딸기의 품질 특성에 대한 식물위생처리로서 전자선 조사의 영향

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

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소, [2]전남대학교 식품공학과

Effect of Electron-beam Irradiation as a Phytosanitary Treatment on the Quality Characteristics of Strawberry

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

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

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

Abstract - Evaluation for the effect of electron-beam irradiation (0, 0.1~1 kGy) on the quality parameters of 'Maehyang' strawberries (*Fragaria*×*ananassa*) were performed to verify the feasibility of irradiation treatment as a phytosanitary treatment. Electron-beam irradiation had not significant effect on weight loss, moisture content, water activity and total soluble solid in both non-irradiated control and all irradiated samples. However, firmness were significantly reduced in a dose-dependent manner ($p<0.05$). Phenolic acids and hydrolysable tannins and anthocyanins content maintained regardless of irradiation treatment, while flavonoids of irradiated-samples increased than those of the control. Moreover, 0.1~0.8 kGy irradiated samples did not show significant changes in sensory scores for overall acceptance compared to the control. Based on these results, it is considered that suitable electron-beam irradiation of strawberry was appropriate to achieve phytosanitary purpose without adversely affecting physio-chemical changes and sensory qualities.

Key words : Strawberry, Electron-beam, Phytosanitary treatment

서 론

딸기(*Fragaria*×*ananassa*, Duch.)는 세계적으로 가장 널리 섭취되는 과일이며, 국가 간의 무역 거래량이 매우 많다(Serapian and Prakash 2016; Ariza *et al*. 2018). 한국의 경우, 주로 재배되는 딸기 품종은 '설향'과 '매향'으로 이 중 높은 당도와 단단한 조직감을 갖는 '매향'이 싱가포르, 홍콩, 일본 호주 등의 해외 시장에 약 5,000여 톤(세계 8위) 수출되고 있으며(FAOSTAT 2016; Cho *et al*. 2019), 해외 소비자들의 한국산 딸기에 대한 선호도 증가로 인해 그 수출량은 향후 더욱 증가할 것으로 예상된다(농수산식품유통공사 2018). 이에 따라, 딸기 수출 시 발생되는 클레임을 최소화하기 위하여 수출대상국들에 대한 국가별 맞춤형 농약사용 안전지침 준수, 수출단지별 안전성 컨설팅, 현장기술지원 등과 같은 다양한 노력들이 수반되고 있는 상황이다.

신선한 과일의 국제 간 무역거래에서 많은 나라의 주요

* Corresponding author: Jong-Heum Park, Tel. +82-63-570-3244, Fax. +82-63-570-3218, E-mail. jhpark21@kaeri.re.kr

관심사는 외래 해충 확산을 방지하기 위한 효과적인 식물위생처리 방법의 도입이다(Aylangan 2017; Ornelas-Paz *et al*. 2017). 일반적으로 딸기를 포함한 많은 과일에 대해 식물위생처리 목적으로 methyl bromide (MeBr)를 이용한 화학적 훈증방식이 사용되어 왔으며, 한국 또한 동일한 방식이 적용되고 있다(농림축산검역본부 2019). 그러나 MeBr는 강력한 인체 유해성, 과실의 인위적인 약해 유발 및 지구 오존층의 파괴에 따른 환경문제를 일으킬 수 있어 Montreal 협약에 따라 그 사용이 제한되고 있다(Cannon *et al*. 2012). 이러한 MeBr의 단점을 해결하기 위한 방안으로 ethylformate, methyliodide, phosphine, hydrogen cyanide, carbonyl sulfide와 같은 대체 훈증제들이 개발되어 사용되고 있으나, 여전히 상당한 독성을 지니고 있고(농림축산검역본부 2015), 식물 내부 깊숙이 존재하는 알 및 번데기와 같은 해충의 유충에 제한적인 살충효과를 나타내고 있다. 반면, 방사선 조사는 기존 화학 훈증제와는 달리 물리적인 비가열처리로서 잔류성이 없어 환경오염을 유발하지 않고 고 투과성으로 식물 내부 깊숙이 존재하는 해충에 대해 효과적인 사멸효능을 지닌다(Jung *et al*. 2016). 따라서, 미국 농무부 동식물검역국(USDA APHIS)은 방사선 조사의 식물위생처리 최소선량으로 0.15 kGy, 나비목 및 어패류를 제외한 대부분의 곤충에 대해 0.4 kGy 조사를 승인하였으며(APHIS 2006), 미국 식품의약국(US FDA)은 신선 농산물에 대해 최대 1 kGy 선량의 조사를 허용한 바 있다(FDA 2007).

식물위생처리와 관련하여 국제원자력기구(IAEA; International Atomic Energy Agency), 유엔환경프로그램(UNEP; United Nations Environment Program) 및 국제식물보호협약(IPPC; International Plant Protection Convention)은 감마선, 전자선 및 X-선과 같은 이온화 에너지를 국제 식물검역 관리기술로 권고하고 있다(Hallman 2011). 그러나 감마선은 해당 선원의 구매가격 상승, 운송 시 안전관리 문제 및 방사성 물질에 대한 소비자의 불안감 확대로 인해 그 사용에 있어서 부정적인 인식에 놓여 있다. 이와 달리 전자선 및 X-선은 전기적으로 생성되는 방사선으로 ^{60}CO 및 ^{137}Cs와 같은 방사성 동위원소에서 발생하는 방사선인 감마선보다 소비자 수용성이 상대적으로 높으며, 무엇보다도 방사성 폐기물을 발생시키지 않는다(Jung *et al*. 2016). 게다가, 전자선은 높은 선량률을 제공할 수 있기 때문에 제품의 처리량 면에서 X-선보다 우수하다(Kong *et al*. 2014).

지금까지 딸기에 대한 1 kGy 이하의 방사선 조사를 적용한 대부분의 연구는 감마선 조사처리이며(Cheour and Mahjoub 2003; Hussain *et al*. 2007; Serapian and Prakash 2016; Maraei and Elsawy 2017), 전자선 조사처리에 대한 연구는 매우 제한적이었다. 비록 감마선 조사에 비해 전자선 조사처리에 관한 연구사례가 상대적으로 많지 않지만, 전자선 조사도 감마선 조사와 마찬가지로 여러 유형의 신선 농산물에서 해충 및 병원성 미생물을 감소시키는 데 있어서 효과적임을 증명하고 있다(Mintier and Foley 2006; Grasso *et al*. 2011; Kong *et al*. 2014; Yun *et al*. 2015). 특히, 식물위생처리에 있어서 전자선 조사의 적합성 여부는 표적 곤충을 죽이거나 불활성화시키는 능력뿐만 아니라 대상 과일의 품질에 부정적인 영향을 끼치지 않는 것이 중요하기 때문에(Ornelas-Paz *et al*. 2017), 해당 방사선 조사처리에 대한 품질 연구는 무엇보다도 필요하다고 판단된다. 따라서 본 연구의 목적은 한국의 주요 수출 품종인 매향 딸기의 품질, 화학성분 및 관능적 품질에 대한 1 kGy 이내의 전자선의 영향을 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 시료의 준비

수출용으로 재배된 '매향' 딸기 중 크기와 과피 색상이 일정하고 상처나 물러짐이 없는 것들만 선별하여 진주 수곡덕천영농조합㈜ 수출사업단으로부터 구입하였으며, 통기구가 있는 플라스틱 포장용기에 2단으로 쌓은 다음, 수출전용 box (50 cm × 30 cm × 11.5 cm)에 담아 즉시 방사선 조사시설로 운송하였다.

2. 전자선 조사

딸기의 전자선 조사는 충북 음성에 위치한 서울방사선서비스㈜에서 beam energy 10 Mev 전자빔 가속기(MB10-8/635, Mevex Corp., Canada)를 이용하여 컨베이어벨트 속도 조절을 통해 0.1 kGy 단위로 0.1~1.0 kGy의 목표선량에 도달하도록 조사하였다. 추가적으로 딸기의 생체활성 화합물 분석 시에는 동일한 전자선 가속기로 0.15, 0.4, 0.6 1.0 kGy가 되도록 조사하였다. 실제 흡수선량은 각각의 딸기 box에 15개의 alanine 선량계(Brunker Instruments, Rheinstetten, Germany)를 부착하여 측정하였으며, 흡수선량의 오차는 목표선량의 9% 이내였다. 각각의 선량으로 조사된 딸기 box 내의 선량 균일도 비율(DUR; dose uniformity ratios)은 1.33~1.61이었다.

3. 중량손실률, 수분 함량, 수분활성도 및 총 가용성 고형분 함량 분석

중량손실률은 딸기의 초기 중량을 기준으로 방사선 조사처리 후 중량을 측정하여 얻은 중량손실을 백분율(%)로 나타내었다. 수분 함량은 상압건조법으로 2 g의 시료를 취하여 105°C의 drying oven에서 수분을 제거한 후, 칭량하여 수분 함량을 %로 산출하였다. 수분활성도 측정은 딸기를 측정용 원형 disc에 넣어 수분활성도 측정기(Labmaster-aw, Novasina Ag Co., Switzerland)를 이용하여 측정하였다. 과

일의 총 가용성 고형분 함량은 시료를 착즙한 다음 digital 당도계(Hi 96801, Hanna Co., Romania)로 측정하여 °Brix 농도로 나타내었다.

4. 경도 분석

딸기의 경도는 texture analyzer (TA-XT2i, Stable Micro Systems, England)를 이용하여 딸기의 중앙부분을 5 mm probe, test-speed 2 mm·s^{-1}, strain 6 mm로 측정하였다.

5. 색도 분석

딸기의 색도는 색차계(Chroma Meter, CM-5, Minolta Co., Japan)를 이용하여 명도(L^* value), 적색도(a^* value) 및 황색도(b^* value)를 측정하였다.

6. HPLC를 이용한 Polyphenol 분석

딸기를 동결건조기(VD-800F, Taitec, Koshigaya, Japan)로 건조시킨 다음, 건조된 시료 1 g을 80% methanol solvent (0.1% formic acid가 포함된 80% methanol) 20 mL과 혼합하여 교반기(BR-300 LF, TAITEC, Koshigaya, Japan)에서 2시간 동안 진탕 추출하였다. 얻어진 추출물은 4°C에서 5분간 1912×g로 원심분리한 다음, 상층액을 0.20 μm filter로 여과시켰다. 딸기의 추출물 내 polyphenol 함량 분석은 자외흡광다이오드검출기(DAD; diode array detector)와 Eclipse plus C18 column (250 mm×4.6 mm, 5.0 μm, Agilent Corp., Palo Alto, CA, USA)이 장착된 Agilent HPLC system (1200 series, Agilent Corp., USA)을 이용하였으며, 보다 상세한 분석조건으로는 이동상인 A: water-formic acid (98.5 : 1.5, v/v)와 B: acetonitrile-formic acid (98.5 : 1.5, v/v)의 조합을 통해 초기 0~30분간 A 100% 유지, 30~33분간 B 30% 증가, 33~45분간 B 70% 증가, 45~48분 B 70% 유지, 48~55분 A 100% 증가 및 55~60분 A 100% 유지의 gradient 방식을 적용하였다. 분석에 사용된 시료 양은 20 μL, 유속은 1.2 mL·min^{-1}, column 온도는 22°C, 파장 범위 200~600 nm에서 2 nm로 맞추어 실시하였다. 각각의 polyphenol 성분들에 대한 정량적인 분석을 위하여 cyanidin-3-O-glucoside chloride (purity≥96%), pelargonidin-3-O-glucoside chloride (purity≥95%), ellagic acid (purity≥95%), *p*-coumaric acid (purity≥98%), *trans*-cinnamic acid (purity≥99%), gallic acid (purity≥96%), chlorogenic acid (purity≥95%), salicylic acid (purity≥99%), (+)-catechin hydrate (purity≥98%), quercetin 3-glucoside (purity≥90%), kaempferol 3-glucoside (purity≥90%)를 Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA)에서 구입하여 표준용액으로 100% methanol에 희석하여 사용하였다.

7. 관능 평가

관능검사 요원 20명을 선발하여 난수를 써놓은 시료를 무작위로 배열하였다. 평가 항목은 색(color), 향(flavor), 조직감(texture), 종합적 기호도(overall acceptance)에 대하여 각 시료 간의 차이를 더욱 명확하게 구분하기 위해 매우 좋다(7점), 좋지도 싫지도 않다(4점), 매우 싫다(1점)로 구성한 7점 척도 방법으로 실시하였다.

8. 통계처리

실험 결과는 mean±SD로 나타내었으며, SPSS (Windows ver. 18.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 이용하여 각 시료 간 유의성을 검증한 후 $p<0.05$ 수준에서 Duncan's multiple range test로 사후검정을 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 전자선 조사된 딸기의 중량손실률, 수분 함량, 수분활성도 및 총 가용성 고형분 함량

중량손실률 및 총 가용성 고형분 함량은 과일의 신선도 평가의 중요한 지표이며, 수확 후 품질 하락을 초래하는 미생물 증식 및 부패 발생 등은 제품의 수분 함량과 밀접한 관련이 있다(Jain *et al*. 2017; Nam *et al*. 2019). 수분활성도 역시 일정온도에서 식품의 수증기압에 대한 순수한 물의 상대적으로 표시한 지표로 식품에 포함되어 있는 자유수 함량을 나타내는 일반적인 수분 함량과는 다른 의미로 사용된다. 수분활성도가 높은 식품일수록 미생물에 의한 부패가 쉽게 일어나기 때문에 식품의 신선도 평가에 중요한 척도로 활용된다(Kim *et al*. 2017). 본 실험에서는 딸기의 중량손실률, 수분 함량, 수분활성도 및 총 가용성 고형분 함량에 대한 전자선 조사의 영향을 평가하였다(Table 1). 전자선 조사 후, 딸기의 중량손실률은 0.4~0.6%의 범위였으며, 1 kGy 이하의 전자선 조사는 과일의 중량손실에 유의적인 영향을 미치지 않았다. 마찬가지로, 조사된 모든 딸기의 수분 함량 및 수분활성도는 대조군과 비교하여 유의적인 변화를 나타내지 않았다. 또한, 딸기의 총 가용성 고형분 함량은 8.5~8.9 °Brix 범위였으며, 전자선 조사는 과일의 총 가용성 고형분 함량에도 유의한 영향을 미치지 않았다. 과일의 총 가용성 고형분 함량은 총 당 함량을 반영하며 굴절률로 표현된다. 따라서, 이 실험결과를 통해서 딸기의 당도에 전자선 조사는 유의한 영향을 미치지 않는다는 것을 확인하였다. 또한 본 연구 결과와 유사하게, Nam *et al*. (2019) 역시 1 kGy 전자선 조사는 mandarin orange의 수분 함량과 총 가용성 고형분 함량에 유의한 영향을 미치지 않음을 관찰하였으며, Jain *et al*. (2017) 또한 pummelos의 중량손

Table 1. Weight loss, moisture content, water activity and total soluble solid content of e-beam irradiated strawberry

Dose (kGy)	Weight loss (%)	Moisture content (%)	Water activity	Total soluble solid content (°Brix)
0	0.4±0.2	90.2±0.1[ab]	0.967±0.002	8.7±0.6
0.1	0.6±0.2	89.7±1.1[ab]	0.966±0.005	8.5±0.7
0.2	0.5±0.2	89.7±0.2[ab]	0.965±0.005	8.8±0.7
0.3	0.4±0.2	89.7±0.4[ab]	0.970±0.009	9.1±0.6
0.4	0.5±0.2	90.0±0.4[ab]	0.970±0.008	8.5±0.9
0.5	0.4±0.2	89.6±08[ab]	0.968±0.007	8.8±0.5
0.6	0.5±0.2	90.8±0.9[a]	0.970±0.006	8.8±0.7
0.7	0.5±0.3	90.4±0.7[ab]	0.968±0.014	8.7±0.7
0.8	0.4±0.2	90.0±0.8[ab]	0.968±0.006	8.9±0.8
0.9	0.6±0.2	89.2±0.6[b]	0.968±0.010	8.5±0.8
1	0.6±0.2	89.8±0.9[ab]	0.964±0.006	8.8±0.7

Data represent mean values±standard deviation (Weight loss: n=8, Moisture content and Water activity: n=5, and Soluble solid content: n=10)
[a-b]Values followed by different lowercase letters within a column are significantly different at $p<0.05$ based on the results of the Duncan's multiple range test.

Table 2. Color of e-beam irradiated strawberry

Dose (kGy)	Color		
	*L**	*a**	*b**
0	45.9±5.2	38.0±4.8	31.2±4.4[ab]
0.1	47.4±4.8	39.3±4.3	30.4±3.5[b]
0.2	44.9±4.1	40.0±3.9	31.6±3.9[ab]
0.3	44.7±6.0	38.0±4.6	31.2±4.4[ab]
0.4	48.2±4.8	38.7±6.4	33.5±2.8[a]
0.5	45.2±4.3	41.1±4.6	33.0±3.6[ab]
0.6	44.5±3.6	40.2±4.5	31.9±2.7[ab]
0.7	48.0±6.3	40.0±3.8	31.7±2.8[ab]
0.8	45.4±6.2	39.2±3.6	32.6±3.7[ab]
0.9	47.3±5.8	38.2±4.0	31.5±4.1[ab]
1	47.5±4.5	37.8±4.7	31.2±2.7[ab]

Data represent mean values±standard deviation (n=20)
[a-b]Values followed by different lowercase letters within a column are significantly different at $p<0.05$ based on the results of the Duncan's multiple range test.

실과 주스 함량에 1 kGy 감마선 조사의 영향은 없었다는 것을 보고한 바 있다.

2. 전자선 조사된 딸기의 색도

색상은 신선한 딸기에서 가장 먼저 확인되는 품질 속성이며, 제품의 등급과 숙성도를 평가할 수 있는 중요한 인자다(Liu *et al*. 2018). Table 2는 전자선 조사된 딸기의 색상 변화를 나타낸 결과로, *L** 값은 명도를 나타내며, 100에 가까울수록 밝은 정도를 의미한다. 적색도를 나타내는 *a** 값은 positive (+) 값을 나타낼수록 빨간색을 나타내며, 황색도를 나타내는 *b** 값은 positive (+) 값을 나타낼수록 노란색을 나타낸다. 대조군의 *L**, *a** 및 *b** 값은 각각 45.9, 38.0 및 31.2로 관찰되었으며, 전자선 조사는 딸기의 *L**, *a** 및 *b** 값에 유의한 영향을 미치지 않았다. 이와 유사한 결과로 McDonald *et al*. (2013) 역시 0.6 kGy 감마선 조사가 오렌지의 색상 변화에 영향을 미치지 않았고, Jung *et al*. (2016)은 1.0 kGy 감마선 및 전자선, X-선 조사된 각각의 사과 및 배에서 조사되지 않은 시료들과 비교하여 *L**, *a** 및 *b** 값에 유의적인 변화를 일으키지 않았다는 것을 관찰하였다.

3. 전자선 조사된 딸기의 경도

식품의 위생처리 목적으로 이용되는 방사선 조사는 채소 및 과일의 경도를 감소시킬 수 있으며(da Silva Aquino 2012), 이러한 경도의 변화는 소비자 선호도에 영향을 미칠 수 있다(Jung *et al*. 2015). 따라서, 전자선 조사에 따른 딸기의 경도 변화를 분석하였다(Fig. 1). 그 결과, 대조군의 경도는 4.78로 관찰되었지만, 전자선 조사는 선량에 의존적인 방식으로 딸기의 경도를 2.98까지 유의적으로 감소시켰다. 이러한 유사한 경향이 0.4 kGy 감마선 조사된 'Marquee' 및 'Amado' 품종의 딸기에서도 보고된 바 있다(Serapian and Prakash 2016). 일반적으로 방사선 조사로 인한 과일의 경도 감소는 방사선에 의한 cellulose의 분해 작용에 기인된다. 즉, 방사선 조사는 이온화 작용에 의해 cellulose를 구성하는 pectin과 같은 탄수화물의 glycosidic bond 파괴를 유발할 수 있으며, 이는 과일 및 채소의 견고성 감소를 초래하게 된다(Taiz and Zeiger 2006; Hussain *et al*. 2008). 게다가, 본 연구결과에서 확인된 전자선 조사에 의한 딸기의 경도 감소 효과는 최종 소비자가 구입하는 시점에 맞추어 딸기의 수확 후 저장기간 동안 수반되는 숙도 변화로 인해 그들의 최종적인 품질에 미치는 영향에 따라 달라질 수 있다.

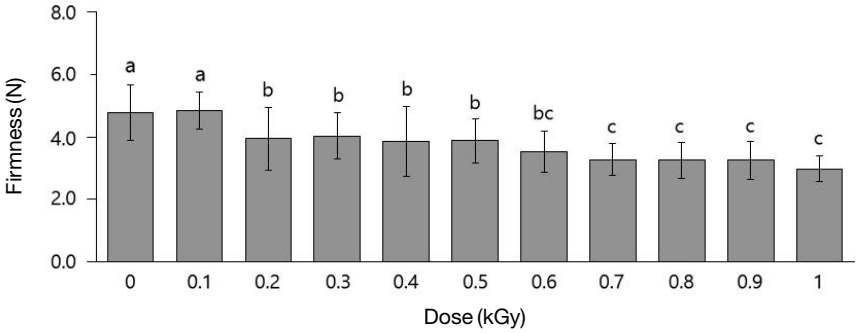

Fig. 1. Firmness of e-beam irradiated strawberry. [a-c]Each of bars followed by different lowercase letters within different irradiation dose is significantly different at $p<0.05$ based on the results of the Duncan's multiple range test. Data are expressed as the mean ± standard deviation values (n = 20).

예를 들어, 다른 신선 과일들과 마찬가지로 딸기 또한 수확 후 저장기간에 따라 일어나는 대사적 활성으로 인해 경도가 점진적으로 감소되며(Jiang *et al*. 2020), 반면 UV-C 조사 후 딸기의 경도는 떨어지나 조사로 인해 그들의 경도에 중요한 역할을 하는 endo-β-1,4-glucanase, pectin methylesterase 및 polyglacturonase와 같은 효소들의 대사적 활성이 유의적으로 감소되어 비조사된 시료에 비해 상대적으로 경도 연화가 지연될 수 있기 때문이다(Pombo *et al*. 2009). 따라서 전자선 조사 및 숙도에 따른 경도 변화에 대한 보다 정확한 결론을 도출하기 위해서는 딸기의 저장기간에 따른 변화에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

4. 전자선 조사된 딸기의 polyphenol compound 함량

딸기에는 phenolic compound와 같은 천연 항산화제가 풍부하게 함유되어 있으며(Maraei and Elsawy 2017), 이들의 함량 변화는 항산화, 항염증, 항암, 항균, 항바이러스 활성의 영향으로 질병 예방과 밀접한 관련이 있다(Forbes-Hernández *et al*. 2016). 딸기에는 주요 페놀성 화합물들로 ellagic acid derivatives, flavonols, flavanols 및 과일의 붉은색을 나타내는 anthocyanins 등이 존재한다(Ariza *et al*. 2018). 따라서, 본 실험에서는 딸기의 6가지 phenolic acids and hydrolysable tannins (ellagic acid, chlorogenic acid, *p*-coumaric acid, gallic acid, salicylic acid 및 *trans*-cinnamic acid), 3가지 flavonoids ((+)-catechin hydrate, quercetin 3-glucoside 및 kaempferol 3-glucoside) 및 2가지 anthocyanins (pelargonidin-3-O-glucoside chloride 및 cyanidin-3-O-glucoside chloride)의 함량에 대한 전자선 조사의 영향을 분석하였다. 분석된 결과에 따르면, 1 kGy 이내의 전자선 조사는 딸기의 phenolic acid and hydrolysable tannin 및 anthocyanin의 함량에 유의한 영향을 미치지 않았다(Fig. 2). 이는 Shahbaz *et al*.(2014)이 보고한 0.5 kGy 감마선 조사된 pomegranade의 phenolic acid 및 anthocyanin 함량에서 변화가 없었다는 점과 Tezotto-Uliana *et al*.(2013)이 보고한 1 kGy 감마선 조사된 raspberry의 anthocyanin 함량에 유의미한 변화를 일으키지 않았다는 이전의 연구들과 일치하는 결과였다. 특히, 딸기의 phenolic compound 중에서 대표적인 주요 성분인 ellagic acid 역시 본 연구에서 적용된 최고선량인 1 kGy에서도 그 함량의 변화는 없었다(Fig. 2). Breitfellner *et al*.(2002) 또한 딸기의 ellagic acid는 3 kGy의 조사에서도 유의한 영향을 받지 않았음을 제시한 바 있다. 한편, 조사된 딸기의 flavonoid 함량은 대조군과 비교하여 높은 함량을 나타내었는데, 아마도 이는 방사선 조사에 따른 고분자 페놀화합물의 분해로 인한 flavonoid 함량 증가에 기인된 것으로 사료된다(Harrison *et al*. 2007). 동일한 현상으로 열대성 다년생 식용식물인 Siam tulip 내 total flavonoid, catechin, naringin 및 quercetin 함량이 감마선 조사로 인해 증가한 것이 관찰된 바 있다(Taheri *et al*. 2014).

5. 전자선 조사된 딸기의 관능평가

본 연구에서 실험에 사용된 딸기는 70% 숙성단계였으며, 숙성단계는 감각 속성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이로 인해, 딸기의 종합적 기호도 점수는 '좋지도 싫지도 않다(4점)' 근처인 3.5~4.8로 기록되었다(Table 3). 대조군과 비교하여 0.8 kGy 이하의 선량에서 조사된 딸기의 종합적 기호도는 유의한 변화를 나타내지 않았으며, 이는 0.8 kGy 조사가 소비자 수용성에 영향을 미치지 않을 수도 있음을 의미한다. 딸기의 관능적 선호도에 영향을 줄 수 있는 품질 속성은 조직감, 맛 및 anthocyanin 함량이다(Maraei and Elsawy 2017). 특히, anthocyanin은 많은 과일에서 적색을 나타내는 페놀성 화합물 그룹이며, 딸기의 착색은 이들의 분포와 함량을 통해 결정이 된다(Garcia-Alonso *et al*. 2004). 앞서의 실험에서, 딸기의 총 가용성 고형분 및 anthocyanin 함량, 그리고 색도는 조사에 의한 유의한 변화를 나타내지 않았다. 따라서 이러한 결과는 0.8 kGy 이내의 조사에 의한 딸기의 외관, 맛 및 종합적 기호도에 손실을 일으키지 않음을 뒷받침한다. 반면, 0.9 및 1 kGy 조사된 시료들은 4점 미만의 종

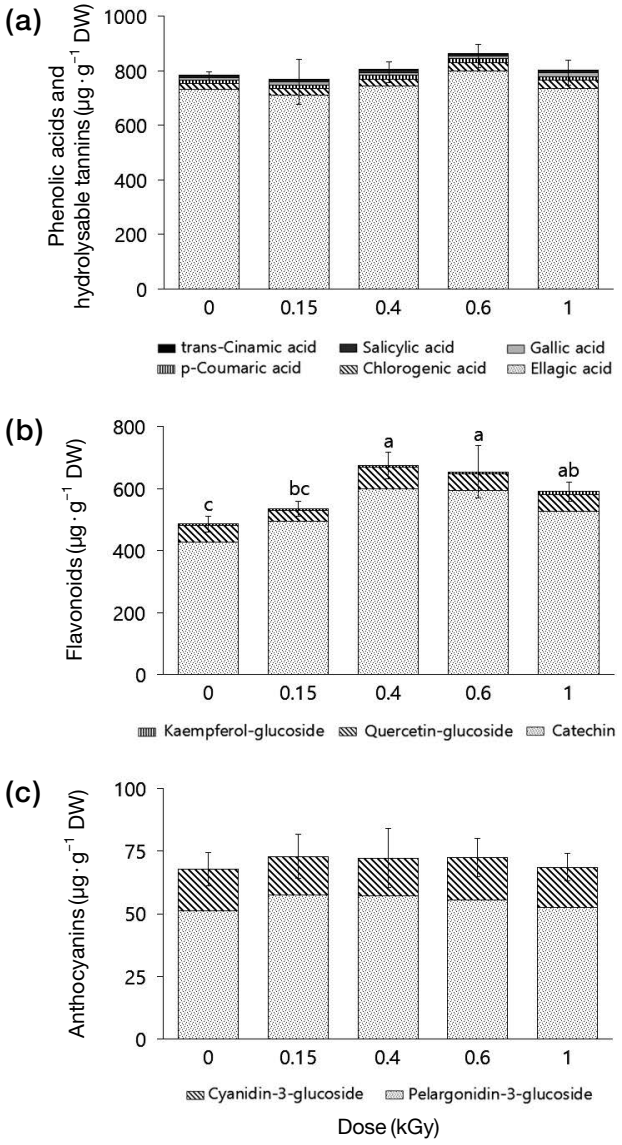

Fig. 2. Polyphenol compound content of e-beam irradiated strawberry; Phenolic acids and hydrolysable tannins (a), flavonoids (b) and anthocyanins (c). [a-c]Each of bars followed by different lowercase letters within different irradiation dose is significantly different at $p<0.05$ based on the results of the Duncan's multiple range test. Data are expressed as the mean ± standard deviation values (n = 3).

합적 기호도 점수가 기록되었으며, 이들은 대조군과 비교하여 유의적으로 낮은 점수를 나타내었다. 이 선량에서 종합적 기호도 감소는 조사로 인한 경도 감소에 기인된 조직감 선호도 감소로 인한 것으로 추정되었다(Fig. 1).

결 론

본 연구는 국외에서 식물위생처리 목적으로 이용되는 전자선 조사가 한국의 주요 수출 품종인 '매향' 딸기의 품질 및 관능평가에 미치는 영향을 살펴보고자 실시되었다. 1 kGy 이하의 전자선 조사는 딸기의 중량손실, 수분 함량, 수분활성도, 가용성 고형분 함량, 색도, phenolic acid와 hydrolysable tannin 및 anthocyanin에 유의한 영향을 미치지 않았지만, 과일의 flavonoid 함량을 증가시키고, 선량에 의존적으로 경도 감소를 초래하였다. 또한, 0.9 kGy 이상의 전자선 조사는 딸기의 관능적 품질에 대한 부정적인 영향을 미쳤다. 이러한 결과는 딸기의 위생처리에 적용되는 전자선이 조사선량에 따라 딸기의 품질을 좌우하는 요인으로 작용할 수 있음을 의미한다. 일반적으로 해외 수출되는 매향 딸기의 경우, 수확 후 최종 소비자에게 도달까지 약 7일 이상의 기간이 소요되므로, 이를 고려하여 1 kGy 이내의 전자선 조사가 딸기의 저장기간 동안 품질에 미치는 영향에 대한 추가적인 연구가 요구되며 이를 통해 기존 화학 훈증제의 대안 방법으로서 전자선 조사의 식물위생처리 최적조건 확립이 필요함을 알 수 있다.

Table 3. Sensory score of e-beam irradiated strawberry

Dose (kGy)	Sensory score			
	Color	Flavor	Texture	Overall acceptance
0	4.2±1.0	4.9±0.3	4.9±0.3[a]	4.8±0.4[a]
0.1	4.0±1.4	4.8±0.4	4.9±0.3[a]	4.7±0.5[a]
0.2	4.3±0.9	4.6±0.5	4.6±0.5[ab]	4.6±0.5[a]
0.3	4.2±1.1	4.7±0.7	4.4±1.0[abc]	4.6±0.8[a]
0.4	4.1±1.4	4.6±0.7	4.3±0.9[abc]	4.3±0.8[ab]
0.5	4.4±1.0	4.4±1.0	3.9±1.4[abc]	4.0±1.2[ab]
0.6	4.1±1.4	4.5±1.0	3.9±1.4[abc]	4.1±1.2[ab]
0.7	4.3±0.9	4.3±0.9	4.0±1.2[abc]	3.9±1.1[ab]
0.8	4.4±0.8	4.5±0.7	3.9±0.9[abc]	4.0±0.9[ab]
0.9	4.1±1.4	4.3±1.3	3.6±1.2[bc]	3.5±1.6[b]
1	4.1±1.2	4.4±1.1	3.4±1.2[c]	3.5±1.5[b]

Data represent mean values ± standard deviation (n = 20)
[a-c]Values followed by different lowercase letters within a column are significantly different at $p<0.05$ based on the results of the Duncan's multiple range test.

사 사

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

참 고 문 헌

농림축산검역본부. 2015. 주요국의 친환경 소독처리 매뉴얼. 농림축산검역본부 식물검역부.

농림축산검역본부. 2019. 식물검역온라인민원시스템. 소독정보.

한국농수산식품유통공사. 2018. 농림수산식품 수출입동향 및 통계.

APHIS. 2006. Treatments for fruits and vegetables. Federal Register (71 FR 4451).

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

Aylangan A, Ic E and Ozyardimci B. 2017. Investigation of gamma irradiation and storage period effects on the nutritional and sensory quality of chickpeas, kidney beans and green lentils. *Food Cont*. **80**:428-434.

Breitfellner F, Solar S and Sontag G. 2002. Effect of gamma irradiation on flavonoids in strawberries. *Eur. Food Res. Technol*. **215**:28-31.

Cannon RJC, Hallman GJ and Blackburn C. 2012. The pros and cons of using irradiation for phytosanitary treatments. *Outlooks Pest Manage*. **23**:108-114.

Cheour F and Mahjoub A. 2003. Delayed ripening and senescence of strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) by gamma irradiation. *Sci. Des. Aliments*. **23**(3):355-366.

Cho SR, Koo HN, Shin S, Kim HK, Park JH, Yoon YS and Kim GH. 2019. Gamma-ray irradiation control of whiteflies *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) and *Trialeurodes vaporariorum* in the exportation of fresh strawberries. *J. Economic Entomol*. **112**(4):1611-1617.

da Silva Aquino KA. 2012. Sterilization by gamma irradiation. pp. 171-206. In: Gamma Radiation (Adrovic F ed.), Intech Co., Rijeka, Croatia.

FAOSTAT. 2016. Food and agriculture division of the United Nation. Retrieved from http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize

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

Forbes-Hernández TY, Gasparrini M, Afrin S, Bompadre S, Mezzetti B, Quiles JL, Giampieri F and Battino M. 2016. The healthy effects of strawberry polyphenols: Which strategy behind antioxidant capacity? *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **56**:S46-S59.

Garcia-Alonso M, RimbachJ G, Rivas-Gonzalo JC and De Pascual-Teresa S. 2004. Antioxidant and cellular activities of anthocyanins and their corresponding vitisins a studies in platelets, monocytes, and human endothelial cells. *J. Agric. Food Chem*. **52**(11):3378-3384.

Grasso EM, Uribe-Rendon RM and Lee K. 2011. Inactivation of Escherichia coli inoculated onto fresh-cut chopped cabbage using electron-beam processing. *J. Food Prot*. **74**:115-118.

Harrison K and Were LM. 2007. Effect of gamma irradiation on total phenolic content yield and antioxidant capacity of Almond skin extracts. *Food Chem*. **102**:932-937.

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

Hussain PR, Meena RS, Dar MA, Mir MA, Shafi F and Wani AM. 2007. Effect of gamma-irradiation and refrigerated storage on mold growth and keeping quality of strawberry (*Fragaria* sp.) cv 'Confitura'. *J. Food Sci. Technol*. **44**(5):513-516.

Hussain PR, Meena RS, Dar MA and Wani AM. 2008. Studies on enhancing the keeping quality of peach (*Prunus persica* Bausch) Cv. Elberta by gamma-irradiation. *Radiat. Phys. Chem*. **77**:473-481.

Jain A, Ornelas-Paz JJ, Obenland D, Rodriguez K and Prakash A. 2017. Effect of phytosanitary irradiation on the quality of two varieties of pummelos (*Citrus maxima* (Burm.) Merr.). *Sci. Hortic*. **217**(15):36-47.

Jiang Y, Yu L, Hu Y, Zhu Z, Zhuang C, Zhao Y and Zhong Y. 2020. The preservation performance of chitosan coating with different molecular weight on strawberry using electrostatic spraying technique. *Int. J. Biol. Macromol*. **151**:278-285.

Jung K, Go SM, Moon BG, Song BS and Park JH. 2016. Comparative study on the sensory properties of Fuji apples and Niitaka pears irradiated by gamma rays, electron beams, or X-rays. *Food Sci. Technol. Res*. **22**(1):23-29.

Kim JY, Bea YM, Hyun JE, Kim EM, Kim JC and Lee SY. 2017. Microbiological quality of dried and powdered foods stored at various relative humidities. *J. East Asian Soc. Diet. Life*. **27**(5):576-582.

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. Technol*. **95**:28-35.

Liu C, Zheng H, Sheng K, Liu W and Zheng L. 2018. Effects of melatonin treatment on the postharvest quality of strawberry fruit. *Postharvest Biol. Technol*. **139**:47-55.

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.

McDonald H, Arpaia ML, Caporaso F, Obenland D, Were L, Rakovski C and Prakash A. 2013. Effect of gamma irradiation treatment at phytosanitary dose levels on the quality of 'Lane Late' navel oranges. *Postharvest Biol. Technol*. **86**:91-99.

Mintier AM and Foley DM. 2006. Electron beam and gamma irradiation effectively reduce *Listeria monocytogenes* populations on chopped romaine lettuce. *J. Food Prot*. **69**:570-574.

Nam HA, Ramakrishnan SR and Kwon JH. 2019. Effects of electron-beam irradiation on the quality characteristics of mandarin oranges (*Citrus unshiu* (Swingle) Marcov) during

storage. *Food Chem*. **286**:338-345.

Ornelas-Paz JJ, Meza MB, Obenland D, Rodriguez Friscia K, Jain A, Thornton S and Prakash A. 2017. Effect of phytosanitary irradiation on the postharvest quality of Seedless Kishu mandarins (*Citrus kinokuni mukakukishu*). *Food Chem*. **230**(1):712-720.

Pombo MA, Dotto MC, Martínez GA and Civello PM. 2009. UV-C irradiation delays strawberry fruit softening and modifies the expression of genes involved in cell wall degradation. *Postharvest Biol. Technol*. **51**:141-148.

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.

Shahbaz HM, Ahn JJ, Akram K, Kim HY, Park EJ and Kwon JH. 2014. Chemical and sensory quality of fresh pomegranate fruits exposed to gamma radiation as quarantine treatment. *Food Chem*. **145**:312-318.

Taheri S, Abdullah TL, Karimi E, Oskoueian E and Ebrahimi M. 2014. Antioxidant capacities and total phenolic contents enhancement with acute gamma irradiation in *Curcuma alismatifolia* (Zingiberaceae) Leaves. *Int. J. Mol. Sci*. **15**(7):13077-13090.

Taiz L and Zeiger E. 2006. Plant Physiology. 4th ed. pp. 197-220. Sinauer Associates Inc., Sunderland.

Tezotto-Uliana JV, Berno ND, Saji FRO and Kluge RA. 2013. Gamma radiation: An efficient technology to conserve the quality of fresh raspberries. *Sci. Hortic*. **164**:348-352.

Yun S, Koo H, Kim HK, Cho S and Kim G. 2015. Effects of electron beam irradiation on six insect pests in different sections of flower boxes for export. *J. Asia-Pac. Entomol*. **18**(3):629-639.

Received: 7 February 2020
Revised: 1 March 2020
Revision accepted: 12 March 2020