

식품 살균을 위한 X선 조사 기술의 활용 및 전망

The potential of X-ray irradiation as a new pasteurization technology for food

임종성¹ · 이재원^{1*}

Jong-Seong Lim¹ and Jae-Won Ha^{1*}

¹한경대학교 식품생명공학전공

¹Department of Food Science and Biotechnology, Hankyong National University

Abstract

Ionizing radiation is one of the efficient non-thermal pasteurization methods. The US Food and Drug Administration (FDA) allows the use of ionizing radiation to a dose up to 10 kGy for controlling foodborne pathogens and extending the self-life of foods. Recently X-rays, generated on absorption of high energy electrons in an appropriate metal target, have been used commercially for sterilization purposes. X-rays have the advantages of higher penetration power than E-beams and absence of harmful radioactive sources, such as Cobalt-60 or Cesium-137 associated with gamma-rays. That is why it has continued to receive attention as an

attractive alternative to gamma-ray or E-beam irradiation. In this article, the potential of X-ray irradiation for controlling foodborne pathogens in various food products and necessary pre-requisite knowledge for the introduction of X-ray irradiation to the Korean food industry will be provided.

Keywords: X-ray, food irradiation, pasteurization, foodborne pathogens, food safety

서론

식품살균법으로써 오랫동안 사용되어 온 가열 살균법은 영양성분을 파괴하고 관능적 품질을 저하시킨다는 문제가 있다. 최근 소비자들은 최소한의

* Corresponding author: Jae-Won Ha

Department of Food Science and Biotechnology, Hankyong National University, Anseong-si 17579, Korea

Tel: +82-31-670-5153

Fax: +82-31-670-5159

E-mail: hjw@hknu.ac.kr

Received July 30, 2020; revised August 27, 2020; accepted August 28, 2020



Fig. 1. Global sterilization market volume shares, by sterilization technology (Adapted from GIP Alliance and International Irradiation Association, 2018)

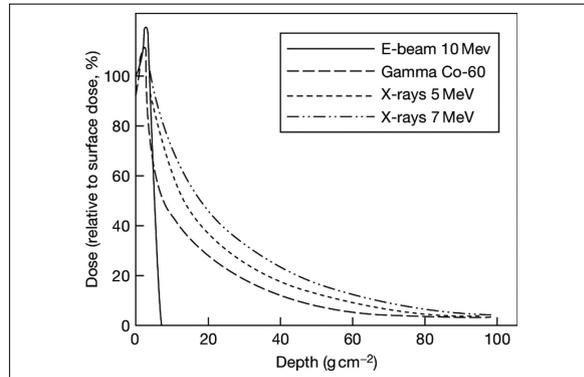


Fig. 2. Dose and penetration depth profiles of e-beam, g-, and X-rays. Note that the penetration depth is a function of both distance and material density (Adapted from Qiu et al., 2011)

가공으로 식품 품질을 유지하면서 미생물학적으로 안전한 식품을 선호하고 있다. 가열 살균의 단점을 보완하기 위해 화학적 살균법이 도입되었지만 사용방법에 따른 미생물의 저항성 변화(적응이나 손상회복 등)와 내성화(항생제 내성 등) 등의 문제점이 발견되었고(Kim 등, 2009), 화학적 살균제에 대한 소비자의 부정적 인식으로 인해 대체 기술에 대한 요구가 증가하고 있다. 이에 따라 초고압 처리(Considine 등), 자외선 조사(Kim 등, 2020), 비열 플라즈마(Han 등), 고전압 펄스 전기장(Clemente 등), 초음파(Park과 Ha, 2019)와 같은 비가열 살균법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

전리 방사선 조사기술은 식품의 물리, 화학적 및 관능적 특성에 영향을 주지 않으며, 식품의 저장수명 증가와 미생물학적 안전성을 확보할 수 있는 효과적인 비가열 살균법이다(Cho와 Ha, 2019). 현재, 미국 질병통제예방센터(CDC)와 세계보건기구(WHO)에서는 식품 병원균으로부터 사람들을 보호할 수 있는 효과적인 기술로 전리 방사선 조사기술을 사용할 것을 권장하며(Mahmoud 등, 2009), 식량농업기구/국제원자력기구/세계보건기구(FAO/IAEA/WHO) 공동전문가 자문위원회에서 “10 kGy까지의 고선량 조사된 식품의 안전성을 연구한 결과 미생물학적, 영양학적, 독성학적으로 안전하고

건전하다.”라고 발표하였다(WHO, 1981). 또한, 1992년 WHO/IOCU공동 연구 그룹에서는 방사선 조사 식품의 안전성을 재확인하였다.

식품 방사선 조사에 이용되는 선원으로는 감마선, 전자선 및 X-선이 있으며, 주로 감마선과 전자선이 식품 살균을 목적으로 많이 이용된다. 실제로 GIP Alliance와 International Irradiation Association(2018)에 따르면 세계 식품 살균시장은 약 40.5% 감마선 조사, 4.5% 전자선 조사, 50% 산화 에틸렌(기체 살균법) 및 5% 기타 살균법의 구성 비율을 가진다고 보고하였다(Fig. 1). X-선은 X-선관 내 음극층 전자(electron)를 빠른 속도로 가속시킨 다음 진행되는 전자의 흐름을 저지극(target)에서 차단시킬 때 에너지의 변환을 일으켜 발생하는 이온화 방사선으로, 의료, 반도체 산업 및 농산물 검역에 널리 사용되고 있다(Jang 등, 2011).

X-선 조사는 식품산업에서 살균 목적으로 주로 활용되고 있는 감마선 및 전자선 조사 대비 다음과 같은 장점들이 있다. 5 MeV 및 7 MeV의 고준위 X-선은 감마선과 유사한 수준의 투과력을 보유함으로써, 전자선의 한계로 지적되고 있는 낮은 투과력을 보완할 수 있다(Qiu 등, 2011)(Fig. 2). 또한, X-선은 전기에 의해 발생되므로 Co-60 및 Cs-137 등과 같은 방사성동위원소들을 사용하는 감마선에

비해 비교적 높은 안전성 및 소비자 수용도를 가진다. 최근 전세계적인 원자로 시설의 감축으로 인한 방사선 동위원소의 가격상승으로 감마선 조사처리 비용이 증가하는 것 역시 X-선 조사기술이 기존 감마선 및 전자선 조사기술의 대안으로써 주목받는데 한 몫을 하고 있다(Jung 등, 2015). 현재, 전세계적으로 50여 개국에서 260종의 식품에 대해 X-선을 포함한 위 3종의 선원에 대해 사용이 허가되어 식품의 미생물 제어 또는 안전성 향상을 위해 활용되고 있다(Kim, 2010; Kim 등, 2011). 반면 국내에서는 방사선 조사선원으로 감마선과 전자선만 허가되어 X-선을 식품조사선원으로 활용할 수 없었으나, 2019년 7월 식품 조사용 방사선종으로 X-선을 포함하는 식품의 기준 및 규격 일부개정고시(안)이 행정예고 되어 뒤늦게나마 국내 식품산업에서도 X-선 조사기술의 활용 및 도입에 대한 논의가 시작될 것으로 예상된다(식품의약품안전처, 2019).

본 고에서는 살균을 목적으로 다양한 식품에 적용된 X-선 조사기술의 최신 연구 동향을 제시하여 향후 국내 식품산업의 X-선 조사기술 도입을 위한 기반지식을 제공하고자 한다.

본론

1. 다양한 식품군에서의 X-선 조사에 의한 미생물 제어 효과

1.1 육류 및 가공품

육류는 단백질과 철분, 아연, 비타민 B₁₂ 등의 필수 영양소를 함유한 고에너지원으로써 육류의 1인당 평균 소비량과 소비되는 고기량은 평균 개인 소득 증가와 인구 증가에 따라서 증가하고 있다(Godfray 등, 2018). 그러나 육류는 도축 과정이나 가축, 털 등 동물의 도체 표면에 존재하는 미생물에 의해 쉽게 오염될 수 있으며, 최근까지도 *Escherichia coli* 속, *Salmonella* 속, *Listeria monocytogenes* 등의 식중독 균에 의한 감염사례가 지속적으로 보고되고

있다. 미국 CDC(2019)는 *E. coli* 103에 오염된 우육 분쇄육(ground beef)을 섭취하여 209명이 식중독에 걸리는 사건이 발생하였다고 보고하였다. 또한, 2010년 덴마크에서는 *S. Typhimurium*에 감염된 육류 제품을 섭취하여 20건의 감염 사례가 있었으며, 이 중 50%는 10세 이하의 어린이였다고 보고되었다(Cho와 Ha, 2019). 육류 및 그 가공품의 품질을 보존하면서 존재하는 병원성 미생물을 효과적으로 제어하기 위한 살균법이 지속적으로 연구되고 있으며, X-선 조사 또한 병원성 미생물을 제어할 수 있는 새로운 비가열 살균법으로써 제시될 수 있다. 최근, X-선 조사처리를 통해 소, 돼지, 닭 등 다양한 육류 및 그 가공품에서 식중독 세균을 효과적으로 제어한 여러 연구가 보고되었다(Table 1). Song 등(2016)은 소 분쇄육에 접종된 *E. coli* O157:H7, *S. Typhimurium*, *L. monocytogenes* 및 *Staphylococcus aureus*에 대한 감마선, 10 MeV 전자선 및 7.5 MeV X-선의 조사의 D₁₀ 값(decimal reduction dose)을 측정하였다. 그 결과 식품 병원균에 대한 3개의 전리 방사선의 D₁₀ 값에서 유의적 차이가 관찰되지 않았고 X-선이 감마선 및 전자선과 같이 육류 살균목적의 방사선 조사선원으로 활용될 수 있음을 확인하였다. Mahmoud 등(2015)의 연구결과에 따르면 2.0 kGy X-선 처리했을 때 닭가슴살 fillet에 접종된 *S. enterica*는 검출한계 미만으로 감소하였으며, Calenberg 등(1999)의 연구에서도 1.5 kGy X-선 조사로 다진 닭가슴살에 접종된 대장균군, *Staphylococcus* 속, 그리고 *Pseudomonas* 속을 검출한계 미만으로 감소시킨 것을 확인하였다. 이외에도, X-선 조사처리는 슬라이스 햄 표면에 접종된 *E. coli* O157:H7, *S. Typhimurium*, 그리고 *L. monocytogenes*를 5 log cycle 이상 감소시켰을 뿐만 아니라(Cho와 Ha, 2019), 칠면조 다리에 접종된 *S. senftenberg*도 효과적으로 사멸시킨 결과가 보고되었다(Teotia와 Miller, 1976).

1.2 해산물 및 가공품

해산물에는 단백질, 오메가-3 지방산, 비타민 D,

Table 1. Efficacy of X-ray irradiation on inactivation of foodborne pathogens in meats, sea foods, and dairy products

Food	Target bacteria	Applied X-ray doses	Result ^a	Ref.
Meat				
Ground beef	<i>E. coli</i> O157:H7, <i>S. Typhimurium</i> , <i>S. aureus</i> , and <i>L. monocytogenes</i>	7.5 MeV	D ₁₀ -value ^b : 0.22-0.42 kGy	Song et al., 2016
Sliced ham	<i>E. coli</i> O157:H7, <i>S. Typhimurium</i> , and <i>L. monocytogenes</i>	up to 0.8 kGy	5.7-7.2 log CFU/g	Cho and Ha, 2019
Skin-on chicken breast fillet	<i>S. enterica</i>	up to 2.0 kGy	7.50 log CFU/g	Mahmoud et al., 2015
Minced chicken breast meat	Microflora	up to 1.5 kGy	2.25-4.68 log CFU/g	Calenberg et al., 1999
Turkey drumsticks	<i>S. senftenberg</i>	0.8 kGy	5.70-5.90 log CFU/ml	Teotia and Miller, 1975
Sea food				
Smoked catfish fillets	<i>L. monocytogenes</i>	up to 2.0 kGy	3.90 log CFU/g	Mahmoud et al., 2012
Smoked salmon fillets	<i>L. monocytogenes</i>	up to 2.0 kGy	3.70 log CFU/g	Mahmoud, 2012
Smoked Mullet	<i>L. monocytogenes</i>	up to 2.0 kGy	4.00 log CFU/g	Robertson et al., 2006
Raw tuna fillets	<i>S. enterica</i>	up to 0.6 kGy	7.60 log CFU/g	Mahmoud, 2016
Oysters(<i>Crassostrea virginica</i>)	<i>V. vulnificus</i>	up to 3.0 kGy	7.00 log CFU/g	Mahmoud, 2009c
Shrimp	<i>E. coli</i> O157:H7, <i>S. Typhimurium</i> , <i>S. flexneri</i> , and <i>V. parahaemolyticus</i>	up to 4.0 kGy	7.60-8.10 log CFU/g	Mahmoud, 2009a
Dairy product				
Sliced cheese	<i>E. coli</i> O157:H7, <i>S. Typhimurium</i> , and <i>L. monocytogenes</i>	up to 0.8 kGy	4.47-5.45 log CFU/g	Park and Ha, 2019
Skim milk, low-fat milk and whole-fat milk	<i>E. sakazakii</i>	up to 6.0 kGy	7.40-8.90 log CFU/ml	Mahmoud, 2009b

^aLog reduction of pathogens by X-ray irradiation.

^bDose required for 1-log reduction in cell count.

셀레늄 등과 같은 영양소를 많이 함유하고 있어 신경, 시간 및 인지 발달에 도움을 주며, 심혈관 질환의 예방에도 도움을 주는 것으로 알려져 있다(Elbashir 등, 2018). FAO에 따르면 전세계적으로 수십년 동안 해산물의 소비가 증가했으나(FAO, 2016), 해산물에 의한 식중독 사례도 그에 맞추어 지속적으로 발생하고 있다. 미국 공익과학센터(2009)에 따르면 1998년부터 2007년까지 보고된 7289건의 식중독 사례 중 838건은 해산물과 관련이 있었다고 보고하였다. 이에 해산물에서 *Salmonella* 속, *Vibrio* 속,

그리고 *Listeria monocytogenes* 등의 주요 식중독 균을 효과적으로 사멸시킬 수 있는 비가열 살균기술로서 X-선 조사처리에 대한 연구들이 진행되고 있다(Table 1). Robertson 등(2006)에 따르면 2.0 kGy X-선 조사했을 때 진공 포장된 훈연 송어에 접종된 *L. monocytogenes*가 4.0 log CFU/g만큼 감소되었다고 보고하였으며, Mahmoud 등(2016)은 *S. enterica*에 된 참치 fillet에 0.6 kGy X-선 조사했을 때 *S. enterica*의 수가 검출한계 미만으로 감소하였다고 보고하였다. 또한 *L. monocytogenes*가 접종된 훈제

Table 2. Efficacy of X-ray irradiation on inactivation of foodborne pathogens in vegetables, fruits, and others

Food	Target bacteria	Applied X-ray doses	Result ^a	Ref
Vegetables				
Spanich leaves	<i>E. coli</i> O157:H7, <i>S. enterica</i> , <i>L. monocytogenes</i> , and <i>S. flexneri</i>	up to 2.0 kGy	D ₁₀ -value ^b : 0.96–1.20 kGy	Mahmoud et al., 2010
Lettuce	<i>E. coli</i> O157:H7	up to 0.25 kGy	D ₁₀ -value: 0.04–0.08 kGy	Jeong et al., 2010
Roma tomatoes	<i>E. coli</i> O157:H7, <i>S. enterica</i> , <i>L. monocytogenes</i> , and <i>S. flexneri</i>	up to 1.5 kGy	D ₁₀ -value: 0.39–0.98 kGy	Mahmoud, 2010
Parsley Leaves	<i>E. coli</i> O157:H7, <i>S. enterica</i> , <i>L. monocytogenes</i> , and <i>S. flexneri</i>	up to 1.5 kGy	6.8–8.8 log CFU/g	Mahmoud, 2012b
Furits				
Cantalope	<i>E. coli</i> O157:H7, <i>S. enterica</i> , <i>L. monocytogenes</i> , and <i>S. flexneri</i>	up to 2.0 kGy	6.6–8.9 log CFU/g	Mahmoud, 2012a
Mangoes	<i>E. coli</i> O157:H7, <i>S. enterica</i> , <i>L. monocytogenes</i> , and <i>S. flexneri</i>	up to 1.5 kGy	> 5 log CFU/g	Mahmoud et al., 2016
Others				
Edible bird's nest	<i>E. coli</i> O157:H7 and <i>S. Typhimurium</i>	up to 0.4 kGy	5.84–6.35 log CFU/g	Zhang et al., 2020
Shell eggs	<i>S. enterica</i>	up to 2.0 kGy	8.1 log CFU/egg	Mahmoud et al., 2015
Almond	<i>S. Enteritidis</i> PT30 and <i>S. Tennessee</i>	up to 2.28 kGy	D ₁₀ -value: 0.23–0.43 kGy	Jeong et al., 2012
Walnut	<i>S. Enteritidis</i> PT30 and <i>S. Tennessee</i>	up to 4.32 kGy	D ₁₀ -value: 0.47–0.93 kGy	Jeong et al., 2012

^a Log reduction of pathogens by X-ray irradiation

^b Dose required for 1-log reduction in cell count

연어 및 메기 fillets에 2.0 kGy X-선 조사처리 후 5°C에서 5주간 저장실험한 결과, *L. monocytogenes*의 균 수가 검출한계 미만으로 감소 및 유지된 것으로 나타났다(Mahmoud, 2012; Mahmoud 등, 2012). 이러한 결과는 X-선으로 조사처리 했을 시 해산물에서 listeriosis의 위험을 현저하게 감소시키며 5°C에서 저장하는 동안 훈제 연어 및 메기의 저장 수명을 연장시킬 수 있음을 보여준다. 이외에도, X-선 조사는 굴에 접종된 *Vibrio vulnificus*의 수를 7.0 log CFU/g만큼 감소시켰을 뿐만 아니라, ready-to-eat shrimp에 접종된 *E. coli* O157: H7, *S. enterica*, *Shigella flexneri* 및 *V. parahaemolyticus*의 수를 현저

하게 감소(7.6–8.1 log reduction)시켰다(Mahmoud, 2009a; Mahmoud, 2009c).

1.3 우유 및 유제품

E. coli O157:H7, *S. Typhimurium*, *L. monocytogenes* 및 *Cronobacter sakazakii*는 우유 및 유제품 산업에서 중요한 식중독 세균으로 관리되고 있다. 2016년 미국에서 *L. monocytogenes*에 오염된 우유를 섭취하여 2명이 감염되어 1명이 사망하는 식중독 사건이 발생하였다(CDC, 2016). 또한, 미국 CDC(2010)는 *E. coli* O157:H7로 오염된 치즈는 식중독 감염을 일으켜 식중독 환자 15명이 발생했고, 용혈성 요독



증후군(Hemolytic uremic syndrome) 환자가 1명 발생되었다고 보고하였다. 이러한 우유 및 유제품에서 주요 식중독 세균을 제어하기 위해 X-선 조사가 적용된 연구들이 다음과 같이 보고되었다(Table 1). 무지방, 저지방(지방함량 1 및 2%) 및 일반 우유(지방함량 3.5%)에 접종된 *C. sakazakii*의 X-선 살균 효과에 대한 연구는 Mahmoud(2009b)에 의해 보고되었으며, 6.0 kGy X-선 조사처리했을 때 *C. sakazakii*의 수를 7.0 log 이상 감소시킨 것을 확인하였다. Park과 Ha(2019)의 연구에서는 0.8 kGy의 X-선 조사로 슬라이스 치즈의 품질에 영향을 주지 않고 접종된 *E. coli* O157:H7, *S. Typhimurium*, 그리고 *L. monocytogenes*를 검출 한계 이하로 감소시켰다고 보고하였다.

1.4 과채류

과일과 채소는 항산화 영양소를 비롯한 비타민, 무기질 등의 여러 유용한 물질들을 함유하고 있어 균형 잡힌 식단의 중요한 구성 요소이다. 세계암연구재단(WCRF)에서는 개인의 건강증진을 위해 과일과 채소(전분성 채소, 염장채소는 제외한 것)를 하루 최소 400 g 이상 섭취할 것을 권장하고 있다(Lee 등, 2018). 그러나 과일과 채소는 주로 생식으로 소비되기 때문에 식중독 발병의 원인으로 지속적인 문제가 제기되고 있다(Jeon과 Ha, 2020). 일반적으로 과일과 채소의 안전성을 확보하기 위해 염소수 처리법을 많이 사용하지만, 이는 유기물질과 반응하여 클로라민(chloramine) 및 트리할로메탄(trihalomethane)과 같은 유해한 독성화합물을 생성할 수 있다(Mahmoud, 2010). 따라서 식품산업에서는 과일 및 채소를 미생물학적 안전성을 확보하기 위한 새로운 살균기술을 필요로 하며 비가열 X-선 조사는 염소수 처리법에 대한 유망한 대안 중 하나로써 여러 연구가 보고되었다(Table 2).

Jeong 등(2010)에 따르면 *E. coli* O157:H7을 침지(dip) 또는 점(spot) 접종한 양상추(iceberg lettuce)에 X-선 조사한 결과 D_{10} 값이 0.04-0.08 kGy가 산출되었다고 보고했으며, 이 결과는 이전에 보고된

양상추에 접종된 *E. coli* O157:H7에 대한 감마선 조사의 D_{10} 값(0.14 kGy) 보다 낮아 X-선 조사가 잎 채소에서 병원성 미생물을 제어할 수 있는 효과적인 대안책이 될 수 있음을 보여준다. Mahmoud(2012b)는 *E. coli* O157: H7, *S. enterica*, *L. monocytogenes* 및 *Shigella flexneri*을 접종한 파슬리 잎에 X-선을 조사한 결과 1.0 kGy 선량에서 4개의 식중독균들이 5.0 log 감소한 것으로 나타났으며, 1.5 kGy 선량에서는 4개의 균 모두 검출한계 이하로 감소하였다고 보고하였다. 또한, *E. coli* O157:H7, *S. enterica*, *L. monocytogenes* 및 *S. flexneri*에 오염된 토마토(Roma tomato), 시금치, 벨론 및 망고에 각각 1.5, 2.0, 2.0 및 1.5 kGy X-선 조사 선량으로 처리했을 때 4개의 식중독균이 모두 검출한계 미만으로 감소되었다(Mahmoud, 2010; Mahmoud 등, 2012; Mahmoud, 2012a; Mahmoud 등, 2016).

1.5 기타

주요 식품군 외에도 견과류, 계란 껍질, 제비집에서의 주요 식중독 세균을 X-선 처리하여 효과적으로 제거시킨 연구들도 보고되었다. Zhang 등(2020)은 0.4 kGy X-선 조사처리 후 제비집(Edible bird's nest)에 접종된 *E. coli* O157:H7과 *S. Typhimurium*이 각각 5.84와 6.35 log 감소하였다고 보고하였다. Jeong 등(2012)은 아몬드와 호두에 X-선으로 조사 처리했을 때 관능품질에 영향을 주지 않고 접종된 *Salmonella* 속을 최대 5 log 감소를 시켰다고 보고하였고, *Salmonella* 속에 대한 X-선 처리의 D_{10} 값을 조사한 결과 호두와 아몬드 각각 0.474-0.930 kGy와 0.226-0.431 kGy의 값을 나타냈다.

2. X-선 조사처리에 의한 미생물 제어 기작 연구

전리 방사선 조사기술은 DNA의 구성요소인 purine과 pyrimidine 등 염기의 화학적 변환을 유도하여 DNA의 단일사슬 혹은 이중나선 결합구조를 파괴하거나, 조사과정에서 물분자로부터 생성된 활성산소종(ROS)이 세포, 핵 구조 등을 파괴하여 미

Table 3. Membrane damage of X-ray treated cells inferred from leakage of UV-absorbing substances^a (Adapted from Cho and Ha, 2019)

Target dose (kGy)	Absorbance					
	<i>S. Typhimurium</i>		<i>E. coli</i> O157:H7		<i>L. monocytogenes</i>	
	260nm	280nm	260nm	280nm	260nm	280nm
0	0.693±0.043 ^A	0.411±0.025 ^A	0.487±0.020 ^A	0.274±0.010 ^A	0.500±0.023 ^A	0.302±0.020 ^A
0.4	0.715±0.068 ^A	0.417±0.028 ^A	0.527±0.021 ^A	0.286±0.010 ^A	0.504±0.027 ^A	0.299±0.015 ^A
0.8	0.734±0.058 ^A	0.415±0.035 ^A	0.533±0.021 ^A	0.291±0.010 ^A	0.524±0.038 ^A	0.298±0.022 ^A

^a Mean values ± standard deviations from three replicates. Values in the same column followed by the same capital letter are not significantly different ($P > 0.05$).

생물의 사멸 또는 돌연변이 등을 유발하는데, 온도 및 환경 의존성이 낮고 화학약제 저항성을 가지는 해충에도 같은 효과를 갖는다고 보고되었다(Kader, 1986; 변 등, 2000). 감마선과 달리 X-선 조사에 의한 미생물 불활성화 메커니즘의 대한 실질적인 연구가 미비했으나, 최근 X-선 조사처리의 살균기전(세포막, 활성산소종, 효소, DNA)에 관련된 연구 결과들이 보고된 바 있다(Cho와 Ha, 2019; Park과 Ha, 2019).

Cho와 Ha(2019)는 X-선 조사처리에 의한 *E. coli* O157:H7, *S. Typhimurium* 및 *L. monocytogenes*의 세포막 손상 정도를 세포 내 핵산(O.D. 260nm)과 단백질(O.D. 280nm)의 누출량을 측정함으로써 평가하였다. Table 3에 나타낸 바와 같이, X-선으로 처리된 *E. coli* O157:H7, *S. Typhimurium* 및 *L.*

*monocytogenes*의 막 손상 수준은 처리하지 않은 세포의 막 손상 수준과 유의한($P > 0.05$) 차이를 나타내지 않았다고 보고하였다. 미생물의 세포막 전위변화는 미생물의 불활성화를 직접적으로 대변하지는 않지만, 세포막의 탈분극이 세포막 손상 전에 발생하기 때문에 세포생리학에서 중요한 지표로 활용된다(Kim 등, 2017). Park과 Ha(2019)는 bis-(1,3-dibutylbarbituric acid) trimethine oxonol (DiBAC₄(3))을 사용하여 X-선 조사처리에 의한 식중독 세균의 세포막 전위변화를 평가하였다(Table 4). DiBAC₄(3)는 세포막 탈분극의 결과로 세포 내에 축적되어 세포막의 전위 변화를 정량적으로 평가할 수 있다(Rezaeinejad과 Ivanov, 2011). X-선 처리된 *S. Typhimurium*과 *L. monocytogenes*의 세포막 전위는 처리되지 않은 세포와 비교할 때 유의적인

Table 4. Ratio of DiBAC₄(3) accumulation values in treated bacteria to that in the positive control after X-ray treatment^a (Adapted from Park and Ha, 2019)

Treatment dose (kGy)	DiBAC ₄ (3) percentage (%)		
	Gram negative		Gram positive
	<i>E. coli</i> O157:H7	<i>S. Typhimurium</i>	<i>L. monocytogenes</i>
0	0.00±0.00 ^A	0.00±0.00 ^A	0.00±0.00 ^A
0.4	0.08±0.08 ^A	0.24±0.17 ^B	0.22±0.06 ^B
0.8	0.11±0.07 ^A	0.28±0.09 ^B	0.32±0.17 ^B

^a Data represent mean ± standard deviation from three replications. Different letters within the same bacteria column indicate significant difference ($P < 0.05$). Normalized data were obtained by subtracting fluorescence values of untreated cells from those of treated cells and dividing by the positive control value and expressing this value as a percentage as follows: DiBAC₄(3) percentage = (fluorescence value after treatment - fluorescence value of non-treated) / (OD₆₀₀ · fluorescence value of positive control).

Table 5. ROS generation values of *E. coli* O157:H7, *S. Typhimurium*, and *L. monocytogenes* inferred from the ROS detection assay by using CM-H₂DCFDA^a (Adapted from Park and Ha, 2019)

Treatment Dose (kGy)	Microorganism		
	<i>E. coli</i> O157:H7	<i>S. Typhimurium</i>	<i>L. monocytogenes</i>
0	461.04 ± 40.58 ^A	324.79 ± 41.17 ^A	590.06 ± 28.20 ^A
0.4	501.00 ± 24.17 ^{AB}	403.10 ± 13.21 ^B	640.75 ± 67.77 ^{AB}
0.8	563.69 ± 33.28 ^B	404.40 ± 35.99 ^B	678.79 ± 9.72 ^B

^a Data represent mean ± standard deviation from three replications. Different letters within the same pathogen column indicate significant difference ($P < 0.05$). Fluorescence values were normalized against the OD₆₀₀ of the cell suspensions.

Table 6. Levels of intracellular enzyme inactivation in X-ray irradiated bacterial cells inferred from INT conversion tests^a (Adapted from Cho and Ha, 2019)

Treatment dose (kGy)	Microorganism		
	<i>S. Typhimurium</i>	<i>E. coli</i> O157:H7	<i>L. monocytogenes</i>
0	11.03 ± 0.71 ^A	12.23 ± 1.90 ^A	2.42 ± 0.38 ^A
0.4	8.06 ± 1.97 ^B	9.69 ± 1.45 ^A	2.01 ± 0.12 ^A
0.8	3.40 ± 0.29 ^C	5.93 ± 1.49 ^B	1.95 ± 0.67 ^A

^a Mean values of three replicates ± standard deviations. Different letters within the same pathogen column indicate significant difference ($P < 0.05$). The obtained absorbance data from untreated and treated samples were normalized for OD₆₀₀. INT conversion value = absorbance value after treatment (OD₄₉₀) / OD₆₀₀.

($P < 0.05$) 차이를 보여주었다. *E. coli* O157:H7는 세포막 전위 변화에 의한 DiBAC₄(3) 누적량이 통계적으로 유의한($P > 0.05$) 차이를 보여주지 않았으나, 증가하는 경향이 관찰되었다.

Park과 Ha(2019)는 X-선 조사가 감마선 및 전자선과 같이 미생물 세포 내 활성산소종(ROS)를 증가시킨다고 보고하였다(Table 5). 형광염료로 이용된 5-(and-6)-chloromethyl-2',7'-dichlorodihydrofluorescein diacetate(CM-H₂DCFDA)는 cytosol에서 가수분해되어 dichlorofluorescein (DCFH) carboxylate anion으로 전환되고, DCFH는 ROS에 의해 녹색형광의 2',7'-dichlorofluorescein(DCF)로 산화된다(Wojtala 등, 2014). X-선 처리한 식중독 세균을 CM-H₂DCFDA를 이용하여 미생물 세포 내 ROS 발생정도를 평가한 결과, X-선 처리된 *E. coli* O157:H7, *S. Typhimurium* 및 *L. monocytogenes*의 형광 값은 처리하지 않은 세포와 비교하여 유의하게($P < 0.05$) 증가하였다. Park과 Ha(2019)와 Cho

와 Ha(2019)에 연구결과 따르면 X-선 조사는 미생물 세포 내 효소에도 영향을 주는 것으로 나타났다. 산화환원지표로 사용되는 레사주린(resazurin)은 세포 간 대사활동에 관여하는 호흡 사슬 탈수소효소(respiratory chain dehydrogenase)에 의해 붉은 색의 레조루핀(resorufin)으로 환원되고(Chen 등, 2015), iodinitrotetrazolium chloride(INT)는 세포 내에서 호흡 사슬 탈수소효소에 의해 적색의 iodinitrotetrazolium formazan(INF)으로 환원되므로 이 두 지표물질을 이용하여 호흡 사슬 탈수소효소의 활성을 평가할 수 있다(Li 등, 2010). Cho와 Ha(2019)는 INT 전환시험법과 레사주린 분석법을 사용하여 X-선 처리 후 미생물 세포 내 호흡 사슬 탈수소효소의 활성이 유의적으로($P < 0.05$) 감소하는 것을 확인하였다(Table 6과 Fig. 3). 반면, 5(6)-carboxyfluorescein diacetate(cFDA)는 세포막을 자유롭게 통과하여, esterase에 의해 녹색형광을 나타내는 carboxyfluorescein(cF)로 전환되므

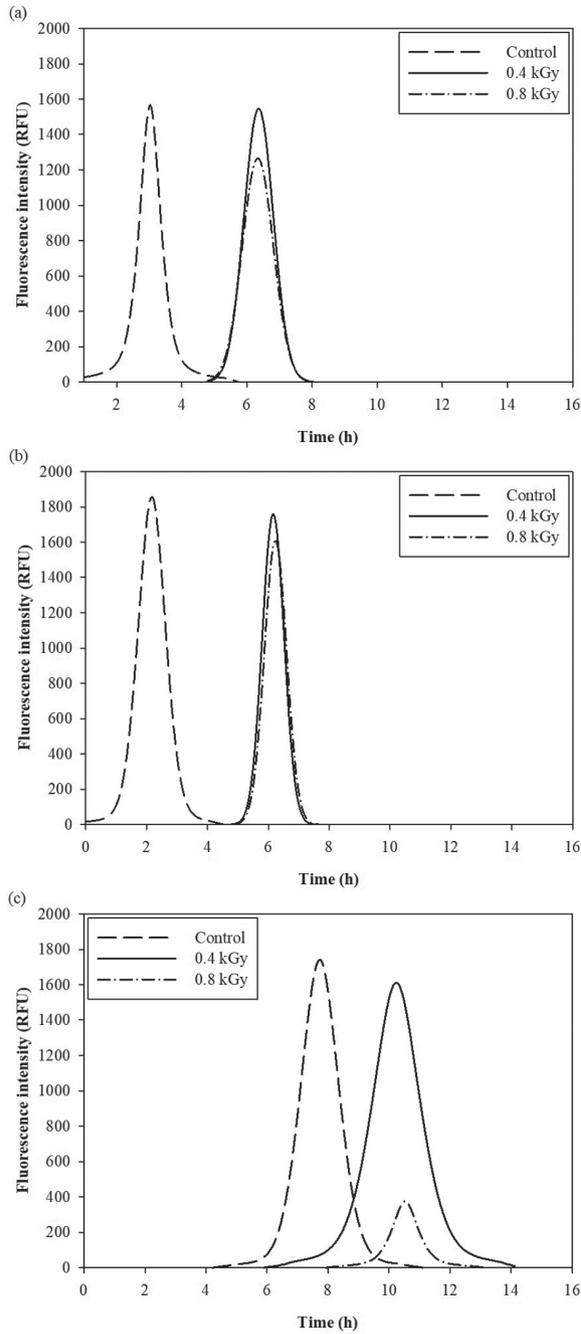


Fig. 3. Respiratory chain enzyme activities of X-ray irradiated (a) *S. Typhimurium*, (b) *E. coli* O157:H7, and (c) *L. monocytogenes*. The time required to achieve maximum fluorescence intensity indicates the relative level of enzymatic activity of the bacterial cells (Adapted from Cho and Ha, 2019)

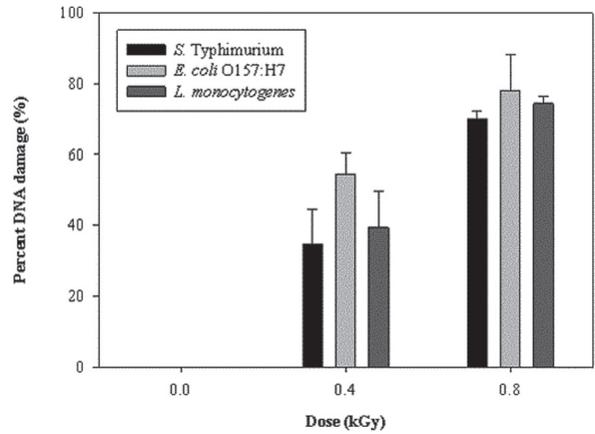


Fig. 4. Percent DNA damage of *E. coli* O157:H7, *S. Typhimurium*, and *L. monocytogenes* following X-ray irradiation. Measured Hoechst 33,258 uptake values were expressed as a percentage to that of the positive control and the calculated percentage was subtracted from 100% value to quantify DNA damage (Adapted from Cho and Ha, 2019)

로 esterase 효소 활성을 평가하기 위해 사용된다 (Ha 등, 2017). Park과 Ha(2019)는 cFDA를 이용하여 X-선 조사처리가 미생물 세포 내 esterase의 활성을 유의적으로($P < 0.05$) 감소시킨다고 보고하였다 (Table 7). 또한, Cho와 Ha(2019)는 핵산(adenine 및 thymine)과 결합하는 청색 염료인 Hoechst 33,258을 사용하여 DNA 손상 정도를 평가했으며, 그 결과 X-선 조사처리가 유의하게($P < 0.05$) 미생물 세포 내 DNA 손상을 유도한다고 보고하였다(Fig. 4).

위의 내용들을 정리해보면, X-선 조사처리는 미생물의 세포막을 파괴하지는 않지만 세포막 전위에 유의적인 변화를 유도하고, 미생물 세포 내 물분자로부터 슈퍼옥사이드 음이온 라디칼($\cdot O_2^-$)과 하이드록시라디칼($\cdot OH$)과 같은 활성산소종(ROS)을 유의적으로 발생시킴을 알 수 있다. 또한, 호흡을 비롯한 대사활동에 관여하는 주요 효소들의 활성을 저해하고, 미생물 세포의 DNA에도 유의적 손상을 유발하였다. 이는 다른 전리 방사선 계열인 감마선 및 전자선의 이미 알려진 살균 기작들과 일부 유사한 경향을 보임을 알 수 있다(Black과 Jaczynski, 2008; Chen 등, 2010).



Table 7. Levels of intracellular enzyme inactivation in X-ray treated cells inferred from cFDA conversion tests^a (Adapted from Park and Ha, 2019)

Treatment dose (kGy)	Microorganism		
	<i>E. coli</i> O157:H7	<i>S. Typhimurium</i>	<i>L. monocytogenes</i>
0	0.00 ± 0.00 ^A	0.00 ± 0.00 ^A	0.00 ± 0.00 ^A
0.4	75.17 ± 26.29 ^{AB}	566.86 ± 272.37 ^B	661.26 ± 233.7 ^B
0.8	108.16 ± 83.04 ^B	1461.56 ± 105.99 ^C	897.09 ± 192.14 ^B

^a Data represent mean ± standard deviation from three replications. Different letters within the same pathogen column indicate significant difference ($P < 0.05$). The data were normalized by subtracting fluorescence values obtained from untreated cells and against OD₆₈₀ as follows: cFDA conversion value = |(fluorescence value after treatment - fluorescence value of non-treated)/OD₆₈₀|.

3. X-ray 조사를 활용한 신규 허들기술 연구

허들 기술(hurdle technology)은 combined methods, barrier technology로도 부르며 미생물 세포에 손상을 줄 수 있는 물리적 혹은 화학적 살균기술들을 연속 또는 동시에 적용하는 기술을 말한다. 허들 기술은 살균효과의 상승작용(synergistic effect)을 유도함으로써 식품의 품질에 미치는 영향을 최소화하면서 위해 미생물을 효과적으로 제어하는 것을 목적으로 한다(Choi 등, 2018).

최근, X-선 조사와 합성 혹은 천연 화합물의 조합을 통한 신규 허들 기술들이 연구되어 낮은 준위의 X-선을 활용하여 보다 효율적으로 병원성 미생물을 제어한 결과들이 보고되었다(Jeon과 Ha, 2020a; Jeon과 Ha, 2020b; Jung 등, 2018; Park 등, 2018; Park과 Ha, 2020). Jung 등(2018)은 2.0 kGy X-선 조사와 50 ppm 차아염소산나트륨(sodium hypochlorite)을 병용처리했을 때 각각 단독으로 처리했을 때보다 메추리 알 껍질의 품질 변화없이 *S. Typhimurium* biofilm에 대한 상승적인 살균효과(Synergistic effect value = 0.8 log CFU/egg)를 나타냈다고 보고하였고, Park 등(2018)은 2.0 kGy X-선 조사와 50 ppm 이산화 염소(chlorine dioxide)의 조합이 계란 껍질 표면에 형성된 *S. Typhimurium* biofilm에 대해 시너지 살균효과(Synergistic effect value = 1.47 log CFU/egg)를 나타냈다고 보고하였다.

Park과 Ha(2020)는 저준위 X-선 조사(0.4 kGy)와

천연유래 향균물질인 커큐민(curcumin; 0.5 mg/L)을 결합처리했을 때 슬라이스 치즈에 접종된 *L. monocytogenes*에 대해 각각의 살균기술을 단독으로 사용했을 때보다 상승적인 향균 효과(Synergistic effect value = 0.92 log CFU/g)가 나타났다고 보고하였다. Jeon과 Ha(2020a, 2020b)는 다양한 유기산(organic acid)과 X-선 조사의 조합처리했을 때 주요 식중독 세균에 대해 흥미로운 시너지 살균효과가 유도됨을 입증하였다. Jeon과 Ha(2020a)에 따르면 0.3 kGy 저준위 X-선 조사와 0.5% 갈산(gallic acid)을 조합처리했을 때 양상추에 접종된 *E. coli* O157:H7, *S. Typhimurium* 및 *L. monocytogenes*의 수를 각각 5.41, 2.57 및 1.36 log 감소시켰는데, 특히 *E. coli* O157:H7에서 X-선 조사와 구연산을 동시 처리하였을 때 뛰어난 시너지 살균효과(Synergistic effect value = 2.16 log CFU/cm²)가 나타났음을 확인하였다. 또한, Jeon과 Ha(2020b)는 시금치 잎에 접종된 *E. coli* O157:H7와 *L. monocytogenes*가 0.3 kGy 저준위 X-선 조사와 1% 구연산(citric acid)을 조합처리를 통해 효과적으로 사멸되었고, 조합처리 시 단독처리의 살균효과의 합보다 0.95-1.14 log CFU/leaf만큼 높은 시너지 효과가 발생됨을 보고하였다.

결론

고품질 식품에 대한 소비자들의 요구가 증가하고 안전성에 대한 관심이 고조됨에 따라 영양소와 관

능적 특성 등 식품의 품질에 영향을 주는 가열 살균법의 대안으로 비가열 살균법을 단독 및 복합적으로 적용하는 처리기술들의 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다. 전리 방사선 조사기술은 대표적인 비가열 살균법으로 미생물에 대하여 선택적으로 강력한 살균효과를 나타내며 식품의 품질변화를 최소화하고 식품 적용 범위도 넓어 유용한 식품 병원성 미생물 제어기술로 인정되고 있다.

본 고에서는 식품 방사선 조사선원으로써 X-선 기술에 대한 전반적인 식품조사 연구 동향을 제시하였다. 앞서 설명한 데로 방사선 동위원소를 사용하지 않아 소비자 수용도가 높으며 육류, 해산물, 유제품, 과채류 등 다양한 식품군에서 품질의 영향을 주지 않고 미생물을 효과적으로 사멸시킨 것으로 나타났다. 또한 X-선 조사기술의 미생물 제어 기작에 대한 종합적인 고찰을 제시하였고, 합성 및 천연 항균제를 X-선 조사와 조합처리하였을 때 강한 시너지 살균효과가 발생됨을 바탕으로, 저준위의 X-선 조사기술이 다른 물리적 기술 혹은 항균제 재들과 조합되어 허들기술로도 충분히 활용될 수 있음을 보여주었다.

Codex 등 제외국에서는 X-선을 감마선 및 전자선과 함께 식품조사 목적으로 사용되고 있다. 최근 국내에서도 국제기준과의 조화 및 식품조사처리 기술 선택의 다양성을 제공하여 관련 산업을 활성화하고자 식품조사처리에 사용할 수 있는 선중에 엑스선을 추가하는 식품조사처리 기준을 개정 중에 있다(식품의약품안전처, 2019). 개정안에 따르면, X-선을 이용한 식품조사처리 시 전자선 가속기를 5 MeV(엑스선 전환 금속이 탄탈륨 또는 금일 경우 7.5 MeV)이하에서 조사처리 하도록 규정하고 있다.

X-선을 활용한 식품 미생물 제어 연구는 근래에 미국을 중심으로 활발히 진행되었으나 전세계적으로 아직 초입 단계임은 분명하다. 따라서 추후 식품 산업에 안정적인 기술 도입을 위해서는 보다 광범위한 기반 연구를 통해 데이터를 확보해 나가야 할 것이다.

사사

본 논문은 2020년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 신진연구지원사업(2020R1C1C1006979)의 지원을 받아 수행됨.

참고문헌

- Black JL, Jaczynski J. Effect of water activity on the inactivation kinetics of *Escherichia coli* O157:H7 by electron beam in ground beef, chicken breast meat, and trout fillets. *Int. J. Food Sci. Technol.* 43: 579-586 (2008)
- Calenberg SV, Cleemput OV, Mondelaers W, Huyghebaert A. Comparison of the Effect of X-ray and Electron Beam Irradiation on the Microbiological Quality of Foodstuffs. *LWT - Food Sci. & Technol.* 32: 372-376 (1999)
- Calenberg SV, Vanhaelewyn G, Cleemput OV, Callens F, Mondelaers W, Huyghebaert A. Comparison of the Effect of X-ray and Electron Beam Irradiation on Some Selected Spices. *LWT-Food Sci. & Tech.* 31: 252-258 (1998)
- Centers for Disease Control and Prevention. Multistate outbreak of *E. coli* O157:H7 infections associated with cheese. Available at: <https://www.cdc.gov/ecoli/2010/bravo-farms-cheese-11-24-10.html> (2010)
- Centers for Disease Control and Prevention. Multistate Outbreak of Listeriosis Linked to Raw Milk Produced by Miller's Organic Farm in Pennsylvania Available at: <https://www.cdc.gov/listeria/outbreaks/raw-milk-03-16/index.html> (2016)
- Centers for Disease Control and Prevention. Outbreak of *E. coli* Infections Linked to Ground Beef. Available at: <https://www.cdc.gov/ecoli/2019/o103-04-19/index.html> (2019)
- Chen H, Li F, Yuan H, Xiao X, Yang G, Wu L. Abscopal signals mediated bioeffects in low-energy ion irradiated *Medicago truncatula* seeds. *J. Radiat. Res.* 51: 651-656 (2010)
- Chen JL, Steele TW, Stuckey DC. Modeling and application of a rapid fluorescence-based assay for biotoxicity in anaerobic digestion. *Environ. Sci. Technol.* 49: 13463-13471 (2015)
- Choi JB, Cheon HS, Chung MS, Cho MI. Pretreatment sterilization of garlic and ginger using antimicrobial agents and blanching. *Korean J. Food Sci. Technol.* 50(2): 172-178 (2018)
- Clemente I, Condon-Abanto S, Pedros-Garrido S, Whyte P, Lyng JG. Efficacy of pulsed electric fields and antimicrobial compounds used alone and in combination for the inactivation of *Campylobacter jejuni* in liquids and raw chicken. *Food control.* 107 (2020)
- Considine KM, Kelly AL, Fitzgerald GF, Hill C, Sleator RD. High-pressure processing - effects on microbial food safety and food quality



- ty. FEMS Microbiol. Lett. 281(1): 1-9 (2008)
- DeWaal CS, Tian XA, Plunkett D. Outbreak Alert! 2009 Centers for Science and Public Interest. Available at: <http://www.cspinet.org/new/pdf/outbreakalertreport09.pdf> (2009)
- Elbashir S, Parveen S, Schwarz J, Rippen T, Jahncke M, DePaloa A. Seafood pathogens and information on antimicrobial resistance: A review. Food Microbiol. 70: 85-93 (2018)
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of World Fisheries and Aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all. (2016)
- GIP Alliance, International Irradiation Association. A Comparison of Gamma, E-beam, X-ray and Ethylene Oxide Technology for the Industrial Sterilization of Medical Devices and Healthcare Products, 1-49. White Paper (2017) available online at: <http://iiaglobal.com/wp-content/uploads/2018/01/White-Paper-Comparison-Gamma-Eb-Xray-and-EO-for-Sterilisation.pdf>, Accessed 22th Jul 2020
- Godfray H CJ, Aveyard P, Garnett T, Hall J W, Key T J, Lorimer J. Meat consumption, health, and the environment. Sci. 361(6399) (2018)
- Ha J W, Lee J I, Kang D H. Application of a 222-nm krypton-chlorine excilamp to control foodborne pathogens on sliced cheese surfaces and characterization of the bactericidal mechanisms. Int. J. Food Microbiol. 243: 96-102 (2017)
- Han J Y, Song W J, Eom S, Kim S B, Kang D H. Antimicrobial efficacy of cold plasma treatment against food-borne pathogens on various foods. J. Phys. D: Appl. Phys. 53(20) (2020)
- Jang K J, Kim N H, Lee J H, Lee S B. Distribution of X-ray Strength in Exposure Field Caused by Heel Effect. J. Korean Soc. Radiol. 5(5): 223-229 (2011)
- Jeon M J, Ha J W. Bactericidal and synergistic effects of X-ray irradiation and gallic acid against foodborne pathogens on lettuce. Food Microbiol. 92: 103584 (2020a)
- Jeon M J, Ha J W. Synergistic bactericidal effect and mechanism of X-ray irradiation and citric acid combination against food-borne pathogens on spinach leaves. Food Microbiol. 91: 103543 (2020b)
- Jeong S, Marks B P, Ryser E T, Moossekian S R. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 on Lettuce, Using Low-Energy X-Ray Irradiation. J. Food Prot. 73(3): 547-551 (2010)
- Jung K, Song B S, Kim M J, Moon B G, Go S M, Kim J K, Lee Y I, Park J H. Effect of X-ray, gamma ray, and electron beam irradiation on the hygienic and physicochemical qualities of red pepper powder. LWT-Food Sci. & Tech. 63(2): 846-851 (2015)
- Jung S J, Park S Y, Ha S D. Synergistic effect of X-ray irradiation and sodium hypochlorite against *Salmonella enterica* serovar Typhimurium biofilms on quail eggshells. Food Res. Int. 107: 496-502 (2018)
- Kim D K, Kim S J, Kang D H. Bactericidal effect of 266 to 279 nm wavelength UVC-LEDs for inactivation of Gram positive and Gram negative foodborne pathogenic bacteria and yeasts. Food Res. Int. 97: 280-287 (2017)
- Kim S S, Shin M J, Kang J W, Kim D K, Kang D H. Application of the 222 nm krypton-chlorine excilamp and 280 nm UVC light-emitting diode for the inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* Typhimurium in water with various turbidities. LWT - Food Sci. & Technol. 117: 108458 (2020)
- Kim Y S, Park I S, Ha S D. Application Sanitizer for the Control of Microorganisms in Food, Food Sci. & Ind. 42(2): 26-51 (2009)
- Ko S H, Kwon G M, Jeon Y H, Jung C. Effects of Gamma Radiation on the Comstock Mealybug, *Pseudococcus comstocki* Mortality. Kor. J. Soil Zool. 17: 36-41 (2013)
- Kwon J H. Safety and Understanding of irradiated Food. Korea Food Safety Research Institute, Seoul, Korea. pp. 9-29 (2010)
- Kwon J H, Chung H W, Kim B K, Ahn J J, Kim G R, Jo D, Ahn K A. Research and application of identification methods for irradiated foods. Safe Food 6: 11-27 (2011)
- Lee E, Choi J H, Heo Y R. Intake of fruits and vegetables may modify the risk of cataract in Korean males: data from Korean National Health and Nutrition Examination Survey 2012. J. Nutr. Health. 51(5): 423-432 (2018)
- Li W R, Xie X B, Shi Q S, Zeng H Y, You-Sheng O Y, Chen Y B. Antibacterial activity and mechanism of silver nanoparticles on *Escherichia coli*. Appl. Environ. Microbiol. 85: 1115-1122 (2010)
- Mahmoud B S M, Bachman G, Linton R H. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella enterica* and *Shigella flexneri* on spinach leaves by X-ray. Food Microbiol. 27(1): 24-28 (2010)
- Mahmoud B S M, Chang S, Wu Y, Nannapaneni R, Charma C S, Coker R. Effect of X-ray treatments on *Salmonella enterica* and spoilage bacteria on skin-on chicken breast fillets and shell eggs. Food Control. 57: 110-114 (2015)
- Mahmoud B S M. Effect of X-ray treatments on inoculated *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella enterica*, *Shigella flexneri* and *Vibrio parahaemolyticus* in ready-to-eat shrimp. Food Microbiol. 26: 860-864 (2009a)
- Mahmoud B S M. Effects of X-ray treatments on pathogenic bacteria, inherent microflora, color, and firmness on whole cantaloupe. Int. J. Food Microbiol. 156(3): 296-300 (2012a)
- Mahmoud B S M. Effect of X-Ray Treatments on Pathogenic Bacteria, Inherent Microbiota, Color, and Texture on Parsley Leaves. Food-borne Pathog. Dis. 9(10): 922-927 (2012b)
- Mahmoud B S M. Inactivation effect of X-ray treatments on *Cronobacter* species (*Enterobacter sakazakii*) in tryptic soy broth, skim milk, low-fat milk and whole-fat milk. Lett. Appl. Microbiol. 49: 562-567 (2009b)
- Mahmoud B S, Nannapaneni R, Chang S, Coker R. Effect of X-ray treatments on *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, *Shigella flexneri*, *Salmonella enterica* and inherent microbiota on whole mangoes. Lett. Appl. Microbiol. 62(2): 138-144 (2016)

- Mahmoud BSM. Reduction of *Vibrio vulnificus* in pure culture, half shell and whole shell oysters (*Crassostrea virginica*) by X-ray. *Int. J. Food Microbiol.* 130: 135-139 (2009c)
- Mahmoud BSM. The effects of X-ray radiation on *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella enterica* and *Shigella flexneri* inoculated on whole Roma tomatoes. *Food Microbiol.* 27: 1057-1063 (2010)
- Park JS, Ha JW. Ultrasound treatment combined with fumaric acid for inactivating foodborne pathogens in apple juice and its mechanisms, *Food Microbiol.* 84 (2019)
- Park SI, Bae SY. A study on Elementary Students' Milk Intake at Home and School in Seoul Area. *J. Korean Soc. Food Cult.* 14(4): 361-369 (1999)
- Park SY, Jung SJ, Ha SD. Synergistic effects of combined X-ray and aqueous chlorine dioxide treatments against *Salmonella* Typhimurium biofilm on quail egg shells. *LWT- Food Sci. Tech.* 92: 54-60 (2018)
- Qiu QQ, Sun WQ, Connor J. 4.410 - Sterilization of Biomaterials of Synthetic and Biological Origin. *Compr. Biomater.* 4: 127-144 (2011)
- Rezaeinejad S, Ivanov V. Heterogeneity of *Escherichia coli* population by respiratory activity and membrane potential of cells during growth and long-term starvation. *Microbiol. Res.* 166: 129-135 (2011)
- Robertson CB, Andrews LS, Marshall DL, Coggins P, Schilling MW, Martin RE, Collette R. Effect of x-ray irradiation on reducing the risk of listeriosis in ready-to-eat vacuum-packaged smoked mullet. *J. Food Prot.* 69(7): 1561-1564 (2006)
- Song BS, Lee Y, Moon BG, Go SM, Park JH, Kim JK, Jung K, Kim DH, Ryu S. Comparison of bactericidal efficiency of 7.5MeV X-rays, gamma-rays, and 10 MeV e-beams, *Radiat Phys Chem.* 125: 106-108 (2016)
- Wojtala A, Bonora M, Malinska D, Pinton P, Duszynski J, Wieckowski MR. Chapter Thirteen - Methods to monitor ROS production by fluorescence microscopy and fluorometry. *Methods. Enzymol.* 542: 243-262 (2014)
- Teotia JS, Miller BF. Destruction of Salmonellae on Poultry Meat with Lysozyme, EDTA, X-Ray, Microwave and Chlorine. *Poult. Sci.* 54(5): 1388-1394 (1975)
- Zhang H, Ha TMH, Seck HL, Zhou W. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* Typhimurium in edible bird's nest by low-energy X-ray irradiation. *Food Control.* 110: 107031 (2020)
- 변명우, 김동호, 육홍선, 안현주. 식품미생물의 방사선 살균. *식품과학과 산업.* 33(2): 58-70 (2000)
- 식품의약품안전처. 식품의약품안전처 공고 제2019-336호. 식품의 기준 및 규격 일부개정고시(안) 행정예고 (2019)