

한림연구보고서 155-3

미래 30년을 대비하는 과학기술전략

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

넥스트 팬데믹에 대한 대응



한림연구보고서 155-3

미래 30년을 대비하는 과학기술전략

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

넥스트 팬데믹에 대한 대응



미래 30년을 대비하는
과학기술전략

///
한림연구보고서 155-3

THE KOREAN ACADEMY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

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

006

1 서론

009

2 글로벌 보건 안보를 유지하기 위한 원헬스 접근법

009

가. 들어가는 말

010

나. 원헬스 접근법

014

다. 글로벌 인프라 구축

016

라. 맺음말

018

3 인수공통감염병과 중간전파

018

가. 들어가는 말

019

나. 중간전파(spillover) 감염병의 의미와 중요성

020

다. 고병원성 조류인플루엔자의 포유류 감염 확산

023

라. 국내외 HPAI 감염병 대응 정책

025

마. 맺음말

030

4 신종 바이러스에 대한 면역학적 대응

030

가. 들어가는 말

030

나. 신종 바이러스에 대한 중화항체

031

다. 신종 바이러스에 대한 T 세포 반응

033

라. 신종 바이러스 팬데믹의 엔데믹 전환과 면역

035

마. 과잉 염증반응과 중증 감염

036

바. 신종 바이러스에 대한 면역학적 선제 대응

038

사. 맺음말

042

5 차세대 바이러스 감염병 백신 전략

042

가. 들어가는 말

043

나. 백신 기술 개발 현황

046

다. 백신 기술 개발 전망

048

라. 주요국의 백신 정책 동향

048

마. 국내 백신 기술 개발을 위한 제언

049

바. 맺음말

051 **6 팬데믹 치료제 개발의 중요성**

- 051 가. 들어가는 말
- 051 나. 팬데믹의 위기
- 054 다. 코로나19 치료제 개발
- 058 라. 미래 팬데믹 대응 치료제 개발
- 060 마. 맺음말

062 **7 신·변종 바이러스 대응 진단의 중요성**

- 062 가. 들어가는 말
- 063 나. 감염병과 검체 수집
- 064 다. 감염병의 진단 시기와 임상증상 간의 관계
- 066 라. 바이러스 진단 플랫폼
- 068 마. 유입 가능한 신·변종 병원체에 대한 진단 준비 사항 또는 연구 방향
- 070 바. 맺음말

072 **8 넥스트 팬데믹에 대한 대응: 공중보건**

- 072 가. 들어가는 말
- 074 나. 과거의 팬데믹
- 076 다. 신종감염병
- 078 라. 넥스트 팬데믹의 전망
- 079 마. 넥스트 팬데믹, 어떻게 대비할 것인가?
- 081 바. 넥스트 팬데믹 대응의 과제들
- 084 사. 국가 정책 제언
- 086 아. 맺음말

089 **9 소결**

K A S T

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 언제든 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 중간 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 중간 장벽을 강화하는 적극적인 대응책이 필요하다.

코로나19 팬데믹을 거치면서 전 세계는 각국의 상황에 따른 맞춤형 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 면역 체계의 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.

KAST

2

글로벌 보건 안보를 유지하기 위한 원헬스 접근법

한호재

서울대학교 수의과대학 교수

가 들어가는 말

수의역학 전문가인 켈빈 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 중간 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 등)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, 주사바늘, 주사기의 폐기도 문제가 된다. 그래서 원헬스 접근법을 기반으로 환경 지속 가능성을 개선하기 위해 플라스틱 및 유해 화학물질 사용을 평가하고, 폐기물을 줄일 방안을 찾

기 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 | ⑤ 혈액제제 사용, 장기 이식 등 보건의료 요인 |
| ② 도시화, 노령인구 증가 등 사회적 요인 | ⑥ 약제 내성, 유전자 변이 등 병원체의 적응 |
| ③ 지구온난화, 삼림 파괴 등 생태환경 변화 | ⑦ 공중보건 인프라 부족 |
| ④ 음식의 생산 체계, 소비 패턴 등 식품 요인 | |

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 모기와 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. 천연두와에 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 관리하는데 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 위협을 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 | ④ 연구개발 확충 |
| ② 내성균 확산 방지 | ⑤ 협력체계 활성화 |
| ③ 감시체계 강화 | |

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 의학자는 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 진행되고 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, 정보의 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 재구성할 수 있는 기회를 제공한다. 또한, 전염병에 효과적으로 대응하기 위해서는 발병 정보를 제한 없이 공유해야 하며, 이는 발병의 모든 단계에서 이루어져야 한다. 특히, 공중보건에 심각한 위협을 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 전문 지식과 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 위협에 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., Zakhshvili, 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 Serbia, Tunisia and Georgia", *Zoonoses and Public Health*, Vol.66 No.3, pp. 276-287.
- Hayman, D., Adisasmito, W., Almuhairi, S., Behraves, 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., Khaita, 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., MacCauley, 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 bibliometric 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.

K A S T

3

인수공통
감염병과
종간전파

송대섭

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 중간전파(spillover) 감염병의 의미와 중요성

병원체가 중간 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 중간전파는 발생할 수 없다. 하지만, 최근 인간의 생활 환경 변화 및 지구의 온도 상승 등 다양한 이유로 병원체를 보유하고 있는 동물과의 접촉 가능성이 늘어나고 있으며, 이는 동물에서 인간으로의 중간전파 가능성을 높인다(Plowright et al., 2024).

동물에서 인간으로의 중간전파가 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 중간전파가 일어난 것이 아니라 소를 통해 인간, 그리고 인근의 고양이들에게도 중간전파가 발생하였다는 점이다. 앞서 언급하였듯이 중간전파가 발생하기 위해서는 다양한 장벽을 넘어야 한다. 하지만 조류에서 젖소, 젖소에서 고양이와 인간으로의 두 번의 중간전파가 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.

종간전과 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) 젓소의 고병원성 인플루엔자 바이러스 감염 사례

2024년 2월부터 텍사스, 캔자스, 뉴멕시코 등의 젓소 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 중간전파 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 중에서 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 중간전파가 가능하다는 것을 알리며, 개체들이 밀접하게 생활하는 환경에서의 감시를 강화할 필요가 있음을 시사한다(Lee et al., 2024).

반려동물은 사람과 밀접하게 접촉하기 때문에 인간으로의 중간전파로 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- α -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 젓소의 주(州) 간 이동 전 인플루엔자 A 음성 판정을 요구하며, 모든 양성 결과는 USDA 및 APHIS에 보고해야 한다. 이는 바이러스 확산을 막기 위한 조치로, 젓소 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 Epizooties, 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., Hirschaud, E., Herault., Planel, R., Rigau, 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 Virus in 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., Gordon, 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 avian 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., Kwicien, 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 avian influenza H5N1 virus infection of companion animals”, *Virulence*, 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., Naclér, 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>.

K A S T

4

신종 바이러스에 대한 면역학적 대응

신의철

KAIST 의과학대학원 교수

가 들어가는 말

인체가 바이러스에 감염되면 이에 대응하여 면역반응이 일어난다. 면역은 크게 선천면역과 적응면역으로 나뉘어지는데, 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 폐 병리현상의 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 세

포 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 이야기이다. 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 점이였다. 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 대책은 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 타겟 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 댓글

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 제기되

있던 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., lafrate, 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, 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.

K A S T
5차세대
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 백

신이 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 단백질을 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 긴급 사용승인을 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 백신

은 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 효과 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, 안센 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, 안센 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 우수 연구기관, 기업과는 전략적 제휴를 맺어 선진 기술

을 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 접종물 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, Global 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.

KAST

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 코로나 19 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.

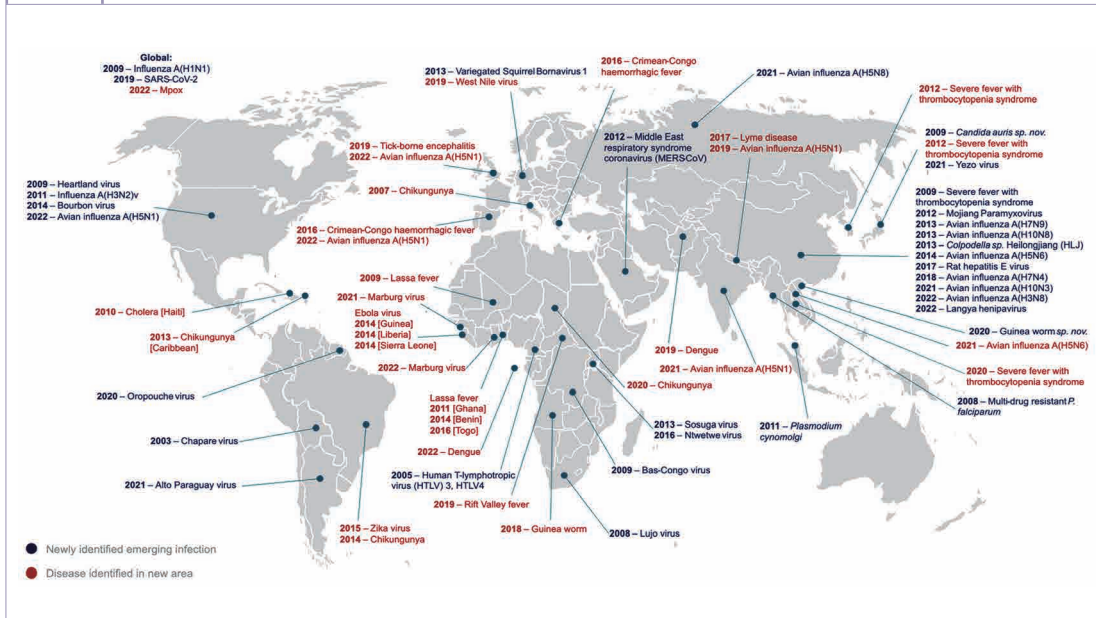
이 과정에서 최신 기술과 혁신적 접근법이 중요한 역할을 하며, 인공지능과 머신러닝, 유전자 치료와 같은 첨단기술이 신약 개발의 효율성을 높이고 있다. 특히 치료제 개발은 공공 및 민간 부문의 협력과 국제적 협력이 필수적이다. 정부, 학계, 제약 회사가 협력하여 효율적인 자원 공유와 연구개발을 촉진하고, 전 세계적으로 치료제를 공평하게 배포하는 것이 중요하며, 이를 통해 팬데믹 상황에서도 신속하고 효과적인 대응이 가능하다. 또한 코로나19 팬데믹 과정에서의 치료제 개발 사례 연구를 통해 앞으로 다가올 새로운 팬데믹에 대응하는 전략을 구체화하는 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. <그림. 1>은 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.

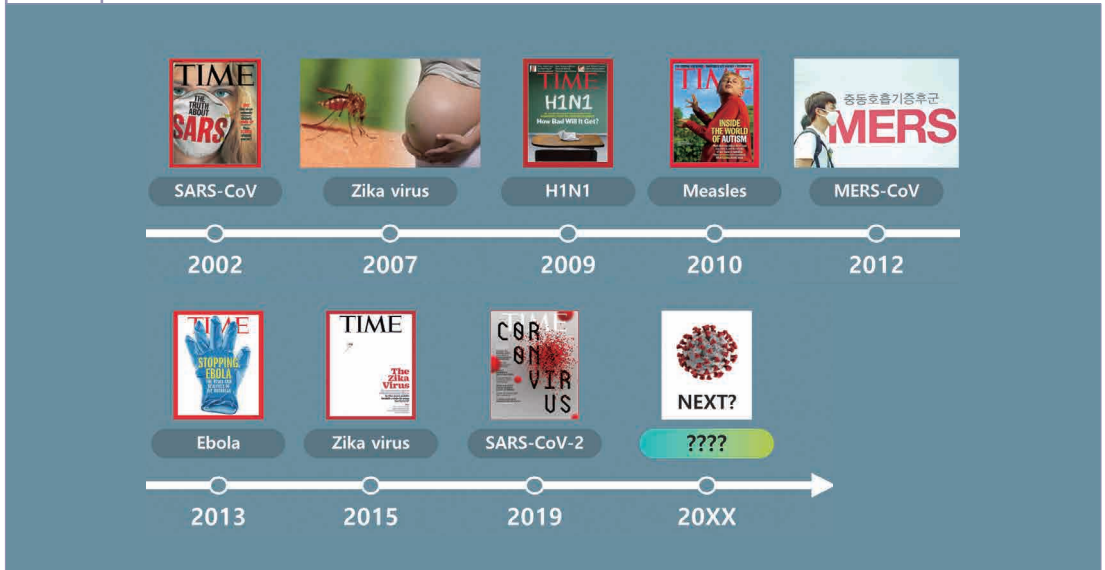
그림. 1 Emerging Infections (2003~2022)



출처: GOV.UK(2023).

<그림. 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.

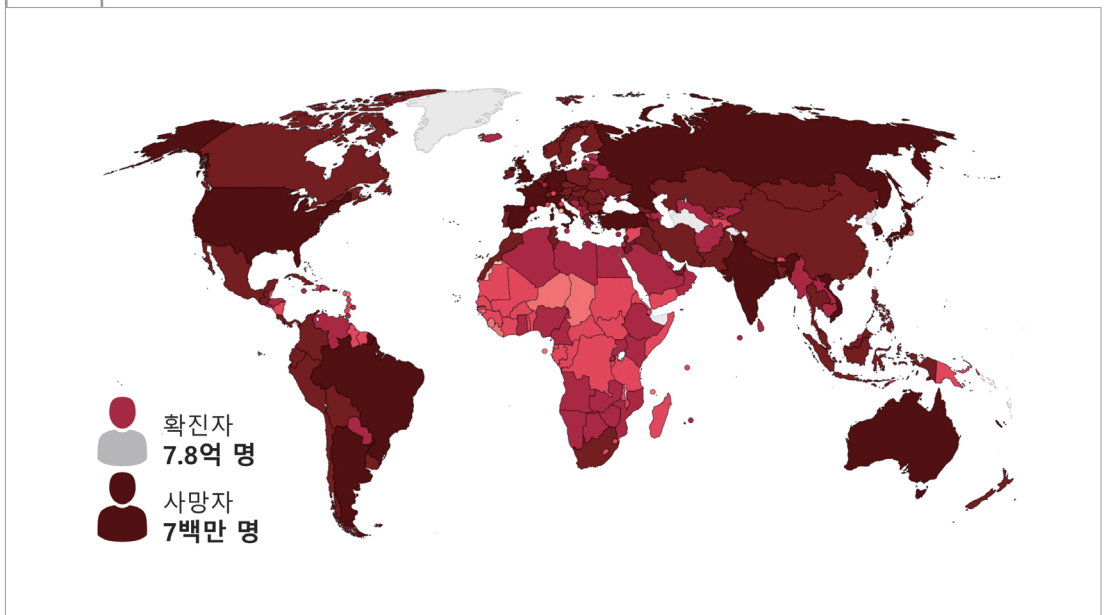
그림. 2 주요 바이러스 질병 발현 시기



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. 3>). 지도에서 진한 색으로 표시된 지역은 감염자와 사망자가 많았던 곳을 나타내며, 팬데믹이 전 세계에 얼마나 큰 영향을 미쳤는지 시각적으로 잘 보여준다.

그림. 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.

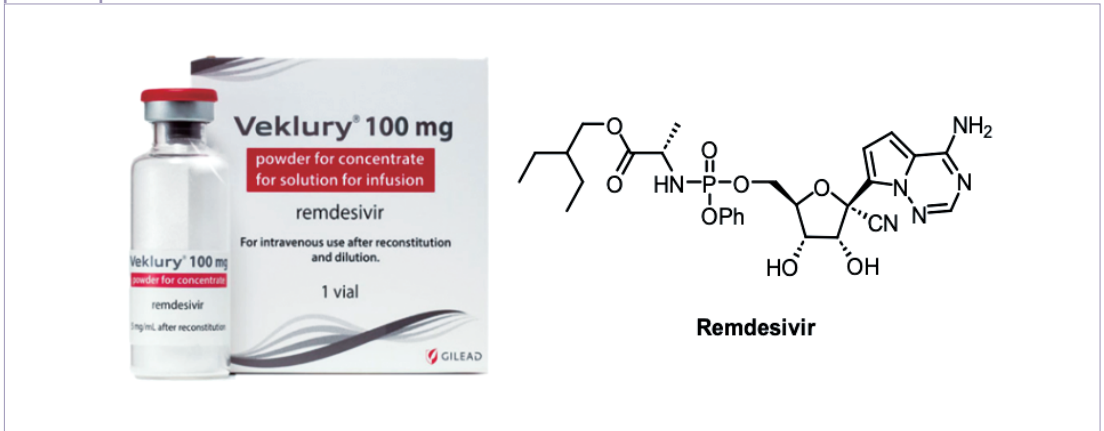
다 코로나19 치료제 개발

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. 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 파크로비드(Paxlovid)와 같은 치료제들이 더 많이 사용되면서 렘데시비르의 사용 빈도는 감소하고 있다.

그림. 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 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. 6>), 벡텔로비맵(Bebtelovimab),

그림. 6 항체치료제 렉키로나주



출처: 한국보건산업진흥원 제약산업정보포털(2021).

레그단비맵(Regdanvimab(Regkirona)), 소트로비맵(Sotrovimab), 아무바르비맵 및 롬루세비맵(Amubarvimab and romlusevimab), 밤라니비맵 및 에테세비맵(Bamlanivimab and etesevimab), 카시리비맵 및 임데비맵(Casirivimab and imdevimab(REGEN-COV)), 실가비맵 및 텍사게비맵(Cilgavimab and tixagevimab(Evusheld)) 등 세계 각국에서 코로나 치료제가 개발되어 큰 희망을 안겨주었다.

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. 소포스부비르

이와 더불어 시오노기사에서 개발한 엔시트렐비르(Ensitrrelvir) 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.

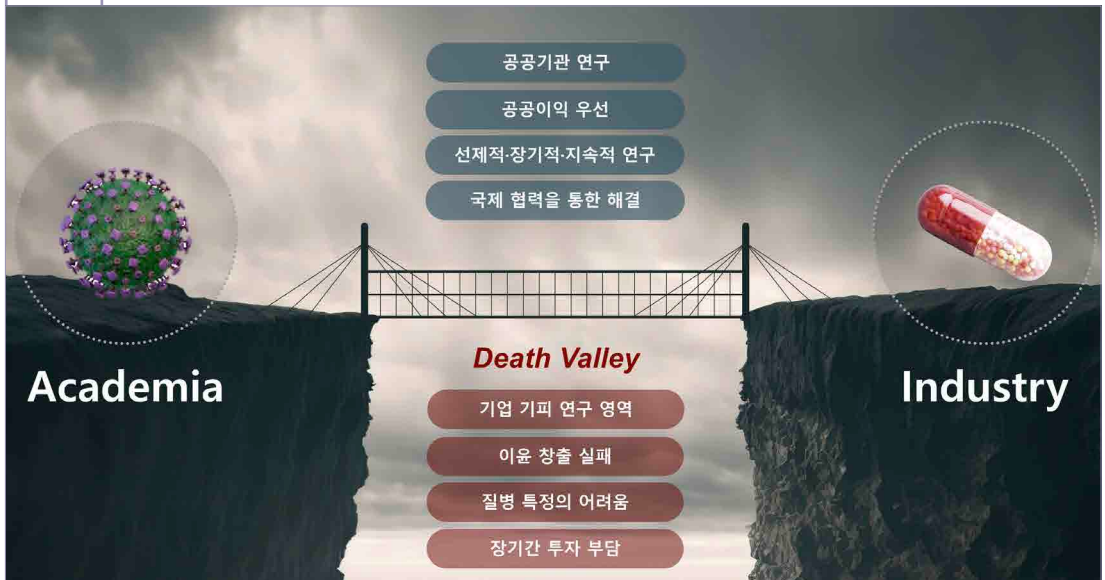
이러한 팬데믹을 막을 수 있는 근본적인 방법은 팬데믹 발생 이전에 다양한 바이러스에 대한 치료제 개발 연구를 선제적으로 진행하는 것이다. 하지만, 팬데믹이 발생하기 이전에 연구를 진행하는 것에는 특정 바이러스 질환에 대한 예측 불가능성, 예산의 부족, 장기적인 투자 부담 등이 주요 장애 요소로 작용된다. 또한 치료제 개발의 중요한 역할을 하는 제약 기업 입장에서는 이윤 창출이 보장되어 있지 않기 때문에 팬데믹 대응연구를 기피할 수밖에 없다. 따라서 공공기관을 중심으로 공공의 이익을 위해 선제적, 장기적, 지속적 연구가 이루어져야 하며, 특히 국제협력이 매우 중요하다(<그림. 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. 8 감염병 팬데믹의 특징



출처: 한국화학연구원 한수봉(2024).

그림. 9 감염병 연구의 어려움



출처: 한국화학연구원 한수봉(2024).

이에 다양한 세계 공공 기구 및 정부 기관에서는 미래 팬데믹 유발 가능 바이러스를 발표하였다. 특히 우리나라 질병청에서는 SARS-CoV-2, 인플루엔자, 라싸, 뎅기, SFTS, 치킨구냐, 한타, 니파, RSV 바이러스를 유력한 팬데믹 바이러스로 지정하고 대비하는 전략을 발표하였다(<그림. 10>).

그림. 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	 National Institute of Allergy and Infectious Diseases		 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=304846>에서 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=9999999999999999&minIndex=9999999999999999&schType=0&schText=&categoryId=&continent=&country=&upDown=0&boardStyle=&no1=0&linkId=48865011>에서 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 against SARS-CoV-2 Omicron and other variants of concern", *Antiviral Research*, Vol.198, Article: 105252.

K A S T
7신·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 중간전파가 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 사회적 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. 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 감염 경로나 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 면역저하자자는 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) 등은 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 등은 증폭(Reverse Transcription Loop-Mediated Isothermal Amplification, RT-LAMP)과 같은 등은 핵산 검출 기술들이 개발되고 있다. 이러한 등은 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 판

독하기 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 타겟으로 하는 효소로, 타겟 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 타겟으로 하는 효소로, 타겟 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.

K A S T

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 기원

● 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 가지고 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 1870 년대에 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), 코로나 19(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 생물 무기 프로그램은 1975년에 발효된 ‘생물무기금지조약’으로 개발이 중단되었다. 그러나 냉전 시대에 생물 무기를 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, 견잡을 수 없는 공포를 유발한다. 그래서 생물무기를 “가난한 나라의 핵무기”라고 부른다. 만일에 지정학적 상황이 나빠지면 생물무기가 다시 등장할 수 있다.

표. 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. 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, 리우 데자네이루 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 공양계를 외우며 이런 믿음을 되새긴다. 사실, 원헬스 접근법은 미생물이 감염병의 원인이며, 백신과 항생제로 감염병을 근절할 수 있다는 기존의 접근법이 한계에 도달하였다는 성찰의 결과이다.

표.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 하거나와 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 특정 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 효과적인지, 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 전문가들은 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 원칙

이고, 확실한 근거가 없는 치료제와 기술은 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 일으킨 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 위기소통 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 반복해야 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 조치가 개인의 자유를 희생해서라도 사회 구성원 다수를 보호한다는 대의명분에 부합한다고 하더라도 법 제도의 규정에 없거나 허용하지 않는 조치를 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 세계보건 기구와 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., Akin, 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/2024011222304426542](https://www.pressian.com/pages/articles/2024011222304426542)에서 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-qatar-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-\(2005\)](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.

KAST

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 절실했다.

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 병원 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 요구

된다. 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 우리에게 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.

