

냉동 떡갈비에 접종된 식중독균에 대한 감마선, 전자선 및 엑스선의 살균효과

송범석¹, 염서준¹, 윤기남¹, 박종흠¹, 김재경^{1,*}

¹한국원자력연구원 첨단방사선연구소

Bactericidal Effect of Gamma rays, E-beams, and X-rays for Food Poisoning Bacteria Inoculated in Frozen *Tteokgalbi*

Beom-Seok Song¹, Seo-Joon Yeom¹, Ki-Nam Yoon¹, Jong-Heum Park¹ and Jae-Kyung Kim^{1,*}

¹Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, Jeongeup 56212, Republic of Korea

Abstract Irradiation standards have not been established for ground meat products in Korea. This study was performed to evaluate 90% reduction doses (D_{10} values) of gamma rays, 10 MeV electron beams, and 7 MeV X-rays for major food poisoning bacteria inoculated in frozen *tteokgalbi*, the traditional Korean beef patties. The D_{10} values for enterohemorrhagic *Escherichia coli* O157:H7 ATCC 35150, 43889, and 43890 were 0.32 to 0.33 kGy for e-beams, 0.40 to 0.46 kGy for gamma rays, and 0.67 to 0.72 kGy for X-rays, respectively, implying the highest bactericidal effect of e-beams and the lowest effect of X-rays. *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, and *Salmonella enterica* serovar Typhimurium exhibited higher D_{10} values compared with *E. coli*. Especially, *Salmonella*, which is known as a bacterium with the highest radiation resistance among gram negative bacteria, presented the highest values (1.02 kGy for e-beams, 1.15 kGy for gamma rays, and 2.01 kGy for X-rays) among the tested bacteria. As the bactericidal efficiency among the three radiation types, X-rays exhibited the lowest efficiency; however, irradiation of frozen *tteokgalbi* at a dose of 7 kGy, the maximum irradiation dose for frozen meat products endorsed by US FDA, could exhibit a commercial sterilization (99.9%) effect generally required for food hygiene, regardless of radiation types.

Key words: Radiation sensitivity, D_{10} value, Food poisoning bacteria, Food irradiation, *Tteokgalbi*

1. 서론

분쇄가공육은 식육가공품 중 양념육류에 포함되는 유형의 제품으로 식육을 세절 또는 분쇄하여 이에 식품 또는 식품첨가물을 가한 후 냉장 또는 냉동한 식육함량 50% 이상의 떡갈비, 햄버거 패티, 돈가스 등의 가공식품을 말한다[1]. 최근 1인 가구 및 캠핑 인구의 증가와 가정간편식의 다양화로 분쇄가공육을 포함한 양념육의 생산은 매년 증가 추세에 있으며, 2018년도에는 3조 3천억원이 생산되었

고 식육가공품 전체 생산량의 59.3%를 차지하였다[2]. 이러한 분쇄가공육의 시장 확대와 더불어 위생학적 안전성에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이를 위해 정부는 식품 위생법과 축산물위생관리법에 따라 식품 및 축산물 안전관리인증기준(Hazard Analysis and Critical Control Point) 제도를 시행하고 있다. 그러나 이러한 법적 장치에도 불구하고 매년 식육가공품 섭취에 의한 식중독 사건이 빈번히 발생하고 있다. 분쇄가공육의 경우 분쇄, 혼합, 성형, 포장, 냉동 등의 복잡한 제조 과정을 거치며, 이 과정 중 다양한

<http://www.ksri.kr/>

Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author. Jae-Kyung Kim

Tel. +82-63-570-3219 Fax. +82- 63-570-3207 E-mail. jkim@kaeri.re.kr

Received 8 April 2022 Revised 18 August 2022 Accepted 30 August 2022

원재료의 혼입, 비위생적인 장비의 사용 및 작업자에 의한 병원균 오염 확률이 높아진다[3]. 만약 병원균에 오염된 제품이 냉동 유통되는 떡갈비, 햄버거 패티, 돈가스 등 비살균 제품일 경우 불충분한 온도로 조리되어 제공된다면 제품 내부에 존재하는 병원균에 의해 식중독이 유발될 수 있다. 우리나라의 경우 2020년도 국내 식중독 발생 통계자료에 따르면 전체 식중독 건수 중 44.5%가 병원성 세균에 기인하였으며, 대표적인 원인균은 병원성 대장균(14.0%)과 살모넬라균(12.8%)인 것으로 나타났다[4]. 특히 병원성 대장균 중 장출혈성 대장균의 하나인 *Escherichia coli* O157:H7 균주가 생산하는 독소에 의한 용혈성 요독증후군 발병 등의 식중독 사건들이 발생하고 있으며, 이들의 주요 매개체는 햄버거 패티와 같은 분쇄가공육과 가열처리되지 않은 채소류 등으로 알려져 있다[5,6]. 리스테리아 모노사이토제네스는 냉장 상태에서도 생육이 가능한 그람 양성 간균으로 우리나라의 경우 대규모 식중독이 발생한 사례는 없으나 미국, 유럽 등지에서는 식육제품의 섭취로 인한 대규모 식중독이 발생하여 모니터링에 주의를 기울이고 있는 세균이며, 황색포도상구균 역시 우리나라에서 식중독 발생 건수는 2020년 1건으로 매우 낮으나 자연계에 광범위하게 상재하고 있기 때문에 식품공전에서 식육가공품 및 포장육의 위생 지표로 지정하고 있는 세균이다[7,8].

식품조사처리 기술은 감마선, 전자선, 엑스선 등 투과력이 높은 이온화 방사선을 이용하여 식품의 품온을 증가시키지 않으면서 내부에 존재하는 미생물을 효과적으로 살균할 수 있는 비가열 살균 공정으로 냉동식품의 살균에 큰 장점을 가지고 있으며, 최종적으로 포장이 완료된 식품에 활용이 가능하므로 이차오염의 가능성이 없는 기술이다[9]. 미국의 경우 1982년 *E. coli* O157:H7균에 오염된 햄버거 패티의 유통으로 인한 식중독 발생 및 사망 사건을 계기로 식육에 대한 조사처리 기술에 관한 연구를 활발하게 수행하였으며, 1997년 미국 Food and Drug Administration (FDA)은 살모넬라와 장출혈성 대장균 등 식중독균의 99.9% 살균을 목표로 냉장 식육 및 식육가공품에 대하여 4.5 kGy, 냉동제품에 대하여 7.0 kGy의 최대 허용 선량 기준을 설정하여 식육류의 조사처리를 공식적으로 제도화하였다[10]. 미국 이외에도 영국, 호주 등 30개 국가에서 식육제품에 대한 방사선 조사처리를 허용하고 있으나, 우리나라는 건조된 식육의 살균을 위해 최대 7

kGy의 조사처리가 허용되어 있을 뿐 그 외의 신선 포장육 및 건조하지 않은 식육가공품에 대한 국내 조사처리 규정은 마련되지 않고 있는 실정이다[11]. 각 국가별로 조사처리 허가 품목 및 허용 선량이 다른 이유는 해당 품목의 소비량, 생산 업체의 위생 수준 및 소비자 수용도 등 다양한 이해관계에 기인하는 것으로 판단되며, 우리나라의 경우 식품조사처리에 대한 낮은 소비자 수용도로 인해 식육류의 조사처리 허용에 대한 공론화가 이루어지고 있지 않으나 식육제품의 소비 증가와 더불어 확대되고 있는 대형 식중독 사고를 감안한다면 예방 차원에서 적극적인 위생화 기술의 활용이 필요한 시점이다.

식품조사처리에 사용이 가능한 방사선의 종류, 최대 허용 선량, 허용 식품 등에 대한 국내 기준 재개정은 식품의약품안전처 유해물질기준과에서 담당하고 있으며, 민원인이 새로운 품목에 대한 조사처리 허가 요청 시 식품의 기준 및 규격(식품공전)의 식품 유형을 지정하여 해당 유형의 품목에 대한 최대 허용 선량 설정 근거와 조사처리에 의한 살균효과 평가 자료 등의 제출을 요구하고 있다[12]. 따라서 본 연구에서는 분쇄가공육의 조사처리 허가 요청을 위한 기초 자료 확보를 목적으로 분쇄가공육 중 국내 소비량이 많은 냉동 떡갈비를 실험 대상으로 선정 후 다양한 식중독균(*E. coli* O157:H7, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*)을 접종한 다음 식품조사처리에 사용이 가능한 방사선 3종(감마선, 전자선, 엑스선)의 D_{10} 값 산출을 통해 살균효과를 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시험균주

주요 식중독 병원균에 대한 시험균주로 장출혈성 대장균 *E. coli* O157:H7 3개 균주(ATCC 35150, 43890, 43889)는 한경대 하재원 교수 실험실에서 분양받았고 *S. Typhimurium* UK1은 한국원자력연구원 서호성 박사 실험실에서 분양받았으며, *S. aureus* KCCM 11335와 *L. monocytogenes* KCCM 40307은 한국미생물보존센터(Seoul, Korea)로부터 분양받은 후 각각 tryptic soy broth (TSB, Difco Laboratories, Detroit, MI, USA)에 37°C, 18시간 계대 배양하여 활성화하였다.

2.2. 세균현탁액 및 접종시료 준비

각각의 활성화된 세균 전배양액 1 mL를 TSB 100 mL에 무균적으로 접종한 후 37°C에서 12~24 시간 동안 진탕배양하여 대수기의 세포를 얻었다. 배양액은 4°C에서 10분간 원심분리(4000×g)하여 얻은 균체를 멸균 phosphate buffer saline (PBS) 용액으로 2회 세척 및 원심분리하여 최종 균의 농도가 약 10^8 CFU mL⁻¹이 되도록 조절하였다. 조사처리에 사용될 PBS 세균현탁액은 2 mL 용량의 eppendorf tube에 1 mL씩 분주한 다음 -20°C에서 냉동 보관 후 다음날 조사처리하였다. 접종실험을 위한 세균현탁액은 다른 날짜에 새롭게 제조하였고 병원균 접종시료 준비를 위해 보존제가 포함되지 않은 수제 떡갈비를 인터넷으로 구입한 후 멸균처리를 위해 한국원자력 첨단방사선 연구소의 감마선 조사시설에서 25 kGy의 선량으로 조사처리한 후 멸균 여부를 확인하였다. 이후 떡갈비 시료 25 g을 clean bench 내에서 무균적으로 멸균 필터백(Interscience Co., Paris, France)에 넣고 접종될 균수가 1 g 시료무게당 7~8 log CFU가 되도록 전날 제조된 세균현탁액 0.2 mL를 접종한 후 손으로 1분간 혼합한 다음 이중 지퍼백으로 재포장하여 조사처리 전까지 -20°C의 냉동고에 보관하였다. 세균현탁액 실험용 시료와 접종실험용 시료는 각 선종별로 하나의 흡수선량에 대하여 각각 5개씩 준비하여 반복실험을 수행하였다.

2.3. 방사선 조사처리 및 흡수선량 측정

살균에 영향을 미치는 실질적인 방사선량인 흡수선량을 측정하기 위해 조사처리에 앞서 각 목표선량당 하나의 eppendorf tube에 직경 5 mm alanine dosimeter (Bruker BioSpin GmbH, Rheinstetten, Germany) 2개를 삽입하여 세균현탁액과 같이 조사처리하였다. 접종시료의 경우 방사선 입사 방향의 수직으로 놓인 시료의 포장재 앞뒷면에 alanine dosimeter를 부착하였으며, 냉동 상태에서의 방사선 살균효과 확인이 목적이므로 조사처리 시간 동안 해동되는 것을 방지하기 위해 드라이 아이스가 채워진 스티로폼 박스에 시료를 담아 밀봉하였다. 감마선 조사처리는 한국원자력연구원 첨단방사선연구소의 ⁶⁰Co gamma irradiator (AECL, R-79, MDS Nordion International Co. Ltd., Ottawa, Canada)에서 발생하는 평균에너지 1.25 MeV의 감마선을 이용하여 시간당 10 kGy의 선량률로 조사처리하였으며, 전자선 조사처리는 첨단방사선연구소의 10 MeV linear electron accelerator (MB10-30, Mevex Corp.,

Stittsville, Canada)를 이용하여 빔 전류는 0.6 mA로 고정된 후 컨베이어 속도를 조절하여 360 kGy h⁻¹의 선량률로 조사처리하였다. 엑스선 조사처리는 (주)서울방사선서비스의 전자가속기(MB10-8/635, Mevex Corp., Ottawa, ON, Canada)로부터 발생하는 7 MeV 전자선을 엑스선 컨버터에 장착된 탄탈륨에 충돌시켜 발생하는 엑스선을 이용하여 빔 전류와 컨베이어 속도를 각각 0.6 mA와 1.07 m min⁻¹으로 고정된 후 회전수를 달리하여 조사처리하였으며, 이때 한 회전당 흡수선량은 0.1 kGy이고 8분이 소요되므로 선량률은 0.75 kGy h⁻¹으로 산출되었다. 예비실험을 통해 세균현탁액은 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 및 1.0 kGy의 선량 구간을, 접종시료는 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 kGy의 선량 구간을 목표선량으로 설정하였다. 조사처리 후 alanine dosimeter를 회수하여 electron para-magnetic resonance analyzer (e-scan™ alanine dosimeter reader, Bruker BioSpin GmbH, Rheinstetten, Germany)를 이용하여 흡수선량을 측정하였으며, 각 목표선량별 평균 흡수선량을 D₁₀ 값 산출에 활용하였다. 조사처리 후 세균현탁액과 접종시료는 냉동 보관하였으며 다음 날 생균수 측정에 사용하였다.

2.4. 생균수 측정 및 D₁₀ 값 산출

세균현탁액은 멸균 PBS 용액을 이용하여 연속적인 10배 희석액을 제조한 후 각 희석액 0.1 mL를 tryptic soy agar (Difco) 배지에 도말한 다음 37°C에서 24~48시간 배양하였다. 이후 30~300개의 집락이 형성된 평판의 집락을 계수한 다음 해당 희석배수를 곱하여 최종 생균수를 log CFU mL⁻¹으로 나타내었다. 접종시료는 멸균수 225 mL를 가한 후 stomacher (Mark II Lab Blender, Tekmar Teledyne Technologies Inc., Sacramento, CA, USA)를 이용하여 1분간 균질화한 다음 멸균 PBS로 연속적으로 희석하여 앞선 세균현탁액의 생균수 측정 방법에 준하여 실시하였으며, 최종 생균수를 시료의 단위무게당 집락수인 log CFU g⁻¹로 나타내었다. 각각의 병원균에 대하여 방사선 선종별 흡수선량에 따른 생균수를 Statistical Package for the Society Science (SPSS, window ver. 21.0, IBM, Chicago, IL, USA)를 이용하여 회귀분석을 수행하였으며, 생균의 90%를 살균(1log CFU 저감)하는 데 필요한 방사선 선량인 D₁₀ 값은 아래의 수식과 같이 회귀방정식에서 산출된 기울기의 역수와 같으며 살균효과에 대한 회귀방정식의 기울기는 항상 음수이기 때문에 양수로 전환하기 위해 음수를 곱하여 산출하였다.

Regression equation: $Y = \beta_0 + \beta_1 X$

$$\beta_1 = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{\log_{10} N_0 - \log_{10} N}{D_0 - D}$$

$$D_{10} \text{ value} = \frac{\Delta X}{\Delta Y} = -\frac{1}{\beta_1}$$

이때 Y 는 로그 생균수, β_0 는 절편, β_1 는 기울기, X 는 흡수선량, ΔY 는 로그 생균수의 변화, ΔX 는 흡수선량의 변화, D_0 , 초기 흡수선량; D , 최종 흡수선량; N_0 , 초기 흡수선량에서의 생균수; N , 최종 흡수선량에서의 생균수이다. 아울러, PBS 현탁액 상태 또는 떡갈비에 접종된 각각의 균주들에 대한 방사선 선종별 살균효과 (D_{10} 값)를 비교하기 위해 SPSS 프로그램을 이용하여 공분산분석 (analysis of covariance)을 수행하였다. 명목변수인 방사선 선종과 연속변수인 생균수를 각각 독립변수와 종속변수로 설정한 후 연속변수인 흡수선량을 공변량으로 지정하여 분석을 실시하였고, 사후분석은 Bonferroni 방법을 활용하여 $p < 0.05$ 수준에서 유의성을 검정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 장출혈성 대장균에 대한 방사선 선종별 살균효과

세균현탁액 또는 떡갈비에 접종된 후 냉동 상태에서 감마선, 전자선 및 엑스선으로 조사처리 시 흡수선량 변화에 따른 장출혈성 대장균 3개 균주의 생균수 변화를 Fig. 1에 나타내었으며, 각각의 회귀방정식으로부터 기울기의 음의 역수를 취해 산출된 D_{10} 값은 Table 1과 같다. 현탁액의 경우 모든 장출혈성 대장균 균주에 대하여 0.5 kGy의 조사처리 선량으로도 5 log 수준의 감균효과를 나타내었으며, 방사선 선종 간 살균효과 (D_{10} 값)는 ATCC 43890 균주에 대해서만 엑스선의 살균효과가 유의적으로 낮게 나타났을 뿐 다른 균주들은 선종에 상관없이 유사한 살균효과를 나타내었다. 그러나, 떡갈비에 접종된 후 냉동 조건에서 조사처리될 경우 D_{10} 값이 0.32~0.72 kGy로 증가하여 현탁액에 비해 살균효과가 낮아졌으며, 특히 모든 장출혈성 대장균 균주에 대하여 엑스선의 D_{10} 값 (0.67~0.72 kGy)이 가장 낮은 전자선 (0.32~0.33 kGy)에 비해 유의적인 차이를 나타내었으며 약 2배 정도 높았다. 생물의 방사선 감수성은 선량률에 영향을 받으며 낮은 선량률의 조사처리가 높

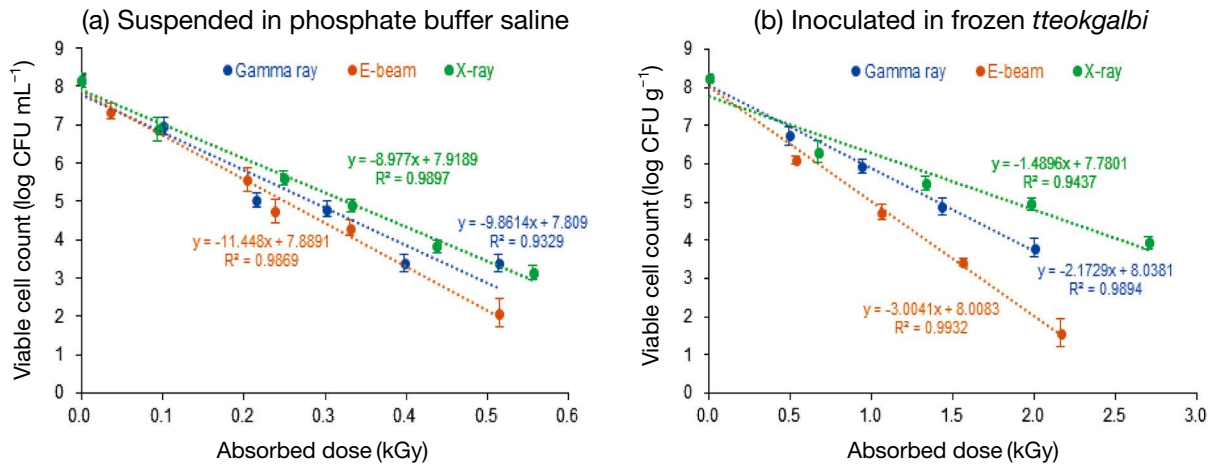
은 선량률의 조사처리에 비해 세포가 받는 손상으로부터 회복할 수 있는 시간이 늘어나기 때문에 생존율이 증가하는 것으로 알려져 있다[13]. 따라서 본 실험에서 사용된 전자선, 감마선, 엑스선의 선량률은 각각 360, 10, 0.75 kGy h^{-1} 으로 전자선이 가장 높았고 엑스선이 가장 낮았기 때문에 엑스선의 살균효과가 감마선과 전자선에 비해 낮은 이유로 사료된다. 또한, 냉장 상태의 분쇄우육에 접종한 대장균에 대한 세 종류의 방사선 선종의 살균효과를 비교한 선행 연구에서 10 MeV 전자선과 감마선의 D_{10} 값은 동일하게 0.18 kGy였고 7.5 MeV 엑스선은 0.22 kGy로 본 실험과 유사하게 엑스선의 낮은 살균효과를 나타내었다[14]. 그러나 해당 선행 연구에서는 엑스선과 감마선 및 전자선의 D_{10} 값은 흡수선량의 10% 불확도를 고려할 때 선종 간의 유의미한 차이는 발견하지 못하였다고 보고하였는데 이는 이때 사용된 7.5 MeV 엑스선의 선량률은 24 kGy h^{-1} 으로 본 실험에서 사용된 7 MeV 엑스선의 선량률에 비해 32배가 높았기 때문에 본 실험에 비해 선종 간 차이가 유의미하지 않았던 것으로 판단된다.

아울러, 냉동 우육 및 우육 패티 등 다양한 식육가공품에 대한 선행 연구들은 주로 감마선과 전자선에 대하여 다수 보고되었으며 이들 식품에 접종된 장출혈성 대장균의 D_{10} 값은 0.28~1.21 kGy의 범위를 나타내어 본 실험의 결과는 해당 범위에 포함되는 것으로 나타났다[15-21]. 이온화방사선의 살균 메커니즘은 세균의 DNA를 파괴하는 것으로 직접적인 손상과 DNA 주변의 물분자의 이온화로 생성된 라디칼이 반응하는 간접적 손상이 있으며, 일반적으로 간접적인 손상이 직접적 손상과 비교해 높은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[22]. 따라서 상온 또는 냉장온도에 비하여 동결 상태에서는 물의 방사선 분해에 의한 라디칼 생성이 억제되기 때문에 간접적 손상이 적어지므로 살균효과가 낮아진다[23]. Kawasaki 등[17]은 다진 쇠고기에 접종된 장출혈성 대장균의 D_{10} 값이 냉장 조건의 경우 0.25~0.33 kGy이지만 냉동 조건의 경우 2배 증가한 0.51~0.69 kGy로 증가한다고 보고하였다. 따라서 본 실험에서 냉동 상태에서의 D_{10} 값이 냉장 육제품들에 접종된 균들의 D_{10} 값에 비해 높은 원인으로 사료된다.

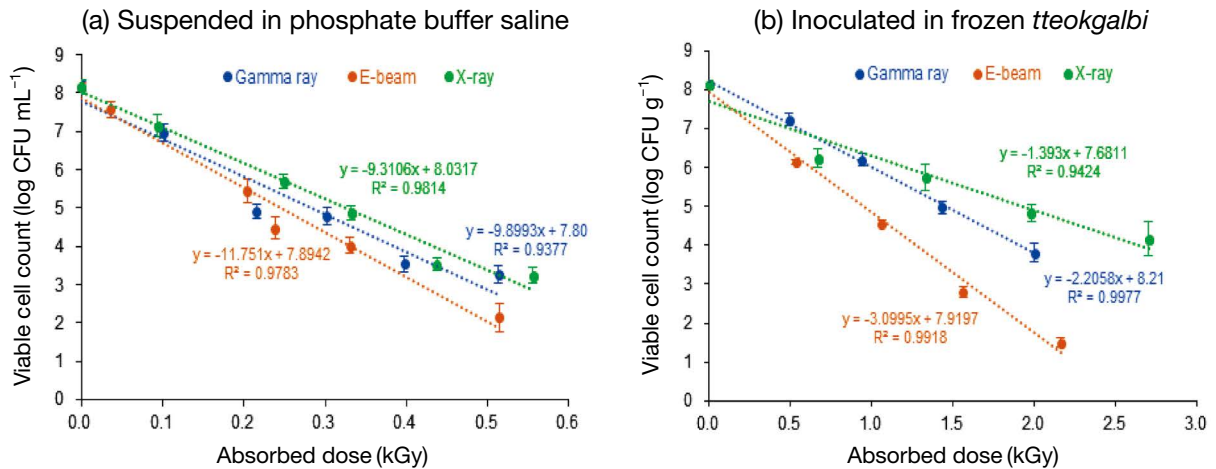
3.2. 살모넬라균에 대한 방사선 선종별 살균효과

살모넬라균은 그람 음성균 중 방사선 저항성이 가장 높은 것으로 알려져 있으며, 조사처리 시 세균의 환경에 따

A. *Escherichia coli* O157:H7 ATCC 35150



B. *Escherichia coli* O157:H7 ATCC 43890



C. *Escherichia coli* O157:H7 ATCC 43889

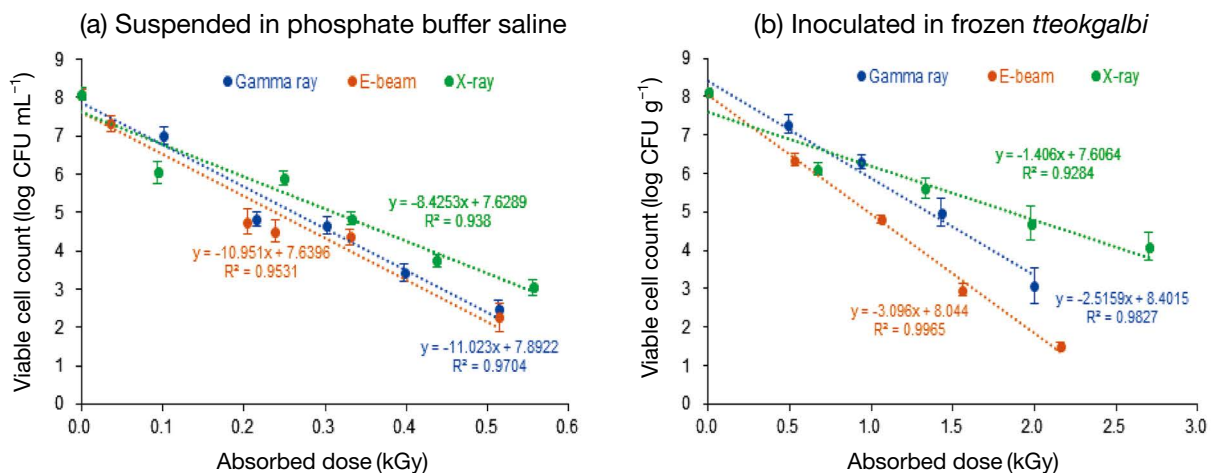


Fig. 1. Viability (n = 5) of three strains of *Escherichia coli* O157:H7 suspended in phosphate buffer saline or inoculated in frozen *tteokgalbi* following irradiation at different doses with gamma rays, electron beams, or X-rays.

Table 1. Decimal reduction dose (D_{10} value) of 3 radiation types for *Escherichia coli* O157 : H7 inoculated in various frozen meat products

Strain	Medium	Temperature	Radiation type	D_{10} value (kGy)	Reference
ATCC 35150	PBS	-20°C	Gamma ray	0.10	
			E-beam	0.09	
			X-ray	0.11	
	<i>Tteokgalbi</i>	-20°C	Gamma ray	0.46 ^b	
			E-beam	0.33 ^a	
			X-ray	0.67 ^c	
ATCC 43889	PBS	-20°C	Gamma ray	0.10	This study
			E-beam	0.08	
			X-ray	0.11	
	<i>Tteokgalbi</i>	-20°C	Gamma ray	0.45 ^b	
			E-beam	0.32 ^a	
			X-ray	0.72 ^b	
ATCC 43890	PBS	-20°C	Gamma ray	0.09 ^a	
			E-beam	0.09 ^a	
			X-ray	0.12 ^b	
	<i>Tteokgalbi</i>	-20°C	Gamma ray	0.40 ^b	
			E-beam	0.32 ^a	
			X-ray	0.72 ^b	
ATCC 35150	Ground beef	-20°C	E-beam	0.33	[15]
Isolates (CA1, E0019, 550B, 932, 204P)	Ground beef	-18°C	Gamma ray	0.31	[16]
Isolates (466, DT66)	Beef liver	-80°C	Gamma ray	0.76~0.85	[17]
	Ground beef	-80°C	Gamma ray	0.51~0.69	
ATCC 43894	Beef	-18°C	E-beam	0.45	[18]
ATCC 43895	Ground beef patty	-15°C	Gamma ray	0.59~0.62	[19]
			E-beam	0.32~0.44	
ATCC 35150, 43889, 43894, isolates (93-437, ENT C9490)	Ground beef	-20°C	Gamma ray	0.75~1.21	[20]
	Chicken breast meat	-20°C	E-beam	0.35	
NCTC 12900	Beef meat trimming	-18°C	Gamma ray	0.28	[21]

^{a-c}The superscript letter means a significant difference in D_{10} values between three radiation types (gamma ray, e-beam, and X-ray) for individual strain in each medium using an ANCOVA analysis ($p < 0.05$).

른 다양한 방사선 선종의 살균효과를 Fig. 2와 Table 2에 제시하였다. 세균현탁액의 D_{10} 값은 같은 그람 음성균인 장출혈성 대장균에 비해 2배 높은 0.16~0.23 kGy로 나타났으며, 감마선이 전자선과 엑스선에 비해 유의적으로 높아 가장 낮은 살균효과를 나타내었다. 그러나 냉동 떡갈비에 접종된 경우 방사선 저항성이 5배가 증가한 1.02~2.01

kGy를 나타내었으며, 특히 엑스선의 D_{10} 값이 전자선과 감마선에 비해 2배 이상으로 큰 차이를 나타내어 엑스선의 살균효과가 다른 선종들의 살균효과에 비하여 명확하게 낮음을 확인하였다. 앞서 장출혈성 대장균에 대한 고찰에서 엑스선의 낮은 살균효과는 다른 선종들에 비해 낮은 선량률에 기인하는 것으로 판단하였고 떡갈비에 접종한

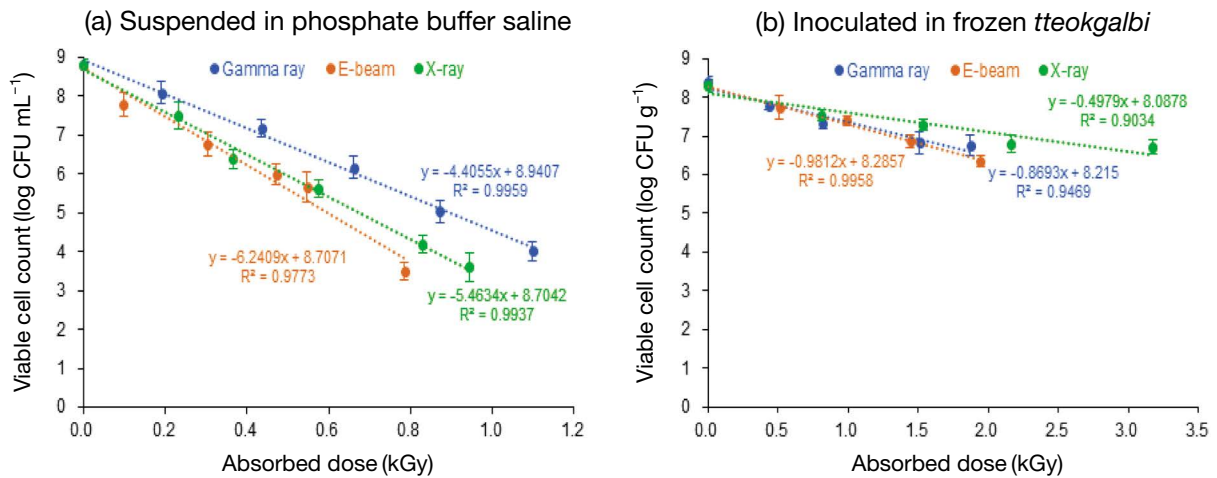


Fig. 2. Viability (n = 5) of *Salmonella enterica* serovar Typhimurium UK1 suspended in phosphate buffer saline or inoculated in frozen *tteokgalbi* following irradiation at different doses with gamma rays, electron beams, or X-rays.

Table 2. Decimal reduction dose (D₁₀ value) of 3 radiation types for *Salmonella* spp. inoculated in various frozen meat products

Strain	Medium	Temperature	Radiation type	D ₁₀ value (kGy)	Reference
<i>S. Typhimurium</i> UK1	PBS	-20°C	Gamma ray	0.23 ^b	This study
			E-beam	0.16 ^a	
			X-ray	0.18 ^a	
	<i>Tteokgalbi</i>	-20°C	Gamma ray	1.15 ^a	
			E-beam	1.02 ^a	
			X-ray	2.01 ^b	
<i>S. Dublin, S. Enteritidis, S. Typhimurium</i>	Ground beef	-18°C	Gamma ray	0.62~0.80	[16]
<i>S. Enteritidis</i> 3313	Beef liver	-80°C	Gamma ray	1.38	[17]
	Ground beef	-80°C	Gamma ray	1.00	
<i>S. Typhi</i> KCTC 1916	Duck meat	-18°C	E-beam	0.51	[25]
<i>S. Panama</i>	Broiler carcass	-20°C	Gamma ray	0.65~1.29	[26]
<i>S. Typhimurium</i> ATCC 14028	Mechanically deboned chicken	-20°C	Gamma ray	0.45~0.70	[27]

^{a,b}The superscript letter means a significant difference in D₁₀ values between three radiation types (gamma ray, e-beam, and X-ray) for individual strain in each medium using an ANCOVA analysis (p < 0.05).

살모넬라의 경우 역시 이러한 경향을 따르고 있다. 그러나 세균현탁액의 경우 감마선의 살균효과가 유의적으로 낮게 나타났으며 이는 선량을 효과보다는 시험에 사용된 살모넬라 균주 내부적 요인에 기인하는 것으로 사료된다. 세균의 방사선 감수성은 유전자 손상 복구와 관련된 세균 자체의 내부요인에 따라 다양하다[24]. 현재까지 방사선 선

종에 따른 유전자 손상 복구 등의 방사선 감수성과 내부적 요인과의 상호관계에 대한 연구는 미비한 실정이므로 향후 이에 대한 추가 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

다양한 냉동 육제품에 접종된 살모넬라에 대한 D₁₀ 값은 감마선에 대하여 주로 보고되었으며 0.45~1.38 kGy

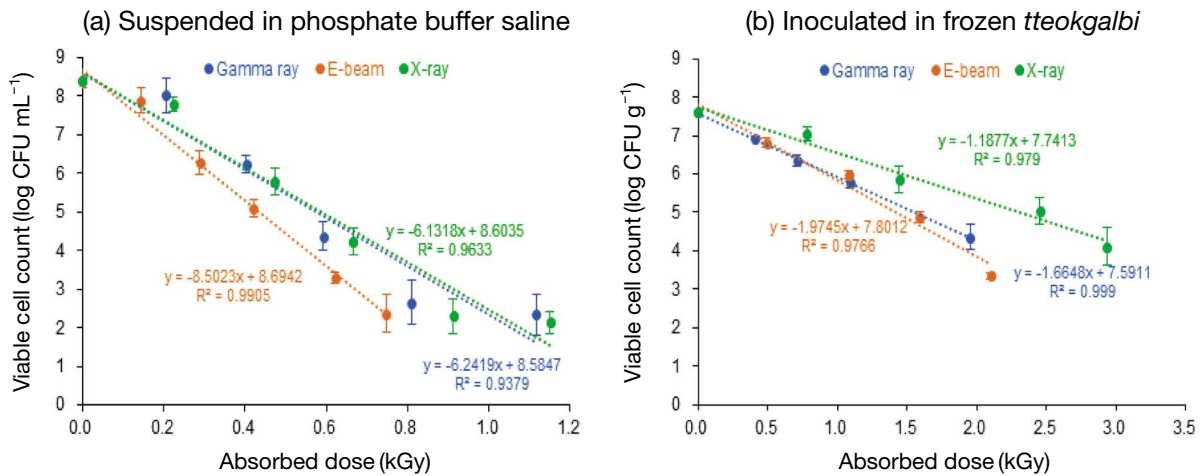


Fig. 3. Viability (n=5) of *Staphylococcus aureus* KCCM 11335 suspended in phosphate buffer saline or inoculated in frozen *tteokgalbi* following irradiation at different doses with gamma rays, electron beams, or X-rays.

Table 3. Decimal reduction dose (D₁₀ value) of 3 radiation types for *Staphylococcus aureus* inoculated in various frozen meat products

Strain	Medium	Temperature	Radiation type	D ₁₀ value (kGy)	Reference
KCCM 11335	PBS	-20°C	Gamma ray	0.16 ^b	This study
			E-beam	0.12 ^a	
			X-ray	0.16 ^b	
	<i>Tteokgalbi</i>	-20°C	Gamma ray	0.60 ^a	
			E-beam	0.51 ^a	
			X-ray	0.84 ^b	
ATCC 25923, 13565, 14458, 27154, isolate (B124)	Ground beef	-20°C	Gamma ray	0.83~0.93	[20]
Isolates (FRI 100, FRI 472, FRI 576, FRI 798, FRI 1068)	Ground beef	-16°C	Gamma ray	0.44	[28]
ATCC 13565, isolates (B121, B124, B767, 196E)	Mechanically deboned chicken meat	-20°C	Gamma ray	0.37~0.47	[29]

^{a,b}The superscript letter means a significant difference in D₁₀ values between three radiation types (gamma ray, e-beam, and X-ray) for individual strain in each medium using an ANCOVA analysis (p<0.05).

의 범위를 나타내었고 전자선은 0.51 kGy로 보고되었다 [16,17,25-27].

3.3. 황색포도상구균에 대한 방사선 선종별 살균효과

방사선 선종별 흡수선량의 변화에 따른 황색포도상구균의 생균수의 변화 및 선종별 D₁₀ 값을 Fig. 3과 Table 3에 나타내었다. 냉동 상태의 세균현탁액의 경우 전자선의 D₁₀ 값이 감마선과 엑스선에 유의적으로 낮았으며, 냉동 떡갈비 접종의 경우 엑스선(0.84 kGy)이 전자선(0.51 kGy)과

감마선(0.60 kGy)에 비해 유의적으로 높게 나타나 방사선 선종에 대한 통일된 경향을 나타내지는 않았다. 이러한 결과 역시 앞선 살모넬라균의 경우와 같이 떡갈비에 접종된 세균의 경우 방사선의 살균효과가 세균의 외부환경 요인인 선량률의 차이에 따라 크게 영향을 받으나, 비교적 외부환경의 영향이 적은 PBS 완충액에 현탁된 세균의 경우 방사선 감수성에 대한 선종별 영향력의 차이가 내부적인 요인에 의해 발생하는 것으로 판단되며 이에 대한 추가 연구가 필요한 실정이다.

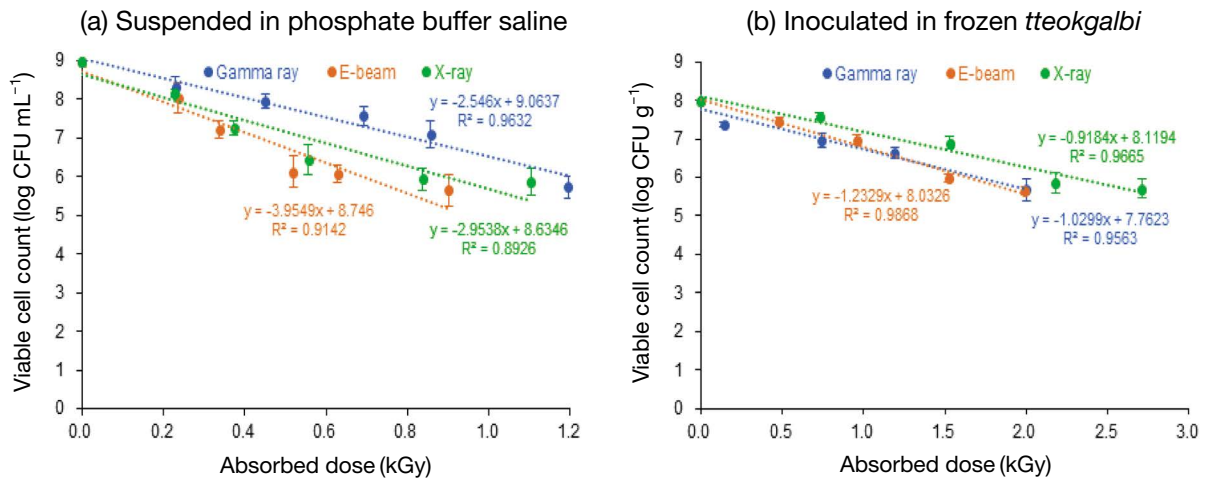


Fig. 4. Viability (n = 5) of *Listeria monocytogenes* KCCM 40307 suspended in phosphate buffer saline or inoculated in frozen *tteokgalbi* following irradiation at different doses with gamma rays, electron beams, or X-rays.

Table 4. Decimal reduction dose (D₁₀ value) of 3 radiation types for *Listeria monocytogenes* inoculated in various frozen meat products

Strain	Medium	Temperature	Radiation type	D ₁₀ value (kGy)	Reference
KCCM 40307	PBS	-20°C	Gamma ray	0.39 ^b	This study
			E-beam	0.25 ^a	
			X-ray	0.35 ^a	
	<i>Tteokgalbi</i>	-20°C	Gamma ray	0.90 ^a	
			E-beam	0.81 ^a	
			X-ray	1.09 ^b	
ATCC 19111	Beef meat trimming	-18°C	Gamma ray	0.71	[21]
KCTC 3569	Duck meat	-18°C	E-beam	0.47	[25]
Isolates (Scott A, LCDC 81-861, V7, Brie-1, 101M)	Ground beef	-16°C	Gamma ray	0.52~0.55	[28]
ATCC 35152	Chicken meat	-40°C	Gamma ray	0.50	[30]

^{a,b}The superscript letter means a significant difference in D₁₀ values between three radiation types (gamma ray, e-beam, and X-ray) for individual strain in each medium using an ANCOVA analysis (p < 0.05).

아울러, 본 실험의 결과에서 가장 살균효과가 낮은 엑스선의 D₁₀ 값 역시 냉동 계육과 분쇄육에 접종된 황색포도상구균의 D₁₀ 값에 대한 선행 연구들에서 보고한 0.37~0.93 kGy 범위에 포함되는 것을 확인하였다[20,28,29].

3.4. 리스테리아 모노사이토제네스에 대한 방사선 선종별 살균효과

리스테리아 모노사이토제네스의 방사선 선종별 감수성을 Fig. 4와 Table 4에 나타내었다. 세균현탁액의 경우 D₁₀

값이 0.25~0.39 kGy로 본 실험에 사용된 균주들 중 가장 높은 저항성을 나타내었다. 그러나, 냉동 떡갈비 접종의 경우 D₁₀ 값의 범위는 0.81~1.09 kGy를 나타내었으며, 살모넬라균보다는 낮았다. 아울러 다양한 냉동 육제품에 접종된 리스테리아 모노사이토제네스의 D₁₀ 값은 0.47~0.71 kGy를 나타내었으며, 본 실험의 결과는 이러한 선행 연구들의 결과들보다는 다소 높았다[21,25,28,30]. 방사선 선종별 비교에 있어 현탁액의 경우 감마선의 살균효과가 전자선과 엑스선보다 유의적으로 낮았으며, 냉동 떡갈비에 접종된

경우 앞선 3종의 균들과 같이 엑스선의 살균효과가 감마선과 전자선에 비해 유의적으로 낮은 것으로 나타났다.

지금까지 결과들을 토대로 냉동 떡갈비에 접종된 세균들의 방사선 선종별 살균효과는 선량률의 차이에 의해 전자선 > 감마선 > 엑스선의 순서로 낮아지나 완충액에 현탁된 세균의 경우 일률적인 경향을 나타내지 않았으며 이는 세균 종류별 내부적인 요인에 의하여 선종별 감수성에 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 식품에 존재하는 세균의 방사선 감수성은 유전자 손상 복구와 관련된 세균 자체의 내부요인에 따라 다양하며, pH, 염도 및 식품 구성 성분 등 다양한 외부 환경요인들에 의한 영향을 받는다. 특히 식품에서는 단백질, 지방, 탄수화물 등 다양한 성분들이 이온화 에너지를 흡수하기 때문에 식품 매트릭스 내에 존재하는 세균에 대한 살균효과는 순수한 물보다 낮아지며, 따라서 동일한 균주의 살균효과에 있어서 외부요인이 중요하게 작용한다[31,32]. 본 실험에서 PBS에 현탁된 후 냉동된 상태로 있는 식중독균의 D_{10} 값이 냉동 떡갈비에 접종한 균의 D_{10} 값에 비해 3배 이상 낮은 이유는 세균 내 DNA 손상을 일으키는 이온화 에너지의 흡수량이 크기 때문인 것으로 쉽게 예측되는 것은 사실이나, 식품 매트릭스 효과를 배제한 세균 자체의 살균효과 정보 또한 식품의 조사처리 공정 설계 시 필요하므로 현탁된 세균의 방사선 선종별 D_{10} 값을 제시하였다.

식품의 조사처리에 관한 연구들은 전통적으로 감마선에 대한 연구들이 주를 이루어 왔으나 최근 들어 전자선에 대한 연구들이 증가하고 있는 추세이다. 그러나 현재까지 엑스선에 대한 연구들은 소수에 한정되고 있으며 이는 한국의 경우 엑스선에 대한 식품조사처리 허가가 2020년 4월에 고시된 바 있어 장비의 보급과 기준이 마련된 기간이 짧기 때문인 것으로 판단된다. 비록 본 실험 결과에서 냉동 떡갈비에 식중독균에 대한 엑스선의 D_{10} 값이 전자선과 감마선에 비해 유의적으로 낮은 살균효과를 나타내었지만 6 kGy의 흡수선량으로 조사처리 3 log 수준의 감균효과(99.9% 살균)를 나타내므로 냉동 육류에 대한 미 FDA의 최대 허용 선량인 7 kGy의 기준 범위 내에서 살균 목적을 만족시키기에는 충분하므로 살균에 효과적인 방사선 선종으로 엑스선 역시 사용 가능할 것으로 판단된다. 그러나 감마선과 전자선에 비해 살균효과가 낮아 조사처리 선량이 높아지고 이에 따른 조사처리 시간이 늘어나므로 엑스선을 조사처리 선종으로 선택함에 있어 이러한 단점을 반드시 고려하여야 할 것이다.

4. 결론

본 연구는 현재까지 국내에서는 허용이 되어 있지 않은 분쇄가공육 제품의 조사처리 기준 설정을 위한 자료 확보 목적으로 냉동 떡갈비에 접종된 주요 식중독균에 대한 감마선, 10 MeV 전자선 및 7 MeV 엑스선의 90% 살균 선량(D_{10} 값)을 평가하였다. 장출혈성 대장균 3개 균주(*Escherichia coli* O157:H7 ATCC 35150, 43889, and 43890)에 대한 D_{10} 값은 전자선 0.32~0.33 kGy, 감마선 0.40~0.47 kGy 및 엑스선 0.72~0.78 kGy로 산출되었으며, 전자선의 살균효과가 가장 높고 엑스선이 가장 낮았다. 황색포도상구균(*Staphylococcus aureus* KCCM 11335), 리스테리아 모노사이토제네스(*Listeria monocytogenes* KCCM 40307) 및 살모넬라(*Salmonella enterica* serovar Typhimurium UK1)는 장출혈성 대장균에 비해 높은 D_{10} 값을 나타내었으며, 특히 살모넬라는 전자선, 감마선, 엑스선의 D_{10} 값이 각각 1.02, 1.15, 2.01 kGy로 산출되어 실험에 사용된 세균들 중 가장 높은 저항성을 나타내었다. 냉동 떡갈비에 접종된 병원균들에 대한 선종 간 살균효과 비교에 있어 본 실험에 사용된 모든 균들에 대하여 엑스선의 살균효과가 가장 낮은 것으로 나타났으나, 모든 선종에 대하여 미국 FDA의 최대 허용 선량인 7 kGy 이하의 흡수선량으로 조사처리 시 99.9% 이상의 살균효과를 나타낼 수 있음을 확인하였다. 본 실험의 결과는 냉동 분쇄가공육 제조자가 제품의 살균처리를 위하여 방사선 선종의 선정 및 대상 세균의 살균 목표를 감안한 최저 조사처리 선량을 결정함에 있어 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 아울러 본 실험의 결과를 활용하여 조사처리 품목 확대를 위한 식품공전 개정 신청을 추진할 계획이다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국원자력연구원의 주요사업(523210-22)에 의해 수행되었으며, 그 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ministry of Food and Drug Safety. 2022. Korea Food Code. https://www.foodsafetykorea.go.kr/foodcode/01_03.jsp?

- idx = 37
2. Korea Agro-Fisheries & Food Trade Corporation. 2020. Current status of processed food segmentation market in 2020: Processed meat product. Naju, Republic of Korea.
 3. Kim W, Kim K, Yook H, Kim C and Lee J. 2008. Policy plan for the early approval for irradiated meat products and the promotion of irradiated meats in market. *J. Rad. Ind.* **2**(4):199-207.
 4. Ministry of Food and Drug Safety. 2021. Foodborne disease outbreak. https://www.foodsafetykorea.go.kr/portal/healthyfoodlife/foodPoisoningStat.do?menu_no = 3724&menu_grp = MENU_NEW02
 5. Kim MJ, Jang SY, Kang JY, Kim HW, Lee SH and Lim JB. 2019. Evaluation of microbiological safety in ready-to-eat meat products. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* **48**(8):896-902.
 6. Wang Q, Ruan X, Wei D, Hu Z, Wu L, Yu T and Wang L. 2010. Development of a serogroup-specific multiplex PCR assay to detect a set of *Escherichia coli* serogroups based on the identification of their O-antigen gene clusters. *J. Mol. Cell. Probes.* **24**:286-290.
 7. Cho Y, Lee J, Lee MK, Shin DB, Kim DH and Park KM. 2011. Prevalence and characterization of *Staphylococcus aureus* pathogenic factors isolated from various food in Korea. *Korean J. Food Sci. Technol.* **43**(5):648-654.
 8. Kim SH and Park YH. 2010. Reemergence of foodborne pathogen *Listeria monocytogenes*. *Safe Food* **5**(3):13-18.
 9. Fan X and Sommers CH. 2013. Food Irradiation Research and Technology, 2nd ed. Blackwell Publishing, Chicago.
 10. Food and Drug Administration. 2022. Irradiation in the production, processing and handling of foods: Ionizing radiation for the treatment of food. Code of federal regulations 21 CFR179.26. <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?fr = 179.26>
 11. Arvanitoyannis IS and Tserkezou P. 2010. Legislation on food irradiation. In: Arvanitoyannis IS (ed.), Irradiation of Food Commodities: Techniques, Applications, Detection, Legislation, Safety and Consumer opinion. Academic press, London., pp. 3-20.
 12. Ministry of Food and Drug Safety. 2017. Guidelines on petition procedure for amendment of irradiation standard for foods. <https://www.mfds.go.kr/law/board/boardDetail.do?menuKey = 29&brdId = data0011&seq = 13285>
 13. Vilenchik MM and Knudson AG. 2000. Inverse radiation dose-rate effects on somatic and germ-line mutations and DNA damage rates. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **97**:5381-5386.
 14. Song BS, Lee Y, Moon BG, Go SM, Park JH, Kim JK, Jung K, Kim DH and Ryu S. 2016. Comparison of bactericidal efficiency of 7.5 MeV X-rays, gamma-rays, and 10 MeV e-beams. *Radiat. Phys. Chem.* **125**:106-108.
 15. Black JL and Jaczynski J. 2006. Temperature effect on inactivation kinetics of *Escherichia coli* O157:H7 by electron beam in ground beef, chicken breast meat, and trout fillets. *Food Microbiol. Safety* **71**:M221-227.
 16. Clavero MR, Monk JD, Beuchat LR, Doyle MP and Brackett RE. 1994. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonellae*, and *Camphylobacter jejuni* in raw ground beef by gamma irradiation. *Appl. Env. Microbiol.* **60**:2069-2075.
 17. Kawasaki S, Saito M, Mochida M, Noviyanti F, Seito H and Todoriki S. 2019. Inactivation of *Escherichia coli* O157 and *Salmonella* Enteritidis in raw beef liver by gamma irradiation. *Food Microbiol.* **78**:110-113.
 18. Kwon OJ, Yang JS, Lim SI and Byun MW. 1997. Elimination of *Escherichia coli* O157:H7 contaminated in frozen beef by electron beam irradiation. *Korean J. Food Sci. Tehchnol.* **29**:771-775.
 19. Lopez-Gonzalez V, Murano PS, Bresnann RE and Murano EA. 1999. Influence of various commercial packaging conditions on survival of *Escherichia coli* O157:H7 to irradiation by electron beam versus gamma rays. *J. Food Prot.* **62**:10-15.
 20. Thayer DW and Boyd G. 2001. Effect of irradiation temperature on inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Staphylococcus aureus*. *J. Food Prot.* **64**:1624-1626.
 21. Xavier MP, Dauber C, Mussio P, Delgado E, Maquieira A, Soria A, Curuchet A, Marquez R, Mendez C and Lopez T. 2014. Use of mild irradiation doses to control pathogenic bacteria on meat trimmings for production of patties aiming at provoking minimal changes in quality attributes. *Meat Sci.* **98**:383-391.
 22. von Sonntag C. 1987. The chemical basics of radiation biology, Taylor and Francis, New York.
 23. Urbain WM. 1986. Food Irradiation, Academic Press, Orlando, FL.
 24. Monk JD, Beuchat LR and Doyle MP. 1995. Irradiation inactivation of food-borne microorganisms. *J. Food Prot.* **58**:197-208.
 25. An AK, Jo Y, Akram K, Suh SC and Kwon JH. 2018. Assessment of microbial contaminations in commercial frozen duck meats and the application of electron beam irradiation to improve their hygienic quality. *J. Sci. Food Agri.* **98**:5444-5449.
 26. Mulder RWA. 1976. Radiation inactivation of *Salmonella panama* and *Escherichia coli* K12 present on deep-frozen broiler carcasses. *Eur. J. Appl. Microbiol.* **3**:63-69.
 27. Thayer DW and Boyd G. 1991. Effect of ionizing radiation dose, temperature and atmosphere on the survival of *Salmonella typhimurium* in sterile, mechanically deboned chicken meat. *J. Food Sci.* **57**:848-851.

28. Monk JD, Clavero MRS, Beuchat LR, Doyle MP and Brackett RE. 1994. Irradiation inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Staphylococcus aureus* in low- and high-fat frozen and refrigerated ground beef. *J. Food Prot.* **57**(11):969-974.
29. Thayer DW and Boyd G. 1992. Gamma ray processing to destroy *Staphylococcus aureus* in mechanically deboned chicken meat. *J. Food Sci.* **57**(4):848-851.
30. Kamat AS and Nair MP. 1995. Gamma irradiation as a means to eliminate *Listeria monocytogenes* from frozen chicken meat. *J. Sci. Food Agri.* **69**:415-422.
31. Jo C, Lee NY, Kang HJ, Hong SP, Kim TH, Kim HJ and Byun MW. 2005. Radio-sensitivity of pathogens in inoculated prepared food of animal origin. *Food Microbiol.* **22**:329-336.
32. Thornly MJ. 1963. Radiation resistance among bacteria. *J. Applied Bacteriol.* **26**: 334-345.