Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 20, No. 1, pp. 93-99, 2026
https://doi.org/10.23042/radin.2026.20.1.93

Original article

감마선 조사에 따른 돈육 지방산 변화 및 *in vitro* 안전성 평가

김도영[1] · 박종흠[2] · 송범석[2] · 김재경[2,*]

[1]전남대학교 식품영양과학부, [2]한국원자력연구원 첨단방사선연구소

Effects of Gamma Irradiation on the Fatty Acid Composition and *in vitro* Safety of Pork

Do-Yeong Kim[1], Jong-Heum Park[2], Beomseok Song[2], and Jae-Kyung Kim[2,*]

[1]Division of Food and Nutrition, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Republic of Korea
[2]Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, Jeongeup 56212, Republic of Korea

ABSTRACT Food irradiation is widely applied as a non-thermal technology to enhance the microbial safety and shelf life of foods. However, ionizing radiation may induce oxidative changes in food lipids through the generation of free radicals, raising concerns regarding possible chemical and biological effects. Therefore, this study investigated the effects of gamma irradiation on the fatty acid composition of pork and evaluated the biological safety of lipid extracts obtained from irradiated pork. Fatty acid profiling showed that oleic acid, palmitic acid, and linoleic acid were the predominant fatty acids in both raw and cooked pork samples. Gamma irradiation induced statistically significant changes in certain fatty acids in both raw and cooked pork; however, the magnitude of these changes was minimal and did not meaningfully alter the overall fatty acid composition. The biological safety of lipid extracts from irradiated pork was further assessed through mutagenicity, cytotoxicity, and DNA damage analyses. No significant increase in revertant colonies was observed in Ames test under both metabolic activation and non-activation conditions. In addition, treatment with lipid extracts from irradiated pork did not significantly affect the viability of HT-29 cells. Consistently, no significant increase in DNA damage was detected in the comet assay. These findings indicate that gamma irradiation up to 10 kGy does not significantly influence the fatty acid composition of pork and that lipid extracts from irradiated pork do not exhibit mutagenic, cytotoxic, or genotoxic effects at the cellular level.

Key words: Gamma irradiation, Pork; Fatty acid composition, Cytotoxicity, Genotoxicity

1. 서 론

식품 방사선 조사는 미생물 오염을 감소시키고 저장성을 향상시키기 위한 효과적인 비열처리 기술로 알려져 있으며, 육류, 수산물 및 곡류 등 다양한 식품의 위생적 품질 향상을 위해 널리 활용되고 있다[1,2]. 특히 감마선 조사와 같은 이온화 방사선은 식품 내 미생물의 DNA를 손상시켜 사멸시키며, 식품의 품질을 비교적 유지하면서 식중독 미생물을 효과적으로 제어할 수 있는 기술로 평가되고 있다[3,4]. 이러한 이유로 세계보건기구(World Health Organization, WHO) 및 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)는 일정 선량 범위 내에서 조사된 식품의 안전성을 인정하고 있으며, 식품 산업에서의 활용 가능성을 제시한 바 있다[5]. 그러나 이온화 방사선은 식품 성분 중 특히 지질 성분에 화학적 변화를 유도할 수 있는 것으로 알려져 있다[6]. 방사선 조사 과정에서 발생하는 자유라디칼은 지방산의 산화 반응을 촉진할 수 있으며, 이러한 반응은 지질 과산화 및 다양한 분해 생성물의 형성을 유도할 수 있다[7,8]. 지질 산화 과정에서는 malondialdehyde (MDA) 및 4-hydroxy-2-nonenal (4-HNE)과 같은 반응성이 높은 알데하이드 화합물이 생성될 수 있으며, 이러한 물질들은 식품의 품질 저하뿐만 아니라 생물학적 활성을 나타낼 가능성이 있는 것으로 보고되고 있다[9,10].

육류는 단백질과 함께 지질 함량이 높은 식품으로서 방사선 조사 시 지질 산화 반응이 비교적 쉽게 일어날 수 있는 식품군에 속한다[11,12]. 특히 돈육은 다양한 지방산을 주요 성분으로 함유하

ISSN 1976-2402 http://www.ksri.kr/
Copyright© 2026 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 11 March 2026 Revised 13 March 2026 Accepted 16 March 2026

고 있으며, 이러한 지방산 조성은 식품의 영양적 특성뿐만 아니라 산화 안정성에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[13]. 따라서 방사선 조사에 따른 육류 지질의 화학적 변화와 지방산 조성의 변화를 평가하는 것은 방사선 조사 식품의 품질 및 안전성을 이해하는 데 중요한 요소로 간주된다[14]. 지금까지 방사선 조사에 따른 지질 변화에 관한 연구는 육류, 수산물 및 식물성 식품 등 다양한 식품 시스템에서 수행되었고 지방산 조성 변화, 지질 산화의 촉진, 또는 특정 산화 생성물의 형성 등이 보고된 바 있다[15-17]. 그러나 식품 매트릭스와 지방산 조성에 따라 방사선 조사에 대한 반응은 서로 다르게 나타날 수 있으며, 특히 육류 지방 성분의 경우 가공 조건이나 조리 과정에 따라 지질 산화 양상이 달라질 수 있는 것으로 알려져 있다[18,19]. 따라서 방사선 조사 식품의 안전성을 보다 정확하게 평가하기 위해서는 식품 성분의 화학적 변화뿐만 아니라 생물학적 안전성에 대한 종합적인 평가가 필요하다. 특히 육류로부터 추출된 지질 성분이 세포 수준에서 어떠한 생물학적 영향을 나타내는지에 대한 연구는 방사선 조사 식품의 안전성 평가에 있어 중요한 기초 자료가 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 감마선 조사에 따른 돈육 지방산 조성의 변화를 분석하고, 돈육으로부터 추출한 지방 성분이 생물학적 안전성에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 이를 위해 감마선 조사된 돈육 시료로부터 지방을 추출한 후 gas chromatography/mass spectrometry(GC/MS)를 이용하여 지방산 조성을 분석하였으며, 세포 수준에서의 생물학적 영향을 평가함으로써 방사선 조사 돈육의 지방 성분에 대한 안전성을 검토하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 재료

본 실험에서는 돈육 삼겹살(pork belly)을 사용하였으며, 도축 후 2일 이내의 시료를 전라북도 정읍시에 위치한 마트에서 구입하였다. 구입한 시료는 여러 개체에서 유래한 돈육이 혼합된 형태로 사용되었으며, 실험에 필요한 크기로 절단하여 사용하였다(n=3). 지방산 표준품인 FAME mix는 Supelco사(Bellefonte, PA, USA)로부터 구입하였고 지방추출 및 chromatography에 사용한 14% BF_3-methanol, n-hexane, chloroform, methanol 등의 유기용매는 Sigma-Aldrich사(St. Louis, MO, USA)에서 GC grade를 구입하여 사용하였다.

2.2. 감마선 조사

한국원자력연구원 첨단방사선연구소 내 선원 11.1 PBq, Co-60 감마선 조사시설(IR-70 gamma irradiator, MDS Nordion, Canada)을 이용하였으며, 시료 20 g을 각각 LDPE (low density polyethylene)에 진공포장한 후 각각 1, 5, 및 10 kGy의 흡수선량(선량률 10 kGy h^{-1})이 되도록 조사하였다. 최종 흡수선량 확인은 알라닌 선량계(5 mm, Bruker Instrument, Rheinstetten, Baden-Württemberg, Germany)를 사용하였고 실제 흡수선량의 오차는 5% 이내로 확인되었으며, 이후 비조사 시료와 함께 −18°C에 저장하며 실험에 사용하였다.

2.3. 지방 추출

돈육을 감마선 조사 후 가공조건(raw/cooked)별 시료로 분류하여 사용하였고, cooked시료의 경우 70°C의 water bath에서 30분간 가열 후 사용하였다. 지방은 Folch법[20]을 이용하여 추출하였는데, 먼저 돈육시료를 균질화 하여 5 g씩 취하고 Chloroform/MeOH (2:1, v/v) 용액 45 mL을 넣어 24시간 동안 shaking(120 rpm)하였다. Whatman filter paper를 이용해 여과해주고 여과된 부피의 20%에 해당하는 0.88% NaCl 용액을 넣어 세게 흔들어 주었다. 완전히 층이 분리될 때까지 방치했다가 아래층을 둥근 flask로 옮겨 vacuum rotary evaporator (Eyela, Tokyo, Japan)와 N_2 gas blowing evaporator (Tokyo Rikakikai, Tokyo, Japan)를 이용하여 잔존용매를 완전히 제거하고 −18°C에 보관하여 실험시료로 사용하였다.

2.4. 지방산 분석

추출한 지방 25 mg을 cap-tube에 칭량하고 0.5 N methanolic NaOH 1.5 mL을 가한 뒤 약 100°C의 heating block (LBH-T04, Daihan Labtech, Jeonju, Korea)에서 5분간 가열하였다. 가열된 시료를 냉각한 후 14% BF_3-methanol 용액으로 methylation하였다. 최종샘플을 0.45 μm PTFE membrane syringe filter (Millipore, Molsheim, France)로 여과한 후 Gas chromatography/mass spectrometer (GC/MS, Agilent 6890N series, CA, USA)로 분석하였으며, column은 SP-2560 (100 m×0.25 mm i.d., film thickness 0.20 μm, Supelco Inc.)을 사용하였다. Oven온도는 최초 140°C로 5분간 유지한 후, 분당 4°C씩 240°C까지 상승시키고 240°C에서 15분간 유지하여 분리능을 높였다. Carrier gas는 헬륨 가스(20 cm sec^{-1})를 사용하였고 injector 온도는 250°C로 설정하였다. 각각의 시료는 auto sampler를 이용해 1 μL씩 주입하여 분석하였으며, split ratio는 100:1의 비율로 설정하였다. 표준 지방산으로 37개 지방산 혼합물(37 component FAME mix, Supelco, PA, USA)을 사용하였고 검출된 peak의 동정은 GC/MS의 spectrum을 library 검색하여 확인하였다. 각 peak는 표준물질의 머무름 시간과 비교, 확인하여 면적을 적분하여 구하고, 총 지방산에 대한 백분율(% of total fatty acid)로 나타내었다.

2.5. 안전성 평가

2.5.1. Ames test (돌연변이원성)

시료의 돌연변이원성(mutagenicity)은 Ames법[21]으로 측정하였다. 실험에 사용한 균주는 *Salmonella Typhimurium* TA98 (KCTC 2053)와 TA100 (KCTC 2054)를 사용하였으며 nutrient

broth No. 2 (Oxoid Ltd., Hampshire, England, UK)에 접종하여 37°C에서 200 rpm으로 약 10시간 진탕배양(Vision Scientific Co., Korea)한 후 시험에 사용하였다. 음성대조물질로는 시험물질의 조제에 사용한 dimethyl sulfoxide (DMSO)를 사용하였으며, 양성대조물질로는 직접 돌연변이 물질인 2-Aminoanthracene (2-AA), 4-Nitroquinoline 1-oxide (4-NQO) 및 Sodium azide (SA)를 사용하였다. 대사활성을 위한 간 균질액(S9 fraction)은 Sprague-Dawley rat의 간으로부터 분리한 것으로 Oriental Yeast Co. (Tokyo, Japan)에서 구입하였으며, 5% (v/v)의 S9 mixture를 제조하여 사용하였다. 시험물질의 처리는 대사활성계 적용(+S) 및 미적용(−S)하여 direct plate incorporation 방법으로 하였으며, 각 농도군당 2개 plate를 사용하였다. 돈육 지방추출물 시료 100 μL과 S9 mixture 500 μL에 배양액 100 μL을 top agar에 혼합하여 minimal glucose agar plate에 부어 고화시킨 다음, 37°C에서 48시간 배양한 후 복귀돌연변이 집락수를 계수하였다. 시험 결과는 복귀돌연변이 집락수의 평균과 표준편차로 나타내었으며, 돌연변이 유발성의 판정은 복귀변이 집락수가 음성대조군의 2배 이상이면서 용량의존성을 갖는 경우를 양성으로 하였다.

2.5.2. WST assay를 통한 세포독성 평가

감마선 조사된 돈육에서 추출된 지방에 의한 세포독성이 나타나는지 알아보기 위하여 WST assay 실험법으로 대장암세포주(HT-29)의 생존율을 측정하였다. HT-29 세포는 Dulbecco's modification of eagles medium (DMEM; Gibco, Grand Island, NY, USA)에 10% fetal bovine serum (FBS; Gibco, Grand Island, NY, USA), 1% penicillin/streptomycin(Gibco, Grand Island, NY, USA)을 첨가하여 배양하였다. WST assay 실험을 위해 96-well plate에 2×10^4 cell/well가 되도록 seeding하고 37°C, 5% CO_2 배양기에서 24시간 동안 세포를 부착시킨 후 DMSO에 녹인 시료를 DMEM배지에 최종 0, 25, 50, 75, 100 μg mL^{-1} 농도(배양액 내 DMSO 농도는 0.5%)로 처리하고 24시간 더 배양하였다. 그 후 WST 용액을 각각의 well에 10 μL씩 넣고 2시간 동안 배양한 다음 ELISA plate reader (BioTek Instruments, Winooski, VT, USA)를 이용하여 570 nm에서 흡광도를 측정하였다.

2.5.3. Comet assay를 통한 DNA 손상 측정

감마선 조사된 돈육에서 추출된 지방이 세포의 DNA 손상에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Comet assay를 수행하였다. HT-29 세포는 10% fetal bovine serum (FBS; Gibco, BRL, USA)과 1% penicillin/streptomycin (Gibco, Grand Island, NY, USA)이 함유된 Dulbecco's modification of eagles medium (DMEM; Gibco, Grand Island, NY, USA)에서 배양하였다. Comet assay 실험을 위해 24-well plate에 1.5×10^5 cell/well가 되도록 seeding하고 37°C, 5% CO_2 배양기에서 24시간 동안 세포를 부착시킨 후 각각의 시료를 0, 25, 50, 75, 100 μg mL^{-1} 농도로 처리하고 24시간 더 배양하였다. 그 후 인산 완충용액(Dulbecco's phosphate-buffered saline (DPBS); Gibco, Grand Island, NY, USA)으로 세척하고 Tryipsin ethylene-diamine-tetraacetic acid (EDTA)을 처리하여 세포를 탈착시킨 뒤 0.4% low melting point agarose (Invitrogen, Waltham, MA, USA)와 섞어준 후 0.4% normal melting point agarose (Sigma-Aldrich, St.Louis, MO, USA)가 코팅된 슬라이드 위에 75 μL를 도포하여 굳혀 lysing solution (2.5 M NaCl, 100 mM Na-EDTA, 10 mM Tris-HCl pH 10, 1% DMSO, 1% Triton X-100, 1% N-lauroylsarcosinate)에 침지하고 4°C 암실에서 1시간 동안 반응시켜 세포막과 핵막을 용해시켰다. 침지가 끝난 슬라이드는 electrophoresis tray에 평행되게 배열하고 전기영동 버퍼(300 mM NaOH, 10 mM Na2-EDTA, pH 8)하에서 20분 동안 unwinding 시킨 다음, 25 V/300 mA에서 20분 동안 전기영동 하였다. 이어 전기영동이 끝난 슬라이드는 neutralization buffer (0.4 M Tris, pH 7)로 5분 동안 세척하였으며 형광염색시약인 Gel green dye (Biotium, USA)로 슬라이드에 존재하는 세포핵체를 염색하여 형광현미경으로 관찰하였다. 세포핵 이미지는 Komet 5.5 program (Andor Technology, Belfast, UK)을 사용하였고, 각각의 슬라이드 당 100개 세포의 olive tail movement 를 측정하여 분석하였다.

2.6. 통계분석

모든 실험은 3회(Ames test만 2회) 반복 수행하였으며 결과는 평균±표준편차(mean±SD)로 나타내었다. 통계분석은 SPSS (version 20.0; SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 이용하여 one-way ANOVA를 수행하였으며, Duncan's multiple range test를 통해 유의차를 검정하였다($p<0.05$).

3. 결 과

3.1. 방사선 조사에 의한 돈육의 지방산 변화 profiling

돈육의 지방산 조성 분석 결과(Table 1), raw 돈육에서는 총 17종의 지방산이 검출되었으며 oleic acid가 41.76%로 가장 높은 비율을 나타냈고, 다음으로 palmitic acid (23.08%), linoleic acid (13.42%) 순으로 높은 함량을 보였다. 이들 세 가지 지방산은 돈육 지방산 조성의 대부분을 차지하는 주요 지방산으로 알려져 있으며, 특히 oleic acid와 같은 단일 불포화지방산은 육류의 풍미와 지방 안정성에 중요한 역할을 하는 것으로 보고되어 있다[22]. Cooked 돈육의 경우 총 14종의 지방산이 검출되었으며(Table 2), raw 시료와 유사하게 oleic acid, palmitic acid 및 linoleic acid가 주요 지방산으로 확인되었고 stearic acid가 그 다음으로 높은 함량을 나타냈다. 일반적으로 조리 과정에서는 일부 지방산의 산화 또는 휘발에 의해 검출되는 지방산의 종류가 감소할 수 있으며, 특히 불포화지방산의 일부 변화가 보고된 바 있다[23]. 그러나 본 연구에서는 raw 및 cooked 돈육 모두에서 감마선 조사에 따

Table 1. Effects of gamma irradiation on the fatty acid composition of raw pork

Fatty acids (%)	Control	1 kGy	5 kGy	10 kGy
Capric C10:0	0.09±0.01^{NS}	0.08±0.01	0.09±0.01	0.09±0.01
Lauric C12:0	0.15±0.02^{NS}	0.14±0.02	0.13±0.01	0.15±0.02
Myristic C14:0	1.80±0.07^{NS}	1.83±0.03	1.81±0.04	1.83±0.07
Pentadecanoic C15:0	0.15±0.01^{NS}	0.15±0.01	0.15±0.01	0.15±0.01
Palmitic C16:0	23.08±0.46^{NS}	23.07±0.46	23.04±0.46	23.19±0.51
Palmitoleic C16:1	2.94±0.11^{NS}	2.93±0.10	2.89±0.09	2.97±0.11
Margaric C17:0	0.92±0.01^{NS}	0.92±0.02	0.95±0.01	0.89±0.01
Stearic C18:0	12.83±0.56^{NS}	12.93±0.60	12.96±0.59	12.76±0.53
Elaidic C18:1 *trans*	0.67±0.05^{b}	0.71±0.06^{ab}	0.76±0.03^{ab}	0.79±0.05^{a}
Oleic C18:1 *cis*	41.76±0.68^{NS}	41.64±0.53	41.69±0.52	41.78±0.66
Linoleic C18:2 *cis*	13.42±0.45^{NS}	13.53±0.36	13.51±0.30	13.17±0.55
Arachidic C20:0	0.25±0.02^{NS}	0.25±0.01	0.25±0.01	0.27±0.01
Eicosanedioic C20:1	1.14±0.09^{NS}	1.17±0.06	1.16±0.06	1.14±0.07
Linolenic C18:3 *cis*	0.79±0.08^{NS}	0.83±0.04	0.82±0.04	0.81±0.16
Eicosatrienoic C20:3 *cis*	0.17±0.02^{NS}	0.17±0.01	0.18±0.01	0.16±0.01
Arachidonic C20:4 *cis*	0.37±0.03^{NS}	0.37±0.02	0.37±0.01	0.37±0.03
Eicosapentaenoic C20:5 *cis*	0.21±0.02^{NS}	0.21±0.01	0.21±0.01	0.22±0.03
Total saturated	40.71±1.42^{NS}	40.64±1.13	40.59±0.99	40.81±1.48
Total monounsaturated	46.51±0.91^{NS}	46.45±0.75	46.51±0.69	46.67±0.89
Total polyunsaturated	14.96±0.57^{NS}	15.12±0.39	15.09±0.34	14.74±0.74
Total unsaturated	61.47±1.48^{NS}	61.57±1.14	61.60±1.02	61.41±1.56
Total unsaturated/ total saturated	1.51±0.09^{NS}	1.52±0.07	1.52±0.06	1.51±0.09

Values represent mean ± standard deviation (n=3).
$^{a-b}$Differences between letters in rows indicate significant differences (p<0.05).
^{NS}Not significant

라 일부 지방산에서 통계적으로 유의적인 변화가 관찰되었으나, 그 증감 폭은 매우 미미한 수준으로 전체적인 지방산 조성의 경향성이나 영양학적 가치에 큰 영향을 미치지는 않는 것으로 판단된다. 돈육 raw 샘플에서, Elaidic acid (C18 : 1 trans)의 함량은 감마선 조사 선량이 증가함에 따라 통계적으로 유의적인 증가 경향을 나타내었는데, 이러한 변화는 방사선 조사 과정에서 발생하는 자유라디칼에 의해 지방산의 구조적 변형이 유도되면서 cis 형태의 불포화 지방산이 trans 형태로 부분적으로 이성화될 수 있기 때문으로 해석된다. 그러나 본 연구에서 관찰된 elaidic acid의 증가는 절대적인 함량 변화가 매우 제한적인 수준이었으며, 전체 지방산 조성에서 차지하는 비율 또한 낮게 나타나므로 돈육의 전반적인 안전성에 큰 영향을 미치지 않는 수준으로 평가된다. 또한 총 포화지방산(total saturated fatty acids)과 총 불포화지방산(total unsaturated fatty acids)의 함량에서도 감마선 조사에 의한 차이가 나타나지 않았으며, 불포화지방산과 포화지방산의 비율(Total unsaturated/ total saturated ratio) 역시 유의적인 변화를 보이지 않았다. 이러한 결과는 방사선 조사 선량이 비교적 낮은 범위에서는 육류 지방산 조성에 큰 영향을 미치지 않는다는 기존 연구 결과와 일치하였다[24,25]. 따라서 본 연구에서 적용된 감마선 조사 조건에서는 돈육 지방산 조성에 유의적인 변화가 유도되지 않는 것으로 판단된다.

3.2. 방사선 조사된 돈육의 유전독성시험 결과

감마선 조사된 돈육의 유전독성 가능성을 평가하기 위하여 복귀돌연변이 시험(Ames test)을 수행하였다. 시험 결과(Table 3), 대사 활성화를 적용하지 않은 조건(S9 mix (–))과 대사 활성화 조건(S9 mix (+)) 모두에서 감마선 조사된 돈육 시료 처리군의 복귀돌연변이 집락수는 음성대조군과 비교하여 유의적인 증가를 나타내지 않았다. 또한 시료 농도를 증가시킨 경우에도 복귀돌연변이 집락수의 농도 의존적 증가가 관찰되지 않았다. 일반적으로 복귀돌연변이 집락 수가 대조군 대비 유의적으로 증가할 경우 돌연변이 유발 가능성이 있는 것으로 판단되나[26] 본 연구에서는 감마선 조사된 돈육 시료 처리군에서 이러한 증가가 관찰되지 않았으며, 이는 해당 시료가 직접 돌연변이원 또는 간접 돌연변이원으로

Table 2. Effects of gamma irradiation on the fatty acid composition of cooked pork

Fatty acids (%)	Control	1 kGy	5 kGy	10 kGy
Capric C10:0	0.14±0.01^{NS}	0.14±0.01	0.15±0.01	0.15±0.01
Lauric C12:0	0.20±0.01^{NS}	0.19±0.01	0.21±0.01	0.20±0.02
Myristic C14:0	1.75±0.01^{NS}	1.74±0.02	1.76±0.03	1.74±0.02
Palmitic C16:0	23.51±0.13^{NS}	23.51±0.03	23.66±0.09	23.61±0.02
Palmitoleic C16:1 *cis*	2.74±0.03^{NS}	2.77±0.01	2.78±0.06	2.72±0.02
Margaric C17:0	0.65±0.01^{NS}	0.70±0.04	0.68±0.04	0.65±0.01
Stearic C18:0	11.84±0.12^{ab}	11.75±0.02^{a}	11.64±0.02^{b}	11.97±0.07^{a}
Oleic C18:1 *cis*	43.56±0.21^{NS}	43.48±0.04	43.64±0.12	43.42±0.03
Linoleic C18:2 *cis*	13.06±0.03^{ab}	13.11±0.07^{a}	12.94±0.04^{b}	12.99±0.06^{ab}
Linolenic C18:3 *cis*	0.68±0.01^{NS}	0.68±0.03	0.67±0.01	0.66±0.01
Arachidic C20:0	0.28±0.04^{NS}	0.27±0.02	0.27±0.01	0.31±0.04
Eicosanedioic C20:1	0.91±0.01^{a}	0.94±0.01^{a}	0.90±0.01^{b}	0.92±0.02^{ab}
Eicosadienoic C20:2 *cis*	0.39±0.01^{ab}	0.41±0.01^{a}	0.38±0.01^{b}	0.40±0.01^{ab}
Arachidonic C20:4 *cis*	0.30±0.01^{NS}	0.28±0.04	0.25±0.02	0.24±0.03
Total saturated	38.37±0.22^{NS}	36.74±2.33	31.12±1.24	33.92±4.48
Total monounsaturated	47.20±0.25^{NS}	45.26±2.71	38.38±1.35	41.35±5.59
Total polyunsaturated	14.43±0.02^{a}	13.90±0.75^{ab}	11.60±0.35^{b}	12.59±1.75^{ab}
Total unsaturated	61.63±0.22^{NS}	59.16±3.46	49.98±1.70	53.93±7.34
Total unsaturated/ total saturated	1.61±0.02^{NS}	1.61±0.01	1.61±0.01	1.59±0.01

Values represent mean ± standard deviation (n=3).
$^{a-b}$Differences between letters in rows indicate significant differences (p<0.05).
^{NS}Not significant

Table 3. Mutagenicity of gamma-irradiated pork in the Ames test

Sample	Conc. (μg/plate)	TA98		TA100	
		S9 Mix (+)	S9 Mix (−)	S9 Mix (+)	S9 Mix (−)
Control	62.5	39±8	19±8	135±18	132±5
	125	24±1	19±3	125±16	122±13
	250	27±1	9±3	138±1	93±30
	500	26±7	13±4	141±6	34±2
	1,000	31±6	13±1	130±23	74±35
Irradiated Pork (10 kGy)	62.5	34±1	18±6	151±15	129±1
	125	30±6	26±1	128±7	106±17
	250	33±10	19±6	151±8	110±21
	500	37±0	23±8	129±22	147±18
	1,000	28±1	15±5	166±18	78±10
DMSO		32±4	63±75	201±70	100±59
2AA	2	756±24		1000±59	
SA	0.5		-		484±2
4NQO	0.5		122±15		-

Abbreriviations: 4-NQO, 4-Nitroquinoline-1-oxide; SA, Sodium azide; 2-AA, 2-Aminoanthracene.
Values represent mean±standard deviation (n=2).

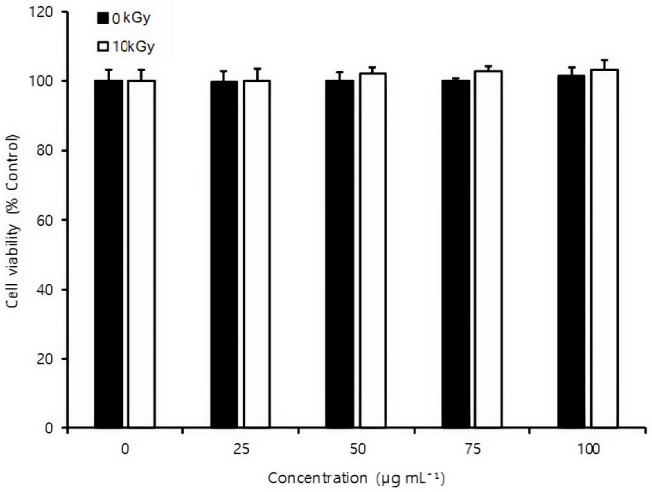

Fig. 1. Cytotoxicity of lipids from gamma-irradiated pork.

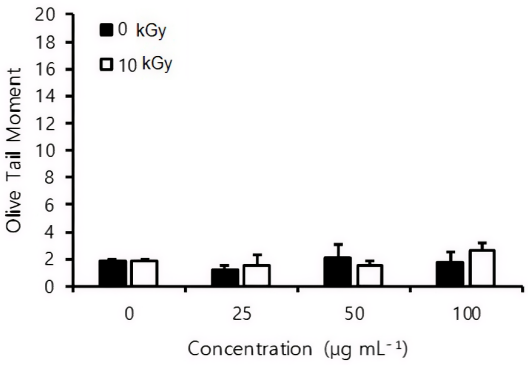

Fig. 2. DNA damage of lipids from gamma-irradiated pork.

작용하지 않음을 시사한다. 이미 방사선 조사 식품에 대한 유전독성 연구에서도 조사된 식품 성분이 Ames test에서 돌연변이 유발 활성을 나타내지 않는다는 보고가 다수 제시된 바 있다[27,28]. 따라서 본 연구 결과, 감마선 조사된 돈육은 조리 전과 후 모두 유전독성학으로 안전한 것으로 판단된다.

3.3. 감마선 조사 돈육 지방성분의 세포독성 분석

감마선을 조사한 돈육(10 kGy)의 지방 추출물이 세포 수준에서 독성을 나타내는지 확인하기 위하여 WST assay를 이용하여 인간 대장암세포주 HT-29 세포의 생존율을 측정하였다(Fig. 1). 실험 결과 감마선을 조사하지 않은 돈육의 지방 추출물과 감마선 조사된 돈육의 지방 추출물을 각각 처리한 경우 모두 세포 생존율의 유의적인 감소는 관찰되지 않았다. 또한 본 실험에서 적용된 최대 처리 농도인 100 μg mL^{-1}까지 처리하였을 때에도 세포 생존율은 대조군과 유사한 수준을 유지하였다. 일반적으로 지질 산화에 의해 생성되는 일부 산화 생성물은 세포 독성을 유발할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 특히 지방산 산화 과정에서 생성되는 알데하이드 화합물은 세포 기능에 영향을 미칠 수 있는 것으로 보고되고 있다[16]. 그러나 본 연구에서는 감마선 조사된 돈육 지방 추출물이 세포 생존율에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 방사선 조사에 의해 생성될 수 있는 지질 산화 생성물의 수준이 세포 독성을 유발할 정도로 높지 않았음을 의미할 가능성이 있으며, 기존 연구에서도 조사처리 육류가 세포 독성을 나타내지 않는 경향이 보고된 바 있다[29]. 본 연구에 사용한 최고 농도인 100 μg mL^{-1}은 일반적인 사람의 소장 내 유체량을 약 500 mL로 가정할 경우, 50 mg의 지방 추출물을 섭취한 수준이므로 실제 경구 섭취 시 노출이 가능한 농도 범위이다. 따라서 본 연구 조건에서 감마선 조사된 돈육의 지방 성분은 세포 수준에서 독성을 나타내지 않는 것으로 판단된다.

3.4. 감마선 조사 돈육 지방성분의 DNA 손상 결과

감마선 조사 돈육의 지방 추출물이 세포 수준에서 DNA 손상을 유발하는지 확인하기 위하여 comet assay를 수행하였다(Fig. 2). 실험 결과 감마선 비조사 돈육 및 감마선 조사 돈육(10 kGy)의 지방 추출물을 각각 처리한 경우 모두 100 μg mL^{-1} 농도까지 처리하였을 때 유의적인 DNA 손상 증가가 관찰되지 않았다. 본 연구에서는 감마선 조사 돈육 지방 추출물이 DNA 손상을 유발하지 않는 것으로 나타났으며, 이는 세포독성 실험 결과와도 일관된 경향을 보였다. 따라서 이상의 결과를 종합적으로 고려할 때 본 연구에서 적용된 실험 조건에서 감마선 조사된 돈육의 지방 성분은 조리 전과 후 모두 세포 수준에서 DNA 손상이나 유전독성을 유발하지 않는 것으로 판단되며, 독성학적 측면에서 안전한 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 감마선 조사에 따른 돈육의 지방산 조성 변화와 돈육으로부터 추출된 지방 성분의 생물학적 안전성을 평가하였다. GC/MS를 이용한 지방산 분석 결과, raw 및 cooked 돈육 모두에서 oleic acid, palmitic acid, linoleic acid가 주요 지방산으로 확인되었다. 본 연구에서는 raw 및 cooked 돈육 모두에서 감마선 조사에 따라 일부 지방산에서 통계적으로 유의적인 변화가 관찰되었으나, 그 증감 폭은 매우 미미한 수준으로 전체적인 지방산 조성의 경향성이나 영양학적 가치에 큰 영향을 미치지는 않는 것으로 판단된다. 감마선 조사된 돈육의 생물학적 안전성을 평가하기 위하여 Ames test, WST assay 및 comet assay를 수행하였다. Ames test 결과, 감마선 조사된 돈육 시료 처리군에서 복귀돌연변이 집락 수의 유의적인 증가가 관찰되지 않아 돌연변이 유발 가능성이 확인되지 않았다. 또한 HT-29 세포를 이용한 WST assay에서는 감마선 조사된 돈육 지방 추출물을 최대 100 μg mL^{-1} 농도까지 처리하였을 때에도 세포 생존율의 유의적인 감소가 나타나지 않았다. Comet assay 결과에서도 감마선 조사 돈육

지방 추출물에 의해 DNA 손상이 증가하지 않는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구 결과는 감마선 조사(최대 10 kGy) 조건에서 돈육의 지방산 조성에 큰 변화가 유도되지 않으며, 조사된 돈육으로부터 추출된 지방 성분이 세포 수준에서 유전독성이나 세포독성을 유발하지 않는다는 것을 시사한다. 이러한 결과는 감마선 조사 돈육의 지방 성분이 독성학적 측면에서 안전함을 뒷받침하는 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국원자력연구원의 주요사업(523320-26)에 의해 수행되었으며, 그 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Diehl JF. 1995. *Safety of irradiated foods*. 2nd ed. Marcel Dekker Inc., New York, USA.
2. Farkas J. 2006. Irradiation for better foods. *Trends in Food Science & Technology*. **17**(4):148-152.
3. Kim YJ, Cha JY, Kim TK, Lee JH, Jung S and Choi YS. 2024. The effect of irradiation on meat products. *Food Science of Animal Resources*. **44**(4):779-789.
4. Kim YH, Nam KC and Ahn DU. 2002. Volatile profiles, lipid oxidation and sensory characteristics of irradiated meat. *Meat Science*. **62**(1):123-131.
5. World Health Organization. 1999. FAO/IAEA/WHO international conference on ensuring the safety and quality of food through radiation processing: Book of extended synopses. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
6. Brewer MS. 2009. Irradiation effects on meat flavor: A review. *Meat Science*. **81**(1):1-14.
7. Zanardi E, Battaglia A, Ghidini S, Conter M, Badiani A and Ianieri A. 2009. Lipid oxidation of irradiated pork products. *LWT-Food Science and Technology*. **42**(7):1301-1307.
8. Yang J, Pan M, Han R, Yang X, Liu X and Yuan S. 2024. Food irradiation: An emerging processing technology to improve the quality and safety of foods. *Food Reviews International*. **40**(8):2321-2343.
9. Ayala A, Mu z MF and Arg lles S. 2014. Lipid peroxidation: Production, metabolism and signaling mechanisms of malondialdehyde and 4-hydroxy-2-nonenal. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. **2014**:360438.
10. Gu aud F, Atalay M, Bresgen N, Cipak A, Eckl PM, Huc L, Jouanin I, Siems W and Uchida K. 2010. Chemistry and biochemistry of lipid peroxidation products. *Free Radical Research*. **44**(10):1098-1124.
11. Shahidi F and Zhong Y. 2010. Lipid oxidation and improving the oxidative stability. *Chemical Society Reviews*. **39**(11):4067-4079.
12. 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 Science*. **128**:68-76.
13. Wood JD, Enser M, Fisher AV, Nute GR, Sheard PR, Richardson RI, Hughes SI and Whittington FM. 2008. Fat deposition, fatty acid composition and meat quality: A review. *Meat Science*. **78**(4):343-358.
14. Ahn DU, Olson DG, Jo C, Love J and Jin SK. 1999. Volatiles production and lipid oxidation in irradiated cooked sausage as related to packaging and storage. *Journal of Food Science*. **64**(2):226-229.
15. Nam KC and Ahn DU. 2003. Effects of ascorbic acid and antioxidants on the lipid oxidation and volatiles of irradiated beef. *Journal of Food Science*. **68**(5):1680-1685.
16. Esterbauer H. 1993. Cytotoxicity and genotoxicity of lipid-oxidation products. *The American Journal of Clinical Nutrition*. **57**(5):779S-786S.
17. Oliveira NDM S, Resende MR, Morales DA, Umbuzeiro G de Rag and Boriollo MFG. 2016. In vitro mutagenicity assay (Ames test) and phytochemical characterization of seeds oil of Helianthus annuus Linn (sunflower). *Toxicology Reports*. **3**:733-739.
18. Dom guez R, G ez M, Fonseca S and Lorenzo JM. 2014. Effect of different cooking methods on lipid oxidation and formation of volatile compounds in foal meat. *Meat Science*. **97**(2):223-230.
19. Falowo AB, Fayemi PO and Muchenje V. 2014. Natural antioxidants against lipid-protein oxidative deterioration in meat and meat products: A review. *Food Research International*. **64**:171-181.
20. Folch J, Lees M and Sloane Stanley GH. 1957. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. *Journal of Biological Chemistry*. **226**:497-509.
21. Maron DM and Ames BN. 1983. Revised methods for the Salmonella mutagenicity test. *Mutation Research*. **113**:173-215.
22. Zhang W, Xiao S and Ahn DU. 2020. Protein oxidation: Basic principles and implications for meat quality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. **60**(3):1-17.
23. Dom guez R, Pateiro M, Gagaoua M, Barba FJ, Zhang W and Lorenzo JM. 2019. A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products. *Antioxidants*. **8**(10):429.
24. O'Bryan CA, Crandall PG, Ricke SC and Olson DG. 2008. Impact of irradiation on the safety and quality of poultry and meat products: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. **48**(5):442-457.
25. Jayathilakan K and Sultana K. 2018. Irradiation preservation of meat and meat products and its effect—a review. *Journal of Meat Science*. **13**(1):1-17.
26. Mortelmans K and Zeiger E. 2000. The Ames Salmonella/microsome mutagenicity assay. *Mutation Research*. **455**:29-60.
27. Roberts PB. 2014. Food irradiation is safe: Half a century of studies. *Radiation Physics and Chemistry*. **105**:78-82.
28. Sommers CH and Fan X. 2013. *Food irradiation research and technology*. 2nd ed. Wiley-Blackwell, Ames, USA.
29. Indiarto R, Irawan AN and Subroto E. 2023. Meat irradiation: A comprehensive review of its impact on food quality and safety. *Foods*. **12**(9):1845.