푸드테크와 식품안전 모니터링

FoodTech and Food Safety Monitoring

강미선[1,2] · 임민철[1,2] · 옥경식[1] · 김태용[1] · 김현정[1,2*]

Miseon Kang[1,2]·Min-Cheol Lim[1,2]·Gyeongsik Ok[1]·Tai-Yong Kim[1]·Hyun Jung Kim[1,2*]

[1]한국식품연구원 안전유통연구단, [2]과학기술연합대학원대학교 식품생명공학전공

[1]Food Safety and Distribution Research Group, Korea Food Research Institute, Wanju 55365 Republic of Korea
[2]Department of Food Biotechnology, University of Science and Technology, Daejeon 34113 Republic of Korea

김 현 정

Correspondence to

Hyun Jung Kim
Food Safety and Distribution Research Group, Korea Food Research Institute, 245, Nongsaengmyeong-ro, Iseo-myeon, Wanju_gun, Jeonbuk-do, Republic of Korea, 55365, Republic of Korea.
Tel.: +82-63-219-9271,
Fax: +82-63-219-9876
E-mail: hjkim@kfri.re.kr

서론

식품안전의 목적은 공급망 전반에서 식품에 오염된 화학물질, 병원균, 위해요소로부터 소비자를 보호하는 것이다. 식품 미생물 및 화학적 안전과 관련된 과제를 해결하기 위해 공학적 원리를 적용하는 새로운 다학제 분야인 식품안전공학은, 가공, 취급, 운송, 보관 및 시험 과정에서 혁신적인 기술과 개입을 개발하여 식인성 질병을 예방하고 농장에서 식탁까지 안전하고 고품질의 식품 생산을 보장하는 것을 목표로 한다[1]. 그림 1과 같이 오염물질 제거 및 식중독 예방을 위한 기본적인 위생관리 관행에서 시작하여 기술과 과학적 이해가 발전함에 따라 저온살균, 냉장, 멸균과 같은 기술의 접목을 통해 식품 보존 및 식중독균 제어가 가능해졌다. 이후

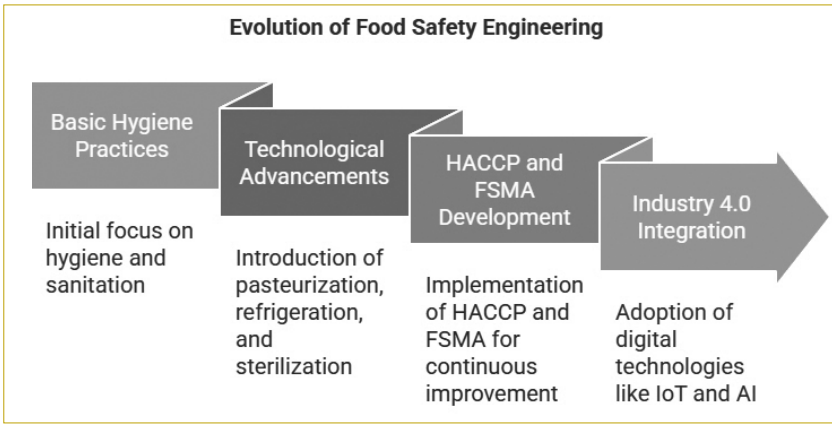

그림 1. 식품안전공학의 발전에 따른 푸드테크 기술 적용

식품 공급망 상의 안전을 지속적으로 개선하고자 위해 요소 분석 및 중점관리 기준(HACCP)이 도입되었고 [2], 현대 식품 공급망의 복잡성과 글로벌 무역, 다양한 생산환경으로부터 비롯된 새로운 과제 해결을 위해 영양, 환경, 작업자 안전까지 포함하는 포괄적인 시스템이 도입되었다[2]. 나아가 최근 몇 년 동안 "산업 4.0"의 영향과 푸드테크 기술의 접목으로 다양한 디지털 기술과 고수준 자동화의 통합 등 보다 전향적이며 사전예방적으로 식품안전을 담보하려는 노력이 지속되고 있다[1].

푸드테크(식품 기술)는 생산, 가공, 포장, 유통, 보관을 아우르는 식품 공급망 전반에 걸쳐 과학 및 기술 혁신을 적용하여 식품의 안전성, 품질 및 지속가능성을 보장하는 것을 의미한다[3]. 식품안전의 측면에서 보다 구체적으로 살펴보면 자동화, 빅데이터, 생명공학, 사물인터넷(IoT), 스마트 포장과 같은 첨단 디지털 기술을 식품 공급망 전반에 통합하여 식품의 편의성, 지속 가능성, 안전성을 향상시키는 혁신 분야를 일컬으며, 이러한 기술들을 식품안전관리에 접목함으로써 실시간 공급망 모니터링, 위생 규정 준수, 오염원 조기 탐지, 식품 보존 기술의 고도화와 궁극적으로는 식중독 발생 위험 감소에 기여할 수 있다[4,5]. 또한 식품안전분야에서 푸드테크는 운송 · 저장 중 식품 품질과 안전을 유지할 수 있도록 설계된 고급 배송 시스템 및 포장 솔루션도 포함하며, 보온 · 보냉 기능, 온도 조절, 누수 방지 기능 등을 통해 제품의 품질을 보장하고 소비자의 만족도를 제고할 수 있다[6]. 현대 식품 기술의 핵심 구성 요소 중 하나는 식품 안전 모니터링으로, 지속적인 감시와 첨단 방법 · 도구를 적용하여 식품의 화학적, 생물학적 위험을 조기에 감지, 예방 및 관리함으로써 공중 보건 보호와 소비자 신뢰 유지에 도움을 줄 수 있다[7]. 국제적 상호 연결성 심화, 진화하는 소비자 기대, 식품 매개 질병의 증가로 인해 글로벌 식품 산업이 새로운 과제에 직면함에 따라 첨단 기술을 식품 안전 모니터링에 적용하는 것은 필수이자 산업 표준이 되었으며[8], 이와 관련된 주요 방법과 기술을 살펴보면 다음과 같다.

본론

1. 식품안전모니터링 주요 기술

식품 안전 모니터링 시스템은 최첨단 디지털 및 분석 기술을 활용하여 잠재적 위험을 효율적으로 감지함으로써 크게 발전했다. 예를 들어 IoT 시스템은 식품 공급망에 실시간 추적 및 데이터 전송이 가능하며 상호 연결된 센서를 장착하여 온도, 습도 또는 식중독균 증감과 같은 주요 변화를 신속하게 감지하는데 도움을 준다[9]. 이러한 IoT 지원 네트워크는 데이터 수집 · 분석 플랫폼과 연동 구현하여 오염인자 모니터링 또는 무결성 확인에 적용할 수 있다. IoT 및 블록체인 등의 디지털 기술은 식품 산업에서 고도화된 추적성(traceability)을 제공하고 비상 시 신속한 리콜을 가능하게 한다[9]. 예를 들어, IoT 센서는 생산 및 운송 과정에서 실시간 환경 데이터를 스트리밍하여 중요한 안전 매개변수를 유지하는 데 도움이 되며, 블록체인은 이러한 데이터가 안전하고 투명하게 기록되도록 보장하여 소비자와 규제 기관 간 신뢰 구축에 활용될 수 있다[10].

비색 센서, 바이오 센서, 분광 장치를 포함한 비파괴 센서 기술은 부패 지표 및 오염 물질을 현장에서 신속하게 감지하여 생산자와 규제 기관 모두에게 비용 효율적이고 사용자 친화적인 접근 방식을 제공하게 되는데[11], 나노 기술과 나노바이오센서 등은 분자 수준에서 오염물질과 병원균을 실시간으로, 매우 특이적이고 민감하게 감지할 수 있도록 하여 식품 모니터링에 혁명을 일으키고 있다[12]. 이들 첨단 센서 시스템은 다양한 식품 매트릭스에서 농약, 병원균, 독소 및 알레젠 등 여러 화학적, 생물학적 위해인자 분석 시 신속성, 높은 감도와 합리적인 경제성으로 인해 활용도가 증가하고 있다[13]. 이러한 센서 기술은 종종 스마트폰 앱이나 전용 판독기로 간단한 색상 변화를 감지하며, 이를 통해 식품 상태의 변화를 시각화, 정량화 및 해석하여 현장 및 소비자 입장에서 보다 간단하고 효율적으로 식품 안전 여부를 평가할 수 있다[11]. 또한, 식품 포장에 부착된 시간-온도 통합기(TTI)는 부패하기 쉬

운 제품의 온도 이력을 시각적 또는 계량적으로 표시하여 운송–보관 과정에서 제품이 안전한 매개변수 범위 내에서 유지되도록 관리할 수 있다[14]. 한편, 지표와 센서가 내장된 스마트 · 지능형 포장재는 식품 제조부터 포장까지 제품의 신선도와 부패 여부를 모니터링함으로써 식품 품질 및 안전 상태에 대해 이해관계자와의 직접적인 소통을 증가시킬 수 있다[13,15].

이때 수집된 다종의 데이터를 바탕으로 식품안전성 예측 능력을 향상시키기 위한 노력도 지속되고 있는데, 기계학습 등 보다 고도화된 데이터 분석 기술은 다양한 모니터링 장치로부터 수집된 데이터를 실시간으로 분석하여 식중독 등 안전사고 발생의 예측과 식품 품질 평가 등에서 정확도 제고에 도움을 주고 있다[16,17]. 식품안전인자의 모니터링 중 특히 실시간 모니터링은 전체 공급망에서 발생하는 주요 상황에 대한 지속적이고 즉각적인 데이터를 제공하여 식품 공급망의 조기 위험 감지 기능을 향상시키며, 잠재적 위험을 신속하게 식별 · 대응하고, 오염을 방지하며 식품 안전을 보장할 수 있어 최근 관심이 주목되고 있다. 식품안전관리의 화두인 추적성 및 투명성과 관련하여 실시간 모니터링은 공급망 전체에 걸쳐 식품의 상세한 상태 이력을 기록하여 추적성을 향상시키고, 위험 발생 지점의 정확한 식별을 가능하게 한다[18]. 이러한 투명성은 보다 빠르고 집중적으로 리콜이 가능하게 하며, 책임 소재의 파악에 도움을 주어 산업적 · 경제적 손실을 최소화하는데 기여한다[18].

실시간 모니터링 시스템은 주로 센서와 IoT 장치를 활용하여 생산, 보관, 운송 및 유통 과정에서 온도, 습도, 병원균 존재, 화학 오염 물질 등의 매개변수를 지속적으로 추적하며[19–21], 이러한 중단 없는 데이터 스트림을 통해 기존의 정기 검사에서는 간과할 수 있는 안전 기준 위반 사항을 적시에 감지할 수 있다[22]. 이 시스템은 주요 매개변수가 안전 기준을 초과할 경우 실시간 알림을 제공함으로써 오염 사고나 광범위한 식품 안전 사고로 확대되기 전에 이해관계자가 잠재적 위험에 즉시 대응할 수 있도록 도와준다[19, 20]. 아울러 앞서 기술한 센서 기술을 스마트 패키징에 통합함으로써 부패 및 신선도에 대한 실시간 정보를 제공하고 전체 식품 가치 사슬에 걸쳐 자동화된 품질 관리가 가능하다[15]. 이러한 선제적 접근 방식은 회고적 데이터 분석이나 인적 검사에 의존하는 기존 방식의 문제점인 처리 · 대응 지연을 예방할 수 있다. 이와 같은 식품공급망에서의 식품 품질안전인자 실시간 모니터링 기술의 장점과 영향을 요약하면 다음 표 1과 같다. 한편 온도 중심의 식품안전관리는 오랜 기간 활용되어 온 매우 유용한 방식이나 관리 대상 식품 및 식중독균의 고유 특성

표 1. 식품 공급망에서 실시간 모니터링 기술의 특성

Benefit	Description	Impact
Continuous Surveillance	Ongoing tracking of safety–critical parameters	Immediate detection of hazardous deviations
Rapid Alerts and Response	Automated notifications when risks are detected	Prevents contamination and widespread hazards
Improved Traceability	Detailed historical data across supply stages	Efficient hazard source identification and recall management
Predictive Risk Management	Feeding data into predictive models for early hazard prediction	Allows preventive rather than reactive safety measures
Minimized Human Error	Automation reduces manual inspection dependency	Enhances monitoring accuracy and coverage
Regulatory Compliance	Real–time evidence of safety procedures adherence	Supports legal requirements and industry standards
Increased Consumer Trust	Assurance of food safety from production to consumption	Strengthens brand reputation and market confidence

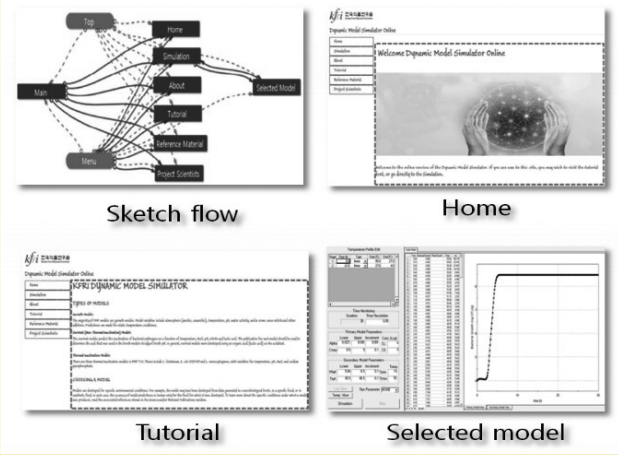

그림 2. 식품 중 식중독균 실시간 모니터링을 위한 동적모델시스템 (한국식품연구원 데이터)

에 따라 각기 다른 거동 특성을 나타내므로 관리의 사각지대가 발생한다. 식중독균의 예측 모델은 식품 가공, 저장, 안전관리의 영역에서 널리 활용되어 왔는데, 최근 한국식품연구원 등에서는 IoT 센서를 통해 실시간으로 환경 데이터를 수집하고, 품질 및 식중독균 균수 변화에 대한 동적 모델을 개발 · 연동함으로써, 식품 공급망 중 실시간으로 품질과 식중독균의 균수 변화를 모니터링하는 연구를 수행하고 있다(그림 2).

2. 동적 모델링 (Dynamic Modeling)

센서를 이용한 실시간 모니터링 기술과 더불어 복잡한 식품 매트릭스에서의 품질안전인자 변화에 대한 모델링 기술은 데이터 해석, 예측 및 실시간성 확보를 위한 주요 기술로 평가되고 있다. 동적 모델링(Dynamic modeling)은 수학적 · 속도론적 모델을 이용해 색상, 영양, 미생물 안전성 등 식품 품질 지표의 시간에 따른 변화를 예측하며, 미생물 성장, 부패, 교차 오염 관리와 같은 과학적 근거 기반의 식품안전관리 핵심기술로 활용되고 있다 [23]. 최신 동적 모델은 IoT 센서 데이터, 블록체인 기반 추적성, 인공지능(AI) 기반 위험 예측을 통합하여 실시간 위해 탐지 및 공급망 안전성 · 투명성 강화에 활용되는데[24], 전산유체역학 기반 냉장 물류 모델, 오염원 추적 시뮬레이션 도구, AI 기반 예측 분석 등을 예로 들 수 있다[24]. 그러나, 다양한 동적 모델링 접근에도 불구하고, 실용성과 예측 신뢰성 측면에서 몇 가지 한계가 존재한다. 예를 들면 전통적인 속도론적 모델은 단순 반응 기반으로 설계되어 식품시스템이 가지고 있는 내적(intrinsic) 및 외적(extrinsic) 인자로 인한 복잡성을 충분히 반영하기 어렵다[25]. 이에 개별 식품에 대해 개별적으로 각각 동적 모델을 개발하여 보완하고 있는 현실이며 보편적인 모델 개발에 대한 필요성은 오랜 기간 대두되고 있으나 아직 충분한 결과가 도출되고 있지 않다. 액체 등 균질 시스템과 달리, 식품 매트릭스는 수분 활성도, 영양소 분포, pH 구배, 그리고 미생물의 성장과 생존에 불균일하게 영향을 미치는 미세 구조적 차이를 포함하는 경우가 많다. 물리적 이질성 외에도 식중독균과 다양한 환경 스트레스 요인 간의 동적 상호작용도 모델링의 복잡성을 야기한다. 식품 매트릭스에서 식중독균은 온도 변화, pH 변동, 항균 화합물 및 경쟁 미생물 균총과 같은 변동적인 조건에 노출된다. 보다 상세하게 살펴보면 식품의 미생물 군집 구성, 재료 특성, 가공 중 온도 변화 등 식품 매트릭스에 따른 불확실성이 존재하며 이를 충분히 반영하지 못했을 때 모델 예측력이 감소되는 한계가 있다[25]. 마지막으로, 모델 검증을 위한 현실적인 식품 조건에서 병원균의 행동 패턴 실험 데이터가 부족한 것도 식중독균 동적 모델링의 어려움 중 하나이다. 기존의 미생물학적 방법은 노동 집약적이므로 방대한 데이터를 생산하는데 어려움이 있다. 다중 PCR 분석법이나 생물 발광 또는 형광 리포터 병원균과 같은 분자 검출 기술은 실시간 검출에 용이하나 이러한 데이터 스트림을 동적 모델에 통합하는 것은 여전히 도전적인 것으로 평가받고 있다[26] (그림 3). 요약하자면, 복잡한 식품 매트릭스에서 식중독균의 거동을 시뮬레이션하는 데 있어 해결해야 할 과제에는 식품의 공간적 미세환경의 재현, 다인자 병원체–환경 상호작용 통합, 매개변수 및 데이터 부족 문제 해결 등이 있으며, 이러한 과제의 해결은 다양한 식품 시스템에서 식중독균의 현실적이고 효과적인 예측 및 제어를 위한 동적 모델링을 발전시키는 데 매우 중요할

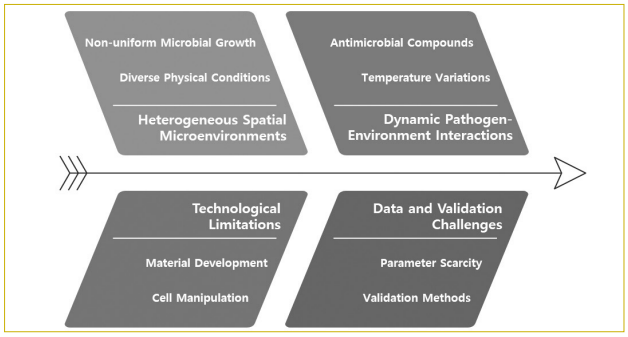

그림 3. 복잡한 식품매트릭스에서 동적 모델링의 한계

것이다[27].

한편 소비자의 선호, 소비 습관, 보관 및 조리 방식은 공급망의 마지막 단계에서 식품 안전에 큰 영향을 미치므로, 동적 모델에 반드시 통합되어야 한다. 예를 들어, 소비자의 냉장 보관 시간, 조리 습관 등은 미생물 성장에 영향을 주며, 이를 반영한 모델은 보다 정확한 위해 예측이 가능하다[4]. 소비자 피드백과 디지털 플랫폼의 데이터를 활용하면 식품 소비 시점, 불만리콜 사례 등을 실시간으로 반영할 수 있고, 스마트 포장이나 나노기술 기반 제품의 수용성 예측에도 행동 데이터를 활용할 수 있다[28]. 앞서 기술한 바와 같이, 푸드테크 기술은 동적 모델링을 가능하게 하는 데이터 인프라와 기술적 기반을 제공한다. IoT 센서의 연결성과 빅데이터 분석은 실시간 모니터링과 오염 사고 대응을 가능하게 하며[9], 스마트 포장과 선진화된 배송 시스템은 모델 기반으로 식품 품질을 전 공급망에 걸쳐 유지하는데 도움을 줄 수 있다[4]. 이와 같은 다양한 기술을 종합적으로 적용함으로써 보다 고도화된 방식으로 규제를 준수하고 소비자 기대를 충족시키며, 데이터 기반 리스크 관리 전략 수립이 가능하다. 즉, 푸드테크와 동적 모델링의 융합 등 최신기술과 식품산업의 전통적인 기술을 융합적으로 적용함으로써 식품안전의 정밀도와 실시간 대응 능력을 획기적으로 향상시킬 수 있으며 특히 디지털 혁신, 속도론적 모델링, AI 기반 분석 도구의 활용은 식품 공급망 중 발생하는 다양한 위해인자에 효과적으로 대응하고, 보다 효율적이며 투명한 식품 시스템 구축에 기여할 수 있다.

3. 예측 분석 및 머신러닝과의 통합

앞서 기술한 바와 같이 여러 식품안전모니터링 기술 및 장치로 부터 방대한 양의 다양한 데이터가 수집되며 이들 복잡한 데이터를 분석하기 위한 기술에 대한 수요가 증가하고 있다. 예측모델과 머신러닝 알고리즘을 실시간 수집된 식품안전인자에 적용하여 식품공급망에서 잠재적 위험 발생 예측력을 증가시킬 수 있으며, 이를 통해 사전예방적 조치와 전반적인 식품 안전 관리를 개선시킬 수 있다[28]. 식품공급망의 여러 단계에서 수집된 다종의 데이터들을 통합 분석하기 위해 최근 기계학습을 포함한 AI 적용 사례가 급증하고 있다. 그러나 많은 AI 모델의 "블랙박스" 특성은 식품 안전 전문가, 규제 기관 및 공급망 이해관계자의 신뢰를 제한하고 효과적인 의사 결정을 방해할 수 있다. 이 중 설명 가능 AI(XAI, Explainable AI)는 AI 및 머신러닝 모델의 의사 결정을 해석 가능하고 투명하게 하여 공급망 내 식품 안전 강화에 중요한 역할을 한다. 설명 가능 AI는 예측 근거를 제공하여 이러한 문제를 해결함으로써 자동화된 모니터링 시스템에 대한 이해관계자의 신뢰를 높여, 궁극적으로는 정보에 기반한 대응을 가능하게 한다[29]. 예를 들어 설명 가능 AI 시스템은 온도, 습도, 병원균 존재, 화학 오염 물질과 같은 입력 변수와 예측된 위험 결과 간의 관계를 규명하여 식품 안전 관리자에게 보다 이해할 수 있는 정보를 제공할 수 있다. 이러한 투명성은 AI를 HACCP 및 규정 준수 프레임워크에 활용할 때 특히 중요하다. 또한, 설명 가능 AI는 IoT 센서 및 스마트 패키징 기술에서 파생되는 실시간 데이터를 분석하여 보다 고도화된 통찰력을 제공할 수 있다. 예를 들어, 감시 시스템이 식품 품질 이상이나 환경 조건의 편차를 감지할 때, 설명 가능한 AI를 통해 위험의 근원, 잠재적 영향, 그리고 권장되는 조치를 명확히 파악할 수 있다[19]. 설명 가능 AI는 생산자, 유통업체, 소매업체 그리고 규제 기관 간의 공동 의사 결정에 판단의 근거를 제공하며, 블록체인과 결합하였을 때 데이터 프라이버시를 보장하는 동시에 위험 평가 및 추적성 향상에 기여할 것으로 예상된다[18, 29]. 즉, 설명 가능 AI는 정교한 머신러닝 결과를 투명하고 신

뢰할 수 있는 지식으로 변환하여 실시간 식품 안전 모니터링 시스템을 강화하여 적절한 예방조치의 근거를 제공함으로써 식품 공급망의 전반적인 안전수준을 제고하는데 활용될 수 있다.

향후 전망 및 결론

식품공급망에서 온도, 습도, 병원균 존재 여부 등을 지속적으로 또한 실시간 수준으로 추적하기 위해 IoT 센서 · 장치 활용이 지속적으로 증가하고 있다. 그러나 이러한 기술을 복잡한 식품 공급망 전반에 광범위하고 효과적으로 도입하기 위해서는 비용, 데이터 보안, 기존 시스템과의 통합, 숙련된 인력 등 몇 가지 선결 과제가 요구된다[30]. 그 외에도 식품산업에서 보편적으로 적용되기 위해서는 표준화 방법, 효율성 향상, 그리고 실제 환경에서 새로운 센서 및 AI 기술의 성능 검증에 대한 추가 연구도 필요하다[5]. 특히 센서 고장이나 전송 지연은 실시간 모델링 정확도 및 사전 대응 조치에 영향을 미칠 수 있으므로[31] 센서 네트워크와 데이터 전송 인프라의 안정성은 무엇보다 중요하다. 그러나 이와 같은 자동화된 실시간 시스템은 인적 오류가 발생하기 쉬운 수동 모니터링의 문제를 해결하고 여러 단계가 포함되는 식품 공급망 전반에 걸쳐 더욱 포괄적인 감시 기능을 제공함으로써 농장에서 식탁까지 소비자 신뢰 제고를 가능하게 할 것이다[19]. 따라서 기술 발전에 따른 실시간 안전인자 모니터링과 여러 푸드테크 기술이 접목된 식품안전관리기술로의 변화는 지속적이면서도 급격하게 진행될 것으로 전망되며, 개발된 기술을 보다 적극적으로 검토하고 적용할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2025년도 한국식품연구원 기본연구사업(E0210702-05)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. He, Y., et al., *Food Safety Engineering*. 2024, Elsevier. p. 101059.
2. Awuchi, C.G., *HACCP, quality, and food safety management in food and agricultural systems.* Cogent Food & Agriculture, 2023. **9**(1): p. 2176280.
3. Lalpuria, M., R. Anantheswaran, and J. Floros, *Packaging technologies and their role in food safety, in Microbial Decontamination in the Food Industry.* 2012, Elsevier. p. 701-745.
4. Van Boekel, M.A., *Kinetic modeling of food quality: a critical review.* Comprehensive reviews in food science and food safety, 2008. **7**(1): p. 144-158.
5. Halim-Lim, S.A., et al., *Digital innovations in the post-pandemic era towards safer and sustainable food operations: a mini-review.* Frontiers in Food Science and Technology, 2023. **2**: p. 1057652.
6. Palanisamy, Y., V. Kadirvel, and N.D. Ganesan, *Recent technological advances in food packaging: sensors, automation, and application.* Sustainable Food Technology, 2025.
7. Nath, S., *Advancements in food quality monitoring: integrating biosensors for precision detection.* Sustainable Food Technology, 2024.
8. Food and A.O.o.t.U. Nations, *Thinking About The Future Of Food Safety - A Foresight Report.* FAO, 2022.
9. Dakhia, Z., M. Russo, and M. Merenda, *AI-Enabled IoT for Food Computing: Challenges, Opportunities, and Future Directions.* Sensors, 2025. **25**(7): p. 2147.
10. Yousefi, H., et al., *Intelligent food packaging: A review of smart sensing technologies for monitoring food quality.* ACS sensors, 2019. **4**(4): p. 808-821.
11. Zhang, X., et al., *Portable sensor devices based on multifunctional framework materials: Recent advances for food safety assurance by on-site detection.* Trends in Food Science & Technology, 2025: p. 104965.
12. Caswell, J.A., *Trends in food safety standards and regulation--implications for developing countries: food safety in food security and food trade.* 2003.
13. Guruprasath, N., et al., *Review on emerging*

applications of nanobiosensor in food safety. Journal of Food Science, 2024. **89**(7): p. 3950-3972.

14. Waldhans, C., et al., *Implementation of a time-temperature-indicator as a shelf life predictive tool for a ready-to-eat salad.* Applied Food Research, 2025. **5**(1): p. 100640.

15. Lee, N., et al. *Predictive Food Safety Risk Monitoring. in 2023 10th International Conference on ICT for Smart Society (ICISS).* 2023. IEEE.

16. Mazur, F., et al., *Digitalization of colorimetric sensor technologies for food safety.* Advanced Materials, 2024. **36**(42): p. 2404274.

17. Kaushani, K., et al., *Trends in smart packaging technologies for sustainable monitoring of food quality and safety.* International Journal of Research and Innovation in Applied Science, 2022. **7**(07): p. 07-30.

18. Letia, I.A. and A. Groza. *Developing hazard ontology for supporting haccp systems in food supply chains. in IEEE 8th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics*. 2010. IEEE.

19. Jiménez-Carvelo, A.M., et al., *Spatial-temporal event analysis as a prospective approach for signalling emerging food fraud-related anomalies in supply chains.* Foods, 2022. **12**(1): p. 61.

20. Smith, B.G., *Developing sustainable food supply chains.* Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2008. **363**(1492): p. 849-861.

21. Albu, C., et al., *Advances in Cost-Effective Chemosensors for Sustainable Monitoring in Food Safety and Processing.* Chemosensors, 2025. **13**(3): p. 113.

22. Mena, C. and G. Stevens, *Delivering performance in food supply chains*. 2010: Elsevier.

23. Kumar, V., J.J. Ahire, and N.K. Taneja, *Advancing microbial food safety and hazard analysis through predictive mathematical modeling.* The microbe, 2024: p. 100049.

24. Huang, Y., L.J. Kangas, and B.A. Rasco, *Applications of artificial neural networks (ANNs) in food science.* Critical reviews in food science and nutrition, 2007. **47**(2): p. 113-126.

25. World Health Organization, *Microbiological Risk Assessment - Guidance for food*. Vol. 36. 2021: Food & Agriculture Organization of the United Nations.

26. Lanzas, C., Z. Lu, and Y.T. Gröhn, *Mathematical modeling of the transmission and control of foodborne pathogens and antimicrobial resistance at preharvest.* Foodborne pathogens and disease, 2011. **8**(1): p. 1-10.

27. Boughattas, S. and R. Salehi, *Molecular approaches for detection and identification of foodborne pathogens.* Journal of food quality and hazards control, 2014. **1**(1): p. 1-6.

28. Kuppusamy, S., et al., *Integrating AI in food contaminant analysis: Enhancing quality and environmental protection.* Journal of Hazardous Materials Advances, 2024. **16**: p. 100509.

29. Khadka, S., M. Gopinath, and F.A. Batarseh, *Friendshoring in global food supply chains.* European Review of Agricultural Economics, 2025: p. jbae031.

30. Kumar, V., et al., *A comprehensive review on smart and sustainable agriculture using IoT technologies.* Smart Agricultural Technology, 2024: p. 100487.

31. Fazil, A., et al., *Choices, choices: the application of multi-criteria decision analysis to a food safety decision-making problem.* Journal of Food Protection, 2008. **71**(11): p. 2323-2333.