Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 3, pp. 247-256, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.3.247

Original article

감마선 조사가 냉동 떡갈비의 품질 특성에 미치는 영향

조민지[1,2] · 염서준[1,2] · 김상수[1] · 송범석[1] · 박종흠[1] · 김도영[3] · 김재경[1,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소, [2]전남대학교 융합식품바이오공학과, [3]전남대학교 식품영양학과

The Effect of Gamma Irradiation on the Quality Characteristics of Frozen *Tteokgalbi*

Min-Ji Cho[1,2], Seo-Joon Yeom[1,2], Sang-Su Kim[1], Beom-Seok Song[1], Jong-Heum Park[1], Do-Yeong Kim[3], and Jae-Kyung Kim[1,*]

[1]Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, Jeongeup 56212, Republic of Korea
[2]Department of Integrative Food, Bioscience and Biotechnology, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea
[3]Department of Food Science and Nutrition, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea

ABSTRACT This study evaluated the effects of various gamma irradiation doses (0, 2.5, 5, 7, and 10 kGy) on the microbial, physicochemical and sensory characteristics of frozen Tteokgalbi, a traditional korean ground meat product, during storage at −18°C for 0, 90, and 180 days. Gamma irradiation significantly reduced total aerobic bacteria (TAB), yeast and mold (Y&M) in a dose-dependent manner, with the 10 kGy group remaining below detection limits even after 180 days. TBARS values, indicative of lipid oxidation, increased with both irradiation dose and storage period. Lightness (L*) showed no significant change, while redness (a*) increased with irradiation dose but decreased during storage. pH values showed statistically significant differences, but the changes were small, less than 0.05. Flavor and overall acceptance significantly decreased in the 10 kGy group during storage, whereas acceptable sensory quality was retained in treatments at or below 7 kGy. In conclusion, gamma irradiation effectively improved the microbiological safety of frozen Tteokgalbi, and a dose of up to 7 kGy can be recommended to ensure product safety without compromising quality during frozen storage.

Key words: Food irradiation, Ground meat, Preservation, Microbiological safety, Physicochemical quality

1. 서 론

떡갈비는 분쇄한 소고기와 돼지고기를 주원료로 하여, 다양한 채소와 향신료를 혼합한 후 일정한 형상으로 성형하고 구워 내는 우리나라의 향토 식육가공품이다[1]. 떡갈비는 부드러운 질감과 조화로운 풍미로 전 연령층에서 높은 기호도를 보이며, 양질의 단백질과 비타민을 함유하고 있어 한 끼 식사로도 적합하다[2]. 최근 캠핑 문화 확산, 1인 가구의 증가 및 식생활 문화의 변화 등 사회적 요인에 따라 편의성과 영양 기능을 동시에 갖춘 가공식품에 대한 관심이 증가하고 있다[3]. 이러한 흐름에 맞춰, 떡갈비는 가정간편식(HMR)의 형태로 산업화되었으며, 보존성과 품질 유지를 위해 주로 함기 포장 후 냉동 상태로 저장 및 유통되고 있다[4,5].

떡갈비를 포함하는 분쇄가공육은 도축, 세절 및 분쇄 과정에서 식육의 표면적 증가되고, 비위생적인 작업 환경 및 유통 중 오염 등 다양한 요인에 인한 교차오염에 취약하며, 위생학적 안전성이 쉽게 저하될 수 있다[6-7]. 2022년, 시판 떡갈비 제품에서 장출혈성대장균이 검출되었으며, 장내 출혈성 설사와 용혈성요독증후군(Hemolytic uremic syndrome, HUS)의 발생 가능성으로 인해 제품 판매가 중단되고 회수 조치가 이루어졌다[8]. 또한, 2020년 식품의약품안전처가 실시한 식육 및 식육가공품의 미생물 오염도 조사 결과, 소고기 및 돼지고기 분쇄육을 포함한 시료 총 313개 중 46개(14.7%)에서 대장균이, 30개(9.6%)에서 병원성 대장균이 검출되었다. 특히, 소고기 분쇄육 시료 50개 중 13개(26%)에서 병원성 대장균이 검출되었으며, 1건의 제품에서 장출혈성 대장균이 검출되어 식품공전 기준 및 규격에 대해 부적합한 결과가 보고되었다[9].

ISSN 1976-2402 **http://www.ksri.kr/**

Copyright© 2025 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 16 July 2025 **Revised** 23 July 2025 **Accepted** 30 July 2025

식중독을 유발하는 병원성 미생물을 살균하기 위해 가열, 약제, 마이크로파, 방사선 조사, 자외선 조사, CO_2 처리, 초고압, 광펄스, 오존 처리 등의 다양한 기술이 제안되고 있다[10]. 그러나 보편적으로 사용되는 가열 처리는 높은 살균력을 보이지만, 고온에 의해 식품의 영양 및 관능적 품질에서 저하가 발생된다. 훈증제 및 살충제와 같은 화학적 방법 또한 잔류 성분의 잠재적 독성과 환경 오염 가능성으로 사용이 제한적이다. 반면, 식품조사(Food irradiation)는 감마선, X선 및 전자선 등 이온화 방사선을 식품에 적용하는 대표적인 비가열 살균 기술로, 포장된 상태에서도 적용 가능하여 2차 오염을 효과적으로 방지할 수 있고, 잔류물 없이 식품의 생화학적 품질을 유지할 수 있다[11,12]. 식품 조사의 미생물 살균은 방사선이 미생물의 DNA에 직접적으로 에너지를 전달하여 구조적 손상을 입히는 직접 효과와 세포 내 수분과 반응하여 생성된 자유 라디칼, 반응성 산소종 및 반응성 질소종이 세포의 구성 요소와 상호작용하여 추가적으로 손상을 주는 간접 효과를 통해 이뤄진다[13]. 여러 조사 방식 중에서도 감마선 조사는 방사선 동위 원소 ^{60}Co에서 생성된 고에너지 방사선을 이용하며, 강한 투과력을 바탕으로 다양한 깊이의 대상에 균일한 조사 처리가 가능하다. 이러한 특성으로 인해 감마선은 전자선이나 X선에 비해 대규모 식품 조사 공정에 적합하다는 장점을 가지고 있다[14].

1981년 FAO/WHO/IAEA 조사식품공동전문위원회는 평균 10 kGy 이하의 선량으로 조사된 모든 식품의 독성학적, 영양학적 안전성은 확보된다고 보고하였다. 이에 따라 1983년 국제식품규격위원회(CODEX Alimentarius Commission)는 조사식품의 최대 허용선량을 10 kGy로 규격화하였다. 이러한 국제 기준을 기반으로 현재 60개국 이상이 식품에 대한 방사선 조사를 허용하고 있으며, 그 중 30개국은 식육과 식육 가공품에도 적용하고 있다[15-17]. 미국은 냉장육과 냉동육에 대해 각각 4.5 및 7 kGy를 최대 허용선량으로 설정하고 있으며, 캐나다는 냉장 우육의 경우 1.5-4.5 kGy, 냉동 우육은 2-7 kGy의 조사 선량을 허용하고 있다. 반면, 우리나라는 가공식품 원료용 건조 식육 살균에 한해 7 kGy 이하의 조사 처리를 허가하고 있으며, 분쇄가공육을 포함한 식육에 대한 방사선 조사는 현행 기준 상 허용되지 않고 있는 실정이다[18-20].

따라서 본 연구는 떡갈비를 포함한 분쇄가공육 제품의 방사선 조사 선량에 대한 식품공전 개정 시 활용할 수 있는 기초 자료를 제공하고자, 떡갈비에 감마선을 다양한 선량(0, 2.5, 5, 7 및 10 kGy)으로 조사하고, 저장 기간(0, 90, 180일) 동안의 미생물학적, 이화학적 및 관능적 품질을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료

본 연구에 사용된 떡갈비는 국내에서 시판 중인 냉동 제품으로, 육류는 한우갈비살 30%, 목심 14%, 양지 14%, 앞다리살 12%, 설도 11%가 포함되어 있으며, 조미 성분으로는 간장, 설탕, 대파, 양파, 마늘, 생강, 배, L-글루탐산나트륨, 참기름, 물엿 및 후추가 첨가되었다. 시료는 구매한 직후 100 g씩 소분하여 멸균 nylon poly-ethylene/polypropylene bags (20×30 cm, 0.07 mm, Sunkyung Co., Ltd., Seoul, Republic of Korea)에 개별 함기포장하였다. 저장 0일의 실험은 감마선 조사 직후 상온에서 해동하여 사용하였으며, 저장 90일 및 180일의 시료는 −18°C에서 보관하고 저온(4°C)에서 해동하여 각 실험에 사용하였다.

2.2. 감마선 조사

본 실험에서 감마선 조사는 한국원자력연구원 첨단방사선연구소의 ^{60}Co 감마선조사장치(150 TBq capacity, ACEL, MDS Nordion Inc., Ottawa, Ontario, Canada)를 이용하여 수행하였다. 조사 선량률은 10 kGy h^{-1}로 설정하여 2.5, 5, 7 및 10 kGy의 흡수선량을 목표로 조사하였다. 흡수선량 측정을 위해 시료별 포장재의 위쪽과 아래쪽에 알라닌 선량계(5 mm, Bruker Instrument, Rheinstetten, Baden-Württemberg, Germany)를 부착하였고, 실제 흡수선량의 오차는 목표선량의 5% 이내였다. 감마선 조사 시 시료의 해동을 방지하고자 시료의 상·하부에 아이스팩을 배치한 상태에서 수행하였다.

2.3. 미생물학적 평가

미생물학적 평가는 25 g의 시료를 멸균된 인산완충액 225 mL과 함께 멸균필터백(BagFilter 400S, Interscience Co., St. Nom la Breteche, France)에 담고, 1분간 stomacher (BagMixer 400w, Interscience Co., St. Nom la Breteche, France)로 균질화한 후 멸균된 인산완충액으로 10배 단계 희석하였다. 일반 호기성 미생물(Total aerobic bacteria, TAB)은 plate count agar (Difco, Becton, Dickinson and Company, Sparks, MD, USA)에 희석된 시료를 도말하여 37°C에서 24시간 배양하였다. 효모 및 곰팡이는 potato dextrose agar (Difco, Detroit, MI, USA)에 희석된 시료를 도말하여 25°C에서 72시간 배양하였다. 15-300개의 집락이 형성된 배지를 대상으로 미생물을 계수하였고, 결과는 log CFU g^{-1}로 표기하였다. 최소 검출 한계치는 1 log CFU g^{-1} 미만이었다.

2.4. 지질 산화, TBARS

지질 산화는 Yeom 등[21]의 2-Thiobarbituric acid reactive substance (TBARS) 방법을 사용하여 측정하였다. 시료 5 g과 7.2% Butylated hydroxyanisole 50 μL 및 증류수 15 mL를 혼합하여 homogenizer (T25 digital ultra-turrox, IKA, German)로 11,000 rpm에서 30초간 균질화 하였다. 균질액 2 mL에 20 mM Thiobarbituric acid/15% trichloroacetic acid 용액을 4 mL 첨가하여 항온 수조(90°C, 15분)에서 중탕하여 발색시킨 다음 10분간 냉각시켰다. 이후 원심분리기(VARISPIN 12R, Novapro Co.,

Ltd., Buchun, Korea)로 원심분리(2,400 rpm, 15분, 4°C)하였고, spectrophotometer (Libra S70, Biochrom Ltd., Cambridge, England)를 이용하여 532 nm에서 흡광도를 측정하였다. 최종적으로 malondialdehyde (MDA) 농도를 mg MDA kg^{-1}으로 나타내었다.

2.5. 색도

색도는 colorimeter (CM-5, Konica Minolta Co., Ltd., Osaka, Japan)를 사용하여 측정하였으며, 측정 전 표준백판(A-210, Konica Minolta Co., Ltd., Osaka, Japan)으로 보정하였다. 시료의 표면 위치를 달리하며 명도(Lightness, L*), 적색도(Redness, a*) 및 황색도(yellowness, b*)를 측정하였다.

2.6. pH

pH 측정은 시료 중량의 10배에 해당하는 증류수를 가하여 homogenizer (11,000 rpm, 1분)로 균질화하였다. 그 후 원심분리(3,000 rpm, 15분, 4°C)하여 pH meter (ORION 3 STAR, Thermo Scientific Inc., Beverly, MA, USA)를 사용하여 측정하였다.

2.7. 관능평가

관능평가는 한국원자력연구원 첨단방사선연구소의 연구원 중 12명을 관능평가 패널로 선별하여 진행하였다. 시료 25 g을 일회용 내열성 플라스틱 용기(PRW09004, Enterline, Siheung, Korea)에 담은 후 microwave oven (MW-251BTR, LG electronics, Seoul, Korea)을 700 W 출력으로 2분간 동시 가열하여 세 자리 난수와 함께 무작위로 제공하였다. 평가 방법으로 7점 척도법을 사용하여 '매우 좋지 않다' 1점, '좋지 않다' 2점, '약간 좋지 않다' 3점, '좋지도 싫지도 않다' 4점, '약간 좋다' 5점, '좋다' 6점, '매우 좋다' 7점으로 평가하였다. 평가 항목은 색상(color), 맛(taste), 조직감(texture), 풍미(flavor) 및 종합적 기호도(overall acceptance)에 대해 평가하였다.

2.8. 통계처리

본 실험은 최소 3회 이상의 반복 실험을 실시하여 얻은 결과를 mean±SD로 표기하였다. 통계 처리 소프트웨어 minitab (minitab version 20.1.3, Minitab LLC, State College, PA, USA)을 이용하여 각 시료 간의 유의성을 분산분석으로 검정한 후 $p<0.05$ 수준에서 Tukey's test로 사후 검정을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 미생물학적 평가

감마선이 다양한 선량(2.5, 5, 7 및 10 kGy)으로 조사된 냉동 떡갈비의 저장 기간 중 미생물 변화는 Fig. 1과 Fig. 2에 제시하였다. 일반 호기성미생물 초기 수준은 비조사군에서 5.20±0.12 log CFU g^{-1}이었으며, 조사 선량이 증가함에 따라 각각 4.32±0.13, 3.57±0.13, 1.00±0.00 log CFU g^{-1} 및 검출한계 미만으로 유의하게 감소하였다. 이러한 선량 의존적 감소 경향은 저장 중에도 유지되었고, 특히 고선량군에서 미생물 수준이 가장 낮게 유지되었다. 한편, 저장기간에 따른 변화는 처리군 간 상이한 양상을 보였다. 비조사군은 저장 90일 차에 일시적인 증가 후 180일 차에 감소하는 양상을 보였으며, 두 시점 간 유의한 차이는 관찰되었으나, 전체 저장기간 동안 일관된 경향성은 확인되지 않았다. 2.5 kGy 처리군은 저장 중 감소하는 경향을 보였으나 유의차는 나타나지 않았다. 5 kGy 처리군은 저장 90일 차에서 유의한 감소를 보였으며, 180일 차에는 소폭 증가하였으나 초기보다 낮은 수준이

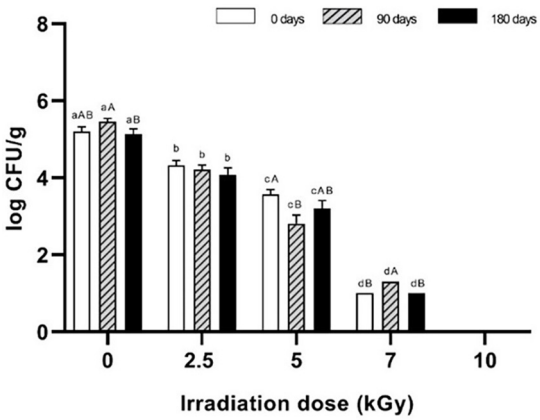

Fig. 1. Total aerobic bacteria (TAB) of frozen *Tteokgalbi* irradiated with gamma rays at various doses over the storage period. [a-c]Means with different letters within irradiation dose differ significantly ($p<0.05$). [A-C]Means with different letters within storage periods differ significantly ($p<0.05$).

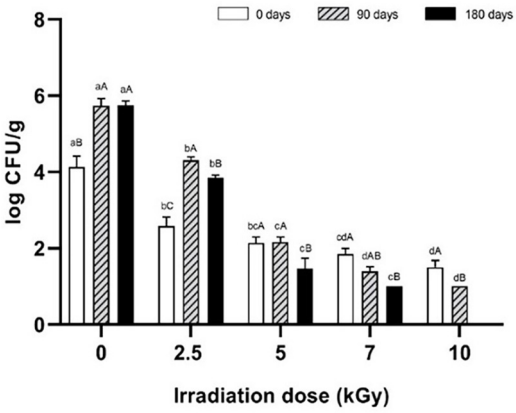

Fig. 2. Yeasts and molds (Y&M) of frozen *Tteokgalbi* irradiated with gamma rays at various doses over the storage period. [a-c]Means with different letters within irradiation dose differ significantly ($p<0.05$). [A-C]Means with different letters within storage periods differ significantly ($p<0.05$).

었다. 7 kGy 처리군은 저장 90일 차에 증가하였으나, 180일 차에는 초기 수준을 회복하였으며, 10 kGy 처리군에서는 저장기간 동안 일반 호기성 미생물이 검출한계 미만으로 유지되었다.

효모 및 곰팡이 또한 조사 선량의 증가에 따라 초기 비조사군의 4.13±0.28 log CFU g^{-1}에서 2.58±0.24, 2.14±0.16, 1.85±0.15 및 1.50±0.17 log CFU g^{-1}까지 선량 의존적으로 감소하였다. 이러한 경향은 저장 90일 및 180일차에도 유지되었으며, 고선량군일수록 낮은 수준을 나타냈다. 그러나 저장 중 미생물 변화는 처리군마다 서로 다른 경향을 보였다. 비조사군은 저장 90일차에 유의적으로 증가한 후 유지되었으며, 2.5 kGy 처리군은 저장 90일차에 유의적으로 증가한 후 180일차에 감소하였으나 초기보다 높은 수준을 나타냈다. 5 kGy 이상의 처리군에서는 지속적인 감소 경향이 나타났으며, 10 kGy 조사 처리군은 저장 180일차에서 검출 한계 미만으로 확인되었다.

Ameer 등[22]은 발효 소시지의 초기 일반 호기성 미생물 수준이 7.42 log CFU g^{-1}였으나, 전자선 조사(1, 2, 3 및 4 kGy)에 따라 유의하게 감소하였고, 저장 15일차에는 일시적으로 증가했으나 30일 이후부터는 감소하는 경향을 보여 2 kGy 이상 처리군에서는 검출 한계 미만으로 억제되었다고 보고하였다. Islam 등[23]은 감마선 조사(1.5, 2 및 4 kGy)에 따라 양고기의 효모 및 곰팡이 수준이 초기에는 감소하였으나, 저장 중 미생물 수준은 다시 증가하여 저장 60일차 비조사군에서 가장 높은 수치를 나타냄을 확인하였다. Tolentino 등[24]은 쇠고기 패티에 2-4 kGy의 전자선을 조사하여 일반 호기성 미생물과 효모 및 곰팡이 수준을 각각 2.0 및 1.5 log CFU g^{-1}를 감소시켰으며, 그 수준이 저장 7개월 동안 유지되었다고 보고하였다.

이전 연구들과 유사하게 본 연구에서도 조사 선량 증가에 따라 미생물 수가 유의하게 감소하는 경향을 보였으나 저장 중의 미생물 변화 양상은 시료 특성 및 조사 선량에 따라 다른 경향을 보였다. 본 연구는 시료가 동결된 상태에서 감마선 조사를 진행하였으며, 이는 방사선의 살균력에 영향을 미칠 수 있는 중요한 요인이다. 동결된 상태에서는 수분활성도가 낮고 시료 내 수분이 고정되어 라디칼의 생성과 확산이 제한되기 때문에, 방사선에 대한 미생물의 민감도가 감소하여 간접적 손상이 상대적으로 약화될 수 있다[25]. 이로 인해 조사 직후 완전 사멸되지 않은 일부 미생물이 저장 중 회복 또는 증식하며 일시적인 수 증가로 이어졌을 가능성도 존재한다. 따라서 저장 중 나타난 처리군 간 미생물 농도 변화는, 단순한 선량 차이 외에도 시료 상태, 초기 오염 수준, 저장 조건 등 다양한 요인이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다[26]. 결과적으로, 감마선 조사는 선량 증가에 따라 미생물 억제 효과가 증가하였으며, 냉동 떡갈비의 경우 10 kGy 처리 시 저장 180일차까지 미생물학적 안전성을 가장 효과적으로 확보하였다.

3.2. 지질 산화

감마선 조사된 떡갈비의 저장 기간 중 TBARS 값 변화는 Table 1에 제시하였다. 초기 비조사군의 TBARS 값은 1.56±0.05 mg MDA kg^{-1}이었으며, 조사 선량이 증가할수록 유의적으로 상승하여 10 kGy 처리군에서는 2.16±0.04 mg MDA kg^{-1}으로 나타났다. 또한, 동일한 선량 조건 내에서도 저장 기간이 경과함에 따라 TBARS 값은 유의하게 증가하는 경향을 보였다. 그러나 저장 180일차에는 비조사군의 TBARS 값도 증가하여, 조사군과의 유의차는 확인되지 않았다.

An 등[27]은 전자선을 조사한 훈제 오리에서 조사 선량 및 저장 기간이 증가함에 따라 초기 비조사군의 TBARS 값인 0.71±0.14 mg MDA kg^{-1}에서 저장 40일 차 4.5 kGy 처리군의 5.24±0.03 mg MDA kg^{-1}까지 유의적으로 증가하였다고 보고하였다. Rodrigues 등[28]은 감마선이 조사된 소고기에서 비조사군과 9 kGy 처리군의 TBARS를 각각 0.21±0.31 및 0.87±0.66 mg MDA kg^{-1}으로 측정하였으며, 조사 선량 증가에 따라 지질 산화가 유의하게 증가하는 경향을 확인하였다. 양념 오리에 전자선을 조사한 연구에서도 저장 기간 경과에 따라 TBARS 값이 유의적으로 증가하는 경향을 보여, 본 연구 결과와 유사한 경향을 나타냈다[29].

육류의 지질 산화는 일반적으로 저장 기간이 길어짐에 따라 증가하는 경향을 보이며, 산소가 존재하는 조건에서는 산화 반응 속도가 가속화된다. 특히 방사선 조사 시 생성되는 하이드록실 라디칼(•OH)은 불포화지방산의 이중 결합과 반응하여 지질 산화를 촉진시킨다. 이러한 산화 반응은 단순한 화학적 변화에 그치

Table 1. TBARS values of frozen *Tteokgalbi* irradiated with gamma rays at various doses over the storage period (mg MDA kg^{-1} meat)

Irradiation dose (kGy)	Storage period (day)		
	0	90	180
0	1.56±0.05^{cC}	2.09±0.03^{bB}	3.42±0.20^{A}
2.5	1.67±0.04^{bcC}	2.13±0.06^{bB}	3.58±0.23^{A}
5	1.77±0.04^{bB}	2.28±0.01^{bB}	3.57±0.36^{A}
7	2.09±0.06^{aC}	2.74±0.25^{aB}	3.71±0.31^{A}
10	2.16±0.04^{aC}	3.00±0.18^{aB}	3.81±0.48^{A}

$^{a-c}$Means with different letters within irradiation dose differ significantly ($p<0.05$).
$^{A-C}$Means with different letters within storage periods differ significantly ($p<0.05$).

Table 2. Color of frozen *Tteokgalbi* irradiated with gamma rays at various doses over the storage period

Parameter	Irradiation dose (kGy)	Storage period (day)		
		0	90	180
L*	0	39.82±2.31	40.10±2.49	38.74±1.38
	2.5	40.12±3.30	39.87±1.53	38.78±1.15
	5	39.98±2.09	39.91±1.32	38.70±1.18
	7	39.93±2.16	39.49±1.50	39.02±1.39
	10	39.94±1.30	40.12±1.99	38.81±1.00
a*	0	7.13±1.01^{bA}	5.34±0.37^{bB}	5.33±0.20^{bB}
	2.5	7.14±0.17^{bA}	5.42±0.26^{bB}	5.34±0.20^{bB}
	5	7.41±0.08^{bA}	5.60±0.15^{bB}	5.46±0.04^{bB}
	7	7.71±0.34^{bA}	6.56±0.20^{aB}	5.58±0.16^{bC}
	10	10.35±0.62^{aA}	6.66±0.21^{aB}	5.92±0.06^{aC}
b*	0	14.51±0.48	14.73±0.52	14.69±0.35^{ab}
	2.5	14.77±0.45	14.45±0.34	14.38±0.69^{ab}
	5	14.44±0.41	14.60±0.50	14.23±0.45^{ab}
	7	14.44±0.77	14.16±0.36	14.93±0.20^{a}
	10	14.40±0.47	14.29±0.25	14.03±0.19^{b}
ΔE*	0	-	3.81±1.97	2.63±1.04
	2.5	3.24±3.06	3.50±1.06	2.83±0.51
	5	3.06±2.00	3.33±1.11	2.69±0.70
	7	3.20±1.92	2.82±1.19	2.64±0.93
	10	4.44±1.04	3.35±1.63	2.55±0.57

$^{a-c}$Means with different letters within irradiation dose differ significantly ($p<0.05$).
$^{A-C}$Means with different letters within storage periods differ significantly ($p<0.05$).

지 않고 육류의 색상, 질감, 향 및 풍미와 같은 관능적 품질 저하뿐만 아니라, 단백질 변성을 유발하여 영양적 가치 또한 감소시킨다. TBARS 측정법은 육류의 지질 산화 정도를 평가하는 대표적인 분석법으로, 말론알데하이드(MDA)와 thiobarbituric acid의 반응으로 생성되는 적색 생성물의 흡광도를 기반으로 한다. MDA는 다중 불포화지방산의 2차 산화 산물로서 지질 산화의 핵심 지표이며, 적은 양으로도 산패취를 유발할 수 있어 관능적인 품질 저하와 연관되어 있다[30-32]. Campo 등[33]은 관능 평가 결과, TBARS가 2.8 mg MDA kg^{-1}에 도달하면 산패취가 소고기의 풍미를 압도하기 시작한다고 보고하였고, 이를 바탕으로 2.0 mg MDA kg^{-1}을 관능적 수용 한계로 제시하였다. 반면, Hughes 등[34]은 20주간 저장된 소고기에서 TBARS값이 2.60-3.11 mg MDA kg^{-1}로 측정되었음에도 소비자들은 수용 가능한 수준으로 평가하였다. Zhang 등[35]은 서로 다른 TBARS 측정법으로 2.5 또는 10.0 mg MDA kg^{-1}로 측정된 시료 모두에서 소비자들의 수용도는 유지되었다고 보고하였다. 이와 같이, 다양한 연구에서 공통적으로 TBARS 수치가 증가함에 따라 관능적 품질에 영향을 줄 수 있다는 점을 시사하였으나, 수용 가능성에 대한 임계값은 연구마다 다양하게 보고되고 있으며, 이러한 차이는 시료의 특성, 저장 및 가공 조건, 분석법 및 소비자군 등의 차이에서 기인한 것으로 보인다.

3.3. 색도

감마선을 조사한 냉동 떡갈비의 저장 기간 동안의 육색 변화는 Table 2에 제시하였다. 초기 비조사군의 명도, 적색도, 황색도는 각각 39.82±2.31, 7.13±1.01 및 14.51±0.48으로 나타났다. 감마선 조사는 냉동 떡갈비의 명도에 유의한 영향을 미치지 않았으며, 저장 기간에 따른 변화도 확인되지 않았다. 반면, 적색도는 조사 선량의 증가에 따라 유의적으로 증가하였으며, 저장 기간이 경과함에 따라 점차 감소하였다. 황색도는 저장 0일 및 90일 차에서 조사 선량과 저장기간에 따른 유의차는 나타나지 않았으나, 180일차에서는 유의차가 확인되었으나 선량에 따른 경향성은 확인되지 않았다.

Yim 등[36]은 X선을 조사한 떡갈비에서 적색도가 비조사군의 6.11에서 10 kGy 처리군의 8.58까지 선량 증가에 따라 유의하게 상승하였으며, 저장 14일차에는 4.29-6.59 수준으로 감소하는 경

향을 관찰하였다. Chouliara 등[37]은 감마선을 조사한 닭가슴살에서 명도와 황색도는 유의적인 변화가 없었으며, 적색도는 선량 의존적으로 증가한다고 보고하였다. Gunes 등[38]은 감마선 조사한 미트볼에서 명도는 조사 선량 및 저장 기간에 따른 유의한 변화가 나타나지 않으며, 적색도는 조사 선량과 저장 기간이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다고 밝혔다.

육색은 식육의 신선도를 평가하는 주요한 품질 지표로 소비자가 식육을 선택하는 과정에서 결정적인 영향을 미친다. 소비자는 명도와 적색도를 주로 관찰하며 식육의 적색도가 높을수록 좋은 품질로 평가받는다. 육류의 적색도는 헴 단백질의 일종인 미오글로빈(myoglobin, Mb)의 산화환원에 의해 좌우된다. Mb은 산소와 충분히 접하지 않은 정형 직후 적자색을 나타내는 de-oxymyoglobin (DMb, Fe^{2+}) 형태로 존재하며, 산소에 노출되면 선홍빛의 oxymyoglobin (OMb, Fe^{2+})이 생성되고 장시간 산소와 노출되면 갈색의 metmyoglobin (MMb, Fe^{3+})으로 산화된다. 방사선이 조사된 육류의 적색도는 저장기간이 길어짐에 따라 OMb의 농도는 감소하고, 산화된 MMb이 증가하게 되어 감소하게 되는 것으로 알려져 있다[39-41]. 한편, 방사선 조사 시 육류에서 일산화 탄소(CO)가 선량 의존적으로 생성되게 되고, CO는 Mb과 높은 결합력을 통해 붉은색의 CO-Mb을 형성하여 조사 선량에 따라 적색도가 증가된다고 제안된 바 있다[42]. 본 실험에서는 감마선 조사 선량 증가에 따라 CO-Mb의 형성률이 높아져 떡갈비의 적색도가 상승하였으며, 장기간 저장동안 Mb이 지속적으로 산화되어 적색도가 감소하는 경향을 나타낸 것으로 판단된다. 따라서, 감마선 조사는 초기 육색 개선에 기여하며, 특히 10 kGy 처리군은 최소 6개월의 저장기간 동안 비조사군에 비해 상대적으로 높은 적색도를 유지함으로써, 장기 저장 중 육색의 품질 저하를 완화할 수 있는 효과적인 처리 조건으로 판단된다.

3.4. pH

감마선을 다양한 선량(0, 2.5, 5, 7, 10 kGy)으로 조사한 냉동 떡갈비의 저장기간 동안 pH 변화는 Table 3에 나타내었다. 감마선 조사 직후(0일) 냉동 떡갈비의 pH는 5.73-5.77의 범위로 측정되었으며 유의적인 차이는 나타나지 않았다. 저장 90일차에는 pH가 5.81-5.86의 범위로 7 kGy 이상의 감마선을 조사한 처리군에서 비조사군에 비해 유의적으로 증가하였다. 저장 180일차에는 5.79-5.81의 범위로 측정되었으며, 2.5 kGy 처리군에 비해 7 및 10 kGy 처리군에서만 유의적인 증가가 관찰되었고, 조사 선량에 따른 일관된 pH 변화 경향은 확인되지 않았다. 한편, 저장기간에 따른 pH 변화는 조사 선량에 따라 서로 다르게 나타났다. 비조사군과 5 kGy 처리군은 저장 0일 이후 pH가 유의적으로 증가한 뒤 유지되는 경향을 보였으며, 2.5 kGy 처리군은 저장기간에 따른 유의한 변화가 확인되지 않았다. 7 및 10 kGy 처리군은 저장 90일 차에서 pH가 가장 높았으며, 저장 180일 차에서는 유의적으로 감소한 경향이 나타났다.

Sadakuzzaman 등[43]은 미트볼에 3, 5 및 7 kGy의 감마선을 조사한 결과, 조사 직후의 pH가 5.77-5.83의 범위로 조사 선량에 따른 유의적인 차이는 나타나지 않았다. 그러나 상온 보관 7일차에 pH가 7.30-7.67까지 증가하여 저장기간에 따른 유의적인 상승한 경향을 보고하였다. Salari 등[44]은 다진 칠면조 고기에 전자선(1.5, 3 및 5 kGy)을 조사한 후 6개월간 냉동 저장하였을 때, 조사 선량에 따른 pH 변화는 유의하지 않았고, 저장기간 경과에 따라 감소하는 경향이 나타났지만 유의차는 없다고 보고하여 본 실험 결과와 상이한 경향이 나타났다. Kim 등[45]은 건조 발효 소시지에 4 kGy 이하의 감마선을 조사하였을 때 조사 처리와 관계없이 pH가 4.88-4.93의 범위로 유의적인 변화가 없다고 보고하여 본 실험 결과와 유사한 경향을 나타내었다.

식육의 pH는 색도, 조직감, 연도 및 신선도 등에 영향을 미치며, 저장성에 대한 중요한 지표로서 식육 품질을 판단하는 기본 요인이다[46]. 일반적으로 pH의 0.1 미만의 차이는 가공육 제품의 품질 특성에 실질적인 영향을 주지 않는 수준으로 간주되며, 이전의 연구에서도 감마선 조사는 육류의 pH에 영향을 미치지 않는 것으로 보고된 바 있다[47]. 따라서 본 연구에서 확인된 냉동 떡갈비의 pH는 유의한 차이가 나타났으나 수치상 변화 폭이 작기 때문에 떡갈비의 품질 특성에 유의미한 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

Table 3. pH of frozen *Tteokgalbi* irradiated with gamma rays at various doses over the storage period

Irradiation dose (kGy)	Storage period (day)		
	0	90	180
0	5.73 ± 0.02^{B}	5.81 ± 0.01^{bA}	5.80 ± 0.01^{abA}
2.5	5.76 ± 0.04^{A}	5.81 ± 0.01^{bA}	5.79 ± 0.01^{bA}
5	5.77 ± 0.02^{B}	5.81 ± 0.01^{bA}	5.80 ± 0.01^{abA}
7	5.73 ± 0.01^{C}	5.86 ± 0.02^{aA}	5.81 ± 0.01^{abB}
10	5.73 ± 0.03^{C}	5.86 ± 0.02^{aA}	5.81 ± 0.01^{abB}

$^{a-c}$Means with different letters within irradiation dose differ significantly ($p < 0.05$).
$^{A-C}$Means with different letters within storage periods differ significantly ($p < 0.05$).

Table 4. Sensory evaluation of frozen *Tteokgalbi* irradiated with gamma rays at various doses over the storage period

Parameter	Irradiation dose (kGy)	Storage period (day)		
		0	90	180
Color	0	5.33±1.37	6.17±0.83	5.17±0.94
	2.5	5.75±1.22	6.00±1.13	5.00±1.04
	5	4.75±1.60	5.58±1.38	5.25±0.97
	7	4.83±1.47	5.75±1.29	5.08±0.90
	10	5.17±1.53	5.42±1.08	5.00±1.21
Taste	0	4.83±1.64	5.42±1.31	4.75±0.97
	2.5	4.83±1.40	5.67±1.61	4.92±0.90
	5	4.67±1.61	5.17±1.53	4.92±1.00
	7	5.08±1.51	5.00±1.04	4.67±1.07
	10	$5.33±1.15^{A}$	$5.08±1.08^{AB}$	$4.50±1.00^{B}$
Texture	0	5.58±1.31	5.33±1.56	4.42±1.24
	2.5	5.25±1.36	5.50±1.57	4.75±0.87
	5	4.92±1.78	4.75±1.76	4.67±0.78
	7	4.58±1.83	4.75±1.22	4.08±1.08
	10	5.25±1.48	5.08±1.16	3.92±0.90
Flavor	0	$5.50±0.90^{A}$	$5.25±1.60^{abAB}$	$4.25±0.87^{aB}$
	2.5	$5.33±1.37^{AB}$	$5.42±1.00^{aA}$	$4.25±1.06^{aB}$
	5	4.58±1.98	$4.67±0.98^{ab}$	$4.08±1.00^{a}$
	7	4.42±1.38	$4.33±1.07^{ab}$	$3.58±1.24^{ab}$
	10	$4.08±1.62^{A}$	$4.00±1.35^{bA}$	$2.50±1.24^{bB}$
Overall acceptance	0	5.50±1.31	5.50±1.57	$4.67±0.89^{a}$
	2.5	5.08±1.31	5.50±1.24	$4.83±0.58^{a}$
	5	4.67±1.78	4.50±1.68	$4.92±1.08^{a}$
	7	4.67±1.83	4.92±1.24	$4.42±1.00^{ab}$
	10	$5.17±1.27^{A}$	$4.93±0.94^{A}$	$3.50±0.80^{bB}$

[a-c]Means with different letters within irradiation dose differ significantly ($p<0.05$).
[A-C]Means with different letters within storage periods differ significantly ($p<0.05$).

3.5. 관능평가

감마선 조사 및 저장기간이 떡갈비의 관능적 특성에 미치는 영향을 Table 4에 나타내었다. 저장 0일 차에서는 모든 관능 특성에서 조사 선량에 따른 유의적인 차이가 확인되지 않았다. 그러나 저장 90일 차에는 풍미에서만, 저장 180일 차에는 풍미 및 종합적 기호도에서 10 kGy 처리군의 유의적인 감소가 확인되었다. 저장기간 증가에 따른 관능 특성의 변화를 확인한 결과, 비조사군은 풍미에서 저장기간의 경과에 따라 유의적으로 감소하였으며, 10 kGy 처리군은 저장기간이 경과함에 따라 맛, 풍미, 종합적 기호도가 모두 유의적으로 감소하였다.

풍미는 미각과 후각 기반의 복합적인 관능적 특성이다. 방사선 조사로 인해 지질이 산화되어 알데히드, 탄화수소, 케톤 등의 물질의 생성되거나, 일부 풍미에 관여하는 화합물의 상대적 함량이 변화하며 방사선 조사 특유의 이취가 발생되어 관능적 특성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[48]. 앞서 지질의 산화정도를 측정한 TBARS 값과 풍미 점수 간의 경향성이 완전히 일치하지는 않았으나, 조사 선량 및 저장기간의 증가에 따라 지질 산화가 증가와 풍미 점수의 감소 경향이 유사하게 나타나, 지질 산화가 풍미 저하의 주요 원인 중 하나로 작용하였음을 확인하였다.

훈제 오리 고기에 4.5 kGy의 전자선을 조사한 후 40일간 저장한 결과 비조사군과 조사처리군 간 외관, 풍미, 조직감, 맛 및 종합적 수용도 점수에 유의미한 차이는 나타나지 않았다[27]. 감마선(1, 3, 5 kGy)을 조사한 돼지 안심에서는 조사 선량이 증가함에 따라 색상과 조직감 점수는 유의하게 증가하였으나, 향 점수는 감소하였고, 종합적 기호도는 비조사군과 유의한 차이를 보이지 않았다[49]. 또한, 전자선을 조사한 떡갈비의 경우 7 kGy 이하의 처

리군에서는 관능적 특성에 유의적인 차이가 없었으나, 10 kGy 처리군에서 풍미와 종합적 기호도가 유의적으로 감소하였고, 저장 3개월차부터 맛, 풍미 및 종합적 기호도가 평균점수 이하로 감소한 결과를 보고하였다[21].

본 연구에서 사용된 7점 척도법에서 4점은 '좋지도 싫지도 않다'로 정의되며, 소비자 기호도 해석에서 수용 가능성의 판단 기준값으로 적용할 수 있다. 저장 180일차에 7 kGy 처리군은 풍미 항목에서 4점 이하로 감소하였으나, 종합적인 기호도를 포함한 대다수의 관능 특성에서 4점 이상을 유지하였다. 이는 감마선 조사에 따른 풍미의 저하에도 불구하고, 7 kGy의 처리 수준이 소비자에게 전반적으로 수용 가능한 품질을 유지할 수 있는 적정한 조사 선량임을 시사한다.

4. 결 론

본 연구는 감마선 조사가 냉동 떡갈비의 최대 180일간의 저장 중 미생물학적, 이화학적 및 관능학적 품질 변화에 미치는 영향을 평가하고, 적정한 조사 선량을 제안하고자 수행되었다. 그 결과, 일반 호기성 미생물과 효모 및 곰팡이 수준은 조사 선량이 증가함에 따라 유의적으로 감소하였으며, 특히 10 kGy 처리군은 저장 180일 차에 검출한계 미만 수준을 유지하여 가장 높은 미생물학적 안전성을 나타냈다. 지질 산화 지표인 TBARS 값은 조사 선량 및 저장 기간의 증가에 따라 유의하게 증가하였고, 색도 중 적색도는 선량 의존적으로 증가하였으나, 저장 중 점차 감소하는 경향을 보였다. pH는 조사 선량 및 저장기간에 따라 유의한 차이를 나타났으나, 수치 상 변화의 폭이 매우 작아 실제 품질 특성에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다. 관능평가 결과, 조사 선량의 증가에 따라 저장 90일 차에서는 풍미만, 저장 180일 차에는 풍미 및 종합적 기호도에서 10 kGy 처리군의 유의적인 감소가 확인되었으며, 저장 기간이 경과함에 따라 10 kGy 처리군의 맛, 풍미 및 종합적 기호도가 유의하게 감소하였다. 이와 같은 결과를 종합적으로 고려하면 감마선 조사 선량이 증가함에 따라 미생물학적 안전성은 향상된 반면, 10 kGy 처리군에서는 일부 관능적 품질의 유의적인 저해가 확인되었다. 이러한 상반된 변화 양상에 비추어 볼 때, 두 지표 간의 균형을 유지할 수 있는 적정한 조사 선량은 7 kGy 수준으로 제안된다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국원자력연구원의 주요사업(523320-25)에 의해 수행되었으며, 그 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee JA, Cho SH, Kim HW, Kim YS and Bae IS. 2023. Quality characteristics of goat meat tteokgalbi prepared with the addition of centella asiatica powder. *J. Korean Soc. Food Cult.* **38**(5):336-344. https://doi.org/10.7318/KJFC/2023.38.5.336.
2. You JY, Chen J, Lim JJ, Park JI, Baek SJ and Choi JH. 2021. Development and Characterization of Mudfish-Tteokgalbi Supplemented with Radish Greens. *Food Engineering Progress* **25**(4):338-346. https://doi.org/10.13050/foodengprog.2021.25.4.338.
3. Korea Agro-Fisheries & Food Trade Corporation. 2020. The status of the processed food segment market in 2020, processed meat product. https://www.atfis.or.kr/home/board/FB0027.do?act=read&bpoId=3593&searchCondition=bpoSj&bcaId=0&searchKeyword=%EC%8C%80&subSkinYn=N&pageIndex=1.
4. Park EM, Kim IS, Park SH and Lee JJ. 2020. Quality Properties of HMR-type Pork Tteokgalbi Added with Red Chinese Cabbage Powder During Cold Storage. *Korean J. Community Living Sci.* **31**(3):375-391. https://doi.org/10.7856/kjcls.2020.31.3.375.
5. Song GC, Kim HJ and Lee KT. 2018. Effects of vacuum packaging on the quality characteristics of frozen tteokgalbi made from spent laying hen meat and mechanically deboned chicken meat. *Korean J. Packag. Sci. Tech.* **24**(1):17-26. https://doi.org/10.20909/kopast.2018.24.1.17.
6. Papadochristopoulos A, Kerry JP, Fegan N, Burgess CM, and Duffy G. 2021. Natural anti-microbials for enhanced microbial safety and shelf-life of processed packaged meat. *Foods* **10**(7):1598. https://doi.org/10.3390/foods10071598.
7. Jeong SY and Kim YS. 2023. Effects of Spice Addition on the Inhibition of Bacterial Growth in Ground Chicken Meat. *J. Food Hyg. Saf.* **38**(1):19-25. https://doi.org/10.13103/JFHS.2023.38.1.19.
8. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS). 2022. Press release: 'tteokgalbi' recalled due to detection of enterohemorrhagic e. Coli. https://impfood.mfds.go.kr/CFBBB02F02/getCntntsDetail?cntntsSn=471236.
9. National Institute of Food and Drug Safety Evaluation. 2020. A study on the risk assessment and safety management of major food pathogenic bacteria in meat and Ready-to-Eat Foods. https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO202300004324&dbt=TRKO&rn=.
10. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS). 2013. Evaluation of thermal processing of processed meat products. https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO201400011762&dbt=TRKO&rn=.
11. Nam JH, Shin JH, Lee HY and Lee DH. 2017. Effects of ionizing and ultraviolet radiation on microbial mutation and DNA damage. *Korean J. Microbiol*. **53**(1):20-28. https://doi.org/10.7845/kjm.2017.7004.
12. Je GS, Chung DH and Shim WB. 2015. Reducing effect of microorganism on meat and fish products by repeated γ-irradiation at low dose. *J. Food Hyg. Saf.* **30**(1):92-97. https://doi.org/10.13103/JFHS.2015.30.1.92.
13. Bhatnagar P, Gururani P, Bisht B, Kumar V, Kumar N, Joshi R and Vlaskin MS. 2022. Impact of irradiation on physicochemical and nutritional properties of fruits and vegetables: A mini review. *Heliyon*

8(10):e10918. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10918.
14. Bisht B, Bhatnagar P, Gururani P, Kumar V, Tomar MS, Sinhmar R, Rathi N and Kumar S. 2021. Food irradiation: effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables– a review. *Trends Food Sci Technol*. **114**:372-385. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.002.
15. World Health Organization (WHO). 1994. Safety and nutritional adequacy of irradiated food. 161pp. https://iris.who.int/handle/10665/39463.
16. Codex alimentarius. 2003. General standard for irradiated foods, CODEX STAN 106-1983. https://www.fao.org/faowhocodexalimentarius/search/en/?cx=018170620143701104933%3Aqq82jsfba7w&q=CODEX+STAN+106-1983%2C+REV.1-2003+&cof=FORID%3A9.
17. International Atomic Energy Agency (IAEA). 2025. Food irradiation. https://www.iaea.org/topics/food-irradiation.
18. Food and Drug Administration. 2025. Code of federal regulations title 21 cfr179.26. ionizing radiation for the treatment of food. https://www.ecfr.gov/current/title-21/chapter-I/subchapter-B/part-179/subpart-B/section-179.26.
19. Government of Canada. 2025. Irradiation of ground beef: summary of submission process. https://www.canada.ca/en/health-canada/services/foodnutrition/foodsafety/foodirradiation/irradiation-ground-beef-summary-submission-process.html.
20. Animal and Plant Quarantine Agency(APQA). 2025. Irradiation. https://www.qia.go.kr/plant/disinpect/plant_sterilize_phy_lad.jsp.
21. Yeom SJ, Yoon KN, Kim SS, Song BS, Park JH and Kim JK. 2022. Effect of Electron-beam Irradiation on Quality Characteristics of Frozen Tteokgalbi. *J. Radiat. Ind.* **16**(4):333-341. http://doi.org/10.23042/radin.2022.16.4.333.
22. Ameer A, Seleshe S and Kang SN. 2022. Effect of Various Doses of Electron Beam Irradiation Treatment on the Quality Characteristics of Vacuum-Packed Dry Fermented Sausage during Refrigerated Storage. *Prev. Nutr. Food Sci.* **27**(3):323-334. https://doi.org/10.3746/pnf.2022.27.3.323.
23. Islam A, Hossain A, Sadakuzzaman, Khan M, Rahman M and Hashem A. 2022. Effect of Gamma Irradiation on the Shelf Life and Quality of Mutton. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology* **10**(2):117-124. https://doi.org/10.24925/turjaf.v10i2.117-124.4126.
24. Tolentino M, Diano G, Abrera G, Montefalcon DR, Cobar ML, Deocaris C, Balue A and Assad C. 2021. Electron beam irradiation of raw ground beef patties in the Philippines: Microbial quality, sensory characteristics, and cost-analysis. *Radiat. Phys. Chem*. **186**:109536. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109536.
25. Ahn DU, Kim IS and Lee EJ. 2012. Irradiation and additive combinations on the pathogen reduction and quality of poultry meat. *Poultry Science* **92**(2):534-545. https://doi.org/10.3382/ps.2012-02722.
26. Indiaro R, Irawan AN and Subroto E. 2023. Meat irradiation: a comprehensive review of its impact on food quality and safety. *Foods* **12**(9):1845. https://doi.org/10.3390/foods12091845.
27. An KA, Arshad MS, Jo YH, Chung NH and Kwon JH. 2017. E-beam irradiation for improving the microbiological quality of smoked duck meat with minimum effects on physicochemical properties during storage. *J. Food Sci*. **82**(4):865-872. https://doi.org/10.1111/1750-3841.13671.
28. Rodrigues LM, Sales LA, Fontes PR, Filho RAT, Andrade MPD, Ramos ALS and Ramos EM. 2020. Combined effects of gamma irradiation and aging on tenderness and quality of beef from Nellore cattle. *Food Chem*. **313**:126137. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126137.
29. Li Y, Zhou C, He J, Wu Z, Sun Y, Pan D, Tian H and Xia Q. 2022. Combining e-beam irradiation and modified atmosphere packaging as a preservation strategy to improve physicochemical and microbiological properties of sauced duck product. *Food Control* **136**:108889. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108889.
30. Śmiecińska K and Daszkiewicz T. 2021. Lipid oxidation and color changes in beef stored under different modified atmospheres. *J. Food Process Preserv.* **45**:e15263. https://doi.org/10.1111/jfpp.15263.
31. Kang HJ, Jo C, Lee NY, Kim JO and Byun MW. 2004. Effect of gamma irradiation on microbial growth, electron donating ability, and lipid oxidation of marinated beef rib (galbi) with different packaging methods. *J. Korean Soc Food Sci Nutr.* **33**(5):888-893.
32. Park JG, Park JN, Han IJ, Kim WG, Song BS, Kim JH, Choi JI, Yoon YH, Byun MW, Hwang HJ and Lee JW. 2009. Comparison of the effects of gamma ray and e-beam irradiation on the quality of minced beef during storage. *J. Radiat. Ind*. **3**(2):71-77.
33. Campo MM, Nute GR, Hughes SI, Enser M, Wood JD and Richardson RI. 2006. Flavour perception of oxidation in beef. *Meat Sci*. **72**(2):303-311. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.07.015.
34. Hughes JM, McPhail NG, Kearney G, Clarke F and Warner RD. 2015. Beef longissimus eating quality increases up to 20 weeks of storage and is unrelated to meat colour at carcass grading. *Anim. Prod. Sci.* **55**:174-179. https://doi.org/10.1071/AN14304.
35. Zhang Y, Holman BWD, Ponnampalam EN, Kerr MG, Bailes KL, Kilgannon AK, Collins D and Hopkins DL. 2019. Understanding beef flavour and overall liking traits using two different methods for determination of thiobarbituric acid reactive substance (TBARS). *Meat Sci*. **149**:114-119. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.11.018
36. Yim DG, Jo C, Kim HJ, Kim SS, Lee HJ, Kim JK and JC. 2023. Effects of different X-ray irradiation doses on quality traits and metabolites of marinated ground beef during storage. *Radiat. Phys. Chem*. **202**:110563. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110563.
37. Chouliara E, Bedeka A, Savvaidis I and Kontominas MG. 2008. Combined effect of irradiation and modified atmosphere packaging on shelf-life extension of chicken breast meat: microbiological, chemical and sensory changes. *Eur Food Res Technol*. **226**:877-888. https://doi.org/10.1007/s00217-007-0610-3.
38. Gunes G, Ozturk A, Yilmaz N and Ozcelik B. 2011. Maintenance of Safety and Quality of Refrigerated Ready-to-Cook Seasoned Ground Beef Product (Meatball) by Combining Gamma Irradiation with Modified Atmosphere Packaging. *J. Food Sci*. **76**(6):M413-420. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02244.x.
39. Kim JY, Kim YJ, Cha JY, Oh SM, Sung JM, Park MK, Ahn JH and Choi YS. 2024. A study on the packaging method and quality analysis of small package refrigerated beef for distribution. *Food and Life* **2024**(1):33-40. https://doi.org/10.5851/fl.2024.e1.
40. Lee YS, Lee DS and Lyu ES. 2007. Development of processing and packaging method for a korean seasoned meat product, *Korean J. Packag. Sci. Tech.* **13**(3/4):97-102. https://www.earticle.net/Article/A277267.
41. Yu QP, Feng DY, Xiao J, Wu F, He XJ, Xia MH, Dong T, Liu YH, Tan HZ, Zou SG, Zheng T, Ou XH and Zuo JJ. 2017. Studies on meat color, myoglobin content, enzyme activities, and genes associated with oxidative potential of pigs slaughtered at different growth stages. *Asian-Australas J. Anim Sci*. **30**(12):1737-1750. https://doi.org/10.5713/ajas.17.0005.
42. Nam KC and Ahn DU. 2002. Carbon monoxide-heme pigment

is responsible for the pink color in irradiated raw turkey breast meat. *Meat Sci.* **60**(1):25-33. https://doi.org/10.1016/S0309-1740(01)00101-2.

43. Sadakuzzaman M, Hossain MA, Rahman MM, Azad MAK, Hossain MM, Ali MS, and Hashem MA. 2021. Combined effect of irradiation and butylated hydroxyanisole on shelf life and quality of beef at ambient temperature. Meat Research **1**(1):3. https://doi.org/10.55002/mr.1.1.3.
44. Salari M and Khatami M. 2025. Simultaneous Application of Electron Beam Irradiation and Freezing as an Effective Method for Shelf life Extension of Minced Turkey Meat. *Food Sci. Nutr.* **13**(1):e4752. https://doi.org/10.1002/fsn3.4752.
45. Kim IS, Jo C, Lee KH, Lee EJ, Ahn DU and Kang SN. 2012. Effects of low-level gamma irradiation on the characteristics of fermented pork sausage during storage. *Radiat. Phys. Chem*. **81**:466-472. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2011.12.037.
46. Kim IS, Jang AR, Jin SK, Lee MH and Jo C. 2008. Effect of marination with mixed salt and kiwi juice and cooking methods on the quality of pork loin-based processed meat product. J. Korean Soc *Food Sci Nutr*. **37**(2):217-222. https://doi.org/10.3746/jkfn.2008.37.2.217.
47. Ham YK, Kim HW, Hwang KE, Song DH, Kim YJ, Choi YS, Song BS, Park JH and Kim CJ. 2017. Effects of irradiation source and dose level on quality characteristics of processed meat products. *Rad. Phys. Chem.* **130**:259-264. http://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.09.010.
48. Li C, He L, Jin G, Ma S, Wu W and Gai L. 2017. Effect of different irradiation dose treatment on the lipid oxidation, instrumental color and volatiles of fresh pork and their changes during storage. *Meat Sci*. **128**:68-76. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.02.009.
49. Wang Q, Dong K, Wu Y, An F, Luo Z, Huang Q and Wei S. 2022. Exploring the formation mechanism of off-flavor of irradiated yak meat based on metabolomics. *Food Chemistry: X* 16:100494. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100494.