클로스트리디움 퍼프린젠스에 의한 식중독 발생 현황과 저감화 연구 동향–집단급식소와 식품접객업소 중심으로

Current Status of Foodborne Outbreaks Caused by *Clostridium perfringens* and Trends in Reduction Strategies: Focusing on Institutional Food Services and Food Service Establishments

주동규[1] · 허지원[1] · 이기원[2] · 김선애[3] · 최창순[4] · 이민석[5] · 조태진[1,2*]

Dong Kyu Joo[1]·Ji Won Heo[1]·Ki Won Lee[2]·Sun Ae Kim[3]·Chang Sun Choi[4]·Min Suk Rhee[5]·Tae Jin Cho[1,2*]

[1]고려대학교 식품규제과학과, [2]고려대학교 식품생명공학과, [3]이화여자대학교 식품생명공학과, [4]중앙대학교 식품영양학과, [5]고려대학교 생명공학과

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

조 태 진

Correspondence to
Tae Jin Cho, Department of Food and Biotechnology, Department of Food Regulatory Science, Korea University, Sejong, Korea
Tel.: +82-44-860-1433,
Fax: +82-44-860-1586
E-mail: microcho@korea.ac.kr

서론

한국의 외식 및 단체급식 산업은 지속적으로 성장하고 있으며, 이는 현대 사회의 변화와 밀접한 연관이 있다. 특히, 1인 가구의 증가와 맞벌이 가정의 확대는 가정 내 조리 빈도를 낮추고, 외식이나 단체급식을 선택하는 소비자를 늘리는 주요 요인으로 작용하고 있다 [1]. 이러한 식문화의 변화는 편리성과 효율성을 높이는 긍정적인 측면이 있는 반면, 대규모 조리 및 단체 급식을 통한 식중독 발생 가능성을 증가시키는 부작용을 동반한다 [2].

실제로 최근 몇 년간의 통계를 살펴보면, 식중독 사고의 발생 빈도와 규모 모두 증가하는 추세를 보이고 있다. 2020년 한 해 동안 보고된 식중독 발생 건수는 164건, 환자 수는 2,534명이었으나 2023년에는 발생 건수가 359건으로 증가했고, 환자 수도 8,789명에 이르렀다 [3]. 이는 각각 2.19배, 3.27배의 증가율을 보인 것으로, 단순히 식중독 발생 건수가 늘어난 것뿐만 아니라, 한 번의 사고로 인해 더 많은 사람이 영향을 받는 집단 식중독의 위험성이 높아진 것을 보여준다.

집단 식중독은 일반적인 개별 식중독보다 더 많은 사람들에게 영향을 미치며, 식품 공급망 전반에 걸쳐 심각한 위기를 초래할 가능성이 높다 [4]. 따라서 식중독이 발생한 경우, 정확한 원인 규명과 재발 방지를 위한 조사가 필수적이다. 그러나 다수의 원인이 복합적으로 작용하고 발생 경로가 명확하지 않은 경우가 많아 효과적인 원인 분석은 현실적인 어려움에 직면하고 있다 [5]. 이에 따라, 집단 식중독의 증가 문제에 대응하기 위해 국가 차원의 체계적인 대응 체계 구축이 필수적이며 식중독 유해인자 및 위해요소를 과학적으로 분석하고 효과적인 관리 방안을 마련하는 것이

중요한 과제로 대두되고 있다.

클로스트리디움 퍼프린젠스(*Clostridium perfringens*)는 외식 및 단체급식을 원인으로 하는 식중독의 대표적인 원인 병원체로 보고되고 있다. 질병관리청에 따르면 최근 2019년에서 2023년까지 클로스트리디움 퍼프린젠스에 의한 식중독 발생 건수는 57건으로 보고되었는데, 이는 타 주요 식중독균에 의한 발생 건수와 비교했을 때 상대적으로 낮은 수준이다(Figure 1) [6)7)8)9)]. 그러나 같은 기간 해당 식중독에 의한 환자 수는 2,439명으로 한 번 발생하면 다수의 환자가 발생하는 특성을 보였다. 이는 클로스트리디움 퍼프린젠스 식중독이 주로 집단 급식 환경에서 발생하며, 대량 조리된 음식이 적절히 관리되지 못했을 때 감염 위험이 급격히 증가한다는 특성에 기인하는 것으로 판단된다.

본 논문에서는 집단 식중독의 주요 원인균인 클로스트리디움 퍼프린젠스의 위험성을 시사하기 위해 국내에서 발생한 검출 · 발병 사례를 바탕으로 클로스트리디움 퍼프린젠스 식중독의 원인 식품과 역학적 특징을 파악하였다. 이를 통해 현재까지 보고된 주요 감염 경로를 확인하고, 고위험 식품군을 특정함으로써 효과적인 예방 전략을 마련하는 데 기여하고자 한다. 또한, 클로스트리디움 퍼프린젠스 식중독을 예방하기 위한 저감화 연구의 최신 동향을 살펴보고, 기존 저감화 방법의 장단점을 분석하여 실질적으로 외식업 및 단체급식소와 같은 대량 조리 환경에 적용될 수 있는 실질적 · 실용적 위해관리 전략을 제안하는 데 연구의 초점을 맞추었다. 이에 본 논문은 클로스트리디움 퍼프린젠스에 의한 집단 식중독의 발생 위험을 줄이는 데 기여할 뿐만 아니라, 보다 과학적이고 체계적인 식품 안전 관리 정책 수립의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

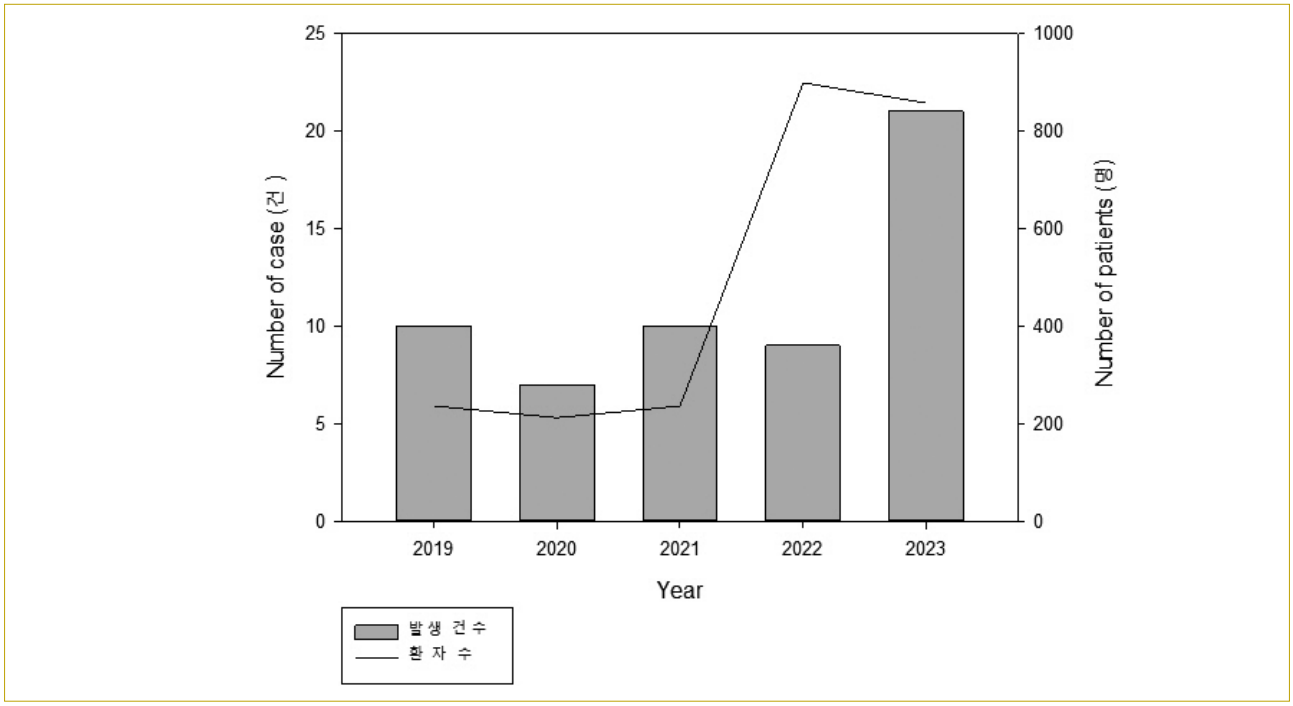

Figure 1. 2019 – 2023 Current status of *Clostridium perfringens* infections in South Korea

본론

1. 클로스트리디움 퍼프린젠스 특성

클로스트리디움 퍼프린젠스는 대표적인 혐기성 세균으로 토양, 물, 동물 및 인간의 장관 등 다양한 환경에서 흔히 발견된다 [10]. 이러한 특성으로 인해 식재료에 쉽게 오염될 수 있으며, 특히 단백질이 풍부한 식품에서 빠르게 증식하는 경향이 있어 식중독 및 기타 감염증의 원인이 된다 [11]. 감염이 발생하면 가벼운 설사에서 심각한 괴사성 장염(necrotizing enteritis)까지 다양한 임상 증상을 유발할 수 있어 공중보건 측면에서 매우 중요한 병원체 중 하나로 평가된다.

클로스트리디움 퍼프린젠스는 생성하는 독소의 종류에 따라 A형, B형, C형, D형, E형으로 분류된다. 각 유형에 따라 발생 질환과 주 감염 대상이 다른데 B형, D형, E형 클로스트리디움 퍼프린젠스는 주로 가축 질병을 유발한다. B형과 E형은 출혈성 장염을 일으키며, D형은 장독혈증(enterotoxemia)을 일으키는 것으로 알려져 있다. 앞의 3가지 유형과 다르게 A형과 C형은 사람을 감염시키기 때문에 주요 식중독 원인체의 유형으로 간주된다 [13].

C형 클로스트리디움 퍼프린젠스는 단순한 설사뿐만 아니라 괴사성 장염을 유발할 수 있으며, 이는 장 조직의 괴사를 초래하고 심한 경우 장 천공과 패혈증이 진행될 수 있다 [14]. 특히 영양 상태가 불량하거나 면역력이 약한 개인에게 감염이 발생할 경우 매우 치명적이다. 다만 한국에서는 C형 클로스트리디움 퍼프린젠스에 의한 괴사성 장염 사례가 보고된 적은 없다. 한국에서 보고되는 클로스트리디움 퍼프린젠스 식중독 사례는 모두 A형에 의해 발생하는 것으로 보고되었다 [15]. 이는 A형이 환경에서 생존력이 강하고, 다양한 식품에서 증식할 수 있는 능력을 갖고 있기 때문으로 추정된다.

A형 클로스트리디움 퍼프린젠스는 강력한 독성을 가진 알파(alpha; α) 독소를 주요 병원성 인자로 생성한다. 이 독소는 포스폴리페이스 C(phospholipase C)의 일종으로 세포막의 인지질을 분해하여 세포 손상을 유도하고, 조직 괴사를 촉진한다 [16]. 일부 A형 균주는 클로스트리디움 퍼프린젠스 엔테로톡신(*Clostridium perfringens* enterotoxin, CPE)을 생산할 수 있는데, 이 독소는 장 상피세포의 투과성을 증가시켜 대량의 수분 및 전해질 손실을 초래함으로써 설사 증상을 유발한다 [17]. 엔테로톡신을 생성하는 균주에 오염된 식품을 섭취하면 수 시간 내에 급성 식중독 증상이 나타날 수 있으며, 집단 급식 시설에서 발생하는 식중독의 주요 원인으로도 알려져 있다.

Table 1. Report on *Clostridium perfringens* foodborne outbreaks in South Korea

Year	Location	Causative pathogen	Causative agent	Number of infections
2008. 12	OO Wedding Hall	*C. perfringens*	Bulgogi	87
2009. 03	OO Academy	*C. perfringens*	Spicy Braised Chicken	121
2009. 09	OO University	*C. perfringens*	Seasoned Marinated Crab	118
2011. 05	OO Packed Meal Company	*C. perfringens*	Spicy Braised Chicken	84
2011. 04	OO High School	*C. perfringens*	Rice Balls	Not Confirmed
2013. 06	OO High School	*C. perfringens*	Salted Mackerel	19
2014. 03	OO Middle School	*C. perfringens*	Blueberry Jokbal	150
2018. 05	OO University Dormitory	*C. perfringens*	Barbecue Grill	105
2020. 06	Group Catering Facility	*C. perfringens*	Curry Rice	92
2021. 04	OO Elementary School	*C. perfringens*	Spicy Braised Chicken	Around 40
2022	Local Festival	*C. perfringens*	Braised Beef	399
2022. 04	Construction Site	*C. perfringens*	Spicy Braised Chicken	89

2. 클로스트리디움 퍼프린젠스 검출 사례 및 역학분석

2.1 클로스트리디움 퍼프린젠스 검출 및 감염 사례

국내에서는 질병관리청의 역학조사 연보를 통해 클로스트리디움 퍼프린젠스에 의한 식중독 사례가 지속적으로 보고되고 있으며, 주로 학교, 기숙사, 축제와 같은 집단급식소에서 발생한다 [18]. 이는 대량 조리된 음식이 실온에서 장시간 방치되거나 가열 및 냉각 과정에서 적절한 온도 관리가 이루어지지 않아 클로스트리디움 퍼프린젠스가 증식하였기 때문으로 추정된다.

국내 주요 사례를 살펴보면, 2008년 12월 한 결혼식장에서 제공된 불고기로 인해 87명이 감염되었으며, 2009년 3월에는 한 학원에서 닭볶음탕 섭취 후 121명의 집단감염이 발생하였다(Table 1). 이는 대량 조리된 닭볶음탕이 충분한 냉각 과정을 거치지 않고 보관하여 식중독이 유발한 것으로 밝혀졌다 [19]. 또한, 2021년 4월 한 초등학교

Table 2. Suspected sources of *Clostridium perfringens* foodborne outbreaks reported in the outbreak database of National Outbreak Reporting System

Year	Causative Agent
2014	Unknown
2014	Chicken
2014	Sauce
2015	Turkey
2015	Beef
2015	Unknown
2015	Meat
2016	Unknown
2016	Beef
2016	Gravy
2016	Ramen Noodles
2016	Rice, Beans, Salad
2016	Chicken
2016	Beans
2017	Unknown
2017	Rice, Tamale Pie
2017	Jambalaya
2017	Chili
2017	Pork
2017	Potatoes
2017	Beef
2017	Beans
2017	Chicken
2017	Tamale Pie
2018	Unknown
2018	Brunswick Stew
2018	Rice, Beans
2023	Unknown

와 2022년 건설 현장 모두 닭볶음탕이 원인 식품으로 감염 사례가 보고되었다. 특히, 2011년 4월 한 고등학교에서 주먹밥을 통한 감염 사례가 보고되었으며, 클로스트리디움 퍼프린젠스의 주요 독소인 엔테로톡신이 검출되었다. 주먹밥 속에 포함된 익힌 제육고기와 김가루에도 동일한 균이 검출되었으며, 이는 조리 후 과정에서의 부적절한 관리로 인해 독소가 생성된 것으로 분석되었다 [20]. 이 사례는 대량 조리 후 장시간 실온에 보관할 시에도 균 증식은 물론 독소도 형성될 수 있다는 가능성을 제시하였다는 점에서 조리 후 보관 온도 및 냉각 관리의 중요성을 강조하고 있다.

미국의 National Outbreak Reporting System (NORS)에 따르면, 클로스트리디움 퍼프린젠스는 주로 소고기, 닭고기 등에서 검출되며, 특히 대량 조리된 음식을 실온에 장시간 보관함으로써 식중독이 해당 식품군에 의해 빈번히 발생하는 것으로 보고되었다(Table 2). 예를 들어, 2021년 5월 한 종교 시설에서 제공된 치킨 타코로 57명이 감염되었고, 같은 해 6월 케이터링 업체에서 제공된 육류로 인해 61명이 감염되었다(Table 3). 이러한 사례는 불충분한 가열 및 냉각 과정, 부적절한 온도 관리 등 대량 식품 취급 과정에서 발생할 수 있는 문제와 식품 내 클로스트리디움 퍼프린젠스에 의한 식중독 위험의 연계성을 시사하였다 [21]. 또한 식품을 보관하는 용기 및 내부 통기 문제로 인해 균 증식이 촉진되었을 가능성이 제기된다. 이는 내부 통기가 제대로 되지 않는 보관 용기 내 식품의 냉각 속도가 상대적으로 느려질 수 있으며, 식품의 내부 열 순환이 원활하지 않아 클로스트리디움 퍼프린젠스가 집중적으로 증식할 가능성 또한 높아질 수 있기 때문이다 [22].

Li 등(2019)의 연구에서는 육류 식품의 빠른 냉각과 느린 냉각 조건에서 클로스트리디움 퍼프린젠스의 생장 정도를 분석하였으며, 약 55℃부터 4℃까지 빠른 속도로 냉각(1 – 4시간)하는 경우에는 기존 약 3 log CFU/g' 수준이었던 클로스트리디움 퍼프린젠스 균수의 변화가 거의 나타나지 않은 것과 달리 느린 냉각(6 – 16시간)의 경우 약 3 $\log_{10}$ CFU/g 수준에서 약 8 log CFU/g' 까지의 균수 증가가 확인되었다 [23]. 이는 오염된 상태로 조리된 식품의 빠른 냉각이 중요하다는 점을 강조한다. 이와 같은 클로스트

Table 3. Report on *Clostridium perfringens* foodborne outbreaks by the U.S. CDC

Year	Location	*Causative pathogen*	Causative Agent	Number of infections
2020. 01	Caterer (food prepared off–site from where served)	*C. perfringens*	curry chicken; pelau dish; curry chick peas w/ potatoes	7
2019. 12	Private home/residence; Caterer (food prepared off–site from where served)	*C. perfringens*	unknown	14
2019. 05	Restaurant – Sit–down dining	*C. perfringens*	pork, smoked	9
2019. 08	Prison/jail	*C. perfringens*	unknown	25
2019. 08	Restaurant – Sit–down dining	*C. perfringens*	unknown	5
2020. 02	Restaurant – Sit–down dining	*C. perfringens*	unknown	10
2018. 07	Restaurant – Sit–down dining	*C. perfringens*	unknown	7
2019. 04	Restaurant – "Fast–food"(drive up service or pay at counter)	*C. perfringens*	unknown	6
2019. 05	Restaurant – "Fast–food"(drive up service or pay at counter)	*C. perfringens*	unknown	5
2019. 10	Other	*C. perfringens*	unknown	22
2020. 06	Restaurant – Sit–down dining	*C. perfringens*	unknown	4
2020. 02	Restaurant – Sit–down dining	*C. perfringens*	queso dip	2

Table 3. Report on Clostridium perfringens foodborne outbreaks by the U.S. CDC (continue)

Year	Location	*Causative pathogen*	Causative Agent	Number of infections
2019. 09	Restaurant – Sit–down dining	*C. perfringens*	unknown	5
2020. 11	Restaurant – Sit–down dining	*C. perfringens*	unknown	3
2020. 12	Restaurant – Sit–down dining	*C. perfringens*	refried beans	4
2021. 01	Restaurant – other or unknown type	*Norovirus; C. perfringens*	unknown	3
2021. 01	Private home/residence	*C. perfringens*	unknown	8
2020. 09	Restaurant – Sit–down dining; Grocery store	*Bacillus cereus; C. perfringens*	carne asada; burrito, chicken	3
2021. 03	Restaurant – Sit–down dining	*C. perfringens*	unknown	4
2021. 03	Restaurant – other or unknown type; Caterer (food prepared off–site from where served)	*C. perfringens*	green chili; refried beans	42
2021. 05	Restaurant – Sit–down dining	*C. perfringens*	steak	2
2021. 05	Religious facility	*C. perfringens*	chicken taco	57
2021. 05	Private home/residence	*C. perfringens*	unknown	21
2021. 06	Caterer (food prepared off–site from where served)	*C. perfringens*	steak, beef tips	61

Table 3. Report on *Clostridium perfringens* foodborne outbreaks by the U.S. CDC (continue)

Year	Location	*Causative pathogen*	Causative Agent	Number of infections
2021. 05	Prison/jail	*C. perfringens*	unknown	81
2021. 07	Restaurant – Sit–down dining	*C. perfringens; Bacillus cereus*	unknown	7
2021. 04	Restaurant – Buffet	*C. perfringens*	gravy, sausage	59
2021. 08	Restaurant – "Fast–food"(drive up service or pay at counter)	*Bacillus cereus; C. perfringens*	cubano sandwich	66
2020. 05	Restaurant – Sit–down dining	*Bacillus cereus; C. perfringens*	unknown	6
2021. 09	Restaurant – Sit–down dining	*C. perfringens*	unknown	5
2021. 08	Caterer (food prepared off–site from where served)	*C. perfringens*	unknown	65
2021. 08	Caterer (food prepared off–site from where served)	*C. perfringens*	burritos	57
2021. 04	Restaurant – Sit–down dining	*C. perfringens*	unknown	4
2021. 11	Restaurant – other or unknown type; Caterer (food prepared off–site from where served)	*C. perfringens; Staphylococcus aureus*	unknown	60
2021. 11	Restaurant – Sit–down dining	*C. perfringens*	unknown	6

리디움 퍼프린젠스의 생장 특성 연구 결과를 기반으로 미국 질병통제 예방센터(Centers for Disease Control and Prevention, CDC)에서는 조리된 음식을 2시간 이내에 21℃ 이하로 냉각하고, 4시간 이내에 5℃ 이하로 냉각 · 보관하는 것을 안전 관리 가이드라인으로 제시한 바 있다[24]. 특히, 클로스트리디움 퍼프린젠스는 식품의 가열 과정에서 열저항성 아포의 형태로 생존한 뒤 냉각이나 보관 과정에서 발아 및 증식할 때 유사 온도 범위에서 생장이 보고된 주요 식중독균과 비교했을 때에도 빠른 생장 속도를 나타내며, 10분 미만의 generation time이 보고된 바 있어 신속한 냉각과 적절한 보관 방법을 철저히 준수하는 것이 식중독 예방의 주요 전략으로 인식되고 있다.

2.2 클로스트리디움 퍼프린젠스 감염의 역학적 요인

국내외 식중독 관련 유관기관에서는 식중독 발생 시 원인체와 원인식품을 연계한 발병의 역학적 요인을 조사하고, 대표적인 결과를 원인조사 보고서로 제작하여 배포하고 있다. 이러한 자료에 따르면 클로스트리디움 퍼프린젠스는 단체급식 환경에서의 부적절한 관리 중 특히 식품의 온도 관리와 밀접한 관련이 있으며, 이는 혐기성 세균으로 열에 강한 아포를 형성하는 특성을 가지기 때문이다.

국내 모니터링 및 리콜 사례 분석 결과, 고춧가루를 포함한 일부 식품에서 대규모 감염 사례가 지속적으로 보고되었으며, 이를 통해 고춧가루와 식중독 간 관련성이 강조된 바 있다(Table 4). Choi 등(2021)의 연구를 통해서는 2020년 경기도 내에서 유통 중인 고춧가루 100건을 대상으로 미생물 오염도를 분석한 결과 27건에서 클로스트리디움 퍼프린젠스 검출이 보고된 바 있으며, 특히 재래시장(18건)의 검출 빈도가 대형마트(9건)보다 두 배 높게 나타나 유통 환경 및 관리 방식에 따른 차이가 존재할 수 있음을 시사하였다[25]. 한편 동 연구에서는 고춧가루의 보관 온도(30℃, 4℃, −20℃) 및 용기 종류(지퍼백, 비닐봉투)에 따른 장기 보관(7개월) 실험 결과 미생물학적 품질에는 큰 변화가 없었으나, 높은 온도(30℃)에서 저장한 고춧가루의 수분 함량과 품질 지표가 급격히 감소하여 장기 보관 시 냉장이나 냉동 보관의 필요성을 강조하였다[25]. 이를 통해 고춧가루가 건조 식품임에도 불구하고 유통 및 보관 과정에서 적절한 온도 관리가 이루어지지 않으면 클로스트리디움 퍼프린젠스 관련 위해가 증가할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 고춧가루에 의한 집단급식소 내 클로스트리디움 퍼프린젠스 오염 및 감염 발생의 예방을 위해 효과적인 원재료 관리가 필요하다.

2015년부터 2018년까지 미국 내 소매 식품점에서 발생한 클로스트리디움 퍼프린젠스 식중독 사례를 분석한 결과, 27건(79.4%)의 사례에서 사람과 관련된 식중독 발생 기여 요인이 확인되었다. 특히, 15건(55.6%)에서 근로자들이 미생물의 생존과 증식을 통제하기 위하여 요구되는 식품안전 절차를 준수하지 않은 것으로 나타났다[26]. 예를 들어, 일부 시설에서는 한 번만 재가열해야 하는 고기 조각을 세 번 재가열하는 등의 조리 방법이 사용되었다. 그

Table 4. Domestic monitoring and recall cases of *Clostridium perfringens*

Year	Category	Causative agent
2011	International Hazard Information	Radish kimchi' (Monitoring)
2014	Press Release	Red pepper (Recall)
2014	Press Release	Red pepper (Recall)
2016	Press Release	Red pepper (Recall)
2017	Press Release	Red pepper (Monitoring)
2018	Press Release	Powdered Infant Formula (Recall)
2021	Academic Reference	Red pepper (Monitoring)
2023	Press Release	Red pepper (Recall)

외에도 다수의 시설에서 재가열, 냉장, 보온 및 실온 보관 과정을 중심으로 온도 관리의 문제점이 보고된 바 있어 식품의 온도를 정기적으로 모니터링하고 이를 제어하는 절차가 필수적임이 강조되고 있다. 또한, 18건(52.9%)의 발병 사례에서는 근로자들이 비효율적인 냉각 절차를 사용한 사례가 다수 보고되었으며, 특히 냉각 과정에서 부적절한 식품 깊이를 사용하거나 실온에서 장시간 냉각하는 등 안전하지 않은 방법이 확인되었다. 전체 발병 사례 중 14건(41.2%)에서 장비로 인해 보온이 제대로 되지 않았거나, 식품이 충분히 높은 온도에서 유지되지 못한 사례도 보고되었다. 일부 시설에서는, 보온 장비가 작동하지 않고 조리된 식품을 보관하거나, 전원이 꺼진 오븐에 식품을 보관하는 등 기본적인 온도 관리가 제대로 이루어지지 않았다[26]. 클로스트리디움 퍼프린젠스에 의한 식중독을 예방하기 위해 식품의약품안전처에서는 조리 시 중심온도를 75℃에서 1분 이상 유지하여 완전히 조리, 냉각 시 규칙적으로 저어주기, 소분하여 보관하기, 60℃ 이상에서 섭취하거나 5℃ 이하로 냉장 보관하기, 조리 후 2시간 이내에 섭취하기, 섭취 전 75℃ 이상으로 재가열하기 등의 사항을 권장하고 있다[27].

이러한 연구를 통해 강조된 바와 같이 클로스트리디움 퍼프린젠스의 식중독 예방을 위해서는 조리 및 보관 과정에서 철저한 온도 관리가 필수적이며, 식품 취급 종사자에 대한 교육과 식품안전 절차가 반드시 필요하다 [28]. 또한, 보온 장비와 냉장 장비의 정기적인 점검을 통해 모든 식품이 적절한 온도에서 보관될 수 있도록 해야 한다. 특히 식품접객업소나 집단급식소에서 이러한 관리 조치가 소홀할 경우, 클로스트리디움 퍼프린젠스 감염은 단순한 식중독을 넘어 심각한 공중보건 문제로 확대될 가능성이 크다. 따라서 식품 산업과 보건 당국은 지속적인 모니터링과 예방 조치를 강화해야 하며, 일반 소비자 또한 개인 위생과 식품 안전에 대한 경각심을 가질 필요가 있다.

3. 클로스트리디움 퍼프린젠스 저감화 연구 동향 및 제어 방안

클로스트리디움 퍼프린젠스와 같은 아포 형성 세균의 제어를 위하여 식품의 필터링 등을 활용한 직접적인 제거, 살균 처리, 인위적인 발아 유도 후 발아된 세포를 대상으로 살균기술을 처리하는 전략 등이 활용되어 왔다. 다만 직접적인 제거는 필터 통과가 가능한 액체 식품으로 적용 대상이 제한된다는 단점이 있고, 아포를 형성하는 세균의 살균은 아포 형성이 불가능한 세균에 비해 강한 처리가 필요하므로 식품접객업소나 집단급식소에 적용하기에는 한계가 있어 효과 및 효율성이 높은 기술의 발굴 · 활용이 요구된다. 클로스트리디움 퍼프린젠스에 대한 다양한 저감화 방법은 지속적으로 연구되고 있는데, 이 중 최근 5년 내 주요 연구 사례를 처리 원리에 따라 생물학적, 물리적, 화학적 3가지 방법으로 분류 · 분석한 현황은 다음 Table 5-7과 같다.

3-1 생물학적 처리 기술

생물학적 처리 기술은 미생물을 이용한 유해균 제어 방법으로 대표되며, 주로 인체 건강에 유익한 균(프로바이오틱스 등)을 중심으로 클로스트리디움 퍼프린젠스의 생장을 억제하는 연구가 수행된 바 있다 [29]. 이와 같은 방식은 식품에 유익균을 첨가하므로 적용이 용이하며, 안전성이 검증된 인체 유익균을 활용한다는 장점이 있기 때문에 식품 안전 및 공중 보건 영역에서 활발하게 연구되고 있다. 다만 생균을 이용하는 경우 식품 내에서 안정적으로 항균 효과를 발휘할 수 있는 적절한 생육 조건을 조성해야 할 필요가 있고, 고온에서 생존 가능한 클로스트리디움 퍼프린젠스와는 달리 다수의 유익균 생균은 고온에서의 활용이 제한된다는 한계점이 존재한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 생균 자체를 사용하지 않고 배양액의 원심분리를 통해 확보할 수 있는 상층액인 무세포 상등액(cell-free supernatants, CFS)을 활용한 연구가 다수 보고되고 있다. Hamad 등(2020)의 연구에서는 프로바이오틱스 균주 *Lactobacillus rhamnosus* EMCC 1105

를 이용해 계육의 냉장 보관 과정 중 무세포 상등액의 클로스트리디움 퍼프린젠스 억제능을 방식으로 평가하였는데, 약 3-4 log CFU/g 수준으로 접종된 클로스트리디움 퍼프린젠스가 4일 경과 후 무처리군에서는 약 6 log CFU/g까지 균수 증가를 나타낸 것과 달리 무세포 상등액 처리군(100 mg/g)에서는 클로스트리디움 퍼프린젠스가 검출 한계 이하 수준(Not detected)으로 사멸하였다 [30]. Shanmugasundaram 등 역시 유산균의 일종인 *Lactobacillus acidophilus*와 *Lactobacillus fermentu*의 상등액을 이용하여 클로스트리디움 퍼프린젠스의 제어 효과를 *in vitro* 및 *in vivo* 시험(가금류 검체 대상)을 통해 증명하였는데, 특히 해당 연구에서는 세균의 불활성화뿐

Table 5. Recent studies on *Clostridium perfringens* mitigation technologies (Biological)

Reduction Technology	Title	Sample	Reference
Probiotics	A lytic bacteriophage isolate reduced Clostridium perfringens induced lesions in necrotic enteritis challenged broilers	Chicken samples	Keerqin et al (2022)
	An atypical lipoteichoic acid from Clostridium perfringens elicits a broadly cross-reactive and protective immune response	Chicken intestines	Wenzel et al (2020)
	Dual Inhibition of Salmonella enterica and Clostridium perfringens by New Probiotic Candidates Isolated from Chicken Intestinal Mucosa	Medium	Lone et al (2021)
Cell-free supernatants	Commercial probiotic cell-free supernatants for inhibition of Clostridium perfringens poultry meat infection in Egypt	Chicken samples	Hamad et al (2020)
	Research Note: Effect of synbiotic supplementation on caecal Clostridium perfringens load in broiler chickens with different necrotic enteritis challenge models	Chicken samples	Shanmugasundaram et al (2020)
Surfactin	Antibacterial activity of *Bacillus* species-derived surfactin on *Brachyspira hyodysenteriae* and *Clostridium perfringens*	Medium	Horng et al (2019)

Table 6. Recent studies on *Clostridium perfringens* mitigation technologies (Physical)

Reduction Technology	Title	Sample	Reference
Thermosonication	The Effect of Thermosonication Treatment on the Inactivation of Clostridium perfringens Spores	Medium	Liang et al (2024)
Electrocoagulation	Improvement on electrochemical inactivation of Escherichia coli and Clostridium perfringens by assisted alum nanocrystallites approach: parametric and cost evaluation	Drinking water	Hayati et al (2020)
Cold Atmospheric Pressure Plasma	Decontamination of Red Pepper Using Cold Atmospheric Pressure Plasma as Alternative Technique	Red pepper powder	Abdi et al (2019)
Pasteurization	Fate of spore-forming pathogens in high and reduced Moisture, processed meat and poultry products subjected to post-packaging pasteurization	Meat and poultry products	Munoz Mendoza et al (2019)

Table 7. Recent studies on *Clostridium perfringens* mitigation technologies (chemical) (continue)

Reduction Technology	Title	Sample	Reference
Isopropoxy benzene guanidine	Pharmacokinetics and Pharmacodynamics of Colistin Combined With Isopropoxy Benzene Guanidine Against mcr−1−Positive *Salmonella* in an Intestinal Infection Model	Chicken intes−tines	Lu et al (2022)
Essential oils	The inhibitory effects of spice essential oils and rapidly prediction on the growth of *Clostridium perfringens* in cooked chicken breast	Chicken samples	Zhu et al (2020)
	Mathematical modeling of temperature and natural antimicrobial effects on germination and outgrowth of *Clostridium perfringens* in chilled chicken	Chicken samples	Wang et al (2023)
	Nigella sativa as an antibiotic alternative to promote growth and enhance health of broilers challenged with *Eimeria maxima* and *Clostridium perfringens*	Chicks	Manjunatha et al (2023)
Ellagitannins	Antimicrobial Activities of Ellagitannins against *Clostridiales perfringens*, *Escherichia coli*, *Lactobacillus plantarum* and *Staphylococcus aureus*	Medium	Puljula et al (2020)
Reuterin	Inhibitory effects of reuterin on biofilm formation, quorum sensing and virulence genes of *Clostridium perfringens*	Medium	Xu et al (2020)
Vinegar with additional ingredients	Selection and application of natural antimicrobials to control *Clostridium perfringens* in sous−vide chicken breasts	Sous vide chicken breast	Smith et al (2021)
Allyl isothiocyanate	Effect of allyl isothiocyanate on the growth and virulence of *Clostridium perfringens* and its application on cooked pork	Cooked pork	Li et al (2023)
Buffered calcium, potassium, sodium citrates	Inhibition of germination and outgrowth of *Clostridium perfringens* spores by buffered calcium, potassium and sodium citrates in cured and non−cured injected pork during cooling	Cured pork, pork	Velugoti et al (2020)
Endolysin	A Broad−Spectrum Phage Endolysin (LysCP28) Able to Remove Biofilms and Inactivate *Clostridium perfringens* Strains	Duck meat	Lu et al (2023)
Potassium lactate, sodium diacetate	Control of *Clostridium perfringens* spore germination and outgrowth by potassium lactate and sodium diacetate in ham containing reduced sodium chloride	Ham	Solano et al (2021)
Neutral electrolyzed water	Bactericidal activity of neutral electrolyzed water against *Bacillus cereus* and *Clostridium perfringens* in cell suspensions and artificially inoculated onto the surface of selected fresh produce and polypropylene cutting boards	Cutting boards, fruits & vegetables	Hamzah et al (2019)

만이 아니라 클로스트리디움 퍼프린젠스의 독소 분해 효과도 확인하여 무세포 상등액 기반 제어법의 높은 효용성을 보여주었다 [31]. 한편 무세포 상등액 내 항균 물질의 농도와 안정성 유지 측면에서는 여전히 선진 기술의 개발이

요구되며, 특정 식품 환경에서 효과가 충분히 나타나지 않아 적용 범위가 제한적일 수 있다는 단점이 존재하므로 식품 매트릭스 내 기능 저해 요인의 발굴 등의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3–2 물리적 처리 기술

클로스트리디움 퍼프린젠스의 아포는 고온, 고압 및 방사선에 높은 저항성을 나타내기 때문에 일반적인 살균 방법으로는 불활성화에 어려움이 있다 [32), 33)]. 이에 클로스트리디움 퍼프린젠스에 특화된 물리적 처리법의 개발이 필요하며 열초음파, 콜드 플라즈마(Cold Atmospheric Pressure Plasma), 펄스 광 플라즈마(Pulsed Light Plasma) 등의 기술 적용 연구 사례가 최근에 보고된 바 있다. 열초음파는 살균력이 부족한 기존 초음파 방식을 보완하기 위하여 활용되고 있는 기술로[34)], Liang 등(2025)의 연구에서는 클로스트리디움 퍼프린젠스 아포 현탁액에 26.67 W/mL, 90℃의 조건으로 30분 동안 열초음파를 처리한 결과 클로스트리디움 퍼프린젠스의 아포 불활성화 수준이 5.89 log reduction으로 나타남을 확인하였다 [35)]. 또한 해당 연구에서는 현미경과 분광분석을 통해 열초음파가 아포의 주요 막 구조를 파괴하고 세포핵의 칼슘 디피콜린산을 방출시켜 아포의 불활성화를 유도할 수 있음을 검증하였다 [35)]. 클로스트리디움 퍼프린젠스의 육류에서의 오염 사례가 다수 보고된 바 있는데, 열처리의 경우 육류 제품의 품질 저하 문제로 이어질 수 있어 비가열 처리 기술의 개발이 보고되어왔다. Kramer 등(2017)의 연구에 따르면 8 · 39 μJ cm − 2 per pulse의 펄스 광 플라즈마를 처리하였을 때, 음용수에 접종된 클로스트리디움 퍼프린젠스를 대상으로 한 약 2 log reduction 수준의 저감화 효과가 온도 변화 없이 나타날 수 있음을 입증하였다 [36)]. Lee 등(2019)의 연구에서는 비가열 처리 기술로서 고압 처리법을 이용하였으며, 4.0 – 4.6 log CFU/g 수준의 클로스트리디움 퍼프린젠스가 접종된 소시지를 20℃에서 5주 간 보관한 이후 7.2 log CFU/g'로 균수가 증가한 무처리군과 달리 3.8 log CFU/g' 수준의 균수를 나타내 생장 저해에 효과를 나타냈다. 이와 같은 물리적 처리 기술은 식품에 직접적인 물질의 첨가를 하지 않고도 클로스트리디움 퍼프린젠스의 저감화를 유도할 수 있다는 장점이 있으나 처리에 의한 식품 품질 변화, 처리를 위한 기기 구비 비용 소요, 살균 효율 유지의 한계 등 극복해야 할 문제가 함께 보고되고 있기 때문에 이를 해결하기 위한 연구 또한 지속적으로 수행될 필요가 있다.

3–3 화학적 처리 기술

화학적 처리 기술은 식품에 특정 항균 물질이나 보존제를 첨가하여 클로스트리디움 퍼프린젠스를 제어하는 방법이다. Redondo–solano등(2021)의 연구에서는 햄에 젖산칼륨과 아세트산나트륨으로 구성된 식품 보존제 혼합물을 첨가한 후 75℃에서 20분 간 가열한 뒤 냉각 과정 중 아포의 발아 및 생장을 분석한 결과, 햄의 NaCl 농도를 낮춤으로써 증가하는 아포 발아율 및 생장능(21시간 냉각 시 5.18 log CFU/g' 까지 증가)을 보존제 혼합물(1.5% 이상)의 첨가를 통해 억제할 수 있음을 확인하였다 [38)]. 이와 같은 식품용 살균제 및 보존제 처리 기술은 클로스트리디움 퍼프린젠스의 제어 효과가 보고되어 왔으나, 일부 물질은 고농도에서 식품의 관능적 특성(맛, 향 등)에 영향을 미치고 잔류 가능성이 있어 적정 사용 조건의 확립이 필수적이다. 클로스트리디움 퍼프린젠스를 제어하기 위해 사용 가능한 식품 첨가물로는 Reuterin, Endolysin, Ellagitannins 등의 물질들이 적용성 평가에 활용된 바 있으며, 특히 천연 항균물질은 식품용 살균제 및 보존제의 안전성 측면에서 소비자의 부담감이 낮다는 장점이 있어 다양한 물질(식물 유래 페놀 화합물, 에센셜 오일 등)의 발굴 및 활용 연구가 보고되고 있다 [39) 40) 41)]. Zhu 등(2020)의 연구에서는 닭고기에 처리된 계피 에센셜 오일이 19.12 mg/mL 수준의 처리 조건에서 클로스트리디움 퍼프린젠스 생장 억제 효과가 있음을 확인하였다 [42)]. Wang 등(2023)의 연구는 닭고기에 처리된 에센셜 오일과 포도씨 추출물이 클로스트리디움 퍼프린젠스 아포의 발아와 생장 제어에 효과적임을 제시하였다 [43)]. 한편

Manjunatha 등(2023)의 연구에서는 흑종초 추출물이 클로스트리디움 퍼프린젠스의 독소 생성 억제 효과를 확인하여 세균뿐만 아니라 유해한 대사 산물의 제어에도 천연 항균물질의 활용이 가능함을 시사하였다[44]. 다만 일부 천연 항균물질은 강한 향과 맛이 식품에 영향을 줄 수 있어 활용 범위가 제한될 수 있어 관능적 특성 변화를 중심으로 식품 내 적용성 문제를 해결하기 위한 연구가 지속적으로 수행될 필요가 있다.

국문요약

국내 외식산업과 집단급식 산업이 지속적으로 성장하면서 식품 제공의 편의성과 효율성은 높아졌으나, 대량 조리로 인한 식중독 발생 위험도 증가하고 있다. 특히 클로스트리디움 퍼프린젠스 등 한 번의 발생으로 다수의 환자를 유발할 수 있는 집단 식중독의 위험성이 강조되고 있다. 따라서 식중독 예방을 위해 체계적인 관리 방안의 수립이 필수적이다. 클로스트리디움 퍼프린젠스는 외식 및 집단급식 환경에서 식품 오염 후 증식을 통해 집단 식중독을 일으키는 주요 원인균으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 국내에서 보고된 클로스트리디움 퍼프린젠스의 검출 및 감염 사례를 분석하여 식중독 발생의 역학적 특성(주요 감염 경로, 고위험 식품군 등)을 파악하고, 집단 식중독 제어 관점에서 효과적인 관리 방안을 제시하고자 하였다. 또한 최근 발표된 클로스트리디움 퍼프린젠스 관련 항균 기술 연구를 생물학적, 물리적, 화학적 원리로 구분하여 각 기술의 장단점과 현장 적용 가능성을 확인하였다. 본 연구의 결과는 외식산업 및 집단급식 시설에서 실질적으로 적용 가능한 위험 관리 전략을 제시할 것으로 기대되며, 보다 과학적이고 체계적인 식품 안전 관리 정책 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 이를 통해 대량 조리 환경에서 클로스트리디움 퍼프린젠스 식중독 발생 위험을 감소시키는 데 기여하고자 한다.

Acknowledgement

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

Conflict of interests

The authors declare no potential conflict of interest.

ORCID

Dong Kyu Joo 0009-0008-5848-8375
Ji Won Heo 0009-0009-4015-1616
Ki Won Lee 0000-0003-3799-9199
Sun Ae Kim 0000-0003-2463-3198
Changsun Choi 0000-0001-7730-8538
Min Suk Rhee 0000-0003-0412-1910
Tae Jin Cho 0000-0002-6563-2514

참고 문헌

1. Corporation KA-FFT, 2024 Food & Dining Statistics. (2024).
2. Ministry of Food and Drug Safety RoK, Beware of Food Poisoning Even in Boiled Foods During Autumn. (2024).
3. Korea S, Infectious Disease Occurrence Statistics. (2025).
4. Kim H.W., Pie J.E., An analysis of meal hygiene management status of children's foodservice facilities in Anyang area – regarding the change in the number of visits due to COVID-19. Int. J. Adv. Cult. Technol. 10, 12-20 (2022).
5. Jang H.J., Ha Y.K., Yu S.N., Kim S.Y., Um J, Ha G.J., Kim D.S., Lee S.Y., Ahn S.C., Molecular Epidemiological analysis of food poisoning caused by *Salmonella enterica* serotype Enteritidis in Gyeongnam province of Korea. J Life Sci. 33, 56-63 (2023).
6. Korea Disease Control and Prevention Agency, Epidemiological Investigation Yearbook of Infectious Diseases, 2023. (2024).
7. Korea Disease Control and Prevention Agency, Epidemiological Investigation Yearbook of Infectious Diseases, 2022. (2023).
8. Korea Disease Control and Prevention Agency, Epidemiological Investigation Yearbook of Infectious Diseases, 2020-2021. (2022).
9. Korea Centers for Disease Control and Prevention, 2019 Infectious Disease Surveillance Yearbook. (2020).
10. Cabelli V., *Clostridium perfringens* as a water quality indicator. In: Hoadley A.W., Dutka B.J. (Eds.), Bacterial Indicators/Health Hazards Associated with Water. ASTM International, Philadelphia, PA, USA, pp. 120-135 (1977)
11. Labbe R.G., Juneja V., *Clostridium perfringens*. In: Doyle M.P. (Ed.), Foodborne Diseases. Elsevier, London, UK, pp. 235-242 (2017).
12. Kaldhusdal M, Evensen Ø, Landsverk T., *Clostridium perfringens* necrotizing enteritis of the fowl: a light microscopic, immunohistochemical and ultrastructural study of spontaneous disease. Avian Pathol. 24, 421-433 (1995).
13. McClane B.A., Robertson S.L., Li J., *Clostridium perfringens*. In: Doyle M.P., Buchanan R.L. (Eds.), Food Microbiology: Fundamentals and Frontiers. 4th ed. ASM Press, Washington, D.C., USA, pp. 465-489 (2012).
14. Granum P.E., *Clostridium perfringens* toxins involved in food poisoning. Int. J. Food Microbiol. 10, 101-111 (1990).
15. Chon J.W., Seo K.H., Bae D, Park J.H., Khan S., Sung K.J., Prevalence, toxin gene profile, antibiotic resistance, and molecular characterization of *Clostridium perfringens* from diarrheic and non-diarrheic dogs in Korea. J. Vet. Sci. 19, 368-374 (2018).
16. Sakurai J, Nagahama M, Oda M., *Clostridium perfringens* alpha-toxin: characterization and mode of action. J. Biochem. 136, 569-574 (2004).
17. Smedley III J.G., Uzal F.A., McClane B.A. Identification of a prepore large-complex stage in the mechanism of action of *Clostridium perfringens* enterotoxin. Infect. Immun. 75, 2381-2390 (2007).
18. Grass J.E., Gould L.H., Mahon B.E., Epidemiology of foodborne disease outbreaks caused by *Clostridium perfringens*, United States, 1998 - 2010. Foodborne Pathog. Dis. 10, 131-136 (2013).
19. Kalinowski R.M., Tompkin R.B., Bodnaruk P.W., Pruett W.P. JR., Impact of cooking, cooling, and subsequent refrigeration on the growth or survival of *Clostridium perfringens* in cooked meat and poultry products. J. Food Prot. 66, 1227-1232 (2003).
20. Dolan G., Foster K., Lawler J., Amar C., Swift C., Aird H., et al., An epidemiological review of gastrointestinal outbreaks associated with *Clostridium perfringens*, North East of England, 2012 - 2014. Epidemiol. Infect. 144, 1386-1393 (2016).
21. Juneja V.K., Marks H., Thippareddi H., Predictive model for growth of *Clostridium perfringens* during cooling of cooked uncured beef. Food Microbiol. 25, 42-55 (2008).
22. Schaffner D.W., Brown L.G., Ripley D., Reimann D., Koktavy N., Blade H., et al., Quantitative data analysis to determine best food cooling practices in US restaurants. J. Food Prot. 78, 778-783 (2015).

23. Li M., Huang L., Zhu Y., Wei Q., Growth of *Clostridium perfringens* in roasted chicken and braised beef during cooling–One-step dynamic analysis and modeling. Food Control. 106, 106739 (2019).

24. Centers for Disease Control and Prevention (CDC), 2024. *Clostridium perfringens* – Prevention. Retrieved from https://www.cdc.gov.

25. Choi Y.M., Hwang S.I., Park G.Y., Kim S.T., Lee H.K., Lim H.W., Kim H.Y., Ham H.K., Park Y.B., Microbial contamination levels of red pepper powder purchased in Gyeonggi province and changes in characteristics according to the storage method. J. Food Hyg. Saf. 36, 382-391 (2021).

26. Wittry B.C., Holst M.M., Anderberg J., Hedeen N.J., Operational antecedents associated with *Clostridium perfringens* outbreaks in retail food establishments, United States, 2015–2018. Foodborne Pathog. Dis. 19, 209-216 (2022).

27. Ministry of Food and Drug Safety RoK, Beware of *Clostridium perfringens* Food Poisoning in Spring! (2020).

28. Centers for Disease Control and Prevention (CDC), 2024. *Clostridium perfringens*: Root Causes and Prevention Practices. Retrieved from https://www.cdc.gov.

29. Schoster A., Kokotovic B., Permin A., Pedersen P., Dal Bello F., Guardabassi L., In vitro inhibition of *Clostridium difficile* and *Clostridium perfringens* by commercial probiotic strains. Anaerobe. 20, 36-41 (2013).

30. Hamad G.M., Abdelmotilib N.M., Darwish A.M., Zeitoun A.M., Commercial probiotic cell-free supernatants for inhibition of *Clostridium perfringens* poultry meat infection in Egypt. Anaerobe. 62, 102181 (2020).

31. Shanmugasundaram R., Markazi A., Mortada M., Ng T., Applegate T., Bielke L., et al., Research Note: Effect of synbiotic supplementation on caecal *Clostridium perfringens* load in broiler chickens with different necrotic enteritis challenge models. Poult. Sci. 99, 2452-2458 (2020).

32. Paredes-Sabja D., Sarker N., Setlow B., Setlow P., Sarker M.R., Microbiology E, Roles of DacB and Spm proteins in *Clostridium perfringens* spore resistance to moist heat, chemicals, and UV radiation Appl. Environ. Microbiol. 74, 3730-3738 (2008).

33. Setlow P., Wang S., Li Y.Q., Germination of spores of the orders *Bacillales* and *Clostridiales*. Annu. Rev. Microbiol. 71, 459-477 (2017).

34. Onyeaka H., Miri T., Hart A., Anumudu C., Nwabor O.F., Application of ultrasound technology in food processing with emphasis on bacterial spores. Food Rev. Int. 39, 3663-3675 (2023).

35. Liang D., Cui X., Guo S., Liu S., Li M., He L., et al., The effect of thermosonication treatment on the inactivation of *Clostridium perfringens* spores. Food Bioprocess Technol. 18, 349-359 (2025).

36. Kramer B., Wunderlich J., Muranyi P., Recent findings in pulsed light disinfection. J. Appl. Microbiol. 122, 830-856 (2017).

37. Lee, S. H., Choe, J., Shin, D. J., Yong, H. I., Choi, Y., Yoon, Y., Jo, C., Combined effect of high pressure and vinegar addition on the control of *Clostridium perfringens* and quality in nitrite-free emulsion-type sausage. Innov Food Sci Emerg Technol, 52, 429-437 (2019).

38. Redondo-Solano M., Valenzuela-Martinez C., Juneja V.K., Burson D.E., Thippareddi H., Control of *Clostridium perfringens* spore germination and outgrowth by potassium lactate and sodium diacetate in ham containing reduced sodium chloride. LWT – Food Sci. Technol. 137, 110395 (2021).

39. Xu Y., Wang Y., Ding X., Wang J., Zhan X., Inhibitory effects of reuterin on biofilm formation, quorum sensing and virulence genes of *Clostridium perfringens*. LWT – Food Sci. Technol. 162, 113421 (2022).

40. Puljula E., Walton G., Woodward M.J., Karonen M., Antimicrobial Activities of Ellagitannins against *Clostridiales perfringens, Escherichia coli, Lactobacillus plantarum* and *Staphylococcus aureus*. Molecules. 25, 3714 (2020).

41. Lu R., Liu B., Wu L., Bao H., García P., Wang Y., et al., A broad-spectrum phage endolysin (LysCP28) able to remove biofilms and inactivate *Clostridium perfringens* strains. Foods. 12, 411 (2023).

42. Zhu Y., Ma Y., Zhang J., Li M., Yan L., Zhao G., et al., The inhibitory effects of spice essential oils and rapidly prediction on the growth of *Clostridium perfringens* in cooked chicken breast. Food Control. 113, 106978 (2020).

43. Wang W., Mai X., Wang D., Zheng Y., Liu F., Sun Z., Mathematical modeling of temperature and natural antimicrobial effects on germination and outgrowth of *Clostridium perfringens* in chilled chicken. LWT – Food Sci. Technol. 177, 114555 (2023).

44. Manjunatha V., Nixon J.E., Mathis G.F., Lumpkins B.S., Güzel–Seydim Z.B., Seydim A.C., et al., *Nigella sativa* as an antibiotic alternative to promote growth and enhance health of broilers challenged with *Eimeria maxima* and *Clostridium perfringens*. Poult. Sci. 102, 102831 (2023).