

이 사업은 복권기금 및 과학기술진흥기금의 지원을 통한 사업으로 우리나라의 공익적 가치에 기여하고 있습니다.

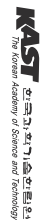


ISBN 979-11-86795-94-1

2024년 석학 커리어 디지전스 과학기술정책제언

규제(規制) 연계 식품안전 기술 확보 방안

하상도(농수산학부 정회원, 중앙대학교)



2024년 석학 커리어 디지전스
과 학 기 술 정 책 제 언

규제(規制) 연계 식품안전 기술 확보 방안

하상도(농수산학부 정회원, 중앙대학교)



발행처

한국과학기술한림원
031) 726-7900
kast@kast.or.kr

발행인

유옥준

발행일

2024년 12월

홈페이지

<http://www.kast.or.kr>

디자인/인쇄

경성문화사



이 보고서의 모든 저작권은 한국과학기술 한림원에 있습니다.



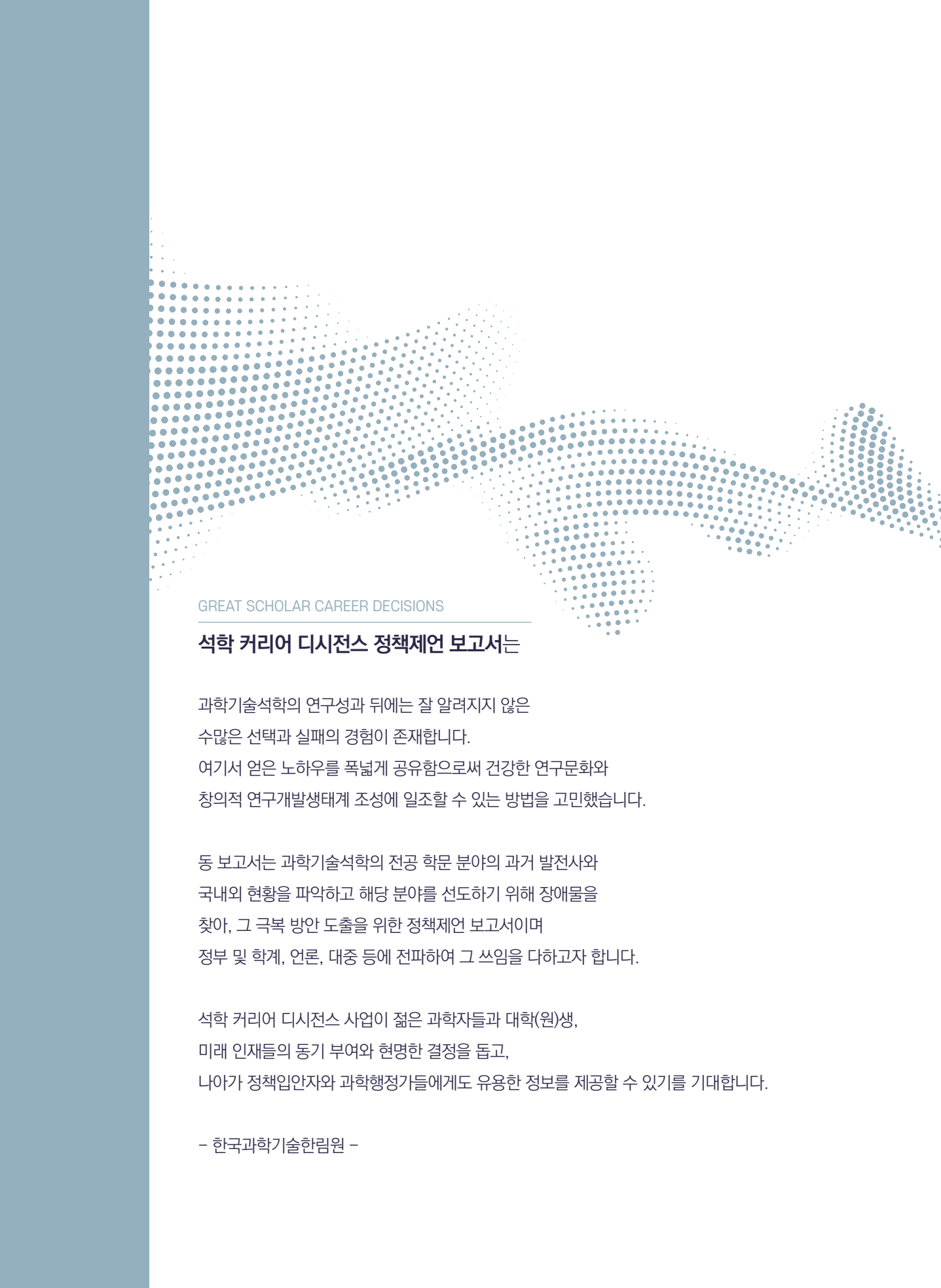
한국과학기술한림원은

대한민국 과학기술분야를 대표하는 석학단체로서 1994년 설립되었습니다.
우리나라 과학기술계를 대표하는 석학집단으로서,
1,000여명의 과학기술분야 석학들이 한국과학기술한림원의 회원이며,
대한민국이 과학기술 선진국으로 도약하여
글로벌 난제를 해결할 수 있는 최첨단 과학기술 업적을 창출할 수 있도록
창의와 도전의 연구개발 생태계를 만드는 데 기여하고자 합니다.

한국과학기술한림원 더 알아보기

-  홈페이지 www.kast.or.kr
-  블로그 kast.tistory.com
-  포스트 post.naver.com/kast1994
-  페이스북 www.facebook.com/kastnews





GREAT SCHOLAR CAREER DECISIONS

석학 커리어 디시전스 정책제언 보고서는

과학기술석학의 연구성과 뒤에는 잘 알려지지 않은
수많은 선택과 실패의 경험이 존재합니다.
여기서 얻은 노하우를 폭넓게 공유함으로써 건강한 연구문화와
창의적 연구개발생태계 조성에 일조할 수 있는 방법을 고민했습니다.

동 보고서는 과학기술석학의 전공 학문 분야의 과거 발전사와
국내외 현황을 파악하고 해당 분야를 선도하기 위해 장애물을
찾아, 그 극복 방안 도출을 위한 정책제언 보고서이며
정부 및 학계, 언론, 대중 등에 전파하여 그 쓰임을 다하고자 합니다.

석학 커리어 디시전스 사업이 젊은 과학자들과 대학(원)생,
미래 인재들의 동기 부여와 현명한 결정을 돕고,
나아가 정책입안자와 과학행정가들에게도 유용한 정보를 제공할 수 있기를 기대합니다.

- 한국과학기술한림원 -



하 상 도
중앙대학교 교수
(한국과학기술한림원 정회원)

하상도교수는 중앙대 식품공학과를 입학하면서부터 식품미생물과 인연을 맺기 시작했다. 미국 Texas A&M대로 박사과정 유학을 가서 식품안전을 위협하는 유해균 연구를 시작하게 됐다. 귀국해 8년간 한국보건산업진흥원 등 정부출연기관에서 정책 기획, 요약 등의 능력을 습득했고 한국식품안전연구원 원장, 한국식품안전협회 부회장, 소비자시민모임 부회장, 한국식품위생안전성학회 수석부회장, 식약처 식품 위생심의위원회 위원장, 서울특별시/안성시 규제개혁위원 등의 활동을 해오고 있다.

23년에 접어드는 교수생활 동안 식품안전 유해균의 생물막 연구에 집중해 지금까지 300여 편의 SCI(E)를 포함, 400편 이상의 국내외 논문을 게재했다. 식품과학 분야에서 식품위해세균이 식품 및 환경표면에서 바이오필름을 형성하는 유전자를 찾아 냈고 이 유전자의 발현을 저해해 식중독을 저감화할 수 있는 길을 밝힌 연구를 수행 하였다. 또한 2024년 식품안전의 날 정부로부터 홍조근정훈장을 받았고 과학커뮤니 케이터, 칼럼니스트로 활동하며 12권의 저서, 1,000건 이상의 기고 칼럼도 써오고 있다.



규제(規制) 연계 식품안전 기술 확보 방안

1. 식품산업의 발전사	04
2. 식품산업 현황 분석	12
3. 식품과학 기술의 특성 및 발전사	20
4. 식품산업과 안전의 중요성	32
5. 산업 발전에 영향을 미치는 주요 규제 연계 식품안전 과학기술	38
1) 유전자 교정 생물체 생산 기술	
2) 배양육 개발 기술	
3) 나노식품 기술	
4) 식품 로보틱스 기술	
6. 식품안전 과학기술의 실용화에 걸림돌이 되는 기술의 정책 및 규제 분석	58
7. 식품안전 기술 확보 전략	70
참고 문헌	77

1

식품산업의 발전사

- 산업태동기 (1945~1960)
- 산업체화기 (1961~1980)
- 산업발전기 (1981~2000)
- 산업선도기 (2000년 이후)

식품산업의 발전사

가공식품은 세계 제1, 2차 대전(大戰)을 통해 기록적인 발전을 이뤘다. 전쟁 중에 장기 저장이 가능하고 조리 없이 간편하게 먹을 수 있는 급식을 대량으로 공급해야 했기 때문이다. 전쟁 식량은 일반적으로 휴대와 섭취가 간편하고 저장성과 영양가도 높아야 하며 먹은 뒤 쉽게 버릴 수 있도록 포장돼 인스턴트식품의 비약적 발전으로 이어졌다. 우리나라의 식품산업은 1900년대 초반까지만 해도 술, 떡, 엿 등 대부분 조잡하고 단순한 수공업의 시대였다. 근대적인 공업화의 싹을 틔우기 시작한 것은 일제강점기인 1920년대 전후인데, 우리나라는 일본 식품원료의 공급처이자 상품의 소비국으로 철저하게 이용당했다. 해방 이후 한국전쟁을 거치며 미국의 원조로 곡물 도정, 수산물통조림, 제분, 제당, 양조 등 전쟁 군수품을 중심으로 산업화가 이뤄졌다.

농·수·축산업의 발달에 따라 인류는 더 이상 많은 시간을 식품 확보에 할애하지 않아도 되었다. 그러나 생산된 농수축산물의 저장 기술 개발과 확보는 계절적 영향을 크게 받는 농업의 특성상 우선적으로 해결해야 할 과제였다. 초기 식품산업은 식품저장 위주로 발전했다. 기원전 3000년경 인류는 건조, 발효, 염지(鹽漬), 당지(糖漬), 보존료 첨가, 냉동 등 자연환경을 이용한 식품저장법을 처음으로 사용하기 시작했다. 이는 원시적 형태의 식품가공이라 부를 수 있다.

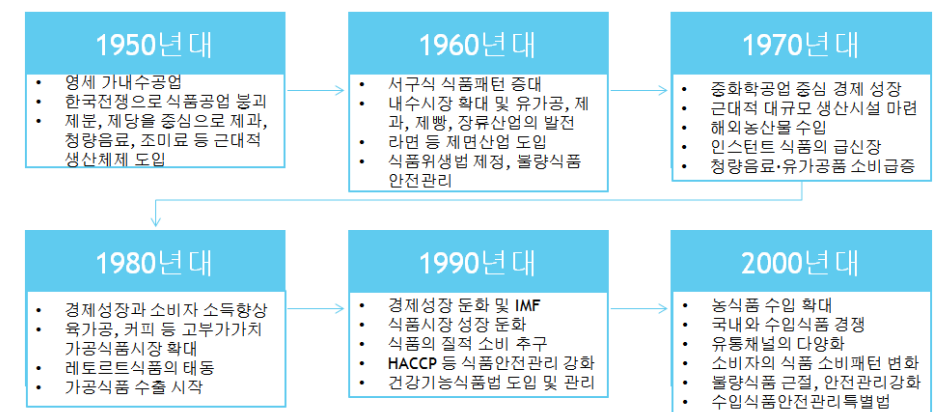
근세에 이르러 과학기술의 발달에 따라 기계, 기구가 진보했고, 식품가공이 비약적인 발전을 이루게 되었다. 추출법, 농축법, 고압증자법(高壓蒸煮法) 등 화학적, 물리적 기법을 응용한 식품가공법의 개발로 식품의 보존과 이동이 보다 쉽게 되었다. 이와 함께 정제 설탕과 소금이 등장하게 되었다. 또한 포도당과 알코올의 제조도 대량으로 이뤄지게 되었으며, 이와 함께 병조림에 의한 저장, 냉동 등의 저장법도 널리 성행하게 되었다.

또한 19세기 후반부터는 식품가공 이론이 산업적으로 활발히 응용돼 본격적인 식품공업이 대두하게 되었다. 특히 제1, 2차 세계대전을 거치며, 식품산업은 기록적인 발전을 이루게 되었다. 이는 전쟁 중에 장기 저장이 가능하고 조리하지 않고 간편하게 먹을 수 있는 급식용 편의식품을 대량으로 공급해야 했기 때문이다. 전후식량은 일반적으로 휴대 및 섭취가 간편하고 저장성과 영양가 또한 높으며 먹은 뒤 쉽게 포장을 폐기할 수 있도록 제조됐다. 전쟁이 끝난 후 전쟁 식량을 생산하던 기술은 일반인을 위

한 인스턴트식품 제조는 물론 값싼 식물성 단백질, 콩을 이용한 인조육 등의 개발로 이어졌다. 이와 병행해 동결건조, 방사선을 이용한 살균·저장법 연구, 진공포장 등 저장 및 운송이 편리한 다양한 가공법이 속속 개발되어 식품의 안전성 및 편의성을 갖추게 되었다.

우리나라 식품산업의 발전사를 살펴보면 <그림 1>과 같다. 1900년대 초반까지만 해도 주류, 떡류, 엿류 등 단순 가공품이 주류를 이루는 가내수공업 형태라 산업이라 할 것도 없는 척박한 시대였다. 해방 이후 1950년대에 접어들어 6.25 한국전쟁을 거치며 미국의 원조로 우리 식품산업이 시작되었다고 볼 수 있다.

그림 1 우리나라 식품산업의 변천사



출처: 한국산업기술발전사-섬유-식품(산업통상자원부, 한국공학한림원, 2018)

산업태동기 (1945 ~ 1960)

1945년 해방 직후에는 극심한 식량부족을 겪었으나, 차츰 일제강점기의 잔재로 남은 식품가공공장이 영세한 가내수공업 형태로 운영되기 시작하였다. 따라서 이 시기인 1945년부터 1960년을 비로소 우리나라 식품공업의 진정한 태동기라고 볼 수 있다. 이때 미군의 영향으로 서구식 식생활이 급속히 확산됐으며, 이를 뒷받침하는 다양한 식품가공업체가 출현하기 시작했다. 특히 1948년 12월 10일 체결된 한미경제원조협정이 식품공업의 태동에 결정적인 역할을 했다. 미국의 옥수수, 밀 등 잉여 농산물

에 의한 식량원조는 해방 직후 남한에 남아있던 4개 제분공장을 활성화시켰고 여기서 생산된 소재를 이용한 제품 개발로 식품공업의 발전을 가져왔다.

1950년대 이전의 식품산업은 곡물도정, 수산물통조림, 제분, 제당, 양조가 주를 이루었으며 원료 농수산물을 단순 가공하는 정도였다. 소비계층도 제한적이라 국민 식생활에 기여하는 바는 매우 미미했다. 게다가 1950년 6월 25일 한국전쟁은 이제 막 태동기에 접어든 우리나라의 산업 기반을 철저히 파괴하였다. 이후 UN 단체의 원조로 서구 식품이 우리의 전통 식생활에 유입되기 시작했는데, 특히 1956년 이후 미국의 잉여 농산물 도입을 계기로 제분, 제당산업이 근대적 생산체제를 갖추기 시작했다. 그중에서도 가장 활발했던 것은 소위 '3백(白)'이라 불리는 제분, 제당, 시멘트였다. 설탕, 밀가루 등 식품소재산업을 발판으로 제과, 제빵, 제면, 청량음료 제조업 등이 성장함으로써 국내 식품산업은 서서히 근대적 산업으로서의 면모를 갖추어 나가기 시작했다. 휴전 이후 독보적인 입지를 굳혀 나가던 해태제과에 이어 1956년 풍국제과를 인수한 동양제과, 1953년 제일제당이 첫 가동에 들어가 수입대체의 길을 열면서 국내 식품산업은 활기를 띠기 시작했다. 1956년 1월에는 대상의 전신인 미원식품에서 조미료와 전분당, 감미료 등을, 1958년 1월에는 롯데삼강의 전신인 삼강산업이 빙과와 유지를 생산하기 시작했다(식품공업협회, 2000).

102 산업체화기 (1961 ~ 1980)

1960년대를 맞이하면서 가장 큰 변화는 『경제개발 5개년 계획』의 순조로운 진행과 월남파병, 중동건설 등으로 식품공업 분야의 전반적인 약진이었다. 또한 국민 소득 수준의 향상과 서구식 식문화의 유입으로 전통 식생활이 점진적으로 와해되고 서구식 가공식품 위주의 내수시장이 성장했다. 국민 소득 수준의 향상은 제과, 음료 등 각종 기호식품의 발전을 가져오게 했다. 특히 주곡인 쌀 부족에 따른 정부의 적극적인 밀가루 '분식 장려 시책'으로 제과, 제빵, 제면산업이 함께 급성장하였다. 덧붙여 정부의 축산 진흥정책과 서구식 식생활의 확산으로 우유가공품이나 마가린, 쇼트닝 등 유지가공품의 생산도 본격화되었다. 국내 효시로 알려진 해태제과, 동양제과, 크라운제과, 롯데제과가 60년대 국내 제과업을 이끌어갔다. 이어 1968년 설립한 삼립식품과 기린이 제빵 분야에서 두각을 나타내었다. 청량음료 부문에서는 칠성사이다와 펄시콜라를 출시한 한미식품과 코카콜라를 생산한 한양식품이 60년대 후반 들어 업계의 선두로 나서며 국내 청량음료시장을 선도했다. 또한 1966년 설립한 동방유량, 군

납을 통해 성장한 통조림 및 두부제조업, 우유제조업 등 다양한 식품가공업체가 출현해 국내 식품공업 성장을 이어갔다. 60년대 들어 가장 높은 성장을 보인 분야는 장류공업과 라면 등 면류제조업이었다. 1963년 9월 일본의 묘조(明星)식품과 기술 제휴한 삼양식품이 라면생산의 효시였다. 이후 라면제조업은 국가 '혼분식 장려 정책'의 지원하에 연간 40% 신장률로 급성장을 지속했는데, 한편 60년대 식품공업의 급속한 발전과 함께 일부 몰지각한 식품제조업자들에 의한 저질, 불량식품의 생산이 식품공업의 위축을 가져왔다. 이를 해결하기 위해 1962년 「식품위생법」이 제정되고, 1969년 (사)한국식품공업협회가 창립돼 산업 발전의 토대가 되었다.

1970년대는 자립경제와 고도성장을 실현한 우리 경제의 대도약기였다. 연평균 9.5%라는 경이적인 경제 성장률에 수출 100억 달러를 돌파했으며, 1인당 국민소득 1천 달러 시대를 개막했다. 우리 경제는 제1차 석유파동과 세계 경기의 침체에도 불구하고 고도성장했으며, 산업구조도 경공업 중심에서 탈피하기 시작했다. 1973년 '녹색혁명'으로 불리는 통일벼의 개발로 쌀 자급을 이룰 수 있었다.

경제성장에 따른 대규모 자본력의 형성과 운수, 통신, 도로 등 사회 간접자본의 확충이 이뤄져 식품산업이 근대식 대규모 생산체제를 갖출 수 있었다. 국내 농수산물의 공급 여건도 크게 개선돼 식품산업의 성장에 기여했다. 번거로운 슬로우 전통식품 대신 편리하고 신속한 인스턴트 가공식품과 패스트푸드 선호 추세가 확산되어 값고 새로운 맛에 대한 욕구도 높아졌다. 이런 추세로 인스턴트식품과 제과, 제빵, 청량음료 등 기호식품이 본격적으로 성장하기 시작했다. 다양한 스낵제품이 70년대 들어 크게 유행했다. 1973년부터 생산에 들어간 아이스크림 등 유가공품 역시 높은 성장률을 기록했다. 그러나 이 시기에는 식품 기술이 아직 외국 기술의 모방단계에서 크게 벗어나지 못했고 기업들도 품질 경쟁보다는 시장 점유율 확대를 위한 양적 팽창에 보다 주력했던 시기였다.

이후 1970년대 후반 자본시장의 개방 확대와 함께 외국인 투자와 기술도입이 증가했고 과점적 시장경쟁이 치열해짐에 따라 식품산업이 질적 변화의 시대를 맞이하게 되었다.

103 산업발전기 (1981 ~ 2000)

1980년대 초 정치적 불안과 함께 주춤했던 우리 경제는 1982년부터 재도약을 시작하여 1986년에는 만성적인 무역적자에서도 벗어났다. 산업구조도 경공업 위주에서 탈피해 자동차, 전자, 기계산업 등 중공업으로 지속적인 경제성장의 기틀을 다졌다. 80년대 중·후반 '86아시안게임'과 '88서울올림픽'

은 국내 관광산업과 함께 식생활에 지대한 영향을 끼쳤다. 선수촌에 공급되는 가공식품의 품질 향상과 함께 내한한 수많은 외국인 관광객들의 입맛을 사로잡기 위한 고급제품들이 개발돼 국내 식품산업 수준이 크게 향상됐다. 특히 육가공, 유가공 분야와 인스턴트식품의 성장이 활발했다.

1988년 5월 「한국식품개발연구원육성법」(법률 제3985호)에 따라 농수산물유통공사 종합식품연구원과 한국과학기술연구원(KIST)의 식품 관련 연구 부서를 통합하여 과학기술부 산하 정부출연 연구기관으로 '한국식품연구원'이 설립됐다. 특히, 80년대 들어 식품산업 분야에서 주목받은 것은 뜨거운 물에 데워 즉석에서 먹는 레토르트식품의 출시였다. 또한 제6공화국 정부가 추진한 북방정책이 성공적으로 진행되면서 라면, 제과, 음료, 주류 등 국내 가공식품이 러시아를 포함한 동구권에 많이 수출됐다. 그러나 우루과이라운드(UR) 협상으로 해외 농수축산물과 가공식품의 수입자유화가 실시됨에 따라 국내 식품산업이 크게 위축되고 위기를 맞기도 했다.

1990년대에 들어서면서 본격적인 수입 개방이 이뤄졌는데, 경제 성장의 둔화, 국제수지 악화, 외환위기를 겪으면서 식품기업의 구조조정이 이뤄졌다. 국민의 식생활도 양보다 건강이나 안전을 고려한 식품의 질적인 측면에 관심이 더해져 고품질 농산물, 건강기능식품 시장이 급속히 성장했다. 생산·유통·소비 전 과정에서 철저한 위생이 강조된 시기였다. 1994년 12월 29일에 보건사회부 산하기관으로 '한국식품위생연구원'이 설립되면서 본격적인 식품안전관리, 위생행정에 대한 연구개발이 시작됐다.

그러나 원료가 원제품보다 높은 '관세율'을 유지하고 있는 왜곡된 관세정책 탓에 타 산업 분야에 비해 원료 가격 부담이 커 경쟁력 약화의 원인이 됐다. 게다가 1997년 국제통화기금(IMF) 구제 금융에 따라 시중 실세금리가 30% 안팎으로 급등해 재무구조가 취약한 제과, 제빵, 라면, 대두유 등을 제조하는 몇몇 선도기업들이 부도를 내는 등 경영위기에 봉착했다. 특히 대부분의 원료를 해외에 의존하고 있는 식품산업 분야는 환율이 치솟아 원료수급에 큰 어려움을 겪기도 했었다. 1992년에 진로쿠어스맥주(주)가 설립되면서 하이트맥주, OB맥주, 카스맥주 등 3개 회사 체제가 되었다. 이후 카스맥주가 OB맥주에 인수되었고, 현재는 하이트진로(주)와 OB맥주(주)에서 맥주를 생산하고 있다. 이와 함께 국제무역기구(WTO) 체제 출범, 경제협력개발기구(OECD) 가입, 아시아태평양경제협력체(APEC)의 본격적인 활동 등 급박하게 진행되는 국제 경영환경 변화까지 겹쳐 국내 식품산업은 위기의 연속이었다.

04 산업선도기 (2000년 이후)

2000년대는 본격적인 개방이 이뤄지면서 그동안 수입 규제가 심했던 농산물과 가공식품까지도 수입이 확대되기 시작했다. IMF 금융위기 이후인 1998년부터 2005년까지 가공식품 수입은 연평균 약 21%씩 성장했으며, 식품 유통은 대형마트 위주로 재편되었다. 2002년 8월 26일 법률 제6727호로 「건강기능식품에 관한 법률」(보건복지부)이 제정됨으로써 건강식품 시장의 무질서가 정비되고, 정부 주도의 안전성과 유효성이 관리되면서 규제가 강화되었다.

미래 식품산업 발전 방향의 키워드는 '편의성, 안전성, 기능성'이며, 외식과 간편식 수요는 지속적으로 증가할 것이다. 또한 갈수록 부족해지는 식량자원의 개발과 이들 자원의 식품 소재화에 초점이 맞춰질 것으로 예측된다. 또한 전통식품의 고부가가치화, 기능성식품의 개발, 간편식품 개발, 포장의 다양화 등의 추세가 이어질 전망이다. 특히 우주식품, 산악인을 위한 아웃도어 식품, 전투식량 등 특수 분야에 종사하는 이들을 위한 식품의 개발과 노약자, 청소년, 유아, 환자, 운동선수 등을 위한 특수용도의 식품 개발도 활기를 띠 것으로 보인다. 한편, GMO(유전자변형농산물)의 안전성, 건강기능식품의 효능과 안전성, 불량식품의 근절, 영양성분 표시, 원전 폭발에 따른 식품의 방사능 오염과 방사선조사, 벤조피렌, 환경호르몬, 알레르기 등의 문제는 식품산업에서 더욱 중요해질 것이다. 또한 유기농, 글루텐 프리, 식품첨가물, 나노식품, 등의 신식품, 식품포장과 포장용기, 외식산업, 푸드트럭, ICT융합 기술에 의한 스마트유통/저장, 동물복지, 기후변화, 미세먼지 등도 주된 미래 이슈가 될 것으로 전망된다.

세계 최고 기술력을 자랑하는 우리나라 식품과학 기술은 주로 발효식품 분야이다. 산업통상자원부가 주관하는 세계 일류상품에 선정된 식품은 대상(주)의 발효조미료 '미원(MSG, 글루탐산나트륨)'을 선두로 2001년 '종가집 김치', 2004년 '클로렐라', 2005년 '순창고추장', 2010년 '고기양념장', 2011년 '천일염', 2014년 '홍초' 등이 있다. CJ제일제당의 식품첨가물 아미노산인 '라이신' 생산 기술도 세계 최고 기술로 알려져 있다.

2

식품산업 현황 분석

- 식품과 식품산업의 정의
- 식품산업 현황
- 식품산업의 특성

식품산업 현황 분석

101 식품과 식품산업의 정의

가) 식품의 정의

현행 「식품위생법」 제1장 2조 1항에 따르면 “식품이란 의약으로 섭취하는 것을 제외한 모든 음식물을 말한다”라고 정의되어 있다. 즉 가공식품, 비가공식품 등 구별 없이 먹을 수 있는 것을 의미한다. 한편 국제농업기구(FAO)나 세계보건기구(WHO)에서는 “인간이 섭취할 수 있도록 완전 또는 일부 가공한 것이나 가공하지 않은 것으로 먹을 수 있는 모든 것”으로 식품을 정의하고 있다.

나) 식품산업의 정의

식품은 원료의 생산부터 최종 소비에 이르기까지 수많은 단계의 가공 및 유통경로를 거치게 된다. 식품이 지니는 지리적, 계절적, 시간적 제한성을 배제하고 저장성, 수송성, 편의성, 안전성, 상품성을 부여하기 위해 가공하며, 생산자로부터 소비자에게 원활하게 전달하기 위해 유통과정을 거치게 된다. 이렇게 인류의 생명 유지를 위해 행해지는 식품의 수집, 저장, 가공, 포장, 유통, 판매 등 모든 단계에서의 제반 경제활동을 우리는 넓은 의미에서의 식품산업이라 부른다. 따라서 식품산업은 가공을 위주로 하는 식품제조업은 물론 원료농산물의 수집, 중개, 운송, 보관, 식품 기계, 용기 포장, 외식산업 모두를 포함한다고 할 수 있다.

102 식품산업 현황

세계 식품시장은 2024년 현재 9조 달러, 식료품은 4.7조 달러 수준으로 전년 대비 4% 이상 늘어난 신성장산업이다. 국가별 식품시장 규모를 살펴보면, 미국이 전 세계 식품시장의 약 20%를 차지하고 있으며, 이어서 중국이 16%, 일본이 7%, 독일이 6%, 브라질이 5% 순이다. 최근 5년간 미국, 일

본, 독일, 프랑스 등 선진국이 전체 시장에서 차지하는 비중은 소폭 감소세를 보인 반면 중국, 브라질, 멕시코 등은 증가 추세에 있다. 우리나라는 세계 17위 수준으로 약 1%의 비중을 차지하고 있다.

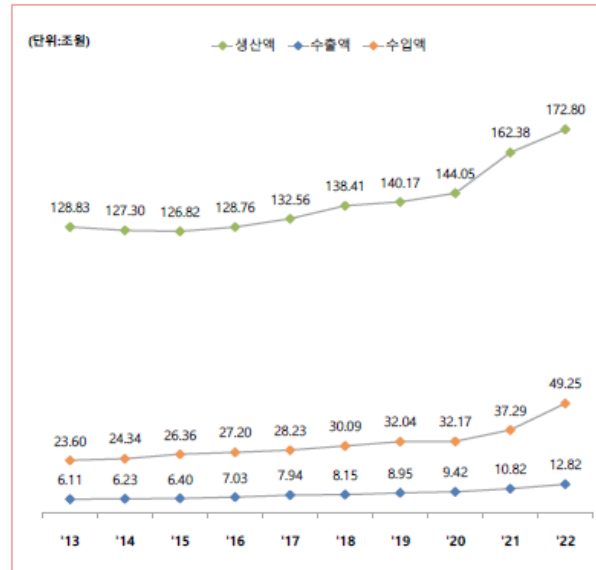
국내 식품산업은 최근 10년 사이 폭발적인 성장을 이뤘는데, 국내 식품생산액은 2014년 121.52조 원, 2015년 122.86조 원, 2022년 172.80조 원으로 증가 추세에 있으며, 수출액과 수입액 모두 증가 추세다. 2022년 식품 생산액은 172.80조 원으로 국내 총산출 4,573조 원(2021년 기준)의 3.78%를 차지하며, 연평균 성장률(2013~2022) 3.32%에 이른다. 2022년 분야별 생산액을 살펴보면, 가공식품(주류 포함)은 58.43조 원, 건강기능식품은 2.80조 원, 식품첨가물은 2.50조 원, 축산물가공품은 14.83조 원, 포장육은 19.67조 원, 기타(기구용기포장, 용기류, 식품조사처리) 6.78조 원에 이르며, 농임산물물은 33.32조 원, 축산물물은 25.22조 원, 수산물물은 9.24조 원을 차지한다.

식품산업은 기존 전통적 제조업에 유통, 외식산업까지 더해진 종합 산업군이다. 최근 더해진 외식산업은 1970년대에 태동해 86아시안 게임, 88올림픽 등 대규모 국제행사를 계기로 급성장했으며, 1980년대 해외브랜드의 국내시장 진출로 그 성장이 본격화되기 시작했다.

건강기능식품 또한 미래형 성장산업인데, 일본, 유럽, 미국 등 전 세계적으로 급성장하고 있는 분야라 우리나라에서도 식품산업 성장의 돌파구가 될 것으로 예상된다. 2015년에 발생한 가짜 백수오 사건, 가짜 홍삼 사건 등 신뢰성 회복이 산업 성장의 가장 중요한 변수가 될 전망이다. 2023년 국내 건강기능식품 생산 규모는 코로나19 덕으로 6조 2천억 원 규모로 성장했다. 2019년 4조 8천 936억 원에서 꾸준히 성장하는 모습이다. 구매 금액을 기준으로 가장 많이 판매된 상위 기능성 원료는 홍삼, 비타민, 프로바이오틱스, EPA·DHA 함유 유지(오메가-3), 체지방감소제품, 단백질보충제, 당귀추출물, 콜라겐, 밀크씨슬 추출물 순이었다. 그러나 건기식 공전에 따라 획일화된 문구만을 사용함에 따른 표시 문제로 시장 성장이 힘을 받지 못하고 있다는 불만과 함께 소비자 편의를 위한 ‘기능성 표시’ 개선 이슈가 다시 떠오르고 있다.

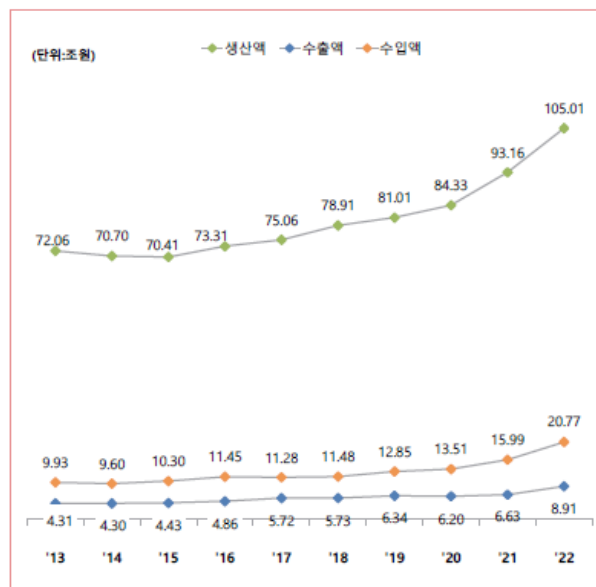
사실 업계에서는 국내 건기식 시장 성장의 저해요인으로 정부 규제를 지목한다. 이에 산업 육성을 위한 기능성 표시제도의 개선이 시급하다는 목소리가 높다. 국내에서는 식약처가 정한 ‘도움을 줄 수 있음’이라는 획일화된 문구만을 기능성 표시 내용으로 사용하고 있어 사실상 극히 제한적인 표현밖에 할 수가 없는 구조이기 때문이다. 반면 외국의 표시제도는 보다 더 자유스럽다. 일본의 경우 특정보건용식품(허가제) 중 정장작용을 하는 기능성 원료가 함유됐을 때 “장의 상태를 염려하는 분에게 적합함”이라는 표시가 가능하다. 미국도 마찬가지로, 건강강조표시(허가제)식품 중 “칼슘 함량이 높고 체내 이용이 가능한 경우 규칙적인 운동, 충분한 칼슘과 건강한 식단은 청소년 및 젊은 여성의 뼈 건강을 유지시키고 인생 후반기 골다공증의 위험을 감소시킬 수 있음”이라는 표시도 가능하다고 한다.

그림 2 연도별 식품산업 통계



출처: 2023년 식품의약품산업 동향 통계(식약처, 2023)

그림 3 연도별 가공식품 통계



출처: 2023년 식품의약품산업 동향 통계(식약처, 2023)

03 식품산업의 특성

식품산업은 원료인 농·수·축·임산물을 가공, 저장, 수송, 판매하는 일련의 과정에 관련된 모든 산업으로, 원료의 부가가치를 높이고 원료의 가공, 저장, 수송, 판매에 참여하는 기업 부문의 소득 향상에 기여하며, 고용 및 부가가치를 창출한다. 또한 식품산업은 국민경제의 주요산업의 하나로 대부분이 다른 산업 부문과 유기적인 관계를 형성하고 있다. 이러한 식품산업의 일련의 활동은 경제성장, 고용, 물가, 국제수지, 투자 등 여러 방면으로 일반경제에 영향을 미친다. 또한 노동, 자본 및 기타 식품산업에서 사용되는 중간투입재와 일반경제 부문의 활동에 의하여 결정되는 임금, 금리 및 기타 생산요소의 가격 변동은 식품산업에 직·간접적으로 영향을 미친다(식품공업협회, 2000).

식품산업은 농·수·축산업인 1차 산업과 가장 밀접한 관계를 갖는데, 1차 산업으로부터 원료를 구매하여 가공 및 유통함으로써 산업의 부가가치를 높인다. 나아가 원료의 가격을 안정시키고, 1차 산업의 소득 증대에도 기여한다. 1차 산업에서 생산된 원료인 농·수·축산물의 품질은 식품산업에서 생산된 가공식품의 품질에 직접적인 영향을 미치므로, 고품질의 원료를 생산하는 것은 식품산업의 발전에 매우 중요하다. 그리고 농·수·축산물 원료의 가격, 생산량 등 생산 및 공급 여건의 변화 또한 식품산업의 수익성에 직·간접적인 영향을 미치게 된다.

한국전쟁 이후 1960년대부터 시작된 경제 성장과 산업화, 도시화의 진전에 따른 경제·사회·문화적 변화는 식생활에 커다란 변화를 가져왔으며, 이는 식품산업 발전의 주된 원동력이 되었다. 식품소비 는 과거 곡류, 서류, 두류 등 전분질 식품의 소비로부터 어육류, 과채류, 해조류, 견과류 등을 소비하는 구조로 점차 바뀌어 왔다. 식품소비 성향의 변화는 경제, 사회 문화적인 요인의 영향이 매우 큰데, 여성의 사회진출과 맞벌이 가구의 증가로 복잡한 조리과 오랜 시간이 소요되는 식품보다는 가정식 대체품(Home Meal Replacement: HMR), 즉석조리(Ready-to-Eat: RTE) 식품과 같은 편의식품의 선호가 증가해 왔다. 그리고 열량 섭취를 중시하던 과거의 식습관에서 탈피해 맛과 영양을 고려한 프리미엄 식품, 기능성식품에 대한 선호가 증가해 왔다. 건강과 안전에 대한 소비자의 관심 증가에 따라 일반 소비자들의 식품 선택도 크게 변해 왔는데, 성분, 보관 상태와 유통기한, 그리고 안전한 식품을 점차 더 선호하게 됐으며, 편의식품의 소비 또한 증가해 왔다. 도시 가구의 식료품 지출액은 감소해 가는 반면, 외식 지출액은 증가 추세로 변해 왔다.

식품산업은 인간의 생명과 직결되고 식량 안보라는 특성상 정부의 간섭과 시장 참여가 심한 편이다. 정부는 민간 부문에서 해결하기 어려운 해외 시장정보의 수집, 식품위생과 검역체계의 정비, 연구

개발 투자의 확대, 생산 활동에 필요한 사회간접자본의 확충, 산업 발전을 저해하는 제도의 개선과 함께 무역정책, 환경정책, 인력 수급정책 등을 통하여 식품산업의 발전에 직접적인 영향을 미친다. 「식품위생법」 등을 통한 감시와 규제측면의 정책과 「식품산업진흥법」 등 국산 농산물의 이용 증대, 식품산업의 체질 개선과 경쟁력 강화를 위한 체계적이고 장기적인 육성정책 등의 양면성을 갖고 있다. 특히, 이명박 정부가 출범하면서 식품산업의 진흥을 목표로 농림부를 농림수산식품부로 개편했고, 국정과제에 식품산업 육성도 포함시켰다.

우리나라 식품산업은 취약한 농업 기반으로 원료의 해외의존도가 매우 높다. 대외경제의 변화가 산업에 큰 영향을 미치는데, 특히 원료농산물과 가공식품의 수입 가격 변동이 가장 큰 영향을 끼친다. 이러한 가격 변동은 국내 식품산업의 경기, 관세 및 비관세정책, 식품위생 규제의 변화에 영향을 미치고, 수출 경쟁국의 여건 변화는 국내 수출시장 확보에 직접적인 영향을 준다.

자유무역협정(FTA) 체결 등으로 인한 대외 시장개방 또한 식품산업에 직·간접적으로 영향을 미치는데, 곡물 등 식품원료 수입에 의존하는 가공식품산업은 FTA로 수익성 개선의 혜택을 볼 것이다. 반면 간장 등 일부 품목은 일본 등 외국 프리미엄 간장의 수입으로 경쟁이 심화되어 어려움에 직면할 수도 있다. 그러나 식품산업은 전반적으로 원료 수입비용 절감의 혜택을 볼 것으로 보인다. 미국, 중국, 호주, 브라질 등으로부터 주로 수입되는 밀, 대두, 옥수수가 대표적 수혜 품목이다. 또한 2008년부터 본격적으로 추진된 FTA와 최근 전 세계적으로 불고 있는 한류인 케이푸드(K-FOOD), 케이팝(K-POP) 열풍이 우리 식품의 수출 촉진에 긍정적인 영향을 줄 것으로 평가된다.

과거 인류는 '산업혁명 이전과 이후'로 나뉘졌는데, 앞으로는 '코로나19 이전과 이후'로 나뉠 것으로 전망될 만큼 전 세계가 사회적 거리 두기로 사회, 경제 전반에서 예측 불가능한 충격적 변화를 겪고 있으며 이는 식품산업도 마찬가지다. 식품산업에 있어 코로나19는 득(得)도 실(失)도 되고 있어 산업 전반에 새롭고 다양한 비즈니스 모델이 등장할 것으로 기대된다.

식품산업은 전 세계적으로 가장 빠르게 성장하는 산업군이다. 최근 쿠팡의 인기와 패밀리 레스토랑, 급식 등 외식과의 융합, 면역과 장 건강에 대한 관심 증가로 건강기능식품의 부상, 패스트푸드와 가정간편식(HMR)의 수요 증가, 배달업과 온라인 주문의 일상화 등으로 성장에 날개를 달았다. 반면 소비자는 생활 수준의 향상으로 안전(安全)을 넘어 안심(安心) 식품까지 요구하고 있고, 식품안전에 대한 국가책임뿐 아니라 제조자의 무한책임을 강조하고 있다.

향후 글로벌 식품산업 환경을 전망해 보면, 식량 증산을 위한 꾸준한 위해가능물질의 사용과 산업의 지속적 성장과 발전에 따른 환경오염으로 식품안전의 위협요인이 지속적으로 증가될 것이다. 유

전자재조합식품(GMO), 유전자 가위 기술, 나노식품, 새로운 첨가물 등 신(新)식품의 지속적인 개발과 상품화로 식품으로 인한 위해환경 노출 가능성이 더욱 커질 것이다. 농수축산물의 증산을 위한 농약, 항생물질 등 인체 위해가능물질의 의도적 사용이 늘어날 것이고 산업 발달에 따른 중금속, 다이옥신, PCBs 등 산업 오염물질로 인한 토양 및 수질오염으로 식품원료의 오염 가능성도 커질 것이다. 대량생산 및 유통을 위한 식품첨가물의 사용이 늘어나고 영세한 식품제조업소 종사자들의 위생·안전 의식 수준 및 전문성이 미흡해 언제든지 글로벌 대형 식품안전사고 발생이 우려되는 상황이며, 바이러스 등 전 세계적으로 생물학적 위협이 창궐하게 될 것이다.

산업적 측면에서 볼 때 건기식의 지속적 성장이 예상된다. 사실 건기식은 식품이지만 일반식품과 의약품의 중간쯤 위치해 식품업계와 제약사들이 서로 경쟁하고 있는데, 아직까지 국내 식품산업에서 차지하는 비중은 2% 정도에 불과하다. 과거 가짜 백수오, 가짜 홍삼 등 신뢰성 문제와 프로바이오틱스 유산균 사망사건 등 안전문제가 발생해 시장에 부정적인 측면도 있는 상황이다. 우리나라에서는 건기식의 안전성 확보, 품질 향상과 건전한 유통, 판매를 위해 「건강기능식품에 관한 법률」이 약 22년 전인 2002년 8월에 제정되었다. 일본은 1991년부터 '특정보건용식품'을 허용했다.

3

식품과학 기술의 특성 및 발전사

- 식품과학 기술의 발전사
- 푸드테크의 발전사
- 푸드테크의 특성

식품과학 기술의 특성 및 발전사

101 식품과학 기술의 발전사

한국 식품산업의 단계별 기술 발전은 <표 1>과 같이 요약했다. 1945년 해방 이전을 근대 이전으로 봤으나 주요 가공식품은 전량 일본에서 수입했고, 국내에서는 단순 가공처리만을 해왔으므로 산업이 싹트기 전이라 볼 수 있다. 1945~1960년은 해방 직후 ‘산업 태동기’인데, 1948년 12월 10일 한미경 제원조협정 체결과 미군의 영향으로 서구식 식생활이 급속히 확산된 시기였고, 제분, 제당, 장류, 제과, 제빵산업이 기술보급과 함께 시작됐다. 1961~1980년은 ‘산업 체화기’로서 1962년 제1차 『경제개발 5개년 계획』 시행, 월남파병, 중동건설 등으로 식품공업이 약진한 시기였다. 또한 1968년엔 (사)한국 식품과학회가 창립돼 과학기술 발전의 토대가 구축됐다. 1981~2000년은 진정한 ‘산업 발전기’인데, 1986 아시안경기, 1988 서울올림픽 등으로 레토르트식품 등 식품산업이 서구화되기 시작했고 기술 도입, 연구기능 강화, 품질경영이 시작됐다. 그러나 1997 국제통화기금(IMF) 구제 금융으로 원재료를 수입에 주로 의존하는 식품기업들은 위기를 겪기도 했었다. 2000~현재는 ‘산업 선도기’로 보는데, 외 식, 집단급식, 건강기능식품, 간편식품 등이 식품산업 패러다임을 바꿔 놓았고 수출이 확대되고 있다.

표 1 국내 개발 위성 분류

단계 시기	근대 이전 1945 이전	산업 태동기 1945~1960	산업 체화기 1961~1980	산업 발전기 1981~2000	산업 선도기 2000~현재
단계 구분 사건	일제 강점기 해방 이전	1945년 해방 직후	1962 제1차 경제개발 5개년 계획 시행	중공업 육성정책	농산물, 가공식품 수입 개방
주요 연대기	일제 강점기 1920년대	1950년 6월 25일 한국전쟁 1956년 이후 미국의 잉여농산물 도입	정부의 밀가루 ‘분식 장려 시책’ 시행	1986 아시안경기 1988 서울올림픽	세계 5대 생산국가 세계 5대 생산회사
환경	곡물도정, 수산물통조림, 제분, 제당, 양조 등 전쟁 군수식품을 중심으로 일본의 원료 공급처이자 소비국으로 이용 당하며 식품의 산업화 시작	미군의 영향으로 서구식 식생활이 급속히 확산	제1차 석유파동과 세계경기의 침체 경제개발 5개년 계획 시행, 월남 파병, 중동건설 등으로 식품공업의 약진 1968년엔 (사)한 국식품과학회가 창립돼 과학기술 발전의 토대 구축	1979 2차 석유위기 1997 국제통화 기금(IMF) 구제 금융으로 기업 부도 환율상승으로 수입업체 위기 1990년대 수입개방 개시	2008 미국 금융위기 외식, 집단급식 급증
주요 제품	곡물도정, 수산물 통조림, 제분, 제당, 양조 등 전쟁 군수식품, 제과, 우유, 맥주 등	제분, 제당, 장류, 제과, 제빵	장류, 제과, 제빵, 제면(라면), 햄, 소시지 등 육가공품, 유지류	레토르트식품	건강기능식품, 간편식품
정부정책	주요 가공식품은 전량 일본에서 수입	1948년 12월 10 일 한미경제원조 협정 체결	1962년 제1차 경제개발 5개년 계획 1962년 「식품위 생법」 제정 1973년 통일벼 개발로 쌀 자급 달성 자립 전략	수출촉진 1985공업촉진법 1988년 5월 「한국식품개발연 구원육성법」 국제무역기구 (WTO) 체제 출범, 경제협력개발기구 (OECD) 가입	2002년 8월 「건강기능식품에 관한 법률」 제정
기업전략 (선도업체 기준)	단순 가공처리	가내수공업	외국투자 및 외국 기술 모방단계	기술 도입 연구기능 강화 품질경영	수출 확대 글로벌경영

출처: 한국산업기술발전사-섬유·식품(산업통상자원부, 한국공학한림원, 2018)

102 푸드테크의 발전사

요즘 식품시장에선 ‘푸드테크’가 핫한 이슈다. 이는 푸드테크 관련 산업이 국내뿐 아니라 전 세계적으로 고(高)성장이 전망되며, 전통적 식품산업 성장의 새로운 활로가 될 것으로 기대되기 때문이다. 코로나19 이후 식품소비 트렌드가 환경과 건강 중시, 개인 맞춤형 소비, 비대면 활성화 등으로 변하면서 바로 이 푸드테크산업이 떠올랐고 여기에 정부와 민간 차원의 많은 투자가 이어지며 발전을 견인하고 있다. 소비자들도 사회적 가치 실천, 혁신적 제품을 통한 만족도 제고 등을 목적으로 푸드테크 관련 제품 소비를 확대하는 추세다.

푸드테크(Food-tec)는 ‘식품(Food)’과 ‘기술(Technology)’의 합성어로 식품의 생산·유통·소비 전반에 IT(정보통신), BT(생명과학), AI(인공지능) 등 첨단 기술이 결합된 신(新)산업을 말한다. 현재 국내에서는 농식품부가 주도하고 있는데, 식품에 기술을 융합시켜 새로운 제품과 서비스를 개발하거나 생산공정의 효율화, 유통 시간 단축 등 식품산업의 부가가치를 올려주는 기술을 일컫는다.

우리나라에서의 푸드테크의 범위는 협의적으로 신식품 개발, 제조 및 유통 효율화, 외식, 부산물 처리 등 5개 분야로 구분되는데, 광의적으로는 ICT 기반 농업생산 등 전후방 산업을 포함하는 농업-푸드테크(Agri-Foodtech)로 크게 본다. 특히, 대체식품, 간편식품, 식품프린팅, 스마트팩토리, 배달앱 및 무인주문기, 배달·서빙·조리 로봇 등 핫한 아이템들이 포함된다.

특히 미국, 유럽연합(EU) 등 선진국은 정부 차원에서 푸드테크 지원에 적극 나서고 있다. 미국은 「2020 국가 인공지능 이니셔티브 법」을 제정하는 등 푸드테크 관련 규제 완화 및 R&D 투자를 확대하고 있다. 2022년 11월 미국 내 최초로 식약청(FDA)에서 업사이드푸드 사(社)의 닭고기 세포배양 기술의 안전성을 승인했고, 농무부(USDA)에서 세포배양 시설의 등록 및 검사, 제품검사 등을 진행해 현재 제품 판매가 가능한 상태라 한다. 미(美) Impossible Food 사는 대두 뿌리혹에서 추출한 레그헤모글로빈(Leghemoglobin)에 정밀 발효 기술을 접목한 고농도의 식물성 헴(Heme) 단백질을 대량생산해 2021년에만 약 2만 개의 마트와 3만 개 식당에 고기 패티를 납품했다고 할 정도다.

EU도 「Horizon 2020」을 통해 2014년부터 대체단백질 분야 연구개발 지원을 해 오고 있다. 특히 네슬레는 2017년에 식물성 식품기업 Sweat Earth를 인수해 2021년 완두콩을 사용한 식물성 유제품 브랜드 Wunda를 런칭했다. 일본도 식료·농업·농촌정책 기본계획(2020~2024)에 따라 푸드테크 관련 R&D 지원을 강화해 농식품 기술혁신, 대체식품 기술개발 등에 공을 들이고 있는데, 2020년엔 160여 개의 산학연이 참여한 ‘푸드테크연구단’을 발족하기도 했다.

우리나라에서도 붐이 일고 있어 조만간 푸드테크산업 육성에 관한 법적 근거가 마련될 것 같고 시장 확대를 위한 각종 안전관리 규정이 정비될 것으로 보인다. 현재 축산단체, 소비자단체 등이 참여하는 협의체를 통해 표시 기준도 논의 중이라 한다. 또한 산업부와 경찰청에서는 보도통행 허용 대상에 로봇이 포함될 수 있도록 「지능형로봇법」, 「도로교통법」 등의 법 개정을 추진 중이라 하니 신기술과 신제품이 주도하는 ‘푸드테크의 시대’가 생각보다 빨리 올 것 같다.

103 푸드테크의 특성

(1) 개념

식품(Food)과 기술(Technology)의 합성어로 식품의 생산·유통·소비 전반에 IT·BT·AI 등 첨단 기술 등이 결합된 신(新)산업이다. 식품과 기술과의 융합을 통해 새로운 식품과 서비스 개발, 생산공정 효율화, 유통시간 단축 등 농식품산업의 부가가치를 제고한다.

(2) 범위

협의의 푸드테크는 식품 가치사슬에서 ‘신(新)식품 개발, 제조 및 유통 효율화, 외식, 부산물 처리’ 등 5개 분야로 구분 가능하다. 광의로는 ICT 기반 농업생산 등 전후방 산업을 포함, ‘농업-푸드테크(Agri-Foodtech)’로 불린다. 대체식품, 간편식품, 식품프린팅, 스마트팩토리, 배달앱 및 무인주문기, 배달·서빙·조리 로봇 등이 광범위하게 포함된다. 3차원 디지털 디자인을 활용하여 식품원료를 한 층씩 적층하여 재구성하는 식품 제조 기술을 말한다. 모든 생산과정에 IoT, ICT 기술을 접목해 최소 비용으로 제품을 생산하는 첨단 지능형 공장도 포함된다.

그림 4 푸드테크의 범위



출처: 한국산업기술발전사-섬유 식품(산업통상자원부, 한국공학한림원, 2018)

그림 5 푸드테크의 영역

구분	분야	주요 영역			
광의의 푸드 테크 (Agri-Foodtech)	협업의 푸드 테크	식품생산	新식품	대체식품	식물·미생물·곤충 대체식품 등
				간편식	밀키트, HMR 등
				케어푸드	메디푸드, 고령친화식품, 기능성식품, 개인맞춤식품 등
		제조 기술	식품프린팅, 로봇 등을 적용한 생산공정 자동화, 스마트 안전관리 등		
		식품유통	식품유통 무역	주문배달앱, 농식품 온라인플랫폼 등	
		식품소비	외식 서비스	주방서빙 자동화	서빙로봇, 주방로봇 등
				식당주문/배달	배달앱, 무인주문기, 배달로봇 등
				맞춤형 정보제공	음식·식당 추천, 영양검색 기술 등
	처리 기술	푸드 업사이클링, 친환경포장 기술 등			
	연관 산업	식품생산	농수축산	에그테크	디지털육종, 스마트팜, 스마트축산, 스마트유통, 정밀농업 등
푸드테크 기술개발			관련 하드웨어 및 소프트웨어 기술개발 산업 등		

출처: 농식품산업의 혁신성장을 위한 푸드테크산업 발전방안(관계부처 합동, 2022)

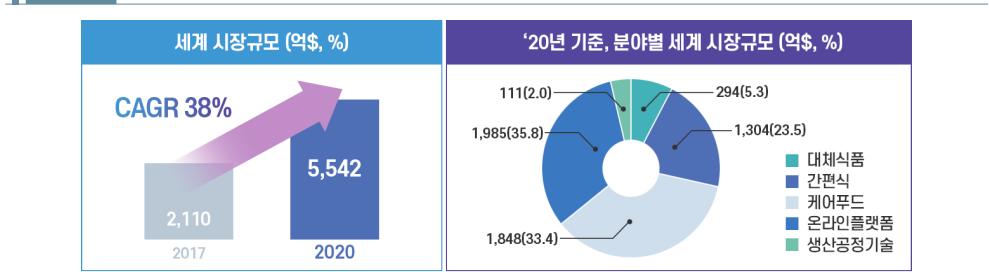
(3) 푸드테크 시장규모

푸드테크산업의 성장률은 전 세계적으로 식품산업 전체 성장률보다 월등히 높다. 국내 푸드테크 시장규모는 약 61조 원(2022년 기준, 2017년 27조 원)으로 전체 식품·외식·유통산업(570조 원)의 10.7% 규모에 불과하지만 성장률은 31%로 4.8%의 성장에 그친 식품산업보다 크게 높아 앞으로 식품산업 성장의 활로가 될 것으로 기대된다. 현재 국내 푸드테크산업을 세부적으로 나눠보면 온라인 식품거래(43조 원, 73%)가 가장 크고, 다음이 케어푸드(12조 원, 20%), 간편식(4조 원, 7%), 대체식품(209억 원, 0.03%) 순이다.

특히 '온라인 식품 주문·배달' 부문은 고도화된 IT 기술력을 바탕으로 우리나라가 가장 높은 경쟁력을 보유하고 있다. 로봇의 경우, 국내 기술 수준은 미국, 중국에 비해 낮지만, 조리·서빙 등 외식산업 분야 로봇 개발에 투자를 확대하고 있어 앞으로 성장이 기대된다. 우리나라에서 집중적으로 확보하고자 하는 10대 푸드테크 핵심 기술로는 세포배양식품 생산 기술, 식물기반식품 제조 기술, 간편식 제조 기술, 식품프린팅 기술, 식품 스마트 제조 기술, 식품 스마트 유통 기술, 식품 커스터마이징 기술, 외식 푸드테크 기술, 푸드 업사이클링 기술, 친환경식품 포장 기술이 있다.

2020년 기준 세계 푸드테크 시장규모는 약 5,542억 달러(약 665조 원, GS&J 추정)로 2017~2020년 연평균 38% 성장을 보인다. 세계 푸드테크산업 시장규모는 2017년 2,110억 달러에서 2020년 5,542억 달러로 연평균 38% 성장을 보인다. 현재 분야별 시장규모는 온라인 식품 거래가 1,985억 달러(35.8%), 케어푸드가 1,848억 달러(33.4%), 간편식이 1,304억 달러(23.5%), 대체식품이 294억 달러(5.3%) 순이다. 향후 대체식품, 생산공정 기술(식품프린팅, 로봇 등)에서 높은 성장 전망이 전망된다. 분야별 연평균 성장률 전망치를 보면, 대체식품이 2020~2030년 18.6%(Bloomberg), 생산공정 기술이 2020~2025년 16.1%(Research and Market), 간편식이 2020~2025년 4.1%(Euromonitor) 등이다.

그림 6 세계 푸드테크산업 시장규모



출처: 농식품산업의 혁신성장을 위한 푸드테크산업 발전방안(관계부처 합동, 2022)

(4) 해외 푸드테크정책 및 산업 동향

① 미국

미국은 푸드테크 관련 R&D를 강화하며, 범부처 협업체계를 구축하고 있다. 2020년 「국가 인공지능 이니셔티브 법」 제정으로 푸드테크 R&D 지원을 강화하고 있으며, 배양육 관리를 위한 정부 간 역할 정립 등을 추진 중이다. 미 식약청(FDA)은 세포 증식·채취 단계를 담당하고, 미 농무부(USDA)는 세포 채취 이후 식품생산·유통 단계를 관할한다. 2022년 11월 미국 내 최초로 FDA에서 업사이드푸드사의 닭고기 세포배양 기술의 안전성 승인, USDA에서 세포배양 시설 등록 및 검사, 제품검사 등을 진행한 후 제품 판매가 가능하다. 스타트업 중심으로 기술혁신 사례가 지속 등장하고 있는데, 비용 절감·품질 고급화 등을 통해 산업화 단계에 진입한 상황이다. 미 Impossible Food 사에서는 대두 뿌리혹에서 추출한 레그헤모글로빈(Leghemoglobin)에 정밀 발효 기술을 접목하여 고농도의 식물성 헴(Heme) 단백질 대량생산이 가능하다. 2021년 약 2만 개의 식료품점과 3만 개 식당에 납품 중인데, 패티 개당 가격은 5.49달러로 일반 소고기 패티(2~3달러)보다는 비싼 상황이다.

② 유럽연합(EU)

EU에서는 대규모 R&D 투자를 통해 푸드테크 기술 수준을 향상하고 있다. Horizon Europe(2021~2027)을 통해 식물·곤충 등을 활용한 대체단백질 소재 개발 등 연구 지원을 하고 있는데, 2021~2022년 식품 분야에 약 1,766억 원을 투자하고 있다. 스위스 네슬레 사는 2017년 식물성 식품기업 Sweat Earth를 인수했고, 2021년 완두콩을 사용한 식물성 유제품 브랜드 'Wunda'를 런칭했다.

③ 일본

일본도 푸드테크 관련 산학연 협력 R&D 지원을 강화하고 있다. '식료·농업·농촌정책 기본계획'(2020~2024)에 따라 산학연 협력을 바탕으로 농식품 기술혁신, 대체식품 기술개발 등 집중 지원하고 있다. 2020년 160개 이상의 식품기업, 스타트업, 정부, 연구기관 참여의 푸드테크 연구단을 발족했다.

(5) 국내 푸드테크정책 및 산업 동향

국내에는 스타트업을 중심으로 산업화를 위한 기술을 개발 중이다. 식물성 대체식품 분야는 대부분 원료·소재를 수입, 가공하는 수준으로, TVP 등 소재 개발 및 공정 기술 개선이 필요한 상태다. 다양

한 제품이 개발되어 시장에 출시되고 있으나, 품질·인지도 측면에서 산업화 초기 단계이며 수출 역량을 갖춘 기업도 소수에 불과하다. 식물성 대체식품업체 대상 설문조사 결과(aT, 2022), 응답 업체 중 63.2%만 매출 실현 중이다. 수출기업 대상 조사 결과(aT, 2022), 대체식품 수출기업은 대·중견기업(5개) 중심으로 진행 중이다.

세포배양 식품 관련, 미국, EU 등은 식물·미생물 등 다양한 세포배양 연구가 진행 중이나, 우리나라는 배양육 분야 연구가 주를 이루고 있다. 고수율의 줄기세포 및 무혈청배지 개발 등 대량생산을 위한 연구가 활발하고 대규모 투자를 유치한 스타트업도 등장하고 있으나, 규제의 불확실성이 한계로 작용한다. 현재 다수 업체가 배양액 소재로 고가의 소 태아혈청(소 태아에서 채취, 전 세계 생산량은 연간 80만 리터, 약 2,240kg의 배양육 생산 가능)을 사용하고 있다. 누적 투자액(2021)을 보면, 엑셀세라퓨틱스가 337억 원, 다나그린이 105억 원, 씨위드가 75억 원, 셀미트가 59억 원 등이다. 현재까지 배양육 판매가 가능한 국가는 싱가포르가 유일하다(2020년 11월 승인).

식품프린팅 분야는 단일 원료 제품(초콜릿, 쿠키 등)의 시제품 제작에 활용하는 수준이며, 다양한 식품의 자동화 공정에 적용하기 위한 연구가 필요하다. 유통플랫폼 분야를 보면, 국내 푸드테크 유니콘 기업(기업가치 1조 원 이상) 모두 유통플랫폼 기업(컬리, 오아시스)으로 빠르게 성장 중이다. 온라인 주문·배달은 고도화된 IT 기술력을 바탕으로 푸드테크산업 분야 중 가장 높은 경쟁력을 보유하고 있다.

식품로봇 분야는 로봇의 기술적 기반인 인공지능, 자율주행 센서, 구동기(전기 모터, 감속기), 제어기 등의 기술에서 상대적으로 고도화된 상황이다. 최고 기술 보유국가(100점) 대비 국내 로봇 기술 수준은 80.0점(KISTEP, 2020), AI는 87.4점(ITP, 2019)이다. 로봇의 상용화 수준은 미국, 중국 등에 비해 낮지만, 조리·서빙 등 외식산업 분야에서 로봇 기술을 개발하는 사례가 증가하는 추세다. 2021년 기준, 중국은 전 세계 서비스로봇 매출의 30%를 차지(약 4.3조 원 규모)한다. 삼성전자, LG전자, 두산로보틱스 등 주요 대기업들이 조리·서빙로봇 시장에 참여 중이다. 식품 제조공정에서는 주로 포장 단계에서 로봇이 적용되나, 식품 종류의 다양성·비정형성 등으로 인해 기술개발 난이도가 높다.

표 2 국내 푸드테크 10대 핵심 분야 기술개발 방향

10대 핵심 기술 분야	연구 방향
세포배양식품 생산 기술	• 배양액 핵심 소재, 지지체 등 신소재 발굴 및 생산 효율화 기술개발 • 고급육 모사를 위한 구조화 등 배양육 품질(식감·풍미) 고도화 기술개발 • 생산비용 절감을 위한 대량 배양 공정 기술 개발 등
식물기반식품 제조 기술	• 분리단백, 구조화단백 등 식물성 대체식품 소재 기술개발 • 고품질 단백질 구조체 대량생산을 위한 스케일업 기술 및 설비 개발 • 대체 지방, 물성 구현 소재 등 고기능 신규 첨가원료 발굴
간편식 제조 기술	• K-Food 특성 연구 및 DB화 • K-Food 간편식 생산 자동화, 포장 개선 등을 위한 기술개발
식품프린팅 기술	• 국내 농산물의 식품프린팅 적성 등 특성 연구 및 DB화 • 물성제어 등 식품프린팅 가공 기술 및 표준모델 개발 • 식품 잉크 소재 개발, 보존·유통 기술개발
식품 스마트 제조 기술	• 식품제조업 분야 AI, 로봇 등 기반 협동 기술* 개발 * 인간과 로봇이 같은 공간에서 협동 작업을 수행하는 기술. 센서를 탑재하여 사람과 물리적 상호작용이 가능 • 주요 품목 제조공정별 이물질 검출 등을 위한 푸드센서 기술개발
식품 스마트 유통 기술	• 주요 농산물 수확 후 품질 판정 등 인공지능 모델 개발 • IoT 기반 농산물 가공시스템 실시간 모니터링 및 고도화 기술
식품 커스터마이징 기술	• 식품 특성, 건강 상관성 등 기초 정보 DB화 • 개인별 질환, 유전정보 등에 기반한 식이설계 알고리즘 개발 • 질환별 관리식 적용을 위한 소재 발굴 및 생산 기술 개발
외식 푸드테크 기술	• 로봇, 수요예측 AI 등 외식 매장관리 자동화 기술개발 • 메뉴별 영양성분 정보, 고객 평가 분석 등 소비자 맞춤형 데이터 이용 기술개발
푸드 업사이클링 기술	• 농식품 부산물 성분 DB 구축 및 원료처리 공정 효율화 • 농식품 부산물 종류별 업사이클링 용도 다양화를 위한 연구개발
친환경식품 포장 기술	• 경량화 등 플라스틱 절감 기술개발 • 플라스틱 포장재의 재활용성 제고를 위한 고차단성 유니소재 기술개발 • PBAT, PLA 등 생분해성 원료 기반 식품포장 소재 생산 기술 개발

출처: 농식품산업의 혁신성장을 위한 푸드테크산업 발전방안(관계부처 합동, 2022)

4

식품산업과 안전의 중요성

- 식품산업(Food Industry)의 중요성
- 식품안전(Food Safety)의 중요성

식품산업과 안전의 중요성

101 식품산업(Food Industry)의 중요성

최근 코로나19 사태에도 불구하고 식품산업은 급성장 중이다. 4차 산업 기술 기반 신기술 도입 및 건강과 편의성을 동시에 추구하는 먹거리 트렌드에 맞물려 가공식품의 소비가 급증하고 있다. 우리나라 식품산업 중 음식료품 제조업의 2015년도 산업연관분석¹ 결과를 보면 취업유발계수는 15.991이며 고용유발계수는 6.671이었고 외식업은 각각 23.653과 11.801이었다.

식품산업은 제약업계나 화장품, 의료기기업계보다 높은 취업유발계수를 나타낸다. 부가가치유발계수는 음식료품제조업이 0.185이었고 외식업은 0.090으로 상대적으로 낮았다. 세계 자동차 시장규모는 1.4조 달러, IT 시장은 0.9조 달러, 철강시장 0.8조 달러로 세계 식품시장이 각각 4.5배, 7배, 7.9배 큰 것으로 나타난다.

국내에서 유통되고 있는 신기술 이용 식품으로는 유전자변형식품이 대표적이며 최근 유전자 교정(유전자 편집) 기술을 이용한 식품산업의 범위와 규모는 지속적인 증가추세에 있으며, 대체육 등의 개발이 활발해지면서 식품산업 시장의 새로운 트렌드가 되고 있다.

대체육의 경우 미국 FDA에서는 생산 자재 및 공정을 평가하기 위한 Pre-market 상담을 실시하며 세포 수집 및 Cell banks의 품질 감독, 채취부터 생산공정 감독, 시설 등록, cGMP 및 기타 해당 식품 규제 준수 여부 확인, 필요시 배양과정에서 생산되는 생물학적 산물들의 안전성 확인 및 세포은행과 배양시설의 안전을 위한 검사를 강화하고 있다.

이와 같은 새로운 기술을 적용한 식품의 개발과 수요가 증가하면서 미국 및 일본 등에서는 안전관리를 위한 정책 방향을 제시하고 있다. 일본에서는 외부에서 유전자를 삽입하여 새로운 기능을 얻는 경우에는 안전성 심사 대상이 되지만 유전자를 절단만 한 경우에는 유전자 본래의 기능이 손실되어 안전성 심사 대상에서 제외하고 있다.

¹ 식품산업정보분석 전문기관 사업보고서(한국농촌경제연구원, 서울대학교, 2019)

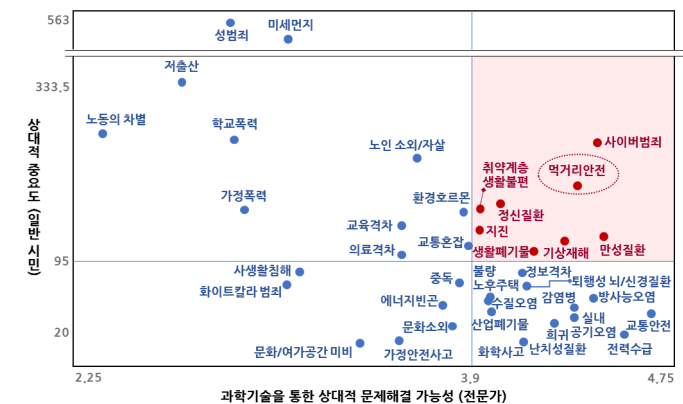
현재의 식품산업은 제약산업, 의료기기산업 또는 화장품산업과 비교할 때 산업의 규모 면에서 월등히 크고 산업연관분석 결과 고용유발계수, 취업유발계수, 부가가치유발계수 등을 비교해 볼 때 의미 있는 결과를 보여주고 있다. 코로나19 사태에서도 식품산업은 활발한 생산 활동을 보이고 있으며 특히 곤충, 배양육, 유전자 교정기술 등 새로운 제품 개발이 활발하여 새로운 블루오션으로 평가될 수 있다고 사료된다. 이에 새로운 기술이나 소재를 활용한 신종식품에 대한 안전성 평가와 법률과 규정 등의 제정에 필요한 규제과학 전문 인력 양성 및 연구 활동이 필수적으로 요구된다.

102 식품안전(Food Safety)의 중요성

2018년도 국가과학기술자문회의에서는 『제2차 과학기술 기반 국민생활(사회)문제해결 종합계획(2018~2022)』을 발표하고 국가가 해결해야 할 주요 사회문제 10개 분야를 선정하였다. 이는 생활안전, 재난재해, 건강, 환경, 문화, 에너지, 주거·교통, 가족, 교육, 사회통합 등의 분야이며 이 중 40개 주요 사회문제를 도출하였다. 식품안전(먹거리 안전)은 성범죄, 사이버범죄, 사생활 침해, 가상화폐 부작용, 화이트칼라 범죄, 가정 안전사고와 함께 생활안전 분야에 포함되어 있다.

과학기술정보통신부에서는 선정된 40개 사회문제를 가지고 일반시민을 대상으로 사회문제 중요도를, 전문가를 대상으로 과학기술을 통한 문제해결 가능성을 설문조사 한 결과 먹거리안전, 사이버범죄, 만성질환 등 8개 사회문제가 상대적으로 최우선 영역에 해당되었다(그림 9).

그림 9 일반시민·전문가 통합 포트폴리오



출처: 과학기술정보통신부 제2차 과학기술 기반 국민생활(사회) 문제해결 종합계획(2018~2022)(과학기술정보통신부, 2018)

이러한 일반시민과 전문가들이 평가한 결과에서도 식품안전(먹거리 안전) 문제는 우리나라 전체 사회문제 중에서 2위로 국민이 가장 필요로 하는 분야로 선정되었다. 이와 같이 우리나라 국민들의 안전한 식품과 안전한 삶에 대한 높은 기대에도 불구하고 낙지 머리 카드뮴 사건(2010), 참기름 벤조피렌 오염 사건(2015), 햄버거 용혈성요독증후군 사건(2017), 학교급식 초코케이크 사건(2019) 등 위해 요소(Hazards) 검출 사건이나 대형 식중독 사건들이 연례적으로 발생하고 있는 실정이다.

최근 식품 산업계에서는 곤충, 배양육과 같은 신소재 식품원료나 유전자 교정기술과 같은 신기술을 적용하여 개발된 다양한 신종식품이 시판되고 있어 이러한 신종식품에 대한 허가·심사 등 평가기술과 기준·규격 설정 및 안전관리 분야의 업무 수요가 증가될 것으로 예측되고 있다. 신소재 식품원료나 신기술 적용 개발된 다양한 신종식품에 대해서는 아직까지 어떠한 위해요소가 존재할 수 있는지조차 확인하기 어려운 실정이다. 따라서 이러한 신종식품의 시판 전에 어떠한 기준·규격을 설정할지 결정하여야 하며, 화학적·물리적·생물학적 위험요인들의 검사를 위한 가이드라인도 필요할 것이다.

특히 코로나19 시대에는 식품 등 사회 모든 부문의 안전관리 규제가 강화될 것이므로 식품산업계는 미래 식품산업 진흥 및 안전관리 패러다임 변화에 따라 발 빠른 대비가 필요하다. 가공식품에 대한 선호가 늘면서 식품의 판매기한을 의미하는 유통기한을 넘어 수명을 알려주는 소비기한 제도가 도입되고 냉장, 냉동, 실온 등 보관·유통기준 표시의 유연성이 확보되며, 환경과 보존성을 고려한 포장재·포장 방법 관련 규제가 완화되어야 한다. 또한 새로운 유형의 가공식품, 새로운 제조공법, 신식품 등에 대한 허가요건과 유형별 기준·규격에 대한 유연한 제도 운영이 필요하다. 온택트 소비가 증가하면서 온라인 배송업, 편의점 업종에 대한 규제가 개선되어야 한다. 공유주방, 주류배달, 해외 직구, 온라인 배달, 새벽배송, 자판기, SNS 광고 및 구매 등 관련 규제의 완화와 합리화 과정이 진행되어야 한다. 개인위생과 안전 관리에 대한 사회적 니즈 증가로 정부의 식품안전 규제는 보다 강화될 것이며, 반면 진단·시험법, 소독, 신식품, 신소재 등 안전 관련 혁신 성장산업은 규제 샌드박스의 적용 등 인허가에 유연한 입장을 취할 것으로 예상된다. 블록체인 기술 활용 이력추적시스템, 지능형 스마트 감시시스템, 시간-온도감지 지시계 등 4차 산업혁명에 따른 스마트 식품안전 감시체계가 발전, 도입될 것으로 전망되며 이로 인해 더욱 엄격하고 철저한 식품 안전관리가 가능해질 것이다.

5

산업 발전에 영향을 미치는 주요 규제 연계 식품안전 과학기술

- 유전자 교정 생물체 생산 기술
- 배양육 개발 기술
- 나노식품 기술
- 식품 로봇틱스 기술

산업 발전에 영향을 미치는 주요 규제 연계 식품안전 과학기술

산업 발전에 영향을 미치고 규제에 민감한 식품안전 과학기술로는 배양육 등 신소재 식품원료, 유전자 재조합 및 편집 기술 등 생명공학(BT), 나노(NT), 정보통신(IT), 로봇틱스 등을 적용한 식품안전 관련 신기술이 있다. 본고에서는 유전자 교정 생물체 생산 기술, 배양육 개발 기술, 나노식품 기술, 식품 로봇틱스 기술 등 4대 기술을 선정하였다.

101 유전자 교정 생물체 생산 기술

(1) 기술 개요

유전자 교정 생물체 생산 기술은 유전체에서 특정 염기서열을 인식한 후 해당 부위의 DNA를 정교하게 잘라내는 시스템을 의미한다. 유전자 가위에 의한 DNA 이중나선의 절단은 세포의 자연 내부 복구시스템인 상동재조합 또는 비상동말단연결을 통해 수선되면서 유전정보의 교정이 일어난다. 이러한 유전자 교정기술은 변형된 핵산분해효소를 사용하여 세포의 유전체에서 특정 염기서열을 인식한 후 해당 부위의 DNA를 정교하게 잘라내어 자연에서 일어나는 무작위적인 돌연변이를 의도한 곳에서만 일어나도록 하는 기술로 외부에서 끼워 넣은 유전자가 남아 있지 않는 특징을 지닌다. 반면에 기존의 유전자 변형 기술을 이용한 유전자변형생물체(GMO)는 외부에서 인위적으로 첨가한 유전자가 생물체 안에 남아 특정 형질이 발현되게 만든 것이다.

유전자 교정기술로 만들어진 작물이 과연 GMO와 같은 것인지 다른 것인지가 세계적 논란거리다. 이 기술은 작물 고유의 유전자(gene) 일부를 약간 편집하는 수준이라 GMO와 차별화해 안전성 논란을 잠재우고 싶은 개발자 그룹과, 이 기술은 결국 유전자를 조작하는 기술이라 GMO와 같은 것이고 당연히 안전성이 입증되지 않았다는 반대 측 논리가 첨예하게 대립하고 있는 상황이다. 이 두 가지 기술

은 모두 유전자를 만진다는 면에서는 같은 기술인데, 'GMO'는 유전자를 삽입하는 '더하기'고, '유전자 교정기술'은 유전자를 빼는 '빼기'라는 차이가 있다. 이렇듯 유전자 교정기술은 외래 유전자를 끼워 넣는 것이 아니라 필요한 부분에 한해 최소한의 돌연변이를 유도하므로 기존 돌연변이 육종에서 나오는 부작용과 유사하거나 훨씬 낮은 위해성을 지니는 것으로 판단되고 있다.

(2) 국내외 연구개발 현황

최근 신(新)기술인 '유전자 교정기술'로 알려진 '게놈 편집 기술'로 품종을 개량해 생산한 작물로 만든 식품이 전 세계적으로 급속히 보급되고 있다. 일본 정부가 가장 적극적으로 규제를 정비 중이며, 실용화를 유도하는 중이다. 이 기술로 유전자를 절단한 생물은 유전자변형작물(GMO)과는 달리 안전성 규제 대상에서 제외하나, 어떠한 유전자를 조작했는지 등의 정보는 국가에 제공하고 소비자에게 공개한다는 방침이다. 그러나 유전자 교정(편집)으로 새로운 알레르기 원인물질이 생기는 등 미지의 위험이 발생할 우려 때문에 일본의 전국소비자단체연합회에서는 반대의견을 밝혔다.

미국, 일본, 중국 등 무역 강국에서는 국가가 적극적으로 나서 유전공학 기술을 활용한 식량자원을 개발하고 있는 추세인데, 최근 국내 한 생명공학기업도 'GMO'가 아닌 '유전자 교정기술'로 곰팡이병에 강한 포도와 사과를 만들었다고 한다. 또한 고기 양을 늘린 돼지, 상추나 벼의 품종 개발도 이어지고 있다.

102 배양육 개발 기술

(1) 기술 개요

가축을 키우는 축산(畜産)업은 항생제 남용, 전염병 확산 등 다양한 환경·보건 문제를 야기하는 것이 사실이다. 특히 최근 기후 온난화의 주요 원인으로 고기 생산이 지목받고 있고 이산화탄소 발생과 가축 배설물 처리 등 환경운동가들의 눈엣가시가 되고 있다. 축산업이 배출하는 온실가스의 양은 지구 전체 온실가스 배출량의 14%에 육박하고, 전 세계 15억 마리의 소가 배출하는 메탄가스는 연간 1억 톤이나 된다고 한다. 동물을 키워 단백질을 얻는 데는 식물에 비해 물이 4~25배 더 필요하고, 화석연료가 6~20배 더 들기 때문에 대체육(代替肉) 시장이 환경보호 측면에서 각광받고 있다.

게다가 지난 2015년 세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구소(IARC)에서 소시지, 햄, 핫도그 등 가공육을 담배나 석면처럼 위험한 1군 발암물질로 분류하고 “붉은 고기의 섭취가 암을 유발할 가능성

이 있다”는 평가를 내려 시장에서 위기를 맞고 있다.

사실 환경 부담이 적으면서도 단백질 생산량이 높아 압도적으로 가성비가 좋은 육류 1위는 ‘곤충 단백질’인데, 가장 환경친화적이라는 이야기다. 그 다음이 닭고기, 식물성 단백질 순이며, 젓소가 가장 나쁘다고 한다. 우유를 만들기 위해 어미 소는 끊임없는 인공수정으로 새끼를 임신하고 착유하는 과정을 평생 반복해야 하는데 이런 동물 윤리 문제 또한 해결할 수 있는 ‘대체유(代替乳)’에 대한 니즈와 시도가 줄을 잇고 있다. 최근 콩, 아몬드, 코코넛, 쌀 등으로 만든 ‘식물성 milk’가 두 자릿수 고성장을 보이는 반면 소가 만든 ‘우유(cow milk)’의 소비는 점점 줄어들어 장기 침체기에 빠졌다. 미국 스타트업 퍼펙트데이는 실험실에서 새로운 ‘애니멀프리’ 우유를 만들어 냈다. 효모세포를 이용한 것인데, 일반 낙농업에 비해 에너지 소비를 65% 줄이고, 온실가스 배출량도 84% 감소시키는 획기적 기술로 평가받고 있다.

대체단백질 식품의 경우 동물성 단백질을 대체한 식품으로 식물성 단백질 기반 제품, 곤충 단백질 기반 제품, 미생물 단백질 기반, 해조류 단백질 기반 제품 및 세포 배양육 등 5개 제품군으로 분류된다(박 등, 2020). 맛, 식감, 모양 등 실제 고기와 비슷하게 구현하기 위해 다양한 단백질 원료를 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 대체단백질 식품에서 원료 사용 비중은 현재 식물 기반(87.2%), 곤충(6.3%), 해조류(5.4%), 미생물(1.1%)로 활용되며, 이 중 대두, 완두, 밀, 쌀, 렌틸콩, 병아리콩, 헴프시드 등 식물성 단백질 원료가 주로 활용된다(오나히, 2024).

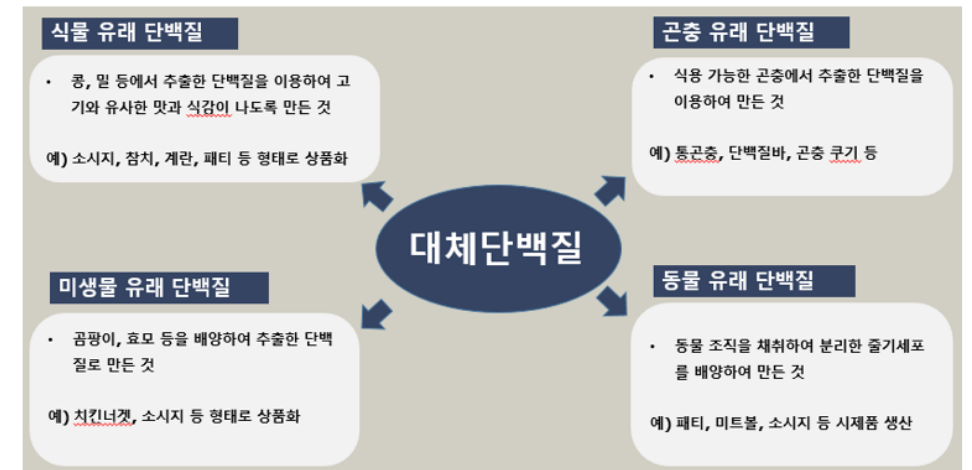
대체육(alternative meat)이란 단백질 등 전통 육류를 대체할 수 있는 성분을 지닌 원료를 바탕으로 구현한 식품을 지칭하며, 식물 유래, 곤충 유래, 미생물 유래, 배양육으로 나뉜다.

배양육(培養肉, cultured meat, synthetic meat, cell-cultured meat, clean meat, vat meat, in-vitro meat)은 살아있는 동물의 줄기세포를 채취하고 배양하여 축산농가 없이 고기를 배양하는 세포공학 기술로 생산하는 살코기를 말한다.² 배양육은 재생 의학 분야에서 개척된 조직공학 기술을 사용하여 생산된다. 제이슨 매테니(Jason Matheny)는 배양육 생산에 관한 논문을 공동 집필하고 체외 육류 연구에 전념하는 세계 최초의 비영리 단체인 뉴 하베스트(New Harvest)를 만든 후 2000년대 초반에 이 개념을 대중화했다.

배양육은 기후변화의 잠재적인 완화 외에도 육류 생산, 동물 복지, 식량안보 및 인간 건강의 환경적 영향을 해결할 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

² <https://ko.wikipedia.org/wiki/%EB%B0%B0%EC%96%91%EC%9C%A1>

그림 8 대체육의 종류

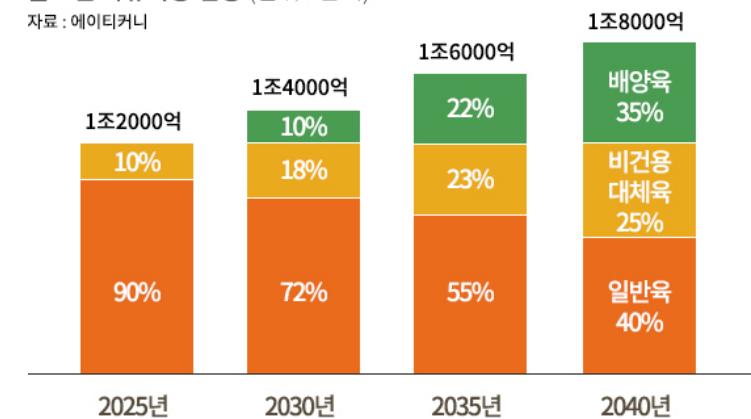


출처: 식약처, 대체식품의 정의와 안전관리 기준(식품의 기준 및 규격 고시 개정). 2022.12.22 (연구진 재구성)

그림 9 글로벌 육류시장 전망자료

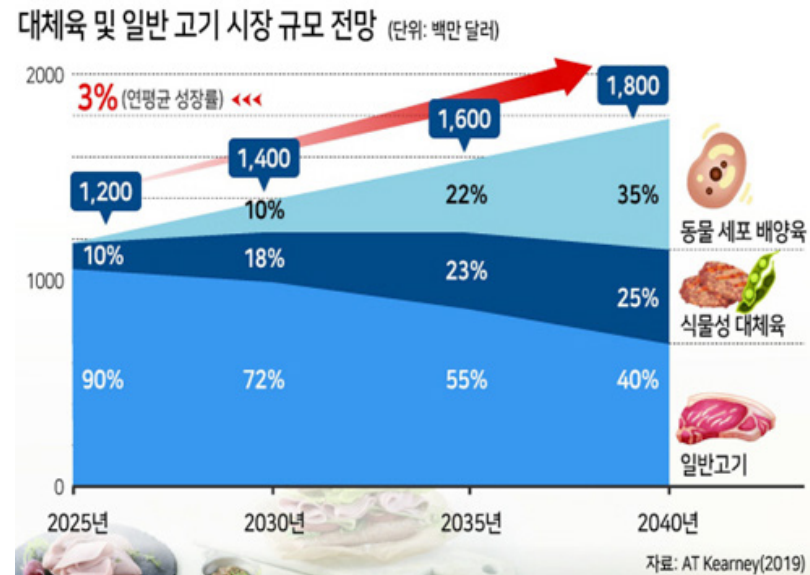
글로벌 육류시장 전망 (단위 : 달러)

자료 : 에이티커니



출처: A.T. Kearney

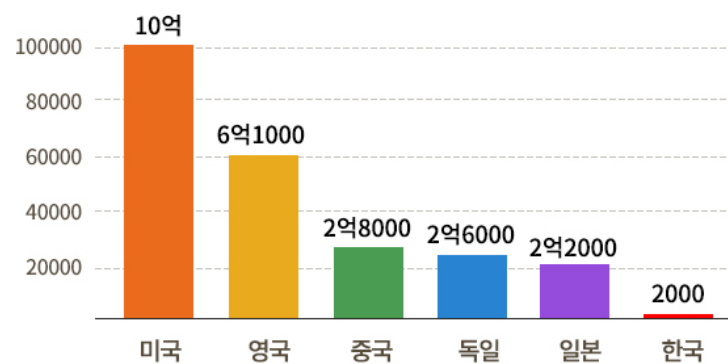
그림 10 세계 대체육 및 일반 고기 시장 규모 전망



출처: KORTA 국가별 대체육시장 규모

그림 11 글로벌 대체육 시장 규모

글로벌 대체육시장 규모 (단위 : 만달러)
자료 : KOTRA



출처: KORTA 국가별 대체육시장 규모

(2) 국내외 연구개발 현황

2013년 마크 포스트(Mark Post)는 동물의 외부에서 자란 조직으로 만든 햄버거 패티를 만들었다. 그 이후로 다른 배양육 시제품이 언론의 주목을 받았다. 슈퍼미트(SuperMeat)는 치킨버거에 대한 소비자 반응을 테스트하기 위해 텔아비브에 '치킨'이라는 팜투포크 레스토랑을 열었다. 미국 정부는 5G, AI 등의 최신기술을 식품산업에 융복합하여 식품·농업 분야의 미래인력을 양성 및 제조 분야 첨단화를 추진 중이며, 정부 주도의 농식품 분야의 혁신을 위한 기초·응용연구를 진행 중이다.

2020년 11월 26일 도살(屠殺)하지 않고 가축의 근육(筋肉) 세포를 배양해 만든 배양육이 세계에서 처음으로 싱가포르 정부의 식용 승인을 받았다. 싱가포르 레스토랑 1880에서 미국 기업 잇저스트(Eat Just)가 제조한 배양육을 판매하던 곳에서 만들어졌다. 2013년 네덜란드 마스트리흐트대의 마크 포스트 교수가 처음으로 배양육 햄버거를 선보인 지 7년 만에 신 식품으로 정식 인정받게 됐다. 미국 실리콘밸리의 배양육 개발업체 잇저스트(Eat Just)가 개발한 배양육 닭고기 치킨 너겟과 함께 싱가포르 현지 업체 시오크미트(Shiok Meats)의 배양육 새우 제품, 앤츠이노베이트(Ants Innovate)의 배양육 스낵도 식품 판매 허가를 동시에 받았다고 한다.

미(美) 잇저스트는 2011년 '식물성 계란' 개발업체로 출발해 2016년 10억 달러 가치의 유니콘 기업으로 성장한 뒤, 2017년부터 배양육 치킨 개발에 나서고 있다. 잇저스트는 현재 일본의 쇠고기 와규도 배양육으로 개발하는 중이다. 대체육 시장은 향후 10년 내 세계 육류산업의 10%인 1,400억 달러까지 성장할 것으로 예측된다.

배양육은 선진국에서 소비의 대부분을 차지하는 돼지고기, 쇠고기, 닭고기와 같은 일반적인 육류에 초점을 맞추는 반면, 오빌리언바이오(Orbillion Bio)와 같은 회사는 엘크, 양고기, 들소, 와규 쇠고기와 같은 고급 또는 특이한 육류에 집중했다. 아반트 미츠(Avant Meats)는 2021년에 양식된 그루퍼를 시장에 내놓았고, 다른 회사들은 다른 종류의 생선 및 기타 해산물을 추구했다. 생산공정은 기업과 정부 연구기관들에 의해 지속적으로 발전하고 있다. 배양육에 대한 적용은 윤리, 건강, 환경, 문화 및 경제적인 논의로 이어졌다.

싱가포르 당국은 안전성 및 품질 검증을 통해 배양육 닭고기가 기존 사육 닭고기보다 미생물 오염이 더 적고 청정하다고 한다. 배양육은 실제 가축의 근육에서 줄기세포를 추출한 뒤 이를 배양액이 담긴 생물반응기에 넣어 만든다. 세포 성장에 필요한 영양 공급 배양액으로는 주로 소 태아의 혈청을 쓰는데, 시판 단계에서는 새로 개발한 식물성 배양액을 쓸 예정이라고 한다. 배양육 치킨이 실제 치킨에 비해 오히려 단백질과 불포화 지방산, 미네랄이 더 풍부하고 아미노산 구성도 다양했다고 한다. 다만

파운드(453g)당 수백 달러(수십만 원)대로 단가가 비싼 게 흠이다. 당분간은 시판 제품에 식물성 단백질을 혼합해 가격을 낮출 것이라 하나 앞으로는 생산공정 개선으로 10달러 이하로도 충분히 낮출 수 있다고 한다.

유럽(EU)은 환경과 기후변화에 대응하기 위한 푸드테크 기술에 관심을 갖고 관련 산업 전반에 대한 정책 수립 및 투자 확대에 주력하고 있다. Horizon Europe(2014~2020) 및 후속 프로그램인 Horizon Europe(2021~2027)은 농촌의 고령화, 기후변화, 대체식량 등의 사회문제 해결을 목표로 식량과 천연자원 분야의 R&D 투자금액을 대폭 확대했다(38.5억 유로에서 100억 유로로 확대). 개인 맞춤형 영양, 대체단백질, 건강을 위한 가공 기술, 식물 영양 증진을 도모하는 4개 과제를 수행했다. 'Farm to Fork Strategy'는 단백질 공급원 확대를 위해 식물, 조류, 곤충 등을 원료로 이용한 대체단백질 분야의 연구개발을 지원하는 등 지속 가능한 식량시스템을 위한 방안을 추진 중이다.

일본에서는 '푸드테크산업 육성을 통한 일본 및 세계 식량·환경문제 해결과 신산업창출로 경제발전 공헌'이라는 목표를 설정했다. 푸드테크를 활용하여 농촌의 생산·유통혁신, 세포배양식품, 곤충소재 대체단백질 등의 미래식량 확보를 주요 국가정책으로 추진 중이다. '경제 재정 관리과 개혁 2020 기본정책'과 '성장전략 실행계획'은 대체단백질 관련 기술을 포함한 식품기술 개발을 목표로 푸드테크를 활용하여 새로운 식량 공급 체계를 구축할 수 있는 자국 기술 확보를 위하여 노력 중이다. '식음료·농업·농촌정책 기본계획(2020 ~ 2024)'에서 신규 식품시장 창출과 식품산업의 경쟁력 강화를 위해 스마트밀, 대체식품 등 개발과 식품공장의 스마트화를 기술 개발핵심 기술 분야로 선정했다.

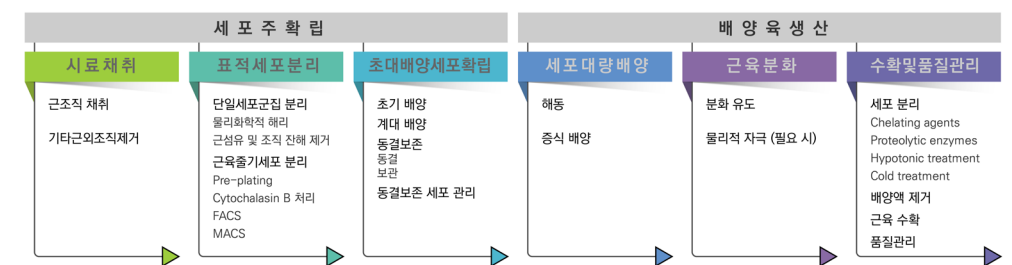
미래 4차 산업혁명의 시대에는 다양한 대체식품이 대세가 될 것이다. 단순히 기존 먹거리의 대체(代替)에 그치는 게 아니라 환경 보존, 동물복지, 지속 가능한 개발 등을 동시에 얻을 수 있는 일석이조라는 점이 대체식품의 성공요인이다. 대체육 시장이 이렇게 급성장하는 이유는 무엇보다도 육류가 몸에 나쁘다는 인식의 확산과 연이은 코로나19, 아프리카돼지열병, 조류인플루엔자(AI), 구제역, 광우병 등으로 인한 고기에 대한 불신이 주원인이다.

많은 국내외 식품업계의 올해 R&D 방향이 식물성, 채식문화를 전파하는 비거니즘(Veganism)에 맞춰져 있다고 한다. 4차 산업혁명과 기후변화에 대한 불안감, 지구를 살리자는 환경운동이 때를 만나 시장에서 자연스럽게 만들어진 신식품의 혁명이다. 그러나 규제(規制)가 걸림돌이 돼서는 안 되겠다. 과거에 집착해 전통만을 고수하고, 지금까지 먹어 왔던 음식에만 갇혀 있다면 모처럼 때를 만난 글로벌 식품산업의 기회에 찬물을 끼얹는 꼴이 될 것이다. 기업도 정부도 아무도 막을 수 없는 배양육을 필두로 한 '대체육', '대체음식' 개발에 참여해야 한다.

한정적인 단백질 소재의 사용은 실제 육류의 조직감, 맛, 풍미 등 육류 특성 모방 기술 및 다양한 제품이 부족한 실정으로 다양한 식품첨가물이나 식품원료의 개발이 필요하다. 식육 섭취 시 느껴지는 조직감은 주로 식육 내 치밀하게 구조화된 근섬유와 결합조직에서 유래하는데, 특히, 식물성 대체육 내 단백질은 대부분 무결정성 조직을 가지고 있어 제조 시 조직화 공정이 반드시 필요하다. 식물성 단백질 원료 가공 기술(식육의 근섬유 모방 기술, 식물성 단백질 발효 기술, 마이코 프로틴 생산 기술 등)과 식물성 단백질 제품 제조 및 품질 향상 기술(식육제품 색 모방 기술, 향미 모방 기술, 다성분 조합 모방 기술, 질감 형성 기술 등)을 이용하여 기존 전통적 제품과 비슷한 식감을 가지게 하는 데 성공한 상황이다.

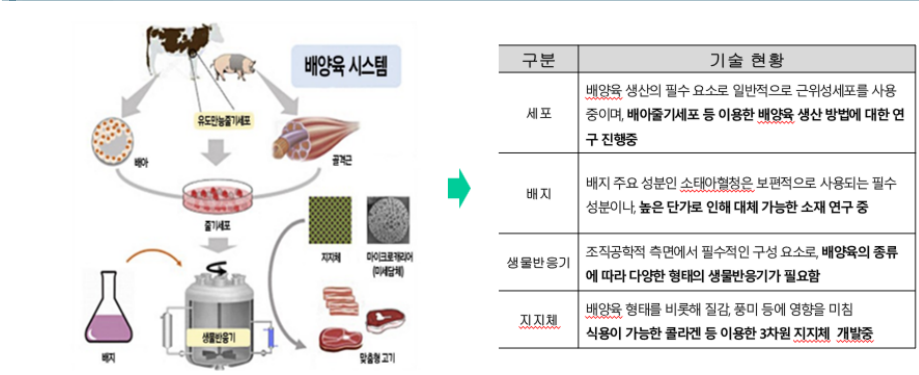
2013년 네덜란드 모사미트(Mosa meat)의 세포배양 기술 개발 성공 등 실제 고기와 같은 맛, 질감 구현을 위한 고도화 기술 개발 연구가 활발하게 진행되고 있으나, 생산비 절감을 위한 생산 기술 확보가 필수적이다. 현재 생산 단가는 2017년에 1,986달러에서 2025년에는 5달러를 목표로 관련 기업 간 경쟁 중인 상황이다(Etnews 2022). 배양육 생산과정에서 세포를 획득하는 방법, 배지 생산비용을 절감하는 방법, 고기의 모양을 갖추기 위한 지지체 제조방법, 대량생산을 위한 바이오리액터 생산공정 등 아직까지는 기술 장벽이 존재한다.

그림 12 배양육의 생산과정 흐름도



출처: 하상도, 제4차 열린소통포럼 발표자료 - 신(新)식품 이슈와 쟁점 대체육, 메디푸드 (2022.8.31)

그림 13 배양육 생산 기술



출처: 하상도, 제4차 열린소통포럼 발표자료 - 신(新)식품 이슈와 쟁점 대체육, 메디푸드 (2022.8.31)

2020년 9월 21일 농식품부 주관 10개 부처·청이 제3차 혁신성장전략회의 겸 제36차 경제장관회의에서 확정된 『그린바이오융합형 신산업육성방안』에 따르면 생명자원을 활용하는 그린바이오산업을 미래 핵심산업으로 분류해 마이크로바이옴, 대체식품·메디푸드, 종자, 동물용의약품, 기타 생명소재(곤충, 해양, 산림) 개발을 5대 유망산업 분야로 확정, 집중 투자한다고 계획했다.

그림 14 그린 바이오 핵심 기술 및 유망 제품

<그린바이오 핵심 기술 및 유망 제품>		
구 분	핵심 기술·분야	유망 제품[시장]
마이크로바이옴	마이크로바이옴 유전체 분석 기술	연재
		프로바이오틱스
		생물농약 재료 사료첨가제(축산·수산)
대체식품 메디푸드	식품단백질, 육류모사 기술, 동물세포 배양 기술	환경
		수질개선헌재, 폐기물 처리제
		식품성 대체육, 배양육
종자산업	정밀영양 기반 식품개발 기술	메디푸드, 고령친화식품
		분자 육종, 디지털 육종
		내재해성 종자, 고기능성 종자
동물용 의약품	유전자가위 등	유전자가위 등
		유전자재조합 기술
		생물학적 재료 [백신 등]
기타 생명소재	줄기세포 기술	세포지료제
		곤충, 해양생물, 식물경유 등 재형성 기술
		곤충 식품·사료디젤, 해조류 식품소재, 양잠·영미료 등

대체식품·메디푸드		
1. 육류모사, 세포배양 기술 개발(고부가가치식품기술개발사업 연계)	'21~'25	농식품부
2. 대체 간편식품 소재 개발	'22~'31	농진청
3. 해조류 대체육·배양육 기술개발	'22~	해수부
4. 대체식품 안전관리 및 사용 기준 마련	'20~'25	식약처
5. 기능성 식품소재, 식이설계 알고리즘 개발	'21~'25	농식품부
6. 바이오촉매 활용 고부가 식품소재생산기술 개발	'22~	환경부
7. 식품 영양정보 데이터 수집 확대	'18~	농진청
8. 메디푸드 제표기준 마련	'20~'21	식약처

출처: 『그린바이오융합형 신산업육성방안』(2020.9.21)

03 나노식품 기술

(1) 기술 개요

나노(nano)는 그리스어로 '아주 작은 것'을 말한다. 희랍어의 난쟁이를 뜻하는 '나노스(Nanos)'에서 유래돼 현재 과학계에서는 크기의 단위로 사용된다. 우리 선조들도 서양인 못지않게 과거부터 자세히 물질의 크기를 세분화했었다. 1nm(10-9미터)의 크기는 '진(塵, 먼지)'이라는 표현을 썼고 영어로는 '나노(nano)'라 불렀다. 1 나노미터(nano meter, nm)는 10-9미터 즉, 10억 분의 1미터다. 요즘 과학계에서도 뜨는 '나노기술'은 물질의 특성을 나노 수준에서 밝히고 제어하는 기술을 말하는데, 1950년대 미국의 파인만 박사가 처음 사용하면서 인기를 끌고 있다.

나노기술은 IT, BT 기술과 함께 첨단 제조 기술에 바탕을 둔 지식정보형 신제조업의 개발 및 발전에 중추적인 분야로, 지난 2000년대 초반부터 세계 각국에서 많은 연구와 산업화를 위한 노력을 하고 있다. 최근에는 에너지, 환경, 바이오, 식품 등 다양한 분야의 융합을 통해 미래 신성장 동력으로서의 가능성이 주목받고 있으며, 녹색성장, 삶의 질 향상에 핵심적인 역할을 수행할 것으로 기대되고 있다.

나노식품은 나노기술을 활용하여 식품시스템을 구축하고 고안하여 유용물질을 생산하거나 건강증진에 도움이 되는 신소재를 이용한 식품이다. 유엔 산하의 국제농업기구(FAO)와 세계보건기구(WHO)는 나노식품을 전체 식품공급사슬(Food Supply chain), 즉 생산, 제조가공, 포장 및 유통과정 중 나노기술을 적용하여 생산한 식품이나 유관 제품으로 정의하고 있다. 요즘 우리 시장엔 '나노(nano)' 열풍이다. 나노식품에도 열광하지만 나노마스크 등 건강제품에도 '나노' 자가 들어가면 소비자들의 호기심과 인기가 하늘을 찌른다.

(2) 국내외 연구개발 현황

통계자료에 의하면, 2010년 기준으로 나노바이오 분야(의료건강, 식품과 영양보조제, 식품포장, 동물의약품 등) 시장은 전체 나노시장의 약 10%에 달할 것으로 전망되었고, 2015년경 세계 나노시장의 규모는 1조 불(NSF 예측) ~ 2.6조 불(Lux Research)로 예측되었다.

미국은 2000년 국가나노기술이니셔티브(National Nanotechnology Initiative: NNI)를 수립한 이래, 2005년에는 새로운 NNI 체제를 구축하고, 2009년 나노기술 개발법을 개정하는 등 나노기술 연구개발을 전략적으로 추진하고 있다. 유럽연합은 2000년 초부터 나노기술 분야를 프레임워크 프로그램의 전략적인 연구개발 부문으로 선정·지원하고 있다. 유럽집행위원회는 2004년 『나노기술에 대한 유럽전략』을 발표한 이후, 연합연구센터(Joint Research Center: JRC) 등을 통해서 나노기술 연구에 직접적으로 관여하고 있으며, 이를 관련 정책과의 연계를 추진하고 있다. 일본은 2000년에 발표된 미국의 국가나노기술전략(NNI)의 영향을 받아 지난 2001년부터 제2기 과학기술기본계획(2001~2005), 제3기 과학기술기본계획(2006~2010)의 중점 분야의 하나로 나노기술을 선정하고 전략적인 국가차원의 투자를 실시하고 있다. 중국은 지난 10여 년 동안 국가 나노과학기술 기초시설 및 연구개발 인프라 건설을 추진해 오고 있으며, 나노기술 제품화 촉진을 위한 나노기술 표준화사업을 추진하고 있고, 2001년 이후 나노전자, 나노기계, 나노바이오 및 측정 분야(14억 위안), 연구시설 건설 및 정보네트워크 구축(7억 위안), 기초 연구 분야(5억 위안), 연구환경 조성(3억 위안) 등 5년간 20억 위안을 나노기술에 투입하고 있다.

식품산업이 나노식품개발 및 상용화하는 데 있어서 가장 우선적으로 검토하고 있는 것은 나노식품의 안전성과 소비자 수용 여부에 대한 것이며, 이런 측면에서 나노기술의 식품 분야 응용은 식품안전과 품질유지 분야(나노센서, 나노항균포장재 등)의 상용화가 나노식품소재나 나노캡슐 등의 분야보다 우선적으로 추진될 수 있다. 식품안전 확보나 소비자에게 식품의 품질과 안전성, 유통기간 유지 등 정보를 제공할 수 있는 것이 소비자들에게 큰 이점으로 인식될 가능성이 크기 때문이다. 따라서, 나노기술 응용식품의 안전성평가는 일반식품의 안전성평가 방법에 준하여 실시하는 것을 원칙으로 하고, 나노기술 응용식품에 사용된 ‘나노소재’와 ‘나노기술’의 특성을 고려하여 필요 항목에 대해서는 추가적인 평가를 실시할 필요가 있다.

현재 식품시장에서 인기를 끌고 있는 나노식품으로는 은 나노입자, 산화티탄 등 저장기간 연장을 위한 맞춤형 보존료, 식품 미세가공, 향, 냄새, 맛, 색이 강화된 나노캡슐 식품, 영양소나 기능성 원료, 나노 크기로 분쇄한 곡물, 향산화물질을 함유한 에멀전, 공기와 산소가스 등 나노버블, 나노화 전분, 나

노식이섬유, 나노비타민, 나노칼슘, 나노철분, 나노스테롤 등이 알려져 있다. 이산화규소(실리카)의 나노입자가 고결방지제로 식염, 다시, 콘소메, 후리카케 등 조미료에도 첨가되고 있고 백금 나노콜로이드는 미네랄워터, 요구르트 등 건강식품에도 사용되고 있다. 작년 10월 삼양식품이 경남 밀양에 소재한 나노융합국가산업단지에 공장 착공식을 하면서 나노라면에 대한 관심도 커지고 있는 상황이다.

치약과 가공식품, 씹는 사탕으로 유명한 멘토스는 나노기술로 만든 병에 든 껌을 판매하고 있는데, 식품 포장재로서의 나노물질 또한 각광받고 있다고 한다. 산화아연, 산화마그네슘의 나노입자들과 무정형 실리카가 식품포장재로 주로 쓰이고 있다. 미국에서는 맥주의 가스 손실을 방지하는 데 나노기술이 쓰이고 있는데, 사브 밀러사가 사용하는 플라스틱 맥주병에는 진흙으로 만든 나노입자가 병의 벽에 있는 빈 공간을 꽉 채워 맥주에서 탄산과 향이 빠져나가기 어렵게 만들었다고 한다.

이론적으로 나노식품의 작은 입자인 나노물질은 기관과 세포를 쉽게 관통해 체내 흡수율을 높일 수 있다. 그러나 이 특징 때문에 나노식품은 양날의 검으로 불린다. 즉, 좋은 물질은 체내 흡수가 빨리 돼 좋지만 나쁜 물질 또한 세포 안으로 들어오기가 쉽다는 말이다. 현재까지 나노입자나 나노소재의 건강 위험성을 평가한 정보가 부족해 나노식품의 안전성은 명확히 밝혀지지 않은 상태다.

04 식품 로봇틱스 기술

(1) 기술 개요

식품 제조, 가공, 포장 및 유통과정에서 자동화시스템을 사용하여 효율성을 증대시키는 기술로, 노동력 절감, 생산력 향상, 위생적인 제조 환경 유지 등의 목적으로 활용된다. 조리 로봇, 자동 포장 로봇, 서빙 로봇 등 식품의 오염을 최소화하며 정확한 양의 식품을 신속하게 조리 및 포장할 수 있다.

표 4 식품 로봇틱스 기술 적용 분야 및 적용기술 사례

구분	식품 로봇틱스 기술 적용 분야 및 적용기술 사례	
식품생산	식품제조	• 식품프린팅, 로봇 등을 적용한 생산공정 자동화, 스마트 안전관리 등
식품소비	외식 서비스	• 주방서빙 자동화 : 서빙로봇, 주방로봇 등
		• 식당주문/배달 : 배달앱, 무인주문기, 배달로봇 등

출처: 관계부처합동(2022). 농식품산업의 혁신성장을 위한 푸드테크산업 발전방안(연구진 재구성)

해외에서도 식품 분야에서 활용되는 로봇 공학의 트렌드는 자율이동로봇, 서비스형 로봇, AI&디지털 자동화 통합, 지속 가능성 등으로 제시하고 있다.

표 5 해외 식품 로봇 공학의 트렌드

구분	해외 식품 로봇 공학의 트렌드
자율이동로봇(AMR)	• 고급 내비게이션 기능으로 배송 및 버스 운행과 같은 작업을 자동화하여 식품 서비스를 포함한 다양한 부문에서 운영 효율성 향상
서비스형 로봇(RaaS)	• 구독 기반으로 로봇 솔루션을 제공하여 기업이 상당한 초기 투자 없이 하이테크 로봇 공학을 채택할 수 있는 진입 장벽 완화
사용 편의성 향상	• 로봇틱스 기술의 발전으로 최소한의 프로그래밍 기술만으로도 보다 사용자 친화적인 인터페이스가 가능해짐에 따라 다양한 기술 전문 지식 수준에서 로봇틱스의 접근성 향상
AI&디지털 자동화 통합	• AI와 통합되어 예측할 수 없는 환경에서 적응성과 기능을 개선하고 있으며, 이는 식품 산업의 재고 관리 및 고객 서비스와 같은 작업에 활용
지속 가능성	• 산업용 로봇의 수명 주기를 연장하고 순환 경제를 지원함으로써 지속 가능성 목표에 맞춰 산업용 로봇을 개조하고 재사용하는 추세 증가

출처: Robot Tomorrow(2024). (연구진 재구성)

식품 로봇의 기술적 기반인 인공지능, 자율주행 센서, 구동기(전기모터, 감속기), 제어기 등의 국내 기술은 상대적으로 고도화된 상황이다. 국내 로봇의 상용화 수준은 미국·중국에 비해 낮지만, 삼성전자, LG전자, 두산로보틱스 등 주요 대기업들이 조리·서빙 로봇시장에 참여하면서 조리·서빙 등 외식산업 분야에서 로봇 기술을 개발하는 사례 증가 추세다. 또한, 식품 제조공정에서는 주로 포장 단계에서 로봇이 적용되고 있으나, 식품 종류의 다양성, 비정형성 등으로 인해 기술개발의 난이도가 높다.

(2) 국내외 연구개발 현황

국내 식품 로보틱스와 관련한 주요 정책 동향 현황은 다음과 같다. 주로 농림축산식품부, 식품의약품안전처에서 주관하여 푸드테크와 관련된 정책을 추진하는 가운데 식품 로보틱스와 관련된 정책도 제시하고 있다.

표 6 국내 식품 로보틱스와 관련한 주요 정책 동향 현황

구분	담당 부처	연도	사업명	세부 내용
1	관계부처 합동	2022년	『푸드테크산업 발전방안』	• ‘푸드테크를 통한 농식품산업의 혁신성장 도모’를 위한 비전과 3대 추진전략 및 8대 주요과제를 제시
2	농림축산식품부	2023년	『제4차(’23~’27) 식품산업진흥 기본계획』	• 푸드테크를 통한 식품산업의 혁신 성장을 도모 • ‘푸드테크 혁신 클러스터’를 지정하여 지역별 푸드테크 특화 분야를 선정하고, 지역 내 기업·대학·연구기관 간 공동 R&D, 기술 실증 등의 네트워킹 실현과 푸드테크 계약학과를 지방대학으로 확대 (석사과정: ’22년 4개 → ’27년 12개)할 계획
3	식품의약품안전처	2022년	식약약 규제혁신 100대 과제 수립	• 식품원료의 인정 대상에 기존의 농·축·수산물 외에 세포배양 등 새로운 기술을 적용한 신소재를 추가해 대체식품에 대한 정의, 원료 등의 구비요건, 제조·가공기준, 규격 등에 대한 가이드라인을 마련
4			‘식품의 기준 및 규격’ (식약처 고시) 개정	
5	농식품부 푸드테크 정책과	-	「식품산업진흥법」	• 법정부적 차원의 정책 수립·집행에 필요한 법적 기반은 아직 미흡

출처: 국회입법조사처(2024). 푸드테크산업 육성을 위한 입법 정책적 개선과제(연구진 재구성)

이러한 정책적인 동향과 더불어 국내에서 추진되고 있는 주요 연구개발 현황은 다음과 같다. 먼저, 농림축산식품부는 식품 분야 신규 연구개발 과제를 전문가 및 기업의 수요조사 결과를 바탕으로 선정된 지정공모과제와 자유공모과제로 구성, 선정된 연구과제에 대해 지원사업을 진행하고 있다. 또한, ‘탈피 등 원재료 손실 최소화를 위한 전처리 협동 기술개발’ 연구과제 등에서 농산물 폐기율과 인건비 절감 등 식자재 유통·관리 효율화를 위해 아워홈에서 인공지능 기반 감자 탈피 로봇 개발에 나설 계획이다. 한국로봇산업진흥원은 ‘2023년 제조로봇 선도보급 실증사업’ 및 ‘2024년 첨단제조로봇 실증사업’을 진행하여 로봇 활용 확산이 필요한 제조업을 중심으로 개발된 제조로봇 활용 표준공정모델의 실증·보급 추진하고 있다. 또한, 한국로봇산업진흥원이 2023년 진행한 ‘대규모 로봇 융합모델 시범사업’에서 서울시교육청, 한국프랜차이즈산업협회, 한국로보틱스가 컨소시엄을 구성하여 선정되어, 송곡중학교에 조리로봇 4대가 도입되어 실증사업이 진행 중이다.

2024년에는 ‘단체급식 대량조리 시범사업’을 진행하여 근로자 안전과 단체급식 효과성·경제성 분석을 위한 지원사업을 진행했다. 이 사업에 선정된 한국로보틱스와 서울시 교육청은 서울형 다기능 단

체급식 대량 조리로봇 시스템 실증 연구를 통하여 대현초, 개포초, 고일초, 원촌중, 영동중, 진선여고 등 6개의 학교를 실증거점으로 하여 유당, 국당 등 협동로봇을 활용한 대량조리 환경개선 및 조리공정 표준화를 실증하고자 한다. 뉴로메카와 경상북도 교육청, 경북직업환경연구소는 학교급식 내 대량 조리를 위한 푸드테크 로봇 융합 모델 실증 및 로봇 운용 데이터 활용을 위한 통합관제시스템 구축 연구로 경상북도 4개교를 대상으로 유당·볶음·국당 공정 설계를 수립하고자 한다. 추후, 실증 데이터를 통해 조리·혼·근골격계 질환 등 노동자의 안전 확보 및 근로 강도 감소에 대한 안전성과 효과성 등을 검증할 계획이다. 디케이아이테크놀로지와 나사렛국제병원은 안전하고 효율적인 단체급식을 위한 조리로봇 융합 솔루션 개발 및 실증을 통해 병원 단체급식 시설 내 튀김, 볶음 국당 로봇을 도입하여 일반식, 환자식 맞춤형 조리를 통한 단체급식 품질 향상 및 식중독·감염 등 위생으로부터 안전성을 검증할 계획이라고 한다.

표 7 국내 식품 로봇틱스와 관련한 주요 연구개발 현황

구분	담당 부처	연도	사업명	세부 내용
1	농림축산식품부	2024년	2024년 미래 유망 식품 분야 고부가가치 식품 기술 개발(R&D) 신규과제	• 냉해동·살균 자동화 등 식품 품질과 안전관리기술 분야 6개 과제 15억 원 지원 • 식물성 대체식품·식품로봇 등 해외 연구소·대학·기업 등과 공동 연구가 필요한 분야 3개 과제 17억 원을 지원
2	농림축산식품부	2027년~2030년	탈피 등 원재료 손실 최소화를 위한 전처리 협동 기술 개발	• 농산물 폐기율과 인건비 절감 등 식자재 유통·관리 효율화를 위해 아워홈에서 인공지능 기반 감자 탈피 로봇 개발 계획
3	한국로봇산업진흥원	2023년	2023년 제조로봇 선도보급 실증사업 (식음료 분야)	• 고강도·고위험 작업 대체, 인력난 등 제조환경 개선을 위해 로봇 활용 확산이 필요한 3대 제조업(뿌리, 섬유, 식·음료)을 중심으로 개발된 제조로봇 활용 표준공정 모델의 실증·보급 추진
4	한국로봇산업진흥원	2023년	대규모 로봇 융합 모델 시범사업	• 서울시교육청, 한국프랜차이즈산업협회, 한국로보틱스는 송곡중학교 조리 로봇 4대 도입 및 실증 진행
5	한국로봇산업진흥원	2024년	2024년 첨단제조 로봇 실증사업 (식음료 분야)	• 산업통상자원부의 지능형로봇 보급 및 확산 사업의 내역사업 • 공공 및 민간 제조시설에 로봇공정모델 실증을 통한 첨단제조로봇 활용기술 시장 확산으로 제조업 디지털 전환 가속화 및 로봇산업 경쟁력 강화 • 총 사업비의 최대 50% 국비 지원

구분	담당 부처	연도	사업명	세부 내용
6	한국로봇산업진흥원	2024년	단체급식 대량 조리 로봇 시범사업	• [서울형 다기능 단체급식 대량 조리 로봇 시스템 실증] 한국로보틱스와 서울시 교육청은 대현초, 개포초, 고일초, 원촌중, 영동중, 진선여고 등 6개의 학교를 실증거점으로 하여 유당, 국당 등 협동로봇을 활용한 대량조리 환경개선 및 조리공정 표준화를 실증 • [학교 급식 내 대량 조리를 위한 푸드테크 로봇 융합 모델 실증 및 로봇 운용 데이터 활용을 위한 통합관제 시스템 구축] 뉴로메카와 경상북도 교육청, 경북직업환경연구소는 경상북도 4개교를 대상으로 유당·볶음·국당 공정 설계를 수립하고자 함. 추후, 실증 데이터를 통해 조리·혼·근골격계 질환 등 노동자의 안전 확보 및 근로 강도 감소에 대한 안전성과 효과성 등을 검증할 계획 • [안전하고 효율적인 단체급식을 위한 조리로봇 융합 솔루션 개발 및 실증] 디케이아이테크놀로지와 나사렛국제병원은 병원 단체급식 시설 내 튀김, 볶음 국당 로봇을 도입하여 일반식, 환자식 맞춤형 조리를 통한 단체급식 품질 향상 및 식중독·감염 등 위생으로부터 안전성을 검증

출처: 국회입법조사처(2024). 푸드테크산업 육성을 위한 입법 정책적 개선과제(연구진 재구성)

다음으로, 해외 식품 로봇틱스 기술 관련 정책 동향 및 주요 산업 현황은 다음과 같다.

표 8 해외 식품 로봇틱스 기술 관련 정책 동향 및 주요 산업 현황

구분	국가	푸드테크산업 현황 및 정책 동향	우수기술력 보유 분야
1	미국	• 2022년 11월 미 식약청(FDA) 등이 세포배양식품의 시장 출시를 허용하고, PDD(Personal Delivery Device)법 제정으로 배송로봇 관련 규제를 철폐하는 등 산업활성화를 위한 제도 정비 • 푸드테크 스타트업 기업 수가 2022년 기준 4,044개(전 세계의 약 34%) 정도로 투자와 기술력이 독보적	사물인터넷(IoT), 빅데이터, 인공지능(AI), 생명공학(BT) 등
2	EU	• 환경과 기후변화에 대응하기 위해 푸드테크 기술에 관심과 투자를 진행 • 2021년에는 식품·농업 분야에 약 89억 유로를 투자하고, 'Farm to Fork'(농장에서 식탁까지) 전략을 수립하여 친환경 기술 도입과 제품 생산을 촉진	3D 식품 프린팅 및 생명공학(네덜란드)
3	일본	• 2020년 산·학·관 연계하에 『푸드테크 추진 비전』을 수립하여 지속 가능한 식량시스템 구축 방안으로 AI, 로봇 등에 의한 식품 제조업 자동화 사업 등을 추진	
4	중국		블록체인과 로봇틱스 분야

출처: 국회입법조사처(2024). 푸드테크산업 육성을 위한 입법 정책적 개선과제(연구진 재구성)

이러한 정책적인 동향과 더불어 해외에서 추진되고 있는 주요 연구개발 현황은 다음과 같다.

표 9 해외 식품 로봇틱스 기술 관련 주요 연구개발 현황

구분	국가	해외 로봇 연구개발 동향
1	일본	• Yaskawa Electric Corporation: 인쇄 로봇 & 밀봉 로봇회사 인수, 식품포장 및 가공 로봇 개발
2	일본	• OMRON Corporation: 데이터 기반 기업 경영을 발전시키기 위해 IBM 재팬과 파트너십 강화. IBM의 데이터 분석 기능과 함께 OMRON의 로봇 공학 기술을 활용 하여 생산공정을 최적화하고 품질 관리를 보장
3	스위스	• ABB Group: 로봇 제조시설을 확장, 약 72개의 새로운 일자리 창출 및 식음료, 헬스케어, 포장 분야의 로봇 공학 솔루션 수요 증가를 충족. • ABB & 풀무원 협력 계약: 실험실 재배 식품 취급을 위한 로봇 솔루션 개발을 위해 협력 계약을 체결, 세포배양을 활용한 차세대 해산물 제품을 개발, 세포배양 처리, 실험 등 다양한 단계를 자동화, 지루하고 반복적인 작업의 소요 시간을 줄이고 프로세스 추적성까지 확보 가능
4	미국	• Flexiv: 생선 필레 모양을 위한 솔루션을 제공. 컴퓨터 비전 기술과 포스 컨트롤(힘 제어) 기술을 결합하여 빵가루를 입힌 생선 필레를 식별하고 모양을 조정함 • Chowbotics: 샐러드 제조 로봇 기업 • Picnic: 피자 반죽을 올리면 소스와 토핑을 올려 구워내는 과정까지 자동화 가능한 피자 메이커 로봇 • Miso Robotics: 패스트푸드 체인을 겨냥한 조리로봇, 플립피(Flippy)는 버거, 튀김용 로봇으로 유명, 쿡라잇은 AI와 센서 기술을 이용한 플랫폼으로 식품 조리 과정 모니터링 하고 조리사가 수행해야 할 작업 식별, 실피(Sippy)는 POS로 들어오는 주문에 따라 자동으로 음료 제조 및 포장 • Richtech Robotics: 식당 서버용, 실내 청소용, 호텔 배달용, 조리용, 음료 제조용, UV 소독용 등 다양한 로봇 제조 기업 • Wilkinson Baking Company : 전자동으로 식빵을 구워내는 제빵 로봇

출처: 식품음료신문(2022); Robotics Tomorrow(2024). (연구진 재구성)

식품로봇 산업을 활성화하기 위해서는 정책 및 연구가 진행되고 있는 만큼, 시장 확대를 위한 규제 개선과 각종 규격 및 기준의 정비도 필요하다. 푸드테크산업 성장에 수반되는 식품 위해(危害)를 예방하기 위해 식품 규격과 기준, 안전 지침 등을 마련하여야 한다. 또한, 푸드테크 기술이 접목된 조리 로봇 등 식품 기기의 규격과 안전 등에 대한 인증제도를 도입하는 방안을 검토하고, 가이드라인도 마련해야 할 필요가 있다.

6

식품안전 과학기술의 실용화에 걸림돌이 되는 기술의 정책 및 규제 분석

- 유전자 교정기술
- 배양육 개발 기술
- 나노기술
- 식품 로봇틱스 기술

식품안전 과학기술의 실용화에 걸림돌이 되는 기술의 정책 및 규제 분석

6.1 유전자 교정기술

구분	규제 현황	문제점	개선방안
1	「유전자변형 생물체의 국가 간 이동 등에 관한 법률 (LMO법)」 제2조(정의) 「식품위생법」 제12조의2(유전자변형 식품 등의 표시)	유전자변형 생물체를 현대 생명공학기술을 이용하여 새롭게 조합된 유전물질을 포함하고 있는 생물체로 정의함 ※ 현대 생명공학기술은 인위적으로 유전자를 재조합하거나 유전자를 구성하는 핵산을 세포 또는 세포 내 소기관으로 직접 주입하는 기술로 정의됨	법규 문언 그대로 해석할 경우 유전자 교정기술이 GMO에 해당하는지 여부에 대한 찬반 논쟁을 떠나 유전자 교정기술이 적용된 식품 등에 기존 GMO와 관련한 규제의 적용 가능성이 있어 이에 대한 명확한 구분이 필요
2	「유전자변형 생물체의 국가 간 이동 등에 관한 법률 (LMO법)」	유전자 교정기술 등 바이오 신기술 산물에 대한 규제를 완화하려면 LMO법 개정 필요	제7조의3 신설 해당 산물에 외래 유전자가 도입되지 않았거나 외래 유전 자가 잔존하지 않아 전통 육종 또는 자연적 돌연변이 수준의 안전성을 갖추었음을 국가 책임기관의 장에게 확인받음 으로써 위해성 심사, 수입 승인, 생산 승인, 이용 승인의 절차를 면제받도록 함

무한경쟁의 시대에 미국, 일본을 위시한 세계 각국의 식품산업 규제가 파격적이다. 일본은 이미 농산물이나 일반식품의 기능성 표시를 허용했고, 유전자를 만지는 신기술 관련 규제도 파격적이다. 지난 2019년 3월 18일 개최된 일본 후생노동성의 전문가회의에서 빠르면 동년 여름부터 새로운 유전자 삽입 없이 ‘유전자 교정(genome-editing)’기술로 개발된 식품에 대해서는 안전성 심사 없이, 정부에 사전 신고만으로 판매 가능하게 한다고 한다. 유전자 변이는 자연계에서도 일어날 수 있고, 종전의 품종

개량기술로 만들어진 것과 다르지 않다고 간주하고 안전성 심사를 따로 하지 않는다.

일본의 이러한 신기술에 대한 포용적 규제는 매우 전략적이다. 우리나라의 경우 미래 글로벌 식품산업의 경쟁력 확보에 필수적인 신기술 확보를 위한 규제를 국제적 흐름에 맞게 적극 수용하는 방향으로 가야 한다고 본다. 물론 반대하는 우려 섞인 목소리가 있으나 현 정부의 ‘규제 샌드박스’ 트렌드에 따라 안전성이 입증된 경우, 우선 시판을 허용하고 사후관리를 하면서 보완하면 된다고 본다. 이 규제 샌드박스는 “신기술이나 새로운 비즈니스 모델이 국민의 생명과 안전을 위협하지 않을 경우, 기존 법령이나 규제에도 불구하고, 시장에 출시될 수 있도록 임시로 허가하는 것”을 말하는데, 이를 통해 신산업 분야의 제품 출시를 앞당기고 글로벌 시장을 선점한다는 세계적 무역 강국들의 트렌드다.

2016년 4월 세상에서 가장 먼저 미 농무부(USDA)가 유전자 교정기술로 만든 변색예방 버섯에 대해 GMO 안전성 규제 대상이 아니라는 결정을 내려 주목을 받고 있고 올해부터 일본까지 가세해 이것은 GMO와는 다른 안전한 기술이라는 방향으로 의견을 모으는 중이다. 그러나 유전자 교정작물의 ‘안전성’은 인정한 반면, ‘유기농’이란 프리미엄으로는 인정하지 않는다는 입장이다. 정부의 입장은 이렇지만 시장과 소비자의 반응은 여전히 냉담해 유전자 교정작물이 안전하게 시장에 받아들여지기까지는 오랜 시간이 필요할 것 같다.

우리나라에서도 현재 유전자 교정기술의 실용화가 논의되기 시작했고 식약처에서도 검토 중이다. 조만간 정부의 규제 입장이 정리될 것으로 예상되는데, 아직까지는 GMO 완전표시제에 대한 요구, 비의도적 혼입허용치의 재조정, GM감자 승인 문제 등 GMO 논란으로 온 나라가 시끄러운 상황이라 서로 다른 기술임에도 불구하고 작물의 유전자에 손을 댄다는 이유로 부정적인 시각이 많은 것이 사실이다.

이런 사회적 분위기가 너무나 압도적이라 국내에서는 정부가 개발한 기술도 허가받지 못하고 사장되는 형국이다. 최근 국내에서 ‘유전자 교정기술’로 곰팡이병에 강한 포도와 사과를 만들었고 근육량을 늘린 돼지, 상추나 벼의 품종 개발도 이어지고 있으나 국내 시판 허가가 나지 않아 발을 동동 구르고 있다고 한다. 정부 당국은 시민단체, 농민단체의 눈치를 보느라 시판 허가를 내주지 못하고 있다. 사실 허가돼 시판되더라도 표시제도만 잘 운영하여 소비자들이 보고 구매하지 않으면 그만인 것을 왜 허가 여부로 이 난리를 치는지 모르겠다. 국내에서 소비자 외면으로 판매가 안 되면 수출하면 그만인데 좋은 신기술들이 사장되는 현실이다.

당분간 ‘유전자 교정기술’과 ‘유전자 변형 생물체(GMO)’식품의 차별성이 논란거리가 될 것 같다. 그러나 시간은 좀 걸리겠지만 현실적으로 이 유전자 교정기술은 GMO와 같은 험난한 길을 걷지는 않을 것 같고, 소비자가 알고 사 먹도록 ‘완전표시제’ 조건하에 전략적으로 수용될 것으로 기대된다.

102

배양육 개발 기술

구분	규제 현황	문제점	개선방안
1	「식품위생법」 식약처 『안전성평가 가이드라인』(2023) 에서 새로운 식품 원료(novel food) 의 한시적 기준/ 규격 인정	GMO와 같은 엄격한 안전성 평가, 배양액 성분의 식용 가능 여부 등 엄격한 규제	• 세포주를 사용하는 방식의 경우 원료 세포의 종류에 따라 다양한 이슈가 제기되고 있음. 예컨대 유도 만능 줄기세포주를 사용하는 경우 GMO 규제를 적용받을 가능성이 높은 반면, 자연적 불멸화 세포주를 사용하는 경우 GMO 규제를 회피할 수 있으나 식품 안전성의 우려가 제기돼 세포주 사용 방식에 따른 가이드라인 제시 필요 • 기초배양액에 첨가되는 다양한 물질에 대한 사용 기준과 함께, 도축 후 세균 오염 등을 방지하기 위해 사용되는 항생제가 최종 생산물에 잔류할 수 있기 때문에 항생제 사용 및 잔류량 허용기준 등에 대한 명확한 기준을 마련하고 가이드라인을 제시할 필요가 있음
2	「축산물위생 관리법」 정의	배양육은 식육의 정의에 해당되지 않음	동물세포 배양육의 경우 100% 동물성 원료 그 자체인 만큼 다른 대체식품과 명확한 구분 필요
3	「식품위생법」 식약처 『식품 등의 표시기준』 『식품의 기준 및 규격(식품공전)』	행정예고(공고 제 2022-576호)를 통해 ‘대체식품으로 표시하여 판매하는 식품’에 ‘세포배양 물’을 주원료로 사용한 제품을 포함 하여 관리하고자 하였으나, 실제 개정으로는 이어지 지 않았음	• 세포주 확립 단계에서 세포주, 세포배양 배지 및 지지체에 사용되는 물질의 안전성 확인 및 신규 식품첨가물로 지정 • 안전성에 문제가 없는 물질의 경우, 신규 식품 첨가물로 지정될 수 있도록 제도 정비 지원 • 안전성이 확인되지 않은 물질들의 문헌조사를 통한 대체 물질 탐색 • 단계별로 사용물질의 잔류 가능성이 없는 물질을 제외하여 최종 제조된 배양육에 안전성 확인된 물질만 잔류기준 설정

식약처는 한덕수 국무총리 주재로 열린 제4회 국정현안점검조정회의에서 세포배양식품, 메디푸드 등 신기술 유망 분야 맞춤형 혁신에 나선다고 선언했다. 식약처의 『국제기준 선도 식의약행정 혁신방안』(2022.7)에 따르면 세포배양식품 등 첨단 생명공학기술을 적용한 식품에 대해 선제적으로 안전성 평가기준 마련 및 개발 가이드라인을 제공해 지지체·배양액 등 신기술 적용 원료 인정 등 안전성이 확보된 제품 출시를 지원한다고 한다.

식약처는 이어 『식의약규제혁신 100대 과제』(2022.8.11.)를 발표, 새 정부 국정과제인 ‘바이오·디지털 헬스 글로벌 중심국가 도약’을 위한 추진전략의 일환으로 혁신 제품의 신속한 시장 진입 지원을 위한 신제품 개발 활성화와 안전·건강과 직결되지 않으면서 시대·환경 변화에 맞지 않고 기업 활동에도 불합리·불필요한 규제는 과감히 폐지·완화한다고 한다.

국제농업기구(FAO)는 제출된 정보를 기반으로 작성된 세포 배양육 대한 평가지침(FAO, 2023)을 제공해 식약처 등 관련 부처가 산학협력을 통해 세포배양 원천기술 및 대량생산 기반기술 확보를 추진 중이다. 배양육 분야는 아직까지는 연구개발 단계에 머물러 있지만 현재 이에 대한 관심이 학계뿐만 아니라 산업계 글로벌 벤처기업이 급증하고 있는 추세다. 미 농무부(USDA)와 식약청(FDA)은 2019년 세포배양식품에 대한 공동 규제 및 감독에 관련된 제도 마련에 합의했다. FDA는 세포의 채취 과정, 세포주와 배양액성분에 대한 안전성 검토, 세포주 은행과 배양 시설의 요건 등 생산기술을 감독하는 방법을 마련, USDA는 식품의 생산과 유통과정을 담당, 연방 「육류검사법」, 「가금제품검사법」에 따라 세포 배양식품을 감독기로 했다. 2022년 11월, FDA는 UPSIDE Foods 사의 세포배양 식품의 시판 전 사전협의를 완료하고 USD가 이를 승인하며, 세포기반 식품의 시장 출시가 가능해졌다.

이에 발맞춰 우리나라에서도 이 분야에 대한 정부의 연구개발 투자가 본격화되었으며 일부 기업은 미래 새로운 형태의 동물성 단백질 식품 생산을 목표로 창업한 상태다. 생산 단가를 낮추기 위한 기술, 환경적, 경제적 가치가 높은 배양 배지, 지지체 관련 기술 등 확보에 집중하고 있다. 향후 10년 이내에 배양육이 상용화될 수 있다는 전문가들의 예상을 근거로 기존에 우리가 섭취한 적이 없는 신개념의 식품인 배양육 생산 재료, 생산 설비, 공정, 유통, 섭취 등의 과정에 대한 소비자의 안전성 확보는 매우 중요하다.

최근 식약처는 이들 대체단백질을 식품 제조에 사용 가능토록 니신(보존료), 메칠셀룰로오즈(안정제)로 사용기준을 개정(식품의약품안전처 고시 제2021-19호, 2021.3.12)하였으나, 보다 많은 식품 첨가물의 사용기준 검토 및 인정 확대가 필요한 상태다. 그리고 식약처 식품의약품안전평가원에서는 2024년 7월 『세포배양식품 원료 한시적 기준 및 규격 - 제출자료 작성 가이드(민원인 안내서)』를 제작, 배포하였다.

배양육의 안전성은 세포주, 세포배양 배지 및 지지체를 활용하는 생산 단계에서 사용되는 물질의 안전성 확인이 특히 중요한데. 특히 배지의 주요 성분 중 하나인 소 태아 혈청(Fetal Bovine Serum: FBS)은 보편적으로 사용되는 필수 성분이지만, 높은 단가로 인해 이를 대체하기 위한 연구를 수행하고 있다. Heuros(호주)는 유전자재조합 없이 재조합 단백질을 합성하여 항생제, 호르몬 및 혈청이

함유되지 않은 배지를 연구하고 있다. 지지체는 세포의 증식과 분화를 위해 필요한 요소로 마이크로캐리어(미세담체)와 스케폴드 유형이 존재하며, 배양육 형태를 비롯해 질감, 풍미 등에 영향을 미치는데, 식용이 가능한 Biomaterials(콜라겐 등)을 이용한 3차원 지지체 개발이 진행 중이며, 지지체 개발에 3D 바이오 프린팅 기술을 활용하기 시작했다. Bodiou 등이 발표한 논문에서 현재 시판돼 사용 가능한 지지체의 종류 및 그들의 특징은 <표 10>과 같다(Bodiou, 2020).

국내에서 대체육이 제품화되기 위해서는 규제가 뒷받침돼야 한다. 우선 세포주 확립 단계에서 세포주, 세포배양 배지 및 지지체에 사용되는 물질의 안전성 확인 및 신규 식품첨가물로 지정해야 한다. 시료 채취, 표적세포 분리, 초대배양세포 확립 등 단계별로 사용되는 물질 목록화(DB화) 및 독성동태, 잔류소실 자료 등 안전성 검토에 필요한 자료 조사가 필요하다. 단계별로 사용물질의 잔류 가능성이 없는 물질을 제외하여 최종 제조된 배양육에 안전성이 확인된 물질만 잔류기준을 설정해야 한다.

세포주, 세포배양 배지 및 지지체를 활용하는 배양육 생산단계에서는 세포 대량 배양, 근육 분화, 수확 및 품질 관리 단계별로 사용되는 물질을 목록화(DB화)하고 독성동태, 잔류 소실 자료 등 안전성 검토에 필요한 자료를 조사해야 한다. 단계별 사용물질의 잔류 가능성을 확인하고 필요시 잔류 여부 확인시험법도 개발해야 한다. 그리고 세포주 확립 단계에서 세포주, 세포배양 배지 및 지지체에 사용되는 물질의 안전성을 확인하고 신규 식품첨가물로 지정해야 한다. 즉, 안전성에 문제가 없는 물질의 경우, 신규 식품첨가물로 지정될 수 있도록 제도의 정비가 필요하다.

우리나라에서 대체식품인 배양육의 시판은 사실상 허용된 것이다. 그러나 배양육 함유 제품의 표시 문제가 남아있다. 배양육 제품이 시장에 출시되면 ‘meat, 육(肉), 고기’ 등의 용어의 표시가 허용되기 쉽지 않기 때문이다. 많은 국내외 식품업계의 올해 R&D 방향이 식물성, 채식문화를 전파하는 비거니즘(Veganism)에 맞춰져 있다. 4차 산업혁명과 기후변화에 대한 불안감, 지구를 살리자는 환경운동이 때를 만나 시장에서 자연스럽게 만들어진 신식품의 혁명이다. 그러나 규제(規制)가 걸림돌이 돼서는 안 된다.

표 10 현재 시판돼 사용 가능한 지지체의 종류 및 특징

	Microcarrier	Manufacturer	Matrix	Surface coating	Surface charge	Diameter (µm)	Specific density	Porosity	Specific surface area (cm ² /g DW)
Animal-free microcarriers	Cytodex 1	GE Healthcare	Cross-linked dextran	DEAE	+	147 - 248	1.03	Non-porous	4,400
	Cytopore 1 & 2	GE Healthcare	Cross-linked cotton cellulose	DEAE	+	200 - 280	1.03	>90%; pore size: 30 µm	11,000
	Cytoline 1	GE Healthcare	Polystyrene	None	-	Lentil shaped; Length: 1.7-2.5 mm Thickness: 0.4 - 1.1mm	1.32	Pore size: 10 – 400µm	>3,000
	Cytoline 2	GE healthcare	HDPE [®] /Silica	None	-	Lentil shaped; Length: 1.7-2.5 mm Thickness: 0.4 - 1.1mm	1.03	Pore size: 10 – 400µm	>1,000
	Enhanced attachment	Corning	Polystyrene	CellBIND	None	125 - 212	1.02	Non-porous	360
	Hillel [®]	SoloHill	Modified polystyrene	Cationic trimethyl ammonium	+	160 - 200	1.09-1.15	Non-porous	515
	Plastic	SoloHill	Cross-linked polystyrene	None	None	90 - 150	1.02-1.03	Non-porous	360
	Plastic Plus	SoloHill	Cross-linked polystyrene	None	+	125 - 212	1.034 -1.046	Non-porous	360
	Star Plus	SoloHill	Cross-linked polystyrene	None	+	125 - 212	1.02-1.03	Non-porous	360
	Untreated	Corning	Polystyrene	None	None	125-212	1.026	Non-porous	360
Animal derived protein-coated microcarriers	Dissolvable	Corning	Cross-linked PGA	Synthemax II	None	200 - 300	1.02-1.03	Non-porous	5,000
	Synthemax II	Corning	Polystyrene	Synthemax II	None	125 - 212	1.02	Non-porous	360
	Collagen	SoloHill	Polystyrene	Type I porcine collagen	None	125 - 212	1.02	Non-porous	480
	Cultispher-G [®]	Percell	Type I porcine gelatin	None	None	130 - 380	1.02 - 1.04	50% ; pore size: 50 µm	15,000
	Cultispher-S [®]	Percell	Gelatin	None	None	130 - 380	1.02 - 1.04	50% ; pore size: 50 µm	15,000
	Cytodex 3	GE Healthcare	Cross-linked dextran	Type I porcine collagen	None	141 - 211	1.04	Non-porous	2,700
	FACT III	SoloHill	Polystyrene	Cationic type I porcine collagen	+	125 - 212	1.02	Non-porous	480
	Collagen Coated	Corning	Polystyrene	Type I collagen	None	125 - 212	1.026	Non porous	360
	Dissolvable	Corning	Cross-linked PGA	Denatured Collagen	None	200 - 300	1.02-1.03	Non porous	5,000
	SphereCol [®]	Advanced BioMatrix	Polystyrene	Type I human collagen (VitroCol [®])	None	125 - 212	1.03	Non-porous	360
Recombinant protein-coated microcarriers	ProNectin [®] F	SoloHill	Polystyrene	RGD containing peptide	None	125 - 212	1.02	Non-porous	360

출처: Vincent Bodiou et al. (2020) <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00010>

03

나노기술

구분	규제 현황	문제점	개선방안
1	「식품위생법」 식약처 『식품 등의 기준 및 규격(식품공전)』	우리나라 식약처에서 아직까지 법적으로 허용되지 않은 용어로 기준규격도 없으며, 새로운 식품원료로 한시적 인정받지도 못한 상황임	「식품위생법」 식약처 『안전성평가 가이드 라인』(2023)에서 새로운 식품원료(novel food)의 한시적 기준/규격 인정 대상에 포함
2	「식품위생법」 식약처 『식품 등의 표시기준』	우리나라 식약처에서 아직까지 법적으로 허용되지 않은 용어로 시장에서만 통용되고 있음	새로운 식품원료(novel food)의 한시적 기준/규격 인정 대상에 포함되면 표시도 가능

최근 나노필터로 만든 ‘나노마스크’의 허가를 식약처에 신청하겠다고 하는 기사를 봤다. 그러나 나노식품뿐 아니라 나노의약품, 나노의약외품 역시 법적인 용어가 아니므로 심사, 승인 대상도 아니고 현재 국가의 『안전성·유효성 심사기준』도 마련돼 있지 않은 상황이다.

즉, 나노식품은 법적 용어가 아니므로 이에 관한 별도 규정은 없다. 미국에서는 새로운 식품이나 성분에 대해 식품첨가물 규정, 색소첨가물 규정 또는 GRAS 규정을 통해 나노기술과 같은 신기술이 제조공정에 변화를 미치는지 사업자가 평가할 수 있는 고려 요소들을 설명한 식품에 관한 가이드라인을 제공하고 있다. 이를 통해 신기술 적용 등 제조공정의 변화로 인한 식품의 안전성 평가와 제품 출시 전 미 FDA와 논의하도록 권고하고 있다. 나노식품은 우리나라 식약처에서 아직까지 법적으로 허용되지 않은 용어로 시장에서만 통용되고 있으나 여러 선진국에서 공식적으로 사용되고 있어 언젠간 우리나라에서도 나노식품의 안전성 평가기준, 관리의 기준과 규격 등이 만들어져 법적으로 허용될 것으로 예상된다.

04

식품 로봇틱스 기술

구분	규제 현황	문제점	개선방안
1	「한국산업표준 및 국제 표준」 한국산업 표준(KS B ISO 10218-1/2 와 KS B ISO TS 15066) 및 국제 표준(ISO TS 15066)을 기준	식품 관련 로봇에 대한 기준 규격 부재 식품생산라인, 급식, 외식 서비스업장에 사용되는 로봇에 대한 기준 규격의 부재 산업용 로봇(협동 로봇 포함) 시스템 협동 운전 관련 필수 참조 규격은 한국산업 표준 (KS B ISO 10218-1/2 와 KS B ISO TS 15066) 및 국제 표준(ISO TS 15066)을 기준 으로 하나, 식품 관련 로봇은 기준 규격이 없음	식품 관련 로봇에 대한 기준 규격 마련 필요
2	「식품위생법」 제47조의2, 같은 법 시행령 제32조의2 같은 법 시행규칙 제61조의2 및 제61조의3의 규정 [식약처] 음식점 위생등급 지정 및 운영관리 규정	식품로봇 자체에 대한 위생안전 기준의 부재 조리 로봇 자체에 대한 안전·위 생 관련 인증 기준은 아직 마련되어 있지 않으며, 음식점 위생관리 기준에 따른 ‘음식점 위생등급제’로 평가를 받고 있음. 조리 로봇과 관련된 평가 항목 부재 및 일반음식점과 관련된 평가 항목으로 현장과 거리감 있음	식품로봇에 대한 위생안전 기준 마련 필요 로봇이 안전하게 설계되고 제조 되었으며 식재료와 접촉하여 오염이 발생할 수 있는지, 사람이 있는 공간에서 작동했을 때 안전한지 등의 다양한 규정이 필요함 ※ 규제 혁신을 통해 푸드테크 시장 확대에 맞추어 안전, 위생 등의 문제에 대해 가이드라인을 제시 하여 관리의 효율성을 높이고, 소 모적인 행정 절차를 줄일 수 있음
3	「산업안전보건법」 한국로봇산업진흥원 『협동로봇 설치 및 작업장 안전인증제도』 한국로봇산업진흥원 『협동로봇 설치 작업장 안전인증 심사규 정』	안전 기준의 현장 반영 부족 조리로봇이 사용되는 현장에서는 「산업안전보건법」이 적용되어 안전한 작업환경을 보장해야 하나, 일부 규정은 인력 중심의 제조 환경을 전제로 하고 있어 자동화 로봇이 중심이 되는 환경에 맞지 않는 경우가 있음	조리 로봇 안전 표준의 완화 기계적으로 작동하는 장비는 사람의 개입이 최소화된 상태에 서 작업하기 때문에, 기존 인력 중심의 안전 규제를 조정 하고, 로봇의 운영 환경에 맞는 안전 기준을 도입할 필요가 있음. 이러한 규제 완화를 통해 로봇의 도입 비용이 줄어들고 설치 과정이 간소화될 수 있음

구분	규제 현황	문제점	개선방안
4	로봇 산업 육성정책 부재 *「푸드테크산업 육성에 관한 법률」안이 제안되었으나, 법안 통과되지 못함	1) 로봇서비스업 정책적 지원 부족 조리로봇 산업이 지속적으로 발전하기 위해서는 로봇의 유지보수, 소프트웨어 업데이트, 데이터 관리 등 관련 서비스업이 함께 성장해야 하지만, 대한민국에서는 이러한 서비스업을 육성하기 위한 정책적 지원이 부족함 2) 로봇제조 및 서비스업 육성 정책 필요 로봇 도입에 따른 초기 비용이 상당하기 때문에 외식업체들이 조리로봇을 쉽게 도입하기 어려울 수 있음	1) 로봇서비스업 지원 관련 정책 필요 조리로봇 회사들이 성장하기 위해서는 로봇 기반 서비스업 육성정책이 필요하며, 정부가 로봇 유지보수 인프라 구축 및 관련 인력 양성을 위한 프로그램 운영 관리할 필요가 있음(산학협력프로그램 등) 2) 로봇 제조 및 서비스업 육성 정책 필요 로봇 도입 기업에 대한 세금 감면 혜택이나 도입 비용의 상당수를 저금리로 대출해 주는 프로그램, 기술 지원 프로그램 강화 필요. 이를 통해 중소기업이나 외식업체가 부담 없이 로봇을 도입할 수 있으며, 로봇 공급업체도 지금보다 더 쉽게 시장에서 인정받을 수 있음

현재 식품 관련 로봇산업 육성을 위한 정책적 지원은 매우 부족한 실정이다. 특히 로봇 서비스업에 대한 지원이 미흡하여 시장 규모가 아직 제조로봇의 1/3 수준에 불과하고, 특히 청소·서빙로봇 외에 물류·조리로봇 등은 아직 초기 단계에 머물러 있다. 국내 로봇기업 2,500개의 약 99%가 중소기업이고, 매출 10억 원 미만 업체가 약 70%를 차지하므로 영세 자영업자의 구인난 해소와 서비스 효율화 등을 위해서는 조리로봇의 도입이 필요하며, 식품 관련 로봇산업 육성을 위한 정책적 지원은 필수적이다. 로봇 서비스업 육성과 더불어 로봇 도입 비용에 대한 세제 혜택이나 저금리 대출 등 재정적 지원이 마련되어야 한다.

또한 식품 생산라인, 급식, 외식산업에서 로봇이 도입되고 있는데, 적합한 안전과 위생에 대한 규정이 부재한 현실이다. 산업 로봇의 안전에 대한 규정은 『산업안전보건기준에 관한 규칙』 제222조(교시 등) 산업용 로봇의 작동범위에서 교시(작동순서·위치·속도의 설정과 변경)의 작업을 하는 경우 예기치 못한 작동 또는 오조작에 의한 위험 방지를 위한 조치, 제223조(운전 중 위험 방지) 로봇의 운전으로

인해 근로자에게 발생할 수 있는 부상 등의 위험을 방지하기 위한 울타리 및 방호장치 설치, 제224조(수리 등 작업 시의 조치 등) 로봇의 수리·검사·조정·청소·급유·결과 확인 등의 작업을 하는 경우 기동 스위치의 잠금 및 오조작에 의한 위험 방지 등의 규제를 찾아볼 수 있는 반면, 식품 생산라인, 급식, 외식 업장에 적용되는 식품 협동로봇은 산업 로봇보다 더 많은 인력과 협업하여 인력과 접촉이 많은 상황인데, 안전 관련 규제는 부재하다. 식품산업에 협동 로봇이 적용될 때, 위생에 대한 규제는 「식품위생법」 제36조 시설기준만 있을 뿐, 위생관리 규정 또한 부재하다.

7

식품안전 기술 확보 전략

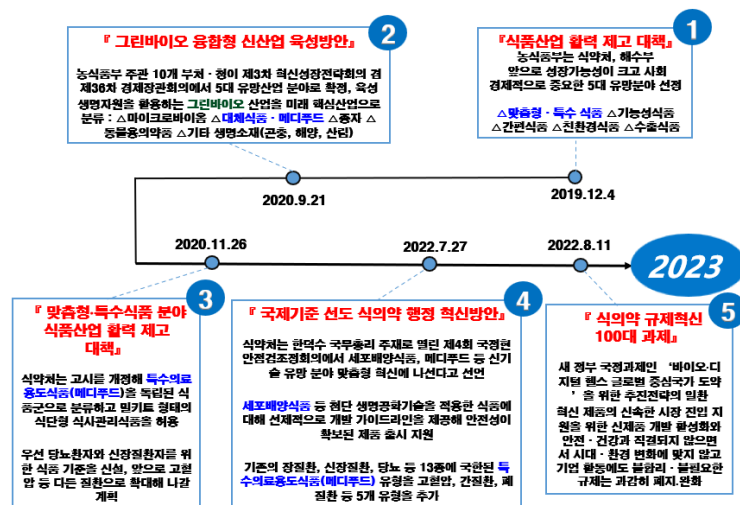
- 유전자 교정기술
- 배양육 개발 기술
- 나노식품 기술
- 식품 로봇틱스 기술

식품안전 기술 확보 전략

기존의 전통적인 식품산업에서 신기술과의 융복합을 통해 푸드테크산업으로 경쟁력을 확보하기 위한 접근이 필요하다. 미국의 경우 농무부와 국립식량농업연구소(USDA-NIFA)가 지원하는 U.C. Davis와 일리노이 대학(Urbana-Champaign) 2개 대학의 AI 연구소에서는 식품 시스템 전체적인 관점에서의 농업 문제를 해결하고, 미래 농업 복원력, 관리 및 지속 가능성을 위한 AI 기반 협력연구를 발전시키면서 인력 교육에도 집중하고 있다.

우리나라도 산업활성화 등 복합적인 문제해결을 위해 관계 부처 지원 전략을 구사하고는 있으나, 식품산업 전반에 AI, IoT 등의 융복합 기술 접목의 적극적 확대가 필요하다. 식약처는 '신기술 적용 식품(푸드테크) 안전기술 지원' 출연 연구를 지원하고 있다. 국내 기업이 당면한 심각한 인력난과 높은 자동화 설비 수요 등 현안 문제 해결에 대응하기 위한 범부처 협력이 요구된다. 그 밖에, 부가가치를 높일 수 있는 신식품 개발 분야에 대한 투자 확대 및 국내 푸드테크 시장의 성장 가능성이 높은 분야를 중심으로 국내·외 관계 부처 간 협력 사업 발굴 및 구축도 시급하다.

그림 15 신(新) 식품 관련 우리나라 정부 R&D 지원 정책 흐름



출처: 하상도, 제4차 열린소통포럼 - 신(新)식품 이슈와 쟁점 대체육, 메디푸드 (2022.8.31)

101 유전자 교정기술

세부과제

- 유전자 편집기술 기반 식의약 소재 생산기술 개발 및 인프라 구축 연구사업단
□ 유전자 편집기술 기반 대체단백질 소재, 생리활성 소재, 소재 생산기술 개발 연구

02 배양육 개발 기술

세부과제

- 배양육 생산기술 실용화연구 사업단
 - 세포배양식품과 기원조직 간 유전학적 및 감각학적 동등성 검증 기술개발 및 동등성 허용 기준 가이드 마련
 - 농약 및 동물용 의약품 성분의 세포배양식품 배양용 향생제 사용을 위한 배양 배지 중 분석 시험법 개발검증 및 적정 사용기준 확보
 - 세포배양식품 기원조직 간 영양학적 동등성 확보를 위한 아미노산, 지방산 등 조성 조절 기술 개발
 - 기원조직별 세포배양식품 세포주 거점 은행 구축 사업
 - 식품소재 가능 효모 이용 대체단백질 소재 대량생산 원천기술 개발 및 안전성 확보를 통한 제품화 추진 연구
 - 동물성 단백질 소재 기원별 특이적 판별 가능 유전정보 DB화 및 동식물성 혼합 소재에서의 기원별 동물성 단백질 원료 정성/정량 분석 시험법 개발검증 연구
 - 푸드테크 적용 식품 소재 개발 및 안전성 확보 촉진을 위한 지원센터

- 소 태아 혈청 대체를 위한 성장인자 생산기술 개발 연구

103 나노식품 기술



세부과제

□ 식품나노텍 통합 연구단

- 식품가공 중 나노기술 유래 기능성 식품소재의 안전성 검증 기술
- 나노기술이 적용된 식품첨가물/보조제
- 나노캡슐의 식품소재로서의 가능성 확인을 위한 임상/비임상적 효과 검증기술
- 나노기술이 적용될 식품포장재 안전/안정성 검증 기술

국내외 전문가들이 제시하는 문제점

- 나노식품의 경구섭취 시 체내 ADME(Absorption, Distribution, Metabolism, Excretion) 데이터가 제한적 나노식품에 인체가 장기 노출될 경우 독성 데이터 부족
- 나노물질이 포함된 식품군에 대한 정보 부족과 표시 기준의 부재
- 식품 중 나노물질의 다른 성분들과의 반응성, 분해 여부 등에 대한 정보 부족(나노캡슐 제외)
- 나노물질의 분리 유출 시 체내 유해성에 대한 우려
- 나노식품의 실제 섭취 DB 부재
- 나노물질의 식품과 체내, 특히 소화기관 등에서의 측정과 특성 연구에 대한 분석법의 필요성이 증가하고 있으나 비싼 분석 비용과 고도의 분석기술, 표준화된 분석법의 부재로 나노식품의 검출과 안전성 연구 필요성이 제기되고 있음

국내 전문가들이 제시하는 주요 개발 기술

□ 식품가공

- 식품 내 나노물질들이 섭취 후 소화기관에서 소화되거나 용해됨에 따라 상대적으로 안전성에 대한 이슈 정도는 낮은 편임
- 나노물질의 안전성평가는 소화성(Digestibility)과 체내 이용성의 주요 변화 등을 고려해서 수행 필요
- 식품가공 중 나노기술 유래 기능성 식품소재의 안정성 검증 기술 필요

□ 나노식품첨가물/보조제

- 나노기술로 제조된 나노물질의 불용성과 물질의 안정성이 증가하고, 이들 나노물질의 독성학적 특성에 대한 데이터 부족함에 따라 소비자 노출과 위해 가능성
- 나노기술이 적용된 식품첨가물/보조제의 안전성평가기술 개발 필요

□ 나노캡슐 식품제제

- 나노캡슐제품의 체내 흡수 및 대사 과정이 기존의 제품과 상이할 경우의 잠재적 유해성에 대한 데이터 부족
- 나노캡슐제품의 체내이용률의 증가와 과도한 섭취효과 등 유해한 영향 평가기술 부재
- 나노캡슐의 식품소재로서의 가능성 확인을 위한 임상/비임상적 효과 검증기술 필요

□ 나노식품포장

- 나노물질(Engineered Nanoparticles: ENPs) 포장 시 식품이나 음료(알코올, 비알콜류)로 전이될 경우 잠재적 소비자 안전
- 나노기술이 적용될 식품포장재 안전/안정성 검증 기술 개발 필요

104 식품 로봇틱스 기술



세부과제

□ 식품 조리용 로봇개발연구 사업단

- 식품로봇 기준 규격 마련 연구
- 식품로봇 위생·안전 기준 마련 연구
- 조리로봇 안전표준 적정성 기준 마련 연구

국내 전문가들이 제시하는 주요 개발 기술

- 식품로봇 기준·규격 마련 연구
 - 식품로봇 적합 기준 파악
 - 식품로봇 전반 필요 기준 마련
 - 식품생산, 급식외식 생산, 서비스 각 영역별 필요기준 마련
 - 현장 적용 타당성 조사
- 식품로봇 위생안전 기준 마련 연구
 - 식품로봇 유형 분류, 식품로봇 유형 및 상황별 위생·안전 적합 기준 파악
 - 식품로봇 위생·안전 전반 필요 기준 마련
 - 식품생산, 급식외식 생산, 서비스 각 영역별 위생·안전 기준 마련
 - 현장 적용 타당성 조사
- 조리로봇 안전표준 적정성 기준 마련 연구
 - 로봇 유형별 운영 환경 파악
 - 식품로봇 안전표준 적정성 기준 파악
 - 식품로봇 안전표준 전반 필요 기준 마련
 - 식품생산, 급식외식 생산, 서비스 각 영역별 안전표준 기준 마련
 - 현장 적용 타당성 조사

참고문헌

과학기술정보통신부. 2018. 제2차 과학기술 기반 국민생활(사회) 문제해결 종합계획 (2018~2022).

김정원. 2002. 국내 식품산업체 및 정부의 식품 연구개발 투자 동향. 식품과학과 산업, 제35권 제3호, 14~27쪽.

농식품부 주관 10개 부처·청. 2020. 그린바이오융합형 신산업육성방안 (2020.9.21.).

농식품부 주관 10개 부처·청. 2022. 농식품산업의 혁신성장을 위한 푸드테크 산업 발전방안 (관계부처 합동).

박미성, 박시현, 이용선. 2020. 대체식품 현황과 대응과제. 한국농촌경제연구원

산업기술진흥협회. 2017. 기업연구소 현황.

산업통상부. 2017. 세계일류상품. <http://www.wcp.or.kr/index/> (2017.11.26.).

산업통상자원부, 한국공학한림원. 2018. 한국산업기술발전사-섬유·식품.

서울대학교 산학협력단. 2012. 식품산업 관련기술의 수준 향상 및 지원체제 개선방안.

식약처. 2022. 국제기준 선도 식의약품행정 혁신방안 (2022.7.).

식약처. 2022. 대체식품의 정의와 안전관리 기준(식품의 기준 및 규격 고시 개정 (2022.12.22.)).

식약처. 2022. 식의약품규제혁신 100대 과제 (2022.8.11.).

식약처. 2023. 2023년 식품의약품산업 동향 통계.

식약처 식품의약품안전평가원. 2024.7. 세포배양식품 원료 한시적 기준 및 규격 - 제출자료 작성 가이드(민원인 안내서)

식품공업협회. 2000. 식품공업발전사.

식품음료신문. 2021. 신(新)식품의 등장과 식품시장의 변화①:배양육(培養肉)-하상도의 식품 바로보기(243). <https://www.thinkfood.co.kr/news/articleView.html?idxno=90129> (2021.2.15.)

식품음료신문. 2021. 신(新)식품의 등장과 식품시장의 변화②:나노식품-하상도의 식품 바로보기(247) <https://www.thinkfood.co.kr/news/articleView.html?idxno=90411> (2021.3.15.)

식품음료신문. 2021. 신(新)식품의 등장과 식품시장의 변화③:유전자가위편집 기술과 GMO-하상도의 식품 바로보기(248) <https://www.thinkfood.co.kr/news/articleView.html?idxno=90497> (2021.3.22)

식품음료신문. 2024. 특수의료용도식품의 미래와 발전 방안-하상도의 식품 바로보기(369) <https://www.thinkfood.co.kr/news/articleView.html?idxno=99562> (2024.1.15.)

오나희. 2024.7. 소비자정책동향 제140호 대체식품 관련 주요 동향 및 시사점.

트로트뉴스. 2015. [대상의 60년 고집] 발효조미료 ‘미원’ 세계일류상품 선정. <http://www.trotnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=22198> (2015.12.16.).

하상도. 2000. 식품과학분야의 기술예측: 델파이기법을 중심으로. 식품과학과 산업, 제33권 제2호, 96~104쪽.

하상도, 이현유, 장승동, 이규천. 2004. 미래 식품과학기술 중 가공분야 기술로드맵 작성. 식품과학과 산업, 제37권 제3호, 36~49쪽.

하상도. 2022.8.31. 제4차 열린소통포럼 발표자료 - 신(新)식품 이슈와 쟁점 대체육, 메디푸드

하상도. 2024. 식량안보와 식품산업의 GMO 이슈. Biosafety, 제25권 제3호.

한국과학기술기획평가원(KISTEP). 2022. 과학기술예측 및 기획연구.

한국농촌경제연구원/서울대학교. 2019. 식품산업정보분석 전문가관 사업보고서.

한국바이오안전성정보센터. 2020. 2019년 전 세계 GM작물 재배 현황.

한국식품산업협회. 2000. 식품공업협회 30년사.

aT(한국농수산식품유통공사). 2022. 식품산업통계정보 - 대체식품 소비자 조사(2024.7.14.~18)

Bodiou, V., Moutsatsou, P., & Post, M. J. 2020. Microcarriers for Upscaling Cultured Meat Production. Front. Nutr., Sec. Nutrition and Food Science Technology Volume 7 - 2020

Etnews, 2022.7. 배양육 시장에 주목하라

FAO(국제농업기구). 2023. 세포 배양육 대한 평가지침

ITP(인천테크노파크). 2019. 2019 국제필드로봇포럼(IFRF: International Field Robotics Forum 2019)

Production. Frontiers in Nutrition, Vol. 7, <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00010>.