Journal of Radiation Industry 13(2) : 119~126(2019)

감마선과 전자선 조사처리된 들깨와 대두의 신속 판별을 위한 유전자 코메트 분석

박종흠[1] · 김재경[1] · 박하영[1] · 이윤종[1] · 김재호[1] · 연영흠[1] · 송범석[1,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소

Comet Assay for Rapid Identification of Irradiated Perilla Seeds and Soybeans with Gamma Rays and Electron-beams

Jong-Heum Park[1], Jae-Kyung Kim[1], Ha-Young Park[1], Yunjong Lee[1], Jae-Ho Kim[1], Yeong-Heum Yeon[1] and Beom-Seok Song[1,*]

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

Abstract - This study was carried out to investigate the applicability of comet assay, which is approved as a formal detection method only for the identification of irradiated fresh meats in Korea, to identify irradiated perilla seeds and soybeans at doses at 0, 0.5, 1, 2, and 3 kGy with gamma rays or electron-beams (e-beams). The florescent images for comet assay were obtained by microscopic observation and olive tail moment (OTM) of nuclei in a samples was measured by using a comet analysis software. Irradiation with both gamma rays and e-beams increased the ratio of considerably damaged nuclei (OTM≥30) in both perilla seeds and soybeans as the absorbed dose increased. Moreover, the average OTM exhibited close correlations with the absorbed dose in both food models, regardless of radiation sources (R^2 of regression curves: 0.91~0.98). On the other hand, all samples irradiated at more than 1 kGy could be discriminated from non-irradiated one by visual inspection of typical comets of nuclei generated by irradiation using fluorescent microscope without the comet analysis software. Based on these results, it is considered that the comet assay can be used as a rapid identification method for irradiated perilla seeds and soybeans with gamma rays and e-beams, because the evaluation for irradiation using this method can be drawn within 3 hours.

Key words : Perilla seed, Soybean, Gamma ray, Electron-beams, Comet assay

서 론

최근 후쿠시마 원전사고로 인한 방사능 오염식품, 가짜 분유, 쓰레기 두부 및 가짜 계란 등과 같은 중국발 불량 식품 파동으로 인한 소비자의 공포로 국내에 유입되는 수입식품 및 원료에 대한 식품안전에 대한 국민들의 관심은 확대되고 있다. 이로 인해 수출국으로부터 국내 위해식품 차단을 위한 통관단계 검사기준 및 국민 건강에 위협을 가할 수 있는 수입식품에 대한 안전성이 확인될 때까지 보류할 수 있는 무검사 억류제 도입이 강화되고 있는 실정이다(MFDS 2016a).

한편, 국가 간 FTA 체결 확대로 인한 국제 식품교역량의 증가로 국내 유입되는 농축산 식품 및 원료는 점차적으로 높아져 2015년 기준 국내 전체 식품 대비 약 50%를 수입하

* Corresponding author: Beom-Seok Song, Tel. +82-63-570-3211, Fax. +82-63-570-3218, E-mail. sbs0110@kaeri.re.kr

고 있는 실정이다(MAFRA 2018). 특히, 국내 유입 농축산 식품 및 원료의 상당 부문은 중국 및 동남아에 의존하고 있으며, 이들 국가들은 전 세계 방사선 조사처리 식품 및 원료 시장의 약 70%를 차지하고 있어 해당 수입 품목이 국내에서 조사처리가 허용되지 않는 품목이거나 별도의 표시 없이 조사처리된 원료를 사용한 제품일 가능성은 점차 높아지고 있다(Kume and Todoriki 2013; Eustice 2017). 식품의약품안전처의 통계자료에 따르면, 국내에서 조사처리가 허가되지 않은 품목의 수입 및 조사처리 표시 기준 위반 적발을 통해 폐기 및 반송되는 사례들이 지속적으로 보고되고 있다(MFDS 2016b).

이러한 표시 위반 사례들은 소비자의 알권리를 위해 시행되는 식품 표시 제도를 위반한 것일 뿐 독성학적 위해성을 내포하는 것은 아니지만, 방사능 물질 오염식품 등과의 혼동과 더불어 조사처리 식품에 대한 소비자 수용도를 낮추는 데 일조하고 있다. 조사처리식품의 독성학적 안전성에 관해서는 국제원자력기구, 세계보건기구 및 국제식량기구들이 30여 년간의 독성학적 안전성 평가 연구 자료 검토를 통해 인체가 섭취하여도 전혀 문제시 되지 않음을 각국에 지속적으로 공표한 바 있다(WHO 1981; WHO 1994; WHO 1999). 식품의약품안전처는 2010년 이후 수입식품으로부터 국내 조사처리식품 관리의 투명성 확립, 소비자들에게 이들 식품의 정확한 정보 제공을 통한 식품안전 신뢰도 향상 및 조사처리식품 섭취에 대한 자유로운 선택권 제공을 위해 식품의 조사처리 유무를 판별할 수 있는 검지법 5종(광자극발광법, photostimulated luminescence; 열발광법, thermoluminescence; 전자스핀공명법, electron spin resonance; 기체크로마토그래프/질량분석법, gas chromatography/mass spectrometry; 유전자 코메트 분석법, comet assay)을 제도적으로 시행하고 있다(MFDS 2018).

들깨와 대두의 경우 미국과 중국 등으로부터 수입량이 많으며(APQA 2019), 특히 대두의 경우 국내 식품의 기준 및 규격에서 살충, 살균을 위하여 5 kGy 이하의 감마선과 전자선 조사처리가 가능하고 조사처리 여부 판별을 위하여 열발광법을 이용하도록 고시되어 있다. 이들 품목들에 대한 검지법 적용 연구들은 광자극발광법과 열발광법을 이용하여 0.5 kGy 이상의 선량으로 조사처리한 시료의 확인이 가능하였으며 전자스핀공명법은 들깨에는 적용이 불가능하고 대두에만 적용이 가능한 것으로 보고한 바 있다(Chung *et al*. 2002; Han *et al*. 2012; Kim *et al*. 2012). 그러나 광자극발광법의 경우 공인된 검지법 중 가장 신속하나 대상 시료 내 광물질 함유정도에 따라 정확도가 낮고 열발광법은 정확도가 높으나 광물질을 추출하고 정제하는 복잡한 전처리로 인해 2일 이상의 긴 분석시간이 소요되는 단점을 지니고 있으며, 기체크로마토그래프/질량분석법을 적용한 연구는 보고된 바 없으나 열발광법과 같이 지방질 추출과 정제에 긴 분석시간이 소요되는 분석법으로써 실제적인 적용에 한계를 나타내고 있어 새로운 신속 검지법의 개발이 필요한 실정이다(Jeong *et al*. 2001). 한편, 유전자 코메트 분석법은 현재까지 신선육에 한해서만 사용이 가능한 검지법으로 식약처 시험법에 고시되어 있다(KAERI 2018).

이에 본 연구에서는 국내에서 신선육에 대해서만 공인되어 있는 유전자 코메트 분석법을 감마선과 전자선으로 조사처리된 들깨와 대두의 조사처리 여부 판별을 위한 신속 검지법으로써 활용이 가능한지에 대하여 살펴보고자 하였다.

재료 및 방법

1. 시료 준비

본 연구에서 사용된 들깨(*Perilla frutescens* var. *Japonica* Hara)와 대두(*Glycine max*.)는 정읍 시내 마트에서 국내산임을 확인하고 구입하였으며, 각각의 시료는 50 ml 코니칼 튜브에 각각 담아 방사선 조사하기 전까지 냉장실에서 보관하였다.

2. 방사선 조사

시료에 대한 방사선 조사는 한국원자력연구원 첨단방사선연구소 내 ^{60}Co 감마선 조사장치(선원 11.1 PBq capacity, point source AECL, IR-79; MDS Nordion International Co. Ltd, Ottawa, Canada)과 전자선가속기(model UELV-10-10S, 10 MeV, 10 kW, 0.2 mA; Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus, Moscow, Russia)를 이용하여 각각 0.5, 1, 2, 3 kGy의 흡수선량을 목표선량으로 설정하여 조사처리하였다. 이들 시료에 대한 흡수선량은 방사선 투과방향으로 코니칼 튜브의 앞면과 뒷면에 붙인 알라닌 선량계(5 mm; Bruker Instrument, Rheinstetten, Germany)를 ESR spectrometer(EMS 104 EPR analyzer, Bruker, Rheinstetten, Germany)로 측정하였으며 시료별 측정된 흡수선량은 목표선량의 5% 이내였다.

3. 슬라이드 글라스 전처리

얇은 아가로스 층이 형성된 슬라이드 글라스를 제조하기 위하여, 한쪽 면이 서리가 낀 슬라이드 글라스(Fisher Scientific Co., Pittsburgh, USA)의 표면을 0.5% 일반 아가로스(겔화 온도 41°C; Sigma-aldrich Co., St. Louis, USA) 용액 35 µl로 코팅하고 알코올램프로 완전히 건조시켰다. 이어 아가로스로 코팅된 슬라이드 글라스 표면 위에 같은 아가로스 용액 100 µl를 분주하고 커버 글라스(24 × 50 mm; Paul Marienfeld GmbH & Co., Lauda-Königshofen, Germany)로 덮은 후 얼음이 담긴 철제 박스 위에 놓아 5분간 굳혔다.

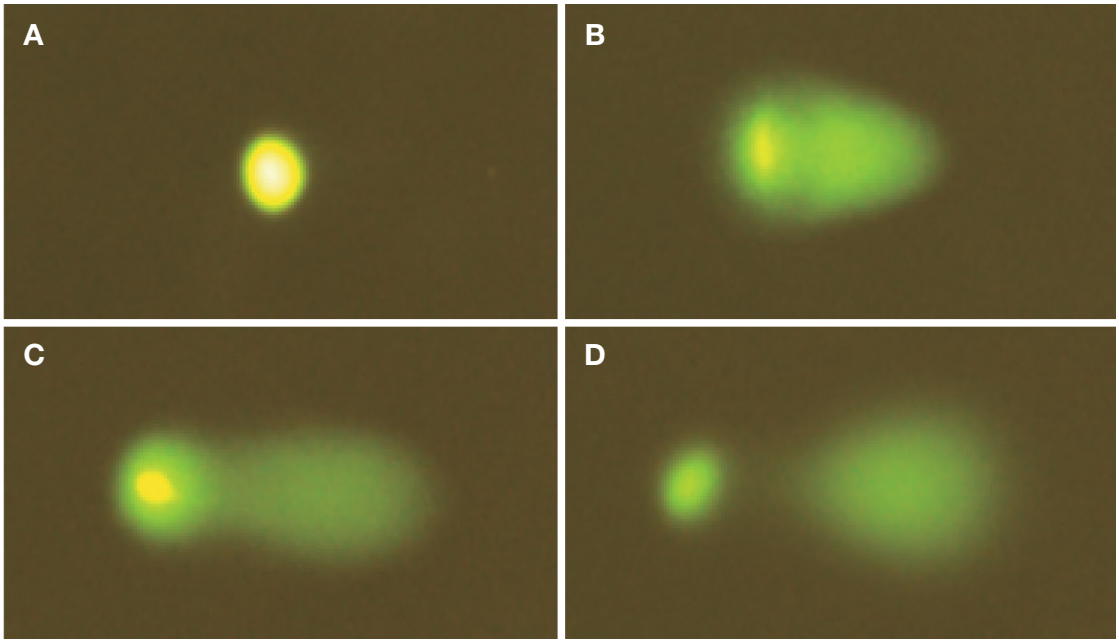

Fig. 1. Classification of DNA damage in nuclei according to the olive tail moment (OTM). A, not damaged (OTM < 5); B, moderately damaged (5 ≤ OTM < 30); C, considerably damaged (30 ≤ OTM < 70); D, severly damaged (70 ≤ OTM).

4. 시료로부터 DNA 핵 추출

들깨 및 대두로부터 DNA 핵의 분리는 Chung *et al*. (2002)의 방법을 보완하여 이용하였다. 즉, 들깨는 막사사발에서 막자로 살짝 눌러 깼으며, 대두는 DNA 핵 추출을 용이하도록 주방용 칼로 작게 자르고, 각각 0.8 g씩 취하여 차가운 phosphate buffered saline (PBS) 용액 6 ml와 같이 비이커에서 30초간 stirring plate를 이용하여 약 200 rpm의 속도로 교반한 후 상층액은 버리고 적당량의 증류수로 신속하게 세척을 2번 실시하였다. 다시 여기에 차가운 PBS 용액 6 ml를 넣고 5분간 교반하였으며, 교반이 끝난 DNA 핵 추출액은 나일론 여과포 (pore size 125 μm)에 걸러 15 ml 코니칼 튜브에 담아 아이스 상에서 보관하였다.

5. 시료 DNA 핵 추출물의 agarose 혼입

시료로부터 추출된 DNA 핵 추출액 50 μl는 1.1% 저융점 아가로스(겔화 온도 36°C; Sigma-aldrich Co., St. Louis, USA) 용액 100 μl와 섞은 후, 이 중 100 μl를 커버 글라스가 벗겨진 일반 아가로스 층이 있는 슬라이드 글라스 위로 옮긴 후, 커버 글라스로 덮고 얼음이 담긴 철제 박스에 놓아 굳혔다.

6. DNA 핵막 제거 및 유전자 코메트 전기영동

DNA 핵을 둘러싸고 있는 핵막을 제거하기 위하여, 해당 슬라이스 글라스는 차가운 중성 세포용해 완충용액 (0.2% SDS, 40 mM Tris-acetate, 1 mM EDTA, pH 8.0)에 30분간 침지시켰다. 침지가 끝난 슬라이드 글라스는 중성 전기영동 완충용액 (45 mM Tris-borate, 1 mM EDTA, pH 8.4)이 담긴 전기영동 트레이에서 5분간 담가 놓았으며, 이어 2분간 2 V·cm^{-1}로 전기영동을 실시하였다. 전기영동이 끝난 슬라이드 글라스는 증류수에 5분간 3번 담가 충분히 세척하였다.

7. 슬라이드 염색 및 이미지 분석

세척된 슬라이드 글라스는 여분의 물기를 완전히 제거한 후, 1,000배로 희석된 GelGreen 형광염색 용액 (Biotium Inc., Fremont, USA) 100 μl를 세 네 방울로 떨어뜨리고 커버 글라스로 다시 덮어 DNA 핵이 혼입된 아가로스 층에 골고루 퍼지게 하였다. 이 후 blue excitation filter가 장착된 형광 현미경 (Model U-LH100HG; Olympus Corporation, Tokyo, Japan) 하에서 ×100의 배율로 관찰하였다. 확보된 이미지들로부터 각각의 DNA 핵에 대한 이미지 분석은 시료 당 최소 100개 이상의 DNA 핵을 casplab_1.2.3b2 프리 소프트웨어 (Końca *et al*. 2003)를 이용하여 분석하였으며, 측정된 각각의 DNA 핵에 대한 손상정도는 해당 프로그램 상에서 각각의 DNA 핵 분석시마다 자동적으로 계산되어 나오는 Olive Tail Moment (OTM)를 평가지수로 사용하였다. DNA 핵의 손상 결과는 OTM값에 따라 없음 (OTM < 5), 약간 손상 (5 ≤ OTM < 30), 상당한 손상 (30 ≤ OTM < 70) 및 심한 손상 (70 ≤ OTM) 등 4개 그룹 (Fig. 1)으로 나누었으며 해당 그룹에 속하는 DNA 핵의 수를 측정된 총 DNA 핵의 수로 나누어 %로 나타내었다.

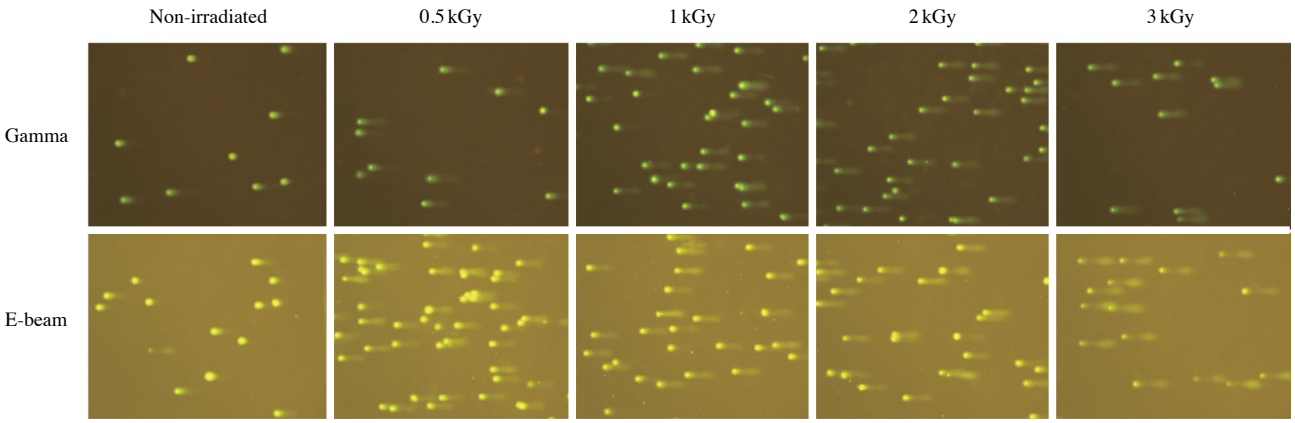

Fig. 2. Typical fluorescent images of DNA nuclei extracted from perilla seeds irradiated with gamma-rays and e-beams at different doses.

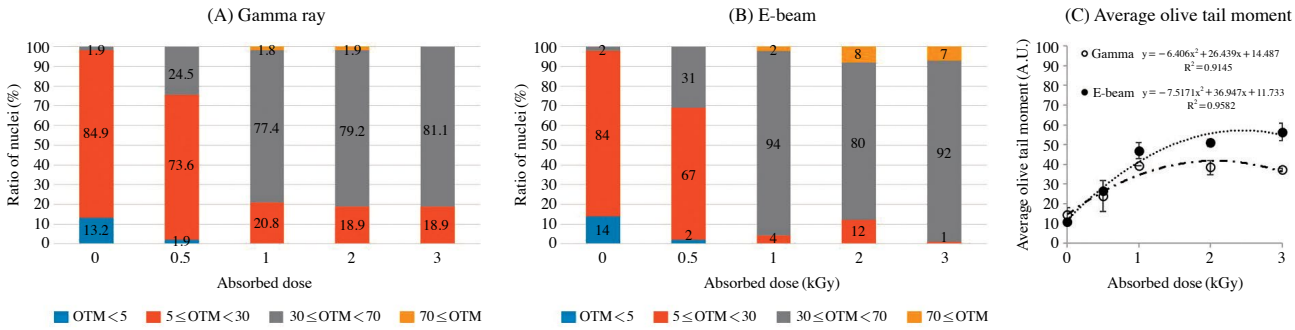

Fig. 3. The changes of DNA damage in nuclei extracted from perilla seeds irradiated with gamma-rays and e-beams at different doses.

결과 및 고찰

1. 감마선과 전자선 조사처리된 들깨 유전자 핵의 손상 변화

감마선과 전자선을 이용하여 다양한 흡수선량으로 조사처리된 들깨로부터 추출한 유전자핵의 형광 현미경 이미지와 유전자 핵 손상 정도를 Fig. 2와 3에 나타내었다. 감마선 1 kGy 이상의 흡수선량으로 조사처리된 시료들에서는 육안검사를 통해 방사선 조사처리에 의해 발생하는 꼬리가 긴 전형적인 코메트(혜성)를 확인할 수 있었으나 0.5 kGy 시료는 육안으로 비조사구와의 차이 식별이 불가능하였다. 비조사 시료의 형광 현미경 이미지에서는 대부분의 유전자 핵들이 손상이 없었으나 일부 약한 손상이 있는 핵들이 관찰되었으며, 경우에 따라서는 상당한 손상 또는 심한 손상이 있는 유전자 핵들도 관찰할 수 있었다. 이러한 비조사구에서 나타나는 약한 손상은 들깨와 대두 종자가 일반적으로 수확 후 햇빛에 직접 노출시켜 건조시키고 장기 저장하는 과정 중에서 햇빛의 노출과 이에 따른 온도 상승 등이 세포 내 핵산효소와 라이소좀 유래 여러 가수분해 효소의 활성 증가로 인한 대사변화에 따라 유전자 핵의 손상이 축적되어 나타난 것으로 추정된다(Cheah and Osborne 1978; Cooper 1997; Koppen and Cerda 1997). 아울러, 일반적으로 조사되지 않은 시료로부터 확인되는 대부분의 유전자 핵들의 경우 앞서 언급한 것처럼 다양한 정도의 손상을 나타낸다는 관찰이 이미 여러 연구자들에 의해 보고되고 있기 때문에(Khan *et al*. 2002; Martin-Huachaca *et al*. 2002; Delinceé *et al*. 2003; Villavicencio *et al*. 2004; Jo and Kwon 2006; Horak *et al*. 2009; Jo *et al*. 2017), 유전자 핵들 사이에서 관찰되는 이러한 이질적인 DNA 손상 패턴은 시료가 방사선 조사가 되지 않았음을 판정하는 데 있어서 하나의 특성으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 반면, 유전자 핵 내에 유전자 파편들이 있는 경우, 이 파편들은 전기영동 시에 (+)극으로 이끌리게 되는데, 그 파편의 크기 및 양에 따라 1) 유전자 핵의 감소, 2) 꼬리의 크기 및 농도 증가, 3) 유전자 핵으로부터 이동거리가 증가하게 되며(Mckelvey-Martin *et al*. 1993), 그 정도는 조사선량의 증가와 밀접한 관련이 있는 것으로 제시되고 있다(Khawar *et al*. 2011). 본 실험에서도 감마선과 전자선으로 각각 조사처리된 들깨에서 동일한 현상이 관찰되었으며, 조사선량이 증가할수록 각각의 유전자 핵들은 점차 전형적인 코

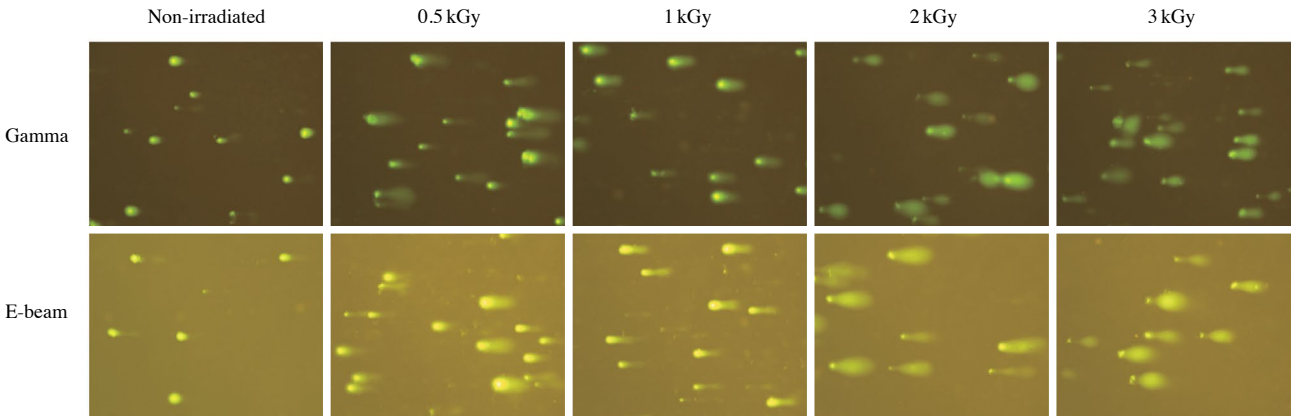

Fig. 4. Typical fluorescent images of DNA nuclei extracted from soybeans irradiated with gamma-rays and e-beams at different doses.

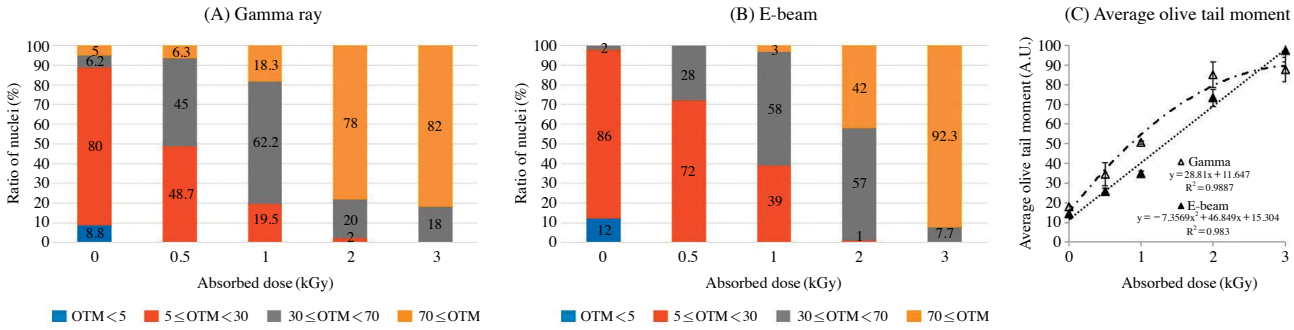

Fig. 5. The changes of DNA damage in nuclei extracted from soybeans irradiated with gamma-rays and e-beams at different doses.

메트의 형태를 띠고 있었다. 특히, 앞서 언급한 비조사처리 시료의 유전자 핵들이 가지는 이질적인 DNA 손상 패턴과는 달리 본 실험에서 관찰된 방사선 조사처리된 들깨 씨앗의 보다 균일한 혜성 형태의 유전자 손상 패턴은 이들 시료들이 감마선 및 전자선에 조사가 되었음을 쉽게 판별이 가능하게 하였다.

육안검사의 확인 자료로써 OTM 측정을 통한 핵의 유전자 손상 정도를 그룹화 할 경우 조사선원에 상관없이 흡수선량이 증가함에 따라 손상이 없거나 약한 손상(OTM＜30)을 입은 핵의 비율은 비례적으로 감소하였으며, 이와는 반대로 상당한 손상 또는 심한 손상(30≤OTM)을 나타내는 핵의 비율이 현저히 증가하였다. 특히, 감마선과 전자선 모두 1 kGy 이상의 흡수선량으로 조사처리한 시료들에서 상당한 손상을 나타내는 30≤OTM＜70 범위의 유전자 핵들의 비율이 77~94%를 차지하였으며, OTM이 70 이상으로 심한 손상을 입은 핵들이 관찰되므로 비조사구와의 확연한 차이를 나타내었다. 또한, 평균 OTM값은 감마선과 전자선의 흡수선량에 대하여 각각 0.91과 0.95의 높은 상관관계 계수를 나타내었지만 1차 선형 회귀선 보다는 2차 회귀곡선을 나타내어 흡수선량을 예측을 위한 자료로는 활용이 불가능할 것으로 판단되었다.

2. 감마선과 전자선 조사처리된 대두 유전자 핵의 손상 변화

감마선과 전자선을 이용하여 다양한 흡수선량으로 조사처리된 대두로부터 추출한 유전자 핵의 형광 현미경 이미지와 유전자 핵 손상 정도를 Fig. 4와 5에 나타내었다. 대두의 경우는 들깨와는 달리 조사선원과는 상관없이 0.5 kGy 이상의 흡수선량으로 조사처리된 모든 시료들에서 육안 검사를 통해 방사선 조사처리에 의해 발생하는 꼬리가 긴 전형적인 코메트를 확인할 수 있어 비조사구와의 차이 식별이 가능하였다. 유전자 핵 손상 정도는 들깨와 유사하게 상당한 손상 또는 심한 손상(30≤OTM)을 나타내는 핵의 비율이 현저히 증가하였으나 동일한 흡수선량에서의 대두의 평균 OTM이 들깨보다 높은 값을 나타내었으며, 전자선의 경우 비례적인 1차 선형 회귀선(R^2: 0.98)을 나타내어 흡수선량을 예측하는 자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 한편, 시료로부터 추출한 유전자 핵을 소프트웨어를 이용해 분석하는 것은 이들 시료의 방사선 조사여부를 판별하는 데 유용할 수 있지만, 반대로 상당한 시간이 소요되어 실제 현장에서 많은 시료의 조사여부를 한 번에 결정하는 데 있어 한계점으로 작용할 수 있다. 따라서 한 번에 가능한 많은 시료를 신속하게 검사

하기 위해서는 직접 시료로부터 추출된 유전자 핵의 형태를 육안 검사 후 판정하는 것이 분석시간 절약의 측면에서 매우 효과적일 수 있다.

식품의 방사선 조사유무 판별을 위한 시험법들은 크게 DEFT/APC법 (direct epifluorescent filter technique/aerobic plate count), LAL/GNB법 (*Limulus* amoebocyte lysate/gram negative bacteria), 유전자 코메트 분석법과 같은 생물학적인 방법과, 기체크로마토그래프/질량분석법과 같은 화학적인 방법, 그리고 전자스핀공명법, 광자극발광법, 열발광법과 같은 물리적인 방법으로 나누어진다. 이들 방법 중 DEFT/APC법과 LAL/GNB법은 식품 내 존재하는 세균 수, 유전자 코메트 분석법은 방사선 조사에 의해 DNA에 일어난 손상(DNA 파편), 그리고 기체크로마토그래프/질량분석법은 지질로부터 유래된 hydrocarbon을 측정하며, 전자스핀공명법은 방사선 조사에 의해 포집된 자유라디칼의 유무를, 광자극발광법과 열발광법은 방사선 조사에 의해 식품 내 혼입되어 있는 광물질(석영, 작성 등)에 포집된 에너지가 적외선 노출 또는 열에 의해 발광되는 현상을 이용해 분석하게 된다. 또한 이들 시험법 각각은 식품의 물리·화학적 특성 차이에 따라 적용할 수 있는 식품 품목들이 달라진다(European standard 1997; European standard 2000; European standard 2002a; European standard 2002b; European standard 2002c; European standard 2002d; European standard 2003a; European standard 2003b; European standard 2005; European standard 2009). 예를 들면, 광자극발광법, 열발광법 및 전자스핀공명법은 뼈나 광물질이 함유된 식품에, 기체크로마토그래프/질량분석법은 지질을 함유한 식품에 적용이 가능하며, 나머지 DEFT/APC법, LAL/GNB법 및 유전자 코메트 분석법은 대부분의 식품에 적용가능하다. 특히 무엇보다도 중요한 점은 적용하고자 하는 시험법의 분석시간으로 DEFT/APC법 및 LAL/GNB법은 대상 미생물의 증식 확인에 하루 이상의 시간이 소요되며, 기체크로마토그래프/질량분석법은 대상 분석 화합물인 hydrocarbon의 추출 및 정제에 하루 이상의 전처리 과정이 수반된다. 열발광법 및 전자스핀공명법의 경우에도 대상 광물질의 추출과 시료의 동결건조에 각각 하루 정도의 시간이 요구된다. 이와 달리 광자극발광법과 유전자 코메트 분석법은 복잡한 전처리 과정이 필요 없어 단시간 내에 신속 분석이 가능하며, 이 중 유전자 코메트 분석법은 적용될 수 있는 식품 품목이 광물질을 함유한 식품에만 적용되는 광자극발광법보다 훨씬 다양하여 그 활용성이 높다.

본 실험에서 적용된 유전자 코메트 분석법은 감마선과 전자선으로 1 kGy 이상의 흡수선량으로 조사처리된 들깨와 대두가 방사선 조사처리 되었음을 형광 현미경을 통한 육안검사로 비조사구와 확연히 구분할 수 있었다. 게다가 시료 준비부터 현광 현미경 관찰에 이르기까지 걸린 총 시간은 최대 3시간으로(시료 수＝10개), 시료의 방사선 조사유무 판정에 걸리는 시간적인 측면에서 공인된 시험법 중 광자극발광법을 제외한 다른 6가지 시험법보다 훨씬 빨라 식품의 방사선 조사처리 유무 판별을 위한 신속 시험법으로써 그 가치는 매우 높은 것으로 사료되었다.

결 론

본 연구는 국내 식품공전에서 신선육에 대해서만 조사처리 여부 판별을 위한 검지법으로 활용되고 있는 유전자 코메트 분석법이 전자선 또는 감마선으로 조사처리(0.5, 1, 2, 3 kGy)된 들깨와 대두의 조사처리 여부 판별을 위한 신속 검지법으로써 활용이 가능한지를 살펴보고자 수행되었다. 각 시료로부터 추출된 유전자 핵은 형광 현미경을 이용하여 코메트 이미지를 얻었고 코메트 분석 소프트웨어를 이용하여 각 유전자핵의 olive tail moment (OTM)를 측정하였다. 감마선과 전자선 조사는 두 품목 모두에 있어 상당한 손상 정도를 나타내는 OTM 값이 30 이상인 핵의 발생 비율을 증가시켰다. 또한, 평균 OTM 값은 적용된 방사선 선종에 관계없이 모두 흡수선량에 밀접한 연관성을 나타내었다(회귀곡선의 R^2 값: 0.91~098). 한편, 1 kGy 이상의 흡수선량으로 조사처리된 두 품목 모두 코메트 분석 소프트웨어 사용 없이 형광 현미경을 이용한 육안검사 만으로 전형적으로 조사처리에 의해 발생되는 균일한 코메트 이미지 확인을 통해 비조사 시료와의 판별이 가능하였다. 육안검사의 경우 3시간 이내의 분석시간을 통해 조사처리 여부 판별이 가능하므로 유전자 코메트 분석법은 감마선과 전자선으로 조사처리된 들깨와 대두의 신속 검지법으로써 활용이 가능할 것으로 사료되었다. 본 연구 결과를 토대로 다양한 기관들과의 실험실간 검증 실험을 수행할 예정이며, 이를 통해 최종적으로 식약처 시험법 개정 신청을 계획하고 있다.

사 사

본 연구는 과학기술정통부의 재원으로 한국원자력연구원의 주요사업(523240-19)에 의해 수행되었으며, 그 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

APQA. 2019. 검역통계. 식물검역온라인민원시스템. 농림축산검역본부.

MAFRA. 2018. 2018~2022 농업·농촌 식품산업 발전계획. 농림수산식품부.

MFDS. 2016a. 수입식품등 검사연보. 제18호. 식품의약품

안전처.
MFDS. 2016b. 수입식품 안전관리 특별법. 법률 제13201호. 국가법령정보센터.
MFDS. 2018. 식품공전. 식품의약품안전처.
Cheah KSE and Osborne DJ. 1978. DNA lesions occur with loss of viability in embryos of ageing rye seed. *Nature* **272**:593-599.
Chung HW, Delinceé H, Han SB, Hong JH, Kim HY and Kwon JH. 2002. Characteristics of DNA comet, photostimulated luminescence, thermoluminescence and hydrocarbon in perilla seeds exposed to electron beam. *J. Food Sci*. **67**:2517-2522.
Cooper GM. 1997. Lysosome. pp. 379-381. *In*: The Cell (Cooper GM ed.), ASM Press, Washington, D.C.
Delinceé H, Khan AA and Cerda H. 2003. Some limitations of the comet assay to detect treatment of seed with ionising radiation. *Eur. Food Res. Technol*. **216**:343-346.
European standards. 1997. Foodstuffs-detection of irradiated food containing bone-method by ESR spectrometry (EN 1786). European standard store, Pilsen, Czech Republic.
European standards. 2000. Foodstuffs-detection of irradiated food containing cellulose by ESR spectrometry (EN1787). European standard store, Pilsen, Czech Republic.
European standards. 2002a. Thermoluminescence detection of irradiated food from which silicate minerals can be isolated (EN1788). European standard store, Pilsen, Czech Republic.
European standards. 2002b. Foodstuffs-detection of irradiated food containing crystalline sugar by ESR spectrometry (EN 13708). European standard store, Pilsen, Czech Republic.
European standards. 2002c. Foodstuffs-detection of irradiated food using direct epifluorescent filter technique/aerobic plate count (DEFT/APC)-screening method (EN13783). European standard store, Pilsen, Czech Republic.
European standards. 2002d. Foodstuffs-DNA comet assay for the detection of irradiated foodstuffs-screening method (EN 13784). European standard store, Pilsen, Czech Republic.
European standards. 2003a. Foodstuffs-detection of irradiated food containing fat-Gas chromatographic analysis of hydrocarbons (EN1784). European standard store, Pilsen, Czech Republic.
European standards. 2003b. Foodstuffs-detection of irradiated food containing fat-gas chromatographic/mass spectrometric analysis of 2-alkylcyclobutanone (EN1874). European standard store, Pilsen, Czech Republic.
European standards. 2005. Foodstuffs-microbiological screening for irradiated food using LAL/GNB procedure (EN14569). European standard store, Pilsen, Czech Republic.
European standards. 2009. Foodstuffs-detection of irradiated food using photostimulated luminescence (EN13751). European standard store, Pilsen, Czech Republic.
Eustice RF. 2017. Global status and commercial applications of food irradiation. pp. 397-424. *In*: Food Irradiation Technologies: Concepts, Applications and Outcomes (Ferreira ICFR, Antonio AL and Verde SC eds.), Royal Society of Chemistry, Cambridge, U.K.
Han IJ, Yoon YM, Choi SJ, Song BS, Kim JK, Park JH, Lee JW, Kim JH, Kim KH, Cho TY, Yoon HS, Han SB and Lee JE. 2012. Detection of gamma-irradiated imported foods (perilla seeds, almonds, and soybeans) by using PSL, TL, and ESR. *J. Radiat. Ind*. **6**:305-310.
Horak CI, Giorgio MS and Kairiyama E. 2009. Identification of irradiated apples for phytosanitary purpose. *Radiat. Phys. Chem*. **78**:707-709.
Jeong J, Lee EY and Kwon JH. 2001. The detection of irradiated agricultural commodities by origins with photostimulated luminescence (PSL) analysis. *Korean J. Postharvest Sci. Technol*. **8**:291-295.
Jo D and Kwon JH. 2006. Detection of radiation-induced markers from parts of irradiated kiwifruits. *Food Control* **17**:617-621.
Jo Y, Sanyal B, Ameer K and Kwon JH. 2017. Thermoluminescence analysis and DNA comet assay to identify grapes irradiated as a quarantine treatment. *Eur. Food Res. Technol*. **243**:1397-1403.
KAERI. 2018. Development of detection technology of radiolytic products from lipids and safety evaluation of those product. KAERI/RR-4354/2017. Korea Atomic Energy Research Institute.
Khan AA, Khan HM and Delinceé H. 2002. Identification of irradiated spices using the novel technique of DNA comet assay. *J. Food Sci*. **67**:493-496.
Khawar A, Bhatti A, Khan QM, Khan AI, Asi MR and Ali T. 2011. Evaluation of irradiation in foods using DNA comet assay. *J. Food Sci. Technol*. **48**:106-109.
Kim KH, Choi EJ, Chang HW, Shin CS, Kim MY, Hwang CR, Kim EJ, Jo TY, Park GS, Kang MH, Kim JI, Kim JS, Park SN, Seong RS, Jang YM, Yoon HS and Han SB. 2012. Studies on the applicationas of PSL, TL and ESR methods for the detection of irradiated foods not allowed to be irradiated in Korea. *J. Food Hyg. Safety*. **27**:233-246.
Końca K, Lankoff A, Banasik A, Lisowska H, Kuszewski T, Gózdz S, Koza Z and Wojcik A. 2003. A cross-platform public domain PC image-analysis program for the comet assay. *Mutate. Res*. **534**:15-20.
Koppen G and Cerda H. 1997. Identification of low-dose irradiated seeds using the neutral comet assay. *Lebensm. Wiss. u. Technol*. **30**:452-457.
Kume T and Todoriki S. 2013. Food irradiation in asia, the european union, and the united states: a status update. *Radioisotopes* **62**:291-299.
Martin-Huachaca NS, Lamy-Freund MT, Mancini-Filho J, Delinceé H and Villavicencio ALCH. 2002. Detection of irra-

diated fresh fruits treated by e-beam or gamma rays. *Radiat. Phys. Chem.* **63**:419-422.

Mckelvey-Martin Vj, Green MHL, Schmezer P, Pool-Zobel BL, De Méo MP and Coolins A. 1993. The single cell gel electrophoresis assay (comet assay): a european review. *Mutat. Res.* **288**:47-63.

Villavicencio ALCH, Araújo MM, Baldasso JG, Aquino S, Konietzny U and Greiner R. 2004. Irradiation influence on the detection of genetic-modified soybeans. *Radiat. Phys. Chem.* **71**:489-492.

WHO. 1981. Wholesomeness of irradiated food. Technical Report Series 659, World Heal Organization, Geneva.

WHO. 1994. Safety and nutritional adequacy of irradiated food. World Health Organization, Geneva.

WHO. 1999. High dose irradiation: wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy. Technical Report Series 659, World Heal Organization, Geneva.

Received: 23 May 2019
Revised: 11 June 2019
Revision accepted: 17 June 2019