Journal of Radiation Industry 14(2) : 127~134(2020)

다양한 이온화 방사선으로 저선량 조사처리된 딸기의 물리적 확인시험

윤영석[1,2] · 이기창[1,2] · 박종흠[1] · 은종방[2] · 송범석[1,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소, [2]전남대학교 식품공학과

Physical Identification of Low-dose Irradiated Strawberries with Various Ionizing Radiations

Yeong-Seok Yoon[1,2], Ki-Chang Lee[1,2], Jong-Heum Park[1], Jong-Bang Eun[2] and Beom-Seok Song[1,*]

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

[2]*Department of Food Science and Technology, Graduate School of Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea*

Abstract - This study evaluated the applicability of electron spin resonance (ESR), photo-stimulated luminescence (PSL), and thermoluminescence (TL) methods to identify strawberries irradiated at various doses (0.15, 0.4, 0.6, and 1 kGy) with gamma-rays, electron beams (e-beams), and X-rays, respectively. ESR analysis was found not to be a reliable indicator for irradiation identification because, for all of the irradiated strawberries, there was no specific signal of free radicals derived from cellulose by irradiation treatment within a 6 mT range. PSL analysis distinguished irradiated samples from non-irradiated ones. The minimum identification dose was observed to be 0.4 kGy for e-beams and 1 kGy for X-rays, whereas it was not possible to identify all gamma-irradiated samples. However, TL analysis provided clear verification of irradiation treatment for all irradiated samples at higher than 0.4 kGy, regardless of radiation types. Furthermore, after the storage at 15℃ for 9 days, the TL ratios (TL_1/TL_2) for the irradiated samples at $\geq$0.4 kGy were higher than 0.1, which is the standard value for judgement of irradiation treatment. These results indicate that TL analysis is the most suitable identification method for strawberries irradiated at $\leq$1 kGy with a phytosanitary purpose.

Key words : Strawberry, Radiation type, Electron spin resonance, Photo-stimulated luminescence, Thermoluminescence

서 론

딸기(*Fragaria*×*ananassa* Duch.)는 장미과에 속하는 다년생 초본식물로 밝은 적색, 신맛과 단맛의 조화로운 맛, 풍부한 영양소를 함유하고 있으며, 국제적으로 높은 경제적 가치를 지니고 있다(Ariza *et al*. 2018). 2016년 159억 달러에 이르는 딸기 시장 가치는 여전히 연간 5% 이상의 복합 성장률로 지속적으로 성장하고 있으며, 향후 딸기의 국제적

* Corresponding author: Beom-Seok Song, Tel. +82-63-570-3211, Fax. +82-63-570-3207, E-mail. sbs0110@kaeri.re.kr

무역거래량은 더욱 확대될 전망이다(Serapian and Prakash 2016; Yang *et al*. 2020). 그러나, 딸기는 해충 및 미생물 오염, 유통 과정 중 기계적 손상, 수확 후 급격한 신진대사 활성 증가로 인해 부패하기 쉬우며, 저장 기한이 7~10일로 제한되어 있다(Jang *et al*. 2011; Serapian and Prakash 2016).

최근 딸기의 해충 및 미생물 오염을 감소시키고 저장 기한을 증진시킬 수 있는 친환경적인 식물위생처리법으로서 이온화 방사선 처리의 유용성이 입증되었다(Serapian and Prakash 2016; Maraei and Elsawy 2017; Filho *et al*. 2018). 식물위생처리로 이용될 수 있는 방사선은 ^{60}Co 같은 동위원소에서 발생하는 감마선, 전자가속기에서 발생되거나 전환되는 전자선(10 MeV 이하) 및 X-선(7.5 MeV 이하)이 있으며, 이들은 이온화 에너지를 바탕으로 신선 농산물의 생장조절, 살충, 살균 등의 생물학적 효과를 달성할 수 있다(Song *et al*. 2016). 또한, 이온화 방사선은 처리 후 유해한 잔류물을 생성하지 않기 때문에 추가적인 잔류물 제거 공정이 필요하지 않다는 장점을 갖고 있다(Kong *et al*. 2014). 이에 따라, 국제원자력기구와 국제식물보호협약기구는 딸기를 포함한 신선 농산물에 대한 식물위생처리법으로 감마선, 전자선, X-선의 이온화 방사선 사용을 승인하고 있으며, 적정 처리 선량으로 저선량 조사(0.15 및 0.4 kGy)를 권고하고 있다(AHPIS 2006; Hallman 2011). 현재, 미국을 포함한 선진국에서는 딸기와 같은 신선 식품에 대하여 감마선, 전자선 및 X-선의 저선량(1 kGy 이하) 조사처리가 활발하게 이용되고 있다(FDA 2007).

한편 소비자들의 선택권을 보장하고 식품의 정확한 정보를 제공하기 위해 조사식품은 국제적 표시규정에 따라 명확하게 표기되어야 하지만 방사선 조사에 대한 소비자의 부정적인 인식을 회피하기 위해 표시규정을 위반한 사례가 계속해서 보고되고 있다(Hwang *et al*. 2007; 박 등 2019). 이러한 문제에 대응하기 위해 유럽표준화위원회에서는 조사된 식품을 판별할 수 있는 여러 가지의 확인시험법을 개발하고 제도적으로 시행하고 있다(Lee *et al*. 2020). 가장 일반적으로 사용되는 확인시험법으로는 전자스핀공명법(electron spin resonance, ESR), 광자극발광법(photo-stimulated luminescence, PSL), 열발광법(thermoluminescence, TL) 등의 물리적 방법과 탄화수소류(hydrocarbons)를 가스크로마토그래프/질량분석법(gas chromatography/mass spectrometry, GC/MS)으로 검출하는 화학적 방법, 그리고 유전자코메트분석법(DNA comet assay)을 이용하여 DNA 손상을 확인하는 생물학적 방법 등이 있다(Fan and Sommers 2013; 식품의약품안전처 2018). 이러한 조사처리식품 확인시험법들 중 물리적 방법은 전처리가 간단하고 다른 처리와 비교하여 신뢰도가 높아 실용적인 방법으로 간주되고 있으며, 오렌지, 도라지, 오가피, 건조채소, 복합조미식품 등에 대한 조사처리 여부 확인법으로서의 적용 가능성이 보고된 바 있다(김 등 2006; 권 등 2006; 양 등 2008; Jo *et al*. 2016). 그러나 1 kGy 이하 저선량 조사처리된 딸기의 확인을 위한 물리적 확인시험법의 적용성을 평가한 연구는 거의 이루어진 바가 없다. 따라서, 본 연구는 국제적 식물위생처리 권고선량을 바탕으로 0.15, 0.4, 0.6 및 1 kGy의 감마선, 전자선 및 X-선 조사를 딸기에 적용하고 9일간의 저장기간 동안 물리적 확인시험법(ESR, PSL 및 TL)의 검출한계 선량을 조사하였으며, 저선량 조사처리된 딸기의 판별을 위한 물리적 확인시험법의 적용 가능성을 평가하였다.

재료 및 방법

1. 시료 및 시약

실험에 사용한 딸기는 진주시 (주)수곡덕천영농조합 수출사업단으로부터 상처나 물러짐이 없으며, 크기와 과피 색상이 일정한 수출용으로 재배된 '매향' 품종을 선별하여 구매하였다. 통기구가 있는 플라스틱 용기에 2단으로 포장하였으며, 수출전용 종이상자(50 cm × 30 cm × 11.5 cm)에 옮겨 담아 당일에 방사선 조사를 위해 조사시설로 운송하였다. 사용된 시약 중 sodium polytungstate solution (purity ≥ 85%)은 Sigma-Aldrich사(St. Louis MO, USA)의 제품을 사용하였으며, acetone (≥ 99.5%), ammonium hydroxide solution (≥ 25%) 및 hydrochloric acid (≥ 37%)는 대정화금(Siheung, Korea)의 제품을 사용하였다.

2. 이온화 방사선 조사처리 및 시료의 저장

감마선 조사처리는 전북 정읍에 위치한 한국원자력연구원 첨단방사선연구소에서 ^{60}Co gamma irradiator (10 PBq capacity, ACEL, MDS, Nordion, Canada)를 이용하여 1 kGy·h^{-1} 선량률로 식물위생처리 권고 선량에 따라 0.15, 0.4, 0.6 및 1 kGy의 목표선량으로 조사처리하였다. 전자선 조사처리는 충북 음성의 서울방사선서비스㈜에서 beam energy 10 MeV 전자빔 가속기(MB10-8/635, Mevex Co., Canada)를 이용하여 conveyor speed를 조절하여 설정한 목표선량에 부합하도록 조사처리하였다. X-선 조사처리는 10 MeV 전자빔 가속기에 X-선 컨버터를 부착하여 beam energy를 7 MeV로 낮춘 X-선 발생장치를 이용하여 목표선량으로 조사처리하였다. 실제 흡수선량은 각각의 딸기 box에 15개의 Alanine 선량계(Bruker Instruments, Rheinstetten, Germany)를 부착하여 측정하였으며, 흡수선량의 오차는 목표선량의 9% 이내였다. 각 선량으로 조사된 딸기 box 내의 선량 균일도 비율(dose uniformity ratio = maximum dose/minimum dose)은 감마선, 전자선, X-선에 대하여 각각 1.19, 1.61, 1.30이었다. 모든 조사처리된 딸기는 항온항습기(DS-53FBPL, Dasol Scientific Co., Korea)를 이용하여 15°C, 상대습도 65%의 조건으로 9일

간 저장하였다.

3. 전자스핀공명(electron spin resonance, ESR) 분석

전자스핀공명 분석을 위한 시료의 전처리 및 측정은 EN 1787 방법과 식약처 일반시험법 중 조사처리 여부 확인법에 준하여 실험하였다(CEN 2000; 식품의약품안전처 2018). 딸기의 씨를 분리하여 48시간 동결건조시킨 다음, 분석용 시료로 사용하였다. 동결건조된 시료 0.1 g을 quartz ESR tubes (5 mm diameter, Jeol Co., Tokyo, Japan)에 충진하고 ESR/EPR spectrometer (JES-TE300, Jeol Co., Tokyo, Japan)를 사용하여 분석하였다. 분석 조건은 microwave frequency 9.4 GHz, microwave power 0.4 mW, magnetic center field 337±5 mT, time constant 0.1초, sweep time 2분에서 radiation-induced free radicals (cellulose radical, sugar radical, hydroxyapatite radical)을 screening하였다.

4. 광자극발광(photo-stimulated luminescence, PSL) 분석

광자극발광 분석은 EN 13751 (CEN 2009)의 방법에 준하여 분석하였다. 딸기 5 g의 꼭지 부분을 취하여 petri dish (Ø 50 mm, Green Cross Co., Yongin, Korea)에 넣은 후 PSL system (Serial 0021, SURRC, Scottish universities research & Reactor Centre, Glasgow, UK)을 사용하여 빛이 차단된 장소에서 1분 동안의 photon counts (PCs)를 측정하였다. 기기의 분석 조건은 cycle time 1초, cycle 횟수 60, dark count 50±2.0, light count 49±1.8이었으며, 측정된 값을 $PCs \cdot min^{-1}$으로 나타내었다. 조사시료의 확인은 측정값이 700 $PCs \cdot min^{-1}$ 미만이면 음성대조시료(N, 비조사처리 시료), 700 이상 5,000 $PCs \cdot min^{-1}$ 미만이면 중간검체(M, 조사처리 의심 시료), 5,000 $PCs \cdot min^{-1}$ 이상이면 양성 검체(IR, 조사처리된 시료)로 분류하였다.

5. 열발광(thermoluminescence, TL) 분석

열발광 분석은 시료에서 추출된 광물질의 TL signal intensity를 측정하는 EN 1788 (CEN 2001)에 준하여 실시하였다. 광물질을 추출하기 위해 4 kg의 딸기에 증류수를 가하여 초음파세척기(8210R-DTH, Branson Ultrasonics Co., Danbur, CT, USA)로 10분간 처리하고 나일론 여과포로 여과시켰으며, 1900×*g*로 원심분리하였다. 그 다음 침전물에 존재하고 있는 유기물 제거를 위해 2 $g \cdot mL^{-1}$의 농도로 준비된 sodium polytungstate solution 5 mL을 가하고 1차 증류수로 2회 세척하였다. 세척된 침전물 중 carbonate 제거를 위해 1 N HCl 20 mL을 가한 후 동량의 1 N NH_4OH를 혼합하여 중화시켰으며, acetone으로 3회 세척하여 건조한 다음 광물질을 추출하였다. TL spectra 측정은 TLD system (RISØ, DA-20, Copenhagen, Denmark)을 이용하여 초기온도는 50°C에서 5초간 예열하고, 5°C $\cdot sec^{-1}$의 온도 상승률로 최고 온도를 400°C의 조건으로 설정하였다. 추출된 광물질의 1차 glow (TL_1)를 측정하였으며, 측정한 광물질은 다시 한 번 감마선 1 kGy로 재조사하여 2차 glow (TL_2)를 측정하였다. 방사선 조사처리에 대한 고유의 시그널 피크를 나타내는 150~250°C 범위의 면적 값으로 TL ratio (TL_1/TL_2)를 산출하였다. 조사 여부의 확인은 산출된 TL ratio의 수치를 기준으로 0.1 이상이면 조사처리된 시료로 판정하였다(양 등 2008; Lee *et al*. 2020).

결과 및 고찰

1. 전자스핀공명(electron spin resonance, ESR) 확인시험법의 적용

ESR 분석은 CODEX의 조사처리식품 확인시험법으로 채택되어 국제적으로 다양한 식품에 적용되고 있다(CODEX 2003). 이 분석법은 뼈, 결정형 당(crystalline sugar) 및 섬유소를 함유한 식품에서 방사선 조사처리 과정 중 생성되는 자유라디칼을 측정하는 방법으로 분석 속도가 빠르고 재현성이 높은 확인시험법이다(곽 등 2012). 일반적으로 조사처리된 식품의 ESR 분석에서 방사선에 의해 생성되는 자유라디칼은 식품 성분에 따라 다르게 관찰된다. 뼈를 함유한 식품은 하이드록시아파타이트(hydroxyapatite) 유래 라디칼에 의한 특이 signal이 관찰되고, 건조 과실류 등의 식품은 결정형 당 유래 라디칼에 의한 다성분(multi-component) signal이 확인되며, 견과류 및 신선 과실류 등의 섬유소 함량이 높은 식품은 셀롤로오스(cellulose) 유래 라디칼에 의한 특이 signal이 관찰된다(김 등 2012). 이를 바탕으로 본 실험에서는 섬유소 함량이 많은 딸기의 씨를 분석 시료로 사용하였으며, 세부적으로 딸기의 씨를 동결건조하고 ESR 분석을 이용하여 singlet peak 중심에서 좌우로 각각 약 3 mT 간격의 방사선에 의해 특이적으로 생성되는 cellulose radical을 확인하였다(Figs. 1~3). 3 kGy의 감마선 조사처리된 딸기(positive control)에서는 singlet peak를 기준으로 좌우 대칭적인 cellulose radical의 생성을 확인할 수 있었으나(Fig. 1a), 저장 0일 및 9일에 3종의 방사선원(감마선, 전자선 및 X-선)에서 1 kGy 이하 흡수선량으로 조사처리된 모든 시료들에서는 특이적인 cellulose radical이 관측되지 않았다(Fig. 1b, c; Figs. 2 and 3). 이러한 결과는 딸기의 조사처리 여부 확인을 위해 ESR 분석을 적용한 선행연구에서도 보고된 바 있다. Raffi *et al*. (1988)은 감마선 조사처리된 딸기의 ESR 분석에서 특이적인 cellulose radical이 관찰하였지만, 이를 통한 명확한 조사 여부의 확인은 1 kGy 이상의 흡수선량에서만 가능함이 밝혀진 바 있다.

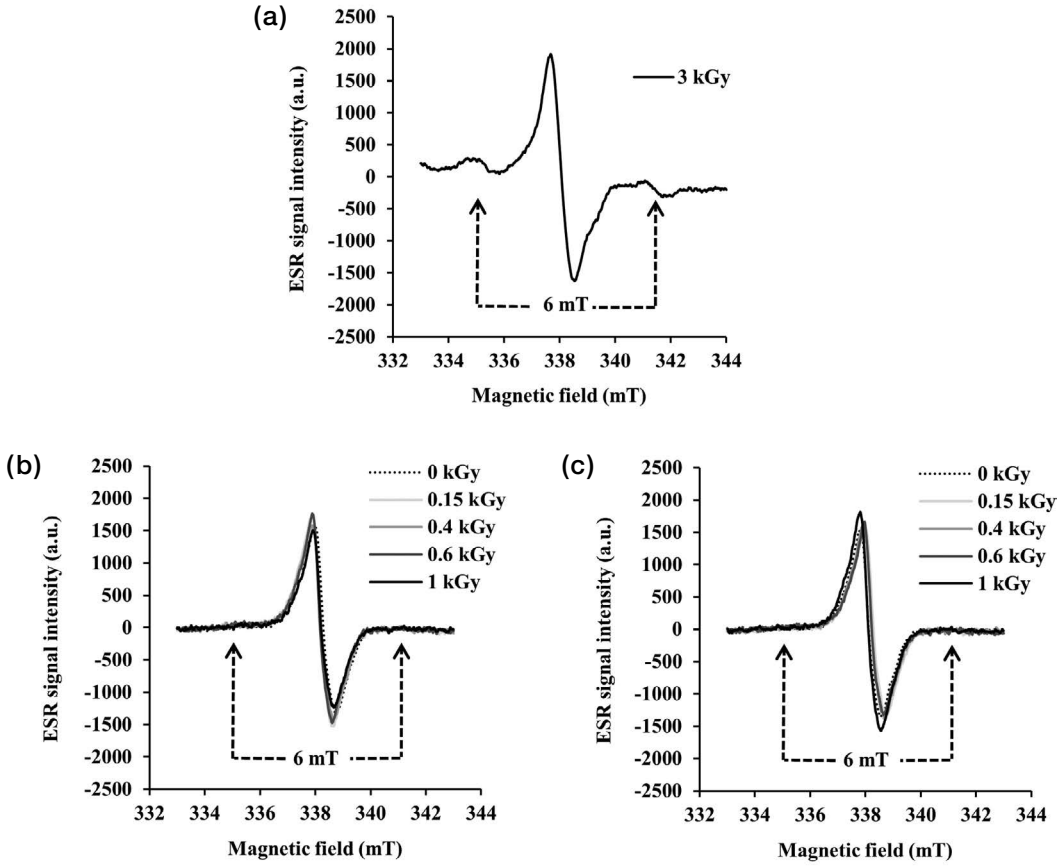

Fig. 1. Electron spin resonance analysis of strawberries irradiated with gamma-rays at different doses. (a) gamma-irradiated strawberry at 3 kGy (positive control); (b) 0 day of storage; (c) 9 days of storage.

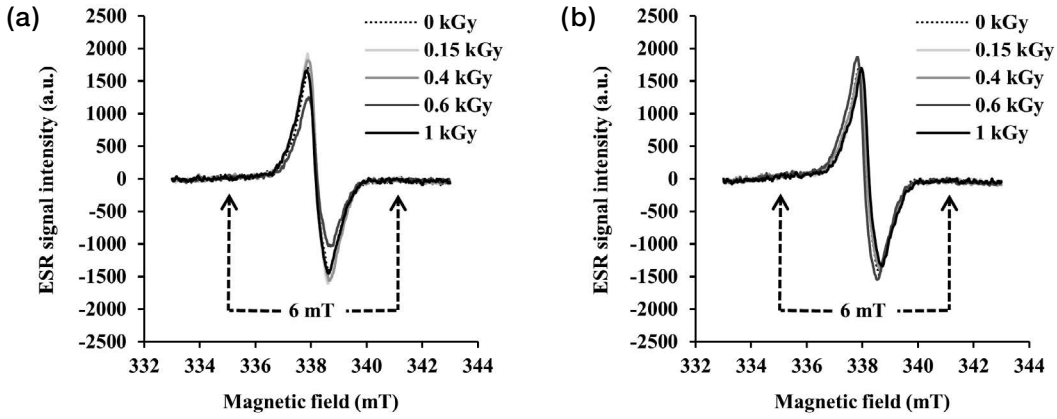

Fig. 2. Electron spin resonance analysis of strawberries irradiated with electron-beams at different doses. (a) 0 day of storage; (b) 9 days of storage.

보편적으로 섬유소 함량이 높은 조사식품에서 ESR 분석을 위한 시료의 전처리 방법은 본 실험의 방법과 마찬가지로 동결건조 또는 진공건조 방법이 사용된다. 이는 ESR 분석에서 조사식품의 자유라디칼 측정에 큰 영향을 미치는 요인은 수분이며, 시료의 수분함량이 감소함에 따라 ESR signal이 명확하게 나타나기 때문이다(곽 등 2012). 최근, 이러한 분석 원리를 바탕으로 ESR 분석의 검출 감도를 높이려는 방법으로 조사처리된 자몽 및 레몬, 오렌지에서 ethanol 추출과 oven-drying 또는 ethanol 추출과 진공건조를 혼합한 개선된 전처리 방법이 시도된 바 있으며, 이 개

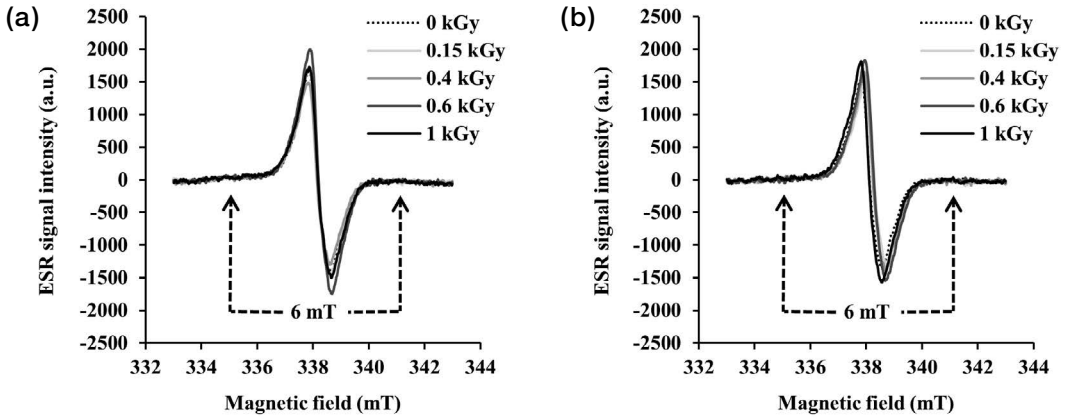

Fig. 3. Electron spin resonance analysis of strawberries irradiated with X-rays at different doses. (a) 0 day of storage; (b) 9 days of storage.

선된 전처리 방법은 기존의 단독 건조처리보다 최소 수분 함량과 높은 섬유소 함량을 갖기 때문에 명확한 cellulose radical이 검출될 수 있음이 증명되었다(Jo *et al*. 2016; Jo *et al*. 2020). 또한, ESR의 protocol에서 낮은 microwave power (0.25 mW) 사용은 negative한 반응을 줄이고 검출 감도를 높일 수 있다고 제안된 바 있다(Yang *et al*. 1987; Raffi *et al*. 1992). 따라서, 향후 저선량 조사된 딸기에서 조사 여부를 확인하기 위한 ESR 분석은 시료의 혼합 전처리(ethanol 처리+건조) 및 protocol의 낮은 microwave power 사용 등의 개선된 방법이 필요할 것으로 판단되며, 이를 적용 및 확인하기 위한 추가적인 연구를 수행할 계획이다.

2. 광자극발광(photo-stimulated luminescence, PSL) 확인시험법의 적용

식품 표면에는 에너지를 흡수할 수 있는 다수의 광물질(silicate mineral)이 존재하고 있으며, 이러한 광물질에는 이온화 방사선 에너지가 일부 저장된다(Jo *et al*. 2020). PSL 분석은 광물질에 저장된 에너지를 일정 온도조건에서 광 자극(적외선 노출)을 통해 방출되는 에너지의 빛의 양을 측정함으로써 방사선 조사처리 여부를 스크리닝하고 확인할 수 있다(Akram *et al*. 2012a; Jo *et al*. 2015). 이에 따라, 3종의 방사선원에서 저선량 조사처리된 딸기의 PSL 분석 특성을 Table 1에 나타내었다. 저장 0일째, 3종의 방사선원에서 조사처리된 모든 시료의 PCs 수치는 선량에 의존적인 증가 경향을 나타내었으며, 양성검체 확인 값(5,000 PCs·min^{-1})보다 높은 수치를 나타낸 실험구들은 0.4 kGy 이상의 흡수선량으로 조사처리된 전자선 조사처리구들과 0.6 kGy 이상의 X-선 조사처리구들에서 관찰되었다. 이후 15°C, 9일간 저장된 모든 시료의 PCs 수치는 0일차에 비해 현저히 감소하였으나 전자선의 경우 여전히 0.4 kGy 이상의 조사처리구들에서 5,000 PCs·min^{-1}보다 높은 수치를 나타내었으며, X-선의 경우 1 kGy 조사처리구 만이 5,000 PCs·min^{-1}보다 높은 수치가 확인되었다. 본 실험의 결과와 유사한 결과들이 감마선 조사처리된 과일 및 채소의 조사 여부 확인을 위해 PSL 분석을 수행한 Jo *et al*. (2020)과 양 등(2008)의 연구에서 보고된 바 있다. 이들은 조사처리된 자몽 및 레몬, 도라지, 오가피의 PSL 분석에서 선량 의존적인 PCs 수치의 증가 경향을 관측하였으며, 선량이 증가함에 따라 5,000 PCs·min^{-1} 이상의 PCs 수치가 확인되었기 때문에 조사처리 여부 확인법으로서 PLS 분석법이 활용될 수 있음을 제시하였다(양 등 2008). 이는 저선량 조사처리된 딸기를 스크리닝하는 신속한 확인시험법으로서 PLS 분석법이 사용될 수 있음을 뒷받침한다.

한편 본 실험에서 0.6 kGy 이상의 선량으로 감마선 조사처리한 시료들은 중간검체(700＜PCs＜5000) 수치를 나타내었기 때문에 스크리닝은 가능하지만 조사처리 여부를 명확하게 판별할 수 없으므로 열발광 분석과 같은 추가적인 확인 실험이 필요한 것으로 판단되었다.

3. 열발광(thermoluminescence, TL) 확인시험법의 적용

TL 분석은 광자극발광법과 유사하게 에너지를 포집하고 있는 광물질에 열을 가할 시 방출되는 광자를 측정하는 신뢰도 높은 확인시험법이다. 조사처리된 식품에서 추출된 광물질의 TL signal은 200°C 전후에서 peak를 나타내며(이 등 2002), 이를 바탕으로 1차 glow curve 중 150~200°C 사이의 온도 구간에서의 signal 면적을 산출한다(TL_1). 최고 온도인 400°C로 광물질을 가열하게 되면 포집된 에너지들이 모두 방출되고 이후 1차 측정을 마친 광물질을 감마선 1 kGy의 선량으로 재조사하여 2차 glow 면적값(TL_2)을 측정한다. 마지막으로 산출된 TL ratio (TL_1/TL_2)의 수치가 0.1 이상을 나타낼 때 명확히 조사처리된 시료로 판정한다(양 등 2008; Lee *et al*. 2020). 3종의 방사선원으로 저선

Table 1. Photo-stimulated luminescence analysis of strawberries irradiated with gamma-rays, e-beams and X-rays at different doses

Radiation type	Irradiation dose (kGy)	Storage period	
		0 day	9 days
Gamma-rays	0	285 ± 18 (N)*	361 ± 21 (N)
	0.15	562 ± 115 (N)	365 ± 82 (N)
	0.4	667 ± 185 (N)	472 ± 12 (N)
	0.6	916 ± 85 (M)	538 ± 86 (N)
	1.0	1,195 ± 188 (M)	784 ± 105 (M)
E-beams	0	290 ± 14 (N)	372 ± 35 (N)
	0.15	3,070 ± 761 (M)	2,006 ± 245 (M)
	0.4	16,282 ± 2819 (IR)	5,077 ± 401 (IR)
	0.6	21,405 ± 6561 (IR)	9,799 ± 1491 (IR)
	1.0	35,163 ± 15743 (IR)	14,916 ± 2572 (IR)
X-rays	0	310 ± 58 (N)	286 ± 20 (N)
	0.15	3,118 ± 296 (M)	594 ± 78 (N)
	0.4	4,846 ± 3044 (M)	1,755 ± 205 (M)
	0.6	9,864 ± 1596 (IR)	3,038 ± 412 (M)
	1.0	14,376 ± 3289 (IR)	5,541 ± 853 (IR)

Mean ± standard deviation (n = 3)
*Decision was classified as follows: (N), non-irradiated ($PCs \cdot min^{-1} < 700$); (M), intermediate ($700 < PCs \cdot min^{-1} < 5000$); (IR), irradiated ($PCs \cdot min^{-1} > 5000$).

Table 2. Thermoluminescence ratio (TL_1/TL_2) analysis of strawberries irradiated with gamma-rays, e-beams and X-rays at different doses

Radiation type	Irradiation dose (kGy)	Storage period	
		0 day	9 days
Gamma-rays	0	0.010 ± 0.002 (N)*	0.012 ± 0.002 (N)
	0.15	0.072 ± 0.010 (N)	0.063 ± 0.009 (N)
	0.4	0.183 ± 0.070 (IR)	0.176 ± 0.037 (IR)
	0.6	0.263 ± 0.059 (IR)	0.240 ± 0.062 (IR)
	1.0	0.386 ± 0.096 (IR)	0.366 ± 0.095 (IR)
E-beams	0	0.011 ± 0.003 (N)	0.012 ± 0.003 (N)
	0.15	0.086 ± 0.028 (N)	0.088 ± 0.012 (N)
	0.4	0.179 ± 0.043 (IR)	0.172 ± 0.058 (IR)
	0.6	0.356 ± 0.043 (IR)	0.337 ± 0.062 (IR)
	1.0	0.470 ± 0.056 (IR)	0.462 ± 0.076 (IR)
X-rays	0	0.009 ± 0.002 (N)	0.007 ± 0.002 (N)
	0.15	0.062 ± 0.028 (N)	0.057 ± 0.012 (N)
	0.4	0.180 ± 0.035 (IR)	0.171 ± 0.046 (IR)
	0.6	0.292 ± 0.035 (IR)	0.268 ± 0.045 (IR)
	1.0	0.415 ± 0.084 (IR)	0.389 ± 0.062 (IR)

Mean ± standard deviation (n = 3)
*Decision was determined to be irradiated (IR) when the TL ratio for sample was greater than 0.1, otherwise as non-irradiated (N).

량 조사처리된 딸기의 TL ratio 수치를 산출하여 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 저장 0일에 비조사구의 TL ratio 수치는 0.009~0.011의 범위로 기록되었으며, 조사처리된 딸기의 TL ratio 수치는 앞서 PSL 분석과 유사하게 선량 의존적인 증가추세를 나타냄에 따라 모든 방사선원에서 0.4 kGy 이상의 조사처리구는 0.1을 초과하는 값이 관찰되었다. 9일

후에도 비조사처리구의 TL ratio 값은 0.1보다 현저히 낮은 수치가 기록되었으며, 모든 방사선원의 0.4 kGy 이상의 조사처리구는 여전히 0.1을 초과하는 수치가 확인되었다. 이러한 결과는 TL 분석을 이용한 딸기의 조사처리 여부 판별이 가능한 최소 선량이 0.4 kGy임을 나타낸다. 본 연구와 유사한 연구에서 Jo *et al*. (2015)은 3종의 방사선원으로 저선량 조사처리된 오렌지의 TL 분석에서 0.5 kGy 조사처리된 시료까지 TL ratio 값이 0.1 이상의 수치가 기록됨을 관찰하였으며, 6주의 저장 후에도 조사처리 여부의 확인이 가능함을 입증한 바 있다. 그러나 해충의 살멸을 위한 식물위생처리 목적으로 0.4 kGy 이하의 흡수선량으로 조사처리하는 경우가 있으므로, 현재까지 TL 확인시험법의 감도를 개선할 수 있는 신규 확인시험법의 개발 및 개선 연구들의 수행이 필요하다.

결 론

딸기 등 신선 농산물의 국제무역량이 증가함에 따라 제품의 부적절한 유기체를 제어하기 위한 식물위생처리법으로서 저선량 조사처리 기술은 안전성과 효과가 인정되어 지속해서 확대되고 있다. 식품의 조사처리 여부를 확인하는 것은 소비자에게 정확한 정보를 제공하고 선택권을 부여함으로써 조사처리식품의 투명성 확립과 소비자 신뢰도가 향상될 수 있으므로 매우 중요하다. 이러한 관점에서 본 연구는 감마선, 전자선, X-선의 이온화 방사선으로 1 kGy 이하의 저선량 조사처리된 딸기에 대한 전자스핀공명법, 광자극발광법 및 열발광법의 저장기간에 따른 특성 변화를 살펴보고 적용 가능성을 확인하였다. 전자스핀공명법을 통한 조사처리 여부 확인시험에서는 모든 조사처리 시료들에서 이온화 방사선에 의해 생성된 cellulose 라디칼에 대한 특정 피크들이 관찰되지 않아 조사처리 여부 확인이 불가능하였다. 광자극발광 분석은 조사처리 시료의 판별이 가능하였으나, 검출한계선량은 전자선의 경우 0.4 kGy, X-선의 경우 1 kGy로 관찰된 반면 감마선 조사처리 시료들은 명확한 판별이 불가능하였다. 그러나 열발광 분석 결과 저장 0일째 모든 방사선원에서 0.4 kGy 이상에서 조사처리된 딸기의 TL ratio 값이 0.1 이상의 수치를 나타내었고, 15°C에서 9일간의 저장 후에도 여전히 0.1보다 높은 수치를 나타내므로 조사처리 시료로 명확한 확인이 가능하였다. 결론적으로 해충 사멸을 위한 식물위생을 목적으로 1 kGy 이하의 흡수선량으로 조사처리된 딸기의 확인시험법은 열발광 분석법이 가장 적합한 것으로 판단되며, 열발광 분석법의 검출한계선량은 3종의 이온화 방사선원 모두에 대하여 0.4 kGy인 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 과학기술정통부의 재원으로 한국원자력연구원의 주요사업(523240-20)에 의해 수행되었으며, 그 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

식품의약품안전처. 2018. 식품공전.

AHPIS. 2006. Treatments for fruits and vegetables. Federal Register (71 FR 4451). https://www.federalregister.gov/d/06-746.

Akram K, Ahn JJ and Kwon JH. 2012a. Analytical methods for the identification of irradiated foods. In: Belotserkovsky E, Ostaltsov Z (eds). Nova Science Publishers, Inc. New York, pp. 1-48.

Ariza MT, Reboredo-Rodríguez P, Cervantes L, Soria C, Martinez-Ferri E, González-Barreiro C, Cancho-Grande B, Battino M and Simal-Gándara J. 2018. Bioaccessibility and potential bioavailability of phenolic compounds from achenes as a new target for strawberry breeding programs. *Food Chem*. **248**:155-165.

CODEX. 2003. General codex methods for the detection of irradiated foods. CODEX STAN 231-2001.

EN 1787. 2000. Foodstuffs-detection of irradiated food containing cellulose by ESR spectroscopy. European committee of standardization (CEN), Brussels.

EN 1788. 2001. Foodstuffs-thermoluminescence detection of irradiated food from which silicate minerals can be isolated. European committee of standardization (CEN), Brussels.

EN 13751. 2009. Foodstuffs-detection of irradiated food using photostimulated luminescence. European committee of standardization (CEN), Brussels.

Fan X and Sommers CH. 2013. Food irradiation research and technology (2nd ed.). Chicago: Blackwell publishing and the institute of food technologists (Chapter 8).

FDA. 2007. Foods permitted to be irradiated under FDA regulations (21 CFR 179.26).

Filho MDJ, Scolforo CZ, Saraiva SH, Pinheiro CJG, Silva PI and Lucia SMD. 2018. Physicochemical, microbiological and sensory acceptance alterations of strawberries caused by gamma radiation and storage time. *Sci. Hortic*. **238**:187-194.

Hallman GJ. 2011. Phytosanitary applications of irradiation. *Compr. Rev. Food. Sci. F*. **10**:143-151.

Hwang KT, Kim JE, Park JN and Yang JS. 2007. Effects of roasting, powdering and storing irradiated soybeans on hydrocarbon detection for identifying post-irradiation of soybeans. *Food Chem*. **102**:263-269.

Jang SA, Shin YJ and Song KB. 2011. Effect of rapeseed pro-

tein-gelatin film containing grapefruit seed extract on 'Maehyang' strawberry quality. *Int. J. Food Sci. Tech.* **46**:620-625.

Jo DJ, Sanyal B, Lee JU and Kwon JH. 2015. Thermoluminescence characterization of isolated minerals to identify oranges exposed to γ-ray, e-beam, and X-ray for quarantine applications. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **303**:297-304.

Jo Y, Ameer K, Chung NH, Kang YH, Ahn DU and Kwon JH. 2020. E-sensing, calibrated PSL, and improved ESR techniques discriminate irradiated fresh grapefruits and lemons. *J. of Food Sci. Tech. Mys.* **57**:364-374.

Jo Y, Sanyal B, Chung N, Lee HG, Park Y, Park HJ and Kwon JH. 2015. Calibrated photostimulated luminescence is an effective approach to identify irradiated orange during storage. *Radiat. Phys. Chem.* **111**:81-86.

Jo Y, Sanyal B, Park HJ and Kwon JH. 2016. Ethanol extraction-based drying enhanced ESR radical detection in oranges irradiated to different ionizing radiations during storage. *Postharvest Biol. Tec.* **112**:170-175.

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 applications of PSL, TL and ESR methods for the detection of irradiated foods not allowed to be irradiated in Korea. *J. Fd Hyg. Safety.* **27**(3):233-246.

Kim MY, Kim BK, Kim KY, Bhatti IA and Kwon JH. 2006. Detection characteristics of irradiated dried vegetables by analyzing photostimulated luminescence (PSL) and thermoluminescence (TL). *Korean J. Food. Preserv.* **13**(2):211-215.

Kong Q, Wu A, Qi W, Qi R, Carter JM, Rasooly R and He X. 2014. Effects of electron-beam irradiation on blueberries inoculated with Escherichia coli and their nutritional quality and shelf life. *Postharvest Biol. Tec.* **95**:28-35.

Kwak JY, Ahn JJ, Kashif A, Kim GR and Kwon JH. 2012. Characterization and identification of gamma-irradiated kimchi cabbage and broccoli by electron spin resonance spectroscopy using different sample pre-treatments. *Korean J. Food Sci. Technol.* **44**(5):532-539.

Kwon JH, Kim MY, Kim BK, Chung HW, Kim TC and Kim SJ. 2006. The detection of irradiated composite seasoning foods by analyzing photostimulated luminescence (PSL), electron spin resonance (ESR) and thermoluminescence (TL). *Korean J. Food Preserv.* **13**(1):55-66.

Lee EY, Jung JY, Noh JG, Jo DJ and Kwon JH. 2002. Detection characteristics of TL, ESR and DNA comet for irradiated soybeans. *Korean J. Food Sci. Technol.* **34**(1):18-23.

Lee KC, Park JH, Kim JK, Park HY, Yoon YS, Eun JH and Song BS. 2020. Rapid identification method for gamma-irradiated soybeans using gas chromatography-mass spectrometry coupled with solid-phase microextraction agriculture. *J. Agric. Food Chem.* **68**(9):2803-2815.

Maraei RW and Elsawy KM. 2017. Chemical quality and nutrient composition of strawberry fruits treated by γ-irradiation. *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* **10**(1):80-87.

Park JH, Kim JK, Park HY, Lee YJ, Kim JH, Yeon YH and Song BS. 2019. Comet assay for rapid identification of irradiated perilla seeds and soybeans with gamma rays and electron-beams. *J. Radiat. Ind.* **13**(2):119-126.

Raffi JJ, Agnel JP, Buscarlet LA and Martin CC. 1988. Electron spin resonance identification of irradiated strawberries. *J. Chem. Soc. Faraday Trans.* **84**(10):3359-3362.

Raffi JJ, Stevenson MH, Kent M, Thiery JM and Belliardo JJ. 1992. European intercomparison on electron spin resonance identification of irradiated foodstuffs. *Int. J. Food Sci. Technol.* **27**:111.

Serapian T and Prakash A. 2016. Comparative evaluation of the effect of methyl bromide fumigation and phytosanitary irradiation on the quality of fresh strawberries. *Sci. Hortic.* **201**(30):109-117.

Song BS, Lee Y, Moon BG, Go SM, Park JH, Kim JK 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.

Yang GC, Mossoba MM, Merin U and Rosenthal I. 1987. An EPR study of free radicals generated by gamma-radiation of dried spices and spray-dried fruit powder. *J. Food Qual.* **10**:287.

Yang HS, Park YD, Jin CH, Choi DS, Chang HW, Byun MW and Jeong IY. 2008. Detection characteristics of gamma-irradiated Korean medicinal herbs by using PSL, TL, and ESR. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* **37**(11):1529-1533.

Yang M, Ban Z, Luo Z, Li J, Lu H, Li D, Chen C and Li L. 2020. Impact of elevated O_2 and CO_2 atmospheres on chemical attributes and quality of strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) during storage. *Food Chem.* **307**:125550.

Received: 10 April 2020
Revised: 24 April 2020
Revision accepted: 4 May 2020