

펫푸드 동물성 자원의 멸·살균 현황

Status of Sterilization and Pasteurization of Animal Resources in Pet Food

백의빈¹, 김학연^{1,2*}(Ui-Bin Baek¹, Hack-Youn Kim^{1,2*})

¹공주대학교 동물자원학과, ²공주대학교 자연과학연구소

¹Department of Animal Resources Science, Kongju National University

²Resource Science Research Institute, Kongju National University

I. 서론

최근 고령화와 1인 가구 증가로 반려동물을 가족 구성원으로서 양육하는 가구수가 증가하고 있다(내 손안에 서울, 2019). 이에 펫푸드 시장은 휴먼그레이드와 기능성 사료, 화식, 그리고 생식 등 고품질 펫푸드 전략을 채택하였다. 반려동물 사료와 간식을 포함한 글로벌 펫케어 시장은 연평균 성장률(CAGR) 6.1%로 전망된다(미래에셋증권, 2021). 국내 펫케어 시장 또한 2020년 3.4조 원에서 2027년 약 6조 원의 성장세를 보일 것으로 보고되었다(삼일PwC경영연구원, 2023). 그러나 최근 집단 고양이 폐사 사건으로 인하여 펫푸드 안정성 문제가 대두되었고, 이에 따른 적절한 처리 방안이 필요한 실정이다.

제품화된 펫푸드 살균 방식은 대부분 열처리법이며, 이외에 고압, 오존, 전기장, 초음파, 방사선, 자외선, 플라즈마 등 비열 살균 기술이 최근 연구되고 있다(Barbhuiya et al., 2021). 이는 기존의 열처리와 달리 식품 고유의 영양소와 향미를 유지하며 미생물을 효과적으로 억제할 수 있는 살균 방식이다. 이중 고압 처리는 MPa 단위의 높은 정수압으로 미생물의 세포벽을 물리적으로 파괴한다. 또한, 방사선과 자외선, 오존, 그리고 플라즈마 등은 산화에 의한 다량의 자유라디칼을 생성하여 미생물의 DNA를 손상시켜 미생물을 억제한다(Shahi et al., 2021). 그러나 미국, 호주, 유럽 등 해외국가와 달리 국내에는 명확한 비열 살균 기준과 규제가 전무한 실정이다. 이는 국내 펫푸드 비열살균 기술 도입과 발전을 저해하는 요인으로 작용할 수 있다. 이에 현재 많이 연구되고 있는 비열살균 기술인 초고압과 방사선, 플라즈마를 적용한 주요 펫푸드 동물성 자원(닭고기, 소고기, 돼지고기, 어육 등)의 품질 유지와 효과적인 미생물 억제를 위한 적정 기준을 모색하고자 한다.

*Corresponding author: Hack-Youn Kim

Department of Animal Resources Science, Kongju National University, Chungnam, Korea

Tel: +82-41-330-1241

Fax: +82-41-330-1249

E-mail: kimhy@kongju.ac.kr

II. 본론

1. 초고압 비열 처리 기술

1) 식품에서의 초고압 처리 기술

초고압 기술은 식품의 풍미, 색상, 영양성분 등 품질특성을 유지하면서 효과적으로 위해 미생물을 멸·살균할 수 있는 기술이다(Seo et al., 2014). 이 기술은 HPP(high pressure processing)와 HHP(high hydrostatic pressure), 그리고 UHP(ultra-high pressure) 등으로 불리며 주로 HPP로 지칭한다(Elamin et al., 2015). HPP는 가압에 의하여 식품의 부피와 분자수가 감소하고, 이때 미생물 세포막 붕괴 및 세포막 단백질이 변성되며 멸·살균되는 Le Chatelier의 화학적 평형 원리가 적용된다(Renaud et al., 2022). 또한, 저온 또는 실온에서 액체 매질과 함께 식품을 가압하는 저온 등정압(cold isostatic pressure, CIP)을 이용하고 있다. HPP에 의한 가압 시 분자 간의 공유 결합은 압력에 영향을 적게 받으나, 상대적으로 약한 결합인 정전기적 및 수소성 결합은 가압에 의해 구조가 변형된다(Campus, 2010). 이러한 변형은 미생물의 세포 구조를 파괴하고 효소를 비활성화하지만, 분자 크기가 작은 비타민과 향미 화합물에는 영향을 주지 않아 영양 물질을 보전할 수 있다(Albert et al., 2021). 또한, 열을 가하지 않아 식품의 변형을 최소화하고, 100-600 MPa의 초고압이 액체 매질을 통하여 식품에 균일하고 즉각적인 처리를 가하기 때문에 식품의 크기와 모양에 큰 변형을 주지 않는다는 장점이 있다(Li and Farid, 2016). 이에 HPP 기술은 식품 원료뿐만 아니라 포장한 완제품도 적용이 가능하여 식품 산업에서의 응용이 용이할 것으로 판단된다.

HPP는 식품과 제약, 의학 등 다양한 분야에서 응용되고 있으며 식품산업에서 주로 활용되고 있다. 식품산업의 HPP 응용은, Hite(1899)가 우유와 고기에 500-600 MPa의 초고압을 가할 시 미생물 수가 감소한 사실을 발표하며 식품에서의 연구가 시작되었다. 이후, 20세기에

미국, 영국, 일본 등 국가에서 HPP 기술 연구가 이루어지며 식품에 적용할 수 있는 HPP 기기가 개발되어 식육, 독균 멸·살균이 가능하게 되었다. 현재 상용화된 국내외 기업의 HPP 기기는 기기 내 용기나 액체 매질, 압력 범위 등이 정형화되어 HPP 식품의 사용화가 보다 용이하게 되었다(표 1). 이에 HPP 처리한 축산물, 수산물, 주스, 잼, 푸레 등 다양한 HPP 멸·살균 처리한 식품이 상용화되고 있다. HPP 처리에 영향을 받는 주요 미생물은 *Listeria* spp., *Salmonella* spp., *Escherichia coli*, *Vibrio* spp., *Campylobacter* spp. 등으로 특히 미생물 오염에 취약한 축산물이나 수산물 멸·살균에 HPP 처리가 유리할 것으로 판단된다(Campus, 2010). 그러나 탄수화물, 단백질, 지방, 염분 등 영양 성분이 풍부하거나 수분활성도가 낮은 식품은 HPP 처리에 대한 미생물 보호 작용을 한다고 보고되었다(Govariz et al., 2021). 이에 식품 상태에 따라 미생물의 가압 민감도에 차이가 있어 각 식품 별로 충분한 멸·살균을 위한 조건 정립이 필요하다.

미국, 영국, 캐나다 등 HPP 선진국은 HPP 기술을 식품 산업에 활발히 응용하고 있으며, 이에 따른 식품에 대한 HPP 정책을 정립하였다. 미국은 식품위생검역국(FSIS), 영국은 식품기준청(Food Standards Agency), 캐나다는 캐나다 보건국(Health Canada), 호주와 뉴질랜드는 식품기준청(FSANA)에서 HPP 적용 식품에 대하여 정책을 유지하였다. 반면, 우리나라는 HPP 적용 식품 정책과 기준이 부재하여 HPP 적용 시 미생물을 충분히 멸·살균할 수 있는 가압 정도와 가압 시간의 정립이 필요하다.

2) 펫푸드 동물성 원료의 초고압 처리 기준 설정

동물성 자원 멸·살균 처리에 주로 적용되는 초고압은 4°C 또는 25°C의 온도 조건에서 400-600 MPa의 압력을 10분 이내의 처리가 국제 규제 기관에서 요구하는 미생물 5 log 감소를 충족한다(표 2). 이처럼 초고압 멸·살균은 처리 온도와 압력, 그리고 처리 시간에 영향이 가장 중요한 제어점으로 작용한다. 이때, 처리 온도는 4°C 이하의 저온이 25°C 전후의 온도보다 미생물 제거에 효과

표 1. 국내외 식품 HPP 기기 제조 회사 및 제품

국가명	회사명	제품명	제품 사진	제품 사양
대한민국	일신오토클레이브	Hippo		<ul style="list-style-type: none"> • 압력: Up to 600 MPa • 온도: 10-35°C • 처리용량: 20-550 L • 처리시간: 7-10 cycle/h (3분 유지)
대한민국	ENERGYN	EHPP		<ul style="list-style-type: none"> • 압력: 300-600 MPa • 온도: 5-150°C • 처리용량: 55-530 L
스페인	Hiperbaric	H55 - H525		<ul style="list-style-type: none"> • 압력: Up to 600 MPa • 온도: 5-20°C • 처리용량: 55-525 L • 처리시간: 270-3,210 kg/h
스웨덴	Quintus	HPP QIF		<ul style="list-style-type: none"> • 압력: Up to 600 MPa • 처리용량: 150 L
미국	Avure Technologies	Avure AV		<ul style="list-style-type: none"> • 압력: Up to 600 MPa • 온도: 4-29°C • 처리시간 -1,500-3,400 kg/h (1분 유지) -1,300-2,300 kg/h (3분 유지)
독일	ThyssenKrupp	Uhde		<ul style="list-style-type: none"> • 압력: Up to 600 MPa • 온도: 4-29°C • 처리용량: 55-700 L • 처리시간: 210-3,200 kg/h

출처: 해당 기업 홈페이지에서 발췌.

표 2. 주요 펫푸드 동물성 자원별 초고압 처리

동물성 자원	실험 조건		실험 결과	참고문헌
닭다리	처리 조건	<ul style="list-style-type: none"> • 0.1, 300, 600 MPa • 15±3°C • 5 min 	<ul style="list-style-type: none"> • 300 MPa 이상 처리 시 검출 수준 이하로 미생물 억제 • 300 MPa 이상 처리 시 저장 기간 중 대조구보다 미생물 억제능 증가 • 300 MPa 이상 처리 시 명도 증가 및 적색도, 황색도 감소 • 300 MPa 처리는 TBARS, VBN에 영향 X 	Jung et al. (2012)
	측정 미생물	총 미생물		
	저장 조건	0, 3, 7 days		
닭가슴살	처리 조건	<ul style="list-style-type: none"> • 0, 500 MPa • 18-20°C • 10 min 	<ul style="list-style-type: none"> • 500 MPa 처리 시 <i>Brochothrix thermosphacta</i>, <i>Pseudomonas</i> spp., 장내세균, <i>Lactobacillus</i>, 그리고 효모 및 곰팡이가 1 log CFU/g 검출 • 500 MPa 처리 시 대조구보다 pH 증가 	Argyri et al. (2018)

표 2. 계속

동물성 자원	실험 조건		실험 결과	참고문헌
닭가슴살	측정 미생물	<ul style="list-style-type: none"> 장내세균 총 미생물 효모 및 곰팡이 <i>Lactobacillus</i> <i>Pseudomonas</i> spp. <i>Salmonella enteritidis</i> 	<ul style="list-style-type: none"> 500 MPa 처리 시 <i>Brochothrix thermosphacta</i>, <i>Pseudomonas</i> spp., 장내세균, <i>Lactobacillus</i>, 그리고 효모 및 곰팡이가 1 log CFU/g 검출 500 MPa 처리 시 대조구보다 pH 증가 	Argyri et al. (2018)
	저장 조건	<ul style="list-style-type: none"> 0, 5, 10 days 4, 12°C 		
돼지고기	처리 조건	<ul style="list-style-type: none"> 50, 100, 200, 300, 400, 500 MPa 1, 5, 15 min 	<ul style="list-style-type: none"> 400 MPa 이상 처리 시 총균수 3 log CFU/g 이하로 감소 500 MPa에서 1, 5, 15분 처리 시 총균수는 각각 2.17, 1.77, 2.33 log CFU/g으로, 대조구(약 3 log CFU/g)보다 감소 처리 압력과 처리 시간이 증가할수록 대조구보다 pH 증가 	Sazonova et al. (2017).
	측정 미생물	총 미생물		
돼지 후지 (조리 O)/ 훈제 돼지 등심 (조리 X)	처리 조건	<ul style="list-style-type: none"> 300, 400, 500, 600 MPa 10 to 60 min 	<ul style="list-style-type: none"> 훈제 돼지 등심을 600 MPa에서 10분 처리 시, 8주 저장 기간 동안 대장균군, <i>Enterococci</i>, 호산성균 검출 X 300 MPa 이상에서 10분 이상 처리 시 대조구보다 적색도, 황색도, 전단력 증가 및 명도 감소 	Karlowski et al. (2002)
	측정 미생물	<ul style="list-style-type: none"> 중온성 및 저온성균 호산균 <i>Enterococci</i> <i>Escherichia coli</i> 		
	저장 조건	<ul style="list-style-type: none"> 0, 4, 6, 8 week 4 to 6°C 		
소 목심	처리 조건	<ul style="list-style-type: none"> 400, 600 MPa 35, 45, 55°C 20 min 	<ul style="list-style-type: none"> 35°C에서 400 MPa 이상 처리 시 pH, 명도, 황색도, 가열감량 증가 및 적색도 감소 처리 압력이 증가할수록 가열감량 증가 	McArdle et al. (2011)
	측정 미생물	<ul style="list-style-type: none"> 총 미생물 <i>Lactobacillus</i> 장내세균 <i>Listeria</i> <i>Salmonella</i> <i>Campylobacter</i> 		
	저장 조건	0, 7, 15, 30 days		
슬라이스 소고기	처리 조건	<ul style="list-style-type: none"> 300, 450, 600 MPa 5 min 	<ul style="list-style-type: none"> 2% 구연산과 2% 소금 용액을 포함한 300, 450, 600 MPa의 압력 처리는 <i>Enterococcus faecium</i> 증식을 각각 1, 4, 6 log cycles 감소 구연산 함량이 증가할수록 <i>Enterococcus faecium</i> 억제에 효과적 2% 구연산과 2% 소금 용액을 포함한 300-600 MPa 의 압력 처리는 <i>Listeria innocua</i> 증식을 6 log cycles 감소 소금 농도 증가할수록 <i>Listeria innocua</i> 억제에 효과적 	Rodrigues et al. (2016)
	측정 미생물	<ul style="list-style-type: none"> <i>Listeria innocua</i>, <i>Enterococcus faecium</i> 		
대구/연어/고등어	처리 조건	<ul style="list-style-type: none"> 0.1, 200, 500 MPa 2 min 	<ul style="list-style-type: none"> 500 MPa 처리는 대구, 고등어 내 총 호기성균을 검출 수준 이하로 억제 200 MPa 처리는 모든 처리구에서 대조구보다 TBARS, pH가 증가 	Rode and Hovda (2016)
	측정 미생물	<ul style="list-style-type: none"> 저온성균 황화수소 생성균 		
	저장 조건	<ul style="list-style-type: none"> 대구: 0, 7, 11, 14, 22 days 연어: 0, 7, 11, 15, 18, 21, 26 days 고등어: 0, 4, 7, 11, 14, 19 days 		

적이었고, 처리 시간은 증가할수록 미생물 멸·살균 효과 또한 증가하였다. 또한, 처리 압력은 시료 내 단백질의 물리적 상태와 미오글로빈의 산화에 영향을 주는 것으로 나타났다(Pou, 2021).

초고압 멸·살균 처리한 가공 식품 중 약 30%가 육가공제품인 만큼 육가공제품에 대한 초고압 멸·살균은 이미 대대적으로 이루어지고 있으며, 이는 육가공제품은 생육보다 초고압 처리에 대한 품질 특성과 관능 특성이 비교적 안정적이기 때문이다. 반면, 생육은 육가공제품과 달리 육류의 색상과 초고압의 온도, 압력, 처리 시간 등 요인에 다양한 영향을 받을 수 있다. 닭고기나 어육은 돼지고기 또는 소고기보다 조직이 무른 특성이 있어 200-300 MPa 가압 시 단백질의 겔화가 진행된다(Chen et al., 2018). 가압에 의한 육류의 색상은 미오글로빈을 많이 함유한 적색육에서 더 예민한 변화를 나타낸다. 300 MPa 이상의 가압 시 미오글로빈의 물리적 구조 파괴 및 산화의 촉진으로 명도는 증가하고 적색도는 감소하였으

나, 이러한 초고압 처리로 인한 색상 변화는 보관기간이 증가할수록 점차 사라지는 것으로 나타났다. 이에 펫푸드 초고압 처리는 원료와 완제품 간의 멸·살균 효율 및 품질 비교와 성상(건식, 습식, 반습식, 동결건조 등)에 따라 오염 우려가 높은 미생물에 대한 적정 초고압 조건 연구가 필요할 것으로 사료된다.

2. 식품에서의 방사선 비열 처리 기술

1) 식품에서의 방사선 처리 기술

방사선은 자연 방사선과 인공 방사선으로 구분하며, 이 중 인공 방사선은 방사성 동위원소로부터 방출되는 알파(α)선, 베타(β)선, 감마(γ)선과 기계적으로 발생하는 X선, 전자가속기로 발생하는 전자선, 원자로에서 발생하는 중성자선 등이 있다(그림 1). 전리방사선(ionizing radiation)은 방사선이 물질을 통과할 때 물질의 원자나

그림 1. 자연방사선과 인공방사선



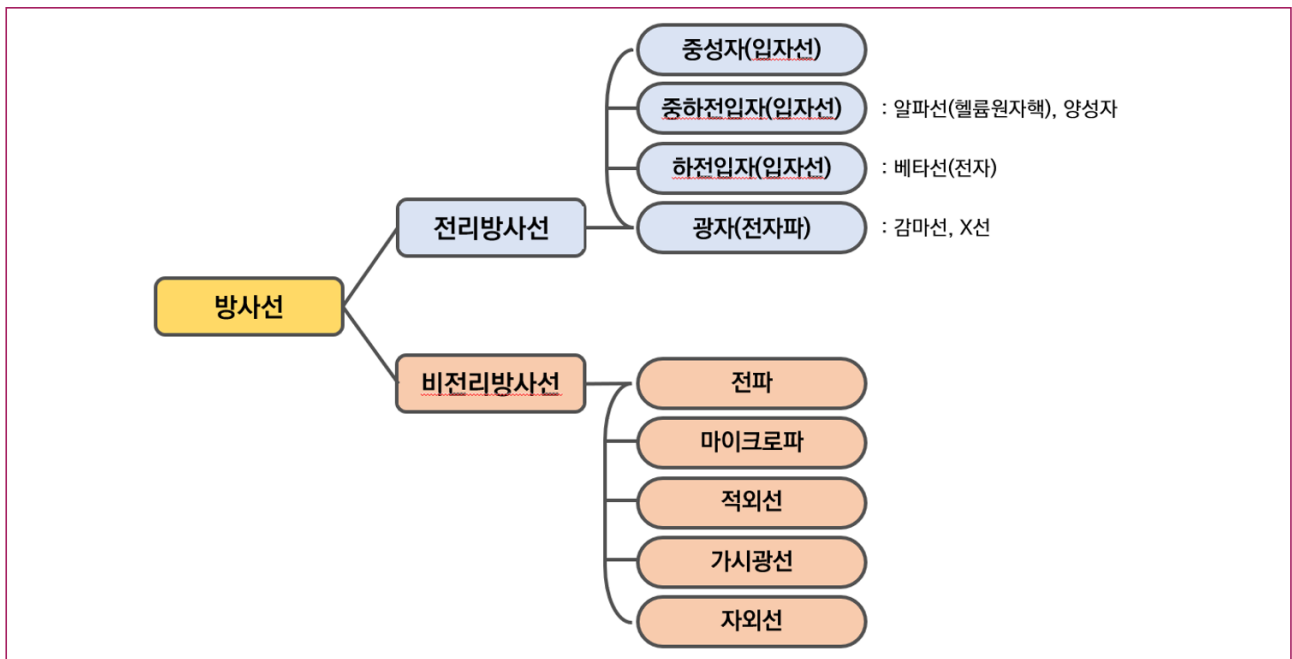
출처: 방사선기술정보시스템. 방사선 개념정리.

분자를 전리하여 이온을 생성하게 하는 성질을 가진 방사선으로 알파선, 감마선, 전자선, 자외선, 중성자선 등이 이에 포함된다(그림 2). 그러나 식품 방사선 조사는 안정성에서 꾸준한 문제가 제기되고 있으며, 이에 FAO, IAEA, WHO 등 관련 국제 기구는 식품에 감마선, X선, 전자선, 그리고 자외선의 10 kGy 미만 조사에 대하여 안정성을 입증하였다. 이는 방사선 처리 시 화학물질 및 잔류물질을 남기지 않으며 환경조건의 영향을 거의 받지 않기 때문이다(Jildeh et al., 2021). 방사선 종류별 특징의 경우, 감마선과 X선은 투과력이 강하여 불투명한 시료나 포장한 완제품의 처리가 가능해 살균 처리 후 재포장에 따른 2차 오염을 방지할 수 있다. 그러나 감마선은 방사선핵을 중심으로 방사형으로 방출되는 반면, X선, 전자선은 전기를 이용해 인공적으로 가속 전자를 발생시켜 집약된 부분에 고른 살균이 가능하다. 자외선과 전자선은 감마선과 X선에 비하여 투과력이 약하나 전원으로 조절이 가능해 공정제어, 신속, 정확성, 효율성 등 장점이 있다. 멸·살균에 사용하는 방사선 중 가장 낮은 에너지를 가지는 자외선은 파장 길이에 따라 UVA(315-400 nm), UVB(280-315 nm), UVC(200-280 nm) 영역으로 나뉘

고, 이중 UVC가 미생물 멸·살균에 이용하는 자외선이다(Shahi et al., 2021). 이러한 방사선은 농산물 발아 및 발근 억제, 해충 및 기생충 사멸, 농산물 숙도 조절, 저장 수명 연장 등에 사용되고 있다.

식품 산업에서 방사선 조사의 응용은 1895년 Roentgen에 의하여 X선이 발견되며 식품 내 미생물 사멸 가능성이 제시되었고, 1921년 방사선 조사가 돼지고기 선모충 제거를 위해 미국에서 최초로 사용되었다(Jildeh et al., 2021). 하지만 값비싼 방사선 조사 설비로 실용화에 제한이 있었으나, 1950년 방사성 물질의 대량 생산으로 본격적인 연구가 진행되었다(Demir et al., 2019). 식품 방사선 조사는 직접적 또는 간접적으로 미생물에 영향을 주어 멸·살균된다. 직접적 영향은 전리 방사선이 미생물 핵산에 손상을 주어 핵산 생산을 억제하여 미생물의 분열을 억제한다. 간접적 영향은 방사선 조사로 물분자에서 자유 라디칼 등 방사선 분해 생성물이 생성되고, 이중 반응성이 높은 자유 라디칼이 서로 결합하거나 산소와 결합하여 산화제를 형성하게 된다. 이 과정에서 생성된 자유 라디칼과 산화제가 미생물 세포막에 손상을 일으켜 미생물을 사멸한다. 미생물은 종류에 따라 방사선

그림 2. 전리방사선과 비전리방사선의 종류



조사 정도에 감수성 차이가 있어, 미생물 멸·살균 시 방사선 조사는 완전살균(radappertization), 병원성 미생물 살균(radicidation), 부분살균(radurization)으로 구분한다(Kim, 2006). 완전살균은 바실러스, 클로스트리듐 등 내생포자(endospore) 생성 미생물 멸·살균을 위하여 30-50 kGy의 고선량 조사를 하는 것으로 통조림, 병원식, 우주식, 스포츠식, 실험동물용 무균 사료 등에서 사용한다. 병원성 미생물 살균은 식품 내 위해 미생물을 1-10 kGy의 조사량으로 멸·살균하는 것이다. 부분살균은 0.5-10 kGy 조사량으로 식품 내 미생물 수를 감소시켜 보존 및 냉장 보관 기간을 연장시키는 것이다. 방사선 조사는 가열 처리보다 시간이 단축되고 화학물질 및 잔류 물질이 남지 않으며, 처리가 간편하다는 장점이 있다(Yang et al., 2023). 그러나 특정 방사선량에서 과일의 변색과 연화를 유발하고 육가공제품의 산화를 촉진하며, 방사선 조사에 대한 소비자 거부감이 있을 수 있다(Ahn et al., 2023 ; Shahbaz et al., 2016). 이에 육류를 주요

원료로 하는 펫푸드에서의 방사선 조사를 위하여 적절한 방사선 종류와 방사선량을 모색하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

2) 펫푸드 동물성 원료의 방사선 처리 기준 설정

동물성 자원 멸·살균 처리에 주로 적용되는 방사선은 10 kGy 이하의 감마선과 전자선이며, 모든 생육에서 대체로 6 kGy 이상의 선량 조사 시 식중독 미생물이 사멸하였다(표 3). 그러나 3 kGy 전후의 선량 조사 시 과도한 과산화물과 휘발성 물질의 생성으로 이취 등에 의하여 기호성이 저하될 수 있다(Farkas, 1998). 이에 천연 항산화 물질 또는 합성 항산화 물질을 첨가한 시료에 대한 방사선 조사 효과가 연구되고 있다. 방사선 조사와 항산화 물질을 함유한 구아바잎 추출물 첨가를 병행할 시, 2 kGy의 선량에서도 호기성 미생물과 대장균에 대한 저해 효과가 나타나 천연 항산화 성분은 방사선 조사 후에도 항산

표 3. 주요 펫푸드 동물성 자원별 방사선 처리

동물성 자원	실험 조건		실험 결과	참고문헌
기계 발골 닭고기	처리 조건	<ul style="list-style-type: none"> • 감마선 • 0.30, 0.60, 0.90, 1.20, 1.80, 2.70, 3.60 kGy • 대기압, 진공 	<ul style="list-style-type: none"> • 20°C에서 감마선 처리는 -20°C, 0°C보다 <i>Salmonella typhimurium</i> 억제에 효과적 • 20°C에서 3.6 kGy 처리 시 대기압, 진공 조건에서 <i>Salmonella typhimurium</i>이 각각 2.75, 3.06 log CFU/g 검출 • -20°C에서 3.0 kGy 처리 시 대기압, 진공 조건에서 <i>Salmonella typhimurium</i>이 각각 3.93, 4.29 log CFU/g 검출 	Thayer and Boyd (1991)
	측정 미생물	<i>Salmonella typhimurium</i>		
닭고기 패티	처리 조건	<ul style="list-style-type: none"> • 감마선 • 2 kGy • 대기압, 진공 	<ul style="list-style-type: none"> • 대기압 조건에서 진공 조건보다 TPC, DPPH, FRAP이 낮고 TVBN, TBARS, 총 혐기성균, 분변대장균군은 높음 • 구아바잎 추출물 농도 증가 시 미생물 검출 감소 • 2 kGy 처리는 대조구보다 TPC, DPPH, FRAP, 명도, 적색도, 황색도 증가 및 TVBN, TBARS, POV 감소 	Sadiq et al. (2023)
	측정 미생물	총 미생물		
	저장 조건	• 0, 5, 10 days		
간 돼지고기	처리 조건	<ul style="list-style-type: none"> • 감마선 • 5 kGy 	<ul style="list-style-type: none"> • 5 kGy 처리 시 <i>Pseudomonas aeruginosa</i>와 <i>Lactobacillus casei</i>가 검출 X • 5 kGy 처리한 <i>Pseudomonas aeruginosa</i> 처리구는 대조구보다 pH 증가 • 5 kGy 처리한 <i>Lactobacillus casei</i> 처리구는 대조구보다 pH 감소 	Kim et al. (2004)
	측정 미생물	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pseudomonas aeruginosa</i> • <i>Lactobacillus casei</i> 		
	저장 조건	• 0, 5, 10 days		

표 3. 계속

동물성 자원	실험 조건		실험 결과	참고문헌
다진 돼지고기/ 볼로냐 소시지	처리 조건	<ul style="list-style-type: none"> 전자빔, X선 2.5 MeV 2, 4, 6, 8, 10 kGy 	<ul style="list-style-type: none"> X선은 전자빔보다 단백질 용해도, 총균수, 명도, 적색도는 낮고 TBARS, 황색도, 가열수율은 높음 2 kGy 이상 처리 시 콜라겐 용해도, TBARS, 적색도, 황색도 증가 및 총균수, 명도 감소 다진 돼지고기에서 8 kGy 전자빔, X선 처리 시 검출 수준 이하로 총균수 억제 	Shin et al. (2014)
	측정 미생물	총 미생물		
간 소고기	처리 조건	<ul style="list-style-type: none"> 감마선 2 kGy 	<ul style="list-style-type: none"> 2 kGy 처리 시 중온성균, 저온성균, 효모 및 곰팡이가 각각 2.58, 3.76, 1.32 log CFU/g 감소 2 kGy 처리 시 헴철 감소 및 TBARS, 과산화물, 명도, 적색도 증가하였으나, pH, 일반성분에 영향 X 	Ayari et al. (2016)
	측정 미생물	<ul style="list-style-type: none"> 중온성균 총 대장균군 효모 및 곰팡이 <i>Bacillus cereus</i> <i>Escherichia coli</i> <i>Listeria monocytogenes</i> <i>Staphylococcus aureus</i> 		
	저장 조건	0, 7, 12, 21 days		
통조림 청어	처리 조건	<ul style="list-style-type: none"> 감마선 1.5, 3, 6 kGy 	<ul style="list-style-type: none"> 감마선, 전자빔을 6 kGy 처리 시 미생물 약 1 log CFU/g 검출 X선을 3-6 kGy 처리 시 미생물 약 1 log CFU/g 검출 	Sanzharova et al. (2021)
		<ul style="list-style-type: none"> X선, 전자빔 4.8 MeV 1.5, 3, 6 kGy 		
	측정 미생물	<ul style="list-style-type: none"> 조건혐기성균 중온성균 총 미생물 <i>Listeria</i> spp. <i>Salmonella</i> spp. <i>Staphylococci</i> spp. 		
	저장 조건	15, 30 days		

화 효능을 나타낸다(Sadiq et al., 2023). 또한, 합성 항산화물인 무기피로인산염과 신남알데하이드, 그리고 아스코르브산은 중온성 및 저온성 미생물에 대하여 높은 저해 효과를 나타내었으며, 항균능력은 무기피로인산, 신남알데하이드, 아스코르브산 순으로 높게 나타났다(Ayari et al., 2016). 이외에도 차 폴리페놀, 포도씨 추출물, D-sodium erythorbate, 키토산, 카르바크롤, 망고스틴 과육 등 항산화제의 첨가는 방사선 조사와 함께 처리하였을 때, 미생물 억제 효과가 나타난다. 이러한 항산화제 첨가는 방사선 저항성이 높은 미생물이나 소비기간 중 외부 오염 요인을 예측 및 제거할 필요가 있는 완제품에 대하여 방사선 조사량 감소에 응용할 수 있을 것으로 판단된다.

내성포자를 형성하는 식중독균 또는 방사선 저항성이 높은 미생물의 경우 일반 식중독균보다 더 강한 선

량에서의 처리가 필요하다. 이중 *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Proteus mirabilis*, *Enterococcus faecalis*, 그리고 *Clostridium botulinum* 등은 일반 식중독균(*Escherichia coli*, *Staphylococcus* spp., *Listeria monocytogenes* 등)보다 감마선, 전자선에서 D₁₀-value가 약 2배 이상 높게 나타나 적정 멸·살균 방사선량 선정 시 고려가 필요할 것으로 판단된다(De Lara et al., 2002 ; Ebrahim et al., 2022). 이에 펫푸드 원료에 대한 방사선 멸·살균 처리는 최대 허용 선량인 10 kGy 이내의 조사량으로 생육 종류에 따른 품질 및 관능평가 연구가 필요할 것으로 판단된다. 펫푸드 완제품의 경우 성상과 유통 형태(파우치, 통조림 등)에 따라 오염 우려가 높은 미생물에 대하여 적정 방사선 멸·살균 조사량과 품질 및 관능평가 연구가

필요할 것으로 사료된다.

3. 식품에서의 플라즈마 비열 처리 기술

1) 식품에서의 플라즈마 처리 기술

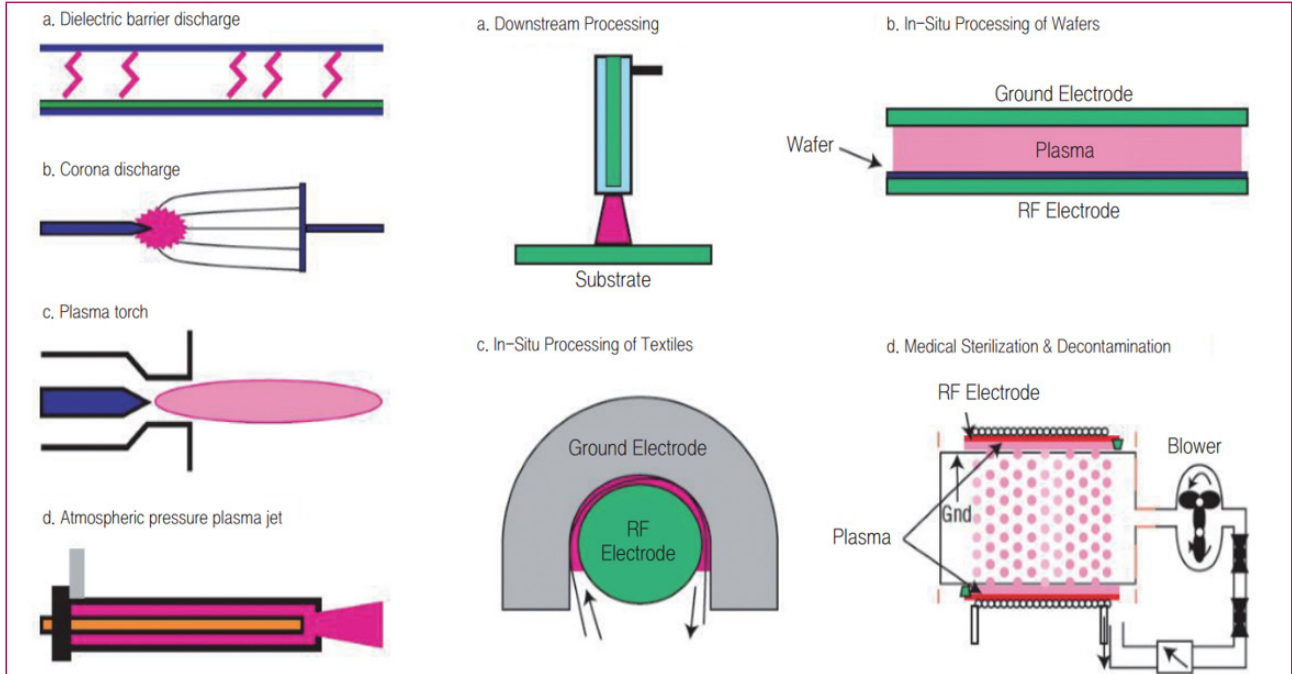
플라즈마는 물질이 높은 에너지를 얻어 분리된 이온과 전자가 에너지 평형 또는 비평형을 이루는 제4의 물질로, 이온과 전자, 자유 라디칼, 그리고 자외선 등으로 구성되어 있으며 번개, 오로라, 네온사인, 형광등을 예로 들 수 있다(표 4). 이는 이온과 전자의 평형 상태에 따라 고온 플라즈마(평형 플라즈마 ; 아크 방전이 해당)와 저온 플라즈마(비평형 플라즈마 ; 코로나와 유전체 장벽 방전이 해당)로 분류될 수 있고(그림 3), 이중 저온 플라즈마는 전자 온도가 전체 온도보다 높아 비평형 플라즈마라고도 한다(Mok and Song, 2010). 또한, 저온 플라즈마는 저압(감압) 또는 상압(대기압)에서 아크 방전, 코로나 방전, 유

전체 장벽 방전(DBD)을 통해 이온화 가스 상태가 유도 및 유지된다(Birania et al., 2022). 아크 방전은 상압에서 직류전극을 이용해 극소 부위에 한하여 고온의 플라즈마를 발생시키며, 코로나 방전 또한 상압에서 직류전극을 사용하고 비교적 발열이 적으나 극소 부위에만 적용할 수 있다는 한계가 있다(Dalvi-Isfahan et al., 2023). 이에 유전체 장벽 플라즈마는 직류 또는 교류전극을 연결한 평행한 두 금속판에 하나 혹은 두개의 유전체판을 붙여 발열이 적고 처리 면적이 넓은 플라즈마를 생성할 수 있다(Nasiru et al., 2021). 저온 플라즈마 기술 중 상압 플라즈마는 플라즈마의 생성속도 제어가 어렵고 과도한 에너지에 의한 온도 상승이 발생하기 때문에 저온살균을 병행한 저온 상압 플라즈마를 주로 사용한다(Domonkos et al., 2021). 반면, 저압 플라즈마는 플라즈마 발생 기체를 조절할 수 있어 플라즈마 생성속도를 조절하여 열 발생을 억제해 비가열 멸·살균에 적합하다(Mok and Song, 2010). 저압 플라즈마와 함께 액체 플라즈마(플라즈마 활

표 4. 원자의 에너지량과 구조에 따른 물질의 네 가지 형태

에너지량	원자 형태	원자 구조	
매우 적음	고체		 얼음, 주괴
적음	액체		 물, 기름
많음	기체		 수증기, 가스
매우 많음	플라즈마		 번개, 오로라, 네온사인

그림 3. 다양한 플라즈마 형태와 응용기술



출처: 국방과학연구소. 2015. KR-10-1573231-0000.

성수, PAW) 또한 축산물과 과채류에서의 비가열 멸·살균 기술로 연구되고 있다(Sammanee et al., 2022).

플라즈마에 의한 미생물 멸·살균 연구는 1990년대 중반부터 연구되었으나, 식품 산업에서의 적용은 2000년대 초반부터 응용되고 있다(Li and Farid, 2016). 플라즈마는 상온 진공 상태에서 안정적으로 작동시키기 위한 시설에 있어 금전적 부담이 있기 때문이며, 최근 플라즈마 기술은 상대적으로 간단하고 저렴한 장비가 연구되고 있다. 플라즈마는 화학적 처리와 잔류물질 없이 미생물을 멸·살균할 수 있어 최근 식품 산업에서는 미생물 사멸과 오염물질 제거, 유통기한 연장, 효소 불활성화, 독소 제거, 식품포장 개선, 그리고 폐수 처리 등에 활용되고 있다(Hati et al., 2018). 이중 플라즈마에 의한 미생물 멸·살균은 플라즈마로 생성된 자외선에 의한 DNA의 변형(UV inactivation)과 화학결합 파괴로 인한 휘발성 물질의 방출(photodesorption), 그리고 반응성 화합물의 흡착반응(etching) 등에 의해 발생된다(Mok and Song, 2010). 이는 *Escherichia coli*, *Salmonella*,

Listeria 등 식중독균과 norovirus, hepatitis virus 멸·살균에 효과적이다. *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Campylobacter* 등 위해 미생물은 가축의 도축 시 오염되기 쉬운 주요 미생물이다. 축산물에서의 플라즈마 기술은 다양한 위해 물질과 미생물을 효과적으로 멸·살균하며 색상과 질감 등 품질 특성에 큰 영향을 주지 않아 닭고기, 돼지고기, 소고기에서 주로 응용 연구가 이루어지고 있다(Misra and Jo, 2017).

2) 펫푸드 동물성 원료의 플라즈마 처리 기준 설정

동물성 자원 멸·살균 처리에 주로 적용되는 플라즈마는 단백질 변형이 적은 대기압 또는 진공 조건과 44°C 이하의 온도에서 플라즈마를 처리하는 유전체 장비 플라즈마 또는 플라즈마 처리수를 사용하는 것을 알 수 있다(표 5). 닭고기에 적용되고 있는 비가열 플라즈마 멸·살균은 닭가슴살과 닭다리살 부위에 대하여 유전체 이용 플라즈마 또는 플라즈마 처리수를 침지하는 방법이 주로 연

표 5. 주요 펫푸드 동물성 자원별 플라즈마 처리

동물성 자원	실험 조건		실험 결과	참고문헌
닭가슴살	처리 조건	<ul style="list-style-type: none"> • 가압 플라즈마 • 10, 30 sec, 1, 2, 3 min • Gap: 1.0-1.5 cm • Voltage: 6.0-11.0 kV • Frequency: 23.0 to 38.5 kHz • He: 5.0 L/min • O₂: 50, 100 mL/min 	<ul style="list-style-type: none"> • 시료 표면이 두껍고 거칠수록 플라즈마 처리 효과가 감소 	Noriega et al. (2011)
	측정 미생물	<ul style="list-style-type: none"> • 총 미생물 • <i>Listeria innocua</i> 		
닭가슴살/ 돼지 삼겹살	처리 조건	<ul style="list-style-type: none"> • 플라즈마 활성수 (PAW, 침지) • Voltage: 125 W, 15 kV • Frequency: 50 Hz • 60 ppm H₂O₂, 500 mL 	<ul style="list-style-type: none"> • 돼지고기와 닭고기를 과산화수소 PAW 처리 시 <i>Campylobacter jejuni</i>가 다른 미생물보다 가장 많이 감소 • 돼지고기 표면에 과산화수소 PAW 처리 시 pH, 명도, 온도, 수분활성도 증가 및 적색도, 황색도 감소 • 닭고기 표면에 과산화수소 PAW 처리 시 pH, 적색도 증가 및 명도, 황색도, 온도 감소 	Sammanee et al. (2022)
	측정 미생물	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Campylobacter jejuni</i> • <i>Escherichia coli</i> • <i>Pseudomonas aeruginosa</i> • <i>Salmonella typhimurium</i> • <i>Staphylococcus aureus</i> 		
	저장 조건	<ul style="list-style-type: none"> • 0, 3, 7, 10 days • 4 to 6°C 		
돼지 등심	처리 조건	<ul style="list-style-type: none"> • 진공 플라즈마 • 5, 10 min • Frequency: 20-100 kHz 	<ul style="list-style-type: none"> • 5 kGy 처리 시 <i>Pseudomonas aeruginosa</i>와 <i>Lactobacillus casei</i>가 검출 X • 5 kGy 처리한 <i>Pseudomonas aeruginosa</i> 처리구는 대조구보다 pH 증가 • 5 kGy 처리한 <i>Lactobacillus casei</i> 처리구는 대조구보다 pH 감소 	Ulbin-Figlewicz et al. (2015)
	측정 미생물	<ul style="list-style-type: none"> • 총 미생물 • 효모 및 곰팡이 		
	저장 조건	<ul style="list-style-type: none"> • 0, 56, 12, 24, 48, 96, 192 h • 4°C 		
소고기	처리 조건	<ul style="list-style-type: none"> • PAW (1mL spray) • 0, 5, 10, 20, 30 min • Voltage: 10 kV • Frequency: 8 kHz • 40 mL deionized water 	<ul style="list-style-type: none"> • PAW를 5분 처리 시 대조구보다 처리구의 pH가 3.7 감소 • PAW 처리 시간이 증가할수록 VBN, TBARS가 증가 	Zhao et al. (2018)
	측정 미생물	<ul style="list-style-type: none"> • 총균수 • 총 미생물 		
	저장 조건	<ul style="list-style-type: none"> • 6, 12, 24, 48, 96, 192 h • 4°C 		
고등어 필렛	처리 조건	<ul style="list-style-type: none"> • PAW (침지) • 25°C • 10 min • Voltage: 550 W • Frequency: 25 kHz • 200 ppm CH₃COOH 30 mL 	<ul style="list-style-type: none"> • 과아세트산 PAW을 10분 처리 시 총 미생물이 3.8 log CFU/g 감소 • 과아세트산 PAW 처리 시 색상, TBARS에 유의적인 영향 X 	Zhao et al. (2021)
	측정 미생물	<ul style="list-style-type: none"> • 총 미생물 • <i>Escherichia coli</i> • <i>Listeria innocua</i> • <i>Pseudomonas fluorescens</i> 		

구되고 있다. 이때 껍질이 있는 닭고기는 표면이 균일하지 않아 표면이 균일한 경우보다 미생물 멸·살균 효과가 감소하였다(Noriega et al., 2011). 이에 껍질이 있

는 닭껍질은 조사거리(gap) 1.0 cm, 전압 7.0 kV, 주파수 38.5 kHz 조건에서 3분 또는 전압 8.0 kV에서 30초 조사하는 것이 리스테리아 음성 검출에 효과적일 것으로

판단된다. 반면, 껍질이 없는 닭가슴살은 조사거리 1.0 cm, 전압 8.0-11.0 kV, 주파수 38.5-30.0 kHz 조건에서 리스테리아 음성 검출되었는데, 이로 인하여 높은 전압과 주파수를 가진 플라즈마를 사용하는 것이 닭고기 리스테리아 멸·살균에 효과적인 것으로 판단된다. 플라즈마 멸·살균 효과에 영향을 주는 요인은 전압과 주파수뿐만 아니라 노출시간, 유속, 수분, 온도, 그리고 가스 조성 등이 있다.

비가열 플라즈마 멸·살균 효과에 영향을 미치는 다른 요인은 대기 조성 가스로, 질소와 아르곤, 헬륨 등이 주로 사용되고 있다(Ulbin-Figlewicz N et al., 2015). 이러한 가스 조성을 달리한 돼지고기 등심의 진공 유전체 플라즈마 멸·살균 영향은 헬륨에서 가장 높은 미생물 사멸 효과를 나타내었다. 또한, 효모 및 곰팡이가 총균수와 저온성균보다 높은 사멸 효과를 보였다. 가스 조성을 달리한 플라즈마는 시료의 pH에 유의적 영향을 미치지 않아 원물에 큰 변화를 일으키지 않을 것으로 판단된다. 그러나 플라즈마 멸·살균은 장비와 운용 비용이 비싸다는 단점이 있어 이에 대한 대안으로 플라즈마 활성화도 연구되고 있다(Du et al., 2022).

플라즈마 활성화는 수조에 담긴 액체에 플라즈마 발생기로 전극을 통하게 하여 제조하고, 이를 시료의 표면에 분무하거나 시료를 침지시키는 방법이 주로 연구되고 있다. 플라즈마 활성화는 주로 과산화수소, 치아염소산, 치아염소산나트륨, 아세트산 등의 희석액을 사용하고 적용 조건은 25°C 전후의 온도에서 10분 동안 처리가 주로 시행된다. 돼지고기와 닭고기에 대하여 과산화수소 플라즈마 처리는 캄필로박터, 살모넬라 아우레우스에 대한 멸·살균 효과가 높았으나 슈도모나스의 멸·살균에는 효과가 없는 것으로 나타났다(Sammanee et al., 2022). pH와 색도는 심부와 표면 처리 시 각기 다른 결과를 나타내어 플라즈마 활성화수 이용 시 기호성에 부정적 영향을 미치지 않을 수준의 처리 수준이 필요할 것으로 보인다. 고등어에 적용한 플라즈마 활성화수 또한 pH가 감소하는 경향을 보였고, 색도는 유의적 차이를 나타내지 않았다. 이러한 플라즈마 활성화수는 유전체 장벽 플라즈마와 달리 침

지나 살포 방식을 통해 대량 처리가 가능하나 산성의 활성화수는 신맛을 내어 기호성에 영향을 미칠 수 있으므로 활성화수 종류에 따른 기호성 연구가 필요할 것으로 보인다. 이에 표면이 균일한 펫푸드 원료와 완제품에 대한 플라즈마 멸·살균은 25°C 전후의 상온에서 유전체 장벽 플라즈마를 이용하여 처리하는 것이 품질 및 관능적으로 우수할 것으로 판단된다. 그러나 유전체 장벽 플라즈마는 플라즈마 활성화수 처리보다 비용적 부담이 있으므로, 펫푸드 원료와 완제품에 대한 플라즈마 처리 방법 간의 비교 연구가 필요할 것으로 사료된다.

III. 결론

식품 산업에서 비열 멸·살균 기술의 상용화가 활발히 진행되고 있으며, 펫 휴머니제이션 문화 확산에 따라 펫푸드에 대한 비가열 멸·살균의 도입은 상용화 가치가 높을 것으로 판단된다. 주로 도입되고 있는 비가열 멸·살균 기술은 초고압, 플라즈마, 방사선으로 전통적인 살균 방법(화학 살균, 가열 살균 등)과 달리 식품에 잔여물을 남기지 않고, 원재료의 변형과 영양 파괴를 최소화하는 등의 품질 및 관능적 장점이 있다. 초고압은 원재료 또는 완제품에 고압을 가하는 것으로 시료의 모양과 색상, 포장 유무에 관계없이 시료 전면에 대한 고른 멸·살균 처리가 가능하다. 그러나 200-400 MPa 처리 조건에서 단백질 겔 형성과 육색 변화가 발생할 수 있어 저압에서 미생물 멸·살균에 효과적인 처리 조건을 찾는 것이 중요하다. 이에 펫푸드 초고압 처리는 생육과 완제품 간의 멸·살균 효율과 품질(색, 보수력, 전단력 등) 및 관능특성(풍미, 패널평가 등) 연구가 필요할 것으로 판단된다. 플라즈마는 플라즈마 방전 기술을 응용하여 원재료 또는 완제품 표면을 멸·살균 처리하는 기술로, 유전체를 사용하여 가용 범위를 넓히고 처리 온도를 낮춘 유전체 장벽 플라즈마 기술이 주로 연구되고 있다. 그러나 이는 플라즈마 처리수보다 경제성이 떨어지고, 플라즈마 처리수는 처리수 종류에 따른 신맛을 발생시킬 수 있어 두 방법에 대한 효율성 비교가 필요할 것으로 사료된다. 이에 다양한 플라

즈마 방법에 따른 펫푸드의 품질 및 관능특성 연구가 필요할 것으로 판단된다. 방사선은 원재료 또는 완제품에 방사선을 투과시키는 것으로 시료를 포장한 상태에서 조사가 가능하다. 그러나 특정 조사량에서 변색 및 이취가 발생할 수 있으므로 반려동물에 대한 기호성 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이에 펫푸드 방사선 처리는 다양한 성상과 완제품에 대하여 적정 방사선량 선정과 품질 및 관능특성 연구가 필요할 것으로 사료된다. 이러한 비가열 멸·살균 처리 연구는 반려동물 및 반려인의 식중독과 조

류 인플루엔자 등 인수공통감염병 예방에 도움을 주며 관능적으로 우수한 펫푸드 생산 기반이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청의 "농업과학기술개발협력연구사업(과제번호 RS-2023-00231378)"의 지원으로 수행되었습니다. 연구 수행에 도움을 주셔서 감사합니다.

참고문헌

1. 국방과학연구소. 2015. 플라즈마 발생 전극모듈, 플라즈마 발생 전극 집합체 및 이를 이용한 플라즈마 발생 장치. KR-10-1573231-0000.
2. 내 손안에 서울. 서울시 5가구 중 1가구 '반려동물과 산다'.
3. 목철균, 송동명. 2010. 감압 플라즈마를 이용한 *Escherichia coli* 살균. 산업식품공학 14(3): 202-207.
4. 미래에셋증권. [글로벌 펫케어] ProShares Pet Care ETF (PAWZ US).
5. 방사선기술정보시스템. 방사선 개념정리.
6. 삼일 PwC경영연구원. Industry Issue Report-2023년 7월 1주.
7. Ahn DU, Kim IS, Lee EJ. 2013. Irradiation and additive combinations on the pathogen reduction and quality of poultry meat. Poultry Science, 92(2): 534-545.
8. Albert T, Braun PG, Saffaf J, Wiacek C. 2021. Physical methods for the decontamination of meat surfaces. Current Clinical Microbiology Reports, 8: 9-20.
9. Argyri AA, Papadopoulou OS, Nisiotou A, Tassou CC, Choriantopoulos N. 2018. Effect of high pressure processing on the survival of *Salmonella* Enteritidis and shelf-life of chicken fillets. Food Microbiology, 70: 55-64.
10. Ayari S, Han J, Vu KD, Lacroix M. 2016. Effects of gamma radiation, individually and in combination with bioactive agents, on microbiological and physicochemical properties of ground beef. Food Control, 64: 173-180.
11. Barbhuiya RI, Singha P, Singh SK. 2021. A comprehensive review on impact of non-thermal processing on the structural changes of food components. Food Research International, 149: 110647.
12. Birania S, Attkan AK, Kumar S, Kumar N, Singh VK. 2022. Cold plasma in food processing and preservation: A review. Journal of Food Process Engineering, 45(9): e14110.
13. Campus M. 2010. High pressure processing of meat, meat products and seafood. Food Engineering Reviews, 2(4): 256-273.
14. Chen X, Tume RK, Xiong Y, Xu X, Zhou G, Chen C, Nishiumi T. 2018. Structural modification of myofibrillar proteins by high-pressure processing for functionally improved, value-added, and healthy muscle gelled foods.

- Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 58(17): 2981–3003.
15. Dalvi-Isfahan M, Havet M, Hamdami N, Le-Bail A. 2023. Recent advances of high voltage electric field technology and its application in food processing: A review with a focus on corona discharge and static electric field. *Journal of Food Engineering*, 353: 111551.
 16. De Lara J, Fernández PS, Periago PM, Palop A. 2002. Irradiation of spores of *Bacillus cereus* and *Bacillus subtilis* with electron beams. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 3(4): 379–384.
 17. Demir ES, Ozgenc E, Gundogdu EA. 2019. Radiation sterilization applications. *International Journal of Scientific and Technological Research*, 5(12): 112–119.
 18. Domonkos M, Tichá P, Trejbal J, Demo P. 2021. Applications of cold atmospheric pressure plasma technology in medicine, agriculture and food industry. *Applied Sciences*, 11(11): 4809.
 19. Du Y, Yang F, Yu H, Xie Y, Yao W. 2022. Improving food drying performance by cold plasma pretreatment: A systematic review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(5): 4402–4421.
 20. Ebrahim H, Abou El-Nour S, Hammad AA, Abouzeid M, Abdou D. 2022. Comparative effect of gamma and electron beam irradiation on some food borne pathogenic bacteria contaminating meat products. *Egyptian Journal of Pure and Applied Science*, 60(1): 62–72.
 21. Elamin WM, Endan JB, Yosuf YA, Shamsudin R, Ahmedov A. 2015. High pressure processing technology and equipment evolution: a review. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 8(5).
 22. Farkas J. 1998. Irradiation as a method for decontaminating food: a review. *International Journal of Food Microbiology*, 44(3): 189–204.
 23. Govaris A, Pexara A. 2021. Inactivation of foodborne viruses by high-pressure processing (HPP). *Foods*, 10(2): 215.
 24. Hati S, Patel M, Yadav D. 2018. Food bioprocessing by non-thermal plasma technology. *Current Opinion in Food Science*, 19: 85–91.
 25. Jildeh ZB, Wagner PH, Schöning MJ. 2021. Sterilization of objects, products, and packaging surfaces and their characterization in different fields of industry: The status in 2020. *Physica Status Solidi (a)*, 218(13): 2000732.
 26. Jung S, Kang MG, Kim IS, Nam KC, Ahn DU, Jo CR. 2012. Effect of addition of phosvitin and high pressure processing on microbiological quality and lipid and protein oxidation of minced chicken leg meat. *Food Science of Animal Resources*, 32(2): 212–219.
 27. Karłowski K, Windyga B, Fonberg-Broczek M, Ścieżyńska H, Grochowska A, Górecka K, Mroczek J, Grochalska D, Barabas A, Arabas J, Szczepek J, Porowski S. 2002. Effects of high pressure treatment on the microbiological quality, texture and colour of vacuum packed pork meat products. *International Journal of High Pressure Research* 22(3–4): 725–732.
 28. Kim DH. 2006. Principles of radiation sterilization of food materials. *Food Industry and Nutrition* 11(3): 21–29.
 29. Kim JK, Jo CR, Kim HJ, Lee KH, Kim YJ, Byun MW. 2004. Relationship of specific microbial growth and TBARS value in radiation-sterilized raw ground pork. *Preventive Nutrition and Food Science*, 9(4): 312–316.
 30. Li X, Farid M. 2016. A review on recent development in non-conventional food sterilization technologies.

- Journal of Food Process Engineering, 182: 33–45.
31. McArdle RA, Marcos B, Kerry JP, Mullen AM. 2011. Influence of HPP conditions on selected beef quality attributes and their stability during chilled storage. *Meat Science*, 87(3): 274–281.
 32. Misra NN, Jo C. 2017. Applications of cold plasma technology for microbiological safety in meat industry. *Trends in Food Science*, 64: 74–86.
 33. Nasiru MM., Frimpong EB, Muhammad U, Qian J, Mustapha AT, Yan W, Zhuang H, Zhang J. 2021. Dielectric barrier discharge cold atmospheric plasma: Influence of processing parameters on microbial inactivation in meat and meat products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(3): 2626–2659.
 34. Noriega E, Shama G, Laca A, Díaz M, Kong MG. 2011. Cold atmospheric gas plasma disinfection of chicken meat and chicken skin contaminated with *Listeria innocua*. *Food Microbiology*, 28(7): 1293–1300.
 35. Pou KJ. 2021. Applications of high pressure technology in food processing. *International Journal of Food Studies*, 10(1): 248–281.
 36. Renaud C, de Lamballerie M, Guyon C, Astruc T, Venien A, Pottier L. 2022. Effects of high-pressure treatment on the muscle structure of salmon (*Salmo salar*). *Food Chemistry*, 367: 130721.
 37. Rode TM, Hovda MB. 2016. High pressure processing extend the shelf life of fresh salmon, cod and mackerel. *Food Control*, 70: 242–248.
 38. Rodrigues I, Trindade MA, Caramit FR, Candoğan K, Pokhrel PR, Barbosa-Cánovas GV. 2016. Effect of high pressure processing on physicochemical and microbiological properties of marinated beef with reduced sodium content. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 38: 328–333.
 39. Sadiq A, Arshad MS, Amjad RB, Munir H, Rohi M, Khalid W, Nadeem MT, Suleria HAR. 2023. Impact of gamma irradiation and guava leaf extract on the quality and storage stability of chicken patties. *Food Science & Nutrition*, 11(8): 4485–4501.
 40. Sammanee P, Ngamsanga P, Jainonthee C, Chupia V, Sawangrat C, Kerdjana W, Na Lampang K, Meeyam T, Pichpol D. 2022. Decontamination of pathogenic and spoilage bacteria on pork and chicken meat by liquid plasma immersion. *Foods*, 11(12): 1743.
 41. Sanzharova NI, Kobyalko VO, Polyakova IV. 2021. Comparison of the effectiveness of antimicrobial radiation treatment of fish preserves on different installations. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 640(3): 032001.
 42. Sazonova S, Galoburda R, Gramatina I. 2017. Effect of high pressure processing on microbial load in pork. *Research for Rural Development*, 1: 237–243.
 43. Seo SH, Kim EM, Kim YB, Cho EK, Woo HJ, Lee MA. 2014. Quality improvement of Galbijjim using superheated steam and high hydrostatic pressure. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 43(9): 1423–1430.
 44. Shahbaz HM, Akram K, Ahn JJ, Kwon JH. 2016. Worldwide status of fresh fruits irradiation and concerns about quality, safety, and consumer acceptance. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(11): 1790–1807.
 45. Shahi S, Khorvash R, Goli M, Ranjbaran SM, Najarian A, Mohammadi Nafchi A. 2021. Review of proposed

- different irradiation methods to inactivate food-processing viruses and microorganisms. *Food science & nutrition*, 9(10): 5883–5896.
46. Shin MH, Lee JW, Yoon YM, Kim JH, Moon BG, Kim JH, Song BS. 2014. Comparison of quality of bologna sausage manufactured by electron beam or X-ray irradiated ground pork. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 34(4): 464.
47. Thayer DW, Boyd G. 1991. Effect of ionizing radiation dose, temperature, and atmosphere on the survival of *Salmonella typhimurium* in sterile, mechanically deboned chicken meat. *Poultry Science*, 70(2): 381–388.
48. Ulbin-Figlewicz N, Brychcy E, Jarmoluk A. 2015. Effect of low-pressure cold plasma on surface microflora of meat and quality attributes. *Journal of Food Science and Technology*, 52: 1228–1232.
49. Yang J, Pan M, Han R, Yang X, Liu X, Yuan S, Wang S. 2023. Food irradiation: an emerging processing technology to improve the quality and safety of foods. *Food Reviews International*, 1–23.
50. Zhao Y, Chen R, Tian E, Liu D, Niu J, Wang W, Qi Z, Xia Y, Song Y, Zhao Z. 2018. Plasma-activated water treatment of fresh beef: Bacterial inactivation and effects on quality attributes. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, 4(1): 113–120.
51. Zhao YM, Oliveira M, Burgess CM, Crobotova J, Rustad T, Sun DW, Tiwari BK. 2021. Combined effects of ultrasound, plasma-activated water, and peracetic acid on decontamination of mackerel fillets. *LWT—Food Science and Technology*, 150: 111957.