한림연구보고서 155

미래 30년을 대비하는 과학기술전략

The Science and Technology Strategy for the Next 30 Years of Korea

인공지능·초고령사회·넥스트 팬데믹

KAST 한국과학기술한림원
The Korean Academy of Science and Technology

발간사

지금 우리는 디지털 대전환과 4차 산업혁명으로 인한 급격한 패러다임의 전환 속에 살고 있습니다. 그 어느 때보다 빠른 속도로 변화하는 사회입니다. 주요 국가들은 심화된 글로벌 패권 경쟁과 과학기술혁신 패러다임에 적극 대응하고 있으며, 세계 도처에서 발생하고 있는 갈등 및 기후변화 위기 등 인류를 위협하는 문제들을 극복하기 위한 난제들을 해결하기 위해서 끊임없는 노력을 기울이고 있습니다. 따라서 과학기술의 역할은 점점 더 중요해질 것이 자명합니다. 미래를 위한 준비와 대응의 과정에서 과학기술을 통한 문제 해결 노력을 지속해서 펼쳐가야 합니다.

현대 인류는 과학기술의 눈부신 발전에 힘입어 보다 건강하고 풍요로운 삶을 영위하게 되었습니다. 그러나 그 이면에는 환경과 에너지 위기, 점차 심화하는 국가 간 빈부격차 등 어두운 면이 공존하고 있습니다. 이러한 현존하는 다양한 글로벌 도전과제들은 물론 새롭게 발생할 잠재적인 문제들에 대해서도 보다 적극적인 예측과 대응의 필요성이 제기되고 있습니다.

이에 한국과학기술한림원(KAST)은 창립 30주년을 맞아 과학기술계 석학들이 모여 앞으로 30여 년간 우리 사회가 당면하게 될 큰 변화와 도전과제가 무엇일지에 대한 고민을 바탕으로, 인공지능의 활용과 공존, 초고령사회에 대한 대비, 넥스트 팬데믹에 대한 대응 등 대표적인 3대 과제를 도출하여, 이들에 대응하기 위한 전략과 과학기술정책의 방향을 제시하고자 본 보고서를 발간하게 되었습니다.

우리 정부에서도 현재뿐만 아니라 점차 가속화될 기술패권 경쟁의 시대에 대비하여 우리나라의 기술주권을 확보하고 국가적 역량을 결집하여 미래의 지속적인 성장동력을 확보하고자 노력하고 있습니다. 2023년 9월에는 「국가전략기술 육성에 관한 특별법」을 제정하였으며, 12월에는 국가과학기술자문회의에서 향후 기술패권을 주도할 12대 국가전략기술과 50개 세부 중점기술을 선정하였습니다. 이들 국가전략기술은 기술패권 경쟁의 시대에서 우리나라의 기술주권 확보에 필요한 핵심기술들이며, 국가적인 역량을 결집하고 도전적, 장기적 투자를 통해 반드시 확보해야 할 기술들입니다.

21세기에 접어들며 가속화된 고령화 문제, 환경문제와 기후변화 위기, 글로벌 빈부격차 등과 같은 거대한 문제들에 대비하기 위하여 주요 국가들은 국가혁신체제를 지속 가능한 체제로 전환하고, 이러한 사회·경제적 문제 해결을 위한 미션지향적 과학기술정책을 추진해 오고 있습니다. 이와 같은 맥락에서 우리나라의 국가전략기술 선정과 육성은 새로운 미션지향적 과학기술정책 시대에 걸맞는 아주 적절한 정책으로 평가받고 있습니다. 그러나 새로운 미션지향적 과학기술정책이 뿌리내리고 더 많은 성과를 창출하기 위해서는 보다 장기적인 관점에서 국가전략기술을 예측하고, 이에 대한 체계적인 육성과 활용이 필요할 것입니다. 이러한 배경 속에서 한국과학기술한림원은 기획·정책위원회를 중심으로 향후 30여 년 동안 우리나라와 전 세계가 개발 및 활용하여야 할 3대 도전과제를 도출하고, 이를 해결하기 위한 세부적 전략기술의 국내외적 개발 동향과 관련 정책에 관해서 연구해 왔습니다.

기획·정책위원회에서 도출한 3대 도전과제인 '인공지능의 활용과 공존', '초고령사회에 대한 대비', '넥스트 팬데믹에 대한 대응'은 향후 30여 년간 우리 사회에 지대한 영향과 파급력을 미칠 것으로 예상되는 이슈입니다. 이들 도전과제는 앞으로 우리 국민의 삶의 질 향상뿐만 아니라, 지속적인 성장동력 발굴을 위해서도 필요하며, 새로이 제기되는 사회적 변화와 이에 따른 갈등을 해결하기 위한 세부적인 전략기술의 개발과 사업화를 위해서도 중요한 과제들입니다. 이 과제들은 우리 사회가 곧 마주하게 될, 그리고 어느 정도 확정된 미래이자 변화에 대한 대응이라고 할 수 있습니다.

이같이 장기적으로 광범위하게 우리 사회에 지대한 영향을 미치는 변화에 효과적으로 대응하기 위해서는, 명확하고 전략적인 목표와 방향성을 설정하여 보다 다양한 이해관계자의 참여가 필요하며, 무엇보다도 정당성과 공감대를 확보한 새로운 미션지향적 과학기술정책이 수립되어야 할 것입니다. 우리나라는 과거 1960년대 이후, 정부의 전폭적인 지원과 정책의 추진에 힘입어 단기간 내에 전 세계에서 유례없는 경제성장을 이루어 냈습니다. 이 과정에서 정부의 미션지향적 과학기술정책이 주요한 역할을 했으며, 이는 우리나라의 교육 수준과 과학기술 인프라 역량 또한 선진국 수준으로 높아지는 성과로 이어졌습니다.

이같은 경험에서 볼 때 향후 새로운 30년의 미래에 대비하기 위해서는 '새로운' 미션지향적인 과학기술정책이 더욱 중요해질 것이며 이를 바탕으로 특히 우리 사회에 큰 영향을 미치게 될 이슈와 도전과제에 선제 대응하고 해결해야 할 것입니다.

우리 정부의 '새로운' 미션지향적 과학기술정책은, 산-학-연-관은 물론 일반 시민 등 사회의 다양한 구성주체와의 폭넓은 수평적, 수직적 숙의 과정을 바탕으로 지속해서 진화하고 학습하는 과학기술정책의 메커니즘을 확립하고, 정부와 민간을 아우르는 통합적인 거버넌스 구조를 구축·운용하며, 기술의 개발을 넘어 이를 확산하고 사업화할 수 있는 산업생태계를 마련해야 할 것입니다. 아울러 과학기술 분야의 국제협력을 강화하고, 국제기구에서의 리더십을 확보하며, 새로운 환경변화에 맞는 창의적 과학기술 인력을 확보하는 등의 다양한 노력을 펼쳐가야 할 것입니다.

무엇보다도 우리 정부는 이와 같은 적극적인 미션지향적 과학기술정책을 바탕으로 본 연구에서 도출한 3대 도전과제를 적극적으로 해결해 나가야 할 것입니다. 보다 세부적으로는, 인공지능 기술의 우위 확보와 함께 기술 이면의 잠재적 문제에 대하여 효율적으로 대응하고, 초고령사회 도래로 인한 사회적 문제와 갈등을 해결하며, 언제 등장하게 될지 모르는 신종감염병의 위협에 대비하는 국가 전체차원의 과학기술 역량 축적이 필요합니다. 이들 3대 도전과제의 해결과 새로운 성장동력 창출은, 우리 국민의 삶의 질을 높이고 지속할 수 있는 미래를 만들어 가는 데 큰 공헌을 할 것입니다.

한국과학기술한림원(KAST) 창립 30주년을 맞아 발간되는 본 보고서에 담긴 과학기술 분야 최고 석학들과 전문가들의 고견이 그 누구도 겪어보지 못한 향후 30여 년의 미래에 대비하여, 우리 대한민국이 지속적인 성장과 발전을 이루어 가는 데 도움이 될 수 있기를 크게 기대하는 바입니다. 본 보고서의 발간을 위해 참여해 주시고 많은 도움을 주신 집필진 석학들과 한림원 운영위원 여러분께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

2024년 11월
한국과학기술한림원 원장
유욱준

CONTENTS

미래 30년을 대비하는 과학기술전략
한림연구보고서 155

THE KOREAN ACADEMY OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

PART 1

서론 008

PART 2

미래를 대비하는 과학기술과 정책 016

1. 서론 019
2. 새로운 과학기술정책의 대두 023
3. 소결 033

PART 3

인공지능의 활용과 공존 040

1. 서론 044
2. 인공지능 기술 및 분야 발전 전망 050
3. AI 기술 발전 전망 및 국내 산업의 새로운 도약 전략 062
4. 생성 AI 시대 산업과 사회 대전환 081
5. 인공지능의 발전과 신뢰성 기술 전망 097
6. 인공지능 시대, 물리학자의 역할 107
7. 인공지능이 불러온 생명과학 연구 혁신 114
8. 공정한 인공지능을 위한 기술과 발전 전망 122
9. 지속 가능한 AI와의 공존을 위한 윤리와 규제 132
10. 소결 149

PART 4

초고령사회에 대한 대비 154

1. 서론 158
2. 삶의 질 향상은 초고령사회 과학기술의 핵심목표 161
3. 초고령사회를 대비한 건강노화 전략과 전망 171
4. 초고령사회에 대비한 치매의 과학기술현황 및 발전 방향 184
5. 초고령사회를 대비한 암관리 정책 200
6. 초고령사회와 디지털헬스 213
7. 초고령사회 대응을 위한 돌봄로봇 기술 223
8. 초고령사회에 필요한 미래 모빌리티의 발전 234
9. 초고령사회와 능동적 노화: 인지적, 사회적 관점 246
10. 소결 257

PART 5

넥스트 팬데믹에 대한 대응 258

1. 서론 262
2. 글로벌 보건 안보를 유지하기 위한 원헬스 접근법 265
3. 인수공통감염병과 종간전파 274
4. 신종 바이러스에 대한 면역학적 대응 286
5. 차세대 바이러스 감염병 백신 전략 298
6. 팬데믹 치료제 개발의 중요성 307
7. 신·변종 바이러스 대응 진단의 중요성 318
8. 넥스트 팬데믹에 대한 대응: 공중보건 328
9. 소결 345

PART 6

결론 348

PART 1

서 론

집필

박태현 이화여자대학교 식품영양학과 특임교수

미래 30년을 대비하는

과학기술전략

한림연구보고서 155

THE KOREAN ACADEMY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

PART 1

서론

현대 과학이 발전하면서, 과학의 발전은 고도의 기술 발전으로 이어지고, 이는 다시 새로운 산업을 창출하면서 사회가 발전해 오고 있다. 산업혁명의 관점에서 바라보면, 증기기관에 기반한 기계화 혁명(1차 산업혁명), 전기에너지에 기반한 대량생산 혁명(2차 산업혁명), 컴퓨터와 인터넷 기반의 정보화 혁명(3차 산업혁명), 인공지능과 융합기술 등에 기반한 초지능 초연결 혁명(4차 산업혁명)으로 이어지는 발전을 이루고 있다. 과학기술의 눈부신 발전에 힘입어 산업이 발전하고, 이로 인하여 인류의 삶이 더 건강하고, 편리하고, 즐거운 방향으로 변모해 왔다. 하지만 이와 더불어 환경 문제, 에너지 문제, 고령화 문제, 새로운 질병 문제 등 인류가 맞닥뜨리고 있는 문제들도 함께 발생하고 있다.

이에 한국과학기술한림원에서는 창립 30주년을 맞이하여, 과학기술의 발전이 가져올 긍정적인 면과 이와 함께 동반될 부정적인 면에 대해 예측하고 대비할 수 있는 방법에 대하여 생각해 보고자 본 보고서를 기획하게 되었다. 이를 위하여 한림원 내의 기획·정책위원회에서 논의를 시작하였다. 기획·정책위원회는 기획·정책 담당 부원장, 정책연구소장 및 5개 학부 학부장으로 구성되었다. 먼저 본 보고서가 담을 주제를 선정하기 위하여, 미래 변화에 대한 과학기술적 대응 및 각 학부의 세부 학문 분야가 모두 포함될 수 있는 주제에 대하여 논의하였다.



이에 기획·정책위원회에서는 과학기술의 거시적 측면에서 앞으로의 30년 동안 우리 사회에 미칠 영향이 가장 클 것으로 여겨지는 3가지 주제인 ① 인공지능의 활용과 공존, ② 초고령사회에 대한 대비, ③ 넥스트 팬데믹에 대한 대응을 대상 분야로 선정하였다. 각 주제에 대하여 본 보고서에 포함할 내용으로는 각 세부 분야의 현재 발전 상황과 미래 발전에 대한 예측뿐만 아니라, 현재 각 주요국들이 해당 분야의 발전을 위하여 수행하고 있는 과학기술정책을 파악하여 기술하고, 이에 대비하여 우리나라가 펼쳐나가야 할 정책 방향도 제시하기로 하였다. 이를 위하여 각 세부 분야별 내용에 앞서 과학기술정책에 대한 포괄적 파트를 통해 국가전략기술의 중요성, 미래 과학기술정책 방향 및 한림원의 역할에 대한 내용을 포함하였으며, 이 파트는 한림원 정책연구소에서 담당하여 집필하기로 하였다.

본 보고서의 발간을 추진하기 위해 정책학부, 이학부, 공학부, 농수산학부, 의약학부가 공동으로 협력하여 '인공지능의 활용과 공존', '초고령사회에 대한 대비', '넥스트 팬데믹에 대한 대응' 등 주제의 집필에 참여할 회원 및 전문가를 섭외하였다. 한림원 회원 및 관련 분야 전문가 등 7~10인 내외로 3가지 주제에 대한 집필진을 구성한 후, 각 분야별 착수회의와 중간점검회의를 통하여 보고서 작성 형식 및 내용을 논의하였다. 논의된 보고서 작성 방법에 의거하여 집필자들은 원고 초안을 작성하였고, 원고 초안에 대한 관련 분야의 전문가 자문 및 검토 의견을 받아서 이를 반영하는 과정을 거쳤으며, 후속 작업으로 편집 및 감수 과정을 거친 후에 최종 보고서를 제작하기에 이르렀다.

인공지능의 활용과 공존

인공지능이라는 개념은 이미 오래전부터 우리의 상상 속에 존재해 왔으며, 영화와 만화 등으로 표현되어 왔다. 2001년에 스티븐 스필버그(Steven Allan Spielberg) 감독의 'AI'라는 제목의 영화가 출시되었는데, 이 영화는 이미 1969년에 출간된 원작 소설인 'Supertoys Last All Summer Long'을 기반으로 제작되었다. 이 영화에서는 감정과 사랑을 느끼는 AI 로봇이 등장하는데, 불치병으로 인하여 치료제가 개발될 때까지 냉동 상태로 보존된 아들을 대신해 준다는 설정을 담고 있다.

영화 속에서 등장하던 AI가 우리 실생활에 적용되어 가장 큰 임팩트를 준 사건은 알파고와 이세돌 간의 바둑 경기가 아닌가 싶다. 우리 모두 이세돌 선수를 응원했지만, 이세돌 선수는 AI에게 단지 한 게임만

을 이기고 1:4로 완패를 당하였다. 마치 인간이 자동차와 100m 경주를 하지 않는 것과 같이, 이제 더 이상 AI와 바둑 대결을 벌이는 사람은 없다. 이제 AI는 인간의 대결 상대가 아니라, 인류가 유용하게 활용해야 할 대상이 되었다. 구글의 CEO인 에릭 슈밋(Eric Emerson Schmidt)은 이세돌과 AI의 대국 전에 한국을 방문하여 누가 이기든 인류의 승리라고 하였다.

우리의 실생활에 가시적으로 다가와 있는 또 하나의 AI는 챗GPT이다. 아마도 많은 사람들이 호기심에 챗GPT를 이미 한 번쯤은 사용해 보았을 것이다. 어느 대학의 총장이 큰 기대 없이 졸업식 축사를 챗GPT에 써보라고 했더니, 매우 그럴듯하게 써내더라는 이야기를 들은 적이 있다. 이제 AI는 소소한 일상의 일에서부터 산업, 의료, 금융, 교육, 연구 등 다양한 분야에서 활용이 가능한 시대가 되었다. AI는 이제 다양한 분야에서 전 세계적으로 중요한 역할을 하고 있으며, AI의 활용을 통해 기술적 우위를 확보하기 위한 각국의 치열한 경쟁이 시작되었다. AI의 기술적 발전과 더불어 등장하고 있는 이슈는 AI 활용에 따른 공정성과 윤리성 문제이다.

'인공지능의 활용과 공존' 파트에서는 AI 기술의 발전 현황과 응용 분야, 각국의 정책 및 투자 전략, 산업 발전을 위한 AI 전략, 우리나라의 AI 역량 및 정책 방향에 대하여 살펴보았고, 또한 AI가 우리 사회에서 지속 가능하게 활용되기 위한 윤리와 규제에 대하여도 기술하였다. 이를 통하여 AI 기술의 현황, 잠재력 및 문제점을 면밀히 파악하여, 다가올 미래에 대한 AI의 효과적 활용 및 이와 함께 급변할 상황에 대비한 방안을 마련하고자 하였다.

초고령사회에 대한 대비

초고령사회에 이미 접어든 일본의 현재는 우리나라도 곧 맞이할 가까운 미래를 보여주고 있다. 일본의 초고령사회를 다룬 SF 영화인 '플랜 75'는 2022년에 처음 개봉되었고, 우리나라에서도 2024년에 개봉된 영화이다. 이 영화에서는 고령인구의 증가로 인한 사회적 부담을 줄이기 위하여 정부가 75세 이상 국민의 죽음을 적극 지원하는 정책인 '플랜 75'를 발표하는 충격적인 내용을 다루고 있다.

유엔 기준에 의하면 전체 인구 중 65세 이상의 연령층이 차지하는 비율에 따라서 고령화 사회, 고령사회, 초고령사회로 분류되는데, 이 중에 고령인구 비율이 가장 높은 초고령사회는 65세 이상의 인구가 20% 이상인 사회를 의미한다. 우리나라는 2024년 7월 기준, 65세 이상의 비중이 19.5%로서 초고령사회가 바로 코앞에 다가온 상황이다. 초고령사회에서는 당사자인 고령자의 신체적, 정신적, 사회적 건강 상태를 유지하는 문제뿐만 아니라, 사회 전체가 부담해야 하는 의료 및 복지비용 지출이 심각해질 것이며 이로 인한 세대 간의 갈등도 심화될 우려가 깊다.

고령화 사회에서 직면하게 될 문제들의 상당 부분이 과학기술의 발전을 통하여 해결할 수 있을 것으로 생각된다. '초고령사회에 대한 대비' 파트에서는 초고령사회를 대비하기 위하여 유용하게 사용될 주요 과학기술들에 대하여 논의하였다. 이들 주요 기술로서 ① 노화를 본질적으로 제어하고 건강한 기능적 장수를 유지할 수 있는 '건강노화 확보 기술', ② 인지기능 장애의 대표적인 질환인 치매를 예방하고 조기에 발견하여 진행을 억제하기 위한 '치매 극복 기술', ③ 의료적 측면에서 사망률에 커다란 영향을 미치는 암을 예방하기 위한 식생활 및 생활습관 개선을 통한 '암 극복 기술', ④ 노화에 따라 저하되는 생체기능을 보완하기 위한 원격 의료, 웨어러블 디바이스, 스마트 약 복용 관리 시스템 등의 개발을 포함하는 '디지털 헬스 기술', ⑤ 고령인의 일상생활을 돌보아 줄 수 있는 소셜 로봇, 안전을 위한 스마트홈 시스템, 온라인 커뮤니티 도입, 낙상 예방 및 활동성 증진을 위한 '돌봄 기술', ⑥ 고령인의 이동성과 편의성을 증진하기 위한 자율주행차, 모빌리티 보조기기 등을 포함하는 '이동성 증진 기술', ⑦ 고령인의 삶의 질에 중요한 요인인 사회적 연계를 위한 거주환경을 확보할 수 있는 '사회연계 확대 기술' 등에 대하여 다루었다.

넥스트 팬데믹에 대한 대응

세계적으로 수억 명이 감염되고 수백만 명이 사망한 코로나19 사태라는 공포와 불안의 상황을 겪으면서, 이에 대한 커다란 경각심을 갖게 되었다. 세계보건기구(World Health Organization, WHO)에서는 코로나19가 발생하기 이전인 2018년에 '미지의 질병'이라는 의미의 'Disease X'라는 개념을 이미 도입하여, 알려지지 않은 감염에 의하여 발생할 수 있는 치명적 질병에 대한 경고를 하였다. 그보다 훨씬 전인 2011년에 개봉된 영화인 '컨테이젼'에서는 마치 코로나19 상황을 보여주는 다큐멘터리 같은 내용을 담고 있어서, 코로나19를 겪으면서 다시금 세계적으로 큰 주목을 받았다.

이 영화는 깜깜한 화면에 여자 주인공의 기침 소리만 들리는 장면으로 시작되고, 그 다음 장면은 기침하는 여자 주인공의 모습이 보이면서 'Day 2'라는 자막이 띄워진다. 여기서 Day 2는 감염 2일째를 의미한다. 그 이후의 영화 장면들은 마치 우리가 겪은 코로나19 상황을 그대로 보고 촬영한 것 같은 상황들이 전개되어 관객들에게 놀라움을 주었다. 이 영화의 마지막 부분에서는 'Day 1'이라는 자막과 함께, 이 여자 주인공이 어떻게 감염되었는지를 보여준다. 숲속에 기거하던 박쥐가 민가의 돼지 사육장으로 날아듦으로써 박쥐에 있던 바이러스가 돼지로 옮겨가고, 이 돼지는 고급 레스토랑에서 요리됨으로써 요리사가 감염되며, 여자 주인공이 이 요리사와 손을 맞잡고 기념사진을 찍으며 감염되는 과정이 Day 1의 장면이다. 이 영화에서는 코로나19 바이러스가 인간에 감염되기까지 현실 세계에서 실제로 일어난 경로와 놀랍

도록 유사한 경로를 보여주고 있다.

신종감염병의 대부분은 이 영화에서 보여주고 있듯이 야생동물이나 가축으로부터 인간에 전파되는 감염병이다. 특히, 반려동물 등과의 접촉이 더욱 밀접해지고 있는 요즈음의 상황에서는 이에 대한 경각심이 더욱 요구된다. '넥스트 팬데믹에 대한 대응' 파트에서는 이와 같은 신종감염병의 위협에 대응하기 위한 진단, 백신, 치료 및 공공 위생 분야에서의 과학적 기술과 정책 개발에 대한 전문가들의 견해와 제안을 기술하였다.

이상에서 기술한 바와 같이 본 보고서는 미래를 대비하는 과학기술정책 및 적절한 정책 수립을 위한 방향에 대하여 기술하였으며, 미래 우리 사회에 미칠 영향이 가장 클 것으로 예상되는 3가지의 과학기술 관련 주제를 제시하였고, 이들 3가지 주제에 대하여 전문가들의 분석 및 그에 기반한 대응책을 제안하였다. 급변하는 상황으로 도래할 미래 사회에 있어서 우리의 삶의 질 향상뿐만 아니라 미래의 경제성장 동력의 발굴을 위하여 본 보고서가 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대하는 바이다.

PART 2

미래를 대비하는 과학기술과 정책

집필

*정선양 건국대학교 기술경영학과 교수

미래 30년을 대비하는
과학기술전략

한림연구보고서 155

THE KOREAN ACADEMY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

PART 2 미래를 대비하는 과학기술과 정책

019 **1 서론**

023 **2 새로운 과학기술정책의 대두**
023 가. 전환이론
025 나. 변혁적 과학기술정책
027 다. 새로운 미션지향적 과학기술정책

033 **3 소결**
033 가. 한림원의 전략기술 도출
035 나. 한림원의 미션지향적 정책자문

PART 2

1 서론

과학기술은 국가경쟁력 제고, 국민 삶의 질 향상, 사회경제적 도전과제의 해결에 있어서 핵심적인 역할을 수행한다. 그 결과 대부분 국가의 정부는 과학기술의 개발, 확산, 활용에 적극적인 노력을 기울여오고 있다. 이른바 적극적인 과학기술정책의 시대가 펼쳐졌다. 대부분 국가는 연구개발 투자를 대폭적으로 증대하고, 과학기술인력의 육성에 국가적 명운을 걸고 노력을 해오고 있다. 그 결과 21세기에 접어들면서 과학기술정책은 대부분 국가의 정책 어젠다에 있어서 핵심적인 위치를 차지하고 있다.

그러나 과학기술자원의 증대가 필연적으로 국가의 발전을 가져오는 것은 아니다. 국가는 과학기술의 전략적 중요성을 충분히 인식하고 과학기술의 효율적 경영을 위해 노력하여야 할 것이다. 이른바 국가 차원의 적극적인 기술경영이 필요하다. 즉, 과학기술 자체가 국가의 발전을 가져오는 것이 아니라 과학기술에 대한 국가 차원의 효율적인 경영이 국가의 부를 창출한 이 같은 배경을 바탕으로 지난 세기 후반 과학기술혁신의 창출, 활용, 확산을 위한 국가 전체의 시스템적 접근 및 노력의 중요성이 크게 대두되었다(정선양, 2018). 국가혁신체제(National Innovation System, NIS)의 구축 및 운용의 중요성이 대두되었으며, 대부



분의 국가는 더욱 효율적인 국가혁신체제의 구축 및 운용을 위해 경쟁하고 있다(Freeman, 1988; Lundvall, 1992; Nelson, 1993; Chung & Lay, 1997; Chung, 1998, 2002). 국가혁신체제의 구축 및 운용은 지난 세기 후반의 과학기술정책의 화두였다.

한편 국가혁신체제 개념의 탄생 초기에는 과학기술을 통한 경제적인 부의 창출에 주안점을 두었으나, 지난 세기 후반 이후 기후위기, 환경위기, 고령사회로의 진입, 국가 간 사회경제발전의 격차 등 사회경제적 거대문제(socio-economic grand challenges)의 대두로 이들 문제의 해결을 위한 포괄적이고도 통합적인 과학기술정책의 추진이 이루어지고 있다(성지은·송위진, 2007; 정선양, 2015a, 2015b; 정선양·정지윤, 2023; Chung, 1996). 일부 학자들은 이와 같은 새로운 과학기술정책을 제3세대 과학기술정책이라고 부른다(Kuhlmann & Rip, 2018; Diercks et al., 2019). 현재는 제3세대 과학기술정책의 시대이다.

이와 같은 새로운 과학기술정책에서 정부의 역할은 더욱 다양화되는 등 중요성이 커지고 있다. 즉, 정부는 과거와 같이 과학기술 전담부처를 중심으로 과학기술정책의 수립 및 집행의 문제에만 관여하는 것이 아니라 다양한 관련 부처가 참여하여 정책의 수립, 집행, 평가 등 전주기에 이르는 다양한 주체의 역할, 기능, 영향을 조정하는 역할을 담당하여야 한다. 실제로 새로운 과학기술정책은 이전의 산학연 혁신 주체의 협력을 촉진하는 것을 넘어서 사회 전체의 관련 당사자들이 과학기술정책의 수립, 집행, 평가, 피드백의 과정에 적극적으로 참여할 것을 강조하고 있는데, 정부는 여기에서 적극적인 조정자의 역할을 담당하여야 한다는 것이다. 이는 정부의 역할 확대로 파악할 수 있으며, 일부 학자들은 이를 새로운 임무지향적 과학기술정책(new mission-oriented S&T policy)이라고 부른다(Mazzucato, 2018; OECD, 2021).

최근 들어, 많은 국가들이 새로운 임무지향적 과학기술정책을 추진하는 과정에서 국가의 미래 경제발전 및 국민 삶의 질 향상에 필요한 전략기술(strategic technologies)의 개발, 도출, 활용에 많은 노력을 기울이고 있다(Mazzucato, 2018). 과거의 전략기술이 이들 기술을 통한 단기적인 경제발전을 지향하였던 데 비하여, 최근의 전략기술은 새로운 과학기술정책과 확대된 정부의 역할을 반영하여 중장기적인 측면에서 경제발전은 물론 국민 삶의 질 향상과 사회경제적 도전과제의 해결에 주안점을 두고 있다.

우리나라 현 정부는 2023년 9월 「국가전략기술 육성에 관한 특별법」을 제정하고 12월 국가과학기술자문회의에서 기술패권을 주도할 12대 국가전략기술 및 50개 중점기술을 선정하여 개발 및 활용에 노력을 기울이고 있다(<표 2.1>). 이 기술들은 현재의 그리고 앞으로 가속화될 기술패권 경쟁의 시대에 우리나라의 기술주권 확보에 필요한 핵심·신흥기술로서 국가적 역량을 결집하고 도전적 투자를 통해 반드시 확보하여야 할 기술을 의미한다(국가과학기술자문회의, 2023).

12대 국가전략기술 및 50개 중점기술은 최근 심화되고 있는 글로벌 기술패권 경쟁을 주도할 기술들로서, 정부가 향후 중점적으로 개발 및 상용화할 기술들이며, 경쟁력 확보를 통해 중단기적으로 사업화

하여 새로운 미래산업을 창출할 수 있는 중요한 기술 분야를 망라하고 있다. 이러한 점에서 장기적으로 국가의 미래를 이끌어갈 기술 분야는 아니다. 여기에 국가의 장기적 미래 경쟁력을 가져다 줄 기술 분야의 도출과 체계적으로 육성할 미래지향적 과학기술정책의 필요성이 강조된다.

표 2.1 현 정부의 기술패권 경쟁을 주도할 12대 국가전략기술

12대 전략기술	50개 중점기술
반도체·디스플레이	고집적·저항기반 메모리
	고성능·저전력 인공지능 반도체
	전력반도체
	반도체 첨단패키징
	차세대 고성능 센서
	프리폼 디스플레이
	무기발광 디스플레이
	반도체·디스플레이 소재·부품·장비
이차전지	리튬이온전지 및 핵심소재
	차세대 이차전지 소재·셀
	이차전지 모듈·시스템
	이차전지 재사용·재활용
첨단 모빌리티	자율주행시스템
	도심항공교통(Urban Air Mobility, UAM)
	전기·수소차
차세대 원자력	소형모듈형원자로 (Small Modular Reactor, SMR)
	선진원자력시스템·폐기물관리
첨단 바이오	합성생물학
	유전자·세포치료
	감염병 백신·치료
	디지털헬스 데이터 분석·활용
우주 항공해양	대형 다단연소사이클 엔진
	우주관측·센싱
	달착륙·표면탐사
	첨단 항공가스터빈 엔진부품
	해양자원 탐사
수소	수전해 수소생산
	수소 저장·운송
	수소연료전지 및 발전
사이버 보안	데이터·AI 보안
	디지털 취약점 분석·대응(공급망 보안)
	네트워크·클라우드 보안
	산업·가상융합 보안
인공지능	효율적 학습 및 AI 인프라(SW/HW) 고도화
	첨단 AI 모델링·의사결정(인지·판단·추론)
	산업 활용·혁신 AI
	안전·신뢰 AI
차세대 통신	5G 고도화(5G-Adv)
	6G
	오픈랜(Open-RAN)
	고효율 5G·6G 통신부품
	5G·6G 위성통신
첨단 로봇·제조	로봇 정밀제어·구동 부품·SW
	로봇 자율이동
	고난도 자율조작
	인간-로봇 상호작용
	가상 제조
양자	양자컴퓨팅
	양자통신
	양자센싱

출처: 국가과학기술자문회의(2023).

이와 같은 배경 속에서 2024년으로 창립 30주년을 맞는 한국과학기술한림원은 이들 중단기적인 국가전략기술에 더불어 향후 30여 년 뒤의 장기적 기술패권을 가져다줄 것으로 예상하는 기술을 도출하고 관련 전략과 정책을 제시할 당위성이 있는 것이다. 이를 위하여 2장에서는 이 같은 국가전략기술의 개발 및 사회적 문제 해결을 위한 새로운 과학기술정책, 특히 새로운 미션지향적 과학기술정책의 대두에 관하여 논하고, 새로운 정책 환경과 향후 30여 년을 대비하는 국가전략기술 도출 및 개발과 이를 위한 새로운 미션지향적 과학기술정책에 있어서 한림원의 역할을 살펴보고자 한다.

PART 2

2 새로운 과학기술정책의 대두

국가와 사회의 발전에 있어 과학기술의 중요성이 점차 증가함에 따라, 정부의 과학기술에 대한 개입이 보편화되었고, 이는 과학기술정책의 진화를 가져왔다. 실제로 과학기술의 중요성은 지난 세기 초반 조지프 슘페터(Joseph Schumpeter)에 의해 최초로 주장되었고, 이 점에서 과학기술정책의 시작은 1911년 슘페터가 독일어로 발간한 「경제발전의 이론(Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung)」이라고 할 수 있을 것이다(정선양(역), 2021(원저 Schumpeter, 1911)). 이 시기 이후 일부 신고전파 경제학자들도 과학기술에 대한 정부개입의 중요성을 간헐적으로 주장하였고(Solow, 1957; Schmookler, 1966), 1970년대에 들어서면서 슘페터의 이론을 추종하는 신슘페터주의자에 의해 과학기술에 대한 시스템적 접근의 강조로 인하여 국가혁신체제론(National Innovation System, NIS)이 탄생하였다(Freeman, 1988; Lundvall, 1988; Nelson, 1993). 이 시기까지의 과학기술정책은 과학기술을 통한 국가 경제의 발전에 주안점을 두고 사회적, 환경적, 글로벌 문제의 해결은 등한시하였다는 특징을 가지고 있다(정선양·정지윤, 2023).

그러나 21세기에 접어들면서 고령화, 환경위기, 글로벌 빈부격차 등 거대한 도전과제들이 등장하면서 국가혁신체제의 지속 가능한 체제로의 전환과 사회경제적 도전과제 해결을 위한 새로운 미션지향적 정책이 적극적으로 추진되고 있다. 이 새로운 과학기술정책에서는 국가의 더 포괄적이고 적극적인 개입을 강조하고 있다. 아래에는 이와 같은 2000년대 이후의 새로운 과학기술정책의 발전과 정부의 역할을 살펴보기로 한다.

가 전환이론

2000년대에 접어들면서 급격한 산업화, 인구 증가, 이동 수단의 발달 등으로 인해 발생하고 있는 전 지구적 환경 문제에 대한 해결 방안 및 보다 더 폭넓은 관점에서의 지속 가능한 발전을 위한 과학기술의 역할에 기대가 높아지고 있다. 특히 1997년 교토의정서, 2015년 파리기후협약의 체결 및 시행으로 인하여 기후변화 대응 및 환경 문제의 해결은 전 세계적으로 사회경제 발전의 필수불가결한 요소로 인식되어 오고 있다.

이 같은 배경 속에서 그동안 국민경제의 발전과 기업의 기술혁신능력 확보·유지·발전에 주안점을 둔 과학기술정책 및 혁신연구는 그동안 경제발전에 주안점을 두어온 사회기술체제(socio-technological system), 즉 혁신체제의 지속 가능성을 어떻게 확보하는가의 문제와 기존의 체제를 어떻게 지속 가능하게 변환할 것인가의 문제에 주안점을 두고 논의되고 있다. 이와 같은 변환을 전환이라고 부르며, 이와 같은 전환의 과정을 논의하는 학문을 전환이론(transition study)이라고 부른다. 특히 많은 연구가 이와 같은 전환을 위한 이론적, 실무적 기법으로서 전략적 니치관리(Strategic Niche Management, SNM)를 적용하고 있다. 이들 혁신체제의 전환은 1990년대 초반의 일부 연구자들에 의해 제기된 과학기술정책의 포괄성에 대한 강조에서 비롯한다.

그동안 과학기술정책은 과학기술이 경제발전에 미치는 긍정적인 효과에만 주안점을 두어왔다. 그러나 유럽을 중심으로 일부 학자는 과학기술 및 기술혁신이 이와 같은 긍정적 효과는 물론 부정적 효과가 있음에 주목하였는데, 특히 이들은 과학기술의 발전이 환경 문제의 근본적인 원인이라는 점에 주목하고 이를 해결하려는 방안을 제시하기 위해 노력하고 있다. Grey(1989)는 기술혁신이 창출하는 긍정적 효과와 부정적 효과를 '기술개발의 모순(paradox of technological development)'이라고 명명하고, 이들 두 모순적 효과의 동시적 해결에 기술혁신이 필요함을 강조하였다. Kemp & Soete(1992)는 사회가 기술진보에 의해 영향을 받을수록 이로 인한 부정적 효과인 환경 문제의 범위와 정도가 점점 더 커진다고 강조하고 있다. Ayres(1989)는 과학기술의 다른 부정적 영향과 환경 문제는 작은 효과의 누적으로 발생하여 결국 생태계가 지탱할 수 있는 한계를 넘어서는 진화론적 특징을 가지고 있음을 강조하고 있다.

Kemp & Soete(1992)는 기술진보의 모순된 효과를 정적 외부효과와 동적 외부효과로 설명하고 있다. 정적 외부효과(static externalities)는 기술혁신이 폭넓은 인구에 혜택을 주지만 부정적 효과는 제한된 집단의 인구에게만 영향을 미치며, 이는 단기적 현상이라는 점에서 단기적 외부효과로 부른다. 그러나 동적 외부효과(dynamic externalities)는 장기적 측면에서 환경 폐해의 누적으로 파악하며, 이 같은 폐해는 과거의 제도적 구성이 제대로 대응하지 못하여 발생한 것으로 이해한다. 이는 환경 문제를 장기적, 진화론적으로 파악한다는 점에서 장기적 혹은 진화론적 외부효과라고 부른다. 이들은 현재의 환경 문제가 기존의 경제성장 경로의 한계를 알려주는 것이기에 이를 해결할 새로운 기술-경제 패러다임(new techno-economic paradigm)이 필요함을 강조하였다.

한편 1990년대 초반 경제정책 분야에서도 포괄성을 강조하는 논의가 시작되었다. Majer(1992)는 경제정책의 패러다임이 양적 성장(quantitative growth)에서 질적 성장(qualitative growth)으로 변환되어야 함을 강조하면서, 경제정책은 경제적 책무성, 환경적 책무성, 사회적 책무성, 국제적 책무성 등 네 개의 함수를 포괄적으로 충족하여야 함을 강조하였다. 기술혁신이론의 대가이면서 국가혁신체제의 개념을 창조한 Freeman(1992)은 앞으로 다가올 새로운 기술경제체제는 ① 많은 제품과 서비스의 대단한 원가감소, ② 많은 제품과 서비스의 기술적 특성의 대단한 진보, ③ 기술의 사회적, 정치적 수용성의 필요, ④ 환경적 수용성의 필요, ⑤ 경제체제 전체에 대한 폭넓은 영향의 특징 등을 가질 것이라고 주장하며 이러한 특징을 감안하여 체제를 준비해야 우리의 미래는 낙관적이고 희망이 있다고 웅변하였다.

이와 같은 배경 속에서 전환이론 분야의 연구자들은 지속 가능한 기술(sustainable technologies)이 어떻게 기존의 사회기술체제 속에서 생존, 발전, 공진할 수 있을 것인가에 주안점을 두고 있다. 그동안 유럽 국가들을 중심으로 이 같은 시스템 전환(system transition)에 관한 많은 이론적, 실증적 논의가 이루어져 왔다(예를 들어, Schot et al., 1994; Geels, 2002; Elzen et al., 2004; Geels & Schot, 2007; Wells & Nieuwenhuis, 2012).

한편 이 같은 전환이론의 대표적 연구 분야 중 하나는 어떻게 혁신체제를 전환할 것인가를 다루는 전략적 니치관리이다. 여기에서 전환은 사회기술체제, 즉 혁신체제의 지속 가능한 발전을 목표로 하고 있다. 전략적 니치관리는 새롭게 대두되는 지속 가능한 기술이 급진적 혁신을 창출하고 견고한 시스템 및 산업으로 발전하도록 실험을 할 수 있는 보호 영역(protective areas)이 필요하다는 점을 강조한다. 그리하여 새롭고 급진적 기술을 개발하기 위한 니치형성(niche formation)과 이의 발전과정이 필요함을 강조한다. 그동안 전환이론 분야의 학자들은 이 같은 전략적 니치관리에 관한 이론적, 실증적 연구를 활발히 수행해 오고 있다(예를 들어, Kemp et al., 1998, 2001; Schot & Geels, 2008; Dijk et al., 2013; 황두희·정선양, 2019).

나 변혁적 과학기술정책

최근 들어 전환이론 분야의 일부 학자들은 그동안 새로운 과학기술정책으로서 과학기술혁신정책의 획기적 전환을 강조하고 있는데, 이것이 이른바 '변혁적 혁신정책(transformative S&T policy)'이다(대표적으로, Kuhlmann & Rip, 2018; Schot & Steinmueller, 2018; Diercks et al., 2019). 이 새로운 조류의 과학기술혁신정책은 기술혁신의 과정을 폭넓게 이해하여 전술한 혁신체제의 전환을 정책적으로 반영하고 그동안 혁신정책의 경제발전 목표를 확장하여 사회적, 환경적 목표로 포함·수용한 것으로 이해할 수 있다. 이 같은 혁신정책은 최근 들어서 심각하게 대두된 전 지구적 기후변화, 불평등, 건강노화 등 이른바 거대한 도전(grand challenges)의 상황에 직면하여 이에 대한 해결방안으로 대두되었다.

대표적으로 Diercks et al.(2019)은 과학기술혁신정책이 제2차 세계대전 이후의 전통적인 '과학기술정책(S&T policy)'에서 1980년대 중반 이후의 '혁신체제정책(innovation system policy)'을 거쳐 현재 새롭게 대두되는 '변혁적 혁신정책(transformative innovation policy)'으로 이어져 오고 있으며, 이들 세 정책 유형은 서로 대체적인 것이 아니라 그동안의 정책을 바탕으로 지식과 개념이 축적되어 온 것이라고 주장하였다. 이들은 세 유형의 정책을 정책 어젠다(policy agenda)와 혁신과정(innovation process)의 이해라는 두 가지 차

원으로 비교분석을 하고 있는데, 정책 어젠다의 관점에서 전통적 과학기술정책과 혁신체제정책은 경제적 어젠다에 주안점을 두고 기술혁신의 긍정적 측면에만 집중하였으나, 변혁적 혁신정책에서는 경제적 어젠다뿐만 아니라 사회적, 환경적 등 포괄적 어젠다를 다루고 있음을 강조하였다. 기술혁신과정에 대한 이해의 관점에서는 전통적 과학기술정책의 혁신과정을 아주 좁게 해석하여 과학기술의 사업화로 이해하고 혁신과정의 공급 측면을 중시하였고, 혁신체제정책에서는 혁신이 창출되는 환경을 제공하는 조직과 제도의 복잡한 네트워크, 수요자-공급자 간의 상호작용적 학습을 강조하며 혁신과정의 공급 측면과 아울러 수요 측면 모두에 주안점을 두었으며, 변혁적 혁신정책에서는 혁신과정을 매우 폭넓게 이해하여 기술혁신의 직접적 주체는 물론 사회의 다양한 주체 간의 참여와 협력의 과정으로 간주하고 혁신체제의 변혁, 즉 사회-기술적 전환(socio-technical transition)을 추구한다고 주장하였다.

유사한 논의로 Schot & Steinmueller(2018)는 그동안의 과학기술혁신정책이 지속적인 '프레이밍(framing)'에 의해 구축·발전하여 왔다고 강조하고, 과학기술정책이 제2차 세계대전 이후 세 번에 걸친 프레임을 경험해 오고 있다고 주장하였다. 제1차 프레임은 제2차 세계대전 이후 대두된 프레임으로서 경제성장을 위한 기술혁신을 지향하여 과학과 연구개발(R&D)에 대한 정부 지원의 제도화에 주안점을 두었고, 1980년대 세계화의 시기에 대두된 제2차 프레임은 국가혁신체제의 구축 및 운용을 지향하여 시스템 내부의 혁신 주체들 간의 연계 및 학습에 집중하였으며, 현재 대두된 제3차 프레임은 변혁적 변화(transformative change)를 지향하며 보다 근본적 차원에서 과학기술을 통한 지속 가능하고 포용적인 사회의 구현에 주안점을 두고 있음을 강조하였다.

이처럼 새롭게 대두된 변혁적 혁신정책은 경제적, 사회적, 환경적 목표를 동시에 추구한다는 점에서 포괄적 과학기술정책으로 파악할 수 있다. 아울러 일부 학자는 국가의 새로운 과학기술정책이 새롭게 대두되고 있는 거대한 도전적 과제를 해결하여야 한다는 점에서 1980년대 후반 강조되었던 미션지향적 기술정책을 잇는 '새로운' 미션지향적 혁신정책이라고 강조하고 있다(Mazzucato, 2018; OECD, 2021). 그럼에도 새로운 혁신정책에서 Majer(1992)와 Chung(1998)이 주장한 '국제적 책무성'이 포함되지 않은 것은 아직도 정책의 포괄성은 충분하지 않은 것으로 이해할 수 있다. 특히 작금의 세계화 시대의 기후변화 등 환경 문제, 전 지구적 불균등한 경제발전의 문제 등은 글로벌 협력과 연계를 통해 해결 가능하다는 점에서 국제적 책무성은 향후 새로운 혁신정책에 중요한 목표와 어젠다로 포함되어야 할 것이다.

다 새로운 미션지향적 과학기술정책

1) 미션지향적 과학기술정책의 개념과 특징

미션지향적 과학기술정책(mission-oriented S&T policy)은 과학기술정책의 여명기인 1980년대에 대두되었다. 이 시기에는 미국, 프랑스 등 일부 국가를 중심으로 환경위기에 대응하는 문제, 인류를 달에 보내는 미션의 완수에 주안점이 모아졌다(Ergas, 1987; Chiang, 1991). 특히 Chiang(1991)은 이 시기의 선진국 과학기술정책을 분석하고, 미국, 프랑스와 같은 국가들은 미션지향적 과학기술정책을 추진하며, 일본, 독일 등의 국가는 확산지향적 과학기술정책을 추진한다고 분류하기도 하였다. 이는 앞에서 논의된 바와 같이 1990년대 불어 닥친 국가혁신체제론의 논의에 밀려 한동안 등한시되다 최근 들어 새롭게 조명을 받고 있다. 아래에는 최근에 중요하게 대두된 새로운 미션지향적 과학기술정책에 관해 살펴보기로 한다.

OECD(2021)는 전 세계적인 사회적 도전과제 증가의 환경 속에서 많은 국가가 전통적 과학기술정책이 문제해결의 방향성 부족, 국가 전체적 측면에서의 조정 능력의 부족, 정책적 혼합(policy mix)의 파편화 등의 한계가 있음을 인식하고 다양한 형태의 시스템적 개입을 실험(experimenting)하고 있다고 강조하며, 이것을 미션지향적 과학기술정책(mission-oriented S&T policies)이라고 명명하였다. 그리하여 이 기구는 미션지향적 과학기술정책을 사회적 도전과 관련된 잘 정의된 목표를 시간적 범위 내에 해결하기 위하여 과학기술을 동원하기 위한 특별히 맞춤화되고 조정된 정책과 규제수단의 패키지로 정의한다. 이 정책은 다양한 정책분야, 산업부문, 분과학을 가로지르는 특징을 가지고 있고, 구체적인 정책수단은 연구개발로부터 시장도입에 이르는 혁신과정의 다양한 단계를 포괄하고 정부 주도의 공급 측면의 투입 수단과 수요측면의 시장견인 수단을 포괄하여 활용되고 있다.

OECD는 미션지향적 과학기술정책의 특징을 '전략적 지향', '정책의 조정', '정책의 집행' 등 세 가지 차원으로 제시하고 있다(<표 2.2>). 이 특징들은 미션지향적 과학기술정책의 '설계원칙(design principles)'으로서, 정책 수립 및 조정, 집행에 이르는 일련의 과정에서 반드시 고려되어야 할 요소로 강조되고 있다.

먼저, 전략적 지향(strategic orientation)은 미션지향적 과학기술정책이 다양한 이해관계자의 컨센서스(consensus) 확보를 위한 정당성, 수요에 기반한 명확한 목표와 지침, 그리고 정책 집행에 대한 목표 및 수단의 변경 가능성이 있어야 함을 의미한다.

둘째, 정책의 조정(policy coordination)과 관련하여, 이 유형의 과학기술정책은 다양한 계층의 정책결정의 주체들과 범부처적인 참여가 필수적이라는 점에서 다양한 관련 부처 간의 수평적 정책조정은 물론 정책의 최고 의사결정자로부터 아래로의 다양한 주체들 간의 수직적 정책조정이 동시에 이루어져야 하

고 관련 정책결정 주체들의 집합적 의사결정으로 인하여 강력한 정부개입이 이루어져야 하며, 포트폴리오 접근방법 등을 통하여 새롭고 다양한 해결책이 실험되어야 할 것을 강조한다. 마지막으로 정책의 집행(policy implementation)과 관련해서는 연구개발에서 사업화에 이르는 기술혁신주기를 모두 포괄하는 다양한 정책수단이 복합적으로 활용되어야 하며, 본 정책에 참여하는 공공 및 민간부문 이해관계자들의 적극적인 투자가 이루어져야 하고 다양한 지표에 의한 정책의 집행 및 결과에 대한 체계적인 평가와 학습이 필요하며, 평가결과는 정책 관련 의사결정에 적극적으로 반영되어야 할 것을 강조한다.

표 2.2 OECD가 제시하는 미션지향적 과학기술정책의 특징

차원	주요업무	특징
전략적 지향	특정한 사회적 도전의 공지와 선택 그리고 명확하고 정확한 목적에 대한 집중된 정책개입의 정당성 강화	• **정당성(legitimacy)**: 미션의 필요성에 관하여 폭넓은 집단의 이해관계자들(일반시민 포함)의 컨센서스를 확보
		• **방향성(directionality)**: 미션에 공식화된 명확하고도 정통한 지향성과 전략적 지침에 의해 정책이 유도됨
		• **의도성(intentionality)**: 미션으로부터 특정하고도 잘 표현된 수요기반의 목표가(명확한 시간표와 마일스톤(milestone)을 가지고) 도출됨
		• **유연성(flexibility)**: 목표와 이를 달성할 정부개입의 수단이 정책의 집행과정에서 수정될 수 있음
정책의 조정	정책에 관계된 다양한 기관들의 전략과 활동의 조정	• **수평성(horizontality)**: 다양한 정책영역을 포괄하는 정책주체의 계획과 활동이 미션을 달성하기 위하여 조정됨
		• **수직성(verticality)**: 정부의 다양한 차원의 정책주체의 계획과 활동이 미션을 달성하기 위하여 조정됨
		• **강렬함(intensity)**: 정부개입(목표, 방법, 자원의 수준)에 관한 의사결정이 관련 정책주체에 의해 집합적으로 이루어지고 구속함
		• **참신성(novelty)**: 미션을 달성하기 위한 다양한 대체적 해결책을 포괄하고 실험하기 위하여 다양한 정책주체와 이해관계자들의 계획과 활동이 조정됨 (예를 들어, 포트폴리오 접근방법 등)
정책의 집행	정책목적을 달성하기 위하여 동원된 정책개입의 방법과 공공 및 민간 파트너들의 자원의 일관성과 효과성의 보증	• **정책혼합의 일관성(policy mix consistency)**: 미션을 달성하는 데 필요하기에, 정책은 (혁신주기를 넘어서) 다양한 분과학, 부문, 영역, 시장을 지원하기 위한 다양하고도 일관된 정책개입(기술적, 재정적, 규제적 개입 등)의 집합을 포괄함
		• **자금성(fundability)**: 계획(혁신과정의 단계, 부문, 시장 등)의 다양한 측면에 관계된 공공 및 민간 이해관계자들은 미션의 달성을 위하여 자원을 동원함
		• **평가성(evaluability)**: 정책은 결과를 평가하고 지속적 개선의 측면에서 집행으로부터 학습하기 위하여, 처음부터 투입 및 산출 지표 그리고 시스템적 측면의 평가절차를 보유하고 있음
		• **반사성(reflexivity)**: 미션을 달성하는 데 필요하기에, 평가와 모니터링 결과는 정책 관련 의사결정에 영향을 미치고 계획을 개선(예를 들어, 목표의 수정, 거버넌스와 운영절차의 개정)하는 데 사용됨

출처: OECD(2021).

또한 Mazzuato(2018)는 기술혁신은 혁신율은 물론 방향성을 가지고 있다고 강조하며, 21세기는 사회적, 환경적, 경제적 주요 도전과제, 이른바 거대한 도전과제에 적극적으로 대응할 필요성이 점점 증가하고 있으며, 이를 위한 정책을 새로운 미션지향적 과학기술정책이라고 정의하였다. 이 새로운 정책은 전통적인 미션지향적 과학기술정책과는 다르게 다양한 수행 주체(actors) 및 방식의 협력이 필요하며, 이 정책이 성공하기 위해서는 하부로부터의 실험과 학습이 필요하다고 강조하였다. 그는 새로운 정책의 특징을 국방, 원자력, 항공우주 분야의 전통적인 미션지향적 정책과 비교하여 세부적으로 나타내고 있다(<표 2.3>). 새로운 미션지향적 과학기술정책은 연구결과의 광범한 확산을 목표로 하고, 미션이 특정 부문의 문제를 기술적으로는 물론 경제적으로 해결할 수 있으며, 기술혁신이 정부, 기업, 소비자집단 등 다양한 주체에 의해 영향을 받고, 정책의 집행과 관리에 있어서도 다양한 주체의 참여가 필요하다고 주장하였다. 또한, 가능한 많은 수의 기업이 참여하여 급진적 혁신은 물론 점진적 혁신을 창출하고 있으며, 다른 정책들과의 보완 및 연계, 정책의 지속성과 일관성이 매우 필요하다고 주장하였다.

한편 Mazzucato(2018)는 일련의 미션지향적 과학기술정책의 연구를 바탕으로 성공적인 정책을 위하여 다음과 같은 시사점을 제시하고 있다. 이 시사점은 새로운 미션지향적 과학기술정책의 수립에 있어서 새로운 시각을 제공해 준다.

승자선택(picking winners)에서 의지선택(picking the willing)으로

새로운 과학기술정책은 사회 전체의 변환을 추구한다는 점에서 전통적인 개별적 기업 혹은 산업부문을 선정하는 것이 아니라 경제 전체를 가로지르는 다양한 주체들이 사회적으로 적합한 미션에 참여하게 하는 의지를 선택하여야 한다. 이는 전통적인 '수직적 정책'뿐만 아니라 다양한 산업부문을 넘어서는 '수평적 정책'을 추진하여야 한다는 것을 의미한다.

시장의 고착(fixing markets)에서 적극적인 공동창출(actively co-shaping)로

미션은 기존 시장에 고착하는 것이 아니라 새로운 시장을 창출하는 것이다. 즉, 새로운 정책은 기존 주체들의 역할과 기능은 그대로 유지하고 새로운 미션을 해결하여 새로운 시장을 창출하는 데 주안점을 둔다. 전통적인 과학기술정책이 국가가 시장을 고착화하는 역할에 그쳤다면, 새로운 정책에서는 새로운 시장 창출에 있어서 시장이 선도하고 기업이 뒤따라야 한다. 이 정책에서 공공조직은 부를 분배하기보다는 부를 창출하기 위해 시장과 시스템을 적극적으로 구축, 창출하는 책임이 있다. 이 점에서 Mazzucato(2018)는 전통적인 과학기술정책의 근거인 공공재(public goods)라는 개념보다 새로운 정책의 미션이 산업부문의 가치사슬 전반의 변환을 추구한다는 점에서 공공가치(public value)의 개념이 더욱 적합하다고 주장한다.

표 2.3 새로운 미션지향적 과학기술정책의 특징

과거의 미션지향적 과학기술정책 (예: 국방, 원자력, 항공우주 정책)	새로운 미션지향적 과학기술정책 (예: 환경 및 사회적 도전 해결 정책)
• 연구결과의 핵심 참가자 이외로 확산은 중요하지 않거나 적극적으로 금지함	• 연구결과의 확산이 핵심적인 목표이며 적극적으로 권고됨
• 미션이 경제적 타당성의 고려 없이 일련의 기술적 성과에 의해 정의됨	• 미션은 특정한 부문의 문제에 대한 경제적으로 타당한 기술적 해결책으로 정의됨
• 기술개발의 목적과 방향이 적은 수의 전문가에 의해 사전적으로 정의됨	• 기술변화의 방향이 정부, 민간기업, 소비자집단 등을 포함한 다양한 범위의 주체에 의해 영향을 받음
• 정부 내에서 집중적인 통제	• 많은 관계자에 의한 분권적 통제
• 적은 수의 급진적 혁신에 대한 강조로 인하여 적은 수의 기업만 제한적 참가	• 많은 수의 기업 참가를 허용할 수 있는 급진적 혁신과 점진적 혁신의 개발을 동시에 강조
• 보완적 정책이 필요 없고 자족적 프로젝트와 일관성에 대한 고려가 없음	• 보완적 정책이 성공에 핵심적이고 다른 목표들과 일관성에 세심한 주의가 필요

출처: Mazzucato(2018).

실패에 대한 두려움(fearing failure)에서 실험의 환영(welcoming experimentation)으로

체계적인 미션지향적 과학기술정책은 명료한 진단과 예측에 기반되어야 한다. 아울러 국가혁신체제의 취약점, 예를 들어 연계의 부족, 실패, 병목 등의 도출뿐만 아니라 체제의 장점에 대한 인식이 필요하다. 그리하여 이 새로운 정책은 미션지향적 정책의 과거 경험으로부터 학습하여야 한다. 특히 다양한 주체의 탐험능력(explorative capacity)을 필요로 한다.

참여(engagement)

새로운 정책에서는 미션의 정의가 넓은 이해관계자에게 어떻게 개방될 수 있는가가 핵심이다. 즉, 미션이 정의되고 목표로 하는 바가 민주적 절차에 의해 다양한 주체들에게 확산되어야 하며, 공공가치는 공공부문만의 업무로 달성될 수 없기 때문에 다양한 이해관계자를 포함해야 가능하다.

위험감소(de-risking)에서 위험과 보상의 공유(sharing both risks and rewards)로

미션은 특정한 분야에 대한 집중적 투자가 필요하며, 이들 투자는 반드시 성공하는 것은 아니다. 이 점에서 미션의 달성을 위한 공공자금을 공적인 벤처케피탈의 형태로 간주하여 투자로부터 수익도 창출하여 재투자할 방안을 마련하여야 한다. 즉, 미션의 달성에 있어서 무조건적 위험회피보다는 위험과 수익을 모두 공유하는 방안을 마련하여야 할 것이다.

OECD(2021)는 여러 나라의 미션지향적 과학기술정책의 실제 사례를 분석한 결과 전략적 지향, 정책의 조정, 정책의 집행 세 측면에서 합리적인 정책을 위한 다음과 같은 정책적 시사점을 제시하고 있다.

① 대부분의 미션지향적 과학기술정책은 문제의 도출에 주안점을 두는 반면에 해결책의 도출에는 등한시하고 있다.

② 일반적으로 미션은 정책 프로그램의 시작 단계에 설정되는 것이 아니라 아주 점진적이고 포용적인 과정을 통하여 도출된다.

③ 대부분의 미션지향적 정책은 과학기술적 목표뿐만 아니라 사회적, 경제적 목표를 혼합하고 있다.

④ 모든 미션지향적 과학기술정책은 '중첩된(nested)' 범부처적, 범기구적 거버넌스 구조와 같은 다양한 차원의 정교한 거버넌스를 통해 관리된다.

⑤ 미션지향적 정책 내에서 포트폴리오 접근방법(portfolio approach)이 추천되며, 이는 주어진 도전과제에 대한 다양한 대안의 조정된 실험과 탐험을 가능하게 한다.

⑥ 현재까지는 미션지향적 과학기술정책에 대한 평가가 거의 이루어지고 있지 않으며, 대부분의 평가는 전통적인 비체계적 평가방법에 의존하고 있다.

⑦ 대부분 국가의 미션지향적 과학기술정책은 해당 국가의 이전 정책에 기초하고 있으며, 이들 정책은 기존 정책을 보다 목표지향적으로 하고 효율적으로 조정하기 위한 노력의 결과로 점진적인 과정에 의해 추진된다.

⑧ 미션지향적 정책은 상당한 부분 국가의 제도적 구성의 특징에 의해 영향을 받기 때문에 이들 정책은 점진적이고, 실험적이며, 국가 특정적 과정의 산물이다.

⑨ 미션지향적 과학기술정책을 실험하는 많은 나라는 이들 정책을 확장하고 보다 넓은 전략적, 정책적 틀 속에 통합하는 데 어려움을 겪고 있으며, 그리하여 이 새로운 정책이 성공하기 위해서는 이들 실험으로부터 학습하여 새로운 정책 프로그램에 반영하는 것은 물론 상층부의 정치적 참여와 후원이 필요하다.

이상의 미션지향적 과학기술정책의 구성요소 및 특징에 관한 논의를 요약하면 정책의 수립, 집행, 평가에 있어서 다양한 요소를 고려하여야 함을 나타낸다. <표 2.4>는 전술한 OECD(2021)와 Mazzucato(2018)의 논의를 종합, 분석하여 우리나라에 익숙한 과학기술정책의 모델, 즉 정책의 수립, 정책의 집행, 정책의 평가 측면에서 핵심적인 10대 고려요인을 요약하여 나타내고 있다. 먼저, 정책의 수립(policy formulation)과 관련하여 국가가 우리가 당면한 사회경제적 도전과제를 해결할 의지가 있는가의 문제, 정책의 수립에 있어서 범부처적인 컨센서스는 물론 다양한 이해관계자의 컨센서스를 모았는가, 아울러 미션이 지향하는 명확한 목표와 구체적 마일스톤이 있는가를 검토하여야 할 것이다.

표 2.4 우리나라 미션지향적 과학기술정책의 고려요인

차원	고려요인
정책의 수립	1. 사회경제적 도전과제 해결을 위한 강력한 의지와 이를 정책으로 실행할 의지가 있는가?
	2. 미션과 정책적 목표의 도출에 있어서 다양한 부처와 이해관계자들의 컨센서스를 확보하였는가?
	3. 미션이 지향하는 명확한 목표와 지향성, 구체적인 마일스톤이 설정되었는가?
정책의 집행	1. 정책의 집행에 있어서 관련 부처들 간 수평적 조정을, 다양한 계층의 정책주체 간 수직적 조정을 담당할 '중첩된' 거버넌스를 구축, 운용하고 있는가?
	2. 정책은 다양한 주체의 참여를 바탕으로 새로운 대체적 해결책을 실험하고 있는가?
	3. 정책은 다른 관련 정책(예: 산업정책, 보건정책, 사회복지정책)과의 충분한 연계가 이루어지고 있는가?
	4. 정책적 미션과 목표를 달성하기 위하여 다양한 정책수단(기술적, 재정적, 규제적 수단)을 도입하고 충분한 재정적 투자(공공부문과 민간부문의 투자)를 하고 있는가?

차원	고려요인
정책의 평가	1. 정책은 연구개발 활동을 넘어서 시장과 수익을 창출하는 사업화를 충분히 지향하고 있는가?
	2. 정책은 결과평가와 지속적 개선을 위하여 적절한 평가체제(평가지표 및 절차 등)를 가지고 있는가?
	3. 평가와 모니터링 결과는 정책 관련 의사결정과 정책의 개선(예: 목표의 수정, 거버넌스와 운영절차의 개정)에 충분히 반영되는가?

출처: 건국대학교 정선양(2024).

둘째, 정책의 집행(policy implementation)과 관련해서는 관련 부처 간 수평적 조정과 정책주체의 다양한 계층 간의 수직적 조정이 이루어질 수 있는 구조를 구축하고 있는가, 다양한 주체들이 참여하여 새롭고 대체적인 해결책을 실험하는가, 미션지향적 정책이 다른 산업정책, 보건정책, 복지정책 등과의 연계가 이루어지고 있는가, 다양한 정책수단이 동원되고 공공부문과 민간부문의 자원조달이 충분히 이루어질 수 있는가의 문제를 검토하여야 할 것이다.

셋째, 정책의 평가(policy evaluation)와 관련해서 미션지향적 과학기술정책은 단순히 연구개발에 그치는 것이 아니라 새로운 수익과 시장을 창출하고 중장기적으로는 새로운 산업을 창출하여야 할 것이며, 이 같은 수익, 시장, 산업의 창출 정책의 성공을 나타내는 가장 좋은 지표가 될 것이다. 아울러 본 정책이 지속적인 모니터링과 결과평가를 위한 체계적 평가체제를 가지고 있는가와 평가 및 모니터링의 결과가 후속 정책의 수립 및 개선에 충분히 반영되는지를 점검하여야 할 것이다.

이상의 새로운 과학기술정책의 이론적 분석을 바탕으로 현 정부와 향후의 과학기술정책에 대해 다음과 같은 시사점을 제시할 수 있을 것이다. 먼저, 우리나라의 국가전략기술 도출 및 육성은 정부의 출범과 함께 정부 전체 차원에서 역점을 두어 추진하고 있는 정책으로서 새로운 미션지향적 과학기술정책의 시대에 적합한 정책적 접근으로 판단된다. 특히 이 정책은 국가 최상위 어젠다로 추진되고 국정의 최고 의사결정자가 적극적으로 추진하여 정책의 수직적 조정은 충분한 것으로 판단된다. 그러나 정책의 구체적 추진에 있어서 다양한 부처의 참여가 부족하다는 점에서 범부처적인 프로그램을 도입하여 수평적 조정과 협력을 통하여 구체적인 시너지를 창출하여야 할 것이다. 아울러 정책의 추진에 있어서 다양한 이해관계자의 의견을 적극적으로 수렴할 필요가 있으며, 정부부문과 민간부문에서 관련 전략기술의 개발 및 사업화에 충분한 투자가 이루어지도록 독려하고, 전략기술을 통한 사회적 문제해결을 넘어 구체적인 사업화를 이루어 수익을 창출할 방안을 찾아야 할 것이다. 현재 우리나라의 국가전략기술 개발 및 사업화는 아직 사업의 시작 단계라는 점에서 정책적 미션과 목표의 달성 여부를 평가하기는 이르다. 그럼에도 불구하고 정부는 국가전략기술의 개발 및 사업화, 그리고 이를 통한 사회경제적 도전과제의 효율적인 해결을 보장하기 위한 체계적인 평가체제를 미리 구축, 운용하여야 할 것이다.

PART 2

3 소결

가 한림원의 전략기술 도출

본 보고서에서는 한림원이 창립 30주년을 맞이하여 각 학부의 의견을 수렴하여 향후 30년 후 즈음의 우리나라에 영향을 미칠 주요기술 중 인공지능의 활용과 공존, 초고령사회에 대한 대비, 넥스트 팬데믹에 대한 대응 주제를 선정하고 이들의 현재 국내외 발전 정도와 정책적 대응 현황을 살펴보고 있다. 이 점에서 이들 세 기술은 향후 30년 후의 국가전략기술이라고 할 수 있을 것이다. 이와 같은 국가전략기술의 도출 및 사업화는 미션지향적 과학기술정책의 중요 과제 중 하나이다. 이에 따라, 우리 정부도 12대 국가전략기술 육성을 위한 「국가전략기술 육성에 관한 특별법」을 제정하고 12대 국가전략기술 및 50개 중점기술 중점기술 분야를 선정하였다. 이 기술은 기술패권의 시대에 우리나라의 경쟁우위를 확보하고 차세대 산업경쟁력을 가져다줄 것으로 기대된다. 이 점에서 이들 기술은 우리나라의 중단기적인 산업경쟁력의 확보에 크게 이바지할 것이다.

국가전략기술과 세부 중점기술은 해당 분야 전문가들의 논의를 바탕으로 도출되었다. 일반적으로 국가가 개발, 확산, 상업화할 전략기술의 도출은 기술예측(technology forecasting)에 속하는데, 여기에서 전문가들로 구성된 델파이법(Delphi methods)을 많이 사용한다(Porter et al., 1991; 정선양, 2023). 실제로 1980년대 영국을 시작으로 독일, 일본 등 선진국에서 국가가 개발하여야 할 전략기술의 도출에 많은 국가가 노력해 왔는데, 이것이 이른바 연구예측(research foresight)이다(Martin & Irvines, 1989; Breiner et al., 1994; Vanston, 1998). 우리나라도 1990년대 이후 한국과학기술기획평가원(KISTEP)을 중심으로 국가가 개발해야 할 전략기술을 도출해 왔다(예를 들어, 국가과학기술위원회·한국과학기술기획평가원, 2012; 한국과학기술기획평가원, 2020). 이들 기술은 중단기적으로 국가가 개발, 사업화하여야 하는 기술의 도출이다. 이 점에서 기술예측, 연구예측 등은 국가 차원 기술경영의 출발점이 아닐 수 없으며 실제로 기술예측은 기업 차원에서나 국가 차원에서나 효율적 기술경영의 기초가 아닐 수 없다.

이러한 관점에서 현 정부에서 기술패권 시대에 대응할 12대 국가전략기술 및 50개 중점기술 중점기술을 전문가들의 숙의를 바탕으로 도출한 것은 아주 적절하다고 판단된다. 그러나 도출기술을 현재의 과학기술정책 관점에서 살펴보면 다음 두 가지의 아쉬움이 있다. 먼저, 20~30년을 내다보는 장기적인 전략기술이라기보다는 중단기적 측면의 기술패권에 대응하는 기술이라는 점이다. 물론 앞으로 닥쳐올 기술패

권 경쟁에서 우리나라의 미래가 걸려 있는 기술이라는 점에서 대단히 중요한 기술임에는 틀림이 없다. 그러나 적어도 몇 개의 전략기술 분야 및 중점기술은 장기적인 전략적 중요성이 있는 기술들을 도출하고 이에 대한 중점적인 지원정책을 펼칠 필요가 있다. 두 번째는 이들 국가전략기술과 중점기술 대부분이 경제적인 측면에서 기술패권 확보와 새로운 산업의 창출 등 경제적 측면의 미션 달성에 주안점을 두고 있다는 점이다. 이 같은 경제발전과 새로운 산업의 창출과 선도는 대단히 중요한 국가의 미션이 아닐 수 없다. 그럼에도 불구하고 국가전략기술은 최근에 중요하게 대두되는 기후변화, 환경위기 해결, 국민 삶의 질 향상, 지속 가능한 발전, 글로벌 사회적 이슈의 해결 등과 같은 인류가 당면한 글로벌 거대 도전과제(grand challenges)의 해결을 목표로 할 필요가 있다.

이 같은 장기적인 측면의 사회경제적 도전과제의 해결을 위한 국가전략기술의 도출은 쉬운 일이 아니다. 그동안 미래기술예측에 사용된 일시적으로 구성된 전문가 집단을 중심으로 한 델파이법은 전문가를 단지 일시적으로 활용할 뿐 지속적으로 활용할 수 없다는 점에서 이 같은 장기적 전략기술의 도출에 적합하지 않다. 이 점에서 우리나라가 필요로 하는 중장기적 국가전략기술의 도출 및 미래기술예측에는 우리나라 최고의 과학기술인재로 구성된 한림원을 활용할 필요가 있을 것이다. 올해 창립 30주년을 맞은 한림원은 이와 같은 중단기적 기술패권을 가져다줄 기술뿐만 아니라 20~30여 년 뒤의 국가경쟁력에 핵심적인 과학기술의 도출 및 체계적 육성을 위한 정책 방안을 제시할 필요가 있다. 그 이유는 한림원 본연의 역할은 과학기술의 측면에서 국가의 미래 발전에 대한 정책자문이기 때문이다. 특히 과학기술 전 분야를 망라하는 5개 학부가 국내 최고의 학자들로 구성되어 있고, 한국차세대과학기술한림원(Y-KAST)을 운영함으로써 현재 국내에서 가장 왕성한 연구 활동을 하는 신진과학자들을 회원으로 보유하고 있다. 한림원 정회원과 차세대회원을 적극적으로 활용하면 과학기술 전 분야에 걸쳐 향후 우리나라의 경제발전, 삶의 질 향상, 사회적 도전과제를 해결할 수 있는 국가전략기술을 도출하고 이들을 육성할 효과적인 과학기술정책방안을 제시할 수 있을 것이다. 한림원의 기본적 미션이 국가의 과학기술발전에 대한 정책자문이라는 점에서, 이 같은 한림원의 중장기적 국가전략기술 도출은 '증거에 기반한' 과학기술 정책자문의 좋은 사례가 될 것이다. 아울러 한림원 정회원과 차세대회원들은 스스로 연구 활동을 활발하게 수행하고 있다는 점에서 국가와 사회의 수요를 바탕으로 한 이들 전략기술의 실질적이고 구체적인 개발을 수행할 수 있으며, 이를 통해 정부의 미션지향적 과학기술정책의 성공에 기여할 수 있을 것이다.

앞서 설명한 바와 같이 본 보고서를 통해 향후 30여 년간 우리나라 경제발전, 국민의 삶의 질 향상, 사회경제적 도전과제 해결을 위한 3대 국가전략과제를 도출하고 관련 분야의 동향과 정책을 살펴보는 한편 이들 과제에 대응하기 위한 정책적 대응 방안을 제시하고자 하는 목적을 가지고 있다. 이들 국가전략과제는 향후 과학기술적 연구개발 및 사업화를 통해 해결해야 할 국가적 차원의 중요한 미션이 아닐 수 없다.

나 한림원의 미션지향적 정책자문

본 보고서에서 도출한 향후 30년 후의 우리나라의 국가적 도전과제는 인공지능의 활용과 공존, 초고령사회에 대한 대비, 넥스트 팬데믹에 대한 대응으로, 이들은 미래 우리나라가 직면할 국가적 도전과제 중 가장 중요한 것으로 판단된다. 이를 과학기술정책으로 표현하면 이들 세 과제는 우리나라가 향후 30년간 대응하여야 할 새로운 미션임이 분명하다. 이에 우리나라도 세 도전과제 혹은 미션을 해결할 새로운 미션지향적 과학기술정책을 적극 추진하여야 할 것이다. 여기에 한국과학기술한림원은 우리나라 과학기술계에서 더욱 중요한 역할을 담당해야 하며, 특히 이러한 과제를 해결하기 위한 정책의 수립, 집행, 평가에 있어서 핵심적이고 선도적 역할을 해야 한다. 새로운 과학기술정책의 이론적 발전 추이를 살펴볼 때 이들 세 도전과제의 해결을 위한 미션지향적 과학기술정책은 무엇보다도 다음의 특징을 가져야 할 것이다.

우선, 이 과제들을 해결하기 위한 과학기술정책에 있어서 포괄성(comprehensiveness)이 필요하다. 본 미션의 해결을 위한 과학기술정책의 거버넌스는 '중첩된' 범부처, 범기구적 정교한 거버넌스를 가지고 추진하여야 할 것이며, 구체적인 정책 프로그램은 범부처 차원에서 추진되어야 할 것이다. 이를 통하여 해당 부처 내의 수직적 거버넌스와 관련 부처 간의 수평적 거버넌스를 적극적으로 구축, 활용하여야 할 것이다.

둘째, 이 세 도전과제를 해결하기 위한 미션지향적 과학기술정책은 점진적, 장기적으로 추진되어야 한다. 이 과제의 해결은 중장기적인 점에서 정권의 부침과 관계없이 장기적이고 지속적으로 추진되어야 할 것이다. 그동안 구축해온 정부의 정책 경험을 더욱 활용하고 새로운 정책의 추진에 있어서 적극적인 학습을 하여야 할 것이다. 아울러 정책을 구체적으로 집행할 제도적 구성에 있어서도, 기존의 제도를 적극적으로 활용하되 필요할 경우 새롭게 추진하는 것을 권장한다.

셋째, 세 국가적 도전과제의 해결에는 적극적인 재정투자가 필요하다. 관련 부처의 공적 자금 투입도 중요하지만, 이들 전략기술 및 과제는 궁극적으로 새로운 수익, 시장, 산업을 창출하여야 한다는 점에서 민간부문의 적극적인 참여가 필요하다. 민간부문의 참여에 있어서 이론적 검토에서 살펴본 것처럼 급진적 혁신을 추구하는 첨단 대기업은 물론 점진적 혁신을 추구하는 중소기업의 투자와 참여를 유도하여야 할 것이다.

넷째, 본 보고서를 통해 도출된 세 미션을 해결하기 위한 새로운 정책은 새로운 미션지향적 정책의 중요 과제인 '문제의 제기'를 넘어서 '문제의 해결'에 주안점을 두어야 한다. 여기에서 말하는 문제의 해결은 과학기술적 측면을 넘어서 경제적 측면에서의 문제해결, 즉 사업화를 추구하여야 할 것이다. 이들 정책은

미션에 대한 기술적 해결책 도출과 더불어 충분한 수익을 만들어갈 수 있는 시장을 창출해야 할 것이며, 궁극적으로는 향후 우리나라의 전략산업을 창출하여야 할 것이다.

결론적으로 한림원은 본 연구에서 선정된 인공지능의 활용과 공존, 초고령사회에 대한 대비, 넥스트 팬데믹에 대한 대응 등 세 도전과제뿐만 아니라 향후 우리나라의 미래가 걸려있는 다양한 국가적 전략기술의 개발 및 사업화에 정책적인 측면에서 공헌해야 한다. 즉, 한림원은 이상의 여러 정책적 측면의 새로운 미션지향적 과학기술정책의 수립, 집행, 평가에 있어서 보다 적극적으로 참여를 하고 Marburger Ⅲ(2011) 등이 강조하는 '과학기술정책의 과학화(Science of S&T Policy)'에 선도적 역할을 하여야 할 것이다. 이를 위하여 한림원은 정책연구역량을 배양·증가하여 국가전략과제의 도출, 이를 통한 현재 당면하고 미래에 제기될 도전과제, 즉 미션 해결을 위한 정책의 수립, 집행, 평가에 있어서 적극적인 연구와 자문을 하여야 할 것이다. 한편, 앞에서 살펴본 바와 같이 새로운 미션지향적 과학기술정책은 궁극적으로 국가혁신체제의 전환, 즉 지속 가능성을 제고하기 위한 것이다. 이 점에서 한림원은 회원들의 역량을 바탕으로 '증거 기반' 과학기술 정책역량을 배양·활용하고 우리나라 국가혁신체제가 지속 가능한 체제로 발전하여 국민 삶의 질 향상에 이바지하여야 할 것이다.

참고문헌

국가과학기술위원회·한국과학기술기획평가원(2012). 제4회 과학기술예측조사: 2012~2035, 서울.

국가과학기술자문회의(2023). 「국가전략기술 육성에 관한 특별법」상 국가전략기술 선정(안), 국가과학기술자문회의 심의회의.

성지은·송위진(2007). "총체적 혁신정책의 이론과 적용: 핀란드와 한국의 사례", 기술혁신학회지, 제10권 제3호, pp. 555-579.

정선양(2015a). "우리나라 과학기술정책의 회고", 정선양·최항순(2015), 우리나라 국가과학기술정책의 진단, 제2장, 한국과학기술한림원.

정선양(2015b). "우리나라 과학기술 거버넌스의 변화", 정선양·최항순(2015), 우리나라 국가과학기술정책의 진단, 제3장, 한국과학기술한림원.

정선양(2018). 기술과 경영, 제3판, 서울: 시대가치.

정선양(2023). 전략적 기술경영, 제5판, 서울: 박영사.

정선양·정지윤(2023). "기술혁신이론의 진화", 기술혁신연구, 기술경영경제학회, 제31권 제3호, pp. 75-110.

한국과학기술기획평가원(2020). 미래환경 이슈: 대기오존의 현재와 미래, KISTEP 미래예측 브리프.

황두희·정선양(2019). "지속가능한 사회-기술적 시스템 전환에 대한 연구: 한국의 전기자동차 사례를 중심으로", 기술혁신학회지, 제22권 제4호, pp. 709-747.

Ayres, R. U.(1989). "Industrial Metabolism", in Ausubel, J. H. & Sladowich, H. E.(eds.), Technology and Environment, Washington, D. C. : National Academy Press, pp. 23~49.

Breiner, S., Cuhls, K. & Grupp, H.(1994). "Technology Foresight Using a Delphi Approach: A Japanese-German Co-operation", R&D Management, Vol.24 No.2, pp. 141~153.

Chiang, J. -T.(1991). "From 'Mission-oriented' to 'Diffusion-oriented' Paradigm: The New Trend of U.S. Industrial Technology Policy", Technovation, Vol.11 No.6, pp. 339~356.

Chung, S.(1996). Technologiepolitik für neue Produktionstechnologien in Korea und Deutschland, Heidelberg: Physica-Verlag.

Chung, S.(1998). "Towards a "Sustainable" National System of Innovations: Theory and Korean Perspectives", in Lefebvre, L. A., Mason, R. M. & Khalil, T.(eds.), Management of Technology, Sustainable Development and Eco-Efficiency, Amsterdam and New York: Elsevier, pp. 321~330.

Chung, S.(2002). "Building a National Innovation System through Regional Innovation Systems", Technovation, Vol.22 No.8, pp. 485~491.

Chung, S. & Lay, G.(1997). "Technology Policy between 'Diversity' and 'One Best Practice' – A Comparison of Korean and German Promotion Schemes for New Production Technologies", Technovation, pp. 675~693.

Diercks, G., Larsen, H. & Steward, F.(2019). "Transformative Innovation Policy: Addressing Variety in an Emerging Policy Paradigm", Research Policy, Vol.48, pp. 880~894.

Dijk, M., Orsato, R. J. & Kemp, R.(2013). "The Emergence of an Electric Mobility Trajectory", Energy Policy, Vol.52, pp. 135~145.

Elzen, B., Geels, F. & Green, K.(2004). System Innovation and the Transition to Sustainability: Theory, Evidence, and Policy, Cheltenham: Edward Elgar.

Ergas, H.(1987). "Does Technology Policy Matter", in Guile, B. R. & Brooks, H. (eds.), Technology and Global Industry: Companies and Nations in the World Economy, National Academy Press, pp. 191~245.

Freeman, C.(1988). "Japan: A New National System of Innovation?", in Dosi, G., Freeman, C., Nelson, R., Silverberg, R. & Soete, L.(eds.), Technical Change and Economic Theory, London and New York: Pinter Publishers, pp. 330~348.

Freeman, C.(1992). The Economics of Hope: Essays on the Technical Change, Economic Growth and the Environment, London and New York: Pinter Publishers.

Geels, F. W.(2002). "Technological Transitions as Evolutionary Reconfiguration Processes: A Multi-level Perspective and a Case-study", Research Policy, Vol.31, pp. 1257~1274.

Geels F. W. & Schot, J. W.(2007). "Typology of Socio-technical Transition Pathways", Research Policy, Vol.36 No.3, pp. 399~417.

Grey, P. E.(1989). "The Paradox of Technological Development", in Ausubel, J. H. & Sladovich, H.(eds.), Technology and Environment, Washington, D.C.: National Academy Press, pp. 192~204.

Kemp, R. & Soete, L.(1992). "The Greening of Technological Progress", Futures, June, pp. 437~457.

Kemp, R., Schot, J. & Hoogma, R.(1998). "Regime Shifts to Sustainability through Processes of Niche Formation: the Approach of Strategic Niche Management", Technology Analysis and Strategic Management, Vol.10 No.2, pp. 175~198.

Kemp, R., Rip, A. & Schot, J.(2001). "Constructing Transition Paths Through the Management of Niches", in Garud, R. & Karnoe, P.(eds.), Path Dependence and Creation, Lawrence Erlbaum Associates Publishers: Mahwah, NJ, pp. 269~299.

Kuhlmann, S. & Rip, A.(2018). "Next-Generation Innovation Policy and Grand Challenges", Science and Public Policy, Vol.45 No.4, pp. 448~454.

Lundvall, B. A.(1988). "Innovation as an Interactive Process: User-Pro-ducer Relations", in Dosi, G., Freeman, C., Nelson, R., Silverberg, G. & Soete, L.(eds.), Technical Change and Economic Theory, London and New York: Pinter Publishers, pp.349~369.

Lundvall, B. A. (Ed.) (1992). National Systems of Innova-tion: Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning, London: Pinter Publishers.

Majer, H.(1992). Wirtschaftswachstum: Paradigmenwechsel vom quanitativen zum qualitativen Wachstum, München/ Wien: Oldenbourg.

Marburger III, J. H.(2011). "Why Policy Implementation Needs a Science of Science Policy", in Fealing, K. H., Lane, J. I., Marburger III, J. H. & Shipp, S. S.(eds.), The Science of Science Policy: A Handbook, Stanford University Press, pp. 9~22.

Martin, B. R. & Irvine, J.(1989). Research Foresight: Priority-Setting in Science, Pinter Publishers.

Mazzucato, M.(2018). "Mission-oriented Innovation Policies: Challenges and Opportunities", Industrial and Corporate Change, Vol.27 No.5, pp. 803~815.

Nelson, R. R. (Ed.) (1993). National Innovation Systems: A Comparative Analysis, New York and Oxford: Oxford University Press.

OECD(2021). The Design and Implementation of Mission-oriented Innovation Policies: A New System Policy Approach to Address Societal Challenges, Paris: OECD.

Porter, A., Roper, A., Mason, T., Rossini, F. & Banks, J.(1991). Forecasting and Management of Technology, New York: Wiley.

Schot, J. & Geels, F. W.(2008). "Strategic Niche Management and Sustainable Innovation Journeys: Theory, Findings, Research Agenda, and Policy", Technology Analysis and Strategic Management, Vol.20 No.5, pp. 537~554.

Schot, J. W., Hoogma, R. & Elzen, B.(1994). "Strategies for Shifting Technological System: The Case of Automobile System", Futures, Vol.26 No.10, pp. 1060~1076.

Schot, J. & Kanger, L.(2018). "Deep Transitions: Emergence, Acceleration, Stabilization and Directionality", Research Policy, Vol.46, pp. 1045~1059.

Schot, J. & Steinmueller, W. E.(2018). "Three Frames for Innovation Policy: R&D, Systems of Innovation and Transformative Change", Research Policy, Vol.47, pp. 1554~1567.

Schumpeter, J. A.(1911). Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung, 1. Aufl., Leipzig: Duncker & Humblot, 정선양 역(2021), 경제발전의 이론, 서울: 시대가치.

Schmookler, J.(1966). Invention and Economic Growth, Cambridge, MA: Harvard University Press.

Solow, R.(1957). "Technical Change and the Aggregate Production Function," Review of Economics and Statistics, August, pp. 312~320.

Vanston, J. H.(1998). Technology Forecasting: An Aid to Effective Technology Management, Technology Future Inc.

Weber, M. & Hemmelskamp, J. (Eds.) (2005). Towards Environmental Innovation Systems, Heidelberg: Springer.

Wells, P. & Nieuwenhuis, P.(2012). "Transition Failure: Understanding Continuity in the Automotive Industry", Technological forecasting and Social Change, Vol.79, pp. 1681~1692.

PART 3

인공지능의 활용과 공존

참여 집필진

조형희 연세대학교 기계공학부 교수
이성환 고려대학교 인공지능학과 특훈교수
이경무 서울대학교 전기정보공학부 석좌교수
하정우 네이버클라우드 AI이노베이션센터장
최재식 KAIST 김재철AI대학원 교수
서재민 중앙대학교 물리학과 교수
백민경 서울대학교 생명과학부 교수
조성배 연세대학교 컴퓨터과학과 교수
김명주 국제인공지능윤리협회 회장

미래 30년을 대비하는
과학기술전략

한림연구보고서 155

THE KOREAN ACADEMY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

PART 3

인공지능의 활용과 공존

044 **1 서론**

050 **2 인공지능 기술 및 분야 발전 전망**
050 가. 들어가는 말
051 나. 생성형 인공지능의 발전
054 다. 인공지능의 활용
056 라. 인공지능에 대한 국가 정책 현황
060 마. 맺음말

062 **3 AI 기술 발전 전망 및 국내 산업의 새로운 도약 전략**
062 가. 들어가는 말
063 나. AI 기술의 현황 및 발전 방향
070 다. 우리의 AI 역량 및 현주소
078 라. 국내 산업 발전을 위한 AI 전략
079 마. 맺음말

081 **4 생성 AI 시대 산업과 사회 대전환**
081 가. 들어가는 말
081 나. 2024년 생성 AI 기술 동향 및 전망
089 다. 생성 AI 도입을 통한 생산성 혁신
092 라. 새로운 AI 에이전트 시대
094 마. 맺음말

097 **5 인공지능의 발전과 신뢰성 기술 전망**
097 가. 들어가는 말
098 나. 미국의 인공지능 투자 전략
099 다. 중국의 인공지능 투자 전략
100 라. 미국과 중국의 인공지능 경쟁과 우리의 전략
102 마. 생성형 인공지능의 발전과 경제발전
102 바. 인공지능 관련법과 규제
103 사. 인공지능 신뢰성의 구성요소
104 아. 딥러닝 내부의 의사결정을 설명하는 기술
104 자. 맺음말

107 **6 인공지능 시대, 물리학자의 역할**
107 가. 들어가는 말
108 나. 물리학과 AI: 원자핵부터 우주까지
110 다. 물리를 이해하는 AI
111 라. 물리학자의 역할
112 마. 맺음말

114 **7 인공지능이 불러온 생명과학 연구 혁신**
114 가. 들어가는 말
115 나. 인공지능의 생명과학 연구 활용 현황
117 다. 인공지능 기반 생명과학 연구의 전망
120 라. 맺음말

122 **8 공정한 인공지능을 위한 기술과 발전 전망**
122 가. 들어가는 말
123 나. 공정성 척도와 데이터셋
125 다. 인공지능의 편향제거 기술
127 라. 주요국의 동향
129 마. 발전 전망
130 바. 맺음말

132 **9 지속 가능한 AI와의 공존을 위한 윤리와 규제**
132 가. 들어가는 말
132 나. AI의 양면성
135 다. AI 윤리 원칙
143 라. AI 규제 동향
147 마. 맺음말

149 **10 소결**

PART 3

1 서론

최근 몇 년간 인공지능(AI) 기술은 상상을 초월할 만큼 비약적인 발전을 이루어왔다. 특히 2022년 11월 오픈AI에서 출시한 챗GPT는 초거대 언어모델 기술이 실생활에 본격적으로 도입되는 계기가 되었으며, 이는 사회 각 분야에 큰 변화를 가져왔다. 인공지능은 더 이상 미래의 기술이 아닌, 현재의 기술로 자리매김하며 우리의 일상생활뿐만 아니라 산업, 의료, 금융, 교육 등 다양한 분야에서 혁신을 이끌고 있다. 이러한 기술의 발전은 인간의 삶을 더 편리하고 효율적으로 만들어주는 동시에, 새로운 문제와 도전을 불러일으키기도 한다.

인공지능 기술의 급격한 발전 속도와 그 영향력은 30년 후의 기술 발전 및 활용 방안을 예측하는 것을 어렵게 만든다. 그러나 미래를 준비하고 적절한 정책을 마련하기 위해서는 현재의 기술 동향과 발전 방향을 면밀히 분석하고, 가능한 시나리오를 바탕으로 예측하는 노력이 필요하다.



따라서 이러한 기술들이 현재 산업과 일상생활에서 어떻게 활용되고 있는지 분석하고, 외국에서의 개발 현황, 다양한 학문 분야에서의 접목 사례 등을 통해 앞으로의 발전 방향과 그 가능성을 예측해 보고자 한다. 또한 인공지능의 공정성과 윤리 및 규제 문제에 대해서 다루고자 한다. 이를 통해 우리는 인공지능의 미래를 보다 명확히 이해하고, 그에 맞는 준비를 할 수 있을 것이다.

40년 전만 해도 인공지능은 마치 공상과학 소설 속에나 나오는 환상에 가까운 기술로 여겨졌다. 운전자 없는 자율주행 자동차, 인공지능 비서, 지능형 로봇들은 영화나 만화 속 상상일 뿐, 가까운 미래에 현실이 될 것이라고 믿는 사람은 거의 없었다. 그러나 2012년 AlexNet의 혁신적인 발표 이후 딥러닝 기반 AI 기술은 믿기 어려울 정도로 빠르게 발전했다. 초기에는 AI 학자들조차 딥러닝의 성능과 지속 가능성에 대해 반신반의하는 경향이 있었지만, AlphaGo, ResNet, GAN, 트랜스포머, 확산 모델 등 획기적인 기술의 등장으로 다양한 분야에서 기존의 난제를 해결할 수 있음을 보여주며 딥러닝 기술은 학계와 산업계의 표준으로 자리 잡았다.

딥러닝 기반 AI 기술의 발전에는 새로운 아키텍처와 학습 알고리즘의 개발도 큰 기여를 했지만, 최근의 경향은 'scaling law', 즉 규모의 법칙이 주도하고 있다. 대규모 GPU와 방대한 학습데이터로 훈련된 챗GPT와 같은 초거대 언어모델은 천문학적인 자원이 투입되었고, 예상을 뛰어넘는 결과를 보여주었다. 이러한 초거대 인공지능 모델 개발은 당분간 가속화될 것으로 예상되며, 아직 한계에 도달했다고 보기에는 이르다. 단순한 언어모델을 넘어 이미지, 비디오, 음성, 텍스트 등을 복합적으로 분석하고 이해하는 멀티모달 AI와 로봇, 가전, 기계 등 물리적인 기기에 결합하는 임바디드 AI로의 확장이 본격화되고 있으며, 많은 사람들은 이러한 발전이 범용인공지능(AGI)의 도래를 예고하고 있다고 믿고 있다.

인공지능은 21세기 기술 혁신의 중심에 있으며, 이 중 미국과 중국이 AI 개발과 투자에서 세계를 선도하고 있다. 이 두 나라는 각각 고유한 전략과 강점을 바탕으로 AI 경쟁을 주도하고 있으며, 그 결과는 향후 글로벌 기술 발전의 방향을 결정짓는 중요한 요소가 될 것이다.

미국의 AI 분야 강점은 세계 시장을 지배하는 실리콘 밸리의 글로벌 기업들과 최고의 연구 능력에서 기인한다. 마이크로소프트, 구글, 애플 등의 기업은 컴퓨터와 휴대폰에 필수적인 소프트웨어 인프라와 AI 서비스를 제공하고 있으며, 아마존, 넷플릭스, 메타(페이스북), 트위터 등은 클라우드, 인터넷 미디어, 소셜 미디어 및 마이크로블로깅 서비스 분야에서 시장을 선도하고 있다. 이러한 글로벌 플랫폼 기업들은 사용자 데이터를 기반으로 AI 기반 인식 기술과 추천 시스템을 개발하고, 지속적인 혁신을 이루고 있다. 미국 기업들은 또한 구글의 딥마인드 인수와 마이크로소프트의 오픈AI 투자와 같은 사례에서 볼 수 있듯이, 세계적 수준의 연구진을 유치하고 기술 발전을 주도하기 위해 기술 기업에 대한 투자를 우선시하고 있다.

미국의 AI 발전 전략은 국방연구진흥기관 방위고등연구계획국(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)을 통해 이루어져 왔다. DARPA는 1968년부터 카네기멜론대학교와 협력하여 군용 자율주행 자동차 개발 프로젝트를 진행했으며, 2005년 DARPA 그랜드 챌린지를 통해 자율주행 기술의 가능성을 확인했다. 이 기술은 이후 구글, 웨이모, 테슬라와 같은 민간 기업에 이전되어 상용화되었다. 또한 챗GPT의 근간이 되는 기술도 DARPA와 미국 표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)가 함께 추진한 기계 자동 독해 프로그램(machine reading program)의 결과물이다. 이처럼 미국은 장기적인 연구 기획과 투자, 민간 기업과의 협력을 통해 AI 기술을 발전시키고 있다.

반면 중국은 내수 시장의 보호와 내수 기업 육성, 국외 전문 인력의 유치 전략을 통해 AI 분야에서 경쟁력을 키워왔다. 중국은 주요 정보 검열과 보안을 이유로 다국적 기업의 내부 서비스 제공을 제한하고, 중국 내 기업을 육성하여 대규모 데이터를 축적하고 AI 기술을 발전시키고 있다. 또한, 천인계획과 만인계획 같은 프로그램을 통해 해외에 있는 중국계 인재를 유치하여 신기술 개발을 촉진하고 있다. 특히 컴퓨터 비전 기반의 인식 기술에서 우위를 점하고 있으며, 최근에는 알리바바의 Qwen2와 Kuaishou의 Kling 같은 생성 AI 모델을 통해 경쟁력을 높이고 있다. 중국 정부는 생성 AI를 정부 체제 확산의 도구로 활용하며, 시진핑 주석의 어록을 대답할 수 있는 시진핑 GPT를 준비 중이라는 보도도 있었다. 그러나 중국의 AI 발전 전략은 여전히 기술 추격형에 머물러 있으며, 장기적인 기술 개발에 대한 투자와 혁신이 필요하다.

EU는 강력한 AI 연구 역량을 보유하고 있지만, 미국이나 중국에 비해 생성 AI 분야에서 상대적으로 뒤처지고 있다. 그러나 프랑스의 Mistral과 독일의 Aleph Alpha 같은 기업들은 거대 언어모델을 오픈소스 형태로 공개하며 경쟁력을 인정받고 있다. 이탈리아 역시 자국의 생성 AI 경쟁력 확보를 위해 정부 차원의 투자를 천명하고 있다. EU는 규제와 함께 오픈소스 중심의 생성 AI 산업 활성화 부분을 반영한 법안을 마련하며, EU 내 기업의 활동을 지원하고 있다.

일본은 오픈AI와의 협업을 통해 공공 분야에 생성 AI를 도입하고 있으며, 자국 기업인 소프트뱅크를 통해 자체 AI 기술 확보를 추진하고 있다. 인도네시아, 태국, 베트남 등 아시아 국가들도 생성 AI 기술의 자국화를 위해 노력하고 있다. 한국은 네이버, LG AI 연구원, 카카오, KT, SKT 등 여러 기업이 자체적으로 거대 언어모델을 개발하며 빠르게 산업 생태계를 구축하고 있다.

이러한 배경에서 AI 기술의 발전은 전 세계적으로 중요한 영향을 미치고 있으며, 각국은 이를 통해 경제적, 기술적 우위를 확보하려는 전략을 펼치고 있다. 우리나라도 글로벌 경쟁에서 뒤처지지 않기 위해 AI 기술 연구와 인재 양성, 그리고 관련 산업 육성에 대한 전략적인 접근이 필요하다. 이를 통해 AI 기술의 상용화와 혁신을 촉진하고, 글로벌 시장에서 경쟁력을 확보할 수 있을 것이다.

다양한 학문 분야에서도 인공지능을 활용하기 위한 노력을 하고 있다. 물리학 분야에는 아직 인간이 완전히 이해하지 못하는 방대한 양의 실험 및 관측 데이터들이 존재한다. 예를 들어, 입자가속기에서는 우주의 기본 법칙을 탐구하기 위해 입자 충돌 데이터를 수집하고 있으며, 핵융합 장치에서는 플라즈마의 거동을 이해하기 위한 많은 데이터를 축적하고 있다. 최근 인공지능 기술이 발전하면서 이러한 물리학 데이터를 활용한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

핵융합 기술은 태양의 에너지원인 수소 핵융합 반응을 지구상에서 구현하려는 시도로, 고온의 플라즈마를 안정적으로 유지하는 것이 핵심 과제다. 한국핵융합에너지연구원의 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)는 1억 도의 초고온 플라즈마를 안정적으로 유지하는 데 성공했지만, 이는 수많은 시행착오를 거친 인간의 노력 덕분이었다. 인공지능을 활용하면 이러한 데이터 주도 학습을 더욱 효과적으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 우주 연구에서도 인공지능의 역할은 커지고 있다. 태양풍의 활동 변화나 암흑물질의 분포를 이해하기 위해 AI 기술을 활용한 연구가 진행되고 있다. AI는 태양 관측 사진에서 코로나 홀을 자동으로 탐지하거나, 관측 가능한 물질의 분포와 속도 정보를 기반으로 암흑물질의 질량 분포를 재구성하는 데 중요한 역할을 하고 있다. 앞으로의 AI는 단순히 데이터를 분석하는 도구를 넘어 물리학을 이해하고 새로운 물리 현상을 발견하는 데까지 발전할 것이다. 그리고 물리정보 신경망과 양자 기계학습(ML) 같은 기술은 물리 법칙을 학습하여 더 정교한 분석을 가능하게 하며, 물리학 연구에 큰 변화를 가져올 것이다. 이를 위해 물리학자들은 AI와의 융합 연구에 적극 참여하고, 학문 간 경계를 허물어 새로운 시너지를 창출해야 한다. 이러한 노력은 물리학의 발전뿐만 아니라 인류의 지식 확장에 크게 기여할 것이다.

또한 인공지능의 발전은 생명과학 연구에 혁신적인 변화를 가져오고 있다. 전통적으로 생명과학 연구는 주로 실험에 의존했지만, 인간 유전체 프로젝트 이후 축적된 방대한 데이터를 효과적으로 분석하기 위해 계산 기법들이 개발되기 시작했다. 최근 AI 기술이 고도로 발달하면서 생명과학 빅데이터 분석에 AI를 접목하려는 시도가 활발히 이루어지고 있다. 이는 단백질 구조 예측, 유전체학, 분자생물학 등 다양한 분야에서 혁신적인 결과를 낳고 있다. 대표적인 예로, 구글 딥마인드의 알파폴드와 미국 워싱턴대학교의 로제타폴드는 고정확도의 단백질 구조를 예측하는 AI를 개발하여 생명과학 연구에 큰 혁신을 가져왔다. 이는 AI의 활용 가능성을 증명하는 사례로, 이후 AI를 활용한 다양한 생명과학 연구를 촉진하는 계기가 되었다. 단백질 구조 예측 외에도 AI는 유전체 데이터 분석, 분자 모델링, 시뮬레이션 등 다양한 분야에서 활용되고 있다.

AI의 도입은 약물 개발, 신약 발견, 질병 진단 및 맞춤형 치료 등 생명과학 연구의 다양한 측면에서 연구의 효율성과 정확성을 높이는 데도 기여하고 있다. 예를 들어, 엔비디아와 아스트라제네카가 공동 개발한 MegaMolBART는 대규모 화합물 라이브러리를 기반으로 신약 후보 물질을 더 효율적으로 도출하는 기술을 제공하고 있으며, 이는 신약 개발의 초기 단계에서 시간과 비용을 크게 절감할 수 있도록 돕고 있

다. 더 나아가 AI는 생명과학 연구에서 새로운 분야를 개척하고, 기존 연구 방법론을 혁신하고 있다. 합성생물학, 유전자 편집, 바이오프린팅 등 첨단 생명과학 기술과 결합하여 연구의 혁신을 이끌고 있으며, 환경 보호와 생태계 연구에서도 중요한 역할을 하고 있다. 예를 들어, Conservation Metrics는 AI를 이용해 멸종위기종의 소리를 분석하고 서식지를 모니터링하며, 이를 통해 생물 다양성 보전과 생태계 보호에 기여하고 있다.

종합하자면, AI 기술을 효과적으로 활용하여 생명과학 연구의 새로운 가능성을 탐구하고, 인류의 건강과 지구 환경 보호에 기여할 수 있는 방향으로 나아가야 한다. 이를 위해 지속적인 기술 발전과 함께 윤리적 고려와 사회적 책임을 병행하여 AI 기술이 긍정적인 영향을 미칠 수 있도록 해야 할 것이다.

AI의 발전은 다양한 분야에서 혁신을 이끌지만, 공정성과 윤리성 문제도 함께 제기되고 있다. AI 시스템의 예측과 의사결정에서 편향과 불공정이 발생할 수 있어 이를 해결하기 위한 다양한 공정성 척도와 데이터셋이 개발되고 있다. 예를 들어, 인구학적 동등성, 기회 균등, 예측 동등성 등의 척도가 AI 모델의 공정성을 평가하는 기준으로 사용된다. COMPAS, Adult Income, German Credit 같은 데이터셋은 이러한 공정성 척도를 적용하여 AI 모델의 편향을 평가하고 개선하는 데 활용된다. 편향을 제거하고 공정성을 보장하기 위해 전처리, 중처리, 후처리 접근 방식이 개발되었다. 전처리 접근 방식은 데이터 샘플링, 증강, 정규화 등을 통해 데이터 자체의 편향을 줄이는 방법이다. 중처리 접근 방식은 모형 학습 과정에서 알고리즘에 공정성을 내재화하는 것이고, 후처리 접근 방식은 학습된 모형의 예측 결과를 수정하여 편향을 줄이는 방법이다. 특히, 대형언어모델(LLM)의 편향을 줄이기 위한 다양한 기술이 연구되고 있다.

미국, EU, 아시아 등 주요국은 AI 공정성과 윤리를 보장하기 위해 정책과 규제를 마련하고 있다. 미국은 NIST를 통해 공정성 평가 기준을 마련하고 다양한 도구를 개발 중이며, EU는 AI 규제 법안과 GDPR을 통해 비차별적이고 투명한 AI 작동을 요구하고 있다. 아시아의 중국, 일본, 한국 등도 AI 공정성을 위한 정책과 연구를 추진하고 있다. 앞으로 AI 공정성을 확보하기 위한 기술은 더욱 발전할 것이며, 연구자들은 정교한 편향제거 알고리즘을 개발하고 예측 정확도를 유지하면서도 공정성을 높이는 방향으로 나아가야 한다. 글로벌 기업과 정부는 AI 공정성을 보장하기 위한 규제와 정책을 강화하고, 사회적 인식과 참여를 통해 AI 공정성을 높이기 위한 공동의 노력을 기울여야 한다.

기술 혁신은 인류 사회에 막대한 영향을 미치며, 특히 AI의 등장은 그 영향력을 극대화하고 있다. AI는 일상생활과 업무의 효율성을 높이고, 경제 성장을 촉진하며, 교육, 건강, 고용 기회 확대 등 다양한 분야에서 긍정적인 변화를 일으키고 있다. 예를 들어, 생성형 AI '챗GPT'를 활용한 연구에서는 문서 작업의 효율성이 40% 향상되고, 소프트웨어 개발 시간이 40% 이상 단축된다는 결과가 보고되었다. 이러한 기술 혁신은 경제 성장과 소득 수준 향상, 건강 증진과 수명 연장, 교육과 학습 기회 확대, 고용 창출 등 다양한 혜택을 제공하며, 개인과 사회 전반에 걸쳐 긍정적인 영향을 미친다.

그러나 기술 혁신에는 항상 양면성이 존재한다. 기술의 순기능 곁에는 역기능과 부작용이 병존하며, 이는 AI 역시 예외가 아니다. 기술 혁신은 긍정적인 영향을 미치지만, 동시에 사회적, 경제적, 윤리적 문제를 야기할 수 있다. AI의 발전과 함께 발생하는 부작용과 문제점들은 다양한 사회적, 윤리적 논의를 필요로 한다. 예를 들어, 원자폭탄 개발을 이끌었던 오펜하이머 연구소장과 딥러닝의 대부 제프리 힌튼 교수는 기술의 발전과 함께 윤리적 문제를 제기하며 그 위험성을 경고한 바 있다. 이러한 사례들은 기술 혁신이 항상 긍정적이지는 않으며, 그 이면에는 해결해야 할 중요한 문제들이 존재함을 시사한다.

AI의 윤리적 문제는 특히 중요한 논점으로 부각되고 있다. 기술 혁신의 긍정적인 면을 극대화하고 부작용을 최소화하기 위해서는 AI의 개발과 사용에 있어 윤리적 원칙을 준수하는 것이 필수적이다. 통제성과 안전성, 투명성과 설명 가능성, 공정성, 프라이버시 보호, 책임성과 책무성, 표절과 저작권 침해 방지, 진짜와 가짜 구분, 그리고 다양성 등 다양한 윤리적 원칙들이 AI의 개발과 사용 과정에서 고려되어야 한다. 이러한 윤리적 원칙들은 AI 기술이 사회적 신뢰를 얻고, 인류 전체에 혜택을 줄 수 있도록 하는 데 중요한 역할을 한다.

AI 기술의 급격한 출현으로 인해 현재는 인류 역사상 가장 중대한 산업적, 사회적 변혁이 일어날 것이라는 기대와 우려가 공존하는 시기이다. 이전의 산업혁명이 특정 분야에서의 변혁을 가져왔고 상대적으로 장기간에 걸쳐 진행되었던 것에 비해 AI에 의한 혁명은 모든 산업과 인류의 삶 전체의 패러다임을 근본적으로, 단기간에 바꿀 수 있는 특징을 가지고 있어 그 무게가 다르다. 이는 AI로 인해 기존의 국가, 산업, 노동, 경제, 사회, 개인 간의 역할과 질서가 새로운 차원으로 급격히 재편될 수 있음을 의미한다.

따라서 이러한 대변혁의 시기에 새로운 AI 기술의 능력과 파급력, 그리고 위험 요소를 정확히 파악하고 경쟁력 있는 핵심기술을 확보함으로써 우리 산업과 사회를 한 단계 도약시킬 수 있는 전략을 마련하고 실행하는 것은 미룰 수 없는 숙제이다. 본 주제에서는 AI 기술의 현황과 발전 방향, 문제점을 파악하여, 다가올 미래를 철저히 준비하기 위한 방안을 찾고자 한다.

PART 3

2 인공지능 기술 및 분야 발전 전망

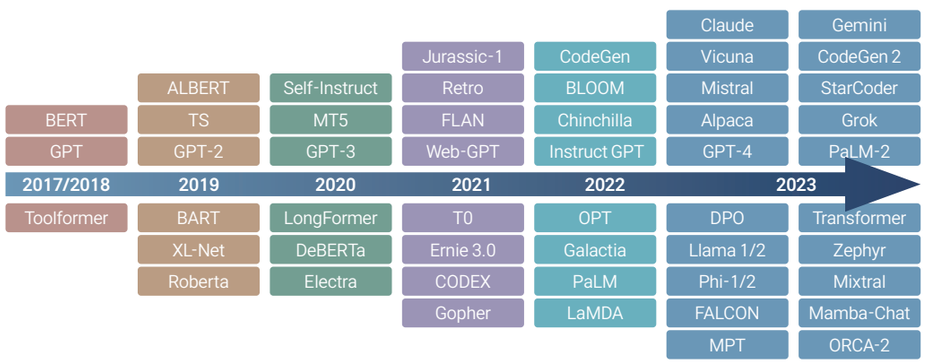
이 성 환
고려대학교 인공지능학과 특훈교수

가 들어가는 말

인공지능(AI) 기술은 지난 몇 년 동안 비약적인 발전을 이루어왔다. 2022년 11월에 출시된 오픈AI의 챗GPT를 시작으로, 초거대 언어모델 기술이 본격적으로 우리의 일상에 파고들면서 사회의 다양한 분야에 큰 영향을 미치고 있다. 인공지능은 더 이상 미래의 기술이 아닌, 현재의 기술로 자리 잡고 있으며, 일상생활, 산업, 의료, 금융, 교육 등 여러 분야에서 혁신을 이끌고 있다. 이러한 급격한 발전 속도와 변화를 감안할 때, 30년 후의 인공지능 기술 및 그 활용에 대해 예측하는 것은 매우 어려운 과제이다. 그럼에도 불구하고, 미래를 준비하고 적절한 정책을 마련하기 위해서는 현재의 기술 동향과 발전 방향을 면밀히 분석하고, 가능한 시나리오를 바탕으로 예측하는 노력이 필요하다.

본 장에서는 사회에 가장 큰 영향을 준 생성형 인공지능에 대해서 살펴보고, 더 나아가 생성형 인공지능 중 하나인 대형언어모델(LLM)을 바탕으로 연구되고 있는 범용인공지능(AGI)에 대해 알아볼 것이다. 또한 인공지능이 현재 산업 및 생활에서 활용되고 있는 예시를 살펴본다. 마지막으로, 이러한 기술들이 어떠한 방향으로 발전할 것인지 예상해 보며 본 장을 마치도록 하겠다.

그림 3.1 트랜스포머 이후 출현한 대형언어모델



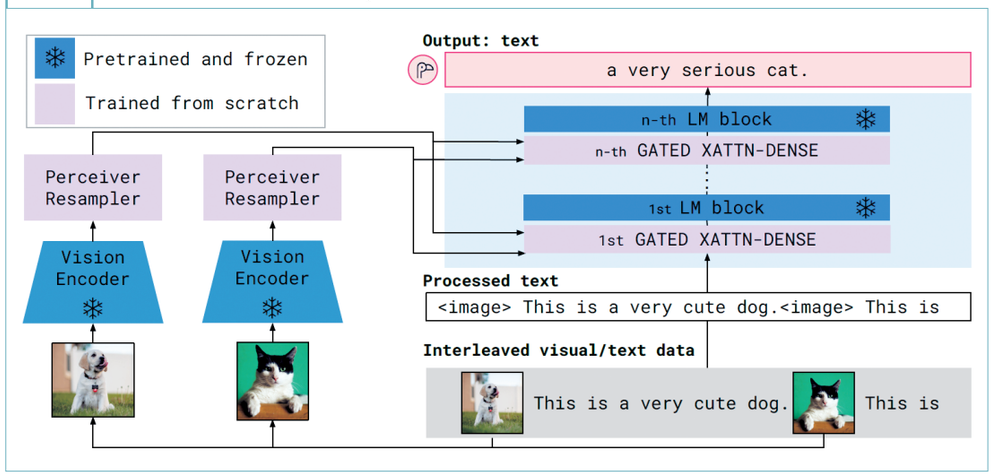
출처: Minaee et al.(2024).

나 생성형 인공지능의 발전

1) 대형언어모델

대형언어모델(Large Language Model, LLM)은 딥러닝과 자연어처리의 교차점에서 탄생한 혁신적인 기술로, 최근 몇 년 동안 그 중요성과 영향력이 급증하고 있다. 이러한 모델은 웹 규모의 막대한 양의 데이터로부터 학습된 지식을 활용한다. 이전 언어모델과 대형언어모델의 주요한 차이점은 학습데이터 및 모델 규모와 그에 따라 나타나는 특수한 능력에 있다. 특수한 능력의 발현을 위해 모델은 최소 수십억 개에서 수조 개에 이르는 파라미터를 포함하고 있으며, 위키피디아, 웹 페이지, 뉴스 기사 등과 같은 인터넷에서 수집된 방대한 텍스트 데이터 세트로부터 학습된 지식을 보유한다. 이러한 지식 학습을 기반으로 모델은 복잡한 문장 구조, 다양한 언어 스타일, 그리고 도메인 특화된 지식까지도 포함하는 광범위한 정보를 이해할 수 있다. 이에 따라 전통적인 자연어처리 모델과는 달리 문장 혹은 문단의 복잡한 구조를 이해하고 사전 지식이 필요한 질문을 명확히 파악한 후 정답을 추론한다. 이를 통해, 대형언어모델은 여러 도메인 안에서의 기계 번역, 텍스트 요약, 질의응답 시스템, 그리고 다양한 자연어처리 작업에서 높은 성능을 달성했다.

그림 3.2 최초의 멀티모달 언어모델 Flamingo

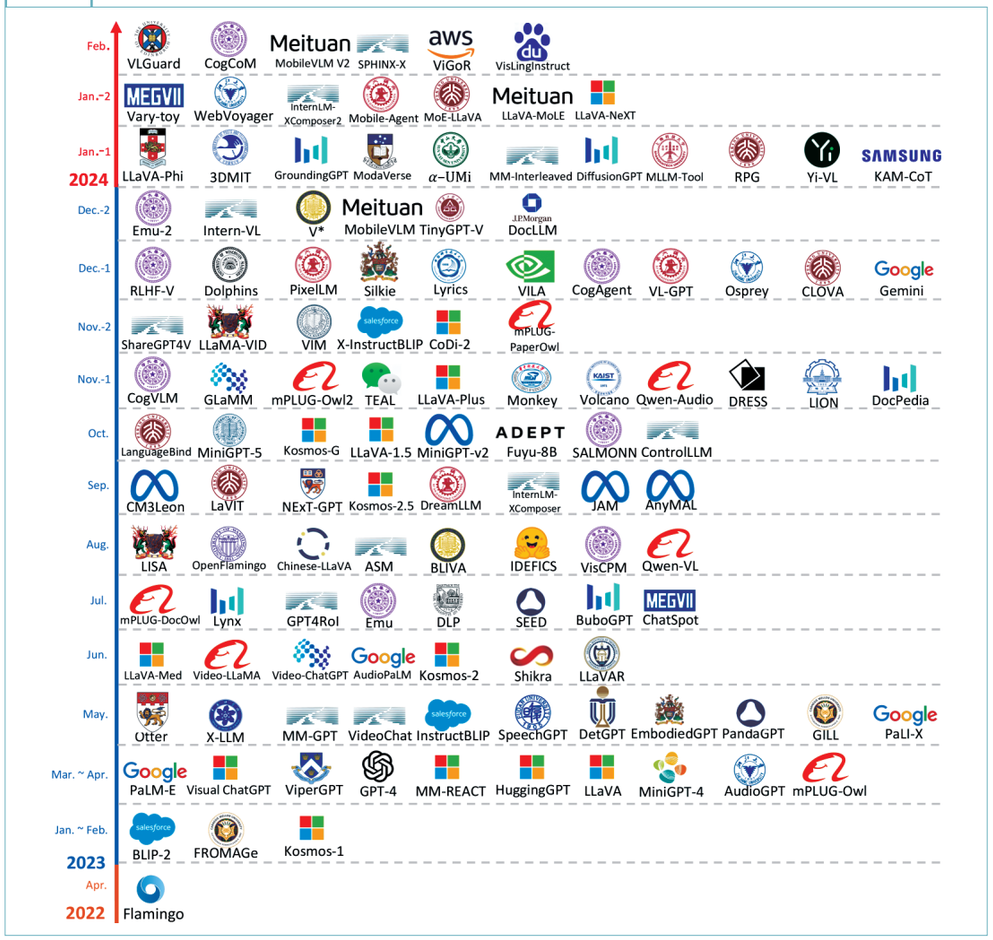


출처: Alayrac et al.(2022).

2) 멀티모달 언어모델

멀티모달 언어모델은 텍스트뿐만 아니라 이미지, 오디오, 비디오 등 다양한 형태의 데이터를 통합하여 이해하고 처리할 수 있는 혁신적인 인공지능 기술이다. 이러한 모델은 다양한 모달리티의 데이터를 결합함으로써 더 풍부하고 정교한 정보 처리를 가능하게 한다. 멀티모달 언어모델은 대형언어모델의 발전과 함께 등장했으며, 이는 대형언어모델의 풍부한 언어적 공간에 관련 정보가 이미 학습되어 있다는 가정하에 개발되었다. 최초의 멀티모달 언어모델인 Flamingo를 시작으로 수많은 멀티모달 언어모델이 개발되고 있으며, 이러한 모델들은 자연어처리 컴퓨터 비전, 음성인식 등 여러 인공지능 분야의 교차점을 대표한다.

그림 3.3 다양한 멀티모달 언어모델



출처: Zhang et al.(2024).

멀티모달 언어모델의 핵심은 서로 다른 형태의 데이터를 공동으로 학습할 수 있는 능력에 있다. 이를 위해, 멀티모달 모델은 텍스트와 다른 모달리티를 각각 이해하는 별도의 트랜스포머 구조를 사용하거나, 동시에 처리할 수 있는 아키텍처를 설계한다. 예를 들어, 오픈AI의 CLIP 모델(Radford et al., 2021)은 이미지 공간과 텍스트 공간을 맵핑되도록 학습하여 텍스트 설명과 일치하는 이미지를 찾는다. 이러한 모델은 다양한 멀티모달 작업에서 미세조정을 통해 사용되거나, 대형언어모델이 쉽게 이미지를 이해할 수 있게 한다. 이와 같은 기술은 이미지 캡셔닝, 비디오 해석, 멀티모달 검색 등 다양한 응용 분야에서 높은 성능을 발휘하고 있다. 최근에는 'Sora'라는 자연어 프롬프트를 통해 원하는 모습의 동영상을 생성하는 모델이 등장했다.

3) 생성형 인공지능의 미래: 범용인공지능

정의 및 개념

범용인공지능(Artificial General Intelligence, AGI)은 특정 작업에 국한되지 않고 인간처럼 다양한 지적 작업을 수행할 수 있는 인공지능을 의미한다. 이는 특정 분야에서 뛰어난 성능을 발휘하는 좁은 의미의 인공지능과는 달리, 다양한 상황과 문제를 이해하고 해결할 수 있는 능력을 가진다. AGI는 복잡한 문제 해결, 추론, 학습, 창의성 등 인간 지능의 모든 측면을 모방하는 것을 목표로 한다.

주요 특징

특정 작업에 국한되지 않고 다양한 작업을 하기 위해 AGI는 다양한 도메인에서 새로운 정보를 학습하고 기존 지식과 결합하여 문제를 해결할 수 있는 학습 및 추론 능력을 보유한다. AGI는 그러한 능력을 통해 의학에서부터 환경과학, 복잡한 데이터 분석에 이르기까지 인류가 직면한 가장 어려운 문제들을 해결할 수 있는 새로운 방안을 제시하며, 인간과 협력하여 창의적인 아이디어를 생성해 다양한 분야에서 인간의 능력을 확장시키는 역할을 할 것이다.

현재의 연구 동향

현재 AGI를 실현하기 위해 여러 방면으로 연구가 진행되고 있다. 인간처럼 필요한 지식을 스스로 인지하고 학습할 수 있도록 뇌를 모사하여 자가 정렬화하는 기술 개발, 비정형 데이터로부터 필요한 부분의 데이터를 선별하고 정형 학습데이터로 변환하여 능동적으로 학습하는 기술 연구, 문제 해결에 필요한 지식을 검색하기 위해 자동으로 부족한 지식을 식별하여 다수의 쿼리를 생성하는 연구가 있다. 또한, 복합적 문제 해결을 위해 문제를 분해하고 이에 대한 수행 계획을 수립하여 다양한 문제를 해결할 수 있는 능력이 연구되고 있다. 그 외에도 텍스트, 이미지, 오디오 등 다양한 형태의 데이터를 통합하여 학습하는 멀티모달 학습, 다양한 상황에서 최적의 행동을 학습하기 위한 강화학습, 새로운 작업을 빠르게 학습하기 위한 메타학습 기술 등이 연구되고 있다.

표 3.1 AGI의 레벨 분류

AGI 레벨(명칭)	능력 수준	약인공지능 사례	AGI 목표 및 사례
레벨 0 (No AI)	AI가 아님 (단순 연산 능력)	계산기, 컴파일러 등	• 인간이 컴퓨팅 프로세스에 직접 참여 • Amazon Mechanical Turk, Google Cloud Dataflow 등
레벨 1 (Emerging AGI)	숙련되지 않은 인간 수준	GOFAI(Good Old-Fashioned AI), 단순 룰베이스 시스템 등	• 낮은 수준의 패턴인식 및 기초 학습 능력 • 챗GPT(OpenAI), Bard(Google), Llama 2(Meta), Gemini(Google) 등
레벨 2 (Competent AGI)	숙련된 인간의 상위 50% 수준	시리(Apple), 알렉사(Amazon), 구글어시스턴트(Google), 왓슨(IBM) 등	• 복잡한 문제 해결 및 추상적 사고 능력 향상 • 없음
레벨 3 (Expert AGI)	숙련된 인간의 상위 10% 수준	그래머리(Grammarly), Dall-E 2(OpenAI), Imagen(Google) 등	• 인간 수준의 언어 이해 및 생성 능력 도달 • 없음
레벨 4 (Virtuoso AGI)	숙련된 인간의 상위 1% 수준	딥블루(IBM), 알파고(Google) 등	• 다양한 응용 분야에서 높은 수준의 성과 • 없음
레벨 5 (Artificial Super Intelligence)	숙련된 인간의 능력을 초월하는 수준	알파폴드(Google), 알파제로(Google) 등	• 자체 학습 및 발전이 가능한 완전한 AGI 도달 • 없음

출처: Morris et al.(2024).

해결해야 하는 과제

구글 딥마인드(Google DeepMind)는 AGI 레벨을 <표 3.1>과 같이 여섯 단계로 분류하였으며, 현재 AGI 수준은 숙달되지 않은 인간보다 약간 높거나 비슷한 수준(레벨 1)으로, 완전한 AGI 수준에 도달하기 위해서는 복합적 문제 해결 능력 및 자체 학습 능력을 개발해야 한다. 현재 기술로는 AGI를 구현하는 데 필요한 컴퓨팅 자원과 알고리즘의 효율성에 한계가 있어 이를 극복하기 위한 기술적인 혁신이 필요하다. 또한, AGI 개발 및 사용에 있어서 윤리적 문제는 반드시 고려해야 할 사항 중 하나이다. 인간과 유사한 혹은 더 높은 지능을 가진 인공지능이 윤리적 결정이나 작업을 수행할 때 일으킬 수 있는 사회적 문제를 고려하여 기술의 오남용을 최대한 방지해야 한다.

다 인공지능의 활용

1) 산업에서의 인공지능

기하급수적으로 발전하는 인공지능은 다양한 산업에서 사람을 대신해 여러 가지 일을 수행하고 있다.

대표적으로 생성형 인공지능을 이용한 사례로는 이미지를 생성하여 광고한 삼성생명과 인공지능 모델이 햄버거 그림과 관련된 음악을 창작하는 롯데리아 광고 등이 있다. 이러한 기술들은 마케팅과 광고 산업에서 혁신적인 변화를 가져오고 있다. 이뿐만 아니라, 사람을 대신해서 음식점에서 서비스를 제공하는 서빙 로봇 '딜리플레이트', 길을 안내해주는 안내 로봇 등도 인공지능 기술의 활용 사례로 주목받고 있다. 이들 로봇은 고객 서비스의 질을 높이고 인건비를 절감하며, 비즈니스 운영의 효율성을 극대화하는 데 기여하고 있다. 이외에도 제조업 분야에서 스마트 팩토리를 통해 생산 공정을 자동화하고 있고, 물류 분야에서 최적 경로를 계산하여 배송 효율성을 높이고 있으며 의료 분야에서 진단 보조 시스템을 통해 환자의 치료를 돕는 등 다양한 분야에서 실제로 인공지능이 쓰이고 있다.

2) 생활에서의 인공지능

인공지능은 산업에서 인간의 일을 대신할 뿐만 아니라 생활 편의를 도와주는 다양한 서비스를 제공한다. 대표적인 예로 AI 개인비서는 사용자의 일정 관리, 전화 걸기, 통화 내용을 텍스트로 변환 및 요약 등 다양한 작업을 자동적으로 수행하여 생활 편의를 제공한다. 일상 업무뿐만 아니라 수면 분석 등 AI 헬스케어 기술이 도입되어 건강 유지에도 도움이 되고 있다. 스마트 워치를 포함한 웨어러블 디바이스는 사용자의 운동량, 심박수, 수면 패턴 등을 모니터링하여 건강 상태를 실시간으로 체크하고 필요한 조언을 제공한다. 인공지능은 스마트 홈 기술에도 활용되고 있다. 스마트 스피커는 음성인식을 통해 음성을 재생하고, 날씨 정보를 제공하며, 일정 관리를 도와주는 등 다양한 기능을 제공한다. 이러한 기술들은 사용자의 일상생활을 더욱 편리하고 효율적으로 만들어준다.

3) 미래의 인공지능 활용 방향

현재 전 세계적으로 에너지 효율을 극대화하고 탄소 배출을 줄이기 위한 노력의 일환으로 인공지능 기술이 활발히 적용되고 있다. 국내 기업 또한 이러한 흐름에 맞추어 다양한 인공지능 기반 에너지 혁신을 추진하고 있다. 대표적으로 GS칼텍스는 인공지능을 활용한 운영 최적화를 본격적으로 시작했다. 공장의 일산화탄소 발생을 최소화하는 최적점을 찾아 불필요한 공정을 줄여 에너지 효율을 높이고 있다. 실제로 에너지 절감뿐 아니라 관련 비용도 5분의 1 수준으로 줄어 친환경과 비용 절감 두 가지를 모두 잡을 수 있었다.

현재 농림축산식품부의 '2050 농식품 탄소중립 추진전략'에 따라 데이터, 네트워크, 인공지능 기반의 정밀농업이 도입되는 중이고, 인공지능 기반 스마트팜 기술을 활용하여 작물관리와 에너지 절감을 동시에 추구하며 2050년까지 농가의 60%에 정밀농업 기술을 보급하는 것을 목표로 하고 있다.

미래에는 이런 인공지능 기술을 활용한 에너지 자립형 스마트시티가 구축될 것으로 예상된다. 도시 전체의 에너지 흐름을 인공지능이 실시간으로 분석하고 최적화하여 에너지 사용 효율을 극대화할 것이며, 대표적인 사례로 인공지능 기반 전력망 관리, 자율주행 전기차 인프라, 재생에너지 통합 관리 시스템 등이 활용될 수 있다. 또한 탄소중립 이슈와도 연계하여, 2050년 탄소중립 목표 달성을 위해 인공지능 기반 기술의 도입이 가속화할 것으로 보인다. 구체적으로, 산업 전반에 걸쳐 인공지능을 통한 에너지 소비 패턴 분석, 탄소 배출 감축 전략 등을 수립하고 실행할 것이다.

라 인공지능에 대한 국가 정책 현황

인공지능은 생활의 편리함과 다양한 혜택을 제공하지만, 동시에 피해를 초래할 가능성도 존재한다. 이에 따라 각국은 인공지능 규제 정책에 대해 상반된 접근을 보인다. 미국과 중국 등의 인공지능 선도국은 인재들을 지속적으로 양성하고 기업의 자율 규제에 초점을 맞춘 정책을 추진하는 한편 EU는 규제 강화를 통해 잠재적 위험을 관리하려는 경향이 강하다. 그러나 최근에 유럽에서도 인공지능 산업을 촉진하기 위해 규제를 완화하려는 움직임이 있다. 이제 주요국들의 인공지능 정책을 살펴보자.

1) 미국

미국의 디지털 인재 양성 정책

미국의 AI 정책은 글로벌 시장에서 AI 경쟁력을 유지하고, 안전하고 신뢰할 수 있는 AI 발전을 추구하는 것이다. AI 인재 확보를 위해 '국가 AI R&D 전략계획', '안전하고 신뢰성 있는 AI를 위한 행정명령' 등을 통해 AI 분야에 필요한 기술 인력을 평가하여 교육하고 글로벌 AI 인력 확보를 위해 비자 제도를 개편하였다. 또한 「인공지능교육법」을 제정하여 AI 오용 가능성을 감소시키고, 정부 관계자들이 정부의 수요에 가장 적합한 인공지능 시스템을 도입할 수 있도록 하기 위해 연방 행정 각부, 산하기관 등에 AI 교육을 시행하고 있다.

바이든, 최초 인공지능 행정명령 발령(2023.11.30.)

인공지능의 안전 및 보안에 대한 새로운 표준을 확립하기 위해 최초 인공지능 행정명령을 발령하였으며, 이를 통해 개인정보 등 민감한 정보를 보호하며 인공지능 알고리즘이 차별 악화에 사용되는 것을 방지하고자 하였다. 뿐만 아니라, 인공지능 시스템에 대해 안정성과 신뢰성을 확인할 수 있는 테스트 등을 확립하도록 지시하였다.

미국 유타주의 「인공지능 수정법」(Artificial Intelligence Amendments, SB0149)

유타주(State of Utah)는 주정부 차원으로는 최초로 생성형 인공지능 이용 고지 및 인공지능 기술개발과 규제 완화를 위한 법적 근거로 「인공지능 수정법」을 마련(24.03.13. 제정, 24.05.01. 시행)하였다(채은선, 2024).

- **생성형 인공지능을 이용하여 서비스를 제공하는 경우 이를 소비자에게 고지**
  규제 직종 종사자(회계사, 건축가, 치료사 등)가 생성형 인공지능을 사용할 때 소비자에게 고지 의무가 부과되었다. 통신, 재산 거래, 웹사이트, 소비자 개인정보 등 소비자 보호 분야에서 생성형 인공지능을 사용 시, 요청이 있을 경우 명확하고 분명하게 고지를 해야 한다. 만약, 공개 의무 위반 시 최대 2,500 USD의 과태료 부과 및 민사상 벌금 부과가 가능하고 법무장관이 대신 소송 제기가 가능하다.
- **인공지능정책법 수립**
  상무부에 인공지능 정책 사무소를 설치·운영하고 인공지능 연구 프로그램 수립·운영하도록 정책을 펼쳤다.

2) 중국

중국의 인공지능 인재 양성

2017년 8월 중국 공산당 중앙위원회와 국무원에 의해 발표된 '차세대 인공지능 발전계획'을 통해 '전 국민의 인공지능 교육 사업을 단계적으로 실시하고 초중등 학교에 인공지능 관련 교과를 개설하며, 프로그래밍 교육을 점진적으로 추진' 등 다양한 단계적 목표를 세우며 실질적인 발전을 이뤄내고 있다. 이후 지속해서 '고등교육기관 AI 혁신 행동 계획', '중국 인공지능 인재양성 백서' 등을 통해 국가 주도로 AI 인재를 양성하고 있으며, 대학을 중심으로 기업이 보조하는 형태의 인재 양성을 추진하고 있다. 대학에서 실무에 바로 투입할 수 있는 실습 기반 교육을 하고, 빅테크 기업에서 인공지능 대회, 단기 교육을 통해 실전 경험을 유도하여 인재 인증 제도를 활성화함으로써 AI 인재 양성에 힘쓰고 있다(이수진, 2023).

인공지능 산업 육성책 'AI+행동' 공개

중국 정부는 2024년 3월 5일 전국 인민대표대회에서 발표한 업무보고서에서 디지털 경제 혁신 발전을 강조하며, 디지털 산업화와 산업 디지털화를 적극 추진할 것을 밝혔다. 'AI+행동'의 주요 내용으로는 디지털 기술과 실물 경제의 융합 촉진, 빅데이터 및 인공지능 연구·응용 심화, 데이터 기초 체계 완비, 인터넷 플랫폼 기업 지원 등이 있다.

3) EU

독일의 인더스트리 4.0

2006년 하이테크 전략(Die Hightech-Strategies fur Deutschland)에서 인더스트리 4.0을 최초로 개념화한 후, 현재 2030년까지의 장기 비전을 가지고 관련 정책을 추진 중이다. 인더스트리 4.0 정책의 추진은 2016년 다보스 포럼에서 제4차 산업혁명이 주제로 선정되기 이전부터 시작된 것으로 제조업 강국으로서 앞선 행보를 보인다. 인더스트리 4.0의 개념 및 전략은 독일 AI 연구소가 주도한 것으로 제조업 시스템의 지능화를 목표로 하고 있다(오연주, 2022).

독일과 프랑스 등 대형언어모델 규제를 위한 강력한 장치 마련 반대

프랑스, 독일, 이탈리아 등 여러 EU 회원국 대표자들이 기초 모델에 대한 모든 유형의 규제를 반대하고 있다. 이는 자국 내 인공지능 기업을 대표 대형언어모델 기업으로 키우기 위함이 크다. 프랑스의 경우 자국의 '미스트랄 AI'를 전폭 지지하고 독일 역시 작년 11월 'Aleph Alpha'에 5억 달러(약 6,500억 원)를 몰아주며 지원하고 있다. 이들은 비영어권 데이터로 학습한 인공지능의 필요성을 주장하고 있어 단순히 국가 문제로 보기 어렵다는 입장이며 EU가 인공지능 발전을 막아 미국이나 중국보다 더 뒤처질 수 있다는 논리로 반대를 하고 있다.

4) 우리나라 현황 및 정책적 대비 상황

우리나라 인공지능 기술 현황

우리나라의 인공지능 기술수준은 아직 세계 최고 수준인 미국과 중국에 비해 미흡한 측면이 있지만, 최근 몇 년간 가장 빠르게 발전하고 있다. 전반적 기술수준에서는 2022년 기준 미국을 100으로 할 때, 한국은 88.9%로 평가되었으며, 기초단계, 응용단계, 사업화 단계에서도 각각 88.0%, 90.1%, 88.6%를 기록했다. 특히 응용단계 인공지능 기술수준은 2018년 대비 8.7% 향상되어 주요국 중 가장 빠른 발전을 보였다. 또한 AI 기술분야별로 보면, 학습지능 분야에서 미국 대비 기술격차가 2018년 2.0년에서 2022년 1.3년으로 축소되었고, 단일지능 분야에서도 2018년 2.0년에서 2022년 1.5년으로 단축되었다. 복합지능 분야에서는 2018년 2.0년에서 2022년 1.0년으로 축소되는 등 우리나라는 전반적으로 기술격차를 줄이며 빠르게 성장하고 있다(봉강호, 2024).

우리나라의 정책적 지원

과학기술정보통신부는 2023년 4월, '초거대 인공지능 경쟁력 강화 방안'을 발표하며, 국가전략기술로서 AI를 포함한 연구개발 예산을 확대 편성했다. 이는 AI 기술발전을 위한 선제적이고 체계적인 지원 방안으로, 다음과 같은 주요 정책을 포함한다(진회승 외, 2023).

- **연구개발 투자 확대**
  인공지능 분야의 핵심기술 개발을 위한 연구개발 투자를 확대하고, 이를 통해 기술력을 강화한다.
- **인재양성**
  인공지능 분야의 우수 인재를 양성하기 위해 대학, 연구기관, 기업 간의 협력 프로그램을 운영한다.
- **산업 생태계 조성**
  인공지능 스타트업을 육성하고, 대기업과 중소기업 간 협업을 촉진하여 인공지능 산업 생태계를 구축한다.
- **국제 협력 강화**
  글로벌 인공지능 선도국과의 협력을 통해 기술 교류 및 공동연구를 추진한다.

정책적 대비 방안

- **지속적인 연구개발 투자**
  정부와 민간이 협력하여 지속적인 연구개발 투자를 확대하고 이를 통해 기술 격차를 줄이는 노력이 필요하다.
- **실용적 인공지능 응용 확대**
  인공지능 기술의 상용화와 응용을 촉진해 산업 전반에 걸친 생산성 향상을 도모한다.
- **데이터 인프라 강화**
  인공지능 개발에 필수적인 데이터의 확보와 활용을 위해 데이터 인프라를 강화하고, 데이터 공유와 활용을 촉진하는 정책을 마련한다.
- **국제 표준화 및 규제 마련**
  인공지능 기술의 글로벌 경쟁력을 확보하기 위해 국제 표준화 작업에 적극 참여하고, 인공지능 기술에 대한 윤리적, 법적 규제를 마련하여 안전한 인공지능 활용 환경을 조성한다.
- **민관 협력 강화**
  정부와 민간의 긴밀한 협력을 통해 인공지능 기술 발전과 산업 생태계 구축을 촉진하며, 국가 차원의 종합적 전략을 수립한다.

이와 같은 정책적 대비를 통해 우리나라는 글로벌 인공지능 경쟁에서 우위를 정하고, 차세대 인공지능 기술 패러다임의 변화를 선도할 수 있을 것이다.

마 맺음말

인공지능 기술의 급격한 발전은 이미 우리의 일상생활과 다양한 산업 분야에서 그 영향을 보여주고 있으며, 앞으로도 그 중요성과 역할은 더욱 커질 것으로 예상된다. 생성형 인공지능의 발전과 더불어 대형언어모델과 멀티모달 언어모델의 등장으로 인공지능의 적용 범위와 효율성은 획기적으로 향상되고 있다. 이러한 기술 발전은 특정 작업에 국한되지 않고 인간처럼 다양한 지적 작업을 수행할 수 있는 AGI의 연구로 이어졌으며, 인류가 직면한 복잡한 문제들을 해결하는 데 새로운 가능성을 제시한다. 그러나 AGI의 실현을 위해서는 복합적 문제 해결 능력, 자가 학습 능력, 윤리적 문제 해결 등의 과제가 남아 있으며, 이를 극복하기 위한 기술적, 정책적 노력이 필요하다. 이에 따라 각국 정부는 인공지능 기술 발전을 지원하고 규제하는 정책을 마련하고 있으며, 우리나라도 연구개발 투자 확대, 인재 양성, 산업 생태계 조성, 국제 협력 강화 등의 정책적 노력을 통해 글로벌 인공지능 경쟁에서 우위를 점하고자 한다.

결론적으로 인공지능 기술의 발전은 우리 사회의 혁신과 변화를 주도할 것이며 이러한 변화를 효과적으로 관리하고 활용하기 위해서는 기술적 발전과 함께 윤리적, 법적, 정책적 대비가 필수적이다. 지속적인 연구개발과 국제 협력을 통해 인공지능 기술을 선도하고, 이를 통해 더 나은 미래를 만들어 나가는 노력이 필요하다.

참고문헌

봉강호(2024). “우리나라 및 주요국 인공지능(AI) 기술 수준의 최근 변화 추이(2023년 조사 기준)”, 제116권, 소프트웨어정책연구소, pp. 4-11.

오연주(2022). “주요국 인공지능(AI) 전략 분석(하)”, 제10호, 한국지능정보사회진흥원(NIA), IT & Future Strategy 보고서, pp. 1-93.

이수진(2023). “중국의 인공지능(AI) 교육 현황 및 주요 정책분석”, 인공지능연구 논문지, 제4권 제2호, 한국인공지능교육학회, pp. 1-14.

진회승·윤보성·신승윤(2023). “생성형 AI에 대응한 SW 인재 양성 정책 방향 연구”, 제158권, 소프트웨어 정책연구소, pp. 1-154.

채은선(2024). “美유타주, 「인공지능 수정법」의 주요 내용 및 시사점”, 제24권 제5호, 한국지능정보사회진흥원(NIA) 디지털 법제 Brief, pp. 1-6.

Alayrac, J.-B., Donahue, J., Luc, P., Miech, A., Barr, I., Hasson, Y., Lenc, K., Mensch, A., Millican, K., Reynolds, M., Ring, R., Rutherford, E., Cabi, S., Han, T., Gong, Z., Samangooei, S., Monteiro, M., Menick, J. L., Borgeaud, S., Brock, A., Nematzadeh, A., Sharifzadeh, S., Bińkowski, M., Barreira, R., Vinyals, O., Zisserman, A. & Simonyan, K.(2022). “Flamingo: a Visual Language Model for Few-Shot Learning”, Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), Vol.35, pp. 23716~23736.

Minaee, S., Mikolov, T., Nikzad, N., Chenaghlu, M., Socher, R., Amatriain, X. & Gao, J.(2024). “Large Language Models: A survey”, arXiv preprint arXiv:2402.06196.

Morris, M. R., Sohl-Dickstein, J., Fiedel, N., Warkentin, T., Dafoe, A., Faust, A., Farabet, C. & Legg, S.(2024). “Position: Levels of AGI for Operationalizing Progress on the Path to AGI”, Proceedings of the International Conference on Machine Learning (ICML), Vol.235, pp. 36308~36321.

Radford, A., Kim, J. W., Hallacy, C., Ramesh, A., Goh, G., Agarwal, S., Sastry, G., Askell, A., Mishkin, P., Clark, J., Krueger, G. & Sutskever, I.(2021). “Learning Transferable Visual Models From Natural Language Supervision”, Proceedings of the International Conference on Machine Learning (ICML), Vol.139, pp. 8748~8763.

Zhang, D., Yu, Y., Dong, J., Li, C., Su, D., Chu, C. & Yu, D.(2024). “MM-LLMs: Recent Advances in MultiModal Large Language Models”, Findings of the Association for Computational Linguistics (ACL), Vol.1 No.738, pp. 12401~12430.

PART 3

3

AI 기술 발전 전망 및 국내 산업의 새로운 도약 전략

이경무
서울대학교 전기정보공학부 석좌교수

가 들어가는 말

40년 전 필자가 처음 인공지능(AI)에 관심을 가졌을 때만 해도, AI는 우리 세대에서는 결코 이루어질 수 없는 환상에 가까운 기술이었다. 불과 10여 년 전만 해도 운전자 없는 자율자동차, 인공지능 비서, 그리고 지능형 로봇들은 영화나 만화에서 보아왔지만, 상상일 뿐 그것들이 가까운 미래에 현실이 될 것이라고 믿는 사람은 거의 없었다. 2012년 혁신적인 AlexNet이 발표된 이후 딥러닝(Deep Learning) 기반의 AI 기술은 믿을 수 없을 만큼 빠른 속도로 발전하고 있다. 그러나 2010년도 초중반까지만 해도 AI 분야 학자들 사이에서조차 딥러닝의 성능에 대해 반신반의하는 경향이 있었고 그 지속 가능성에 대해서도 의견이 분분했다. 그 이후 AlphaGo, ResNet, GAN(Generative Adversarial Network), Transformer, Diffusion Model 등 여러 획기적인 돌파(breakthrough) 기술들의 개발로 다양한 분야의 기존 난제들이 해결될 수 있음을 속속 보여줌으로써 현재는 모든 문제에 이러한 딥러닝 기술을 사용하는 것이 학계와 산업계의 표준이 되었다.

딥러닝 기반 AI 기술의 발전에는 새로운 아키텍처와 학습 알고리즘의 개발도 기여한 바 적지 않지만 최근의 경향은 'scaling law', 즉 규모의 법칙이 견인한 측면이 크다. 대규모의 GPU와 수많은 학습데이터로 훈련된 챗GPT와 같은 생성형 대형언어모델(LLM)에 천문학적인 자원이 투입되었는데, 전문가들조차도 예상치 못한 결과로 모두를 놀라게 하고 있다. 이러한 초거대 인공지능 모델 개발에 대한 노력은 당분간 가속화할 것으로 예상되며 아직 한계에 도달했다고 보기에는 이르다. 오히려 지금부터가 시작이라고 보는 것이 타당할 것이다. 최근에는 단순한 언어모델을 넘어서 이미지, 비디오, 음성, 텍스트 등을 복합적으로 분석하고 이해하는 멀티모달(multi-modal) AI, 그리고 로봇, 가전, 기계 등 물리적인 기기에 결합하는 임바디드(embodied) AI로의 확장이 본격화하기 시작했는데, 이에 대해 많은 사람들은 범용인공지능(AGI)의 도래가 목전에 왔을 수도 있다는 기대를 품기도 한다.

현재는 AI 기술의 급작스러운 출현으로 인류 역사 상 가장 중대한 산업적, 사회적 변혁이 일어날 것이라는 기대와 동시에 우려가 교차하고 있다. 이전의 산업혁명이 특정 분야에서의 변혁을 가져왔고 상대적으로 장기간에 걸쳐 진행되었던 것에 비해 AI에 의한 혁명은 모든 산업과 인류의 삶 전체의 패러다임을 근본적이며 단시간에 바꿀 수 있는 특징을 가지고 있어 무게가 다르다. 이는 AI로 인해 기존의 국가, 산업, 노동, 경제, 사회, 개인 간의 역할과 질서가 새로운 차원으로 급격히 재편될 수 있다는 것을 의미한다.

따라서 이러한 대변혁의 시기에 새로운 AI 기술의 능력과 파급력, 그리고 위험 요소를 정확히 파악하고 경쟁력 있는 핵심기술을 확보함으로써 우리 산업과 사회를 한 단계 도약시킬 수 있는 전략을 마련하고 실행하는 것은 미룰 수 없는 숙제이다.

나 AI 기술의 현황 및 발전 방향

1) AI 기술의 현황

1957년에 개발된 최초의 인공 신경망인 Perceptron Mark I(Rosenblatt, 1957)는 오른쪽에 표시된 카드와 왼쪽에 표시된 카드를 구별하는 단순한 태스크를 수행하였다. 이 네트워크는 1,000개의 인공 뉴런으로 이루어져 있었으며, 훈련에는 약 70만 번의 연산이 필요했다. 65년이 지난 2023년 OpenAI에서 발표한 대규모 언어모델인 챗GPT4(OpenAI, 2023)는 1.7조 개의 파라미터로 구성되었으며 훈련을 위해 13조 개의 토큰으로 55조 번의 연산이 필요했는데, 이를 수행하는 데 25,000개의 NVIDIA A100 GPU로 100일의 시간이 소요되었다. Perceptron Mark I는 단 6개의 데이터 포인트로 훈련된 반면, 최근 메타에서 개발한 대형언어모델인 LlaMa는 약 10억 개의 데이터 포인트로 훈련되었으며, 이는 Perceptron Mark I보다 1억 6천만 배 이상 증가한 것이다.

<그림 3.4>는 AI 시스템의 컴퓨팅 증가 추이를 보여주는데, 2010년 이후 최근까지 학습에 사용된 계산량이 매년 약 4배씩 증가한 것을 알 수 있다(Epoch, 2024). 이와 더불어 학습 데이터셋 연 2.5배, 학습 알고리즘 효율성 연 1.5~3배, 그리고 하드웨어 효율성 또한 연 1.5배가량 증가된 것으로 보고되고 있다.

이러한 많은 계산량과 데이터를 사용하는 'scaling up' 방법이 최근의 획기적인 AI 능력 향상을 주도했다는 점에는 많은 AI 연구자들이 동의하고 있다. scaling up 방식은 AI 시스템으로 하여금 더 많은 양의 데이터를 학습하게 하고, 다양한 경우의 수를 배우게 하며 데이터 내 변수 간의 관계를 더 고차원적으로 모델링할 수 있게 함으로써 더 정확하고 심층적인 결론을 도출하도록 한다.

특히 최근의 생성형 모델에 기반한 대규모 AI 시스템의 비약적인 발전으로 챗봇뿐 아니라 이미지, 동영상, 3D 생성 분야에서까지 획기적인 변화가 일어나고 있다. 2024년 스탠포드대학교의 AI Index

그림 3.4 AI 모델들의 학습계산량 추이



출처: Sevilla & Roldan(2024).

Report(Stanford University, 2024)에 따르면 현재의 AI 시스템은 이미지 분류, 시각적 추론 및 영어 이해를 포함한 벤치마크 등 여러 분야에서 인간의 성능을 이미 능가하였고 수학, 시각적 상식 추론 및 계획과 같은 복잡한 작업에 있어서도 인간 수준에 근접하고 있는 것으로 나타났다.

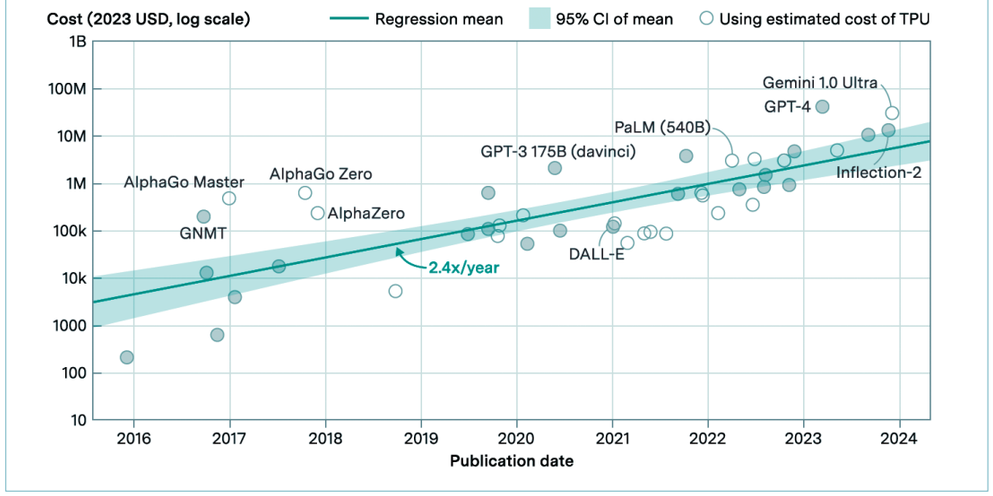
최근의 대규모 AI 모델 개발이 특정 기업들을 중심으로 이루어지고 있는 데 대해 기대와 우려가 공존한다. 오픈AI나 구글과 같은 기업들이 이러한 인공지능 모델 개발에 많은 자원을 투입하지 않았다면, 우리는 오늘날처럼 발전된 AI 모델을 갖지 못했을 것은 물론이거니와 인공지능의 잠재력이 얼마나 큰지조차 알 수 없었을 것이다. 반면에, 이윤을 추구하는 기업들이 AI와 같은 파괴력이 있고 위험성을 내포하고 있는 기술을 사회가 따라가고 적응하기도 전에 빠르게 개발하고 결정하는 상황에 대한 우려도 크다. 이것은 AI의 안전 및 규제와 관련된 문제이며, AI 기술이 인류에게 공공의 선으로서 이익이 되는 방향으로 개발되도록 유도하고 보장하는 것이 무엇보다 중요하다.

2) 거대 AI 모델의 발전과 지속 가능성

오늘날 우리가 목도하고 있는 AI의 놀라운 성능은 대부분 소위 scaling law에 기인하는데, 컴퓨팅 파워와 데이터의 규모가 커짐에 따라 개발자들조차도 예측하지 못한 성능이 발현되는 현상 즉, 'emergent ability' 또는 '양에서 질로의 변환' 현상이 두드러지고 있다. AI 기술이 현재와 같은 속도로 계속 발전할 수 있는가, 특히 이러한 양적 증가에 기반한 발전이 지속 가능할지에 대해서는 의견이 분분하다. 이것은 구체적으로 컴퓨팅 자원의 관점, 알고리즘 관점, 비즈니스와 산업적 관점, 그리고 규제적 관점에서 살펴볼 수 있을 것이다.

먼저 컴퓨팅 자원의 관점에서 보자면, <그림 3.5>처럼 대규모 AI 학습에 필요한 하드웨어 수요는 지난 10여 년간 기하급수적으로 증가해 왔고 앞으로도 계속해서 증가할 전망이다. AI 개발을 위해서는 일반적으로 자체 컴퓨팅 인프라를 구축하거나, 클라우드 컴퓨팅 서비스를 이용해야 한다. 챗GPT4의 경우 학습에만 약 1억 달러 이상이 소요된 것으로 알려져 있다.

그림 3.5 AI 모델의 학습비용 추이

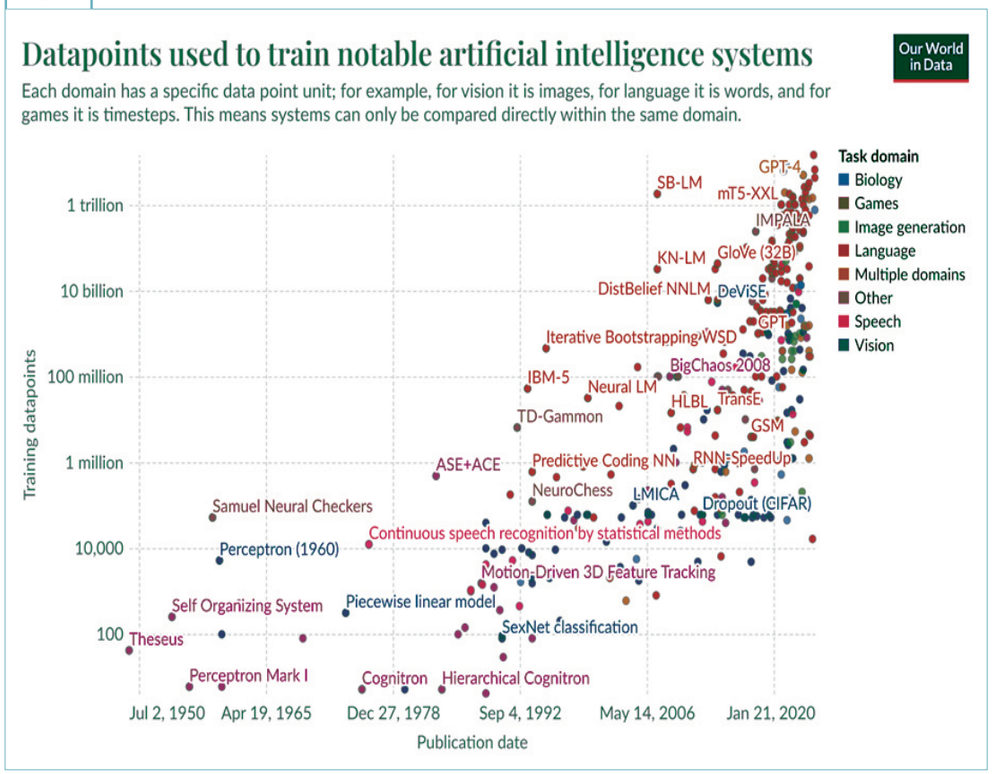


출처: Cottier et al.(2024).

AI 시스템을 학습하는 것뿐만 아니라 추론(inference)하는 데에도 컴퓨팅 자원이 크게 증가하고 있다는 점도 주목할 필요가 있다. 몇몇 거대 모델의 경우 학습에 소요되는 컴퓨팅보다 추론에 필요한 자원이 많은 것으로 보고되고 있다. 더군다나 조만간 텍스트만이 아닌 멀티모달 데이터 기반의 AI 시스템이 대세가 될 것이라는 점을 고려하면 컴퓨팅 자원의 수요는 상상 이상이 될 가능성이 있다. 그러나 고성능 AI 서

버를 만드는 데 필요한 GPU, 패키징, 고대역폭 메모리 및 기타 구성 부품들의 공급망 부족, 그리고 필요한 수요를 충족하기 위한 반도체 공장의 증설 등은 물리적·시간적 한계가 있기 때문에 AI 발전을 지연시키는 요소로 작용할 수 있다.

그림 3.6 AI 모델 학습데이터 양 추이



출처: Our World in Data(2024a).

데이터의 관점에서 보면, 최근 대규모 AI 모델들의 경우 그동안 인터넷 등에서 텍스트, 영상 등 대규모의 학습데이터들을 수집함으로써 매년 2.5배 이상 그 규모를 늘릴 수 있었다(<그림 3.6>). 이러한 추세를 근거로 Epoch은 2026년을 기점으로 학습에 사용할 수 있는 고퀄리티의 텍스트 데이터가 고갈될 것이라는 전망도 내놓고 있다(Epoch, 2024). 2024년부터는 이미지, 오디오, 동영상 등 멀티모달 AI 시스템들의 개발이 본격화하기 시작했는데, 멀티모달과 관련해서는 아직 많은 양의 데이터들이 존재하기는 하나 저작권과 비용문제가 걸림돌이 될 수도 있다. 그리고 가상데이터를 생성해서 사용하는 기법들이 고도화됨에 따라 실제와 구별할 수 없는 가상데이터의 무한한 생성 및 활용이 대안이 될 수 있다. 또한 AlphaGo 학습의 예에서처럼 다중 AI 시스템 간의 상호 학습 기법을 통해 데이터 부족 문제를 해결할 수도 있다. 더불어 AI 알고리즘의 진보에 따라 적은 학습데이터 또는 학습데이터를 필요로 하지 않는 few-shot learning, unsupervised learning, self-learning 등의 학습 기법들이 발전함에 따라 실제 데이터에 대한 의존도가 약해질 가능성도 있다. 데이터 관점에서 한 가지 더 주목할 부분은 향후 범용 pre-trained AI 시스템들이 도메인 특화 시스템 또는 개인맞춤형 시스템으로 세분화될 것이므로 이에 필요한 분야별 특화 데이터들의 확보가 중요한 이슈가 될 것이라는 점이다.

알고리즘 관점에서 보면 그동안 새로운 AI 알고리즘의 개발은 하드웨어와 데이터를 효과적으로 사용할 수 있게 함으로써 리소스에 대한 의존도를 낮추는 역할을 해 왔다. 최근 범용 AI 시스템들에 사용되는 학습 알고리즘의 효율성은 매년 1.5~3배 정도 증가한 것으로 보고되고 있다. Epoch의 연구(Epoch, 2024)에 따르면 매 9개월마다 더 효율적인 알고리즘의 도입으로 컴퓨팅 예산의 두 배 증가와 맞먹는 효과를 가져왔다고 한다.

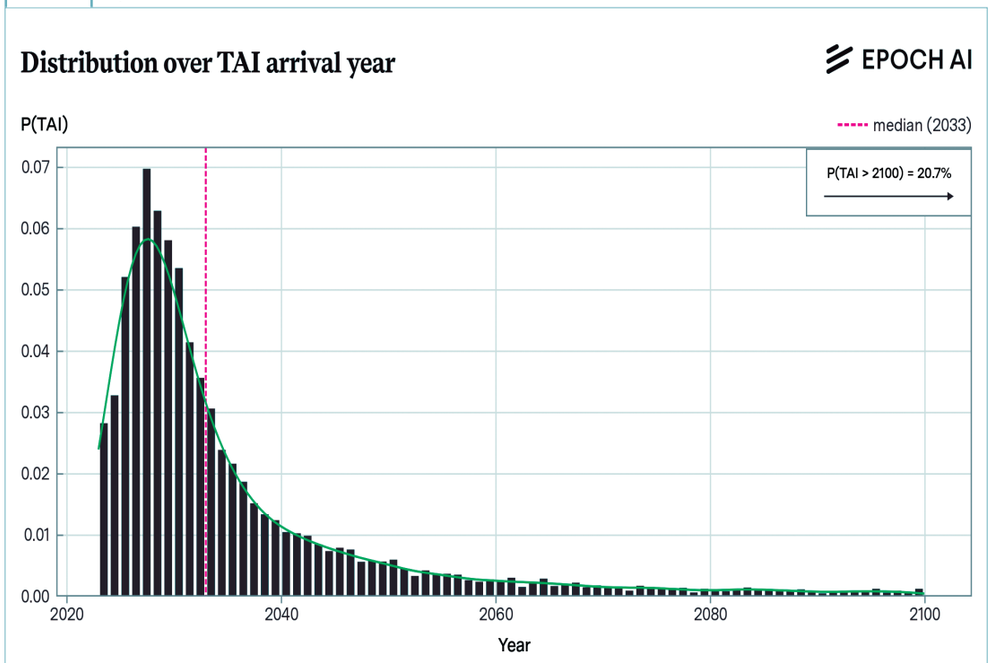
에너지 문제 또한 AI 발전의 지속 가능성에 걸림돌로 작용할 수 있다. AI 학습에 필요한 전력량은 매년 4배씩 증가하고 있고 하드웨어의 개선과 알고리즘의 효율화를 감안하더라도 전력소비량은 증가할 것으로 전망된다. 현재의 추세대로라면, 전 세계적으로 AI 시스템을 운영하는 데 사용되는 전기량이 2026년경 70TWh로 오스트리아 전체의 전기사용량에 육박한다는 보고가 있다. 발전소를 새로 착공하고 전력 인프라를 확충하는 것은 물리적 시간을 요하는 것이므로 지연의 요소가 될 수 있다.

현재의 기업주도의 대규모 AI 개발 트렌드가 지속 가능하기 위해서는 투자대비 이익이 확보되어야 한다. 챗GPT4의 경우 총 개발비용에 대한 정확한 정보가 제공되고 있지는 않지만 학습하는 데 약 1억 달러가 소요되었다고 한다. 오픈AI는 2024년 37억 달러의 매출을 예상하고 있는데, 이는 전년도 대비 200% 성장을 의미한다. 대부분의 수익이 챗GPT 구독서비스에 의해 발생하고 있는데, 챗GPT 운영 비용이 매일 약 70만 달러 정도인 것을 고려하면 연 2억6천만 달러의 비용이 투입되는 것이므로 비용대비 수익은 충분하다고 볼 수 있다. 현재, 챗GPT의 경우 유료 구독자의 수가 2024년 말 기준 전세계적으로 수천만 명 규모인 것으로 알려져 있다. 챗GPT-4o가 본격적으로 공개되면 더 많은 사용자가 가입할 것으로 예측하지만, 전문가들뿐 아니라 일반인들이 일상생활 속에서 AI를 보편적으로 사용할 수 있도록 하기 위해서는 성능 혁신과 더불어 서비스 고도화의 필요성이 존재한다. 향후 챗GPT5와 같은 한층 고도화된 모델이 출시되고, 약 1억 명의 사용자가 챗GPT 서비스에 유료 가입한다고 가정하면, 매달 20억 달러, 연 240억 달러의 매출이 발생할 수 있다. 이것은 전 세계 인구의 단 1.3%만이 사용한다는 가정이고 챗GPT가 스마트폰과 같이 일상화될 경우에는 그 시장규모가 상상을 초월할 것이다. 또한 단순한 챗봇으로의 상품에 그치지 않고 다양한 응용파생기술과 제품들이 등장한다면 시장은 급격히 확대될 수 있다. 그러나 AI 기술의 특성상 대규모 투자와 초격차기술 확보의 선순환 구조를 구축한 오픈AI나 구글과 같은 선도기업이 시장을 독점할 가능성이 크며 이를 타개할 만한 새로운 기술적 혁신 없이는 나머지 대부분의 기업들은 상대적으로 경쟁에서 도태되는 어려움에 처할 수도 있다.

3) 범용인공지능은 실현 가능한가? 언제 가능하게 될 것인가?

최근 AI의 급속한 발전으로 범용인공지능(AGI)이 언제 실현 가능할지에 대해 많은 관심이 집중되고 있다. 사실 AGI 또는 Super-intelligence에 대한 명확한 정의가 확립되어 있지 않고 또 그것을 측정할 만한 명확한 기준이 제시되지 않은 상태에서 언제 그것이 달성될 것인지에 대한 질문은 모호하고 개인마다 대답이 다를 수 있다. 넓은 의미로 AGI를 통상 '대부분의 인지관련 태스크들에 대해 사람과 동등 또는 그 이상의 능력을 갖는 AI 시스템'으로 해석하더라도 그것의 도래 시기에 대해서는 전문가 간 견해차가 크다. Ray Kurzweil(Google director), Louis Rosenberg(Unanimous AI CEO), Elon Musk(Tesla CEO), Sam Altman(OpenAI CEO), Dario Amodei(Anthropic VEO) 등은 AGI가 5년 내지 10년 사이에 개발될 것이라고 예측하고 있는 반면, Jürgen Schmidhuber(co-founder of NNAISENSE), Rodney Brooks(MIT professor) 등은 수십 년 또는 수백 년이 걸릴 것으로 내다봤다. Epoch의 연구자들이 최근 scaling law에 기반한 계산량 기준으로 TAI(Transformative AI; AGI와 유사개념)의 도래 시기를 예측한 결과에 따르면(<그림 3.7>), 2025년까지는 10%, 2033년까지는 50%의 확률로 AGI가 달성될 것으로 분석되었다. 이는 여러 선도적 AI 기업의 CEO들이 예측한 것과 유사하다.

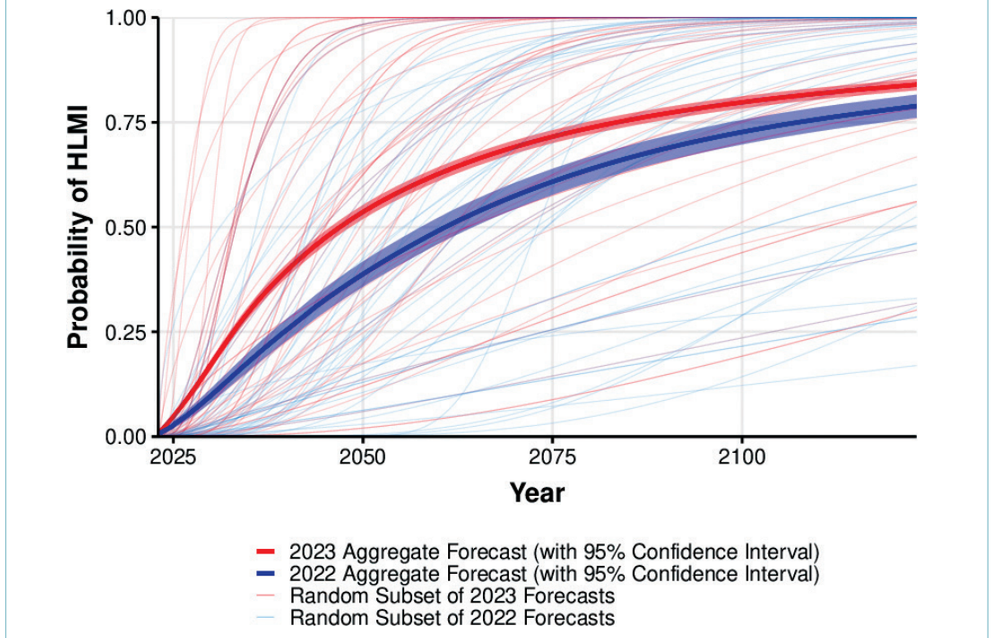
그림 3.7 Epoch의 TAI(AGI) 도래 시기 예측



출처: Atkinson et al.(2024).

2023년 2,778명의 전문가들을 대상으로 한 설문조사(Grace et al., 2024)에서는 10%가 2027년, 50%가 2047년경으로 AGI 도래 시기를 예상하고 있다(<그림 3.8>). 동일한 질문에 대한 2022년 설문조사에서 전문가들의 10%가 2029년, 50%가 2060년을 예상했던 것과 비교하면 1년 사이에 많은 변화가 있었음을 알 수 있다. 이는 전문가들조차도 AI의 빠른 발전을 예상하지 못했다는 것을 방증한다. 만약 챗GPT-4o, Sora, Figure Robot 등 더욱 고도화된 시스템들이 발표된 현 시점에서 동일한 설문조사가 진행된다면 훨씬 많은 사람들이 AGI 도래 시기를 앞당겨 예측할 것이라고 본다. 분명한 사실은, AGI 도래 시점에 대해서는 여전히 의견이 분분하나 예상보다 그 시기가 훨씬 앞당겨질 수 있다는 점에는 대부분 공감한다는 것이다.

그림 3.8 AI 전문가들의 AGI 도래 시기 예측



출처: Grace et al.(2024).

필자는 AGI의 개념에 실제 환경에서 인간이 수행할 수 있는 모든 태스크들을 포함한다면 물리적인 환경에서의 멀티모달 인식, 추론, 동작, 상호작용까지 수행하는 완벽한 휴머노이드 로봇의 개발을 의미하는 것이기 때문에 도래 시기가 훨씬 늦어질 수 있겠지만, 협의적 개념으로 영화 'Her'에서의 '아만다', 그리고 '아이언맨'에서의 '자비스'와 같은 챗봇 기반의 AI assistant 관점에서 본다면 현재의 대형언어모델들은 몇몇 부족한 점에도 불구하고 AGI의 초기 수준에 상당히 근접한 것으로 보인다. 이는 최소한 채팅에 있어서는 전문지식뿐 아니라 일상대화에서 Turing test를 통과할 수준이 되었다고 보기 때문이다. 따라

서 빠르면 3~5년 안에 성숙된 단계의 AGI 수준 챗봇을 만나볼 수 있을 것으로 기대된다. 멀티모달 영역은 이제 막 시작 단계이나 이 또한 머지않아 인간 수준에 버금가는 결과를 보여줄 것으로 예상된다. 이것은 scaling law에 의해 예측 가능한 'more and more' 특성뿐 아니라 대규모의 멀티모달 학습이 이루어졌을 때, 우리가 예상하지 못한 더욱 놀라운 emergent ability를 갖게 되는 'more and new' 현상이 발현할 가능성이 더욱 높아질 수 있기 때문이다.

AGI의 도래가 먼 미래가 아닐 수 있다는 사실은 사람들에게 희망과 공포를 동시에 불러일으킬 수 있다. 노동으로부터의 해방, 생산력 극대화, 복지 및 삶의 질 향상, 난제 해결 등 유토피아적 기대와 함께 AGI의 통제 상실로부터 오는 위협, 개인·국가 간 AI 격차 및 불평등 심화, 노동시장의 변화 등 디스토피아적 견해도 설득력을 얻고 있다. 이러한 AGI 관련 이슈는 현재 챗GPT 수준의 general purpose AI(GPAI)가 갖는 것과 차원이 다른 심각성을 내포하고 있고, 우리에게 AGI를 어떻게 전개하고 받아들일지에 대한 직접적이고 빠른 판단과 행동을 요구하고 있다. 각국의 상황에 따라 서로 다른 전략을 모색하겠지만, 우리나라의 경우 기본적으로는 지속적인 기술개발을 추구하되 최소한의 안전장치(guard rail) 마련을 병행하는 것이 합리적일 것이다.

다 우리의 AI 역량 및 현주소

우리나라의 AI 역량을 객관적으로 파악하는 것은 단순히 현재의 위상을 확인하는 데 그치지 않고 장·단점을 분석하여 경쟁력을 향상시키기 위한 전략을 수립하는 데에도 필요하다. 국가의 AI 역량을 하나의 지표로 나타내는 것은 쉽지 않은 일이다. Tortois에서 발표한 2023년 Global AI Index(Tortois, 2023)가 종합적인 국가경쟁력을 나타내고 있는데, 이 지표에서 한국은 세계 6위로 평가되고 있다(<그림 3.9>). 개발, 인프라, 정책 부문에서는 우수한 반면 인력, 연구, 상업화 부문에서 상대적으로 경쟁력이 낮음을 보여주고 있다. 그러나 필자의 관점에서 생각하는 우리나라의 장·단점과 상이한 부분이 있어서 이 지표가 얼마나 신뢰할 만한지는 확인이 필요해 보인다.

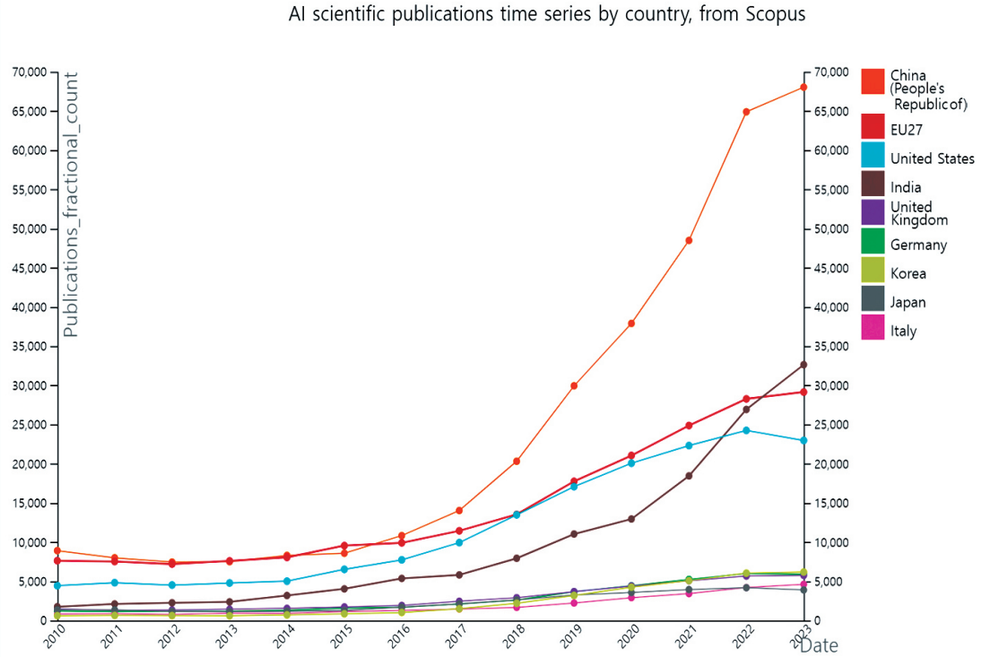
그림 3.9 국가별 AI 경쟁력 순위

	Overall	Talent	Infrastructure	Operating Environment	Research	Development	Government Strategy	Commercial	Scale	Intensity
United States	1	1	1	28	1	1	8	1	1	5
China	2	20	2	3	2	2	3	2	2	21
Singapore	3	4	3	22	3	5	16	4	10	1
United Kingdom	4	5	24	40	5	8	10	5	4	10
Canada	5	6	23	8	7	11	5	7	7	7
South Korea	6	12	7	11	12	3	6	18	8	6
Israel	7	7	28	23	11	7	47	3	17	2
Germany	8	3	12	13	8	9	2	11	3	15
Switzerland	9	9	13	30	4	4	56	9	16	3
Finland	10	13	8	4	9	14	15	12	13	4
Netherlands	11	8	16	15	10	13	28	20	11	8
Japan	12	11	5	10	20	6	18	23	6	25
France	13	10	11	25	15	18	13	10	9	20

출처: Tortois(2023).

세부 부문의 경쟁력을 좀 더 구체적으로 분석해 보면 다음과 같다. 먼저 학술 부문의 지표를 살펴보면 OECD에서 공개한 2023년 국가별 AI 관련 논문 발표 수를 기준으로 우리나라는 세계 7위(EU를 국가 단위로 계산할 경우)에 해당한다(<그림 3.10>). 총 논문 수 7,887편으로 중국의 75,206편, 미국의 32,936편에 비해 약 1/9, 1/4 수준이지만, 인구를 고려해 환산한다면 세계 최고 수준으로 볼 수 있다. 그러나 질적으로 우수하고 영향력이 높은 논문들로 한정할 경우 세계 8위로 순위가 다소 내려앉는다.

그림 3.10 국가별 AI 관련 논문 발표 수

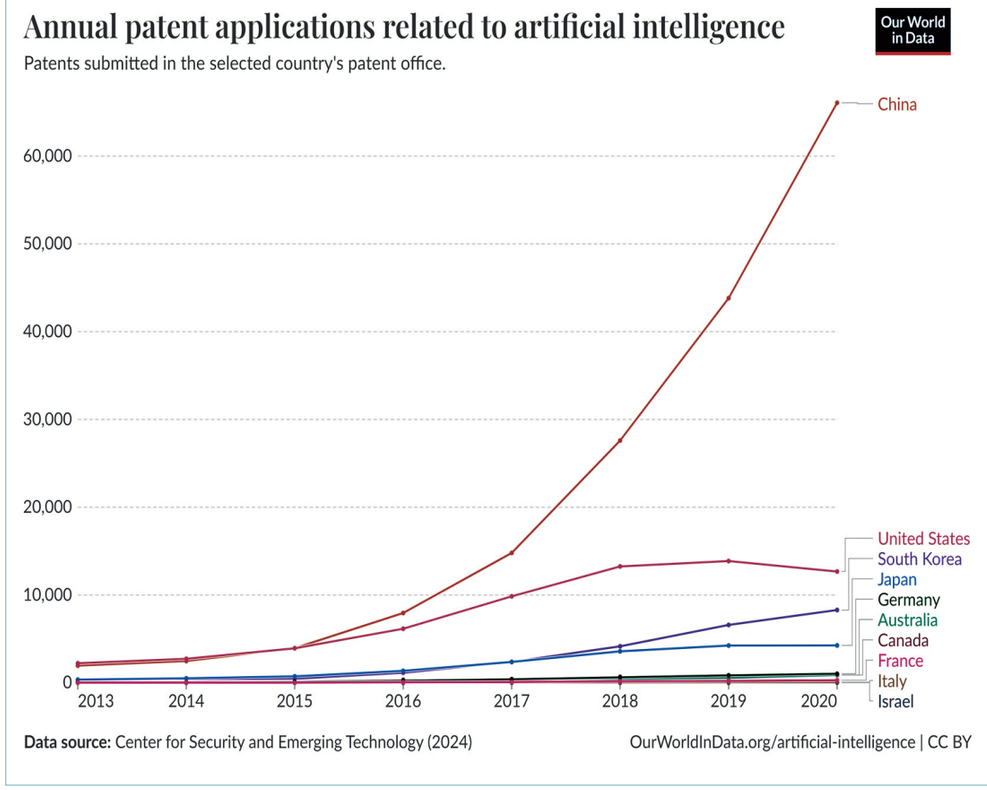


출처: OECD.AI(2024).

AI 분야 최고 학술대회인 CVPR(Conference on Computer Vision and Pattern Recognition)과 ICCV(International Conference on Computer Vision)의 경우를 보면, 최근 국가별 발표논문 수를 기준으로 우리나라는 중국, 미국에 이어 세계 3위를 꾸준히 기록하고 있다. 참가자 수에 있어서도 세계 3~4위를 기록하고 있는데, 이것은 우리가 AI 분야 중 특히 시각지능(vision) 분야에 상대적으로 높은 학술적 경쟁력과 관심을 갖고 있음을 보여준다. 물론 논문인용 수나 영향력지수 등 질적 측면에서는 아직 성장이 필요한 단계지만, 일본이나 유럽 국가들에 비해 단기간에 급격한 도약을 이루며 국제적으로 존재감을 확대하고 있는 것은 분명하다.

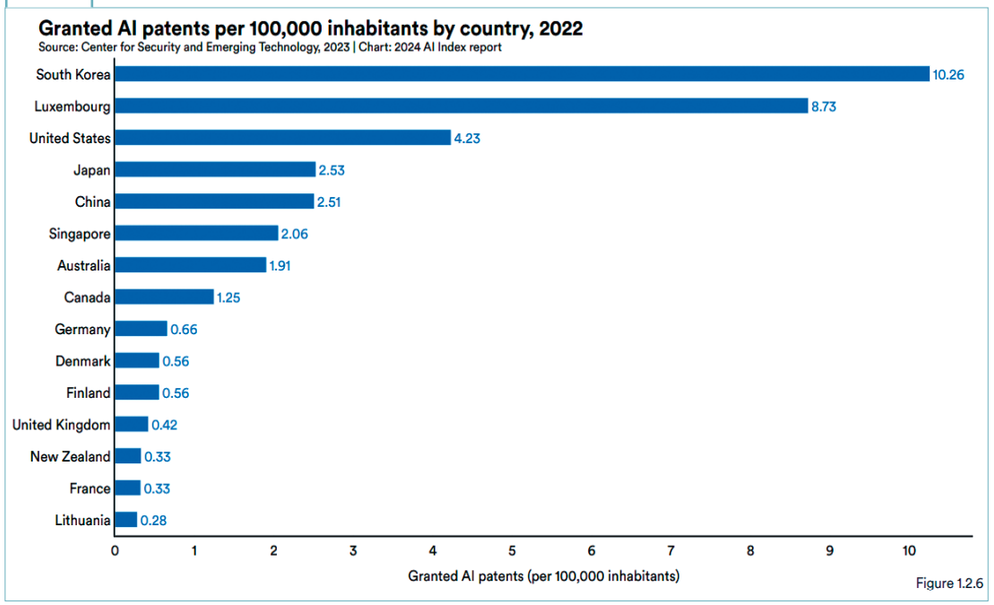
AI 특허 부문에서는 <그림 3.11>, <그림 3.12>에서 보듯이 특허등록 숫자상 우리나라가 중국, 미국에 이어 세 번째로 많고, 인구 100만 명당으로 보면 평균 10건이 넘어 세계 최고 수준이다. 또한 증가율 면에서도 중국과 미국을 압도하고 있음을 알 수 있다(<그림 3.13>).

그림 3.11 국가별 특허 수



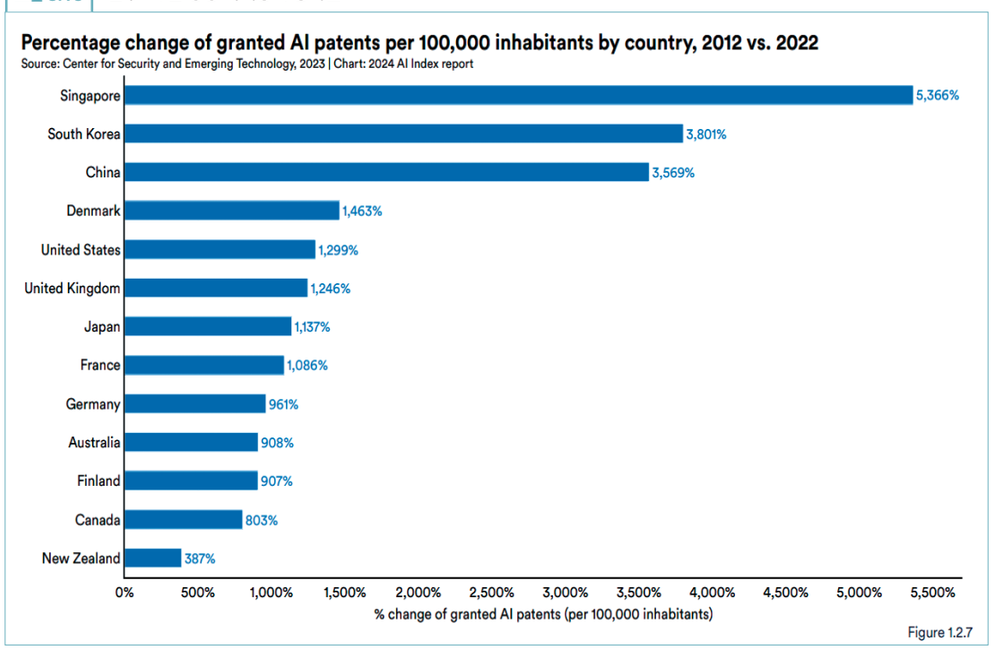
출처: Our World in Data(2023).

그림 3.12 인구 10만 명당 특허등록 수



출처: Stanford University(2024).

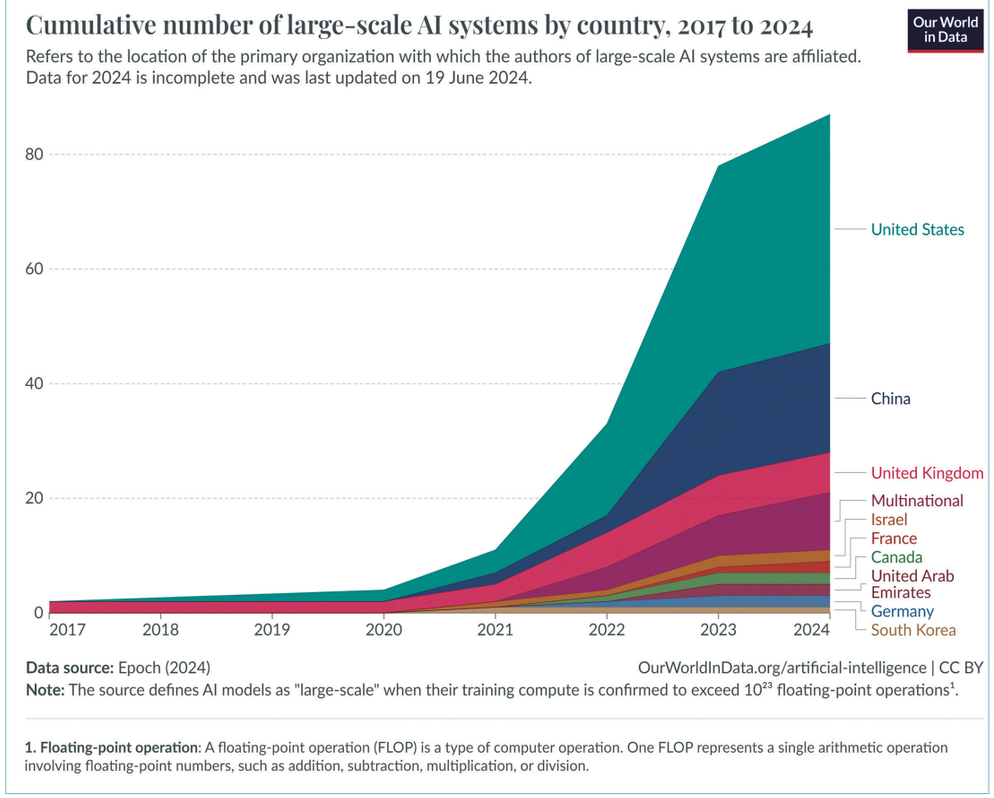
그림 3.13 인구 10만 명당 특허등록 증가율



출처: Stanford University(2024).

국가별 거대 AI 모델 보유 지표를 살펴보면 2024년 기준 미국 40개, 중국 19개, 한국 1개로 상당한 차이를 보이는 것을 알 수 있다(<그림 3.14>). 실제로 국내에 1~2개가량이 더 있다고 가정하더라도 상대적인 격차가 여전히 크다는 것은 분명해 보인다.

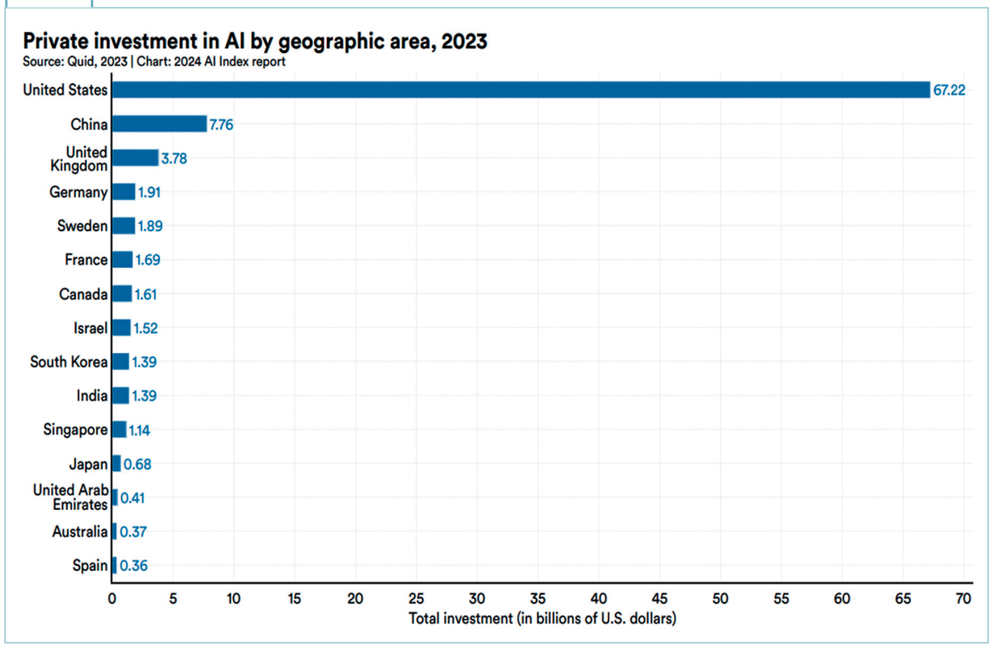
그림 3.14 국가별 대규모 AI 시스템 보유 수



출처: Our World in Data(2024b).

AI 분야에 대한 재정적 투자 규모에 있어서는 2023년 기준 우리나라는 민간부문에서 55억 달러가 투자되었고 이것은 미국의 약 1/50, 중국의 1/6 정도에 해당한다(<그림 3.15>). 또한 정부와 공공부문의 투자에서도 한국은 5년간 누적 약 100억 달러로 미국의 1/32, 중국의 1/13 정도에 불과함을 알 수 있다(<그림 3.16>).

그림 3.15 2023년 국가별 AI 민간투자 규모



출처: Stanford University(2024).

그림 3.16 국가별 정부 AI 투자 규모

A breakdown of AI government investment statistics by country

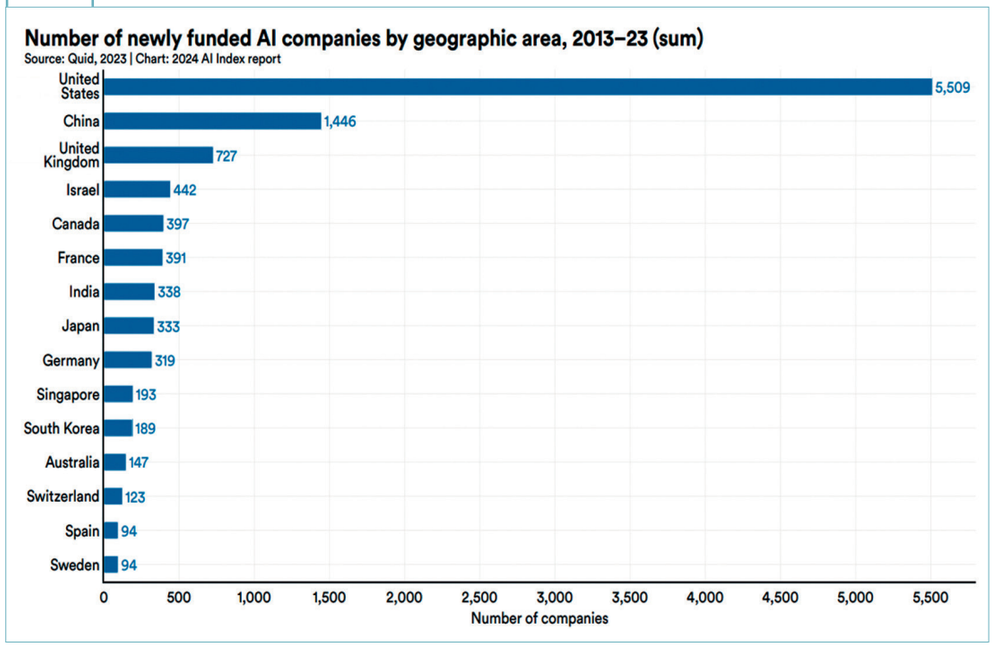
Country	Sum of investment in last 5 years (millions USD)	Investment in past 5 years (per thousand $ GDP)	Investment in past 5 years, as a percentage of USA investment (per thousand $ GDP)
Singapore	7,005	15.01	116.30
Sweden	8,281	14.13	109.53
The U.S.	328,548	12.90	100.00
Estonia	415	10.89	84.44
U.K.	25,541	8.32	64.46
China	132,665	7.39	57.24
South Korea	10,348	6.21	48.16
Canada	12,457	5.82	45.12
India	16,147	4.77	36.97
Switzerland	3,239	4.01	31.08

(Source: AIPRM via OECD and World Bank)

출처: AI Statistics(2024).

또 다른 지표로서 지난 10년 동안 신규 등장한 AI 관련 스타트업 수를 보면 우리나라는 총 189개로 세계 11위에 위치해 있고 이는 일본이나 싱가포르보다도 적은 수치이다(<그림 3.17>). 이것은 국내 스타트업 생태계가 아직 충분히 활성화되지 않았음을 의미하며, 향후 우리나라 AI 산업을 이끌 혁신 동력이 취약하다는 것을 시사한다.

그림 3.17 2013-2023년 신생 AI 회사 수



출처: Stanford University(2024).

여러 개별적 데이터들을 종합적으로 고려해 볼 때 현재 우리나라의 AI 국제경쟁력은 세계 10위권 안에 드는 것은 분명해 보인다. 그러나 최선두 그룹인 미국과 중국에 비하면 그 차이가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 분야별로는 연구 및 특허 부문에서 상대적으로 강점을 가진 것으로 평가되나 기업경쟁력 특히 스타트업 부문이 열세이고, 정부 투자 및 인프라 부문에서도 상대적으로 열악한 상황인 것으로 분석된다. 따라서 향후 전략적 차원에서 이러한 배경의 정책적 고려가 뒷받침되어야 할 것으로 본다.

라 국내 산업 발전을 위한 AI 전략

AI 혁명에 의한 파고는 조만간 우리 산업은 물론 사회 전반에 지대한 영향을 미칠 것이다. 이것은 AI가 우리의 생존을 위한 미래 전략에 있어 핵심적인 요소로 작용한다는 의미이므로, 우리에게 AI는 또 하나의 기회이자 위기이다. 선진국 반열에 오른 오늘날 대한민국의 위상은 과거 반도체, 디지털, 그리고 인터넷/모바일 시대로 산업의 패러다임이 바뀌는 과정에서 선제적 대응과 과감한 투자를 통해 후발주자에서 선도자로 자리바꿈한 결과이다. AI 대변혁의 시기에 우리가 어떠한 전략과 실행 방안으로 이에 대응해야 하는지를 냉철하게 고민해야 하는 이유도 여기에 있다. 더욱이 AI 기술과 산업의 발전 속도를 고려할 때 전략적 판단과 실행이 매우 빠르게 이루어져야 한다는 점은 중요하고도 명확하다. AI 산업에서의 경쟁력 확보를 위한 방안은 학계 및 산업계 전략, 인재, 정책, 그리고 원천기술 및 응용기술 부문 등 여러 가지 관점에서 생각할 수 있다.

먼저 학계를 들여다보면 그동안 논문, 특허 등 연구의 양적 성장은 괄목할 만하다. 일부 분야는 세계적인 수준에 도달하는 등 놀라운 성과를 내고 있는데, 반면 전반적으로는 분야별 편차가 크다는 문제를 안고 있다. 또한, 원천기술뿐 아니라 산업과 응용 분야에 연계된 연구개발이 상대적으로 부족하다는 것이 약점이 될 수 있다. AI 분야 최고 학술대회에서 발표되는 논문들이 전 세계적으로 연간 약 10,000편이 넘는데도 불구하고 이 중 약 90%가량은 인용되지 않는다는 점을 감안하면 이제부터는 단지 실적을 위한 논문 양산이 아니라 영향력이 큰 논문 그리고 실용성 있는 기술을 추구하는 방향으로 노력을 기울여야 할 시점이다. 대학의 AI 인재 양성과 연구개발 경쟁력은 충분한 재정적 지원 및 인프라 확충이 없으면 한계에 부딪히게 된다. 현재 우리 정부에서 대학에 지원하는 AI 관련 예산 규모는 경쟁국들에 비해 매우 적은 상황이고 본격적인 경쟁을 위해서는 과감한 재정 투자가 필요한 시점이다. 필요하다면 예산의 선택과 집중을 통해서라도 단기간에 선도적 대학을 집중 육성하는 방안을 고려할 수 있을 것이다. 그리고 현재 대학 등 학계 전반에 서버 및 전력 등 충분한 컴퓨팅 연구 인프라가 확보되지 않아 연구와 교육에 어려움을 겪고 있는 상황이 해결되지 않는다면 아킬레스건이 될 가능성이 높으므로, 산·학·관 간의 긴밀한 소통과 협력을 통해 대책을 강구해야 한다.

산업계에서의 AI 경쟁력은 투자 규모, 대규모 AI 모델 보유 수, 스타트업 수, AI 비즈니스 시장 규모 등의 데이터를 통해 봤을 때 아직 기대에 미친다고 보기는 이르다. 현재 네이버나 LG, 카카오 등이 자체적인 대규모 AI 시스템을 개발·운영하고 있으나 오픈AI, 구글 등이 천문학적인 자금과 물량을 투입하는 상황에서 직접적 경쟁을 지속하는 것이 현실적으로 가능할지, 또 승산이 있을지에 대한 전략적 판단이 중요한 지점이다. 그럼에도 불구하고, 독자적인 핵심 거대 AI 모델을 확보하는 문제는 그 파급력을 생각할 때 포기하기는 어려운 측면이 있다.

자체 거대모델 개발의 목적이 무엇인가? 국내 산업, 문화 및 정보 보호와 같은 주권 수호 차원의 방어적 소버린 AI 개발이 목표인가? 혹은 국제적 경쟁을 통한 세계 시장 확보와 같은 공격적 목표를 추구하는가? 목표의 설정에 따라서 이를 이루기 위한 전략이 달라질 수 있겠지만, 실질적으로는 두 가지 전략이 모두 필요하다. 특히 거대 언어모델이 개인용 비서와 같은 고도의 지능적 역할을 수행한다고 할 때, 해당 국가의 문화, 관습, 예술, 지식 그리고 삶의 방식 및 가치와 관련된 최신의 정보가 핵심적인 역할을 할 것이므로 개별 지역 및 국가에 특화된 AI 모델이 경쟁력을 가질 가능성이 높다. 네이버 검색엔진이 구글 검색엔진보다 낫다고 할 수는 없으나 국내 검색포털 중 압도적 점유율을 행사하고 카카오톡이 트위터나 페이스북보다 국내시장에서 절대적 우위를 가지는 것과 같다. 따라서 이러한 소버린 전략을 위해 자체 개발된 AI 모델을 빠른 시간 안에 상품화하고 기존 서비스플랫폼에 탑재하여 국내 생태계를 형성할 필요가 있다.

기술적 관점에서는 마라톤이나 쇼트트랙에서 경기 초반 선두에 나서는 선수가 반드시 최종 우승을 하지는 않는 것처럼, 적절한 거리를 유지하면서 적은 에너지로 추격하다 결정적인 순간 속도를 높이는 전략을 구사하는 것도 효율적일 수 있다. 주목받지 못하던 작은 오픈AI가 절대 강자라고 여겨졌던 골리앗 구글을 챗GPT로 추월한 예에서 보듯이 기술적으로는 새로운 방식의 혁신적 돌파 기술이 언제든지 등장할 수 있고 가능성 또한 무궁무진하다. 향후, 소형 저전력 AI, 멀티모달 AI, 임바디드 AI, 자기학습 AI 등 새로운 혁신 기술들이 속속 태동할 것이다. 이러한 관점에서 기업과 대학, 대기업과 중소기업 간 실질적 협력 프로그램을 강화하고 공동전선을 형성해서 선제적으로 대응하는 것도 유효한 전략이 될 것으로 판단된다.

산업적으로 AI 응용 부문에서의 경쟁력 확보는 더욱 중요하다. AI로 인한 실제 산업적 부가가치는 대부분 다양한 응용 분야에서 발생할 것이기 때문이다. 현재의 AI 기술을 가지고도 제조, 의료, 금융, 모빌리티, 엔터테인먼트, 물류, 서비스, 국방 등 많은 분야에서 최소한 기존의 생산성을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 혁신적인 제품 및 서비스 개발, 새로운 산업 분야 창출 등도 가능하다. 중국은 이러한 다양한 AI 응용 분야에서 데이터와 경험을 축적하고 경쟁력을 확보하고 있다. 산업 분야로의 AI 기술 적용 및 확산을 위해서는 해당 도메인의 지식을 겸비한 충분한 수의 AI 응용 인재 확보가 전제되어야 하고, 동시에 창의적 비즈니스 모델을 가진 많은 스타트업을 육성해야 할 것이다.

마 맺음말

결론적으로 AI 발전은 대한민국 산업의 다양한 분야에 걸쳐 머지않아 큰 변화를 일으킬 것으로 예상된다. 이를 효과적으로 활용하기 위해서는 지속적인 인재 양성, 부문 간 협력, 정부의 정책적 지원, 글로벌 시장 진출, 스타트업 지원 등의 전략이 촘촘하게 강화되어야 하고 과감한 투자가 병행되어야 한다. 이러한 전략을 통해 우리나라는 AI 기술을 바탕으로 한 혁신적인 산업 생태계를 구축하고, AI에 의한 새로운 글로벌 질서의 재편에서 새로운 도약의 전기를 마련할 수 있을 것이다.

참고문헌

Grace, K., Stewart, H., Sandkühler, J. F., Thomas, S., Weinstein-Raun, B. & Brauner, J.(2024). Thousands of AI Authors on the Future of AI, arXiv:2401.02843.

OpenAI(2023). "GPT-4 Technical Report", arXiv:2303.08774.

Rosenblatt, F.(1957). "The Perceptron: A Perceiving and Recognizing Automaton", Report 85-460-1, Cornell Aeronautical Laboratory.

AI Statistics(2024). IPRM via OECD and World Bank, Retrieved July 31, 2024 from https://www.aiprm.com/ai-statistics.

Atkinson, D., Barnett, M., Roldán, E., Cottier, B. & Besiroglu, T.(2024). "Direct Approach Interactive Model", Epoch AI, Retrieved July 31, 2024 from https://epochai.org/blog/direct-approach-interactive-model.

Cottier, B., Rahman, R., Fattorini, L., Maslej, N. & Owen, D.(2024). "The Rising Costs of Training Frontier AI Models", arXivarXiv:2405.21015, Retrieved July 31, 2024 from https://arxiv.org/abs/2405.21015.

Epoch(2024). Data on Notable AI Models, Published online at epochai.org, Retrieved July 31, 2024 from https://epochai.org/data/notable-ai-models.

OECD.AI(2024). Visualization Powered by JSI, using data from Elsevier, Retrieved July 31, 2024 from https://oecd.ai/en/data?selectedArea=ai-research&selectedVisualization=scientific-publications-time-series-by-country-2.

Our World in Data(2023). "Annual Patent Applications related to Artificial Intelligence", in Giattino, C., Mathieu, E., Samborska, V. & Roser, M.(eds.), Artificial Intelligence, Data adapted from Center for Security and Emerging Technology, Retrieved July 31, 2024 from https://ourworldindata.org/grapher/artificial-intelligence-patents-submitted.

Our World in Data(2024a). "Datapoints used to Train Notable Artificial Intelligence Systems" [dataset], Epoch, "Parameter, Compute and Data Trends in Machine Learning" [original data], Retrieved July 31, 2024 from https://ourworldindata.org/grapher/artificial-intelligence-number-training-datapoints.

Our World in Data(2024b). "Cumulative Number of Large-scale AI Systems by Country" [dataset], Epoch, "Tracking Compute-Intensive AI Models" [original data], Retrieved July 31, 2024 from https://ourworldindata.org/grapher/cumulative-number-of-large-scale-ai-systems-by-country.

Sevilla, j. & Roldan, E.(2024). Training Compute of Frontier AI Models Grows by 4-5x per Year, Published online at epochai.org, Retrieved July 31, 2024 from https://epochai.org/blog/training-compute-of-frontier-ai-models-grows-by-4-5x-per-year.

Stanford University(2024). AI Index Report 2024, AI Index Annual Report, Retrieved July 31, 2024 from https://aiindex.stanford.edu/report.

Tortois(2023). The Global AI Index, Global AI Index, Retrieved July 31, 2024 from https://www.tortoisemedia.com/intelligence/global-ai/#rankings.

PART 3

4 생성 AI 시대 산업과 사회 대전환

하정우

네이버클라우드 AI이노베이션센터장

가 들어가는 말

2022년 11월 챗GPT가 첫 공개된 이후 전 세계는 생성 인공지능(AI)이 불러온 큰 변화의 바람에 휩싸여 있다. 별다른 추가 학습 없이 사용자의 명령에 상당히 높은 수준의 글과 그림을 만들어 내고 이런 능력이 일상생활과 업무에 적용되면서 생산성 향상을 이끌고 있다. 2023년 하반기부터 생성 AI의 멀티모달 능력이 강화됨에 따라 사용자에게 더 편리하면서도 강력한 기능을 제공하게 되는 등 영화 「Her」의 사만다가 실현될 수 있는 시대가 가까워지고 있다. 이렇게 생성 AI 기술이 일상과 산업 전반에 영향을 끼치게 됨에 따라 AI 경쟁은 기업 간 경쟁을 넘어 국가 간 경쟁의 양상으로 확대되고 있으며 AI 안전과 책임성 문제도 함께 논의되기 시작했다.

본 장에서는 생성 AI 기술을 중심으로 국가별 동향과 2024년 새롭게 떠오르고 있는 생성 AI 기술 주요 트렌드를 소개하고자 한다. 그리고 생성 AI가 다양한 산업에서 이룰 수 있는 생산성 향상 사례를 언급하며 생성 AI 기반의 AI 에이전트가 가져올 일상의 변화를 제시하겠다.

나 2024년 생성 AI 기술 동향 및 전망

1) 국가 및 주요 기업별 생성 AI 기술 동향

미국

미국은 지난 70여 년간 AI 분야에서 압도적인 기술을 기반으로 하는 산업 경쟁력을 보여주고 있으며 최근의 생성 AI 기술 흐름 또한 실리콘 밸리 기업들이 이끌어 가고 있다. 오늘날 생성 AI 특히 대형언어모델(LLM)의 기본 모델 구조라 할 수 있는 트랜스포머(Vaswani et al., 2017)는 2017년 5월 구글에서 발표했고 1년 반 후 자연어처리(Natural Language Processing, NLP) 분야에서 대량 데이터 사전학습 후 간단한 fine-tuning으로 대부분의 공개 벤치마크에서 기존 기록을 깬 버트(Bidirectional Encoder Representations from Transformers, BERT; Devlin et al., 2019) 또한 구글에서 2018년 10월에 발표한 기술이며, GPT-3(Brown et al.,

2020)와 챗GPT, GPT-4, 달리(DALL-E; Betker et al., 2023) 시리즈를 발표한 오픈AI도 미국 기업이다. 그 외에 오픈소스 LLM 생태계를 이끌어가는 LLaMA 시리즈는 페이스북과 인스타그램을 운영하는 메타에서 주도하고 있다. AI 학습과 운영을 위한 컴퓨팅 인프라의 핵심인 AI 가속기 시장의 90% 이상을 GPU로 독점하고 있는 엔비디아 또한 미국 기업이다.

학계에서도 스탠포드대학교, MIT, 워싱턴대학교, 카네기멜론대학교, UC Berkeley, 조지아 공대, UIUC 등이 미국의 기업계와 강력한 협업을 통해 AI의 혁신을 만들어 가고 있다. 나아가 위 학교의 대학원생들이 테크 기업들의 인턴으로 합류하여 기업의 연구자들과 함께 혁신적인 연구 성과를 이루고 있다.

중국

지난 1년간 Nature Index에 따르면 중국이 전반적인 과학기술 분야에서도 미국을 이미 추월하여 세계 1위를 기록하고 있으며 세계 최고 연구기관 Top-10에서도 Chinese Academy of Sciences가 1위를 차지한 것을 포함해 7개 기관이 Top-10 리스트에 포함되어 있다(Nature index, 2024).

AI 분야에서도 중국은 미국과 더불어 AI 2강 체제를 구축하고 있다. Tortoise media의 Global AI Index 2023에 따르면 미국의 AI 역량을 100점으로 볼 때 60점대 정도로 격차가 있는 것으로 보이지만 일부 영역 특히 국가체제 유지에 필요한 안면인식, 행동인식, 생체인식과 같은 컴퓨터 비전 기반의 인식 기술은 이미 미국의 수준을 넘어섰다는 평가를 받고 있다(Tortois, 2024).

생성 AI 특히 LLM에서는 중국 정부 체제와 사상에 부합하는 이해 및 추론, 콘텐츠 생성 능력을 보유하도록 강하게 제한한 이유로 실리콘 밸리 기업들에 비해 상대적으로 성장 속도가 느렸다. 하지만 최근 알리바바에서 발표한 Qwen2(Yang et al., 2024) 등은 상당한 경쟁력을 보여주고 있으며 이를 오픈소스로 전 세계에 배포하고 있다. Text-to-video에서도 Kuaishou가 공개한 Kling은 오픈AI Sora 이상의 경쟁력을 보유한 것으로 인식되고 있는데, 생성 AI 분야에서도 미국과 중국의 격차가 상당히 많이 줄어든 것으로 보인다.

최근 사우스차이나 모닝포스트는 중국 정부가 시진핑 주석의 어록과 사상을 대답할 수 있는 언어모델인 시진핑 GPT(Xi-GPT)를 준비 중이라 보도했다(Zhuang, 2024). 해당 거대언어모델의 적극 오픈소스 정책에 대해 중국 정부는 체제 확산의 방법으로 생성 AI를 활용하고 있는 것으로 의심받고 있다.

EU

EU는 강력한 AI 연구역량에도 불구하고 미국이나 중국에 비해 상대적으로 생성 AI 분야에서 발전이 더딘 편이다. 자체 플랫폼이 사실상 존재하기 않기 때문에 유럽 각국의 언어를 기반으로 하는 양질의 사전훈련용 학습데이터 확보도, 생성 AI를 활용할 혁신적인 서비스를 운영하기에도 어려움이 있다. 이러한 상황에서 강력한 규제 성향을 띠는 AI 법안이 올해 초에 통과되었다.

그러나 EU 회원국 중 일부는 강력한 정부 지원과 투자를 통해 자국 기업 중심으로 생성 AI 경쟁력을 확보하기 시작했는데, 대표적인 사례가 프랑스의 Mistral과 독일의 Aleph Alpha이다. 이들은 실리콘 밸리 빅테크 기업들에 준하는 대형언어모델을 오픈소스 형태로 공개하면서 그 기술력을 인정받고 대규모 투자를 얻어 이미 유니콘 대열에 합류해 있다. 이탈리아 또한 자체 생성 AI 경쟁력 확보를 위해 정부 차원에서 투자를 천명했다. 이 때문에 12월 6일에 통과되었어야 할 AI 법안이 프랑스, 독일, 이탈리아의 반대로 한차례 연기되는 등 격렬한 논의 끝에, 법안에 생성 AI에 대한 조항과 오픈소스 중심 샌드박스 활용을 통한 생성 AI 산업 활성화 부분이 반영된 것으로 알려졌다. 그러면서 규제 대상 생성 AI의 컴퓨팅 연산량 기준을 미국 행정명령보다 다소 적은 수치로 잡아 오픈소스 정책 및 강력한 처벌조항과 함께 미국 기업의 활동은 억제하고 역내 기업을 지원하는 형태로 보호정책을 취하고 있다.

일본 및 아시아

일본 정부는 디지털청을 별도로 설립하고 오픈AI와 손을 잡아 공공 분야 생성 AI 도입을 진행하고 있다. 이에 발맞추어 오픈AI는 일본지사를 설립하고 일본어에 특화된 GPT인 GPT Japan을 지난 4월에 공개했다. 그러나 이와 별개로 자국 생성 AI 기술 확보를 위해 일본 정부는 자국 기업인 소프트뱅크에 지난 2년간 약 4,500억 원에 달하는 보조금을 지급하며 생성 AI 학습에 필요한 슈퍼컴퓨터 도입 관련 투자에 활용토록 했다. 이를 통해 궁극적으로 실리콘 밸리 기업들에 대한 기술적 종속을 막고 생성 AI 강대국으로 나아가기 위한 정책을 과감하게 추진 중이다.

인도네시아, 태국, 베트남과 같은 국가들도 미국, 중국에 생성 AI 기술이 종속되는 것을 막기 위해 자국 문화를 정확히 이해하는 소버린 AI 확보를 위한 노력을 진행하고 있다. 생성 AI 사전훈련은 기술적인 난이도가 있기 때문에 자국 혹은 외국 대학들과 협업을 통해 오픈소스 언어모델에 자국어 데이터를 학습하는 형태로 먼저 진행하며, 신뢰 가능한 글로벌 파트너를 찾아 자국 AI 기술 산업 생태계 강화를 모색 중이다.

대한민국

우리나라는 대형언어모델 분야에서 미국, 중국에 이어 빠른 속도로 자체 역량의 AI 모델을 개발하고 산업 생태계를 구축한 국가이다. 네이버가 2021년 5월 매개변수 1천억 개 이상 기준 전 세계 3번째로 LLM인 하이퍼클로바(Kim et al., 2021)를 공개했고 뒤이어 LG AI 연구원, 카카오, KT, SKT, 엔씨소프트 등이 자체 기술력으로 LLM을 출시했다.

네이버는 하이퍼클로바를 더욱 개선한 한국어 중심의 다국어 LLM인 하이퍼클로바X를 출시한 이래로 챗GPT와 유사한 대화형 서비스인 클로바X를 작년 8월, 검색 형태의 서비스 Cue를 같은 해 10월에 공개했다. 그리고 기업들이 외부에서 클라우드 기반의 API 형태로 활용할 수 있도록 클로바 스튜디오를 2022년 2월부터 제공하고 있으며 현재 2,200여 개 기업들이 활용 중이다. LG AI 연구원은 2021년 말 엑

사원과 더불어 2023년 7월 엑사원2.0을 공개하고 주로 LG 그룹 관계사들의 AI 전환에 활용하고 있다.

카카오, SKT, KT와 같은 기업들은 자체 LLM 외에도 글로벌 기업들의 LLM과 sLM까지 다양한 모델을 동시에 활용하는 멀티 LLM 전략을 채택하고 다양한 비즈니스를 만들어가고 있다.

2) 2024년 생성 AI 주요 기술 동향 및 전망

멀티모달(multimodal) AI

멀티모달은 데이터를 표현하는 방법이나 형태가 여러 가지인 경우를 일컬으며, 일반적으로 멀티모달 AI는 글뿐 아니라 사진, 음성, 영상, 시계열 수치 등 다양한 형태의 데이터를 동시에 처리, 학습하고 이해, 추론, 생성할 수 있는 AI를 의미한다. 챗GPT의 경우에도 초기에는 텍스트의 형태로만 입력 및 콘텐츠 생성이 가능했다. 그러나 2023년에 들어서는 사진과 대화가 가능한 GPT-4가 챗GPT에 탑재되었고 구글 딥마인드의 Gemini나 Anthropic의 Claude 3 등이 멀티모달 대화가 가능한 AI를 발표했다. 이어서, 글을 입력하면 그 내용을 그림으로 그려주는 AI인 DALL-E2와 3가 연이어 챗GPT와 연동되며 멀티모달 AI 기술이 연구실 수준을 넘어 고객의 지갑을 열 수 있는 서비스 수준까지 발전했다.

그림 3.18 오픈AI Sora가 생성한 비디오와 프롬프트 예시

[프롬프트]

한 세련된 여성이 따뜻하게 빛나는 네온과
생동감 넘치는 도시 간판으로 가득한 도쿄 거리를
걷고 있습니다. 그녀는 검은색 가죽 재킷,
긴 빨간색 드레스, 검은색 부츠를 착용하고,
검은색 지갑을 들고 있습니다.
그녀는 선글라스를 쓰고 빨간 립스틱을 발랐습니다.
그녀는 자신감 있고 자연스럽게 걷습니다.
길은 축축하고 반사되어 화려한 조명이 거울 효과를
만들어 냅니다. 많은 보행자가 걸어갑니다.



출처: OpenAI Sora(2024).

2024년에는 더욱 강력한 멀티모달 AI가 등장했는데 첫 번째는 챗GPT-4o(omni)이다. 기존 챗GPT도 이미지 대화나 음성인식이 가능했지만, 음성인식의 경우 단일 모델이 아닌 오픈AI의 음성인식 모델인 Whisper를 사용하여 입력된 음성을 글로 변환하고 이를 챗GPT-4에 입력하는 구조였다. 그러나 챗GPT-4o는 하나의 모델에 글, 음성, 이미지, 영상을 모두 학습하고 생성하는 형태로 만들어져 목소리의 감정마저도 자연스럽게 함께 모델링되고 스트리밍 형태로 처리하는 것이 가능해졌다. 이에 따라 영화 Her에 나오는 사만다가 드디어 실현되는 시대가 도래했다는 평을 듣기도 했다.

대화형 생성 AI 외에도 입력된 글의 내용을 영상으로 생성해 내는 text-to-video 기술이 API 형태로 제공됨으로써 새로운 AI 서비스로서 자리 잡기 시작했다. 가장 먼저 등장한 것은 오픈AI가 2월에 발표한 Sora이다. Sora는 대량의 비디오 데이터를 트랜스포머 기반의 확산모델(Diffusion model)인 DiT 모델을 활용하여 학습한 모델로 입력된 글의 내용을 반영하는 60초 길이의 고해상도 영상을 생성할 수 있다. 과거에도 text-to-video 기술이 없지는 않았지만 일반인이 바로 활용할 수 있는 수준의 AI는 Sora가 최초이다. 오픈AI Sora 이후 유사한 수준의 영상 생성 AI가 쏟아지기 시작했는데 대표적으로 runway의 Gen3-a, Luma AI 등이 있으며 중국 기업인 Kuaishou의 Kling도 뛰어난 성능을 보유한 것으로 알려져 있다. 특히 오픈AI와 달리 나머지 3개 기업은 이미 API나 인터넷을 통해 유료 혹은 무료로 직접 비디오를 제작할 수 있는 기술을 확보했다.

Text-to-video 외에 Text-to-music도 2024년 초에 선풍적인 인기를 끌었는데 대표적인 앱이 suno이다. suno 또한 웹을 통해 글을 입력하면 글의 내용을 반영한 가사와 멜로디로 표현된 노래를 누구나 다운받을 수 있다.

온디바이스(on-device) AI

2023년 12월 초 구글 딥마인드에서 Gemini를 공개할 때 다른 모델 대비 눈에 띄는 부분이 바로 Nano 버전이었는데, Nano-1이 18억 개, Nono-2가 32억 개의 매개변수를 가진 Gemini(Gemini Team Google, 2023)였다. 이렇게 작은 모델을 만든 이유는 바로 구글의 스마트폰인 픽셀에 활용하기 위함이라며 온디바이스 AI 혹은 AI 스마트폰의 시대를 선언한 것이다. 물론 18억 개 매개변수 모델조차도 픽셀 8 스마트폰의 하드웨어 사양과 안드로이드 운영체제를 고려하면 아무리 양자화 압축을 한다 해도 그대로 스마트폰에 탑재하는 것은 과도한 발열과 배터리 소모 등으로 인해 기술적 어려움이 예상되는 부분이었고, 결국 실제로 픽셀 8에 탑재하지는 않는다는 뉴스가 연초에 전해졌다.

오히려 AI 스마트폰 시장을 선점한 것은 삼성전자의 갤럭시 S24였다. 물론 Gemini와 같은 강력한 성능을 가진 단일 범용 파운데이션 모델을 사용한 것은 아닌 것으로 추정되나 circle-to-search나 실시간 통화번역 기능, 요약 기능 등 스마트폰 사용자들에게 매우 편리한 AI 기능을 탑재함으로써 AI 스마트폰 시장에서 앞서가는 데 성공한 것으로 보인다.

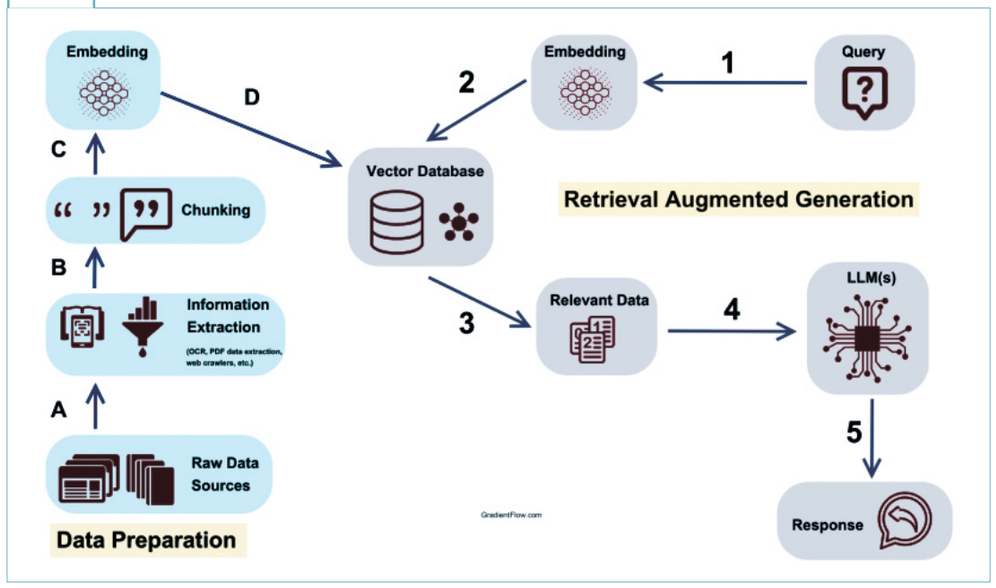
메타의 LLaMA나 Mistral LM, 마이크로소프트의 Phi(Abdin et al., 2024), 그리고 구글의 Gemma(Gemma Team, 2024)와 같이 상대적으로 작은 규모의 언어모델(sLM: small Language Model) 성능이 비약적으로 개선됨에 따라 스마트폰뿐만 아니라 PC나 자동차, 가전, 로봇 등 다양한 디바이스에 탑재

되는 사례가 늘어나고 있다. 특히 양자화(Quantization)를 포함한 AI 모델 압축 기술이 크게 개선됨에 따라 인텔, 마이크로소프트, 애플 등에서 양자화된 거대 언어모델을 AI 반도체 형태로 만들어 PC에 내장한 AI PC 제품들이 출시되기 시작했다(Intel, 2024).

환각(hallucination) 현상 해결책

환각 현상은 생성 AI, 특히 LLM이 문법이나 표현으로는 아주 그럴 듯하지만 사실과 다른 내용을 생성하는 경우를 말한다. 마케팅, 세일즈, 혹은 창작활동의 도구로 사용될 때는 문제가 되지 않으나 사용자 질의의 정확한 정보를 제공하는 챗봇과 같이 사실 여부가 중요한 응용 분야에서는 문제가 될 수 있다.

그림 3.19 RAG를 활용한 LLM 응용 시스템 전제구조



출처: Lorica(2023).

환각 현상은 언어모델이 갖는 근본적인 문제이다. 데이터를 사전학습하는 과정에서 데이터가 데이터베이스처럼 그대로 저장되는 것이 아니라 모델 매개변수의 가중치 형태로 변환하여 저장되므로 이 과정에서 정보 손실이 발생할 수 있다. 또한 모델이 글을 쓰는 과정에서 다음 토큰을 선택할 때 글이 자연스러운 방향의 확률적 선택을 하고 이것이 사실을 보장하지 않을 수 있다. 특히 외부 공개가 덜 된 특수 분야에 대한 글을 쓸 때 이런 현상이 많이 발생한다.

이러한 LLM의 환각 현상 완화를 위해 전문가들이 다양한 전문 분야 지식과 상식 등 데이터를 가공해 LLM을 추가적으로 학습시키는 미세 학습(fine-tuning)을 수행하거나 사용자들의 피드백을 활용하여 언어

모델의 품질을 평가하는 보상 모델을 학습하는 인간 피드백 강화학습(Reinforcement Learning from Human Feedback, RLHF) 등이 많이 활용되어 왔다. 그러나 이것만으로는 실제 제품이나 서비스에 적용하기에는 여전히 한계가 있다 보니 최근에는 검색증강기법(Retrieval-Augmented Generation, RAG; Lewis et al., 2020)과 함께 사용되고 있다. RAG는 주로 LLM을 활용하여 금융상품 안내 상담 등과 같이 전문 분야에 특화된 정확한 정답을 요구하는 챗봇이나 질의응답 시스템을 구현할 때 사용된다. <그림 3.19>과 같이, 먼저 정보가 포함된 관련 문서들로부터 정답에 해당될 정보들을 별도의 인공신경망 모델 활용을 통해 벡터 형태로 임베딩하고 이들을 벡터 데이터베이스에 저장한다. 그리고 사용자 질의가 들어오면 이를 바로 프롬프트로 LLM에 입력하는 것이 아니라, 벡터 데이터베이스를 만들 때 활용했던 임베딩 모델을 활용하여 사용자 질의를 벡터로 변환하고 이 질의 벡터와 가장 유사한 관련 정보를 검색해서 가져온다. 이렇게 검색해 온 정보를 활용하여 프롬프트를 만들어 LLM에 입력함으로써 보다 정확한 답변을 생성해낼 수 있다. 물론 LLM만 쓸 때보다 더 많은 추가 연산이 필요하므로 속도 최적화를 구현하는 것이 서비스 품질 향상을 위해 매우 중요하며 임베딩 모델의 정확도가 성능에 큰 영향을 미친다는 점도 고려해야 한다.

오픈소스 AI 생태계의 확산

2023년 메타에서 LLaMA를 공개하면서 오픈소스 sLM 생태계가 본격적으로 열리기 시작했다. 그 이전에도 BLOOM이나 Eleuther AI의 GPT-Neo, 국내에선 Polyglot과 같은 모델들이 존재했으나 성능에 대한 아쉬움이 있었다. 그러나 LLaMA는 파인튜닝을 통해 바로 활용 가능할 정도로 잘 사전학습된 LLM이었고, 70억 개부터 700억 개까지 다양한 크기의 매개변수를 제공했으며 70억 개짜리 모델을 기반으로 소수의 데이터에 대한 미세 학습을 통해 챗GPT-3.5 등 LLM과 비교해서도 경쟁력 있는 벤치마킹 결과들이 공개되면서 sLM이 주목받기 시작했다. 그러나 이후 벤치마크 데이터 과적합으로 벤치마크 순위표에 대한 신뢰성 문제가 수면 위로 떠오르게 된다.

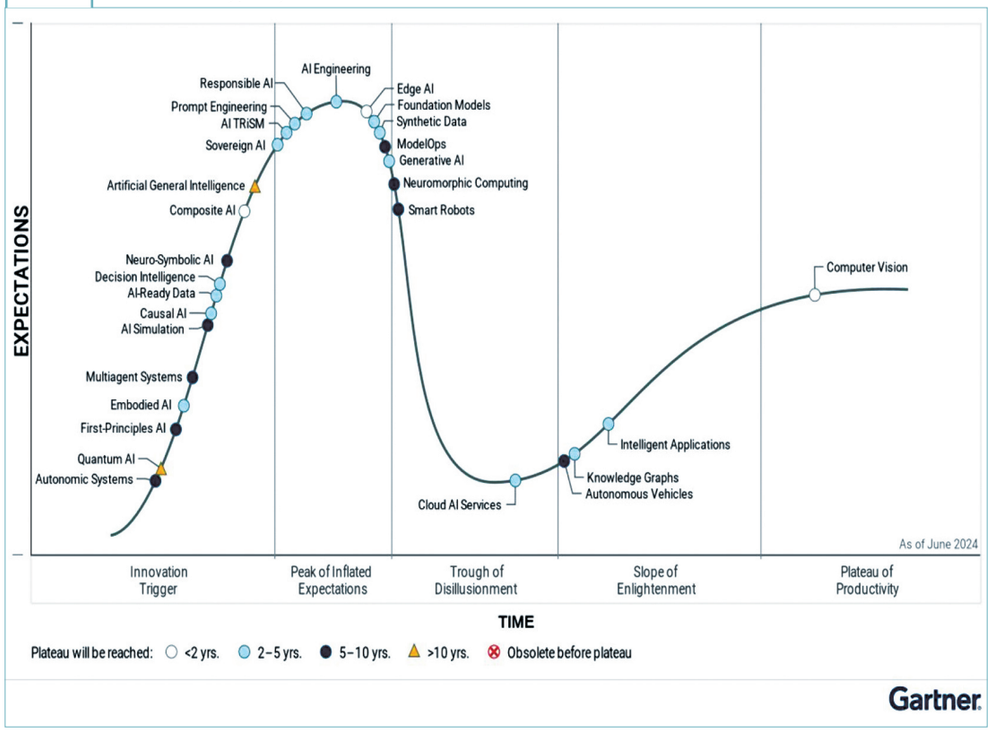
LLaMA1은 상업적 용도로 사용할 수 없어 학계를 중심으로 활용되었는데 LLaMA2부터는 라이센스 정책을 바꾸어 월간 활성 사용자 수억 명 급의 글로벌 규모 기업이 아닌 이상 상업적 용도로 활용이 가능해졌다. 전 세계 많은 스타트업들과 다양한 산업의 기업들이 자체 보유 데이터나 서비스 구현에 필요한 데이터를 추가적으로 미세 학습하여 LLaMA를 도입하기 시작했다.

2024년에는 프랑스의 미스트랄 AI에서 LLaMA 구조를 기반으로 하여 자체 사전학습한 sLM인 Mistral 모델(Jiang et al., 2023)을 오픈소스로 공개했으며 이 모델을 여러 전문가모델로 활용한 mixture of expert 형태인 Mixtral도 함께 출시했다. 이에 따라 다수의 글로벌 기업들이 Mistral sLM도 함께 활용하고 있고 국내의 많은 스타트업들도 이 Mistral 모델을 기반으로 한국어 데이터를 추가 학습하여 제공하고 있다.

글을 그림으로 그려주는 text-to-image 모델 중에서는 Stability AI에서 공개한 Stable diffusion 모델

이 대표적이다. Stable diffusion 모델을 누구나 활용할 수 있게 됨에 따라 많은 스타트업들이 자체적으로 보유한 사진데이터를 추가 학습하여 새로운 응용 프로그램을 만들고 학계에서는 ControlNet(Zhang et al., 2023)과 같이 훨씬 더 정교하게 그림을 생성할 수 있는 기법들이 개발될 수 있었다.

그림 3.20 가트너 그룹의 Hype Cycle for AI 2024



출처: Gartner(2024).

빅테크의 LLM이 API 형태로만 접근 가능한 것과 달리 오픈소스 sLM은 모델 파일이 공개되기 때문에 연구 및 활용 측면에서도 더 많은 시도를 해볼 수 있다. 이는 생성 AI 분야의 다양한 연구의 활성화를 가져옴과 동시에 더 많은 산업에 생성 AI가 빠르게 확산하는 데 기여하고 있다.

소버린 AI

각 국가는 언어뿐 아니라 고유의 문화, 역사, 사회 규율, 가치관을 갖고 있는데, 미국 기업이 만든 LLM은 추가 학습을 통해 전 세계 수십 개 언어로 글을 자연스럽게 쓰면서 언어장벽을 무너뜨린 것으로 보이나 사전훈련 데이터의 90% 이상을 미국의 인터넷 영어 문서로 구성하다 보니 철저하게 미국 중심의 가치관을 갖게 된다. 그러나, 미래 세대들이 생성 AI를 일상생활과 교육에 적극 활용하게 됨에 따라 이러한 미국 가치관 중심의 콘텐츠에 지속적으로 노출되는 것은 각국의 정체성과 문화 다양성 유지에 악영향을 끼칠 우려가 있다. 이와 달리 소버린 AI는 각 지역의 문화, 역사, 사회 규율을 더욱 정확하게 이해하는 AI이다. 그리하여 세계 각국은 자국의 문화를 정확하게 이해하고 콘텐츠를 생성할 수 있는 소버린 AI를 확보하기를 원하고 있다.

엔비디아의 CEO 젠슨 황 또한 2024년 World Government Summit에서 각 지역 문화를 정확히 이해하는 소버린 AI 중요성을 강조했다. 실제로, 가트너 그룹에서 공개한 Hype Cycle for AI 2024에서 <그림 3.20>과 같이 처음으로 소버린 AI가 주목받는 키워드로 등장하기도 했다. 그러나 생성 AI를 자체 기술로 만들기 위해서는 상당한 경험이 있는 인재와 기술, 투자 그리고 플랫폼이 필요하기 때문에 각 국가들은 신뢰 가능한 기술력을 가진 글로벌 파트너와 협력을 원하고 있다. 이 때문에 우리나라 AI 기업들은 소버린 AI 확보를 원하는 국가들과 협업을 통해 전 세계로 진출할 수 있는 좋은 기회를 마련하고 있다.

다 생성 AI 도입을 통한 생산성 혁신

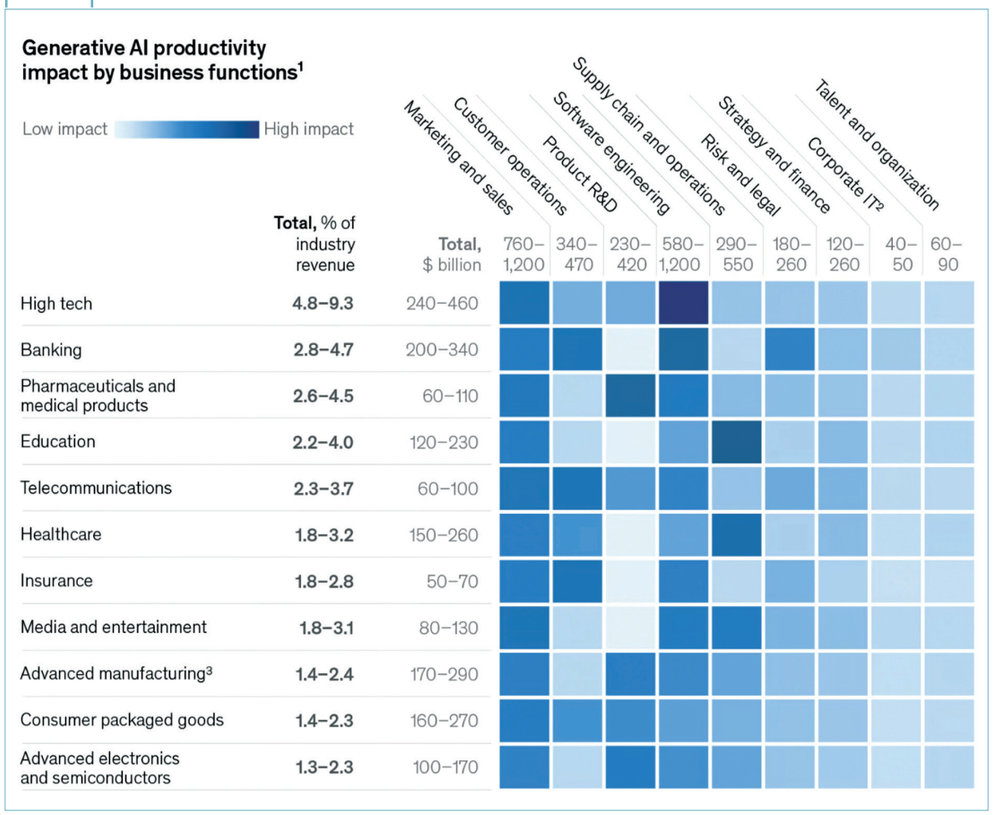
1) 생성 AI에 의한 생산성 혁신

생성 AI의 주요한 효과는 콘텐츠 생성 능력을 통한 생산성 혁신이다. McKinsey가 2024년 1월에 발표한 생성 AI 보고서에 따르면 생산성 향상 효과는 적게는 2조 6천억 달러 많게는 4조 4천억 달러에 이를 것으로 전망하고 있다. <그림 3.21>과 같이 생성 AI는 모든 산업에서 마케팅 및 세일즈, 고객 관리, 소프트웨어 엔지니어링, 제품 R&D의 생산성을 극도로 향상시킬 수 있으며 IT 하이테크 산업은 물론 금융, 교육, 제약, 헬스케어, 미디어 콘텐츠, 유통, 제조를 망라하는 모든 산업 생산성 향상에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

금융 분야는 매우 빠르게 생성 AI를 도입한 대표적인 산업 분야이다. Bloomberg는 자체적으로 학습한 금융 특화 LLM인 BloombergGPT(Wu et al., 2023)를 개발하여 내부 업무에 활용하고 있다. 2023년에 발표된 OECD 금융 분야 생성 AI 활용 보고서에 따르면 골드만삭스나 JP모건 등은 내부 개발자들을 위한 LLM 기반의 코딩 어시스턴트를 활용하여 소프트웨어 개발 운영 업무 생산성을 크게 향상시키고 있다(OECD, 2023). 특히 소프트웨어 개발자 채용이 상대적으로 쉽지 않은 전통 산업 분야에서 코딩 어시스턴트는 생산성 제고에 큰 기여를 하고 있다. 국내에서도 4대 은행에서 생성 AI를 도입한 사례들이 증가하고 있는데, 아직은 환각 현상 등의 문제로 대고객 서비스보다는 코딩 어시스턴트 등 내부 업무 생산성 향상을 주된 목적으로 하여 적용하고 있다. 미래에셋은 자체 앱을 통해 해외 뉴스를 간단하게 요약해서 대고객 서비스를 제공하고 있다.

법률 분야에서도 글로벌 로펌을 중심으로 생성 AI 도입이 빠르게 진행되고 있다. 특히 LexisNexis는 변호사 업무 자동화를 위한 생성 AI 도구인 Lexis + AI를 개발했다. 국내에서도 BHSN이나 인텔리콘, 엘박스와 같은 리걸테크 기업들이 생성 AI를 활용한 법률 업무 생산성 보조도구 제품을 출시했다. 또한 최근 국내 로펌인 대륙아주에서는 하이퍼클로바X를 활용한 24시간 일반인 법률상담 서비스 AI대륙아주를 출시해서 법률 서비스의 문턱을 낮추는 데 기여하고 있다.

그림 3.21 각 산업 분야에서 기능별 생성 AI 도입에 따른 생산성 향상 효과



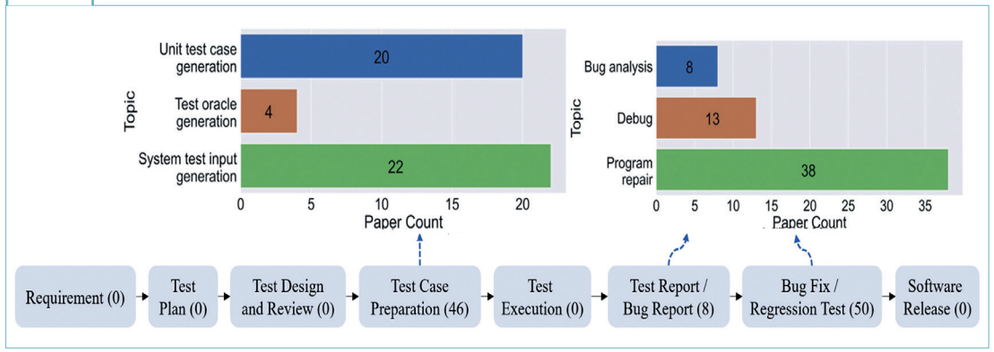
출처: McKinsey(2023).

공공 분야에서는 우리 정부가 빠르게 성과를 보이고 있다. 정부는 2022년 대통령 1호 공약으로 디지털플랫폼정부를 선언하고 이를 위한 대통령직속위원회인 디지털정부위원회를 2022년 9월 출범시켰다. 그리고 2023년 5월 공공 분야 생산성 혁신 및 대국민 혁신적 서비스를 위한 생성 AI의 공공 분야 도입을 미션으로 하는 초거대 공공 AI TF 조직을 만들어 운영하고 있다. 이를 통해 작년에는 20억여 원의 예산을 활용하여 화성시청 상담원 업무보조 질의응답 시스템과 서울교통공사 법률 업무 보조 시스템을 포함한 70여 개 생성 AI 응응 실증과제를 지원하고 각 정부, 지자체, 공공기관에서 생성 AI를 도입할 때 참고할 수 있는 가이드라인을 제작하여 배포하였다(디지털플랫폼정부위원회, 2024). 2024년에는 예산을 110억 원 규모로 확대하여 실증을 넘어 실제 업무에 바로 적용 가능한 형태의 프로젝트를 선발하여 개발이 진행 중이며 공무원들의 AI 문해력과 활용 역량 강화를 위한 온라인 핸즈온 교육 프로그램도 개발하여 연말까지 배포 예정이다.

2) AI를 통한 일자리와 일하는 방식의 변화

생성 AI 기술 발전에 따라 인간 일자리 대체에 대한 우려가 많이 제기되고 있다. 생성 AI가 인간 수준에 버금가는 이해, 추론, 콘텐츠 생성 능력을 보유함에 따라 인간 일자리 특히 블루칼라보다는 화이트칼라, 시니어보다는 주니어들의 일자리가 위협받고 있다는 것이다. 실제로 골드만삭스에서는 생성 AI 도입을 통해 소프트웨어 개발 운영 생산성을 높이면서 개발자들의 해고로 이어지기도 했다.

그림 3.22 소프트웨어 평가 직군의 과업과 각 과업별 LLM 활용 사례



* 괄호안의 숫자는 LLM을 활용한 연구사례를 의미

출처: Wang et al.(2023).

그러나 직업과 과업을 구분할 필요가 있다. <그림 3.22>는 소프트웨어 평가 직군에서 필요한 과업을 순차대로 정리한 도표를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 소프트웨어 평가는 요구사항 정의부터 시작해서 평가 계획 수립과 전체 설계, 평가를 위한 입출력 케이스 준비, 평가 실행, 결과 및 오류 보고서 작성, 오류 보고서 기반의 오류 수정 및 재평가, 그리고 소프트웨어 배포의 8가지 과업으로 이루어진다. 이 중 평가 케이스 준비, 보고서 작성, 오류 수정 등은 LLM이나 코딩 어시스턴트 등을 통해 자동화가 가능함을 확인할 수 있지만, 문제 정의나 전체 설계, 실행 등과 같이 책임이 따르는 것들은 인간이 직접 수행해야 하는 과업임을 알 수 있다. AI가 직업을 대체하려면 직업 내 담당자가 수행하는 모든 과업을 자동화해야 가능한데 이것이 가능한 직업은 그렇게 많지 않다. 그러므로 생성 AI의 도입은 일자리 대체라기보다는, 지금까지 모든 과업을 인간이 수행해야 했던 것과 달리 일부 과업은 AI를 통해 자동화하고 다른 주요 과업을

인간이 직접 수행하는 형태로의 변화를 가져오게 된다. 따라서, 기업은 AI와 인간에게 과업을 어떻게 배분할지 판단하기 위해 AI에 대한 정확한 이해 및 활용 역량을 갖추고 직원들의 AI 활용 교육에 적극적인 투자를 할 필요가 있다.

라 새로운 AI 에이전트 시대

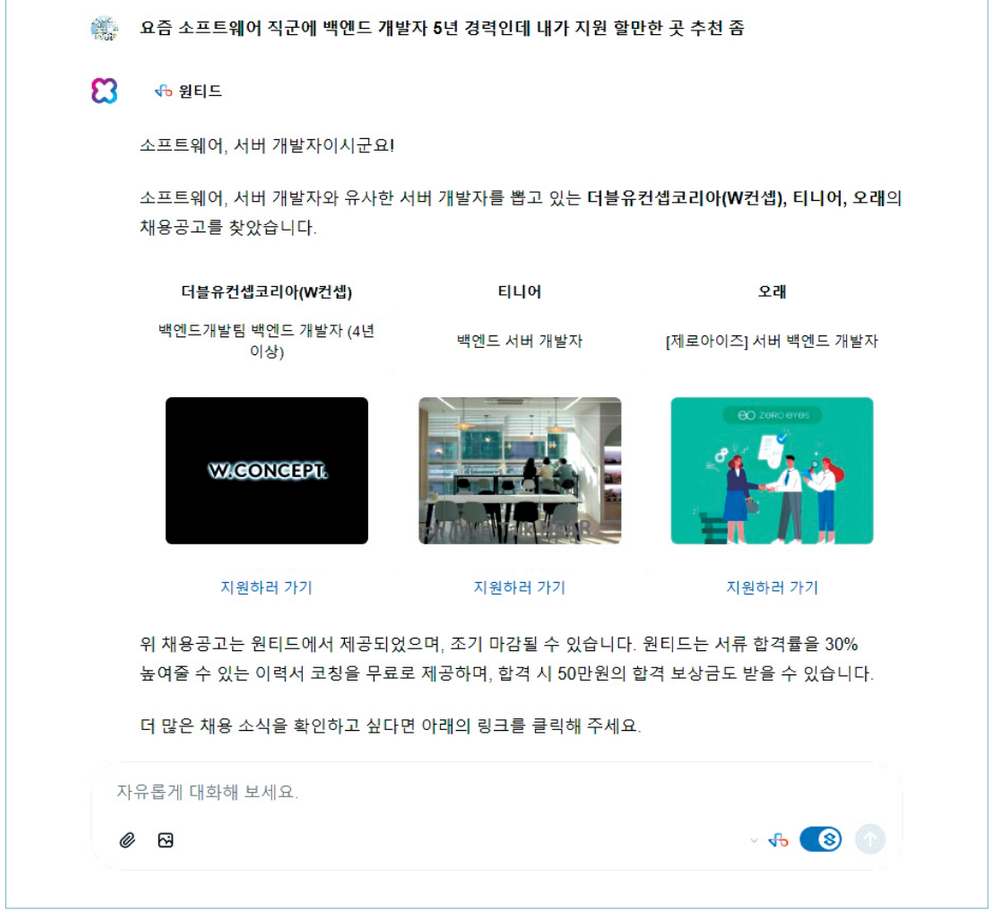
AI 에이전트는 사람을 대신해 혹은 도와서 특정 작업이나 목표를 수행하기 위해 독립적으로 동작하는 AI 소프트웨어 프로그램이라고 할 수 있다. AI 에이전트는 사람이 문제를 정의하면 그 문제 해결을 위해 데이터 수집 및 분석, 절차의 및 계획 수립, 수립된 절차의 과업 수행 및 평가를 하게 된다. 간단하게는 질의응답하는 챗봇부터 자율주행 차량, AI 비서 등이 이에 포함된다. 특히 데이터 수집 및 분석, 계획 수립, 인간의 개입 없는 평가와 적응 등은 매우 어려운 과업이기 때문에 기존 AI 기술로 이를 구현하는 것은 한계가 있었다. 그러나 생성 AI 기술의 발전으로 다시금 AI 에이전트의 등장이 현실화되고 있다.

LLM은 글을 쓸 수 있는 것뿐만 아니라 함수를 호출할 수 있는 형태로 글의 내용을 변환하여 코드를 작성할 수 있다. 그러므로 프로그래밍을 통해 자체적으로 데이터 분석을 할 수도 있고 함수를 통해 외부 API 혹은 별도 앱을 호출하는 것이 가능하다. 챗GPT의 경우 문서나 데이터 업로드를 통해 그래프를 그릴 수 있고 네이버의 클로바X는 스킬을 통해 <그림 3.23>과 같이 외부 앱을 활용한 정보를 확인할 수 있다. 2023년에 공개된 AutoGPT는 GPT4의 계획 능력을 활용해 사용자가 미션과 2~3개의 부분과업을 입력하면 해당 과업을 수행하기 위한 프롬프트 작성과 수정을 스스로 수행하여 미션을 완수하는 데모를 보여주며 AI 커뮤니티의 큰 관심을 끌었다. 그러나 사용자 개입 없이 자동으로 프롬프트를 생성 및 수정하면서 의도치 않게 많은 토큰을 생성하게 되어 지나친 과금이 발생할 수 있다.

이렇게 생성 AI의 데이터 분석 및 계획 수립이 가능해지면서 본격적인 AI 비서 에이전트의 시대가 열릴 수 있을 것이라는 기대감이 높아지고 있다. 특히 스마트폰이나 자동차, 가전, 오피스, 로봇 등에 생성 AI 에이전트가 탑재되고 멀티모달 형태로 사용자와 상호작용을 하거나 에이전트들끼리 정보를 주고받으며 어디서나 사용자를 이해하고 업무와 일상생활을 도울 수 있는 에이전트가 빠른 시간 내에 등장할 것으로 예상된다. 이미 챗GPT-4o나 구글의 연례 개발자 행사인 구글 I/O에서 AI 비서 에이전트의 데모를 보여주었고 애플 또한 애플 인텔리전스를 WWDC 2024에서 공개하면서 애플의 AI 비서인 시리와 챗GPT-4o를 연동하여 하반기 출시한다는 계획을 발표했다. 특히 구글은 이러한 생성 AI 기반의 에이전트 시대를 대비하여 제미나이(Gemini)를 개발하는 딥마인드, 스마트폰 팀인 픽셀팀, 그리고 안드로이드 개발팀을 하나의 조직으로 통합하는 대규모 조직변경을 지난 4월에 단행하였다. 즉, 앞으로 제작될 안드로이드의

운영체제 기본 설계부터 제미나이에 최적화된 형태로 만들어 이것을 스마트폰에 탑재하려는 것으로 보인다.

그림 3.23 클로바X의 스킬을 활용하여 원티드 앱과 연동한 사례



* 사용자는 구직앱인 원티드를 연동하여 자신의 경력에 적합한 채용하는 기업을 쉽게 확인할 수 있음

출처: CLOVA X(2024).

이렇게 생성 AI 기술의 발전으로 검색, 모바일 등의 기존 플랫폼이 AI 에이전트 플랫폼으로 융합됨에 따라 금융, 쇼핑, 콘텐츠 등 기존의 많은 앱들이 AI 에이전트를 적극 활용하는 형태로 변화될 것으로 예상되며, 이와 같은 거대한 플랫폼 지각변동에서 새로운 기회가 만들어질 것이다.

마 맺음말

지금까지 생성 AI 기술의 동향과 전망, 그리고 이를 통한 생산성 혁신 및 새로운 AI 에이전트 시대에 대해 살펴보았다. 생성 AI는 이미지, 음성, 텍스트 등 다양한 형태의 콘텐츠를 자동으로 생성할 수 있으며, 이를 통해 생산성을 크게 향상시킬 수 있다. 기업들은 생성 AI를 활용하여 제품 개발, 마케팅, 고객 서비스 등 다양한 분야에서 혁신을 이루고 있으며, 개인들도 생성 AI에서 비롯되는 일상 속 다양한 편의를 누리고 있다.

새로운 AI 에이전트 시대가 도래하면서, AI 에이전트는 우리의 일상과 업무에서 더욱 중요한 역할을 하게 될 것이다. AI 에이전트는 우리의 개인정보와 데이터를 안전하게 보호하면서도, 우리의 요구에 빠르고 정확하게 대응할 수 있어야 한다. AI 에이전트가 인간의 역할을 대체하는 것이 아니라, 인간과 함께 협력하여 더 나은 가치를 창출하는 것이 무엇보다 중요하다.

기술의 발전에 따른 윤리적 문제와 사회적 책임에 대해서도 고민해야 할 것이다. 생성 AI가 인간의 창의성과 자유를 침해하지 않도록, 적절한 규제와 가이드라인이 필요하다. 더불어 전 세계의 문화 다양성을 지키기 위한 방법으로 소버린 AI에 대한 중요성을 인식하고 우리나라의 AI 기술과 산업 생태계 역량은 물론 소버린 AI 확보를 원하는 국가 정부 및 기업과 협력하여 글로벌 AI 다양성을 강화함으로써 우리의 성장 기회를 창출하는 것이 중요하다.

참고문헌

Abdin, M., Jacobs, S. A., Awan, A. A., Aneja, J., Awadallah, A., … Xu, J. & Xu, W.(2024). Phi-3 Technical Report: A Highly Capable Language Model Locally on Your Phone, arXiv:2404.14219.

Betker J., Goh, G., Jing, L., Brooks, T., Wang, J., Linjie, L., Ouyang, L., Zhuang, J., Lee, J., Guo, Y., Manassra, W., Dhariwal, P., Chu, C., Jiao, Y. & Ramesh, A.(2023). Improving Image Generation with Better Captions, https://cdn.openai.com/papers/dall-e-3, pp. 2, 3, 8.

Brown, T., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J. D., Dhariwal, P., Neelakantan, A., Shyam, P., Sastry, G., Askell, A., Agarwal, S., Herbert-Voss, A., Krueger, G., Henighan, T., Child, R., Ramesh, A., Ziegler, D., Wu, J., Winter, C., Hesse, C., Chen, M., Sigler, E., Litwin, M., Gray, S., Chess, B., Clark, J., Berner, C., McCandlish, S., Radford, A., Sutskever, I. & Amodei, D.(2020). Language Models are Few-Shot Learners, NeurIPS 2020.

Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., Toutanova, K.(2019). BERT: Bidirectional Encoder Representations from Transformers. NAACL 2019.

Gemini Team Google(2023). Gemini: A Family of Highly Capable Multimodal Models, arXiv:2312.11805.

Gemma Team(2024). Gemma: Open Models Based on Gemini Research and Technology, arXiv:2403.08295.

Jiang, A. Q., Sablayrolles, A., Mensch, A., Bamford, C., Chaplot, D. S., … Lacroix, T. & Sayed, W. E.(2023). Mistral 7B, arXiv:2310.06825.

Kim, B., Kim, H., Lee, S., Lee, G., Kwak, D., Jeon, D., Park, S., Kim, S., … Park, W., & Sung, N.(2021). What Changes Can Large-scale Language Models Bring? Intensive Study on HyperCLOVA: Billions-scale Korean Generative Pretrained Transformers, EMNLP 2021.

Lewis, P., Perez, E., Pitkus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., Kuettler, H., Lewis, M., Yih, W.-T., Rocktaschel, T., Riedel, S. Kiela, D.(2020). Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. NeurIPS 2020.

Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, L., & Polosukhin, I.(2017). Attention Is All You Need, NIPS 2017.

Wang, J., Huang, Y., Chen, C., Liu, Z., Wang, S. & Wang, Q.(2023). Software Testing with Large Language Models: Survey, Landscape, and Vision, arXiv:2307.07221.

Wu, S., Irsoy, O., Lu, S., Dabravolski, V., Dredze, M., Gehrmann, S., Kambadur, P., Rosenberg, D. & Mann, G.(2023). BloombergGPT: A Large Language Model for Finance, arXiv:2303.17564.

Yang, A., Yang, B., Hui, B., Zheng, B., Yu, B., Zhou, C., … Fan, Z. & Qwen Team, Alibaba Group(2024). Qwen2 Technical Report, arXiv:2407.10671.

Zhang, L., Rao, A., & Agrawala, M.(2023). Adding Conditional Control to Text-to-Image Diffusion Models, ICCV 2023.

Zhuang, S.(2024). China rolls out large language model AI based on Xi Jinping Thought. South China Morning Post. 21 May 2024.

디지털플랫폼정부위원회(2024). 공공부문 초거대 AI 도입·활용을 위한 가이드라인(2024.4.), Retrieved August 23, 2024 from https://www.dpg.go.kr/DPG/contents/DPG03020000.do?schM=view&id=20240423103225685873&schBcid=reference.

CLOVA X(2024). Retrieved August 23, 2024 from https://clova-x.naver.com.

Gartner(2024). Retrieved August 23, 2024 from https://www.linkedin.com/posts/peter-dulcamara_here-is-the-2024-gartner-hype-curve-for-ai-activity-7211379878388989952-Le6K.

Intel(2024). Retrieved August 23, 2024 from https://www.intel.com/content/www/us/en/products/docs/processors/core-ultra/ai-pc.html.

Lorica, B.(2023). Techniques, Challenges, and Future of Augmented Language Models, Gradient Flow, Retrieved August 23, 2024 from https://gradientflow.com/techniques-challenges-and-future-of-augmented-language-models.

McKinsey(2023). The economic potential of generative AI: The next productivity frontier, Retrieved August 23, 2024 from https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/the-economic-potential-of-generative-ai-the-next-productivity-frontier#industry-impacts.

Nature index(2024). Country/territory tables, Retrieved August 23, 2024 from https://www.nature.com/nature-index/country-outputs/generate/all/global.

OECD: Organization for Economic Co-operation and Development(2023). Generative artificial intelligence in finance, Retrieved August 23, 2024 from https://www.oecd.org/en/publications/generative-artificial-intelligence-in-finance_ac7149cc-en.html.

Openai sora(2024). Retrieved August 23, 2024 from https://openai.com/index/sora.

Tortois(2024). The Global AI Index 2024, Retrieved August 23, 2024 from https://www.tortoisemedia.com/intelligence/global-ai.

PART 3

5 인공지능의 발전과 신뢰성 기술 전망

최재식
KAIST 김재철AI대학원 교수

가 들어가는 말

인공지능(AI)의 발전은 앨런 튜링(Alan Turing)이 튜링 테스트(Turing Test)를 만들면서 처음 시작되었고 그 이후 전문가 시스템(expert system)이 만들어졌다. 또한, 베이지안 추론(Bayesian Inference)이라는 학습 방법을 통해서 기계학습(ML)에 큰 발전이 있었고, 인공신경망(artificitial neural networks) 분야도 많은 진보를 이루었다. 그 결과, 여러 연구자들의 연구와 노력을 거쳐서 이미지넷(ImageNet)이나 챗GPT와 같은 발전을 이루게 되었다. 인공지능 분야에서 전문가 시스템, 베이지안 추론, 학습 이론 및 인공신경망을 만든 사람들이 그 공을 인정받아 컴퓨터 분야의 노벨상이라 불릴 정도로 가장 영예로운 상인 '튜링상(Turing Award)'을 받게 되었다. 이런 연구자들이 인공지능을 발전시켜온 길을 회고해 보고자 한다.

인공지능이라는 용어를 만든 존 맥카시(John McCarthy) 교수는 원래는 프린스턴대학교에서 편미분방정식으로 박사학위를 받은 젊은 수학자였다. 스탠포드대학교 수학과 교수로 부임한 후, 그는 스스로 생각하는 컴퓨터를 만들고 싶어서 논리적 규칙(logical rule)을 잘 학습하고 프로그래밍이 자동화된 무언가가 도움이 되겠다는 생각을 했다. 다만, 이런 생각은 당시 스탠포드대학교 수학과의 다른 교수들의 의견과는 맞지 않았고 편미분방정식을 연구해서 결과를 내기를 바라는 학교의 입장과도 차이가 있어 그는 결국 스탠포드대학교를 떠나게 된다. 그 후 당시 인공지능을 만들고자 하는 여러 연구자들을 모아서 다트머스대학교에서 워크숍을 개최하고 '인공지능'이라는 명칭을 만들어 개념을 정립하게 된다. 또한, 다트머스 시절 IBM으로부터 "자동화된 프로그램을 만드는 언어가 필요하다. 이런 자동화된 것들을 프로그래밍화해서 실행될 수 있는 것을 만들어 달라"라는 의뢰를 받고, LISP(LISt Process)라는 새로운 프로그래밍 언어(McCarthy, 1960)를 만들어서 전문가 시스템의 토대를 닦게 된다. 결국 MIT 교수를 거쳐서, 스탠포드대학교를 떠난 지 10년도 되지 않은 시점에 스탠포드대학교의 수학과 안에 컴퓨터과가 만들어지면서 정교수로 부임해 수많은 제자들을 양성하였고, 그런 공로를 인정받아 튜링상을 받게 되었다.

오늘날 딥러닝이라는 분야를 만들고 발전시킨 인공신경망의 아버지(godfather)라 불리는 얀 레쿤 교수, 요슈아 벤지오 교수, 제프리 힌튼(LeCun et al., 2015) 교수도 2018년 튜링상을 수상하였다. 여기에도 흥미로운 이야기가 있는데, 힌튼 교수가 튜링상을 받고 AAAI(Association for the Advancement of Artificial Intelligence)라는 학회에서 수상을 기념하는 기조강연을 할 당시 매우 인상적인 말을 남겼다. 힌튼 교수는

"내가 마지막으로 이 학술대회에 논문을 냈을 때 내 생애 가장 좋지 않은 리뷰를 받았습니다."라고 말했는데, 그 리뷰는 "힌튼은 벡터 표현법(Vector Representation)이라는 아이디어로 7년간 연구를 했다. 그런데 아무도 관심이 없고 작동하지도 않는데, 그러니 그만하고 다른 곳으로 갈 때가 아닌가?"라는 내용이었다고 한다. 해당 리뷰를 받고 난 다음부터는 AAAI에 더 이상 논문을 투고하지 않고, 다른 곳에 투고하여 연구를 계속하게 된다. 그 결과, "그 당시 7년 동안 주목을 받지 못했지만 이 방향의 연구를 계속하면서 나는 결국 경사하강법(Gradient Descent)이라는 알고리즘으로 큰 시스템의 매개변수를 학습할 수 있다는 것과 그 큰 시스템이 실제로 작동함을 보였다(Synced, 2020)."라고 이야기한다. 20~30년이 넘는 기간 동안 지능적인 시스템이 작동하는 것을 보기 위해서 힌튼 교수가 AI 분야에서 노력한 점이 결국 인정받은 것이다.

이와 같이 인공지능은 인간과 비슷한 지능적인 기능이 있는 시스템을 만들기까지 특정한 이론을 따라 깊게 파고들면 새로운 결과가 나오기보다는 불확실한 영역이 많아서 새로운 연구를 계속 진행해야 하고 그 과정에서 학문 분야 내 기존 학설과 다르거나 심지어는 배치되는 경우가 비일비재했다. 그만큼 연구 분야에서 미리 계획된 결과를 도출하기보다는 도전적인 과정에 투자를 하는 것이 더 중요할 수도 있다는 점을 인식할 필요가 있다. 다음으로는, 미국과 중국 등 현재 인공지능 분야에서 앞서가는 나라들이 어떤 투자 전략을 취하는지 소개해 보고자 한다.

나 미국의 인공지능 투자 전략

AI 분야에서 미국의 강점은 세계 시장을 주도하는 실리콘 밸리 소재 글로벌 인터넷 기업과 세계 최고의 연구 능력을 기반으로 하고 있다. 마이크로소프트, 구글, 애플은 컴퓨터와 휴대폰에 필수적인 소프트웨어 인프라 및 AI 서비스를 제공하고 있고, 아마존, 넷플릭스, 메타(페이스북) 및 트위터는 각각 클라우드, 인터넷 미디어, 온라인 소셜 미디어 및 마이크로블로깅 서비스 분야에서 온라인 서비스 시장을 주도하고 있다. 이런 온라인 서비스를 전 세계로 제공하는 과정에서 축적되는 대용량 데이터의 누적과 그 처리 역량은 미국의 AI 기술 및 산업을 발전하게 하는 매우 중요한 인프라다. 이러한 글로벌 플랫폼 기업들은 글로벌 사용자의 데이터를 축적해 더욱 발전된 AI 기반 인식 기술 및 추천 시스템을 개발하여 제공하고 있다. 구글의 딥마인드(DeepMind) 인수와 마이크로소프트의 오픈AI 투자에서 보듯이 미국 기업들은 혁신을 주도할 세계적 수준의 연구진을 유치하기 위해 기술 기업에 대한 투자를 우선시하여, 기술의 발전을 이끌고 있다.

미국이 AI 분야에서 확보한 독보적인 위상은 국가의 전략적인 투자에 기인한다. 미국은 방위고등연구계획국(DARPA)이라는 국방연구진흥기관을 통해서 AI에 관련한 대형 프로젝트를 진행해왔다. 1984년부터 DARPA는 카네기멜론대학교를 통해서 군용 자율주행 자동차를 만들기 위한 프로젝트(Jochem et al., 1995).를 수행했다. 성공과 실패를 계속 거듭하다가 2005년 DARPA 그랜드챌린지를 통해서 사막을 무인으로 경주할 수 있다는 것을 확인(Thrun et al., 2006)하였다. 이후 구글과 웨이모, 테슬라와 같은 민영 기업들에게 기술 이전이 이루어짐과 동시에 고급 인력들이 투입됨에 따라 상용화 기술에서 앞서 나가게 되었다.

챗GPT의 근간이 되는 기술도 사실 DARPA가 미국의 표준기술연구소(NIST)와 함께 기계가 자동으로 읽는 것을 목표로 하는 프로그램(Machine Reading Program) 개발을 40년 동안 지속한 결과이다(Strassel et al., 2010). 처음 '텍스트를 어떻게 가져올 것(retrieval)인가?', 그리고 '가져온 정보를 어떻게 자동으로 분석할 것인가?'라는 질문을 장기간 연구와 경진대회 형식으로 수행했고, 결국 구글이 개발한 버트(BERT) 같은 프로젝트를 성공할 수 있었다(Voorhees, 2005; Delvin et al., 2019). 챗GPT를 학습하는 알고리즘은 사실 BERT에서 먼저 공개되어 있었는데, 이런 기술을 연구한 많은 이들이 매년 NIST가 개최하는 경진대회에 참여하고, 연구에 대한 지원을 받아서 세계적 전문가로 양성되었으며 지금은 구글, 오픈AI와 같은 회사의 연구개발 주역으로 활동하고 있다.

미국의 힘은 기술을 상용화하는 기업들이 전 세계의 데이터를 모으고 학습하는 역량뿐만 아니라, 40년 가까이 긴 호흡으로 중요한 연구를 기획하고 투자하면서 기술 개발을 장려해 온 정부의 장기적인 기술 및 인재 양성 전략에 있다.

다 중국의 인공지능 투자 전략

중국의 인공지능 투자 전략은 내수 시장의 분리에 따른 내수 기업 육성, 그리고 국외 전문 인력의 유치 전략으로 나눌 수 있다. 주요 정보 검열 및 보안을 이유로 다국적 기업이 중국 내부에서 서비스하는 것을 막고 자국에서 서비스하는 기업을 육성하면 중국 내부의 인공지능 및 온라인 서비스 시장이 충분히 크기 때문에 이를 처리하는 회사가 생기고 양질의 AI 서비스를 학습할 데이터가 충분히 모일 것을 예상한 정책이다. 산업이 커짐에 따라 해외에 있는 중국계 인재가 국내로 돌아오게 만드는 정책을 통해서 신기술을 개발하는 것도 함께 기대한 것으로 보인다.

이런 전략은 초기의 외국 자본 유치 전략에서 많이 변화된 양상이라고 볼 수 있다. 초기에는 마이크로소프트와 같은 미국 기업에서 중국의 인재가 연구하면서 기술을 개발하는 것이 주요한 발전 전략이었

다. 예를 들면, 2016년 전후에는 시각 인공지능을 인식하는 기술에 대한 개발이 매우 활발하게 진행됐는데, 특히 딥러닝의 계층을 많이 늘린 구글은 미국 본사 연구원을 중심으로 Inception-v3라는 모델 개발에 집중했고, 마이크로소프트는 중국 연구소 내 연구원을 중심으로 ResNet이라는 모델을 개발해서 데이터가 많은 특정한 작업에 대해서는 시각 인지 분야에서 인간의 능력에 버금가는 성능을 확보할 수 있었다(Szegedy et al., 2015; He et al., 2016). 결국 미국 연구원들이 주축이 된 구글과 중국 연구원들이 주축이 된 마이크로소프트는 50개 이상의 계층을 쌓는 모델을 개발하는 기술을 확보할 수 있었고, 마이크로소프트와 구글은 각각 해당 기술에 지적재산권을 보유하게 되었다. 당시 미국 연구원과 중국 연구원 사이의 기술 대리전과 같은 양상을 띠었지만, 구글과 마이크로소프트는 모두 미국에 본사를 둔 다국적 기업이기에 결국 주요한 연구원과 지적재산권은 미국 기업의 소유가 되었다. 이를 계기로 중국은 인공지능 분야에서 자국의 학교와 기업에 의한 기술 개발을 더욱 강화하게 된 것으로 보인다.

이에 대한 중국의 인공지능 전략 중 중요한 한 축은 소위 천인계획, 또는 만인계획이라고 불리는 해외 거주 인공지능 인재를 유치하여 주요한 기술을 빠르게 습득하여 개발하는 추격형 전략이다(Shi et al., 2023). 이는 우리나라가 해외에서 공부한 유수의 재외한국인 연구자를 유치해서 KIST를 설립하고 기술자립화를 이룬 사례의 21세기 버전으로 보인다. 인공지능 인재 유치를 위해 재정적인 지원뿐만 아니라, 교육 관련 대규모 데이터 및 학습 인프라를 함께 적극적으로 홍보하고 있고, 미국 등 다국적 인터넷 기업에서 많은 경험을 쌓은 중국계 인재를 주요 회사의 임원 및 핵심 기술자로 유치해서 젊은 연구자 및 개발자를 육성하는 전략을 함께 취하고 있는 것으로 보인다.

중국은 학습데이터가 많은 이미지 분석 및 인식, 중국어 인식 등의 부문에서 기술적으로 많이 앞서 있지만, 중국 정부의 장기적인 투자를 통해서 인공지능의 주요한 난제를 새롭게 해결한 사례는 아직 부족하고, 현재 대형언어모델의 개발에서 추격형 위주의 양적 전략을 개발한 사례는 많지만, 질적 측면의 문제해결 역량이 검증되지 않은 점은 개선이 필요할 것으로 보인다.

라 미국과 중국의 인공지능 경쟁과 우리의 전략

AI 기술의 발전이 장기적으로는 우리에게 중요하고 긍정적인 영향을 주는 것이 맞지만, 기술을 개발하는 입장에서는 미국과 중국 등에서 AI 관련 데이터와 기술 및 인력을 독점 혹은 과점하며 시장을 주도하고 있는 형국이다. 더구나 많은 빅테크 기업들이 여러 새로운 신기술을 만들고 논문을 써서 공개도 하지만, 그 원천 특허들은 전 세계에 출원하고 등록하여 갖고 있는 경우가 많다. 예를 들면, 구글 딥마인드에서 신경망 기반 모델을 바탕으로 한 강화학습으로 알파고를 만들었던 기술은 전 세계 특허로 등록되어 있다. 만약, 다른 회사가 이런 기술을 상용화해서 수익을 내려 한다면, 구글의 승인을 받아야 하는 상황이다. BERT에서 개발한 챗GPT의 학습 알고리즘도 특허 심사가 진행된 바 있어 논란이 되었다(Bergman et al., 2023).

AI 기술이 원활하게 발전하기 위해서는 당장 상용화되지는 않더라도 새로운 도전적인 기술을 자유롭게 연구할 연구기관, 그리고 인재를 양성할 대학이 필요하다. 캐나다 토론토대학교의 벡터연구소(Vector Institute)나 미국 스탠포드대학교, MIT, 영국의 옥스퍼드대학교, 캠브리지대학교와 같은 유수의 대학들을 보면, 당장의 실용성은 다소 부족하더라도 딥러닝의 한계를 극복하고 인공지능의 안전성을 담보하기 위한 여러 선도적인 연구를 다수 수행하고 있다. 이러한 기관을 유지하기 위해서는 선도적인 연구 수행에 재정을 지원하고자 하는 정부의 의지, 그리고 국내뿐만 아니라 해외로부터 우수한 연구자 및 학생을 유치할 수 있는 환경을 마련하는 것이 중요하다.

개발된 원천기술을 잘 상용화하는 것도 중요하다. 실리콘 밸리의 빅테크 기업들은 대학에서 새로 개발된 기술들을 활용할 뿐만 아니라, 대학의 인재를 데리고 와 전 세계로 서비스되는 AI 인프라를 키우고 성능을 높여서 다른 나라와 기관들이 쉽게 따라하지 못하는 기술을 개발하고 있다. 이를 위해서는 창업 생태계에 자본을 공급하는 투자자도 중요하지만, 성공한 기업은 상장하거나 인수 합병하고 실패한 기술과 기업은 새로운 환경에서 다시 도전할 수 있는 기회를 지속적으로 제공해야 한다. 외국 투자자나 외국의 연구원 기술자가 함께 이 과정에 참여하고 보상을 받는 것도 중요한 제도적 발전이다. 미국이나 영국, 싱가포르가 국외 투자와 외국인 학생 유치에 적극적으로 나선 끝에 큰 혁신을 이루고 있는 점을 감안하면 인공지능 분야에서도 적극적인 개방 정책을 펼치는 것이 중요하다.

정책적·기관적으로는 이러한 원천기술의 개발이 사업화 기술로 잘 전환될 수 있도록 지원해야 한다. 미국에서는 DARPA가 인공지능 원천기술을 고도화해서 국방의 응용에 적용할 수 있는 것을 목표로 장기연구를 수행한 결과 자율주행, 기계읽기(Machine Reading) 등 여러 인공지능 기술이 발전되어 국방뿐만 아니라, 인터넷 서비스, 챗GPT 등에도 활용할 수 있게 되었다. 대부분의 원천기술은 상용화 과정에서 많은 시행착오를 겪어 때로는 긴 시간이 걸리게 되는데, 미국에서는 DARPA가 연구에 대한 기획과 재정지원을 전담하고, NIST는 기술 평가와 표준화 관점에서 다양한 경진대회를 개최함으로써 상용화 기술의 개발을 유도했다는 점에서 시사점이 크다.

마 생성형 인공지능의 발전과 경제발전

맥킨지는 2013년 AI의 발전으로 2025년까지 7조 달러 정도의 GDP 증가가 있을 것으로 예상한 바가 있다. PwC(PricewaterhouseCoopers International Limited)사는 2030년까지 15.7조 달러, 즉 우리나라 GDP의 9배가 넘는 경제적 효과가 있을 것으로 예상하고 있다. 2030년까지 AI를 통한 GDP의 증가율은 미국이 26.1%, 중국이 14.5%로, 우리나라를 포함한 기타국의 GDP 증가는 10% 이내로 예상되고 있다. IBM 등의 기업은 인사/경영지원의 신규 채용을 중단하고 AI를 적극적으로 활용하겠다는 정책을 발표했다. 지금까지 AI가 노동 생산성을 향상시키는 데 많은 기여를 했다면, 앞으로는 개인화, 그리고 신규 서비스를 확장하는 데 큰 영향을 줄 것으로 보인다. 그 중에서는 생성형 AI 시장이 연평균 21.3% 정도 성장하여 2023년에는 2020년 대비 30배 정도 성장할 것으로 예상하고 있다.

세계경제포럼에서 매년 등대공장을 선정하는데, 2023년에 발표된 등대공장을 조사해 보면, 29개 등대공장별 대표 기술을 각 5개씩 선정하여 총 145개의 기술이 주요한 효과를 냈다고 한다. 그 중 AI와 관련된 기술이 AI 광학 조사, AI 기반 제어, AI 기반 안전 관리 등 총 68건으로, 무려 47%에 육박했다. 고도화된 제어 분야에서도 AI가 생산성을 높이고 에너지 사용을 줄이는 등 활발하게 활용되고 있는 것이다. 인공지능의 발전은 이외에도 금융, 군사, 의료, 에너지 등 다양한 산업에 널리 적용되어 인간의 삶을 더욱 윤택하게 할 것으로 기대된다.

바 인공지능 관련법과 규제

인공지능 관련 기술의 사회적 영향력이 커지면서 전 세계적으로 신뢰할 수 있는 인공지능을 개발하고 인공지능 시스템을 안전하게 제어하는 방법에 대한 법적, 제도적 규제에 대한 관심도 높아지고 있다.

EU는 2018년 발효된 일반정보보호법(GDPR)에서 자동화된 의사결정에 대한 설명을 요구하는 법안을 통과시킨 이후 이 기준이 더 강화된 인공지능법(AI Act)의 발효를 앞두고 있다. 중국은 생성형 AI가 중국 공산당의 사상에 반하지 않도록 규제하는 데 노력을 기울이고 있다. 미국은 NIST를 통해서 AI 위험관리 프레임워크를 마련하고 AI 시스템을 개발하는 회사와 조직이 위험에 노출되는 것을 막는 데 노력을 기울이고 있다.

사 인공지능 신뢰성의 구성요소

인공지능의 신뢰성은 다음 7가지 요소로 구성된다는 의견이 지배적이다(Beena et al., 2021). 그 구성 요소는 투명성(transparency/explainability), 공정성(fairness), 강건성(robustness), 안전성(safety/secure), 개인정보보호(privacy), 책임성(responsibility)이다. 이런 인공지능 신뢰성의 요소들은 서로 밀접한 관계를 맺고 있다.

투명성(transparency/explainability)은 AI 시스템의 의사결정을 투명하게 분석하고 볼 수 있는지를 확인하는 요소이다. 예를 들어 인공지능 시스템이 인간과 다른 의견을 냈다면, 왜 이런 의사결정이 나왔는지 해석을 제공하고 이를 인간이 쉽게 이해할 수 있도록 설명하는 것이 중요하다.

공정성(fairness)은 AI 시스템의 의사결정이 사회적 합의와 규범에 따라서 공정하게 이뤄졌는지를 확인하는 요소이다. 인공지능 시스템이 성별, 인종, 나이 등을 편향된 의사결정 요소로 관여시키지 않도록 확인하는 것이 중요한 기준이다. 예를 들어 AI가 회사에 지원한 사람을 평가할 때, 성별, 인종, 거주지 등에 의해서 편향되지 않도록 AI 모델의 학습 과정뿐만 아니라, AI 시스템이 활용되는 시점까지도 확인을 하는 것이다.

강건성(robustness)은 AI 시스템이 데이터가 적거나 시스템의 문제로 작동하지 못할 때 의사결정을 하지 못하는 것을 사용자에게 통보하는 등 다양한 환경에서도 안전하게 사용할 수 있게 하는 기술이다. 예를 들면 자율주행 자동차의 눈에 해당하는 카메라에 이물질이 붙어서 더 이상 자율주행을 하기 어렵다면, 조금 느리더라도 안전하게 운전할 수 있는 방향을 안내하거나, 사용자에게 문제가 있음을 알려줄 수 있어야 한다.

안전성(safety/secure)은 외부의 공격으로부터 AI 시스템을 보호할 수 있는지를 확인하는 기준이다. 예를 들어, 군에서 운영하는 자율주행 드론이 적군의 해킹으로 제어권을 빼앗겨서 우리 군을 공격하는 상황을 막을 수 있어야 한다.

개인정보보호(privacy)는 AI 모델 개발 시 학습데이터로 포함된 개인정보 관련 데이터가 AI 시스템의 주요한 의사결정에 직접적으로 활용되는 것을 지양하고, 더 나아가 AI 모델에 담겨있는 개인정보가 서비스 과정에서 누출되는 것을 방지하는 것이다.

책임성(responsibility)은 인공지능 신뢰성의 다양한 구성요소 몇 개를 포괄하는 개념이다. AI 시스템의 신뢰성에 문제를 발견했다면, 이런 문제를 일으킨 원인은 무엇이고, 또 누가 이 문제를 해결할 기술적, 법적 책임이 있는지를 확인해서 제공하는 것을 의미한다.

아 딥러닝 내부의 의사결정을 설명하는 기술

딥러닝은 합성곱 신경망이 이미지와 소리 인식 등에서 인간의 인지 능력을 넘는 성능을 보였을 때 어떻게 이러한 우수한 성능을 보이는지 명확하게 알기 어렵기 때문에, 블랙박스 모델이라고 불리곤 했다. 하지만, 딥러닝의 내부를 이해하기 위한 다양한 연구가 수행되어 현재는 합성곱 신경망에서 주요한 유닛이 수행하는 기능에 대해서 비교적 정확하게 해석하는 것이 가능하다. 그 원리는 합성곱 신경망의 특정 위치에 있는 유닛이 활성화될 때, 이런 활성화를 유발하는 입력 데이터(예: 이미지)의 위치에 있는 물체들의 공통적인 특징을 찾는 방식으로, 해당 유닛을 선택적으로 활성화하는 입력 데이터의 특징을 나열하는 것이 가능하다. 이런 기술을 확장하면, 생성형 모델에서 특정한 이유로(예: 학습이 모두 완성되지 못했기 때문에) 활성화될 때마다 비정상적인 물체(artifact, 인공물)를 생성하는 유닛을 찾아서 비활성화시키고, 물체를 정상으로 만드는 것이 가능하다.

현재 생성형 AI 시스템 중에서도 가장 큰 주목을 받고 있는 대형언어모델(LLM)의 의사결정을 설명하는 기술에 대한 관심이 매우 많다. 대형언어모델이 매우 많은 매개변수를 사용하고 있고, 그 원리가 더 복잡해서 알기 어려운 면이 있지만, 최근에 개발된 기술들은 이런 모델이 갖고 있는 주의집중(attention) 구조에서 어떤 입력에 반응하는 대형언어모델 내부의 유닛을 찾아서, 악성 답변을 하게 하거나, 막게 하는 것이 가능하다. 예를 들어, 대형언어모델이 원래는 “인종차별적인 농담을 해줘.”라는 질문에 “저는 그런 답변을 할 수 없습니다.”라고 이야기하지만, 특정 유닛을 강제로 비활성화하면 인종차별적인 농담을 답변으로 제공하는 것을 볼 수 있다.

이런 복잡한 AI 모델의 내부를 해석하고 분석하는 기술들을 잘 발전시키면 AI 모델 내부의 문제를 미리 확인하고 해결해서, 안전한 AI 시스템을 만드는 데 활용될 수 있다. 이를테면, 왜 이런 의사결정을 내렸는지, 언제 어떤 상황에서 학습데이터가 부족했는지 등을 미리 파악할 수 있을 것이다. 이런 기술을 통해서 수많은 매개변수가 있는 대형언어모델의 내부를 정확하게 해석하고 이해할 수 있게 되면, 보다 신뢰할 수 있는 인공지능을 개발하는 길이 조금 더 가까워질 수 있을 것으로 기대된다.

자 맺음말

인공지능의 신뢰성을 확보하기 위해서는 서비스 개발 과정에서 충분한 데이터를 수집하고, 학습데이터를 안전하게 처리 및 관리하고, 서비스 과정에서 인공지능의 신뢰성을 전주기적으로 확보하는 것이 가장 중요하다.

AI 학습데이터를 준비할 때는 개인정보가 포함되어 있지는 않은지, 저작권에는 문제가 없는지, 유해한 악성 콘텐츠가 있는지 등을 확인하고, 데이터를 정제해야 한다. 또한, 가능한 적은 전력과 에너지로 정교한 AI 모델 학습을 수행하는 것도 중요하지만, 추후 편향성 해결과 설명 제공을 위해서 모델의 내부 구조가 해석·수정 가능한 형태로 학습되어야 한다. AI 서비스는 불편을 느끼거나 문제가 있는 결과가 고객에게 제공될 때 왜 이런 결과가 제공되었는지, 앞으로 이런 문제를 방지하기 위해서는 누가 어떻게 조치를 취해서 해결할 수 있는지에 대한 정보를 제시하고, 문제에 대해 책임이 있는 조직과 사람을 파악해서 해결할 수 있어야 할 것이다.

참고문헌

Beena A. & Hirschmann, D.(2021). “Investing in trustworthy AI”, Deloitte.

Bergman, J., Poliakov, P., Dawson, M. W., Rothi, K. & Wen, C.(2023). “Evaluating an Interpretation for a Search Query”, US20230334045A1.

Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K. & Toutanova, K.(2019).“BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding”, Proceedings of the Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics.

He, K., Zhang, X., Ren, S. & Sun, J.(2016). “Deep Residual Learning for Image Recognition”, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 770~778.

Jochem, T., Pomerleau, D., Kumar, B. & Armstrong, J.(1995). “PANS: A Portable Navigation Platform”, IEEE Symposium on Intelligent vehicle, pp. 107-112.

LeCun, Y., Bengio, Y. & Hinton, G.(2015). “Deep Learning”, Nature, Vol.521 No.7553, pp. 436~444.

McCarthy, J.(1960). “Recursive Functions of Symbolic Expressions and Their Computation by Machine, Part I”, Communications of the ACM, Vol.3 No.4, pp. 184~195.

Shi, D., Weichen, L. & Wang, Y.(2023). “Has China's Young Thousand Talents program been successful in recruiting and nurturing top-caliber scientists?”. Science, Vol.379 No.6627, pp. 62~65.

Strassel, S., Adams, D., Goldberg, H., Herr, J., Keesing, R., Oblinger, D., Simpson, H., Schrag, R. & Wright, J.(2010). “The DARPA Machine Reading Program - Encouraging Linguistic and Reasoning Research with a Series of Reading Tasks”, Proceedings of the International Conference on Language Resources and Evaluation.

Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., Erhan, D., Vanhoucke, V. & Rabinovich, A.(2015). "Going deeper with Convolutions", IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1~9.

Thrun, S., Montemerlo, M., Dahlkamp, H., Stavens, D., Aron, A., Dievel, J., Fong, P., Gale, J., Halpenny, M., Hoffmann, G., Lau, K., Oakley, C., Palatucci, M., Pratt, V., Stang, P., Strohband, S., Dupont, C., Jendrossek, L. E., Koelen, C., Markey, C., Rummel, C., Niekerk, J. V., Jensen, E., Alessandrini, P., Bradski, G., Davies, B., Ettinger, S., Kaehler, A., Nefian, A. & Mahoney, P.(2006). “Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge”, Journal of Field Robotics, Vol.23 No.9, pp. 661~692.

Voorhees, E. M.(2005). “TREC: Experiment and Evaluation in Information Retrieval”, MIT Press.

Synced(2020). AAAI 2020 - A Turning Point for Deep Learning? Hinton, LeCun, and Bengio Might Have Different Approaches, Retrieved June 27, 2024 from https://syncedreview.com/2020/02/16/aaai-2020-best-papers-turing-award-winners-see-a-turning-point-for-deep-learning-mit-reveals-voting-app-vulnerabilities.

PART 3

6 인공지능 시대, 물리학자의 역할

서재민

중앙대학교 물리학과 교수

가 들어가는 말

필자를 포함한 많은 물리학자는 종종 물리학이라는 학문의 오랜 전통을 상당히 자랑스러워한다. 과거 선사시대, 불의 성질을 탐구하고 별자리를 통해 방향을 찾아가던 때부터 인류는 물리학과 함께해왔으며, 이러한 자연의 법칙을 이해하려는 인류의 정신은 오늘날 우리가 스마트폰을 사용하고 우주를 개척할 수 있게 한 근원이라고도 할 수 있다. 하지만 간혹, 물리학에 대한 자부심이 지나쳐 오히려 과학의 융합과 발전을 저해하는 경우가 생기기도 한다. 대표적으로, 알파입자 산란실험으로 유명한 어니스트 러더퍼드는 “물리학 외의 과학은 우표수집에 불과하다.”라며 물리학을 제외한 자연과학 학문들을 무시하기도 했다. 또한 정작 스스로를 물리학자로 여겼던 본인이 노벨화학상을 받게 되자 당혹감을 표현하기도 했다. 이렇듯 간혹 일부 물리학자들은 다른 학문이 물리학의 영역을 침범하거나 섞이는 것을 불편해한다.

최근 인공지능(AI)의 발전에 따라, 이러한 양상이 또 한 번 두드러지고 있다. 일례로 이론물리를 기반으로 하는 물리학자들은 새로운 물리법칙의 발견이 인간 고유의 영역이라고 생각하기도 한다. 하지만, 마찬가지로 인간 고유의 영역이라 여겨졌던 또 다른 예시인 바둑과 예술, 심지어 수학 증명 분야에서 AI의 역량이 막강해져 세간에 충격을 주었다는 점을 생각하면, 더 이상 물리학자만이 물리연구를 한다는 편견은 유효하지 않을지도 모르겠다. 한편 전산물리, 실험데이터를 다루는 물리학자들은 새로운 분석도구로서의 AI 기술 발전을 환영하기도 하며 더 나아가 최근에는 물리정보 신경망, 양자 기계학습 등과 같이, 반대로 물리학을 도구로서 활용해 AI 기술을 한층 더 발전시키는 방식이 연구되기도 한다.

이렇듯, 지금 시점은 물리학과 인공지능의 경계가 허물어지며 서로 간에 새로운 이해와 발견을 제공하는 학문적 과도기 단계로 보인다. 급격히 발전하고 있는 인공지능 융합 시대에서, 물리학 연구와 AI의 시너지를 극대화할 수 있는 물리학자들의 역할을 고찰할 필요가 있다. 이 장에서는 물리학 분야에서 AI를 활용한 연구들과, 반대로 물리학을 이용한 새로운 AI 기술들을 간략히 소개하며, 물리를 ‘흉내내는’ AI가 아닌 물리를 ‘이해하는’ AI 기술 개발을 위한 시사점을 논의하고자 한다.

나 물리학과 AI: 원자핵부터 우주까지

1) 물리학에서 데이터란

물리학에서 '데이터'란, 미지의 자연의 법칙을 따라 흘러가는 현상 중 아주 일부, 인간이 관측할 수 있는 빙산의 일각이다. 하늘이 낮에는 파랗다가 석양이 질 즈음에는 붉어지고 밤이 되면 깜깜해지는 것처럼, 우리는 인간의 시각으로 관측할 수 있는 시간에 따른 색깔 데이터에 아주 익숙하다. 하지만 사실 그 속에는 지구의 자전운동, 대기를 구성하는 물질분포, 그리고 전자기파의 산란 등 훨씬 다양한 과학적 성질과 법칙들이 숨겨져 있다. 물리학자들은 이렇게 빙산의 일각만을 관찰하여, 그 속에 숨겨진 법칙을 찾아내고자 하는 일을 하고 있다. 가설을 제시하고, 그 가설로부터 자연의 현상을 예측하고, 실제로 관찰할 수 있는 일부를 통해 검증하는 방식으로 뉴턴의 법칙, 양자역학, 상대성 이론들이 수립되어 왔다. 하지만 꼭 물리학자가 아니더라도, 혹은 뉴턴의 만유인력 법칙을 전혀 모르더라도, 우리는 공을 어느 방향으로 던질 때 어느 지점에 떨어지는지를 경험 혹은 데이터를 통해 자연스레 학습할 수 있다. 이것이 바로 '데이터 주도(data-driven)' 학습이다.

흔히 딥러닝으로 대표되는, 데이터 주도 지도학습을 통해 최적화되는 인공신경망 기법은 방대한 양의 데이터가 주어진 상황에서 입출력 데이터 사이의 패턴을 학습하고 그 관계를 가장 잘 흉내내는 함수를 찾아내는 기법이다. 공을 여러 번 던져보면서, 그 축적되는 경험을 통해 머릿속으로 공의 경로를 예측해 가는 작업과 비슷하다. 물리학 분야에는 아직 인간이 완전히 이해하지 못하는 방대한 양의 실험 및 관측 데이터들이 존재한다. 오늘도 입자가속기에서는 우주를 구성하는 기본법칙을 탐구하기 위해 입자들을 부딪혀가며 충돌 데이터를 수집하고 핵융합 장치에서는 수소 핵융합 관련 플라즈마의 거동을 이해하기 위한 실험 데이터들을 쌓아가고 있다. 본 장에서는 인공신경망 기법을 통하여 이러한 물리학 데이터를 학습하고 연구에 활용하는 사례들을 몇 가지 소개하고자 한다.

2) 수소 핵융합에서의 AI 활용

수소 원자핵을 이용하는 핵융합 기술은 최근 AI 시대의 급격히 증가하는 에너지 수요와 탄소중립을 모두 만족시킬 수 있는 미래 에너지원이다. 태양에너지의 원천이기도 한 핵융합 반응을 지구상에서 구현한 '인공태양' 기술은 실제 태양의 중력 대신 강한 자기장을 이용해 수소 플라즈마를 반응로에 가두고, 고온 고압 환경에서 지속적인 핵반응을 일으켜 에너지를 생산한다. 하지만 자기장 내에서 초고온 플라즈마의 움직임은 밀레니엄 문제 중 하나인 나비에-스토크스 방정식에 전자기적 및 상대론적 효과가 더해진 복잡한 현상이며, 이를 해석적으로 풀어내어 움직임을 예측하는 것은 현재로서는 불가능하다고 알려진 난제이다. 최근 우리나라의 한국핵융합에너지연구원에서 운영하는 인공태양인 KSTAR에서 세계 최초로 1억 도의 초고온 플라즈마를 수십 초 이상 안정적으로 유지 및 제어하는 성과를 보이기도 했다(Han et al., 2022). 그러나 이것은 플라즈마를 미리 완전히 이해하여 제어한 것이 아닌, 수많은 과학자들에 의해 수 년간의 실험적 시행착오를 거쳐 이루어낸, '인간에 의한 데이터 주도' 성과라고 할 수 있다. 그렇다면, 이러한 데이터 주도 학습에 인간보다 더 특화된 딥러닝을 활용하면 더 효과적으로 연구할 수 있지 않을까 하는 생각이 떠오르곤 한다. 이에 몇몇 물리학자들은 실험 데이터로부터 그 패턴을 학습한 AI 기반의 물리 모델을 만들어 연구에 활용하기 시작했다.

핵융합 플라즈마를 오랫동안 유지함에 있어 문제가 되는 가장 큰 허들은 바로 플라즈마가 불안정해지는 현상이다. 특히, 핵융합에 필요한 고온, 고압 환경에서 플라즈마는 더더욱 불안정해지기 쉬워지곤 한다. 이러한 불안정 현상은 밀리 초 이내의 짧은 시간 동안 자라나 플라즈마를 꺼뜨리기 때문에, 장치를 제어하는 연구자가 반응하거나 물리계산 기반의 예측제어기를 활용하기에는 한계가 있다. 최근에는 AI 기술을 통하여 플라즈마 가장자리에서 발생하는 불안정성(ELM)을 예측하여 제어에 활용하기도 하고(Joung et al., 2024), 플라즈마를 꺼뜨리는 주요 불안정성인 찢어짐 모드(tearing mode)를 미리 예측하고 피해가는 기술이 개발되기도 했다(Seo et al., 2024).

또한 핵융합 플라즈마는 1억 도 수준의 아주 뜨거운 상태이기 때문에, 플라즈마의 상태를 측정하려 온도계와 같은 탐침을 집어넣는 것이 불가능하다. 일반적인 저온 플라즈마를 측정하는 장비를 핵융합로 내에 넣으면 바로 녹아버리거나 고장날 것이다. 대신 주로 빛이나 자기장 반응과 같이 외부에서 간접적으로 측정할 수 있는 정보로부터 내부 온도나 압력과 같은 물리적 상태를 추정해야 한다. 이는 대표적인 '잘못 정의된(ill-posed)' 문제로, 기존의 계산 기법으로는 불가능하거나 부정확한 결과를 도출하는 것으로 알려져 있다. 최근에는 AI를 이용하여 외부 정보로부터 내부 상태를 재구성하고, 더 나아가 내부 상태의 미래 변화를 예측하는 연구들이 활발히 진행되고 있다. 해당 연구에 따르면, AI를 이용한 플라즈마 상태 재구성은 고정밀 계산결과와 유사한 정확도를 보임에도 훨씬 빠르게 계산되기에 실시간 플라즈마 모니터링으로 활용될 수 있다(Shousha et al., 2024).

3) AI를 이용한 우주의 이해

인류가 허블 우주망원경을 올린 1990년 이래로 우리는 수십 년 동안 광대한 우주를 바라보고 관찰해 왔다. 가까운 태양계 내의 행성들부터, 외계 행성, 블랙홀, 은하들까지의 다양한 관측 데이터들은 고스란히 NASA의 서버에 저장되어 왔으며, 스피처, 케플러, 제임스웹 우주망원경 등 더욱 우수한 장비들이 도입됨에 따라 보다 풍부한 정보를 담을 수 있도록 진화해 왔다. 하지만 여전히 우리가 직접적으로 관측할 수 있는 물질은 전체 우주의 5%에 불과하며, 그 외 대부분의 우주를 구성한다고 알려진 암흑물질, 암흑에너

지는 전파와 상호작용하지 않아 기존의 방식으로는 직접적인 관측이 불가하다고 알려져 있다. 최근에는 AI 기술을 활용하여 기존 관측이 닿지 않는 영역까지 탐지하고 재구성하는 기법들이 개발되고 있다.

첫 번째로, 태양풍 모니터링 활용 사례를 들 수 있다. 당장 우리 가까이에 있는 태양에서 불어오는 태양풍은 전자기파뿐 아니라 양성자와 전자 등의 하전 입자들로 구성되어 있는 플라즈마 덩어리이다. 이 태양풍의 활동 변화에 따라 지구 기후가 달라지기도 하며, 강한 태양풍은 지구의 인공위성이나 전자 기기들을 마비시켜 큰 사회적 혼란을 가져오기도 한다. 특히 이 태양풍은 태양 표면 중 어두운 면의 열린 자기장 영역인 코로나 홀에서 방출되는 것으로 알려져 있어, 코로나 홀을 발견하고 지속적으로 모니터링하는 것이 중요하다. 하지만 태양의 코로나 영역은 밝기 변화가 심하고, 다른 어두운 부분과의 구별이 쉽지 않기 때문에 천문학자들이 일일이 탐지하고 기록하기에 어려움이 있었다. 하지만 최근 이미지 분석 AI 기술이 발전하며, 태양 관측 사진으로부터 자동으로 코로나 홀을 탐지하고 추적하는 기술이 개발되었다. NASA에서 촬영된 태양 관측 사진에 이 기술을 활용한 결과, 98.1%의 코로나 홀 탐지 성공률을 보인 바 있다(Jarolim et al., 2023).

더 나아가, 암흑물질은 우주를 구성하는 물질들 중 80%를 차지한다고 알려져 있지만 전파와 상호작용하지 않는 특성 때문에 그 존재와 분포를 파악하는 데 어려움이 있었는데, 최근 한국천문연구원에서 AI를 활용하여 관측가능한 물질의 분포와 속도 정보로부터 암흑물질의 질량 분포를 재구성해 내는 기술을 개발한 바 있다. 특히, 이를 통해 우주 내의 은하단을 연결하는 암흑물질의 실가닥 구조 지도를 재구축할 수 있었다(Hong et al., 2021).

다 물리를 이해하는 AI

앞서 소개한 AI를 활용한 물리연구 사례들은 물리학에서의 빅데이터로부터 패턴을 학습하고 모방하여 새로운 영역에서의 결과를 예측하는 작업, 즉 데이터를 기반한 통계적 분석에 해당한다. 하지만 최근에는 이러한 단순한 통계적 패턴 학습을 넘어, 논리적 사고를 하는 AI들이 등장하고 있다. 예를 들어, 새로운 알고리즘의 개발은 단순한 데이터 기반의 패턴 학습이 아니라, 무에서 유를 창조해내는 논리적 사고를 필요로 하는 고도의 작업이다. 2023년 구글 딥마인드에서 개발된 '알파데브'는, 과거 백 년 가까이 인간에 의해 개발되어 온 정렬 알고리즘들보다 더 빠른 알고리즘을 개발해 화제가 된 바 있다(Mankowitz et al., 2023). 이미 어느 정도 한계에 이르렀다고 평가되던 정렬 알고리즘의 속도를 한 층 더 높인 것은 십 수 년 만에 처음 있는 일이기에 더욱 놀랍다. 더 나아가, 2024년 개발된 '알파지오메트리'는 국제 수학 올림피아드 수준의 기하학 증명 문제를 풀어내기도 했다. 올림피아드 문제 30개 중 알파지오메트리는 금메달 수상자 수준인 25개를 풀어냈을 뿐 아니라, 기존에 알려져 있지 않은 새로운 풀이법을 제시하기도 했다(Trinh et al., 2024). 논리적 사고를 겹겹이 쌓아 이론을 전개해 가는 증명 작업은 수학 및 이론물리학에서 과학자의 역할을 대신할 수 있다. 과거의 AI가 단순히 물리학적 현상을 흉내내는 수준이었다면, 앞으로의 AI는 물리학을 이해하고 새로운 물리를 발견해 낼 수도 있다는 점을 시사한다.

그 외에도, 기존에는 AI를 물리연구를 보조하기 위한 도구로서 주로 사용해 왔다면, 이제는 반대로 물리적 이론 및 특성을 활용하여 한 층 더 진보된 AI 기술을 개발하고자 하는 시도들도 수행되고 있다. 대표적으로 '물리정보 신경망' 기술은 주어진 데이터와의 오차를 줄이도록 학습되는 기존의 AI 기술과 달리, 물리이론 혹은 지배방정식과의 오차를 줄이도록 학습되는 기법을 활용한다. 기존 방식의 경우, AI가 예측한 결과가 그럴듯해 보이더라도 에너지 보존, 힘의 평형 등을 만족하지 않아 엄밀한 물리적 분석에 활용되기에 한계가 있었다. 반면, 물리정보 신경망은 물리법칙을 만족하는 결과를 내도록 학습되기 때문에 더 정교한 분석에 활용될 수 있다(Seo, 2024). 또한 양자신경망을 비롯한 양자 기계학습의 경우, 양자컴퓨팅, 양자회로 등을 활용해 기계학습 알고리즘을 구성하는 기술인데, 이는 양자 중첩, 얽힘 등 기존의 신경망 기술로는 모사가 어려운 미시세계의 현상들을 모방하는 데 훨씬 효과적으로 작용함이 알려져 있다(Jia et al., 2019).

이렇듯 앞으로의 AI는 물리를 이해할 뿐만 아니라 이용하기 때문에, 이를 통해 새로운 물리 이론과 현상을 발견하는 것이 머지않을 것으로 기대된다.

라 물리학자의 역할

앞에서 다루었던 사례들을 미루어 보면 이제는 물리학과 AI 사이의 융합이 무르익어 가고 있으며, 보다 높은 시너지를 위해 상호 분야 간의 활발한 교류가 필요한 단계라고 판단된다. 하지만 실제로 발전하고 있는 AI 기술개발 속도에 비해 융합연구를 위한 각 학문 분야의 문화와 정책이 변화하는 속도는 다소 느린 편이다.

일례로, 물리학 학계에서는 주로 SCIE급 학술지의 논문 결과를 인정하지, 학술지가 아닌 학술대회에서 발표되는 프로시딩 논문은 미완성 아이디어 혹은 브레인스토밍 정도로 가볍게 취급하는 경향이 있다(물론 수리물리학 및 고에너지 물리 분야와 같이 출판 전(preprint) 논문을 중요하게 취급하는 분야들도 존재한다). 반면에 인공지능을 비롯한 컴퓨터과학 학계에서는 출판까지 길게는 수년의 시간이 소요되는 학술지 논문보다, 결과 공개와 피드백이 빠르고 동료 간의 상호작용이 훨씬 활발한 학술대회 발표를 훨씬

중요하게 취급한다. 하지만 최근 물리정보 신경망, 양자 기계학습 등 물리학자가 인공지능 연구에 기여할 여지가 많아졌음에도 불구하고, 물리학자들의 인공지능 관련 학술대회 참여는 여전히 저조한 편이다. AI 연구자가 물리학 학술대회 및 학술지에 발표하는 것은 더더욱 저조하다. 다른 공학 분야들 간 상호 학술대회 교류가 활발한 것과는 대조적이다.

그 원인으로는 연구자 개인의 학문적 배타성, 다른 학문 및 기술에 대한 무관심, 그리고 학계 내에서의 산학연 간 교류문화 미흡 등 여러 가지를 들 수 있다. 하지만 그 외에 한 가지 추가로 언급하고 싶은 점은, 연구소 및 대학에서의 연구지원 정책들이 아직은 학문 간 융합연구에 그다지 적합하지는 않다는 점이다. 필자는 과거 AI와 물리학의 융합연구를 수행하며 인공지능 학술대회에도 참가하여 발표를 하고 프로시딩 논문을 투고한 적이 있다. 이 학술대회 발표는 엄격한 동료평가를 거쳐야 하며, 일반적인 SCIE급 학술지 논문을 투고하는 수준 이상의 시간과 노력을 투자해야 했다. 실제로도 이러한 인공지능 학술대회 발표 실적은 컴퓨터공학 관련 학과에서는 SCIE급 논문 수준의 실적으로 인정받고 지원된다. 그럼에도 불구하고 필자가 컴퓨터공학 전공이 아닌 물리학과 소속이라는 이유로 당시 학회 실적을 기관 실적으로 인정받지 못했으며, 연구지원을 받는 과정에서도 번거로운 증빙이 필요했던 기억이 있다. 겉으로는 타 학문과의 융합연구를 장려하지만, 정작 세부적인 지원정책은 이를 인정하지 않는 점이 아쉬웠다. 연구소 및 대학 등에서의 연구지원이나 실적평가 정책이 융합연구를 통한 결실을 인정해줄 수 있도록 성장한다면, 자연스레 연구자들이 타 분야와 더욱 활발히 교류하여 시너지를 이룩할 수 있을 것으로 기대한다.

마 맺음말

과거 물리학 연구에서 주로 활용되었던 AI는 물리학의 방대한 데이터를 잘 분석하고 예측하기 위한 도구로서 인식되어 왔다. 하지만 앞으로의 AI는 단순한 도구가 아니라 물리를 이해하고 논리적 사고를 전개하는 능동적인 형태로 물리학 연구에 기여할 수 있을 것으로 조심스럽게 추측한다. 더 나아가 물리정보 신경망 및 양자 기계학습과 같이, 반대로 AI의 발전에 물리학이 도구로서 활용될 수도 있을 것이다. 이러한 AI와 물리학의 학문적 과도기에서 보다 효과적인 시너지를 이룩하기 위해 물리학자들의 역할은 더욱 중요해질 것이다. 오랫동안 연구되어 왔으나 당장의 발전 속도가 상대적으로 느린 물리학 학계에 익숙해진 물리학자들은 상대적으로 최신 분야이자 하루가 다르게 발전하고 있는 AI 기술들을 받아들이기 위해 더 적극적으로, 그리고 능동적으로 기술을 습득하고 이해할 필요가 있다. 이를 위해 연구소 및 대학에서도 학문 간 융합연구를 적극 지원하고 시대에 맞는 유연한 정책을 수립해 가는 것이 중요하다. 이러한 변화가 이루어질 때, 물리학과 AI는 함께 더 큰 시너지를 발휘하고 함께 성장할 수 있을 것이라 기대한다.

참고문헌

Han, H., Park, S., Sung, C. & Kang, J.(2022). "A Sustained High-Temperature Fusion Plasma Regime Facilitated by Fast Ions", Nature, Vol.609 No.7926, pp. 269~275.

Hong, S., Jeong, D., Hwang, H. & Kim, J.(2021). "Revealing the Local Cosmic Web from Galaxies by Deep Learning", Astrophysical Journal, Vol.913 No.1, p. 76.

Jarolim, R., Thalmann, J., Veronig, A. & Podladchikova, T.(2023). "Probing the Solar Coronal Magnetic Field with Physics-Informed Neural Networks", Nature Astronomy, Vol.7 No.10, pp. 1171~1179.

Jia, Z.-A., Yi, B., Zhai, R., Wu, Y.-C., Guo, G.-C. & Guo, G.-P.(2019). "Quantum Neural Network States: A Brief Review of Methods and Applications", Advanced Quantum Technologies Vol.2 No.7, p. 1800077.

Joung, S., Smith, D. R., McKee, G., Yan, Z., Gill, K., Zimmerman, J., Geiger, B., Coffee, R., O'Shea, F. H. & Jalalvand, A.(2024). "Tokamak Edge Localized Mode Onset Prediction with Deep Neural Network and Pedestal Turbulence", Nuclear Fusion, Vol.64 No.6, p. 066038.

Mankowitz, D. J., Michi, A., Zhernov, A., … Silver, D.(2023). "Faster Sorting Algorithms Discovered Using Deep Reinforcement Learning", Nature, Vol.618 No.7964, pp. 257~263.

Seo, J., Kim, S., Jalalvand, A., Conlin, R., Rothstein, A., Abbate, J., Erickson, K., Wai, J., Shousha, R., & Kolemen, E.(2024). "Avoiding Fusion Plasma Tearing Instability with Deep Reinforcement Learning", Nature, Vol.626 No.8000, pp. 746~751.

Seo, J.(2024). "Solving Real-World Optimization Tasks Using Physics-Informed Neural Computing", Scientific Reports, Vol.14 No.1, p. 202.

Shousha, R., Seo, J., Erickson, K., Xing, Z., Kim, S., Abbate, J. & Kolemen, E.(2024). "Machine Learning-Based Real-Time Kinetic Profile Reconstruction in DIII-D", Nuclear Fusion, Vol.64 No.2, p. 026006.

Trinh, T. Wu, Y., Le, Q. & Thang Luong, H.(2024). "Solving Olympiad Geometry without Human Demonstrations", Nature, Vol.625 No.7995, pp. 476~482.

PART 3

7 인공지능이 불러온 생명과학 연구 혁신

백 민 경
서울대학교 생명과학부 교수

가 들어가는 말

인공지능(AI)은 현대 기술 혁신의 핵심으로 자리 잡고 있으며, 특히 생명과학 연구에 미치는 영향은 가히 주목할 만하다. 전통적으로 생명과학 연구는 주로 실험에 의존해 왔으나, 인간 유전체 프로젝트 이후 방대한 생명과학 데이터가 축적되면서 이를 효과적으로 분석하고 활용하기 위한 새로운 방법들이 필요해졌다. 이에 따라 인공지능 기술의 도입이 가속화되었고, 이는 생명과학 연구의 패러다임을 크게 변화시키고 있다.

생명과학 연구는 인간의 건강과 환경 보호에 직결되는 중요한 분야이다. 예를 들어, 유전체학 연구를 통해 유전 질환의 원인을 규명하고 신약 개발을 통해 질병을 치료하며, 생태계 연구를 통해 환경을 보호하는 등의 다양한 활동이 이루어지고 있다. 그러나 이러한 연구는 방대한 데이터 처리와 분석, 복잡한 생물학적 시스템의 이해를 필요로 하는데, 이는 전통적인 방법만으로는 한계가 있다. 따라서 인공지능 기술의 도입은 생명과학 연구의 혁신을 가속화하고, 새로운 가능성을 열어줄 것으로 기대된다.

최근 인공지능 기술의 발전은 생명과학 연구에서 다양한 응용 분야를 창출하고 있다. 예를 들어, 인공지능 기반의 단백질 구조 예측 모델은 단백질의 삼차원 구조를 정확하게 예측하여 연구자들이 단백질의 기능을 이해하고, 새로운 약물 개발에 기여하도록 돕고 있다. 또한, 약물 개발 과정에서도 인공지능은 분자 모델링과 시뮬레이션을 통해 신약 후보 물질을 도출하고 최적의 약물-표적 상호작용을 예측함으로써 시간과 비용을 절감하고 있다. 질병 진단과 맞춤형 치료 분야에서도 인공지능은 의료 데이터를 분석하여 질병을 조기에 진단하고 각 환자에게 최적화된 치료법을 제안하는 데 중요한 역할을 하고 있다.

본 장에서는 인공지능의 발전에 따라 생명과학 연구가 어떻게 변화하고 있는지에 대한 연구 현황 및 미래 전망을 살펴본다. 인공지능이 불러온 생명과학 연구의 변화가 사회 및 관련 산업 전반에 어떤 영향을 줄지 다양한 측면에서 논의하고자 하며, 지속 가능한 발전을 위해 인공지능 기술이 생명과학 연구에서 어떤 역할을 할 수 있는지를 살펴보겠다.

나 인공지능의 생명과학 연구 활용 현황

1) 생명과학 빅데이터 분석 및 예측 모델 개발

기존의 생명과학 연구는 주로 실험에 의해 이루어져 왔다. 그러나 인간 유전체 프로젝트 이후로 생명체에 대한 방대한 데이터가 축적되면서 이를 효과적으로 분석하기 위한 계산 기법들이 개발되기 시작했다. 최근 인공지능 기술이 고도로 발달함에 따라, 인공지능을 생명과학 빅데이터 분석에 접목하려는 시도가 많이 이루어지고 있다. 인공지능 기반의 생명과학 빅데이터 분석은 전통적인 계산 기법에 비해 훨씬 뛰어난 성능을 보이며, 그동안 불가능하다고 여겨졌던 생명과학 분야의 난제 해결에도 큰 도움을 주고 있다.

가장 대표적인 예는 단백질의 서열 및 구조 데이터를 기반으로 학습된 단백질 구조 예측 인공지능이다. 단백질은 생명체의 주요 구성 요소이며, 거의 모든 생명현상에 관여하는 중요한 생체분자이다. 단백질은 스무 종류의 아미노산이 연결된 생체고분자로, 아미노산 서열에 따라 서로 다른 삼차원 구조를 가지며 이에 따라 다양한 기능을 수행한다. 단백질의 기능을 이해하기 위해서는 그 삼차원 구조를 알아내는 것이 필수적인데, 단백질 구조 예측은 매우 어려운 문제로 여겨져 왔다. 하지만 인공지능은 이를 해결했다.

2021년, 구글 딥마인드의 알파폴드와 미국 워싱턴대학교의 로제타폴드 인공지능은 고정확도의 단백질 구조를 단 몇 분 만에 예측할 수 있음을 보여주었다(Jumper et al., 2021; Baek et al., 2021). 이는 생명과학 연구에 인공지능이 접목되었을 때의 폭발적인 효과를 보여준 첫 사례로, 이후 인공지능을 활용한 생명과학 연구가 활발히 촉진되는 계기가 되었다. 이러한 성과는 단백질 구조 예측 외에도 유전체학, 분자생물학, 생물정보학 등 다양한 분야에서 인공지능의 활용 가능성을 증명하고 있다.

2) 약물 개발 및 신약 발견

약물 개발은 시간과 비용이 많이 드는 복잡한 과정이다. 새로운 약물이 시장에 출시되기까지는 보통 10년 이상의 시간과 수십억 달러 이상의 비용이 소요되는데, 이러한 과정에서 많은 후보 물질이 초기 단계에서 실패하곤 한다. 그러나 인공지능은 분자 모델링과 시뮬레이션을 통해 약물-표적 상호작용을 예측하고 최적의 신약 후보 물질을 도출함으로써, 신약 개발의 초기 단계에서 발생하는 비용과 시간을 대폭 절감할 수 있다.

축적된 단백질의 분자 결합 데이터는 신약 후보 물질을 설계하는 인공지능 개발을 가능하게 했다. 인공지능을 활용해 약물 분자와 표적 단백질의 상호작용을 예측하고 설계하려는 연구가 활발히 진행되고

있는데, 인공지능 플랫폼을 활용하면 수백만 개의 화합물을 스크리닝하여 특정 질병에 대한 최적의 후보 물질을 빠르게 찾아낼 수 있다. 예를 들어, 엔비디아와 아스트라제네카가 공동 개발한 MegaMolBART는 대규모 화합물 라이브러리를 기반으로 신약 후보 물질을 더 효율적으로 도출하는 기술을 제공하고 있다(NVIDIA, 2023). MegaMolBART는 특히 신약 후보 물질 발굴 과정에서 엄청난 시간 절약과 정확성 향상을 가져와 연구자들이 보다 빠르게 치료제를 개발할 수 있도록 돕고 있다. 이는 기존의 실험 방법에 비해 훨씬 효율적이며, 신약 개발의 초기 단계(후보 물질 발굴 및 최적화)에서 소요되는 시간을 평균 5년에서 50% 이상 단축할 수 있다.

단백질 구조 예측 인공지능 개발로 촉진된 단백질 설계 연구는 전통적인 유기분자 약물에서 벗어나 새로운 형태의 치료제 개발 가능성을 열어주고 있다. 예를 들어, 워싱턴대학교는 단백질 설계 인공지능인 RFdiffusion을 개발하여 단백질 설계 성공률을 크게 향상시켰다(Watson et al., 2023). Generate Biomedicine 회사에서도 Chroma라는 단백질 설계 인공지능을 개발하여 공개했으며, 이를 활용한 단백질 치료제 개발 연구를 진행하고 있다(Ingraham et al., 2023). 또한 유전자 치료제로 활용될 수 있는 단백질 설계, CAR-T와 같은 세포 치료제의 표면 단백질 설계에 인공지능 기술을 접목하는 연구 등도 활발히 진행 중이다(Ichikawa et al., 2023; Qiu et al., 2024). 이러한 차세대 치료제 개발은 신약 개발의 패러다임을 바꾸고 있으며, 앞으로 더 많은 혁신이 있을 것으로 기대된다.

3) 질병 진단 및 맞춤형 치료

인공지능은 방대한 의료 데이터를 분석하고, 이미지 및 패턴 인식을 통해 질병을 조기에 정확하게 진단하는 데 활용되고 있다. 인공지능은 X-ray, MRI, CT 스캔 등의 다양한 의료 영상을 분석하여 질병을 진단할 수 있다. 예를 들어, Google Health는 인공지능을 이용해 유방 촬영 이미지를 분석하여 유방암을 조기에 진단할 수 있음을 보여주었다(김현석, 2020). 또한, 스탠포드대학교 연구진은 인공지능을 이용해 피부암 진단 모델을 개발하였으며, 이 모델은 피부 병변 이미지를 분석하여 피부암 여부를 진단하는 데 숙련된 피부과 전문의와 비슷한 정확도를 보인다(Esteva et al., 2017). 이러한 인공지능 시스템은 의료 인력과 장비가 부족한 지역에서도 유용하게 사용될 수 있다.

인공지능은 질병 진단뿐만 아니라 환자 개개인의 데이터를 기반으로 맞춤형 치료를 제공하는 데에도 활용된다. 맞춤형 치료는 환자의 유전자 데이터, 생활 습관, 환경 요인 등을 기반으로 최적의 치료 계획을 수립하는 접근법이다. 예를 들어, Foundation Medicine은 인공지능을 활용해 암 환자의 유전자 프로파일을 분석하고 각 환자에게 최적의 항암제를 추천한다(박으뜸, 2018). Tempus 역시 인공지능을 이용해 환자의 유전자 프로파일과 임상 데이터를 종합 분석하여 최적의 치료법을 제안하는 플랫폼을 구축하고 있다(남혜현, 2020). 이러한 맞춤형 치료 인공지능은 환자의 치료 성공률을 높이는 데 기여하고 있다.

다 인공지능 기반 생명과학 연구의 전망

1) 연구 효율성 및 정확성 향상

인공지능은 생명과학 연구의 효율성을 크게 높이고 있다. 이는 연구의 속도와 정확도를 향상하고, 연구비용을 절감하는 데 중요한 역할을 한다. 예를 들어, 유전체 데이터 분석의 경우 인공지능은 수 개월이 걸리던 작업을 며칠 또는 몇 시간 만에 완료할 수 있다. 인간 유전체 프로젝트는 수 년 간의 작업 끝에 완료되었지만, 이제는 인공지능을 활용하여 비슷한 규모의 데이터를 훨씬 빠르게 분석할 수 있다. 생명과학 연구 데이터는 방대하지만 불완전하고 노이즈가 많은 편인데, 인공지능은 불완전한 데이터를 처리하고 노이즈를 제거하며 유의미한 패턴을 추출하는 데에도 활용될 수 있다. 이는 연구 결과의 신뢰성을 높이는 데 중요한 역할을 한다. 인공지능과 생명과학 데이터 분석의 접목은 신약 개발, 질병 연구, 유전 연구 등 다양한 분야에서 연구 효율성을 극대화할 수 있게 한다.

인공지능 기반의 자동화된 실험 플랫폼은 실험 데이터를 실시간으로 분석하고 최적의 실험 조건을 자동으로 조정하여 연구 결과의 정확도를 높인다. 예를 들어, Berkeley Lab의 자동화 실험실은 인공지능과 로봇을 결합하여 생명과학 실험을 자동으로 수행하고, 데이터를 분석하여 최적의 실험 조건을 찾아낸다(Biron, 2023). 이러한 시스템은 연구자의 반복적이고 시간 소모적인 작업을 줄여주며, 연구 결과의 정확성과 일관성을 보장한다.

또한, 인공지능은 방대한 데이터를 빠르고 정확하게 처리할 수 있어 연구자들이 전략적 의사결정과 창의적인 문제 해결에 집중할 수 있게 한다. 이는 연구 생산성을 크게 향상하여 생명과학 연구의 혁신을 가속화할 것이다.

2) 새로운 생명과학 연구 분야의 활성화

인공지능은 생명과학 연구에서 새로운 분야를 개척하는 동시에 기존 연구 방법론을 혁신하고 있으며, 합성생물학, 유전자 편집, 바이오프린팅 등 첨단 생명과학 기술과 결합하여 연구의 혁신을 이끌고 있다.

합성생물학에서는 인공지능을 이용해 유전자 회로를 설계하고 최적화함으로써 새로운 기능을 부여할 수 있다. 예를 들어, Ginkgo Bioworks는 인공지능을 활용해 미생물의 유전자 회로를 설계하고 특정 화합물을 생산하도록 최적화하고 있는데, 이는 생물학적 생산 공정을 혁신하고 새로운 바이오 제품을 개발하는 데 기여하고 있다(Hayden, 2015). 유전자 편집 기술인 CRISPR-Cas9과 인공지능의 결합은 유전자 서

열을 신속하게 분석하고, 최적의 편집 위치를 예측하여 효율성을 높인다. 이는 유전자 치료와 농업 분야에서 혁신적인 응용 가능성을 제공한다. 바이오프린팅은 세포와 바이오 소재를 이용해 3차원 구조물을 인쇄하는 기술로, 인공 장기와 조직을 만드는 데 사용된다. 인공지능은 바이오프린팅 과정에서 최적의 세포 배치와 인쇄 조건을 찾아내어 인공 장기의 기능성을 높이고 있다(Ramesh et al., 2024). 예를 들어, 인공지능이 인쇄 과정에서 세포의 생존율을 높이고 조직의 구조와 기능을 최적화하는 데 중요한 역할을 하는 점 등을 꼽을 수 있다.

또한, 인공지능과 바이오테크의 융합은 신약 개발의 모든 단계에서 혁신을 일으키고 있다. Exscientia는 인공지능을 이용해 화합물 라이브러리를 스크리닝하고 신약 후보 물질을 최적화하여 기존 방법에 비해 15배 더 빠른 속도로 신약 후보 물질을 찾아내고 있다(Staines, 2020). 맞춤형 의료의 발전에도 인공지능은 크게 기여하고 있다. Tempus는 인공지능을 이용해 환자의 유전자 프로파일과 임상 데이터를 종합 분석하여 최적의 치료법을 제안하는 플랫폼을 구축하였는데, 이는 환자별로 효과적인 치료법을 제공하여 치료 성공률을 높이고 부작용을 최소화할 수 있다.

환경 보호와 생태계 연구에서도 인공지능은 중요한 역할을 한다. 예를 들어, Conservation Metrics는 인공지능을 이용해 멸종위기종의 소리를 분석하고 서식지를 모니터링한다(Klein et al., 2015). 인공지능은 방대한 환경 데이터를 분석하여 멸종위기종의 위치와 개체 수를 추정하고, 보호 조치를 계획하는 데 도움을 준다. 이러한 연구는 생물 다양성 보전과 생태계 보호에 기여한다.

결론적으로, 인공지능은 생명과학 연구에서 새로운 연구 분야를 개척하고, 기존 연구 방법론을 혁신하고 있다. 이는 연구 효율성과 정확성을 높이고 새로운 연구 가능성을 열어주며, 생명과학의 발전을 가속화하고 있다.

3) 지속 가능한 발전에의 기여

인공지능은 연구 과정에서 자원 소비를 줄이고 효율성을 극대화한다. 자동화 실험 시스템을 통해 실험 조건을 최적화하고 반복적인 실험을 최소화하여 자원의 낭비를 줄일 수 있다. 또한, 대규모 데이터를 분석하여 최적의 연구 전략을 제시함으로써 자원을 아끼는 효과를 창출하기도 한다. 이는 연구비용 절감과 자원의 효율적인 사용을 가능하게 한다.

환경 보호와 생태계 유지에서도 인공지능의 역할은 크다. 인공지능은 기후 모델링을 통해 기후 변화의 영향을 예측하고 이에 따른 대응 전략을 수립하는 데 도움을 준다. 멸종위기종의 서식지와 개체 수를 모니터링하고 보호 조치를 계획하는 데 활용된다. 이는 생물다양성을 유지하고 생태계를 보호하는 데 기여한다.

사회적 가치 증대 측면에서, 인공지능은 글로벌 보건 개선과 보편적 의료 서비스 확산에 기여한다. 인공지능 기반의 질병 진단 서비스 등은 의료 자원이 부족한 지역에서 효과적인 의료 서비스를 제공한다. 또한, 개발도상국의 연구자들이 첨단 생명과학 연구에 접근할 수 있도록 저비용, 고효율의 연구 방법론을 제공하여 글로벌 건강 격차를 줄인다.

결론적으로, 인공지능은 생명과학 연구와 지속 가능한 발전에 중요한 역할을 하며 인류의 건강과 지구 환경 보호에 크게 기여하고 있다. 앞으로도 인공지능 기술의 역할은 더욱 확대될 것이다.

4) 윤리적 및 사회적 고려사항

인공지능의 생명과학 연구 도입은 많은 긍정적인 변화를 가져오고 있지만, 이에 따른 윤리적 및 사회적 고려도 필요하다. 인공지능이 생명과학 연구 및 의료 분야에서 의사결정을 내릴 때, 그 과정의 투명성을 확보하는 것이 중요하다. 인공지능 시스템이 복잡한 알고리즘을 사용하여 결정을 내리는 경우, 그 과정이 불투명하면 결과에 대한 신뢰성이 떨어질 수 있다. 따라서 인공지능 모델의 의사결정 과정을 설명할 수 있게 만들고 투명성을 높이는 연구가 필요하다. 이는 '설명 가능한 인공지능' 기술의 발전을 통해 이루어질 수 있으며, 연구자와 의사가 인공지능의 판단 근거를 이해하고 신뢰할 수 있게 된다.

생명과학 연구에서 인공지능은 방대한 개인 데이터를 처리한다. 이러한 데이터의 보호와 윤리적 사용 역시 매우 중요한 문제이므로 연구 데이터의 익명성을 보장하고 개인의 프라이버시를 침해하지 않기 위해 데이터 보호 규정과 같은 법적 기준을 준수해야 한다. 또한, 연구자들은 데이터 수집 목적과 사용 방법에 대해 명확히 설명하고 데이터 제공자의 동의를 받아야 하며, 민감한 개인 정보는 엄격히 보호하고 연구 목적 외에는 사용하지 않아야 한다.

인공지능의 도입은 사회적 불평등을 심화시킬 수도 있다. 인공지능 기술은 자원이 풍부한 지역과 기관에서 더 쉽게 접근할 수 있으며, 이는 의료 및 연구의 격차를 더욱 벌릴 수 있다. 따라서 인공지능 기술의 혜택이 공정하게 분배될 수 있도록 정책적, 제도적 지원이 필요하다. 또한 인공지능 시스템이 편향된 데이터를 학습할 경우 그 결과도 편향될 수 있는데, 이는 생명과학 연구와 의료 분야에서 특정 집단에게 불리하게 작용할 수 있다. 예를 들어 특정 인종이나 성별에 대한 데이터가 충분하지 않으면, 인공지능의 진단이나 치료 제안이 공정하지 않을 수 있다. 이를 방지하기 위해 다양한 데이터를 학습시키고, 인공지능 시스템의 공정성을 지속적으로 모니터링하는 것이 중요하다. 최근에는 인공지능이 데이터 편향 문제를 해결하기 위해 다양한 인종, 성별, 연령대의 데이터를 포함하는 방식으로 학습데이터를 구성하고 있으며, 이를 통해 인공지능 모델의 공정성을 확보하고자 하는 노력이 계속되고 있다. 또한, 윤리적 인공지능 개발을 위해 각국 정부와 국제기구에서 지침과 규제를 강화하고 있다.

결론적으로, 인공지능의 생명과학 연구 도입은 많은 가능성을 열어주지만, 철저한 윤리적 및 사회적 고려를 전제해야 한다. 투명성과 책임성을 높이고 개인정보 보호와 데이터 윤리를 준수하며, 공정성을 확보하는 것이 중요하다. 이를 통해 인공지능 기술이 인류의 건강과 복지에 긍정적으로 기여할 수 있도록 해야 한다.

라 맺음말

현재 인공지능은 생명과학 연구에서 핵심적인 역할을 하고 있다. 생명과학 빅데이터 분석 및 예측 모델 개발을 통해 단백질 구조 예측, 유전체 데이터 분석, 약물-표적 상호작용 예측 등에서 뛰어난 성과를 보이고 있다. 단백질 구조 예측 인공지능은 고정확도의 예측을 가능하게 하여 단백질 기능 이해와 신약 개발에 기여하고 있으며, 약물 개발 과정에서도 인공지능의 분자 모델링 및 시뮬레이션을 통해 최적의 신약 후보 물질을 도출하여 시간과 비용을 절감하고 있다. 질병 진단 및 맞춤형 치료에서는 인공지능이 의료 데이터를 분석하여 조기진단과 최적화된 치료법 제공에 중요한 역할을 하고 있다.

미래에는 인공지능이 생명과학 연구의 혁신을 더욱 가속할 것이다. 연구의 효율성과 정확성을 높이는 자동화된 실험 플랫폼과 데이터 분석 기술은 연구자의 반복적 작업을 줄여주고 합성생물학, 유전자 편집, 바이오프린팅 등 새로운 연구 분야를 개척할 것이다. 또한, 인공지능은 지속 가능한 발전을 위해 자원 소비를 줄이고 환경 보호와 생태계 유지에 기여할 것이다. 인공지능을 통한 신약 개발 비용 절감 및 질병 진단 효율성 증대는 의료 자원이 부족한 지역에서도 고품질의 의료 서비스를 제공할 수 있게 하여 보건의료의 보편화에도 많은 영향을 미칠 것으로 보인다.

결론적으로, 인공지능은 생명과학 연구의 패러다임을 혁신적으로 변화시키고 있으며, 그 역할은 앞으로도 확대될 것이다. 인공지능 기술을 효과적으로 활용하여 생명과학 연구의 새로운 가능성을 탐구하고, 인류의 건강과 지구 환경 보호에 기여할 수 있는 방향으로 나아가야 한다. 이를 위해 지속적인 기술 발전과 함께 윤리적 고려와 사회적 책임을 병행하여 인공지능 기술이 긍정적인 영향을 미칠 수 있도록 해야 할 것이다.

참고문헌

김현석(2020). 구글 AI 의사보다 유방암 진단 정확, 한국경제.

남혜현(2020). 맞춤형 치료 추천 템푸스는 어떤 회사?, 바이라인네트워크.

박으뜸(2018). 맞춤치료에 대한 확신.. 빅파마로 보는 청사진, 메디파나뉴스.

Baek, M., DiMaio, F., Anishchenko, I., Dauparas, J., Ovchinnikov, S., Lee, G. R., … & Baker, D.(2021). "Accurate Prediction of Protein Structures and Interactions Using a Three-Track Neural Network", Science, Vol.373 No.6557, pp. 871~876.

Biron, L.(2023). Meet the Autonomous Lab of the Future, LBNL News.

Esteva, A., Kuprel, B., Novoa, R. A., Ko, J., Swetter, S. M., Blau, H. M. & Thrun, S.(2017). "Dermatologist-Level Classification of Skin Cancer with Deep Neural Networks", Nature, Vol.542 No.7639, pp. 115~118.

Hayden, E. C.(2015). "Tech Investors Bet on Synthetic Biology", Nature, Vol.527 No.7576, p. 19.

Ichikawa, D. M., Abdin, O., Alerasool, N., Kogenaru, M., Mueller, A. L., Wen, H., … & Noyes, M. B.(2023). "A Universal Deep-Learning Model for Zinc Finger Design Enables Transcription Factor Reprogramming", Nature Biotechnology, Vol.41 No.8, pp. 1117~1129.

Ingraham, J. B., Baranov, M., Costello, Z., Barber, K. W., Wang, W., Ismail, A., … & Grigoryan, G.(2023). "Illuminating Protein Space with a Programmable Generative Model", Nature, Vol.623 No.7989, pp. 1070~1078.

Jumper, J., Evans, R., Pritzel, A., Green, T., Figurnov, M., Ronneberger, O., … & Hassabis, D.(2021). "Highly Accurate Protein Structure Prediction with AlphaFold", Nature, Vol.596 No.7873, pp. 583~589.

Klein, D. J., McKown, M. W. & Tershy, B. R.(2015). Deep Learning for Large Scale Biodiversity Monitoring, In Bloomberg Data for Good Exchange Conference, Vol. 10.

NVIDIA(2023), Nvidia/MegaMolBART: A Deep Learning Model for Small Molecule Drug Discovery and Cheminformatics Based on Smiles, https://github.com/NVIDIA/MegaMolBART.

Qiu, S., Chen, J., Wu, T., Li, L., Wang, G., Wu, H., ... & Wang, H.(2024). "CAR-Toner: an AI-driven Approach for CAR Tonic Signaling Prediction and Optimization", Cell Research, Vol.34 No.5, pp. 386~388.

Ramesh, S., Deep, A., Tamayol, A., Kamaraj, A., Mahajan, C. & Madihally, S.(2024). "Advancing 3D Bioprinting Through Machine Learning and Artificial Intelligence", Bioprinting, Vol.38, e00331.

Staines R.(2020). Exscientia Claims World First as AI-created Drug Enters Clinic, Pharmaphorum.

Watson, J. L., Juergens, D., Bennett, N. R., Trippe, B. L., Yim, J., Eisenach, H. E., … & Baker, D.(2023). "De Novo Design of Protein Structure and Function with RFdiffusion", Nature, Vol.620 No.7976, pp. 1089~1100.

PART 3

8 공정한 인공지능을 위한 기술과 발전 전망

조성배
연세대학교 컴퓨터과학과 교수

가 들어가는 말

인공지능(AI)은 우리 삶에 다양하게 녹아들어 의료, 금융, 교육, 법률 등 여러 분야에서 효율성과 정확성을 높이고 있다. 다양한 실현 방법 중에서 기계학습(Machine Learning, ML)은 수많은 데이터로부터 자동으로 모형을 구축할 수 있을 뿐만 아니라, 최근에는 인간을 뛰어넘는 성능을 내기도 해서 크게 각광받고 있다. 기계가 학습한다는 것은 컴퓨터가 경험으로부터 성능 척도를 향상시켜서 어떤 작업을 수행하는 것이라고 정의한다. 예를 들어 x와 y라는 속성을 갖는 데이터 <x, y>에 대해서 <1, 5>, <2, 7>, <3, 9>, <4, 11>, <5, 13>을 학습한다는 것은 y=F(x)가 되는 모형 F를 결정하는 것이다. F를 단순하게 y=ax+b로 하면, 학습은 데이터의 x와 y를 넣어서 성립되는 a와 b를 결정하면 된다. 이 경우에는 단순한 1차 방정식이기 때문에 학습한 모형은 F(x)=2x+3이 되는데, 나중에 x=100인 데이터의 y가 무엇인지 알아내는 데 사용된다. 기계학습으로 만든 모형으로 새로운 데이터의 x에 대해서 y의 값을 알아내는 것이다.

최근에 인공지능이 다양하게 사용되면서 공정성에 대한 문제가 대두되고 있다. 공정성은 인공지능이 특정 집단에 대한 편향이나 차별 없이 모든 사용자에게 공정한 결과를 제공하는 것인데, 대량의 데이터로 학습된 인공지능이 편향된 의사결정을 하는 사례가 빈번하게 발생하고 있다. 일례로, 아마존의 인공지능 채용 시스템이 주로 남성 지원자가 많았던 과거 데이터를 기반으로 학습되어 남성 지원자를 우대하는 평가를 하였다. 또한, 탐사보도 전문매체 프로퍼블리카는 범죄 전과자의 얼굴 이미지로부터 재범 가능성을 예측하는 인공지능을 개발했는데, 흑인의 재범률을 백인보다 훨씬 더 높게 예측하는 편향을 보였다. 의료 및 법률 시스템에서도 특정 인종, 성별에 따라 다른 결과를 내서 특정 집단을 불공정하게 대할 가능성이 있다. 챗GPT에서도 성별 관련 대명사와 직업 관련 단어를 활용할 때 특정 직업을 특정 성별과 연관 짓는 편향이 보인다.

인공지능의 공정성은 사회 정의와 관련이 깊다. 공정한 인공지능은 사회적 신뢰를 구축하고, 다양한 집단이 동등한 기회를 갖도록 한다. 반면 불공정한 인공지능은 사회적 불평등을 심화시키고 특정 집단에 대한 차별을 강화할 수 있다. 이 장에서는 인공지능의 공정성을 측정하고 편향을 줄이는 방법에 대해서 소개하고, 다양한 국가와 기관에서 인공지능의 공정성을 보장하기 위해 어떤 시도를 하고 있는지 알아보며 향후 발전 전망에 대해서 논의하고자 한다.

나 공정성 척도와 데이터셋

1) 공정성 척도

인구학적 동등성(demographic parity)

모든 집단에서 긍정적인 예측 결과의 비율은 동일해야 한다. 예를 들어, 채용 과정에서 특정 성별이나 인종에 상관없이 대출 승인 비율이 동일해야 하지만, 경우에 따라서 불공정한 결과를 초래할 수 있다. 대출 승인 시스템에서 인구학적 동등성을 적용하면, 특정 인종이 다른 인종보다 더 낮은 신용 점수를 갖고 있음에도 불구하고 동일한 승인율을 갖도록 조정될 수 있다.

기회 균등(equal opportunity)

실제 긍정 사례에 대해 각 집단은 동일한 참의 비율을 가져야 한다. 질병 진단 인공지능은 성별에 관계없이 일정한 정확도로 질병을 진단해야 사람들이 공정하게 혜택을 받을 수 있다. 이를테면, 의료 분야의 암진단 인공지능은 남성과 여성 모두에게 같은 정확도로 진단해야 한다. 만약 여성 환자에게만 진단 정확도가 떨어진다면, 이는 기회 균등을 위반하는 것이다.

예측 동등성(predictive parity)

각 집단에서 예측 결과의 정확도는 동일해야 한다. 이는 예측이 정확하게 이루어지고 있는지, 예측의 품질이 집단 간에 일관성 있게 유지되고 있는지를 평가한다. 재범 가능성 예측 인공지능은 인종에 관계없이 동일한 정확도로 범죄 가능성을 예측해야 한다. 만약 특정 인종만 예측 정확도가 높다면, 예측 동등성이 지켜지지 않은 것이다.

동등 가능성(equalized odds)

모든 집단에서 참과 거짓의 비율은 같아야 한다. 이는 모형의 예측이 모든 집단에 대해 동일하게 잘못되거나, 동일하게 올바르다는 것을 의미한다. 예를 들면, 신용 평가 인공지능에서는 모든 인종의 대출 승인 비율이 일정하게 잘못되거나 올바르게 되어야 한다. 이는 모형이 특정 집단에 대해 더 많은 오차를 범하지 않도록 한다.

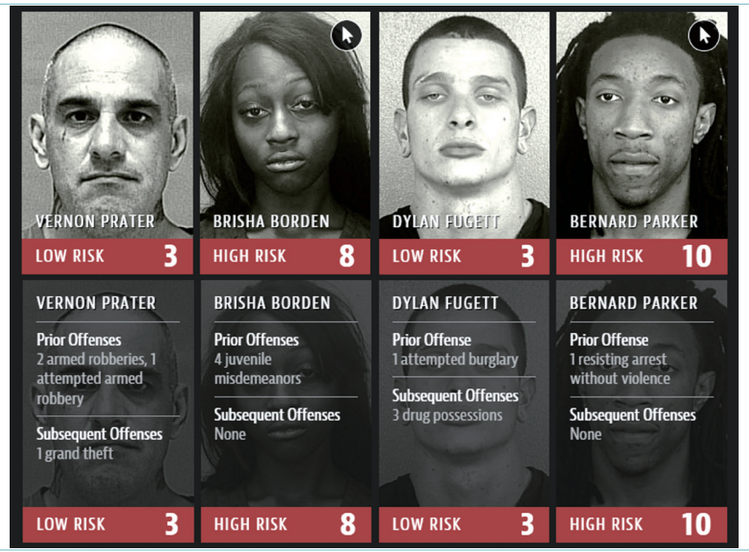
2) 공정성 평가 데이터셋

COMPAS 데이터셋

COMPAS(Correctional Offender Management Profiling for Alternative Sanctions)는 재범 가능성을 예측하

기 위해 미국의 여러 주에서 사용되는 시스템이다. 이 데이터셋은 인종에 따른 예측 편향으로 인해 큰 논란을 불러일으켰는데, <그림 3.24>에서처럼 흑인 피고인에 대해 더 높은 재범 가능성을 예측하는 경향이 있음이 확인됐다. 흑인 피고인은 백인 피고인보다 실제 재범 가능성이 낮음에도 불구하고 편향된 예측을 했다.

그림 3.24 COMPAS 데이터셋에 나타나는 편향성



출처: Propublica(2024).

Adult Income 데이터셋

이것은 미국 인구 조사 데이터를 기반으로 개인의 소득 수준을 예측하는 데 사용된다. 여기에는 성별과 인종에 따른 편향이 있는데, 여성이 동일한 자격 요건을 갖고 있음에도 불구하고 남성보다 더 낮은 소득을 받는다고 예측되는 경향이 있다. 이는 성별에 따른 소득 편향을 나타내며, 인공지능이 이러한 편향을 학습하여 예측에 반영할 수 있다.

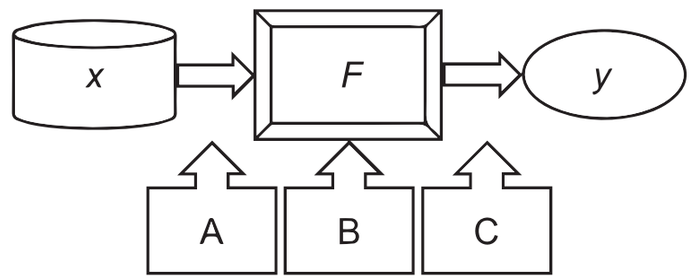
German Credit 데이터셋

이것은 독일의 신용 대출 데이터로, 대출 승인 여부를 예측하는 데 사용된다. 이 데이터셋은 연령, 성별, 직업 등 다양한 특성을 포함하고 있어 편향 분석에 유용한데, 고령자와 젊은 층 간의 대출 승인율이 다르게 나타나는 경우가 종종 있다. 만약 고령자가 불리하게 예측된다면 연령에 따른 편향을 식별하고 수정하는 방법을 연구하는 데 도움이 된다.

다 인공지능의 편향제거 기술

인공지능의 공정성을 보장하기 위해 다양한 편향제거 기술이 개발되고 있는데, <그림 3.25>와 같이 전처리(pre-processing), 중처리(in-processing), 후처리(post-processing)의 3가지로 나눌 수 있다. 이러한 기술은 데이터 수집과 처리(A), 모형 학습(B), 그리고 결과 처리(C)의 각 단계에서 편향을 제거하고자 한다.

그림 3.25 편향제거 방법의 3가지 접근 방식



출처: 연세대학교 조성배(2024).

1) 전처리 접근 방식

모형학습 전에 데이터 자체에서 편향을 제거하거나 줄이는 방법으로서, 데이터 자체가 편향되지 않도록 하여 데이터의 공정성을 확보한다.

- 데이터 샘플링은 특정 그룹이 과소 혹은 과다 대표되지 않도록 다양한 배경, 인종, 성별, 연령의 데이터를 포함하는 학습데이터를 샘플링하는 것이다.
- 데이터 증강은 소수 집단의 데이터에 노이즈를 추가하거나 변형하는 등 데이터를 증강하여 학습데이터의 균형을 맞추는 것을 의미한다.
- 리샘플링은 다수 집단의 데이터를 줄이거나 소수 집단의 데이터를 늘려서 균형을 맞추는 방법인데, 일반적으로 다수 집단의 데이터를 일부 제거하여 데이터의 균형을 맞춘다.
- 데이터 정규화는 소득이나 연령과 같은 연속형 변수를 표준화하는 등 데이터의 특정 속성을 정규화하여 편향을 줄이는 방법이다.
- 속성 제거는 성별, 인종 등 편향을 유발할 수 있는 민감한 정보 및 속성을 제거하는 방식을 의미한다.

2) 중처리 접근 방식

모형의 학습 과정에서 편향을 제거하거나 줄이는 방법으로, 알고리즘 자체에 공정성을 내재화하여 모형이 공정하게 학습되도록 한다.

- 모형 학습 과정에서 편향을 보정하는 알고리즘은 모델의 손실값과 가중치를 수정하는 방향으로 진행된다. 이는 모형이 학습되는 동안 특정 그룹에 대한 편향을 줄이도록 조정하는 방법이다.
- 잘못된 예측에 대해 비용을 부여하여 편향을 줄이는 방법도 있다. 예를 들어, 소수 집단에 대해 잘못 예측할 경우 높은 비용을 부여하여 모형이 더 신중하게 학습되도록 한다.
- 제약기반 학습은 모형학습 시 모형의 예측 결과가 모든 그룹에서 균형 있게 나오도록 공정성 제약 조건을 추가하여 편향을 줄인다.
- 최적화 알고리즘은 공정성을 고려하여 모형을 학습함으로써 모형이 성능과 공정성을 동시에 만족시키도록 학습하는 방법이다.

3) 후처리 접근 방식

모형이 생성한 예측 결과를 후처리하여 편향을 제거하거나 줄이는 것으로, 이미 학습된 모형의 결과가 공정하도록 보정한다.

- thresholding은 예측 결과의 임계값을 조정하여 편향을 줄이는 방법으로 특정 그룹이 불리한 예측을 받지 않도록 공정성을 확보한다.
- 결과기반 변환 방법은 예측 결과를 변환하여 편향을 줄이는 것으로, 모형의 예측값을 직접 수정하여 특정 그룹에 불리하지 않도록 한다.
- calibration은 모형의 예측 확률을 조정하여 편향을 줄이는 방법으로 예측 확률이 실제 결과와 일치하도록 조정하여 공정성을 높인다.
- 결과기반 제약 조건 최적화 방법은 예측 결과에 제약 조건을 적용하여 편향을 줄이는 것으로, 결과의 공정성을 보장하기 위해 제약 조건을 최적화한다.

4) 대형언어모델의 편향제거

최근에 대형언어모델(LLM)은 방대한 데이터를 학습하여 다양한 응용 분야에서 탁월한 성능을 보여주고 있으나 학습데이터에 내재된 편향을 학습하여 불공정한 결과를 생성할 수도 있다. 이에, LLM의 편향을 줄이는 다양한 기술이 개발되고 있다.

- 데이터 증강은 학습데이터에서 특정 속성을 바꾸며 균형을 맞추는 방법으로서, '남성은 훌륭한 프로그래머다'를 '여성은 훌륭한 프로그래머다'로 바꾸는 식으로 수행된다.
- 프롬프트 튜닝은 사용자가 제공하는 프롬프트를 개선해 편향을 줄이는 방법이다.
- 모형 구조에 편향 감소를 위한 모듈을 추가하여 편향을 제거하기도 한다.
- 모형 편집은 모형의 특정 부분을 변경하여 편향을 줄이는 것으로서, 모형의 특정 영역에서 행동을 효율적으로 조정하면서 다른 입력에 영향을 주지 않도록 한다.
- 결과 수정은 모형이 생성하는 텍스트의 품질을 조정하는 방법이다.
- 추론 단계에서 특정 입력에 대한 모형의 출력을 CoT 등으로 수정해 편향을 완화하기도 한다.

라 주요국의 동향

1) 미국

미국은 인공지능 기술의 선도국답게 인공지능의 공정성과 윤리에 관한 활발한 연구와 정책을 개발하고 있다. 여러 정부 기관과 민간단체가 협력하여 인공지능의 공정성을 보장하기 위한 다양한 노력을 기울이고 있다. 국립표준기술연구소(NIST)는 인공지능의 공정성 평가를 위한 기준을 마련하고 공정성, 투명성, 책임성을 보장하기 위해 다양한 연구를 수행하고 있으며, 이를 통해 인공지능의 신뢰성을 높이려 하고 있다.

미국 정부는 인공지능 연구와 개발을 촉진하기 위해 백악관에 AI 이니셔티브를 출범시켰다. 인공지능의 윤리적 사용과 공정성을 강조하며, 공정성 관련 연구에 대한 지원을 확대하고 있다. 캘리포니아주는 인공지능의 편향을 줄이기 위한 법안을 추진하고 있는데, 그 내용은 인공지능이 특정 집단에 대한 편향을 일으키지 않도록 하는 규제를 포함하고 기업이 이러한 규제를 준수하도록 하는 것이다.

구글은 인공지능 공정성을 위한 다양한 연구를 진행하고 있는데, 'What-If Tool'은 머신러닝 모델의 공정성을 시각적으로 분석할 수 있는 도구로, 모델의 편향을 식별하고 수정하는 데 도움을 준다. IBM은 인공지능 공정성을 위한 오픈소스 툴킷인 AI Fairness 360을 개발했는데, 이는 데이터 전처리, 모형 학습, 후처리 단계에서 편향을 줄이는 다양한 알고리즘과 도구를 제공한다.

2) EU

EU는 인공지능의 공정성과 윤리를 보장하기 위해 가장 엄격한 규제를 마련하고 있다. EU의 접근 방식은 주로 법적 규제와 윤리적 가이드라인을 통해 인공지능의 책임성을 강화하는 것이다. 2021년에 인공지능 규제 법안을 발표하여 인공지능이 비차별적이고 투명하게 작동될 것을 요구하였으며, 이를 위반할 경우 엄격한 제재를 가한다. 이 법안은 인공지능의 공정성, 투명성, 안전성을 보장하는 것을 목표로 한다.

GDPR은 데이터 보호와 관련된 강력한 규제를 포함하고 있으며, 인공지능이 개인의 데이터를 공정하고 투명하게 처리하도록 요구한다. 이는 인공지능이 편향을 일으키지 않도록 하는 중요한 법적 장치이다. AI4EU는 유럽의 인공지능 연구자와 기업들이 협력하여 인공지능의 공정성과 윤리를 연구하고 개발하는 플랫폼으로서 인공지능의 투명성과 공정성을 높이기 위한 다양한 도구와 리소스를 제공한다.

3) 아시아

아시아도 인공지능 발전에 큰 관심을 기울이고 있으며, 여러 국가가 인공지능의 공정성을 보장하기 위한 정책과 연구를 추진하고 있다. 중국은 인공지능 선도국으로서 인공지능의 공정성을 보장하기 위한 연구와 정책을 강화하고 있다. 중국 정부는 인공지능의 개발과 활용을 촉진하면서도, 공정성과 윤리를 강조하는 정책을 추진하고 있다. 또한, 여러 대학과 연구기관에서 인공지능의 공정성을 연구하고, 편향을 줄이기 위한 다양한 알고리즘과 기법을 개발하고 있다.

일본 정부는 인공지능의 윤리적 사용을 보장하기 위해 AI 윤리 가이드라인을 제정하여 인공지능이 인권을 존중하며 공정하게 작동될 것을 요구하고 기업과 연구자들이 이를 준수하도록 장려한다. 또한, 공정성을 포함한 인공지능 연구개발을 지원하기 위해 다양한 프로그램을 운영하고 있다. 일본의 여러 연구기관과 대학에서도 인공지능의 공정성을 연구하는 프로젝트를 진행하고 있다.

우리 정부도 인공지능의 공정성을 평가하기 위한 기준을 마련하고 있다. 이 기준은 인공지능이 공정하게 작동되는지 평가하고, 편향을 식별하여 수정하는 방법을 제시한다. 또한, 국가 AI 전략을 통해 인공지능의 윤리적 사용과 공정성을 강조하고 있다. 이 전략은 인공지능이 사회에 긍정적인 영향을 미칠 수 있도록 다양한 정책과 규제를 포함하고 있다.

마 발전 전망

1) 기술적 측면

인공지능의 공정성을 확보하기 위한 기술은 지속적으로 발전하고 있다. 연구자들은 보다 정교한 편향 제거 알고리즘을 개발하고 있으며, 인공지능의 예측 정확도를 유지하면서도 공정성을 높이는 방향으로 나아가고 있다. 이에 따라, 새로운 딥러닝 기법이나 강화학습 알고리즘은 공정성을 내재화한 형태로 발전할 것으로 보인다.

또한, 인공지능이 실시간으로 환경과 데이터를 학습하면서 편향을 줄이는 적응형 알고리즘이 개발될 것이다. 이러한 알고리즘은 변화하는 데이터 패턴에 맞춰 스스로 조정하며 공정성을 유지할 수 있다. 하나의 모형이 여러 과제를 동시에 학습하면서 공정성을 유지하는 멀티태스크 학습 기법도 주목받고 있다. 이는 모형이 다양한 상황과 데이터를 균형 있게 처리할 수 있도록 돕는다.

인공지능 모형의 해석 가능성과 투명성을 높이는 기술도 발전하고 있다. 이는 인공지능의 결정 과정을 명확히 이해하고, 잠재적인 편향을 식별하여 수정하는 데 중요한 역할을 한다. 설명 가능한 AI(Explainable AI, XAI) 기술은 모형의 예측 결과를 이해할 수 있게 설명해주는 것으로, 사용자가 모형의 작동 방식을 이해하고 신뢰할 수 있도록 돕는다. 시각화 도구를 통해 모형의 의사결정 과정을 시각적으로 표현하거나 문장으로 설명하는 사례 등이 이에 해당한다. 모형의 공정성을 평가하고 편향을 식별하기 위한 감사 도구 또한 개발되고 있는데, 이는 모형의 모든 결정 과정을 기록하고 분석하여 공정성 문제를 사전에 방지할 수 있도록 한다.

데이터의 공정성을 보장하기 위한 데이터 관리 기술도 중요하다. 데이터 관리의 목표는 데이터 수집, 정제, 저장, 사용의 전 과정에서 공정성을 유지하는 것인데, 이를 위해 다양한 배경을 대표하는 데이터를 수집하고 관리하는 기술도 발전하고 있다. 이는 인공지능이 특정 집단에 편향되지 않도록 하는 데 중요한 역할을 한다. 데이터 사용의 윤리성을 보장하기 위한 방법과 도구 또한 개발되고 있는데, 데이터 사용이 법적, 윤리적 기준을 준수하도록 돕는 역할을 한다.

2) 정책적 측면

전 세계적으로 인공지능의 공정성을 보장하기 위한 정책과 규제가 강화될 전망이다. 이는 각국의 법적 기준을 국제적으로 표준화하여, 글로벌 기업들이 일관된 규제를 준수할 수 있도록 하는 방향으로 발전하고 있다. 여러 국가들이 협력하여 인공지능의 공정성에 관한 국제적인 가이드라인과 표준을 마련하고 있는데, 이는 글로벌 시장에서 일관된 규제를 적용할 수 있게 한다. 각국의 규제 기관은 인공지능의 공정성을 평가하고 보장하기 위한 구체적인 기준을 마련하고, 이를 준수하지 않는 기업에 대해 엄격한 제재를 가할 것이다.

기업들은 인공지능의 공정성을 보장하기 위해 더 많은 책임을 지게 될 것이다. 이는 기업이 자율적으로 공정성을 유지하도록 하는 내부 규제와, 외부의 법적 규제를 동시에 적용하는 방식으로 발전하게 될 것으로 보인다. 기업들은 공정성, 투명성, 책임성을 포함한 자체적인 윤리 기준을 마련하고, 이를 준수하기 위한 내부 정책을 강화할 것이다. 또한 정부의 규제를 준수하기 위해 기업 내 공정성 평가 도구와 프로세스를 도입하여 정기적으로 공정성 평가를 실시하고 결과를 보고해야 할 것이다.

바 맺음말

인공지능의 공정성에 대한 사회적 인식이 높아지고 있다. 공정성에 대한 요구가 더욱 강해지면서, 기업과 연구자들은 공정성을 최우선 과제로 삼아야 할 것이다. 대학과 기업에서는 인공지능 공정성에 관한 교육 프로그램을 강화할 것으로 보이는데, 이는 개발자와 사용자가 공정성 문제를 인식하고 해결할 수 있도록 돕는 역할을 할 것이다. 정부와 민간단체는 인공지능의 공정성에 대해 공공의 인식을 높이기 위한 홍보 활동을 강화하여 일반 대중이 인공지능의 공정성 문제를 이해하고 이를 개선하기 위한 노력에 공감할 수 있도록 힘써야 한다.

사회와 민간의 참여를 통해 인공지능의 공정성을 보장하는 노력도 중요하다. 다양한 이해관계자들이 함께 협력한다면, 인공지능의 공정성을 높이는 방향으로 발전할 것이다. 무엇보다도, 인공지능 개발 과정에 시민들이 참여할 수 있는 플랫폼을 마련하여 다양한 목소리를 반영하고 인공지능이 공정하게 개발될 수 있도록 해야 한다. 이와 같이 기업, 정부, 학계, 시민단체 등 다각적인 협력을 통해 이제는 인공지능의 공정성을 높이기 위한 공동의 노력을 기울여야 할 시점이다.

참고문헌

Caton, S. & Haas, C.(2024). “Fairness in Machine Learning: a Survey”, ACM Computing Surveys, vol.56 No.166, pp.1~38.

Chen, J., dong, H., Wang, X., Feng, F., Wang, M. & He, X.(2023). “Bias and Debias in Recommender System: A Survey and Future Directions”, ACM Transactions on Information Systems, vol. 41 No.67, pp.1~39.

Chu, Z., Wang, Z. & Zhang, W.(2024). “Fairness in Large Language Models: A Taxonomic Survey”, arXiv preprint, arXiv:2404.01349.

Mehrabi, N., Morstatter, F., Saxena, N. & Lerman, r.(2021). “A Survey on Bias and Fairness in Machine Learning”, ACM Computing Surveys, vol. 54, No.6 pp.1~35.

Quy, T., Roy, A., Iosifidis, V., Zhang, W. & Ntoutsi, E.(2022). “A survey on Datasets for Fairness-Aware Machine Learning”, Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, vol.12, pp. 1~59.

Xivuri, K. & Twinomurinzi, H.(2021). “A Systematic Review of Fairness in Artificial Intelligence Algorithms”, Responsible AI and Analytics for an Ethical and Inclusive Digitized Society, pp. 271~284.

Propublica(n.d.). Retrieved September 10, 2024 from https://www.propublica.org/article/machine-bias-risk-assessments-in-criminal-sentencing.

PART 3

9

지속 가능한 AI와의 공존을 위한 윤리와 규제

김명주
국제인공지능윤리협회 회장

가 들어가는 말

30년 전 인터넷이 비영리 인프라에서 상업화 기술로 전환되고 급속히 대중화됨에 따른 인류의 소통 혁신은 예상을 초월했다. 그러나, 혁신이 불러온 편익과 함께 심각한 부작용과 역기능이 대두되기 시작했다. 이를 최소화하기 위해 세계 각지에서는 정보통신 윤리, 사이버 윤리, 인터넷 윤리 등 각종 윤리 운동을 전개했다. 그리고 윤리만으로는 해결할 수 없는 문제들을 규제와 법률로 보완해 왔다.

오늘날 인류는 인공지능(AI)이라는 또 다른 신기술을 맞이하고 있다. 인공지능은 인류 최대의 혁신 신기술이라고 인정받을 만큼 그 잠재력이 무궁하며 심지어 신인류로의 대전환을 위한 핵심 기술이라고도 평가되지만, 여기에도 잠재적인 위험은 헤아릴 수 없을 만큼 많다. 어떤 전문가들은 인공지능의 잠재적 위험을 감안하여 인공지능을 인류의 마지막 기술이라고 예견하기도 한다. 인공지능은 혁신성이 매우 커서 일단 사회적으로 수용되면 부작용과 역기능이 아무리 심각해도 이전으로 되돌아갈 수 없는 '비가역적 기술'이다. 따라서 처음부터 윤리적 접근이 필요하며 이를 감안한 신중한 수용이 필수적이다. 본 장에서는 인류가 앞으로 인공지능과 지속적인 공존 관계를 유지하기 위하여 고려해야 할 윤리와 규제를 살펴본다.

나 AI의 양면성

1) 디지털 신기술과 혁신, 그리고 양면성

'혁신'은 이전과 다른 새로움을 통해서 긍정적 변화를 이끌고 가치를 창출함으로써 사회 전반에 걸쳐 발전을 이루어 내는 것이라고 정의할 수 있다. 혁신은 인류의 모든 영역에 걸쳐 가능하지만, 특히 '기술 혁신'은 역사를 돌아볼 때 인류에게 가장 큰 영향력을 끼쳐왔다고 해도 과언이 아니다. 기술 혁신은 사회 전반에 걸친 '발전'의 차원을 뛰어넘어 '혁명'이라 불릴 만한 시대적 전환기를 만들어 내기도 했다. 최근에는 AI를 위시하여 일련의 새로운 디지털 기술들이 과거 그 어느 때보다도 강력한 변화를 일으키면서 새로운 혁신을 이루는 중이다.

기술 혁신은 일상의 편의성 및 업무의 효율성을 높이는 등 다양한 방식으로 우리 사회에 긍정적인 영향을 미쳐왔다. 최근 연구에 따르면 생성형 AI '챗GPT'를 활용할 경우 문서 작업의 효율성이 40%, 출력 품질은 18% 향상되며 소프트웨어 개발 시간은 40% 이상 단축된다고 알려졌다. 뿐만 아니라, 기술 혁신은 경제 성장을 촉진하며 소득 수준도 높여준다. 건강 증진과 수명 연장이라는 인간의 꿈을 현실화하고 자아실현과 행복 추구를 향한 기초 수단인 교육과 학습의 기회를 넓혀주며 고용의 기회도 새롭게 제공한다. 아울러 개인 간 소통과 연결성을 증진함으로써 사회적 존재로서의 특장점을 기반으로 새로운 기회와 가치를 만들어 낸다. 사회에 미칠 긍정적 영향에 대한 이러한 기대는 공학자와 과학자 등 기술 전문가들이 기술 혁신을 꾀하며 열정과 시간을 쏟는 동안 중요한 동인(動因)으로 작용해 왔다.

그러나, 어떤 기술이든지 정도의 차이는 있겠지만 양면성이 존재한다. 기술의 순기능 곁에는 항상 역기능과 부작용이 병존한다. 기술 자체의 양면성 못지않게 기술 혁신이 일으키는 다양한 변화에도 양면성이 존재하며, 이에 따라 기술 혁신은 긍정적인 영향과 함께 사회적, 경제적, 윤리적 숙제를 꾸준히 동반해 왔다. 2차 세계대전을 종식할 수 있는 유일한 해결책으로 원자폭탄 개발을 추진했던 오펜하이머 연구소장은 이후 적극적인 핵무기 반대론자가 되었고, 딥러닝을 만든 AI 대부 제프리 힌튼 교수는 생성형 AI의 글로벌 경쟁 과정을 지켜보면서 지난 시간에 대한 후회와 미래에 대한 걱정이 담긴 인터뷰를 쏟아 냈다. 제프리 힌튼 교수는 "인공지능으로 인하여 앞으로 인류는 엄청난 이득을 얻게 될 것이다. 그러나 인공지능으로 인해 파생되는 문제점들을 해결하기 위해서는 얻은 이득의 두 배 이상을 쏟아 부어야 할 것이다."라며 여러 미디어와 인터뷰했다.

2) AI 분야의 부머와 두머

2023년 11월 17일 '챗GPT의 아버지'라 불리던 샘 알트만 대표의 전격 해임을 결정했던 오픈AI 이사회가 주목을 받았다. 전체 이사 6명 중에서 일리야 수츠케버, 아담 디안젤로, 타샤 매컬리, 헬렌 토너는 범용인공지능(AGI)의 윤리적 중요성을 강조하는 두머(doomer)에 속한다고 볼 수 있다. 두머는 미래의 AGI가 궁극적으로 인간에게 위해를 가하거나 심지어 인류를 파멸시킬 수 있다(doom)는 가능성을 배제하지 않으며, 이를 예방하기 위해서 인간이 AI를 지속적으로 모니터링하고 위험 발생 시 즉각적인 개입이 가능해야 하며, 기술은 물론 윤리와 규제, 법 등 필요한 모든 조치가 신기술 개발 첫 단계부터 병행되어야 한다는 입장이다.

반면에 오픈AI의 대표이사 샘 알트만과 이사회 의장 그렉 브록만은 아직 인공지능이 윤리를 앞서 내세울 만큼 우려스럽지는 않으며 우선 인공지능을 성장시키는 것이 중요함을 강조하는 부머(boomer)에 속한다. 부머는 미래 AGI가 인류를 배신하는 일은 결코 일어나지 않을 것이라고 믿는데, 이는 신뢰할 수 있는 기술의 개발에 대한 기술자 스스로의 자신감 표현이라고도 평가된다. 이들은 오히려 AGI 기술을 개발할수록 인류에게 큰 도움이 될 것이라는 확신을 가지고 있으므로, 인류가 기술 발전과 이를 통한 사회적 변화(boom)에 더 노력을 기울여야 한다는 입장이다.

두머가 과반수를 이루었던 오픈AI 이사회는 대표이사 샘 알트만과 이사회 의장 그렉 브록만이 '안전하고 윤리적인 AGI 개발'이라는 오픈AI의 창립 취지를 변질시키고 있다고 판단하여 각각 해임과 해촉을 명령했다. 그런데 750여 명의 직원 중에서 700명이 사표를 냈고 이들을 모두 마이크로소프트가 받아들이겠다고 하면서, 오픈AI에 지금까지 투자됐던 자금이 전량 회수당할 위기에 처하자 5일 만에 이사회는 인사 결정을 철회했고 이 일은 단순한 해프닝으로 끝났다. 이는 미래의 AGI 기술과 그 영향력을 바라보는 부머와 두머의 갈등이 세상에 널리 조명된 계기가 되었고, 기술 혁신이 기술자들의 시선에서마저도 언제나 긍정적이지만은 않음을 보여주었다. 정리하자면, 부머와 두머는 기술 혁신에 있어서 '파괴적 혁신가(destructive innovator)'와 '책임 있는 혁신가(responsible innovator)'에 각각 비견될 수 있다.

2024년 5월 14일 오픈AI가 챗GPT의 기반모델을 챗GPT-4o로 업그레이드하면서 내부 윤리팀이 슈퍼얼라인먼트(Super-Alignment)팀을 전격 해체했다. 오픈AI의 슈퍼얼라인먼트팀장이었던 얀 라이케는 "지난 수 년 간 AI 안전성은 잘나가는 제품보다 뒷전으로 밀려났다."며 윤리를 가볍게 여기는 오픈AI를 비난했고 클로드(Claude) AI를 만든 안드로픽(Anthropic)에 합류하여 슈퍼얼라인먼트팀을 이끌게 되었다. 오픈AI의 초창기 멤버로서 기술개발 총책을 맡았던 일리야 수츠케버도 같은 시기에 회사를 떠났다. 그 후 한 달 만인 6월 20일 '안전한 초지능'을 목표로 하는 AI 스타트업 'SSI(Safe Super Intelligence)'를 만들었다. 부머에게 밀려 나온 두머가 안전한 미래 인공지능을 위한 기업 활동을 다시 시작한 셈이다. 이처럼 AI 기술과 산업 분야에서는 안전한 인공지능에 대한 서로 다른 시각이 존재하며, 그 사이에서 더욱 발전된 윤리와 규제가 최근 이슈로 부각되고 있다.

다 AI 윤리 원칙

1) 법적 정의에서 바라본 AI 윤리

2020년 EU 집행위원회(EC)에서 제안했던 인공지능법(AI Act) 초안에는 'AI 시스템'이 다음과 같이 '기술' 중심으로 다르게 정의되었다.

'AI 시스템이란 부속서 I에 나열된 하나 이상의 기법과 접근 방식을 사용하여 개발된 소프트웨어로, 주어진 인간 정의 목표 집합에 대해 상호작용하는 환경에 영향을 미치는 콘텐츠, 예측, 추천 또는 결정을 생성할 수 있는 소프트웨어를 의미한다.'

부속서 I

(a) 지도학습, 비지도학습 및 강화학습을 포함하여 다양한 방법(딥러닝 포함)을 사용하는 기계학습(ML) 접근 방식

(b) 지식 표현, 귀납적(논리) 프로그래밍, 지식 베이스, 추론 및 연역 엔진, (상징적)추론 및 전문가 시스템을 포함한 논리 및 지식 기반 접근 방식

(c) 통계적 접근 방식, 베이지안 추정, 검색 및 최적화 방법

하루가 다르게 변하는 AI 기술을 법에서 직접적으로 나열하면서 정의하는 것이 부담스러웠는지, 4년 뒤인 2024년 3월 유럽의회(EP)에서 승인한 세계 최초의 인공지능법에서는 'AI 시스템'을 다음과 같이 3조에서 재정의하고 있다.

"AI 시스템이란 다양한 수준의 자율성을 가지고 작동하도록 설계된 기계 기반 시스템으로서, 배포 후 적응력을 발휘할 수 있으며 명시적 또는 암묵적 목표에 따라 수신한 입력으로부터 물리적 또는 가상 환경에 영향을 미칠 수 있는 예측, 콘텐츠, 추천, 결정과 같은 출력물을 생성하는 방법을 추론하는 것이다."

이러한 AI의 법적 정의에 입각하여 윤리적 이슈 및 원칙을 나열하면 다음과 같다.

통제성과 안전성

EU의 인공지능법에서 정의한 AI에 대해 주목할 만한 표현은 우선 '자율성(autonomy)'이다. 인간의 개입 없이 일부든 전부든 스스로 동작하고 운영되며 결정을 내리는 것이 AI이다. 따라서 AI의 이러한 자율성으로 인하여, AI는 통제 가능해야 한다는 '통제성(controllability)'과 AI는 안전해야 한다는 '안전성(safety)'이라는 윤리 원칙이 필요해진다.

스스로 동작한 AI가 인류에게 피해를 줄 경우 이를 통제함으로써 안전을 확보해야 한다는 원칙이다. 지금까지는 인간이 모든 디지털 신기술을 어느 정도 통제할 수 있었고 이를 통해서 안전성을 보장받았다. 이른바 '킬 스위치(kill switch)'가 모든 AI에게 마련되어야 하는데, 이것이 AI의 자율성을 인간이 어느 때든 통제할 수 있음을 의미하기 때문이다. 그러나 최근 자동차 급발진 사고를 보면서, 첨단 기술들이 뭉치면 이를 인간이 통제하기가 생각만큼 쉽지 않을 수 있음을 깨닫게 된다. 그렇다면, 사물인터넷과 연결된 AI가 외부로부터 스스로를 보호할 수 있는 미래 상황에서 AI에 대한 킬 스위치가 여전히 통할지 의문스러워진다. 이는 "AI가 인류의 마지막 기술일 수 있다."는 스티븐 호킹 박사의 경고를 상기시키는데, 킬 스위치가 제대로 작동하지 않을 경우 인류는 매우 심각한 위험에 놓일 수도 있을 것이다.

투명성과 설명 가능성

EU의 인공지능법에서 주목할 만한 두 번째 표현은 '추론(inference)'이다. 추론은 AI가 보조하거나 대체할 수 있는 인간 두뇌의 핵심 기능이다. AI의 추론이 정확하거나 뛰어날수록 인간처럼 똑똑하며 지능적이라고 평가받는다. 이러한 AI의 지능성(intelligence)이 발현되기 위한 추론 과정은 인간에게 투명하게 보여야 하는데, 그렇지 않을 경우 AI의 우수한 지능성과 그로 인한 결과를 인간은 아무런 질문도 없이 받아들이기만 해야 하기 때문이다. 이에 따라 '인간을 위한 AI', '인권을 우선시하는 AI'라는 가장 근본적인 기대를 저버리는 상황에 처하게 될 수 있으므로, 지능적으로 추론하는 AI를 맞닥뜨렸을 때 AI의 추론 과정이 인간에게 투명하게 보여질 '투명성(transparency)'과 추론 근거에 대한 '설명 가능성(explainability)'이라는 AI 윤리 원칙이 필요해진다.

코로나 3년 동안 국내 700여 개 기업은 신입사원 지원자를 대상으로 비대면 면접 방식인 'AI 면접관'을 사용했다. 국내에는 약 5개의 AI 면접관 솔루션이 있는데, 그 중 2개 업체의 솔루션이 거의 독과점을 하고 있다. 만약 이들을 활용한 면접시험에 응시한 지원자가 탈락한 경우 그 이유를 설명해주는 것이 마땅한데, 이것이 설명 가능성이라는 AI 윤리 원칙이다. 그리고 AI 면접관이 공정한지 혹은 그렇지 않은지를 알고자 할 때 AI 면접관이 동작하는 내부를 들여다볼 수 있어야 하는데, 이것은 투명성 원칙과 연결된다. 설명이 불가능한 AI는 사용자들이 기피할 것이고, 투명하지 않은 AI는 사용자들이 불안해 할 수 있어서 AI의 신뢰성을 저하하는 요인이 된다.

공정성

EU의 인공지능법에서 주목할 만한 세 번째 표현은 '시스템'이다. 통상적으로 시스템은 입력-처리-출력의 구조를 갖는데, AI 시스템 역시 마찬가지이다. 여기에서 AI 시스템의 입력은 두 가지로 구분된다. 하나는 추론의 근거가 되는 정보를 입력하여 AI에게 지능을 부여하는 과정이며, 이는 AI 시스템을 개발하는 과정에서 사용하는 입력이다. 다른 하나는 지능이 부여된 AI에게 추론을 위하여 질의하는 입력인데, 이는 개발하여 배치된 AI 시스템을 이용자가 활용하기 위한 것이다. 전자의 경우, AI의 종류에 따라서 입력물이 '정리된 지식'일 수도 있고, '학습데이터'일 수도 있다. AI가 70년의 역사 가운데 세 번의 하이프 커브(hype curve)를 그렸다고 볼 때, 두 번째 하이프 커브에서 주목할 만한 점은 전문가 시스템(expert system)이다. 이는 특정 분야 전문가들이 교육기관에서 학습과정을 거치고 현장에서 실무를 경험하면서 내재된 암묵지를 명백지로 표현하여 컴퓨터 시스템에게 제공한 것이다. 분야별 전문가가 수십 년 간 배우고 경험한 지식을 규칙 등으로 정리하여 컴퓨터에게 제공한 것인데, 이를 '훌륭하지만 구식의 AI(Good, Old-Fashioned AI, GOFAI)'라고 부른다. GOFAI는 전문 분야별로 우수한 경우가 존재하여 지금도 일부 사용되고 있지만, 구축 시간이 오래 걸리고 명백지로 바꾸는 작업의 난이도가 높은 편이다.

반면, 아예 컴퓨터로 하여금 학습 과정부터 작업하도록 할 경우 특정 전문가보다 학습 및 경험에 소요되는 시간이 대폭 줄어들면서 구축 및 개발에 필요한 노력을 비약적으로 아낄 수 있다. 이 방법이 바로 세 번째 하이프 커브, 즉 여름기의 핵심이 되는 기계학습이다. 기계학습은 인간의 뇌신경망을 기반으로 하는 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN)을 포함하는데, 인공신경망은 캐나다 토론토대학교 제프리 힌튼 교수 등이 제안한 다층 인공신경망 중심의 딥러닝(Deep Learning, DL)이 최근 들어 혁신적인 성능을 보이며 AI 시스템의 주류가 되었다.

GOFAI에 비하여 기계학습 기반의 AI는 대량의 데이터를 직접 학습하여 추론 정보를 축적하다 보니, 학습데이터가 가지고 있는 문제점을 그대로 투영할 수 있다. 대표적으로, 학습데이터가 가지고 있는 편견과 차별을 AI가 그대로 고착화할 수 있다는 점을 들 수 있다.

2019년에 애플에서 신용카드를 발행하기 시작했다. 그런데 신용카드의 지출한도가 여성의 경우 남성의 1/20밖에 되지 않았다. 공동명의의 재산을 보유한 부부의 경우에도 동일한 현상이 대거 발생했다. 이는 기존의 신용카드 지출한도에 관한 데이터를 보았을 때 남성이 여성보다 해당 비율만큼 높았다는 점을 AI가 그대로 학습하여 고착화한 사건이었다.

비슷한 사건은 또 있다. 2016년부터 아마존은 신입사원을 채용할 때 서류 평가 단계에서 AI를 활용했는데, 유독 여성 지원자들이 많이 탈락했다. 성별을 기재하지 않는 서류전형이었지만, 이후 아마존은 여성에 대한 차별이 있었음을 시인하며 결국 AI 서류전형을 중단했다. 아마존의 AI는 과거 서류전형 데이터를 학습했는데, 남성 탈락자보다 여성 탈락자가 월등하게 많았다. 해당 여성 지원자들의 서류에 기재되어 있던 여성 고유 활동 관련 다양한 키워드들이 불합격 강화 요인으로 작용하도록 AI 안에 불공정성이 자리잡은 것이다.

2020년 8월 영국은 코로나 팬데믹으로 인해 우리나라의 수능시험에 해당하는 고등학교 학력평가 'A레벨 테스트'를 온라인으로 시행하면서 '다이렉트 센터 수행평가 모델'이라는 AI 알고리즘을 활용해 점수를 배정했다가 30만 명의 대입 지망생들이 거세게 반발했다. AI가 배정한 점수를 보니 사립학교 학생들의 점수는 높고 공립학교 학생들의 점수가 낮았던 것인데, 이것도 학습데이터 문제였다. 상대적으로 사립

학교 출신 학생들이 좋은 대학을 진학했던 데이터가 많고 공립학교 출신들은 그렇지 못했기 때문에 이러한 데이터들을 학습하다 보니 편견과 차별이 자연스레 드러났고 공정성을 잃게 된 것이다.

프라이버시

AI가 학습하는 대량의 데이터 안에 개인 식별정보, 민감정보 그리고 사생활 정보가 담겨져 있을 경우, 이를 미리 걸러내지 못하면 AI가 개인정보를 유출하고 프라이버시를 침해할 수 있게 된다. 챗GPT가 한창 세상의 주목을 받았던 2023년 3월 이탈리아는 챗GPT의 사용을 전면 금지한 적이 있다. 그 이유에는 여러 가지가 있었지만, 대표적으로 개인정보 유출과 프라이버시 침해를 꼽을 수 있다. 이탈리아 국민들이 챗GPT를 사용할 경우, 프롬프트를 통해서 입력한 개인정보 및 사생활 정보가 그대로 챗GPT 서버로 이동하고 이를 다시 AI가 추가 학습함으로써 개인정보가 유출되고 프라이버시가 침해될 수 있다는 것이 주된 골자였다. 결국, 3주의 유예기간에서 1주일을 더 넘긴 시점에 오픈AI는 챗GPT와의 대화 내용 및 목록을 삭제할 수 있고 서버에 대화 내용을 전달하지 않도록 선택할 수 있는 옵션을 추가함으로써 이탈리아 서비스를 다시 회복할 수 있었다.

우리나라에서도 몇 년 전 유사한 사건이 발생하였다. 국내 모 기업에서 제공한 AI 챗봇 서비스가 개시된 지 3주 만에 종료되었는데, AI로서 공정성을 유지하지 못하고 프라이버시를 준수하지 않았던 점이 3주 천하의 직접적인 원인이었다. 처음에는 중·고교 남학생들이 여성 캐릭터인 AI 챗봇을 성희롱했던 화면들을 캡처해 일부 커뮤니티 사이트 등에 게시했던 것이 문제가 되었고, 이후 성차별, 사회적 약자에 대한 차별 등이 불거지면서 해당 AI 챗봇 서비스가 차별과 편견, 공정성 문제를 일으킨다며 사회적 이슈로 대두되었다. 뒤이어 개인정보 유출 문제도 불거졌다. 해당 기업의 AI 서비스는 타사 서비스를 통해 이루어진 남녀 커플의 대화 10억 개를 학습하고 그중 1억 개를 활용해 답변을 내놓았는데 이때 개인정보를 무단으로 학습하고 민감한 정보를 완전하게 거르지 못한 사실이 밝혀져 결국 3주 만에 서비스가 종료되었다.

책임성과 책무성

EU의 인공지능법에서 정의한 AI 시스템의 출력 부분을 주목하면, 예측, 콘텐츠, 추천, 결정이라는 4가지 종류를 명시하고 있다. 코로나와 같은 전염병이 올해 유행할지에 대해 AI가 예측할 수 있고, 넷플릭스나 유튜브 등의 OTT에서 이용자가 선호하는 콘텐츠를 추천하기도 하며, 합격 여부를 AI 면접관이 결정하고 목적지까지의 경로를 AI 자동차가 설정하는 것이 모두 출력의 형태라고 할 수 있다. 그리고 글을 생성하는 초거대 언어모델인 챗GPT, 이미지를 생성하는 DALL·E와 미드저니, 영상을 생성하는 Runway의 GEN이나 Sora, 음악을 만들어주는 Suno 등은 콘텐츠를 출력물로 생성한다.

만일 이러한 출력 결과가 기대에 미치지 못하고 사실과 다르거나 심지어 사고를 일으킬 경우에는 이를 누가 책임질 것인지에 대한 문제가 발생한다. 이는 앞서 제시한 AI의 자율성과 깊은 관련이 있는데, AI가 인간의 개입 없이 자율적으로 생성한 출력물에 문제가 있을 때의 책임소재를 말한다. 자율성이 없는 기술이나 장비, 장치의 경우 제조물 책임법에 의하여 제조사가 모든 사고의 책임을 지도록 되어 있다. 그런데 AI는 자율성을 가지고 있어서 이러한 제조물 책임법이 AI 개발사에게 온전하게 책임을 물을 수 없어 이에 대한 다양한 대안이 제시되고 있다. 가장 손쉬운 방법은 보험이다. AI로 인한 사건과 사고에 대하여 경제적으로 보상하는 것이다. 그러나 자동차 보험과 마찬가지로 대부분의 보험은 결국 가입자에게 부담을 준다는 문제가 있다. 또 다른 방법은 AI를 별도의 독립된 법인체로 인정하는 것이다. AI 개발이 성공하여 많은 부를 얻든, 예기치 못한 사건과 사고로 인하여 부도가 발생하든 하나의 법인체로서 독립된 권리와 책임을 부여하는 것이다. 2018년 EU는 노동자를 대신하는 로봇 때문에 연금 수입에 문제가 발생하자 로봇을 전자 인간(electronic person)으로 법인화하여 연금 기금으로 로봇세를 징수할 수 있는 법을 발의했다가 많은 파장을 낳고 통과되지 못한 전례가 있다. AI의 법인화 노력은 포스트휴머니즘과 결합하여 앞으로 더욱 많이 시도될 것으로 보이지만 아직은 시기상조라는 의견이 지배적이다. 추가적인 대안으로는 기존의 제조물 책임법을 더욱 강화하여 AI 사업자에게도 추가 적용하는 것을 고려할 수 있다. 영국이 이 방법을 채택했는데, 가장 상식과 전통에 부합함에도 불구하고 AI 사업자들은 약관을 교묘하게 작성하여 사고 발생에 따른 무한 책임은 피하려고 하고 있어 이는 앞으로 AI의 대중화를 위해서 넘어야 할 큰 산이라고 할 수 있다.

그럼에도 불구하고, AI를 개발하고 사업화하는 주체들이 AI로 인한 모든 상황에 대해 1차적인 책임을 지는 것은 필요하므로 책임성(responsibility)은 AI 윤리에서 매우 중요하다. 이와 비슷한 윤리 원칙으로 책무성(accountability)이 있다. 책임성은 발생한 사건과 사고에 대해 적절한 조치를 취하는 것을 의미한다면, 책무성은 책임성을 이행하는 과정에서 그 원인을 규명하고 이를 설명하며 다시 발생하지 않도록 조치를 취하는 과정까지 포함한다. 사고가 발생할 때마다 손해배상을 한다면, 책임성은 만족할지 모르나 책무성은 부족하다 할 수 있다. 그리고 책무성은 공동체 개념에서의 책임성과 관련이 있다. AI를 다루는 개발자와 사업자는 본인이 책임질 상황이 아니더라도 관심을 가지고 해결 역량을 함께 키워야 하는데, 이 부분이 책무성에 해당한다고 할 수 있다.

표절과 저작권 침해

콘텐츠라는 AI 출력물은 예측, 추천, 결정이라는 3가지의 출력 형태로 구성되는데, 이에 따른 윤리 이슈가 존재한다. 바로 표절과 저작권 침해이다. AI 내부적으로 TDM(Text and Data Mining) 과정을 통하여 이루어지는 예측, 추천, 결정은 그 출력 형태가 서술적이거나 묘사적이지 않기 때문에 표절 및 저작권 침해의 여지가 거의 없었다. 그래서 학습데이터에 연계된 제반 권한을 '공정 사용(fair use)'이라는 명목으로 인정하지 않았다. 우리나라도 챗GPT가 등장하기 전까지만 해도 글로벌 AI 경쟁력 강화를 위하여 TDM 활용에 있어서 학습데이터의 저작권 인정을 유보하는 저작권법 전면 개정안이 상정되기도 했다. 그러나 AI가 글, 그림, 영상, 음악, 버추얼 휴먼 등 다양한 콘텐츠를 출력물로 내놓자 표절과 저작권 위반에 대한 논쟁이 치열하게 벌어졌다. 워싱턴 포스트는 챗GPT를 만든 오픈AI를 상대로 기사 저작권 침해, 그리고 자사 기사에 잘못된 내용을 연계한 할루시네이션에 따른 명예 훼손을 이유로 법적 소송을 제기했다.

2023년 4월 발표한 논문에서 미국 펜실베니아주립대학교(PSU)에 재직 중인 이동원 교수는 챗GPT가 표절의 위험이 높다고 주장했다. 그는 챗GPT의 기반 모델 GPT-3.5의 이전 모델인 GPT-2에 대하여, GPT-2가 생성한 21만 건의 글을 학습데이터 800만 건의 문서와 비교한 논문을 발표했다. 해당 논문은 출처 인용 없이 문장 바꾸기(paraphrase), 복사하여 붙이기(verbatim), 아이디어 도용하기 등의 대표적인 표절 현상이 다수 발생했음을 지적했다. 이러한 표절 현상은 저작권 침해로 이어질 수 있는데, GPT-3와 GPT-3.5, GPT-4 모두 GPT-2와 동일한 기반 모델을 사용하고 있으므로 현재의 챗GPT에서도 표절 및 저작권 침해가 발생하고 있다고 볼 수 있다.

진짜와 가짜 구분

AI의 뛰어난 성능은 콘텐츠 출력물에 대한 인간의 판단에 어려움을 초래한다. 딥페이크가 가장 대표적인 영역이다. 사진과 영상 속 인물이 직접 촬영된 것인지, 혹은 AI가 가짜로 만든 결과물인지에 따라 다양한 사회적 문제가 따른다. 배우의 어린 시절을 생성해 내는 디에이징(de-aging) 기술은 방송 및 영화 산업에서 유망한 반면, 딥페이크로 만든 디지털 성착취물은 피해자들에게 너무나 가혹한 불행을 초래한다. 2020년 N번방 사건이 발생했을 당시 딥페이크에 의한 가짜 사진 및 영상물의 확산이 큰 이슈가 되었기에, 국내에서도 딥페이크 기반의 성적합성물에 대한 처벌조항을 「성폭력범죄의 처벌 등에 관한 특례법(성폭력처벌법)」 제14조의2에 '허위영상물'이라는 용어를 중심으로 신설하였다. 이 법률에 근거하여 여성가족부 산하 디지털성범죄피해자지원센터에서는 관련 영상물 삭제를 위해 수사·법률 등을 연계하여 지원하고 있다. 합성·편집 관련 지원은 2022년 212건에서 2023년 423건으로, 딥페이크 기술 이용 '성적허위영상물'에 대한 방심위 시정 요구는 2022년 3,574건에서 2023년 11월 기준 5,996건으로 증가하기도 했다. 지난 22대 국회의원 선거 당시에는 공직선거관리법을 개정하여 딥페이크를 이용한 선거 운동을 전면 금지하기도 했다.

이에 따라 EU의 인공지능법에서는 AI가 생성한 합성 산출물(synthetic output)에 대하여 AI가 생성하였음을 명확하게 밝히는 라벨을 부착하고, 가시적 및 비가시적 워터마크를 기재할 것을 명시하였다. 2023년 10월 30일에 발효된 조 바이든 미국 대통령의 AI 행정명령도 같은 요구 항목이 있는데, 다만 워터마크는 미국 상무성이 만들어 배포하겠다는 단서를 달았다.

다양성

라벨을 달고 워터마크를 부착하는 것은 콘텐츠라는 출력물, 즉 AI의 합성 산출물에 대한 진위 여부를 구분할 수 없기 때문에 취해진 조치라고 볼 수 있다. 그러나 일각에서는 AI의 합성 산출물과 인간의 저작물을 처음부터 분명하게 구분해야 한다는 주장이 있는데, 이를 '다양성(diversity)'의 원칙이라고 부른다.

'반복의 저주(The Curse of Recursion): 생성된 데이터를 기반으로 학습할 때 모델이 잊어버리는 것'이라는 제목의 논문이 2023년 5월 발표되었다. 이 논문에 따르면, 먼저 개발된 AI가 만든 합성 산출물을 후속 AI가 학습데이터로 사용하게 되면 '모델 붕괴(model collapse)'가 이루어진다. 모델 붕괴는 트랜스퍼 모델 등 다양한 AI 모델에서 발생하는데, 이러한 이유 때문에 인간의 저작물을 AI의 합성 산출물과 반드시 구분해야 하며 더 소중하게 다루어야 한다는 주장이 제기되는 것이다. 2021년 11월 23일 193개국이 채택한 유네스코 'AI 윤리 권고' 제95조와 제98조에서도 다양성 원칙을 강조하는데, 인간의 언어와 표현의 뉘앙스에 AI가 미치는 문화적 영향을 조사하여 필요한 부분은 대처해야 하며(제95조), 문화적 표현물에 대해 다양한 공급과 접근을 촉진해야 한다(제98조)고 명시하고 있다.

현재 챗GPT의 기반 모델은 GPT-3이며, GPT-3.5와 GPT-4 모두 같은 기반 모델에 뿌리를 두고 있다. 오픈AI는 프로젝트 코드명 '아라키스(Arrakis)'로 불리는 다음 버전의 기반 모델 GPT-5를 준비하고 있는데, MoE 등 첨단 기술을 사용하고 학습데이터도 GPT-3보다 2배를 늘렸지만 성능이 현재의 기반 모델에 미치지 못해 공개를 하지 못하고 있는 상황이다. 중요한 대목은, 학습데이터의 50%가 기존 AI의 합성데이터라는 점이다. 이는 앞선 논문에서 다룬 내용에 해당하는 구체적인 사례로 꼽을 수 있다.

2) 혁신 신기술로서 AI의 보편적 윤리

공공성

사회를 전환시키는 혁신 신기술로서 AI가 따라야 할 보편적 윤리 원칙도 존재한다. 우선적으로 고려할 것은 그 어떤 혁신 신기술이라도 궁극적으로 '인류 공영'을 위해야 한다는 '공공성(publicness)' 원칙이다. 기술이 소수의 개인과 기업만을 위해서는 안 되며 가급적 인류 전체에게 도움을 줄 수 있는 공공의 기술이어야 한다. 이러한 공공성에는 앞서 소개한 '다양성'도 포함된다. 다양한 인류가 고루 혜택을 볼 수 있도록 고려하는 것도 공공성의 일부이기 때문이다.

포용성

과거 인터넷과 컴퓨터가 혁신 신기술로 부상할 당시에는 해당 디지털 기술에 접근하여 이용하는 데 있어서 소외되는 사회 구성원이 없도록 하는 '디지털 접근성 보장'이 중요한 윤리 원칙이었다. 그리고 접근성 보장이 이루어지지 않는 계층을 대상으로 정부는 디지털 격차 해소 정책을 전개했다. 디지털 신기술을 통한 기회 창출의 장에서 소외되는 국민이 생기지 않도록 하기 위한 목적이었던 것이다. 그러나 AI라는 디지털 신기술은 이전의 인터넷이나 컴퓨터와 달리 학습의 난이도가 높고 활용 역량이 원천적으로 부족한 상황이어서 디지털 격차 해소가 불가능한 계층이 존재한다. 이러한 계층에게도 AI를 통한 혜택의 기회로부터 소외되지 않도록 지원할 필요가 있는데, 이를 포함하는 개념이 바로 '포용성(inclusion)'이다. 실버세대를 위한 키오스크 표준화, 장애인을 위한 에이블테크(able-tech) 산업 활성화가 포용성의 구현 사례이다.

보안성과 안전성

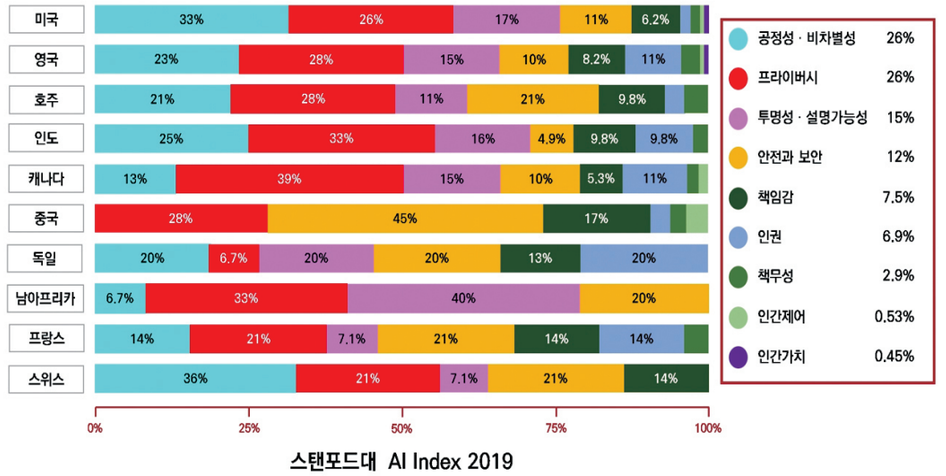
혁신 신기술로서 AI는 '보안성(security)'과 '안전성(safety)' 원칙을 만족해야 한다. 어떤 신기술을 사회에 도입했을 때, 외부 침입자에 의하여 문제가 발생하지 않도록 하는 '보안성'과 재난과 사고 등의 불가항력적 상황에서도 제 기능을 유지할 수 있는 '안전성'은 크게 보면 앞서 제시한 '책임성'의 한 부분으로도 볼 수 있다.

AI의 보안성 관련 문제 규명 및 해결책에 대한 실례는 MITRE가 제시한 ATLAS를 통해서 전체적인 윤곽을 살펴볼 수 있다. 통상적으로 AI의 안전성은 보안성을 포함한다. 안전한 AI는 정상적으로 사용하는 과정에서 발생하는 모든 문제 상황으로부터도 안전해야 하지만, 비정상적인 외부 공격으로부터도 견딜 수 있어야 하기 때문이다. 영국과 미국에서는 AI의 안전성 확보를 위하여 AI 안전연구소(AI Security Institute, AISI)를 이미 운영하고 있으며, 우리나라도 올해 안에 설립할 계획이다. 이 경우, 안전성은 통상적인 의미보다 더 포괄적으로 사용되는데 미국의 경우 NIST(국립표준연구소)에서 제시한 AI 위험관리프레임워크(RMF)를 과학적으로 검증하고 구현하기 위해 AISI를 운영하므로 AI의 잠재적 위험 대부분을 포괄하여 다룬다고 보면 좋을 것이다.

3) AI 윤리의 글로벌 동향 비교

AI 윤리의 원칙은 국가마다 중시하는 내용에 대한 관점의 차이가 존재할 수 있으며, 이에 따라 특정 사안에 대해 윤리 민감도가 다를 수 있다. 2019년 스탠포드대학교는 국가별 빅데이터 분석에 기반하여 인공지능 윤리 원칙을 키워드 형태로 표시한 'AI 인덱스' 자료를 발표한 바 있다. 이는 인공지능 윤리 원칙에 대한 관심도에 있어서 국가적 특성에 따른 차이가 제법 존재하고 있음을 보여준다. 중국의 경우 '공정성과 비차별성'에 대한 이슈가 아예 존재하지 않지만 '안전과 보안' 이슈가 45%로 가장 큰 비중을 차지한다. 반면, 독일의 인공지능 윤리 원칙 관심도를 보면 '프라이버시' 원칙이 가장 낮지만 '인권' 원칙이 가장 높다. 이처럼 인공지능 윤리 원칙에 대한 국가적 관심도가 상이함에 따라 글로벌 표준의 인공지능 윤리를 합의하는 것이 쉽지 않아 보이지만, 인공지능에 대한 우려와 두려움을 최소화하기 위하여 AI 윤리를 적극적으로 다루어야 한다는 점에 대해서는 모든 나라가 예외 없이 동의하고 있다.

그림 3.26 AI 윤리의 글로벌 이슈 동향



출처: Stanford University(2019).

라 AI 규제 동향

1) EU의 인공지능법

생성형 AI가 대중적으로 알려지기 전부터, 인공지능에 대한 규제는 이미 준비되고 있었는데, 2021년 4월 EU 집행위원회(EC)가 제안한 「인공지능법(AI Act)」이 바로 그것이다. 이 법안은 모든 인공지능을 '위험' 관점에서 분류하여 규제한다. 초기 원안에서는 인공지능을 금지, 고위험, 기타 등 3개 요소로 분류하였는데 이후 챗GPT가 등장하는 등 변수가 발생하면서 의회에서 추가 논의를 통해 보다 더 구체적인 분류를 정립했다. 아예 개발 자체가 금지된 인공지능(unacceptable-risk AI)부터 시작하여 고위험 인공지능(high-risk AI), 범용 및 생성형 인공지능(general-purpose and generative AI), 제한적 위험 인공지능(limited-risk AI)까지 인공지능 전체를 위험을 기준으로 분류한 것이다.

금지된 인공지능은 크게 세 분야로 구분된다. 첫째는 사람이나 특정 취약 집단에 대한 인지 행동을 조작하는 인공지능(예를 들어 어린이의 위험한 행동을 조장하는 음성 인식 장난감), 둘째는 사회적 점수(social scoring)를 산정하는 인공지능(즉, 행동, 사회경제적 지위 또는 개인적 특성을 기준으로 사람을 분류하는 인공지능), 셋째는 사

람의 생체를 식별하고 분류하거나 안면 인식 등 실시간 및 원격으로 생체를 인식하는 인공지능이다. 다만, 세 번째 분류의 경우에는 법 집행을 목적으로 할 때 예외적으로 허용될 수 있다. 특히 '실시간' 원격 생체인식 시스템은 매우 제한적으로 허용되며, 상당한 지연 후에 신원 확인이 이루어지는 '포스트' 원격 생체인식 시스템은 심각한 범죄에 한정하여 법원의 승인을 받아야 가능하다.

고위험 인공지능은 사전 위험 평가를 실시해야 하며, 인공지능의 주요 사항을 EU 데이터베이스에 미리 등록해 놓아야 한다. 이는 일종의 에스크로(escrow) 제도로서 해당 기업의 존망과 상관없이 EU 국가에 도입된 고위험 인공지능을 꾸준히 관리하기 위함이다. 모든 규제 조건을 만족한 고위험 인공지능은 인증을 받아서 CE 마크를 부착할 수 있으며 비로소 유럽에서 서비스를 개시할 수 있다. 고위험 인공지능은 특정하여 명시되어 있으며 이는 계속 증가할 수 있다.

범용 및 생성형 인공지능은 챗GPT의 영향을 받아 EU 의회 수정안에 가장 늦게 담긴 내용이다. 이 인공지능은 저작권과 관련된 학습데이터를 어떻게 다루었는지에 대한 요약자료를 제출해야 한다. 해당 인공지능을 통해서 어떤 콘텐츠를 만들 경우, 창작자는 인공지능을 이용했다는 사실을 명확하게 표기해야 한다(공개 disclosure, 면책 disclaimer). 고위험 인공지능은 이를 악용하여 불법 콘텐츠를 제작하는 경우를 대비하여 이를 예방할 수 있는 모델로 미리 설계되어야 하는데, 이처럼 추상적인 규제에 대하여 OECD GPAI(Global Partnership on AI)에서는 구체적인 대안을 제시하고 있다. 바로 AI 합성 산출물에 대한 검증 메커니즘(detection mechanism)을 제공하라는 것이다. 여기에는 AI 합성 산출물 분류 도구를 비롯하여 워터마크와 같은 기술적 조치도 포함된다.

제한적 위험 인공지능은 제공된 정보를 토대로 사용자가 결정을 내릴 수 있도록 최소한의 투명성 요건을 준수해야 한다. 사용자는 인공지능 애플리케이션과 상호작용을 한 후에 이를 계속 사용할지에 대한 여부를 결정할 수 있는데, 이에 대해 사용자가 인지할 수 있도록 해야 한다. 대표적으로, 딥페이크와 같이 이미지, 오디오 또는 비디오 콘텐츠를 생성하거나 조작하는 인공지능이 포함된다.

집행위원회의 원안을 토대로 2022년 12월 약간의 수정을 가한 이사회 안이 만들어졌다. 그리고 2022년 11월 말 등장한 챗GPT로 인해 원안 대비 많은 수정이 이루어진 의회 수정안이 2023년 6월 의회에 제출됐다. 결국 집행위원회, 이사회, 의회는 2023년 12월 8일 인공지능법에 대한 합의에 이르렀으며, 2024년 3월 유럽의회 인준을 거쳐 8월 공표되었다. 2년의 유예 기간(grace period)을 거쳐 2026년 전면 시행된다.

2) EU의 디지털서비스법

EU가 2022년 11월 6일 발효하여 2023년 8월 16일부터 시행하고 있는 「디지털서비스법(DSA)」이 있는데, 해당 법은 생성형 AI에 대한 다른 차원의 규제를 명시하고 있다. 원래 「디지털서비스법」은 SNS, 검색엔진과 같은 빅테크 기업을 규제하기 위한 법으로서 가짜 뉴스와 같은 유해 콘텐츠를 필터링하도록 의무 조항을 부여하고 있다. 만약 생성형 AI가 만든 합성 산출물을 위 기업들이 제공하는 경우, 해당 합성 산출물에 인공지능을 활용했다는 사실을 표시하며 관련 라벨을 붙이고 소비자의 악용을 방지할 조치를 반드시 제시하도록 규정하고 있다.

3) 미국의 AI 행정명령

미국의 경우, 전통적으로 기업 자율 규제를 중시해 온 나라이다. 2023년 3월, 6개월 간 AI 개발을 중지하자는 FLI 공개서한이 발표되고 같은 해 5월 샘 알트만이 미국 상원 법사위원회 청문회에 참석하여 "AI에게 규제가 필요하다."라는 발언을 한 이후, 자율적 규제에 대한 논의가 급격히 이루어지고 있다. 7월 21일 조 바이든 미국 대통령은 7개 AI 기업 대표를 백악관으로 초청하여 8개 항목에 대한 합의를 이루었는데, 이를 '8대 원칙(8 Commitments)'이라고 부른다. 이 합의안은 크게 안전성(safety), 보안성(security), 신뢰성(trust)이라는 세 꼭지를 중심으로 구성되어 있다. 주목할 부분은 사이버 보안과 내부자 보안을 중요시함과 동시에 AI 기업 내부에 레드팀을 두어 버그바운팅 작업을 반드시 수행하도록 권장하고 있다는 점이다. 이는 챗GPT의 버그바운팅 사례가 큰 영향을 준 것으로 파악된다. 앞으로는 보안 이슈로 부도를 맞는 인공지능 기업들이 생기지 않도록 하기 위한 규제로 볼 수 있다. 이 합의안에서도 인공지능이 생성한 합성 산출물에 대한 출처 표시뿐만 아니라, 장차 미국 정부 특히 상무성에서 개발할 워터마크를 콘텐츠 안에 부착할 것을 명시하고 있다. 기업이 자율적으로 워터마크를 도입하여 사용하도록 하는 것이 아니라 미국 정부가 워터마크를 개발하여 이를 제공하겠다는 내용은 앞으로 인공지능 시장을 미국 정부가 규제 중심으로 선도해 나가겠다는 의미로 해석된다. 이 8개 항목의 합의안은 미국의 20여 개 우방국가도 함께 이행할 것이라고 바이든 대통령은 밝혔는데, 여기에는 대한민국도 포함된다.

2023년 10월 30일 바이든 대통령은 '8대 원칙'을 중심으로 하는 66면의 'AI 행정명령(AI Executive Order)'을 발동했는데, 우리나라도 본격적으로 이 내용을 분석하여 규제의 수준을 미국에 맞출 필요가 생겼다. AI 행정명령은 법률과 거의 동등한 규제력을 가지고 있으며, 후임 대통령이 행정명령을 폐기하지만 않는다면 법률과 같은 구속력을 갖는다.

4) 우리나라의 AI 기본법

우리나라는 2023년 2월 14일 국회 과학기술정보방송통신위원회에서 그동안 발의하여 제출된 여야 국회의원 7명의 7개 인공지능법안을 모두 폐기하고 위원회 대표 법안으로 통합한 후 법안심사소위원회를 통과시켰다. 그 내용을 보면 '고위험 영역 인공지능'이라는 표현을 통해 EU 인공지능법 집행위원회 원안을 상당 부분 인용했음을 알 수 있는데, 다만 금지된 인공지능은 명시하지 않고 있어서 일부 시민단체들이 이에 대한 규정 추가를 요구하고 있다. 8월에 2개 의원실에서 이를 반영하여 추가 발의를 하기도 했다. 이러한 국내 인공지능법안에 따르면, 국무총리 소속으로 인공지능위원회를 설치·운영하고 그 산하에 신뢰성전문위원회를 설치하도록 명시하고 있으며 과학기술정보통신부는 3년마다 인공지능 기본계획을 수립해야 한다. 그리고 인공지능에 대한 여러 규제들은 '인증'이라는 단어에 집약하여 향후 검증과 인증을 진행하도록 규정하고 있다. 인증 관련 실무는 현재 한국정보통신기술협회(TTA)가 준비하고 있다.

그러나 우리나라의 AI 기본법은 21대 국회에서 통과되지 못했고, 이에 따라 22대 국회에서 다시 원점부터 출발해야 한다. 세계 각국은 AI 산업의 '진흥'과 '규제'라는 양날의 검을 쥔 채 AI의 여름기를 주도하기 위해 노력하고 있다. EU는 올해 3월 인공지능법을 의회에서 통과시킨 후, 5월 29일 EU 집행위원회 안에 'AI 사무국'을 설치해서 본격적인 인공지능법 운영과 지원에 돌입했다. AI 사무국은 5개의 부서로 구성되는데, AI 혁신 패키지를 통해 EU의 AI 생태계를 진흥함과 동시에 AI의 안전성을 위한 규제 준수도 담당한다. 미국도 작년 10월 말 조 바이든 대통령의 AI 행정명령(일종의 인공지능법)이 발동된 이후, AI 인력 확보를 위한 노력 및 AI 산업 진흥을 위한 구체적인 행정 실무에 돌입했다. 또한, AI 안전연구소를 NIST 산하에 설립하여 AI의 위험에 대비한 체계적이며 과학적인 대응에 착수했다. 지난 4월 중순 미국 상무부 장관은 AI 안전연구소에 다양한 CO(chief officer)들을 대폭 추가 임명하여 구체적인 역할을 주문하기도 했다. 영국도 2023년 11월 AI 안전연구소를 발족하여 이듬해 5월에는 AI 안전성에 관한 과학 보고서도 발행했다.

이러한 글로벌 흐름을 지켜보면 우리 상황은 한시가 급하다. 글로벌 경쟁력을 갖춘 국내 AI 산업 생태계를 구축하고 관련 인력을 확보하기 위한 중장기적 전략이 필요하며, 이와 더불어 AI의 위험성을 선제적으로 통제하기 위한 기술적, 제도적 조치도 마련되어야 한다. 국가적 차원에서의 진흥과 규제를 진두지휘할 조직도 필요하며 AI의 잠재적 위험을 통제할 수 있는 AI 안전연구소의 설립도 시급하다. 무엇보다도, 이러한 내용들을 충분히 담아낼 AI 관련 입법이 우선되어야 한다.

이번 22대 국회에서는 정치적 상황을 잠시 뒤로 미루고 지난 21대 국회에서 2년 넘게 계류하다 완성되지 못한 AI 기본법을 과학적 관점에서 담아내고 현장 중심의 구체적인 논의를 거쳐 진흥과 규제의 적절한 타협점을 도출해야 할 것이다.

마 맺음말

'미란다 원칙'을 만들었던 미국 연방법원의 얼 워런 대법관은 "윤리는 배가 떠다니는 바다와 같다."라고 표현했다. '윤리'라는 바다가 크고 깊고 물이 풍부할수록 '법'이라는 배는 이 바다 위를 무리 없이 부드럽게 떠다닐 수 있다. 어떤 신기술이 부작용과 역기능을 낳을 경우, 곧바로 법률로 규제하면 될 것이라고 쉽게 생각할 수도 있다. 그러나 신기술 관련 윤리가 사회 구성원들 간에 충분하게 공유되지 않은 상태에서 소수의 전문가 의견만을 기반으로 관련법을 제정할 경우, 예상치 못한 변수와 반복적인 개정이 발생하게 되어 해당 신기술은 충분히 활용되기도 전에 사회에서 소멸할 수도 있다. 인공지능의 경우 더욱 그러할 우려가 높다. 인공지능 관련 입법에 앞서 반드시 선행되어야 할 것은 사회 구성원 전체가 인공지능으로 인한 위험과 문제점들을 함께 인식하고 다양한 대안을 교류할 수 있는 공론의 장을 충분히 마련하는 것이다. 이는 인공지능 윤리의 대중화를 의미한다. 「인공지능법」이 2024년 3월 유럽의회를 통과하기 5년 전인 2019년 4월, 이미 인공지능 윤리 가이드라인이 발표되었음을 주목할 필요가 있다. 이제는 우리 차례가 되었다.

참고문헌

김명주(2017). “인공지능 윤리의 필요성과 국내외 동향”, 〈정보와 통신〉, 제34권 제10호, pp. 45-54.

김명주(2022). AI는 양심이 없다, 헤이북스.

김명주(2024). “인공지능의 잠재적 위험과 국제적 규제 동향”, 〈문명과 경계〉, 제8호, pp. 43-77.

김명주(2024). “선거 속 딥페이크, 그 실태와 윤리”, 〈관훈저널〉, 제171호, pp. 115-123.

Bostrom, N. & Yudkowsky, E.(2014). “The Ethics of Artificial Intelligence”, in Frankish, K. & Ramsey, W. M.(eds.), Cambridge Handbook of Artificial Intelligence, Cambridge University Press.

Bostrom, N.(2014). Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies, Oxford University Press.

Coeckelbergh, M.(2020). AI Ethcis, The MIT Press.

Lee, J., Le, T., Chen, J. & Lee, D.(2023). Do Language Models Plagiarize?, In Proceedings of the ACM Web Conference 2023(WWW '23), ACM.

Shumailov, I., Shumaylov, Z., Zaho, Y., Gal, Y., Papernot, N. & Anderson, R.(2023). The Curse of Recursion: Training on Generated Data Makes Models Forget, DOI:10.48550/arXiv.2305.17493.

파보세(2023). 챗GPT 1년 격돌하는 인공지능 시각! [비디오파일]. Retrieved August 31, 2024 from https://www.youtube.com/watch?v=EOrrVorkvz0

Stanford University(2019). artificial intelligence index 2019 annual report, Retrieved August 31, 2024 from https://hai.stanford.edu/sites/default/files/ai_index_2019_report.pdf.

UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization(2021). Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence, Retrieved August 31, 2024 from https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381137.

PART 3

10 소결

인공지능(AI) 기술의 발전은 이미 우리 사회 전반에 걸쳐 심대한 변화를 일으키고 있다. 생성형 인공지능과 대형 언어모델(LLM)은 산업, 의료, 금융, 교육 등 다양한 분야에서 혁신을 주도하고 있으며, 멀티모달 언어모델과 범용인공지능(AGI)은 보다 포괄적이고 강력한 기능을 제공하며 미래의 새로운 가능성을 열어주고 있다. 이러한 기술들은 기계번역, 텍스트 요약, 질의응답 시스템, 이미지 캡셔닝, 비디오 해석 등 여러 작업에서 뛰어난 성능을 발휘하며 인간의 능력을 확장시키고 있다.

앞으로 인공지능은 에너지 효율화, 탄소중립, 정밀농업 등 다양한 분야에서 지속적으로 활용될 것이며, 인공지능 기반 스마트 시티와 같은 미래형 도시의 구축에도 중요한 역할을 할 것이다. 이러한 기술 발전에 발맞추어 각국의 정부는 인공지능 기술 발전과 윤리적 문제를 균형 있게 다루는 정책을 마련하고 있다. 미국, 중국, EU 등 주요 국가들은 인공지능 기술의 선도적 위치를 유지하기 위해 인재 양성, 연구개발 투자, 산업 생태계 조성 등 다양한 정책을 추진하고 있으며, 우리나라도 이에 발맞추어 기술 발전을 위한 투자를 추진하고 있다.

생성 AI 기술의 도입은 콘텐츠 생성 능력을 통해 생산성을 크게 향상시키며, 금융, 법률, 공공 분야 등에서 실질적인 성과를 보이고 있다. 예를 들어, Bloomberg는 자체적으로 학습한 금융 특화 LLM인 BloombergGPT를 통해 내부 업무에 활용하고 있으며, 국내 4대 은행에서도 생성 AI를 도입하여 코딩 어시스턴트 등 내부 업무 생산성 향상에 기여하고 있다. 우리나라 정부는 초거대 공공 AI TF를 운영하며 공공 분야 생산성 혁신과 대국민 서비스 향상을 위해 생성 AI를 도입하고 있다. 그러나 생성 AI 기술의 발전은 일자리 변화와 윤리적 문제 등 새로운 도전을 동반한다. 생성 AI가 보유한 인간 수준에 버금가는 이해, 추론, 콘텐츠 생성 능력은 일자리 대체 우려를 불러일으키고 있다. 그러나 생성 AI의 도입은 일자리 대체로 이어지기보다는 일부 과업을 AI가 자동화하고 중요한 과업을 인간이 직접 수행하는 형태로 변화를 가져올 것으로 생각된다.

새로운 AI 에이전트 시대가 도래하면서, AI 에이전트는 우리의 일상과 업무에서 더욱 중요한 역할을 하게 될 것이다. AI 에이전트는 인간을 대신해 특정 작업이나 목표를 수행하며, 데이터 수집, 분석, 문제 해결 절차 계획 및 수립, 수행 및 평가 등을 독립적으로 해낼 수 있다. 이러한 AI 에이전트는 스마트폰, 자

동차, 가전, 로봇 등 다양한 디바이스에 탑재되어 사용자와 상호작용하며 일상생활과 업무를 도울 것이다.

기술의 발전에 따른 윤리적 문제와 사회적 책임에 대해서도 고려해야 할 것이다. 생성 AI가 인간의 창의성과 자유를 침해하지 않도록 적절한 규제와 가이드라인이 필요하다. 더불어 전 세계 문화 다양성을 지키기 위한 방법으로 소버린 AI의 중요성을 인식하고, 한국의 AI 기술과 산업 생태계 역량을 강화하며 글로벌 AI 다양성을 위한 협력을 추진해야 할 것이다. 이를 통해 우리는 생성 AI 기술의 혜택을 최대한 활용하는 동시에 기술 발전이 가져올 수 있는 부정적인 영향도 최소화할 수 있을 것이다.

미국과 중국은 각기 다른 전략과 강점을 바탕으로 AI 분야에서 선두를 달리고 있다. 미국은 실리콘 밸리의 글로벌 기업들과 DARPA를 중심으로 한 장기적이고 전략적인 투자를 통해 AI 기술 발전을 주도하고 있다. 특히, DARPA의 프로젝트를 통해 자율주행 자동차, 기계 독해 프로그램 등 다양한 분야에서 혁신적인 기술을 개발하고 이를 민간 기업에 이전함으로써 상용화에 성공하고 있다. 반면, 중국은 내수 시장 보호와 인재 유치에 기반한 기술 추격형 전략을 통해 AI 분야에서 빠르게 성장하고 있다. 천인계획과 만인계획 등의 프로그램을 통해 해외에 있는 중국계 인재를 유치하고, 자국 내 기업을 육성하여 대규모 데이터를 기반으로 AI 기술을 발전시키고 있다.

이러한 미국과 중국의 AI 전략은 우리나라에게 중요한 시사점을 제공한다.

첫째, 장기적이고 지속적인 연구 투자 및 전략적인 기획이 필수적이다. DARPA와 같은 연구 지원 기관을 통해 장기적인 연구 프로젝트를 추진하고, 이를 통해 새로운 기술을 개발하는 것이 중요하다. 둘째, 글로벌 인재 유치 및 인재 양성이 필요하다. 해외에서 유수한 연구자와 학생을 유치하고, 이들을 지원할 수 있는 환경을 조성하여 AI 분야의 인재를 양성해야 한다. 셋째, 원천기술의 상용화 및 혁신적인 기업 환경 조성이 필요하다. 실리콘 밸리의 성공 사례에서 볼 수 있듯이, 대학에서 개발된 기술과 인재를 산업계로 연결하고, 이를 통해 글로벌 경쟁력을 갖춘 기업을 육성해야 한다.

우리나라는 AI 기술 개발과 인재 양성을 통해 글로벌 경쟁에서 우위를 확보하고, 경제적 성장을 이끌어 나가야 한다. 이를 위해 장기적인 연구 투자와 전략적인 기획, 글로벌 인재 유치와 양성, 원천기술의 상용화와 혁신적인 기업 환경 조성을 위한 노력이 필요하다. 이러한 전략을 통해 우리나라는 AI 기술의 선도국가로 자리매김하고, 미래의 기술 혁신을 주도할 수 있을 것이다.

다양한 학문 분야에서 인공지능을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 물리학과 AI의 융합은 현재 진행형으로, 두 학문이 상호 보완적으로 발전해 나가고 있다. 물리학은 오랜 전통과 깊이를 자랑하는 학문이지만, AI의 급격한 발전은 물리학 연구에 새로운 도전과 기회를 제공하고 있다. AI 기술은 단순히 물리학의 방대한 데이터를 분석하고 예측하는 도구로 활용될 뿐만 아니라, 물리학의 이론과 법칙을 이해하고 새로운 발견을 가능하게 하는 잠재력을 가지고 있다. 예를 들어, 핵융합 플라즈마 제어와 같은 물리학의 난제들을 AI를 통해 더 효과적으로 연구할 수 있으며, 우주 관측 데이터 분석을 통해 암흑물질의 분포를 예측하는 기술 개발 사례에서 볼 수 있듯이, AI는 물리학이 접근하기 어려운 영역까지 탐구할 수 있는 가능성을 열어주고 있다. 이러한 AI 기술의 발전은 단순히 데이터 기반의 통계적 분석을 넘어서, 물리학적 법칙을 이해하고 이를 기반으로 새로운 현상을 예측하는 단계로 나아가고 있다. 물리학과 AI의 융합을 촉진하기 위해 물리학자들이 AI 기술을 이해하고 이를 연구에 적용하는 데 있어 능동적인 자세가 필요하며, 연구소와 대학은 이러한 융합 연구를 지원하기 위한 유연한 정책을 수립하고, 학문 간 교류를 장려해야 한다. 특히, 연구지원 정책이 학문 간 융합 연구를 인정하고 지원하는 방향으로 변화해야 한다.

인공지능은 생명과학 연구의 혁신적인 도구로 자리 잡으며 연구의 효율성과 정확성을 크게 향상시키고 있다. AI는 단백질 구조 예측, 유전체 데이터 분석, 약물-표적 상호작용 예측 등에서 뛰어난 성과를 보이며, 신약 개발 과정에서도 시간과 비용을 절감하고 있다. 예를 들어, 구글 딥마인드의 알파폴드와 워싱턴대학교의 로제타폴드는 단백질 구조 예측에서 높은 정확도를 보이며 신약 개발에 기여하고 있다. 엔비디아와 아스트라제네카의 MegaMolBART와 같은 AI 플랫폼은 신약 후보 물질 발굴 과정을 가속화하고 있다. 질병 진단 및 맞춤형 치료에서도 AI는 중요한 역할을 하고 있으며, 유방암과 피부암 진단에서 높은 정확도를 보인다. 이는 의료 인력과 장비가 부족한 지역에서도 유용하게 사용될 수 있다. AI 기반 생명과학 연구는 연구 효율성과 정확성을 높이고, 합성생물학, 유전자 편집, 바이오프린팅 등 새로운 연구 분야를 개척할 것이다. 또한, AI는 자원 소비를 줄이고 환경 보호와 생태계 유지에 기여할 것이다.

그러나 생명과학 연구에서의 AI 도입에 대한 윤리적 및 사회적 고려사항도 중요하다. AI의 의사결정 과정의 투명성을 확보하고, 개인 데이터의 보호와 윤리적 사용을 보장해야 한다. 연구 데이터의 익명성을 보장하고, 데이터 수집 목적과 사용 방법을 명확히 설명하며, 데이터 제공자의 동의를 받아야 한다. 또한, AI 기술의 혜택이 공정하게 분배될 수 있도록 정책적, 제도적 지원이 필요하다. AI는 생명과학 연구의 패러다임을 혁신적으로 변화시키고 있으며, 그 역할은 앞으로도 확대될 것이다. AI 기술을 효과적으로 활용하여 생명과학 연구의 새로운 가능성을 탐구하고, 인류의 건강과 지구 환경 보호에 기여할 수 있는 방향으로 나아가야 한다. 이를 위해 지속적인 기술 발전과 함께 윤리적 고려와 사회적 책임을 병행하여 AI 기술이 긍정적인 영향을 미칠 수 있도록 해야 한다.

AI와 다른 전공 영역의 융합은 기술 발전을 넘어 학문적 사고와 연구 방법론의 변화를 요구한다. 다른 전공 분야의 학자들은 AI를 단순한 도구로 보는 것을 넘어, AI와 협력하여 새로운 발견을 이루어내는 파트너로 인식해야 한다. 또한, AI 기술이 학문의 새로운 이론과 현상 발견에 기여할 수 있음을 인식하고 이에 기여하는 역할을 해야 한다. 이러한 변화가 이루어질 때, 다양한 학문 분야와 AI는 더 큰 시너지를 발휘하며 함께 성장할 수 있을 것이다. AI와 타 학문 분야의 융합은 새로운 시대를 여는 열쇠가 될 것이며, 이를 통해 우리는 더 나은 미래를 만들어 나갈 수 있을 것이다.

AI의 공정성과 윤리는 현대 기술 발전의 중요한 과제이다. AI 시스템의 편향 문제는 특정 그룹에게 불공정한 결과를 초래할 수 있으며, 이는 사회적 신뢰와 공정성에 큰 영향을 미친다. 이를 해결하기 위해 다양한 공정성 척도와 데이터셋을 활용한 평가 방법이 개발되고, 전처리, 중처리, 후처리 접근 방식을 통해 편향을 제거하는 기술도 발전하고 있다. 대형언어모델의 편향을 줄이기 위해 데이터 증강, 프롬프트 튜닝, 모형 구조 변경, 모형 편집, 결과 수정 등의 방법을 사용하여 공정성을 높이는 노력이 계속되고 있다. 기술적 접근 외에도 주요국들은 AI의 공정성을 보장하기 위한 정책과 연구를 활발히 추진하며, 이를 통해 AI가 사회에 긍정적인 영향을 미치고 윤리적 기준을 준수할 수 있도록 하고 있다.

AI의 공정성을 보장하기 위한 연구와 정책은 지속적으로 발전할 것이다. 연구자들은 정교한 편향제거 알고리즘을 개발하고, 예측 정확도를 유지하면서도 공정성을 높이는 방향으로 나아가야 한다. 국제적인 협력을 통해 공정성 가이드라인과 표준을 마련하고, 이를 준수하도록 하는 것이 중요하다. 이러한 노력은 AI 기술의 지속 가능성을 보장하고, 사회 구성원이 공평하게 혜택을 누리도록 한다. 공정성과 윤리는 기술적 문제가 아닌 사회적 책임이자 필수 과제로 자리 잡고 있으며, 사회적 인식도 점차 높아지고 있다. 기업과 연구자들은 공정성을 최우선 과제로 삼고, 대학과 기업은 관련 교육 프로그램을, 정부와 민간단체는 공정성에 대한 공공의 인식을 높이기 위한 홍보 활동을 강화해야 한다.

AI 공정성 보장은 사회와 경제에 긍정적인 영향을 미치며, 의료, 교육, 금융 등 다양한 분야에서 공평한 기회를 제공한다. 사회와 민간의 협력을 통해 AI 공정성을 높이는 노력이 필요하며, 시민들이 참여할 수 있는 플랫폼을 마련해 다양한 목소리를 반영해야 한다. 기업, 정부, 학계, 시민단체 등 다양한 이해관계자들이 협력하여 AI의 공정성을 높이기 위한 공동의 노력을 기울여야 할 시점이다.

AI는 현대 사회에서 경제 성장, 교육 기회 확대, 건강 증진 등 다양한 분야에서 혁신의 핵심 동력으로 작용하고 있다. 그러나 AI의 발전에 따른 윤리적 문제도 발생하며, 이를 해결하기 위한 윤리적 원칙의 준수가 필수적이다. 주요 윤리 원칙으로는 통제성과 안전성, 투명성과 설명 가능성, 공정성, 프라이버시 보호, 책임성과 책무성, 표절과 저작권 침해 방지, 진짜와 가짜 구분, 다양성 등이 있다. 특히 AI의 자율성으로 인한 통제 문제와 대량 데이터 학습으로 인한 편향 문제는 중요한 윤리적 쟁점이다. EU의 「인공지능법」, 미국의 AI 행정명령, 우리나라의 AI 기본법 등은 AI의 공정성과 윤리를 보장하기 위한 정책적 노력의 일환이다. 이러한 규제와 정책은 AI가 사회에 긍정적인 영향을 미칠 수 있도록 하는 중요한 역할을 하며, 글로벌 동향을 참고하여 적절한 AI 윤리와 규제 방안을 마련하는 것이 필요하다.

딥러닝 기반의 AI 기술은 최근 획기적인 발전을 이루며 다양한 분야에서 혁신을 주도하고 있다. 특히 초거대 언어모델의 등장과 멀티모달 AI, 임바디드 AI 등의 기술 발전은 AGI의 도래를 예고하고 있으며, 이는 삶과 산업 전반에 큰 변화를 가져올 것이다. 그러나 이러한 발전은 일자리 변화와 윤리적 문제 등 새로운 도전도 동반한다. 따라서 각국 정부와 기업은 AI 기술의 활용과 규제를 균형 있게 조절하며, 미래를 대비한 정책을 마련하고 실행해야 한다.

AI 기술의 응용 경쟁력 확보는 매우 중요하다. 제조, 의료, 금융, 모빌리티, 엔터테인먼트, 물류, 서비스, 국방 등 다양한 분야에서 AI를 활용해 생산성을 높이고, 혁신적인 제품과 서비스를 개발해야 한다. 이를 위해 AI 응용 인재 양성과 창의적인 비즈니스 모델을 가진 스타트업의 육성이 필요하다. AI 기술의 발전을 최대한 활용하여 더 나은 미래를 만들기 위해 기술과 인간이 조화롭게 공존할 방안을 모색해야 한다. AI 혁명에 대비하여 적극적인 대응과 준비를 갖춘다면, 이를 통해 대한민국은 AI 기반 혁신 산업 생태계를 구축하고 글로벌 경쟁에서 우위를 점할 수 있을 것이다.

AI 기술은 삶을 편리하고 풍요롭게 만드는 동시에 윤리적 문제와 사회적 영향 등 면밀한 검토와 대비를 요하는 과제를 동반하는데, AI 개발과 사용에 있어 윤리적 원칙 준수가 필수적임을 양지해야 한다. 통제성과 안전성, 투명성과 설명 가능성, 공정성, 프라이버시 보호, 책임성과 책무성, 표절과 저작권 침해 방지, 진짜와 가짜 구분, 다양성 등의 윤리적 원칙을 고려해 AI를 개발하고 사용하는 노력이 필요하다. 이러한 노력이 지속되어야 AI는 인류에게 더 나은 미래를 제공할 수 있다.

AI의 공정성을 보장하는 노력은 기술적 문제 해결을 넘어 사회적 신뢰와 윤리를 지키는 데 중요한 역할을 하므로, 다양한 이해관계자들이 협력해 AI의 공정성을 높이기 위한 공동의 노력을 기울여야 한다. AI 공정성과 윤리에 대한 사회적 인식과 공감대 형성을 통해 AI 기술이 사회적 신뢰를 얻고, 인류 전체에 혜택을 줄 수 있도록 하는 것이 중요하다.

인공지능 기술은 우리의 미래를 밝고 혁신적으로 만들 잠재력을 가지고 있다. 이를 실현하기 위해 지속적인 연구와 발전, 공정성, 윤리적 고민과 사회적 책임을 함께 고려해야 한다. AI 기술을 최대한 활용해 더 나은 미래를 만드는 데 힘쓰고, AI가 우리의 삶을 더욱 편리하고 풍요롭게 만들도록 기술과 인간이 조화롭게 공존할 방안을 모색해야 한다.

PART

4

초고령사회에 대한 대비

참여 집필진

서영준 서울대학교 약학대학 명예교수
박상철 전남대학교 의과대학 연구석좌교수
정해영 부산대학교 약학대학 석학교수
묵인희 서울대학교 의과대학 교수
고상백 연세대학교 원주의과대학 교수
송원경 국립재활원 재활보조기술연구과장
조형희 연세대학교 기계공학부 교수
한소원 서울대학교 심리학과 교수

미래 30년을 대비하는
과학기술전략

한림연구보고서 155

THE KOREAN ACADEMY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

PART 4

초고령사회에 대한 대비

158 **1 서론**

161 **2 삶의 질 향상은 초고령사회 과학기술의 핵심목표**
161 가. 들어가는 말
161 나. 시대적 변화와 백세인의 교훈
164 다. 장수의 패러독스와 코로나19의 교훈
166 라. 고령사회의 과학기술
169 마. 맺음말

171 **3 초고령사회를 대비한 건강노화 전략과 전망**
171 가. 들어가는 말
172 나. 4차 산업혁명시대의 다중오믹스 및 AI 기술의 건강노화 연구 활용
172 다. 노화 유발인자와 인체 방어기전 기반 건강노화 연구 동향과 전망
175 라. 세포노화와 세놀리틱스 연구 현황과 한계
176 마. 역노화 연구 현황과 전망
176 바. 건강노화 전략과 전망
181 사. 맺음말

184 **4 초고령사회에 대비한 치매의 과학기술현황 및 발전 방향**
184 가. 들어가는 말
186 나. 알츠하이머성 치매 치료제 관련 기술 동향
190 다. 알츠하이머병 조기진단의 필요성 및 방법
195 라. 국외 주요기관 정책 동향
196 마. 국가 차원에서의 치매 대비를 위한 정책 및 제도적 지원
198 바. 맺음말

200 **5 초고령사회를 대비한 암관리 정책**
200 가. 들어가는 말
200 나. 우리나라 암발생률 및 사망률의 변화 추이
202 다. 다단계 발암기전의 과학적 이해
203 라. 암치료 및 항암제 개발의 현황 및 한계
204 마. 암세포의 특성 및 암발생에 대한 새로운 시각-진화론적 접근
205 바. 암은 예방 가능한가?
206 사. 주요 선진국의 암관리 정책 분석
209 아. 우리나라 암관리 현황 및 정책적 대비
210 자. 초고령사회 통합적 암관리를 위한 새로운 접근법
211 차. 맺음말

213 **6 초고령사회와 디지털헬스**
213 가. 들어가는 말
215 나. 디지털헬스의 정책 및 기술현황
217 다. 디지털헬스의 내용과 역할
221 라. 맺음말

223 **7 초고령사회 대응을 위한 돌봄로봇 기술**
223 가. 들어가는 말
224 나. 돌봄로봇 기술의 발전 전망
227 다. 주요국의 돌봄로봇 정책 동향
229 라. 국내 현황 및 정책 과제
231 마. 맺음말

234 **8 초고령사회에 필요한 미래 모빌리티의 발전**
234 가. 들어가는 말
234 나. 웨어러블 로봇의 발달과 활용
238 다. 개인 이송 기술의 발달
241 라. AI 및 자율주행과 모빌리티 기술의 연계 및 발전 방향
242 마. 초고령사회의 모빌리티 향상 및 활용성을 높이기 위한 정책 제언
244 바. 맺음말

246 **9 초고령사회와 능동적 노화: 인지적, 사회적 관점**
246 가. 들어가는 말
247 나. 노화의 새로운 패러다임
248 다. 신체 움직임과 뇌인지 기능
250 라. 모빌리티와 사회적 연결
251 마. 걷기 좋은 도시와 자연이 있는 환경
253 바. 모두를 위한 도시 모델과 정책 제언
254 사. 맺음말

257 **10 소결**

PART 4

1 서론

인간의 수명이 길어지면서 전 세계적으로 고령화가 빠르게 진행되고 있다. 유엔 기준에 따르면, 전체 인구에서 65세 이상 연령층이 차지하는 비율이 7% 이상인 사회를 고령화 사회(aging society), 14% 이상인 사회를 고령사회(aged society), 20% 이상이면 초고령사회(super-aged society) 또는 후기고령사회(post-aged society)로 분류하고 있다. 대한민국은 2017년 고령사회에 진입하였고 65세 이상 인구 비중이 2024년 7월 기준 19.5%를 기록했다. 이러한 추세대로면 우리나라는 2024년 말 또는 2025년 초에 초고령사회가 될 것으로 예상된다. 문제는 고령사회에서 초고령사회로 진입하는 속도가 너무 빠르다는 점이다. 고령사회에서 초고령사회로 도달되기까지 영국이 50년, 미국이 15년, 일본이 10년 걸린 반면, 우리나라는 7년 만에 도달할 것으로 전망되고 있기 때문이다. 여기에는 여러 이유가 있겠지만 의료기술의 발달 등으로 인한 평균수명의 증가와 출산율 저하 등을 들 수 있다.



초고령화로 인한 노동인구 감소와 이로 인한 경제활동 위축은 국가의 경제성장에도 악영향을 미칠 수 있다. 우리나라 고령층 인구의 상대적 빈곤율은 경제협력개발기구(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD) 15개 주요국 중 가장 높은 수준으로 대책 마련이 시급하다. 초고령화 사회에서는 의료비 증가, 복지비용 부담 등도 심각해지며, 사회 전반의 활력 저하와 세대 간 갈등 심화도 우려된다.

초고령시대에는 고령자의 신체적, 정신적, 사회적 웰빙(well-being) 상태를 유지함으로써 개인 삶의 질 향상을 위한 노력이 필요하다. 이를 통해 노년기 삶의 질 제고와 의료비 절감, 나아가 건강한 사회 발전에 기여할 수 있다. 따라서 노화의 요인과 신체 반응에 대한 이해를 바탕으로 효과적인 노화조절 방안을 모색하는 것이 매우 중요하다. 고령층의 대표적 퇴행성 질환인 치매와 암은 고령화 사회가 될수록 더 많이 발생할 것으로 예측된다. 이로 인한 사회·경제적 부담을 경감시키기 위해서는 보다 효율적이고 체계적인 국가 차원의 정책 수립 및 사업 수행이 절실히 요구된다.

고령인구의 증가와 함께 노인들에 대한 돌봄 수요 역시 증가할 것이다. 따라서 변화하는 인구구조에 맞게 디지털헬스 등 과학기술을 통한 사회구조 인프라를 삶의 질 차원에서 준비하는 것 또한 매우 중요하다. 그러나 저출산과 고령화로 인한 생산가능인구의 감소는 돌봄 인력 부족 문제를 더욱 심화시키며 돌봄서비스의 질적 저하로 이어질 수 있는 심각한 사회적 문제로 대두되고 있다. 이러한 맥락에서 돌봄로봇 기술은 인력 부족 문제를 완화하고 돌봄서비스의 질을 향상시킬 수 있는 혁신적인 해결책으로 주목받고 있다. 초고령사회에서 발생할 수 있는 다양한 사회적 문제들은 주로 신체의 노화로 인해 움직임에 제약이 생김으로써 발생한다. 이를 해결하기 위한 방안으로 모빌리티(mobility) 개발 및 보급에 정책적 지원이 필요하다.

기대수명이 급격히 늘어가면서 노년기가 길어지고 있는 것에 대한 논의도 활발하게 이루어지고 있다. 건강하게 장수하는 것은 인류의 숙원 중 하나였다. 그러나 준비되지 않은 길어진 인생을 어떻게 살아야 할지에 대한 심리적 부담은 초고령사회를 맞이하며 겪게 될 또 하나의 문제로 대두되고 있다.

본 보고서에서는 초고령화 사회의 심각성에 대해 살펴보고 이를 해결하기 위한 방안을 모색해 보고자 한다. 30년 뒤의 초고령사회에 필요한 삶의 질 향상을 위한 과학기술로 국가가 우선적으로 추진할 주제를 다음과 같이 선정하여 정리하였다.

건강노화 확보 기술

고령사회에서 제기되는 제반 문제점을 과학기술적으로 해결하기 위해서는 노화현상 자체를 제어할 수 있는 방안의 강구가 최우선이다. 비가역적 불가피한 현상으로 간주되어 왔던 생물학적 노화현상을 제어하거나 역노화를 유도할 수 있다는 가능성이 제안되면서 노화를 본질적으로 제어하고 건강한 기능적 장수를 유지할 수 있다는 기대감이 커지고 있다.

치매 극복 기술

노인의 삶의 질에 절대적 영향을 미치는 인지능의 장애는 고령사회의 핵심적 과제이다. 인지기능 장애의 대표적인 질환인 치매는 연령에 따라 급증하고 있기 때문에 초고령화가 급속도로 진행되고 있는 우리나라의 상황에서 이를 예방하고 조기 발견하여 진행을 억제하는 노력은 고령사회 대책 중에서 가장 중요한 의료적 요구사안 중 하나다.

암 극복 기술

의료적인 측면에서 사망률에 결정적인 영향을 미치는 암은 고령사회 대책 중에서 가장 중요한 의료적 요구사안 중 하나다. 특히 한국 백세인의 유전적 패턴에서 서구와는 달리 심혈관 질환보다 암과 유관한 유전형이 보다 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀졌다. 그러므로 암을 예방하기 위한 식생활을 비롯한 생활습관 개선에 전방위적 노력을 기울여야 한다.

디지털헬스 기술

노화에 따라 저하되는 생체기능의 보완은 삶의 질을 유지하기 위해 필수적이다. 따라서 생체 각 조직 및 기관의 기능을 보조하거나 보강하고 대체할 수 있는 도구나 장치가 개발되어야 한다. 이러한 측면에서 디지털헬스 기술의 발전은 원격의료, 웨어러블 디바이스, 스마트 약 복용 관리 시스템 등의 개발을 앞당겨 고령인의 삶의 질 개선에 기여할 수 있다.

돌봄 기술

고령사회로 진입하면서 직면하는 또 다른 시급한 문제는 고령인의 일상생활을 돌봐 줄 수 있는 방안의 개발이다. 고령인의 증가는 인적 돌봄의 한계를 초래하기 때문에 과학기술의 발전을 통한 문제해결 방안이 필요하다. 이에 따라 환경 변화 적응을 위한 소셜 로봇, 온라인 커뮤니티의 도입과 안전을 위한 스마트홈 시스템, 낙상 예방 기술, 활동성 증진을 위한 기술개발 등이 추진되어야 한다.

이동성 증진 기술

노인의 삶의 질에 영향을 미치는 결정적인 요인 중의 하나는 이동성이다. 이동의 편리는 보다 많은 사람과 세상과의 접촉을 가능하게 해주어 일상생활의 폭을 넓혀주며 삶의 질을 고양한다. 따라서 고령인의 이동성과 편의성을 증진하기 위한 자율주행차, 모빌리티 보조기기 등의 개발이 중요하다.

사회연계 확대 기술

노인의 삶의 질에 중요한 또 하나의 요인은 사회적 연계이다. 더 많은 사람과 보다 더 편하게 접촉하게 되면 고립을 벗어나 환경에 적응할 수 있다. 그 결과 운동성이 높아지고 생활이 편리해지면서 이웃과의 접촉이 증진될 수 있다. 이처럼 고령인의 거주환경을 확보할 수 있는 과학기술 방안이 개발되어야 한다.

PART 4

2

삶의 질 향상은 초고령사회 과학기술의 핵심목표

박 상 철

전남대학교 의과대학 연구석좌교수

가 들어가는 말

전 지구적으로 인구가 초고령화 되어가면서 미증유의 새로운 문제점들이 등장하고 있다. 이에 따라 정치·경제·사회적인 측면에서의 대응도 필요하지만, 과학기술이 기여해야 할 부분이 더욱 급속히 확대되어가고 있다. 인류가 처한 모든 난제들을 결국은 과학기술이 해결해 내었기 때문이다. 식량부족 해결, 각종 전염병 통제 등은 과학기술이 인류에게 제공한 대표적인 해법이다. 최근 코로나19 사태도 예외가 아니다. 신속한 백신 개발이 인류를 위기에서 구출하였다. Life 3.0시대로 진입하면서 노화의 개념이 근원적으로 달라지며 과학기술이 인간의 삶에 미치는 영향이 더욱 심대해지고 있다. 그중에서도 우리나라는 급속하게 세계 최장수국으로 진입하고 있기 때문에 고령사회에 대한 대응이 더욱 절실하게 요구되고 있다.

따라서 빠르게 변화되고 있는 고령화 실태를 알아보고 미래 초고령사회를 가늠하기 위해서 우리나라 백세인의 건강과 행복 상태가 지난 20년 동안 어떻게 변화하고 있는지 그 추이를 검토해 보면서 미래지향적인 해법을 과학기술적 측면에서 우선적으로 찾고자 한다.

나 시대적 변화와 백세인의 교훈

1) Life 3.0시대의 도래

최근 맥스 테그마크(Max Tegmark)는 생명체를 생성 주체에 따라 Life 1.0, Life 2.0 그리고 Life 3.0 version으로 분류했다(Tegmakr, 2018). Life 1.0은 생명체의 하드웨어나 소프트웨어가 수억 년의 세월에 걸쳐 진화라는 방법으로 결정된 생명체를 말하며, Life 2.0의 경우 하드웨어는 진화에 의하여 결정되지만 소프트웨어는 설계에 의하여 변형될 수 있는 인간과 같은 인지능력을 가진 생명체를 의미한다. 교육이나 훈련에 의하여 인간의 능력을 개선할 수 있음을 특별하게 부각한 것으로 인간과 동물의 차이를 두드러지게 하였다. 한편, Life 3.0은 생명체의 소프트웨어뿐 아니라 하드웨어까지 설계에 의하여 변형시킬 수 있

는 미래 후생 인류를 지목하고 있다. 인간의 신체구조인 간, 심장, 근육, 관절, 치아, 신장 등의 기능적 생리기관뿐만 아니라 신경이나 뇌와 같은 생체 통합 및 인지 제어 기능까지 대체할 수 있는 Life 3.0시대의 도래를 예측하였는데 이미 상당 부분 현실화되고 있다. 이에 따라 노화란 개념은 종래의 제한된 시간 종속적 개념을 벗어나 이제는 보다 확대된 시공간적 개념으로 새롭게 해석할 수 있게 되었다. 전통적으로 노화는 불가피한 피동적 변화로 인정되어 비가역적 현상으로 인지되어 왔다. 그러나 근래 생명과학의 발전 과정에서 노화현상이 자발적이고 능동적 변화로서 가역적 현상이라는 인식이 대두되면서 고령사회에 대한 대응방안에도 근본적인 변화를 요구하고 있다. 이러한 개념의 발전은 인간의 수명연장뿐 아니라 생체기능의 확대와 보완까지 예고하고 있다. 이에 따라 개인적 노화에 대하여 보다 적극적인 대응을 함으로써 개인의 능력을 극대화하고 다가오는 초고령사회에 대해서는 보다 근원적인 의료적·사회적·환경적 개혁이 필요하다.

2) 한국의 백세인 지난 20년의 변화

21세기에 들어서서 인간의 수명이 크게 증가하고 백세인 숫자도 급증하고 있으며 장수지역도 급속하게 확대되고 있다. 이와 더불어 장수인의 생활습관이나 지역사회도 크게 변화하고 있다. 백세인은 그들의 긴 수명만큼 오래 살아오면서 세상의 풍파를 겪어 왔기 때문에 이들의 건강 상태와 삶의 질은 총체적인 사회 발전의 누적적 지표가 될 수 있다. 이러한 관점에서 우리나라 백세인의 건강과 행복의 지표인 삶의 질이 지난 20년 동안 어떠한 변화를 이루었는가를 비교하는 일은 초고령사회에서 맞이할 변화를 예측함에 있어서 도움이 될 것으로 본다(박광성 외, 2022; Park, 2016). 우선 우리나라 장수지역인 구례, 곡성, 순창, 담양 지역의 2001년도와 2018년도의 조사 결과를 비교해 보면 백세인의 신체·심리·사회적 측면에서 엄청난 변화가 초래되었다. 백세인의 남녀 비율이 과거 1:12이었으나 현재는 1:5로 크게 줄어들었으며 지역 간의 격차도 감소하였다. 종래 여성 위주 장수패턴이나 특정 지역 중심의 장수패턴이 완화되면서 우리나라가 이제는 남녀 또는 지역에 상관없이 보편적인 장수의 시대에 진입하고 있음을 보여주고 있다. 또한 백세인의 한글 문해율은 13%에서 28%로 개선되었고 초등학교 수준의 정규교육 수혜자가 0%에서 20%로 증가하여 문화적 수준이 높아졌다. 생존하고 있는 자녀의 비율도 높아지고 생활습관 개선이 이루어져 현재 음주율이나 흡연율이 크게 낮아졌으며, 과거 병력에서 생활습관성 질환 이환율이 낮아진 현상을 보였다. 이러한 결과는 백세인의 건강 상태가 지난 20년 동안 유의미하게 개선되고 있음을 보여준다. 한편 백세인의 사회적 특성은 지난 20년 동안 현저한 차이를 보이고 있다. 무엇보다도 백세인의 가족 동거율이 90%에서 50%로 급감하였고, 백세인의 독거율이 10%에서 30%로 급증하였다. 더 이상 전통적인 다세대 가족의 형태가 아닌 가족의 해체가 급속하게 진행되었음을 알 수 있다. 또한 백세인의 활동 범위를 평가하는 이동성이 36%에서 45%로 증가하였다. 이러한 결과는 백세인의 독립적 생활이 증가하고 대외활동이 증진하였음을 나타내고 있다. 중요한 사실은 이러한 변화를 겪은 백세인이 느끼는 주관적 생활만족도는 30%에서 50%로 크게 개선되었다는 것이다. 결론적으로 지난 20년 동안 한국 백세인의 건강 상태뿐 아니라 행복 상태가 개선되어 삶의 질이 높아진 긍정적 변화가 이루어지고 있음을 보여주고 있다. 한편 유전적 측면에서는 미국이나 유럽의 백세인에게서 밝혀진 장수 관련 유전자들이 한국의 백세인에서는 유의미한 차이를 나타내지 않았다. 서구 백세인에게서 보이는 ApoE4(Apolipoprotein E4), CETP(Cholesteryl Ester Transfer Protein), MTTP(Microsomal Triglyceride Transfer Protein) 등과 같은 지방대사와 관련하여 심혈관 질환의 원인이 되는 유전자는 한국 백세인에서는 유의하게 나타나지 않았다. 반면 한국의 백세인에게서는 MLH1(MutL Homolog 1), Brca1(Breast Cancer 1)과 같은 암유전자들이 장수와 연관하여 유의미하게 나타났다. 이러한 차이는 장수에 미치는 결정요인이 서구의 경우 심혈관 질환이지만 한국의 경우는 암이 중요함을 시사하고 있으며 전통적인 식습관이 미치는 영향의 차이를 보여주고 있다(Choi et al., 2003; Kim et al., 2006; Park et al., 2009).

3) 한국이 최장수국으로 부상

최근 영국 임페리얼 대학교의 마지드 에자티(Majid Ezzati)팀은 선진국의 국가별 기대수명 변화를 예측한 논문에서 21가지의 다양한 예측 모델을 가용하여 1980년부터 2015년까지의 통계를 바탕으로 선진 35개국의 자료를 분석하였고 미래 수명패턴 추세를 보고하였다. 그 결과, 우리나라가 2030년에 세계 최장수국이 된다는 놀라운 예측을 하였다. 특히 우리나라 여성의 평균수명이 인류 역사 최초로 90세를 초과하고, 남성 평균수명도 84세를 초과하여 남녀 모두 세계 최장수국가가 될 것으로 예고하였다. 대한민국이 세계 최장수국이 되는 요인으로 경제적 개선과 교육을 포함한 사회안전망의 강화 등을 꼽았으며, 초등학교부터의 급식과 영양교육을 통한 국민 영양상태 개선, 첨단의료기술의 보급과 의료혜택 적용의 불평등을 해소한 건강보험의 역할을 강조하였다(Kontis et al., 2017). 이러한 연구보고는 우리나라의 고령화 속도가 빠를 뿐만 아니라 세계 최고 수준의 장수국가가 될 것임을 예고하고 있어 이에 대한 대응이 시급함을 지적하고 있다.

4) 우리나라의 최장수국 진입과 고령화 대책의 시급성

우리나라의 급속한 고령화 및 초고령사회로의 진입은 무엇보다도 이에 대한 대응방안을 철저하게 그리고 신속하게 수립하여야 함을 의미하고 있다. 지난 20년 동안 한국 백세인의 건강 상태와 생활만족도가 개선되고 있음은 현재까지 우리나라가 노인부양과 보호에 대한 조치를 철저하게 하고 사회안전망을 확대하며 생활의 편리와 의료적 보험체계를 완비하는 등 고령사회에 적절한 대응을 하였다고 인정할 수 있다. 그러나 앞으로 지속적으로 심화될 고령화에 대한 대책도 철저하게 수립하여야 한다. 만일 적절한 대응을 하지 않으면 사회적으로 큰 혼란이 초래될 것은 자명하다.

다 장수의 패러독스와 코로나19의 교훈

인구의 고령화에 따른 장수도의 증가는 개인적 차원에서 볼 때 수명연장이라는 혜택이라 할 수 있지만 공적으로는 복잡하고 다양한 사회적 문제를 야기하고 있다. 더욱 최근의 코로나19 위기는 연령차별적으로 높은 노인 치사율을 보여 고령사회의 문제점을 명확하게 부각하였다. 반면 코로나19 사태는 초고령사회에서 요구되는 개선의 방향을 강력하게 제시해주었을 뿐 아니라 과학기술발전이 궁극적이고 시급한 초고령사회의 해법임을 시사해주었다.

1) 장수패러독스(Longevity Paradox)의 극복

인간의 수명증가는 개인적으로는 행복의 근원으로 추구되어 왔지만 사회적 측면에서는 다양한 문제점을 야기하기 때문에 이에 대한 대책을 심각하게 고려하여야 한다. 초고령사회로 진입하면서 초래되는 문제점들을 장수패러독스라 정의한다. 초고령사회로 진입하는 현 인류에게 장수패러독스를 극복하는 일은 가장 엄중한 시대적 사명이다. 장수패러독스를 검토하고 이를 해결하기 위한 사회 전방위적인 노력이 필요하며, 그중에서도 고령인의 신체적 역량을 극대화하기 위한 근원적이고 확실한 해법은 과학기술의 발전에서 찾을 수 있다(박상철, 2010).

경제적 측면의 의료비 급증과 복지시스템 부담 증가

고령화가 진행되면서 장기간의 치료가 요구되고 생체기능 저하와 생활지원을 필요로 하는 각종 퇴행성 질환이 증가함에 따라 의료비와 사회적 경비가 급증하게 되어 결국 고비용장수사회로 진입할 수밖에 없다. 따라서 이러한 퇴행성 질환을 예방하거나 생체기능을 보완할 수 있는 효율적이고 저비용의 의공학적 및 시설적 지원이 필요하다.

사회적 측면의 인간관계 변조와 세대갈등

초고령사회가 되면서 기존 질서와 달리 부부, 부자 관계뿐 아니라 친구와 이웃과의 관계가 달라질 수밖에 없다. 노인의 사회적 고립이 촉진되고 노노(老老)케어가 증대하면서 세대 간의 갈등과 재정적 문제 또한 발생한다. 이러한 현상은 결국 사회적 질서와 윤리를 붕괴하기 때문에 이에 대한 사회적 합의가 필요하며 문제를 해결하기 위한 과학기술 발전이 시급하다(박상철, 2010).

생물학적 측면의 출산율 격감과 인구구조 변화

초고령사회의 결정적인 문제는 출산율 격감이다. 수명이 길어지면 출산이 저하된다는 것은 생물학의 기본이다. 수명이 긴 동물은 자식을 적게 낳으며, 수명이 짧을수록 번식을 활발하게 한다. 인간도 마찬가지로 전쟁이나 위기 후에는 출산율이 높다가 사회가 안정되고 수명이 길어지면 출산율이 저하되고 있다(Cheng et al., 2022). 출산율 저하는 생산가능인구 저하와 사회 동력 상실로 이어진다. 그리고 인구구조의 변화를 초래하여 미래사회의 발전을 저해하기 마련이다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 과학기술적 측면에서 대책을 심각하게 고려하여야 한다.

2) 코로나19 사태의 교훈

코로나19 사태는 지난 3년 동안 전 세계를 뒤흔든 공포의 위기였다. 높은 노인 치사율과 양로 및 요양시설과 같은 집단시설에서의 높은 치사율은 다가오는 초고령사회에 엄중한 경종을 울렸다. 코로나19 사태를 극복하는 과정에서 무엇보다도 백신과 치료제 개발을 위한 과학기술의 중요성이 크게 부각되었다.

높은 고령 선택적 치사율

코로나19에 의한 치사율이 연령에 따라 엄청난 차이를 보였다. 40대까지는 치사율이 0.02~0.2%에 불과했지만 50대부터 급증하기 시작하여 80대에는 20%에 이르며 연령차별 및 고령자 집중치사율을 보였다. 종래 다른 팬데믹의 경우 위험집단은 영유아와 노인층이었지만 코로나19는 노인층만이 위험집단으로 등장하여 고령사회에 대한 경고를 울렸다. 그러나 백세인의 경우는 치사율이 의외로 5%에 불과하여 이러한 요인이 단순히 연령 때문만은 아님을 분명하게 보였다. 이는 코로나19 치사율의 근원이 절대적으로 연령 의존적이지는 않으며 이외의 변수가 중요함을 보였다(박상철, 2021).

생활습관과 주거환경의 중요성

코로나19로 인한 연령별 치사율의 차이에서 가장 크게 부각된 요인은 각종 기저질환의 여부였다. 당뇨병, 고혈압, 비만, 심혈관 질환 및 암과 같은 질환 여부가 결정적 요인으로 제기되었다. 한편 일반적인 고령인과 달리 백세인의 경우는 당뇨나 고혈압, 비만, 암 이환율이 낮았기 때문에 기저질환 예방을 위한 생활습관 개선의 중요성이 우선 부각되었다. 뿐만 아니라 코로나19 사태 초기에 치사율이 높았던 공간이 양로원이나 요양원과 같은 집단요양시설이었다는 점은 밀집, 밀폐, 밀접의 문제점을 가진 기존의 모든 주거 및 생활환경에 대한 개혁을 요구하고 있다. 따라서 고령인의 주거환경에 보다 실용적이며 건강 안전이 보장되는 새로운 개혁이 요구되면서 향거장수(鄕居長壽), 향거치유(鄕居治癒) 및 케어팜(Care Farm) 같은 제도의 도입이 요구되고 있다(박상철, 2021).

과학기술 발전의 시급성

코로나19 위기에서 전 세계가 초조하게 기다리며 주목하고 있었던 해법은 바로 백신과 치료제의 개발이었다. 각 선진국뿐 아니라, 국제적으로는 전염병대비혁신연합(Coalition for Epidemic Preparedness Innovations, CEPI), 세계백신면역연합(Global Alliance for Vaccines and Immunization, GAVI), 국제백신연구소

(International Vaccine Institute, IVI) 등이 총동원되어 백신 및 치료제 개발에 총력을 기울였다. 그 결과 기존의 단백질 위주의 백신에서 DNA 백신, RNA 백신이 동시다발적으로 개발되었고 그중 승자는 결국 mRNA 백신이 되었다. mRNA 백신은 국제적 긴급사태에서 임시로 허가받았지만, 효과가 입증되었으며 이를 계기로 mRNA technology가 정립되어 미래 생명과학과 의료 발달에 큰 전기가 마련되었다(박상철, 2021). 코로나19 사태는 세계적인 위기를 해결하기 위해 복잡하고 예민한 정치적·사회적 수단보다도 과학기술의 개발이 가장 근본적이며 확실한 수단임을 명확하게 보여주었다. 코로나19 사태는 인류에게 다시금 과학기술의 중요성을 알리는 전화위복의 기회를 가져왔다.

사회적 위기의 미래지향적 해법

인구의 고령화 측면에서 지난 20년 동안 엄청난 변화가 이루어졌지만 앞으로 30년 뒤에는 과거 20년의 변화보다 더욱 심대한 변화가 초래될 것이다. 특히 세계 최장수국가를 내다보고 있는 우리나라는 초고령사회에 대한 대책을 진지하게 마련하여야 한다. 한국 백세인 연구는 지난 20년 동안에 백세인의 건강과 행복이 개선되었음을 보여주고 있다. 그 이유로는 경제적 발전에 따른 환경개선, 사회 안전 확보, 건강보험 확대에 의한 의료혜택, 식생활, 운동 생활화를 통한 생활습관 개선 및 이동성 증가에 따른 삶의 질 개선 효과를 들 수 있다. 사회 제도적으로는 노인 건강증진, 건강보험 확대, 장기요양 보장 및 장자상속 폐지 등이 백세인의 삶에 직접적인 영향을 미쳤다. 코로나19 사태는 일반 노인보다 백세인의 치사율이 현저하게 낮은 현상을 보임으로써 생활습관질환의 중요성을 새롭게 부각하고 일상생활의 건전성 유지를 강조하였다. 사회 제도의 발전이 중요한 역할을 하였지만, 결정적이고 핵심적인 역할을 한 것은 결국 의료 및 과학기술의 발달과 보급이었다. 특히 의료과학기술의 발전이 고령사회의 삶의 질을 향상하고 기능적 장수를 보장하고 팬데믹과 같은 역병에서 해방되게 해주었다. 그동안 우리나라는 고령인의 삶의 질이 개선되는 방향으로 발전해 왔지만, 앞으로 가속적으로 확대될 초고령화 현상에 대해 최우선적으로 과학기술 측면에서 더욱 철저한 대응이 절대적으로 필요하다.

라 고령사회의 과학기술

고령사회로 진입하면 과학기술의 수요뿐 아니라 필요한 기술도 크게 달라질 수밖에 없다. 과학기술이 보다 수요자 중심으로 바뀌면서 노인들의 삶의 질 향상에도 역점을 두어야 하며, 고령인의 삶의 질을 향상할 수 있는 과학기술을 발전시키기 위해서는 다른 목적의 R&D와 차별되는 독립적인 추진 기구를 설립하여 운영할 수 있어야 한다.

1) 과학기술 수요의 변화

과학기술의 변화는 인류의 일상생활 패턴을 새롭게 전환할 뿐 아니라, 삶에 대한 인식과 태도마저 혁신할 것을 요구한다(박상철, 1996). 그중에서도 인간게놈프로젝트(Human Genome Project, HGP)의 성공은 개개인의 특성에 따른 의학적 맞춤성을 가능하게 함으로써 인간의 개인성을 강화하는 방향으로 새로운 의료과학의 지평을 열었다. 뿐만 아니라 노화에 따른 퇴행성 변화가 부득이하고 당연한 현상이 아니라 이제는 인생의 마지막 순간까지 생체기능을 유지할 수 있다는 가능성이 제기되고 있다. 전통적 사고와 지역환경에 적응하면서 평생을 시공간적으로 제약을 받으며 살아온 고령인에게 이러한 변화는 크나큰 부담을 줄 수밖에 없다. 인류 역사상 유례없이 전개되고 있는 급속적인 고령화 현상은 사회적, 문화적 충격을 가중하고 있다. 이러한 충격을 이겨내고 극복하기 위해서는 결국은 혁신적이고 인간적인 과학기술의 발전이 필요하다. 고령인의 삶의 질을 유지하고 향상하기 위한 과학기술은 과거와 다르게 변화하고 있는 상황을 책임져야 한다. 따라서 30년 뒤의 장수고령사회를 대비한 과학기술은 기존의 과학기술체계와 여러 가지 측면에서 다를 수밖에 없다.

고령사회를 위한 과학기술은 무엇보다도 공급자 위주가 아니라 소비자 위주로 바뀌어야 하며, 주 소비자가 고령층임을 감안하여 초고령사회를 대비한 과학기술은 노인들의 일상생활, 삶의 질, 욕구, 심리 상황과 건강 상태를 회복하고 개선할 수 있어야 한다. 고령자의 기능을 보조·보완해 줌으로써 안락한 삶을 유지해주려는 단순한 목적의 고령친화산업이라는 개념을 탈피하여, 고령자도 젊은이들과 차별 없이 당당한 삶을 영위할 수 있도록 적극적으로 개발하여 지역사회 발전의 능동적 주체가 될 수 있도록 지원하여야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 무엇보다도 노화에 대한 분명한 인식을 통해서 고령사회를 대비한 능동적인 과학기술 진흥 대책이 필요하다.

치병장수(治病長壽) 사례로 본 장수와 의료혜택

화순지역의 백세인 조사과정에서 현대의술의 혜택을 받고 건강한 장수를 누리는 백세인을 만나면서 Life 3.0시대의 치병장수 사례를 보았다. 106세의 한 조사 대상의 경우 77세에 퇴행성 관절염부터 시작하여 93세 흉추압박골절, 99세 요추압박골절, 94세 백내장, 98세 황반변성, 100세와 101세 사이 3차례 심근경색이 발생하였으나 모두 의료적 시술과 수술을 받아 해결하였고 현재도 건강하게 살고 있다. 이는 인류가 신체구조와 같은 하드웨어, 다양한 생리적 및 지적 기능과 같은 소프트웨어를 더 이상 자연 진화에 기대지 않고 직접적으로 인위적 설계를 통하여 개조하는 트랜스휴먼의 단계에 접근하는 사례이다. 과학기술의 발전은 단순한 수명연장이 아니라 연령에 상관없이 생체기능을 복원하여 정상적 활동을 가능하게 하는 기능적 장수시대가 열리고 있음을 보여주고 있다.

2) 고령사회에 필요한 과학기술

과학기술의 발전은 삶의 질에 기초가 되는 생산과 물질적 풍요의 창출에 결정적으로 기여하고 있기 때문에 중요하다. 그러나 본격적인 삶의 질 향상을 위해서는 보다 적극적으로 인간의 건강, 환경, 안전 등의 측면에서 과학기술이 도구로 작동하여야 한다. 특히 장수사회에서는 개인의 건강을 최적의 상태로 생의 마지막까지 유지할 수 있는 기능적 장수(functional longevity)를 향유하도록 하여야 한다. 기능적 장수란 단순한 수명연장이 아니라 삶의 질을 고양하며 인간의 존엄성을 생애 마지막 순간까지 지킬 수 있는 건강한 장수의 패턴을 의미한다. 기능적 장수가 추구하는 것은 개인의 능력을 극대화하기 위하여 활동성을 증진하고 인지능을 향상하며 면역능을 개선할 수 있어야 한다는 것이다(박상철, 1996). 이러한 생체능력을 생애 최후의 순간까지 최대한 유지할 수 있도록 개인적 차원에서는 생활습관 개선과 사회적 관계망 확대 노력이 필요하며, 공적 차원에서는 사회의 문화와 정치적 제도를 개선하여야 한다. 그러나 본질적인 문제를 해결하기 위해서는 과학기술 발전을 통해서 고령화에 따른 개인적 역량 감퇴를 방지하고 남녀노소 모두가 어울려 서로를 포용하는 사회적 유기성을 증진할 수 있는 방안이 필요하다. 또한 장수패러독스로 거론되는 의료비 증가와 복지시스템 부담 증가, 인간관계 변조와 세대갈등, 출산율 격감, 인구구조변화를 해결하기 위한 과학기술의 발전이 최우선적으로 추진되어야 한다. 장수패러독스를 극복하고 저비용 장수사회를 구축하기 위한 최적화 기술로서 개인적 삶을 개선하기 위한 삶의 질 향상 과학기술(QOL-Associated Science and Technology, QAST)과 사회적 문제점을 해결하기 위한 장수과학기술(Longevity-Associated Science and Technology, LAST)이 강력하게 추진되어야 한다(박상철, 2006).

3) 고령사회 대비 과학기술 발전을 위한 제도적 개선

고령사회 대비 과학기술체계는 무엇보다도 인간중심으로서 건강, 안전, 환경을 위한 삶의 질 향상 과학기술과 인구 고령화, 사회변천에 대응하는 장수과학기술의 개념이 융합되어 공급적 차원보다 소비자인 고령자를 위한 과학기술로 전환할 필요가 대두되고 있다. 특히 고령사회 대비 과학기술은 미래복지사회를 건설하기 위한 사회보험적 특성이 있기 때문에 장기적이고 거시적인 투자를 추진하여야 하고 공익적 목적이 선행되어야 하므로 기본적으로 정부 주도적으로 추진하되 민간의 참여를 적극 유도하여야 한다. 그러기 위해서는 정부가 확고한 입장으로 과학기술을 주도적으로 추진하는 종합추진체계를 구축하여 궁극적으로는 미래지향적인 새로운 산업이 발전되어야 한다(박상철, 2006). 종합추진체계를 구축하기 위해서는 무엇보다도 안정된 재정적 제도가 필요하다. 그러기 위해서는 분명하게 다가오는 미래 초고령사회에 초래될 장수패러독스를 해결하기 위한 사회 전반의 공동체적 협력체계를 갖추어 공익목적의 사업이 원활하게 추진되게 하여야 한다.

이러한 목적을 위해서 사령탑으로 총리실 산하에 국립노화고령사회연구원(가칭)이라는 범부처적 기구 설립을 제안한다. 위 연구원은 과학기술의 발전과 현안의 사회적 문제해결을 위한 목적을 다른 부처들과 협력하여 달성하여야 한다. 또한 고령사회의 문제는 모든 지방자치단체의 구체적이고 현실적인 문제이기 때문에 각 지역의 현안을 해결하고 보다 실질적인 효과를 얻기 위해서 지역별노화고령사회연구센터(가칭)를 설립하기를 제안한다.

결론적으로 삶의 질 향상을 위한 과학기술의 집중적 지원발전이 필요하다. 특히 고령인의 삶의 질을 향상하고 장수사회의 안정을 도모할 수 있는 과학기술의 발전을 위해 국가는 체계적인 지원구조를 갖추어야 하며 안정적 재원을 보장해주어야 한다.

마 맺음말

아무리 나이가 들어도 기능적 장수를 유지한다는 것은 인생의 목표이자 지복이 아닐 수 없다. 그러나 상당수의 고령인은 건강장애 및 기능장애로 정상적 활동을 하지 못하게 되면서 삶의 질이 떨어지고 인간의 존엄성을 상실하게 된다. 따라서 고령인구가 급증하는 초고령사회를 맞이해서 기능적 장수를 유지할 수 있는 과학 및 의료기술의 발전은 고령사회의 문제를 해결하기 위한 가장 중요한 선결 조건이다. 기능적 장수를 달성하여 삶의 질을 향상하기 위해서는 무엇보다도 고령인의 활동성이 보장되어야 하고 인지능력이 온전하게 유지되어야 하며 생체를 보호하는 면역 능력을 갖추고 있어야 한다. 과학기술은 고령인의 삶의 질 향상에 기여하여 초고령사회의 안정을 도모할 수 있다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 무엇보다도 국가가 분명한 의지를 가지고 체계적인 노화과학 지원구조를 갖추어야 하며 지속적인 재원을 보장해주어야 한다. 이러한 측면에서 과학기술발전은 미래 초고령사회의 가장 필수적인 보장성 보험이라 할 수 있다.

참고문헌

박광성·이정화·박상철(2022). 한국의 백세인 20년의 변화, 전남대학교.

박상철(1996). 삶의 질 향상을 위한 과학기술 진흥방안, 국가과학기술자문회의.

박상철(2006). 고령사회 삶의 질 향상 과학기술 추진방향, 국가과학기술자문회의.

박상철(2010). 노화혁명: 고령화충격의 해법, 하서출판사.

박상철(2021). 코로나-19가 바꾼 백세시대의 미래, 시공사.

Cheng, H., Luo, W., Si, S., Xin, X., Peng, Z., Zhou, H., Liu, H. & Yu, Y.(2022). "Global Trends in Total Fertility Rate and Its Relation to National Wealth, Life Expectancy and Female Education", BMC Public Health, Vol.22 No.1, pp. 1346.

Choi, Y. H., Kim, J. H., Kim, D. K., Kim, J. W., Lee, M. S., Kim, C. H. & Park, S. C.(2003). "Distribution of ACE and APOE Polymorphisms and Their Relations with Dementia Status in Korean Centenarians", J. Gerontol. A. Biol. Sci Med Sci, Vol.58 No.3, pp. 227~231.

Kim, D. J., Yi, S. M., Lee, S. Y., Kang, H. S., Choi, Y. H., Song, Y. W. & Park, S. C.(2006). "Association Between the MLH1 Gene and Longevity. Human Genetics", Vol.119 No.3, pp. 353~354.

Kontis, V., Bennet, J. E., Mathers, C. D., Li, G., Foreman, K. & Ezzati, M.(2017). "Future Life Expectancy in 35 Industrialized Countries: Projections with a Bayesian Model Ensemble", Lancet, Vol.389 No.10076, pp. 1323~1335.

Park, S. C.(2016). "Korean Centenarian Study: Comprehensive Approach for Human Longevity", Encyclopedia of Geropsychology, (ed.) NA Panchana, Springer Science-Business Media, Singapore DOI 10.1007/978-981-287-080-3_62-1, pp. 1303~1308.

Park, J. W., Ji, Y. I., Choi, Y. H., Kang, M. Y., Jung, E., Cho, S. Y., Cho, H. Y., Kang, B. K., Joung, Y. S., Kim, D. H., Park, S. C. & Park, J.(2009). "Candidate Gene Polymorphisms for Diabetes Mellitus, Cardiovascular Disease and Cancer are Associated with Longevity in Koreans", Exp Mol Med., Vol.41 No.11, pp. 772~81.

Tegmakr, Max(2018). Life 3.0, Vintage-Books.

PART 4

3 초고령사회를 대비한 건강노화 전략과 전망

정해영

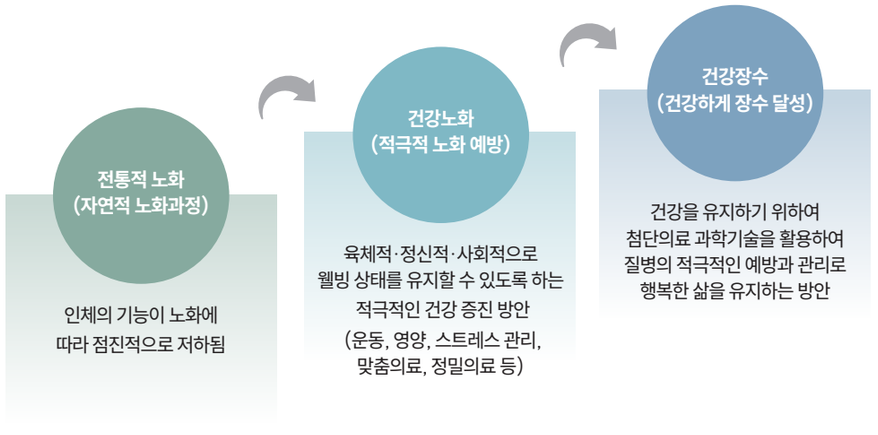
부산대학교 약학대학 석학교수

가 들어가는 말

초고령시대에는 개인의 삶의 질 향상을 위해 건강노화를 통한 건강장수 전략이 반드시 필요하다. 신체적, 정신적, 사회적으로 건강할수록 독립적이고 활동적인 생활이 가능해지며, 삶의 만족도가 높아져 전반적인 삶의 질이 향상된다. 건강노화란 고령자의 신체적, 정신적, 사회적 웰빙 상태를 유지하는 과정으로, 신체 기능적 능력, 정신적 내재적 능력, 외부 환경적 요소가 상호작용하여 노화 과정에서 최적의 기능과 웰빙을 유지하는 것을 의미한다.

건강노화가 중요한 이유는 고령자의 삶의 질 향상, 노인의료비 절감, 사회참여 증진, 노인 인력 활용 등 다양한 측면에서 필수적이기 때문이다. 특히 전체 의료비에서 노인 의료비가 차지하는 비중이 약 50%에 육박하는 최근 상황에서, 건강노화를 통한 건강수명 연장은 노년기 삶의 질 제고와 의료비 절감, 나아가 건강한 사회 발전에 기여할 수 있다(<그림 4.1>). 따라서 노화의 요인과 신체 반응에 대한 이해를 바탕으로 효과적인 노화조절 방안을 모색하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 4차 산업혁명 시대의 건강노화 연구 현황과 전망을 살펴보고, 이를 활용한 적극적인 노화 제어 전략에 대해 알아보고자 한다.

그림 4.1 건강노화와 건강장수



출처: 부산대학교 정해영(2004).

나 4차 산업혁명시대의 다중오믹스 및 AI 기술의 건강노화 연구 활용

4차 산업혁명시대에는 유전체학, 전사체학, 단백체학, 대사체학 등의 다중오믹스(multiomics) 기술 발달과 오믹스 분석기술 비용이 낮아지면서 노화와 암, 대사성 질환, 퇴행성 뇌질환, 심혈관질환 등 노인성 질환에 대한 기전의 총체적 이해가 가능해졌다. 방대한 오믹스 빅데이터 분석을 통해 개인의 유전적 특성, 건강 상태, 생활습관 등을 종합적으로 파악하여 맞춤형 건강정보를 제공하는 정밀 의료 실현이 가능해진 것이다. 국내에서는 울산광역시의 '울산 만 명 게놈프로젝트'가, 해외에서는 여러 기업체의 '개인 유전체 오믹스 데이터와 정밀 의료정보 제공'이 대표적인 사례이다.

더 나아가 다중오믹스 빅데이터는 노화와 노인성 질환의 조기진단, 예후 예측, 치료 반응 모니터링, 신약 표적 발굴 등 다양한 분야에서 활용 가능하다. 이를 통해 질병 생체지표 발굴과 혁신신약 개발을 위한 기반을 마련할 수 있다. 특히 AI 기술과의 BIT(Bioinformatics and Information Technology) 융합을 통해 빅데이터 기반 건강노화 모니터링 및 평가시스템 구축, 개인 맞춤형 건강관리와 정밀 의료 구현, 건강수명 연장 기술개발 등 건강노화 실현을 위한 혁신적 방안들이 모색되고 있다. 이는 궁극적으로 의료산업은 물론 사회와 경제 전반의 큰 변화를 촉진할 것으로 기대된다.

최근 다중오믹스 기술의 발달로 노화 제어와 건강수명 연장을 위한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다. 특히 유전체, 후성유전체, 전사체, 단백체, 대사체 등의 다차원 오믹스 데이터 분석을 통해 노화 과정에 대한 통합적 이해와 제어 전략 수립이 시도되고 있다. 또한 AI 기술을 활용한 방대한 오믹스 데이터 분석은 정밀 노화 의료와 맞춤형 건강수명 관리 구현을 위한 핵심 동력이 될 것으로 전망된다. 이러한 첨단기술 기반의 건강노화 연구는 초고령사회가 직면한 도전과제 해결과 전 세대의 건강하고 활기찬 삶을 실현하는 데 크게 기여할 것으로 기대된다.

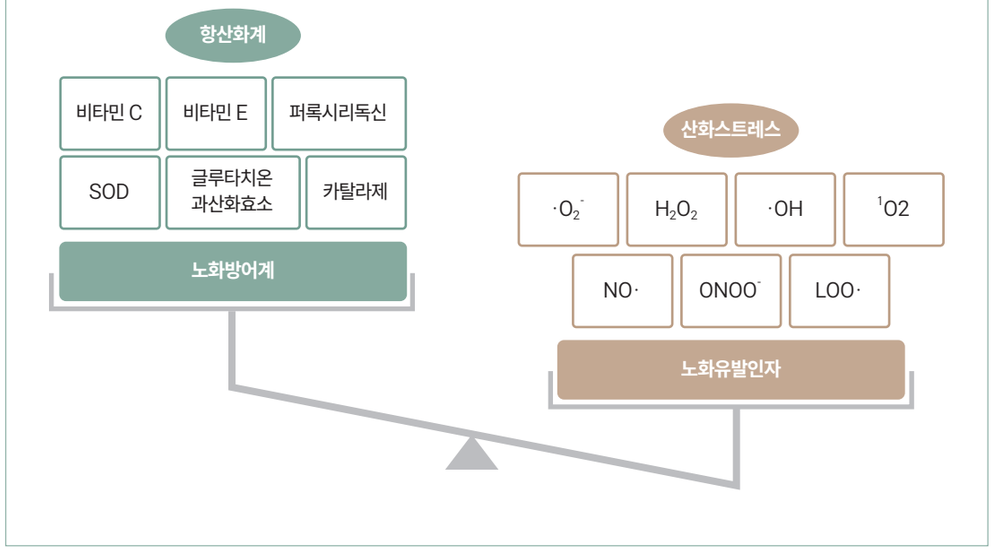
다 노화 유발인자와 인체 방어기전 기반 건강노화 연구 동향과 전망

노화 과정은 산화 스트레스, 만성 염증, 텔로미어 단축, 유전체 및 후성유전체 변화, 단백질 항상성 손상, 인슐린과 인슐린 유사 성장 인자 1(Insulin-like Growth Factor 1, IGF-1) 등 대사경로 이상, DNA 및 세포 손상 축적 등 다양한 요인들의 복합적 상호작용에 의해 촉진된다. 이에 대응하는 인체의 주요 방어기전으로는 SOD(Superoxide Dismutase), 카탈라아제(catalase), 비타민 C, E 등의 산화 스트레스 방어계, 단백질 품질관리계, DNA 손상 복구계, 세포주기 조절계, 염증 조절계, 자가포식 작용계, 세포노화 조절계 등의 방어

계가 있다. 이들 방어계의 정상적 작동을 통해 노화 과정이 제어되고 건강노화가 유지될 수 있다. 건강노화 전략으로는 이러한 생체 방어계를 보강하고 증진시키는 것이 핵심이 될 것이다.

노화 유발인자와 인체 방어기전에 대한 연구는 건강한 노화와 수명연장을 위해 매우 중요한 과제이다(<그림 4.2>). 최근 분자생물학, 유전체학 등 생명과학 기술의 발달로 노화 기전 규명이 가속화되고 있으며, 이를 통해 노화 제어 및 건강수명 연장 기술개발이 활발히 이루어지고 있다. 다음은 노화 유발인자와 인체 방어기전 연구의 주요 동향과 전망을 살펴보자 한다.

그림 4.2 노화의 유발인자와 방어인자의 밸런스



출처: 부산대학교 정해영(2004).

1) 노화 유발인자 연구 동향

유전체 불안정성, 텔로미어(telomere) 손실, 후성유전학적 변화, 단백질 항상성 손상, 미토콘드리아(mitochondria) 기능 저하, 세포 노화, 줄기세포 고갈 등 다양한 노화 유발 요인들이 밝혀지고 있다. 또한, 노화조절 유전자, 장수 유전자 등 노화 및 수명 조절에 관여하는 유전자들이 발굴되고 있으며, 이들 유전자의 기능 및 조절 메커니즘 연구가 활발히 진행되고 있다. 노화 유발인자로는 단일 요인이 아닌 다양한 노화 유발 요인들의 복합적 상호작용에 대한 연구가 확대되는 추세이다.

2) 인체 방어기전 연구 동향

DNA 손상 복구, 항산화 방어, 면역 감시, 단백질 품질관리, 자가포식 등 인체의 다양한 방어 및 항상성 유지 기전에 대한 이해가 심화되고 있다. 그리고 노화에 따른 생체방어기전의 쇠퇴가 노화 촉진의 주요 요인으로 대두되면서 방어기전 활성 유지 및 증진 전략 연구가 활발히 이루어지고 있다. 또한, 장내미생물, 면역 노화 등 새로운 방어기전 요소들의 역할과 중요성이 강조되고 있으며 이에 대한 활발한 연구가 진행 중이다.

3) 주목받는 노화 제어 및 건강수명 연장 전략

칼로리 제한, 식이조절, 약물 투여 등 노화를 지연시키고 건강수명을 연장할 수 있는 다양한 전략들이 연구되고 있다. 그리고 시트룰린(citrulline), 메트포르민(metformin), 레스베라트롤(resveratrol) 등 노화 지연 효과가 있는 것으로 알려진 물질에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 노화에 따른 미토콘드리아 기능 쇠퇴를 개선하기 위한 미토콘드리아 조절 전략에 대한 관심이 높아지고 있으며, 세포 노화를 제어하는 전략, 장내미생물 조절을 통한 노화 제어 전략 등 새로운 노화 제어 표적 발굴 및 기술개발 노력도 확대되고 있다.

4) 건강노화를 위한 다중오믹스, AI 기술의 활용 확대

유전체, 후성유전체, 전사체, 단백체, 대사체 등 다중오믹스 데이터 분석을 통해 노화의 분자적 기전을 종합적으로 이해하려는 연구가 활성화되고 있다. 그리고 인공지능, 기계학습 등 첨단 정보기술을 활용하여 방대한 오믹스 데이터와 임상 데이터를 통합 분석함으로써 노화 및 건강수명 예측 모델 개발, 노화 제어 표적 분자 발굴 등이 시도되고 있다. 또한, 다중오믹스 빅데이터와 인공지능 기술의 융합은 정밀 노화의학 및 개인 맞춤형 건강수명 관리 구현의 핵심 동력이 될 것으로 전망된다.

5) 토탈 솔루션 지향적 연구 강화

최근 노화 및 건강수명 연구는 의학, 생명과학을 넘어 사회, 경제, 문화, 환경 등 다양한 분야와의 융합을 통해 보다 총체적인 해법을 모색하는 방향으로 진화하고 있다. 그리고 고령사회 대응을 위한 사회시스템 혁신, 고령 친화 기술개발, 노년기 삶의 질 향상 전략 등 다각적 관점의 연구 확대가 요구되고 있다. 건강하고 활기찬 노년을 위한 통합적 솔루션 마련에 건강노화 및 건강수명 연구가 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

노화 유발인자와 인체 방어기전에 대한 이해 증진은 인류의 오랜 숙원인 건강수명 연장에 한 걸음 더 다가가는 것을 의미한다. 분자 수준에서 개체 및 사회 수준에 이르는 다양한 스케일에서의 학제 간 융합 연구를 통해 노화의 복잡한 기전이 규명되고, 이를 기반으로 효과적인 노화 제어 및 건강수명 연장 전략이 개발되기를 기대한다. 초고령사회가 직면한 도전에 현명하게 대처하고, 모든 세대가 건강하고 활기찬 삶을 영위하는 미래를 만들어가는 데 건강노화 연구가 중추적 역할을 담당할 것으로 전망된다.

라 세포노화와 세놀리틱스 연구 현황과 한계

세포노화는 산화 스트레스 등의 자극에 의해 세포주기가 정지되고 종양 억제 단백질인 p53, p21, p16 등이 활성화되며 노화 관련 분비표현형(Senescence-Associated Secretory Phenotype, SASP)이 나타나는 노화의 주요 기전 중 하나이다. 세포노화의 축적은 조직 기능 저하를 초래하여 노화뿐만 아니라 암, 심혈관 질환, 퇴행성 뇌질환, 대사성 질환 등 다양한 노인성 질환 발생에 기여한다고 알려져 있다. 따라서 세포노화 연구는 노화 제어와 고령화 문제해결, 궁극적으로는 건강노화 달성에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

최근 주목받는 세포노화 제어 전략으로 노화세포를 선택적으로 제거하는 세놀리틱스(senolytics) 약물 개발이 활발히 이루어지고 있다. 다사티닙(dasatinib), 퀘르세틴(quercetin), 나비토클락스(navitoclax), 피세틴(fisetin) 등이 대표적인 세놀리틱스로 이들은 노화 지연, 건강수명 연장, 노인성 질환 치료에 효과가 있을 것으로 기대된다. 그러나 세놀리틱스가 노화세포를 특이적으로 제거하는지, 아니면 노화세포의 진행 과정을 억제하는지에 대해서는 의문이 제기되기도 한다. 또한 장기적 안전성, 약물전달체계, 노화세포의 이질성, 정상세포에 대한 영향 등을 고려한 세놀리틱스 활용 전략 수립이 필요한 상황이다. 개인의 노화 상태와 질병 특성에 맞는 세놀리틱스 활용법이 정립된다면 노화와 노인성 질환 극복에 크게 기여할 수 있을 것으로 전망된다.

최근 세포노화와 세놀리틱스는 현재 노화 및 연령 관련 질환 연구 분야에서 가장 활발히 연구되고 있는 주제 중 하나이다. 많은 연구자들이 세포노화의 기전 규명과 세놀리틱스 개발에 주력하고 있으며, 상당한 연구 성과가 축적되고 있다. 세포노화와 세놀리틱스 연구의 방향성과 한계는 다음과 같다. 연구의 방향성으로는 ① 세포노화 기전 규명, ② 세놀리틱스 타깃 발굴, ③ 약물 스크리닝 및 최적화, ④ 세놀리틱스 전달 체계 개발, ⑤ 동물 모델에서의 효능 검증, ⑥ 임상 적용 가능성 탐색 등에 대해 노화 및 질환 동물 모델 연구 및 임상시험이 이루어지고 있다. 그러나 연구의 한계로는 ① 노화세포의 이질성, ② 정상세포에 대한 영향, ③ 장기 안전성 및 효능, ④ 개인차 및 질병 특이성, ⑤ 노화 과정의 복잡성, ⑥ 윤리적, 사회적 문제 등이 있는 상황이다.

마 역노화 연구 현황과 전망

역노화(reverse aging)는 노화 과정을 되돌리거나 젊어지게 만드는 개념으로, 노화에 의한 세포, 조직, 기관의 손상을 복원하여 젊은 상태로 회복시키는 것을 목표로 한다. 역노화를 위한 주요 전략으로는 세포 리프로그래밍, 줄기세포를 이용한 세포 재생 및 대체, 유전자 교정, 노화세포 제거, 나노로봇을 활용한 조직 손상 부위 정밀 복원 등이 연구되고 있다. 그러나 아직 개체 수준의 완전한 역노화는 실현되지 않았으며, 세포나 동물 모델에서의 제한적 역노화 현상이 관찰되는 정도이다. 역노화 연구의 기술적 한계와 안전성 문제는 해결해야 할 주요 과제로 남아있는 상황이며, 실용화를 위해서는 보다 많은 연구가 필요할 것으로 보인다.

바 건강노화 전략과 전망

1) 식이제한

노화조절에 가장 효과적인 방법 중 하나가 식이제한(food restriction, calorie restriction)이다. 많은 연구를 통해 칼로리 섭취량을 40% 정도 줄이면 수명이 1.5배까지 연장될 수 있음이 밝혀졌다. 식이제한은 활성산소 생성과 염증반응을 억제하고, 대사를 활성화시켜 지방축적과 인슐린 저항성을 감소시킨다. 이는 노화 과정에서 나타나는 만성 염증을 완화하고 노화를 지연시키는 효과가 있다. 유사한 방식으로 일정 기간 정상식이와 장시간 공복을 반복하는 간헐적 단식도 식이제한과 비슷한 효과를 나타낼 수 있다.

필자의 연구진은 식이제한이 노화 관련 지표들에 미치는 영향을 분석하기 위해 자체 연구 데이터와 선행 연구 결과들을 종합적으로 검토하였다. 그 결과, 노화가 진행됨에 따라 증가하는 염증성 사이토카인(cytokine), 케모카인(chemokine), 세포노화 지표, 대사이상 관련 인자들(소포체 스트레스, 지방축적, 인슐린 저항성)이 식이제한에 의해 유의하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 식이제한이 노화 과정에서 나타나는 만성 염증을 효과적으로 억제함으로써 노화를 지연시킬 수 있음을 시사한다. 실제로 미국 페닝턴 생의학연구센터의 임상연구에서도 식이제한이 심혈관 스트레스를 경감시키고, 지방축적을 감소시키며, 대사성 질환을 개선하는 효과가 있음이 알려진 바 있다.

건강한 노화를 위해서는 총 칼로리 섭취량을 20~40% 수준으로 제한하는 것이 도움이 될 수 있다. 이를 통해 산화 스트레스와 만성 염증 감소, 대사 활성화, 세포 스트레스 감소, 단백질 항상성 유지, 자가포식작용 증진 등 다양한 노화 제어 메커니즘이 활성화될 수 있다. 최근에는 식이제한이 비만, 당뇨, 심혈관 질환 등 노인성 만성질환의 예방에도 도움이 될 수 있음이 보고되고 있다. 다만 장기간의 과도한 식이제한은 영양 불균형이나 면역력 저하 등의 부작용을 초래할 수 있으므로, 전문가의 지도하에 적절한 수준에서 이루어지는 것이 중요하다.

2) 간헐적 단식

간헐적 단식(intermittent fasting)은 일정 시간 동안 단식을 하고 나머지 시간에는 정상적으로 식사를 하는 방법이다. 대표적으로 16시간 단식/8시간 식사(16:8 단식), 20시간 단식/4시간 식사(20:4 단식), 주 2일 단식/5일 정상식(5:2 단식), 24시간 주기로 단식과 식사를 반복하는 방법 등이 있다. 이러한 간헐적 단식은 장기간 지속하기 어려운 지속적 식이제한의 단점을 보완하면서도 유사한 효과를 기대할 수 있다는 점에서 주목받고 있다. 그러나 아직 장기적인 안전성과 효능에 대해서는 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

간헐적 단식과 노화 제어 사이에 상관관계가 있는 것으로 보이며, 간헐적 단식이 노화 과정에 미치는 긍정적인 영향들은 다음과 같다. 산화 스트레스 감소, 단식 기간 동안 활성산소종 감소 및 항산화 방어 증가, 염증 수준 감소, 염증성 사이토카인과 염증 생체지표 감소, 인슐린과 IGF-1 민감성 향상, 인슐린 저항성 개선을 통한 대사이상 완화, 세포 스트레스 방어 경로 활성화, 자가탐식 작용, 단백질 항상성 경로 활성화, 줄기세포와 프로제니터 세포(progenitor cell) 활성 증가, 신경계, 골수 등 줄기세포 증식과 기능 향상, 노화 관련 유전자 발현 변화 등의 다양한 노화 제어 효과를 들 수 있다.

이러한 분자 수준의 변화들은 세포 노화와 노화 관련 질환 위험을 감소시킬 수 있다. 실제로 동물실험에서 간헐적 단식이 수명을 늘린 것으로 나타났다. 다만, 인체 연구에서는 아직 장기적인 효과에 대한 결론이 부족한 상황이다. 향후 추가 연구를 통해 간헐적 단식의 안전성과 효능이 더 명확해질 것으로 기대된다.

3) 적당한 운동

규칙적인 운동은 건강한 노화를 위한 핵심 요소 중 하나이다. 개인의 건강 상태와 체력 수준에 맞는 적절한 강도와 빈도의 운동은 근육량 유지, 기초대사량 증진, 만성 염증 억제, 항산화 능력 향상, 심폐기능 강화, 인지기능 보존 등 노화 지연에 도움이 되는 다양한 효과를 나타낸다. 반면 지나치게 과도한 운동은 오히려 신체에 부담을 줄 수 있으므로 주의가 필요하다.

건강노화에 도움이 되는 적당한 운동 강도에 대한 일반적인 기준으로서 미국 스포츠의학회(American College of Sports Medicine, ACSM)와 세계보건기구(World Health Organization, WHO)에서는 건강증진과 만성질환 예방을 위해 18세 이상 성인에게 다음과 같은 신체활동 가이드라인을 제시하고 있다.

유산소 운동

중강도 유산소 운동을 주 2시간 30분 이상 또는 고강도 유산소 운동을 주 1시간 15분 이상 실천한다. 중강도 운동은 숨이 약간 가쁘고 땀이 나는 정도(예: 빠르게 걷기), 고강도 운동은 숨이 많이 가쁘고 대화가 어려울 정도(예: 조깅, 수영)이다. 운동은 한 번에 최소 10분 이상 지속하는 것이 효과적이며, 주 3회 이상 고르게 분산하는 것이 좋다.

근력 운동

주요 근육군(다리, 엉덩이, 등, 복부, 가슴, 어깨, 팔)을 포함한 근력 운동을 주 2회 이상 실천한다. 각 근육군별로 8~12회 반복을 1세트로 하고, 2~3세트 정도 실시하는 것이 적절하다.

유연성 운동과 밸런스 운동

유연성 운동(스트레칭)은 주 2회 이상, 밸런스 운동은 주 3회 이상 실천하는 것이 좋다. 스트레칭은 각 동작 당 10~30초 정도 유지하고, 밸런스 운동은 자세 유지를 20~30초 정도 하는 것이 효과적이다.

다만, 이는 건강한 성인을 위한 일반적 권고사항이며, 노인이나 만성질환자의 경우에는 개별적 특성을 고려해야 한다. 노인의 경우, 본인의 체력 수준에 맞추어 운동 강도를 조절하는 것이 중요하다. 또한 무리한 고강도 운동보다는 중강도 운동을 점진적으로 늘려가는 것이 안전하다. 특히 관절에 무리가 가지 않도록 주의해야 하며, 균형 잡힌 운동 프로그램을 구성하는 것이 바람직하다. 아울러 심뇌혈관질환, 당뇨병 등 만성질환이 있는 경우에는 의사와 상의하여 질환별 운동법을 따르는 것이 좋다. 요컨대, 노년기 건강 유지와 기능 향상을 위해서는 본인의 건강 상태와 체력 수준에 부합하는 적절한 운동을 규칙적으로 실천하는 것이 무엇보다 중요하다.

4) 장내 유익균 살리기

노화가 진행되면서 장내미생물 구성에서 유익균은 감소하고 유해균이 증가하는 불균형(dysbiosis) 상태가 초래된다. 비피도박테리움(bifidobacterium), 락토바실러스(lactobacillus) 등의 유익균들은 장 건강 유지뿐 아니라 면역기능 조절, 염증 억제, 뇌기능 향상 등 다양한 건강기능 항진 효과를 가진다. 따라서 프로바이오틱스(probiotics), 프리바이오틱스(prebiotics) 섭취 등을 통해 장내 유익균의 증식을 돕는 것은 건강한 노화를 위한 주요 전략이 될 수 있다.

최근 연구에 따르면 장내미생물군(gut microbiome)과 건강한 노화 사이에 밀접한 관련이 있는 것으로 밝혀지고 있다. 마이크로바이옴은 우리 몸에 공생하는 미생물 생태계로, 특히 장내미생물군이 건강에 중요한 역할을 한다. 이들은 면역 조절, 영양분 합성, 대사 조절 등 다양한 기능을 수행한다. 노화가 진행됨에 따라 장내미생물의 다양성과 조성이 변화하는데, 이러한 변화가 노화 관련 질병과 연관되어 있다. 그래서, 건강노화를 위하여 적절한 장내 유익균을 늘리는 전략도 대단히 중요하다. 프로바이오틱스(살아있는 유익균), 프리바이오틱스(유익균 먹이) 및 포스트바이오틱스(유산균 생산 물질) 등의 기전으로는 염증 조절, 면역 조절, 대사 조절, 장-뇌 상호작용 등이 관여할 것이다. 또한, 최근 필자의 연구진이 신규 비피도박테리움과 락토바실러스 유산균이 시상하부의 렙틴(leptin) 저항성 개선, 간의 인슐린(insulin) 저항성 개선 및 여러 장기들의 세포노화와 노화염증을 억제한다는 것을 새롭게 발견하였다.

건강한 장내미생물 유지는 노화 지연에 도움이 된다. 프로바이오틱스와 프리바이오틱스 섭취, 식이섬유가 풍부한 식단 등으로 장내 균형을 맞추는 것이 중요하다. 마이크로바이옴 연구는 아직 초기 단계이지만, 장내미생물 조절이 건강한 노화 촉진을 위한 새로운 전략으로 주목받고 있다. 향후 추가 연구를 통해 마이크로바이옴과 노화의 관계가 더욱 명확해질 것으로 기대된다.

5) 영양보충제

세포 내 소기관인 미토콘드리아는 생체에너지 생산을 담당하는 세포의 발전소와 같은 역할을 한다. 영양분과 산소가 미토콘드리아 내 TCA(tricarboxylic acid) 회로를 통해 생체에너지 ATP(adenosine triphosphate)로 전환되는데, 과도한 영양분 공급은 오히려 활성산소 생성과 미토콘드리아 손상을 초래하여 노화를 촉진시킬 수 있다. 따라서 미토콘드리아 기능 유지는 건강노화의 핵심 요소라 할 수 있다.

항산화 비타민인 비타민 C, 비타민 E는 노화의 주요 원인인 산화 스트레스로부터 미토콘드리아를 보호하는 데에 중요한 역할을 한다. 노화 과정에서 비타민 C 합성이 감소하게 되는데, 충분한 비타민 C 공급은 노화 억제 효과가 있음이 여러 연구를 통해 밝혀졌다. 노화 제어와 골 건강, 면역기능 유지 등을 위해서는 하루 1g 수준의 비타민 C 섭취가 권장된다. 또한 비타민 B군, 비타민 D, 미네랄, 필수 아미노산과 필수 지방산 등은 미토콘드리아의 에너지 대사 및 뼈 대사에 관여하는 다양한 효소들의 조효소로서 중요한 역할을 한다. 과일과 채소에 풍부한 폴리페놀(polyphenol) 성분인 퀘르세틴, 루테올린(luteolin) 등은 노화세포를 제거한다는 세놀리틱스 효과를 가진다.

한편 오메가-3 불포화 지방산은 항염증 효과를 통해 만성 염증 관련 노화를 억제하고 심혈관 건강에 도움이 되는 것으로 알려져 있다. 다만 과도한 영양소 섭취는 오히려 노화를 가속화시킬 수 있으므로, 균형 잡힌 식단을 통한 적정량 섭취가 중요하다.

6) 건강노화를 위한 노화 표적분자 연구와 노화제어 신약개발 전략과 전망

건강한 노화와 수명연장을 위한 핵심 표적 발굴과 신약개발도 활발히 진행되고 있다. 최근에는 빅데이터와 인공지능 기술을 활용하여 노화 관련 표적 단백질을 발굴하고, 이를 조절하는 효능 물질을 대량 검색하는 연구가 활성화되고 있다. 또한 생물 정보학, 시스템생물학 기법으로 노화 관련 인자들의 상호작용 네트워크를 분석하여 핵심 표적을 예측하고, 분자생물학적 분석 및 동물실험을 통해 그 기능을 검증하기도 한다. 검증된 표적에 대한 치료제 후보 물질 발굴에는 가상 스크리닝, 분자 도킹 시뮬레이션, 인공지능 기반 약물 설계 등 컴퓨터 기반 신약 발굴 기술이 활용된다.

아울러 약물의 체내 동태와 독성을 예측 평가하는 ADMET(Absorption, Distribution, Metabolism, Excretion, Toxicity) 분석, 약효 평가를 위한 단백질 활성 측정, 세포 및 동물 약효시험 등을 통합적으로 수행함으로써 보다 효율적이고 신뢰도 높은 항노화 신약개발 프로세스를 구축해 나가고 있다. 이러한 다학제 간 융합 연구를 통해 기존에는 수십 년이 걸리던 신약개발 과정을 빅데이터 및 인공지능 기술로 혁신함으로써, 노화 제어와 건강수명 연장을 위한 새로운 치료제 개발이 가속화될 것으로 기대된다.

7) 유전자 조절을 통한 노화제어

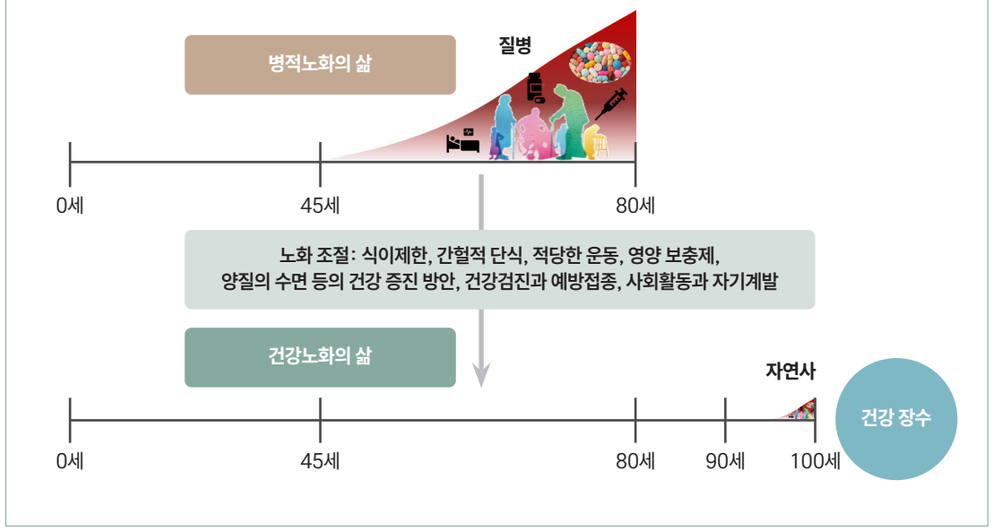
노화 과정은 매우 복잡한 유전자 네트워크에 의해 조절된다. 그 중에서도 노화 제어를 위한 핵심 표적 유전자로는 다음과 같은 것들이 있다.

① Sirtuin 유전자(SIRT1-7), ② mTOR(Mammalian Target of Rapamycin), ③ AMPK(AMP-activated protein kinase), ④ FOXO(Forkhead box O), ⑤ NF-κB(Nuclear Factor-κB) 전사인자, ⑥ Klotho 단백질 등이 있으며, 이 외에도 p53, IGF-1, Nrf2(Nuclear factor erythroid 2-related factor 2) 등 다양한 유전자들이 노화조절에 관여한다. 이들 유전자를 활성화 또는 억제함으로써 노화 과정을 조절할 수 있을 것으로 기대한다. 하지만 인위적 유전자 조작은 안전성 문제가 있어 아직 제한적이다. 현재는 식이요법(식이제한, 간헐적 단식 등), 생활습관 개선, 약물(레스베라트롤, 라파마이신 등) 등을 통해 간접적으로 접근하는 것이 보다 현실적이다. 향후 노화조절 유전자에 대한 심층적 이해를 통해 안전하고 효과적인 제어 기술이 개발되기를 기대한다.

사 맺음말

건강한 노화를 위하여 개인 차원에서 앞에 언급한 것들을 포함한 다른 건강노화 전략들을 종합적으로 정리하면, ① 균형 잡힌 소식 식단, ② 규칙적인 운동, ③ 영양보충제 섭취(비타민 C, D, 오메가-3 지방산, 유산균, 세놀리틱스 등), ④ 충분한 수면과 스트레스 관리, ⑤ 금연 및 적정 체중 유지, ⑥ 정기적 건강검진과 예방접종, ⑦ 활발한 사회활동 및 인간관계 유지, ⑧ 지속적인 배움과 자기계발 등이 있다(<그림4.3>).

그림 4.3 건강노화 전략을 통한 건강 장수 이룩하기



출처: 부산대학교 정해영(2004).

개인 차원의 노력 외에도 지역사회와 국가 차원의 사회적 지원 체계도 필요하므로, 건강한 노화를 위해서는 신체, 정신, 사회적 측면을 모두 고려한 통합적 접근이 필요하다. 그러므로, 지역사회와 국가 차원에서 건강노화를 지원하기 위해서는 ① 노인 건강증진 프로그램 및 시설 확충, ② 노인 돌봄서비스 확대, ③ 노인 친화적 생활환경 조성, ④ 노인 일자리 및 사회활동 지원, ⑤ 연령통합 문화 조성 및 인식 개선, ⑥ 노인 의료비 지원 및 건강보험 강화 등의 노력이 필요하다. 지역과 국가가 정책과 재정을 통해 사회안전망을 구축하고, 제도적으로 노인의 건강하고 활기차며 존엄한 생활을 보장해야 한다. 개인과 가족의 노력도 중요하지만 사회적 노력이 함께해야 진정한 신체적·정신적·사회적 건강노화가 가능하다.

특히 건강노화를 위한 의료기술과 바이오산업의 발전은 건강수명 연장에 직결되는 핵심 동력이 될 것이다. 정밀 의료, 맞춤형 건강관리 등 첨단 의료기술의 발전과 더불어 효과적인 예방, 조기진단, 치료법 개

발이 중요한 과제이다. 이와 함께 건강기능식품, 웰니스(wellness) 관광 등 고령 친화 산업 육성을 통해 노년기 삶의 질 향상과 사회경제적 기회 창출도 이루어져야 한다.

건강노화는 개인의 행복한 노후를 넘어 지속 가능한 초고령사회를 위한 핵심 과제이다. 건강노화에 대한 사회 구성원 모두의 관심과 노력, 그리고 과학기술과 의료, 복지, 산업 등 각 분야의 혁신과 협력을 통해 모든 세대가 함께 누리는 건강하고 활기찬 백세시대를 만들어가야 할 것이다. 우리 사회의 역량을 모아 건강노화 시대를 착실히 준비해 나간다면, 초고령사회는 결코 두려운 미래가 아닌 모두가 기대하는 희망찬 내일이 될 것이라 믿는다.

참고문헌

정해영(2004). 건강하게 오래 사는 비결 -현대과학이 밝혀낸 21세기의 불로초-, 신일상사.

한림원 기획정책위원회(2023). 2023년도 기획정책위원회 활동 보고서, 한국과학기술한림원.

홍선미(2023). 성공적인 건강노화 (Healthy aging)를 위한 노인 대상 지역사회 통합돌봄서비스 전달체계의 과제, NARS 정책연구용역 보고서, 국회입법조사처.

Chung, H. Y.(2021). The Effect of Calorie Restriction and Intermittent Fasting on Health and Disease, Nutrients (MDPI).

Harris, J. R. & Korolchuk, V. I.(2023). Biochemistry and Cell Biology of Ageing: Part IV, Clinical Science, Springer.

津田謹輔(2006). 건강과학: 알아 두고 싶은 예방의학, 신일상사.

PART 4

4

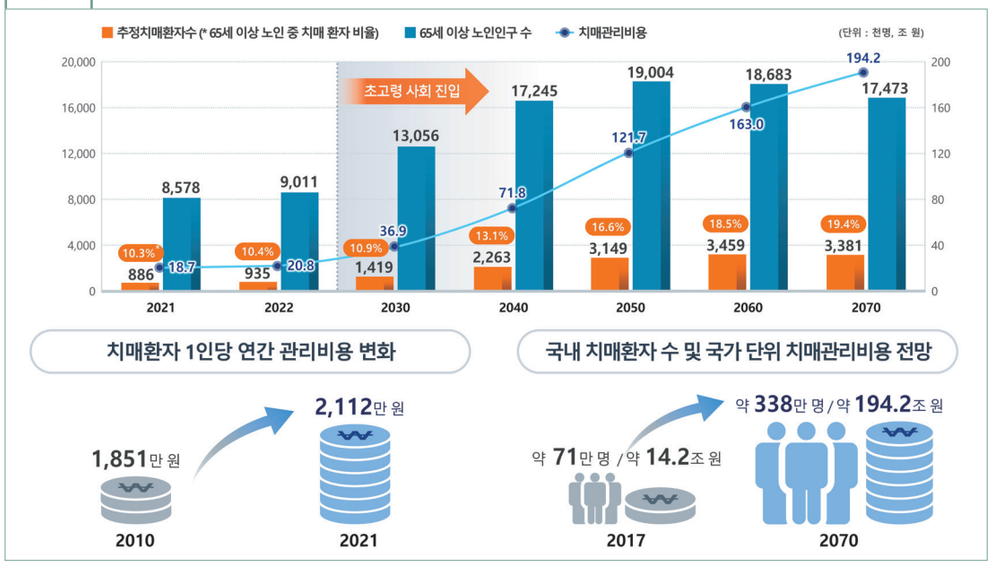
초고령사회에 대비한 치매의 과학기술현황 및 발전 방향

묵인희
서울대학교 의과대학 교수

가 들어가는 말

치매는 단순한 기억력 저하를 넘어 일상생활에 큰 영향을 미치는 심각한 질환이다. 주로 65세 이상 노인층에서 발생하지만, 최근에는 40~50대에서 발병하는 초로기 치매 발병률이 지속적으로 증가하면서 치매 유병 연령층이 점차 확대되고 있다. 치매의 주요 증상으로는 기억력 저하, 인지기능 저하, 판단력 손상, 성격 변화 등이 있으며, 이로 인해 독립적인 생활이 어려워진다. 치매는 장기적으로 다양한 위험요인이 누적되어 발병하는 만큼 횡적 연구와 종적 추적 연구의 복합적인 활용이 중요하다. 치매 발병 이후에는 서서히 증상이 악화되며 환자의 독립적인 생활이 불가능하게 진전된다. 그러므로 현재 치매 환자에게 처방되는 증상 완화제보다는 원인을 치료할 수 있는 원인 치료제의 개발과 보급이 시급한 상황이다. 조기 발견하여 치료를 통해 발병 시기를 늦출 수 있다면 장기적인 의료비용과 간병비용을 줄일 수 있다.

그림 4.4 국내 추정치매환자 추이(2021~2070)



출처: 중앙치매센터(2023).

1) 고령화 사회 진입으로 고위험 치매환자비율 급등

2015년부터 2021년까지 7년간 65세 이상 치매상병자수는 477,604명에서 890,002명으로 53.5%가 증가하였으며, 진료비는 1조 6천억 원에서 약 5조 4천억 원으로 29.1% 증가하였다. 치매 관리 비용은 2021년 기준 치매 환자 연간 약 18조 7천억 원으로 추정되며 2040년에는 약 56조 9천억 원까지 증가할 것으로 예측한다. 또한 치매상병자 진료비는 2021년 기준 1인당 약 3백만 원으로 집계되며 전체 치매상병자 972,436명의 총진료비는 약 2조 8천억 원으로 조사된다.

2) 치매의 종류 및 증상

치매를 원인 질환에 따라 분류할 경우, 알츠하이머성(Alzheimer's Disease, AD) 치매, 혈관성 치매(Vascular Dementia, VaD), 루이소체 치매(Lewy Body Dementia, LBD), 전두측두엽 치매(Fronto Temporal Dementia, FTD), 기타 원인에 따른 치매로 구분한다. 알츠하이머성 치매가 전체 치매 환자의 70% 이상을 차지하고 있으므로 알츠하이머성 치료제에 관해서 구체적으로 언급하고자 한다.

표 4.1 원인 질환에 따른 치매 종류

치매 종류	내용
알츠하이머 (AD)	• **정의**: 아밀로이드 베타(Amyloid-β, Aβ)와 타우(tau) 단백질이 비정상적으로 변형, 녹지 않는 덩어리를 형성하여 신경세포 기능을 훼손하고 염증을 일으켜 세포를 죽게 하는 질병 • **특성 및 증상**: 기억 손상, 점진적 진행, 조기 발견하면 치료제로 중증도 진행 지연 가능
혈관성 (VaD)	• **정의**: 뇌혈관 질환(동맥 경화 등)에 따른 뇌졸중, 뇌경색 등 뇌 손상이 발생한 이후 생기는 치매 • **특성 및 증상**: 기억 손상이 적고 집중력 저하, 감정둔화, 단계적 진행이 가능, 위험요인을 관리하면 예방 가능
루이소체 (LBD)	• **정의**: 신경세포 내 단백질인 알파-시뉴클린(alpha-synuclein)이 비정상적 덩어리(lewy body)를 이루어 대뇌에 광범위하게 분포하는 치매 • **특성 및 증상**: 인지능력 변화, 파킨슨병 환시(실제로 존재하지 아니한 것을 마치 보이는 것처럼 느끼는 환각 현상을 뜻하는 용어)
전두측두엽 (FTD)	• **정의**: 유전성 장애 또는 알 수 없는 이유로 뇌의 전두엽 또는 측두엽이 손상되어 발생하는 치매 • **특성 및 증상**: 성격 및 감정 변화(무감동증, 극한 초조증), 언어능력 감소, 탈억제

출처: Prince et al.(2014) 재구성.

나 알츠하이머성 치매 치료제 관련 기술 동향

1) 현재 치료제의 한계

현재 환자에게 사용되고 있는 알츠하이머성 치매 치료제는 증상 완화에 중점을 두고 있으며, 근본적인 치료는 이루어지지 않고 있다. 알츠하이머병의 원인을 근본적으로 해결할 수 있는 새로운 치료제의 개발이 절실한 상황이다.

표 4.2 치매 증상 완화 치료제 동향

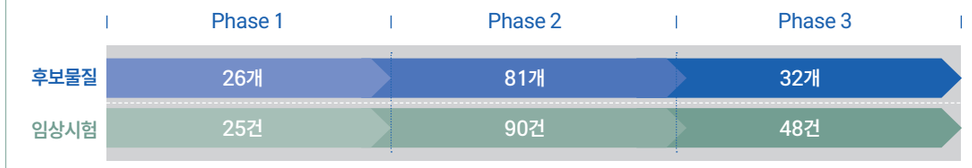
구분	치료제	약물 종류	동향
증상 완화 치료제	메만틴 (memantine)	NMDA 수용체 길항제 (N-methyl-D-aspartate receptor antagonists)	• 아밀로이드 플라크(plaque)와 신경 섬유 다발 근원적 제거 불가
	도네페질 (donepezil)	아세틸콜린에스테라아제 억제제 (acetylcholinesterase inhibitors)	• 저렴한 가격, 주 1회 투여로 높은 시장점유율 • 새로운 경피 제형의 도네페질 치료제인 미국 코리엄의 애드라리티(adlarity)가 출시
	도네페질/메만틴 복합제	NMDA 수용체 길항제/ 아세틸콜린에스테라아제 억제제	• 단독요법에 비해 명확한 이점 부족

출처: Howard et al.(2012); 정서연·이혜재(2022) 활용 및 수정.

2) 알츠하이머병 원인 치료제

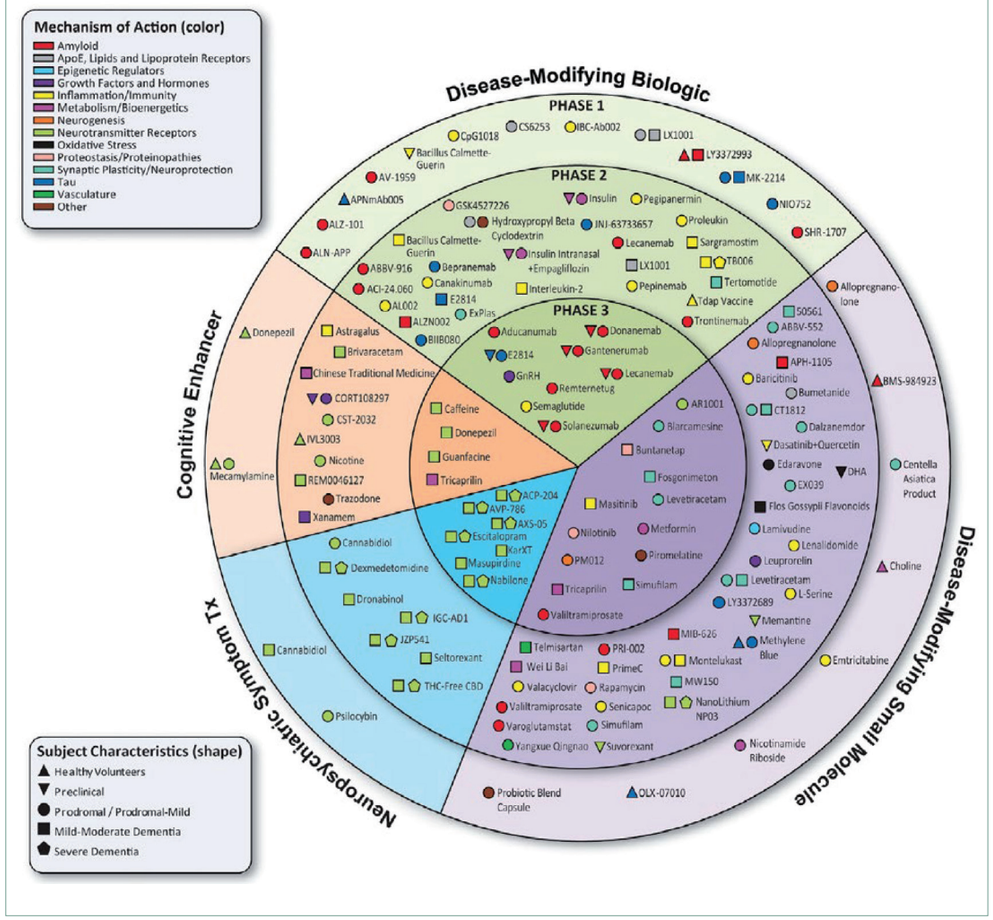
알츠하이머병의 대표적 병리학적 특징으로 아밀로이드 베타(Aβ) 단백질의 응집으로 인해 생성되는 아밀로이드 플라크와 변성된 타우단백질이 실타래처럼 엉키는 타우 응집체가 알려져 있다. 이러한 기전 이외에도 신경 염증과 면역반응, 대사질환 연관, 신경세포 보호, 혈관질환 관련 등 다양한 기전의 치료제 개발이 활발히 진행되고 있다. 2024년 1월 기준으로 알츠하이머병 치료제 개발을 위해 전 세계에서 127개의 후보물질을 대상으로 164건의 임상시험을 진행 중이다. 현재 개발된 알츠하이머병 원인 치료제는 항체 치료제가 유일하다. ApoE4의 유전자를 가진 환자나 증상이 많이 진행된 환자는 제한된 인지기능 개선 효과를 보이고, 일부 환자에서 약물 부작용이 발생할 수 있다. 장기 사용을 해야 하므로 부작용과 효능에 관한 연구는 추후 꼭 해야 할 연구과제이다. 특히 새로운 항체 치료제는 비용이 높아 효능 대비 비용을 생각할 때 널리 사용되기 어려울 수 있다.

그림 4.5 글로벌 알츠하이머 치료제 개발 파이프라인



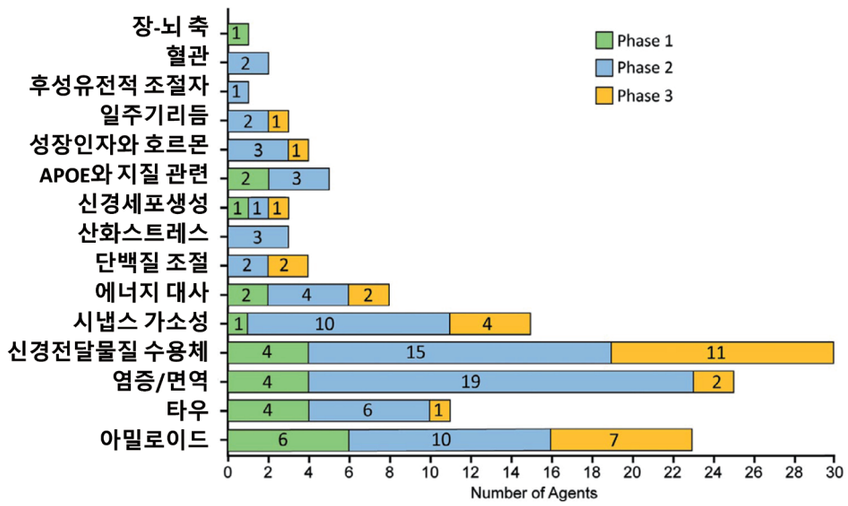
출처: Cummings et al.(2024).

그림 4.6 2024년 알츠하이머병 신약 개발 임상시험 현황



출처: Cummings et al.(2024).

그림 4.7 임상시험 단계별 약물 작용 기전 메커니즘



출처: Cummings et al.(2024).

아밀로이드 베타(Aβ) 타겟 항체 치료제

아밀로이드 베타(Aβ) 타겟 항체 치료제로는 아두카누맙(aducanumab)과 레카네맙(lecanemab)이 있다. 아두카누맙은 2021년 6월 미국 식품의약국(Food and Drug Administration, FDA)에서 최초로 승인된 알츠하이머형 치매 원인 치료제로, 아밀로이드 베타를 뇌 내에서 제거하는 데 초점을 맞추고 있는 항체 치료제이다. 아밀로이드 베타는 알츠하이머병의 주요 원인 물질 중 하나로 여겨지며, 이를 제거함으로써 병의 진행을 늦출 수 있다. 아두카누맙의 등장은 치매 치료의 새로운 전환점으로 기대되었으나 현재는 부작용과 효능의 문제로 판매가 중단된 상태이다.

레카네맙은 아밀로이드 베타를 표적으로 하는 또 다른 항체 치료제이다. 이 약물은 초기 알츠하이머병 환자를 대상으로 한 임상시험에서 인지기능 개선 효과가 27%로 긍정적인 결과를 보였으며, 아밀로이드 플라크의 축적을 70% 이상 감소시킨다. 2024년 5월에 우리나라 식약처에서도 승인을 받아서 국내 환자에게 처방할 수 있는 길이 열렸다. 하지만, 여성과 아시아 인종에서의 효능은 아직 적절하게 임상시험이 되어있지 않고 아포지단백질 E의 e4 유전인자를 가진 사람에게서 뇌부종과 같은 부작용 문제가 계속 대두되고 있어 실제로 임상에 사용되는 것은 상황을 주시해야 할 것이다.

아두카누맙과 레카네맙 후속으로 아밀로이드 베타를 타겟으로 하는 항체 치료제의 파이프라인은 많이 존재하고 있다.

표 4.3 FDA 승인 및 유망 알츠하이머병 치매 치료제

구분	Lecanemab (Leqembi)	Aducanumab (Aduhelm)	Donanemab (Kisunla)	Trontinemab
승인 여부	'23 美, 日 승인 '24 中 승인 '24 한국 승인	'21 가속 승인 유럽 승인 실패 '24 생산·판매 중단	'24 美 승인	임상 2상 진행 중
개발사	Esai / Biogen	Biogen	Eli Lilly	Roche
인지기능 저하 감소효과	27%	22%	35%	평가 필요
투여 경로	정맥주사	정맥주사	정맥주사	정맥주사
항원 인식 부위	Protofibril Aß	Aggregated Aß	Amyloid plaque	Aß aggregation
치료제 타입	항체치료제	항체치료제	항체치료제	항체치료제 (+Brain Shuttle)
ARIA-E 비율 ARIA-H 비율	12.6% 14.0%	35.0% 33.7%	26.7% 30.5%	7% 7%

출처: 각 회사의 발표자료, Clinicaltrials.gov(2024).

타우 단백질 표적 치료제

타우 단백질은 알츠하이머병의 또 다른 주요 병리다. 여러 연구팀이 타우 단백질의 축적을 억제하거나 제거하는 치료제를 개발 중이다. 이러한 치료제는 아밀로이드 베타와는 다른 메커니즘을 통해 치매의 진행을 막을 수 있을 것으로 기대된다.

유전자 치료

CRISPR-Cas9(CRISPR-associated protein 9) 같은 유전자 편집 기술을 활용하여 치매의 유전적 원인을 치료하려는 연구가 진행 중이다. 또한 유전자 치료제의 일종으로 타깃 유전자를 AAV(Adeno-Associated Virus) 바이러스에 넣어서 뇌 내로 주입하는 방식의 연구도 진행하고 있다. 이러한 유전자 편집을 통해 치매를 유발하는 특정 유전자를 교정하거나 비활성화함으로써, 병의 진행을 근본적으로 막을 수 있는 가능성이 제시되고 있다.

줄기세포 치료

줄기세포 치료는 손상된 뇌세포를 재생시키는 접근 방식으로, 치매 치료에 새로운 희망을 불러일으키고 있다. 연구자들은 줄기세포를 이용해 손상된 신경 조직을 재생시키고, 인지기능을 회복시키기 위한 임상시험을 진행하고 있다.

3) 기술기반 치료법 개발

기술기반의 치료법은 비약물 치료, 뇌 자극 기술, 디지털 치료기기(Digital Therapeutics, DTx)가 있다.

비약물 치료

비약물 치료로서 인지 행동 치료와 생활방식 개입 등을 들 수 있다. 인지 재활 프로그램에는 인지기능을 자극하고 유지하기 위한 다양한 활동이 포함되며 인지 훈련의 하나인 특정 인지기능(기억력, 주의력 등)을 향상시키기 위한 훈련 방법 등이 존재한다. 생활방식 개입은 누구나 관심을 가지고 실행할 수 있는 것으로서 신체활동과 영양 관리가 있다. 규칙적인 운동이 인지기능 유지에 긍정적인 영향을 미치며 지중해식 식단 등 특정 식단이 치매 예방에 도움이 될 수 있다는 연구결과도 있다. 비약물 치료의 효과는 환자마다 다르며, 연구 결과가 일관되지 않은 경우가 많다. 또한, 전문적인 인지 재활 프로그램이나 고가의 디지털 치료법은 모든 환자에게 접근하기 어려울 수 있다.

뇌 자극 기술

반복적 경두개 자기자극(Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, rTMS) 기술은 비침습적으로 뇌의 특정 부위를 자극하여 인지기능을 개선하려는 방법이다. 또한, 심부 뇌 자극(Deep Brain Stimulation, DBS) 기술은 전극을 뇌에 이식하여 특정 뇌 영역을 자극하는 방법으로, 주로 파킨슨병 치료에 사용되지만 치매 치료에도 적용 가능성을 연구 중이다. 다만 뇌 자극 기술은 고도의 기술적 장비와 전문 지식이 필요하며, 비용이 많이 들고 치료 효과에 대한 연구결과가 아직 부족한 상태이다.

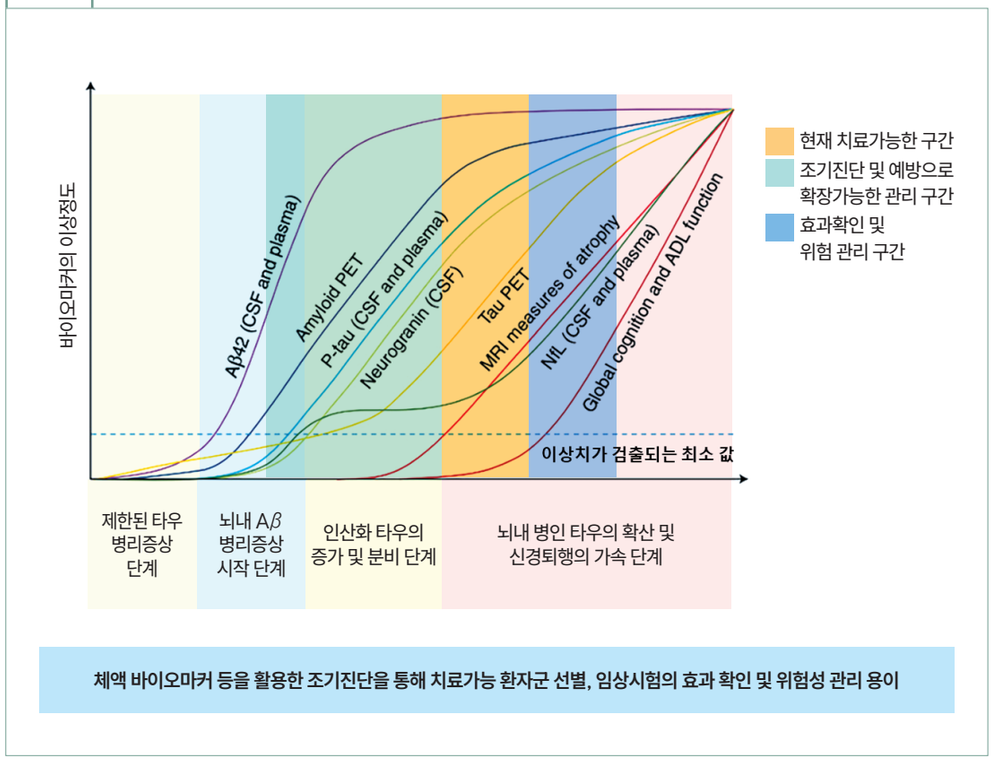
디지털 치료기기

인지 게임과 애플리케이션을 일컫는 기술로서 컴퓨터와 스마트폰을 이용한 인지 훈련 프로그램이 개발되고 있으며, 일부는 긍정적인 효과를 보이고 있다. 뇌 자극 기술과 디지털 치료기기는 아직 연구 초기 단계에 있으며, 장기적인 효과와 안전성에 대한 충분한 데이터가 부족하다.

다 알츠하이머병 조기진단의 필요성 및 방법

알츠하이머병의 조기진단은 치료와 관리에 매우 중요하다. 증상이 발현하기 10~20년 전부터 뇌병리가 변화하기 시작하므로 생체표지자(biomarker)를 이용하여 알츠하이머병을 조기에 진단하고 예방, 치료, 관리에 들어가는 것이 중요하다. 치매 치료의 성공률을 높이고 환자나 가족의 부담을 경감할 수 있는 방법이므로 다양한 생체표지자를 발굴하려는 노력은 꼭 필요한 연구 분야이다. 현재는 혈액, 뇌척수액, 이미징 기술 등을 활용하여 치매를 더 일찍 진단할 수 있는 방법을 개발하고 있다. 이러한 조기진단 기술은 환자들이 더 빠르게 치료를 받을 수 있도록 도움을 주며 치료 효과를 극대화하기 위해 반드시 필요하다.

그림 4.8 알츠하이머병 바이오마커의 현황 및 발전 방향

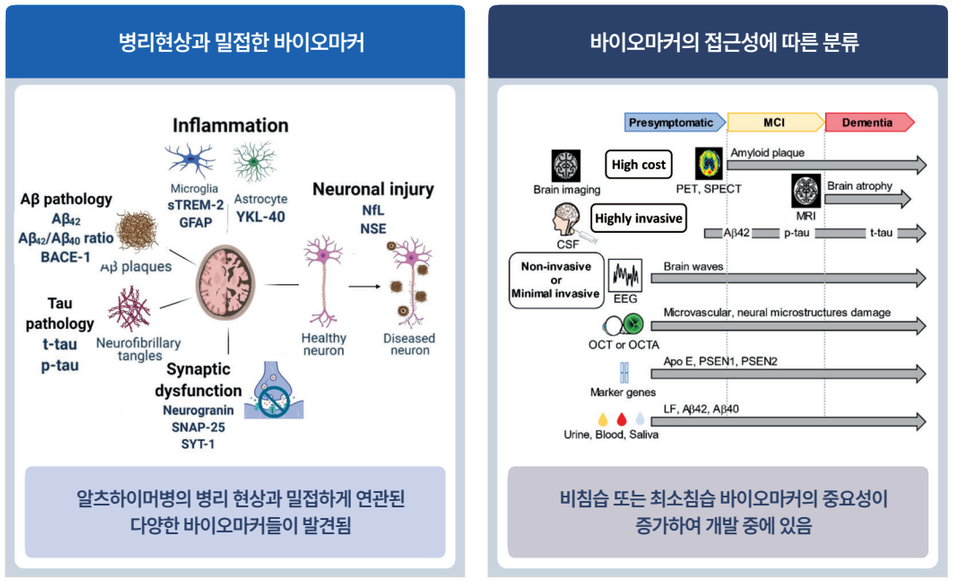


출처: Hansson(2021)에서 수정.

1) 알츠하이머병 바이오마커 관련 기술 동향

알츠하이머병의 병리 현상과 밀접하게 연관된 다양한 바이오마커들이 발견됨에 따라 비침습 또는 최소침습 바이오마커의 중요성이 증가하여 조기진단을 위한 다양한 개발이 진행되고 있다.

그림 4.9 알츠하이머병 관련 바이오마커



출처: Gunes et al.(2022).

유전적 위험인자

95% 이상의 치매 환자는 후발성 치매(Late-Onset Alzheimer's Disease, LOAD)로 유전되지 않지만 형제·자매에서 치매가 발생하면 이완될 확률이 2배 정도 높은 것으로 파악된다.

ApoE 유전자 타입은 ApoEε2, ApoEε3, ApoEε4 세 가지 동형질체(isoforms)를 가지는 지질결합단백질(lipid-binding protein)로 구분되며 ApoEε4[1] 타입을 가진 사람은 그 외 경우에 비해 최소 2배에서 많게는 5배 이상 치매 발병률이 높은 것으로 나타난다. 광범위한 게놈 연관성 연구를 통해 후기 발병 알츠하이머의 증가와 관련된 유전적 위험인자 ApoE 유전자 타입을 확인하였다.

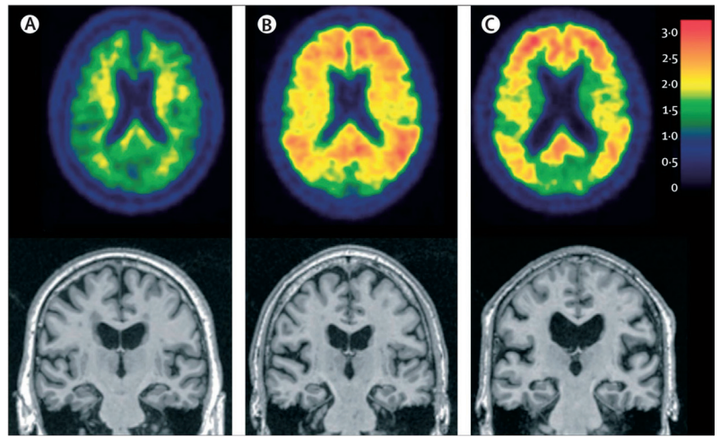
전장유전체분석(Whole Genome Sequencing, WGS)은 인간의 30억 개에 달하는 모든 염기서열을 한 번에 분석하는 분석법으로, 해마다 분석에 소요되는 시간이 빨라지고 있으며 매년 35페타바이트(petabyte)이상의 게놈 데이터가 생성되어, 범용적 치매 유전 원인 규명을 위한 대조군으로 활발히 활용되고 있다.

1 ApoE ε4는 경도 인지 장애(Mild Cognitive Impairment, MCI)에서 알츠하이머(AD)로의 진행을 결정하는 데 일부 제한적인 예측값을 갖는 것으로 나타내며, 치매 발생 위험을 증가시키는 중요한 유전적 위험인자로 알려져 있다.

영상 바이오마커

아밀로이드 양전자방출단층촬영(Positron Emission Tomography, PET) 뇌 영상법은 치매가 진행될 시 환자 뇌에서 아밀로이드 베타가 증가하는 치매 병리를 반영하여 치매 환자 진단에 활용하는 영상 바이오마커이다. 포도당 유사체(Fluorine-18 Fluoro Deoxy Glucose, F-18 FDG)를 이용해 뇌의 당 대사 변화를 영상화하여 치매 진단에 이용하는 FDG-PET 검사는 치매 환자의 경우 뇌에서 포도당 대사 정도가 떨어지는 것을 이용하여 진단한다. 또한 다양한 치매 병리 바이오마커 중 하나인 타우 단백질을 타겟으로 영상 이미징하여 진단에 활용하는 tau-PET이 있다.

그림 4.10 알츠하이머병 영상 바이오마커 비교



(A)정상인, (B)아밀로이드 베타가 높은 정상인, (C)치매 환자 비교 영상 바이오마커 이미지

출처: Jack et al.(2010).

뇌척수액 바이오마커

알츠하이머병 환자는 뇌신경 퇴화로 인해 뇌신경세포가 사멸되어 세포 밖으로 타우 단백질이 흘러나와 뇌척수액(Cerebrospinal Fluid, CSF)에서 그 양이 증가하므로, CSF-Aβ 및 CSF-tau와 p-tau(phosphorylated tau) 양을 측정하여 치매를 진단하는 마커가 개발되었다. 그러나, 뇌척수액을 이용한 알츠하이머병 진단은 환자 척추를 천공하는 요추천자(lumbar puncture)를 통해 뇌척수액을 얻어야 하는 침습적인 방법으로 치매 환자 및 보호자에게 부담으로 작용한다.

혈액 바이오마커

환자 척추를 통해 뇌척수액을 얻는 위험한 침습적 방법의 대안으로 다른 체액(혈액, 침, 눈물, 소변 등)을 이용한 진단법 개발이 요구되어 혈액(혈장, 혈청)에서 아밀로이드 베타 농도를 측정하는 혈액 바이오마커 진단법 연구가 추진 중이다.

인공지능(Artificial Intelligence, AI)과 빅데이터를 이용한 다차원 모델

다중 바이오마커 데이터와 병인학 경로를 통합하는 다차원 모델은 '아밀로이드 연쇄 가설(amyloid cascade hypothesis)'에 대한 임상 연구가 최신 치매 연구 트렌드이다. AI와 빅데이터 분석은 치매의 조기진단과 예측에 큰 도움을 줄 수 있다. 대규모 데이터 분석을 통해 초기 치매의 미세한 징후를 식별하고, 환자 개개인에게 맞춤형 치료를 제공할 수 있는 가능성이 열리고 있다.

타우 단백질을 이용한 바이오마커 개발 연구

뇌척수액의 타우 단백질 증가는 알츠하이머 전환될 가능성이 있는 경도인지장애(Mild Cognitive Impairment, MCI) 환자의 바이오마커로도 사용되고 있다.

그림 4.11 다양한 알츠하이머병 체액 바이오마커 측정 기술 현황



출처: Fujirebio, Roche 홈페이지 및 기사(2024).

라 국외 주요기관 정책 동향

1) 세계보건기구(WHO)

세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 치매 환자의 급격한 증가로 인해 국제적인 공동 대응의 중요성을 강조하며 국가별 주요 치매 대응 전략의 효과적인 시행을 지원하였다. WHO는 2017년 '국제 치매 공동 대응 계획'을 발표하며 치매 환자와 돌봄자의 삶의 질 향상과 사회적 존엄의 존중을 목표로 국가적·사회적 부담 감소에 주력하고 있다. 또한 국제치매관측소(Global Dementia Observatory, GDO)[2] 데이터 포털을 구축하여 35개의 주요 치매 지표에 대한 WHO 회원국의 데이터 수집을 통해 국제 치매 정보 공유 허브로 활용하고 빅데이터를 지속적으로 축적하고 있다. GDOKE 플랫폼은 글로벌 치매 행동 계획의 이행 지원 및 자원을 공유할 수 있는 공간을 제공하고, GDO 데이터 포털을 보완하여 빅데이터 수집 영역을 확장하고 있다. 또한 포괄적 검토 프로세스를 통해 글로벌 치매 조치 계획의 7가지 영역을 포괄하는 광범위한 전문 지식을 공유한다.

2) 경제협력개발기구(OECD)

경제협력개발기구(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)는 치매 정책의 필요성을 제기하고, 다양한 정책연구보고서를 통해 회원국의 보건정책 입안과 수립에 기여하고 있다. 호주, 프랑스, 독일, 미국, 일본, 스페인, 스웨덴, 영국의 치매 관리현황을 비교 및 분석한 'Dementia Care in 9 OECD Countries: A Comparative Analysis' 보고서를 발행하여 치매 정책 수립, 근거 등 제공하고 있다. 'Health at a Glance'는 매년 정기적으로 발간하는 보고서로, 2021년에는 OECD 회원국 간의 치매 유병률, 진단율, 관리 및 치료에 대한 정책 등을 비교 및 분석하여 치매 극복 활성화에 기여하고 있다.

3) 알츠하이머 연맹(AA)

알츠하이머 연맹(Alzheimer's Association, AA)은 미국 내 가장 큰 규모의 치매 관련 기관으로, '치매 없는 세상'을 비전으로 알츠하이머 연구와 지원, 케어, 치매 예방 등 미국 내의 치매 관련 다양한 활동을 지원한다. 'Alzheimer's Disease Facts and Figures' 연간보고서 발표를 통해 미국 내 치매 환자 현황과 치

2 글로벌 치매 관측소로 WHO 회원국의 치매 관련 데이터와 지식을 교환하고 치매 관련 각종 통계와 자료에 접근할 수 있는 플랫폼으로의 개발을 진행하고 있다.

매 비용 부담 등의 현황을 공개한다. 또한, 알츠하이머 연맹 국제회의(Alzheimer's Association International Conference, AAIC)를 개최하여 알츠하이머의 현재와 미래를 조명하고 있다. AA는 국제 콘퍼런스를 통해 매년 기초 과학-임상 연구자, 차세대 연구자, 임상의 등과 알츠하이머병 진단, 예방, 치료 및 개선 방법에 관한 연구 결과를 공유하며 치매 연구개발 촉진에 기여하고 있다.

마 국가 차원에서의 치매 대비를 위한 정책 및 제도적 지원

1) 치매 예방 및 조기진단 지원

치매 인식 제고 캠페인

치매의 위험성과 예방 방법에 대한 대중의 인식을 높이기 위해 다양한 매체를 통해 교육 및 홍보 캠페인을 실시한다. 현재는 치매관리종합계획(2021~2025년까지)에 근거하여 치매에 관한 인식 및 관리를 지원하고 있다.

지역사회 프로그램

지역 보건소와 연계하여 치매 예방을 위한 워크숍, 세미나, 건강검진 그리고 예방 프로그램을 운영한다. 정기적인 치매 예방 교육과 운동 프로그램 등을 통해 지역주민의 참여를 유도한다.

조기진단 프로그램

무료 치매 검진 서비스는 55세 이상 고령자를 대상으로 2년에 1회 간단한 혈액검사 및 인지기능 검사 등의 무료 치매 검진을 실시하여, 치매를 조기에 발견하고 치료할 수 있도록 지원한다. 검진 결과에 따라 필요시 상급병원과의 연계를 지원한다. 그리고 검진 및 환자 데이터베이스 구축을 통해 치매 검진 결과를 체계적으로 관리하고 분석할 수 있도록 국가 차원에서 치매 환자의 통계 데이터를 기반으로 예방 및 치료 전략을 수립한다. 이를 통해 지역별 치매 유병률과 위험요인을 분석하고, 맞춤형 예방 프로그램을 지원한다.

2) 치료 및 관리 지원

국립 치매 센터

치매 조기진단, 치료, 재활, 관리까지 통합적으로 제공하는 치매 전문 센터를 설립한다. 본 센터는 치매로 의심되는 환자와 가족이 원스톱으로 필요한 다양한 서비스를 받을 수 있도록 하며, 최신 치료법과 예방 프로그램을 제공하여 치매 환자 유병률을 낮추고 삶의 질을 향상시킬 수 있다.

케어 코디네이터

치매 환자와 그 가족을 위해 의료서비스, 사회복지서비스, 간병서비스를 연계하고 조정하는 케어 코디네이터를 배치한다. 케어 코디네이터는 환자의 상태를 주기적으로 모니터링하고, 필요한 서비스를 제공받을 수 있도록 지원하며, 환자와 가족의 고충을 상담하고 해결책을 제시한다.

3) 연구 및 교육 지원

치매 연구 투자

2020년부터 보건복지부와 과학기술정보통신부가 공동으로 추진하고 있는 범부처 사업인 치매극복 연구개발사업을 확대 및 재편하여 보다 지속적이고 성과 도출이 가능한 연구 자금을 지원한다. 치매 원인 및 기전 규명, 조기진단 및 예측, 원인 치료 및 예방, 관리 등 연구에 대한 자금 지원을 확대하여, 혁신적인 연구와 기술개발을 촉진한다. 또한, 국내외 연구기관과의 협력을 강화하여, 치매 연구의 발전을 도모하고 연구 결과를 공유하여 빠른 연구 성과를 창출할 수 있도록 지원한다.

전문 인력 양성

연구에서부터 실제로 환자와 대면하는 의사, 간호사, 사회복지사 등 치매 관련 전문가를 위한 교육 프로그램을 마련하여, 최신 지식과 기술을 습득할 수 있도록 한다. 이와 같은 정기적인 치매 관련 학술 대회와 워크숍을 개최하여, 전문가들 간의 정보 교류와 협력을 촉진하도록 한다.

4) 정책적 지원

치매의 다양한 미래지향적 연구 및 활동을 위한 법적 제도를 마련한다. 치매 예방과 관리를 위한 종합적인 법적 제도를 마련하여, 국가 차원의 체계적인 지원을 보장하고 현재 시행되고 있는 노인복지법을 현 시점에 맞게 개정하여, 치매 환자와 그 가족에 대한 지원을 강화하고 보호할 수 있도록 한다.

정부의 역할 강화

국립치매센터를 독립적으로 설립하여, 치매 관련 연구 및 정책의 수립과 시행을 총괄하고 조정하도록 한다. 또한, 중앙 정부와 지방 정부 간의 협력을 강화하여, 지역별 특성에 맞는 치매 예방 및 관리 정책을 효과적으로 시행한다.

바 맺음말

치매는 단순한 질환을 넘어, 개인과 사회에 막대한 영향을 미치는 복합적 문제이다. 초고령사회로의 진입이 가속화됨에 따라 치매 문제는 더욱 심각해지고 있으며, 이에 대한 과학기술적 접근과 발전 방향은 매우 중요할 것이다. 본 보고서에서 다룬 치매의 정의, 현황, 치료제 개발 동향, 조기진단의 필요성과 방법, 그리고 국내외 주요 정책 동향을 종합해 볼 때, 우리는 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

첫째, 치매의 조기진단과 예방을 위한 체계적인 접근이 필요하다. 혈액, 뇌척수액, 이미징 기술 등을 활용한 바이오마커 연구는 조기진단의 중요한 열쇠이며, 이를 통해 치매를 더 일찍 발견하고 관리할 수 있는 방안을 모색해야 한다.

둘째, 근본적인 원인 치료제의 개발이 절실하다. 현재의 증상 완화 치료제는 치매의 진행을 늦출 수는 있지만, 근본적인 치료에는 한계가 있다. 아밀로이드 베타와 타우 단백질을 표적으로 하는 새로운 항체 치료제, 유전자 편집 기술, 줄기세포 치료 등 다양한 접근 방식이 연구되고 있으며, 이러한 기술의 발전과 실용화는 치매 극복에 중요한 역할을 할 것이다.

셋째, 비약물 치료와 생활방식 개입 역시 치매 예방과 관리에 중요한 요소이다. 인지 재활 프로그램과 규칙적인 신체활동, 영양 관리 등의 생활습관 개선은 치매 예방에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다.

넷째, 국가와 사회의 체계적인 지원과 정책적 뒷받침이 필수적이다. 치매 예방과 관리를 위한 종합적인 법적 제도 마련, 연구 투자 확대, 전문 인력 양성, 지역사회 프로그램 강화 등이 필요하며, 정부와 민간의 협력이 중요하다.

치매는 더 이상 개인의 문제가 아닌 사회 전체가 함께 해결해야 할 과제이다. 지속적인 연구와 기술개발, 정책적 지원을 통해 치매 없는 사회를 만들기 위해 노력해야 할 것이다. 앞으로도 과학기술의 발전과 함께 치매 극복을 위한 우리의 노력은 계속될 것이다.

참고문헌

정서연 · 이혜재(2022). “Trends in the Consumption of Anti-dementia Drugs by Region, Provider Type, and Diagnostic Code in South Korea”, 약학회지, Vol.66 No.9, pp. 58~65.

중앙치매센터(2023). 대한민국 치매현황(Korean Dementia observatory) 2022, 중앙치매센터.

Cummings, J., Zhou, Y., Lee, G., Zhong, K., Fonseca, J. & Cheng, F.(2024). “Alzheimer’s Disease Drug Development Pipeline: 2024”, Alzheimer’s Association, Vol.10 No.2, e12465.

Gunes, S., Aizawa, Y., Sugashi T., Sugimoto, M. & Rodrigues, P. P.(2022). “Biomarkers for Alzheimer’s Disease in the Current State: A Narrative Review”, International Journal of Molecular Sciences, MDPI, Vol.23 No.9, p. 4962.

Hansson O.(2021). “Biomarkers for Neurodegenerative Diseases”, Nature Medicine, Vol.27 No.6, pp. 954~963.

Howard R., McShane R., Lindesay J., Ritchie C., Baldwin A., Barber R., Burns A., Dening T., Findlay D., Holmes C., Hughes A., Jacoby R., Jones R., Jones R., McKeith I., Macharouthu A., O'Brien J., Passmore P., Sheehan B., Juszczak E., Katona C., Hills R., Knapp M., Ballard C., Brown R., Banerjee S., Onions C., Griffin M., Adams J., Gray R., Johnson T., Bentham P. & Phillips P.(2012). “Donepezil and Memantine for Moderate-To-Severe Alzheimer's Disease”, New England Journal of Medicine, Vol.366 No.10, pp. 893~903.

Jack, C. R. Jr, Knopman, D. S., Jagust, W. J., Shaw, L. M., Aisen, P. S., Weiner, M. W., Petersen, R. C. & Trojanowski, J. Q.(2010). “Hypothetical Modelo of Dynamic Biomarkers of the Alzheimer's Pathological Cascade”, The Lancet Neurology, Vol.9 No.1, pp. 119~28.

Prince, M., Albanese, E., Guerchet, M., Priana, M. & Guerchet, M.(2014). World Alzheimer Report 2014, Alzheimer’s Disease International.

Fujirebio(2024). Fujirebio, Retrieved September 10, 2024 from (https://www.fujirebio.com/en)

Roche(2024). Roche, Retrieved September 10, 2024 from (https://www.roche.com/)

PART 4

5 초고령사회를 대비한 암관리 정책

서영준
서울대학교 약학대학 명예교수

가 들어가는 말

평균수명의 증가와 식생활을 포함한 생활패턴이 서구화되면서 우리나라에서도 암환자 수가 늘고 있으며, 각종 암의 발생률이나 그 양상 또한 바뀌고 있다. 대부분의 다른 선진국들과 마찬가지로, 암은 우리나라 전체 성인 사망요인 중 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 우리나라 국민들이 기대수명(83.6세)까지 생존할 경우 암에 걸릴 확률은 38.1%이며, 남자(80.6세)는 5명 중 2명(39.1%), 여자(86.6세)는 3명 중 1명(36.0%)에서 암이 발생할 것으로 추정된다. 참고로 미국의 경우는 남자 5명 중 2명(40.2%), 여자 8명 중 3명(38.5%)으로 예측하고 있다.

1970년대부터 발암유전자(oncogene)와 종양억제 유전자(tumor suppressor gene)의 발견으로 인체 암의 발생 및 진행 과정을 분자 수준에서 이해하는 데 일대 변혁이 있었다. 그럼에도 불구하고 지난 50여 년간 전반적으로 암의 발생률 및 사망률은 줄어들지 않았다.

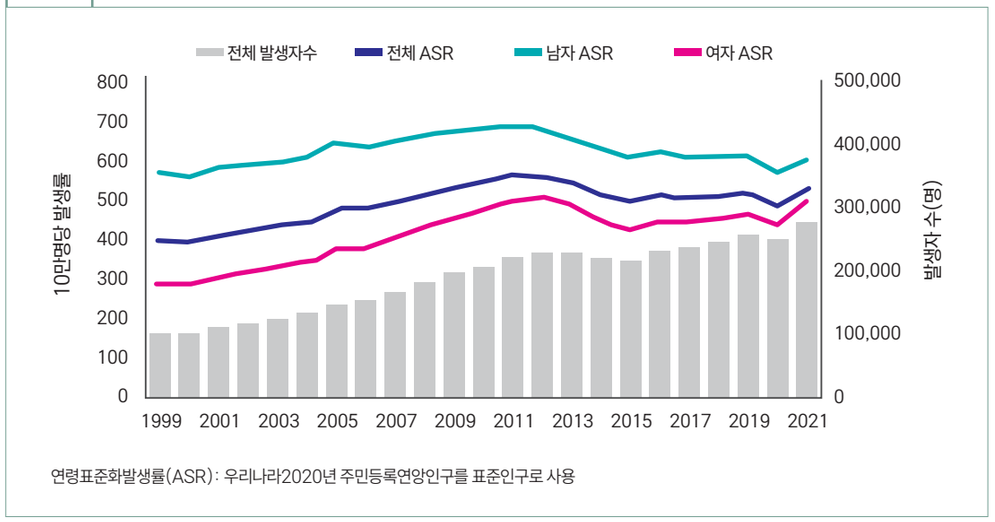
이제 암 극복을 위해 보다 근본적인 해결책이 필요하다. 이를 위해서는 암의 본질과 정체를 제대로 파악하고 그 원인과 발생, 진행, 전이 과정에 대한 식견, 그리고 암의 치료는 물론 검진을 통한 조기진단과 예방의 중요성에 대한 인식이 필요하다.

나 우리나라 암발생률 및 사망률의 변화 추이

여러 나라의 암발생률이나 사망률을 비교할 때, 대상 국가들의 인구수는 같지 않기 때문에 모집단 크기의 차이를 맞추기 위해 일반적으로 인구 100,000명당 발생 또는 사망자 수로 표현한다. 한편, 고령자들에게서 암의 발생 및 사망률이 통계분석 시 연령분포의 차이가 반영되어야 한다. 암발생률과 사망률은 일반적으로 연간 인구 100,000명당 연령 보정 발생률(age-adjusted incidence)로 표현된다.

보건복지부는 중앙암등록본부 및 지역암등록본부를 지정·운영하여 우리나라에서 진행되는 모든 암등록사업 자료를 통합한 국가 암발생 데이터베이스를 구축하였으며, 이 중 1999년 이후 악성암(이하 암) 등록자에 대한 발생통계를 산출해오고 있다. 2021년 암의 발생자 수는 총 277,523명이며, 남자는 143,723명, 여자는 133,800명으로 나타났다. 한편, 2021년 암의 조발생률[1]은 인구 10만 명당 540.6명(남자 561.7명, 여자 519.7명)이었으며, 연령표준화발생률[2]은 인구 10만 명당 526.7명(남자 596.7명, 여자 489.5명)이었다(<그림 4.12>). 이를 우리나라에서 전국 단위 암발생통계를 산출하기 시작한 1999년의 연령표준화 암발생과 비교하면, 연평균 3.3%의 증가 추세를 보였으나, 2011년부터 2015년까지는 연평균 -3.1%의 감소 추세를 보였고 2015년부터 최근까지는 유의한 증감 추세를 보이지 않았다. 주목할 점은 위암, 간암과 같은 한국형 호발암의 경우 발생률은 감소 추세를 보이는 한편, 유방암, 전립선암 등 서구형 암의 발생률은 지속적인 증가 추세를 보이고 있다는 사실이다.

그림 4.12 1999년부터 2021년까지 남녀별 국내 모든 암 연령표준화발생률 추이



연령표준화발생률(ASR) : 우리나라2020년 주민등록연앙인구를 표준인구로 사용

출처: 국가암정보센터(2024).

2021년 우리나라에서 가장 많이 발생한 암은 갑상선암이었으며, 이어서 대장암, 폐암, 위암, 유방암, 전립선암, 간암의 순으로 나타났다. 남자의 경우는 폐암, 위암, 대장암, 전립선암, 간암 순이었으며, 여자는 유방암, 갑상선암, 대장암, 폐암, 위암 순이었다.

1 조발생률: 해당 관찰 기간 동안 특정 인구 집단에서 새롭게 발생한 악성암 환자 수를 전체 인구로 나눈 값으로, 인구 100,000명당 암이 발생한 비율

2 연령표준화발생률: 연령구조가 다른 지역별 또는 기간별 암발생률을 비교하기 위해 각 연령군에 해당되는 표준인구의 비율을 가중치로 부여해 산출한 가중평균발생률

다 다단계 발암기전의 과학적 이해

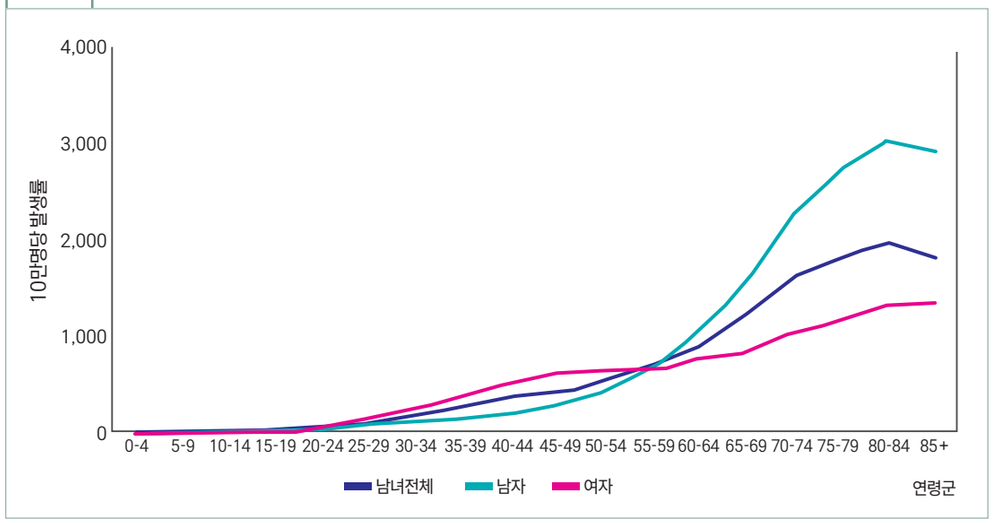
암의 발달에 돌연변이(mutation)가 중요한 역할을 담당한다는 사실은 널리 알려져 있으며, 실제로 암 조직의 90%에서는 체세포 유전자 돌연변이가 발견된다. 일반적으로 암을 유발하는 돌연변이는 화학물질, 방사선, 감염성 물질 등에 의해서 촉발되지만, 드물게는 자연발생적으로, DNA 복제 시 실수로, 또는 유전적으로 유발될 수도 있다.

암과 연루된 돌연변이는 주로 발암유전자(oncogene)와 종양억제유전자(tumor suppressor gene)에서 발생한다. 즉 자동차의 가속페달(accelerator) 역할을 하는 발암유전자의 과도한 활성화나 브레이크 역할을 하는 종양억제유전자의 기능 소실로 인한 세포증식 조절의 실패가 암발생을 초래하는 것이다. 암의 종류에 따라 관여하는 유전자들의 종류나 수가 다르긴 하나 일반적으로 특정 발암유전자들과 종양억제유전자들의 변이가 대개 20~30년에 걸쳐 여러 단계를 거치면서 축적되어 암이 발생한다. 이때 유전자의 발현에 간접적 영향을 미치는 후생유전학적 변화(epigenetic changes)도 관여하는 것으로 알려져 있다.

다단계 발암과정(multi-step carcinogenesis) 중 제1단계인 암유발 개시(initiation)는 발암물질이 DNA를 공격하여 돌연변이를 유발하는 비가역적 반응이며, 제2단계인 암유발 촉진(promotion)에서는 개시화된 세포가 빠르게 증식하여 양성암 상태로 전환되고, 가역적인 반응이다. 암유발 개시 단계만으로는 암이 발생하지 않으며 암발생을 촉진하고 유지하는 단계가 필요하다. 제3단계인 암진행(progression)은 양성 종양이 악성 종양으로 전환하여 다른 조직으로 전이되어 악성 종양의 특성이 증대되는 과정이다. 동물실험의 경우에는 발암기전의 각 단계를 분명하게 구별할 수 있지만, 실제 인체 발암 과정에는 이러한 단계에 관여하는 요인들이 동시에 오랫동안 지속되므로 각 단계를 구별하기가 쉽지 않다.

암의 발생이 오랜 시간을 두고 다단계로 진행되므로 발암물질에 노출되는 빈도가 증가하고, 이로 인한 암 관련 유전자 변이의 축적이 늘어나는 노년층에서 일반적으로 암발생률도 더불어 증가한다. 우리나라의 경우, 모든 암의 연령군별 발생률을 보면, 65세 이상에서의 암발생률은 2021년 기준 인구 10만 명당 1569명에 달하여 고령층에서 암발생이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다.

그림 4.13 2021년 모든 암의 연령군별 발생률



출처: 국가암정보센터(2024).

라 암치료 및 항암제 개발의 현황 및 한계

지난 수십 년 동안 암세포에서 나타나는 분자적·유전적 이상을 밝히는 데 괄목할 만한 발전이 이루어졌다. 이러한 연구를 통해 암화 과정에 관여하는 기전들이 밝혀지면서 궁극적으로 암진단은 물론 치료에 대한 혁신적인 전략이 도출될 수 있게 되었다. 암은 전이되기 전에 발견될 때 가장 치료하기 쉽다. 암이 진단된 후에, 전형적인 암치료의 목표는 정상 조직의 손상을 최소화하면서 암세포를 완전하게 제거하거나 파괴시키는 것이다. 이는 1차 암을 제거하기 위한 수술과 혹시라도 남아있는 암을 제거하기 위한 방사선 및 화학요법(약물), 또는 이 두 가지 방법을 함께 병용함으로써 수행된다.

약물을 사용하는 항암치료의 궁극적인 목표는 정상세포에는 해가 되지 않게 암세포를 사멸시키거나 증식을 제한하는 것이다. 대부분의 화학요법제는 DNA 복제 억제, DNA 손상, 세포분열 억제작용을 하는데, 이것은 암세포뿐만 아니라 정상세포에도 해롭다. 특히 암세포처럼 우리 몸에서 빠르게 재생되는 골수 조혈모세포, 모근세포, 점막세포 등도 동시에 항암제의 공격 대상이 된다. 그 때문에 항암제 치료를 받은 환자는 백혈구 수가 저하되어 세균감염이 발생하거나, 탈모가 되고, 구토, 설사 및 구내염으로 고통을 받게 되는 것이다.

이러한 부작용 외에 화학요법의 효과를 감소시키는 근본적인 문제점은, 지속적인 약물처리 후에 암세포가 항암제의 파괴 효과에 대한 내성을 획득하는 것이다. 특정 항암제로 암세포 대부분이 죽더라도, 최초 암종에 존재하던 소수의 약물 내성세포가 분열해서 약물에 완벽히 내성을 갖는 새로운 암을 형성할 수 있다. 또한 처음에는 약물에 내성을 보이는 세포가 없었지만, 유전적으로 불안정해지는 암의 경향성 때문에 돌연변이를 획득하여 치료 중에 약물 내성을 획득하기도 한다.

지난 20년간 특정 유전자의 돌연변이나 발현 변화가 암발생을 유발하는 것을 확인하는 과정에서 새로운 가능성, 즉 분자표적화(molecular targeting)의 길이 열렸다. 이것은 암세포의 증식에 중요한 단백질들을 표적으로 하도록 설계한 약이다. 특히 돌연변이 등으로 인해 과도하게 활성화된 발암유전자를 공격하는 표적항암제 개발이 1990년대부터 본격적으로 시도되었다. 그러나 발암유전자를 표적으로 개발된 항암제 역시 처음에는 암세포의 증식을 잘 억제하지만, 일정 시간이 지나면 암세포가 더 이상 약에 반응하지 않는 현상이 흔히 관찰된다. 이런 환자의 암세포 유전자를 조사해 보면 항암제의 공격을 피하면서 암세포가 성장하기 위하여 돌연변이 등 다양한 유전자 변화가 발생한다.

표적치료제를 사용함에 있어 발생하는 많은 비용이 문제가 될 수 있다. 현재 표적치료제는 종류에 따라서는 보험 적용이 안 되는 경우가 있으며, 이 경우 상당한 고가의 비용이 든다. 그러므로 표적치료제는, 효과가 높을 가능성이 있는 환자들에게만 선택적으로 투여함으로써 불필요한 의료비의 지출을 줄일 수 있을 것이다.

마 암세포의 특성 및 암발생에 대한 새로운 시각-진화론적 접근

유전적 균일성 및 동질성을 갖는 정상 조직과 달리 종양은 이를 구성하는 암세포의 복잡한 유전적 다양성과 다양한 형태학적 표현형으로 인해 종종 이질적인 형태로 묘사된다. 이질성(heterogeneity)을 갖는 악성 종양에는 항암제에 대해 서로 다른 민감도를 나타내는 다양한 암세포들이 존재한다. 이처럼 종양 내 이질성은 암환자의 약물 반응성 및 전반적인 치료 성적 등에 나쁜 영향을 미침으로써 효과적인 암치료에 장벽이 된다. 따라서 종양 내에 자리 잡은 암세포군(subclone)의 종류와 개별 암세포의 행동 패턴을 정확히 파악하는 것은 효과적 치료제 개발에 중요하며, 이는 개인 맞춤화된 정밀 의료 구현의 근간이 될 것이다.

암은 처음부터 유전적 다양성을 갖는다기보다는 진행되는 동안에 이질성을 획득하게 된다. 이미 악성 종양을 형성한 후에도 암은 역동적인 상태로 남아있으며 지속적으로 진화하고 있다. 이처럼 진행되는 진화가 항암제에 대하여 서로 다른 수준의 민감도를 보이는 암세포들로 구성된 이질적인 종양을 만들게 되는 것이다.

종양 이질성에 대한 발견을 통해 암발생을 진화하는 과정으로 광범위하게 정의하게 되었으며, 종양 발달과 성장 과정을 다윈 진화의 기본 원리로 설명하기도 한다. 하나의 세포가 암세포로 형질 변환되어가는 과정에서 여러 돌연변이가 주변 환경에 의해 진화를 반복하여 새로운 생물학적 특성을 갖는 암세포군을 발생시킨다. 암세포가 특정 기관에서 발생해 자라기 위해서는 종양미세환경(tumor microenvironment)에 적응해야 하고 주위 미세환경은 암세포가 자라도록 도와주어야 하는데 이 과정에서 소위 우성의 세포 집단이 선택되는 '적자생존의 법칙(Fittest of Survival)'이 적용된다. 즉, 다윈의 '선택과 진화'처럼 종양의 생존에 필요한 돌연변이는 획득하고 불필요한 돌연변이는 도태되면서 악성종양이 형성된다고 볼 수 있다.

암세포는 유전적으로 불안정하여 끊임없이 변이되고 진화할 수 있다. 결과적으로 암세포들의 이질성은 점점 심화되어 통제 불능의 상태로 무한 증식하는 것이다. '유전적 불안정성(genomic instability)'은 암세포가 새로운 유전적 이상을 생성하고 새로운 환경에 적응할 수 있는 잠재력을 갖추게 한다. 많은 암은 종양 내 이질성의 발달을 지원하는 유전적 불안정성의 특징을 보인다. 그러나 종양 이질성을 유지하기 위해서는 유전적 불안정성 외에도 후생유전학적 변화를 포함한 다른 요소들이 함께 작용해야 한다.

바 암은 예방 가능한가?

암을 유발하는 일련의 과정에 대한 올바른 이해는 새로운 치료전략 개발뿐만이 아니라 암을 예방하는 데도 중요한 정보를 제공한다. 대다수의 인체 암은 환경계에 존재하는 발암물질이나 바람직하지 않은 생활습관에 의해 발생하므로, 이러한 요인들에 대한 노출을 막거나 줄임으로써 개개인이 암에 걸릴 위험도를 상당 부분 낮출 수 있다. 예를 들어 단순히 담배를 피우지 않는 것만으로도, 모든 암사망의 약 30%를 막을 수 있다. 앞에서도 언급했지만, 암은 하나의 분리된 사건(event)으로 발생하기보다 통상 수십 년이 걸리는 다단계 과정임을 인지하는 것 또한 암예방 수칙을 수립하는 데 중요하다. 그래서 만일 암을 유발할 수 있는 물질에 노출되었다 할지라도, 악성 암으로 진행되는 데 필요한 일련의 여러 과정 중 특정 단계를 차단하거나 지연시킬 수 있는 기회는 얼마든지 있다는 사실을 주지할 필요가 있다.

사 주요 선진국의 암관리 정책 분석

1) 미국

미국은 1937년 의회에서 루스벨트 대통령 주도하에 국가암법(National Cancer Act of 1937)이 발효되어 지금의 미국 국립암센터(National Cancer Institute, NCI)가 설립되었다. 이후 NCI는 암의 원인 규명, 진단, 치료에 관련된 연구를 총괄하는 독립된 미국 정부산하 기관으로서의 막중한 역할을 담당하게 되었다. 또한 대학 등 타 연구기관에도 위에 언급한 암 관련 연구를 증진하기 위한 연구비 지원을 심사하고 승인하는 권한도 갖게 되었다. 이 법안은 현재 National Cancer Advisory Board(NCAB)의 전신인 국가암자문위원회(National Advisory Cancer Council, NACC)를 탄생시켰다.

1971년 닉슨 대통령이 NCI와 국립보건원(National Institutes of Health, NIH)의 역할을 강화하면서 국가의 암치료 역할을 보다 적극적으로 수행하기 위해 국가암법(National Cancer Act)을 제정하면서 이른바 '암과의 전쟁(War on Cancer)'이 선포되었다. 당시 미국은 유인 우주 비행 탐사 프로젝트(일명 아폴로 프로젝트)를 통해 닐 암스트롱을 포함한 우주비행사 3명을 인류 역사상 처음으로 달에 올려보낸 후 안전하게 지구로 귀환시키는 데 성공하였다. 아폴로 프로젝트의 성공 이후 달 탐사선을 쏘아 올린다는 의미를 담은 '문샷(Moonshot)'이라는 단어는 불가능해 보이는 것에 도전하는 시도나 연구개발(R&D) 분야에서 기술개발의 혁신성을 표현할 때 종종 사용되고 있다.

암예방, 조기 검진, 암생존자 관리, 암진료 불평등 해소 등 암 공중보건 현안 해결 및 혁신적인 암진단·치료기술 개발을 주요 연구 주제로 삼는 일명 '캔서 문샷 이니셔티브(Cancer Moonshot Initiative)'라는 프로젝트는 버락 오바마 정부 때 구상되었다. 오바마 전 대통령은 2016년 캔서 문샷 프로젝트의 윤곽을 잡았고, 이듬해인 2017년부터 이 프로젝트에 7년간 18억 달러(약 2조 원)를 투자하기로 하였다. 그러나 도널드 트럼프 전 미국 대통령이 대선에서 승리하며 이 프로젝트는 사실상 백지화되었다가 바이든 대통령 취임 1년 후 부활하여 백악관이 의료 분야에서 가장 핵심적으로 추진하고 있는 대표적인 프로젝트가 되었다.

2022년 2월 초 바이든 미국 대통령은 암사망률을 매년 2.7%씩 감소시켜 나감으로써 향후 25년간 50% 이상 감축시키겠다는 야심찬 목표로 캔서 문샷 프로젝트의 재점화를 천명했다. 미국 보건복지부(Department of Health and Human Services, HHS)와 국립보건원(NIH), 국립암연구소(NCI) 등 이 프로젝트를 수행하기 위해 마련한 세부적인 추진 계획의 초안에 따르면 캔서 문샷은 암예방과 조기 검진, 치료법 개발, 암치료를 위한 건강관리 시스템 개선 및 최적화, 연구기관 간 데이터 공유 확대, 인력 최적화 등을 목표로 한다.

2) 독일

독일은 2008년 연방 보건부가 '국가 암 계획(National Cancer Plan)'을 제정하였는데, 이는 검진을 통한 암 조기 발견과 효율적이고 높은 수준의 암치료를 보장하기 위해 독일 암 협회(German Cancer Society) 등 전문적이고 인증된 암 관련 기관과의 긴밀한 공조를 목표로 한다. 국가 암 계획은 초기에 다음 분야에 초점을 맞추었다.

- 암검진의 추가 개발
- 암관리 및 품질 보증의 구조적 측면의 추가 개선
- 효과적인 암치료 보장(초기에는 약물치료에 집중)
- 암관리를 위한 환자 오리엔테이션 강화

국가 암 계획을 이행함에 있어 주요 사업 중 하나는 암 조기 발견 및 등록을 위해 2013년 4월에 독일의 모든 연방 주에서 포괄적인 임상 암 등록부(Clinical Cancer Registries)를 설립하기 위한 기반을 제공하는 '암 조기 발견 및 등록법(Krebsfrüherkennungs-und-registergesetz, KFRG)' 이라는 새로운 암관리법을 채택하였다. 국가 암계획을 보완하기 위해 2019년에 독일은 연방교육연구부(Federal Ministry of Education and Research) 주도하에 암 연구 분야의 다양한 단체 및 기관들이 참여하는 이른바 '암에 맞서는 국가 10년(National Decade Against Cancer)'이라는 새로운 공동 이니셔티브를 출범시켰다.

위에 언급한 독일의 두 주요 암관리 정책은 2021년 2월 출범한 유럽의 암 퇴치 계획(Beating Cancer Plan)과 상호보완 관계를 유지하며 암의 예방, 조기 발견, 진단 및 암의 치료 그리고 환자 및 생존자의 삶의 질 향상에 주안점을 두고 있다.

3) 일본

일본은 일찍이 1950년대 지방자치단체를 중심으로 암환자에 대한 정보를 데이터베이스화하는 지역 암등록제를 시작하였으나 별로 실효를 거두지 못하였다. 이에 일본 정부는 더욱 충실한 국가 차원의 종합대책을 마련하고자 2005년 후생노동성 주도하에 암관리본부를 만들고 2007년 암대책기본법을 제정하였다. 이 법은 국가, 지방자치단체, 의료보험자, 국민 그리고 의사의 책무를 명확히 규정하고 암대책 추진에 관한 계획 및 암대책의 기본이 되는 사항을 정하여 궁극적으로 사망률 감소와 암환자, 암환자를 돌보는 가족의 부담 경감을 목표로 삼고 있다. 그리하여 2012년 6월부터 암대책추진기본계획이 발표되었는데, 여기서 기존의 암등록과 관련한 제도 개선에 대한 필요성이 대두되면서 관련 법안이 마련되어 2014

년에 의원입법으로 12월 13일 공표되었다. 이를 바탕으로 2016년 1월 1일부터 실제 정보에 기초하여 암 관리 정책이 얼마나 유효한지 평가하고, 관련 연구 발전에 기여하기 위해 데이터를 수집하고 분석할 수 있도록 추진 근거를 마련한 암등록 등의 추진에 관한 법률을 제정하였다. 그 외에도 암예방을 위한 다양한 사업을 운영하고 있으며, 암유전체 정보 관리 센터도 설치해 환자와 유전자 패널 검사 정보를 수집하여 암 관련 데이터베이스를 구축하고 있다.

위 법률에 기반한 주요 사업으로는 크게 네 가지를 꼽을 수 있다. 첫 번째는 암대책기본법에 따른 암예방 사업이며, 두 번째는 국립암센터에 설치된 연구소 겸 정보 관리 센터로, 환자의 동의하에 임상 정보 및 암유전자 패널 검사 정보를 수집하여 암 게놈 지식 데이터베이스를 구축한다. 세 번째는 암환자의 사회복귀를 지원한다. 마지막은 지역암등록사업으로, 의료기관에 다니는 암환자의 정보를 지방자치단체가 수집하고, 국립암센터가 관리하여 공익 창출에 활용할 수 있도록 한다.

4) 호주

호주 연방 정부는 2006년 호주암법(Cancer Australia Act)을 새로 제정해 암환자의 치료 결과를 개선하고 암으로 인한 피해와 불균형을 해소하고자 노력하고 있다. 현재는 2016년에 새로 제정된 국가 암검진 등록법(National Cancer Screening Register Act)이 시행되고 있다. 캔서 오스트레일리아(Cancer Australia)는 호주의 국가 암관리 기관으로, 암환자와 가족들이 더 나은 삶을 살 수 있도록 지원하고 있다. 호주의 국가 암관리 사업은 암예방 및 치료의 향상, 다학제적 협력, 암 연구 개발과 지원 등을 포함한다. 국가 암 검진 등록 사업은 암예방과 조기진단을 위해 시행되는 프로그램으로, 현재는 직장암과 자궁경부암을 대상으로 실시하고 있다. 이 프로그램은 전자 등록 시스템을 통해 암 검진과 관련된 데이터를 수집하고 분석하여 검진과 진단에 도움을 준다.

한편 캔서 오스트레일리아가 개발한 10개년 호주 암 계획(Australian Cancer Plan)은 암 예후를 개선하기 위해 고안된 미래 지향적인 계획으로, 특히 건강 상태가 좋지 않은 환자의 암 예후를 개선하기 위해 고안되었다. 이 계획은 암환자들, 소비자 단체, 연구자, 보건 전문가, 비정부 기구 및 정책 입안자 등의 의견을 수렴하여 암 부문 전반에 걸친 광범위한 참여와 협의를 통해 개발되었다.

아 우리나라 암관리 현황 및 정책적 대비

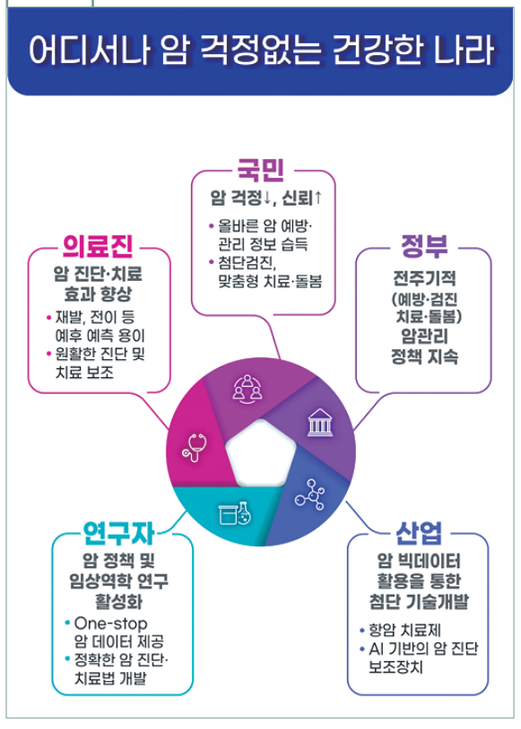
지난 1996년 암정복 10개년 계획을 시작한 우리나라는 국가적 차원에서 지속적으로 암관리 사업을 추진하고 있다. 우리 정부의 암정책은 2003년에 제정된 암관리법과 동법 시행령, 시행규칙에 근거하여 추진되고 있다. 암 관련 법률로서 암관리법 외에도 암관리 시행령과 암관리 시행규칙이 개정되어 운영되고 있다.

우리나라 국민의 암발생률은 2011년 이후 꾸준히 감소하고 있다. 2017년 기준 10만 명당 282.8명으로 OECD 국가 평균 300명보다 훨씬 적다. 특히 오랜 기간 암발생 순위에서 상위를 차지했던 위암, 대장암, 폐암, 간암이 모두 감소하고 있다. 여성의 자궁경부암 역시 집계를 시작한 1999년 이후 지속적인 감소 추세에 있다. 또한 암환자의 생존율 역시 꾸준히 증가하고 있다. 국가 암등록 통계를 보면 암진단 환자의 5년 생존율이 70%를 넘어선 것으로 나타났다. 이러한 암발생률의 감소와 생존율의 증가는 암 위험요인의 관리와 함께 조기 검진을 통한 2차 예방, 그리고 암 치료기술의 발전 덕분이라고 할 수 있겠다.

보건복지부는 암에 대한 국가 차원의 장기적·종합적 관리대책을 마련하고자, 1995년에 제1기 암정복 10개년 계획을 수립하고 시행하였다(보건복지부 관계부처협동, 2006). 2000년대 들어 정부는 범국가적인 암관리 인프라를 구축해 국가암관리사업의 기틀을 마련하였다. 보건복지부 내 암관리과를 별도로 설치하고 국립암센터도 설립했다. 2003년에는 국가암관리사업의 지속적인 운영·발전을 위한 법적 근거를 마련하고자 암관리법을 제정하였다. 2010년에는 암관리법을 전면 개정하면서 2000년에 제정된 국립암센터법을 폐지하고 암관리법으로 통합하였다.

정부는 암으로 인한 개인적 고통과 피해 및 사회적 부담을 줄이고 국민건강증진에 이바지하는 것을 목적으로 국가암관리종합계획을 수립하여 각종 암관리사업을 추진 중에 있으며 2021년부터는 '제4차 암관리종합계획'이 시행

그림 4.14 제4차 암관리종합계획에 따른 5년 뒤 미래상



출처: 국립암센터(2024).

중이다(보건복지부, 2021). '어디서나 암 걱정 없는 건강한 나라'를 비전으로 ① 고품질 암 데이터 구축 및 확산, ② 예방 가능한 암발생 감소, ③ 암치료·돌봄 격차 완화를 주요 목표로 하는 향후 5년간 종합적인 암관리 정책을 수립하였다(<그림 4.14>).

자 초고령사회 통합적 암관리를 위한 새로운 접근법

암은 고령화 사회가 될수록 더 많이 발생할 것으로 예측된다. 우리나라 국민 사망원인 1위인 암의 사회·경제적 부담이 급증하고 있는 상황에서 국가암관리종합계획이 시행되고 있으나 초고령사회를 대비한 보다 효율적이고 체계적인 국가 차원의 정책 수립 및 사업 수행이 절실히 요구된다. 2023년 보건복지부는 초고령사회에 대비해 의료-돌봄서비스 강화와 함께 취약 계층을 위한 재난적의료비 지원 대상을 모든 질환으로 확대하기로 했다. 여기에는 암도 포함된다. 이는 노인들을 대상으로 의료-돌봄서비스를 연계해 지역사회에서의 건강한 생활을 보장하기 위한 시범사업으로, 커뮤니티케어 패러다임 실현과 도시·농어촌 등 지역 특성에 따라 요양병원·시설에 입원·입소 경계선에 있는 노인 등을 대상으로, 재택의료, 방문간호 등 방문 의료서비스를 확충하고, 케어매니저 등을 통한 노인 맞춤 돌봄, 방문건강관리 등 수요자 욕구에 맞춰 다양한 의료-돌봄서비스 간 연계를 강화하는 것이다.

한편, 늘어나는 암생존자의 미충족 수요를 해결하고, 삶의 질을 획기적으로 향상시키기 위해 암생존자를 위한 맞춤형 헬스케어 기술개발 사업도 추진한다(시행: 2023년~2027년). 보건복지부는 "2019년 기준 국내 암생존자는 214만 명(인구대비 4.2%, 노인 인구대비 12.9%)에 육박하며, 암관리법 개정에 따라 암치료 후 사후관리와 암생존자의 맞춤형 헬스케어에 대한 기술개발이 요구되고 있어 이 사업을 통해 암생존자의 건강증진과 삶의 질을 향상시켜 사회적 가치를 창출하고자 한다"고 밝혔다. 이에 다양한 암종의 암생존자를 대상으로 ① 임상시험 준비 코호트(Trial-Ready-Cohort, TRC) 구축, ② 미충족 헬스케어 현황에 기반한 맞춤형 헬스케어 기술개발, ③ 효과 검증을 위한 임상시험을 시행해 근거 기반의 암생존자 연구-임상-활용 선순환적 생태계를 구축하기로 했다.

2021년 3월 보건복지부는 '제4차 암관리 종합계획(안)('21-'25)'을 발표하였다. 그 골자는 초고령화 사회에 진입하면서 암으로 인한 개인적 고통과 피해 및 사회적 부담을 줄이고 국민건강증진에 이바지하는 것을 목적으로 중장기 계획을 수립하여(수립 근거: 「암관리법」 제5조), 5년마다 국가암관리위원회(위원장: 보건복지부차관) 심의를 거쳐 수립·발표를 정례화하기로 했다.

차 맺음말

현재 우리나라에서 암 질환을 앓고 있거나 회복한 암환자 수는 약 2백만 명으로 추정된다. 연간 새로이 암으로 진단받는 사람도 약 25만 명 수준이며 그 수치는 매년 지속적으로 증가하는 추세이다.

이에 암을 조기에 발견하여 완치율을 높이고 암환자들에게 적정 의료서비스를 제공하기 위해 국가와 관련 전문가들이 노력하고 있다. 그러나 궁극적인 암발생 감소는 물론 암으로 인한 개인적 고통과 사회적 부담을 최소화하는 것은 암예방을 통해서만 가능하다. 실제로 세계보건기구(WHO)에서는 암발생의 ⅓은 예방이 가능하고 ⅓은 조기진단 및 조기치료로 완치가 가능하며 나머지 ⅓의 암환자도 적절한 치료를 하면 완화가 가능하다고 하였다.

세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)의 보고에 따르면, 암사망의 30%는 흡연에 의해, 30%는 식이요인에 의해, 18%는 만성감염에 기인한다고 하였으며, 그밖에 직업, 유전, 음주, 생식요인 및 호르몬, 방사선, 환경오염 등의 요인도 각각 1~5% 정도 기여하고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 암은 예방 가능한 질환이라는 국민적 인식을 고취시키고 우리 국민이 암예방 실천을 생활화할 수 있도록 관련 근거와 지침 제공 및 교육 홍보를 수행함으로써 궁극적으로 암발생 자체를 최소화하는 것이 중요하다.

참고문헌

보건복지부 관계부처합동(2006). 암정복 2015(안): 제2기 암정복10개년 계획.

보건복지부(2021). 제4차 암관리 종합계획(안) 〈2021-2025〉.

보건복지부(2024). 알기 쉬운 정책: 한국의 국가 암관리 정책 특징과 우수성.

한림원 기획정책위원회(2023). 2023년도 기획정책위원회 활동 보고서, 한국과학기술한림원.

Merlo, L. M. F., Pepper, J. W., Reid, B. J. & Maley C. C.(2006). "Cancer as an Evolutionary and Ecological Process", Nature Reviews Cancer, Vol.6 No.12, pp. 924~935.

국가암정보센터(2021). 통계로 보는 암: 연령군별 암발생률, https://www.cancer.go.kr/lay1/S1T639C642/contents.do에서 2024. 5. 31. 인출.

국립암센터(2021). 국가암관리사업, https://www.ncc.re.kr/main.ncc?uri=manage01_1에서 2024. 6. 2. 인출.

PART 4

6 초고령사회와 디지털헬스

고 상 백

연세대학교 원주의과대학 교수

가 들어가는 말

1) 의료 패러다임의 변화와 디지털헬스

디지털 기술이 크게 발전하면서, 우리 사회의 다양한 분야에 영향을 미치는 대전환 시기가 도래하였다. 과거의 경험중심의학에서 현재는 근거중심의학의 시대로 변화하였다면, 디지털 대전환은 미래 의학을 데이터중심의학, 맞춤의학의 시대로 전환시키고 있다. 특히 정보의 주체가 의료인에서 사용자중심으로, 치료중심에서 예방중심으로, 시설중심에서 지역중심으로, 사후치료에서 질병 예측과 맞춤의학 시대로의 전환이 요구되고 있다. 이러한 변화의 핵심에는 디지털헬스(Digital Health)가 있으며 초고령사회의 우리나라에 디지털헬스를 접목할 경우 파급효과가 클 것으로 기대된다.

디지털헬스는 디지털헬스케어, 스마트헬스케어 등으로 혼용되어 사용되고 있으며, 과거에 사용하던 용어인 모바일헬스(mobile heath), e-헬스케어(e-healthcare), u-헬스케어(u-healthcare) 등과 혼동되는 것도 사실이다. 그러나 세계보건기구(World Health Organization, WHO)에서 2019년 새롭게 발표된 가이드라인에서는 '디지털헬스'라고 명명하고 있다. 즉 디지털헬스는 디지털 기술을 기반으로 한 의료기기에 관한 연구, 모바일 헬스케어와 e-헬스케어를 포함한 포괄적인 개념으로 빅데이터, 유전체학(genomics), 의료인공지능을 포함하는 전 영역을 의학과 잘 융합하여 실제 임상현장 및 연구현장에서 적용해 나가는 전문 분야로 정의하였다. 우리나라 정부에서는 사물인터넷, 클라우드 컴퓨팅, 빅데이터, 모바일 및 인공지능 등 ICT를 활용해 개인의 건강을 관리하고, 환자 대상으로 맞춤형 치료를 시행하는 서비스나 시스템으로 개념화하고 있다.

미래 의학은 데이터중심의학으로 핵심내용은 예측의학, 맞춤의학, 예방의학, 참여의학으로 요약할 수 있다. 즉 질병을 미리 예측하고, 사전에 예방하며, 개별 환자에 특화된 맞춤형 의료를 제공하는 과정에서 환자의 참여와 역할이 중요해질 것이며, 이를 구현하기 위해서는 디지털헬스가 동반되어야 한다.

2) 초고령사회와 디지털헬스의 접목 필요성

인구의 변화, 초고령사회와 의료비 증가

우리나라 고령화 속도는 전 세계에서 전례를 찾기 어려울 정도로 빠르게 진행되고 있다. 2000년 65세 이상 노인 인구 7.2%이었던 고령화율은 2025년 21%가 되면서 초고령사회에 진입하게 될 것으로 보인다. 2035년이 되면 30%에 달할 것으로 예상되며, 특히 2038년이 되면 전체 노인 인구 중 75세 이상 후기 고령기 인구가 50%가 될 것으로 예상된다.

이 같은 고령인구의 증가로 인해 건강이 쇠약해질 수밖에 없는 노인들에 대한 의료 수요도 크게 증가할 것이며, 특히 후기 고령기의 증가로 인한 돌봄 수요 역시 증가할 것이다. 지난 10년간 전체 진료비는 1.8배 증가하였는데, 노인진료비는 2.3배 증가하였다. 2020년을 기준으로 국민건강보험공단에서 65세 이상 노인진료비 비중은 43.1%였는데, 이는 65세 이상 노인 전체가 65세 미만보다 진료비를 4.1배를 더 쓰는 셈이다. 앞으로 출산율의 저하와 고령화 속도의 증가는 의료비의 비중을 크게 증가시킬 것이다. 따라서 변화하는 인구구조에 맞게 디지털헬스 등 과학기술을 통한 사회구조 인프라를 삶의 질 차원에서 준비하는 것은 매우 중요한 사항이다.

초고령사회 의료와 돌봄 및 디지털헬스

고령화는 노인성 질병과 함께 경제적·사회적 자립 능력이 상실된 노인이 늘어나는 것을 의미한다. 의료 및 돌봄 측면에서 국가 의존성을 높일 수밖에 없고, 사회적 부담이 증가할 수밖에 없다. 따라서 과거와 크게 달라질 노인성 질환과 돌봄 수요의 증가에 적합한 미래 의료돌봄서비스는 현행 병원과 시설중심의 서비스체계 그대로 지속될 경우 감당하기 어렵다. 현행 의료돌봄 체계는 의료 및 돌봄서비스의 접근성도 쉽지 않고, 수요자를 중심으로 서비스체계가 연계되어 있지 않으며, 서비스에 수요자가 억지로 맞추거나, 일부 서비스는 미충족 상태로 남아있는 등 서비스체계가 분절되어 있다.

따라서 이를 해결하기 위해서는 의료 및 돌봄의 필요도와 지역에 따른 기능별 의료기관 및 돌봄 시설에 대한 수요·분포에 대한 계획을 수립하고 그 계획을 이행할 수 있도록 제도적인 뒷받침이 있어야 한다. 뿐만 아니라 디지털헬스 기술을 도입하여 서비스의 효율성을 확보할 수 있어야 하며, 현재 서비스의 분절을 해결할 필요가 있다.

고령화 문제해결을 위해 디지털헬스를 활용하는 것의 장점은 첫째, 저렴한 비용으로 보다 광범위한 대상에게 의료서비스를 제공할 수 있다는 것이다. 지역이나 집에서도 웨어러블 디바이스와 모바일 애플리케이션을 통해 개인의 건강 상태를 모니터링하면서 변화를 빠르게 감지하고, 이에 따른 적절한 진단과 치료를 제공함으로써 조기 예방 및 치료에 도움을 줄 수 있다. 둘째, 다양한 ICT 기기를 활용해 진단의 정확성과 효율성을 향상시킬 수 있다. 예를 들면, 딥러닝 등의 인공지능 기술을 통해 다양한 의료 이미징 데이터를 분석하여, 환자 예후를 보다 정확하게 예측할 수 있다. 또한, 디지털 바이오마커를 통해 이전에 수집하기 어려워 분석에 사용하기 쉽지 않았던 음성 데이터, 움직임 데이터 등을 활용해 더욱 정밀한 진단이 가능해진다. 셋째, AI와 로봇 기술, 디지털 디바이스를 통합적으로 활용하면 노인의 인지적·신체적·사회적 한계를 극복하고 노인 건강과 삶의 질을 높이는 데 중요한 역할을 할 수 있다.

나 디지털헬스의 정책 및 기술현황

1) 국외 현황

세계 디지털헬스 산업 현황

세계 디지털헬스 산업은 향후 연간 18.8% 성장할 것으로 전망되고 있다. 글로벌 주요 국가들은 디지털헬스 산업 선진화를 통해 국가경쟁력 강화와 고령화 시대에 대비한 의료비 상승 억제 및 품질개선, 의료 접근성 강화를 목표로 다양한 정책을 추진 중이다. 우선 요약하면, GDP 대비 의료비 비중이 가장 높은 국가이면서 의료비 절감이 필요한 미국, 초고령사회가 도래한 일본, 헬스케어 선진화 수요가 높은 영국, 독일 등의 국가들은 디지털헬스 산업 성장을 장려함과 동시에 불명확한 규제, 활성화 정책들을 정비하고 있다.

세계보건기구(WHO) 디지털헬스 및 의료혁신 4대 전략

세계보건기구(WHO)는 디지털헬스 및 의료혁신의 채택 및 확장을 촉진하기 위해 ① 글로벌 협력과 지식 이전, ② 국가 디지털 건강전략의 이행 단축, ③ 디지털 건강 거버넌스 강화, ④ 인간 중심의 건강 시스템이라는 4가지 전략 목표와 그에 따른 실행 방안을 설정하고 있다.

미국의 디지털헬스 현황

미국은 규제 완화와 빅데이터 구축을 통해 디지털헬스 산업을 육성하고 있으며, 의료서비스 개선에 적극적으로 활용하고 있다. ‘All of Us 프로젝트’를 적극 추진하고, 법과 제도를 개선하고 있다. 21세기 치료법 제도를 발표하여 신의료기술의 개발 및 인허가를 가속하는 제도적 기반을 마련하고 디지털헬스 혁신 계획에 따라 세계 산업을 선도하고 있다. 특히 메디케어(Medicare)를 중심으로 원격모니터링과 원격진료에 적용하고 있으며, 고령자에 대한 가치기반 지불제도 및 의료의 접근성을 높이고 효율성을 강화하기 위해 디지털헬스를 활용하고 있다.

유럽의 디지털헬스 현황

유럽은 보건의료와 ICT 기술을 융합한 디지털헬스 활성화 정책을 적극적으로 추진 중이다. 호라이

즌 2020(Horizon 2020) 연구혁신 재정지원 프로그램으로 이 분야를 선정하고 있으며, 에덴 프로젝트(Eden project)를 통해 데이터를 표준화하고, e-health 액션플랜으로 디지털 기술을 환자와의 소통강화에 힘쓰고 있다. 또한 의료비 부담이 큰 노인에 대한 정책적 적용을 통해 사회문제 해결에 디지털헬스를 적극 활용하고 있다. 국가별로는 대표적으로 핀란드의 핀젠 프로젝트(FinnGen project)를 예로 들 수 있다. 독일의 경우 의료비용 절감을 위해 디지털헬스케어법(Digitale-Versorgung-Gesetz, DGV)을 제정해 디지털건강앱(Digitale Gesundheitsanwendungen, DiGA)의 시장 진입 활성화를 지원하고 있으며, 프랑스 역시 디지털헬스 정책의 발전을 국가가 중점적으로 추진하고 있다. 특히 국가 건강전략에 ① 모든 생활환경에서 예방을 포함한 평생 건강증진 정책을 전개, ② 건강에 대한 접근 측면에서 사회적 및 지역적 격차 완화에 대한 노력, ③ 모든 단계의 건강관리에서 품질, 안전 및 타당성 보장, ④ 사용자의 역할을 재확인하여 보건 시스템 차원을 개척 등 4가지 우선순위를 설정하여 각각에 디지털헬스를 접목하고 있다.

일본의 디지털헬스 현황

일본은 고령화가 급속히 진행됨에 따라 의료비용 절감과 함께 질병의 사전예방, 예측을 위한 의료서비스 수요가 높아졌으며, 이에 정부 차원에서 디지털헬스 산업을 국가전략산업으로 지정하였다. 실행계획에서는 디지털헬스케어와 관련하여 사회적 과제를 해결하는 경제사회시스템 구축의 차원에서 의료 디지털화를 추진할 것을 강조하고 있다. 기본방침에서는 실행계획의 내용을 포함하여 의료 및 간병 영역에서의 디지털화 방향성에 대해 제시한 바 있으며, 구체적으로는 의료 간병비의 적정화, 서비스의 효율화 및 품질 향상을 목적으로 디지털헬스 서비스의 인증제도 평가 지침을 구축하였다. 또한 데이터 헬스 개혁의 공정표에 기초하여 지속적인 개인건강기록(Personal Health Record, PHR) 추진의 실행과 원격(온라인) 진료의 활용을 촉진하는 것과 동시에 AI 간병을 추진하는 계획도 세우고 있다.

중국의 디지털헬스 현황

중국은 디지털헬스 정책 타임라인을 설정하여 규제를 최소화하고 의료서비스 확대 및 국제경쟁력 확보를 위한 활동을 국가 차원에서 강화하고 있다. 특히 인구수 대비 낮은 의사 비율 및 의료 소외, 고령자 대상 의료 및 돌봄 등의 사회문제 해결을 위한 '모바일 헬스-원격의료'를 가속하고 있다.

2) 국내 현황

정부는 지속적으로 디지털헬스 활성화를 위한 전략과 계획을 수립하여 발표하고 있다. 2022년 디지털 기술을 활용한 국민건강증진을 목표로 ① 디지털 기반 미래의료 실현, ② 디지털헬스케어 신시장 창출, ③ 빅데이터 기반 바이오헬스 산업 혁신이라는 3대 정책방향을 발표하였다. 2023년에는 의료, 건강, 돌봄 디지털 전환으로 국민건강을 향상하기 위해 디지털 신시장 창출 및 바이오헬스 산업 육성 관련 6대 전략을 발표하였다.

그러나 디지털헬스가 의료시스템에서 제도화되기까지 여러 걸림돌이 있다. 아직까지도 복잡한 디지털헬스 분야의 법, 제도적인 문제와 규제이다. 디지털헬스 산업의 혁신을 제한하는 진입규제, 시장진입을 어렵게 하는 인허가 및 평가절차, 복잡한 시장구조와 제한적인 시장 등은 산업 활성화의 주요 장애요인이다. 기술의 안전성과 유효성도 극복해야 할 과제이며, 개인정보에 대한 사회적 합의도 중요하다. 디지털헬스 산업의 성장 정체를 방치할 경우 해외시장에 종속될 우려도 있다.

따라서 우리나라 산업생태계 측면에서 선순환적 비즈니스 체계를 신속히 마련하여야 하며, 우리나라 의료시스템에 맞게 디지털헬스를 안정적으로 도입하기 위한 제도 개선이 이루어져야 한다. 고령화에 따른 인구구조 변화와 만성질환이 확산되는 추세 속에서 병원과 같은 시설중심의 치료기능만으로는 다가올 미래에 대응하기에 한계가 있다. 우리 국민의 생활수준 향상, 소득 증가 등으로 건강에 대한 관심이 확대되는 추세이며, 의료서비스 현장의 ICT 수용도가 향상되고 있다. 디지털헬스에 대한 새로운 부가가치 창출의 기대감은 새로운 국면을 맞이하고 있기에 앞으로 의료체계는 건강 패러다임의 변화에 맞게 질병이 아닌 사람, 병원이 아닌 지역사회를 중심으로 만들어져야 한다. 이를 실현할 수 있는 가장 현실적인 대안으로 디지털헬스를 활용하여 우리 국민의 삶의 질뿐만 아니라 사회의 격을 높여 지속 가능한 사회로 나아가야 할 것이다.

다 디지털헬스의 내용과 역할

1) 디지털헬스 의료기기

스마트폰 및 웨어러블 디바이스를 활용한 디지털헬스 의료기기는 각종 사물 간, 사물과 사람 간 서로 연결되는 사물인터넷 시대가 도래하면서 그 역할과 기능이 확대되고 있다. 디지털헬스 의료기기는 몸에 착용하거나, 피부에 부착하거나 심지어 체내에 삽입하는 형태로 발전하면서 사용자와 주변 환경의 데이터를 측정할 수 있게 되었다. 이러한 측정 자료가 건강관리와 의료에 활용도가 높은 이유는 기기를 지속적으로 착용함으로써 끊임없이 역동적으로 변화하는 우리 몸에 대한 데이터를 연속적·정량적 높은 빈도로 실시간 측정할 수 있기 때문이다. 병원에 가야만 얻을 수 있는 자료를 병원 밖 일상생활에서도 측정할 수 있고, 기존에 얻기 어려운 라이프로그 자료도 실시간 얻을 수 있는 장점도 있다. 그리고 현재 활동량뿐만 아니라 체온, 심박수, 산소포화도, 심전도, 수면, 호흡수, 혈압, 혈류, 혈당, 뇌파, 안압, 자세, 복약, 월경까지 다양한 건강 및 의료 데이터를 측정할 수 있다.

2) 디지털 치료기기(DTx)

디지털 치료기기(Digital Therapeutics, DTx)란 소프트웨어 프로그램을 활용하여 환자의 신체적·정신적·행동과학적 상태에 대한 예방, 관리 및 치료를 제공하는 근거 기반의 치료(evidence-based therapeutics intervention)를 의미한다. 우리나라는 식품의약품안전처를 통해 공식 용어를 디지털 치료기기로 정하고 소프트웨어 의료기기(Software as a Medical Device, SaMD) 중 의학적 장애나 질병을 예방, 관리, 치료하기 위해 환자에게 근거 기반의 치료적 개입을 제공하는 제품으로 정의하였다.

디지털 치료기기를 객관적으로 정의하기 위해서는 다른 디지털헬스케어기기, 디지털 의료기기와의 차이점을 이해할 필요가 있다. 즉, 디지털 치료기기와 기존의 디지털헬스케어의 차이점은 건강관리 또는 건강모니터링과는 달리 치료적 목적의 개입을 목표로 하는 소프트웨어라는 점이다. 이때 치료 목적 실현을 위해 애플리케이션, 가상현실 및 증강현실, 인공지능, 빅데이터, 게임 등의 다양한 디지털 기술이 적용된다. 또한 소프트웨어 형태의 디지털 치료기기를 환자에게 전달-사용-기록하여 진료에 반영하기 위한 인터넷 또는 이동통신 등의 통신망뿐만 아니라, 의료진의 진단 및 처방과 국민건강보험 등 보건의료 체계까지도 관련 생태계를 이루어야 한다.

인구의 고령화로 인해 만성질환 치료에 대한 사회적 부담이 증가하고 있는 상황에서 디지털 치료기기는 기존 의약품만으로는 치료에 한계가 있는 만성질환, 정신·뇌 질환 등에 대한 보완재 또는 연결 대체재로 주목을 받고 있다. 디지털 치료기기는 디지털 기반으로 서비스가 제공되기 때문에 치료과정에 생성되는 다양한 데이터를 수집할 수 있으며, 환자가 편리한 시간과 장소에서 모니터링 및 서비스를 제공받을 수 있다는 장점이 있다. 정신질환 등이 있는 경우에도 편견 없이, 타인의 시선과 관계없이 치료받을 수 있다. 또한, 기존 스마트폰이나 인터넷을 기반으로 하는 디지털 제품이 많이 있고 비교적 적은 비용을 투자해 가정 등에서도 지속적인 치료를 할 수 있다.

따라서 디지털 치료기기가 가지고 있는 장점과 사회적 기대에 부응하여, 우리 사회에 성공적으로 안착하려면 이를 사용하는 환자의 실질적인 사용이 무엇보다 중요하다. 디지털 문해력(digital literacy), 디지털 환경, 사용 경험 및 만족도 등이 필요하다. 기존 의료시스템 내에서 안착하기 위해서는 대부분의 디지털 치료기기는 의사의 처방이 있어야만 사용할 수 있으며, 각각의 치료기기는 단독으로 사용하거나 다른 치료제와 병행하여 사용할 수 있을 것이다. 또한, 처방하는 의료인의 이해와 상호협력이 필요하다. 디지털 치료기기의 개발 및 사용은 맞춤형 인프라 및 시스템 유지 관리, 네트워크 정보 보안을 통해 다양한 이해관계자 간의 대화, 협의 및 협력을 통해 달성될 수 있을 것이다. 특히 근거 기반의 치료적 개입을 제공하는 제품으로 안전성과 유효성 등을 입증해야 하며, 임상시험과 허가 및 관리가 필요한데 이에 대한 제도적 지원체계와 정부 차원에서의 생태계 구축이 필요하다.

3) 빅데이터의 역할과 자료의 통합

사람이 살아가면서 생성하는 의료 데이터, 유전체 데이터 및 라이프로그 데이터는 끊임없이 만들어지고 있고, 이를 측정한 자료는 매우 광범위하고 막대한 규모의 빅데이터이다. 이를 활용하기 위해서는 정확한 측정과 안전한 저장이 가능해야 하며, 무엇보다도 자료의 통합이 전제되어야 한다. 또한 스마트폰, 웨어러블 디바이스 등 디지털헬스 의료기기에서 측정된 데이터뿐만 아니라 진료기록, 처방기록, 의료영상자료 및 검사결과 등 전통적 의미의 의료 데이터 통합이 필요하다. 이처럼 한 사람의 건강에 대해 여러 데이터가 한곳에 모이게 되면, 개인의 건강과 질병에 대해 보다 통합적이고 총체적으로 이해할 수 있다. 특히 이러한 데이터가 실시간으로 축적되고 인공지능 등을 활용하여 분석된다면 질병 예측과 이를 통한 예방 및 관리가 가능해진다. 모든 의료 데이터를 통합하는 것이 당장은 어려운 일이지만 다가올 미래임이 확실하다.

최근 다양한 건강 자료를 통합하기 위해 플랫폼을 구축하고, 이를 활용하기 위해 인공지능 등 분석방법을 고도화하고 있다. 우리나라는 데이터 결합기관으로 국민건강보험공단과 건강보험심사평가원 등을 지정하여 활용성을 높이고 있으며, 플랫폼을 구축하고 있다. 최근 국민건강보험공단은 개인 동의를 전제로 디지털헬스 라이프로그 데이터와 의료정보를 스마트폰 기반으로 자료를 통합하여 의료인에게 정보를 제공하는 의료기관용 '건강IN'을 준비하고 있다. 또한, 우리나라 보건복지부의 PHR 기반 플랫폼 사업, 과학기술정보통신부의 데이터댐 사업을 통한 보건 분야의 빅데이터 플랫폼 사업을 진행하고 있다. 이러한 데이터 통합 플랫폼이 활성화되고, 실질적인 국민 서비스가 구체화된다면 디지털헬스의 가치는 크게 향상될 것이다.

4) 인공지능, 질병 예측과 의료의 활용

인공지능은 예측 분석부터 개인 맞춤형 의료에 이르기까지 다양한 솔루션을 제공하면서 의료의 여러 영역에 빠르게 침투하고 있다. 컨볼루션 신경망(Convolutional Neural Network, CNN) 등의 딥러닝 알고리즘은 의료 이미지를 빠르고 정밀하게 분석할 수 있다. 그리고 빅데이터를 AI로 학습하여 약물 상호작용 등 의사들의 머리를 아프게 한 분야의 위험을 예측할 수 있다. 또한 시계열 신호처리 인공지능을 사용하면 웨어러블 등의 신호로부터 임상적 위기를 찾아낼 수 있으며, 전자의무기록(Electronic Medical Record, EMR)에 자연어 처리 알고리즘을 적용하면 오류를 교정하고 쉬운 전산화를 지원할 수 있다. 아울러 생성형 언어 모형 같은 기술은 의사와 환자의 대화를 모방하여 환자들에게 친절하고 사람과 같은 조언을 해주고 있다. 딥러닝 알고리즘, 특히 컨볼루션 신경망은 의료 이미지 분석에 뛰어난 성능을 보이고 있으며, 이러한 알고리즘은 수백만 개의 이미지 데이터를 학습하여 정밀하고 빠른 분석을 가능하게 한다. 예를 들어 X-Ray, MRI, CT, 내시경, 피부병변 촬영과 같은 이미지에서 암 등의 병변을 자동으로 탐지할 수 있다. 이

는 전통적인 방법보다 더 빠르고 정확하며, 의사가 놓칠 수 있는 미세한 변화까지 포착할 수 있다. 시계열 데이터를 다루는 인공지능은 연속으로 수집된 신호를 분석해 임상적 위기를 미리 알려줄 수 있다. 예를 들어 병원에서는 심박수, 혈압, 체온, 뇌파, 심전도, 산소포화도 등을 실시간으로 모니터링하여 이상 징후를 빠르게 탐지할 수 있다.

병원만큼의 정밀도는 아니지만 웨어러블 디바이스 상에서 탐지된 데이터는 24시간, 일상생활에서도 지속적으로 모니터링이 가능하고, 환자에게 위기 발생 시 인공지능이 의사나 응급 서비스에 즉시 알려 빠른 대응이 가능하게 된다. 또한 생성형 언어 모형과 같은 최신 챗봇 기술(챗GPT 등)은 의사와 환자 간의 커뮤니케이션을 보조할 수 있으며, 챗봇은 흔히 사용되는 의료 지식을 바탕으로 환자의 질문에 답하거나, 복약 지시를 명확하게 전달한다. 그리고 챗봇은 24시간 연중무휴 사용이 가능하므로 의사가 바쁠 때도 환자는 필요한 정보와 지원을 받을 수 있다.

또한, 의학뿐 아니라 일상에 대한 폭넓은 학습 지식을 사용하여 환자의 사소하고 다채로운 질문들에도 언제든지 모바일, 웹, PC 등으로 응대할 수 있다. 개인 일상에 추천 시스템, 인공지능 판독, 생성형 AI 등이 이미 깊게 스며들었듯이 디지털 의료에서도 AI의 도입에 대한 미래는 의심할 여지없이 밝다. 디지털 헬스의 본질은 개인과 사회의 건강 그리고 복리후생의 증진에 있으며, 이는 AI와의 통합에 대해서도 마찬가지이다. 초고령사회에 적용할 때에도 의료서비스 제공자, 환자, 정책 입안자, 정부 기관과 보험 제공자 등이 협업하여 이 같은 방향성 속에서 규제와 다학제적 장벽을 극복하며 도전해야 한다.

표 4.4 디지털헬스의 내용과 역할

	내용	역할
디지털헬스 의료기기	• 사물인터넷, 인공지능 등 디지털 첨단기술이 적용되어 몸에 착용, 피부 부착 및 체내 삽입하여 사용자의 건강정보와 주변 환경의 데이터를 측정	• 기기를 지속 착용하여 끊임없이 역동적으로 변화하는 우리 몸의 데이터를 연속적, 정량적, 높은 빈도로 실시간 측정 • 의료정보 수집, 모니터링, 진단 및 질병 관리에 활용
디지털 치료기기	• 소프트웨어 의료기기 중 의학적 장애나 질병을 예방, 관리, 치료하기 위해 환자에게 근거 기반의 치료적 개입을 제공하는 제품	• 기존 의약품만으로는 치료에 한계가 있는 만성질환, 정신질환, 뇌 질환 등에 대한 보완재, 연결 대체재로 주목 • 치료과정 중에 생성되는 다양한 데이터를 수집할 수 있으며, 환자가 편리한 시간과 장소에서 모니터링 및 서비스를 제공
빅데이터와 자료 통합	• 의료 데이터, 유전체 데이터 및 라이프로그 데이터 등 빅데이터의 수집과 통합	• 데이터가 실시간 축적되고 인공지능으로 실시간 분석되면, 질병 예측, 예방과 관리 등 가능 • 다양한 건강 자료를 통합하기 위해 플랫폼을 구축하고, 이를 활용하기 위해 인공지능 등 분석방법을 고도화
인공지능과 의학적 활용	• 라이프로그, 의료 이미지 및 시계열 데이터 등을 인공지능을 통해 분석하고 이를 의학적으로 활용	• 인공지능은 예측 분석부터 개인 맞춤형 의료에 이르기까지 다양한 솔루션을 제공

출처: 연세대학교 고상백(2024).

라 맺음말

초고령시대에 제한된 의료자원, 공간적인 한계와 시간적인 제약을 극복하여 의료서비스를 제공하는 디지털헬스 기술이 급성장하고 있다. 원격모니터링을 위한 디지털 의료기기가 플랫폼을 기반으로 활용되고 있으며, 급성기 치료를 마치고 재택서비스를 받기 전 로봇 등을 이용한 재활서비스도 가능하다. 또한, 돌봄서비스 영역에도 디지털헬스 기술은 다양한 서비스 영역에 적용이 가능하며, 독거노인 등 사회적 취약계층의 돌봄서비스 공백이 사물인터넷을 활용하면서 사회서비스 연계로 확장되고 있다. 예컨대 양로시설 또는 홈케어 기반 침상, 방, 출입구 등 노인의 활동량과 호흡 센서 등 사물인터넷 기반 센서를 설치하여 응급상황을 대비할 수 있고 웨어러블 의료기기를 제공하여 실시간 건강 상태를 측정하고 환자의 질병 위중도에 따라 지역 의료기관과 연계하여 건강관리를 할 수 있다.

고령화에 따른 인구구조 변화와 만성질환이 확산되고 있는 추세 속에서 병원과 같은 시설중심의 치료 기능만으로는 다가올 미래에 대응하기에 한계가 있다. 우리 국민의 생활수준 향상, 소득 증가 등으로 건강에 대한 관심이 높아지고 있으며, 의료서비스 현장의 ICT 수용도가 향상되고 있고, 디지털헬스에 대한 새로운 부가가치 창출에 대한 기대는 새로운 국면을 맞이하고 있다. 따라서 앞으로 의료돌봄 서비스는 건강 패러다임에 변화에 발맞춰 질병이 아닌 사람, 병원과 시설이 아닌 지역사회를 중심으로 가야 한다. 이를 실현할 수 있는 가장 현실적이고 과학적인 대안 중 하나는 바로 '디지털헬스'이며, 병원 및 시설을 지역사회와 연계한 통합 돌봄 시스템이다.

참고문헌

고상백(2023). “인구변화와 의료돌봄 서비스”, 과학과 기술, 제650호, 한국과학기술단체총연합회, p. 67.

한국지능정보사회진흥원(2022). 국가지능정보화백서-의료복지 지능 정보화, 한국지능정보사회진흥원, pp. 144-167.

Koh S. B.(2023). “Digital Health in the Context of Changing Medical Paradigm”, Digit Health Res. Vol.1 No.1, e1.

WHO: World Health Organization(2019). WHO guideline Recommendations on Digital Interventions for Health System Strengthening, World Health Organization. Retrieved July 8, 2024 from https://www.who.int/publications/i/item/9789241550505

PART 4

7

초고령사회 대응을 위한 돌봄로봇 기술

송원경

국립재활원 재활보조기술연구과장

가 들어가는 말

초고령사회로의 진입이 가속화되면서 우리나라는 돌봄서비스에 대한 수요와 공급 간의 불균형 문제에 직면하고 있다. 2025년을 기점으로 65세 이상 노인 인구 비중이 20%를 넘어설 것으로 예상되며(주영재, 2024), 이는 일상생활 지원이 필요한 노인성 질환자와 장애인의 급격한 증가를 의미한다(이윤신, 2023). 이러한 인구구조의 변화는 돌봄서비스 체계의 근본적인 변화를 요구하고 있으며, 이에 대한 체계적이고 효과적인 대응 전략의 수립이 시급한 상황이다.

저출산과 고령화로 인한 생산가능인구의 감소는 돌봄 인력 부족 문제를 더욱 심화시키고 있다. 특히 요양보호사의 활동자 수 감소와 신규 인력 유입의 어려움은 돌봄서비스의 질적 저하로 이어질 수 있는 심각한 사회적 문제로 대두되고 있다(김주연, 2022). 이는 단순히 인력 수급의 문제를 넘어 돌봄서비스의 지속 가능성과 직결되는 문제로, 새로운 패러다임의 돌봄 체계 구축이 필요한 시점이다.

이러한 맥락에서 돌봄로봇 기술은 인력 부족 문제를 완화하고 돌봄서비스의 질을 향상시킬 수 있는 혁신적인 해결책으로 주목받고 있다. 돌봄로봇은 돌봄자의 작업을 보조하고 지원하는 로봇으로(송원경, 2023), 노인과 장애인의 일상생활을 지원하고 돌봄자의 업무 부담을 경감시키는 역할을 수행한다. 이는 단순한 기계적 지원을 넘어, 사용자의 신체적, 정서적, 인지적 요구를 종합적으로 고려한 통합적 돌봄 시스템의 일환으로 볼 수 있다.

돌봄로봇의 주요 기능은 크게 신체 보조, 일상생활 보조, 일상생활 모니터링, 정서적 지원 등으로 구분할 수 있다. 신체 보조는 노인의 이승(transfer) 보조, 이동 보조, 근력 강화 보조를 지원하며, 일상생활 보조는 식사, 배설, 목욕 등의 기본적인 생활 활동을 돕는다. 일상생활 모니터링은 24시간 사용자의 건강 상태를 포함한 일상생활 활동을 체크하여 응급상황에 대비하고, 정서적 지원은 인지기능 훈련을 통해 치매 예방 및 관리에 도움을 주거나 정서적 교감을 통해 노인의 외로움과 우울감을 완화하는 데 기여할 수 있다.

최근 인공지능, 센서 기술, 로봇 공학의 비약적인 발전으로 돌봄로봇의 기능과 성능이 급속도로 향상되고 있다. 국외를 포함하여 이미 일부 요양시설과 가정에서는 다양한 돌봄로봇이 적용되고 있으며, 그

효과성이 점차 입증되고 있는 상황이다. 예를 들어, 일본의 '파로(PARO)'와 같은 정서 지원 로봇은 치매노인의 불안감 감소에 효과가 있는 것으로 나타났으며(Hung et al., 2019; 고인순, 2017), 국내에서 개발된 '실벗' 로봇은 인지기능 향상에 도움을 주고 있다.

향후 10~20년 이내에 돌봄로봇 기술은 더욱 고도화되어 현재보다 훨씬 복잡하고 섬세한 돌봄 업무까지 수행할 수 있을 것으로 전망된다. 인공지능 기술의 발전으로 개인 맞춤형 돌봄서비스 제공이 가능해지고, 로봇의 물리적 능력 향상으로 더욱 정교한 신체 보조가 가능해질 것이다. 또한, 센서 기술의 발전은 더욱 정확한 건강 모니터링과 위험 예측을 가능하게 할 것이다. 그러나 이러한 기술의 발전과 함께 우리가 명심해야 할 점은 돌봄로봇의 도입이 인간 돌봄자를 대체하는 것이 아니라는 사실이다. 돌봄로봇은 돌봄의 질을 높이고 돌봄자의 업무를 지원하는 보조적 수단으로 인식되어야 한다. 돌봄은 본질적으로 인간적 교감과 이해를 바탕으로 하는 활동이므로, 로봇은 이를 보완하고 강화하는 역할을 수행해야 한다.

본고에서는 돌봄로봇 기술의 현재와 미래, 그리고 초고령사회에서의 활용 방안을 논의하고자 한다. 주요국의 정책 동향을 분석하여 한국의 현황과 정책 과제를 도출하고, 기술 발전과 사회적 수용을 위한 전략적 방향을 제시할 것이다. 특히 공적 돌봄 체계 내 로봇 활용, R&D 지원, 인력 역량 강화, 관련 법·제도 정비 등의 정책 과제를 중점적으로 다룰 것이다. 궁극적으로 인간 중심의 돌봄서비스와 첨단기술이 조화를 이루는 미래 돌봄 체계의 청사진을 제시하고자 한다.

나 돌봄로봇 기술의 발전 전망

돌봄로봇 기술은 급속도로 발전하고 있으며, 향후 더욱 혁신적인 변화가 예상된다. 이러한 기술 발전은 크게 ① 신체 보조, ② 일상생활 보조, ③ 일상생활 모니터링, 그리고 ④ 정서적 지원 분야로 나누어 살펴볼 수 있다. 현재는 로봇 기술의 한계로 인해 제한적인 역할만을 수행하고 있지만, 향후 20~30년 후에는 돌봄 인력 부족 문제가 심화됨에 따라 로봇 기술이 비약적으로 발전할 것으로 예상된다. 이에 따라 미래에는 한 대의 로봇이 요양보호사 한 명의 역할을 수행할 수 있을 정도로 기능이 향상될 것으로 전망된다.

1) 신체 보조 로봇 기술

이승 보조 기술

이승 로봇 기술은 로봇 기술을 바탕으로 침대에서 휠체어로, 휠체어에서 변기로의 옮겨 태우기를 안전하고 편리하게 지원하는 데 중점을 둔다. 현재의 이승 기술은 사람의 등 뒤에 슬링을 깔고 슬링을 위로 들어 이동하는 방식이 주를 이루고 있다. 그러나 향후에는 인공지능과 정교한 로봇 기술의 발전으로, 사람이 안고 이승하는 것처럼 자연스럽고 부드러운 이승이 가능해질 전망이다. 슬링을 등 위에 자동으로 설치하거나 이승 로봇 바퀴에 전동 보조 모듈을 적용하여 돌봄자와 돌봄 받는 사람의 편안함과 안전성을 크게 향상시킬 것이다.

이동 보조 기술

현재 HAL(Ogata et al., 2015; Muira et al., 2018), ReWalk(Esquenazi et al., 2012) 등의 웨어러블 로봇이 이동 재활 훈련에 활용되고 있으며, 향후에는 노인이나 돌봄자의 실내외 이동을 종합적으로 지원하는 스마트 모빌리티(mobility) 로봇으로 진화할 것이다. 이 로봇들은 사용자의 상태를 실시간으로 모니터링하며, 개인 맞춤형 이동 지원을 제공할 것이다.

근력 강화 보조 기술

유연착용형 로봇(soft exosuit)은 몸에 착용하는 유연한 로봇 옷으로, 특수한 신축성 소재나 구동기, 센서를 이용해 사람의 움직임을 돕고 힘을 보강하는 장치이며, 경량화 기술과 사용자 맞춤형 디자인을 통해 일상 활동 중 근력을 보조하고 독립성을 증진시킬 것이다(Asbeck et al., 2013). 이 기술은 미세 구동기를 이용하여 사용자의 움직임을 자연스럽게 보조하며, 실시간 모션 캡처와 분석을 통해 개인화된 지원을 제공할 것이다.

2) 일상생활 보조 로봇 기술

식사 보조 기술

식사 보조 로봇은 손이나 팔의 움직임이 어려운 사람이 먹고 싶은 음식을 먹고 싶은 타이밍에 먹을 수 있도록 돕는다(Song et al., 2013). 향후에는 식사 보조 로봇은 사용자의 식습관을 학습하여 맞춤형 지원을 제공하며, 영양 분석과 식단 추천 기능까지 갖추게 될 것이다. 이 로봇들은 다양한 식사 도구와 호환되며, 사용자의 건강 상태에 맞는 최적의 식사 지원을 제공할 것이다. 음식을 분석하여 식사 섭취량을 기록하고 분석도 가능할 것으로 기대된다. 식사 보조뿐만 아니라 구강관리도 매우 중요하다. 구강관리 기기가 요양병원과 시설을 중심으로 도입될 것으로 예상된다. 개인의 식사 패턴과 구강 상태를 학습하여 맞춤형 케어를 제공할 것이다.

배설 관리 기술

배뇨 및 배변 관리 로봇(Shin et al., 2021)은 사용자의 배설 습관을 분석하고 건강 문제를 조기에 발견하는 기능을 갖추게 될 것이다. 저소음 작동과 편리한 청소 기능을 통해 사용자의 편의성을 높이며, 데이터 분석을 통해 건강관리에 중요한 정보를 제공할 것이다.

목욕 보조 기술

목욕 및 샤워 보조 로봇(Zlatintsi et al., 2020)은 사용자의 피부 상태에 따라 목욕 조건을 자동으로 조절하고, 안전한 목욕 환경을 제공할 것이다. 향후에는 아로마테라피 기능이나 실시간 피부 상태 모니터링 등의 기능이 추가되어 더욱 편안하고 건강한 목욕이나 샤워 경험을 제공할 것이다.

3) 일상생활 모니터링 기술

욕창 예방 기술

수면 중 욕창 방지 및 자세 변환을 지원하는 로봇은 체압 분산 기능을 통해 욕창을 예방하고, 사용자의 수면 패턴을 분석하여 최적의 수면 환경을 제공할 것이다. 이 기술은 침대와 연동되는 환경제어 시스템을 통해 실내 온도, 조명, 그리고 사운드 시스템을 자동으로 조절하여 편안한 수면을 도울 것이다.

통합 건강 모니터링 시스템

사물인터넷 기술을 활용한 스마트홈 솔루션은 노인의 움직임, 수면, 배변 등 일상생활 활동을 감지한다. 향후에는 이러한 기술이 더욱 발전하여 개인의 건강정보와 생활패턴을 종합적으로 분석하고, 잠재적 건강 위험을 예측하여 선제적으로 대응할 수 있는 AI 기반 시스템으로 발전할 것이다.

4) 정서적 지원 로봇 기술

커뮤니케이션 로봇

고령자의 인지기능 향상을 위해 인지기능 향상을 위한 로봇 활용에 대한 관심도 높아지고 있다. 일본의 '파로(PARO)'는 아기 물범 모습의 터치센서 로봇으로, 치매노인의 불안감 감소에 효과가 입증되어 5000여 개가 요양시설에 보급되었다(최민석, 2017). 현재의 인공지능 스피커나 소셜 로봇들이 더욱 발전하여, 사용자와 깊이 있는 대화가 가능한 수준으로 진화할 것이다. 이러한 로봇들은 자연어 처리 기술과 감정 인식 기술을 통해 사용자의 정서적 상태를 파악하고 적절한 지원을 제공할 수 있을 것이다. 또한, 개인화된 언어 훈련 프로그램을 통해 사용자의 인지기능 유지와 향상에도 기여할 것이다. 실어증이 있는 사람에게 보완적인 의사소통 기구로의 활용도 예상된다.

이러한 다양한 돌봄로봇 기술들은 노인의 자립성을 높이고 돌봄 제공자의 부담을 줄이는 데 크게 기여할 것이다. 그러나 이와 동시에 개인정보 보호, 윤리적 사용, 인간-로봇 상호작용의 질 등에 대한 새로운 과제도 제기될 것이다. 따라서 기술 발전과 더불어 이러한 이슈들에 대한 사회적 논의와 제도적 준비도 함께 이루어져야 할 것이다.

다 주요국의 돌봄로봇 정책 동향

1) 일본

일본은 급속한 고령화에 대응하기 위해 돌봄로봇 기술을 국가 차원의 핵심 전략으로 채택하고 있다. 2013년부터 시작된 '로봇 개호기기 개발 5개년 계획'은 이러한 노력의 중심축이 되고 있다(経済産業省·厚生労働省, 2013). 이 계획은 경제산업성과 후생노동성이 공동으로 수립하여 추진 중이며, 돌봄로봇의 개발부터 실증, 보급까지 전 과정을 체계적으로 지원하고 있다. 특히 주목할 만한 점은 '리빙랩' 운영을 통한 실증 환경 구축이다. 이는 실제 생활환경에서 로봇의 성능과 사용성을 테스트하는 것으로, 사용자와 개발자 간 지속적인 피드백을 통해 현장의 요구를 즉각적으로 반영할 수 있는 장점이 있다. 이러한 접근 방식은 기술개발과 실용화 사이의 간극을 효과적으로 줄이는 데 기여하고 있다.

일본 정부는 개호보험 제도를 통해 돌봄로봇의 보급을 지원하고 있다. 현재 개호보험의 급여 항목에 일부 개호로봇이 포함되어 있으나, 주로 이동 지원 장치와 배설 지원 장치에 국한되어 있다(北嶋守, 2021). 이에 따라 보험급여 대상 품목의 확대 필요성이 지속적으로 제기되고 있으며, 이는 향후 정책 변화의 주요 쟁점이 될 것으로 예상된다. 최근 들어 요양시설 등에서 선도적으로 개호로봇 기술을 도입하는 사례가 다수 등장하고 있다. 예를 들어, 일본 젠코카이(Zenkoukai)의 경우 다수의 모니터링 로봇 등 다수의 개호로봇을 도입하여 야간 등의 개호서비스 품질을 향상시키고 있다(정일영·김가은, 2019).

최근 '개호기술도입지원사업'을 통해 요양시설의 로봇 및 ICT 도입을 적극적으로 장려하고 있다. 이 사업은 단순히 기술 도입에 그치지 않고, 이를 통한 업무 프로세스 개선과 서비스 질 향상을 목표로 하고 있다. 이는 돌봄 인력의 부족 문제를 해결하면서도 동시에 돌봄서비스의 질적 향상을 도모하는 이중 효과를 기대할 수 있다. 2018년부터 시작된 제2기 5개년 계획에서는 더욱 확대된 예산과 범위로 개호로봇 개발 및 보급을 지원하고 있다. 이 계획에서는 로봇 개발 지원뿐만 아니라 개호 현장에서의 로봇 활용 모델 구축 및 보급 확대에도 중점을 두고 있어, 기술의 실용화와 보편화를 더욱 가속할 것으로 전망된다.

2) 유럽

유럽연합(EU)은 돌봄로봇 기술을 고령화 사회 대응과 의료서비스 혁신의 핵심 요소로 인식하고, 다양한 정책적 지원을 제공하고 있다. EU의 대표적인 연구혁신 프로그램인 Horizon 2020과 그 후속 프로그램인 Horizon Europe을 통해 돌봄로봇 분야의 연구개발에 투자가 이루어지고 있다. 이러한 프로그램들은 노인 인구의 독립적인 생활 지원과 의료서비스 질 향상에 중점을 두고 있으며, 로봇 기술과 보조 기술을 활용한 통합 건강관리 모델 및 디지털 솔루션 개발을 적극 장려하고 있다. 예를 들어, 'ACCRA' 프로젝트는 고령자를 위한 자율 로봇 개발에 초점을 맞추고 있으며(ACCRA, n.d.), 'CARESSES' 프로젝트는 문화적 다양성을 고려한 돌봄로봇 설계를 목표로 하고 있다(CARESSES, n.d.). 이러한 프로젝트들은 기술개발뿐만 아니라 사회적, 윤리적 측면까지 종합적으로 고려하는 접근 방식을 취하고 있다.

EU는 또한 인공지능과 로봇 기술의 윤리적, 법적 측면에도 주목하고 있다. 2024년부터 단계적으로 시행되는 유럽연합 인공지능 법은 돌봄로봇을 포함한 AI 시스템 사용에 대한 포괄적인 규제 프레임워크(framework)를 제공할 것으로 예상된다. 이는 기술 발전과 윤리적 고려 사항 사이의 균형을 맞추려는 EU의 노력을 잘 보여주는 사례이다.

개별 국가 차원에서도 각국의 특성을 반영한 다양한 정책이 추진되고 있다. 영국은 'Robotics and Autonomous Systems' 전략을 통해 돌봄 분야 로봇 개발에 투자하고 있으며(UKRAS, n.d.), 독일은 'Pflege 4.0' 이니셔티브를 통해 디지털 기술을 활용한 돌봄서비스 혁신을 추진하고 있다(Pflege, n.d.). 덴마크 역시 국가 차원에서 의료 로봇 혁신을 적극 지원하고 있다(Healthcare Denmark, n.d.). 이러한 각국의 노력은 EU 차원의 정책과 시너지를 이루며 유럽 전체의 돌봄로봇 기술 발전을 가속화하고 있다.

3) 미국

미국의 돌봄로봇 정책은 민간 주도의 기술 혁신과 공공 부문의 제도적 지원이 조화를 이루는 형태로 발전하고 있다. 특히 주목할 만한 점은 2018년 메디케어(Medicare) 급여 항목에 정서지원용 반려로봇 파로(PARO)를 포함시킨 결정이다(장길수, 2018). 이는 노인 우울증과 치매 관리에 있어 로봇의 활용 가치를 공식적으로 인정한 선례로, 향후 다른 돌봄로봇에 대한 급여 적용 확대의 기반이 될 것으로 예상된다. 연방 정부 차원에서는 국립과학재단(National Science Foundation, NSF)이 주도하는 국가 로봇 계획(National Robotics Initiative, NRI)을 통해 의료·돌봄 분야 로봇 연구에 집중적인 투자가 이루어지고 있다. 이 프로그램은 산학연 협력을 통한 혁신적인 로봇 기술개발을 지원하며, 특히 인간-로봇 협력 시스템 개발에 중점을 두고 있다. 또한, 국립 장애, 독립생활, 재활 연구소(National Institute on Disability, Independent Living, and Rehabilitation Research, NIDILRR)는 노인들이 개인 간병을 도와줄 로봇을 신뢰하는 데에는 무엇이 도움이 되는지 연구하고 있다. 국립보건원(National Institutes of Health, NIH) 산하 국립노화연구소(National Institute on Aging, NIA)에서도 노인 건강증진을 위한 로봇을 포함한 다양한 기술개발을 적극 지원하고 있다. 이는 고령화에 따른 의료비 증가 문제에 대응하고, 노인의 삶의 질을 향상시키기 위한 노력의 일환으로 볼 수 있다.

미국의 정책적 특징 중 하나는 민간기업과 연구기관의 혁신을 장려하면서도, 필요한 경우 공공 부문에서 제도적 지원을 제공하는 균형 잡힌 접근 방식을 취하고 있다는 점이다. 이러한 접근은 기술 혁신의 속도를 높이면서도 동시에 사회적 수용성을 확보하는 데 효과적인 것으로 평가받고 있다. 향후 미국의 돌봄로봇 정책은 급속한 고령화와 의료비 증가 문제에 대응하면서, 동시에 개인정보 보호와 윤리적 이슈 등을 고려한 균형 있는 발전을 추구할 것으로 전망된다. 특히 메디케어와 같은 공적 의료보험 체계 내에서 돌봄로봇의 활용을 확대하는 방안이 정책 과제로 떠오를 것으로 예상된다.

라 국내 현황 및 정책 과제

1) 현황

국내의 돌봄로봇 산업은 초기 단계이지만 빠르게 성장할 것으로 예상된다. 정부와 민간 부문의 협력을 통해 다양한 돌봄로봇 기술이 개발되고 있으며, 배설, 커뮤니케이션 등과 관련된 일부 제품은 이미 현장에서 시범 운영 중이다. 2023년부터 노인장기요양보험의 복지용구 항목에 신기술 활용 제품을 일부 포함하기 시작했다(요양보험제도과, 2023). 현재 6개 시범사업 지역에서 기저귀센서와 구강세척기 2개 제품을 1년간 복지용구로 이용할 수 있도록 지원하고 있다. 이는 돌봄로봇 기술의 공적제도 편입을 위한 첫걸음으로, 향후 확대될 것으로 예상된다.

국내 돌봄로봇 기업 생태계도 활발히 형성될 것으로 전망된다. 다수의 로봇 전문 중소기업과 스타트업이 등장하고 있다. 다양한 돌봄로봇 제품을 개발하여 요양병원과 시설을 중심으로 보급하고 있다. 정부의 '로봇산업핵심기술개발사업', '재활로봇중개연구사업', '돌봄로봇중개연구사업' 등 전략적 R&D 투자가 이러한 기업 생태계 성장의 원동력이 될 것으로 기대된다.

현장에서의 돌봄로봇 도입은 아직 초기 단계이지만, 점차 확대될 것으로 예상된다. 특히 프리미엄 실버타운이나 요양원에서 선도적으로 돌봄로봇을 도입하는 사례가 증가하고 있다. 주목할 만한 점은 청년층 인력 확보가 어려운 지방 요양시설일수록 로봇에 대한 수요가 높다는 것이다. 이는 돌봄로봇이 단순한

노동 대체가 아닌, 기존 현장 인력과의 협업을 통해 돌봄서비스의 질을 높이는 방향으로 활용될 수 있음을 시사한다.

2) 정책 과제

돌봄로봇의 효과적인 도입과 확산을 위해서는 다양한 정책적 과제가 해결되어야 한다. 첫째, 공적 돌봄 체계 내에서의 로봇 활용 기반 마련이 시급하다. 정부는 노인장기요양보험을 중심으로 건강보험 내 로봇기기에 대한 급여 적용을 확대하고, 재가요양보호 서비스에 대해서도 로봇 활용 수가 모델을 신설하는 등 제도적 인센티브를 설계해야 한다. 또한, 노인장기요양보험 관련 기관에서의 로봇 활용 실증을 통해 향후 시설의 기능보강이나 수가 가산 등을 검토할 필요가 있다.

둘째, 돌봄로봇의 시범적인 보급을 통한 다양한 실증이 필요하다. 이는 기술의 실효성을 검증하고, 현장에서의 적용 가능성을 평가하는 데 중요한 과정이다. 시범 보급은 소규모로 시작하여 점진적으로 그 규모를 확대해 나가는 방식을 채택해야 한다. 예를 들어, 초기에는 몇 개의 요양시설이나 재가 서비스 제공기관을 선정하여 시범사업을 실시하고, 그 결과를 바탕으로 대상 기관과 지역을 확대해 나갈 수 있다. 이러한 단계적 접근은 기술적 문제점을 조기에 발견하고 수정할 수 있게 하며, 동시에 사용자와 돌봄 제공자의 피드백을 지속적으로 수렴할 수 있는 장점이 있다.

셋째, 돌봄로봇 R&D 지원 체계 강화가 필요하다. 보건복지부와 산업통상자원부는 테스트베드 조성, 규제 샌드박스 적용 등을 통해 신기술의 신속한 실증과 사업화를 뒷받침할 실증환경 구축에 공공투자를 확대해야 한다. 지속적인 연구개발을 바탕으로 실증 기능을 확대하여 더 많은 기업들이 임상 검증을 받을 수 있도록 지원해야 한다.

넷째, 돌봄 인력의 로봇 활용 역량 강화가 중요하다. 요양보호사 양성 교육과정에 '돌봄 ICT 및 로봇 활용' 과목을 신설하고, 보수교육에 로봇 관련 커리큘럼 확대를 준비해야 한다. 또한, 돌봄로봇 전문 인력 양성을 위한 별도의 자격증 제도 도입과 함께, 기존 요양보호사나 간호사 등 돌봄 관련 자격자들을 대상으로 한 돌봄로봇 활용 교육 프로그램 개발 및 시행도 검토할 필요가 있다. 이를 통해 신규 인력뿐만 아니라 기존 현장 인력의 디지털 문해력을 전반적으로 높여야 한다.

다섯째, 개인화된 돌봄로봇 서비스 제공을 위한 데이터 기반 구축이 필수적이다. 서비스 수요자들로부터 방대한 데이터를 축적하고 이를 기반으로 최적의 서비스 모델을 개발해 나가는 것이 중요하다. 이를 위해 돌봄 관련 데이터 플랫폼을 구축하고, 이에 상응하는 수가 모델도 병행하여 마련해야 한다.

마지막으로, 돌봄로봇의 사회 전반적 확산을 위한 법·제도 정비가 필요하다. 노인요양시설 설치·운영 기준에 로봇이나 ICT 관련 조항을 신설하고, 관련 법 내 돌봄로봇 등의 항목을 신설하는 등의 법적 지위 확립이 필요하다. 또한, 로봇의 오작동이나 프라이버시 침해 등에 대비한 배상책임보험 의무화 방안도 마련되어야 한다. 더불어 돌봄 윤리 특별위원회를 구성하여 인간-로봇 관계에서의 행동 기준과 윤리헌장 등을 선제적으로 마련해야 할 것이다.

이러한 다각적인 정책 과제들을 체계적으로 추진함으로써, 돌봄로봇의 효과적인 도입과 확산을 위한 기반을 마련할 수 있을 것이다. 특히 시범 보급과 실증을 통한 단계적 접근은 기술의 완성도를 높이고 사회적 수용성을 제고하는 데 큰 도움이 될 것이다.

마 맺음말

초고령사회에 대응한 지속 가능한 돌봄 체계 구축을 위해서는 로봇 기술 발전, 제도 정비, 서비스 혁신이 선순환하는 혁신 생태계 조성이 필수적이다. 이를 위해 연구자, 기업, 의료·돌봄 종사자, 정책 당국 간의 긴밀한 협력이 요구된다. 의료 및 복지 분야에서의 로봇 활용을 적극 추진할 것으로 기대된다. 돌봄로봇 개발 방식도 변화가 필요하다. 기존의 공급자 중심 기술 푸시(technology-push) 방식에서 벗어나, 노인과 가족, 요양보호사 등 실제 사용자들이 개발 과정에 직접 참여하는 수요자 주도형 개발 방식으로의 전환이 필요하다. 한국보건산업진흥원의 '수요자 중심 돌봄로봇 및 서비스 실증 연구개발 사업'은 이러한 변화의 좋은 사례이다(Lim et al., 2023; Song, 2022). 궁극적으로 돌봄로봇 기술은 노인의 존엄성과 자립성 증진이라는 가치를 지향해야 한다. 단순한 노동 대체나 효율성 추구를 넘어, 로봇과 인간 돌봄자의 협력을 통해 노인의 삶의 질을 높이는 것이 핵심목표가 되어야 한다. 이를 위해 '로봇 윤리 가이드라인' 수립 등을 통해 인간 중심의 로봇 활용 원칙을 명확히 해야 할 것이다.

우리나라는 IT 강국으로서의 기술력과 급속한 고령화 경험을 바탕으로, 돌봄로봇 분야에서 선도적 모델을 구축할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 정부의 강력한 정책 드라이브와 산학연병(산업체-대학-연구소-병원) 협력 네트워크를 통해 K-케어 로봇 모델을 개발하고 확산시킨다면, 초고령사회 문제해결과 함께 새로운 성장 동력 창출이라는 두 가지 목표를 동시에 달성할 수 있을 것이다.

참고문헌

고인순(2017). “파로(PARO)로봇 중재가 치매노인의 인지기능, 정서, 사회적 상호작용 및 문제행동에 미치는 효과”, 중앙대학교, 박사 학위논문.

김주연(2022). “요양보호사 20%만 현장에…안정적 일자리 위해 공공 기관 확충”, 청년의사, https://www.docdocdoc.co.kr/news/articleView.html?idxno=2025688에서 2024. 7. 1. 인출.

김호중(2023). “노인요양 스마트기술 어디까지 왔나”, 월간장기요양, http://www.carekim.com/news_view.jsp?ncd=1205에서 2024. 7. 1. 인출.

요양보험제도과(2023). “장기요양 복지용구 지원영역 확대한다! – 신기술 활용 제품 대상 ‘복지용구 예비급여 시범사업’ 실시 –”, 보건복지부, https://www.mohw.go.kr/board.es?mid=a10503010200&bid=0027&tag=&act=view&list_no=377011&cg_code=에서 2024. 7. 1. 인출.

이윤신(2023). “고령사회 현황과 초고령사회 대응 정책방향”, 의협신문, https://www.doctorsnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=150793에서 2024. 7. 1. 인출.

송원경(2023). “Editorial”, Journal of Korea Robotics Society, Vol.18 No.4, pp. 521~522.

장길수(2018). “심리치료 로봇 '파로', 미국 메디케어 적용 대상에 포함”, 로봇신문, http://m.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=15453에서 2024. 7. 1. 인출.

정일영·김가은(2019). “프론티어 기술(FT) 적용 산업혁신정책 조사, 한·일 돌봄로봇 비교연구”, 과학기술정책연구원.

주영재(2024). “노인 1000만 시대…이르면 연말 ‘초고령 사회’ 진입”, 경향신문, https://www.khan.co.kr/national/national-general/article/202407120600015에서 2024. 7. 1. 인출.

최민석(2017). “심리치료용 애완로봇, 고령화 사회를 위한 준비로서의 기회와 과제”, 주간기술동향, IITP.

Asbeck, A. T., Dyer, R. J., Larusson, A. F. & Walsh, C. J.(2013). “Biologically-Inspired Soft Exosuit”, In 2013 IEEE 13th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR) (pp. 1~8), IEEE.

Esquenazi, A., Talaty, M., Packel, A. & Saulino, M.(2012). “The ReWalk Powered Exoskeleton to Restore Ambulatory Function to Individuals with Thoracic-Level Motor-Complete Spinal Cord Injury”, American journal of physical medicine & rehabilitation, Vol.91 No.11, pp. 911~921.

Hung, L., Liu, C., Woldum, E., Au-Yeung, A., Berndt, A., Wallsworth, C., … & Chaudhury, H.(2019). “The Benefits of and Barriers to Using a Social Robot PARO in Care Settings: a Scoping Review”. BMC Geriatrics, Vol.19 No.1, pp. 232.

Lim, M. J., Song, W. K., Kweon, H. & Ro, E. R.(2023). “Care Robot Research and Development Plan for Disability and Aged Care in Korea: A Mixed-Methods User Participation Study”, Assistive Technology, Vol.35 No.4, pp. 292~301.

Miura, K., Kadone, H., Koda, M., Abe, T., Endo, H., Murakami, H., … & Yamazaki, M.(2018). “The Hybrid Assisted Limb (HAL) for Care Support, a Motion Assisting Robot Providing Exoskeletal Lumbar Support, can Potentially Reduce Lumbar Load in Repetitive Snow-Shoveling Movements”, Journal of Clinical Neuroscience, Vol.49, pp. 83~86.

Naric(2018). “What Would Help Older Adults Trust Robots to Help Them with Personal Care?” Retrieved July 1, 2024 from https://sslvpn.heitechservices.com/research-focus/what-would-help-older-adults-trust-robots-help-them-personal-care

Ogata, T., Abe, H., Samura, K., Hamada, O., Nonaka, M., Iwaasa, M., … & Inoue, T.(2015). “Hybrid assistive limb (HAL) rehabilitation in patients with acute hemorrhagic stroke”, Neurologia medico-chirurgica, Vol.55 No.12, pp. 901~906.

Shin, N. Y., Kim, T. G., Jang, J. Y. & Kim, M. Y.(2021). “The Effects of Carebidet Robot during Defecation on Incontinence Associated Dermatitis, Pressure Ulcer Risk, and Biological Markers in Critical Care Patients”, Journal of Digital Convergence, Vol.19 No.12, pp. 649~660.

Song, W. K., Song, W. J., Kim, Y. & Kim, J.(2013). “Usability Test of KNRC Self-Feeding Robot”, In 2013 IEEE 13th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), pp. 1~5. IEEE.

Song, W. K.(2022). “Care Robots and Service Model Development. Assistive Technology”, Vol.16 No.2, pp. 92~100.

Zlatintsi, A., Dometios, A. C., Kardaris, N., Rodomagoulakis, I., Koutras, P., Papageorgiou, X., … & López, R.(2020). “I-Support: A robotic platform of an assistive bathing robot for the elderly population.” Robotics and Autonomous Systems, Vol.126, pp. 103451.

経済産業省·厚生労働省(2013). “介護ロボット事業参考資料:ロボット介護機器開発５ヵ年計画について”, https://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-12301000-Roukenkyoku-Soumuka/0000034903.pdf

北嶋守(2021). "日本における介護ロボットの普及課題―ビジネス?エコシステムの視点に基づいて―", 産業???究年報, No.36, pp. 21~37.

ACCRA Project(n.d.), Retrieved July 1, 2024 from https://www.accra-project.org/en/sample-page/

CARESSES Project(n.d.), http://caressesrobot.org/en/

Healthcare Denmark (n.d.), Retrieved July 1, 2024 from https://healthcaredenmark.dk/national-strongholds/innovation/robotics/

Pflege (n.d.), Retrieved July 1, 2024 from https://www.berlin.de/sen/pflege/grundlagen/pflege-4-0/

UKRAS (n.d.), Retrieved July 1, 2024 from https://www.ukras.org.uk/

PART 4

8

초고령사회에 필요한 미래 모빌리티의 발전

조형희
연세대학교 기계공학부 교수

가 들어가는 말

국가통계포털에 따르면 우리나라는 2025년에 만 65세 이상 인구가 전체의 20% 이상을 차지하는 초고령사회에 진입할 것으로 예상된다. 또한, 노인 인구 비율은 계속해서 증가하여 2050년에는 전체 인구의 40%에 이를 것으로 예측된다. 초고령사회에서 발생할 수 있는 다양한 사회적 문제들은 주로 신체의 노화로 인한 것이다. 나이가 들수록 신체적 조건이 젊을 때와 비교해 많이 감소하여 움직임에 제약이 생기기 때문이다.

통계청이 발표한 2023년 사회조사에 따르면 국민 대부분이 신체적 활동이 수반되는 취미, 여행, 관광 등을 통해 노후를 보내고 싶어 하는 것으로 나타났다(통계청 2023). 걷기 및 달리기와 같은 기본적인 움직임이 삶의 질 향상과 밀접한 관련이 있다고 알려져 있다. 제4차 저출산·고령사회 기본계획에서는 부양 대상으로서의 노인이 아닌, 자율성과 독립성을 강조하는 긍정적 고령자로의 인식 전환을 제시하고 있다(보건복지부 2020).

이를 위해 초고령사회에서 모빌리티(mobility) 개발 및 발전이 어떻게 이루어지고 있는지, 그리고 이를 위해 필요한 정책에 대해 살펴보고자 한다.

나 웨어러블 로봇의 발달과 활용

초고령사회로의 진입은 우리나라를 포함한 많은 나라들이 직면하고 있는 현실이며, 이에 따라 고령층의 삶의 질을 유지하고 향상시키기 위한 다양한 기술적 접근이 필요하다. 2022년 세계보건기구(WHO)와 유니세프(UNICEF)는 'Global Report on Assistive Technology' 보고서를 발표했다(WHO & UNICEF, 2022). 이 보고서에서는 '아무도 뒤처지지 않는(Leaving no one behind) 사회'를 만들기 위해 로보틱스(robotics) 기술이 급부상하고 있으며, 이를 통해 고령자의 일상 활동을 지원할 수 있다고 강조했다. 2021년 세계지식재산권기구(World Intellectual Property Organization, WIPO)가 발표한 'Technology Trends 2021: Assistive Technology'에 따르면, 미래 모빌리티 기술에는 웨어러블 로봇(Exoskeleton)이 포함될 것이라 예측하고 있다(WIPO, 2021). 이처럼 웨어러블 로봇은 고령층의 독립적인 생활을 돕는 중요한 도구로 부각되고 있다.

모빌리티라는 단어는 보통 '탑승'을 연상시키지만, 탑승 자체가 움직임에 제약이 있는 고령자들에게는 부담스럽게 느껴질 수 있다. 반면, 웨어러블 로봇은 단순히 착용함으로써 자율성과 독립성을 충분히 확보할 수 있다. 또한 웨어러블 로봇을 착용하여 고령자의 움직임이 개선되면, 다른 모빌리티 수단을 이용할 때도 불편함이 줄어들 것이다. 웨어러블 로봇을 착용하고 이동하는 모습은 영화 '에일리언', '엣지 오브 투모로우', '아이언 맨' 등에서 자주 등장해 익숙하다. 이러한 영화들은 웨어러블 로봇의 향상된 신체 능력을 보여주기 때문에 실제 보급이 되더라도 큰 거부감 없이 이용할 수 있을 것이다. 2024년 5월에 챗GPT에게 초고령사회에서 미래 모빌리티의 모습을 묘사해 달라는 요청이 있었을 때, 웨어러블 로봇을 입은 노인이 그려진 것을 보면 웨어러블 로봇 기술이 노인들의 움직임 개선에 큰 도움이 될 것임을 예상할 수 있다.

2019년과 2022년에 Science와 Nature에 발표된 연구 결과에서도 웨어러블 로봇을 착용하여 움직임을 개선한 사례들이 있다. 웨어러블 로봇의 활용은 일반인들의 움직임에도 도움을 줄 뿐만 아니라, 특히 고령자들에게 큰 도움이 된다는 연구 자료가 있다(Kim et al., 2019; Slade et al., 2022). 미국 스탠포드 대학교와 체코 흐라데츠크랄로베 대학교에서 발표한 논문에 따르면, 웨어러블 로봇은 고령자들의 모빌리티 개선을 위해 개발되어야 하며, 이를 통해 보행 성능을 향상시킬 수 있다고 주장하고 있다(Lakmazaheri et al., 2024; Maresova et al., 2023). 조지아 공과대학에서도 과거부터 현재까지의 웨어러블 로봇 기술을 리뷰한 결과, 이 기술이 발전을 계속한다면 인간의 모빌리티를 크게 강화할 수 있을 것으로 예상하고 있다(Sawicki et al., 2020). 웨어러블 로봇 기술은 급속히 발전하고 있으며, 다양한 분야에서 그 활용도가 높아지고 있다. 이는 인간의 능력을 유지, 회복, 증강, 심지어 초월하는 데 중요한 역할을 한다. 웨어러블 로봇의 용도에 따라 현재 기술의 발달 현황을 토대로 이를 살펴보고자 한다.

1) 인간 능력 유지를 위한 웨어러블 로봇 - 일상생활 보조

일상생활 보조용 웨어러블 로봇은 거동이 불편한 사람들이 착용하여 일상생활을 독립적으로 할 수 있도록 보조하는 장치이다. 이 로봇은 고령자의 근력 저하와 관절 문제를 보완하여 독립적인 생활을 가능하게 한다. 걷기, 달리기, 일어서기, 계단 오르기 등 인간의 기본적인 움직임을 보조함으로써 고령자가 일상생활을 더 안전하고 독립적으로 수행할 수 있도록 돕는다.

삼성전자는 CES 2019에서 고령자의 균형감각과 움직임을 향상시킬 수 있는 고관절 착용형 웨어러블 로봇(EX1)을 공개하였다. 2023년 Healthcare 학회지에 발표된 문헌에 따르면, 삼성전자의 EX1을 착용

한 고령자들의 신체 움직임이 개선된 것으로 나타났다(Kim et al., 2023). 또한 같은 해 11월 BMC 노인병학회에서 발표된 내용에 따르면, EX1의 착용으로 고령자들의 운동 참여도가 향상되고, 바른 자세로 운동할 수 있도록 가이드 역할을 한다고 보고되었다(Shin et al., 2023). 일본의 사이버다인(Cyberdyne) 사의 Hybrid Assistive Limb(HAL)은 하지에 착용하여 걸을 수 있도록 보조해 주는 장치이다. HAL은 착용자의 뇌신호를 처리하여 동작을 제어하며, 착용자의 모든 움직임에 대한 피드백을 실시간으로 모니터링할 수 있다. 이러한 기술들은 고령자의 삶의 질을 크게 향상시키고, 자존감을 높이며, 낙상과 같은 사고를 예방하는 데 중요한 역할을 할 수 있다.

2) 인간 능력 회복을 위한 웨어러블 로봇 - 재활 로봇

재활 로봇은 부상이나 질병으로 인해 신체 기능이 저하된 환자들의 회복을 돕기 위해 사용된다. 이러한 로봇은 물리치료와 연계하여 환자의 재활 과정을 지원하며, 더 빠르고 효과적인 회복을 가능하게 한다. 예를 들어, 하반신 마비 환자를 위한 로봇은 걷기 훈련을 보조하여 근육과 신경의 회복을 촉진한다. 이러한 로봇은 반복적이고 정확한 운동을 가능하게 하여, 재활 치료의 효과를 극대화한다.

미국 MIT 대학교의 교수인 휴 허(Hugh Herr)는 2018년 TED 강연에서 '선채로'를 발표하였다. 그는 어린 시절 불의의 사고로 양쪽 다리를 무릎 아래까지 절단하였지만, 직접 개발한 웨어러블 로봇을 착용하고 몇 달간 재활을 진행한 결과, 스스로 움직일 수 있는 능력을 회복했을 뿐만 아니라 건강한 사람들과 동등한 수준으로 스포츠를 즐길 수 있을 정도로 향상된 신체 움직임을 보였다. 현대자동차는 기존의 자동차를 통한 이동과 함께 웨어러블 로봇의 도입으로 모빌리티의 영역을 넓히고 있다. 현대자동차 그룹의 로보틱스랩에서는 하지 근력 및 관절 운동의 회복을 위한 웨어러블 재활 로봇인 엑스블 멕스(X-ble MEX)를 개발하였다. 이 로봇은 환자나 장애인들이 착용하여 걸을 수 있도록 돕기 위해 개발되었으며, 2023년 및 2024년에 서울아산병원과 국군수도병원에 기증되어 재활 로봇 확대에 기여하고 있다. 재활용 웨어러블 로봇은 환자들의 회복 속도를 높이고, 일상생활로의 복귀를 앞당기는 데 크게 기여를 할 것이다.

3) 인간 능력 증강을 위한 웨어러블 로봇 - 작업 능력 향상

웨어러블 로봇은 작업 환경에서도 중요한 역할을 한다. 이러한 로봇은 작업자의 신체 능력을 증강하여 무거운 물건을 들어 올리거나 장시간 동안 반복적인 작업을 수행하는 데 도움을 준다. 산업 현장에서 사용되는 웨어러블 로봇은 작업자의 근육 피로를 줄이고, 생산성을 높이며, 안정성 강화에도 기여한다. 예를 들어, 로봇 팔은 공장에서 무거운 부품을 조립하거나 이동시키는 작업을 보조하여, 작업자의 신체 부담을 줄이고 부상의 위험을 감소시킨다.

현대자동차 그룹의 로보틱스랩에서는 의자용 착용 로봇인 첵스(CEX)와 상향 작업을 보조하는 조끼형 착용 로봇 벡스(VEX)를 자체 개발하여 자동차 생산 공정 과정에서 오는 근육 피로감을 80% 줄일 수 있었다. 이는 현장에서 근무하는 작업자들이 같은 시간 동안 더 많은 제품을 생산해 낼 수 있어 경제적이고, 관절 및 근육 등에 반복적으로 생기는 부하를 줄임으로써 작업자의 질환 예방에도 큰 도움이 된다. 독일의 저먼바이오닉(German Bionic) 사의 Apogee와 Apogee+ 웨어러블 로봇은 각각 산업용 및 의료용으로 제작되었다. 두 제품 모두 작업에 쓰이는 근육을 보조하여 작업자가 느끼는 신체 부담을 크게 줄여준다. 미국의 NASA는 우주비행사가 무중력 공간에서 작업할 수 있도록 돕는 X1 Robotic Exoskeleton을 개발했다. X1을 착용함으로써 우주비행사들은 건강 유지를 위한 운동을 할 수 있으며, 저중력 또는 고중력 환경에서 걷거나 작업할 때 필요한 추가적인 힘을 제공받을 수 있다. 이는 우주비행사들이 장기적인 우주 탐사 임무를 보다 성공적으로 수행할 수 있도록 돕는다. 웨어러블 로봇의 사용은 물류, 건설, 제조업, 더 나아가 극한 환경에서도 생산성을 증가시킬 뿐만 아니라, 작업자가 건강한 신체를 유지하며 근무 현장에서 장기적으로 일할 수 있도록 해줄 것이다.

4) 인간 능력 초월을 위한 웨어러블 로봇 - 슈퍼맨 슈트

웨어러블 로봇 기술의 발전은 인간의 신체 능력을 보조하거나 증강하는 단계를 넘어서, 이제는 초월하는 단계에 이르고 있다. 이러한 기술의 정점에 있는 것이 '슈퍼맨 슈트'다. 슈퍼맨 슈트는 인간이 자연적으로 가질 수 없는 힘, 속도, 내구성 등을 착용자에게 제공한다. 강력한 구조 및 동력 장치를 통해 외부의 충격을 흡수하고, 강하면서 신속하고 정확한 움직임을 얻을 수 있다. 또한 첨단 센서 시스템을 적용해 착용자의 움직임을 실시간으로 모니터링하고 최적의 지원을 제공한다. 슈퍼맨 슈트는 SF 영화의 소재로 많이 이용되는데, 영화 '아이언맨'이 그 대표적인 예다. 아이언맨 슈트를 착용하면 다른 도구의 도움 없이도 기동, 회피, 치료, 전투 등 혼자서 모든 일을 해결할 수 있다.

슈퍼맨 슈트의 기술은 아직 초기 단계에 있지만, 그 잠재력은 매우 크다. 특히 군사 작전을 수행할 때 슈퍼맨 슈트를 착용하면 무장으로 인해 움직임이 둔해질 수밖에 없는 군인들에게 더 오랜 시간 작전을 수행할 수 있도록 도와준다. 군사용 웨어러블 로봇 개발은 미국의 거대 방위 산업 기업인 록히드 마틴(Lockheed Martin)과 레이시온 테크놀로지(Raytheon Technology)에서 진행되었으며, 각각 하지 웨어러블 로봇인 Onyx Exoskeleton과 전신 웨어러블 로봇인 XOS 2를 공개했다. 또한 슈퍼맨 슈트는 재난 현장에서 구조대원들이 무거운 잔해를 치우고, 빠르게 피해자를 구조하는 데 사용될 수 있다. 우주와 같은 극한 환경에서도 사용될 수 있는데, 우주비행사들이 강력한 중력이나 무중력 상태에서 작업을 수행할 수 있도록 도와줄 수 있다. 이러한 기술은 인류가 새로운 한계에 도전하고, 더 안전하고 효과적으로 임무를 수행할 수 있도록 한다. 이와 같이 웨어러블 로봇의 착용으로 인해 고령자들의 자율성과 독립성이 증대되어 자존감과 심리적 안정감이 함께 증진될 것이다. 또한, 균형감각을 보조하여 낙상을 예방하고, 신체 상태를 지

속적으로 모니터링하여 건강관리에 필요한 데이터를 제공받아 적절한 시기에 필요한 조치를 취할 수 있도록 도움을 받을 것이다.

초고령사회에서 웨어러블 로봇은 단순한 보조 장치를 넘어, 노년층의 삶의 질을 높이고 독립성을 유지하는 데 중요한 역할을 할 것이다. 일상생활 보조에서부터 재활 치료, 작업 능력 향상, 그리고 인간 능력의 초월에 이르기까지, 기술의 발전과 함께 웨어러블 로봇은 더욱 정교하고 다양한 기능을 갖추게 될 것이며, 이를 통해 고령자들이 보다 안전하고 건강하게 일상생활을 영위할 수 있을 것이다. 사회 전반에 걸쳐 이러한 기술의 도입과 지원이 확대된다면, 초고령사회에서도 모든 세대가 함께 조화롭게 살아가는 미래를 기대할 수 있을 것이다.

다 개인 이송 기술의 발달

초고령사회로의 진입은 많은 나라에서 현실로 다가오고 있다. 고령화가 진행되면서 노인들의 독립적인 생활과 이동성을 유지하는 것이 중요한 사회적 과제가 되었고, 개인의 이동성에 대한 새로운 요구를 불러일으키고 있다. 유엔은 거동이 불편한 고령자들이 도로의 계단 및 턱 등으로 인해 안전하게 이동할 수 없으며, 이를 해결하기 위해 보조 기술개발이 필요하다고 발표했다. 이러한 보조 모빌리티 개발은 고령자들이 이용하기 쉽도록 접근성이 좋고, 효율적이며 안정성이 뒷받침되어야 한다고 강조했다. 미국 교통부와 안전협회는 마이크로 모빌리티와 온디맨드(On-demand) 서비스와 같은 미래 기술들을 개발한다면 개인의 독립성과 이동성을 크게 증가시킬 수 있을 것이라고 발표했다(U.S. DOT, 2021; NSC, 2022).

이처럼, 고령자가 안전하고 편리하게 이동할 수 있는 기술들의 필요성과 개발이 진행되고 있으며, 여기서는 실내 이송 기술부터 실외 지상 및 공중 이송 기술에 이르기까지 다양한 미래 모빌리티 기술의 발전에 대해 알아보고자 한다.

1) 실내 이송 기술

초고령사회로 접어들면서 고령자 인구가 증가함에 따라 실내 이송 기술의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 고령자들은 가정이나 요양시설, 병원 등에서 일상적으로 이동하는 데 어려움을 겪을 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 실내 이송 기술이 개발되고 있으며, 이는 고령자의 독립성과 삶의 질을 향상시키는 데 중요한 역할을 한다.

전동 휠체어는 고령자가 실내에서 독립적으로 이동할 수 있도록 돕는 중요한 장치이다. 최신 전동 휠체어는 사용하기 쉬운 인터페이스와 향상된 배터리 수명을 제공하며, 자율주행 기능과 장애물 회피 기술을 갖추고 있어 안전하고 편리한 이동을 보장한다. 미국의 윌(WHILL) 사의 전동 휠체어는 자동 운전 기능과 충돌 감지 시스템을 내장하고 있어 고령자들에게 안전한 이동을 보장한다.

지하철역에서 흔히 볼 수 있는 계단형 승강기는 초고령사회에 대응하여 좌석형 승강기로 발달되어 사용자가 좌석에 앉아 버튼을 누르면 승강기가 계단을 따라 위아래로 이동할 수 있도록 한다. 로봇 기술의 발전과 함께 고령자가 건물이나 복잡한 실내 공간에서 쉽게 이동할 수 있도록 돕는 실내 로봇도 개발되고 있다. 이러한 로봇은 다양한 센서와 인공지능 기술을 활용하여 사용자에게 최적의 경로를 안내하고, 필요시 물건을 운반하는 등의 역할을 수행하여 고령자에게 편리함을 제공한다. 또한 스마트홈 시스템과 연계하여 가정 내의 이동과 다양한 기기를 연결하여 고령자의 생활 편의를 높일 수 있다. 스마트홈 시스템의 진보된 모니터링 기술로 실시간으로 고령자의 움직임을 감지하여 긴급 상황을 감지하고, 응급상황 발생 시 가족이나 의료진에게 즉시 알릴 수 있을 것이다.

이러한 기술들은 고령자의 일상생활을 보다 안전하고 독립적으로 영위할 수 있도록 도와주며, 초고령사회에서도 삶의 질을 높이는 데 큰 역할을 할 것이다.

2) 건물 내부에서 이송 기술

고령자들은 일상생활에서 병원, 쇼핑몰, 공항, 대형 사무실 등 다양한 실내 공간을 이동해야 하기 때문에 실내 이송뿐만 아니라 더 큰 범위의 공간 이송을 돕기 위한 솔루션이 필요하다. 건물 내부에서 이송 기술은 고령자의 이동성을 보장하고, 편리하고 안전한 환경을 제공하는 데 중점을 두고 있다. 기존의 엘리베이터에 첨단기술을 접목하여 사용자의 요구를 보다 정확하게 반영하고, 이동 편의성을 극대화한 스마트 엘리베이터가 개발될 것이다. 또한, 이동식 플랫폼 리프트는 고령자들이 휠체어에 탄 채로 이동할 수 있도록 도와줄 것이다. 이 리프트는 수직 및 수평 이동이 가능하여 넓은 실내 공간을 편리하게 이동할 수 있다. 이정문 화백은 2050년에는 건물 자체가 움직일 것으로 예측했다. 이와 비슷한 아이디어로 영국의 에이럽(Arup)이 예측한 2050년 고층 건물 모습을 들 수 있다. 에이럽은 건물들의 각 층이 모듈화되어 있어 사용자가 이동을 원하면 모듈화된 공간 자체가 이동할 것이라고 예측했다. 따라서 건물 내에서는 모듈화된 공간을 이동하는 것을 제외하고는 층간 이동 자체가 불필요하다. 이는 거동이 불편한 고령자들이 최소한의 움직임으로 원하는 구역에서 업무를 볼 수 있도록 한다. 이 외에도 실내 이송 기술에서 활용되었던 자율주행 전동 휠체어 및 로봇 기술도 건물 내부를 이동할 때 유용하게 이용될 수 있다. 이러한 기술들은 고령자들이 보다 독립적이고 편리하게 다양한 실내 공간을 이동할 수 있도록 도와주며, 더 안전하고 편안한 환경을 제공할 것이다.

3) 실외 지상 이송 기술

실외 지상 이송 기술은 도시나 커뮤니티 내에서 고령자의 이동성을 높이는 데 중점을 둔다. 이러한 기술은 고령자들이 더 안전하고 독립적으로 이동할 수 있도록 돕고, 삶의 질을 향상하는 데 기여한다. 여기에는 자율주행 차량, 목적 기반 모빌리티(Purpose Built Vehicle, PBV), 그리고 스마트 도로 등이 포함된다. 자율주행 차량은 고령자들이 먼 거리를 독립적으로 이동할 수 있도록 돕는 기술 중 하나다. 자율주행 기술을 6단계로 나누었을 때(레벨 0~5) 가장 진보된 레벨5 자율주행 기술을 갖춘 차량은 운전자의 개입 없이도 모든 주행을 스스로 처리할 수 있다. 미국의 테슬라(Tesla)는 공식적으로 레벨2 자율주행 차량을 개발하여 상용화하였고, 독일의 메르세데스 벤츠(Mercedes-Benz)는 레벨3 자율주행 차량을 개발했다. 현대자동차는 2021년 IAA 모빌리티에서 레벨4 수준의 아이오닉5 자율주행차를 공개하여 시범 운영 중이다. 레벨5 수준의 자율주행 차량은 개발 중이며, 레벨5 수준의 자율주행 시스템이 차량을 포함한 다른 모빌리티에도 적용된다면 고령자들에게 무한한 이동성을 제공할 것이다.

현대자동차가 개발하고 있는 목적 기반 모빌리티(PBV)는 탑승객이 목적지까지 향하는 동안 운동, 헬스케어, 엔터테인먼트 등 필요한 맞춤형 서비스를 제공한다. 과거에는 이동 수단으로만 사용되었던 차량이 미래에는 이동과 함께 활동할 수 있는 공간으로 의미가 확장되면서 도로 위에서 보내는 시간을 더 효율적으로 활용할 수 있을 것이라 기대된다. 또한, 미래에는 과속 방지 도로의 개발로 차량과 도로가 서로 연결되어 차량이 과속 방지 도로에 들어오게 되면 차량의 속도가 자동으로 조정되는 기술이 도입될 것이다. 이와 같은 스마트 도로의 개발은 고령자의 실외 이동을 더욱 안전하게 도울 수 있다. 이러한 기술들은 고령자들이 더 독립적이고 안전하게 이동할 수 있도록 하여, 일상생활에서 자유로운 이동과 삶의 질 향상에 크게 기여할 것이다.

4) 실외 공중(3차원) 이송 기술

현재 개발되고 있는 도심 항공 모빌리티(Urban Air Mobility, UAM)는 실외 공중 이송 기술로, 미래 도시의 교통 혼잡을 해소하고 효율적인 이동을 가능하게 한다. 이러한 기술은 도심 항공 모빌리티, 공중 곤돌라 시스템 등을 포함하며, 미래 모빌리티의 중요한 축을 형성하고 있다. 도심 항공 모빌리티(UAM)는 자율주행 차량과 함께 각광받고 있는 미래 모빌리티 중 하나다. 도심 내에서 사람들을 공중으로 이동시키는 새로운 교통수단으로, 주로 드론과 같은 전기 수직 이착륙기를 활용해 도로 교통의 제약을 극복하고 빠르고 효율적인 이동을 가능하게 한다. 해외에서는 에어버스(Airbus), 보잉(Boeing), 벨(Bell Aircraft) 사 등 많은 스타트업 항공기 제작 기업들이 대거 도심 항공 모빌리티(UAM) 개발에 뛰어들고 있다. 국내에서는 현대자동차가 Supernal S-A2 모델을 CES 2024에서 공개하였고, 한화시스템은 미국 오버에어(Overair)와 합작하여 Butterfly 모델을 2025년 제주도에서 상용화하기 위해 개발 중이다.

다인승 항공 모빌리티의 개발과 더불어 1인용 항공 모빌리티의 개발도 활발히 진행되고 있다. 1인용 항공 모빌리티는 개인이 소유하고 운전할 수 있는 소형 비행체로, 공중 이동을 통해 빠르고 자유롭게 이동할 수 있도록 설계되었다. 자율비행 기능을 갖추고 있어 비행경로를 설정하면 자동으로 목적지까지 이동할 수 있다. 이는 운전 기술이 부족한 고령자들에게 큰 도움을 줄 수 있고, 개인으로 이동할 수 있기 때문에 자율성과 독립성을 보장해준다. 스웨덴의 스타트업 회사 젯슨(Jetson)은 Jetson One이라는 1인 항공 모빌리티를 개발했고, 손쉬운 활용법과 안정성을 인정받아 미국에서는 조종 라이센스가 없어도 운전할 수 있다. 일본의 스즈키(Suzuki)와 스카이드라이브(Skydrive) 사가 합작하여 개발한 1인용 비행 자동차 SD-03 모델은 2020년에 성공적으로 비행에 성공하여 후속 연구를 진행 중이다.

공중 곤돌라 시스템은 도심 내 주요 지점을 연결하는 공중 케이블카 형태의 이동 수단이다. 영국의 에이럽이 공개한 2050년 고층 빌딩 상상도에는 고층 빌딩에서 도심으로 바로 이동할 수 있는 케이블카의 모습이 나타나 있다. 독일의 메르세데스 벤츠는 2019년에 지속 가능한 미래 도시 모빌리티의 모습을 공개했는데, 이미지에는 캔형의 공중 곤돌라 시스템을 이용해 시민들이 이동하는 모습이 있다. 이는 이동이 불편한 고령자들에게 지상 교통의 혼잡과 위험성을 피하고, 쾌적한 이동을 제공할 수 있다. 공중 곤돌라 시스템을 관광 명소, 대형 쇼핑몰, 교통 허브 등 도심 내 주요 거점들에 설치하면 빠르고 편리한 이동이 가능할 것이다.

지속적인 기술개발과 함께, 미국은 이러한 미래 항공 모빌리티 기술들이 사회에 원활히 통합될 수 있도록 'Innovative 28' 프로젝트를 소개했다(FAA, 2023). 이 프로젝트는 2023년 미국 연방항공청이 공개한 보고서의 내용으로, 2028년까지 미래 항공 모빌리티를 안전하고 거부감 없이 이용할 수 있도록 정부와 산업계가 협력해 운용 방안을 개발하는 것을 목표로 하고 있다.

라 AI 및 자율주행과 모빌리티 기술의 연계 및 발전 방향

4차 산업혁명이 불러온 AI 및 자율주행 기술의 발달은 모빌리티 기술과의 연계를 통해 고령자들에게 그 어느 때보다 안전하고 편리한 이동 수단을 제공할 것으로 예상된다. 유엔은 AI를 활용한 기술개발이 국가 발전의 주요 영역이 될 만큼 많은 국가들이 관심을 기울이고 있음을 발표했다(U.N., 2021). 또한 미래 도시의 모빌리티에는 모두 AI가 접목될 것이라고 예측하고 있다. 미국의 에너지부, 교통부, 환경청에서 공개한 미래 모빌리티 관련 보고서에는 자율주행 기술이 공통적으로 포함되어 있다(U.S. DOE, 2017; U.S. DOT, 2018; U.S. EPA, 2023). 미국의 노스웨스턴 대학교와 MIT 대학교에서도 미래 모빌리티 기술에 자율주행 및 상호연결된 모빌리티가 공통적으로 언급되고 있다(Schofer et al., 2016; MIT EI, 2019). 유럽연합 집행

위원회가 2021년에 발표한 보고서에서는 유럽의 지속 가능한 모빌리티 전략에 대한 비전을 제시하며, AI가 접목된 자율주행 모빌리티 개발의 필요성을 강조했다(European Commission, 2021). 영국 정부가 2019년에 발표한 보고서에서도 열차 및 차량의 자동화 기술이 미래 모빌리티의 주요한 기술이 될 것이라고 밝혔다(U.K. GOS, 2019). 이처럼 AI 및 자율주행 기술과 모빌리티의 결합은 안전하고 지속 가능한 미래를 구축하는 데 필수적인 요소로 예상된다.

앞서 살펴본 웨어러블 로봇과 개인 이송 기술들이 미래 모빌리티로 주목받기 위해서는 AI와 자율주행 기술의 연계가 필수적이다. AI 및 자율주행이 접목된 웨어러블 로봇은 사용자의 움직임을 개인화하여 최적화하고, 신체 상태를 실시간으로 모니터링 및 피드백을 제공해 움직임 과정을 더욱 효과적으로 만들 수 있다. 또한 센서 기술을 통해 주변 환경을 인식하여 장애물을 피하거나 경로를 수정하는 등 고령자들이 실내·외를 보다 안전하게 이동할 수 있도록 돕는 자율 이동 보조 기기를 개발할 수 있을 것이다.

개인 이송 장치들은 완전 자동화 단계인 레벨5 수준의 AI 자율주행 시스템의 통제하에 주행이 제어될 것이다. AI는 자율주행 장치들이 주변 환경을 이해하고, 상황에 맞는 결정을 내리며, 안전하게 주행할 수 있도록 한다. 컴퓨터 비전 기술을 통해 카메라와 센서를 사용하여 도로, 교통 신호, 보행자, 장애물 등을 인식할 수 있으며 이는 차량이 실시간으로 환경을 파악하고 적절하게 대응할 수 있도록 한다. AI의 딥러닝 알고리즘을 이용해 방대한 양의 데이터를 학습하여 주행 패턴을 최적화하고, 예측 가능한 문제 상황을 처리할 수 있다. 이와 같은 기술은 향상된 안정성과 효율성을 바탕으로 고령자들의 이동을 보장할 것이다. 또한 AI 및 자율주행 기술의 발전은 결국 모든 모빌리티 기술과 연계되어, 더 이상 사람의 조작 없이도 안전하고 쾌적하게 운용될 것이다. 이는 고령자들의 이동성을 크게 향상시켜 독립적인 생활을 영위할 수 있도록 돕고, 사회 전반의 삶의 질을 높이는 데 중요한 역할을 할 것이다.

마 초고령사회의 모빌리티 향상 및 활용성을 높이기 위한 정책 제언

초고령사회에서 모빌리티 기술의 발전은 고령자들이 보다 안전하고 편리하게 이동할 수 있도록 돕고, 독립적이고 자율적인 삶을 영위할 수 있을 것이다. 이를 위해 필요한 정책들을 다음과 같이 제안할 수 있다.

인프라 개선 및 접근성 확대

웨어러블 로봇 및 자율주행 모빌리티 사용을 위한 공공 인프라를 개선하고 접근성을 높여야 한다. 차량의 충전 및 유지보수 인프라를 구축하여 사용자들이 불편함 없이 기술을 활용할 수 있도록 하며, 공공교통수단, 도로, 건물 등의 무장애 설계를 강화하여 고령자들이 쉽게 접근하고 이용할 수 있도록 해야 한다.

교육 및 훈련 프로그램 개발

웨어러블 로봇 및 자율주행 모빌리티 사용법에 대한 교육 프로그램을 마련하여 고령자와 일반인이 쉽게 기술을 습득하고 활용할 수 있도록 해야 한다. 특히 의료진, 물리치료사, 간병인 등 관련 전문가들을 대상으로 웨어러블 로봇 및 자율주행 기술 관련 교육을 실시하여 재활 및 치료에 적극 활용할 수 있도록 해야 한다.

재정적 지원 및 보조금 제공

고령자 및 장애인들이 웨어러블 로봇과 자율주행 모빌리티를 쉽게 구입하고 사용할 수 있도록 재정적 지원과 보조금을 제공해야 한다. 재정적으로는 의료보험 및 사회복지제도를 통해 웨어러블 로봇 및 자율주행 모빌리티 관련 비용을 보조하여 경제적 부담을 줄여야 할 것이다.

규제 및 표준화 제정

웨어러블 로봇과 자율주행 기술의 안전성과 품질을 보장하기 위해 관련 규제와 표준을 마련하고, 이를 준수하도록 해야 한다. 이러한 기술의 표준화를 통해 다양한 제조업체가 호환이 가능한 제품을 개발할 수 있도록 유도해야 할 것이다.

사회적 인식 개선

웨어러블 로봇과 자율주행 기술에 대한 긍정적인 인식을 확산시키기 위해 홍보 및 캠페인을 진행해야 한다. 또한 고령자 및 일반인들이 기술의 이점을 이해하고 적극적으로 활용할 수 있도록 정보 제공 및 상담 서비스를 운영할 필요가 있다.

연구 개발 지원

웨어러블 로봇, AI, 자율주행 기술에 대한 연구 개발(R&D) 지원을 강화하고 대학, 연구소, 기업 간의 협력 프로젝트를 통해 혁신적인 기술개발을 촉진해야 한다.

산업 협력 강화

웨어러블 로봇 및 자율주행 모빌리티 기술을 보유한 기업과 협력하여 새로운 제품과 서비스를 개발하고 상용화해야 한다. 또한 다양한 산업 분야에서 웨어러블 로봇과 자율주행 모빌리티의 활용 사례를 발굴하고, 이를 통해 기술의 다방면 활용을 촉진할 필요가 있다.

데이터 수집 및 분석 활성화

웨어러블 로봇 및 자율주행 모빌리티 사용 데이터를 수집하고 분석하여 사용자 경험을 개선하고 기술 발전에 활용해야 한다. 이러한 데이터 기반의 정책 수립을 통해 웨어러블 로봇 및 자율주행 모빌리티 기술의 효율적이고 효과적인 활용을 지원할 수 있을 것이다.

지속 가능한 도시 계획 확립

스마트시티와 같은 지속 가능한 도시 계획에 웨어러블 로봇과 자율주행 기술을 통합하여 고령자 친화적인 환경을 조성하고, 도시 계획에서 고령자들의 이동성과 접근성을 고려한 인프라를 구축해야 한다.

이러한 정책들을 통해 모빌리티 기술의 발전과 활용성이 높아지면, 초고령사회에서도 고령자들이 독립적이고 자율적인 삶을 영위할 수 있을 것이다.

바 맺음말

초고령사회로 진입하면서 고령자의 인구 증가와 이로 인한 사회적 문제들은 피할 수 없는 현실이 되었다. 특히 고령자들의 독립적인 생활과 이동성을 유지하는 것은 중요한 사회적 과제로 대두되고 있다. 이를 해결하기 위해 다양한 모빌리티 기술의 발전이 필요하다. 웨어러블 로봇 기술은 고령자의 일상생활 보조부터 재활, 작업 능력 향상, 그리고 인간 능력의 초월에 이르기까지 다양한 분야에서 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 기술은 고령자들의 자율성과 독립성을 증대시켜 삶의 질을 향상시키는 데 크게 기여할 수 있다. 또한, AI 및 자율주행 기술의 발전은 웨어러블 로봇과 모빌리티 기술의 효율성을 높여주고, 고령자들이 더 안전하고 편리하게 이동할 수 있도록 도와준다. AI와 자율주행 기술의 연계는 웨어러블 로봇의 성능을 극대화하고, 고령자들이 실내외에서 안전하게 이동할 수 있는 자율 이동 보조 기기를 개발할 수 있도록 한다.

이를 위해서는 다양한 정책적 지원이 필요하다. 인프라 개선, 교육 및 훈련 프로그램 개발, 재정적 지원 및 보조금 제공, 규제 및 표준화 제정, 사회적 인식 개선, 연구개발 지원, 산업 협력 강화, 데이터 수집 및 분석 활성화, 그리고 지속 가능한 도시 계획 확립 등의 정책들이 필요하다. 이러한 정책들을 통해 웨어러블 로봇과 자율주행 모빌리티 기술의 발전과 활용성을 높일 수 있으며, 초고령사회에서도 고령자들이 독립적이고 자율적인 삶을 영위할 수 있을 것이다. 사회 전반에 걸쳐 이러한 기술의 도입과 지원이 확대된다면, 모든 세대가 함께 조화롭게 살아가는 미래를 기대할 수 있을 것이다.

참고문헌

보건복지부(2020). “제4차 저출산고령사회 기본계획.”

통계청(2023). “2023년 사회조사 결과(복지, 사회참여, 여가, 소득과 소비, 노동).”

European Commission(2021). “Sustainable & Smart Mobility Strategy: Putting European Transport on Track for the Future”, Mobility Strategy.

FAA: Federal Aviation Administrator(2023). “Advanced Air Mobility Implementation Plan”, Federal Aviation Administrator.

Kim, J., Chun, H., Lee, S. H., Lee, H. J. & Kim, Y. H.(2023). “Functional Improvement and Satisfaction with a Wearable Hip Exoskeleton in Community-Living Adults”, In Healthcare, Vol.11 No.5, pp. 643.

Kim, J., Lee, G., Heimgartner, R., Arumukhom Revi, D., Karavas, N., Nathanson, D., ... & Walsh, C. J.(2019). “Reducing the Metabolic Rate of Walking and Running with a Versatile, Portable Exosuit”, Science, Vol.365 No.6454, pp. 668~672.

Lakmazaheri, A., Song, S., Vuong, B. B., Biskner, B., Kado, D. M. & Collins, S. H.(2024). “Optimizing Exoskeleton Assistance to Improve Walking Speed and Energy Economy for Older Adults”, Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, Vol.21 No.1, pp. 1.

Maresova, P., Krejcar, O., Maskuriy, R., Bakar, N. A. A., Selamat, A., Truhlarova, Z., … & Vitkova, L.(2023). “Challenges and Opportunity in Mobility Among Older Adults-Key Determinant Identification”, BMC Geriatrics, Vol.23 No.1, pp. 447.

MIT Energy Initiative(2019). “Insights into Future Mobility”.

NSC: National Safety Council(2022). “Mobility, Technology and Safety: The Next 20 Years”, Allstate.

Schofer, J. & Mahmassani, H.(2016). “MOBILITY 2050: A Vision for Transportation Infrastructure”, Northwestern University.

Sawicki, G. S., Beck, O. N., Kang, I. & Young, A. J.(2020). “The Exoskeleton Expansion: Improving Walking and Running Economy”, Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, Vol. 17, pp. 1~9.

Shin, J. H., Byeon, N., Yu, H., Yun, G., Kim, H., Lim, S., … & Lee, W. H.(2023). “Effect of 4-Weeks Exercise Program Using Wearable Hip-Assist Robot (EX1) in Older Adults: One Group Pre-and Post-Test”, BMC Geriatrics, Vol. 23 No.1, pp. 724.

Slade, P., Kochenderfer, M. J., Delp, S. L. & Collins, S. H.(2022). “Personalizing Exoskeleton Assistance While Walking in the Real World”, Nature, Vol.610 No.7931, pp. 277~282.

U.K. Government Office for Science(2019). “A Time of Unprecedented Change in the Transport System”, The Future of Mobility.

U.S. Department of Energy(2017). “The Transforming Mobility Ecosystem: Enabling an Energy Efficient Future”, Center for Automotive Research at Stanford.

U.S. Department of Transportation(2018). “Preparing for the Future of Transportation-Automated Vehicles 3.0”.

U.S. Department of Transportation(2021). “The Transportation Future: Trends, Transportation, and Travel”, Transportation Policy Studies.

U.S. Environmental Protection Agency(2023). “The Future of Mobility: A Report by the EPA Mobile Sources Technical Review Subcommittee”.

United Nations(2021). “Technology and Innovation Report 2021 Catching Technological Waves Innovation with Equity”.

WHO: World Health Organization & UNICEF: United Nations Children’s Fund(2022). “Global Report on Assistive Technology”.

WIPO: World Intellectual Property Organization(2021). “WIPO Technology Trends 2021: Assistive Technology”.

PART 4

9

초고령사회와 능동적 노화: 인지적, 사회적 관점

한 소 원
서울대학교 심리학과 교수

가 들어가는 말

기대수명이 급격히 늘어가면서 노년기가 길어지고 있는 것에 대한 논의가 활발하게 이루어지고 있다. 건강하게 장수하는 것은 인류의 숙원 중 하나였다. 그러나 변화하는 인구구조에 대한 사회경제적 위기감과 건강수명이 기대수명을 따라가지 못하는 우려, 준비되지 않은 길어진 인생을 어떻게 살아야 할지에 대한 심리적 부담으로 장수를 받아들이는 시각이 긍정적이지만은 않다. 머지않아 한국의 평균연령은 60세에 다가갈 것이다. 인생의 반을 노년이라고 부를 수는 없는 것이며, 언제부터를 인생 후반부라고 불러야 할지 알 수 없는 시대가 되었다. 한창 일할 나이라고 부르는 30세에서 60세까지의 기간이나 60세에서 90세까지의 30년은 물리적으로 같은 시간이며 똑같이 가치 있게 살아야 할 기간이다. 현재 80대, 90대를 지나고 있는 세대는 얼마나 오래 살게 될지 예측하지 못했고, 따라서 준비하지 못했다.

그분들의 젊은 시절이던 1980년에는 기대수명이 60세를 넘기지 못했고, 그 시절의 사회적 통념은 노년에는 자녀나 국가의 돌봄을 받는 것을 당연시했다. 하지만 은퇴 후의 기간이 일하는 기간만큼 길어진다면 은퇴 후는 쉬는 기간이 아니라 새로운 출발과 도전이 필요한 시기이다. 인구구조가 변하면서 돌봄을 받는 것보다 독립적으로 살아가는 것이 중요해졌다.

신체적으로나 정신적으로 건강하고 의미 있게 살기 위해서는 노화에 대한 패러다임을 재정립할 필요가 있다. 이전의 인생을 보는 시각은 인생의 전반기에 교육, 중반기에 일, 후반기에 쉰다는 순차적인 모델을 가지고 있었다. 그러나 교육-일-쉼의 순차적 모델은 100세 시대에 작동하지 않는다. 65세에 은퇴하고 35년을 쉰다는 것은 맞지 않는다. 거듭되는 변화와 출발이 인생의 일부이다. 일하고, 저축하고, 은퇴하는 새로운 방식이 필요하다. 인생의 후반기는 아무것도 하지 않고 쉬는 기간이 아니라 활동적으로 살아가야 하는 기간이다. 미국 스탠포드 대학교의 장수센터에서는 인생의 전 영역에 걸쳐 배우고 일하고 쉬는 것이 펼쳐져 있어야 한다는 새로운 모델을 제시하고 있다. 이 모델에 따르면 배움도 인생의 전 단계에 걸쳐서 계속해서 이루어져야 하며 일도 역시 인생의 전 단계에 걸쳐 이루어져야 한다. 평생교육이 새로운 개념이 아니다. 하지만 이전의 평생교육의 개념은 젊어서는 일을 위한 기술을 습득하는 것을 말하고 나이 들어서 배움은 쉼을 위한, 취미생활을 위한 배움으로 좁혀져 있었다. 하지만 디지털화가 진행되면서 모바일 뱅킹을 하지 않으면 금융 처리가 되지 않는다. 음식점에 가도 키오스크 주문을 해야 하고 테이블에 앉아도 디지털 메뉴판으로 주문해야 한다. 국민연금 신청도 모바일로 해야 한다. 새로운 기술에 익숙해지지 않으면 독립적인 생활이 불가능하다. 평생직장의 개념도 달라졌다. 평생 동안 한 가지 일을 해야 한다고 생각하지 않는다. 정규 직장 이외에도 온라인에서 또 다른 일을 하는 경우도 적지 않다. 이런 새로운 삶의 모델에서는 쉼도 전 인생에 걸쳐서 이루어져야 한다. 젊은 시절 번아웃이 올 만큼 일하는 것을 미덕으로 생각하던 시절은 예전에 지났다. 일 다 하고 은퇴하면 쉬라는 말이 이제는 설득력이 없다. 짧은 인생을 종착점까지 달려가는 것이 인생이 아니라 매 순간 의미 있는 삶을 만들어 내야 한다.

나 노화의 새로운 패러다임

1) 인구구조의 변화

2024년 3월 통계청 발표에 따르면 한국의 중위연령은 46.1세이다. 1960년 한국의 중위연령이 19.0세였던 것과 비교할 때 엄청난 변화이다. 의료와 전반적인 경제사회의 향상으로 늘어난 기대수명은 분명히 긍정적인 변화라고 할 수 있다. 그러나 낮은 출산율과 고령화의 진행으로 인구절벽이 현실로 다가오면서 정책적인 측면은 인구변화의 문제점에 초점을 맞추고 있다. 출산율 반등을 위해 노력하는 것이 중요하고 생산인구 감소, 노인 빈곤 문제, 정년 연장, 연금 개혁, 세대 간 갈등 해소, 지방경제 활성화, 이민 정책 등 해결해야 할 문제들이 산재해 있다. 전체적인 인구구조의 변화와 그에 따른 사회적인 문제를 정책적으로 해결해 나가는 것도 필요하지만 이 시대를 살아가고 있는 사람들의 삶의 방식과 질에 대한 고찰과 실질적인 노력도 중요하다. 중위연령이 19.0세이고 65세 인구가 인구 전체에서 2.9%를 차지하던 시대는 65세 이후의 기간을 쉬는 기간으로 계산했던 것에 무리가 없었다. 그런데 통계청 추산에 따르면 2055년에는 국민의 절반이 60세 이상이 될 전망이다. 60세를 장수했다고 환갑잔치를 하던 시절이 오래전이 아니지만 이제 노인이라는 호칭도 실제적인 건강과 능력도 전혀 다른 시대가 되었다.

2) 노화의 핵심 개념

초고령사회에 접어들면서 다각적인 노화의 측면을 이해하고 개입하기 위해서는 핵심이 되는 여러 가지 개념들을 정립해 볼 필요가 있다. 건강한 노화는 노년기에 웰빙을 가능하게 하는 기능적 능력을 개발하고 유지하는 과정을 말한다. 기능적 능력은 사람들이 가치 있게 여기는 것을 하고, 되고자 하는 것을 가능하게 하는 건강 관련 속성들로 구성된다. 이는 개인의 내재적 능력, 연관된 환경적 특성, 그리고 개인과 그 특성 간의 상호작용으로 이루어진다. 내재적 능력은 개인의 모든 신체적 및 정신적 능력의 종합체이

다. 가장 넓은 의미에서 웰빙은 행복, 만족, 성취감과 같은 영역을 포함한다. 환경 내 요소들에는 건축 환경, 사람들과 그들의 관계, 태도와 가치관, 건강 및 사회 정책, 이를 지원하는 시스템 및 제공하는 서비스가 포함된다. 나이 친화적 환경은 내적 능력을 생애 전반에 걸쳐 구축하고 유지하며, 사람이 더 큰 기능적 능력을 발휘할 수 있도록 함으로써 건강한 노화를 촉진하는 환경을 말한다. 기능적 능력의 관점에서 나이를 바라볼 때 인생의 초기는 성장과 발달의 시기다. 유아 시절은 독립적인 생활이 가능하지 않으며 유아기 단계에서 기능적인 능력에서는 장애의 기준을 넘어서지 못하지만, 아동기와 청소년기를 지나면서 계속 발달한다. 성인기는 최대한 가능한 수준의 기능을 유지하는 시기이다. 성인기에서 장년기 노년기를 지나면서 건강한 노화를 유지하는 경우 독립적인 생활을 지속하고 장애를 예방할 수 있다. 성인기와 노년기를 지나면서 기능적 능력의 개인차는 크게 벌어지고 유전과 환경, 생활의 영향으로 기능적 능력이 장애 기준 아래로 떨어질 수 있다. 그럴 때 재활과 다각적인 노력을 통해 삶의 질을 유지할 수 있다.

기능적인 시각으로 노화를 바라볼 때 건강의 기제와 예방 전략에 중심을 두게 된다. 나이에 따른 신체적 변화는 질병이 아니다. 또한 노년층은 동일 집단이 아니다. 같은 범주에 넣기는 너무나 큰 차이가 있다. 한국 사람은 다 이렇다, 미국 사람은 다 이렇다, 여자는 다 이렇다, 남자는 다 이렇다 하는 식의 일반화된 범주화가 논리적이지 않은 것처럼 나이에 따라 범주화하는 것도 마찬가지의 오류이다. 나이가 들어가면서 유전적인 영향보다 경험과 생활방식에 의해 노화의 많은 부분이 결정된다. 예를 들어 꾸준하게 중강도 이상의 운동을 하고 관리를 하는 사람과 그렇지 않은 사람의 차이는 엄청나게 크다. 운동은 근골격 및 심혈관 건강에 이점을 제공하며 노화와 관련된 뇌의 구조적, 기능적 손상을 예방하고 회복한다. 노화 연구자들 사이에 잘 알려진 노화의 대표적인 특징은 운동기능이 느려지거나 기억력이 떨어진다는 등의 일관된 변화가 아니다. 나이가 들어가면서 큰 차이는 개인차가 더 증가한다는 점이다. 나이와 관련된 신체적, 인지적 변화는 평균값이 떨어지는 것이 아니라 변산이 커진다는 것이 더 중요한 점이다.

다 신체 움직임과 뇌인지 기능

1) 모빌리티와 삶의 질

이동성은 독립적인 생활을 하는 데 결정적으로 중요한 요인이며 신체적 피트니스, 인지능력, 사회적 연결과 긴밀하게 관련되어 있다. 특히 고령화 시대에 노화와 관련된 이동성은 국가보건의 차원에서 중요한 이슈로 대두된다. 이동성은 생활에 필수적인 자원을 공급받을 수 있는 요건이다. 기본적인 삶의 개인적 필요를 감당하기 위해서는 이동성이 필수적이다. 집 밖에 나가서 장을 보고 병원을 가고 필수적인 자원을 공급받기 위해서 이동성이 기본이 되고 집 안에서도 이동성이 제한될 때 독립적인 생활을 하는 것이 어려워진다. 또한 이동성은 뇌인지 기능과 신체 건강에 결정적으로 중요한 역할을 한다. 많은 연구들이 활발한 신체활동이 나이 들어서도 뇌기능을 향상시킨다는 결과를 보여주었다. 이동성은 사회적 연결을 만들고 유지하는 도구로서 기능하기 때문에 사회참여의 통로가 되어 삶의 질과 밀접한 관계가 있다. 이동성이 떨어진다는 것은 그 자체로도 인지기능과 관계가 있으나 더 중요한 것은 사회적 연결이 줄어드는 것이다.

인지기능과 건강 관련 삶의 질(Health Related Quality of Life, HRQOL)을 예측하는 주요 신체 기능은 무릎 기능, 균형, 발걸음 폭, 근력(악력) 등 보행 및 이동성과 관련된 요인이다. 무릎 기능을 측정하는 것은 다양한 높이의 의자에 앉고 일어나는 것이 가능한지를 측정한다. 층계를 오르내릴 수 있는 능력도 무릎 기능을 보여준다. 균형을 측정하는 것은 한 발로 서서 균형을 잡을 수 있는지로 측정한다. 발걸음 폭은 얼마나 큰 보폭으로 걸을 수 있는지를 측정하는 것으로 하체 근력과 균형 그리고 기본적인 유산소 능력도 포함한다. 노인 인지기능을 측정할 때 의외라고 생각할 수 있으나 자주 등장하는 측정 도구가 악력이다. 노인의 경우 악력과 인지기능의 상관관계가 높게 나타나는데 악력이 전반적인 근력을 잘 측정하기 때문이다. 즉 걸어 다닐 수 있는 능력, 이동성과 관련된 신체 기능이 삶의 질을 직접적으로 예측한다는 결과를 보여준 것이다.

고령화가 가장 먼저 진행된 국가로 꼽히는 일본에서는 지역사회 주민을 대상으로 신체 건강과 뇌기능 건강에 대한 요인을 찾는 연구에서 나이가 들어가면서 신체 기능이 약화되면 넘어질 위험과 인지기능 저하를 만들고 삶의 질을 낮출 수 있다고 밝히고 있다(Ikegami et al., 2019). 넘어지는 것에 대한 위험인자를 찾는 연구도 많고 넘어지는 것을 예방하기 위한 다양한 개입연구와 훈련이 진행되고 있다. 웨어러블 로봇을 연구개발하는 대학이나 기업에서 활발히 개발되고 있고 적용성이 넓은 분야가 넘어지는 것을 막을 수 있는 웨어러블 로봇이다. 지금까지는 장애인을 위한 로봇 다리와 같은 형태의 웨어러블 로봇이나 병원 재활용 웨어러블 로봇이 나와 있지만 머지않은 미래에 노년기 이동성을 도와주는 일상의 옷과 비슷한 웨어러블 슈트가 나올 것으로 기대하고 있다.

2) 운동과 뇌인지 기능

최근 몇십 년의 연구는 유산소 운동과 근력운동이 신체 건강뿐 아니라 뇌인지 기능을 향상시키는 것을 보여주고 있다. 이런 운동의 효과는 젊은 사람들에게만 적용되는 것이 아니라 장년층 또는 노년층에게도 명확하게 나타났다. 평소에 운동을 하지 않던 60대 이상 성인이 6개월에서 1년간 유산소 운동을 꾸준히 한 결과 뇌인지 기능의 집행기능이 향상되고(Kramer et al., 1999), 해마의 부피가 증가하였으며, 기억력이 향상되었다(Erikson et al., 2011). 연구자들은 이 결과를 노화로 인한 뇌의 부피 감소를 1~2년 되돌리는 격이라고 해석하였다. 신체 운동과 뇌인지 기능의 관계를 보여주는 연구가 전 세계적으로 쏟아져 나오

면서 나이가 든다고 뇌가 쇠퇴하는 것이 아니라는 것을 명확하게 보여주고 있다. 단시간의 운동도 뇌기능을 자극하는 효과가 있다(Suwabe et al., 2018). 이 연구에서 젊은 성인을 대상으로 짧은 시간 동안 실내 자전거를 타는 운동을 한 후에 이전에 본 사진과 새로운 사진의 차이를 보고하는 상세한 기억처리를 측정했다. 이 결과는 짧은 시간 동안 자전거를 타는 운동이 새로운 기억과 오래된 기억을 구별하는 과제를 신속하고 더 정확하게 할 수 있도록 향상되는 것을 보여주었다. 이 연구에서 운동 전후에 기능자기공명영상법(functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)으로 뇌의 변화를 측정했는데 단기간의 고강도 유산소 운동이 해마와 주변 지역에서 높은 활동을 유발한다는 것을 보여주었다.

공원에서 노인들이 요가와 태극권 등의 그룹 운동을 하는 모습이 가끔 보인다. 관절에 무리를 주지 않는 천천히 하는 운동이 노인의 유산소 효과를 높이고 기억력을 포함한 인지기능을 향상하는 기제가 있다는 것을 보여준다. 특히 야외에서 하는 운동은 자연과 상호작용하여 긍정 정서를 높이는 효과도 있으며 여러 사람이 같이 운동할 때 사회적 효과도 큰 역할을 할 수 있다. 새벽에 공원에서 음악 소리가 들려서 돌아보면 에어로빅 강좌가 열리고 강사의 구호에 맞추어 운동하는 사람들도 보인다.

라 모빌리티와 사회적 연결

1) 코로나19와 이동성

코로나19 팬데믹 중에 야외 공원의 방문을 제외한 그 밖의 오프라인 상점, 직장, 대중교통 정거장 등 다른 사람들과 마주치는 공간의 방문은 줄어들었다. 많은 부분이 팬데믹 이후에 다시 예전으로 돌아갔지만 변화된 패턴은 남아있다. 이동성은 코로나19 팬데믹이 남겨 놓은 영구적인(장기적인) 사회적 환경의 변화이다. 팬데믹 초기, 많은 나라가 바이러스 확산을 막기 위해 봉쇄했고 이에 따라 사람들이 집에 머무는 시간이 증가하였으며, 출퇴근 및 여행이 급격히 감소했다. 많은 기업이 재택근무를 도입했고 직장으로의 출퇴근 관련 이동성이 줄었다. 공원, 산책로 등 야외 활동 장소에 대한 이용이 증가했다. 이런 초기의 변화는 비대면 방식의 확산으로 이어졌다. 온라인 상거래가 증가했고 경제구조의 변화를 만들었다. 비대면 의료서비스도 빠르게 확산했고 인공지능의 발달과 더불어 디지털헬스는 다양한 분야에서 자리 잡았다. 교육의 디지털 전환도 큰 변화이다. 초기 비대면 수업은 팬데믹 이후 대면 수업으로 돌아왔으나 디지털 교육은 새로운 학습 도구와 플랫폼으로 보편화되었다. 많은 기업이 화상 회의 시스템을 도입하여 원격근무를 지원했고 재택근무는 특정 직업에서만 가능한 것이 아닌 보편적인 근무 방식의 하나로 자리 잡았다.

2) 고립과 외로움의 위기

사회적 고립과 이동성의 감소는 정신건강의 위기를 가져왔다. 팬데믹이 지나간 후 전 세계적으로 외로움의 문제가 심각한 보건 문제가 되었다. 미국의 보건 총감은 2023년 5월 3일에 발표한 보고서에서 미국이 고립과 외로움이라는 감염병의 위기를 맞고 있다고 경고했다. 미국 전역의 모든 연령과 사회경제적 배경을 가진 많은 사람들이 "삶의 모든 짐을 혼자 짊어져야 한다" 또는 "내가 내일 사라져도 아무도 눈치채지 못할 것"이라고 말하고 있었다. 자신이 고립되고, 남들이 자신을 알아채지 못하고, 하찮게 느껴진다고 보고했다. 코로나19 이전에도 미국 성인의 약 절반이 외로움을 경험했다고 보고하고 있으나 코로나19 팬데믹으로 인해 외로움과 고립감이 더 악화했다.

외로움은 단지 나쁜 감정 이상의 문제로, 심혈과 질환, 치매, 뇌졸중, 우울증, 불안, 조기 사망의 위험이 증가하는 것과 연관이 있다(Holt-Lunstad et al., 2017). 사회적 단절이 주는 사망률 영향은 하루 최대 15개비의 담배를 매일 피우는 것과 비슷하며, 외로움은 비만, 운동 부족보다 더 큰 영향을 미친다. 사회적으로는 참여를 떨어뜨리고 성과, 생산성도 저하한다. 이런 공중보건 위기를 극복하고 사회적 결속을 회복하기 위해서는 큰 변화가 필요하다. 외로움을 낙인찍는 것이 아니라 이에 대한 문화적, 정책적 대응이 필요하며 개인과 가족, 학교와 직장, 의료 및 공중보건 시스템, 지역사회 모두가 협력해야 한다는 것이다. 그리고 이런 변화는 각자 자신의 삶에서 연결과 관계를 강화함으로 시작할 수 있다.

우리나라의 경우도 코로나19 팬데믹이 남겨 놓은 사회적인 환경의 변화는 사람들을 더 고립시키고 외롭게 만들었다. 2022년 통계청 발표에 따르면 한국에서 20~30대 청년 중 집 밖을 나가지 않는 은둔형 외톨이 청년이 60만 명을 넘어간다고 한다. 또한 2017~2021년 국내 고독사 수는 2412명 → 3048명 → 2949명 → 3279명 → 3378명으로 증가하고 있다. 한 해 전체 사망자 30만~32만 명의 1% 수준이다. 연령대는 50대가 가장 많았고 다음으로는 60대, 40대, 70대 순이었다. '5060 남성' 고독사는 지난 5년간 45~52%를 차지해 단연 비율이 높았다. 서구 선진국의 경우 사회적으로 고립되기 취약한 층에 대한 복지제도가 잘 정비되어 있고 공동 주거나 사회적 커뮤니티의 활성화를 통한 국가적 개입을 하고 있다.

마 걷기 좋은 도시와 자연이 있는 환경

1) 15분 도시

이동성은 사회적 연결과 직결되어 있다. '15분 도시'로 불리는 개념은 시민들이 필요로 하는 모든 것

들을 걸어서 15분 이내 거리에서 제공받을 수 있는 '동네들의 집합체'로 생태적 전환을 추구한다. 현재 도시를 건설하는 방식은 세분화를 기본으로 한다. 행정적인 지역이 있고 비즈니스를 위한 지역이 있다. 다른 쪽에는 주거가 있고 또 다른 쪽에는 상업지가 있다. 이런 도시 패러다임에 대한 문제 제기에서 시작되었다. 2020년 1월 20일 안 이달고(Anne Hidalgo) 파리 시장은 재출마를 선언하면서 15분 도시(La ville du quart d'heure)를 공약으로 발표했다. 15분 도시는 집에서 걷거나 자전거를 타고 사무실, 병원, 상점, 학교, 공원 등을 이용하면서 일상생활을 할 수 있는 집에서 가까운 도시를 만드는 것이다. 기존의 주거 중심의 논의에서 벗어나 집에서 15분 걸어갈 수 있는 거리에서 일자리, 여가, 쇼핑, 교육, 문화, 휴식 등 다양한 기능을 복합적으로 누릴 수 있는 자립적인 생활권으로 개편한다는 것이다.

15분 도시는 기후와 환경 문제에도 기여할 수 있으며 많은 국가와 도시에서 적용하고 있다. 개발 중심의 도시 계획에서 벗어나 탄소중립과 삶의 질 개선을 위한 도시 생활 계획으로 전환할 필요가 있다. 걷기 좋은 도시는 커뮤니티를 더 가깝게 하고 소속감을 느낄 수 있게 한다. 사회적인 연결은 외로움을 줄이고 건강하고 행복한 사회를 만드는 데 중요하다. 걷기 좋은 도시는 풍성하고 다양한 자극이 있는 환경과 자연을 접한 거리, 그리고 흥미로움을 줄 수 있어야 한다. 사람들이 걷기 좋다면 다른 사람과 마주칠 가능성이 많아지고 더 안전하고 연결된 커뮤니티가 형성될 수 있다.

2) 건축 환경과 사회적 연결

건물과 실내 공간, 거리는 모두 사람의 행동과 생각을 유도하고 타인과의 관계를 결정한다. 다른 사람과 우연히 마주칠 일이 많아지는 환경에서 사람들은 친해질 가능성이 많다. 사람과 함께 걸을 수 있는 길, 벤치, 나무와 그늘 모두 사회적 관계를 돕는다. 건축과 도시 환경도 주민의 일상을 중심으로 공간 환경을 진단하고 평가하여 개선사항을 발굴하는 것이 필요하며 공간의 사회적 가치를 높이고 다양한 문화와 소통을 추구하는 것이 필요하다. 이런 디자인에서 핵심은 사회적인 연결이다. 공간의 배치가 서로에 대한 이해를 높이는 부서를 만들 수도 있고 상호작용을 높일 수 있다는 것이다.

구글의 사옥에서는 모든 직원이 2분 30초 안에 서로 다가갈 수 있도록 설계되었다고 한다. 일상에서 사회적 연결이 자연스럽게 만들어지는 환경에서 직원들의 행복감이 높아지고 창의적인 업무를 수행할 수 있으며, 결국 업무 성과도 높아질 것이라는 믿음이다. 구글뿐 아니라 하이브리드 개방형 사무공간으로 만든 회사도 많다. 직원 개인의 역량을 높이고 팀으로서 시너지를 낼 수 있는 물리적인 공간을 마련한다는 것이다. 사회적 환경을 만드는 다른 디자인은 우연한 만남을 극대화하는 공유공간이다. 많은 조직에서 사무실 가운데에 공유공간이나 카페를 만들고 커피머신이나 냉장고와 편한 의자 등을 놓아두는 것도 다른 부서 직원들과 스스럼없이 어울릴 수 있는 공간을 제공하는 것이다. 이런 공간은 사회적인 연결과 휴식을 주고 긍정적인 정서를 높일 수 있다.

3) 자연환경의 인지적 정서적 효과

현대사회에서 자연환경, 특히 녹지공간이 인간의 삶의 질에 미치는 영향에 대한 관심이 증가하고 있다. 녹지는 시각적 아름다움과 공기의 질을 높여 건강한 도시를 만들 뿐 아니라 인지적·정서적 측면에서도 긍정적인 효과가 있다. 미국 미시간 대학교의 연구자들은 녹지가 있는 자연 속을 걷는 것과 도시 안에서 걷는 것이 문제해결 방식에 어떤 영향을 주는지 연구했다(Berman et al., 2008). 이 연구의 결과는 수목원을 45분간 걷는 활동을 하는 것이 문제해결에서 더 창의적인 방법을 찾아낸다는 것을 보여주었다. 자연환경의 인지적 효과는 주의회복 이론으로 설명한다. 자연환경에서 시간을 보내는 것이 주의력을 회복시키고 집중력과 인지기능이 향상한다는 것이다. 도시 생활에서 벗어나 스마트폰과 전자기기를 멀리하고 며칠 동안이라도 자연에 파묻혀 지내는 것이 창의력을 향상시킨다는 연구 결과도 있다(Atchely et al., 2012).

자연 속을 걷는 것은 인지적 효과뿐 아니라 전반적인 스트레스를 낮추는 데 도움이 된다. 우울장애를 겪는 사람들의 경우 자연을 걷는 것은 우울증에 부정적인 영향을 주는 반추를 줄이고 긍정적인 정서를 늘릴 수 있다. 녹지공간에서 산책하는 것이 우울증과 불안을 줄인다는 연구가 있다(Berman et al., 2012). 많은 현대인이 스마트폰 없이는 잠시도 생활할 수 없다. 끊임없이 이메일과 문자 메시지를 체크하고 SNS와 온라인 뉴스와 짧은 영상을 보면서 하루를 보낸다. 그런데 이런 생활이 주의력을 떨어뜨리고 창의력을 막을 뿐 아니라 우울감을 늘릴 수 있다.

바 모두를 위한 도시 모델과 정책 제언

1) 고령친화도시와 커뮤니티

1986년 WHO의 오타와 헬스 프로모션 헌장은 건강의 더 넓은 사회적 결정요인을 인식하는 접근 방식으로의 전환을 촉진했다. 2002년 세계 노화 회의에서 채택된 마드리드 국제 행동 계획(Madrid International Plan of Action on Ageing, MIPAA)은 세 가지 우선순위를 실행하기 위한 국제적 및 국가적 행동의 필요성을 강조했다. 이 세 가지는 '노인과 발달', '생애 전반에 걸친 건강과 웰빙 다루기' 그리고 '건강과 웰빙을 가능하게 하고 지원하는 환경 보장'이다. 고령친화도시와 커뮤니티(Age-Friendly Cities and Communities, AFCC) 운동은 이러한 글로벌 우선순위를 반영하여 2007년 WHO의 '고령친화도시: 가이드'를 발간했다. 이 가이드는 노인들과의 상담 및 23개국 33개 도시에서의 연구를 바탕으로 개발되었으며, 도시와 커뮤니티가 건강하고 활동적인 노화를 위해 기여할 수 있는 여덟 가지 영역을 식별했다. ① 야외

공간, ② 교통과 이동성, ③ 주거, ④ 사회적 참여, ⑤ 사회적 포용과 비차별, ⑥ 시민 참여와 고용, ⑦ 커뮤니케이션과 정보, ⑧ 커뮤니티 지원 및 건강 서비스이다.

2) 노인 친화 도시 모델

WHO에서 제안하는 노인 친화 도시 모델은 구체적인 환경에 대한 가이드를 제공한다. 노인 친화 도시는 보행자가 걸어 다니기 쉬운 도시다. 첫째로 녹지공간과 야외 의자, 보행자 친화적인 울퉁불퉁하지 않은 보도가 필요하다. 둘째는 평평하고 미끄럽지 않은 인도와 차량과 충분한 거리가 있는 길이다. 바로 옆에 달려가는 차가 있다면 불안감이 높아진다. 셋째는 보행자를 위한 지하도와 건널목이 필요하고 충분한 신호등 시간이 필요하다. 신호등 시간이 충분히 길지 않아서 뛰어가야 한다면 고령자에게 건널목은 갈 수 없는 길일 뿐이다. 그 밖에도 자전거 도로가 있는 것이 보행자에게도 자전거를 타는 사람에게도 모두 도움이 된다. 넷째는 밝은 가로등 그리고 시각적으로 막혀 있지 않고 안전한 공간이다. 다섯째는 건물의 접근성이다. 엘리베이터가 있어야 하고 경사로가 잘 디자인되어 있어야 한다. 계단은 난간이 있어야 하고 너무 높거나 가파르지 않아야 한다. 미끄럽지 않은 바닥이 필요하고 충분한 표지판이 있어서 가고자 하는 곳을 찾아갈 수 있어야 한다. 여섯째는 잘 관리되고 편리한 위치에 있는 공중화장실의 필요성이다. 장애물이 없고 안전한 거리는 노인뿐 아니라 어린이, 청년, 장애인을 포함하여 모든 사람의 이동성과 독립성을 높인다. 건축 환경의 작은 변화만으로도 퍼스널 모빌리티가 향상될 수 있다. 산책로를 만들어 걷기를 증진하고, 가로등 개선으로 시야를 넓히고, 도로 보수로 사고를 예방하고, 미끄럼 방지를 위한 바닥 처리 등으로도 큰 효과를 얻을 수 있다.

사회적 인식과 개인의 인식이 행동에 영향을 미치며, 이는 모빌리티와 삶의 질에 영향을 줄 수 있다. 도로와 건물 관련 법규, 교통 서비스에 영향을 미치는 보조금은 접근성과 안정성을 향상시킬 수 있고 이동 장애를 가진 사람들을 돕는 보조 기술의 가용성과 건강, 복지 서비스의 접근성은 개인의 이동성을 높일 수 있다. 개인과 사회를 모두 위한 포용적인 사회를 만드는 것은 시각의 변화와 합의가 필요하다.

사 맺음말

일찍 은퇴한 50대나 60대가 보편적 가치를 추구하는 국제협력기관을 통해 개발도상국에서 새로운 일을 하며 보람과 의미를 찾는 경우도 많다. 본인의 전공을 살려서 청소년 교육을 하기도 하고 현지 정부에서 필요로 하는 다양한 부서에서 일하기도 한다. 은퇴 후에 나의 가치를 찾고 새로운 도전을 추구하는 것이다. 끊임없는 경쟁에서 이겨야만 성공하는 인생이라는 사회적 압박을 벗어나 새로운 일과 가치를 추구하는 것이다. 초고령사회는 전 연령대를 통해 가치 있는 삶을 추구할 수 있는 심리학적 관점에서 준비할 필요가 있다. 인지적, 사회적 기능을 높이는 걷기 좋은 도시, 자연이 있는 도시를 만들고 연결된 커뮤니티를 세우는 것이 필요하다. 미래의 교통은 자율주행차를 떠올리기 쉬우나 포용적인 공유 모빌리티 시스템을 디자인하고 연결된 사회, 지속 가능한 사회를 추구하여야 한다.

참고문헌

Atchley, R. A., Strayer, D. L. & Atchley, P.(2012). "Creativity in the Wild: Improving Creative Reasoning Through Immersion in Natural Settings", PloS One, Vol.7 No.12, e51474.

Berman, M. G., Jonides, J. & Kaplan, S.(2008). "The Cognitive Benefits of Interacting with Nature", Psychological Science, Vol.19 No.12, pp. 1207~1212.

Berman, M. G., Kross, E., Krpan, K. M., Askren, M. K., Burson, A., Deldin, P. J. & Jonides, J.(2012). "Interacting with Nature Improves Cognition and Affect for Individuals with Depression", Journal of Affective Disorders, Vol.140 No.3, pp. 300~305.

Erickson, K. I., Voss, M. W., Prakash, R. S., Basak, C., Szabo, A., Chaddock, L. & Kramer, A. F.(2011). "Exercise Training Increases Size of Hippocampus and Improves Memory", Proceedings of the national academy of sciences, Vol.108 No.7, pp. 3017~3022.

Holt-Lunstad, J., Robles, T. F. & Sbarra, D. A.(2017). "Advancing Social Connection as a Public Health Priority in the United States", American Psychologist, Vol.72 No.6, pp. 517.

Ikegami, S., Takahashi, J., Uehara, M., Tokida, R., Nishimura, H., Sakai, A. & Kato, H.(2019). "Physical Performance Reflects Cognitive Function, Fall Risk, and Quality of Life in Community-Dwelling Older People", Scientific reports, Vol.9 No.1, p. 12242.

Kramer, A. F., Hahn, S., Cohen, N. J., Banich, M. T., McAuley, E., Harrison, C. R. & Colcombe, A.(1999). "Ageing, Fitness and Neurocognitive Function", Nature, Vol.400 No.6743, pp. 418~419.

Suwabe, K., Byun, K., Hyodo, K., Reagh, Z. M., Roberts, J. M., Matsushita, A. & Soya, H.(2018). "Rapid Stimulation of Human Dentate Gyrus Function with Acute Mild Exercise", Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol.115 No.41, pp. 10487~10492.

PART 4

10 소결

2024년 기준 우리나라의 고령 비율은 약 19%에 달하며, 대한민국은 세계에서 가장 빠른 속도로 고령화가 진행되고 있다. 이러한 추세라면 우리나라는 향후 1~2년 내로 초고령 국가에 합류하게 될 것으로 예상된다. 초고령사회로 진입하면서 신체적 노화에 따른 질병과 건강 문제가 사회적으로 큰 이슈로 부각되고 있으며 이에 대비하기 위한 다양한 노력이 이루어지고 있다.

초고령사회를 맞이해서 고령인의 삶의 질이 떨어지지 않도록 건강노화를 통한 기능적 장수를 유지할 수 있도록 개인 차원의 노력 외에도 물론 지역사회와 국가 차원에서 정책적인 지원이 필요하다. 특히 건강노화를 위한 제한된 의료 인력자원, 공간적인 한계와 시간적인 제약을 극복하여 의료서비스를 제공하는 디지털헬스케어 및 개인 맞춤형 건강관리 등을 포함한 정밀 의료기술의 발전은 안정된 초고령사회를 유지하는 핵심 동력이 될 것이다. 원격모니터링을 위한 디지털 의료기기 플랫폼과 로봇을 이용한 재활 및 돌봄서비스는 독거노인 등 사회적 취약계층의 의료공백을 방지할 수 있다. 디지털헬스를 활용하여 병원과 요양시설을 지역사회와 연계한 통합 건강관리 시스템은 초고령사회를 대비하는 지속 가능한 돌봄 체계 구축에 필수적이다. 이를 위해 연구자, 기업, 의료·돌봄 종사자, 정책 당국 간의 긴밀한 협력이 요구된다.

고령자들이 안전하고 편리하게 이동하고 독립적이고 자율적인 삶을 영위함에 있어서 모빌리티 기술의 발전은 초고령사회 대응에 있어 중요한 또 하나의 요소이다. 웨어러블 로봇 및 자율주행 모빌리티 사용에 대한 접근성과 활용도를 높일 수 있도록 공공 인프라를 개선하고, 정보 제공 및 교육은 물론 정부의 재정적 지원도 뒤따라야 할 것이다.

인지적, 사회적 기능을 높이는 스마트시티와 같은 지속 가능한 도시 계획에서 보다 포용적인 공유 모빌리티 시스템을 포함한 고령자 친화적인 환경을 조성할 수 있도록 인프라 개선에도 관심을 가져야 할 것이다. 이와 더불어 고령 친화 산업 육성을 통해 고령층의 삶의 질 향상과 사회경제적 기회 창출도 이루어져야 한다. 그러나 초고령사회는 고령층만이 아닌 전 연령대를 통해 가치 있는 삶을 추구할 수 있는 심리학적 관점에서도 준비할 필요가 있다. 우리 사회의 역량을 모아 건강노화 시대를 착실히 준비해 나간다면, 초고령사회는 결코 두려운 미래가 아닌 모두가 기대하는 희망찬 내일이 될 것이다.

PART 5

넥스트 팬데믹에 대한 대응

참여 집필진

박현진 고려대학교 식품공학과 교수
한호재 서울대학교 수의과대학 교수
송대섭 서울대학교 수의과대학 교수
신의철 KAIST 의과학대학원 교수
정대균 한국생명공학연구원 바이오나노연구센터 책임연구원
한수봉 한국화학연구원 감염병치료기술연구센터장
나운성 서울대학교 치의학대학원 교수
오명돈 서울대학교 의과대학 명예교수

미래 30년을 대비하는
과학기술전략

한림연구보고서 155

THE KOREAN ACADEMY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

PART 5 넥스트 팬데믹에 대한 대응

262 **1 서론**

265 **2 글로벌 보건 안보를 유지하기 위한 원헬스 접근법**
265 가. 들어가는 말
266 나. 원헬스 접근법
270 다. 글로벌 인프라 구축
272 라. 맺음말

274 **3 인수공통감염병과 종간전파**
274 가. 들어가는 말
275 나. 종간전파(spillover) 감염병의 의미와 중요성
276 다. 고병원성 조류인플루엔자의 포유류 감염 확산
279 라. 국내외 HPAI 감염병 대응 정책
281 마. 맺음말

286 **4 신종 바이러스에 대한 면역학적 대응**
286 가. 들어가는 말
286 나. 신종 바이러스에 대한 중화항체
287 다. 신종 바이러스에 대한 T 세포 반응
289 라. 신종 바이러스 팬데믹의 엔데믹 전환과 면역
291 마. 과잉 염증반응과 중증 감염
292 바. 신종 바이러스에 대한 면역학적 선제 대응
294 사. 맺음말

298 **5 차세대 바이러스 감염병 백신 전략**
298 가. 들어가는 말
299 나. 백신 기술 개발 현황
302 다. 백신 기술 개발 전망
304 라. 주요국의 백신 정책 동향
304 마. 국내 백신 기술 개발을 위한 제언
305 바. 맺음말

307 **6 팬데믹 치료제 개발의 중요성**
307 가. 들어가는 말
307 나. 팬데믹의 위기
310 다. 코로나19 치료제 개발
314 라. 미래 팬데믹 대응 치료제 개발
316 마. 맺음말

318 **7 신·변종 바이러스 대응 진단의 중요성**
318 가. 들어가는 말
319 나. 감염병과 검체 수집
320 다. 감염병의 진단 시기와 임상증상 간의 관계
322 라. 바이러스 진단 플랫폼
324 마. 유입 가능한 신·변종 병원체에 대한 진단 준비 사항 또는 연구 방향
326 바. 맺음말

328 **8 넥스트 팬데믹에 대한 대응: 공중보건**
328 가. 들어가는 말
330 나. 과거의 팬데믹
332 다. 신종감염병
334 라. 넥스트 팬데믹의 전망
335 마. 넥스트 팬데믹, 어떻게 대비할 것인가?
337 바. 넥스트 팬데믹 대응의 과제들
340 사. 국가 정책 제언
342 아. 맺음말

345 **9 소결**

PART 5

1 서론

포스트 코로나 시대에 접어들면서 인류는 팬데믹의 재발 가능성에 대해 더욱 경각심을 갖게 되었다. 팬데믹이란 전 세계적으로 감염병이 퍼져 긴급 상황을 초래하는 현상을 말한다. 세계보건기구(WHO)는 2018년 '질병 X(Disease X)'라는 개념을 도입하여 아직 알려지지 않은 신종감염병이 언제든지 인류에 치명적인 팬데믹을 일으킬 수 있음을 경고하였다. 그리고 이러한 경고는 2019년 코로나19 팬데믹으로 현실화되었다.

2019년 12월, 중국 우한시에서 발생한 코로나19는 전 세계에 걸쳐 약 7억 7천5백만 명이 감염되고, 705만 명이 사망하는 결과를 초래하였다. 이러한 상황은 신종 인플루엔자, 에볼라, 지카 바이러스 등과 같은 기존의 감염병들과 함께 21세기에 들어서면서 발생한 다양한 신종감염병들이 얼마나 빈번하고 예측 불가능한지를 보여주었다. 이러한 패턴은 신종감염병이 점점 더 짧은 주기로 발생하고 있음을 시사하며 다음 질병 X의 출현이 머지않았음을 예고한다.



신종감염병 대부분은 야생동물이나 가축에서 인간으로 전파되는 인수공통감염병이다. 지난 30년 동안 인간에게 감염을 일으킨 새로운 병원체 중 약 75%가 동물에서 유래했다는 사실은 인간과 동물 모두에게 주목할 필요가 있다는 걸 시사한다. 특정 동물에서 발생한 감염병 바이러스는 돌연변이를 통해 종간 장벽을 뛰어넘어 다른 종에게 감염을 일으킬 수 있다. 최근 고병원성 조류인플루엔자 바이러스의 포유류 감염이 급증하고 있으며, 인간 감염 사례도 확인되었다. 특히 인간과 반려동물 간의 밀접한 접촉으로 인해, 조류 유래 인플루엔자가 개와 고양이 같은 주요 반려동물을 통해 인간에게 전파될 가능성에 대해 경각심을 가질 필요가 있다. 새로운 미생물과의 첫 접촉에서 면역력이 없는 인간은 신종감염병이 발생할 경우 심각한 건강의 위협에 직면할 수 있다. 이로 인해 신종감염병이 대규모 감염 사태로 이어질 수 있으므로 동물과 인간 사이의 종간 장벽을 강화하는 적극적인 대응책이 필요하다.

코로나19 팬데믹을 거치면서 전 세계는 각국의 상황에 따른 맞춤식 방역 정책과 보건의료 체계를 토대로 감염병 대응 시스템을 구축하였다. 우리나라는 적극적인 방역 정책과 체계적인 보건의료 시스템에 더불어 국민들의 자발적인 방역 지침 준수를 통해 세계 최저 수준의 코로나19 사망률을 기록하며 방역 우수 국가임을 세계에 알렸다. 미국 국립보건원의 연구기관인 NIAID는 감염병 원인체의 특성 및 감시 연구를 통해 팬데믹 위험 가능성을 미리 파악하고, 치료제와 백신 승인 시간을 단축시켜 미래 팬데믹에 대응하기 위한 계획을 발표하였다. 또한 미국 공동체 내의 감염병 관련 지식 및 교육 네트워크 체계를 강화하고 진단, 예방, 백신, 치료 연구를 지원하고 있다. 유럽은 유럽보건연합을 중심으로 감염병 위기 상황에 대비하기 위하여 감염병의 연구, 의료 인프라 및 협력체계 구축을 통해 국가 간 보건 안전에 대한 협력을 강화하고 있다. 특히, European Virus Archive GLOBAL(EVA-GLOBAL) 프로젝트를 통해 국제적으로 발생하는 신종 바이러스에 대응하기 위한 연구를 진행하고 있다. 이외 다른 국가들도 신종감염병에 대응하기 위하여 감염병 대응체계를 강화하는 방향으로 나아가고 있다.

전 세계적인 신종감염병 위협에 대응하기 위해 진단, 백신, 치료 분야의 발전은 필수적이다. 신속하고 정확한 진단은 감염병 발생 초기에 중요한 첫 단계로, 특히 신·변종 바이러스의 조기진단 키트 개발은 감염 여부를 신속히 확인할 수 있도록 함으로써 확산을 방지하고 백신 및 치료제 개발의 기반을 마련한다. 이러한 목적을 위해 나노포어 바이오센서, CRISPR-CAS 시스템(Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats/CRISPR-associated sequences system), 차세대 시퀀싱(Next Generation Sequencing, NGS) 기술 같은 고도의 진단 플랫폼의 개발이 진행 중이다.

적절한 면역체계가 구축되면 병원체가 침입해도 감염되지 않아 팬데믹을 막을 수 있다. 이를 가능하게 하는 것이 백신이며, 코로나19 백신은 mRNA 기술을 활용하여 짧은 기간 내 개발되었다. 하지만 변이 바이러스의 출현으로 인해 기존 백신의 한계가 드러났고, 이를 극복하기 위해 백신 개발뿐만 아니라 면역체계의 반응을 최적화하기 위한 면역학적 연구가 필요하다. 기억 B 세포 및 기억 T 세포의 분화 기전과 지속성을 이해하는 것은 백신의 장기적 효능을 보장하는 데 중요하며, 백신의 부작용을 최소화하기 위한 연구도 중요한 과제로 남아 있다.

치료제 분야에서는 기존의 약물 재창출, 항체치료제, 바이러스 직접 작용제 등이 활용되고 있다. 특히 변이 바이러스에 효과적인 광범위한 치료제 개발이 필요하며, 다양한 바이러스 치료제를 미리 개발하여 감염에 대비하는 것도 중요하다. 또한 백신과 치료제 외에도 비약물적 접근 방식인 손 씻기, 마스크 착용, 사회적 거리 두기 등이 코로나19에 효과적이었음을 알 수 있다.

신종감염병이 발생하기 전 효과적인 백신과 치료제 개발이 완료되기까지 인간, 동물, 환경이 연결된 원헬스(One Health) 접근을 기반으로 한 공중보건 대응은 감염병 예방에 매우 중요하다. 이러한 관점의 접근은 팬데믹 상황에서 중요한 역할을 하며, 전 세계적인 협력과 지속적인 연구를 통해 강화될 필요가 있다.

넥스트 팬데믹의 발생 시기나 형태는 아직 알 수 없지만, 미래에 등장할 질병 X에 대비하는 것은 필수적이다. 우리는 다음 팬데믹에 어떻게 대응할 것인지 고민하고 준비해야 하며, 이를 위해 다양한 분야의 전문가들이 제시하는 생각과 제안을 검토하고, 그것을 통해 대응 방안의 실마리를 찾아야 할 것이다. 이러한 준비는 전 세계적인 협력과 지속적인 연구, 그리고 포괄적인 건강 시스템 강화를 통해 이루어져야 하며, 모든 국가와 기관이 함께 힘을 모아야 할 것이다.

PART 5

2

글로벌 보건 안보를 유지하기 위한 원헬스 접근법

한호재
서울대학교 수의과대학 교수

가 들어가는 말

수의역학 전문가인 캘빈 슈바베는 인간과 동물에서의 건강 및 복지에 대한 접근법을 비교하면서 '원 메디슨(One Medicine)'이라는 개념을 제안했다. 그는 각 전문 분야의 구성원들이 의학 전반에 기여할 수 있는 통합적이고 다학제적인 관점을 가질 것을 강조했다. 또한, 전염병을 통제하기 위해 지역사회와의 협력을 강화하고 사회과학자의 참여와 의사소통 기술 향상이 이루어져야 함을 주장했다. 21세기에 접어들며 이 개념은 더욱 발전하여 식물, 야생동물, 지리적 영역 등 더 넓은 생태계의 건강을 포괄하는 개념으로 발전했다(King, 2021). 2004년에 발표된 맨해튼 보존 원칙은 인간과 동물 간의 상호작용에 대한 더 통합적인 관점을 요구하며 '원헬스' 개념을 공고히 했다. 이후 인수공통감염병이 인간에게 미치는 위험을 매우 분명하게 드러낸 중증 급성 호흡기 증후군 코로나바이러스(SARS-CoV-1)가 전 세계적으로 퍼짐으로써 원헬스라는 개념을 구체화하는 계기가 됐다.

원헬스는 인간, 동물, 환경 건강 간의 상호 의존성에 기반을 둔 접근법으로, 이들 사이의 균형과 최적화를 추구한다(Pitt & Gunn, 2024). 기후 변화, 생태계 파괴, 생물 다양성의 손실은 자체적으로 큰 문제를 일으킬 뿐만 아니라 농업 생산성 감소, 생태계 혜택 손실, 경제 성장 억제와 같은 문제를 유발한다. 이는 종간 질병 전파의 위험도를 증가시키는 요인으로써 인간의 건강과 복지를 위협한다. 그러므로 원헬스 접근법을 통해 질병 발생과 확산의 원인을 이해하고 파악하는 것은 신종 질병 위협을 예방하고 대응 비용을 줄이는데 매우 중요하며, 이를 통해 글로벌 보건 안보를 강화할 수 있다(Pungartnik et al., 2023).

2014년 2월, 국제 컨소시엄에서 감염병으로 인한 글로벌 보건 위협을 줄이기 위한 목표로 글로벌 보건 안보 의제(Global Health Security Agenda, GHSA)가 출범했다. 또한, 유엔(United Nations, UN)의 2030 지속가능발전목표(Sustainable Development Goals, SDGs)는 원헬스 접근법으로 건강과 웰빙, 깨끗한 물과 위생, 기후 변화 대응, 해양 및 육상 생태계 지속 가능성 등을 제시했다. GHSA는 이러한 목표를 보완하며, '현재와 미래의 인류와 지구를 위한 평화와 번영'을 추구한다. 또한 세계보건기구(World Health Organization, WHO), 세계동물보건기구(World Organization for Animal Health, WOAH), 유엔식량농업기구(Food and Agriculture Organization, FAO), 유엔환경계획(United Nations Environment Program, UNEP)은 분야 간, 국가 간

협력의 중요성을 인식하여 원헬스 4차 협의체를 구성했다(Aslam et al., 2021). 우리나라는 원헬스를 새로운 건강정책 패러다임으로 제시하고, 인수공통감염병, 수인성 식품 매개 감염병, 항생제 내성 관리 등 주요 현안 해결을 위한 협력을 가속화하고 있다. 2019년에는 다부처 합동으로 '국가인수공통감염병 관리계획'을 수립하여 다양한 사업 추진을 위한 기반을 마련하기도 하였다. 원헬스를 '협력적, 다분야적, 초학제적 접근법'으로 고려할 때, 이는 세계 보건 안보 및 세계 평화와 번영에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 보인다(Sinclair, 2019).

나 원헬스 접근법

1) 진단 및 검사 연구실

병원체(병원균, 균주, 매개체 종)를 식별하고 위험성을 연구하여 감염병에 대응하고 예방하는 데 있어 생물정보학과 실험실 자료 공유는 매우 중요하다. 그렇기 때문에 병원체 경보 및 감시를 위한 정보 통합 시스템을 활용해 빠르고 정확하게 병원균을 식별해야 한다. 이를 위해 연구실들은 'One-Data' 모델을 사용하여 긴밀히 협력해야 하며, 공통 데이터베이스에 자료를 저장하고 실시간으로 데이터를 공유해야 한다. 진단 연구실에서는 숙련도 테스트 프로그램 등을 통해 실험실 간 데이터를 비교하고, 진단 방법 및 데이터 품질을 관리해야 한다(Malik et al., 2022). 이를 통해 필요한 추가 예산 또는 역량 구축의 우선순위를 파악할 수 있다.

대부분의 국가들은 인간에게서 병원체에 대한 데이터를 수집하고 중앙 기관에 보고하며, 전염성이 높거나 백신 캠페인에 포함되는 질병은 신고 대상으로 지정한다. 하지만 보고 및 신고되지 않은 수많은 병원체가 인수공통감염병의 원인이 될 수 있으며, 이러한 병원체들이 다른 동물들에게도 전파되어 추가적인 감염병 확산의 원인이 될 수 있기 때문에 병원체 식별에 대한 원헬스 접근법이 필요하다(Pitt & Gunn, 2024). 실제로 연구실 진단과 서비스는 감염병 진단 및 모니터링에서 중요한 역할을 하기 때문에 연구실 의과학자들의 훈련과 전문성, 그리고 판단이 매우 중요하다.

연구실은 감염병 진단 및 모니터링을 위해 필수적이지만, 심각한 폐기물 배출원이 될 수 있다. 예를 들어 신속 진단 검사의 경우 빠른 진단으로 많은 이점을 제공하지만, 보건과 안전 문제, 연구 효율성을 고려해 일회용 장비와 시험 키트를 자주 사용하기 때문에 상당한 양의 플라스틱 폐기물을 발생시킨다. 검사 과정에서 사용되는 마스크, 주삿바늘, 주사기의 폐기도 문제가 된다. 그래서 원헬스 접근법을 기반으로 환경 지속 가능성을 개선하기 위해 플라스틱 및 유해 화학물질 사용을 평가하고, 폐기물을 줄일 방안을 찾기 시작했다. 이러한 '진단 관리'의 개념은 유한한 자원을 신중하고 안전하게 사용하기 위한 원헬스적 접근방식이다(Malik et al., 2022). 하지만 무엇보다 항상 환자에게서 정확한 검체를 채취하고 적절한 검사를 수행하여 결과를 제때 보고하는 것이 연구실의 목표가 되어야 할 것이다.

2) 신종감염병 및 인수공통감염병

WHO는 신종감염병을 '과거에 알려지지 않은 새로운 병원체에 의해 발생하여 공중보건 문제를 야기하는 질병'으로 정의하고, 2018년부터는 연구개발이 시급한 국제 우선 병원체 목록에 포함하여 관리하고 있다. 한편, 미국 의학원은 '최근 20년 동안 발생이 증가했거나 가까운 미래에 위협이 될 수 있는 감염병'을 신종감염병으로 명명하였다(Tobias et al., 2021). 이는 신종 또는 재출현 감염병뿐 아니라 현재 공중보건에 문제가 되고 있는 감염병 중 미래에 지속되거나 증가할 것으로 예측되는 감염병까지 포함하는 넓은 의미로 해석된다. 우리나라도 '처음 발견된 감염병 또는 병명을 정확히 알 수 없으나 새로 발생한 감염성 질병'을 신종감염병증후군으로 규정하고 1급 법정 감염병으로 지정하였다(Solis, 2021).

최근 신종감염병의 출현 빈도가 증가하고 발생 주기가 짧아지고 있다. 1970년 이후 확인된 신종 질병만 30여 종 이상으로, 이는 특정 지역에 국한되지 않고 전 세계적으로 유사하게 나타난다. 신종감염병의 빈발 원인은 인간과 환경 간 상호작용의 변화에 기인하며, 다음과 같은 요인들로 분류할 수 있고, 이 요인들은 복합적으로 작용하기도 한다(Tobias et al., 2021).

① 인구 및 해외여행 증가 등 행동양식 변화
② 도시화, 노령인구 증가 등 사회적 요인
③ 지구온난화, 삼림 파괴 등 생태환경 변화
④ 음식의 생산 체계, 소비 패턴 등 식품 요인
⑤ 혈액제제 사용, 장기 이식 등 보건의료 요인
⑥ 약제 내성, 유전자 변이 등 병원체의 적응
⑦ 공중보건 인프라 부족

인수공통감염병은 야생동물, 가축, 또는 매개체가 보유한 병원체가 인간과 직간접적으로 상호 작용할 때 발생한다(Cross et al., 2019). 인간의 관점에서 인수공통감염병 예방을 위한 치료, 예방 프로그램, 교육 등을 통해 동물이나 매개체와의 접촉을 줄이는 전략이 필요하지만, 그 효과는 제한적일 수 있다. 그렇기 때문에 이를 관리하기 위해서는 동물과의 상호작용과 동물 감염 요인을 이해하는 것이 중요하다. 예를 들어, 삼림 서식지 파괴로 인해 원숭이들이 마을로 이동하고 말라리아 모기를 동반하는 경우를 생각해 볼 수 있다. 이러한 환경에서 말라리아 예방을 위해서는 모기와의 접촉을 줄이는 것뿐만 아니라, 원헬스 접근법에서 삼림 서식지 파괴라는 환경적 측면, 원숭이의 서식지 이동에 따른 모기의 이동, 그리고 그로 인

해 발생하는 인간과의 상호작용을 이해하는 것이 중요하다(Dente et al., 2019). 원헬스 접근법으로 본다면 삼림 서식지가 파괴된 숲의 복원이 원숭이의 마을 진입을 줄이게 될 것이고, 이와 함께 모기의 이동도 감소하여 인간의 삼일열말라리아 발병률도 감소할 것이다. 이처럼 원헬스 접근법은 인수공통감염병 예방에 실질적인 도움이 된다.

야생동물이 중요한 감염 매개체인 경우, 야생동물 보존과 질병 예방 사이에 갈등이 발생할 수 있다. 이러한 경우 야생동물의 중요성과 가치를 고려하면서 감염된 동물과의 접촉을 최소화하는 방법을 찾아야 한다. 천연두과에 속하는 천연두 바이러스가 일으키는 원숭이 수두는 서부 및 중앙아프리카에서 풍토병으로 알려져 있으며, 이 바이러스의 일반적인 숙주는 아프리카 밧줄다람쥐와 같은 다양한 설치류이다. 또한, 환경 변화로 인해 일부 지역에서 숙주인 포유류와 인간의 접촉이 증가했고, 특히 포유류를 다루거나 고기로 섭취하는 과정에서 감염이 쉽게 발생하고 있다. 이러한 원숭이 수두의 발생은 원헬스 관점에서 인수공통감염병 원인 파악 및 관리의 중요성을 잘 보여준다(Wang et al., 2024). 이와 같이 원헬스 접근법은 전 세계의 상호 연결성과 동물 감염 저장고로부터의 전파 요인을 인식하여 감염을 효과적으로 관리하는 데 필수적이다.

3) 항생제 내성

항생제 내성은 인류 보건에 심각한 위협이며, 중요한 원헬스 문제로 간주되고 있다. 원헬스와의 상호 연결된 접점은 항생제 내성 미생물의 출현, 진화 및 확산을 촉진하여 지역 및 전 세계 보건에 심각한 위험을 초래한다는 것이다. 항생제 내성 전파를 제한하고 항생제 사용에 대한 인식을 높이며 관련 정책 수립 및 항생제 관리 시스템을 강화하려면 원헬스 원칙에 기반한 통합적 접근 방식이 필요하다. 우리나라는 2016년 관계부처 합동으로 '국가항생제내성관리대책'을 발표하고, 다음을 실행 계획에 포함시켰다.

① 항생제 적정 사용
② 내성균 확산 방지
③ 감시체계 강화
④ 연구개발 확충
⑤ 협력체계 활성화

항생제 과다 처방과 잘못된 섭취는 많은 양의 항생제와 그 대사산물이 하수 시스템으로 유입되는 결과를 초래하며, 사용되지 않고 남은 항생제도 버려져 하수 시스템으로 들어간다. 그리고 하수 시스템 내에서 항생제는 수많은 미생물과 상호작용하며, 수로와 바다를 통해 더 넓은 생태계로 확산된다(Aslam et al., 2021).

미세 플라스틱은 수생 및 육상 생태계, 인간과 동물이 섭취하는 음식과 물 어디에나 존재하지만, 인간 건강과 다른 생명체에 미치는 영향은 아직 충분히 밝혀지지 않았다. 그러나 토양에 존재하는 미세 플라스틱과 같은 오염 물질은 항생제 내성의 확산과 관련이 있다. 항생제 내성 유전자를 가진 박테리아는 미세 플라스틱 주변에 흡착하여 물에 씻겨 내려가지 않고 토양에 잔존하며, 이로 인해 미세 플라스틱이 농작물과 결합하거나 농장 동물이 이를 섭취할 수 있다. 또 다른 가능성은 항생제 내성 박테리아가 나노 입자에 부착되어 식물 뿌리에서 흡수된 후 줄기나 열매로 이동해 먹이사슬에 유입되는 것이다.

항생제의 광범위한 사용은 인간과 동물의 장내 미생물, 비병원성 미생물을 항생제에 노출시킨다. 그 결과 무해한 미생물도 항생제 내성 유전자를 갖게 되며, 이는 수평적 전달을 통해 병원성 미생물에게로 확산될 수 있다. 예를 들어, 내성 유전자는 장내 미생물과 음식 관련 미생물에 축적되어 항생제 치료 중에 병원성 미생물로 옮겨져 내성을 획득할 수 있다. 따라서 인간과 동물이 불필요하게 항생제에 노출되는 빈도를 줄이고, 환경으로의 항생제 유출을 막는 것이 중요하다. 또한, 항생제를 복용하는 사람들은 내성 유전자를 가진 미생물 섭취 가능성을 줄이기 위해 음식 선택과 조리 방법에 주의해야 한다(Torres et al., 2020).

4) 식품 안전 및 장내 미생물

식품의 안전성을 확인하고, 적절한 보관 및 운송을 보장하기 위해 정기적인 검사 시스템이 중요하다. 원헬스 접근법은 특정 식품 섭취 시 동물 및 환경 조건과의 상호작용이 인간에게 위험을 초래할 수 있는지 판단하는 데 도움을 준다. 그러나 식품 보관 및 준비에 관한 법률과 지침은 이행 수단이 없거나 전통적인 관행에 어긋날 경우 효과가 제한적일 수 있으며, 잘못된 취급이나 조리, 보관 부족은 세균성 식중독 위험을 높인다(Bizzaro et al., 2022). 또한, 감염된 요식업 종사자에게 식중독이 유발될 수 있으며, 자신이 감염된 사실을 인지하지 못할 수도 있다. 그리고 야생동물 섭취를 통한 전염성 질병 감염에 대한 위험도 심각하다(Sievers et al., 2024).

모든 유기체는 고유한 미생물총을 가지며, 이는 건강에 직접적으로 영향을 미친다. 특히, 인간의 장내 미생물은 선천성 면역 반응 등 다양한 생리학적 기능을 수행한다. 장내 미생물의 다양성 감소는 설사부터 정신질환까지 다양한 문제와 연관된다. 이는 주로 서구화된 생활 방식과 관련이 있으며, 특히 도시 환경에서의 가공식품 섭취와 연관이 깊다.

그간의 연구에 따르면 지리적 위치와 도시화 수준이 장내 미생물의 변화를 설명할 수 있다. 일부 의과학자는 도시화가 다양한 미생물 군집 획득 능력에 영향을 미쳐 공중보건에 위협이 될 수 있다고 지적한다(Banerjee & van der Heijden, 2023). 현재 대부분의 인류가 도시 지역에 거주하고 있으며, 이 같은 추세는 계

속될 것으로 보인다. 따라서 환경 요인을 평가하는 원헬스 접근법은 이러한 문제를 해결하는 데 도움이 될 수 있다.

5) 환경보건

'환경'은 원헬스 감시에서 생물과 비생물, 자연적 및 인공적 요소를 모두 포함하는 용어이다. 모니터링해야 할 환경 요소에는 토지 및 물 사용, 서식지의 특성과 지리적 가용성, 야생 동식물 개체 수 및 분포, 기상 및 기후 조건 등이 포함된다. 세계보건기구는 공중보건 분야에서 기후 위기로 인한 건강 문제 해소를 최우선 과제로 선정했다. 학자들은 신종 및 재출현 인수공통전염병과 정신질환 증가 및 농축산물 생산성 감소 등이 기후 변화와 관련 있다고 보고 있다(Banerjee & van der Heijden, 2023). 기후 변화는 생물 종과 개체 수의 변화를 초래해 생태계의 질서를 파괴하고, 병원체 생존 기간과 숙주의 질병 적응 능력에 영향을 미친다. 특히, 매개체의 생존과 번식에 큰 영향을 미쳐 질병 확산의 촉발 요인이 될 수 있다. 과학자들은 기후 변화로 인해 모기, 진드기, 벼룩, 새 등의 서식 분포와 활동 범위가 확대되어 매개체성 감염병이 전 세계로 확산될 가능성을 경고하고 있다(Cross et al., 2019). 우리나라도 질병관리청 주관으로 2026년부터 5년 동안 2,000억 원을 투자하여 기후 변화에 따른 환경 및 생태계 변화, 매개체 서식지 및 생활사 변화, 감염병 전파양상 연구를 진행할 예정이다.

다 글로벌 인프라 구축

글로벌 이슈 해결을 위해서는 국가나 지역을 넘어서 전 세계적 차원의 역량 결집과 협력이 필수적이다. 이처럼, 다양한 이해관계와 복잡한 상호작용이 포함되는 문제들에 대해서는 포괄적이고 전체론적인 접근이 종종 필요하다. 현재 21세기에는 사회의 다양한 층위에서 원헬스적 접근을 통해 문제 인식, 해결 및 예방이 진행됨과 동시에, 통일되지 않은 알림 수단, 기관 간 협조와 연계의 지연, 데이터 거버넌스의 격차 같은 문제들에 직면해 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 국제법 체계의 개정이 필요하며, 사회과학 및 경제학 전문가의 참여를 포함한 글로벌 인프라의 구축이 요구된다. 이런 조치들은 국제 사회가 보다 효과적으로 협력하고, 글로벌 문제에 대응할 수 있는 기반을 마련하는 데 도움이 될 것이다.

1) 국제법 체계 개정

적절한 국가 개입이 지연되거나 실패할 경우, 일반적인 질병이 국가적 재난 수준의 전염병으로 발전할 수 있다. 코로나19 팬데믹 초기 3개월 동안 국제적 공중보건 비상사태 선포를 비롯한 통지, 정보 공유, 경보의 지연이 전 세계적 팬데믹에 영향을 미쳤다는 것이 밝혀졌다(Carlson & Phelan, 2022). 따라서 질병 발생에 대한 현재의 과학적 이해를 반영하고, 원헬스 연구 환경을 바탕으로 빠른 질병 예방을 위해 국제법 체계를 강화해야 한다.

전염병 대응 패러다임의 문제를 인식하고 개선하기 위해 우선시 되어야 하는 단계는 글로벌 보건 안보 위협에 대한 공지 시스템을 강화하는 것이다(Hayman et al., 2023). 전염병 조약은 이 시스템을 통해 전염병 통지 의무를 보다 광범위하게 재구상할 수 있는 기회를 제공한다. 또한, 전염병에 효과적으로 대응하기 위해서는 발병 정보를 제한 없이 공유해야 하며, 이는 발병의 모든 단계에서 이루어져야 한다. 특히, 공중보건에 심각한 위험을 초래하거나 새로운 바이러스의 확산에 대한 증거가 있는 경우, 이 정보는 긴급하게 공유되어야 한다.

이때 중요한 것은 공지를 일상적이고 보편적인 절차로 만들어 과학적 증거에 대한 신중한 고려를 바탕으로 반동적인 여행 금지 조치의 위험을 줄이는 것이다. 이를 통해 비상사태 발생 전에도 발병 공지를 강제하고, 데이터 공유를 함으로써 피해 최소화가 가능하다. 이러한 법과 제도 개혁은 글로벌 협력을 강화하고, 다자 간 신뢰를 회복하는 데 기여할 수 있다. 국제법 개정은 다음 감염병이 팬데믹으로 번지는 것을 막는 현실적이고 일관된 원헬스 접근법을 만들 수 있는 잠재력을 지니고 있다(Carlson & Phelan, 2022). 이는 비상 상황에서도 정보를 성공적으로 공유할 수 있는 글로벌 보건 인프라를 구축하는 데 도움이 될 것이다.

2) 사회과학 및 경제학 전문가 참여

인간과 동물(가축 또는 야생) 간의 상호작용과 질병 위험의 변화를 이해하기 위해서는 사회경제적 전문지식과 분석이 필요하다. 이를 통해 질병 발생 환경의 변화와 새로운 질병 위험 증가 영역을 파악할 수 있다. 이러한 정보를 바탕으로 사람, 동물, 식물의 건강 및 병원체를 대상으로 한 표적 감시를 실시할 수 있다(Hayman et al., 2023). 또한, 병원체 모니터링과 대응 조치에 대한 경제적 비용-편익 분석을 사회, 경제, 환경적 영향을 포함하여 단기, 중기, 장기 시간 규모로 수행해야 한다.

현재 대부분의 전염병은 인간의 활동에 기인하므로, 사회과학 및 경제 전문가들은 원헬스 문제를 해결하기 위한 이해관계자를 식별하고 그들의 참여를 지원하는 데 중요한 역할을 한다(Dente et al., 2019). 비

정부기구, 지역 커뮤니티, 종교 단체 등은 종종 배제되는 이해관계자들이지만, 원헬스 위험에 대처하기 위한 실용적인 작업 경로와 지표 설계에 도움을 줄 수 있다. 또한, 사회과학 및 경제 전문가들은 실행을 위한 상황별 자원과 지역 커뮤니티의 참여 및 동의를 포함하여 관리를 지원할 수 있다.

의사소통 전문가들은 미디어 및 지역사회 리더들과 협력하여 국민의 참여와 동기를 부여하기 위한 전략을 개발하는 데 중요한 역할을 한다. 이를 통해 국민에게 정보를 제공하고 지역사회 기반의 감시 활동에 참여하도록 하여 이해관계자의 참여와 관리를 효과적으로 지원할 수 있다(Carlson & Phelan, 2022).

라 맺음말

인류는 세계화를 통해 경제, 사회, 문화 등 다양한 분야에서 정보를 실시간으로 교환하고, 사회 현상을 공유하며, 공동의 목표를 위해 협력하고 있다. 원헬스 접근법은 글로벌 보건 안보에 중요하지만, 이는 글로벌 보건 안보 구축과 지속가능발전목표를 지원하기 위한 여러 요소 중 하나일 뿐이다. 따라서 원헬스 접근법의 성공을 위해서는 공동의 지향점과 일관된 행동이 필요하며, 여러 부문의 원헬스 노력에서 자원의 공평한 배분에 대한 책임이 분담되어야 한다. 궁극적으로, 글로벌 보건 안보를 지원하기 위한 지속가능발전목표와 원헬스 접근법은 모두 평화와 번영이라는, 같은 기본 목표를 공유하고 있다.

참고문헌

Aslam, B., Khurshid, M., Arshad, M., Muzammil, S., Rasool, M., Yasmeen, N., Shah, T., Chaudhry, T., Shahid, A., Xueshan, X. & Baloch, Z.(2021). "Antibiotic resistance: one health one world outlook", Frontiers in Cellular and Infection Microbiology, Vol.11 Article.771510, pp. 1-20.

Banerjee, S. & van der Heijden, M.(2023). "Soil microbiomes and one health", Nature Reviews Microbiology, Vol.21 No.1, pp. 6-20.

Bizzaro, G., Vatland, A. & Pampanin, D.(2022). "The one-health approach in seaweed food production", Environment International, Vol.158 Article.106948, pp. 1-13.

Carlson, C. J. & Phelan, A. L.(2022). "International law reform for one health notifications", Lancet, Vol.400 Issue.10350, pp. 462-468.

Cross, A. R., Baldwin, V. M., Roy, S., Essex-Lopresti, A. E., Prior, J. L. & Harmer, N. J.(2019). "Zoonoses under our noses", Microbes and Infection, Vol.21 No.1, pp. 10-19.

Dente, M., Riccardo, F., Bolici, F., Colella, N., Jovanovic, V., Drakulovic, M., Vasic, M., Mamlouk, H., Maazaoui, L., Bejaoui, M., Zakhashvili, K., Kalandadze, I., Imnadze, P. & Declich, S.(2019). "Implementation of the one health approach to fight arbovirus infections in the Mediterranean and black sea region: assessing integrated surveillance in Servia, Tunisia and Georgia", Zoonoses and Public Health, Vol.66 No.3, pp. 276-287.

Hayman, D., Adisasmito, W., Almuhairi, S., Behravesh, C., Bilivogui, P., Bukachi, S., Casas, N., Becerra, N., Charron, D., Chaudhary, A., Ciacci Zanella, J., Cunningham, A., Dar, O., Debnath, N., Dungu, B., Farag, E., Gao, G., Khaitsa, M., Machalaba, C., Mackenzie, J., Markotter, W., Mettenleiter, T., Morand, S., Smolenskiy, V., Zhou, L. & Koopmans, M.(2023). "Developing one health surveillance systems", One Health, Vol.17 Article.100617, pp. 1-9.

King, T.(2021). "The one medicine concept: its emergence from history as a systematic approach to re-integrate human and veterinary medicine", Emerging Topics in Life Sciences, Vol.5 No.5, pp. 643-654.

Malik, S., Taweh, F., Freeman, M., Dogba, J., Gwesa, G., Tokpah, M., Gbondin, P., Kohar, T., Hen, J., MaCauley, J., Pierson, A., Rayfield, M., Peruski, L., Albetkova, A. & Balish, A.(2022). "Strengthening laboratory biosafety in Liberia during the COVID-19 pandemic: Experience from the global laboratory leadership programme", One Health, Vol.15 Article.10442.

Pitt, S. & Gunn, A.(2024). "The one health concept", British Journal of Biomedical Science, Vol.81 Article.12366, pp. 1-15.

Pungartnik, P. C., Abreu, A., Dos Santos, C., Cavalcante, J., Faerstein, E. & Werneck, G.(2023). "The interfaces between one health and global health: a scoping review", One Health, Vol.16 Article.100573, pp. 1-11.

Sievers, B., Hyder, S., Claes, F. & Karlsson, E.(2024). "Ingrained: rice farming and the risk of zoonotic spillover, examples from Cambodia", One Health, Vol.18 Article.100696, pp. 1-7.

Sinclair, J. R.(2019). "Importance of a one health approach in advancing global health security and the sustainable development goals", Revue Scientifique et Technique, Vol.38 No.1, pp. 145-154.

Solis, A. & Nunn, C. L. (2021). "One health disparities and COVID-19", Evolution, Medicine, and Public Health, Vol.9 No.1, pp. 70-77.

Tobias, A., Molina, T., Rodrigo, M. & Saez, M.(2021). "Meteorological factors and incidence of COVID-19 during the first wave of the pandemic in Catalonia (Spain): A multi-county study", One Health, Vol.12 Article.100239, pp. 1-7.

Torres, R., Carvalho, J., Cunha, M., Serrano, E., Palmeira, J. & Fonseca, C.(2020). "Temporal and geographical research trends of antimicrobial resistance in sildlife – A bibloimetric analysis", One Health, Vol.11 Article.100198, pp. 1-8.

Wang, Y., Vallée, E., Heuer, C., Wang, Y., Guo, A., Zhang, Z. & Compton, C.(2024). "A scoping review on the epidemiology and public significance of Brucella abortus in Chinese dairy cattle and humans", One Health, Vol.18 Article.100683, pp. 1-10.

PART 5

3 인수공통 감염병과 종간전파

송 대 섭
서울대학교 수의과대학 교수

가 들어가는 말

코로나19와 같은 전염병의 등장은 완전히 새로운 현상은 아니다. 인류는 신석기 혁명 시기인 12,000년 전 사냥-채집 생활에서 정착 생활로 전환하며 동물 사육과 농업을 시작했을 때부터 인수공통감염병의 위협을 받아왔다. 인수공통감염병은 세균, 바이러스, 기생충, 곰팡이 등 다양한 병원체에 의해 발생할 수 있다. 이러한 병원체들은 동물로부터 유래하여 직접적인 접촉뿐만 아니라 음식, 물, 환경을 통해 간접적으로도 사람에게 전파될 수 있다. 특히 바이러스는 전파 과정에서 유전적 다양성이 증가하고, 숙주 특이성과 함께 변이되어 다양한 숙주 범위를 가지게 된다(Morens & Fauci, 2020).

새로운 타입의 인수공통감염병 등장에 대한 우려는 학계에서 지속적으로 제기되어 왔다. 기후 변화, 야생 생태계 파괴, 인간의 생활 반경 확장 등의 이유로 야생동물과의 접촉이 늘어나면서 신종인수공통감염병의 발생 가능성은 증가하고 있다. 실제로 지구온난화로 인해 모기, 진드기와 같은 질병을 매개하는 매개체의 수가 증가하며 인수공통감염병이 넓은 지역 범위로 확산되고 있다.

현재 대한민국에서도 지구온난화로 인한 감염병 확산의 가능성이 증가하고 있다. 열대 기후에서만 존재했던 모기, 진드기 등이 국내에서도 발견되고 있으며, 이로 인해 뎅기열, 일본 뇌염 등 기존 국내에서는 발생하지 않았던 질병의 발생 가능성이 증가하고 있는 것이다(Im et al., 2021).

해외에서도 이런 사례가 발생하고 있다. 라임병은 참진드기(ixodes scapularis)에 의해 전파되는 질병으로, 주로 북미와 유럽에서 발생한다. 그러나 기온 상승으로 인해 참진드기의 서식지가 북쪽으로 확장되면서 캐나다와 북유럽에서도 라임병 발생 사례가 증가하고 있다. 이는 기후 변화가 진드기의 생존과 번식에 유리한 조건을 제공하기 때문이다. 지구온난화는 모기와 진드기와 같은 절지동물의 서식지를 변화시키며, 이에 따라 이들이 매개하는 감염병의 발생 가능성도 확대되고 있다(Kelly et al., 2024).

나 종간전파(spillover) 감염병의 의미와 중요성

병원체가 종간 장벽을 넘어서 다른 종에게 전파되는 경우는 드물다. 자연에는 다른 종에서 유래된 수많은 잠재적 인수공통감염병 미생물이 순환하고 있음에도 불구하고, 인간에게 감염되거나 질병을 일으키지 않는다. 병원체가 야생동물에서 인간에게 전염되기 위해서는 여러 장벽을 극복해야 하기 때문이다.

① **자연 숙주와 감염 숙주의 연결**: 병원체를 주로 보유하는 자연 숙주(reservoir host)와 감염되는 종(recipient host)의 분포가 연결되어야 한다.
② **면역기능 극복**: 야생 자연 숙주의 면역기능으로 인해 바이러스 배출이 낮은 수준으로 유지하는 것을 극복해야 한다.
③ **인간 노출**: 인간이 병원체에 노출되어야 하며, 이는 직접 또는 간접 접촉을 통해 이루어진다.
④ **구조적, 면역학적 장벽 극복**: 병원체는 인간 세포에 결합하는 등 구조적, 면역학적 장벽을 극복해야 한다.
⑤ **인간 내 증식과 전파**: 병원체는 인간 내에서 증식하고 배출되어 다른 인간에게 전파되어야 한다.

이 중 어느 하나의 장벽이라도 극복하지 못하면 종간전파는 발생할 수 없다. 하지만, 최근 인간의 생활 반경 변화 및 지구의 온도 상승 등 다양한 이유로 병원체를 보유하고 있는 동물과의 접촉 가능성이 늘어나고 있으며, 이는 동물에서 인간으로의 종간전파 가능성을 높인다(Plowright et al., 2024).

동물에서 인간으로의 종간전파가 일어나면 대부분 인간은 이러한 바이러스에 대한 면역이 없어서 폭발적인 감염이 발생하고, 팬데믹으로 발전할 가능성이 크다. 예를 들어, 인간면역결핍바이러스(Human Immunodeficiency Virus, HIV)는 1920년대 영장류로부터 인간에게 처음 전파되었고, 후천성면역결핍증(Acquired Immune Deficiency Syndrome, AIDS)의 대유행은 1960년대와 1990년대 사이에 나타났다. 사스코로나바이러스(SARS-CoV)와 메르스코로나바이러스(MERS-CoV)는 각각 2002년과 2012년에 인간에게서 나타났으며, 모두 박쥐에서 유래했을 가능성이 크다. 2019년 말에는 SARS-CoV-2에 의해 코로나19가 등장하여 전 세계적으로 확산하였다. 코로나19의 원인체인 SARS-CoV-2 바이러스도 박쥐에서 유래하여 중간 숙주를 통해 인간에게 전파된 것으로 추정된다(Morens & Fauci, 2020).

야생동물뿐만 아니라 가축 또는 반려동물을 통해서도 인수공통감염병이 인간에게 전파될 수 있다. 최근 미국 텍사스에서 조류에 의해 전파되는 H5N1 고병원성 인플루엔자가 인플루엔자 바이러스에 대한 감수성이 없는 소에게 전파된 사례가 있다. 주목해야 할 것은 단순히 소에게만 종간전파가 일어난 것이 아니라 소를 통해 인간, 그리고 인근의 고양이들에게도 종간전파가 발생하였다는 점이다. 앞서 언급하였듯이 종간전파가 발생하기 위해서는 다양한 장벽을 넘어야 한다. 하지만 조류에서 젖소, 젖소에서 고양이와 인간으로의 두 번의 종간전파가 연이어 발생한 것은 시사하는 바가 크다. 숙주의 범위가 점점 다양해

지면서 인간에게 가까워지고 있음을 알 수 있기 때문이다.

인구 증가와 새로운 지리적 공간으로의 사회적 영역 확장, 해외여행 패턴 변화 등으로 인해 인간이 병원체의 숙주인 동물 종과 접촉할 기회가 증가했다. 특히 열대우림 지역까지 인간의 활동 반경이 넓어지면서 이전에는 접촉하지 않았던 바이러스들과의 접촉도 발생하게 되었다. 그 결과 야생동물을 숙주로 삼고 있던 바이러스가 인간을 새로운 숙주로 선택하는 일이 증가하고 있다.

종간전파 감염병의 위협을 줄이기 위해서는 글로벌 모니터링 시스템의 강화, 바이러스 연구의 확대, 동물과 인간의 상호작용을 최소화하는 정책 시행이 필수적이다. 이는 질병 예방 차원의 문제를 넘어 생태계 보호와 인간의 안전을 지키는 중요한 과제이다.

다 고병원성 조류인플루엔자의 포유류 감염 확산

1) 고병원성 조류인플루엔자의 포유류 감염

고병원성 조류인플루엔자(Highly Pathogenic Avian Influenza, HPAI)는 주로 조류 사이에서 발생하는 바이러스성 질병으로, 높은 전염성과 치명률을 가지고 있다. 하지만 최근 몇 년간 HPAI가 다양한 포유류로 감염되는 사례가 보고되고 있다(European Food Safety Authority et al., 2023). 이러한 현상은 바이러스의 변종 가능성과 새로운 숙주로의 확산 능력을 보여주며, 이는 공중보건 및 생태계에 중대한 영향을 미칠 수 있다.

바이러스의 포유류 감염은 인간에게도 잠재적인 위협을 가할 수 있음을 시사한다. 포유류는 조류보다 인간과 더 유사한 생리학적 특성을 가지고 있기 때문에 바이러스가 포유류에서 적응하면 인간에게 전염될 가능성이 높아진다. 따라서 이러한 사례를 통해 바이러스의 진화와 전파경로를 이해하고, 이에 대비한 예방 및 대처 방안을 마련하는 것이 중요하다.

2) 젖소의 고병원성 인플루엔자 바이러스 감염 사례

2024년 2월부터 텍사스, 캔자스, 뉴멕시코 등의 젖소 농장에서 이상 증상이 보고되기 시작했다(Ly, 2024a). 아직 정확한 전파경로는 밝혀지지 않았으나 농가 주변 야생조류로부터 전파가 이루어진 것으로

추정되고 있다. 감염된 젖소들은 우유 생산량 감소, 사료 섭취 감소 등의 증상을 보였으며, 우유의 색깔이 크림색으로 변하는 현상도 관찰되었다. 농장 내 발생률은 10~15% 정도로 추정되며, 2024년 5월 중순까지 미국 9개 주 36개 목장의 소들이 양성 판정을 받았다. 비록 저온살균 우유에서 살아있는 바이러스는 발견되지 않았으나, 감염된 포유류의 유즙을 통한 바이러스 전파 가능성이 잠재적 위험 요인으로 논의되고 있다. 특히 주목할 점은 종간전파 사례다. 2024년 4월, 미국에서는 H5N1 바이러스에 감염된 젖소의 우유를 섭취한 고양이에서 감염 및 사망 사례가 보고되었으며, 감염된 고양이의 50% 이상이 폐사한 것으로 알려져 심각성이 대두되었다(Burrough et al., 2024).

더욱 중요한 사실은 인체 감염 사례도 확인되었다는 점이다. H5N1 바이러스에 감염된 젖소와 밀접 접촉한 목장 노동자도 H5N1 바이러스 양성 반응을 보였다. 2024년 6월 중순까지 확인된 사례는 총 3건이며, 첫 두 사례는 결막염의 증상을 보였으나 세 번째 사례에서는 호흡기 증상이 나타났다. 결막염 증상을 보였던 노동자들은 젖소의 우유가 눈에 노출되어 발생한 것으로 보이지만, 세 번째 사례에서는 착유장에서 감염성 에어로졸을 흡입하여 발생한 것으로 추정된다(Sreenivasan et al., 2024). 이러한 사례들은 소에서 사람으로의 직접적인 전파 가능성을 시사하며, 유제품 관련 분야 근로자들은 눈 보호는 물론 마스크와 기타 보호 장비 사용이 필요함을 의미한다.

이번 사태는 조류에서 유래한 H5N1 바이러스가 소에 감염될 수 있으며, 감염된 소의 유즙을 통해 고양이로 전파될 수 있다는 점에서 바이러스의 종간전파 능력과 적응성을 보여준다. 이러한 종간전파는 바이러스의 광범위한 확산을 촉진할 수 있으며, 특히 고양이는 사람과 밀접한 접촉을 하는 동물이기에 고양이에서의 감염은 사람으로의 전파 위험을 높일 수 있다. 한편, H5N1 바이러스는 다수의 포유류 종에서 높은 치사율을 나타냈지만, 감염된 소에서는 경미한 비특이적 증상만을 유발하였다. 이는 임상증상 기반의 감시체계로는 소에서의 감염 여부를 파악하기 어려움을 의미한다. 반면, 감염된 고양이에서는 심각한 임상증상과 높은 치사율이 관찰되었다. 이는 바이러스가 숙주에 따라 다른 병원성을 나타낼 수 있음을 시사한다. 또한, 한 마리의 소가 다양한 인플루엔자 바이러스를 보유할 수 있어 시간이 경과함에 따라 바이러스 간 유전자 재배열을 통해 사람에게 보다 쉽게 전파될 수 있는 변이 바이러스가 출현할 가능성도 배제할 수 없다. 이러한 재배열은 소뿐만 아니라 고양이와 같은 중간 숙주에서도 일어날 수 있다. H5N1 바이러스 감염은 소 이외에도 다른 우제류에서도 보고되고 있다. 2024년 5월, 미국 아이다호 지역의 한 알파카 농장에서 다수의 알파카가 H5N1 바이러스에 감염되어 폐사한 사건이 있었는데, 이는 H5N1 바이러스가 알파카와 같은 다양한 우제류에서도 감염을 일으킬 수 있음을 보여준다(Kang et al., 2024).

이와 같은 포유류에서의 광범위한 확산은 바이러스의 포유류 숙주 적응을 가속화할 수 있다. 바이러스 유전체 분석 결과, 포유류 적응과 관련된 몇 가지 주목할 만한 유전자 변이가 관찰되었다. 예를 들어, 바이러스의 폴리머라아제 복합체를 구성하는 PB2 단백질의 627번째 아미노산이 글루탐산(E)에서 라이신(K)으로 치환된 E627K 변이나, 701번째 아스파라긴산(D)이 아스파라긴(N)으로 치환된 D701N 변이 등

은 여러 연구에서 포유류 적응과 관련이 있는 것으로 보고된 바 있다(Schrauwen & Fouchier, 2014). 이러한 변이들은 바이러스의 효율적인 복제와 전파에 기여하는 것으로 알려져 있으며, 실제로 고병원성 조류인플루엔자 바이러스의 포유류 감염 사례에서 빈번하게 관찰되고 있다. 이는 H5N1 바이러스가 포유류에서 보다 효과적으로 증식하고 전파될 수 있는 능력을 획득해 나가고 있음을 시사한다.

3) 반려동물에서의 고병원성 인플루엔자 바이러스 감염 사례

반려동물에서도 고병원성 조류인플루엔자(HPAI) 감염이 확인되고 있다. 고양잇과에서 HPAI 감염 사례는 매우 드물었다. 2004년 H5N1에 감염된 가금류 사체를 섭취한 태국 동물원의 호랑이와 표범에서 감염 사례가 보고된 이후 태국, 이라크, 프랑스, 그리고 미국 등에서 가정용 고양이의 산발적인 감염 사례가 보고되었다. 프랑스에서 감염된 가정용 고양이는 조류 농장 근처에 거주하며 자연적으로 감염된 것으로 확인되었다(Briand et al., 2023). 또한 2023년 폴란드에서 길고양이와 가정용 고양이를 포함한 29마리의 고양이가 대규모 감염되었으며, 신경학적 증상과 함께 호흡곤란, 설사 등 증상을 수반하였다. 구체적인 원인이 규명되지는 않았지만 일부 고양이가 야생조류와 접촉할 기회가 있었던 것으로 보고되었다(Domańska-Blicharz et al., 2023; Jordanow et al., 2023). 하지만 같은 해 이탈리아에서 보고된 가정의 개와 고양이는 특별한 증상을 보이지 않아 반려동물의 H5N1 바이러스 무증상 감염에 대한 실질적인 우려가 제기되었으며, 이는 반려동물이 사람에게 바이러스를 무의식적으로 전파할 가능성이 있음을 암시한다(Ly, 2024b).

한국에서는 아직 반려동물의 H5N1 감염 사례가 보고된 바 없지만, 지난해 6월과 7월에 서울 고양이 보호소에서 H5N1 감염 사례가 확인되었다. 첫 사례의 경우 용산구의 보호소에서 대규모로 고양이가 폐사하였으며, 그중 2마리에서 HPAI H5N1 2.3.4.4b를 검출하였다. 첫 사례의 감염 원인은 불분명하지만, 두 번째 사례에서는 농림축산식품부의 조사 결과 적절한 멸균과 살균 처리가 충분히 이루어지지 않은 가금류 사료를 급여한 것이 원인으로 밝혀졌다. 이 사료를 섭취한 고양이들은 발열, 식욕 부진, 호흡기 증상을 보였다. 해당 발견은 국내에서도 조류인플루엔자의 종간전파가 가능하다는 것을 알리며, 개체들이 밀접하게 생활하는 환경에서의 감시를 강화할 필요가 있음을 시사한다(Lee et al., 2024).

반려동물은 사람과 밀접하게 접촉하기 때문에 인간으로의 종간전파로 이어지는 중간 숙주가 될 가능성이 높으며, 그렇기 때문에 개, 고양이에서의 감염은 의미가 크다. 지난해 중국 농업대학에서 발표한 논문에 따르면, 2012년 이후 조류 유래 개 인플루엔자 바이러스(H3N2 CIV)가 개에서 포유류 적응 돌연변이를 획득하면서 시간이 지남에 따라 사람에게 적합한 바이러스로 진화하고 있음이 발견되었다. 생물학적 분석 결과 CIV가 개에서 돌연변이를 가지면서 적응하고 진화하여 사람과 유사한 SA-alpha-2,6-Gal 수용체 결합 특이성을 가지게 되었다. 또한, 사람 기도 상피 세포에서 HA 산 안정성과 복제 능력이 향상되어

사람 H3N2 바이러스와 흡사한 수준으로 진화하였다. 개와 사람 인플루엔자 감염 연구의 실험동물인 페럿을 대상으로 진행한 바이러스 감염 및 전파 실험에서도 진화한 H3N2 CIV가 개체 간 전파력을 획득하여 접촉 후, 호흡기를 통해 쉽게 전파될 수 있음이 입증된 바 있다. 이 연구 결과를 통해 H3N2 CIV가 개체 내에서 단계적으로 적응하면서 사람에게 적합한 바이러스로 진화했음을 확인하였으며, 이는 개가 조류인플루엔자 바이러스를 인간에게 전파할 수 있는 중요한 중간 숙주 역할을 할 수 있음을 의미한다. 또한 사람은 조류인플루엔자에 대한 기존 면역이 부족하기 때문에 높은 치사율과 함께 광범위한 숙주 범위를 가지는 HPAI H5N1이 반려동물을 통해 사람에게 전파된다면 공중보건에 심각한 위협이 될 수 있다(Chen et al., 2023).

라 국내외 HPAI 감염병 대응 정책

1) 미국

미국 농무부(United States Department of Agriculture, USDA)와 동식물 검역소(Animal and Plant Health Inspection Service, APHIS)는 HPAI 발생에 적극적으로 대응하고 있다. 2024년 4월 24일부터 시행된 연방 명령에 따라 젖소의 주(州) 간 이동 전 인플루엔자 A 음성 판정을 요구하며, 모든 양성 결과는 USDA 및 APHIS에 보고해야 한다. 이는 바이러스 확산을 막기 위한 조치로, 젖소 이동을 제한하는 것을 목표로 한다. 또한 바이러스 샘플의 유전자 서열을 공개하여 연구자들에게 제공하고, 바이러스 전파 메커니즘을 이해하기 위한 연구를 지원하고 있다.

미국 보건복지부(Health and Human Service, HHS)는 2024년 미국에서 처음 보고된 H5N1 바이러스의 위협을 심각하게 인식하고, 정부 및 공중보건 파트너와 함께 상황을 면밀히 모니터링하고 있다. USDA는 9천8백만 달러, HHS는 1억 1백만 달러를 투입하여 진단, 유전자 시퀀싱, 생물 보안 강화 및 농가 손실 보상에 사용한다. 특히, 생물 보안을 강화하는 농가에 인센티브를 제공하는 형식을 취하고 있다(Larkin, 2024).

2024년 5월에는 HPAI 대유행에 대비하기 위해 CSL Seqirus와 파트너십을 맺어 백신을 공급받기로 하였다. CSL은 인플루엔자 예방 백신을 포함한 의약품 개발을 전문으로 하는 글로벌 생명공학 회사로, 성공적인 계약 완료 시 H5N1 바이러스 대응 백신 480만 회 분량을 공급할 예정이다. 이로 인해 국가 대유행 전 인플루엔자 백신 비축(National Pre-Pandemic Influenza Vaccine Stockpile, NPIVS) 프로그램을 통한 백신 보유량이 증가하여 효과적인 예방이 가능해질 것으로 보인다(Dekonor, 2024).

2) 영국

영국 정부에 따르면, 현재 영국에서는 가금류나 기타 사육 조류에서 고병원성 조류인플루엔자(HPAI)가 발생하지 않고 있다. 세계동물보건기구(WOAH)의 검토를 거쳐 2024년 3월 29일부터 영국은 HPAI로부터 자유롭다고 자진 선언 하였다. 그러나 HPAI H5N1은 여전히 영국과 유럽 전역의 야생 조류에서 발견되고 있으며, 유럽 여러 국가의 가금류 및 기타 포획 조류에서도 발생하고 있다. 이에 따라 영국 정부는 3월 19일 조류독감으로부터 가금류 부문을 보호하기 위한 새로운 조치를 발표하였다(GOV.UK, 2024a).

이전에는 50마리 이상의 가금류를 사육하는 경우에만 등록이 필요하였으나, 이제는 모든 조류 사육자가 사육 규모에 관계없이 공식적으로 조류를 등록해야 한다. 이를 통해 사육자들은 지역 내 조류 질병 발생과 같은 중요한 업데이트와 생물 보안 규칙에 관한 정보를 받을 수 있다. 이러한 정보는 잠재적인 질병 발생을 관리하고 확산을 제한하는 데 큰 도움이 될 것으로 기대된다. 이번 변화는 2021년 10월 말부터 360건 이상의 사례가 발생한 영국 역사상 최악의 조류인플루엔자 발생 당시 상당수의 소규모 사육 농가도 영향을 받은 사례를 반영한 것이다(GOV.UK, 2024b).

3) EU

EU는 조류인플루엔자 감시, 예방 및 통제 조치를 통합적으로 관리하며, 회원국 간의 협력을 통해 효과적인 대응체계를 구축하고 있다. 이는 조류인플루엔자가 국경을 넘나들며 확산될 수 있기 때문이다. EU는 조류인플루엔자 예방을 위해 회원국들이 정기적으로 감시 프로그램을 수행하도록 하며, 고병원성 조류인플루엔자(HPAI)와 저병원성 조류인플루엔자 바이러스의 조기 발견을 목표로 하고 있다. 이러한 감시 프로그램은 EU 전체에 적용되며, 각 회원국은 그 결과를 집행위원회에 보고해야 한다(European Commission, 2024).

최근 조류 반입 조건도 달라졌다. 비(非)EU 국가에서 반려 조류를 입국시키는 경우, 병원체의 유입과 확산을 방지하기 위해 통제된 조건하에서 이루어져야 한다. 여행 시 반입 가능한 조류의 수는 최대 5마리로 제한된다. 목록에 등재된 국가에서는 30일 격리, 목록에 등재되지 않은 국가에서는 H5 및 H7 아형의 조류인플루엔자 백신 접종 후 60일에서 6개월 사이 또는 백신 미접종 시 14일 격리와 검사 음성 결과가 필요하다(BMEL, 2024).

4) 대한민국

지난 2023년 7월, 농림축산식품부는 고병원성 조류인플루엔자 발생을 최소화하기 위해 방역 개선 대책을 마련하였다. 위험도 기반 과학적 방역조치를 실시하여 과거 전국 단위로 강화된 방역조치를 시행·적용하던 방식에서 벗어나 현재는 과거 조류인플루엔자(Avian Influenza, AI) 다발 지역(24개 시·군)을 선제적으로 지정하여 강화된 방역 관리를 수행하고자 하였다. 계열사의 분기별 계약사육농가 미흡사항 개선 조치 의무를 부여하고, 거짓으로 가금 입식 전 신고 시 제재 수단이 없었던 점에 대해 과태료 등을 부과하여 책임을 강화하였다. 또한 고위험 지역의 오리 사육 제한 등을 통해 방역 기반을 보다 체계적으로 조성하는 방향으로 방역 기반을 더욱 굳건히 하였다. 전체적으로 국내 방역은 지역별 맞춤형 방역 관리와 책임 강화를 통해 조류인플루엔자 발생을 효과적으로 억제하려는 방향으로 대책을 마련하였다(농림축산식품부, 2023).

마 맺음말

미지의 감염병인 질병 X는 어떠한 형태로도 나타날 수 있다. 코로나19는 감염병이 국제 평화와 안전에 중요한 안보 이슈임을 보여주었으며, 이는 앞으로 나타날 신종감염병에서도 동일할 것이다. 존스 홉킨스 대학은 높은 전염성과 치명성을 가진 호흡기 바이러스의 위험성을 강조하였다(Adalja et al., 2018). 그리고 VACCELERATE(팬데믹 발생에 대응하고 백신 개발 역량을 강화하기 위해 설립된 유럽 임상시험 네트워크) 전문가들은 질병 X를 포함한 병원체 중 인플루엔자 바이러스를 1순위로 지목하였다(Salmanton-García et al., 2024). 현재 고병원성 H5N1 바이러스가 조류와 포유류를 넘어 인간에게도 산발적 감염을 일으키고 있는 상황은 매우 심각하게 고려해야 한다.

1) 발생 전 대비

인간에서의 감염병 발생을 사전에 방지하는 것은 매우 중요하다. 현재 대부분의 대응은 병원체가 인간에게 전파된 후의 완화 조치에 집중되어 있으며, 주로 발병 감지, 백신 개발, 치료제와 같은 의학적 대응 수단에 의존하고 있다. 그러나 병원체가 동물 숙주에서 인간으로 전파되는 것을 줄이는 1차적인 팬데믹 예방은 세계적인 논의와 정책 지침에서 상대적으로 덜 주목받고 있다. 때문에 야생동물에서 인간 및 다른 동물로 병원체 전파를 예방할 수 있도록 준비와 대응에 대한 더 큰 관심과 투자가 필요하다.

일례로 H5N1의 경우 포유류에서 확산되기 전 이미 2020년부터 전 세계적으로 야생조류에서 고병원성 H5N1이 다량 검출되었으며, 미국의 폐수 감시를 통한 인플루엔자 모니터링에서도 H5 하위 유형의 증가가 확인된 바 있다(Wolfe et al., 2024). 이렇듯 야생에서의 감시를 통해 인체 감염이 일어나기 전에 상황을 파악하고, 예방할 수 있는 기회를 만들 수 있는 것이다.

차기 팬데믹을 예방하고 대응하기 위해서는 동물과 인간 사이의 양방향 감시를 강화하고 바이러스의 전파경로와 변이를 추적하며, 적절한 생물안전 조치를 시행하는 것이 중요하다. 이를 통해 인간과 동물 모두의 건강을 보호하고 더 지속 가능하고 건강한 미래를 보장할 수 있다.

2) 정부 단위 대비

다가올 팬데믹에 대비하기 위해 정부는 진단, 방역, 백신, 치료 분야에서 세계적인 경쟁력을 확보하고 감염병 공동 연구를 위한 글로벌 네트워크를 강화해야 한다. 각국 정부와 보건 기관은 신종감염병의 발병을 예측하고 대응할 수 있는 글로벌 감시체계를 강화하고, 국제적 정보 공유 시스템을 구축하여 신속하게 대응할 수 있도록 지원해야 한다. 신종감염병은 국경을 초월해 전 세계적으로 확산될 수 있기 때문에 국제적 협력은 초기 확산을 막고 효과적인 방역 및 치료 방법을 도입하는 데 필수적인 요소다.

신종 인수공통감염병은 대부분 국외에서 유입되므로, 국제수역사무국(Office International des Épizooties, OIE)과 같은 국제기구와 협력하여 정보를 사전에 수집하고, 철저한 검역을 통해 국내 유입을 차단해야 한다. 특히 조류인플루엔자는 철새를 통해 국가 간 이동이 가능하기 때문에 주기적인 감시가 필요하며, 야생 철새와 접촉할 수 있는 가금류 및 야생 포유류 등 다양한 동물군에 대한 지속적인 역학 조사와 바이러스 감시 활동이 요구된다. 농장 종사자, 수의사, 실험실 연구자 등 감염 위험이 높은 인력에 대한 정기적인 검사를 통해 조기에 사람 간 전파를 발견하고 차단하는 것도 중요하다.

원헬스 논의에서는 사람, 가축, 야생동물, 환경 간의 상호작용이 주목받고 있지만, 반려동물에 대한 관심과 규제 강화도 필요하다. 최근 H5N1 발생으로 유럽에서 가축 조류뿐만 아니라 반려 조류 입국에 대한 규정을 개정한 것처럼, 반려동물에 대한 관심과 규제 강화도 필요하다.

마지막으로, 정부는 대학, 연구소, 산업계와의 긴밀한 협력을 통해 신종감염병에 대한 종합적인 연구와 개발을 촉진해야 한다. 이를 통해 빠른 진단 기술 개발, 효과적인 백신 및 치료제 마련, 그리고 효율적인 방역 시스템 구축에 기여할 수 있기 때문이다. 또한 최신 연구 결과와 기술을 공유하고, 이를 실제 정책과 방역 전략에 반영하는 체계적인 접근이 필요하며, 이 같은 협력은 인력 양성과 기술 이전을 통해 국가의 감염병 대응 역량을 장기적으로 강화하는 데 중요한 역할을 할 것이다.

3) 개인, 이해관계자, 지역사회의 대비

개인은 최신 건강 정보를 지속적으로 확인하고, 소셜미디어의 정보를 주의 깊게 검토해야 한다. 신뢰할 수 있는 소스를 통해 정보에 대한 업데이트를 받으며 SNS상의 잘못된 정보와 오해를 예방할 수 있어야 하고, 급변하는 건강 지침에 대한 이해를 증진하려는 노력이 필요하다. 이를 통해 개인은 올바른 정보를 바탕으로 팬데믹 상황에 대응할 수 있다. 또한 적절하고 효과적인 생물안전 조치를 따르고 동물과의 접촉 전후에 올바른 손 씻기를 철저히 시행해야 하며, 야생동물과의 접촉을 피하고 개인 물품이나 쓰레기를 남기지 않아야 한다.

이해관계자들은 인수공통감염병에 대한 인식을 높이고, 효율적인 예방을 위해 대국민 교육과 홍보를 강화해야 한다. 의료 종사자에게는 개인 보호 장비의 중요성, 신속 대응, 간호 인력 부족 문제에 대한 교육이 필요하며, 이를 통해 의료 종사자들이 팬데믹 상황에서 자신을 보호하고 효과적으로 대응할 수 있도록 도울 수 있다. 또한 정책 결정자에게는 의료 자원 배분과 공중보건 정책 필요성에 대한 교육이 필요하며, 이는 팬데믹 상황에서 신속하고 정확한 결정을 내리는 데 도움을 준다. 일반인에게는 위생 인식 강화와 공중보건 지침 이해의 필요성을 강조해야 하며, 이는 팬데믹 상황에서 개인과 가족의 건강을 보호하는 데 중요한 역할을 한다.

아울러 지역사회는 지원 시스템 구축과 보건 계획 수립의 중요성을 인식하고, 이를 통해 신속하게 대응하며 피해를 최소화해야 한다. 지역사회는 전체적인 팬데믹 대응에서 중요한 역할을 하며, 지원 시스템 구축과 보건 계획 수립을 통해 팬데믹 상황에서 신속하게 대응하고 피해를 최소화할 수 있다.

각 그룹의 노력은 팬데믹 대응에서 중요한 역할을 한다. 의료 종사자, 정책 결정자, 일반인 및 지역사회가 각각의 역할을 충실히 수행할 때 팬데믹 상황에서 효과적으로 대응할 수 있다. 의료 종사자가 개인 보호 장비를 철저히 사용하고, 정책 결정자가 신속하고 정확한 결정을 내리며, 일반인이 위생 수칙과 공중보건 지침을 철저히 따르는 것은 전체 사회의 건강을 지키는 데 큰 기여를 한다. 이러한 준비를 통해 각 그룹이 팬데믹 발생 시 효과적으로 대응할 수 있으며, 더 나아가 팬데믹의 영향을 최소화할 수 있다(Al-Tawfiq et al., 2024).

신종감염병과 질병 X의 개념은 우리가 직면한 현실적인 위협을 상기시키며, 철저한 대비와 대응을 촉구한다. 이는 단순한 보건 문제를 넘어 전 지구적 차원의 협력과 연대를 요구하는 중요한 과제이다. 지속적인 연구와 감시, 그리고 국제적인 협력을 통해 인류는 보다 안전한 미래를 만들어 나갈 수 있으며, 정부, 커뮤니티, 개인이 주도적으로 행동하고 협력하여 문제를 해결할 수 있다.

참고문헌

농림축산식품부(2023), "고병원성 조류인플루엔자 방역 개선대책 마련", [보도자료].

Adalja A. A., Watson M., Toner E. S., Cicero A. & Inglesby T. V.(2018). "The Characteristics of Pandemic Pathogens", John hopkins bloomberg school of public health, Center for Health Security.

Al-Tawfiq, J. A., Tirupathi, R. & Temsah, M. H.(2024). "Feathered fears: Could avian H5N1 influenza be the next pandemic threat of disease X?", New Microbes and New Infections, Vol.59 No.101416.

Briand, F., Souchaud, F., Pierre, I., Beven, V., Hirchaud, E, Herault., Planel, R., Rigaudeau, A., Stoecklin, S., Werf, S. V., Lina, B., Gerbier, G., Eterradossi, N., Schmitz, A., Niqueux, E. & Grasland, B.(2023). "Highly Pathogenic Avian Influenza A(H5N1) Clade 2.3.4.4b Virusin Domestic Cat, France, 2022", Emerging Infectious Disease, Vol.29 No.8.

Burrough, E. R., Magstadt, D. R., Petersen, B., Timmermans, S. J., Gauger, P. C., Zhang, J., Siepker, C., Mainenti, M., Li, G., Thompson, A. C., Gorden, P. J., Plummer, P. J. & Main, R.(2024). "Highly pathogenic avian influenza A (H5N1) clade 2.3. 4.4 b virus infection in domestic dairy cattle and cats, United States, 2024.", Emerging infectious diseases, Vol.30 No.7.

Chen, M., Lyu, Y., Wu, F., Zhang, Y., Li, H., Wang, R., Liu, Y., Yang, X., Zhou, L., Zhang, M., Tong, Q., Sun, H., Pu, J., Liu, J. & Sun, Y.(2023). "Increased public health threat of avian-origin H3N2 influenza virus caused by its evolution in dogs", Elife, 12, e83470.

European Food Safety Authority, European Centre for Disease Prevention and Control, European Union Reference Laboratory for Avian Influenza, Adlhoch, C., Fusaro, A., Gonzales, J. L., Kuiken, T., Mirinavičiūtė, G., Niqueux, É., Ståhl, K., Staubach, C., Terregino, C., Willgert, K., Baldinelli, F., Chuzhakina, K., Delacourt, R., Georganas, A., Georgiev, M. & Kohnle, L.(2023). "Avian influenza overview September-December 2023", European Food Safety Authority, Vol.21 No.12, e8539.

Domanska-Blicharz, K., Swieton, E., Swiatalska, A., Monne, I., Fusaro, A., Tarasiuk, K., Wyrostek, K., Stys-Fijol, N. S., Giza, A., Pietruk, M., Zechchin, B., Pastori, A., Adaszek, L., Pomorska-Mol, M., Tomczyk, G., Terregino, C. & Winiarczyk, S.(2023). "Outbreak of highly pathogenic avain influenza A(H5N1) clade 2.3.4.4b virus in cats, Poland, June to July 2023", Eurosurveillance, Vol.28 No.31.

Im, J. H., Kim, T. S., Chung, M. H., Baek, J. H., Kwon, H. Y. & Lee, J. S.(2021). "Current Status and a Perspective of Mosquito-Borne Diseases in the Republic of Korea", Vector-Borne and Zoonotic Diseases, Vol.21 No.2. doi: 10.1089/vbz.2019.2588.

Jordanow, O. S., Golke, A., Dzieciatkowski, T., Chrobak-Chmiel, D., Rzewuska, M., Czopowicz, M., Sapierzynski, R., Kardas, M., Biernacka, K., Mickiewicz, M., Moroz-Fik, A., Lobaczewski, A., Stefanska, I., Kwiecien, E., Markowska-Daniel, I. & Frymus, T.(2023). "A Fatal A/H5N1 Avian Influenza Virus Infection in a Cat in Poland", Microorganisms, Vol.11 No.9.

Kang, M., Li, H. P., Tang, J., Wang, X. Y., Wang, L. F., Baele, G., Lou, J. T., Lemey, P. & Su, S.(2024). "Changing Epidemiological Patterns in Human Avian Influenza Virus Infections", Lancet Microbe, S2666-5247(24)00158-7.

Kelly, P. H., Tan, Y., Yan, Q., Shafquat, M., Davidson, A., Xu, Q., Major, M., Halsby, K., Grajales, A., Davis, J., Angulo, F. J., Moisi, J. C. & Stark, J. H.(2024). "Borrelia burgdorferi sensu lato prevalence in Ixodes scapularis from Canada: A thirty-year summary and meta-analysis (1990-2020)", Acta Tropica, Vol.256, 107268.

Lee, K., Yeom, M., Vu, T., Do, H., Na, W., Lee, M., Jeong, D., Cheon, D. & Song, D.(2024). "Characterization of highly pathogenic avian influenza A(H5N1) viruses isolated from cats in South Korea, 2023", Emerging Microbes & Infections, Vol.13 No.1.

Ly, H.(2024a). "Highly pathogenic avian influenza H5N1 virus infections of dairy cattle and livestock handlers in the United States of America. Virulence", Vol.15 No.1, 2343931.

Ly, H.(2024b). "Highly pathogenic avain influenza H5N1 virus infection of companion animals", Viruence, Vol.15 No.1.

Morens, D. M. & Fauci, A. S.(2020). "Emerging Pandemic Diseases: How We Got to COVID-19", Cell, Vol.182 No.5, pp. 1077-1092.

Plowright, R. K., Ahmed, A. U., Coulson, T., Crowther, T. W., Ejiotre, I., Faust, C. L., Frick, W. F., Hudson, P. J., Kingston, T., Nameer, P. O., O'Mara, M. T., Peel, A. J., Possingham, H., Razgour, O., Reeder, D. A., Ruiz-Aravena, M., Simmons, N. B., Srinivas, P. N., Tabor, G. M., Tanshi, I., Thompson, I. G., Vanak, A. T., Vora, N. M., Willison, C. E. & Keeley, A. T. H.(2024). "Ecological countermeasures to prevent pathogen spillover and subsequent pandemics", Nature Communications, Vol.15.

Salmanton-García, J., Wipfler, P., Leckler, J., Nauclér, P., Mallon, P. W., Bruijning-Verhagen, P. C. J. L., Schmitt, H. J., Bethe, U., Olesen, O. F., Stewart, F. A., Albus, K. & Cornely, O. A.(2024). "Predicting the next pandemic: VACCELERATE ranking of the World Health Organization's Blueprint for Action to Prevent Epidemics", Travel Medicine and Infectious Disease, Vol.57, pp. 102676.

Schrauwen, E. J. & Fouchier, R. A.(2014). "Host adaptation and transmission of influenza A viruses in mammals", Emerging microbes & infections, Vol.3 No.1, pp. 1-10.

Sreenivasan, C. C., Li, F. & Wang, D.(2024). "Cross-Species Transmission of Highly Pathogenic Avian Influenza (HPAI) H5N1 Virus in the U.S. Dairy Cattle: A Comprehensive Review", Preprints 2024, 2024052137.

Wolfe, M. K., Duong, D., Shelden, B., Chan, E. M. G., Chan-Herur, V., Hilton, S., Paulos, A. H., Xu, X. S., Zulli, A., White, B. J. & Boehm, A. B.(2024). "Detection of Hemagglutinin H5 Influenza A Virus Sequence in Municipal Wastewater Solids at Wastewater Treatment Plants with Increases in Influenza A in Spring, 2024", Environmental Science & Technology Letters, Vol.11 No.6, pp. 526-532.

BMEL: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft(2024). Reisen mit Heimvögeln, Retrieved August 7, 2024 from https://www.bmel.de/DE/themen/tiere/haus-und-zootiere/einreise-voegel.html.

Dekonor, E.(2024). CSL Seqirus, a Proud Champion of Pandemic Preparedness, Announces U.S. Government Award in Response to Avian Influenza, CSL: Global Biotechnology Company, Retrieved August 7, 2024 from https://www.cslseqirus.us/news/csl-seqirus-announces-us-government-award-in-response-to-avian-influenza.

European Commission(2024). Avian Influenza, Retrieved August 7, 2024 from https://food.ec.europa.eu/animals/animal-diseases/diseases-and-control-measures/avian-influenza_en.

GOV.UK(2024a). UK declares freedom from bird flu, Retrieved August 7, 2024 from https://www.gov.uk/government/news/uk-declares-freedom-from-bird-flu.

GOV.UK(2024b). Register as a keeper of less than 50 poultry or other captive birds, Retrieved August 7, 2024 from https://www.gov.uk/guidance/register-as-a-keeper-of-less-than-50-poultry-or-other-captive-birds.

Larkin, M.(2024). $200M from federal government aims to stop spread of H5N1 among dairy cows, Retrieved August 7, 2024 from https://www.avma.org/news/200m-federal-government-aims-stop-spread-h5n1-among-dairy-cows.

PART 5

4 신종 바이러스에 대한 면역학적 대응

신의철
KAIST 의과학대학원 교수

가 들어가는 말

인체가 바이러스에 감염되면 이에 대응하여 면역반응이 일어난다. 면역은 크게 선천면역과 적응면역으로 나누어지는데, 선천면역과 대비되는 적응면역의 가장 큰 특징은 기억과 항원 특이성이다. 적응면역의 이런 특성 때문에 인체는 한번 경험한 바이러스에 대해서 기억 면역을 가지게 되고, 동일한 바이러스가 재차 침입을 하면 빠르고 강한 면역반응을 나타내게 된다. 그리고 이러한 원리를 이용하여 백신을 개발하여 이용하는 것이다. 즉, 백신을 접종하여 기억 면역을 형성함으로써 바이러스에 노출되었을 때 빠르고 강한 면역반응을 유발할 수 있다. 적응면역의 이러한 특성은 신종 바이러스에 대한 면역의 이해에 매우 중요하다. 왜냐하면 신종 바이러스는 인류에게 새롭게 출현한 바이러스로서 어떤 누구도 이에 대한 기억 면역을 가지고 있지 않기 때문이다.

적응면역의 양대 축으로서 항체와 T 세포가 있다. 특히 중화항체는 바이러스에 결합하여 바이러스가 세포 내로 침투하지 못하도록 막는 역할을 한다. 반면, 세포독성 T 세포는 바이러스에 감염된 세포만을 골라 제거함으로써 더 이상 바이러스가 증식하지 못하도록 하는 역할을 한다. 그리고 도움 T 세포는 이러한 면역반응의 전반적인 과정에 도움을 주어 항체 생성 및 다른 면역세포들의 작용을 촉진한다. 코로나19 팬데믹 때 접종된 코로나19 백신의 경우에도, 바이러스에 대응하는 중화항체와 더불어 항체를 생산하는 기억 B 세포를 생성시켰고 세포독성 및 도움 T 세포들에서도 기억 T 세포를 형성시킴으로써 그 효능을 나타내었다. 이 글에서는 코로나19 팬데믹 동안에 우리가 겪었던 일들을 면역학적 관점에서 살펴보고 이를 바탕으로 미래 나타날 신종 바이러스에 대한 면역학적 대응을 논의하고자 한다.

나 신종 바이러스에 대한 중화항체

바이러스에 대한 면역에서 우리가 중화항체를 중요시하는 이유는, 세포가 바이러스에 감염되는 과정 자체를 중화항체가 막아줄 수 있기 때문이다. 즉 이전 감염이나 백신 접종으로 인해 숙주가 높은 역가의 중화항체를 가지고 있다면 향후 바이러스에 노출된다고 하더라도 감염으로부터 예방될 것이라고 기대할 수 있는 것이다.

코로나19 바이러스에 감염되었다가 자연 회복된 사람이나 코로나19 백신을 접종받은 사람에서는 중화항체가 비교적 잘 생성되었다. 하지만 감염이나 백신 접종을 통해 생성된 중화항체는 오래 유지되지 않았다. 연구결과들마다 수치가 조금씩 다르기는 하지만, 코로나19 중화항체의 반감기는 6~8개월로 보고되었다(Chia et al., 2021). 이렇게 짧은 중화항체 반감기와 더불어 더욱 큰 문제였던 것은 새로 출현한 변이주에 의해 중화항체의 효력이 쉽게 무력화되었다는 점이다.

예를 들어, 오미크론 변이주는 스파이크 단백질의 30개가 넘는 아미노산에 돌연변이가 있어 그 유전자 염기서열이 처음 보고되었을 때부터 기존 중화항체가 제대로 기능을 하지 못할 것이라는 우려가 제기되었는데, 이 예상은 실제 연구 결과로도 증명되었다. 보고된 연구 결과들마다 수치가 조금씩 다르기는 하지만, 우한주를 기반으로 제조된 mRNA 백신을 2회 접종받은 사람의 중화항체 활성을 델타 변이주는 1/3~1/9로 낮추는 데 비해 오미크론은 이를 무려 1/19~1/27로 낮추는 것으로 보고되었다(Garcia-Beltran et al., 2022). 이런 이유로 인해 백신을 접종받은 사람들에서도 오미크론 변이주에 의한 돌파감염이 빈번하게 일어나게 되었다.

이러한 점들을 고려한다면 미래에 다른 신종 바이러스가 출현했을 때에도 감염이나 백신에 의해 형성되는 중화항체의 효력을 무력화시키는 변이주의 출현이 큰 문제가 될 것이라는 점은 자명하다. 이런 이유로 중화항체에만 의존하는 면역학적 대응 방안은 그 한계를 가질 수밖에 없을 것이다.

다 신종 바이러스에 대한 T 세포 반응

1) 신종 바이러스 질환에서 T 세포의 역할

숙주가 바이러스에 감염되는 과정 자체를 막아줄 수 있는 중화항체와 비교해 볼 때 기억 T 세포는 숙주가 바이러스에 감염되는 것 자체를 막아 줄 수는 없다. 하지만 숙주가 바이러스에 감염되면 기억 T 세포는 재빨리 반응하여 그 기능을 수행한다. 그중 세포살상 T 세포는 바이러스에 감염된 세포를 선택적으로 제거하여 더 이상의 바이러스 증식을 막아주며, 도움 T 세포는 이러한 면역반응 전반에 있어 중요한 조력자 역할을 한다. 이러한 사실로부터 이전 감염이나 백신 접종에 의해 유도된 기억 T 세포 면역반응은 숙주가 바이러스에 감염되었을 때 그 진행을 막아주고 경증으로 조기에 회복하게 하는데 기여함을 유추

할 수 있다. 실제로 코로나19 팬데믹 중에 수행된 많은 연구들에서도 기억 T 세포의 이러한 작용들이 보고되었다(Noh et al., 2021). 즉, 감염이나 백신 접종에 의해 유도된 기억 T 세포 면역반응은 코로나19 환자의 중증 진행을 막아주는 역할을 한다.

코로나19 바이러스 감염 후 회복된 영장류 모델에서는 항체를 이용하여 세포살상 T 세포를 체내에서 제거시킨 후 코로나19 바이러스에 다시 감염시켰더니 숙주 방어면역이 약화됨을 관찰하여 세포살상 T 세포의 중요성이 증명된 바 있었다(McMahan et al., 2021). 그리고 마우스(mouse)에서는 T 세포 에피토프(항원결정기)를 발현하는 백신을 접종 후 코로나19 바이러스에 감염시켰을 때 바이러스 역가의 감소와 폐병리현상의 감소가 관찰되었다(Zhuang et al., 2021). 특히 이 상황에서는 중화항체가 존재하지 않기 때문에 중화항체 없이 기억 T 세포만 있어도 방어면역이 나타날 수 있음을 보여준 연구이다. 코로나19 환자를 대상으로 한 연구에서도 T 세포의 중요성이 보고된 바 있다. 그리고 혈액 종양질환으로 인해 항-CD20 항체 제제를 투여 받아 일시적인 체액성 면역결핍 상황에 있는 환자들이 코로나19 바이러스에 감염되었을 때 환자의 생존은 세포살상 T 세포 반응의 강도와 연관이 있음이 보고되었다(Bange et al., 2021). 이러한 사실들을 종합하여 볼 때, 코로나19에 있어 T 세포는 숙주의 방어면역에 기여함을 알 수 있다. 그리고 이런 T 세포의 방어 작용은 중화항체가 없는 상황에서도 나타날 수 있다는 점에서 중요하다고 할 수 있다.

2) 장기간 유지되는 기억 T 세포

중화항체와 비교해 볼 때, 기억 T 세포는 장기간 유지된다는 보고들이 있다. 본 연구팀은 코로나19 회복자들에서 기억 T 세포 면역반응이 10개월 이상 잘 유지된다는 결과를 보고한 바 있다(Jung et al., 2021). 그리고 코로나19 바이러스와 유사한 사스 바이러스에 감염되었다가 회복된 지 17년이 지난 후에도 기억 T 세포 반응이 유지되고 있다는 결과도 보고된 바 있다(Le Bert et al., 2020). 특히 본 연구팀의 연구에서는 단순히 기억 T 세포 반응의 강도만을 측정한 것이 아니라 세포의 분화를 분석하였는데, 기억 T 세포의 장기 유지에 중요한 것으로 알려지고 있는 줄기세포 유사 기억 T 세포(stem cell-like memory T cell)로의 분화가 코로나19로부터 회복된 후에 성공적으로 이루어짐을 증명한 바 있다(Jung et al., 2021). 이는 코로나19 회복자에서 한번 형성된 기억 T 세포 반응은 장기간 유지될 수 있음을 시사하는 결과이다.

3) 변이주에 대해서도 작동하는 기억 T 세포

한편, 기억 T 세포는 오래 유지될 뿐만 아니라 새로운 변이주에 대해서도 잘 작동할 가능성이 높을 것으로 기대되었다. 실제로 코로나19 팬데믹 중에 수행된 연구들은 변이주에 대해서도 기억 T 세포 면역반응이 제대로 작동할 수 있음을 보고하였다. 오미크론 출현 직후 본 연구팀이 우한주에 존재하는 T 세포 에피토프 항원들이 오미크론에 얼마나 보존되어 있는지 분석한 결과 스파이크 단백질에서는 80% 이상, 스파이크 이외의 단백질들에서는 95% 이상의 T 세포 항원들이 완전히 보존되어 있음을 알 수 있었다(Choi et al., 2022). 이는 기존 코로나19에 감염되었다가 회복된 사람이나 코로나19 백신을 투여받은 사람에게 존재하는 기억 T 세포들이 오미크론 감염에서도 잘 작동할 것임을 제시하는 연구 결과였다. 그리고 후속 연구를 통해 이를 실험적으로 증명하기도 하였다(Jung et al., 2022).

변이주들이 기억 T 세포 반응을 쉽게 회피하지 못하는 것은 몇 가지 이유로 설명된다. 특히 중화항체가 결합하는 항원은 스파이크 단백질의 좁은 부분에 국한되어 있지만 T 세포 항원은 단백질의 여러 부분에 흩어져 존재한다는 일반적인 사실로 설명이 가능하다. 즉, 새로운 변이주라고 하더라도 흩어져 존재하는 모든 T 세포 항원에 돌연변이를 일으키기는 사실상 불가능하기 때문에 기억 T 세포 면역반응으로부터 완전히 회피할 수 없는 것이다. 또한 T 세포 항원을 결정하는 데 중요한 인간백혈구항원(human leukocyte antigen) 유전자형이 개인마다 다르기 때문에 특정 변이주가 모든 사람들의 기억 T 세포 면역반응을 회피하는 돌연변이를 가지는 것도 불가능하다. 이러한 일반론적인 사실은 신종 바이러스에 대한 면역학적 대응에 있어 중요한 함의를 제공한다. 향후 신종 바이러스가 출현하고 중화항체를 회피하는 새로운 변이주가 발생할 때 회복자나 백신 피접종자에 존재하는 기억 T 세포 반응을 완전히 회피하지는 못할 것으로 예상할 수 있다. 그리고 이러한 기억 T 세포 반응은 변이주 감염 자체를 예방하지는 못하더라도 위중증 질환으로의 이행을 예방하는 효과를 가져올 것으로 기대할 수 있다.

이러한 점에 주목하여 신종 바이러스에 대한 면역학적 대응에 있어 T 세포 중심의 전략이 필요하다는 의견들이 있다(Noh et al., 2021). 특히 신종 바이러스에 대한 백신의 개발에 있어 중화항체는 유발시키지 못하지만 기억 T 세포를 활성화시킬 수 있는 비구조 단백질을 백신 항원으로 이용하는 전략들이 제시된 바 있다(Noh et al., 2021). 이러한 T 세포를 타깃으로 한 백신들은 중화항체를 회피하는 새로운 변이주의 출현이 빈번한 신종 바이러스의 경우에 그 가치가 더욱 중요해질 것으로 예상된다.

라 신종 바이러스 팬데믹의 엔데믹 전환과 면역

1) 중화항체와 기억 T 세포를 고려한 예측 모델

바이러스에 대한 면역을 인구집단에서 이야기할 때 대개 중화항체를 중심으로 논의한다. 이는 바이러스 유행의 미래를 예측하기 위한 수리 모델에서도 마찬가지로, 감염이나 백신 접종을 통해 중화항체를 가지게 된, 감염이 되지 않는 면역자군을 설정하고 분석을 하게 된다. 그런데 중화항체를 고려하여 신종 바

이러스 팬데믹의 미래를 생각해 보면 새로운 환자는 끊임없이 발생할 것이라는 점을 쉽게 예상할 수 있다. 이번 코로나19 팬데믹의 상황에서처럼 감염이나 백신 접종을 통해 생성된 중화항체가 대개는 오래 유지되지 않기 때문이며, 중화항체를 무력화시키는 새로운 변이주가 끊임없이 출현할 수 있기 때문이다.

하지만 위에서 설명한 바와 같이 기억 T 세포는 중화항체에 비해 더 오래 유지된다. 그리고 기억 T 세포는 오래 유지될 뿐만 아니라 새로운 변이주에 대해서도 비교적 잘 작동할 수 있다. 이러한 점들을 고려할 때 신종 바이러스의 팬데믹 이후에 인구집단에서 중화항체 역가가 감소하여 새로운 환자가 끊임없이 발생한다고 하더라도 신종 바이러스 질환은 점차 더 가벼운 질환으로 변해 갈 것을 예상할 수 있다. 이런 과정에서 지속적으로 발생할 재감염이나 돌파감염은 그 자체가 백신 추가접종의 역할을 하여 인구집단에서의 면역을 유지시켜주며 신종 바이러스 질환의 경증질환화를 더욱 가속화할 것으로 예상된다. 이것이 바로 신종 바이러스 팬데믹의 엔데믹화, 즉 풍토병화 과정에서 일어날 일이라고 할 수 있다. 실제로 본 연구팀은 코로나19 팬데믹 상황에서 기억 T 세포 면역을 고려한 수리 모델을 만들었고 바로 앞에서 서술한 것과 같은 예측 결과를 얻을 수 있었다(Hong et al., 2022). 이렇게 중화항체 뿐만 아니라 기억 T 세포를 고려한 수리 모델은 미래 신종 바이러스의 출현 시에도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2) 끊임없이 나타나는 변이주와 이에 대한 면역반응

그렇다면 이미 엔데믹 상황으로 된 코로나19의 경우 현 상황에서는 바이러스학적 및 면역학적으로 어떤 일들이 벌어지고 있을까? 현재에도 코로나19 바이러스는 오미크론의 하위변이주들이 끊임없이 출현하며 인류에서 없어지지 않고 늘 상존하는 질병이 되어 버렸다. 그러나 코로나19 팬데믹의 초기와는 변이주 출현의 공식이 바뀌었다. 2021년 말까지 나타난 알파, 베타, 감마, 델타, 오미크론 등의 주요 변이주들은 모두 점핑 방식으로 나타났다고 할 수 있다. 예측을 불허하며 갑자기 툭 튀어나왔다는 이야기다. 하지만 오미크론 이후에는 점핑 방식이 아니라 점진적 방식으로 변이주들이 출현하고 있다. 처음 나타난 오미크론 변이주는 BA.1이고 그 후 BA.2, BA.5 등이 연이어 출현하였지만, 모두 다 오미크론이라는 큰 범주 안에서 변이가 점진적으로 일어나고 있는 것이다. 즉 오미크론이라는 큰 범위 안에서 새로운 변이주가 발생하고 있다.

이러한 상황에서 우리의 면역계는 여기에 잘 적응해 가며 대응할 수 있을까? 이 질문에 대해 몇 가지 주목할 만한 연구 결과들이 보고된 바 있다. 독일의 연구진들은 BA.2에 돌파감염되었다가 회복되면 BA.5에도 중화작용을 할 수 있는 항체 역가가 증가한다는 논문을 발표하였다(Muik et al., 2022). 그리고 본 연구팀은 BA.2에 돌파감염되었다가 회복되면 BA.5에도 대항할 수 있는 기억 T 세포 활성이 증가한다는 연구 결과를 발표한 바 있다(Kim et al., 2024). 이러한 연구 결과들은 코로나19의 미래에 대해 중요한 함의를 가지고 있다. 즉, 백신을 접종한 사람이 어떤 시점에 유행하는 오미크론 하위변이주의 돌파감염을 겪으면

해당 하위변이주뿐만 아니라 미래에 출현할 하위변이주에도 방어 작용을 나타낼 수 있는 면역반응이 증가한다는 이야기이다. 이는 점진적인 변이주 출현으로 인해 사람들의 면역도 점차 적응하여 가까운 미래에 나타날 변이주까지 방어하는 면역력을 획득할 수 있다는 이야기다. 미래에 또 다른 신종 바이러스가 출현하고 새로운 변이주가 지속적으로 나타날 때에도 이와 유사한 면역학적 원리가 적용될 수 있을 것이다.

마 과잉 염증반응과 중증 감염

1) 과잉 염증반응

코로나19 팬데믹 상황에서 한 가지 중요한 면역학적 질문이 있었다. '어떤 사람은 무증상이나 경증으로 넘어가는데 왜 어떤 사람은 중증으로 발전하고 사망에까지 이르는 것일까?'하는 점이었다. 그리고 이와 관련하여 회자되었던 것이 소위 사이토카인 폭풍(cytokine storm)이었다. 사이토카인 폭풍에 의한 바이러스 질환의 악화는 이번에 처음 거론되는 것이 아니라 사스와 메르스 때에도 이야기된 바 있다. 이는 바이러스에 감염된 후에 면역반응의 일환으로 분비되는 종양괴사인자(Tumor Necrosis Factor, TNF), IL-6, IL-1과 같은 사이토카인이 너무 과다하게 분비되어 염증을 악화시키고 결국 환자를 사망에 이르게 한다는 이야기이다(Choi et al., 2022). 학술적으로는 사이토카인 폭풍이라는 용어보다는 과잉염증 반응(hyper-inflammatory response)라는 용어가 더 적합하다고 볼 수 있다.

2) 면역노화와 중증 감염

한편, 중증 코로나19가 발생하는데 있어 고령이 가장 중요한 위험 요인이라는 것은 잘 알려져 있다. 그렇다면 왜 고령자들은 코로나19에 감염되면 중증질환으로 되기 쉬운 것일까? 그 답은 면역노화에서 찾을 수 있다. 개체의 연령이 증가하면서 나타나는 면역노화 현상에는 두 가지 큰 특성이 있는데, 첫째는 적응 면역반응의 감퇴이고 둘째는 염증반응의 과잉이다. 적응 면역반응의 감퇴 때문에 감염에 취약해 지기도 하고, 동일한 백신을 맞아도 항체가 잘 생기지 않곤 한다. 더욱 중요한 것은 염증반응의 과잉으로, 노화된 면역계는 동일한 감염이나 유해자극에 대해 과잉된 염증반응을 나타내기 쉬운 것이다(Mittelbrunn & Kroemer, 2021). 이는 위에서 설명한 사이토카인 폭풍과 일맥상통하는 이야기로, 결국 중증 코로나19는 과잉 염증반응으로 인해 유발되는 것이라고 말할 수 있다.

고령자가 면역노화 현상 때문에 중증 바이러스 질환을 더 잘 겪는다는 점은 인플루엔자 바이러스의 상황에서도 잘 나타난다. 국내에서 발표된 한 논문에 따르면 지난 10여 년간 인플루엔자의 사망률은 환자의 나이에 따라 현저한 차이를 보였다(Hwang et al., 2023). 특히 고령자 안에서도 큰 차이를 보였는데, 60~69세, 70~79세, 80세 이상의 연령대별로 각각 0.1~0.2%, 0.4~0.6%, 1.9~2.9%의 사망률을 나타내었다.

3) 과잉 염증반응의 치료

코로나19 팬데믹 중에 중증 환자를 치료하기 위해 과잉 염증반응을 제어하는 치료법들이 이용되었다. 특히 중증 코로나19 환자에서 덱사메타손과 같은 스테로이드 제제의 효능이 임상시험으로 검증되어 중증 코로나19 환자 치료에 유용하게 활용되었다. 스테로이드 제제뿐만 아니라 과잉 염증반응을 제어하는 다른 약제들도 중증 코로나19 환자 치료에 시도되었다. 최근 10여 년 동안 염증반응을 억제하는 항염증 약물들은 류마티스성 관절염이나 건선, 염증성 장질환의 치료 목적으로 매우 활발히 개발되어 왔다. 이러한 약물들 중에서 바리시티닙(Baricitinib, 일명 Olumiant)이라고 하는 사이토카인 수용체 신호전달 차단제는 임상시험을 통해 중증 코로나19 환자 치료 효능이 검증되었다.

이러한 사실들을 종합하여 미래 신종 바이러스 상황에 대입해 보면 다음과 같이 예측해 볼 수 있다. 즉, 신종 바이러스에 의한 중증 환자들의 경우 대부분 그 면역학적 기전은 과잉 염증반응일 것이고, 이를 치료하기 위해서는 스테로이드 제제나 다른 항염증 약물들을 이용하게 될 것이다. 코로나19 팬데믹을 겪으면서 인류는 과잉 염증반응에 의한 중증 환자를 치료하는 방법에 대한 의학적 및 면역학적 지식을 많이 축적하게 되었고 이러한 지식이 미래 신종 바이러스 출현 시에도 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

바 신종 바이러스에 대한 면역학적 선제 대응

1) 범용 백신의 개발

코로나19 팬데믹 상황에서도 볼 수 있었듯이 신종 바이러스에 대한 가장 좋은 대비책은 예방백신이다. 코로나19 백신이 출시된 이후 첫 1년 동안 백신 덕분에 목숨을 구한 사람의 숫자가 전 세계적으로 1,980만 명에 달한다는 연구 결과도 있다(Watson et al., 2022). 특히 이번 코로나19 팬데믹 중에 mRNA 백신이라는 새로운 백신 플랫폼을 성공적으로 이용하여 백신을 신속하게 개발할 수 있었다.

mRNA 백신 플랫폼 덕분에 백신 개발 시간이 획기적으로 단축되기는 했지만 그래도 백신 개발이라는 것은 며칠 만에 될 수 있는 것은 아니다. 이런 이유로 미래 신종 바이러스가 나타날 때 신속하게 백신 개발을 하기 위한 노력들도 있지만 더 혁신적인 방법도 강구되고 있다. 그 한 가지 예는 미래에 출현할 신종 바이러스까지 예방할 수 있는 범용(universal) 백신의 개발이다. 예를 들자면 광범위한 범주의 코로나바이러스들에 모두 효능을 보이는 예방백신을 개발하거나 광범위한 범주의 인플루엔자 바이러스들에 모두 효능을 보이는 예방백신을 개발하는 것이다.

이런 연구를 위해서는 먼저 가까운 미래에 출현할 가능성이 높은 신종 바이러스를 과학적으로 예상하는 것이 필요하다. 현재로서는 신종 코로나바이러스 또는 신종 인플루엔자 바이러스가 손꼽히고 있다. 코로나바이러스의 경우, 박쥐 등 다양한 야생동물들이 보유한 코로나바이러스의 종류가 매우 많아 이들 중 인간에게 새로 유입되는 것이 미래 신종 바이러스가 될 가능성이 높고, 인플루엔자 바이러스의 경우 바이러스 유전자가 8가닥으로 분절화되어 있어 유전자 재조합에 의해 생기는 새로운 바이러스가 미래 신종 바이러스가 될 가능성이 높다.

한편 범용 백신 개발을 위해서는 이러한 바이러스들의 면역학적 특성을 잘 이해하여야 한다. 예를 들어 단백질 구조에서 표면으로 드러나 있지는 않지만 이에 대한 항체는 중화능을 나타낼 수 있고 바이러스들 사이에서 비교적 잘 보존되어 있는 에피토프 부위를 발굴하는 것이 필요하다. 이러한 에피토프를 백신 항원으로 이용한다면 범용 중화항체 생성을 유발하는 범용 코로나바이러스 백신이나 범용 인플루엔자 백신을 개발할 수 있을 것이다. 또한, 바이러스들 사이에 잘 보존되어 있는 바이러스 구조 및 비구조 단백질을 백신 항원으로 이용하여 기억 T 세포 반응을 유발하는 범용 코로나바이러스 백신이나 범용 인플루엔자 백신 개발도 가능할 것이다. 이러한 T 세포 타깃 범용 백신의 경우 현실적인 목표는 바이러스 감염의 예방보다는 위중증 질환의 발생을 예방하는 것이 될 수 있다.

2) 교차면역 반응의 중요성

코로나바이러스의 경우 이번 코로나19 팬데믹을 통해서도 아직 확실한 답을 얻지 못한 또 한 가지 중요한 면역학적 질문이 있다. 바로 다른 코로나바이러스와의 교차면역 반응의 중요성이다. 인간에게 질병을 일으키는 코로나바이러스들 중 4가지는 일반 감기를 일으키는 코로나바이러스이다. 그런데 감기 코로나바이러스들과 코로나19 바이러스는 동일한 바이러스는 아니지만 같은 코로나바이러스에 속하기 때문에 단백질 아미노산 서열에 있어 유사성이 있다. 그래서 이전에 감기 코로나바이러스에 걸림으로써 유발된 기억 면역이 코로나19 감염 시에 교차면역 반응을 나타내 코로나19 감염의 중증화를 막아줄 수 있다는 면역학적 이론이 제기되었다.

실제로 코로나19 바이러스에 한 번도 노출된 적이 없는 사람들이 코로나19 바이러스에 대한 기억 T 세포를 가지고 있는 경우가 매우 흔하게 관찰된 바 있고, 이는 감기 코로나바이러스 때문에 생긴 면역으로 추정되었다. 코로나19 팬데믹 상황에서 영국에서 수행된 한 연구에 따르면 감기 코로나바이러스 때문에 유발된 기억 T 세포를 미리 가지고 있었던 사람들은 코로나19 바이러스에 노출되더라도 감염으로 이어지지 않았다는 보고가 있었다(Swadling et al., 2022). 그리고 감기 코로나바이러스와 코로나19 바이러스 사이에 교차면역을 나타내는 T 세포 에피토프들에 대한 면역반응이 경증 환자에서 더 흔하게 나타난다는 사실이 보고된 바 있다(Mallajosyula et al., 2021). 하지만, 이러한 보고들은 아직 확고한 이론으로 정립되지는 못하였다. 미래 신종 코로나바이러스 출현에 대비하여 이러한 교차면역 반응의 임상적 의의를 좀 더 깊이 있게 연구할 필요가 있다. 만약 이러한 교차면역 반응이 신종 바이러스 감염의 중증화를 예방할 수 있다면 신종 바이러스에 대한 면역학적 대응 전략을 새롭게 고려할 수 있을 것이다. 특히 유사한 교차면역 반응이 신종 인플루엔자 바이러스에서도 유발될 수 있다는 가능성은 교차면역 반응 연구의 중요성을 더욱 부각시킨다.

사 맺음말

이 글에서는 코로나19 팬데믹 동안에 우리가 겪었던 일들을 바탕으로, 미래에 나타날 신종 바이러스에 대한 면역학적 대응을 논의하였다. 미래에 신종 바이러스가 새롭게 출현한다면 우리는 일단 그 신종 바이러스의 면역학적 특성들을 잘 파악하여야 한다. 예를 들어 신종 바이러스에 감염된 후 중화항체 및 T 세포 면역반응이 잘 유발되는지 아니면 제대로 유발되지 못하여 기능을 하지 못하는지에 대해 알아야 한다. 그리고 이렇게 생성된 중화항체 및 T 세포 면역반응은 오래 지속되는지 아니면 단기간에 소실되는지도 중요한 질문이다. 또한 생성된 중화항체 및 T 세포 면역반응은 바이러스 돌연변이에 의해 쉽게 무력화되는지 여부도 신종 바이러스에 대한 대응에 중요하다. 또 다른 측면에서는 왜 동일한 바이러스에 감염 후 사람마다 무증상, 경증, 중증 같은 다양한 임상 증상을 보이는가 하는 점과 중증질환을 유발하는 과잉염증반응의 기전은 무엇인가 하는 점도 중요한 질문이라고 할 수 있다. 이러한 모든 중요한 질문들은 모두 신종 바이러스의 면역학적 이해와 결부되어 있다는 점을 알 수 있고, 따라서 신종 바이러스에 대한 면역학적 연구의 중요성을 알 수 있다.

백신의 효능 및 지속성을 높이려는 노력에 있어서도 면역학적 연구가 중요하다. 코로나19 팬데믹 중에 잘 활용된 mRNA 백신의 경우, 그 효능이 장기간 지속되지 않는 경향이 있다. mRNA 백신의 효능을 오래 지속시키기 위한 방법을 개발하기 위해서는 면역학적 기전 연구가 필요하고, 특히 기억 B 세포 및 기억 T 세포의 분화 기전을 명확히 파악해야 한다. 그리고 코로나19 팬데믹 중에 사회적 이슈로도 제기되었던 백신의 부작용과 관련해서도 면역학적 연구가 필요하며, 이를 토대로 부작용의 위험을 최소화한 백신 개발이 가능해질 것이다.

또한 위에서 살펴본 바와 같이 그동안 중화항체 중심의 영역에 머물렀던 신종 바이러스에 대한 논의를 이제 기억 T 세포의 영역까지 확장하여 고려하여야 한다(Noh et al., 2021). 이러한 면역학적 관점을 적용한다면 신종 바이러스에 대한 역학적 대응에서도 신규 감염만을 중시하는 것이 아니라 중증 환자 중심의 대책이 더욱 중요해질 것이다.

코로나19 팬데믹을 겪으며 우리가 얻게 된 경험과 지식들은 미래 신종 바이러스에 대한 대응에 활용될 수 있다. 예를 들어 다음에 신종 바이러스 팬데믹 상황이 또다시 발생한다면 방역의 목적은 무엇이 되어야 하며 방역을 어떻게 해야 할지, 백신은 어떤 방식으로 빠르게 개발할 수 있을지, 위드 코로나 때처럼 방역을 느슨하게 할 때 무엇을 준비해야 할지 등등의 중요한 질문들에 대해 우리는 이번 팬데믹을 통해 어느 정도 답을 구했다고 할 수 있다. 하지만 신종 바이러스에 대한 선제 대응에 있어 가장 중요한 것은 결국 신종 바이러스 출현 이전부터 준비된 의생명과학(Biomedical Science) 연구이다. 백신 개발이나 치료제 개발이라는 현실적인 대응 방법도 결국은 바이러스 및 이에 대한 면역반응의 과학적 이해에서 시작한다는 자명한 사실이 신종 바이러스에 대한 면역학적 대응의 바탕이 되어야 한다.

참고문헌

Bange, E., Han, N., Wileyto, P., Kim, J., Gouma, S., Robinson, J., Greenplate, A., Hwee, M., Porterfield, F., Owoyemi, O., Naik, K., Zheng, C., Galantino, M., Weisman, A., Ittner, C., Kugler, E., Baxter, A., Oniyide, O., Agyekum, R., Dunn, T., Jones, T., Giannini, H., Weirick, M., McAllister, C., Babady, N., Kumar, A., Widman, A., DeWolf, S., Boutemine, S., Roberts, C., Budzik, K., Tollett, S., Wright, C., Perloff, T., Sun, L., Mathew, D., Giles, J., Oldridge, D., Wu, J., Alanio, C., Adamski, S., Garfall, A., Vella, L., Kerr, S., Cohen, J., Oyer, R., Massa, R., Maillard, I., Maxwell, K., Reilly, J., Maslak, P., Vonderheide, R., Wolchok, J., Hensley, S., Wherry, E., Meyer, N., DeMichele, A., Vardhana, S., Mamtani, R. & Huang, A.(2021). "CD8+ T cells contribute to survival in patients with COVID-19 and hematologic cancer", Nature Medicine, Vol.27, pp. 1280-1289.

Chia, W., Zhu, F., Ong, S., Young, B., Fong, S., Bert, N., Tan, C., Tiu, C., Zhang, J., Tan, S., Pada, S., Chan, Y., Tham, C., Kunasegaran, K., Chen, M., Low, J., Leo, Y., Renia, L., Bertoletti, A., Ng, L., Lye, D. & Wang, L.(2021). "Dynamics of SARS-CoV-2 neutralising antibody responses and duration of immunity: a longitudinal study", Lancet Microbe, Vol.2 No.6, e240-e249,

Choi, H. & Shin, E.(2022). "Hyper-inflammatory responses in COVID-19 and anti-inflammatory therapeutic approaches", BMB Report, Vol.55 No.1, pp. 11-19.

Choi, S., Kim, D., Noh, J., Kim, S., Park, S., Jeong, H. & Shin, E.(2022). "T cell epitopes in SARS-CoV-2 proteins are substantially conserved in the Omicron variant", Cellular & Molecular Immunology, Vol.19 No.3, pp. 447-448.

Garcia-Beltran, W., Denis, K., Hoelzemer, A., Lam, E., Nitido, A., Sheehan, M., Berrios, C., Ofoman, O., Chang, C., Hauser, B., Feldman, J., Roederer, A., Gregory, D., Poznansky, M., Schmidt, A., Iafrate, A., Naranbhai, V. & Balazs, A.(2022). "mRNA-based COVID-19 vaccine boosters induce neutralizing immunity against SARS-CoV-2 Omicron variant", Cell, Vol.185 No.3, pp. 457-466.

Hong, H., Noh, J., Lee, H., Choi, S., Choi, B., Kim, J. & Shin, E.(2022). "Modeling incorporating the severity-reducing long-term immunity: higher viral transmission paradoxically reduces severe COVID-19 during endemic transition", Immune Network, Vol.22 No.3, e23.

Hwang, S., Lee, H., Jung, M., Kim, S., Sung, H., Oh, M. & Lee, J.(2023). "Incidence, Severity, and Mortality of Influenza During 2010-2020 in Korea: A Nationwide Study Based on the Population-Based National Health Insurance Service Database", Journal of Korean Medical Science, Vol.38 No.8, e58.

Jung, J., Rha, M., Sa, M., Choi, H., Jeon, J., Seok, H., Park, D., Park, S., Jeong, H., Choi, W. & Shin, E.(2021). "SARS-CoV-2-specific T cell memory is sustained in COVID-19 convalescent patients for 10 months with successful development of stem cell-like memory T cells", Nature Communications, Vol.12 No.1, pp. 4043.

Jung, M., Jeong, S., Noh, J., Kim, D., Jung, S., Song, J., Jeong, H., Park, S. & Shin, E.(2022). "BNT162b2-induced memory T cells respond to the Omicron variant with preserved polyfunctionality", Nature Microbiology, Vol.7 No.6, pp. 909-917.

Kim, S., Kim, J., Jung, S., Noh, J., Kim, J., Park, H., Song, Y., Peck, K., Park, S., Park, M., Ko, J., Song, J., Choi, J., Jung, M. & Shin, E.(2024). "Omicron BA.2 breakthrough infection elicits CD8+ T cell responses recognizing the spike of later Omicron subvariants", Science Immunology, Vol.9 No.91, eade6132.

Le Bert, N., Tan, A., Kunasegaran, K., Tham, C., Hafezi, M., Chia, A., Chng, M., Lin, M., Tan, N., Linster, M., Chia, W., Chen, M., Wang, L., Ooi, E., Kalimuddin, S., Tambyah, P., Low, J., Tan, Y. & Bertoletti, A.(2020). "SARS-CoV-2-specific T cell immunity in cases of COVID-19 and SARS, and uninfected controls", Nature, Vol.584 No.7821, pp. 457-462.

Mallajosyula, V., Ganjav,i C., Chakraborty, S, McSween, A., Pavlovitch-Bedzyk, A., Wilhelmy, J., Nau, A., Manohar, M., Nadeau, K., Davis, M.(2021). "CD8+ T cells specific for conserved coronavirus epitopes correlate with milder disease in COVID-19 patients", Science Immunology, Vol.6 No.61, eabg5669.

McMahan, K., Yu, J., Mercado, N., Loos, C., Tostanoski, L., Chandrashekar, A., Liu, J., Peter, L., Atyeo, C., Zhu, A., Bondzie, E., Dagotto, G., Gebre, M., Jacob-Dolan, C., Li, Z., Nampanya, F., Patel, S., Pessaint, L., Van Ry, A., Blade, K., Yalley-Ogunro, J., Cabus, M., Brown, R., Cook, A., Teow, E., Andersen, H., Lewis, M., Lauffenburger, D., Alter, G. & Barouch, D.(2021). "Correlates of protection against SARS-CoV-2 in rhesus macaques", Nature, Vol.590 No.7847, pp. 630-634.

Mittelbrunn, M. & Kroemer, G.(2021). "Hallmarks of T cell aging. Nature Immunology, Vol.22, pp. 687-698.

Muik, A., Lui, B., Bacher, M., Wallisch, A., Toker, A., Finlayson, A., Kruger, K., Ozhelvaci, O., Grikscheit, K., Hoehl, S., Ciesek, S., Tureci, O. & Sahin, U.(2022). "Omicron BA.2 breakthrough infection enhances cross-neutralization of BA.2.12.1 and BA.4/BA.5", Science Immunology, Vol.7 No.77, eade2283.

Noh, J., Jeong, H., Kim, J. & Shin, E.(2021). "T cell-oriented strategies for controlling the COVID-19 pandemic", Nature Reviews Immunology, Vol.21, pp. 687-688.

Swadling, L., Diniz, M., Schmidt, N., Amin, O., Chandran, A, Shaw, E., Pade, C., Gibbons, J., Le Bert, N., Tan, A., Jeffery-Smith, A., Tan, C., Tham C., Kucykowicz, S., Aidoo-Micah, G., Rosenheim, J., Davies, J., Johnson, M., Jensen, M., Joy, G., McCoy, L., Valdes, A., Chain, B., Goldblatt, D., Altmann, D., Boyton, R., Manisty, C., Treibel, T., Moon, J.(2022). "COVIDsortium Investigators: van Dorp L, Balloux F, McKnight A, Noursadeghi M, Bertoletti A, Maini MK. Pre-existing polymerase-specific T cells expand in abortive seronegative SARS-CoV-2", Nature, Vol.601 No.7891, pp. 110-117.

Watson, O., Barnsley, G., Toor, J., Hogan, A., Winskill, P. & Ghani, A.(2022). "Global impact of the first year of COVID-19 vaccination: a mathematical modelling study", Lancet Infect Dis, Vol.22 No.9, pp. 1293-1302.

Zhuang, Z., Lai, X., Sun, J., Chen, Z., Zhang, Z., Dai, J., Liu, D., Li, Y., Li, F., Wang, Y., Zhu, A., Wang, J., Yang, W., Huang, J., Li, X., Hu, L., Wen, L., Zhuo, J., Zhang, Y., Chen, D., Li, S., Huang, S., Shi, Y., Zheng, K., Zhong, N., Zhao, J., Zhou, D. & Zhao, J.(2021). "Mapping and role of T cell response in SARS-CoV-2-infected mice", Journal of Experimental Medicine, Vol.218 No.4, e20202187.

PART 5

5 차세대 바이러스 감염병 백신 전략

정대균
한국생명공학연구원 바이오나노연구센터
책임연구원

가 들어가는 말

1) 개요

바이러스 백신 개발의 여정은 한 편의 드라마와 같으며, 초기에는 우리가 알지 못했던 적과 맞서야 한다. 하지만 코로나19 팬데믹 이전까지만 해도 백신 개발은 그리 빠르지 않았다. 수많은 실험과 엄격한 임상시험을 거쳐야 했기에 새로운 백신이 나오기까지는 오랜 시간이 걸렸으나, 코로나19의 급격한 확산으로 절박한 상황이 펼쳐지면서 과학자들은 전례 없는 속도로 백신 개발에 나섰다. mRNA 백신 기술과 같은 혁신적인 접근법이 도입되었고 전 세계의 연구진이 초유의 협력을 펼치며 개발 과정을 크게 단축할 수 있었으나 개발 초기에는 우여곡절도 있었다. 안전성과 효능을 확인하는 과정에서 시행착오를 겪기도 했지만 연구자들은 물러서지 않고 전진하였다.

결국 백신은 기록적인 속도로 탄생했고, 수많은 생명을 구할 수 있었다. 이 사례를 계기로 전 세계는 팬데믹 대비 체계를 다잡았고 앞으로의 백신 개발도 더욱 민첩해질 것이다. 과학기술의 진보와 국제협력의 힘을 보여준 코로나19 백신 개발은 한 시대를 정의할 만한 큰 사건이었으며 앞으로 발생할 팬데믹을 대비할 수 있는 계기가 되었다. 본 장에서는 코로나19 발생 시 개발되었던 백신 플랫폼 기술들과 앞으로 이 백신들의 전망에 대한 고찰을 통하여 백신 기술 개발에 대한 이해를 돕고자 한다.

2) 백신 기술 개발 이슈와 트렌드

옛날부터 인류는 바이러스로 인해 많은 고통을 겪어왔다. 천연두, 홍역, 인플루엔자 등으로 인해 많은 사망자가 속출하였다. 초기에는 이를 막을 방법이 없었지만, 1796년, 에드워드 제너가 천연두 백신을 개발하며 혁명적 발전이 이루어졌다. 그 후 수많은 과학자가 백신 개발에 전력을 다했지만, 바이러스 진화 속도가 너무 빨라 쉽지 않았고, 특히 변종 바이러스가 등장하면서 새로운 백신이 필요해졌다.

21세기에 이르러 바이러스 백신 기술은 날로 발전했으며, 유전체 분석, 컴퓨터 모델링 등 첨단기술을 활용해 백신을 더 빨리, 더 정확히 만들게 되었고, 코로나19 팬데믹 당시에는 그 어느 때보다 신속하게 백신이 개발되기도 하였다. 2020년 초, 코로나19가 전 세계로 확산하기 시작했을 때 과학자들은 백신 개발에 착수했지만 전통적인 방식으로는 너무 오랜 시간이 걸릴 것이라는 사실에 mRNA 백신 기술이 주목받기 시작하였다. mRNA 백신은 바이러스 유전물질 대신 mRNA를 주입해 인체 세포가 스스로 바이러스 단백질을 만들도록 유도하는 혁신적인 방식으로, 모더나와 바이오엔텍·화이자 등 기업이 선두에 섰고, 임상시험에 돌입하였다. 개발 초기에는 mRNA의 불안정성, 부작용 우려 등 많은 의구심이 있었지만 과학자들은 전례 없는 속도로 연구를 진행해 나갔다. 2020년 12월, 첫 mRNA 백신이 긴급사용승인을 받았는데 이는 전통 백신 개발 과정을 뛰어넘는 대단한 성과였다. 수많은 생명을 구했을 뿐 아니라 mRNA 기술의 잠재력을 입증하였다. 이후 여러 제약사에서 mRNA 백신과 치료제 파이프라인을 구축하며 새로운 영역을 개척해 나갔다(김민정, 2022).

또한 기존 방식인 단백질 기반 백신, 생백신, 불활성화 백신 등도 연구되었다. 플랫폼은 각각의 장단점이 있었지만, 서로의 기술을 공유하고 교류하며 시너지를 발휘하였고, 특히 아데노바이러스 벡터 백신은 유전자를 인체 세포에 전달해 단백질을 발현시키는 원리를 활용하였으며 전통 백신에 비해 개발이 쉽고 대량생산에도 유리한 것으로 평가받았다. 이처럼 연구자들은 다양한 기술적 돌파구를 만들기 위해 긴급 상황 속에서도 혁신을 이뤄내었고 차세대 백신 기술의 토대를 마련했으며, 코로나19는 인류에게 큰 시련이었지만 우리의 과학기술력을 한 단계 끌어올릴 수 있는 좋은 계기가 되었다.

나 백신 기술 개발 현황

1) 불활화 바이러스 백신(Inactivated virus vaccine)

불활화 바이러스 백신은 오랜 전통을 가진 백신 기술로서, 살아있는 바이러스를 약품으로 불활성화시켜 병원체의 유전물질은 그대로 존재하게 하되, 바이러스 증식은 불가능하게 만든 백신으로, 우리 몸의 면역계에서는 이 불활성화된 병원체를 인식하고 항체를 생산한다. 코로나19 당시에도 바이러스 배양, 불활화 공정 최적화, 안전성·효능평가 등에 매진하였다. 특히 바이러스 불활화 공정은 까다로운 과정으로 너무 활성이 낮으면 면역반응이 부족하고, 너무 활성이 높으면 부작용이 생길 수 있는 문제점이 있다. 2020년 말, 중국과 인도에서 불활화 백신 후보물질들이 임상3상을 통과하며 세계 최초로 승인되었으며, 이는 전통적 기술이지만 끝없는 노력 끝에 이뤄낸 위대한 성과다. 불활화 백신은 저렴한 가격과 확실한 예방효과로 개발도상국에 큰 활력을 주었지만, 변이 바이러스 출현, 접종 후유증 등 새로운 문제도 지속해서 발생하였기 때문에 더 나은 불활화 기술과 새로운 플랫폼 백신들을 연구하고 있다.

2) 약독화 생백신(Live attenuated virus vaccine)

약독화 생백신 또한 전통적인 백신 개발 방식 중 하나로, 병원체의 독성을 약화해 면역반응을 유도하는 백신이며 바이러스를 분리하여 세포배양 등의 방법으로 증식시킨 후, 화학물질, 방사선 등을 이용하여 바이러스에 돌연변이를 일으켜 독성을 약화한다. 약독화된 균주를 선별하기 위해 다양한 돌연변이 균주 중에서 면역원성은 유지하되 병원성이 현저히 감소한 약독화 균주를 선별하여 안전성, 면역원성, 유전적 안정성 등을 다각도로 평가하여 대량생산하고 적절한 제형으로 가공한다. 약독화 생백신의 특징으로는 체내에서 자연 감염과 유사한 면역반응을 유도하여 강력한 면역력을 얻을 수 있지만, 약독화 과정에서 병원성이 완전히 제거되지 않을 위험도 있다. 코로나19 약독화 생백신 개발에는 안전성 확보가 가장 큰 과제일 것이며, 성공한다면 범용 코로나 백신으로도 활용될 수 있어 매우 유용할 것으로 기대된다.

3) 재조합 단백질 백신(Recombinant protein vaccine)

코로나19 대유행 당시 여러 제약사와 연구기관에서 재조합 단백질 백신 개발을 진행하였다. 재조합 단백질 백신은 바이러스의 특정 항원 단백질을 유전공학적 방법으로 대량 생산하여 면역반응을 유도하는 백신으로써, 바이러스의 특정 항원 단백질만을 사용하므로 불활성화 또는 약독화 백신에 비해 안전하다. 재조합 기술을 사용하여 대량의 항원 단백질을 생산할 수 있어 대규모 백신 제조에 적합하고, 바이러스의 특정 항원을 선택함으로써 면역반응을 최적화할 수 있다.

대표적인 재조합 단백질 백신으로는 미국 제약사 노바백스(Novavax)가 SARS-CoV-2 스파이크 단백질을 활용하여 만든 'NVX-CoV2373' 백신이 있다. 임상3상에서 90% 이상의 예방효과를 보였고, 2021년 말 WHO 승인을 받았다. 또한 사노피(Sanofi)와 글락소스미스클라인(GSK) 두 회사가 협력해 재조합 스파이크 단백질에 GSK의 면역증강제(AS03)를 결합한 백신을 개발하였다. 그러나 임상 1/2상에서 충분한 면역반응을 유도하지 못해 개발이 지연되었다. 국내에서는 SK바이오사이언스와 유바이오로직스가 코로나19 재조합 단백질 백신을 개발하였다. SK바이오사이언스는 미국 노바백스와 협력하여 재조합 단백질 백신 'NBP2001'을 개발하여 2022년 1월, 국내 식품의약품안전처로부터 조건부 허가를 받았다. 2022년 2월부터 국내에서 사용되기 시작하였으며, 18세 이상 성인을 대상으로 접종이 이루어지고 있고, 2023년 8월부터 국내외에서 사용 중이며 추가 임상시험을 통해 안전성과 효능을 지속해서 모니터링하고 있다. 유바이오로직스는 자체 개발한 재조합 단백질 백신'UB-612'를 개발하고 있다. 2022년 6월, 대만에서 긴급사용승인을 받았고 2023년 8월부터, 필리핀, 인도 등 일부 국가에서 승인받아 사용 중이며, 글로벌 임상3상을 진행하고 있다. 이 두 회사에서 개발하는 재조합 단백질 백신은 안전성과 면역원성이 우수한 것으로 알려져 있으며, 변이 바이러스에도 효과가 있을 것으로 기대되고 있다. 이외에도 여러 기업과 연구소에서 코로나19 바이러스의 다양한 항원 단백질을 이용한 재조합 백신 개발을 진행하였다. 재조합 단백질 백신은 기존 방식으로 안전성이 확보되었으나, mRNA나 바이러스 벡터 백신 대비 개발 속도가 다소 느린 단점이 있다(최정민, 2023).

4) 바이러스 벡터(Viral-vectored) 백신

바이러스 벡터 백신은 무해한 바이러스(벡터)에 코로나19 바이러스의 스파이크 단백질 유전자를 삽입하여 인체 내에서 면역반응을 유도하는 방식으로, 기존에 개발된 바이러스 벡터 플랫폼을 활용하여 코로나19에 적용함으로써 백신 개발 기간을 단축할 수 있고, 사용되는 바이러스 벡터는 증식 능력이 제거되어 안전성이 높다. 또한 바이러스 벡터가 체내에 침투하여 스파이크 단백질을 발현시키므로 체액성 및 세포성 면역 반응을 모두 유도할 수 있으며, 세포배양을 통해 바이러스 벡터를 대량으로 생산할 수 있어 상용화에 유리하다. 코로나19 팬데믹 상황에서 바이러스 벡터 백신으로는 아스트라제네카(AstraZeneca)와 얀센(Johnson & Johnson)의 백신이 긴급사용승인을 받아 접종되었으며, 이들은 각각 침팬지 아데노바이러스와 인간 아데노바이러스를 벡터로 사용하였다. 다만 백신 접종 후 매우 드물게 혈소판 감소성 혈전증 등의 부작용이 보고되어 일부 국가에서는 특정 연령군에 대한 접종을 제한하기도 하였다. 바이러스 벡터 백신 기술은 코로나19 상황에서 신속한 백신 개발에 기여하였지만 향후 장기적인 안전성과 변이 바이러스에 대한 효능 등은 지속적인 모니터링과 연구가 필요하다.

5) DNA 백신, mRNA 백신

DNA 백신은 바이러스의 항원 단백질을 코딩하는 DNA 플라스미드를 인체에 주입하여 체내에서 항원 단백질을 발현시켜 면역반응을 유도하는 백신이다. mRNA 백신과 유사하지만, DNA가 세포핵 내로 들어가야 하므로 전달 시스템이 더 복잡하다. 코로나19 초기에 DNA 백신 후보들도 개발되었으며, 대표적으로 이노비오(Inovio)사의 INO-4800, Zydus Cadila사의 ZyCoV-D 등이 있다. 이들은 임상시험을 진행하였지만 mRNA 백신에 비해 개발 속도가 느렸고, 높은 효능을 입증하지 못하였다. 결과적으로 DNA 백신은 코로나19 대응에서 mRNA 백신만큼의 성과를 거두지는 못하였다. 하지만, DNA 백신은 안정성이 높고, 대량생산이 쉽다는 장점을 갖고 있으므로 추가 연구개발을 통한 개선으로 향후 감염병 대응에 기여할 가능성을 갖는다.

코로나19 팬데믹 상황에서 mRNA 백신 기술은 빠른 시일 내에 효과적인 백신을 개발하는 데 핵심적인 역할을 하였다. mRNA 백신은 바이러스의 표면 단백질을 코딩하는 mRNA를 인체에 주입하여, 체내에서 해당 단백질을 생성하게 함으로써 면역반응을 유도하는 것으로, 이는 전통적인 백신과는 다른 새로운 접근 방식이다. 또한, mRNA 백신은 바이러스의 유전 정보만 있으면 빠르게 설계하고 생산할 수 있

어서 코로나19 바이러스의 유전체 서열이 공개된 후 모더나와 화이자·바이오엔테크는 불과 몇 달 만에 mRNA 백신 후보를 개발하였다. 개발된 mRNA 백신은 신속하게 임상시험을 거쳐 안전성과 효능을 입증하였으며, 2020년 말 긴급사용승인 후 정식 승인되었다. mRNA 백신은 대량생산이 비교적 쉬워 백신 공급에 큰 도움이 되었고, 전 세계적으로 수억 회 분량의 백신을 빠르게 보급할 수 있었다. 또한 mRNA 백신 기술은 변이 바이러스에 대응하여 백신을 신속하게 업데이트할 수 있는 유연성도 가지고 있어서 팬데믹 대응에 중요한 역할을 하였다. 결국 코로나19 상황에서 mRNA 백신 기술은 빠른 개발, 대량생산, 변이 바이러스 대응 등의 장점으로 팬데믹 극복에 크게 기여하였다. mRNA 백신 기술은 감염병 대응을 위한 백신 개발에 새로운 패러다임을 제시한 것으로 평가받고 있고, 앞으로도 감염병 예방을 위한 게임 체인저로서 계속 주목받을 것이다.

기존 mRNA 백신과 달리 이번 코로나19 mRNA 백신은 변형된 뉴클레오타이드(nucleotide)를 사용하므로 백신의 안전성과 효능을 높이는 데 중요한 역할을 하였다. 자연 상태의 mRNA는 우리 몸의 면역체계에 의해 이물질로 인식되어 강한 면역반응을 유발할 수 있지만 변형된 뉴클레오타이드를 사용하면 과도한 면역반응을 억제할 수 있으며, 백신의 안전성이 향상될 수 있다. 변형된 뉴클레오타이드가 mRNA의 안정성을 높여주게 되는 것이다. 또한 자연 상태의 mRNA는 체내에서 빠르게 분해되는 경향이 있지만, 변형된 뉴클레오타이드를 사용하면 분해 속도를 늦춰 mRNA가 더 오랫동안 작용할 수 있게 해주는데, 이는 백신의 효능을 높이는 데 기여한다. 마지막으로, 변형된 뉴클레오타이드를 사용하면 mRNA에서 단백질로의 번역 효율을 높일 수 있어 적은 용량의 mRNA로도 충분한 면역반응을 유도할 수 있음을 의미한다. 이는 백신의 효능과 경제성을 동시에 향상시킬 수 있다. 변형된 뉴클레오타이드 기술은 mRNA 백신의 안전성과 효능을 획기적으로 개선하였고, 이는 코로나19 팬데믹 상황에서 신속하고 효과적인 백신 개발을 가능하게 하였다. 이 같은 기술적 혁신이 인정받아 mRNA 백신 개발에 기여한 카탈린 카리코(Katalin Karikó)와 드루 바이스만(Drew Weissman)은 노벨생리의학상을 수상하게 되었다(최정민, 2023).

다 백신 기술 개발 전망

1) 백신 개발에 대한 인식의 전환

팬데믹 상황에서 백신이 바이러스의 확산을 막고 일상을 회복하는 데 핵심적인 역할을 한다는 인식이 높아졌으며, 이에 따라 백신 개발에 대한 투자와 지원이 확대되었다. 과거에 비해 매우 빠른 속도로 백신이 개발되었으며, 모더나, 화이자 등의 기업이 mRNA 백신을 빠르게 개발하여 접종을 시작하였고, 이를 통해 새로운 백신 개발 플랫폼의 가능성을 보여주었다. 또한 백신의 공평한 분배를 위한 국제적 노력도

이루어졌다. COVAX와 같은 국제협력 체계를 통해 저소득 국가에도 백신을 제공하려는 움직임이 있었으며, 각국 정부와 국제기구들은 백신 개발을 위한 재정적, 행정적 지원을 아끼지 않았고, 백신 규제 절차를 간소화하고 임상시험을 지원하는 등 백신 개발의 속도를 높이기 위해 노력하였다. 백신 제조사들은 백신 생산을 위하여 생산시설에 대한 막대한 투자를 통해 공장을 증설하고 생산량을 늘리는 데 주력하였다. 그러나 새로운 변이 바이러스의 출현으로 기존 백신의 효능이 약화하는 문제가 대두되었고, 변이 바이러스에도 대응할 수 있는 백신 업데이트 필요성이 커졌다. 결과적으로, 코로나19를 계기로 감염병 대응을 위한 백신의 역할이 재조명되었고, 백신 개발 역량 강화의 중요성이 드러났다. 앞으로도 감염병 위협에 대비하기 위한 백신 개발 인프라 구축과 지속적인 연구지원이 필요하다.

2) 구조 기반 백신 개발의 확대

코로나19 팬데믹 이후, 구조 기반 백신 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 구조 기반 백신은 바이러스의 중요한 구조적 특징을 이용하여 면역반응을 유도하는 백신이며, 코로나바이러스의 스파이크 단백질 구조를 자세히 분석하여 중화항체 유도에 중요한 부위와 스파이크 단백질의 수용체 결합 영역(RBD)이 ACE2 수용체와 결합하여 바이러스 침투를 매개하는 RBD를 기반으로 한 백신 후보들이 개발되고 있다. 또한 바이러스 항원을 나노입자에 결합하여 면역원성을 높이는 플랫폼에 대한 연구가 진행되고 있는데, 이는 스파이크 단백질의 중요 도메인을 나노입자에 제시하는 방식이다. 다양한 바이러스 구조 단백질로 이루어진 비감염성 입자를 이용한 백신도 개발 중인데, 이는 안전성이 높고 면역원성도 우수하다. 또한 스파이크 단백질의 유전자를 전달하는 DNA, mRNA 백신도 빠르게 발전하고 있으며, 이는 보다 효과적으로 체내에서 항원 단백질을 발현시켜 면역을 유도한다. 이처럼 구조생물학과 면역학, 나노기술, 유전자 전달 시스템 등 다양한 분야의 융합을 통해 효과적이고 안전한 차세대 코로나19 백신 개발이 이루어지고 있으며, 변이 바이러스에도 대응할 수 있는 백신 개발을 목표로 삼고 있다.

3) 차세대 범용 백신 기술의 상용화

차세대 범용 백신 기술에 관한 연구와 투자 역시 활발히 이루어지고 있다. 코로나19 백신으로 효과가 입증된 mRNA 기술은 빠른 개발 속도와 높은 효능으로 주목받고 있어서 다양한 변이 바이러스에 대응할 수 있는 범용 mRNA 백신 개발이 기대되고 있다. 바이러스 항원을 나노입자에 결합해 면역반응을 높이는 나노입자 기술의 경우 안전성이 높고, 변이에 대한 대응력이 좋아 범용 백신으로 사용할 가능성이 있다. 또한 바이러스 DNA를 직접 주입해 체내에서 항원 단백질을 생성하게 하는 DNA 백신 기술도 안정성이 높고 대량생산이 쉬워서 범용성 확보를 위한 연구가 진행 중이다. 약독화 바이러스를 이용해 면역원성을 높이는 바이러스 벡터 기술 또한 에볼라 등의 백신 개발에 활용된 바 있으며, 다양한 병원체에 적용할 수

있는 범용 플랫폼으로 개발 중이다. 무엇보다도 백신의 체액성 면역보다 오래 지속되는 T 세포 기반 백신은 변이 바이러스에도 매우 효과가 좋아서 범용 백신 후보로 다양하게 연구되고 있다. 이처럼 mRNA, 나노입자, DNA, 바이러스 벡터, T 세포 등 다양한 기술을 활용한 차세대 범용 백신 개발이 활발히 진행되고 있으며, 기존 백신의 한계를 극복하고 변이 바이러스에 빠르게 대응할 수 있는 플랫폼 기술 확보가 중요한 과제라 할 수 있다. 정부와 기업의 꾸준한 투자와 국제협력을 통해 범용 백신 상용화가 앞당겨질 것이다.

라 주요국의 백신 정책 동향

미국은 코로나19 팬데믹 당시 화이자, 모더나, 얀센 등의 백신을 긴급 승인하고 신속히 접종을 시작하였으며, 2021년 중반부터는 추가 접종도 권장하고 있다. 영국은 아스트라제네카와 화이자 백신을 조기에 승인, 접종을 시작하였고, 속도를 내어 추가 접종과 소아·청소년 접종도 적극적으로 진행하였다. EU는 역내 공동 구매를 통해 화이자 등의 백신을 확보하여 접종을 진행하였고, 접종률은 국가별로 차이가 있지만 추가 접종과 교차 접종도 일부 시행되고 있다. 중국은 자체 개발한 시노팜, 시노백 등의 백신으로 자국민 접종을 우선 진행하였으며, 인구 대다수가 접종을 마친 상태다. 일본은 화이자, 모더나, 아스트라제네카 백신을 도입해 접종을 진행하였고, 자국 개발 백신도 임상시험을 걸쳐서 승인 단계에 있으며 접종 속도는 다소 느리긴 하나 꾸준히 증가 추세이다. 우리나라는 화이자, 모더나, 아스트라제네카, 얀센 등 다양한 백신을 도입해 접종을 시행하였으며, 2023년도 기준 인구의 약 85%가 2차 접종을, 60% 이상이 4차 접종을 완료한 상태이다. 종합해 보면 주요국들은 자국민 접종에 속도를 내는 한편, 백신 불평등 해소를 위한 국제협력에도 참여하는 추세이며 또한 변이 바이러스에 대응하기 위한 추가 접종과 개량 백신 개발도 지속되고 있다(최정민, 2023).

마 국내 백신 기술 개발을 위한 제언

1) 국내 백신 산업의 발전과 육성 방안

국내 백신 산업의 발전과 육성을 위해서는 무엇보다 정부나 기업의 백신 연구·개발 투자를 늘려 연구 역량을 강화해야 하며, 기초연구부터 임상시험, 상용화까지 전 주기에 걸친 연구비 지원이 필요하다. 그리고 대학, 연구소, 제약사 간 협력을 통해 백신 연구개발의 시너지를 높여 실용화 가능성이 높은 유망 기술을 발굴하고 기술 사업화를 지원해야 한다. 해외 유수 연구기관, 기업과는 전략적 제휴를 맺어 선진 기술을 도입해야 하며, WHO, CEPI 등 국제기구와 협력해 개도국 대상 백신 공급에 참여할 필요가 있다. 아울러 백신 전문 인력 양성을 위해 백신 연구개발, 생산, 인허가 등 단계별 전문 인재 육성에 힘써야 하며, 대학의 백신 관련 학과 신설, 현장 맞춤형 교육 확대 등도 필요하다. 이와 더불어 인프라 구축 및 제도 개선을 위해 첨단 연구시설, 시험생산 설비 등 인프라를 확충하고 개방형 활용을 도모해야 한다(한민규, 2024). 또한 백신 긴급사용승인, 피해보상 등 관련 법령을 정비하고 인센티브 제도를 마련해야 한다. 백신 산업 발전을 위해 정부와 기업, 학계, 연구계가 역량을 집중하고 긴밀히 협력한다면 대한민국은 글로벌 백신 강국으로 도약할 수 있을 것이며, 이를 위해 장기적 관점의 투자와 실효성 있는 지원 정책이 뒷받침되어야 할 것이다(제약바이오산업단, 2022).

2) 국내 백신 개발 정책 제언

우리나라의 백신 개발 역량을 높여가기 위해서는 mRNA, 바이러스 벡터, 재조합 단백질 등 범용 백신 플랫폼에 대한 연구개발을 집중적으로 지원하여 신종감염병에 신속 대응이 가능한 플랫폼을 확보해야 한다. 아울러 임상시험 인프라의 확충 및 규제 개선을 통하여 대규모 임상시험을 신속히 수행할 수 있는 인프라를 구축하고, 임상시험 프로세스 간소화 및 규제 유예제도 도입으로 개발 기간을 단축해야 한다. 그리고 국가 예방접종 프로그램 고도화를 위해 백신의 안정적 수급과 접종률 제고를 위한 국가 차원의 백신 조달 및 관리 시스템을 개선하고, 감염병 발생 양상 분석과 접종 우선순위 설정 등 과학적 의사결정을 강화해야 한다. 또한, 국민의 백신에 대한 신뢰 제고를 위해 백신의 안전성과 유효성에 대한 투명한 정보를 공개하고, 접종 필요성에 대한 적극적인 소통으로 국민적 공감대를 형성해야 한다. 이 같은 정책적 지원을 통해 차세대 감염병에 대한 신속한 백신 개발 역량을 확보한다면 국민의 건강 보호, 백신 주권 확립에 기여할 수 있을 것이며, 구체적인 정책 설계와 실행 과정에서 전문가의 의견 수렴, 이해관계자 간 협의 등 세심한 접근도 함께 이루어져야 할 것이다(감염병기술전략센터, 2022).

바 맺음말

바이러스 감염병의 위협은 지속될 것이다. 이에 대한 가장 효과적인 대응 수단 중 하나는 바로 백신이며, 차세대 백신 전략은 단순한 질병 예방의 차원을 넘어 글로벌 건강 안보를 위한 핵심 요소가 될 것이다. 이 같은 관점에서 정부, 학계, 산업계가 협력하여 혁신적인 백신 기술을 개발하고, 이를 전 세계적으로 공평하게 배포할 수 있는 체계를 구축해 간다면 우리는 미래의 팬데믹에 더욱 효과적으로 대비할 수 있고 인류의 건강과 안전을 보장할 수 있을 것이다. 이에 비춰 볼 때 백신 혁신은 단순한 의학적 진보를 넘어, 우리 사회의 회복력과 지속 가능성을 높이는 핵심 전략이 될 것이다.

참고문헌

김민정(2022). “글로벌 백신 시장 현황 및 전망”, 바이오인더스트리, 국가생명공학정책연구센터, No.173.

김은정(2021). 미국의 COVID-19 백신 기술 개발 동향 및 전망 보고서, Globar Tech Korea Insight, 2021-GT-DC-002, 산업통산자원부 & 한국산업기술진흥원.

최정민(2023). 포스트 코로나19 글로벌 백신 산업 전망 및 분석 연구, 한국바이오의약품협회.

한민규(2024). 감염병 백신 치료, KISTEP 브리프 133, 한국과학기술기획평가원.

제약바이오산업단(2022). 국내외 백신 시장 동향 분석, 보건산업브리프 Vol. 365, 한국보건산업진흥원.

감염병기술전략센터(2022). mRNA 백신 기술 동향 보고서, 한국화학연구원.

PART 5

6 팬데믹 치료제 개발의 중요성

한수봉

한국화학연구원 감염병치료기술연구센터장

가 들어가는 말

팬데믹은 전 세계적으로 인간의 건강과 사회에 심각한 영향을 미치는 공중보건 위기를 말한다. 인류는 21세기에 들어 여러 차례 팬데믹을 경험하였으며, 그중에서도 코로나19 팬데믹은 전례 없는 규모와 파급력을 보여주었고, 이로 인해 치료제 개발의 중요성은 더욱 부각되었다. 신속하고 효과적인 치료제 개발은 팬데믹 대응의 핵심 요소로, 감염병의 확산을 억제하고 환자의 생명을 구하는 데 중요한 역할을 한다.

치료제는 환자의 상태를 안정시키고, 병의 진행을 억제하며, 사망률을 낮추는 데 기여한다. 따라서 효과적인 치료제가 있다면 의료 시스템의 부담을 줄이고 사회적 안정과 경제 회복을 촉진할 수 있다. 그러나 치료제 개발 과정은 복잡하고 다단계적인 절차를 포함한다. 기초 연구 단계에서 시작해 전임상시험, 여러 단계의 임상시험, 긴급사용승인과 정식 승인에 이르는 모든 과정이 체계적으로 진행되어야 한다.

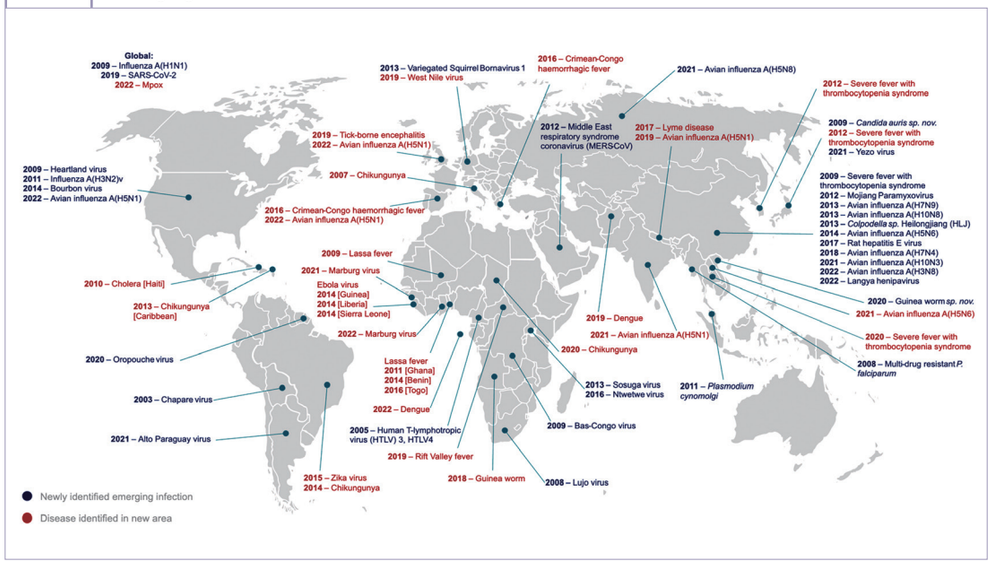
이 과정에서 최신 기술과 혁신적 접근법이 중요한 역할을 하며, 인공지능과 머신러닝, 유전자 치료와 같은 첨단기술이 신약 개발의 효율성을 높이고 있다. 특히 치료제 개발은 공공 및 민간 부문의 협력과 국제적 협력이 필수적이다. 정부, 학계, 제약 회사가 협력하여 효율적인 자원 공유와 연구개발을 촉진하고, 전 세계적으로 치료제를 공평하게 배포하는 것이 중요하며, 이를 통해 팬데믹 상황에서도 신속하고 효과적인 대응이 가능하다. 또한 코로나19 팬데믹 과정에서의 치료제 개발 사례 연구를 통해 앞으로 다가올 새로운 팬데믹에 대응하는 전략을 구체화하는 것도 매우 중요하다.

나 팬데믹의 위기

21세기에 들어서면서 다양한 바이러스가 지속적으로 나타나고 있으며, 이들은 새로운 지역으로 빠르게 전파되고 있다. 이러한 바이러스는 모두 팬데믹으로 발전할 가능성이 있다. 아래 그림은 2003년부터

2022년 사이 세계 각지에서 새롭게 확인된 감염병의 발생 현황을 보여준다. 다양한 바이러스들이 매해 새롭게 등장하고 있으며, 타 지역으로 급속히 전파되고 있음을 알 수 있다. 이러한 빠른 전파는 글로벌화와 기후 변화, 인구 이동 등 다양한 요인에 의해 더욱 가속화되고 있다. 이에 따라 공중보건 체계는 새로운 감염병에 대한 대응 능력을 지속적으로 강화할 필요가 있다.

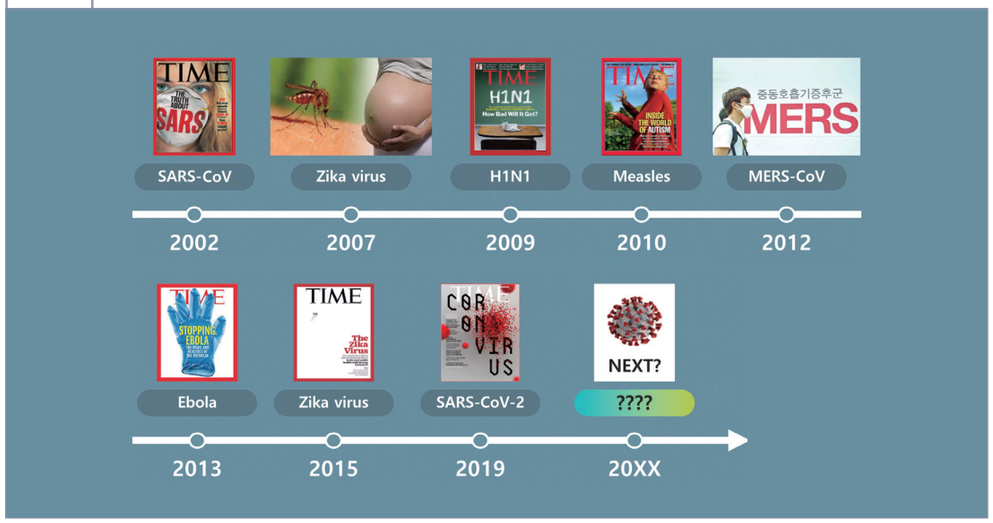
그림 5.1 Emerging Infections (2003~2022)



출처: GOV.UK(2023).

<그림 5.2>는 2002년부터 최근까지 발생한 주요 바이러스 발현을 보여준다. SARS-CoV(2002), 지카 바이러스(2007), H1N1 인플루엔자(2009), 홍역(2010), MERS-CoV(2012), 에볼라 바이러스(2013), 지카 바이러스(2015), SARS-CoV-2(2019) 등 다양한 바이러스들이 나타났음을 알 수 있다. 이러한 바이러스는 각기 다른 방식으로 전 세계에 영향을 미쳤으며, 인류는 항상 새로운 바이러스와 싸워야 했다. 이들 바이러스는 각기 다른 전파경로와 치명률을 가지고 있으며, 각국의 보건 시스템에 큰 도전을 안겨주었다. 특히, SARS-CoV-2와 같은 신종 바이러스는 사회적 거리두기, 마스크 착용, 백신 개발 등의 새로운 대응 전략을 필요로 하였다. 이러한 팬데믹은 공중보건뿐만 아니라 경제, 사회, 정치 전반에 걸쳐 광범위한 영향을 미쳤다. 바이러스의 위협이 점점 더 현실화 되면서, 코로나19 이후 새로운 팬데믹 바이러스는 예상보다 더 빠르게 나타날 수 있다.

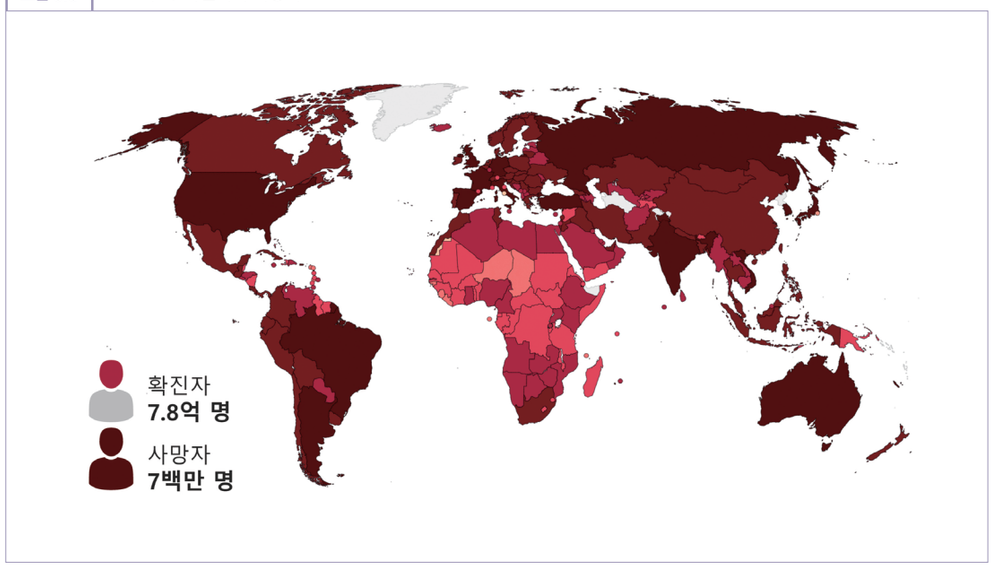
그림 5.2 주요 바이러스 질병 발현 시기



출처: 한국화학연구원 한수봉(2024).

2019년 발생한 코로나19 팬데믹은 전 세계적으로 7.9억 명의 확진자와 700만 명의 사망자를 발생시킬 정도로 매우 심각한 팬데믹을 발생시켰으며, 사회적 경제적으로도 전례 없는 수준의 충격과 변화를 가져왔다(<그림 5.3>). 지도에서 진한 색으로 표시된 지역은 감염자와 사망자가 많았던 곳을 나타내며, 팬데믹이 전 세계에 얼마나 큰 영향을 미쳤는지 시각적으로 잘 보여준다.

그림 5.3 코로나19 확진자와 사망자



출처: Bloomberg(2023).

코로나19 팬데믹은 전 세계 보건 시스템에 큰 부담을 주었고 사회적, 경제적 혼란을 초래하였다. 이처럼 큰 피해가 일어난 이유는 매우 급격히 발생한 바이러스 전환에도 있겠지만 그동안 위험으로만 여겨졌던 바이러스 팬데믹에 대한 실질적 대비가 안일하게 이루어진 탓도 있다. 기업에서는 더 큰 수익이 발생할 수 있는 질병 연구에 상대적으로 더 많은 자원을 투자하였으며, 세계 기구 또는 각국 정부 또한 팬데믹 위협을 과소평가한 것도 사실이다. 코로나19 팬데믹 동안 대규모 봉쇄 조치와 사회적 거리두기, 마스크 착용, 백신 개발 등 다양한 대응 전략이 필요하였고, 이로 인해 많은 국가들이 경제적 타격을 받았으며, 실업률 급증, 사회적 불안 고조 등의 문제가 발생하였다. 또한 의료 자원의 부족, 백신 배분의 불균형, 국제협력의 필요성 등이 두드러지게 나타났다.

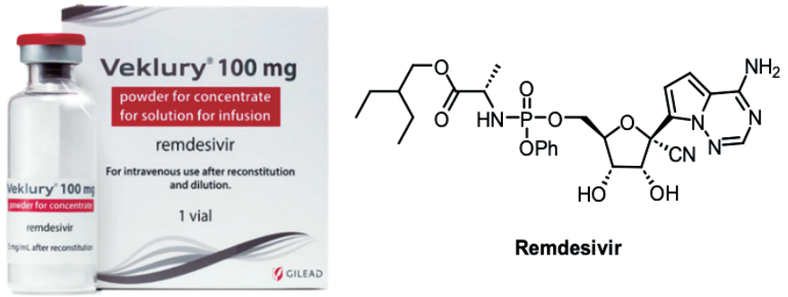
다 코로나19 치료제 개발

1) 약물 재창출

급격하게 SARS-CoV-2가 팬데믹으로 발전하면서 일반 질병의 치료제 개발과는 다르게 보다 신속한 치료제 개발 방법이 필요하게 되었고, 기존에 사용되던 약물을 재창출하여 새로운 치료제로 사용하는 전략이 널리 활용되었다. 약물 재창출(drug repositioning)은 이미 승인된 의약품이나 개발 중인 약물의 새로운 용도를 찾는 방법으로, 신약 개발에 소요되는 시간과 비용을 절감할 수 있다는 장점이 있다.

렘데시비르는 길리어드사에서 에볼라 출혈열(Ebola hemorrhagic fever) 치료제로써 기존에 개발된 화합물이며, 약물 재창출을 통해 코로나19 치료제로 2020년 10월 미국 식품의약국(Food and Drug Administration, FDA) 정식 승인을 받은 첫 번째 약물이다(<그림 5.4>). 이후 국내에는 2022년 1월, 보조 산소 치료가 필요한 중증 또는 폐렴이 있는 입원 환자에게 사용되도록 승인되었다. 이 약물은 SARS-CoV-2 내 RNA-의존성 RNA 중합효소(RNA-dependent RNA polymerase, RdRp)가 복제하는 바이러스 RNA에 편입되어 바이러스 RNA 복제를 지연시키고 RNA 사슬의 생성을 종결하는 방식으로 항바이러스 효능을 나타내지만, 정맥투여 방식으로 인해 응급 상황에서 환자 접근성이 낮아 사용에 어려움이 있다. 또한 렘데시비르는 주로 신장을 통해 배설되므로 신장 기능이 저하된 환자에게는 사용이 제한될 수 있으며, 일부 환자에서 효과가 제한적이고, 다른 치료제와 비교해 부작용 발생률이 높을 수 있다는 단점이 있다. 렘데시비르는 초기 코로나19 팬데믹 동안 많은 기대를 받으며 사용되었지만, 효과성에 대한 논란, 대체 치료제의 등장, 투여 방식의 불편함, 부작용과 기타 제한 사항 등으로 인해 현재는 사용이 다소 줄어든 상황이다. 특히 새로운 경구용 항바이러스제인 팍스로비드(Paxlovid)와 같은 치료제들이 더 많이 사용되면서 렘데시비르의 사용 빈도는 감소하고 있다.

그림 5.4 렘데시비르



출처: 데일리팜(2023).

바리시티닙은 미국 식품의약국(FDA)으로부터 2021년 7월 코로나19 입원 환자 중 산소 보충과 인공호흡기, 에크모(ECMO) 치료를 받아야 하는 성인과 2세 이상 소아 환자를 대상으로 한 임상시험 자료를 근거로 신종 코로나바이러스 감염증(코로나19) 단독 치료제로 승인되었다. 바리시티닙은 일라이릴리사(Eli Lilly)가 류머티스 관절염 치료제로 개발하였으며, 상품명 올루미언트(Olumiant)로 판매되고 있다. FDA는 2020년 11월 렘데시비르와 바리시티닙을 코로나19 치료제로 병용 처방할 수 있도록 긴급사용승인(EUA)하였다. 바리시티닙은 JAK1/2 선택적 억제제로, 류머티스 관절염, 건선성 관절염, 궤양성 대장염, 골수섬유증, 진성 적혈구 증가증 및 스테로이드 불응성 이식편대숙주질환(GVHD) 치료에 사용된다. JAK-STAT 경로는 여러 사이토카인과 성장인자들의 세포 내 신호전달 체계에 관여하여 면역세포의 분열, 생존, 활성화를 유발한다. JAK 억제제 치료로 흔히 보고되는 부작용은 감염으로, 일반적인 감염, 중증 감염, 림프종, 림프증가증, 대상포진, 혈구 감소증, 정맥 혈전증 등이 있다. 바리시티닙은 여전히 코로나19 치료에 사용되지만, 사용 빈도는 특정 상황과 환자 상태에 따라 다르다. 중증 환자에게 특히 유용하며, 산소 보충이나 인공호흡기 치료가 필요한 경우 주로 사용된다. 그러나 경증에서 중등도 환자에게는 다른 치료 옵션이 더 많이 사용될 수 있다. 또한 다른 항염증 치료제나 항바이러스제의 등장으로 인해 바리시티닙의 사용 빈도는 줄어들고 있다.

그림 5.5 바리시티닙



출처: Korea biomedical review(2021).

2) 항체치료제

체내에 세균이나 바이러스 같은 외부 물질(항원)이 침투하면 이를 인식·기억·무력화하기 위해 면역체계가 만들어내는 것이 바로 항체이다. 하나의 항체는 특정한 항원에만 정확하게 결합하며, 우리 몸은 DNA 수준의 유전자 재배열을 통해 1,012개 이상의 많은 항체 레퍼토리를 만들 수 있는 만큼 다양한 항원 및 감염물질에 대응이 가능하다. 그리고 이러한 항체를 치료제로 사용하여 바이러스에 대항할 수 있다. 국내 기업인 셀트리온에서는 항체치료제인 렉키로나주 개발에 성공하였으며(<그림 5.6>), 벱텔로비맙(Bebtelovimab), 레그단비맙(Regdanvimab(Regkirona)), 소트로비맙(Sotrovimab), 아무바르비맙 및 롬루세비맙(Amubarvimab and romlusevimab), 밤라니비맙 및 에테세비맙(Bamlanivimab and etesevimab), 카시리비맙 및 임데비맙(Casirivimab and imdevimab(REGEN-COV)), 실가비맙 및 틱사게비맙(Cilgavimab and tixagevimab(Evusheld)) 등 세계 각국에서 코로나 치료제가 개발되어 큰 희망을 안겨주었다.

그림 5.6 항체치료제 렉키로나주



출처: 한국보건산업진흥원 제약산업정보포털(2021).

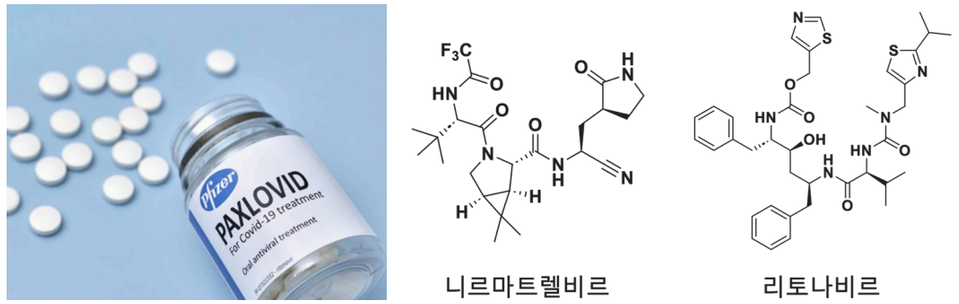
하지만, 코로나바이러스는 매우 빠르게 변이하여 기존 항체치료제의 효과를 무력화시키는 경우가 빈번히 발생한다. 이로 인해 대부분의 항체치료제 약물은 개발이 중단되거나 사용이 제한되었다. 빠르게 치료제를 개발할 수 있다는 항체치료제의 장점에도 불구하고 새로운 변이 바이러스가 등장할 때마다 그 변이에 대응할 수 있는 새로운 항체를 개발해야 하는 어려움이 있다. 이러한 변이에 따른 한계점을 극복하는 것은 여전히 큰 도전 과제로 남아 있으며, 연구자들은 변이에 대응할 수 있는, 보다 광범위하고 효과적인 항체치료제 개발에 지속적인 노력을 기울이고 있다.

3) 바이러스 직접 작용제 (Direct-Acting Antiviral, DAA)

바이러스 직접 작용제(DAA)는 바이러스의 특정 단백질이나 효소에 직접 작용하여 바이러스의 복제 과정을 억제하거나 방해하는 약물이다. 바이러스의 생명 주기에서 특정 단계를 표적으로 하여 빠르고 효과적으로 바이러스를 억제하기 때문에 다양한 바이러스 질환 치료를 위해 성공적으로 개발되어 사용되어 왔다. 대표적인 예로는 C형 간염 바이러스(Hepatitis C Virus, HCV)를 대상으로 한 소포스부비르(Sofosbuvir), B형 간염 바이러스(Hepatitis B Virus, HBV)를 대상으로 한 엔테카비르(Entecavir), 인간면역결핍 바이러스(Human Immunodeficiency Virus, HIV)를 대상으로 한 다루나비르(Darunavir)가 있다. 소포스부비르는 HCV의 RNA 복제 효소인 NS5B를 억제하고, 엔테카비르는 HBV의 DNA 중합효소를 억제하며, 다루나비르는 HIV의 프로테아제를 억제하여 바이러스의 복제를 효과적으로 막는다. 이러한 DAA 약물들은 높은 치료 효율로 각 바이러스 질환 치료에 중요한 역할을 하고 있다.

코로나19의 경우에도 코로나바이러스의 복제에 사용되는 핵심 효소를 저해하는 니르마트렐비르가 화이자에 의해 성공적으로 개발되었다. 니르마트렐비르의 주요 작용 기전은 SARS-CoV-2의 3CL 프로테아제를 저해하는 것으로, 3CL 프로테아제는 바이러스가 자기 복제를 위해 필요한 단백질을 절단하는 효소이며 이를 억제함으로써 바이러스의 증식을 차단한다. 임상시험 결과 니르마트렐비르는 신속하게 바이러스 부하를 감소시키고 증상의 중증화를 방지할 수 있었다. 니르마트렐비르는 일반적으로 리토나비르(Ritonavir)와 병용되어 사용된다. 리토나비르는 니르마트렐비르의 대사를 억제하여 혈중 농도를 높이고, 약효를 연장시키는 역할을 한다. 니르마트렐비르와 리토나비르의 조합은 경구 투여가 가능하여 환자 편의성을 높이며, 이는 특히 경증에서 중등도의 환자들에게 효과적인 치료 옵션을 제공한다.

그림 5.7 팍스로비드의 주성분(니르마트렐비르와 리토나비르)



출처: 데일리팜(2023).

결과적으로 니르마트렐비르(Nirmatrelvir)와 리토나비르(Ritonavir) 병용 요법치료제인 팍스로비드(<그림 5.7>)는 2023년 5월 25일에 미국 식품의약국(FDA)으로부터 정식 승인을 받았으며, 중증으로 진행될 위험이 높은 성인 환자 및 소아 환자들에게 사용할 수 있게 되었다. 특히 니르마트렐비르는 오미크론 변이와 같은 다양한 변이 바이러스에 대해 효과적인 항바이러스 작용을 나타내어 코로나19 팬데믹 동안 계속해서 중요한 치료제로 자리 잡고 있다. 이러한 점에서 니르마트렐비르는 코로나19 치료제 중에서도 매우 유망한 약물로 평가받고 있다.

이와 더불어 시오노기사에서 개발한 엔시트렐비르(Ensitrelvir) 및 머크사에서 개발한 몰누피라비르 등도 바이러스 핵심 효소를 저해하는 DAA로 매우 우수한 약효를 보인다. 이러하듯 바이러스 핵심 단계를 저해하는 치료제 개발 전략은 바이러스 질병에 효과적으로 대처할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 개발 시간이 긴 단점도 가지고 있어 빠르게 치료제를 개발할 수 있는 새로운 기술 개발이 요구된다.

라 미래 팬데믹 대응 치료제 개발

코로나19 팬데믹을 통하여 경험하였던 것처럼 감염병 팬데믹은 급격히 발현 및 확산되고, 특히 국경을 초월하여 불특정 다수를 대상으로 영향을 미침으로써 막대한 경제적 손실 및 의료 시스템 붕괴를 야기하여 극심한 사회불안을 초래한다.

그림 5.8 감염병 팬데믹의 특징



출처: 한국화학연구원 한수봉(2024).

이러한 팬데믹을 막을 수 있는 근본적인 방법은 팬데믹 발생 이전에 다양한 바이러스에 대한 치료제 개발 연구를 선제적으로 진행하는 것이다. 하지만, 팬데믹이 발생하기 이전에 연구를 진행하는 것에는 특정 바이러스 질환에 대한 예측 불가능성, 예산의 부족, 장기적인 투자 부담 등이 주요 장애 요소로 작용된다. 또한 치료제 개발의 중요한 역할을 하는 제약 기업 입장에서는 이윤 창출이 보장되어 있지 않기 때문에 팬데믹 대응연구를 기피할 수밖에 없다. 따라서 공공기관을 중심으로 공공의 이익을 위해 선제적, 장기적, 지속적 연구가 이루어져야 하며, 특히 국제협력이 매우 중요하다(<그림 5.9>). 더 나아가 우수한 기술 확보를 위해 산업계, 학계, 그리고 정부의 긴밀한 협력이 필요하며, 지속적인 연구가 이루어지기 위한 공공 및 민간의 협력 모델이 절실하다.

그림 5.9 감염병 연구의 어려움



출처: 한국화학연구원 한수봉(2024).

이에 다양한 세계 공공 기구 및 정부 기관에서는 미래 팬데믹 유발 가능 바이러스를 발표하였다(<그림 5.10>). 특히 우리나라 질병청에서는 SARS-CoV-2, 인플루엔자, 라싸, 뎅기, SFTS, 치킨구냐, 한타, 니파, RSV 바이러스를 유력한 팬데믹 바이러스로 지정하고 대비하는 전략을 발표하였다(<그림 5.10>).

그림 5.10 주요 기관에서 발표한 미래 팬데믹 유발 가능 바이러스

Korea Disease Control and Prevention Agency	National Institute of Allergy and Infectious Diseases	Coalition for Epidemic Preparedness Innovations	World Health Organization
질병관리청 KDCA	NIH National Institute of Allergy and Infectious Diseases	CEPI	World Health Organization
SARS-CoV-2 Influenza Lassa Dengue SFTS Chikungunya Hanta Nipah RSV	SARS-CoV-2 MERS Influenza Ebola Marburg Lassa Hanta CCHFV Nipah	SARS-CoV-2 Chikungunya Ebola Lassa MERS Rift Valley Fever Nipah Disease X	SARS-CoV-2 CCHFV Ebola Marburg Lassa MERS Nipah Henipaviral Rift Valley Fever Zika Disease X

출처: 한국화학연구원 한수봉(2024).

마 맺음말

새로운 팬데믹에 대응하기 위해서는 국제협력을 통한 바이러스 연구 독려와 우수한 후보물질 발굴, 그리고 이전에 연구하였던 약물 재창출, 항체치료제, 바이러스 직접 작용제 등 관련 기술의 고도화 등 노력이 필요하다. 팬데믹 상황에서 가장 중요한 것은 빠르고 효과적인 대응체계를 구축하는 것이며, 이를 위해서는 감염병 연구에 대한 지속적인 투자와 국제적 협력이 필수적이다. 또한 각국의 공공기관들은 치료제뿐만 아니라 팬데믹 대응을 위한 백신 개발, 진단 기술 향상 등 관련 기술 개발을 위해 상호 협력해야 한다. 다양한 바이러스에 대한 데이터 공유와 연구 결과의 실시간 교환은 새로운 팬데믹의 출현 시 신속한 대응을 가능하게 한다. 이를 위해 글로벌 보건기구와 각국 정부는 공동 연구 프로젝트를 추진하고, 긴급 상황에 대비한 대응 계획을 수립하여 실행해야 한다. 미래 팬데믹에 대비한 전략은 또한 공중보건 시스템의 강화와도 연계되어야 한다. 이를 위해 감염병 전문 인력을 양성하고, 감염병 발생 시 신속히 대응할 수 있는 의료 시스템을 구축하는 것이 중요하다. 더불어, 팬데믹으로 인한 사회적 불안을 최소화하기 위해 대중에게 신뢰할 수 있는 정보 제공과 교육도 필요하다. 이러한 통합적 접근을 통해 우리는 미래의 팬데믹을 효과적으로 예방하고 대응할 수 있을 것이다.

참고문헌

데일리팜(2023), 위드 코로나시대 …'팍스로비드' 고령층 급여시장 열릴까, https://www.dailypharm.com/Users/News/NewsView.html?ID=304846에서 2024. 7. 30. 인출

한국보건산업진흥원 제약산업정보포털(2021), 셀트리온 코로나 치료제 "렉키로나", 유럽서 정식승인, https://www.khidi.or.kr/board/view?pageNum=1&rowCnt=10&menuId=MENU01816&maxIndex=99999999999999&minIndex=99999999999999&schType=0&schText=&categoryId=&continent=&country=&upDown=0&boardStyle=&no1=0&linkId=48865011에서 2024. 7. 30. 인출

Beigel, J. H., Tomashek, K. M., Dodd, L. E., Mehta, A. K., Zingman, B. S., Kalil, A. C., Hohmann, E., Chu, H. Y., Luetkemeyer, A., Kline, S., Lopez de Castilla, D., Finberg, R. W., Dierberg, K., Tapson, V., Hsieh, L., Patterson, T. F., Paredes, R., Sweeney, D. A., Short, W. R., Touloumi, G., Lye, D. C., Ohmagari, N., Oh, M., Ruiz-Palacios, G. M., Benfield, T., Fätkenheuer, G., Kortepeter, M. G., Atmar, R. L., Creech, C. B., Lundgren, J., Babiker, A. G., Pett, S., Neaton, J. D., Burgess, T. H., Bonnett, T., Green, M., Makowski, M., Osinusi, A., Nayak, S. & Lane, H. C.(2020). "Remdesivir for the Treatment of Covid-19 — Final Report", The New England Journal of Medicine, Vol.383 No.19, pp. 1813-1826.

Bloomberg(2023). Mapping the Coronavirus Outbreak Across the World, Retrieved July 30, 2024 from https://www.bloomberg.com/graphics/2020-coronavirus-cases-world-map/

GOV.UK(2023). Emerging infections: how and why they arise, Retrieved July 30, 2024 from https://www.gov.uk/government/publications/emerging-infections-characteristics-epidemiology-and-global-distribution/emerging-infections-how-and-why-they-arise

Guy, R. K., DiPaola, R. S., Romanelli, F. & Dutch R. E.(2020). "Rapid repurposing of drugs for COVID-19", Science, Vol.368 No.6493, pp. 829-830.

Korea biomedical review(2021), FDA authorizes Lilly's baricitinib as Covid-19 treatment, Retrieved July 30, 2024 from https://www.koreabiomed.com/news/articleView.html?idxno=11781

Lilly investors(2022). FDA Approves Lilly and Incyte's OLUMIANT® (baricitinib) for the Treatment of Certain Hospitalized Patients with COVID-19, Retrieved July 30, 2024 from

https://investor.lilly.com/news-releases/news-release-details/fda-approves-lilly-and-incytes-olumiantr-baricitinib-treatment

Lü, Z., Dai, X., Xu, J., Liu, Z., Guo, Y., Gao, Z. & Meng F.(2024). "Medicinal chemistry strategies toward broad-spectrum antiviral agents to prevent next pandemics", European Journal of Medicinal Chemistry, Vol.271, Article: 116442.

Vangeel, L., Chiu, W., Jonghe, S. D., Maes, P., Slechten, B., Raymenants, J., Andr´e, E., Leyssen, P., Neyts J. & Jochmans D.(2022). "Remdesivir, Molnupiravir and Nirmatrelvir remain active againstSARS-CoV-2 Omicron and other variants of concern", Antiviral Research, Vol.198, Article: 105252.

PART 5

7 신·변종 바이러스 대응 진단의 중요성

나운성
서울대학교 치의학대학원 교수

가 들어가는 말

코로나19가 발생한 후 지난 5년여의 시간 동안, 전 세계적으로 인류는 여태껏 경험해보지 못했던 새로운 문제들과 직면하게 되었다. 다행히도 점차적으로 팬데믹의 영향으로 인한 어려움이 완화되는 추세이지만, 숙주가 존재하는 한 바이러스는 절대적으로 없어질 수 없는 병원체이다. 특히 숙주의 종에 구애받지 않고 감염이 활발하게 일어나는 바이러스일수록 대유행을 일으킬 가능성이 크게 증가한다. 코로나19의 주요 병원체인 SARS-CoV-2 역시 특정 종에 구애받지 않고 동물에서부터 사람으로 감염을 일으킨 바이러스로 추정되고 있다. 이러한 종간전파가 잘 일어나는 바이러스성 감염병의 경우 mutation(변이)의 가능성이 크며, 인간이 해당 바이러스로부터 대항할 수 있는 면역체계가 완벽히 갖춰져 있지 않아 폭발적인 감염, 즉 세계적인 팬데믹이 유발될 확률이 굉장히 높아진다.

신·변종 바이러스의 지속적 발생에 대비하기 위한 빠른 진단을 통하여 2차 피해와 확산 최소화에 대한 관심 또한 점점 높아지고 있다. 최근 들어 증가추세를 보이고 있는 신·변종 바이러스(메르스, 뎅기, 고병원성, 니파 바이러스)의 특이적 표면 단백질 특성과 감염 기전을 이용한 조기진단 기능이 제시되고 있는데, 이러한 조기진단 키트의 개발은 검역·방역 전문기관 인력들의 신속한 현장 대응에 활용될 수 있기 때문에 매우 중요하게 여겨지고 있다.

또한 넥스트 팬데믹의 질병 X(Disease X)의 원인인 고위험성 바이러스에 대한 범용성 조기진단 키트 개발 등의 진단 플랫폼 구축은 신·변종 바이러스의 유행에 즉각적으로 대응하는 것을 가능하게 하여 국민의 건강 수준 향상 및 건강관리의 비용을 효과적으로 절감할 수 있게 함으로써 경제적, 산업적 측면으로 도움이 될 수 있다.

나아가, 신·변종 바이러스의 진단 플랫폼 구축은 질병 X의 확산 차단을 가능하게 하여, 공중보건학적인 측면에서 전 세계적인 차원의 사회적인 가치를 가지며 동시에 높은 시장가치와 경제적인 경쟁력을 가질 수 있다. 이와 같이 신·변종 바이러스의 진단 플랫폼 구축은 다양한 분야에 관여하여 긍정적인 효과를 불러일으킬 수 있기에 신·변종 바이러스의 진단에 대한 보다 적극적인 연구가 필요하다.

나 감염병과 검체 수집

1) 감염병과 검체의 상관관계

감염병은 세균, 바이러스, 진균, 기생충 등과 같은 여러 병원체에 의해 감염되어 발병하는 질환이다. 병원체에 의한 감염은 호흡에 의한 병원체 흡입, 음식의 섭취, 감염병 환자와의 접촉 등 다양한 경로를 통해 발생한다. 이러한 감염병을 유발하는 병원체들은 각각의 병원체의 특성에 맞는 체내 기관에서 증식하며, 증식된 병원체가 검출되는 위치(혈액, 소변, 구인두 및 비인두 도찰물 등)를 조사하여 진단을 진행한다.

2) 감염병 원인체의 증식기관에 따른 분류

감염병 원인체(바이러스, 세균 등)는 특정 세포나 조직에 더 잘 침투하고 복제하는 경향이 있지만, 인체의 다양한 부위에서 복제하고 감염을 일으킬 수 있다. 따라서 아래의 분류에 따라 감염병 원인체의 복제 장소와 검체 확보 위치를 구분하였으나, 각각의 원인체의 특성에 따라 다른 검체에서도 진단이 가능할 수 있다.

장관 감염증은 소화기관에서 증식하는 원인체에 의해 발병하는 감염병으로 대부분 감염병 원인체가 대변, 소변 등으로 배출되므로 대변, 직장 도찰물, 소변 등의 검체를 확보하여 감염병을 진단한다. 장관 감염증을 유발하는 세균성 감염병으로는 콜레라, 장티푸스, 파라티푸스, 세균성이질, 장출혈성대장균 감염증 등이 속한다. 또한 바이러스성 감염병으로는 A형 간염, 로타바이러스 감염증, 장내 아데노바이러스 감염증, 노로바이러스 감염증, 등이 속한다.

호흡기 감염증은 호흡기관에서 증식하는 원인체에 의해 발병하는 감염병으로, 대부분 감염병 원인체가 구강, 비강 등으로 배출되므로 인후, 비강, 비인두도찰물, 객담, 기관지세척액 등의 검체를 확보하여 감염병을 진단한다. 호흡기 감염증을 유발하는 세균성 감염병에는 디프테리아, 백일해, 결핵 등이 속하며 바이러스성 감염병에는 인플루엔자, 동물인플루엔자 인체감염증, 중동호흡기증후군, 중증급성호흡기증후군 등이 속한다.

신경계 감염증은 신경계에서 증식하는 원인체에 의해 발병하는 감염병으로, 대부분 감염병 원인체가 신경계에서 증식하므로 뇌척수액, 혈액 등의 검체를 확보하여 감염병을 진단한다. 신경계 감염증을 유발하는 세균성 감염병에는 B형 헤모필루스 인플루엔자, 수막구균성수막염, 매독 등이 속하며 바이러스성 감염병에는 공수병, 수두, 일본뇌염, 웨스트나일열 등이 속한다.

3) 검체의 확보 및 보관

진단을 위한 검체(혈액, 뇌척수액, 소변, 비인두 도찰물, 객담 등)는 검사법과 검체 종류에 따라 적합한 채취량, 채취용기, 보관 온도를 정하여 검체를 확보하여야 하며, 진단하고자 하는 감염병에 따라 검체를 적절하게 확보하여야 한다. 검체의 보관은 검사법, 검체, 채취용기, 채취량, 채취 후 보관 온도에 따라 결정되며 다음의 표에서 조건에 따른 보관 방법을 확인할 수 있다.

표 5.1 검체의 보관

검사법	검체	채취용기	채취량	채취 후 보관온도
배양 검사, 유전자 검출 검사	혈액	항응고제처리용기 또는 혈청분리용기	5ml 이상 (영유아 1ml)	4°C 또는 실온
	뇌척수액	무균용기	1ml 이상	
	비인두도찰물, 직장도말물 등	수송배지	2개의 도찰물	
	소변	무균용기	5ml 또는 10ml 이상	
	피부병변조직 및 그 밖의 조직	무균용기	적정량	
항체 검출 검사	혈액	혈청분리용기	5ml 이상 (영유아 1ml)	4°C

출처: 질병관리본부(2017).

다 감염병의 진단 시기와 임상증상 간의 관계

1) 잠복기

잠복기는 감염된 개체가 바이러스나 세균 같은 병원체에 노출된 후에 질병의 증상이 나타날 때까지 걸리는 기간을 말한다. 잠복기는 병원체의 종류마다 다르며 최초 감염량, 감염경로, 감염원의 증식속도, 숙주의 면역 상태 등 다양한 요인에 의해 영향을 받게 된다. 따라서 같은 병원체에 감염되었더라도 감염경로나 숙주의 면역 상태 등에 따라서 잠복기가 달라질 수 있다.

2) 감염병의 진단 시기

바이러스는 스스로 생존할 수 없기 때문에 여러 숙주를 옮겨 다닌다. 바이러스가 새로운 숙주에 감염된 초기 감염량은 대개 소량이기 때문에 숙주 세포 안으로 침입하여 증식이란 과정을 통해 자신의 몸을 복제한다. 이러한 잠복기 동안에는 바이러스가 증식에 집중하느라 숙주 밖으로 잘 나가지 않는다. 즉, 잠복기 감염자의 몸에서는 바이러스가 보통 배출되지 않는다고 설명할 수 있다. 따라서 잠복기가 끝나는 시점에서 감염병을 진단할 수 있다. 바이러스가 증식하게 되면 숙주의 면역세포들은 이를 침입 신호로 여겨 바이러스를 공격하는데, 바이러스와 면역세포의 대치 상태가 길어질수록 바이러스가 충분히 증식하는 데 오랜 시간이 걸리게 된다. 따라서 면역 상태가 우수한 사람은 잠복기가 길어질 수 있다. 일반적으로 바이러스의 평균 잠복기는 6~7일 정도인데 감염자의 전염력을 확인하는 가장 좋은 방법은 항원 검사를 진행하는 것이다.

감염병의 진단 시기는 해당 질병의 특성과 증상에 따라 달라진다. 일부 감염병은 초기 증상이 명확하고 뚜렷하여 빨리 진단할 수 있지만, 다른 감염병은 증상이 경미하거나 나타나지 않을 수 있어서 진단이 더 어려울 수 있다. 또한 병원체의 최초 감염량, 병원체의 독성, 감염경로, 병원체의 증식속도, 숙주의 감수성, 숙주의 면역 상태 등 다양한 요인에 의해 잠복기가 변할 수 있어 사람마다 감염병을 진단할 수 있는 시기에 차이가 존재한다.

대표적인 신·변종 바이러스인 신종 코로나바이러스의 잠복기는 대부분 1~14일(평균 5~6일)이지만, 1% 정도에서 14일 이후 증상이 발생한다. 신종 코로나바이러스는 변이가 자주 발생하며, 일부 연구에서는 변이 바이러스의 경우 잠복기가 더 짧은 것으로 보고하고 있다. 신종 코로나바이러스 감염증을 일으키는 오미크론 변이가 전 세계적으로 확산함에 따라 각국 정부는 팬데믹 대응 전략을 수정해야 했다. 오미크론은 다른 변이에 비해 전염성이 강하고, 백신 접종을 했더라도 돌파 감염을 일으키거나 재감염을 일으킬 수 있다. 오미크론 이전에 유행했던 변이의 경우, 감염 후 5~6일 만에 임상증상이 나타났으며, 델타 변이의 평균 잠복기는 4일이었다. 오미크론 변이의 경우, 임상증상은 감염 후 2~3일 내에 나타났다.

인플루엔자 바이러스는 항원 변이라는 독특한 특징을 가지고 있고, 항원 변이는 매년 일어나며 이를 통해 지속적인 인플루엔자의 유행이 발생한다. 신·변종 인플루엔자 바이러스가 발생하는 기전을 살펴보면 인플루엔자 바이러스는 몇 개의 유전자 조합으로 이루어져 있기에 사람과 동물 인플루엔자 바이러스가 한 개체 내에 이중 감염을 유발하고, 그 과정 중에 유전자 재조합이 일어나 기존과 전혀 다른 신·변종 바이러스가 나타난다. 인플루엔자 바이러스의 잠복기는 24시간에서 4~5일인데, 침입하는 바이러스의 양과 숙주의 면역 상태에 따라 다르다.

3) 잠복기 이후 임상증상의 발현 및 병원체의 전파

바이러스가 체내에서 충분히 증식하고 나면 바이러스는 다른 숙주를 찾아 떠난다. 숙주가 기침을 하게 만들어 침이나 가래 속에 섞인 채 숙주 밖으로 나가기도 하며, 체외로 빠져나간 바이러스는 비말에 둘러싸인 상태로 일정 기간 생존이 가능하다. 그리고 그 사이 새로운 숙주를 만나 다시 침투하여 잠복기와 확산을 반복하게 된다. 신종 코로나바이러스의 오미크론 감염자의 경우 증상 발현 1~2일 전부터 발현 후 2~3일까지 바이러스의 전파 가능성이 있는 것으로 알려졌다. 확진자에 따라 전염력이 상대적으로 짧은 3~4일간 지속되거나, 7일 동안 지속될 수도 있다. 인플루엔자 바이러스는 증상 발현 1일 전부터 증상 발현 후 약 5~7일까지 전염력이 있으나, 소아나 면역저하자는 증상 발현 후 10일 이상까지 길어지기도 한다. 많은 사람이 바이러스에 감염되어도 아무런 증상을 보이지 않는다. 하지만 무증상자라도 유증상자와 감염 기간이 동일할 수 있으며 여러 연구에 따르면 신종 코로나바이러스 확진자는 증상이 없더라도 바이러스를 타인에게 전파할 수 있다.

라 바이러스 진단 플랫폼

1) 유전자 진단 플랫폼

유전자 진단 플랫폼이란, 바이러스성 병원체의 DNA 혹은 RNA와 같은 유전물질(핵산)을 분석하여 감염 여부를 판별하는 기술이다. 이러한 유전자 진단의 일반적인 방식은 타액, 혈액, 소변 등의 검체에서 유전물질을 추출하고 정제한 후 유전물질을 증폭하거나 증폭하지 않고 감염 여부를 판별하는 과정으로 이루어져 있다. 대표적인 유전자 진단 플랫폼으로는 정량적 역전사 중합효소 연쇄반응(Reverse Transcription Quantitative PCR, RT-qPCR) 등온 핵산 검출 기술 등이 속한다. 실시간 정량적 역전사 중합효소 연쇄반응(RT-qPCR)은 현재 가장 일반적으로 이루어지고 있는 진단법의 일종으로, 바이러스 감염을 진단하기 위한 표준 기준이 된다. 이 기술의 장점은 높은 감도와 안정적인 검출 결과를 얻을 수 있다는 점이다. 하지만 중합효소 연쇄반응의 특성상 높은 온도의 가열이 요구되며 고가의 장비와 숙련된 인력이 필요하다는 단점이 존재한다.

실시간 정량적 역전사 중합효소 연쇄반응(RT-qPCR)의 단점을 보완하기 위하여 역전사 루프 매개 등온 증폭(Reverse Transcription Loop-Mediated Isothermal Amplification, RT-LAMP)과 같은 등온 핵산 검출 기술들이 개발되고 있다. 이러한 등온 핵산 검출 기술은 복잡한 온도 주기가 필요한 중합효소 연쇄반응(PCR)과 달리 일정한 온도에서 유전물질을 빠르고 특이적으로 증폭하게 할 수 있다. 또한 기존의 역전사 실시간 정량적 역전사 중합효소 연쇄반응(RT-qPCR)보다 검출까지 걸리는 소요 시간이 단축되며 검출 결과를 판독하기 위한 특별한 장비 없이 시약의 색 변화만으로 바이러스 감염을 진단할 수 있다. 이러한 검출 방법은 전문적인 실험 공간을 필요로 하지 않기 때문에 실험 환경이 갖추어져 있지 않은 환경에서 에볼라 바이러스의 현장 진단과 같은 경우에 적합한 방법이라 알려져 있다.

또한 최근에는 증폭과정을 거치지 않고 핵산을 탐지하는 기술 개발을 통하여 여러 장비를 통합하여 휴대가 편리한 진단기기를 만들고자 하는 노력이 계속되고 있다.

2) 간이 진단 플랫폼

간이 진단 플랫폼이란, 실험실에서 주로 검사되는 유전자 진단 기술과 달리 진료실이나 응급실 또는 피검사자가 스스로 특정 바이러스에 대한 여부를 진단하기 위해 사용된다. 우리가 코로나19를 통해 익숙해진 단어인 신속항원검사가 이 기술에 속하며 면역 크로마토그래피 또는 바이오센서 기술을 기반으로 한 플랫폼들이 개발되고 있다.

신속항원 검사라고 부르는 면역 크로마토그래피 기반 진단 기술인 측면 유동 검사는 바이러스의 특정 단백질 등의 구성성분을 검사하며, 검사하고자 하는 바이러스에 대한 특정 항체를 사용하여 검체가 검사 키트를 따라 이동하며 바이러스 항원과의 복합체 형성을 통해 색을 발색하는 원리를 이용한다.

최근 다양한 유형의 바이오센서 기반 간이 진단 플랫폼 기술들이 개발되고 있다. 바이러스에 높은 친화력을 갖는 물질과 수용체를 코팅한 탄소전극 기판을 활용하여 단시간 내에 바이러스의 단백질을 감지할 수 있도록 하며 이러한 기술을 확장하여 여러 바이러스를 동시에 검출할 수 있도록 개발되고 있다.

앞서 기술된 간이 진단 플랫폼 기술은 일반인도 스스로 수행할 수 있으며 결과를 빠르게 확인할 수 있기 때문에 격리된 사람들이나 자가 검사가 필요한 경우에 유용하게 활용된다. 그러나 이러한 항원을 이용한 간이 진단 기술은 유전자 진단에 비해 민감도가 상대적으로 낮다. 따라서 항원 검사 결과가 양성이라고 해서 반드시 바이러스에 감염된 것이 아닐 수도 있으며 정확한 결과를 확인하기 위해서 반복 검사나 핵산 진단으로 결과 확인하는 과정이 필요하다.

3) 면역 진단 플랫폼

면역 진단 플랫폼이란 바이러스 감염으로 인해 자연적으로 발생하는 인체의 면역 반응을 이용하여 질병을 진단하는 진단 기법이다. 인체의 면역체계 중 체액성 면역 반응은 바이러스의 감염에 반응하여 항체

를 생산하게 된다. 이러한 항체와 바이러스 항원 간의 특이적인 결합을 이용하여 바이러스 감염 여부를 확인하게 된다. 효소 결합 면역흡착 분석(Enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA), 웨스턴 블로팅, 면역형광분석, 적혈구응집 억제 분석 등이 여기에 속한다. 현재 항체를 이용한 면역 진단은 널리 이용되고 있으나 바이러스 감염 후 일정 기간 동안 바이러스에 특이적인 항체가 충분히 생성되지 않아 검사에서 음성으로 판정된 감염 환자가 바이러스를 확산시킬 수 있다. 하지만 혈액 내 항체를 통하여 질병의 진행을 모니터링 할 수 있으며 오랜 시간이 경과한 후에도 항체를 검출할 수 있기 때문에 전파 경로를 추적하는데 이용될 수 있다.

4) 미래 진단 기술 발전 전망

바이러스의 예방과 통제를 위하여 보다 신속하고 정확하게 바이러스 감염을 진단하는 기술을 개발하는 것은 중요한 과제이다. 또한 다양한 경로의 샘플을 분석할 수 있는 기술 개발과 함께 미래에는 생물학적 지식과 나노기술, 전기화학적 센서를 이용한 기술이 결합되며 점점 새롭고 우수한 진단 기술이 등장하게 될 것이다. 이러한 새로운 기술은 기존 진단 기술을 기반으로 민감도, 특이도 및 검출 속도와 같은 다양한 지표들을 더욱 개선하고 신속 진단 분야에서 더욱 우수한 성능을 발휘할 것으로 기대된다.

마 유입 가능한 신·변종 병원체에 대한 진단 준비 사항 또는 연구 방향

1) 통합 감시 시스템의 구축

신·변종 병원체의 유입은 예측하기 어렵고, 감염병의 확산 속도는 매우 빠르기 때문에 체계적이고 신속한 진단 준비는 필수적이다. 신속한 진단을 위한 가장 중요한 단계는 통합 감시 시스템 구축이다. 통합 감시 시스템 구축은 글로벌 보건 위기에 효과적으로 대응하기 위한 필수적인 조치이다. 이 시스템은 각국 보건 기관과 국제보건기구들 간의 긴밀한 협력과 실시간 정보 교류를 가능하게 하여 신·변종 병원체의 조기 발견, 감시, 그리고 대응을 지원한다. 이 시스템은 각국 보건 기관과 국제보건기구들 간의 긴밀한 협력과 실시간 정보 교류를 가능하게 하여, 신·변종 병원체의 조기 발견, 감시, 그리고 대응을 지원한다. 통합된 감시 시스템의 핵심 기능 중 하나는 실시간 데이터 공유이다. 이를 위해 전 세계의 보건 기관은 감염병 발생에 대한 정보를 공유하는 표준화된 플랫폼을 사용해야 한다. 이러한 데이터 공유는 감염병의 초기 단계에서 글로벌 대응을 조율하고, 필요한 자원을 효율적으로 배분하는 데 필수적이다.

2) 고도의 진단 플랫폼 개발

미지의 병원체에 대응하기 위해서는 선진화된 진단 플랫폼이 필수적이다. 이러한 플랫폼은 신속하고 정확한 병원체 식별을 통해 전염병 확산을 막고, 적절한 치료법을 신속히 개발하는 데 기여할 수 있다. 현재 전 세계적으로 연구자들은 차세대 시퀀싱(NGS), CRISPR-Cas 시스템, 메타제노믹스 등 혁신적인 기술을 활용하여 미지의 병원체를 진단하기 위한 새로운 기술을 개발하고 있다. 이러한 기술 개발은 기존의 한계를 극복하고, 더 빠르고 정확한 진단 방법을 제공하여 공중보건을 강화하는 데 중점을 두고 있다.

3) 차세대 시퀀싱(Next Generation Sequencing, NGS)

각광받는 차세대 진단법으로는 '차세대 시퀀싱(NGS)'이라 불리는 차세대 염기서열 분석법이 있다. 차세대 시퀀싱(NGS)은 신·변종 병원체의 유전체를 신속하게 분석할 수 있는 기술로, 다양한 병원체의 유전자 서열을 한 번에 시퀀싱 할 수 있다. 이는 전염병 발생 초기 단계에서 신속한 병원체 식별과 유전체 특성 파악에 유용하다. NGS는 기존의 시퀀싱 기술보다 빠르고 정밀하며, 한 번의 분석으로 수천에서 수백만 개의 DNA 조각을 시퀀싱 할 수 있어, 다양한 병원체를 동시에 탐지할 수 있다. 이는 특히 신·변종 바이러스가 급속도로 확산되는 상황에서 매우 중요하다. 또한 NGS는 방대한 양의 유전자 데이터를 처리할 수 있는 능력을 갖추고 있어, 대규모 전염병 감시 및 대응에 유리하다. NGS는 병원체의 변이 추적에도 장점을 가지고 있으며, 병원체 유전체 내의 작은 변이까지 정밀하게 탐지할 수 있어, 병원체의 진화 및 전파 경로를 추적하는 데 유리하다. 이는 변이 바이러스가 어떻게 발생하고 확산되는지를 이해하는 데 중요하다. NGS를 통해 얻은 데이터는 병원체의 진화 경로를 분석하는 데 사용될 수 있으며, 이는 백신 개발 및 치료 전략 수립에 중요한 정보를 제공한다. 실제로 NGS 기술은 코로나19에 대응하기 위해 사용된 바 있다. NGS는 코로나19 팬데믹 동안 SARS-CoV-2 바이러스의 유전자 서열을 신속하게 분석하여, 변이 바이러스의 출현과 전파를 모니터링하는 데 중요한 역할을 했다. NGS를 통해 영국에서 처음 보고된 변이 바이러스(B.1.1.7)나 남아프리카 공화국에서 보고된 변이 바이러스(B.1.351)의 유전자 변이를 신속하게 식별할 수 있었다.

4) CRISPR(Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats)-Cas(CRISPR-associated sequences) 시스템

CRISPR-Cas 시스템은 유전자 편집 기술로 널리 알려져 있지만, 최근에는 질병 진단에도 큰 잠재력을 보이고 있다. 이 시스템은 특정 유전자 서열을 매우 정밀하게 인식하고 자를 수 있는 능력을 가지고 있다. 주요 CRISPR 기반 진단 기술에는 SHERLOCK과 DETECTR가 있다. SHERLOCK(Specific High-

sensitivity Enzymatic Reporter Unlocking)은 CRISPR-Cas13a 시스템을 이용하여 특정 RNA 서열을 검출하는 기술이다. Cas13a는 RNA를 타깃으로 하는 효소로, 타깃 RNA를 인식하고 절단하는 능력을 가지고 있다. SHERLOCK 시스템은 이 효소의 특성을 활용하여 고감도와 높은 특이성으로 RNA 바이러스와 같은 병원체를 탐지할 수 있다. SHERLOCK 시스템은 지카 바이러스의 RNA를 매우 낮은 농도에서도 탐지할 수 있어, 진단에 중요한 역할을 한 바 있다. DETECTR(DNA Endonuclease-Targeted CRISPR Trans Reporter)는 CRISPR-Cas12a 시스템을 이용하여 DNA 서열을 검출하는 기술이다. Cas12a는 DNA를 타깃으로 하는 효소로, 타깃 DNA를 인식하고 절단하는 능력을 가지고 있다. DETECTR 시스템은 이 효소의 특성을 활용하여 빠르고 정확한 DNA 검출을 가능하게 한다.

바 맺음말

코로나19 팬데믹은 인류에게 신·변종 바이러스 대응의 중요성을 강력하게 일깨워 주었다. 팬데믹으로 인해 인류는 바이러스의 진화와 전파를 예측하고 신속하게 대응해야 할 필요성을 깊이 인식하게 되었다. 특히 동물에서 사람으로 감염되는 바이러스의 Spillover 현상은 대유행을 초래할 가능성을 높이며, 이러한 바이러스에 대한 신속하고 정확한 진단이 중요하다.

신·변종 바이러스 대응 진단의 중요성은 두 가지 주요 측면에서 강조된다. 첫째, 조기진단을 통해 2차 피해와 확산을 최소화할 수 있다. 최근 개발된 다양한 진단 기술, 특히 유전자 진단 플랫폼과 간이 진단 플랫폼, 면역 진단 플랫폼 등은 신속하고 정확한 바이러스 검출을 가능하게 한다. 이러한 진단 기술의 발전은 공중보건의 향상뿐만 아니라 경제적, 산업적 측면에서도 큰 이점을 제공한다.

둘째, 통합 감시 시스템과 고도의 진단 플랫폼 구축은 미래의 팬데믹에 대비하기 위한 필수적인 조치이다. 글로벌 보건 위기에 효과적으로 대응하기 위해 통합 감시 시스템은 실시간 데이터 공유와 국제협력을 강화하며, 고도의 진단 플랫폼은 NGS와 CRISPR-Cas 시스템과 같은 첨단기술을 활용하여 신속하고 정확한 병원체 식별을 가능하게 한다.

결론적으로, 신·변종 바이러스 대응을 위한 진단 기술의 발전과 통합 감시 시스템 구축은 공중보건을 강화하고 차세대 팬데믹에 대비하는 데 있어 중요한 역할을 한다. 이러한 노력을 통해 인류는 미래에 발생 가능한 미지의 병원체의 위협에 보다 효과적으로 대응할 수 있을 것이다. 앞으로도 지속적인 연구와 기술 개발을 통해 신·변종 바이러스의 위협을 극복하고, 보다 안전한 사회를 만들어 나가는 데 주력해야 할 것이다.

참고문헌

질병관리본부. (2017). 법정감염병 진단검사 통합지침, 제2판. 질병관리본부.

Fang, L., Yang, L., Han, M., Xu, H., Ding, W. & Dong, X.(2023). "CRISPR-cas technology: A key approach for SARS-CoV-2 detection", Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, Vol.11.

John, G., Sahajpal, N. S., Mondal, A. K., Ananth, S., Williams, C., Chaubey, A., Rojiani, A. & Kolhe, R.(2021). "Next-generation sequencing (NGS) in COVID-19: a tool for SARS-CoV-2 diagnosis, monitoring new strains and phylodynamic modeling in molecular epidemiology.", Current issues in molecular biology, Vol.43 No.2, pp. 845-867.

Mallapaty, S., Callaway, E., Kozlov, M., Ledford, H., Pickrell, J. & Van Noorden, R.(2021). "How COVID vaccines shaped 2021 in eight powerful charts", Nature, Vol.600 No.7890, pp. 580-583.

Reta, D., Tessema, T., Ashenef, A., Desta, A., Labisso, W., Gizaw, S., Abay, S., Melka, D. & Reta, F.(2020). "Molecular and immunological diagnostic techniques of medical viruses", International Journal of Microbiology, Vol.2020, Article: 8832728.

WHO(2023). "WHO launches global network to detect and prevent infectious disease threats", Retrieved June 13, 2024 from https://www.who.int/news/item/20-05-2023-who-launches-global-network-to--detect-and-prevent-infectious-disease-threats

Zhang, Y., Bu, J., Shu, R. & Liu, S.(2024). "Advances in rapid point-of-care virus testing", Analyst, Vol.149, pp. 2507-2525.

PART 5

8

넥스트 팬데믹에 대한 대응: 공중보건

오명돈
서울대학교 의과대학 명예교수

가 들어가는 말

팬데믹에 대한 대응은 시기별로 팬데믹 발생 이전과 이후에 따라 크게 다르다. 팬데믹 발생 이전(팬데믹과 팬데믹 사이 기간)에는 팬데믹의 예방, 감시, 그리고 조기 발견에 주력해야 한다. 팬데믹이 발생한 후에는 확산 방지, 환자 진료, 피해 최소화, 그리고 복원에 노력을 집중해야 한다.

팬데믹 대응 수단은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 치료제와 백신이 없던 시절부터 전통적으로 적용해 온 공중보건과 사회 중재법(public health and social measures)이고, 두 번째는 치료제와 백신을 사용하는 약물 중재법이다. 본 내용에서는 팬데믹에 대한 공중보건학적 대응을 살펴본다.

1) 팬데믹의 발생 기전

미생물, 지구의 원주민

지구에서 가장 오래된 생명체는 그린란드의 35억 년 전 화석에서 발견되었다. 최근 연구는 이보다 앞서 41억 년 전에 형성된 서부 호주의 지르콘에서 생명체가 발견되었다고 한다(Bell et al., 2015). 지구의 나이가 45억 년이니, 지구 탄생의 초기부터 생명체가 지구에 살기 시작한 셈이다.

지구 생명체의 형태는 초기에는 매우 단순하였으나, 시간이 지나면서 점차 더 복잡한 형태로 진화해 갔다. RNA/DNA에서 단세포로, 단세포에서 다세포로, 다세포에서 조직으로, 조직에서 장기로, 장기에서 시스템으로. 그 결과 지구상에는 점차 다양한 생명체가 나타났다. 곤충은 5억 4천만 년, 어류는 4억 2천만 년, 양서류는 4억 년, 파충류는 3억 년, 포유류는 1억 7천만 년, 조류는 6천 5백만 년, 영장류는 5천 5백만 년, 그리고 인류는 180만 년 전에 지구상에 나타났다.

이러한 과정에서 지구에 나타난 최초의 생명체는 바이러스와 박테리아(단세포 생물)이다. 바이러스와 박테리아는 지구상에 새로운 생물이 나타날 때마다 이들에게 '감염'을 일으키며 지난 35억 년에 걸쳐서 진화를 거듭해 오고 있다. 현재 지구상에 존재하는 박쥐 바이러스나 원숭이 바이러스는 적어도 수천만 년 동안 포유류에 적응하며 살아남은 생명체이다.

미생물, 동물에서 사람으로(감염병)

사람에게 감염병을 일으키는 미생물은 대개 다른 동물에서 유래한다(Wolfe et al., 2007). 동물에서 사람으로 건너온 미생물의 운명은 ① 증식하지 못하고 죽거나, ② 증식은 하지만 다른 사람에게 전파되지 못하거나, ③ 사람에게 사람으로 몇 차례 전파되다 말거나, 또는 ④ 사람에서 사람으로 계속해서 전파된다.

사람에게 침입한 미생물이 ①~④ 가운데 어떤 운명을 맞느냐는 유래 동물의 체내 환경이 사람의 체내 환경과 얼마나 비슷한가에 따라서 결정된다. 예를 들어, 철새의 인플루엔자 바이러스가 사람에게 감염을 일으키려면, 섭씨 5도가 더 낮은 온도(조류 체온은 41도이고 사람 체온은 36도)에서도 증식할 수 있는 적응력이 필요하다. 철새의 수분이 많은 창자에서 사람의 건조한 기도로 바뀐 환경 변화에도 적응해야 한다. 따라서 사람의 체내 환경과 여러 조건이 비슷한 포유류에서 유래한 바이러스가 비포유류에서 유래한 바이러스에 견주어 동물에서 사람으로의 전파가 일어날 가능성이 크다. 또는 사람의 체내 환경에 적응할 수 있는 변이가 충분히 축적될 수 있을 정도로 오랜 세월이 지나면 동물에서의 사람으로의 전파가 가능하게 된다.

미생물, 사람에서 사람으로(유행병)

동물의 미생물이 사람에서 사람으로 지속해서 감염을 일으키는 돌림병(유행병)으로 자리를 잡으려면 두 가지 조건이 필요하다. 첫째, 동물과 사람이 밀접하게 접촉할 기회가 필요하다. 사냥은 야생동물과 사람이 밀접하게 접촉할 기회이다. 인류가 동물과 일상으로 접촉하게 된 시기는 야생동물을 가축화한 시기이다. 둘째, 사람으로부터 사람으로 전파가 계속 이어질 수 있을 만큼 인구수가 많고 인구 밀도가 높아야 한다. 예를 들어 홍역이 유행을 지속하는 데 필요한 인구수는 대략 50만 명이다(Black, 1966). 이런 두 가지 조건을 충족할 수 있는 환경은 인류가 수렵 채취 생활에서 농경 정착 생활로 옮겨 간 11,000년 전에 시작되었다고 본다(Wolfe et al., 2012). 예를 들면, 인플루엔자는 애초에 돼지로부터, 결핵은 애초에 소로부터 사람에게 건너온 인수공통감염병이다. 그러나 지난 1만여 년 동안 사람에게서 유행을 거듭한 결과 이제는 동물이 없더라도 사람-사람 전파가 일어나는 온전한 사람의 감염병으로 자리를 잡았다. 제러미 다이아몬드는 '총균쇠'에서 감염병을 "deadly gifts from our animal friends"라고 하였다.

세계적 유행(팬데믹)의 탄생

한 지역의 감염병이 다른 지역으로 퍼져서 팬데믹을 일으키려면 두 가지 조건을 충족해야 한다. 첫째, 감염병 병원체를 전파할 수 있는 이동 수단이 필요하며 둘째, 해당 지역 주민들이 침입한 병원체에 대한 면역력이 부족해야 한다. 인류는 교역과 전쟁을 통해 끊임없이 새로운 지역으로 활동 범위를 넓혀왔다. 이렇게 물건과 사람이 이동하면 거기에 편승한 미생물도 새로운 지역으로 옮겨가기 마련이다. 이동 수단이 사람의 발에서 말(馬)의 발로, 그리고 바퀴로, 비행기 날개로 발달하면서 미생물이 새로운 지역으로 퍼져나가는 속도도 그만큼 더 빨라졌다.

새로운 미생물과 처음 만나는 사람은 그 미생물에 대항할 면역력이 없다. 따라서 이전에 사람에게 유행한 적이 없는 새로운 감염병이 출현하여 팬데믹이 발생하면 크게 앓거나 목숨을 잃는 사람이 많다.

세계화(Globalization)와 팬데믹

감염병이 한 국가에서 다른 국가로 확산하는데 가장 큰 영향을 끼친 것은 세계화다. 세계화란 사람들을 가두고 있던 공간적(거리), 시간적(선박·기차·비행기, 우편·팩스·이메일), 인지적(지식, 아이디어, 신념, 가치, 문화) 경계가 무너지면서 정치·경제·사회·기술·환경을 포함한 여러 영역에서 사람 사이의 상호 관계가 변화하는 과정이다. 이러한 세계화의 시작은 역사적으로 15세기부터 시작되었다(Lee & Dodgson, 2000). 15세기부터 시작된 유럽 국가들의 제국주의, 대륙 간 무역과 이주 과정에서 유럽에서 아메리카 대륙으로 전파된 홍역과 두창, 그리고 거꾸로 아메리카 대륙에서 유럽으로 유입된 매독이 대표적인 사례다.

세계화는 사람과 물자가 이동하는 일을 수반하는데, 물자가 이동하면서 미생물이나 매개체도 함께 이동한다. 또한, 자본의 이동과 함께 의사결정 권력이 이동하고 그 결과 빈곤, 빈부 격차의 심화, 공공 영역의 위축, 환경 변화를 수반한다. 이러한 변화는 모두 신종감염병의 발생과 확산에 매우 커다란 영향을 준다. 신종감염병과 팬데믹은 세계화의 암울한 부수현상(epiphenomenon)이다.

나 과거의 팬데믹

1) 중세의 팬데믹: 흑사병

인류 역사에서 가장 참혹한 감염병인 흑사병은 세 차례 대유행을 일으켰다(Achtman et al., 1999). 첫 번째 대유행(유스티니아누스 흑사병, 서기 541~767)은 동아프리카에서 시작하여 이집트의 곡물이나 쥐를 통해서 콘스탄티노플로 유입되었다.

두 번째 대유행은 유럽 인구 1/3의 목숨을 앗아간 중세 흑사병이다. 이 대유행은 중국에서 시작하여 비단길을 통해서 지중해에 도착한 다음 유럽 여러 나라로 퍼졌다. 베네치아는 선박이 도착하면 곧 상륙을 허가하지 않고 40일(quarantine) 동안 관찰한 다음 발병하지 않은 선박만 상륙을 허가하는 제도를 만들어서 흑사병의 유입을 막으려고 하였다. 이것이 오늘날 검역 제도의 효시이다. 세 번째 대유행은 1870년대에 중국에서 선박을 통해 미국 샌프란시스코로, 호주로, 홍해를 거쳐 유럽으로 퍼져나갔다. 세 차례의 흑사병 대유행은 교역과 교통의 발달에 따라서 감염병이 어떻게 그 범위를 넓혀 왔는지 잘 보여주는 예이다.

2) 20세기의 팬데믹: 에이즈

지금까지 설명한 팬데믹 탄생의 기전은 에이즈 팬데믹에도 마찬가지다. 에이즈 바이러스의 자연 보유 동물은 원숭이다. 원숭이의 에이즈 바이러스가 사람에게 건너올 상황은 사람이 원숭이를 사냥하여 먹거나, 애완동물로 키울 때이다. 이렇게 사람이 원숭이의 에이즈 바이러스에 걸린 일은 오랜 옛날부터 드물지 않게 발생하였을 것이다. 그러나 성 산업(sex industry)이 형성되거나 여러 사람과 성관계를 맺는 동성애자가 많은 상황이 오기 전까지는 사람 간 전파가 지속되기 어려웠다. 아프리카 콩고민주공화국은 1920년대부터 내륙도시 Kinshasa에서 해안 도시 Pointe Noire까지 철도를 건설하기 시작하였고, 그 결과 도시화가 진척되면서 성 산업 시장이 형성되었다. 지금까지 발견된 최초의 에이즈 환자는 이곳 Kinshasa에서 1959년에 살았던 남성이다(Zhu et al., 1998).

에이즈가 미국과 유럽에서 유행하고 있다는 사실은 1981년에 알려졌다. 미국 샌프란시스코에서 동성애자 남성 6명이 면역력이 극도로 약해져서 폐렴에 걸린 것이 계기가 되었다(CDC, 1981). 이미 1960년대에 서아프리카에서 유행하던 에이즈가 미국과 유럽으로 흘러 들어간 다음 많은 사람이 감염되어 심각한 면역 부전에 빠지기까지는 약 20년이 걸린 셈이다. 에이즈는 아프리카의 도시화, 아프리카와 서방 세계의 인적 물적 교류, 그리고 성문화의 변화를 타고 전 세계로 퍼져 나갈 수 있었다.

3) 21세기의 팬데믹

21세기에 발생한 팬데믹은 중증급성호흡기증후군(SARS)(2002~2004), 신종 인플루엔자(2009~2010), 서아프리카 에볼라(2014~2016), 폴리오(2014~현재), 지카(2016), Kivu 에볼라(2019~2020), 코로나19(2020~2023), 원숭이두창(Mpox)(2022~2023)이다. 새로운 팬데믹이 3년마다 하나씩 발생하는 셈이다. 이렇게 팬데믹이 자주 발생하는 까닭은 위에서 살펴본 팬데믹 발생 요인이 시간이 갈수록 나빠진 결과이다.

4) 조용한 팬데믹, 항생제 내성 감염증

새로운 감염병이 출현하여 전 세계로 퍼지면 곧 세계 톱뉴스가 되어 모든 사람에게 알려진다. 한편, 예전부터 존재하는 미생물이 항생제 내성으로 바뀌어 내성균이 나타날 때는 세계 톱뉴스가 되는 일이 드물다. 그러나 항생제 내성균에 감염되어 사망하는 사람 수는 2019년 한 해 동안 127만 명에 이를 정도로 많다(Murray et al., 2022).

미생물은 항생제에 노출되면 내성유전자를 획득하여 살아남는 특성이 있다. 따라서 항생제를 사용하

는 빈도가 높은 병원 환경에서 내성균도 쉽게 출현한다. 병원은 항생제 내성균의 소굴이며, 진단과 치료 과정에서 내성균에 감염되면 치료하기 어렵다.

사람뿐만이 아니라 가축이나 농수산물에 사용하는 항생제도 내성균을 유발한다. 이렇게 출현한 내성균은 생태계를 통해서 다시 사람에게 감염될 수 있다. 따라서 항생제 내성을 관리하려면 사람은 물론이고 농축 수산 분야에서 사용하는 모든 항생제의 총량을 줄여야 한다.

항생제 내성균도 다른 미생물과 마찬가지로 여러 나라로 확산한다. 따라서 전 세계 모든 나라가 항생제 사용량을 줄이는 노력에 동참해야 한다. 국제연합은 2016년에 항생제 내성을 의제로 채택하여 각국이 항생제 사용을 줄이는 국가행동계획을 수립하고, 그 결과를 매년 국제연합에 보고하도록 결정하였다. 그러나 항생제 사용량은 줄지 않고 있다.

다 신종감염병

1) 사람이(애초에 의도하지 않았으나) 일으킨 감염병

인플루엔자 팬데믹(독감)은 5차례 발생했다(스페인 독감 1918년, 아시아 독감 1957년, 홍콩 독감 1968년, 러시아 독감 1977년, 돼지 독감 2009년). 이 가운데 러시아 독감은 바이러스 게놈의 염기서열 구조가 1950년의 바이러스와 비슷하다. 그래서 러시아 독감은 1950년에 냉동고에 넣어 둔 바이러스가 실험실에서 유출되어 발생했다는 학설이 유력하였다. 최근 제기된 새로운 학설은 1977년에 중국과 소련에서 약독화 생백신 인플루엔자 백신을 만들었는데, 이 백신 바이러스가 퍼져서 팬데믹을 일으켰다는 주장이다(Rozo & Gronvall, 2015).

폴리오는 예방접종 덕분에 앞으로 몇 년 이내에 유행이 종식되리라 예상한다. 그러나 백신에 들어있는 약독 생바이러스는 면역이 약한 환자에게 생존해 있으면서 새로운 유행을 일으킬 수 있다(Irwin, 2023).

2) 실험실 사고

미생물 실험실의 사고로 병원체가 지역사회로 유출되어 감염병이 발생하기도 한다. 1979년 소련 Sverdlovsk시에서 발생한 탄저는 군대의 미생물 실험실에서 유출된 탄저균이 공기를 타고 시내로 확산되

어 발생하였다(Meselson et al., 1994). 이 사고로 적어도 시민 64명이 탄저에 걸려 목숨을 잃었다.

최근에는 치료제나 백신을 연구개발하는 과정에서 감염력이나 독성이 강한 미생물을 유전 공학으로 만들 수 있게 되었다. 이런 유전자 조작 실험(gain of function)이 미래의 감염병 유행에 대비하는 데 필요한 측면이 있으나, 다른 한편으로 이런 미생물이 실험실 사고로 지역사회에 유출되어 대유행을 일으킬 우려도 있다.

유사한 논쟁은 두창 바이러스에서도 계속되고 있다. 세계보건기구가 지구상에서 두창이 근절되었다고 선언한 1980년 이후, 실험실의 두창 바이러스를 없애야 실험실 사고에 의한 두창의 재유행을 막을 수 있다는 주장이 제기되었다. 실제로 1978년에 영국 버밍엄대학의 의학 사진사가 미생물 실험실에서 두창에 감염되는 비극적인 참사가 발생하였다(Pallen, 2018). 그러나, 백신과 치료제 개발 연구에 필요하다는 이유로 아직도 미국과 러시아의 연구소에는 두창 바이러스를 보관하고 있다.

3) 개인·집단·국가가 의도적으로 일으킨 감염병

미국 뉴욕에서 2001년 9월 11일에 발생한 테러로 세계무역센터가 무너져 내렸다. 이 테러가 발생한 지 1주일 뒤에는 탄저균 테러가 시작되었다. 탄저균은 백색 가루 형태로 우편 봉투 속에 담겨 상원 의원실과 주요 언론사에 발송되었다. 그 결과, 노출된 사람 가운데 22명이 탄저에 걸려서 5명이 목숨을 잃었다. 우편물을 열면 탄저에 걸릴 수 있다는 공포심 때문에 미국 국민이 우편물을 개봉하지 못하는 불안한 상황이 수 개월간 지속되었다.

탄저균 테러를 일으킨 범인은 미국 육군전염병연구소(USAMRIID)의 Bruce Ivins박사로 밝혀졌다. Ivins 박사는 냉전 시대부터 미군 연구소의 생물학전 대응 프로그램으로 탄저균을 연구해 온 전문가이다. 그러나 냉전 시대가 끝나고, 대량파괴 무기 금지 조약이 발효되면서 생물테러 연구도 지원이 줄고 있었다. 그래서 생물테러가 여전히 중요하다는 사실을 부각하려고 911테러의 틈을 이용하여 탄저균 테러를 감행했다고 한다(DOJ, 2010; Bush & Perez, 2012).

일본이 2차 세계대전 때 731부대(관동군 방역급수부 본부)를 설치하고 살아있는 사람(마루타)에 미생물을 투여하는 생체실험을 하고 세균 무기를 개발했다는 것은 널리 알려진 사실이다(김재명, 2024). 국가의 생물무기 프로그램은 1975년에 발효된 '생물무기금지조약'으로 개발이 중단되었다. 그러나 냉전 시대에 생물무기를 개발했던 국가들은 그때 만든 생물무기를 가지고 있거나, 연구자들이 생존해 있을 것이다.

생물무기는 만들기 쉽고, 제작비용이 적게 들며, 조용히 퍼뜨릴 수 있고, 시간이 갈수록 많은 희생자가

나타나며, 걷잡을 수 없는 공포를 유발한다. 그래서 생물무기를 "가난한 나라의 핵무기"라고 부른다. 만일에 지정학적 상황이 나빠지면 생물무기가 다시 등장할 수 있다.

표 5.2 신종감염병 출현 요인

숙주(사람)의 변화	병원체의 적응	여행·교역의 증가	의도적 사용
인구증가·도시화	병원체의 진화·변이	사람, 동물, 물건 이동	바이오 테러
전쟁·내란·빈곤	항생제 내성	레저활동·밀림 탐험	
환경(생태계)변화	**식품의 대량 생산**	**공중위생·행정 붕괴**	**실험실 유출**
환경파괴: 댐 건설, 벌목	공장형 축산	방역행정 붕괴	
기후변화: 홍수·가뭄		예방접종 저하	

출처: Smolinski et al.(2003).

라 넥스트 팬데믹의 전망

지금까지 살펴본 바와 같이 신종감염병의 출현에는 여러 요인이 작용한다(<표 5.2>). 불행하게도 이런 신종감염병의 출현 요인이 가까운 장래에 개선될 움직임은 보이지 않는다. 오히려 앞으로 상당 기간 더욱 나빠지리라 예상한다. 특히 걱정스러운 변화 추세로는 ① 도시의 인구 집중과 거대 도시의 출현, ② 국제적인 종교, 스포츠, 문화 행사에 수십만~수백만 명이 모이는 거대 이벤트(mass gathering events), ③ 가축 항생제 사용량 증가, ④ 지정학적 긴장 관계와 난민 증가, ⑤ 기후변화 등을 들 수 있다.

사람들이 도시로 모여든 결과 2018년 현재 전 세계 사람의 55%가 도시에 거주한다. 인구 1,000만 명 이상인 도시는 1990년에 10개였으나, 2018년에는 33개로 늘었고, 이런 추세가 계속되면 2030년에는 43개로 늘어나리라 예상된다. 거대 도시가 감염병이 유행에 취약한 까닭은 인구 밀도가 높아서 전파가 쉽게 일어날 수 있는 환경임은 물론이고, 슬럼 지역이 형성되어 이곳이 병원체 서식의 온상이 되기 때문이다.

국제적인 종교, 스포츠, 문화 행사의 경우 전 세계 여러 나라로부터 수많은 사람이 운집한다. 메카를 순례하는 Hajj와 Umrah 기간에는 해마다 전 세계로부터 이슬람교도 수백만 명이 사우디아라비아에 모인다. 여름 올림픽 대회 기간에도 수백만 명의 관중이 모이는데, 런던 올림픽(2012)에는 820만 명이, 리우데자네이루 올림픽(2016)에는 620만 명이 모였다(Richter, 2020). 그리고 FIFA 2022년도 월드컵 축구 경기에는 340만 명이 카타르에 모였다(FIFA, 2022). 카니발에도 많은 사람이 모이는데 리우 카니발 기간에는 500만 명이 넘는 관광객이 모인다고 한다.

농축수산업계에서 사용하는 항생제의 양도 증가하고 있다. 전 세계의 농장에서 사용하는 항생제의 총량은 2020년에 99,502t인데 2030년에는 8%가 증가하여 107,472t이 되리라 추산한다. 항생제를 가장 많이 사용하는 나라는 중국, 브라질, 인도, 미국 순이며, 아시아 지역에서 전체 항생제의 67%를 사용하고 있다(Mulchandani et al., 2023).

아울러 세계 곳곳에서 지정학적 긴장이 고조되면서 생물무기를 이용한 테러나 전쟁의 가능성도 커지고 있다. 이러한 변화들은 모두 새로운 감염병의 출현과 전 세계 확산을 부추기는 요인이다. 새로운 팬데믹은 몇 년 이내에 다시 발생할 수 있다. 따라서 우리는 새로운 팬데믹의 대비를 서둘러야 한다.

마 넥스트 팬데믹, 어떻게 대비할 것인가?

코로나19 팬데믹은 우리가 팬데믹에 대응할 능력이 얼마나 부족한지 여실히 드러냈다. 따라서 미래의 팬데믹에 대비하려면 코로나19 팬데믹에 대해 어떻게 대응하였으며, 어떤 분야의 대응이 미흡하였는지를 객관적으로 평가하는 데서 출발해야 한다.

1) 코로나19 대응의 교훈

세계적 의학 학술지 란셋(The Lancet)의 Covid-19 Commission(위원장 Jaffrey D Sachs)이 제시한 코로나19 대응의 평가는 ① 예방 실패, ② 합리성 실패, ③ 투명성 실패, ④ 정상 공중보건 실행 실패, ⑤ 운영협력 실패, ⑥ 국제 단결 실패로 요약할 수 있다(Sachs et al., 2022).

세계보건기구도 코로나19 대응 경험을 바탕으로 다음 팬데믹에 대비하려면 각 국가는 어떻게 준비해야 하는지 지침을 제시하였다(WHO, 2023a). 그 내용을 요약하면 다음과 같다. ① 조기 발견에 필요한 감시 및 실험실 역량 강화, ② 신속하고 효과적인 대응에 필요한 범사회적 방역 역량 강화, ③ 급격히 늘어나는 환자(surge)에 대비하여 의료 시스템과 지역사회 보호, ④ 긴급 상황에서 필요한 의약품 개발·생산·승인 촉진 및 제조 능력 강화, ⑤ 사회 필수 서비스·산업 연속성을 위한 정부, 민간의 긴밀한 협조, ⑥ 공중보건 및 1차 의료에 대한 장기적이고 지속적인 투자, ⑦ 취약 계층에 대한 사회·경제적 피해를 완화할 수 있는 사회 안전망구축, ⑧ 보건·의료는 물론 운송·제조·식량 등 사회 전 분야에서 국제협력과 조정, ⑨ 코로나

19 대응 과정의 성과와 한계를 분석하여 제도화.

빌 게이츠도 다음 팬데믹 예방을 위한 방안을 제시하였다(Gates, 2022). ① 코로나19에서 배워라, ② 팬데믹 예방 팀(GERM)을 만들어라, ③ 발생을 조기에 발견하라, ④ 각자 스스로 즉시 보호하도록 도와라, ⑤ 새로운 치료제를 신속히 개발하라, ⑥ 백신 생산을 준비해 두어라, ⑦ 훈련, 훈련, 훈련!, ⑧ 부자 나라 가난한 나라 간격을 좁혀라, ⑨ 팬데믹을 예방할 계획을 세우고 재정을 조달하라.

2) 신종감염병 대응의 생태학적 관점: 원헬스 접근법

앞에서 살펴본 바와 같이 동물의 교역, 경작지 개간, 공장형 축산, 인구의 도시 집중, 산업화, 기후변화는 생태계에 스트레스를 가중하고, 그 결과로 새로운 감염병이 출현하여 확산할 새로운 기회가 생긴다.

새로이 출현하는 감염병은 야생동물이나 가축으로부터 사람으로 건너온 인수공통감염병이 대부분이다. 지난 30여 년간 사람에게 감염을 일으킨 새로운 병원체가 30여 개 발견되었는데, 그 가운데 75%가 동물로부터 유래하였다.

사람의 건강과 동물의 건강 그리고 생태계의 건강은 매우 긴밀하게 연결되어 있다. 사람-동물-환경의 관계가 바뀌면 사람이나 동물에게 새로운 질병이 발생하고 확산할 위험이 커진다. 따라서 이들 3개 영역을 다루는 기관들은 매우 긴밀하게 협력하고 소통해야 한다. 그런데도 지금까지 사람은 보건복지부에서, 동물은 농림축산식품부에서, 환경은 환경부에서 각기 따로 관리하면서 서로 협력하고 소통하는 일이 드물었다. 원헬스 접근법이란 이들 관련 부서들이 통합적으로 사람, 동물, 환경의 건강을 최적으로 만들자는 접근법이다(WHO, 2023b).

원헬스 접근법은 동양의 자연관과 지혜를 빌린 접근법이다. 동양에서는 오래전부터 "하늘과 땅은 나와 한 뿌리요, 만물은 나와 한 몸이니라(天地與我同根, 萬物與我一體)."라는 믿음이 있다(장일순, 2016). 불교 신자들은 공양할 때마다 "이 음식은 어디서 왔는가…."라는 공양게를 외우며 이런 믿음을 되새긴다. 사실, 원헬스 접근법은 미생물이 감염병의 원인이며, 백신과 항생제로 감염병을 근절할 수 있다는 기존의 접근법이 한계에 도달하였다는 성찰의 결과이다.

표 5.3 팬데믹을 대비하는데 필요한 요소들

1. 동물 → 사람 유출 줄이기	3. 대유행의 타격(피해) 줄이기
지구 건강 접근법 (국제적)	진단시약/치료제/백신제 공평한 분배
원헬스 건강 접근법 (지역적)	응급(의료 재난 시) 법적인 준비
인수공통감염병 위험 산정	제한이 가장 적은 수단 동원
2. 국가 → 국가 대유행(확산) 위험 줄이기	**4. 회복과 복원력**
감시와 평가	탄력적인 거버넌스
생의학 연구개발과 생산	설명 책임과 투명성
건강의료 시스템 강화	불평등과 불공정 감소

출처: Phelan & Carlson(2022).

바 넥스트 팬데믹 대응의 과제들

1) 팬데믹에 대한 심리 반응

팬데믹 대응은 예방접종, 거리두기, 개인위생 등 대부분이 교육을 통한 행동 유도·변화로 이루어진다. 교육과 행동 중재의 성패를 결정하는데 심리 요인이 매우 중요한 역할을 한다(Taylor, 2019).

건강에 심각한 위협을 받으면 사람들은 매우 비이성적으로 행동할 수 있다. 어떻게 해서든지 자기를 지키려는 심리가 작동하면 사람들은 돌팔이의 처방을 따르거나 민간요법에 의지하게 된다. 이런 경향은 과거의 여러 유행에서 반복해서 나타난 현상이다. 인플루엔자가 유행하면 마늘 목걸이를 하거나, 2003년 사스 유행 때 김치가 민간요법으로 거론된 것이 좋은 예이다.

감염에 대한 과도한 정서 반응은 그 자체가 치료의 대상이 되기도 하거니와 사회 기능을 저해하는 원인이 되기도 한다. 겁먹은 군중들이 자신들을 지키려고 다른 사람에게 해를 끼치기도 한다. 다른 사람의 집이나 식품 가게를 약탈할 수 있다. 2009년 신종 플루가 유행하던 때는 식품, 소독약, 타미플루를 마구 사들이는 공포 구매(panic buying)가 발생했다. 폭동이 일어나서 특성 그룹을 공격하기도 하는데, 1890년에 인도에서 페스트가 발생하자 영국이 은밀하게 페스트균을 퍼트렸다는 뜬소문을 들은 시민들이 영국 사람들을 공격하는 일이 일어났다.

이러한 심리 반응을 비이성적인 일부 사람들의 일탈이라고 간과해서는 안 된다. 박테리아나 바이러스

는 너무 작아서 맨눈으로 보이지 않는다. 따라서 사람은 병원체에 노출되는 것을 피할 수 있는 다른 기전을 가지게 되었다. 예를 들면, 독한 냄새가 나거나 기침하는 사람을 보면 저절로 메스꺼움을 느끼면서 본능적으로 병원체로부터 멀리 달아나는 행동이다. 이런 행동을 '행동면역체계'라고 하는데, 이 체계는 병원체를 인지하지 못해서 죽는 것을 회피하려는 진화의 결과라고 한다.

감염병은 대개 외지에서 온 사람으로부터 유입되기 때문에 감염병의 위협을 느끼는 사람들은 외지인을 배척하거나 낙인을 찍는다. 사스가 유행할 때 영국인들은 중국 사람들이 가축과 가깝게 살거나 땅에 침을 뱉는 청결하지 못한 습관이 있기 때문이라고 하였다. 심지어 환자에게 노출되는 의료인들도 왕따를 당하는 대상이다. 사스 유행 때 싱가포르에서는 의료인의 49%가 낙인을 경험하였다고 한다.

특정 동물이나 지역을 질병의 이름에 넣으면 사람들이 그 동물과 지역에 낙인을 찍기 쉽다. '돼지' 독감, '아시아' 독감은 돼지와 아시아인에 대한 차별과 편견을 유발할 수 있다. 코로나19를 '우한' 폐렴이나 'China' 바이러스라고 부를 때도 마찬가지다.

2) 확실하지 않은 상황에서 정책 결정

새로운 팬데믹이 발생하면 얼마나 많은 사람이 감염될지, 감염된 사람 가운데 몇 명이 사망할지, 어떤 사람들이 사망할 위험이 큰지, 어떤 치료제가 유효한지, 언제 백신이 개발될지, 마스크를 쓰면 감염이 예방되는지, 학교 문을 닫으면 확산을 늦출 수 있는지를 알아야 한다. 그러나 이러한 질문에 답을 할 데이터 및 근거가 새로 출현한 감염병에는 아직 존재하지 않는다.

근거중심의학은 진단과 치료를 결정하는 새로운 방법론으로, 지난 30년에 걸쳐서 의료 행위에 깊게 뿌리를 내렸다(EBMWG, 1992). 근거중심의학에 따르면 계통적 리뷰, 무작위 대조군 연구, 양측 비교(비교연구), 여러 사례(관찰연구), 개별 사례 순으로 근거의 질이 높다. 근거중심 의학을 따르는 학자들은 학교 문을 닫거나 거리두기 강제 실시와 같은 정책은 근거가 없다고 주장한다. 이런 정책의 근거가 된 모델링, 단편적인 데이터, 그리고 단순한 직감은 엄청난 사회적, 경제적 파급효과를 가져오게 될 정책의 근거로 삼기에는 심각한 결함이 있다고 비판한다. 또한, 공중보건 전문가들이 잘 설계된 연구로 정책 결정에 필요한 데이터 근거를 만드는 데 소홀하다고 비난한다.

한편 공중보건 전문가는 다음과 같이 주장한다(Frieden, 2017). "데이터가 없다고 결정을 미룰 수 없다. 공중보건 위기 상황에서 아무런 결정을 내리지 않으면 여러 사람이 다친다. 무작위 대조군 연구 결과가 항상 최선의 근거는 아니며, 여러 연구 결과를 종합하여 정책 결정을 할 수 있다. 가장 중요한 목표는 실행에 옮기는데 필요한 데이터이다(actionable data)." 환자 개인을 진료하는 임상의학은 "do no harm"이 원칙이고, 확실한 근거가 없는 치료제와 시술은 환자에게 해를 끼칠 수 있어서 이런 상황에서 의사들은 치료하지 않는 쪽을 택한다. 그러나 공중보건학은 "무엇보다 먼저, 예방할 수 있는 사망을 피해라."가 원칙이다.

3) 국제협력: 선진국과 개발도상국의 갈등

팬데믹은 한 나라에서 출현한 감염병이 국경을 넘어서 다른 나라로 퍼져나갈 때 발생한다. 각 나라가 자기 나라에서 출현한 감염병을 조기에 발견하고 확산을 막을 수 있다면 팬데믹을 예방할 수 있다. 감염병의 예방과 관리는 해당 국가의 문제이면서 동시에 국제 사회의 일원인 모든 국가와 모든 세계인의 책임이다.

감염병의 조기 발견과 확산 억제 역량은 선진국과 개발도상국이 서로 다르다. 특히 팬데믹을 일으킬 만한 감염병은 개발도상국에서 출현하는 경우가 많아서, 개발도상국의 감염병이 선진국으로 확산될 위험성이 높다. 따라서 선진국은 개발도상국의 역량을 끌어 올려야 한다고 주장한다. 문제는 여기에 필요한 비용은 누가 어떻게 마련할 것인가이다.

치료제와 백신 개발도 선진국과 개발도상국의 입장이 서로 다르다. 특히 감염병을 일으킨 병원체와 그 유전 정보를 신속히 공유해야 치료제와 백신을 개발할 수 있다. 따라서 선진국은 개발도상국이 감염병 발생 정보를 공유해야 한다고 주장한다. 그러나 개발도상국은 자신들이 제공한 정보를 바탕으로 개발한 치료제와 백신이 너무 비싸서 정작 자기 나라 국민에게 쓰지 못한다고 한다. 또한, 제약 회사가 지적 재산권을 주장하며 기술을 이전하지 않거나 복제 의약품을 못 만들게 하는 처사가 부당하다고 주장한다.

이런 이슈들은 코로나19 팬데믹을 겪으면서 더욱 명확히 드러났다. 국제보건 문제에서 리더십을 발휘해야 할 미국과 영국 등 선진국들은 자국의 정치적 이슈로 인해 세계를 끌고 갈 수 없었고, WHO의 팬데믹 선언은 구속력이 없었다. 선진국들이 자국 우선주의로 백신과 치료제를 선점하고 사재기하는 바람에 개발도상국에서는 2022년에 이르기까지 위험군이나 의료인마저 백신을 제대로 접종받지 못했다.

넥스트 팬데믹에 대비해서 이런 문제를 해결하고자 세계보건기구는 기존의 국제보건법규인 국제보건규약(International Health Regulation)을 개정하거나 새로운 국제 조약(WHO Pandemic Agreement)을 만들려고 노력하고 있다(WHO, 2023c, 2024). 그러나 선진국-개발도상국의 이해가 서로 첨예하게 충돌하고 있어서 이러한 노력이 열매를 맺기까지는 상당한 시일이 걸릴 것으로 보인다(Cullinan, 2024).

사 국가 정책 제언

우리 정부는 2023년 5월에 신종감염병의 대유행을 대비할 중장기 계획을 발표하였다. 이 계획의 3대 목표는 ① 100일·200일 이내에 주요 대응 수단 확보, ② 하루 확진자 100만 명에 대응할 체계 구축, ③ 두터운 취약 계층 보호이다. 이 목표를 달성하기 위해서 정부가 제시한 10대 핵심 과제는 다음과 같다. ① 감시: 감염병 조기 경보를 위한 통합 감시체계 구축, ② 국제협력: 글로벌 보건 안보를 선도하고 협력체계 강화, ③ 진단&역학조사: 30일 이내 특성 분석 및 진단법 개발, ④ 의료 대응: 하루 확진자 100만 명에도 대응 가능한 의료 대응 체계 구축, ⑤ 인력 확보: 대규모 및 장기 유행에도 흔들리지 않는 인력체계 구축, ⑥ 감염 취약 시설·집단: 감염 사각지대 없는 두터운 보호 체계 구축, ⑦ 회복: 피해를 완화하고, 조기에 회복할 수 있도록 지원 체계 정비, ⑧ 기반: 효과적인 위기관리 및 전 사회적 협력 대응을 위한 튼튼한 기반 조성, ⑨ 정보시스템: 고도화된 방역 통합정보시스템 및 빅데이터 플랫폼 구축, ⑩ 연구개발: 백신 치료제 개발 가속화를 위해 R&D 지원 체계 혁신.

정부가 제시한 10대 핵심 과제는 원론적이며 선언적인 내용들인데, 세부 과제를 살펴보면 구체적인 내용이 나와 있다. 그 가운데 과학기술 분야에서 참여할 사업들을 나열하면 다음과 같다. ① 감시 예방: 다양한 보완적 감시 도입(예: 하수에서 미생물 검출), 감염병 종합 지능 플랫폼, ② 대비 대응: 병원체 조기 파악을 위한 기술 및 역량 고도화, 신속한 진단 시약 도입, ③ 기반: 감염병 정보 분석이 가능한 빅데이터 플랫폼 구축, ④ 연구개발: 백신 치료제 신속 개발.

우리나라의 넥스트 팬데믹 대비에서 정부가 우선순위를 높게 두고 반드시 달성해야 할 과제는 다음과 같다.

1) 전략적 위기 소통 기반 마련

앞서 넥스트 팬데믹의 과제에서 살펴본 바와 같이 팬데믹에 대한 심리 반응에 대한 대비는 매우 중요하다. 그리고 이러한 심리 반응은 국민들이 어떤 정보를 접하는지에 따라 크게 좌우된다. 문제는 팬데믹이 시작되면 다양한 언론매체가 전문가들의 서로 다른 견해를 여과 없이 내보내서 매우 혼란스러운 상황이 발생하게 된다. 또한 팬데믹이 진행하면서 초기의 정책을 변경 또는 번복해야 하는 상황도 발생하게 된다. 이 과정에서 정부와 방역 당국이 신뢰를 잃지 않도록 전략적인 위기 소통을 강화해야 하며, 특히 인포데믹(infodemic)에 대한 대응 체계도 마련해 두어야 한다.

2) 법 제도 정비

팬데믹의 공중보건학적 대응의 핵심인 '사회적 거리두기'는 개인의 주거, 이동의 자유를 제한하며, 또 개인의 정보 공개를 요구하게 된다. 예를 들면, 코로나19 유행 시 특정 카페 이름을 공개하거나 백신을 접종하지 않은 학생은 학원에 다니지 못하는 백신패스 제도가 대표되는 사례이다. 이러한 조처가 개인의 자유를 희생해서라도 사회 구성원 다수를 보호한다는 대의명분에 부합한다고 하더라도 법 제도의 규정에 없거나 허용하지 않는 조처를 방역 당국이 시행할 수 없다.

팬데믹이란 평상시에 우리가 돌볼 수 있는 환자 수용 능력을 초과하는 환자가 발생하는 상황이다. 정부가 하루 100만 명을 돌볼 수 있는 의료체계를 구축하겠다고 선언하였는데, 이런 체계를 구축하는데 막대한 예산이 소요될 뿐만 아니라, 그렇게 구축한 체계를 유지하는 일은 비용 효과 면에서도 실행하기 어렵다. 따라서 수용 능력을 초과하는 환자가 발생하였을 때 우리가 가지 의료 자원을 최대한 효과적으로 사용하는 것이 매우 중요하다. 예를 들면 응급실에 병상은 10개인데, 환자 20명이 왔다면 그 가운데 어떤 환자 10명을 받을 것인가라는 문제이다. 의료 자원의 효율적 이용은 1차 의료기관(동네병원)-2차 의료기관(중소병원)-3차 의료기관(대형병원) 사이에 환자를 어떻게 나누어 볼 것인가라는 문제에서도 마찬가지이다. 팬데믹이 발생하기 이전에 환자의 분류(triage)와 이송 체계에 관련된 구체적인 규정을 마련해 두지 않으면 팬데믹이 발생하였을 때 의료 자원을 효율적으로 이용할 수 없다.

3) 과학 정책 자문 제도 도입

「감염병의 예방 및 관리에 관한 법률」 제4조 및 제5조에 따르면 감염병 유행을 예방하고 관리할 책임은 국가와 지방자치단체의 장에게 있다. 코로나19 유행 초기에 특정 종교 단체를 중심으로 한 지역에서 환자가 다수 발생하였을 때 해당 지자체는 모든 확진자를 입원시키도록 조치하였다. 그 결과 가벼운 감염으로 입원이 필요 없는 사람까지 입원하여 곧 시내 병원의 병실이 포화되어 정작 입원 치료가 필요한 환자들을 입원시키지 못하는 상황이 발생하였다. 이러한 사태가 재발하지 않도록 하려면 지방자치단체는 물론이고 중앙 정부에 과학에 기반한 정책을 자문할 '과학정책자문관'이 필요하다. 영국의 Chief Scientific Officer, Chief Scientist 제도가 참고할 만하다.

아 맺음말

광둥에서 출현한 사스바이러스(SARS-CoV-1)가 홍콩을 거쳐 전 세계로 확산된 2003년 이후 세계보건기구와 각국의 방역 당국은 다음 팬데믹에 대비해 왔다. 그러나 2019년에 우한에서 출현한 사스바이러스(SARS-CoV-2)가 전 세계로 확산하는 것을 막는데 실패하였다. 그러나 우리 사회는 불과 1~2년 만에 팬데믹을 모두 잊은 듯하다. 코로나19 대응에서 겪은 실패를 되풀이하지 않으려면 우리는 지금 당장 넥스트 팬데믹을 대비해야 한다.

참고문헌

장일순(2016). 나락 한 알 속의 우주, 녹색평론사.

Achtman, M., Zurth, K., Morelli, G., Torrea, G., Guiyoule, A. & Carniel, E.(1999). "Yersinia pestis, the cause of plague, is a recently emerged clone of Yersinia pseudotuberculosis", Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol.96 No.24, pp. 14043-14048.

Bell, E., Boehnke, P., Harrison, T. & Mao, W.(2015). "Potentially biogenic carbon preserved in a 4.1 billion-year-old zircon", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States, Vol.112 No.47, pp. 14518-14521.

Black, F. L.(1966). "Measles endemicity in insular populations: Critical community size and its evolutionary implication", Journal of Theoretical Biology, Vol.11 No.2, pp. 207-211.

Bush, L. & Perez, M.(2012). "The Anthrax Attacks 10 Years Later", Annals of Internal Medicine, Vol.156 No.1 Part 1, pp. 41-44.

CDC(1981). Pneumocystis pneumonia - Los Angeles, Morbidity and Mortality Weekly Report, Vol.30 No.21, pp. 1-3.

EBMWG: Evidence-Based Medicine Working Group(1992). "Evidence-based medicine. A new approach to teaching the practice of medicine", JAMA, Vol.268 No.17, pp. 2420-2425.

Frieden, T. R.(2017). "Evidence for Health Decision Making - Beyond Randomized, Controlled Trials", New England Journal of Medicine, Vol.377 No.5, pp. 465-475.

Gates, B.(2022). How to Prevent the Next Pandemic, Knopf.

Irwin, A.(2023). "Polio is on the brink of eradication. Here's how to keep it from coming back", Nature, Vol.623 No.7988, pp. 680-682.

Lee, K. & Dodgson, R.(2000). "Globalization and Cholera: Implications for Global Governance", Global Governance, Vol.6 No.2, pp. 213-236.

Meselson, M., Guillemin, J., Hugh-Jones, M. Langmuir, A., Popova, I., Shelokov, A. & Yampolskaya, O.(1994). "The Sverdlovsk Anthrax Outbreak of 1979", Science, Vol.266 No.5188, pp. 1202-1208.

Mulchandani, R., Wang, Y., Gilbert, M. & Van Boeckel, T.(2023). Global trends in antimicrobial use in food-producing animals: 2020 to 2030. PLOS Glob Public Health, Vol.3 No.2, e0001305.

Murray, C. J. L., Ikuta K. S., Sharara, F., Swetschinski, L. ··· Dolecek, C. & Naghavi M.(2022). "Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis", The Lancet, Vol.399 No.10325, pp. 629-655.

Pallen, M.(2018). The last days of smallpox: Tragedy in Birmingham, Independently published, Cambridge University Press.

Phelan, A. L. & Carlson, C. J.(2022). "A treaty to break the pandemic cycle", Science, Vol.377 No.6605, pp. 475-477.

Rozo, M. & Gronvall, G. K.(2015). "The Reemergent 1977 H1N1 Strain and the Gain-of-Function Debate", mBio, Vol.6 No.4.

Sachs, J., Karim, S., Aknin, L., Allen, J., ··· Lazarus, J. & Colombo, S.(2022). "The Lancet Commission on lessons for the future from the COVID-19 pandemic", The Lancet Vol.400 No.10359 pp. 1224-1280.

Smolinski, M. S., Hamburg M. A. & Lederberg, J.(2003). Microbial Threats to Health: Emergence, Detection, and Response, DC: National Academies Press, Institute of Medicine, Board on Global Health, Committee on Emerging Microbial Threats to Health in the 21st Century.

Taylor, S.(2019). The psychology of pandemics, Cambridge Scholars Publishing.

Wolfe, N., Dunavan, C. & Diamond, J.(2007). "Origins of major human infectious diseases", Nature, Vol.447 No.7142, pp. 279-283.

Wolfe, N., Dunavan, C. & Diamond, J.(2012). ORIGINS OF MAJOR HUMAN INFECTIOUS DISEASES: A16 Improving Food Safety Through a One Health Approach: Workshop Summary.

Zhu, T., Korber, B., Nahmias, A., Hooper, E., Sharp, M. & Ho, D.(1998). "An African HIV-1 sequence from 1959 and implications for the origin of the epidemic", Nature, Vol.391 No.6667, pp. 594-597.

김재명(2024). 김재명의 전쟁범죄 이야기- 생체실험과 세균 전쟁, 프레시안 연재, https:// www.pressian.com/pages/articles/2024011222304426542에서 2024. 9. 9. 인출.

Cullinan K.(2024). Pandemic (Dis) Agreement Talks Limp into Extra Time, Health Policy Watch, Retrieved September 9, 2024 from https://healthpolicy-watch.news/pandemic-dis-agreement-talks-limp-into-extra-time.

DOJ: The United States Department of Justice(2010). Amerithrax Investigative Summary, Retrieved September 9, 2024 from https://www.justice.gov/ archive/amerithrax/docs/amx-investigative-summary.pdf.

FIFA(2022). FIFA World Cup Qatar 2022™ in numbers, Retrieved September 9, 2024 from https://publications.fifa.com/en/annual-report-2022/tournaments-and-events/fifa-world-cup-quatar-2022/fifa-world-cup-qatar-2022-in-numbers.

Richter, F.(2020). The Olympics Attract Millions of Spectators, Statista, Retrieved September 9, 2024 from https://www.statista.com/chart/21046/number-of-tickets-sold-for-summer-olympic-games.

WHO: World Health Organization(2023a). Preparedness and resilience for emerging threats, Retrieved September 9, 2024 from https://cdn.who.int/media/docs/default-source/pret/who_pret_module_1_14042023_draft.pdf?sfvrsn=b1b3306e_2&download=true.

WHO: World Health Organization(2023b). One Health, Retrieved September 9, 2024 from https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/one-health.

WHO: World Health Organization(2023c). Governments make progress towards agreeing amendments to the International Health Regulations (2005), Retrieved September 9, 2024 from https://www.who.int/news/item/07-10-2023-governments-make-progress-towards-agreeingamendments-to-the-international-health-regulations-(2005).

WHO: World Health Organization(2024). Revised draft of the negotiating text of the WHO Pandemic Agreement, Retrieved September 9, 2024 from https://apps.who.int/gb/inb/pdf_files/inb9/A_inb9_3-en.pdf.

PART 5

9 소결

신종 및 변이 바이러스의 출현으로 인한 감염병의 세계적 대유행, 즉 팬데믹은 현대 사회가 직면한 가장 심각한 보건 위기 중 하나이다. 교통과 통신의 발달로 인한 세계화의 진전, 기후 변화와 도시화 등 인류 활동으로 인한 생태계 교란 등으로 인해 신종감염병의 발생 빈도는 갈수록 높아지고 있으며, 국경을 넘나드는 빠른 전파 속도로 인해 단시간 내에 전 지구적 재앙으로 비화될 수 있는 상황이다. 2019년 말 중국 우한에서 발생한 코로나19 사태는 21세기 들어 인류가 맞닥뜨린 가장 큰 팬데믹으로서 감염병이 초래할 수 있는 파괴적 영향력을 확실히 보여주었고, 이를 계기로 향후 발생할 수 있는 미래의 팬데믹에 대한 선제적이고 체계적인 대비책 마련이 그 어느 때보다 절실해졌다.

신·변종 감염병의 위협에 효과적으로 대응하기 위해서는 크게 네 가지 분야, 즉 기초 면역학적 연구, 신속 정확한 진단 기술, 치료제 개발과 확보, 그리고 예방 백신 기술의 고도화가 유기적으로 결합되어야 한다. 무엇보다 감염 초기 단계에서 병원체의 숙주 침입과 증식, 그에 대응하는 선천 및 적응면역반응의 작동 기전에 대한 면밀하고 심층적인 이해가 선행되어야 하는데, 이를 위해 감염 및 면역 연구에 특화된 동물 모델 구축, 단일 세포 수준에서의 면역세포 기능 및 신호전달 체계 규명, 병원체 특이적 T 세포 및 항체 면역 분석, 사이토카인 네트워크 및 면역조절 기전 연구 등 기초 면역학 연구가 활발히 이루어질 필요가 있다. 이러한 기초연구를 통한 병인 기전 및 숙주 방어 기제의 규명은 감염병의 조기진단과 치료, 예방을 위한 중개 연구로 신속히 연계되어야 하며, 정부와 산업계의 전폭적인 연구개발비 투자 확대로 뒷받침될 필요가 있다.

감염병의 확산 방지와 피해 최소화의 핵심 열쇠는 조기진단에 있다. 고위험 신종 바이러스 감염을 민감하고 특이적으로 검출할 수 있는 현장 적용형 진단 플랫폼 기술 구축이 시급한 상황에서, 유전자증폭법에 기반한 분자진단법의 고도화는 물론, 신속한 현장 검사에 최적화된 핵산추출법과 등온증폭법 개발에 박차를 가할 필요가 있다. 여기에 CRISPR/Cas 기술을 접목한 혁신적 정밀진단법, 초고속·대량검체 처리가 가능한 현장형 자동화 진단 시스템 개발에도 역량이 집중되어야 하며, 임상 진단의 정확도와 신뢰도를 높이기 위한 표준물질 확립과 숙련도 평가사업 확대, 그리고 시퀀싱 기반의 변이주 조기 탐지 및 역학 조사 지원을 위한 유전체 감시망 구축 또한 필수적이다.

감염 초기에 적용할 수 있는 치료제의 신속한 개발은 중증으로의 진행과 사망을 막는 데 결정적이다. 이를 위해 광범위 항바이러스제 개발에 주력할 필요가 있다. 특히 바이러스의 세포 침투와 복제 과정에 관여하는 단백질의 구조를 분석하고, 이를 토대로 저해제를 발굴하기 위한 구조 기반 약물 설계에 집중해

야 한다. 코로나19 사태에서 주목을 받은 렘데시비르와 같은 바이러스 RNA 합성 효소 저해제 외에도 바이러스의 숙주 세포 부착과 막 융합에 관여하는 스파이크 단백질이나 바이러스 입자의 조립과 방출에 필수적인 단백질분해효소 등 다양한 약물 표적에 대한 연구도 동시에 수행되어 약물 내성 병원체에 대한 대응도 이루어져야 한다. 또한 최근 전 세계적으로 활발히 수행되고 있는 AI 기반의 약물 스크리닝과 약물 재창출 플랫폼 기술 개발에도 투자가 확대되어야 한다. 아울러 중증 환자에서 주요 사망 원인이 되는 사이토카인 폭풍과 과잉 염증반응 제어를 위한 면역조절제 개발, 그리고 고효능 중화항체 라이브러리의 확보와 신속한 치료용 항체 개발을 위한 면역 레퍼토리 분석 및 단일세포 항체 분리기술 고도화에도 관심을 기울여야 한다.

궁극적으로 팬데믹을 사전에 예방하고 종식시키기 위해서는 안전하고 효과적인 백신 개발이 필수 불가결하다. 전통적인 불활화 및 약독화 생백신에 더하여 재조합 단백질, 바이러스 벡터, 핵산 백신 등 다양한 플랫폼 기술을 활용한 폭넓은 백신 후보물질 라이브러리의 확보와 비상시 신속 개발·승인·공급 체계 구축이 요구되는데, 특히 최근 돌파구로 부상한 mRNA 백신 기술은 안전성과 효능의 극대화는 물론, 다양한 변이주 대응을 위한 다가 백신 조성물 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대를 모으고 있다. 중화항체 유도에 특화된 항원 발굴을 위한 구조생물학적 연구와 AI 기반 역공학적 항원 설계 역량 또한 한층 강화되어야 하며, 단순 바이러스 중화에 그치지 않고 스펙트럼이 넓은 세포독성 T 세포 반응과 기억 면역을 유도할 수 있는 T 세포 백신에 대한 기초-중개 연구 역시 활성화가 필요하다. 여기에 감염병 대응 역량이 취약한 개도국 현지의 백신 제조 글로벌 공급망 확보를 위한 국제사회의 협력과 연대의식 제고도 뒤따라야 할 것이다.

이러한 기초-중개-임상 연구를 아우르는 감염병 극복 기술의 개발·실용화를 위해서는 정부-기업-학계-연구계의 민-관-학-연 협력이 필수적인데, 정부는 국가 어젠다로서의 감염병 대응에 최우선 순위를 부여하고, 연구개발 예산의 획기적 증액, 신속한 긴급사용승인 및 보험수가 적용 등 제도적 지원책을 총동원할 필요가 있다. 기업은 감염병을 새로운 시장 기회로 인식하고 과감한 투자로 기술경쟁력을 높여야 할 것이며, 학-연은 전략적 기초연구와 현장밀착형 중개 임상 연구로 실용화에 속도를 낼 필요가 있다. 아울러 AI·빅데이터, 구조생물학 등 첨단기술과의 융복합연구, 개방형 협력 네트워크 강화 또한 시급한 과제이다.

팬데믹 대비 기술 개발과 더불어 인수공통감염병의 근원적 예방을 위한 노력도 병행되어야 한다. 이를 위해서는 인간과 동물, 환경의 건강을 하나로 보는 원헬스 패러다임으로의 전환이 무엇보다 중요하다. 인간의 건강은 동물과 환경의 건강으로부터 결코 분리될 수 없다는 인식하에, 인간-동물-환경 간 상호작용에 대한 다학제적이고 초학제적인 연구와 정책 수립이 이루어져야 한다. 구체적으로는 산림 파괴와 서식지 훼손 방지를 통한 생태계 건강성 회복, 야생동물 밀렵과 불법 거래 근절을 위한 국제공조 강화, 공장식 축산의 밀집 사육 관행 개선과 항생제 오남용 방지를 위한 제도 정비 등 다각도의 정책적 개입이 요구된다. 이와 함께 인수공통감염병의 주요 매개체인 설치류와 야생동물, 가축에 대한 상시 감시와 빅데이터 구축, 병원체 유전체 정보 공유와 계통 분석을 통한 병원체 기원과 진화 추적 등 협력적이고 다학제적인 연구 또한 더욱 활성화되어야 한다. 원헬스 정책의 성공적 안착은 신종 팬데믹의 발생 자체를 억제하는 근원적 처방이 될 수 있을 뿐 아니라, 기후 위기 대응, 생물 다양성 보전, 식량안보 확보 등 인류 공통의 문제 해결에도 기여할 수 있을 것이다.

코로나19 팬데믹은 신종감염병의 위협이 어제오늘의 일이 아님을 일깨워 주는 계기가 되었다. 문명의 발달과 세계화의 진전은 역설적으로 미지의 병원체 출현과 전 지구적 확산의 위험을 높이고 있다. 그러나 동시에 우리에겐 이러한 위기를 극복할 수 있는 강력한 무기, 과학기술이 있다는 사실 또한 잊어서는 안 된다. 감염 및 면역 기전의 심층적 규명, 신속 정확한 진단법 개발, 항바이러스제와 치료용 항체의 신속 개발과 실용화, 차세대 플랫폼 백신 기술 고도화 등을 통해 미래의 팬데믹 발생 초기부터 선제적이고 체계적으로 대응할 수 있는 역량을 갖추어야 한다. 과학계와 산업계, 정부와 시민사회가 긴밀히 소통하고 협력하는 가운데 감염병 대응을 위한 과학-정책-사회 간 선순환 고리를 구축하고, 개별 학문 분야와 부처의 칸막이를 허물어 다학제적 융복합연구와 부처 간 협업을 활성화해야 한다. 나아가 백신 및 치료제의 형평적 배분과 의료 취약국 지원을 위한 글로벌 연대와 협력 강화, 공동의 위기 대응을 위한 국제규범과 거버넌스 체계 정비 등 감염병 대응을 둘러싼 사회·경제적, 외교적, 법·제도적 여건과 환경의 개선도 요구된다.

코로나19는 인류가 맞닥뜨린 수많은 팬데믹 중 하나일 뿐, 앞으로도 새로운 감염병의 위협이 끊임없이 나타날 것이다. 하지만 우리는 이번 위기를 통해 얻은 귀중한 교훈을 바탕으로 과학과 사회, 정부가 협력하여 미래의 감염병 위협에 보다 지혜롭고 용기 있게 대처해 나갈 수 있을 것이다. 감염병의 공포로부터 자유로운 안전하고 건강한 세상은 결코 요원한 꿈이 아니다. 과학기술의 발전과 인류 보편의 연대의식을 바탕으로, 우리는 그 꿈을 향해 한 걸음씩 나아갈 수 있으리라 확신한다. 함께 힘을 모아 인류의 건강과 안녕을 지켜내는 것이 우리에게 주어진 시대적 소명일 것이다.



PART 6

결 론

집필

김영배 KAIST 경영대학 명예교수

미래 30년을 대비하는

과학기술전략

한림연구보고서 155

THE KOREAN ACADEMY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

PART 6

결론

앞서 서론에서 언급했듯이 한국과학기술한림원 기획·정책위원회에서는 향후 30년을 바라보고 미래에 우리나라, 나아가 우리 인류가 마주하게 될 3가지 변화로 인공지능의 확산에 따른 활용과 공존, 출산율 감소와 노화로 인한 초고령사회에 대한 대비, 그리고 넥스트 팬데믹의 반복적 발생에 대한 대비를 선정했다. 사실 이 3가지 변화는 어느 정도 '확정된 미래'라고 할 수 있으며, 이미 우리 경제, 사회, 문화, 교육, 환경, 의료 및 안보 등에 전방위적으로 영향을 미치기 시작하였고 앞으로 예측하기 어려울 만큼 엄청난 파급효과를 가져올 것으로 여겨진다.

이러한 변화를 피할 수 없다면, 우리 삶의 행복과 발전을 극대화하고 부작용을 최소화하기 위해 어떤 준비들이 필요할까? 특히 과학기술은 우리에게 어떤 해결책을 제시할 수 있으며 어떻게 도움을 줄 수 있을까? 그러려면 과연 어떤 정부 정책이나 제도적인 보완이 필요할까? 이 보고서에는 바로 이러한 질문에 답하기 위한 한국과학기술한림원 회원들과 관련 분야 전문가들의 노력이 담겨 있다고 할 수 있다.



앞서 3장에서 5장까지 3가지 변화 각각에 대한 예측 분석과 이를 대비하기 위한 기술 솔루션 및 정책 방안을 제시하였다. 사실 각 장에서 제안된 3가지 변화와 대처 방안 간에는 서로 밀접한 상호 관계가 존재한다. 예를 들어, 저출산과 인구 고령화로 인한 과학기술인력의 부족은 AI의 적극적인 활용으로 극복할 수 있으며, AI로 인한 일자리 감소에 대한 우려보다 AI 교육과 역량을 강화하여 생산성과 경쟁력을 획기적으로 높일 수 있는 정책이 필요하다. 또한, 넥스트 팬데믹을 예측하고 백신 개발과 같은 기술적 솔루션을 준비하는 것은 초고령사회에서 더욱 절실한 과제이며, 그럴수록 AI는 더 중요한 역할을 할 수밖에 없다.

다시 말하면 이 3가지 변화를 대비하는 개별 정책 간 보완을 통해 시너지를 낼 수 있도록 이를 아우르고 통합하는 정책 패러다임이 필요하다. 따라서 마지막 결론 파트에서는 개별적인 정책 대안보다는 과연 우리나라 과학기술정책의 패러다임이 근본적으로 어떻게 변해야 하는지 고찰해 보고자 한다.

우리나라는 1960년대 이후 가난을 극복하고 추격자로서의 이점을 극대화하는 전략으로서 정부의 전폭적인 지원하에 선별된 국가 대표기업들(national champions)이 선진국의 앞선 기술과 제품을 재빨리 도입 학습하여 더 저렴하고 좋은 기술과 제품을 글로벌 시장에 수출함으로써 빠른 시간에 괄목할 만한 경제성장을 이루어왔다. 물론 이 과정에서 정부의 과학기술 및 산업정책이 주도적인 역할을 했고, 전반적인 우리 교육 수준이나 과학기술 연구 인프라와 역량 역시 선진국에 버금가는 수준으로 발전해 왔다. 그럼에도 불구하고 이러한 과거의 성공 방식은 우리 사회에 여러 부작용을 낳고 있으며, 우리나라가 경제 선진국과 과학기술 선도국으로 도약하는 과정에서 크고 작은 걸림돌이 되고 있는 것도 사실이다.

이제 이를 극복하고 향후 30년의 미래를 대비하기 위해 우리에게는 제2장에서 제시된 것처럼 새로운 미션지향적 과학기술정책의 패러다임이 필요하다. 초고령사회의 도래와 AI 기술의 확산, 또 다른 팬데믹의 발생과 같은, 거의 확실시되고 장기적으로 광범위하게 우리 사회에 엄청난 영향을 미치는 변화를 해결하기 위해 우리는 과거와 같은 정부 주도의 단기성과주의와 top-down의 push형 정책 추진에서 벗어나야 한다. 이러한 변화에 대응하기 위해 명확한 전략적 목표와 방향성을 갖되, 장기적인 안목에서 다양한 이해관계자의 참여와 정당성을 획득한 pull형 정책이 수립되어야 한다. 또한 정책의 일관된 집행을 위해 관련 부처 간 그리고 정책결정자와 집행자 간의 수평적·수직적 조직이 이루어지도록 하여 그 실행 결과가 지속적으로 피드백되는 학습 과정을 통해 보다 나은 방향으로 진화와 발전이 가능한 패러다임으로 전환되어야 한다. 구체적으로 이러한 새로운 미션지향적 과학기술정책 패러다임을 위한 5가지 방안을 제안하고자 한다.

지속적으로 진화 학습하는 정책 실행 메커니즘

과거를 돌이켜 보면 우리 사회는 장기적인 관점에서 단기성과에 연연하지 않고 일관되게 연구개발에 몰두할 수 있는 사회적·제도적 환경이 미흡했다고 할 수 있다. 특히 미래 사회에 필요한 과학기술의 방향이 정권의 이념이나 공약에 따라 달라지는 경우 이러한 장기적 관점의 연구개발 활동이 갑작스레 중단되거나 축소됨으로써 시간과 자원의 낭비 같은 비효율성이 발생할 뿐만 아니라, 아예 원래 의도한 목표 달성 자체가 어려워질 수도 있다. 우리는 이미 기후변화에 대처하기 위한 친환경 에너지 정책 중 원자력 같은 대안을 배제함으로써 생긴 혼란과 후과를 경험하였다.

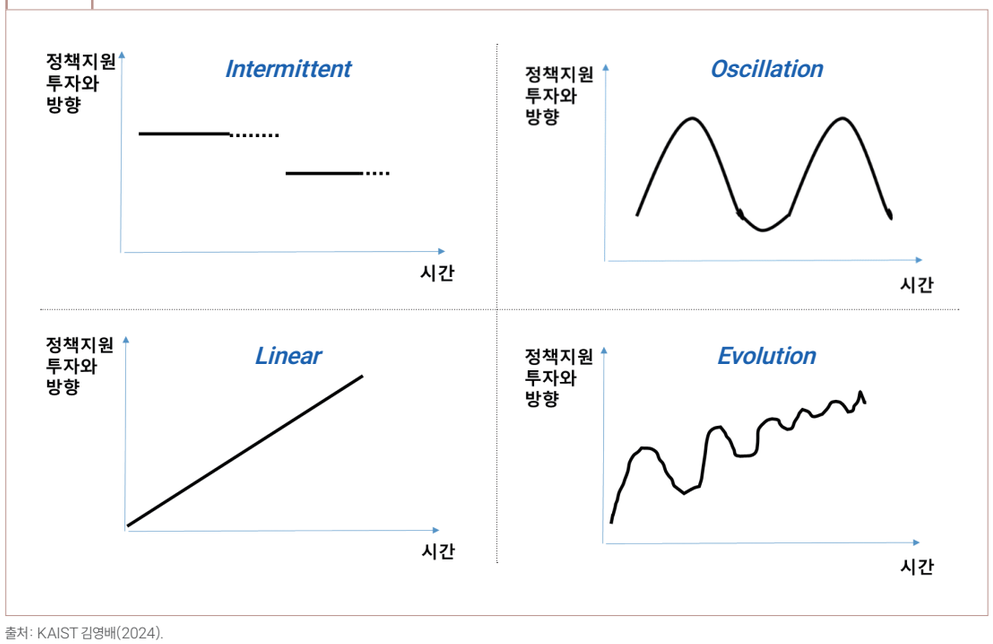
물론 정권에 따라 과학기술정책의 목표와 방향이 달라질 수 있지만, 그 변화는 합리적인 근거와 과학기술 전문가들의 공감대가 수렴되는 과정이 필요하다. 특히 어느 정도 '확정된 미래'라고 할 수 있는 3가지 변화에 대처하는 과학기술정책은 장기적으로 일관되게 추진해야만 효과적으로 대처할 수 있기 때문에 정치적 변화에 상관없이 지속적으로 연구개발 예산이 확보되고 사업이 지속될 수 있는 구조가 필요하다. 또한, 이러한 장기 연구개발이 효과적으로 추진되기 위해서는 명확한 목표와 마일스톤(milestone)이 수립되어야 하며, 동시에 과학기술의 발전과 사회 변화의 학습 과정을 통해 유연하게 진화될 수 있어야 한다.

과학기술정책 추진 과정에는 4가지 경로가 있을 수 있는데 ① 목표와 추진이 일시적 단속적(intermittent)으로 이루어지거나 ② 진동(oscillation)하는 경로, ③ 목표와 계획에 따른 선형적인(linear) 정책 추진, 그리고 ④ 목표와 계획은 제시되어 있지만 추진 과정에서 학습한 결과에 따라 탄력적으로 진화(evolution)하는 경로가 그것이다. 예를 들어 특정한 시기의 정책결정자 등에 의해 집중적으로 추진되다가 정권이 바뀌면서 흐지부지되는 단속적인 경우라든지 혹은 아예 다른 방향으로 추진되는 것이 반복(oscillation)되는 경우를 우리는 종종 보아왔다. 적어도 앞으로는 단속형이나 진동형의 R&D 정책 추진으로 인한 반복 실수를 회피해야 한다.

또한, 분명한 목표를 설정하고 이를 달성하기 위한 최선의 정책 방향과 수단을 선택해서 계획대로 일관되게 실행하는 선형적 정책 추진이 이론적으로는 합리적으로 여겨질 수 있다. 그러나 기술의 발전과 사회경제적 변화의 불확실성이 높은 경우 현실적으로 이러한 선형적인 정책 추진은 바람직하지 않을 뿐 아니라 실행이 가능하지도 않다(Mintzberg, 1994).

이처럼 변화를 예측하기 힘들거나 불확실성이 높은 경우 오히려 주기적으로 그 결과를 평가하여 원래 의도와 다른 점과 그 이유를 파악하고, 지속적으로 수정 보완하는 진화적인 방법이 현실적으로 더 나은 성과를 낼 수 있다. 새로운 미션지향적 과학기술정책의 특징 중의 하나가 바로 진화와 학습이기 때문이다. 우리는 인구감소와 고령화, AI의 확산, 그리고 넥스트 팬데믹의 반복적인 발생이 미래 우리 사회에 엄

그림 6.1 과학기술정책 추진 과정의 4가지 경로



출처: KAIST 김영배(2024).

청난 영향을 줄 것으로 확신하지만 과연 어떤 과정을 거쳐 어느 정도의 파급효과를 가져올지 정확하게 예측하기는 어렵다. 따라서 시간이 지남에 따라 발생하는 예기치 않은 과학기술과 사회경제적 변화를 신속하게 학습하여 수정 보완하는 탄력성을 가진 정책 실행 메커니즘이 필요하다. 예를 들어 단기와 장기 정책과의 연동 메커니즘을 설계함으로써 일정 주기로 관련 기술개발 추세와 연구개발 성과의 장기적인 목표에 대한 기여도를 평가하고 이러한 학습 내용이 피드백되어 정책이 지속적으로 수정 보완되는 방식이 필요하다.

물론 이 과정에서 정책결정자의 미래에 대한 비전과 의지가 중요하다. 제2장에서 언급되었듯이 정부는 승자를 선택하기보다 미래 방향에 대한 의지를 선택해야 하며 이를 위해 정부 역시 기업가정신(entrepreneurship)이 필요하다. 기업가형 국가(entrepreneurial state)란 투자의 불확실성이 큰 미래 신기술 분야에서 실패에 대한 위험을 기꺼이 감수하고 과감한 투자를 담당하는 정부를 말한다(Mazzucato, 2013). 예를 들어 1990년대 초 AI의 두 번째 혹한기가 도래했을 때 당시 캐나다 정부는 미래 AI 기술 발전과 그 중요성에 대한 인식과 의지를 보여주었다. AI 연구비와 인재에 대한 수요가 줄어든 상황에서도 캐나다는 장기적인 안목으로 이 분야의 최고 전문가(예를 들어, AI 3대 대가라 불리는 제프리 힌튼(Geoffrey Hinton) 교수와 요슈아 벤지오(Yoshua Bengio) 교수 등)를 캐나다 대학으로 유치하고 또 차세대 전문가(오픈AI의 공동 창업자인 일리야 수츠케버(Ilya Sutskever), 코히어(Cohere) 창업자인 에이단 고메즈(Aidan Gomez), 일론 머스크(Elon Musk)가 설립한 xAI의 지미 바(Jimmy Ba) 토론토대학교 교수 등)를 육성함으로써 심층학습(deep learning) 방식의 AI 혁신을 주

도하여 AI 강국으로 등극하였다. 이는 기초과학 육성을 위해 고등연구재단(Canadian Institute for Advanced Research, CIFAR)을 설립하고 여기에서 10여 년 이상 아무런 성과가 없었음에도 불구하고 AI 연구비를 확대하는 등 꾸준한 투자를 통해 인재 육성과 연구개발을 진행한 결과였으며 지금도 범국가 인공지능 전략(Pan-Canadian Artificial Intelligence Strategy)을 통해 범정부적으로 AI 기술 개발과 확산을 위해 체계적이고 일관된 정책을 추진하고 있다(김남영, 2023).

정부와 민간을 아우르는 통합적인 지배구조(governance structure)의 구축

새로운 미션지향적 과학기술정책의 조정과 집행을 위해서는 범정부적인 추진 체계가 필요할 뿐 아니라 대학이나 연구소, 산업체, 그리고 관련 사용자와 사회단체 등 민간 전문가의 참여와 광범위한 이해관계자와의 소통과 협력도 필요하다. 제2장에서 논의한 바와 같이 다양한 이해관계자의 참여와 중첩된 거버넌스는 선진국의 새로운 미션지향적 과학기술정책의 성공 요건 중 하나이다.

우리 정부도 최근 4대 전략기술위원회를 통해 관련 부처가 참여하여 협업할 수 있는 거버넌스를 구축하고 있는데, 여기에 관련 민간 부문 등 전문가의 참여와 전략 분야별 R&D 예산 수립과 집행, 인사 및 사업 운영에 이르기까지 권한과 책임이 강화될 필요가 있다.[1]

범부처적인 소통 및 협력과 함께 장기적 관점에서 미션을 달성하기 위해서는 기술적 지식과 리더십을 가진 적임자를 정부나 국내외의 대학, 연구소나 민간 기업 등에서 소속 기관과 상관없이 책임자로 선정하여 필요한 권한과 책임을 부여하는 것도 필요하다. 책임자에게는 미션 달성을 위한 구체적인 장단기 목표와 마일스톤에 대한 제시와 합의, 그리고 필요한 예산과 인사에 관한 권한 및 책임을 확실히 부여해야 한다. 여기에는 여러 세부 과제와 사업을 기획하고 가장 적합한 전문가들을 선발할 수 있는 권한과 이들에 대한 처우 및 보상을 책임자가 자율적으로 결정할 수 있는 권한을 포함한다.[2]

1 예를 들어, 12대 전략기술 추진에 전략기술 특별법을 적용해 새로운 임무(미션)중심 R&D 집중지원체계를 도입하고 있다. '전략연구사업(MVP)'을 통해 예산 활용, 사업기관 지정, 기업 매칭부담 완화 등을 폭넓게 지원하고, 출연연구기관 간의 벽을 넘는 개방형 협력체계인 국가과학기술연구실(NSTL)을 도입하며, 전략기술 분야별 범부처 로드맵을 통해 주요 임무 및 시한별 목표 달성에 대한 성과를 통합 관리한다고 발표하였다.

2 우리도 한국형 DARPA(한계도전 R&D 프로젝트) 방식을 도입하여 책임프로젝트 총괄(PM)에게 사업의 기획과 운영뿐 아니라 명확한 목표 수립과 방향 전환의 자율성, 전폭적인 예산지원, 그리고 관료제 타파를 통해 권한과 책임을 강화하겠다고 발표하였다. 이러한 시도를 통해 책임자의 권한과 책임이 강화되고 범부처적인 조정과 통합이 이루어지길 기대한다.

또한 미션을 추진하는 조직은 대학이나 연구소의 관련 전문가와 산업체, 그리고 사용자와 관련 지역사회단체 등 광범위한 이해관계자의 참여를 유도하고 이들과 긴밀한 소통과 협력을 위한 파트너십 관계를 유지하는 것도 필요하다. 여기에는 관련 주제별로 온라인 네트워크를 구축하고 플랫폼과 커뮤니티와의 연계를 통한 의견 수렴 및 공감대를 형성하며 나아가 혁신적인 아이디어 구상 및 실험적 시도와 피드백 활동을 포함하는 것도 필요하다.

결국 새로운 미션지향적 과학기술정책의 수립과 실행을 위한 지배구조는 불확실한 환경에서도 원래의 미션을 달성하기 위해 장기적인 관점에서 정책 방향이 일관성을 갖고 진화 학습(evolutionary process)될 수 있도록, 범부처적인 수평적 협력 과정(horizontal collaboration process)이 필요할 뿐 아니라, 정책으로 영향을 받게 되는 대학, 연구소, 산업체, 그리고 최종 사용자 및 관련 시민단체와의 지속적인 소통과 피드백 활동을 통해 수정, 변화, 혁신하는 역동적 과정(dynamic process)을 포함해야 한다. 이처럼 시간적, 공간적으로 입체적인 상호 작용이 일어날 수 있도록 설계된 지배구조의 구축이야말로 미션지향적 과학기술정책을 위한 핵심과제라 할 수 있다.

기술개발을 넘어 이를 확산하고 사업화하는 산업생태계의 구축

앞서 어느 정도 확정된 미래라고 할 수 있는 3개 과제에 대한 대비는 우리 삶의 질을 높이는 방법일 뿐 아니라 미래 우리나라 경제성장의 새로운 동력이 될 수 있다고 하였다. 이러한 변화는 비단 우리나라뿐만 아니라 해외 대부분의 국가에서도 일어나는 미래이기 때문이다. 고령화 사회의 도래와 AI의 확산, 그리고 넥스트 팬데믹의 발생은 우리 삶에 심각한 위협을 주기도 하지만, 동시에 이러한 문제를 해결하기 위해 필요한 새로운 제품이나 서비스 등에 대한 수요를 발생시킴으로써 신흥 산업 즉, 새로운 성장 산업을 창출할 수 있다.

따라서 단순히 미션의 범위가 연구개발에서 그치지 않고, 개발된 기술이 확산되어 우리 사회의 문제를 해결하고 동시에 사업화되기 위한 산업생태계와 가치사슬 공급망의 구축을 처음부터 염두에 두는 것이 필요하다. 바로 앞서 제안한 정부와 대학, 연구소, 기업과 사용자 및 민간사회단체를 아우르는 조직과 네트워크 혹은 플랫폼이 필요한 이유다. 이는 사회적 수용성을 높이는 방법일 뿐 아니라 관련 산업생태계의 형성과 가치사슬망(value chain network)의 구축에도 필요하기 때문이며, 새로운 스타트업의 창업 및 기존 기업과의 비즈니스 네트워크 형성, 나아가 해외 관련 기관이나 기업과의 전략적 제휴 등 광범위한 미션의 고려가 필요하다.

중국의 경우 국가전략기술개발을 위한 정책 수립 과정에서 정부(government)-사용자(user)-산업(industry)-학계(university)-연구기관(research complex)(政用产学研)을 강조하여 관련 이해관계자 모두를 참여시키고 처음부터 독자적인 첨단기술 산업생태계 구축을 염두에 두고 추진되고 있다(Noble, 2024). 특히 관련 국영기업이 기술 개발 및 상업화에 대한 중요한 역할을 맡고 있다. 예를 들어 전 세계를 석권하고 있는 전기차와 배터리 산업의 경우 중국은 10여 년 이상의 장기적인 안목으로 리튬이나 탄소 같은 핵심 광물의 확보 및 제련에서부터 전기충전시설이나 폐배터리의 재활용에 이르기까지 가치사슬 전 주기에서 새로운 기술의 개발과 개발된 제품의 초기 시장을 활성화하기 위해 R&D 지원, 소비자 구매를 촉진하는 보조금 지원, 그리고 자국 제품에 대한 정부의 우선 구매 지원 등을 포괄하여 제공해 왔다.

국제 협력 및 국제기구에서 리더십 역할의 강화

3가지 미션의 공통점 중 하나는 한 나라의 힘만으로는 문제를 해결하기 어려운 글로벌 이슈라는 것이다. 다시 말하면 이러한 변화에 대비하기 위해 처음부터 국제 협력과 글로벌 파트너십의 확대가 필수적이라는 의미다. 연구개발 과정에서부터 국제공동연구를 염두에 두며, 기술 표준화를 위한 국제기구에 더 많은 전문가가 참여하도록 유도해야 한다. 특히 과학기술 분야 국제기구나 회의에 우리나라 전문가들이 수시로 바뀌지 않고 장기적으로 참여하는 방식을 고민해야 한다. 또한 기술의 상업화 단계에 이르기 전부터 주도적인 역할을 할 수 있는 앵커(anchor) 기업의 참여를 유도해야 하며, 이들이 해외의 유력 기업들과 전략적 제휴를 통해 산업생태계 형성을 위한 협력을 할 수 있도록 지원을 해야 한다.

특히 중국이나 미국처럼 자국의 시장이 엄청나게 크고, 자원도 풍부한 경우와 달리 우리나라는 단독으로 차세대 기술 개발과 미래 산업생태계를 구축하는 전략을 추진하기보다 서로 보완관계가 있고 신뢰할 수 있는 국가나 국제기관과의 협력을 통해 추진할 필요가 있다. 새로운 기술을 통한 신흥 산업생태계가 구축되기 위해서는 기술의 표준화와 지배제품(dominant design)의 등장[3]이 필요한데, 이는 기술이나 제품의 우월성뿐 아니라 생태계의 주요 이해관계자들 간 사회정치적인 과정을 통해 공식적(de jure standard) 혹은 암묵적(de facto standard) 승인이 요구되기 때문이다. 결국 글로벌 시장에서 새로운 기술이 확산되고 신흥산업의 생태계가 구축되기 위해서는 기술의 표준화와 산업생태계를 구성하는 전 세계 여러 핵심 역할자들(key players) 간의 협력과 경쟁이 불가피하다. 따라서 우리가 이러한 국제 협력 관계에서 주도적인 역할을 할 수 있도록 처음부터 신뢰할 수 있는 파트너와의 국제 협력을 염두에 두어야 한다. 동시에 국제

3 산업에 따라서 단일 표준이나 지배제품이 등장하기도 하지만 복수 이상의 지배제품이 서로 경쟁하기도 한다. 예를 들어 TCP/IP는 IETF에 의해 전 세계적으로 인터넷 통신의 단일 공식 표준으로 설정된 반면 스마트폰의 경우 안드로이드OS와 iOS가 서로 경쟁하고 있다.

협력과 국제기구에서 우리 기술과 규범에 유리하도록 리더십을 발휘할 수 있는 전문가들을 장기적인 안목에서 육성하고 지속적으로 활동할 수 있도록 지원을 아끼지 않아야 한다.

과학기술인력의 확보

세계는 지금 우수한 과학기술인력 확보를 위한 전쟁을 치르고 있다. 팬데믹 이후 대외적으로는 중국과의 경쟁 및 국가의 안보, 대내적으로는 경제성장을 위해 과학기술 기반의 산업정책이 새로이 부각되고 있다. 그런데 반도체, AI, 양자컴퓨팅, 클린에너지, 바이오테크 분야는 모든 국가의 공통 전략 산업 분야에 속해 있고, 이 분야의 기술인력 확보를 위한 국가 간 경쟁이 매우 치열하게 전개되고 있다. 갈수록 엄격해지고 있는 이민 제한에도 불구하고 과학기술인력을 유치하기 위한 연구비와 주거 지원 등 여러 유인책을 제공하는 동시에 외국인에게 불합리한 사회 제도 개선을 적극적으로 시행하고 있다.

인구가 감소되고 초고령사회로 진입하는 우리나라의 경우 과학기술인재의 부족은 당면과제이며 이미 여러 대안이 모색 및 추진되고 있다. 예를 들어 정년 후 교수나 연구원 제도와 같은 능력 있는 은퇴 과학기술인력의 활용이나 여성 과학기술인력 육성과 가족 친화적 환경을 위한 제도 개선, 그리고 해외 우수 과학기술인력 유치 및 활용 등이 검토되고 있으며, 일부는 실행되고 있다. 하지만 우리나라의 미래 비전과 생존을 위해 전략적으로, 범부처 간 통합적으로, 그리고 장기적인 안목에서 체계적으로 정책이 수립되고 실행되지는 못하고 있다.

이코노미스트(Economist) 최신 기사에 따르면 호주와 캐나다, 미국 등 영어권 선진국에 비해 중국이나 일본을 포함한 대부분의 아시아 국가는 인재들이 유입되기보다는 유출 가능성이 높은 나라에 속하고 있다(Economist, 2024).[4] 쾌적한 자연환경뿐 아니라 자유와 인권의 보장, 좋은 일자리와 생활수준, 정주 환경 및 교육 시스템, 사회 안전 및 의료 시스템, 외국인 친화적 사회 환경 등 삶의 질에 관련된 다양한 요소들이 인재를 유인하거나 혹은 유출하게 만드는 요인이라 할 수 있다. 그런 점에서 과연 한국은 중국이나 일본보다 더 나은 수준의 삶의 질을 누리고 있는지 스스로 따져 볼 필요가 있다.

특히 초고령사회를 대비하고 AI 기술의 개발과 각 분야의 생산적 확산을 주도하며 넥스트 팬데믹의 예방과 조기진단 및 치료제 개발을 위한 과학기술인력의 확보는 그 중요성과 국가 간 인재 확보 경쟁 상

4 아시아에서는 유일하게 싱가포르만 인재 유출보다는 유입이 더 많은 나라로 보고되고 있다.

황을 감안하면 단발적이고 산발적으로 추진해서 될 문제가 결코 아니다. 새로운 미션지향적 과학기술정책을 통하여 장기적으로, 범부처적으로, 그리고 우리 삶의 질을 결정하는 다양한 요인들을 통합적으로 접근할 필요가 있다.

결국 새로운 미션지향적 과학기술정책은 우리 삶의 질을 높이고 새로운 경제성장의 동력을 창출하기 위한 것이지만, 동시에 정책이 성공하기 위해서는 바로 우리 사회가 이들이 과학기술 인재로 성장하길 원해야 하고 동시에 성취감과 긍지를 갖고 활동할 수 있는 환경을 만들어야 한다. 초고령사회와 AI의 확산, 그리고 또 다른 팬데믹을 대비하기 위한 궁극적인 목적과 방안은 바로 우리나라가 누구나 살고 싶어 하는 사회 환경을 조성하는 것이다. 본 보고서에서 제안된 새로운 미션지향적 과학기술정책이 그 지름길을 제시할 수 있기를 기대한다.

참고문헌

서행아·이우근·김종명·정용삼·김정식·김기환(2024). 중국 첨단기술경쟁력과 미래 전략, 한중과학기술협력센터.

Mazzucato, M.(2013). The Entrepreneurial State: Debunking Public vs. Private Sector Myths, Anthem Press.

김남영(2023). 실리콘밸리? 메이플밸리! 캐나다는 왜 'AI 성지' 됐나 [글로벌 AI위크① 캐나다], https://www.joongang.co.kr/article/25204837에서 2024. 8. 4. 인출.

Economist(2024). Talent is scarce. Yet many countries spurn it, Retrieved August 4, 2024 from https://www.economist.com/briefing/2024/08/15/talent-is-scarce-yet-many-countries-spurn-it.

Mintzberg, H.(1994). The Fall and Rise of Strategic Planning, Harvard Business Review, Retrieved August 3, 2024 from https://hbr.org/1994/01/the-fall-and-rise-of-strategic-planning.

Noble, G.(2024). China's New National Innovation System pt1: Overview, Retrieved August 2, 2024 from https://www.nobleendeavours.co.uk/chinas-new-national-innovation-system-pt1.