병원성대장균에 의한 식중독 발생 현황과 저감화 연구 동향: 집단급식소와 식품접객업소를 중심으로

Current Status of Foodborne Outbreaks Caused by Pathogenic Escherichia coli and Trends in Reduction Strategies: Focusing on Institutional Food Services and Food Service Establishments

최소윤[1] · 반가희[1] · 조태진[2] · 최창순[3] · 이민석[4] · 김선애[1*]

So Yoon Choi[1], Ga-Hee Ban[1], Tae Jin Cho[2], Changsun Choi[3], Min Suk Rhee[4], Sun Ae Kim[1*]

[1]이화여자대학교 식품생명공학과, [2]고려대학교 식품생명공학과, [3]중앙대학교 식품영양학과, [4]고려대학교 식품공학과

[1]Department of Food Science and Biotechnology, Ewha Womans University, Seoul, Korea
[2]Department of Food and Biotechnology, Korea University, Sejong, Korea
[3]Department of Food and Nutrition, Chung-Ang University, Korea
[4]Department of Biotechnology, Korea University, Seoul, Korea

김 선 애

Correspondence to
Sun Ae Kim, Department of Food Science and Biotechnology, Ewha Womans University, Seoul, Korea
Tel.: +82-2-3277-4032,
Fax: +82-2-3277-4213
E-mail: sunaekim@ewha.ac.kr

서론

식중독을 유발하는 다양한 병원체 중 병원성대장균(pathogenic *E. coli*)은 심각한 건강 피해를 초래할 수 있는 주요 원인균으로 지목되고 있다[1-4]. 지난 10년(2015년 – 2024년)간 국내 식중독 발생 통계를 분석한 결과, 원인불명 사례를 제외한 식중독 원인 중 병원성대장균이 가장 높은 발생 건수와 환자 수를 기록하였다[5]. 이 기간 동안 보고된 전체 식중독 발생 건수는 9,247건이며, 이 중 병원성대장균이 원인이 된 사례는 1,120건(12.1%)에 달했다. 또한, 총 215,078명의 식중독 환자 중 52,809명(24.6%)이 병원성대장균 감염에 의한 것으로 집계되었다[6]. 이러한 통계는 병원성대장균이 국내 식중독 발생의 주요한 원인균 중 하나임을 보여 주며, 이에 대한 예방 및 관리 대책의 강화가 필수적임을 시사한다.

급속한 경제 발전과 맞벌이 부부 증가 등의 변화와 함께 소득이 증가하고 생활 수준이 향상되면서, 집단급식소와 식품접객업소의 규모가 지속적으로 성장하고 있다[6, 7]. 한국농촌경제연구원의 공공급식 조사 보고서에 따르면 2017 년 기준 국내 공공 단체급식 시장 규모는 1일 1식 기준으로 약 336억원에 달하며, 하루 평균 급식 이용 인원은 약 1313만 명으로, 이는 국내 전체 인구의 약 1/4에 해당한다[8]. 또한, 식품산업통계정보원의 2024년 식품외식산업 주요 통계에 따르면 식품접객업소 사업체 수는 2022년 795,000개로 2012년부터 2022년동안 연평균 2.4% 증가하였고, 사업체당 매출액은 2012년부터 2022년동안 연평균 6.1% 증가하는 성장세를 나타내었다[9].

이러한 단체급식 및 외식 산업의 성장과 더불어 대형 식중독 발생 위험도 증가하

고 있다. 실제로 집단급식소에서의 식중독 발생 비율은 2017년부터 2023년까지 최대 31%로 나타났고, 식품접객업소에서 발생한 식중독 사례는 2017년부터 2023년까지 지속적으로 50% 내외의 발생률을 보이며 가장 큰 비율을 차지하였다[10]. 병원성대장균에 의한 식중독 사례를 분석한 결과, 2018년부터 2022년까지 5년간 집단급식소에서 79건(49%: 학교급식소 45건, 기타 집단급식소 34건), 식품접객업소에서 69건(43%), 이 보고되었다[11]. 이러한 통계 결과는 병원성대장균으로 인한 식중독이 주로 집단급식소와 식품접객업소에서 발생한다는 점을 시사한다.

본 논문에서는 병원성대장균의 분류와 위해성을 살펴보고, 병원성대장균에 의한 식중독 사례와 대표적인 원인 식품을 분석하여 식중독 발생 현황을 파악하고자 하였다. 또한 식중독이 주로 발생하는 집단급식소 및 식품접객업소에서 현장 적용이 가능한 위해요소 저감화 기술 개발 방안을 마련하기 위하여 국내외 병원성대장균 저감화 연구의 동향을 검토하였다.

1. 병원성대장균 분류 및 국내 규제

1.1 병원성대장균 분류

대장균은 장내 공생균으로 잘 알려져 있지만, 일부 병원성 계통은 숙주의 장 점막에 부착하거나 침입하여 병리적 변화를 유발한다. 이들 균주는 병원성 유전인자를 획득하여 다양한 감염 양상을 나타내며, 감염 기전에 따라 Enteropathogenic *E. coli* (EPEC, 장병원성대장균), Enterotoxigenic *E. coli* (ETEC, 장독성대장균), Enteroaggregative *E. coli* (EAEC, 장응집성대장균), Enterohemorrhagic *E. coli* (EHEC, 장출혈성 대장균), Enteroinvasive *E. coli* (EIEC, 장침습성대장균), Diffusely Adherent *E. coli* (DAEC, 확산성-부착성대장균)등 여섯 개의 주요 병원형으로 분류할 수 있다(Table 1)[12, 13].

EPEC는 주로 영유아 설사의 원인균이며, 독소를 생성하지는 않지만 숙주의 장 점막에 부착해 Attaching and effacing (A/E) 병변을 유발한다[14, 15]. ETEC는 열안정성 독소(heat-stable enterotoxin, ST)와 열민감성 독소(heat-labile enterotoxin, LT)를 생성하며, 개발도상국 지역의 유아 설사의 주요 원인균이다[16]. EAEC는 장 점막에 응집 형태로 부착하여 장기간 설사를 유발하는데, 특히 면역력이 약한 영유아 설사의 주요 원인으로 알려져 있다[17]. EHEC는 Shiga toxin이라는 독소를 생성하며, 출혈성 대장염과 용혈성 요독 증후군(Hemolytic Uremic Syndrome, HUS)을 유발해 건강에 큰 영향을 미칠 수 있다[18-20]. EIEC는 *Shigella* spp.와 유사한 감염 기전을 가지며, 장 점막을 침습하여 이질과 유사한 증상을 유발한다[21]. DAEC는 장 상피세포에 확산 부착하며, 요로감염의 원인균으로 보고된다. 병원성 기전이 완전히 규명되지는 않았으나, 일부 연구에서는 세포 독성 및 염증 반응을 유발하는 것으로 나타났다[22]. 병원성대장균은 식품 또는 물 섭취로 인한 경구 감염으로 전파되며, 특히 육류 및 신선농산물 섭취와 관련된 감염 사례가 다수 보고되고 있다[23].

2.2 병원성대장균 국내 규제

현재 우리나라는 병원성대장균 중 중증 합병증을 유발할 위험성이 높은 장출혈성 대장균을 주요 규제 대상으로 관리하고 있다[24]. 대상 식품은 가열하지 않고 유통되는 원재료나 추가적인 가열조리 없이 그대로 섭취할 수 있는 가공식품이며, 특히, 2013년부터 기존에 규제 대상이었던 *E. coli* O157:H7뿐만 아니라, 모든 혈청형을 규제 대상으로 확대하였다[25]. EHEC는 중증 합병증을 유발할 위험성이 높아 국내를 비롯하여 해외에서도 주요 규제 대상이 되고 있다[26]. EHEC이 생성하는 Shiga 독소는 출혈성 장염과 용혈성 요독 증후군 등 심각한 합병증을 일으키는 원인으로 알려져 있으며, 감염 최소량이 100 CFU 이하로 매우 적어 낮은 수준의 오염 만으로도 인체 감염이 가능하다[27].

식품의약품안전처 고시에 따르면, 집단급식소와 식품접객업소에서 제공되는 식품을 포함한 모든 식품 중 식육(제조 · 가공용 원료 제외), 그대로 섭취하는 가공식품, 분

Table 1. Pathotypes of human intestinal pathogenic *E. coli* (adapted from Basavaraju, M., Gunashree, 2022)[75]

Category	Clinical manifestations	Susceptible population	Virulence factors	Diagnostic	Treatment
Entero-toxigenic *E. coli* (ETEC)	Watery stool (without blood or inflammatory cells) leading to dehydration, headache, fever, nausea and vomiting	Children 0-5 years of age and adults traveling to developing countries	ST, LT, CFs	Culture, detection of ST (STa, STb) and LT, CFAs using ELISA and PCR-based methods	Self-limited, responsive to oral rehydration therapy (low response in children <2 years). Antimicrobial therapy in individual cases
Entero-pathogenic *E. coli* (EPEC)	Secretory and persistent diarrhea, anorexia, low fever, and rapid wasting	Children 0-2 years of age, occasionally adults	pEAF, BFP, LEE and Nle effectors	Culture, adherence patterns (LA LAL, etc.), serotyping, PCR-based methods	Self-limited, responsive to oral rehydration therapy. Antimicrobial therapy in individual cases
Enteroaggregative *E. coli* (EAEC)	Persistent and acute diarrhea, mucoid stools, abdominal pain, nausea, vomiting, occasionally fever	People of all ages in developing and industrialized countries, HIV-infected adults	EAST Pet Pic ShET-1 Aap AAF/II	Culture, adherence pattern (stacked-brick pattern), pAA DNA probe, multiplex and real-time PCR assays	Self-limited, responsive to oral rehydration therapy. Antimicrobial therapy in individual cases
Enterohaemorrhagic *E. coli* (EHEC)	Mild uncomplicated diarrhea to hemorrhagic colitis with severe abdominal pain and bloody diarrhea	During the summer, most common, and the incidence is higher in children under the age of five	Stx1 and 2 verotoxins (VT)	Shiga toxins rather and A/E cytopathology	Drinking plenty of fluids to prevent dehydration and blood transfusions and kidney dialysis
Enteroinvasive *E. coli* (EIEC)	Invade and destroy the colonic epithelium, producing a disease characterized initially by watery diarrhea	A small percentage of patients develop dysenteric illnesses, which include fever stomach pains, and blood and leukocytes in stool specimens	Inv plasmid, Chromosome, pInv genes	Human stool samples from patients with signs and symptoms of GI infection	Fluoroquinolones, such as ciprofloxacin, macrolides, such as azithromycin, and rifaximin, are antibiotics used to treat non-STEC diarrheagenic *E. coli*
Diffusely adherent *E. coli* (DAEC)	Watery diarrhea	Involved in diarrhea in children but not in adults	Adhesins	Afa/Dr adhesins	multiplex PCR for DEP genes

쇄육, 냉장 · 냉동 포장육(육함량 100%, 다만 분쇄육에 한함)에서는 장출혈성 대장균이 n=5, c=0, m=0/25 g 기준을 충족해야 한다[26]. 식품자동판매기에서 판매되는 일부 식품(가공식품 및 음료류 제외)에 대해서도 장출혈성 대장균이 검출되지 않아야 한다. 미국의 경우, 익히지 않거나 다진 육류, 씨앗, 새싹, 우유, 살균되지 않은 주스 등의 식품을 병원성대장균에 노출될 위험이 높은 식품으로 분류하며, 육류 제품에서*E. coli* O157:H7가 검출되지 않도록 규제 및 감시를 진행하고 있다[28, 29].

2. 병원성대장균 검출 사례 및 역학분석

2.1 병원성대장균 검출 및 감염 사례

병원성대장균의 오염 및 감염을 예방하고자 하는 노

력에도 불구하고 이로 인한 식중독 사건은 최근까지도 국내 · 외적으로 지속적으로 발생하고 있다. Table 2에 2018년 이후로 학술 문헌과 통계자료를 통해 보고된 국내외 병원성대장균 식중독 사고 분석 사례를 분석하여 발생 국가와 장소, 감염자 수, 원인균과 원인 요소를 나타내었다[30-37]. 2018년 미국에서는 식품접객업소에서 EHEC로 인한 대규모 병원성대장균 식중독이 두 차례 보고되었으며, 봄철 발생한 집단 식중독은 37개 주에서 240명의 감염자, 가을철 발생한 또 다른 사례에서는 16개 주에서 62명의 감염자가 보고되었다[31]. 역학 조사 결과, 감염 사례들은 특정 지역(Yuma, Salinas Valley)에서 재배된 로메인 상추와 관련이 있었으며 오염된 농업용수 및 환경 요인이 주요 원인이었다[31]. 2020년 일본에서는 학교 급식을 먹고 약 3,000명의 초 · 중학생이 *E. coli* O7:H4에 감염되는 대규모 식중독 사태가 발생하였다[33]. 식자재 검사 결과 해조류 샐러드와 그 원재료 중 하나인 붉은 해조류(*Gigartina tenella*)에서 동일한 균이 확인되었다[33].

국내에서도 2020년 충청남도의 한 사업장에서 발생한 대규모 집단식중독의 원인을 규명하기 위하여 설사나 구토 등 급성 장염증상을 나타내는 유증상자와 조리종사자의 검체(100건), 주방환경, 음용수, 보존식 등의 환경 검체(147건)에 대한 식중독 세균 및 바이러스 검사를 실시하였다[34]. 검사 결과 EPEC가 유증상자 84명 중 17명에서 검출되어 20.2%를 차지하였고, 보존식 중 카레라이스에서

Table 2. Pathogenic *E. coli* Outbreaks: Reported Cases Worldwide

Year	Outbreak country (Outbreak place)	Number of infections	Causative pathogen	Causative agent	Reference
2018	USA (Restaurant)	4	EHEC	Pesto	CDC (2018)
2018	USA (Restaurant)	4	EHEC	Ground beef	CDC (2018)
2018	USA (Institutional food service)	6	EHEC	Pork ham	CDC (2018)
2018	USA (Restaurant)	240	EHEC	Romaine lettuce	Irvin et al. (2021)
2018	USA (Restaurant)	62	EHEC	Romaine lettuce	Irvin et al. (2021)
2018	Korea (Institutional food service)	2	EPEC	Cooking water and dishwashing water	Lim et al. (2020)
2020	Japan (Institutional food service)	2958	EHEC	Seaweed salad	Kashima et al. (2021)
2020	Korea (Institutional food service)	17	EPEC	Curry	Lee et al. (2020)
2020	Korea (Institutional food service)	104	EHEC	Storage temperature	Heo et al. (2023)
2020	USA (Restaurant)	51	EHEC	Clover sprouts	CDC (2020)
2020	USA (Restaurant)	21	EHEC	Leafy greens	CDC (2020)
2020	Canada (Institutional food service)	6	EHEC	Celery	Smith et al. (2022)
2020	UK (Restaurant)	36	EHEC	Cucumber	Mulchandani et al. (2021)
2021	USA (Restaurant)	62	EHEC	House salad	CDC (2021)
2022	USA (Restaurant)	109	EHEC	Romaine lettuce	CDC (2022)
2023	USA (Restaurant)	44	EHEC	Guacamole	CDC (2023)
2023	USA (Restaurant)	13	EHEC	Iceberg lettuce	CDC (2023)
2023	USA (Restaurant)	4	EHEC	Cold-pressed juice	CDC (2023)

도 동일균이 확인되어 원인병원체로 판단되었다. 명확한 유래는 추정할 수 없었지만, 종사자가 가지고 있던 EPEC가 보존식 또는 유증상자로 전파되었을 가능성이 제기되었다. 같은 해 국내의 한 유치원에서 국내 최대 규모의 *E. coli* O157:H7 감염 발생이 보고되었다[35]. 총 103명의 어린이와 성인 1명이 감염되었으며, 감염된 어린이 중 85명(82.5%)이 설사, 복통, 혈변, 발열, 구토 등의 증상이 발현되었다. 그 중에서도 증상이 심각한 32명(31.1%)이 입원하였고, 15명(14.6%)이 용혈성 요독 증후군을 진단받았으며, 4명(3.9%)이 투석 치료를 필요로 하는 심각한 결과를 초래하였다. 역학조사 결과, 10℃이상으로 유지된 냉장고에서 보관된 음식 섭취가 원인으로 추정되었고, 이는 유치원이나 학교와 같은 단체급식 시설에서는 냉장고의 온도를 정기적으로 점검하고 유지하는 것이 필수적임을 시사한다. 또한, 식품 보관 및 위생 관리에 대한 교육을 강화하고, 식재료의 유통 및 보관 과정에서 철저한 위생 점검이 필요하다. 이러한 사례들을 통해 저온 보관과 원재료 관리의 중요성을 재확인하고, 식중독 예방을 위한 위생관리 시스템을 강화해야 함을 확인할 수 있다.

2.2 병원성대장균 감염 역학적 요인

학교의 학생식당 및 회사의 구내식당과 같은 집단급식소, 일반 식당과 같은 식품접객업소는 1회 제공 인원수가 많아 단일 감염 건수 당 다수의 식중독 환자가 발생한다. 따라서 집단급식소와 식품접객업소에서는 다량의 식품을 신속하게 처리하는 등 미생물 감염 예방에 특별한 주의가 필요하다.

동일 기간의 월별 감염 현황을 살펴보았을 때, 병원성대장균으로 인한 식중독 총 162건과 환자수 5,347명 중 60% 가 더운 여름철인 6-8월에 발생하였다[11]. 기온이 상승하는 4월부터 발생 건수가 증가하며, 가장 평균 기온이 높은 8월에 가장 높은 발생 건수와 환자수를 기록하고, 기온이 하강하는 10월에 들어서면 감소하는 경향을 보인다[11]. 이를 통해 평균 기온이 높은 여름철의 식중독 감염을 주의한 예방 및 위생 관리의 필요성을 알 수 있다.

CDC의 연간 보고서 Surveillance for Foodborne Disease Outbreaks United States에 따르면, 오염된 원재료에 의한 식중독 발생이 전체 98건 중 14건으로 가장 높게 나타났고, 다음으로는 원재료 교차오염(종사자에 의한 교차오염 제외), 불충분한 가열 시간 및 온도, 오염된 환경에서 보관, 부적절한 냉장 보관, 종사자의 손에 의한 교차오염 등이 주요 발생 요인으로 나타났다[38, 39]. 이러한 결과는 식품을 취급하는 전 과정에서의 미생물 오염 방지를 위한 철저한 위생 관리가 필수적임을 의미한다. 특히 원재료 단계에서의 오염이 주요 원인으로 분석된 만큼, 원재료의 안전성 확보 및 취급 과정에서의 교차오염 방지 조치가 중요하다. 또한, 가열 공정 및 보관 과정에서의 온도 관리, 위생적인 제조 및 제공 절차 준수가 병원성대장균 식중독 예방에 있어 핵심적인 요소임을 시사한다. 식품 제조 및 조리 종사자에 대한 지속적인 위생 교육과 식품안전 관리 기준의 철저한 이행이 요구된다.

국내 병원성대장균 감염의 주요 원인 식품으로는 소고기 등의 육류, 신선 채소 또는 김치 등의 채소류가 있다[11, 40], 육류는 대표적인 병원성대장균 오염 위험이 높은 식품으로, 대장균이 자연적으로 소, 양, 돼지 등의 반추동물 장관 내에 서식하는 미생물이기 때문이다[41]. 도축 과정에서 가축의 내장 내용물이 오염원으로 작용할 수 있으며, 이후 육류 가공 및 조리 과정에서 교차오염이 발생할 가능성이 있다[42-46]. 특히, 분쇄육은 연화 과정에서 오염된 소고기가 다른 비오염 소고기를 교차오염 시킬 수 있기 때문에 분쇄되지 않은 소고기보다 위험성이 높다[47]. 채소류 또한 대표적인 병원성대장균의 원인 식품으로 보고되는데, 추가적인 조리 없이 생으로 섭취되는 경우가 많아 병원성대장균 감염의 주요 원인이 될 수 있다[48]. 대장균은 주로 분변 오염을 통해 환경으로 배출되며, 채소류는 재배 과정에서 분뇨, 토양, 하수, 표층수 또는 야생 동물 등 다양한 오염 경로에 노출될 가능성이 크다[48]. 김치류의 경우 주·부원료인 배추, 무, 고춧가루, 젓갈 등이 오염원으로 작용할 수 있다[49]. 김치류는 발효 과정에서 유산균이 증식하며 낮은 pH(약 4 이하)를 형성하여 일부 병원균의 성장을 억

제할 수 있다[50, 51]. 그러나, 발효가 충분히 진행되지 않으면 병원성 대장균이 생존할 가능성이 있어, 겉절이보다는 적절하게 익은 김치, 볶음김치를 섭취하는 것이 병원성대장균 오염으로부터 안전하다[11, 52].

3. 병원성대장균 저감화 연구 동향 및 제어 방안

병원성대장균은 엄격한 법적 기준이 적용되므로 병원성대장균의 오염을 효과적으로 억제하면서도 식품의 품질을 유지할 수 있는 미생물 저감화 기술 개발이 중요한 과제로 떠오르고 있다. Table 3에 식품 및 표면에서 병원성대장균을 저감화 하기 위한 최근 연구 현황을 정리하여 나타내었다. 국내외 병원성대장균을 대상으로 한 저감화 기술은 물리적 열처리 방식인 과열 증기 처리(superheated steam treatment), 진공 증기 처리(vacuum steam treatment), 오믹 가열 처리(ohmic heating) 와 비열처리 방식인 저온 플라즈마(cold plasma), 초임계 유

Table 3. Current research on reducing pathogenic *E. coil* in food

Treatment	Title	Sample	Target E. coli	Reference
Cold plasma treatment	Investigation of a large gap cold plasma reactor for continuous in-package decontamination of fresh strawberries and spinach	Strawberries and spinach	Shiga toxin-producing *E. coli*	Shah et al (2020)
	Effects of cold plasma treatments on spot-inoculated *Escherichia coli* O157:H7 and quality of baby kale (*Brassica oleracea*) leaves	Baby kale	*E. coli* O157:H7	Shah et al. (2019)
	Inactivation of *Salmonella enterica*, Shiga toxin-producing *Escherichia coli*, and *Listeria monocytogenes* by a novel surface discharge cold plasma design	Glass coverslips, in-shell pecans, cherry tomatoes	Shiga toxin-producing *E. coli*	Timmons et al. (2018)
	Evaluation of the efficacy of multiple physical, biological and natural antimicrobial interventions for control of pathogenic *Escherichia coli* on beef	Beef	*E. coli* ATCC BAA-1427 *E. coli* ATCC BAA-1428 *E. coli* ATCC BAA-1430 *E. coli* O157:H7	Stratakos et al. (2018)
Hot water immersion treatment	Reduction of *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, and *Salmonella* on whole yellow onions (*Allium cepa*) exposed to hot water	Whole yellow onions	*E. coli* O157:H7	Lieberman et al. (2021)
Superheated steam treatment	Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* on cherry tomatoes and oranges by superheated steam	Cherry tomato, oranges	*E. coli* O157:H7	Kang et al. (2018)
Ohmic heating and UV-C irradiation	Synergistic effect of ohmic heating and UV-C irradiation for inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium and *Listeria monocytogenes* in buffered peptone water and tomato juice	Buffered peptone water, tomato juice	*E. coli* O157:H7	Kang et al. (2019)
Vacuum steam treatment	Effect of vacuum steam treatment of hard red spring wheat on flour quality and reduction of *Escherichia coli* O121 and *Salmonella* Enteritidis PT 30	Hard red spring wheat on flour	*E. coli* O121:H19	Snelling et al. (2020)
Curcumin-based photodynamic treatment	Effects of curcumin-based photodynamic treatment on quality attributes of fresh-cut pineapple	Pineapple	*E. coli* O157	Zou et al. (2018)
Ozone treatment	A novel aqueous ozone treatment as a spray chill intervention against *Escherichia coli* O157:H7 on surfaces of fresh beef	Fresh beef	*E. coli* O157:H7	Kalchayanand et al. (2019)

Treatment	Title	Sample	Target E. coli	Reference
Sodium bisulfate (SBS) tempering treatment	Significance of sodium bisulfate (SBS) tempering in reducing the *Escherichia coli* O121 and O26 load of wheat and its effects on wheat flour quality	Wheat	*E. coli* O121 and O26	Rivera et al. (2021)
Combinations of sodium hypochlorite and citric acid	Inhibitory effects of combinations of chemicals on *Escherichia coli*, *Bacillus cereus*, and *Staphylococcus aureus* biofilms during the clean-in-place process at an experimental dairy plant	Stainless steel chips	*E. coli* ATCC 25922	Lee et al (2020)
Nano emulsions with carvacrol or thyme essential oil	Evaluation of the efficacy of multiple physical, biological and natural antimicrobial interventions for control of pathogenic *Escherichia coli* on beef	Beef	*E. coli* ATCC BAA-1427 *E. coli* ATCC BAA-1428 *E. coli* ATCC BAA-1430 *E. coli* O157:H7	Stratakos et al. (2018)
Bacteriophage treatment	Application of bacteriophage as food preservative to control enteropathogenic *Escherichia coli* (EPEC)	Lettuce, milk, tofu, chicken, shrimp	EPEC	Waturangi at el. (2021)
Bacteriophage treatment	Efficacy of bacteriophage cocktail to control *E. coli* O157:H7 contamination on baby spinach leaves in the presence or absence of organic load	Baby Spinach Leaves	*E. coli* O157:H7	Jagannathan et al. (2021)
	Developing and optimizing bacteriophage treatment to control enterohemorrhagic *Escherichia coli* on fresh produce	Green bell peppers, organic baby spinach	*E. coli* O157:H7	Snyder et al. (2016)
Thermal-chemical treatment	Pathogen reduction on mung bean reduction of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* and *Listeria monocytogenes* on mung bean using combined thermal and chemical treatments with acetic acid and hydrogen peroxide	Mung bean	*E. coli* O157:H7	Trząskowska et al. (2018)
Essential oil compounds and chemical treatment	Combination of essential oil compounds and phenolic acids against *Escherichia coli* O157:H7 in vitro and in dry-fermented sausage production	Dry-cured sausage	*E. coli* O157:H7	Meira et al. (2017)
Combining high-pressure processing (HPP) with mild heat treatment	Antimicrobial effect of combination treatment with high pressure processing and mild heat against foodborne pathogens in apple puree	Apple puree	*E. coli* O157:H7	Lee and park (2024)

체 처리(supercritical fluid treatment), 초음파 처리(ultrasound treatment), 고압 처리(high-pressure processing, HPP), UV 처리(ultraviolet treatment), 화학적 처리 방식인 오존 처리(ozone treatment), 유기산 처리(organic acid treatment), 에센셜 오일 처리(essential oil treatment) 및 효소 처리(enzyme treatment), 생물학적 처리 방식인 박테리오파지 처리(bacteriophage treatment)와 프로바이오틱스 처리(probiotic treatment) 방식이 있다[53-67]. 또한, 두 가지 이상의 저감화 기술을 결합하여 시너지 효과를 높이는 조합 처리 방식도 최근 활발히 연구되고 있다[68-70].

식품에 사용될 수 있는 저감화 기술 연구에서는 식품의

품질과 인체에 위해를 미치지 않는 것이 중요하다. Shah 등[57]은 물리적 처리방식인 저온 플라즈마 처리를 이용하여 베이비 케일 잎에 접종된 *E. coli* O157:H7를 사멸시키는 최적의 처리 조건을 확인한 결과, 300초 동안 플라즈마 분무로 처리한 베이비 케일 잎의 *E. coli* O157:H7가 완전히 불활성화됨을 보고하였다. 또한, 플라즈마 처리 후 케일 잎의 큐티클 구성에 변화가 없음을 확인하였으며, 케일 잎을 플라즈마 처리 후 보관(4℃/12일)하는 과정에서의 색상을 측정한 결과, 대조군과 비교하였을 때 색상 안정성이 향상되었음을 알 수 있었다. 물리적 저감화 방식은 높은 저감 효과를 보장하지만, 식품의 물리적 · 화학적 특성에 변화를 초래할 수 있어 최소한의 처리를 적용하는 방안이 필요하며, 방사선 조사 처리와 같은 일부 방법은 소비자들에게 부정적인 인식을 줄 수 있다는 점이 한계점으로 작용한다[56].

Kalchayanand 등[62]은 화학적 처리 방법 중 하나인 오존수 분무 처리를 이용해 소고기 표면의 *E. coli* O157:H7 저감 효과를 연구하였다. 냉장고 내부에서 4.6 – 5.6℃의 오존수 또는 냉각수를 12시간 동안 30분 간격으로 90초씩 분무 처리한 결과, 오존수 분무 처리는 *E. coli* O157:H7과 호기성 박테리아를 유의미하게 감소($p \leq 0.05$)시키는 효과를 보였다. 특히, 12 ppm 농도의 오존을 이용한 분무 처리는*E. coli* O157:H7을 1.46 log CFU/g 감소시켜, 냉각수만 사용한 경우보다 0.86 log CFU/g 더 높은 저감 효과를 나타냈다($p \leq 0.05$). 마찬가지로, 호기성 박테리아는 오존수 분무 냉각을 통해 0.99 log CFU/g 감소했으며, 이는 냉각수만 사용한 경우보다 0.90 log CFU/g 더 높은 감소율을 보였다($p \leq 0.05$). 화학적 처리는 사용된 화학물질이 식품 내에 잔류하여 인체에 부정적인 영향을 끼칠 수 있어 제한적으로 활용된다[71].

Waturangi 등[65]은 EPEC를 접종한 상추, 우유, 두부, 닭고기, 새우에 생물학적 처리 방법으로 가축에서 분리한 박테리오파지를 처리하여 저감화 정도를 확인하였다. 실험 결과, 대조군의 EPEC 농도는 약 8 log CFU/g 이었으며, 실험군에서는 실온에서 상추와 우유에서 각각 42.86%, 98.56% 감소하였고, 두부, 닭고기, 새우에서는 검출되지 않았다. 또한, 4℃ 에서는 상추와 우유에서 각각 74.68%, 99.52% 감소하였으며, 두부, 닭고기, 새우에서 검출이 불가능하였다. 하지만, 박테리오파지를 식품 보존제로 사용하기 위해서는 식품 매트릭스, 박테리오파지의 용량 및 다른 화합물의 존재와 같은 여러 요인에 따른 효과를 비교할 필요가 있다[72]. 이와 같은 생물학적 저감화 방법은 화학적 잔류 물질이 남지 않아 비교적 안전하지만, 특정 미생물에만 선택적으로 작용하고, 이에 내성을 가진 변종 세균을 유발할 수 있다는 한계점이 있다[73].

Trząskowska 등[68]은 녹두에 약한 열과 아세트산 및 과산화수소의 조합 처리를 통해 *E. coli* O157:H7의 살균 정도를 확인하였다. 결과에 따르면 60℃로 가열된 물, 아세트산(0.2 – 5%), H_2O_2 (3 – 4%)의 조합 처리는 단독 처리하였을 때 보다 더 높은 효과를 보였다. 또한 녹두의 발아율과 수확량은 대조군에서 측정한 것과 유의미한 차이가 없는 것을 바탕으로, 녹두의 품질에 미치는 영향이 적음을 확인하였다. 이는 조합처리 방식이 식품의 품질을 유지하면서 효과적으로 병원성대장균을 저감화 할 수 있는 기술임을 시사하며, 다양한 조건으로 조합 처리 방식을 시도해 볼 필요성을 제시하였다. 조합 처리 방식은 단일 처리 방법보다 낮은 강도와 농도로도 효과적인 미생물 살균이 가능하며, 식품의 품질을 유지하면서도 안정적인 저감 효과를 제공할 수 있다[74].

우리나라에서는 집단급식소 및 식품접객업소에서 병원성대장균 오염을 방지하기 위해 규격 기준을 마련하고 관리하고 있음에도 불구하고, 관련 식중독이 계속해서 발생하고 있다. 이에 따라, 여러 국가들의 위생 관리 정책과 연구 동향에 맞춰 국내에서도 효과적인 저감화 전략을 마련하고, 식품의 조리 · 보관 과정에서 적용할 수 있는 방안을 강구할 필요가 있다. 특히 식중독이 빈번하게 발생하는 집단급식소와 식품접객업소에서 활용할 수 있는 보다 간편하면서도 대량 조리에 적합한 미생물 제어 기술의 개발이 지속적으로 진행되어야 한다.

국문요약

병원성대장균은 최근 10년간 국내 식중독 사고의 주요 원인균으로, 지속적으로 감염 사례가 보고되고 있어 철저한 관리가 요구된다. 본 논문에서는 병원성대장균의 감염 현황 및 역학적 요인을 분석하고, 국내외 병원성대장균 감염 분석 보고서와 최신 병원성대장균 저감화 기술 동향을 조사하였다. 병원성대장균으로 인한 식중독 사례 분석 결과, 집단급식소와 식품접객업소에서 가장 많이 발생하였으며, 감염 원인으로는 원재료 및 조리용수의 오염과 부적절한 식재료 보관 온도가 주요하게 작용하였다. 기온이 높은 6 월에서 8 월에 집중되는 경향을 보였고, 주요 원인 식품은 육류, 채소류였다. 병원성대장균 저감화를 위한 국내외 연구 동향을 분석한 결과, 다양한 물리적 처리 기술(과열 증기, 오믹 가열, 저온 플라즈마, 고온 살균, 자외선, 광역학 처리), 화학적 처리 기술(오존, 천연 항균제, 중황산나트륨 처리) 및 생물학적 처리 기술(박테리오파지)이 개발되고 있다. 또한, 여러 기술을 조합한 조합처리를 적용함으로써 식품의 품질을 유지하면서도 강력한 살균 효과를 얻을 수 있는 기술도 연구 중이다. 대규모 식중독 발생을 예방하기 위해서는 집단급식소 및 식품접객업소에서 손쉽게 적용할 수 있는 효과적인 저감화 기술 개발이 필요하며, 이를 위해 보다 효율적인 식품 안전 관리 전략을 지속적으로 모색해야 한다.

Acknowledgement

본 연구는 2024년도 식품의약품안전처의 연구개발비(24192미생식021)로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Conflict of interests

The authors declare no potential conflict of interest.

ORCID

So Yoon Choi 0009-0007-5115-2599

Ga-Hee Ban 0000-0001-5448-7262

Tae Jin Cho 0000-0002-6563-2514

Changsun Choi 0000-0001-7730-8538

Min Suk Rhee 0000-0003-0412-1910

Sun Ae Kim 0000-0003-2463-3198

참고 문헌

1. Wasiński, B., Extra-intestinal pathogenic *Escherichia coli* – threat connected with food-borne infections. *Ann. Agr. Env. Med.*, 26, 532-537 (2019).
2. Poolman, J. T., Wacker, M., Extraintestinal pathogenic *Escherichia coli*, a common human pathogen: challenges for vaccine development and progress in the field. *J. Infect. Dis.*, 213, 6-13 (2016).
3. Bintsis, T., Foodborne pathogens. *AIMS Microbiol.*, 3, 529-563 (2017).
4. Saxena, T., Kaushik, P., Medicherla, K. M., Prevalence of *E. coli* O157:H7 in water sources: an overview on associated diseases, outbreaks and detection methods. *Diagn. Microbiol. Infect. Dis.*, 82, 249-264 (2015).
5. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), (2025, January). Food poisoning statistics by causative agent. Retrieved from https://www.foodsafetykorea.go.kr/portal/healthyfoodlife/foodPoisoningStat.do?menu_no=4425&menu_grp=MENU_NEW02
6. Food Information Statistics System (FIS), (2024, March). Status of the restaurant industry. Retrieved from https://www.atfis.or.kr/fip/front/M000000268/stats/service.do
7. Park, J. H., Jung, B. M., Analysis of food purchases and eating out behaviors by income status: Using the consumption behavior survey for food in 2016-2019. *Korean J. Community Living Sci.*, 35, 581-594 (2024).
8. Hwang, Y. J., Hong, Y. A., Park, S. H., Choi, J. Y., A study on improving the food supply system for public meal services. Korea Rural Economic Institute (KREI), R 868 (2019).
9. Korea Agro-Fisheries & Food Trade Corporation (2025, February). Key statistics on the food and restaurant

industry in 2024. Korea Agro-Fisheries & Food Trade Corporation, Jeollanam-do, Korea.

10. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), (2024, December). Number of food poisoning cases and patients. Retrieved from https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=2761

11. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), (2023, June). Be especially careful of pathogenic *E. coli* food poisoning in summer! [Press released]. Retrieved from https://www.mfds.go.kr/brd/m_99/view.do?seq=47357&srchFr=&srchTo=&srchWord=%EB%8C%80%EC%9E%A5%EA%B7%A0&srchTp=0&itm_seq_1=0&itm_seq_2=0&multi_itm_seq=0&company_cd=&company_nm=&Data_stts_gubun=C9999&page=1

12. Kaper, J. B., Nataro, J. P., Mobley, H. L., Pathogenic *Escherichia coli*. *Nat. Rev. Microbiol.*, 2, 123-140 (2004).

13. Nataro, J. P., Kaper, J. B., Diarrheagenic *Escherichia coli*. *Clin. Microbiol. Rev.*, 11 (1998).

14. Serapio-Palacios, A., Finlay, B. B., Dynamics of expression, secretion and translocation of type III effectors during enteropathogenic *Escherichia coli* infection. *Curr. Opin. Microbiol.*, 54, 67-76 (2020).

15. Ochoa, T. J., Barletta, F., Contreras, C., Mercado, E., New insights into the epidemiology of enteropathogenic *Escherichia coli* infection. *Trans. Roy. Soc. Trop. Med. Hyg.*, 102, 825-856 (2008).

16. Fleckenstein, J. M., Kuhlmann, F. M., Enterotoxigenic *Escherichia coli* infections. *Curr. Infect. Dis. Rep.*, 21, 9 (2019).

17. Bamidele, O., Jiang, Z. D., Dupont, H., Occurrence of putative virulence-related genes, aatA, aggR and aaiC, of Enteroaggregative *Escherichia coli* (EAEC) among adults with travelers' diarrhea acquired in Guatemala and Mexico. *Microb. Pathog.*, 128, 97-99 (2019).

18. Karch, H., Tarr, P. I., Bielaszewska, M., Enterohaemorrhagic *Escherichia coli* in human medicine. *Int. J. Med. Microbiol.*, 295, 405-418 (2005).

19. Goldwater, P. N., Bettelheim, K. A., Treatment of enterohemorrhagic *Escherichia coli* (EHEC) infection and hemolytic uremic syndrome (HUS). *BMC Med.*, 10, 12 (2012).

20. Nguyen, Y., Sperandio, V., Enterohemorrhagic *E. coli* (EHEC) pathogenesis. *Front. Cell. Infect. Microbiol.*, 2 (2012).

21. van den Beld M. J. C., Reubsaet F. A. G., Differentiation between Shigella, enteroinvasive *Escherichia coli* (EIEC) and noninvasive *Escherichia coli*. *Eur. J. Clin. Microbiol. Infect. Dis.*, 31, 899-904 (2012).

22. Servin, A. L., Pathogenesis of human diffusely adhering *Escherichia coli* expressing Afa/Dr adhesins (Afa/Dr DAEC): Current insights and future challenges. Clin. Microbiol. Rev., 27, 4 (2014).

23. Yang, S. C., Lin C. H., Aljuffali, I. A., Fang, J. Y., Current pathogenic *Escherichia coli* foodborne outbreak cases and therapy development. Arch. Microbiol., 199, 811-825 (2017).

24. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS). 2024. Food code, Notification, No. 2024-71. MFDS, Chungcheongbuk-do, Korea. Retrieved from https://various.foodsafetykorea.go.kr/fsd/#/ext/Document/FC

25. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS). 2013. Notification of partial revision of food standards and specifications, No. 2013-204. MFDS, Chungcheongbuk-do, Korea. Retrieved from https://www.foodsafetykorea.go.kr/foodcode/01_03.jsp?idx=10042

26. Alhadlaq, M. A., Aljurayyad, O. I., Almansour, A., Al-Akeel, S. I., Alzahrani, K. O., Alsalman, S. A., Yahya, R., Al-Hindi, R. R., Hakami, M. A., Alshahrani, S. D., Alhumeed, N. A., Al Moneea, A. M., Al-Seghayer, M. S., AlHarbi, A. L., AL-Reshoodi, F. M., Alajel, S., Overview of pathogenic *Escherichia coli*, with a focus on shiga toxin-producing serotypes, global outbreaks (1982-2024) and food safety criteria. Gut Pathogens, 16, 57 (2024).

27. Helge, K., Phillip, I.T., Martina, B., Enterohaemorrhagic *Escherichia coli* in human medicine. Int. J. Med. Microbiol., 295, 405-418 (2005).

28. Food and Drug Administration (FDA), FDA Food Code 2022, U.S. Food and Drug Administration, Maryland, USA, Annex 4 - 8.

29. Chen, C., Coronel-Aguilera, C. P., Applegate B. M., Gehring, A. G., Bhunia, A. K., Paoli, G. C., Studies on simultaneous enrichment and detection of *Escherichia coli* O157:H7 during sample shipment. Foods, 11, 3653 (2022).

30. Centers for Disease Control and Prevention (CDC), (2024, December). National Outbreak Reporting System. Retrieved from https://data.cdc.gov/Foodborne-Waterborne-and-Related-Diseases/NORS/5xkq-dg7x/data_preview

31. Irvin, K., Viazis, S., Fields, A., Seelman, S., Blickenstaff, K., Gee, E., Wise, M. E., Marshall, K. E., Gieraltowski, L., Harris, S., An overview of traceback investigations and three case studies of recent outbreaks of *Escherichia coli* O157: H7 infections linked to romaine lettuce. J. Food Prot., 84, 1340-1356 (2021).

32. Lim, M. A., Kim, J. Y., Acharya, D., Bajgain, B. B., Park, J. H., Yoo, S. J., Lee, K., A diarrhoeagenic enteropathogenic escherichia coli (EPEC) infection outbreak that occurred among elementary school children in Gyeongsangbuk-Do province of South Korea was associated with consumption of water-contaminated food items. Int. J. Environ. Res. Public Health, 17, 3149 (2020)

33. Kashima, K., Sato, M., Osaka, Y., Sakakida, N., Kando, S., Ohtsuka, K., Doi, R., Chiba, Y., Takase, S., Fujiwara, A., Shimada, S., Ishii, R., Mizokoshi, A., Takano, M., Lee, K., Iyoda, S., Honda, A., An outbreak of food poisoning due to *Escherichia coli* serotype O7:H4 carrying astA for enteroaggregative *E. coli* heat-stable enterotoxin1 (EAST1). Epidemiol Infect., 149, 244 (2021).

34. Lee, H., Kim, J., Nam, H., Choi, J., Lee, D., Park, S., Lim, J., Cheon, Y., Choi, J., Park, J., Case report for a large-scale food poisoning outbreak that occurred in a group food service center in Chungnam, Korea, J Environ. Health Sci., 46, 525-531 (2020).

35. Heo, N., Lee, J., Kim, Y., Lee, D., Heo, S. J., Park, Y. S., Yun, J. W., Kim, Y. C., The epidemiological and clinical characteristics of the largest outbreak of enterohemorrhagic *Escherichia coli* in Korea. J. Korean Med. Sci., 38, 117 (2023).

36. Mulchandani, R. Clare Brehmer, C., Butt, S., Vishram, B., Harrison, M., Marchant, E., Ferris, S., Jorgensen, F., Smith, R., Godbole, G., Jenkins, C., Dallman, T. J., Verlander, N. Q., Phin, N., Todkill, D., Gharbia, S., Hawker , J., Outbreak of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* O157 linked with consumption of a fast-food product containing imported cucumbers, United Kingdom, August 2020. *J. Infect. Dis.*, 110, 62-68 (2021)

37. Smith, C., Griffiths, A., Allison, S., Hoyano, D., Hoang, L., *Escherichia coli* O103 outbreak associated with minced celery among hospitalized individuals in Victoria, British Columbia, 2021. Can. Commun. Dis. Rep., 48, 46-50 (2022).

38. Centers for Disease Control and Prevention (CDC), 2018. Surveillance for foodborne disease outbreaks united states, 2009-2015. U.S department of health and Human services, Washington, D. C., USA, pp. 1-11.

39. Centers for Disease Control and Prevention (CDC), Surveillance for foodborne disease outbreaks united states, 2016. U.S department of health and Human services, Washington, D. C., USA, pp. 10-18.

40. Kwak, H., Kim, M., Hwang, J., Jeong, J., Heo, E., Jeong, W., Lee, J., Ahn, E., Kim, S., Bae, Y., Lee, M., Seo, S., Hwang, S., Lee, W., Jeong, M., & Nam, K. 2018. Characteristics and risk assessment of anti-acidic pathogenic *E. coli* in Kimchi. National Institute of Food and Drug Safety Evaluation, Chungcheongbuk-do, Korea.

41. Heredia, N., García, S., Animals as sources of food-borne pathogens: A review. Anim. Nutr., 4, 250-255 (2018).

42. Arthur, T. M., Bosilevac, J. M., Nou, X., Shackelford, S. D., Wheeler, T. L., Kent, M. P., Jaroni, D., Pauling, B., Allen, D. M., Koohmaraie, M., *Escherichia coli* O157 prevalence and enumeration of aerobic bacteria, Enterobacteriaceae, and *Escherichia coli* O157 at various steps in commercial beef processing plants. J. Food Prot., 67, 658-665 (2004).

43. Aslam, M., Nattress, M., Greer, G., Yost, C., Gill, C., McMullen, L., Origin of contamination and genetic diversity of *Escherichia coli* in beef cattle. Appl. Environ. Microbiol, 69, 5 (2003).

44. Huang, L., Sheen, S., Quantitative analysis of vertical translocation and lateral cross-contamination of *Escherichia coli* O157:H7 during mechanical tenderization of beef. J. Food Saf., 31, 108-114 (2011).

45. Luchansky, J.B., Porto-Fett, A.C., Shoyer, B., Phebus, R.K., Thippareddi, H., Call, J.E., Thermal inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 in blade-tenderized beef steaks cooked on a commercial open-flame gas grill. J. Food Prot., 72, 1404-1411 (2009).

46. Luchansky, J. B., Porto-Fett, A.C.S., Shoyer, B.A.,

Call, J. E., Schlosser, W., Shaw, W., Bauer, N., Latimer, H., Inactivation of shiga toxin-producing O157:H7 and non-O157:H7 shiga toxin-producing *Escherichia coli* in brine-injected, gas-grilled steaks. J. Food Prot., 74, 1054 - 1064 (2011).

47. Smith, B. A., Fazil, A., Lammerding, A. M., A risk assessment model for *Escherichia coli* O157:H7 in ground beef and beef cuts in Canada: Evaluating the effects of interventions. Food Control, 29, 364 - 381 (2013).

48. Luna-Guevara, J. J., Arenas-Hernandez, M. M. P., Martínez de la Peña, C., Silva, J. L., Luna-Guevara, M. L., The role of pathogenic *E. coli* in fresh vegetables: Behavior, contamination factors, and preventive measures. Int. J. Microbiol., 2894328 (2019).

49. Nam, G. W., Jeong, M., Heo, E. J., Chang, O. K., Kim, M. G., Kwak, H. S., Suh, S. H., Quantitative microbial risk assessment of pathogenic *Escherichia coli* in commercial kimchi in South Korea. Food Sci. Biotechnol., 30, 1455 - 1464 (2021).

50. Kim, Y. K., Zheng, Z. B., Shin, D. H., Growth inhibitory effects of kimchi (Korean traditional fermented vegetable product) against Bacillus cereus, Listeria monocytogenes, and Staphylococcus aureus. J. Food Prot., 71, 325 - 332 (2008).

51. Inatsu, Y., Bari, M. L., Kawasaki, S., Isshiki, K., Survival of *Escherichia coli* O157: H7, Salmonella enteritidis, Staphylococcus aureus, and Listeria monocytogenes in Kimchi. J. Food Prot., 67, 1 - 3 (2004).

52. Choi, Y., Lee, S., Kim, H. J., Lee, H., Kim, S., Lee, J., Ha, j., Oh, H., Choi, K. H., Yoon, Y., Pathogenic *Escherichia coli* and Salmonella can survive in Kimchi during fermentation. J. Food Prot., 81, 942 - 946 (2018).

53. Ban, G. B., Kang, D. H., Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, Salmonella Typhimurium, and Listeria monocytogenes on cherry tomatoes and oranges by superheated steam. Food Res. Int., 112, 38 - 47 (2018).

54. Kim, S. S., Park, S. H., Kim, S. H., Kang, D. H., Synergistic effect of ohmic heating and UV-C irradiation for inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, Salmonella Typhimurium and Listeria monocytogenes in buffered peptone water and tomato juice. Food control, 102, 69 - 75 (2019).

55. Snelling, J., Malekmohammadi, S., Bergholz, T. M., Ohm, J., Simsek, S., Effect of vacuum steam treatment of hard red spring wheat on flour quality and reduction of *Escherichia coli* O121 and Salmonella Enteritidis PT 30. J. Food Prot., 83, 836 - 843 (2020).

56. Ziuzina, D., Misra, N.N., Han L., Cullen, P.J., Moiseev T., Mosnier J.P., Keener K., Gaston, E., Vilaró I., Bourke, P., Investigation of a large gap cold plasma reactor for continuous in-package decontamination of fresh strawberries and spinach. Innov. Food Sci. Emerg. Technol., 59, 102229 (2020).

57. Shah, U., Ranieri, P., Zhou, Y., Schauer, C. L., Miller, V., Fridman, G., Sekhon, J. K., Effects of cold plasma treatments on spot-inoculated *Escherichia coli* O157:H7 and quality of baby kale (Brassica oleracea) leaves. Innov. Food Sci. Emerg. Technol., 57, 102104 (2019).

58. Timmons, C., Pai, K., Jacob, J., Zhang, G., Ma, L. M., Inactivation of Salmonella enterica, Shiga toxin-producing *Escherichia coli*, and Listeria monocytogenes by a novel surface discharge cold plasma design. Food Control, 84, 455 - 462 (2018).

59. Stratakos, A. C., Grant, I. R., Evaluation of the efficacy of multiple physical, biological and natural antimicrobial interventions for control of pathogenic *Escherichia coli* on beef. Food Microbiol., 209 - 218 (2018).

60. Lieberman, V. M., Morgan, E. W., Harris, L. J., Reduction of *Escherichia coli* O157:H7, Listeria monocytogenes, and Salmonella on whole yellow onions (Allium cepa) exposed to hot water. J. Food Prot., 84, 1965 - 1972 (2021).

61. Ying Zou, Y., Yu, Y., Cheng, L., Li, L., Zou, B., Wu, J., Zhou, W., Li, J., Xu, Y., Effects of curcumin-based photodynamic treatment on quality attributes of fresh-cut pineapple. LWT-Food Sci. Technol., 141, 110902 (2021).

62. Kalchayanand, N., Worlie, D., Wheeler, T., A novel aqueous ozone treatment as a spray chill intervention against *Escherichia coli* O157:H7 on surfaces of fresh beef. J. Food Prot., 82(11), 1874 - 1878 (2019).

63. Rivera, J., Deliephan, A., Dhakal, J., Aldrich, C. G., Siliveru, K., Significance of sodium bisulfate (SBS) tempering in reducing the *Escherichia coli* O121 and O26 load of wheat and its effects on wheat flour quality. Foods, 10, 1479 (2021).

64. Lee, E. S., Kim, J. H., Oh, M. H., Inhibitory effects of combinations of chemicals on *Escherichia coli*, Bacillus cereus, and Staphylococcus aureus biofilms during the clean-in-place process at an experimental dairy plant. J. Food Prot., 83, 1302-1306 (2020).

65. Waturangi, D. E., Kasriady, C. P., Guntama, G., Sahulata, A. M., Lestari, D., Magdalena, S., Application of bacteriophage as food preservative to control enteropathogenic *Escherichia coli* (EPEC). BMC Res Notes., 14, 336 (2021).

66. Jagannathan, B. V., Kitchens, S., Vijayakumar, P. P., Price, S., Morgan, M., Efficacy of bacteriophage cocktail to control *E. coli* O157:H7 contamination on baby spinach leaves in the presence or absence of organic load. Microorganisms., 9, 544 (2021).

67. Snyder, A. B., Perry, J. J., Yousef, A. E., Developing and optimizing bacteriophage treatment to control enterohemorrhagic *Escherichia coli* on fresh produce. Int. J. Food Microbiol., 236, 90-97 (2016).

68. Trząskowska, M., Dai, Y., Delaquis, P., Wang, S., Pathogen reduction on mung bean reduction of *Escherichia coli* O157:H7, Salmonella enterica and Listeria monocytogenes on mung bean using combined thermal and chemical treatments with acetic acid and hydrogen peroxide. Food Microbiol., 76, 62-68 (2018).

69. Meira, N. V. B., Holley R. A., Bordin, K., Macedo, R. E. F., Luciano, F. B., Combination of essential oil compounds and phenolic acids against *Escherichia coli* O157:H7 in vitro and in dry-fermented sausage production. Int. J. Food Microbiol., 260, 59-64 (2017).

70. Lee, E. J., Park, S. H., Antimicrobial effect of combination treatment with high pressure processing and mild heat against foodborne pathogens in apple puree. Food Bioprocess Technol., 17, 736-746 (2024).

71. Xue, W., Macleod, J., Blaxland, J., The use of ozone technology to control microorganism growth, enhance food safety and extend shelf life: A promising food decontamination technology. Foods, 12, 814 (2023).

72. Oechslin, F., Resistance development to bacteriophages occurring during bacteriophage therapy. Viruses, 10, 351 (2018).

73. Ge, H., Fu, S., Guo, H., Hu, M., Xu, Z., Zhou, X., Chen, X., Jiao, X., Application and challenge of bacteriophage in the food protection. Int. J. Food Microbiol., 380, 109872 (2022).

74. Wei, X., Lau, S. K., Reddy, B. S., Subbiah, J., A microbial challenge study for validating continuous radio frequency assisted thermal processing pasteurization of egg white powder. Food Microbiol., 85, 103306 (2020).

75. Basavaraju, M., Gunashree, B. S., 2022. *Escherichia coli* - Old and new insights. IntechOpen, London, UK. https://doi.org/ 10.5772/intechopen.105508.