

REVIEW

농산물 내 생물학적 위해요소 검출을 위한 최근 개발기법의 동향: 종설

천정환^{1†} · 서건호^{2†} · 한기원³ · 김치용⁴ · 송광영^{5*}

¹강원대학교 농업생명과학대학 식품생명공학과

²건국대학교 수의과대학 및 원헬스연구소

³인제대학교 반려동물보건학과

⁴신라대학교 반려동물학과

⁵대구한의대학교 반려동물보건학과 및 반려동물산업학과

Screening for Biological Hazards in Agricultural Products Using Newly Developed Methods: A Review

Jung-Whan Chon^{1†}, Kun-Ho Seo^{2†}, Kiwon Han³, Chi Yong Kim⁴, Kwang-Young Song^{5*}

¹Department of Food Science and Biotechnology, College of Biotechnology and Bioscience, Kangwon National University, Chuncheon, Korea

²College of Veterinary Medicine and Center for One Health, Konkuk University, Seoul, Korea

³Department of Companion Animal Health, Inje University, Gimhae, Korea

⁴Department of Companion Animal Health and Science, Silla University, Busan, Korea

⁵Department of Companion Animal Health and Department of Pet Industry, Daegu Haany University, Gyeongsan, Korea



Received: October 29, 2025

Revised: November 27, 2025

Accepted: December 5, 2025

[†]These authors contributed equally to this study.

*Corresponding author :

Kwang-Young Song

Department of Companion Animal Health and Department of Pet Industry, Daegu Haany University, Gyeongsan, Korea

Tel : +82-53-819-1605

Fax : +82-53-819-1273

E-mail : drkysong@gmail.com

Copyright © 2025 Korean Society of Dairy Science and Biotechnology.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Jung-Whan Chon

<https://orcid.org/0000-0003-0758-6115>

Abstract

Agricultural commodities are fundamental to global nutrition and food security, but are continually vulnerable to microbiological contamination throughout cultivation, processing, and distribution. Numerous biological agents, such as bacteria, fungi, viruses, and parasites, can reduce crop yields and indirectly threaten human health via foodborne exposure or toxin accumulation. This review summarizes recent advances in analytical and diagnostic strategies for detecting these hazards in agricultural products. Conventional techniques, including polymerase chain reaction, enzyme-linked immunosorbent assays, and chromatographic analyses, are increasingly being complemented by emerging molecular and biosensor technologies. Such technologies include loop-mediated and recombinase polymerase amplification, surface-enhanced Raman spectroscopy, clustered regularly interspaced short palindromic repeats (CRISPR)/Cas-based assays, and mass spectrometric profiling. Their performances are evaluated in terms of detection accuracy, specificity, operational simplicity, and suitability for field deployment. Furthermore, this review explores the current trends in automation, nanomaterial-assisted microfluidics, and artificial intelligence-based data analysis as promising avenues for enhancing food safety and agricultural biosecurity.

Keywords

biological hazard, agricultural commodities, detection technology, biosensing, food safety

서론

농산물 전반—곡물·원예·축산물—은 인류 영양과 식량안보를 지탱하는 핵심 공급원이며, 필수 영양소를 제공하여 세계 식량 안보를 뒷받침한다[1]. 그러나 현대 농업은 두 가지 위기에 직면해 있는

Kun-Ho Seo
<https://orcid.org/0000-0001-5720-0538>
Kiwon Han
<https://orcid.org/0000-0003-1253-7342>
Chi Yong Kim
<https://orcid.org/0000-0002-7508-3854>
Kwang-Young Song
<https://orcid.org/0000-0002-5619-8381>

데, 2050년 세계 인구가 약 96억 명을 초과하여 농작물 수요가 60% 이상 증가할 것으로 예상되고 그리고 생산에서 최종 유통까지의 각 단계에서 세균, 곰팡이독소, 바이러스, 기생충 등 다양한 생물학적 오염 위험에 직면할 것이다[2]. 이들 병원체는 농작물-가축-인간 간 교차 전파를 통해 수확량 감소와 공중보건 위기를 초래하며, WHO(World Health Organization)는 식품매개 질병으로 인한 전 세계 피해자 수를 약 3천만 명 이상으로 추산했다[3]. 특히 5세 이하 어린이가 전체 감염의 40%를 차지하며, 살모넬라와 노로바이러스가 주요 원인으로 지목된다[4].

농산물은 생산·가공·유통 전 과정에서 다양한 식품매개 병원체의 매개체가 될 수 있으며, 부적절한 취급 또는 섭취 시 식중독, 위장염, 인수공통감염증 등 다양한 질병을 유발한다. 주요 병원성 세균에는 대장균, 황색포도상구균, 장염비브리오, *Listeria*, *Shigella*, *Bacillus cereus*, *Salmonella* 등이 있다. 2011년 독일의 Shiga toxin-producing *Escherichia coli*(STEC) O104:H4 유행으로 2,971명의 감염과 18명의 사망이 발생했다[5]. 유럽연합 2020 보고에 따르면 캄필로박터증 12만 건, 살모넬라증 5만 건, STEC 4,446건이 보고되었다[3]. 또한 ECDC(European Centre for Disease Prevention and Control) 위험 모델은 리스테리아증의 90% 이상이 그램당 2,000 CFU의 *Listeria monocytogenes*를 포함한 육류·수산·유제품 섭취로 인한 것으로 나타났으며, 냉동·신선 가공식품(예: 카라멜 사과, 아이스크림)에서도 발병이 보고되었다[6]. 아플라톡신 B1, 오크라톡신 A, 푸모니신 B1, 지베렐린 등 진균독소는 특정 곰팡이에 의해 생성되는 독성 대사산물로, 옥수수·밀 등에서 흔히 검출되는데, 이들은 단백질 합성 저해, 면역 억제, 발암 및 돌연변이를 유발한다[7]. 짐바브웨 조사에서 옥수수의 아플라톡신 검출률은 52%, 푸모니신은 89%로 나타났으며, 오염 옥수수 섭취 시 연간 10만 명당 9.2명의 간암 발생 위험이 추정되었다[8]. 바이러스는 숙주세포 내에서만 증식하는 병원체로, 농업 생산과 공중보건에 큰 피해를 준다. 아프리카돼지열병 바이러스(African swine fever virus, ASFV)는 2015년 유럽에서 100만 마리 이상의 돼지 폐사와 막대한 경제 손실을 초래했다[9]. 인간 노로바이러스는 급성 위장염의 주요 원인으로, 미국에서 매년 약 900명 사망, 10만 건 이상의 입원, 200만 건 이상의 외래 진료를 유발하며 연간 6억 달러의 의료비를 발생시킨다[10]. 또한 A형 간염바이러스(hepatitis A virus, HAV) 및 식물성 잔류바이러스(pepper mild mottle virus, PMMoV)도 식품 연계 감염 위험을 높인다. 그리고 기생충은 숙주로부터 영양분을 얻는 병원성 무척추동물 또는 원생동물로, *Cryptosporidium* spp., *Echinostoma* spp., *Taenia saginata* 등이 대표적이다. *Schistosoma japonicum*은 오염된 민물 접촉으로 간 손상과 염증을 일으키며, 소 촌충 감염은 연간 약 €340만의 경제 손실을 초래한다[11]. 개발도상국에서는 이들 기생충의 공중보건적 위험이 종종 간과되지만, 방치 시 농업 생산성과 지역사회 건강에 심각한 피해를 초래할 수 있다.

이러한 생물학적 오염은 식량 공급과 의료 체계 모두에 심각한 부담을 주고 있다. 대응을 위해 생물농약 활용, 재배 밀도 조절, 지능형 모니터링 시스템 구축 등이 시도되고 있으나, 비용과 기술 적합성 측면의 한계가 존재한다. 따라서 생물학적 위험의 조기 식별과 표적 대응 전략 개발이 현실적인 해결책으로 주목받고 있다. 현재 검출 기술은 전통적 방법(polymerase chain reaction[PCR], loop-mediated isothermal amplification[LAMP], enzyme-linked immunosorbent assay [ELISA], high-performance liquid chromatograph[HPLC], gas chromatography-mass spectrometry[GC-MS] 등)과 신기술(바이오센서; surface-enhanced Raman spectroscopy [SERS], clustered regularly interspaced short palindromic repeats[CRISPR] 등)로 구분된다. 실험실 기반 기법은 정확도가 높지만 장비 요구가 크다. 최근 개발된 현장형 플랫폼은 감도·특이도를 유지하면서 운영 부담을 줄인다.

본 총설은 농산물의 주요 생물학적 위험 요소와 검출 기술의 연구 동향을 체계적으로 정리하였다. 품질 관리, 운송 모니터링, 위험 평가 등 농업 생산의 핵심 영역에서 각 기술의 장단점을 비교·논의하고, 기존 기술과 신기술이 병행 발전하는 기존 표준과 현장형 신기술이 병행되는 병렬 발전 체계를

제시하였다. 결론적으로, 본 논문은 단일 기술 중심의 기존 연구를 넘어 농산물 생물학적 위험 검출 기술의 기술 통합의 구체적 로드맵과 적용 우선순위를 정리하였다.

생물학적 위험 요소 검출 기술

생물학적 위험 요소의 정확한 검출은 식품 안전 시스템 구축의 핵심이다. 최근 검출 기술은 민감도, 검출 한계, 동적 범위 등 주요 지표에서 비약적인 발전을 이루었으며, 표적 특이성과 미량 분석 능력을 향상시키는 새로운 기술이 지속적으로 개발되고 있다. CRISPR-Cas 시스템은 높은 특이성과 collateral cleavage 활성에 기반한 상온 작동형 핵산 검출 기술로 주목받고, SERS 기술은 단일분자 수준의 민감도를 가능하게 한다. 기존의 PCR, 항체 키트, 바이오센서, 질량분석 기술은 각각의 강점을 바탕으로 소형화·통합화가 이루어지며 상호보완적인 다차원 검출 네트워크를 형성한다. 이러한 기술들은 “실험실 검증 → 장비 소형화 → 현장 적용”의 흐름 속에서 농업 생물보안에 실용적이고 민감한 대응체계를 제공한다.

1. 핵산 증폭 기술

핵산 증폭 기반 진단법은 표적 DNA 또는 RNA를 증폭해 낮은 농도의 병원체도 민감하게 검출할 수 있다는 점이 핵심이다. PCR·qPCR(quantitative PCR)·dPCR(digital PCR) 계열은 열순환을 이용한 정확한 증폭과 정량이 가능하며, 식품 매트릭스에서도 높은 특이성을 유지한다. 예를 들어 qPCR은 밀에서 *Heterodera filipjevi*를, 닭고기에서 *Campylobacter*를 10^2 – 10^3 CFU/mL 수준에서 검출할 수 있었으며, 원유에서는 *B. cereus*를 200 CFU/mL까지 검출한 바 있다[12,13]. PMA(propidium monoazide)-qPCR은 비생존 세포를 배제함으로써 토마토 종자, 젖산 처리 우유 등에서 *Salmonella*, *E. coli*, *Staphylococcus aureus*의 생균만을 선택적으로 정량하는 데 활용하였다[14]. 디지털 PCR은 반응을 미세구획화해 절대정량이 가능하므로, 닭고기의 *Salmonella*를 0.001 ng/ μ L까지 검출하고, 냉동 라즈베리에서는 노로바이러스와 A형 간염 바이러스를 높은 재현성으로 정량한 사례가 보고되었다[15,16].

등온 증폭법은 열순환 장비 없이도 짧은 시간에 증폭이 가능해 현장 진단에 적합하다. RPA(recombinase polymerase amplification)는 37°C–42°C에서 작동하며, 옥수수 병원균 *Pantoea stewartii*를 0.0005 pg/ μ L 수준으로 검출한 사례, 우유에서는 IMB(immunomagnetic beads)-RPA 방식으로 *S. aureus*를 2.5×10^1 CFU/mL까지 검출한 결과가 대표적이다[17,18]. LAMP 역시 등온에서 고효율 증폭이 가능해 농산물 병원체 검출에 널리 사용되며, 딸기의 *Fusarium oxysporum*을 100 pg DNA 수준에서 검출한 사례, 감자·옥수수에서 주요 바이러스를 기존 PCR보다 10배 높은 민감도로 검출한 보고가 있다[19,20]. 또한 원유·유제품에서도 RT-LAMP(reverse transcription loop-mediated isothermal amplification) 기반 분석이 A형 간염 바이러스를 수 PFU(plaque forming unit)/반응 수준까지 검출할 정도로 높은 현장성을 보여준다[21].

핵산 기반 기법 전반은 농산물에서는 곰팡이·세균·바이러스 등 다양한 병원체를 짧은 시간에 고감도로 검출하는 데 사용되고, 유제품에서는 장내세균, *B. cereus*, *S. aureus* 등 저농도 병원성 세균 검출에 특히 효과적이다.

2. 표면 증강 라만 분광법(surface-enhanced Raman spectroscopy)

SERS는 나노구조 표면의 플라즈몬(plasmonic) 효과를 활용해 분자의 라만 신호를 수천 배 이상 증폭시키는 기술로, 기존 라만 분광법의 낮은 감도 한계를 극복하고 비파괴적·고감도·실시간 검출이 가능한 차세대 분석법이다. 빛의 산란 스펙트럼을 통해 물질의 진동 및 회전 에너지 준위를 파악함으

로써 병원균, 독소, 화학 오염물질의 정성·정량 분석에 활용된다. 주요 기질로는 AuNPs와 AgNPs가 사용되며, 기질 크기와 형태는 SERS 감도에 직접적 영향을 미친다. *Salmonella enteritidis* 검출 연구에서 60 nm은 나노구를 사용했을 때 라만 신호가 가장 강하게 나타났으며, 481 cm^{-1} 피크를 통해 *E. coli* O157:H7과 구분이 가능했다[22]. 본 기법은 1.5시간 내 4 CFU/mL의 검출한계를 보였다[23]. 또한, 휴대용 라만 분광기와 Au-TPP(gold-coated tobacco packaging paper, 담배 포장지 기반 금 코팅 기질)를 결합한 분석에서는 *S. aureus*와 *S. flexneri*를 현장에서 100% 정확도로 구별하였다. 머신러닝 기반 스펙트럼 판별 모델도 개발되어, 사과와 부패 곰팡이를 금 나노로드 기질 SERS와 PCA(principal component analysis)·인공신경망(artificial neural network, ANN)을 통해 분류한 결과 98% 이상의 정확도를 달성했다. 또한 Au/Ag 이중 셸 자성 나노입자를 활용한 하이브리드 SERS 바이오센서는 *S. aureus*, *E. coli*, *Pseudomonas aeruginosa*를 동시에 1 CFU/mL까지 검출하였다[23]. 나아가 $\text{Fe}_3\text{O}_4@Au$ 나노태그를 이용한 다중 독소 검출 SERS 면역 분석에서는 FB1·AFB1·DON을 각각 0.053, 0.028, 0.079 pg/mL 수준으로 검출하여 기존 콜로이드 금 방법보다 1,000배 이상 민감도를 향상시켰다[24]. 현장형 SERS의 대표 사례로, Au-NBPs-AAO 기질을 적용한 휴대용 라만 분광기는 땅콩에서 AFB1을 1분 내 검출(limit of detection[LOD]=0.5 $\mu\text{g/L}$)하였으며, 이는 ELISA보다 훨씬 빠른 결과를 제공했다. SERS는 비파괴적·다분자 동시 검출·높은 감도와 선택성을 갖춘 유망한 도구로 평가되지만, 형광 간섭에 따른 신호 왜곡, 복잡한 스펙트럼 해석, 그리고 농산물 내 독소 스펙트럼 데이터베이스 미비 등은 여전히 해결해야 할 과제로 남아 있다.

3. 질량 분석법

질량 분석(MS)은 재료 성분의 정성 및 정량 분석을 위한 강력한 도구이다. 식품 과학에서 MS는 성분 분석 및 식품 안전 평가에 널리 사용된다. 따라서 MS 및 관련 기술은 이제 표준 식품 수출입 검사에 중요한 도구가 되었다.

LC-MS(liquid chromatography-mass spectrometry)는 식품 내 복합 분자 조성을 정밀 분석할 수 있는 핵심 도구로, 식품 오염물질 검출, 미생물 대사 연구, 단백질체 및 대사체 분석 등 식품 안전 연구 전반에 폭넓게 활용된다. 이 기술은 바이러스·세균 감염의 생물학적 변화를 규명하는 데 유용하다. 예를 들어, 돼지의 간 삼출물에서 LC-MS 기반 단백질체 분석을 수행한 결과, E형 간염 바이러스 감염군과 비감염군 간에 554개의 차등 발현 단백질이 확인되었으며, 포도당 대사가 주요 영향 경로로 밝혀졌다[25]. 또한 비표적 LC-MS 분석을 통해 *Salmonella* 감염 돼지의 혈청 대사체 변화를 감지하여 무증상 단계에서도 감염을 조기에 예측할 수 있었다[26]. 독소 검출에도 활용되어, LC-MS/MS 시스템으로 우유에서 아플라톡신 M1과 8종의 마이크로시스틴을 정량했으며, 검출한계(limit of quantitation, LOQ)는 0.05-1 $\mu\text{g/L}$ 수준으로 높은 민감도를 보였다[27]. 또한, 해산물 내 바이오제닉 아민 생성 세균의 펩타이드 바이오마커를 LC-MS 기반 메타볼로믹스·프로테오믹스로 규명하여 병원체를 빠르게 식별할 수 있었으며, 이는 qPCR보다 신속한 대안으로 제시되었다. *S. aureus* 장독소 분석에서도 LC-MS가 면역친화 농축과 결합되어 우유 내 0.1 ng/g 수준의 극미량 독소를 정량할 수 있었으며, 각 독소별 특이 펩타이드 서열을 활용해 높은 특이성과 재현성을 확보하였다[28]. 최근에는 탈착 전기분무 이온화(desorption electrospray ionization, DESI), 실시간 직접 분석(direct analysis in real time, DART), 유전체 장벽방전 이온화(dielectric barrier discharge ionization, DBDI) 등 현장형·비파괴적 이온화 기술이 LC-MS에 접목되어 살충제·항생제 잔류물의 신속 검출을 가능하게 하고 있다. 요약하면, LC-MS는 다중 독소·대사체·단백질의 동시 분석과 높은 감도를 갖춘 식품 안전 핵심 플랫폼으로 자리 잡았으며, 현장 실시간 분석 기술과 결합해 식품 내 생물학적 위험 요인 감시의 효율성과 신뢰성을 크게 향상시키고 있다.

다음으로, GC-MS는 시료의 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOC)을 분리·

동정하여 병원체 감염을 간접적으로 진단하는 데 활용되는 분석 기술로, GC의 높은 분리능과 MS의 감도를 결합해 정성·정량 분석이 모두 가능하다. 고체상 미세추출(solid phase micro extraction, SPME)을 접목하면 용매 없이 VOC를 효율적으로 농축·검출할 수 있다. SPME-GC-MS를 이용해 잎채소에서 *E. coli* O157:H7 감염 시 특이적으로 증가하는 인돌, 벤질알코올, 2-메톡시페놀 등을 검출하였으며, 이는 병원균 감염의 대사 지표로 활용 가능하였다[29]. 헤드스페이스 SPME-GC-MS를 적용한 감자 실험에서는 저장 중 병원성 세균 감염이 VOC 패턴에 뚜렷한 변화를 유발하며, PCA·군집분석을 통해 병원균의 오염 특성을 구분할 수 있었다. 또한, *Lecanicillium fungicola*에 감염된 버섯에서 β -barbatene과 미확인 디테르펜이 주요 VOC로 확인되어 조기 감염 탐지 지표로 제시되었다[30]. *Pectobacterium carotovorum*, *Aspergillus flavus*, *A. niger*가 오염된 감자에서는 1-부탄올, 헥산올, 헥사데칸 등 종 특이적 VOC가 확인되었으며, 부분 최소제곱 판별분석(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)이 감염 분류에 높은 정확도(R^2 96%-99%)를 보였다[31]. 기타 응용으로, 중국 차 219종에서 GC-MS와 HPLC-DAD를 병행해 파툴린을 고감도로 검출했으며(회수율 90%-102%), 포도에서 *Botrytis cinerea* 감염을 감지하기 위해 열탈착-GC-MS와 ZIF-8 흡착체를 이용한 현장형 분석이 제안되었다[32]. 감염 포도에서는 1-옥탄-3-온, 3-옥타논 등 특이 VOC가 검출되어 병원균 감염을 신속히 구별할 수 있었다. 결론적으로 GC-MS는 다중 병원체와 마이코톡신을 동시에 고감도로 검출할 수 있는 강력한 분석 도구로, 식품 안전 및 품질 관리에 필수적이다. 다만, 비휘발성 물질 분석에는 유도체화가 필요하고, 시료 전처리 및 숙련된 조작이 요구된다는 점이 한계로 지적된다.

그리고, MALDI-TOF-MS(matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry)는 박테리아 단백질 조성을 기반으로 한 질량 지문을 분석해 미생물을 신속하게 식별하는 고효율 질량분석 기술이다. 시료의 단백질을 매트릭스로 이온화한 뒤 비행시간을 측정하여 질량 스펙트럼을 생성하고, 이를 표준 데이터베이스와 비교해 균종을 동정한다. 이 기술은 *L. monocytogenes* 혈청형의 특이 이온 83개를 분석해 6개 군으로 분류함으로써, 1/2a·1/2b·1/2c·4b형을 빠르고 정확하게 식별할 수 있음을 입증했다[33]. 또한 MALDI-TOF-MS와 마이크로칩을 결합한 시스템에서는 IgG 기능화 자성 비드로 식육 내 병원균을 농축한 후 분석해 6.7×10^2 CFU/mL(또는 57.8 fg/ μ L DNA)의 검출 한계를 달성했으며, 소혈청 알부민 코팅을 통해 비특이적 흡착을 억제하여 신뢰도를 높였다[34]. 냉장 조건에서 생존 가능한 왁스 생성 *B. cereus* 군도 MALDI-TOF-MS 리보솜 단백질 분석으로 구분할 수 있었다[35]. 균주 간 평균 뉴클레오타이드 동일성(average nucleotide identity, ANI) 값과 질량 스펙트럼 비교를 통해 종 수준의 정밀 분류가 가능했으며, 각 종은 고유한 m/z 바이오마커 패턴을 보였다. 결과적으로 MALDI-TOF-MS는 박테리아·곰팡이·바이러스 등 다양한 미생물의 신속 동정에 적합하며, 의료 진단, 식품 안전, 환경 모니터링, 생물방어 등에서 기존 생화학적 동정법의 이상적인 대안으로 자리 잡고 있다.

4. 면역학적 분석 기술

면역학적 검출법은 항원-항체 특이적 결합을 기반으로 하며, ELISA·TRFIA(time-resolved fluorescence immunoassay)·GICA(gold immunochromatographic assay) 등이 대표적이다. 이들 기법은 비교적 단순한 장비와 안정적인 시약 체계를 가진 덕분에 식품 안전 분야에서 가장 널리 사용된다.

ELISA는 효소 기반 신호증폭을 이용해 농산물에서는 곰팡이독소와 식물 바이러스, 유제품에서는 세균·바이러스 감염 지표를 정량하는 데 적용된다. 예를 들어 경쟁적 ELISA는 옥수수과 사료에서 AFB1을 각각 6.6 ng/kg, 5.5 ng/kg 수준까지 검출하였고, 젖소 우유에서는 항원특이 IgG 농도 차이를 통해 감염 여부를 고정확도로 판별하였다[36,37]. 농산물에서는 다중 항원을 활용한 ELISA를 통해 ASFV·PCV·AFB1 등을 고특이성으로 검출한 사례가 다수 보고되었다[38,39].

TRFIA는 긴 수명의 란타넘족 형광체를 사용해 낮은 배경 신호와 넓은 정량 범위를 확보할 수 있는 고감도 기술이다. 농산물에서는 옥수수 DON·ZEN을 수십 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 수준에서 신속하게 정량한 사례가 있으며, 유제품에서는 유로폼 기반 나노복합체를 이용해 우유 내 *S. aureus*를 2 CFU/mL까지 검출했다는 보고가 있다[40-42]. 이러한 고감도는 복잡한 유제품 매트릭스에서도 높은 신뢰도로 병원체를 모니터링할 수 있게 한다.

GICA는 금 나노입자를 기반으로 한 현장형 면역크로마토그래피 기법으로, 10-15분 이내 판독이 가능해 신속성에 강점이 있다. 농산물에서는 밀·옥수수에서 FB1·DON·ZEN을 6-60 ng/mL 수준에서 동시에 검출하는 기술이 개발되었으며, 유제품 분야에서도 PCV2(porcine circovirus type 2)·PDCoV(porcine deltacoronavirus) 등 다양한 바이러스 항체/항원을 현장에서 판독할 수 있는 면역스트립이 보고된 바 있다[43]. 이러한 면역측정법은 농산물의 독소·병원체 모니터링과 유제품의 감염성 질환 진단 모두에서 적용성이 높다.

5. 바이오센서 기술

바이오센서는 항체·압타머·파지 등 생체 인식 요소를 이용하여 표적 결합을 전기화학적·광학적 신호로 변환하는 기술이다. 신속성·현장성·고감도 측면에서 최근 식품 안전 분야에서 사용이 빠르게 확산되고 있다.

전기화학 바이오센서는 전극 표면의 전하 이동 변화나 전류 차이를 측정해 병원체를 검출한다. 농산물에서는 AuNP·CNT·WO₃ 나노복합체를 활용해 *E. coli*를 3 CFU/mL까지 검출한 사례, 또는 파지 기반 센서를 이용해 *Campylobacter jejuni*를 식품 시료에서 10² CFU/mL까지 검출한 사례가 있다[44]. 유제품에서는 MXene-파지 융합 센서가 생존 *Salmonella*만을 5 CFU/mL 수준에서 분별해 검출할 수 있는 등, 기존 면역검사보다 높은 민감도를 제공한다[45].

비색 센서는 금속 나노입자의 색 변화로 육안 판독이 가능하며, 간편성과 현장성이 뛰어나다. 농산물에서는 밀가루에서 *E. coli O157:H7* DNA를 30분 내 검출한 사례가 대표적이고(LOD 2.5 ng/ μL), 과일 주스에서는 롤링서클증폭과 결합한 비색법으로 3.3 \times 10³ CFU/mL까지 정량한 바 있다. 유제품에서는 CuSe-압타머 복합체를 이용해 우유 내 *E. coli*를 10³ CFU/mL에서 검출한 연구가 보고되었고, 원심분리 기반 비동력 센서는 *S. typhimurium*을 21 CFU/mL까지 검출하였다[46,47].

압타머 기반 센서는 높은 특이성과 안정성을 갖는 핵산 인식자를 기반으로 하며, 농산물에서는 옥수수 내 FB1을 14.4 ng/mL에서 검출한 형광센서가 대표적이다[48]. 유제품에서는 *S. typhimurium*을 6 CFU/mL까지 검출한 IMB-HCR-SERS 시스템, 또는 *L. monocytogenes*를 20-30 CFU/mL 범위에서 검출하는 금 나노입자 기반 센서 등이 보고되었다[48,49]. 이러한 바이오센서는 고감도·신속성을 갖추고 있어 실시간 식품 안전 모니터링 플랫폼으로의 발전 가능성이 크다.

6. CRISPR(clustered regularly interspaced short palindromic repeats)/Cas 시스템

CRISPR/Cas 시스템은 높은 특이성과 민감도를 가진 차세대 분자 진단 기술로, 병원성 미생물 검출 분야에서 빠르게 발전하고 있다. DNA 또는 RNA 절단 효소를 가진 Cas9(II형), Cas12(V형), Cas13(VI형) 단백질이 주로 활용된다. Cas13a는 표적 RNA를 인식하면 주변 RNA를 무차별적으로 절단하는 '측쇄 절단' 특성을 가진다. *Salmonella* 검출을 위해 CRISPR-Cas13a를 RPA와 결합한 시스템이 개발되었으며, 10 pM의 낮은 검출한계를 보였다. 단일 튜브 방식은 신속성(20분)에서, 2단계 방식은 저농도 검출(100 copies/ μL)에 유리하였다[50]. Cas12a는 이중가닥 DNA를 절단하며, 이를 활용한 전기화학 바이오센서는 *S. aureus*를 3 CFU/mL 수준에서 검출했다. 또한, 항체-코팅 자기비드를 이용한 IMBs-RPA-CRISPR/Cas12a 시스템은 *Shigella flexneri*를 70분 이내, 5 CFU/mL 감도로 검출해 육안 판별이 가능했다[51]. LAMP와 RPA를 결합한 다중 CRISPR/Cas12a

플랫폼은 형광 및 면역크로마토그래피 검출 방식으로 *S. aureus*를 67 CFU/mL까지 감지했으며, 증폭 없이 SERS와 연계한 CRISPR-Cas12a 바이오센서는 *S. typhimurium*을 110 CFU/mL에서 검출했다[52]. 또한, 손가락 작동형 미세유체 칩 기반의 원포트 CRISPR/Cas12a 시스템은 7종의 병원균을 62분 내 검출하였고 LOD는 500 CFU/mL 미만으로 보고되었다. 최근에는 혼성화 연쇄반응(HCR)과 CRISPR/Cas12a를 결합한 초고감도 자기 이완 스위치 센서가 개발되어, *S. typhimurium*을 77 CFU/mL까지 검출하고 10^2 - 10^8 CFU/mL 범위의 선형성을 확보하였다[53]. 요약하면, CRISPR/Cas 기술은 높은 특이성과 빠른 검출 속도, 현장 적용성을 모두 갖춘 차세대 분자 진단 플랫폼으로, RPA·LAMP·SERS 등과의 융합을 통해 식품 내 병원균 검출의 민감도와 신뢰성을 크게 향상시키고 있다.

7. 다른 가능한 방법

식품 내 병원균 검출을 위한 최신 기술로, 세포 수준 분석, 유전체 기반 접근, 그리고 인공지능 보조 진단이 결합된 다양한 방법이 개발되고 있다. 우선, *B. cereus*를 신속·정확하게 정량하기 위해 세포 생존 염색(PMA), 형광 현장 교잡법(fluorescence in situ hybridization, FISH), 유세포 분석(flow cytometry)을 통합한 복합 분석법이 제시되었다. 16S rDNA 표적 프로브(pB394)를 이용하여 *B. cereus*를 다른 *Bacillus* 종과 구별하였으며, 1.5시간 내에 10^2 - 10^7 cells/g 범위에서 선형성을 확보하고 회수율은 96.3%-97.7%로 나타났다. 또한, 전장 유전체 시퀀싱(whole genome sequencing, WGS)은 저농도 바이러스 검출에 효과적인 방법으로 평가된다. 단일 프라이머 등은 증폭(single primer isothermal amplification, SPIA)과 서열 독립 단일 프라이머 증폭(sequence-independent single-primer amplification, SISPA)을 비교한 결과, 냉동 라즈베리 시료의 노로바이러스 RNA 검출에서 SPIA-WGS(whole genome sequencing)가 더 우수한 민감도를 보였다[54]. WGS는 RT-qPCR이 검출하지 못한 장거리 유전체 서열을 확보할 수 있어, 낮은 바이러스 농도 샘플에서도 감염 신호를 포착할 수 있었다. 마지막으로, 머신 비전 기반 바이오센서는 인공지능 영상 분석과 분자 진단 기술을 융합한 새로운 접근법으로 주목받고 있다. *S. typhimurium* 검출을 위해 *Clostridium butyricum* 유래 Argonaute 단백질(CbAgo)을 이용한 형광 바이오센서가 개발되었으며, DNA 절단 반응을 통해 형광 신호를 생성하고 머신 비전으로 영상 데이터를 자동 판독하였다. 닭 시료에서 LOD는 40.5 CFU/mL, 검출 범위는 50 - 10^7 CFU/mL로 확인되어 고감도·비증폭 검출이 가능했다[55]. 요약하면, PMA-FISH-유세포 분석, SPIA-WGS, 그리고 머신 비전 기반 CbAgo 센서와 같은 기술은 기존 분자진단의 한계를 극복하며, 고속·정확·비파괴적인 식품 병원균 검출 플랫폼으로 발전하고 있다.

최근 농업 생물보안 분야에서는 인공지능(artificial intelligence, AI)·머신러닝 알고리즘과 분광·이미징·바이오센서 기술을 결합한 지능형 모니터링 플랫폼이 빠르게 확산되고 있다. 예를 들어, 하이퍼스펙트럴 이미징(hyperspectral imaging, HSI)과 머신러닝을 통합하여 곡류 및 견과류의 미코톡신 오염을 비파괴적으로 예측·분류하는 연구들이 다수 보고되었으며, 곡류의 곰팡이 오염 수준을 정량적으로 분류하고 오염도를 등급화하는 모델이 90% 이상 분류 정확도를 달성한 바 있다[56,57]. 또한 HSI-딥러닝 결합 모델을 통해 조기 발현 단계의 식물 병해와 증자 매개 병원체를 전통적 육안 판독 이전 시점에 탐지하는 사례도 보고되었으며, 이는 농산물 생산 단계에서의 선제적 병해 관리와 생물보안 강화를 가능하게 한다[58,59]. 표면증강 라만 분광(SERS) 및 라만 센서 분야에서도 딥러닝·머신러닝 기반 스펙트럼 분석이 도입되어, 실시간 파이버 광섬유 라만 센서를 이용한 식중독균 신속 검출과, 다양한 세균·환경 오염물질을 동시 판독하는 ML-보조 SERS 플랫폼이 제안되고 있다[60-62]. 이러한 AI 기반 분석 모델은 대량의 센서 데이터를 자동으로 해석하여 오염 가능성을 예측함으로써, 기존 실험실 기반 진단을 보완하는 실시간·예측형 농업 생물보안 시스템 구축에 핵심 역할을 할 것으로 전망된다[60,63].

유제품 및 낙농 분야에서의 활용과 시사점

유제품은 고수분·고영양 특성으로 인해 세균 및 바이러스 증식에 취약하며, 원유 집하-저온유통-가공-보관 전 과정에서 *Campylobacter*, *S. aureus*, *B. cereus*, 장내세균군 등 다양한 병원체에 의한 오염 가능성이 존재한다. 또한 아플라톡신 M1, 장독소, 바이러스 감염 지표 등도 안전성 관리의 핵심 요소로 알려져 있어, 앞서 소개한 검출 기술들은 낙농 분야에서도 높은 적용성을 가진다.

핵산 기반 기술(qPCR, PMA-qPCR, dPCR, LAMP/RPA 등)은 원유·치즈·분유의 저농도 병원균 검출에 특히 유용하다. 예를 들어 qPCR을 이용한 *B. cereus* 정량은 200 CFU/mL 수준까지 감도가 확보되었고, IMB-RPA는 우유에서 *S. aureus*를 수십 CFU/mL까지 검출해 대규모 낙농장 현장 모니터링에도 적용 가능하다. RT-LAMP는 A형 간염바이러스 등 유제품 매트릭스에서의 바이러스 검출에도 강점을 보여, 수입 냉동제품 및 가공 우유의 바이러스 오염 감시에 유용한 도구로 평가된다.

면역학적 분석법(ELISA, TRFIA, GICA)은 낙농 산업에서 이미 널리 활용되고 있으며, 항생제 잔류 모니터링, *S. aureus* 감염 우균의 선별, AFB1·AFM1과 같은 독소 검출 등에서 강점을 갖는다. 특히 TRFIA 기반 분석은 우유 내 병원균을 2 CFU/mL 수준까지 검출한 사례가 있어, 대형 집유장 또는 유가공 공정의 고감도 모니터링 체계 구축에 적합하다.

질량분석(MALDI-TOF-MS, LC-MS/MS)은 유제품 품질 평가와 미생물학적 안전성 진단의 핵심 기반으로 자리 잡고 있다. MALDI-TOF는 *L. monocytogenes* 혈청형 구분, 냉장 조건에서의 *B. cereus* 군 분류 등 원유 및 가공 환경의 미생물 모니터링에 활용되며, LC-MS/MS는 AFM1·microcystin 등 독소의 초고감도 정량을 가능하게 한다. 최근의 면역-LC-MS/MS 결합기술은 치즈·우유 내 *S. aureus* 장독소를 ng/g 수준으로 정량할 수 있어, 기존 면역검사 대비 신뢰도와 속도가 크게 향상되었다.

바이오센서(전기화학, 압타머, 비색 기반)는 단시간·현장형 분석이 가능해 목장 단계의 실시간 세균 검출, 유통 중 오염 탐지, 유업체의 자동화 품질관리 시스템과의 통합 가능성이 높다. MXene-파지 센서의 *Salmonella* 검출(LOD 5 CFU/mL), 압타머 기반 SERS 시스템의 *S. typhimurium* 검출 등은 원유 유통망에서의 고감도 현장 모니터링에 적합한 사례로 평가된다.

CRISPR/Cas 기반 진단은 낙농 현장에서의 초신속·고특이성 병원균 검출 플랫폼으로 부상하고 있다. Cas12a 기반 전기화학 바이오센서 및 IMB-RPA-CRISPR 시스템은 *S. aureus*, *Shigella*, *Salmonella* 등이 유제품 매트릭스에서 수 CFU/mL 수준으로 검출되었으며, 스마트폰 판독형 기술과 결합될 경우 낙농 공정의 디지털 품질관리 시스템 구축에 기여할 수 있다.

종합적으로, 본 총설에서 제시된 최신 생물학적 위해요소 검출 기술들은 국내외 낙농 산업의 자동화·고도화된 식품 안전관리 시스템(hazard analysis and critical control point[HACCP], FSSC22000, ISO 22000) 구축에 직접적으로 기여할 수 있다. 원유 생산 단계에서의 실시간 병원균 감시, 가공 공정 내 교차오염 조기 탐지, 수입 유제품의 감염성 바이러스 및 독소 검증 등 다양한 영역에서 활용도가 크며, 향후 AI 기반 판독·미세유체칩 자동화·모바일 연계 기술 발전을 통해 “스마트 낙농(smart dairy safety)” 플랫폼의 핵심 구성 요소로 자리 잡을 것으로 기대된다.

결론

바이러스, 세균, 기생충 등 생물학적 위협은 인류 역사 전반에 걸쳐 지속적인 위협 요인으로 작용해 왔으며, 최근에는 식품 및 환경 안전의 주요 문제로 부상하고 있다. 검출 기술의 발전은 이러한 위협에 대응하는 핵심이지만, 높은 정밀도·신속성·경제성·현장 적용성 간의 균형이라는 구조적 한계를 안고 있다. 생물학적 위협 검출 기술은 “높은 민감도”와 “낮은 운용 편의성”이라는 모순에 직면해 있다. 정밀한 실험실 기기는 열·습도와 먼지가 많은 농업 현장에서 안정적으로 사용하기 어렵고, CRISPR-Cas 기반 신속 진단은 냉장 유통이 필요해 실용성이 떨어진다. 또한, 농산물은 여러 병원체

에 의한 복합 감염이 흔하고, 매트릭스 간섭으로 위음성이 발생할 가능성이 높아 단일 검출 기술의 한계를 드러낸다. 반면, 다중 검출 시스템은 높은 비용과 복잡한 운용을 요구하여 “고감도·저비용” 간의 균형을 찾는 것이 핵심 과제로 남아 있다. 검출 과정에는 장비, 작업자, 시료 품질 등의 다양한 요인이 오류를 유발할 수 있다. 이를 최소화하기 위해 표준화된 샘플링, 보존 절차와 인증 표준물질 기반의 교정이 필요하다. 그러나 빠르게 확산되는 분자진단 및 바이오센서 기술은 아직 통합 표준이 마련되지 않아 기관 간 결과 비교가 어렵다. 민감도와 비용, 보편성을 고려한 국제적 검정 표준 수립이 시급하다. 그리고 미래의 검출 기술은 자동화, 인공지능, 미세유체 칩 기반 통합으로 진화하고 있다. 딥러닝 기반 데이터 분석은 멀티플렉스 PCR의 정확도를 높이고, CRISPR와 결합된 미세유체 시스템은 스마트폰 수준의 소형화와 pg 단위 감도를 실현했다. 또한, 비색 카드 판독을 자동화하는 CMOS 이미지 센서·AI 알고리즘의 결합은 현장 실시간 데이터 전송을 가능하게 한다. 다만, 고비용 문제를 해결하기 위해 “기초 검사-정밀 검증”의 단계적 운영체제와 정책적 지원이 병행되어야 한다. 결국 생물학적 위해요인 검출 기술은 실험실 중심을 넘어 현장과 사회 전반으로 확장되고 있다. 향후 발전은 나노소재·AI 혁신뿐 아니라 표준 체계, 산업 모델, 글로벌 협력의 조화 속에서 이루어질 것이다. 이러한 통합적 접근은 병원체-숙주-환경 간 상호작용에 대한 이해를 심화시키며, 실제 농업·식품 현장의 실용적 대응 기술로 이어질 것으로 전망된다.

특히 하이퍼스펙트럴 이미징, 라만/레이저 분광, 전기화학 바이오센서에서 생성되는 대규모 신호 데이터를 AI·머신러닝으로 해석하는 연구는, 미코톡신·식중독균·식물병원체를 “조기·비파괴·고속”으로 탐지하는 차세대 농업 생물보안 체계의 핵심 축으로 부상하고 있다. 향후에는 이러한 AI 기반 플랫폼을 스마트팜 IoT 센서, 자동 샘플링 로봇, 클라우드 기반 위험 예측 시스템과 통합함으로써, 농산물 생산·가공·유통 전 단계에서 위해요소 조기 경보 및 의사결정 지원을 제공하는 통합형 농업 생물보안 네트워크가 구축될 것으로 기대된다.

요 약

농산물은 인류의 생존과 사회경제적 발전에 필수적인 자원으로, 그 안전성 확보는 식량 안보와 공중보건의 핵심 과제이다. 그러나 농산물은 파종, 재배, 수확, 저장, 운송 및 유통 전 과정에서 세균, 곰팡이, 바이러스, 기생충 등 다양한 생물학적 위해 요인에 노출되며, 이들 병원체는 식품 매개 감염, 독소 생성 및 교차 오염을 통해 인체 건강뿐 아니라 농업 생산성에도 심각한 피해를 초래할 수 있다. 따라서 신속하고 정확한 생물학적 위해 요인 검출 및 모니터링 체계의 구축은 식품 안전성과 전염병 예방을 위한 필수 조건이다. 본 총설에서는 농업 생산 환경에서 발생 가능한 주요 생물학적 위해 요인의 특성과 그 감염·오염 메커니즘을 종합적으로 분석하였다. 또한, 핵산 기반 등은 증폭(RPA, LAMP), 면역 분석(ELISA, GICA, TRFIA), 바이오센서(비색, 압타머, 전기화학), 질량분석(MALDI-TOF, GC-MS, LC-MS), 표면증강라만분광(SERS), 그리고 최신 CRISPR/Cas 기반 진단 기술에 이르기까지 다양한 첨단 검출 방법의 원리와 발전 현황을 체계적으로 정리하였다. 각 기술의 민감도, 특이도, 분석 시간, 장비 의존성, 다중 검출 가능성 등 핵심 성능 지표를 비교·평가하였으며, 복잡한 농산물 매트릭스 내에서의 실제 적용성을 중심으로 기술 간 상호 보완 가능성을 논의하였다. 나아가, 이러한 기술 발전이 직면한 구조적 과제—예를 들어, 고정밀도와 현장 적용성 간의 불균형, 복합 감염 시료의 간섭 문제, 표준화 미비에 따른 결과 신뢰성 저하—를 분석하고, 인공지능(AI), 미세유체 칩, 자동화 로봇틱스, 나노소재 공학의 융합을 통한 차세대 통합 플랫폼의 발전 방향을 제시하였다. 본 총설은 농업 및 식품 생산 현장에서의 생물학적 위해요인 검출 기술의 과학적 이해를 심화시키고, 고감도·고효율·현장형 분석 기술의 실용화 연구를 촉진하기 위한 기초 자료로서 활용될 수 있을 것이다. 나아가 본 연구는 농업 생물보안 강화, 식품 안전 정책 수립, 감염병 예방 시스템 구축 등 다양한 분야에서 기술적·학문적 기반을 제공할 것으로 기대된다.

Conflict of Interest

The authors declare no potential conflict of interest.

감사의 글

본 연구는 중소기업기술정보진흥원(TIPA, Korea)이 지원하는 산학연 콜라보 R&D 사업(과제번호: RS-2025-02316930)의 지원을 받아 수행되었습니다. 본 결과물은 또한 2025년도 교육부 및 강원특별자치도의 재원으로 강원RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2025-RISE-10-002).

References

1. Liu Y, Liu K, Liu Y. Technologies for detecting biological risk factors in agricultural products and their applications. *Curr Res Food Sci.* 2025;10:101068.
2. Winder N, Gohar S, Muthana M. Norovirus: an overview of virology and preventative measures. *Viruses.* 2022;14:2811.
3. European Food Safety Authority, European Centre for Disease Prevention and Control. The European Union One Health 2020 zoonoses report. *EFSA J.* 2021;19:e06971.
4. Havelaar AH, Kirk MD, Torgerson PR, Gibb HJ, Hald T, Lake RJ, et al. World Health Organization global estimates and regional comparisons of the burden of foodborne disease in 2010. *PLOS Med.* 2015;12:e1001923.
5. Frank C, Werber D, Cramer JP, Askar M, Faber M, an der Heiden M, et al. Epidemic profile of shiga-toxin-producing *Escherichia coli* O104:H4 outbreak in Germany. *N Engl J Med.* 2011;365:1771-1780.
6. European Food Safety Authority, European Centre for Disease Prevention and Control. The European Union summary report on trends and sources of zoonoses, zoonotic agents and food-borne outbreaks in 2016. *EFSA J.* 2017;15:e05077.
7. Guo Z, Zhang J, Wang H, Li S, Shao X, Xia L, et al. Advancing detection of fungal and mycotoxins contamination in grains and oilseeds: hyperspectral imaging for enhanced food safety. *Food Chem.* 2025;470:142689.
8. Akello J, Ortega-Beltran A, Katati B, Atehnkeng J, Augusto J, Mwila CM, et al. Prevalence of aflatoxin- and fumonisin-producing fungi associated with cereal crops grown in Zimbabwe and their associated risks in a climate change scenario. *Foods.* 2021;10:287.
9. Gaudreault NN, Madden DW, Wilson WC, Trujillo JD, Richt JA. African swine fever virus: an emerging DNA arbovirus. *Front Vet Sci.* 2020;7:215.
10. Burke RM, Mattison CP, Pindyck T, Dahl RM, Rudd J, Bi D, et al. Burden of norovirus in the United States, as estimated based on administrative data: updates for medically attended illness and mortality, 2001-2015. *Clin Infect Dis.* 2021;73:e1-8.
11. Jansen F, Dorny P, Trevisan C, Dermauw V, Laranjo-González M, Allepuz A, et al.

- Economic impact of bovine cysticercosis and taeniosis caused by *Taenia saginata* in Belgium. *Parasit Vectors*. 2018;11:241.
12. Jian J, Huang W, Kong L, Jian H, Abdulsalam S, Peng D, et al. Molecular diagnosis and direct quantification of cereal cyst nematode (*Heterodera filipjevi*) from field soil using TaqMan real-time PCR. *J Integr Agric*. 2023;22:2591-2601.
 13. Liang L, Wang P, Qu T, Zhao X, Ge Y, Chen Y. Detection and quantification of *Bacillus cereus* and its spores in raw milk by qPCR, and distinguish *Bacillus cereus* from other bacteria of the genus *Bacillus*. *Food Qual Saf*. 2022;6:fyab035.
 14. Liang T, Long H, Zhan Z, Zhu Y, Kuang P, Mo N, et al. Simultaneous detection of viable *Salmonella* spp., *Escherichia coli*, and *Staphylococcus aureus* in bird's nest, donkey-hide gelatin, and wolfberry using PMA with multiplex real-time quantitative PCR. *Food Sci Nutr*. 2022;10:3165-3174.
 15. Velez FJ, Kandula N, Blech-Hermoni Y, Jackson CR, Bosilevac JM, Singh P. Digital PCR assay for the specific detection and estimation of *Salmonella* contamination levels in poultry rinse. *Curr Res Food Sci*. 2024;9:100807.
 16. Larocque É, Lévesque V, Lambert D. Crystal digital RT-PCR for the detection and quantification of norovirus and hepatitis A virus RNA in frozen raspberries. *Int J Food Microbiol*. 2022;380:109884.
 17. Cai L, Tian Q, Meng Q, Bao X, Xu P, Liu J, et al. Recombinase polymerase amplification assay for rapid field diagnosis of Stewart's wilt of corn pathogen *Pantoea stewartii* subsp. *stewartii*. *Agriculture*. 2023;13:1982.
 18. Cheng R, Li L, Zhen S, Liu H, Wu Z, Wang Y, et al. Rapid detection of *Staphylococcus aureus* in milk and pork via immunomagnetic separation and recombinase polymerase amplification. *Microbiol Spectr*. 2023;11:e02249-22.
 19. Katoh H, Yamazaki S, Fukuda T, Sonoda S, Nishigawa H, Natsuaki T. Detection of *Fusarium oxysporum* f. sp. *fragariae* by using loop-mediated isothermal amplification. *Plant Dis*. 2021;105:1072-1079.
 20. Storms SM, Shisler J, Nguyen TH, Zuckermann FA, Lowe JF. RT-LAMP as diagnostic tool for influenza: a virus detection in swine. *Vet Sci*. 2023;10:220.
 21. Wu R, Meng B, Corredig M, Griffiths MW. Rapid detection of hepatitis A virus in foods using a bioluminescent assay in real-time (BART) and reverse transcription loop-mediated isothermal amplification (RT-LAMP) technology. *Food Environ Virol*. 2023;15:144-157.
 22. Chuesiang P, Ryu V, Siripatrawan U, McLandsborough L, He L. Investigation of factors that impact the label-free surface-enhanced Raman scattering (SERS) for the detection and discrimination of *Salmonella* Enteritidis. *LWT-Food Sci Technol*. 2021;150:111962.
 23. Mi F, Guan M, Wang Y, Chen G, Geng P, Hu C. Integration of three non-interfering SERS probes combined with ConA-functionalized magnetic nanoparticles for extraction and detection of multiple foodborne pathogens. *Microchim Acta*. 2023;190:103.
 24. Chen R, Wu J, Wang H, Nisar MS, Li Y, Chen Y, et al. Fe₃O₄@Au magnetic SERS nanotags-based vertical flow immunoassay for simultaneous detection of fumonisin

- B1, aflatoxin B1 and deoxynivalenol. *Anal Chim Acta*. 2025;1348:343837.
25. Martino C, Di Luca A, Bennato F, Ianni A, Passamonti F, Rampacci E, et al. Label-free quantitative analysis of pig liver proteome after hepatitis E virus infection. *Viruses*. 2024;16:408.
 26. Larivière-Gauthier G, Kerouanton A, Mompelat S, Bougeard S, Denis M, Fravallo P. Monophasic variant of *Salmonella typhimurium* infection affects the serum metabolome in swine. *Microorganisms*. 2023;11:2565.
 27. Van Camp C, van Hassel WHR, Abdallah MF, Masquelier J. Simultaneous detection and quantification of aflatoxin M1, eight microcystin congeners and nodularin in dairy milk by LC-MS/MS. *Chemosensors*. 2023;11:511.
 28. Lefebvre D, Blanco-Valle K, Feraudet-Tarisse C, Merda D, Simon S, Fenaille F, et al. Quantitative determination of *Staphylococcus aureus* enterotoxins types A to I and variants in dairy food products by multiplex immuno-LC-MS/MS. *J Agric Food Chem*. 2021;69:2603-2610.
 29. Sousa M, Mulaosmanovic E, Erdei AL, Bengtsson M, Witzgall P, Alsanian BW. Volatilomes reveal specific signatures for contamination of leafy vegetables with *Escherichia coli* O157:H7. *Food Control*. 2023;146:109513.
 30. Hayes W, Keenan C, Wilson J, Onarinde BA. Early detection of dry bubble disease in *Agaricus bisporus* using volatile compounds. *Food Chem*. 2024;435:137518.
 31. Kate A, Tiwari S, Gujar JP, Modhera B, Tripathi MK, Ray H, et al. Spotting of volatile signatures through GC-MS analysis of bacterial and fungal infections in stored potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Foods*. 2023;12:2083.
 32. Jiang L, Dumlao MC, Donald WA, Steel CC, Schmidtke LM. Rapid in-field volatile sampling for detection of *Botrytis cinerea* infection in wine grapes. *Molecules*. 2023;28:5227.
 33. Abdelhamed H, Nho SW, Kim SW, Reddy JS, Park SB, Jung TS, et al. Serotype-identifying ions in *Listeria monocytogenes* using matrix-associated laser desorption ionization-time of flight mass spectrometry. *Heliyon*. 2022;8:e11769.
 34. Chai Z, Soko WC, Xie J, Bi H. Microchip coupled with MALDI-TOF MS for the investigation of bacterial contamination of fish muscle products. *Food Chem*. 2022;396:133658.
 35. Takahashi N, Nagai S, Tomimatsu Y, Saito A, Kaneta N, Tsujimoto Y, et al. Simultaneous discrimination of cereulide-producing *Bacillus cereus* and psychrotolerant *B. cereus* group by matrix-assisted laser desorption ionization-time-of-flight mass spectrometry. *J Food Prot*. 2022;85:1192-1202.
 36. Han S, Yang Y, Chen T, Yang B, Ding M, Wen H, et al. Quantitative determination of aflatoxin B₁ in maize and feed by ELISA and time-resolved fluorescent immunoassay based on monoclonal antibodies. *Foods*. 2024;13:319.
 37. Yang DA, Laven RA. Performance of the StaphGold ELISA test in determining subclinical *Staphylococcus aureus* infections in dairy cows using a Gaussian mixture model. *Vet Med Sci*. 2022;8:1632-1639.
 38. Dong N, Wang Z, Sun Q, Chen X, Zhang H, Zheng J, et al. Establishment and

- application of an indirect ELISA for the detection of antibodies to porcine *Streptococcus suis* based on a recombinant GMD protein. *Animals*. 2023;13:719.
39. Chen Z, Hu X, Wu X, Li Y, Ding Z, Zeng Q, et al. Development and primary application of an indirect ELISA based on rep protein to analyze antibodies against porcine coxsackievirus-like virus (PCLV). *Viruses*. 2022;14:1398.
 40. Wang J, Wang L, Zhang H, Mei X, Qiu L, Liu J, et al. Development of a time-resolved immunochromatographic strip for rapid and quantitative determination of deoxynivalenol. *Front Vet Sci*. 2023;10:1142820.
 41. Sun J, Wang L, Shao J, Yang D, Fu X, Sun X. One-step time-resolved fluorescence microsphere immunochromatographic test strip for quantitative and simultaneous detection of DON and ZEN. *Anal Bioanal Chem*. 2021;413:6489-6502.
 42. Chen C, Lai H, Liang H, He Y, Guo G, Li L. A new method for detection African swine fever virus: time-resolved fluorescence immunoassay. *J Fluoresc*. 2021;31:1291-1296.
 43. Wan Y, Shi Z, Peng G, Wang L, Luo J, Ru Y, et al. Development and application of a colloidal-gold dual immunochromatography strip for detecting African swine fever virus antibodies. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2022;106:799-810.
 44. Liu D, Lv X, Zhao C, Li J, Huang J, Weng L, et al. NaBiF₄ upconversion nanoparticle-based electrochemiluminescent biosensor for *E. coli* O157:H7 detection. *RSC Adv*. 2022;12:30174-80.
 45. Zamzami M, Ahmad A, Alamoudi S, Choudhry H, Hosawi S, Rabbani G, et al. A highly sensitive and specific gold electrode-based electrochemical immunosensor for rapid on-site detection of *Salmonella enterica*. *Microchem J*. 2024;199:110190.
 46. Guo Y, Zhao J, Ma X, Cai M, Liu S, Sun C, et al. A colorimetric biosensor with infrared sterilization based on CuSe nanoparticles for the detection of *E. coli* O157:H7 in food samples. *Microbiol Spectr*. 2024;12:e03978-23.
 47. Wang Y, Wang Z, Zhan Z, Yan L, Wang L, Xu H. Sensitive detection of *Staphylococcus aureus* by a colorimetric biosensor based on magnetic separation and rolling circle amplification. *Foods*. 2022;11:1852.
 48. Li A, Zuo P, Ye BC. An aptamer biosensor based dual signal amplification system for the detection of *Salmonella typhimurium*. *Anal Biochem*. 2021;615:114050.
 49. Yu C, Huang Z, Ping T, Su H, Yang Q, Wu W. Dual-mode aptasensors based on AuNPs and Ag@Au NPs for simultaneous detection of foodborne pathogens. *LWT-Food Sci Technol*. 2023;184:115007.
 50. An B, Zhang H, Su X, Guo Y, Wu T, Ge Y, et al. Rapid and sensitive detection of *Salmonella* spp. using CRISPR-Cas13a combined with recombinase polymerase amplification. *Front Microbiol*. 2021;12:732426.
 51. Shi Y, Tan Q, Gong T, Li Q, Zhu Y, Duan X, et al. Cascaded signal amplification strategy for ultra-specific, ultra-sensitive, and visual detection of *Shigella flexneri*. *Microchim Acta*. 2024;191:271.
 52. Xu D, Zeng H, Wu W, Liu H, Wang J. Isothermal amplification and CRISPR/Cas12a-system-based assay for rapid, sensitive and visual detection of *Staphylococcus*

- aureus. *Foods*. 2023;12:4432.
53. Gu A, Dong Y, Li L, Yu D, Zhang J, Chen Y. CRISPR/Cas12a and hybridization chain reaction-coregulated magnetic relaxation switching biosensor for sensitive detection of viable *Salmonella* in animal-derived foods. *J Agric Food Chem*. 2024;72:20130-9.
 54. Yang Z, Kulka M, Yang Q, Papafragkou E, Yu C, Wales SQ, et al. Whole-genome sequencing-based confirmatory methods on RT-qPCR results for the detection of foodborne viruses in frozen berries. *Food Environ Virol*. 2024;16:225-40.
 55. Zhao J, Han M, Ma A, Jiang F, Chen R, Dong Y, et al. A machine vision-assisted Argonaute-mediated fluorescence biosensor for the detection of viable *Salmonella* in food without convoluted DNA extraction and amplification procedures. *J Hazard Mater*. 2024;466:133648.
 56. Aggarwal A, Mishra A, Tabassum N, Kim YM, Khan F. Detection of mycotoxin contamination in foods using artificial intelligence: a review. *Foods*. 2024;13:3339.
 57. Kabir MA, Lee I, Singh CB, Mishra G, Panda BK, Lee SH. Detection of mycotoxins in cereal grains and nuts using machine learning integrated hyperspectral imaging: a review. *Toxins*. 2025;17:219.
 58. Ferreira LC, Carvalho ICB, Jorge LAC, Quezado-Duval AM, Rossato M. Hyperspectral imaging for the detection of plant pathogens in seeds: recent developments and challenges. *Front Plant Sci*. 2024;15:1387925.
 59. Upadhyay A, Chandel NS, Singh KP, Chakraborty SK, Nandede BM, Kumar M, et al. Deep learning and computer vision in plant disease detection: a comprehensive review of techniques, models, and trends in precision agriculture. *Artif Intell Rev*. 2025;58:92.
 60. Zhang B, Rahman MA, Liu J, Huang J, Yang Q. Real-time detection and analysis of foodborne pathogens via machine learning based fiber-optic Raman sensor. *Measurement*. 2023;217:113121.
 61. Rahman MHU, Sikder R, Tripathi M, Zahan M, Ye T, Gnimpieba ZE, et al. Machine learning-assisted Raman spectroscopy and SERS for bacterial pathogen detection: clinical, food safety, and environmental applications. *Chemosensors*. 2024;12:140.
 62. Srivastava S, Wang W, Zhou W, Jin M, Vikesland PJ. Machine learning-assisted surface-enhanced Raman spectroscopy detection for environmental applications: a review. *Environ Sci Technol*. 2024;58:20830-48.
 63. Sharma S, Tharani L. Optical sensing for real-time detection of food-borne pathogens in fresh produce using machine learning. *Sci Prog*. 2024;107:368504231223029.