JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(1) : 75-82 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.1.75

전자선 조사가 팽이버섯의 품질특성에 미치는 영향

염서준[1,2], 이건아[1], 김상수[1,2], 윤기남[1,3], 송범석[1], 박종흠[1], 김영민[2], 김재경[1,*]

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

Effect of Quality Characteristics of Enoki Mushroom (*Flammulina velutipes*) by Electron-beam Irradiation

Seo-Joon Yeom[1,2], Geon-Ah Lee[1], Sang-Su Kim[1,2], Ki-Nam Yoon[1,3], Beom-Seok Song[1], Jong-Heum Park[1], Young-Min Kim[2] and Jae-Kyung Kim[1,*]

[1]Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, 29 Geumgu-gil, Jeongeup-si, Jeollabuk-do 56212, Republic of Korea
[2]Department of Integrative Food, Bioscience and Biotechnology, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Republic of Korea
[3]Department of Food Science and Technology, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Republic of Korea

Abstract This research was carried out to evaluate on microbiological (total aerobic bacteria, yeast and mold) and physicochemical (color, firmness, water content, water activity and weight loss) characteristics of 10 MeV electron-beam irradiated (0, 0.5, 1, 2 and 3 kGy) enoki mushroom during storage (0, 7, 14, 21 and 28 day) at 4°C with 80% relative humidity. As compared to control, all irradiated samples exhibited dose-dependent decreases of microbial counts up to 28 days, and electron beam irradiation above 2 kGy kept below the microbiological safety threshold. Yellowness (b*) which is associated with discoloration of mushrooms was significantly reduced by electron beam irradiation (2 kGy). Firmness, water content, water activity and weight loss showed no significant difference in all group up to 28 days. Thus, the appropriate electron-beam irradiation dose was confirmed as 2 kGy to inhibit the microbial growth and browning reaction in enoki mushroom.

Key words: Electron-beam irradiation, Enoki mushroom, Microbiological characteristics, Physico-chemical properties

1. 서 론

팽이버섯(*Flammulina velutipes*)은 계통학적으로 주름버섯목(Agricales)에 만가닥버섯과(Physalacriaceae)로 분류되며 자연상태에서 11월부터 다음해 4월까지 활엽수의 고사목 그루터기에서 발생하기 때문에 겨울 버섯이라고도 한다[1]. 팽이버섯은 1987년에 첫 보급된 이후 플라스틱병 재배(1991년), 액체 종균(1997년) 및 자동화시스템(2001년) 등의 재배기술 발전을 통해 대량재배가 가능하게 되어 생산 규모가 크게 향상되었다[2,3]. 2020년에 팽이버섯의 국내 총 생산량은 26,128 (18%)톤으로 느타리버섯 다음으로 많이 재배되고 있으며, 그중 수출량은 COVID-19에 따른 무역량의 감소와 무역비용의 증가로 인해 주요 수출국인 미국(−29.6%), 호주(−11.6%), 캐나다(−2.6%)

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2023 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 9 February 2023 **Revised** 23 February 2023 **Accepted** 8 March 2023

및 네덜란드(−37.6%) 등에서 전년도보다 감소하였음에도 국내 버섯 총 수출량 중 절반 이상인 10,515 (55%)톤을 차지하는 것으로 나타났다[4,5]. 이처럼 버섯 수출산업에서 큰 비중을 가지고 있는 팽이버섯을 원거리 국가에 수출하기 위해서는 최소 20~25일 이상의 신선도를 유지하여야 한다[6,7]. 그러나 팽이버섯은 수분 함량이 높고 호흡작용이 활발하여 미생물의 증식이 용이하므로 중량 감소, 조직감 변화 및 변색 등의 품질 저하가 빠르게 발생하는 문제가 있다[8,9]. 또한 팽이버섯을 생식으로 섭취하는 경우가 증가하고 있어 병원성 미생물에 의한 식중독의 발생이 보고되고 있다[10,11]. 그러므로 수확 후부터 유통단계까지 팽이버섯의 미생물학적 안전성을 확보하고 품질 저하를 방지할 수 있는 적절한 처리기술이 필요한 실정이다. 현재까지 팽이버섯을 포함한 신선 버섯류에는 호흡률과 대사작용을 낮추어 품질을 유지하기 위한 목적으로 저온저장, 기체제어저장(Controlled Atmosphere Storage) 및 가스치환포장(Modified Atmosphere Packaging) 등의 저장기술이 이용되고 있으며, 미생물을 제어하기 위한 목적으로 코팅, 항균제, 펄스전기장, 초음파, 플라즈마 및 식품 조사 등의 수확 후 처리기술이 이용되고 있다[12,13]. 그러나 다발성 구조를 가진 팽이버섯의 경우, 심부 내에 화학물질이 잔류하거나 표면만 살균될 수 있는 문제가 있다[3,13,14].

식품 조사(Food Irradiation)는 높은 투과력을 가지는 ^{60}Co-감마선(1.17 MeV 및 1.33 MeV), 전자선(10 MeV 이하) 및 엑스선(5 MeV 또는 7.5 MeV 이하)을 사용하므로 식품 내부의 미생물까지 완전하게 살균할 수 있는 것으로 알려져 있다[15]. 그중 전자선은 전기적에너지를 이용하므로 동위원소를 사용하는 감마선에 비해 비교적 높은 소비자 수용도를 가지고 있으며, 엑스선(24 kGy h^{-1})에 비해 매우 우수한 조사선량률(8,000 kGy h^{-1})을 가지고 있어 시간과 비용을 절감할 수 있다[16]. 이러한 식품 조사는 조사선량의 조절을 통해 살균, 살충, 발아억제 및 숙도조절을 할 수 있으며, 최대 10 kGy의 조사선량까지는 독성학적 및 영양학적 문제가 발생하지 않는 것으로 알려져 있다[17]. 현재 식품 공전에 따르면 버섯(건조 포함)에 대한 식품 조사는 살충과 숙도조절을 목적으로 감마선, 전자선 및 엑스선 모두 1 kGy 이하의 조사선량이 허가되어 있으나, 아직까지 미생물학적 안전성을 확보하기 위한 살균 기준은 마련되지 않은 상태이다[18]. 현재까지 신선버섯류에 대한 조사처리 연구는 표고버섯[19]과 양송이버섯[20-22] 등에 대해 미생물학적 안전성을 확보하고 품질을 유지할 수 있는 것으로 보고되어 있다. 따라서 본 연구에서는 팽이버섯에 전자선(0, 0.5, 1, 2 및 3 kGy)을 조사하고 최대 28일의 저장기간 동안 미생물학적 및 이화학적 품질 변화를 평가하여 수확 후 처리기술로의 가능성을 확인하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료

본 연구에 사용된 팽이버섯은 그린피스F6호 품종으로 (농)그린합명회사(Cheongdo, Korea)에서 구매하였으며, 각 시료(100 g)는 균일한 형태와 색상을 선별하여 30 kGy 전자선 조사로 멸균한 이축 연신 프로필렌 필름으로 포장하였다. 시료는 전자선 조사 후 항온항습기(TH-DG-150; Jeio-tech Co., Daejeon, Korea)에서 동일한 온습도의 조건(4°C, 상대습도 80%)으로 저장하며 각 실험에 이용하였다.

2.2. 전자선 조사

팽이버섯의 전자선 조사는 한국원자력연구원 첨단방사선연구소(Jeongeup, Korea)의 선형전자선 가속기(UELV-10-10S; 10 MeV, 10 kW, 0.2 mA, Moscow, Russia)를 이용하였으며, 동일한 선량률(0.5 kGy scan^{-1})이 되도록 컨베이어 벨트의 속도를 조절하여 0.5, 1, 2 및 3 kGy로 조사하였다. 실제 흡수선량은 각 시료와 함께 부착된 알라닌 선량계(Alanine Pellet Dosimeters; 5 × 3 mm, 64.5 ± 0.5 mg, Bruker Instruments, Rheinstetten, Germany)를 전자스핀공명분광기(e-scanTM alanine dosimeter reader; Bruker Instruments)로 분석하였고, 오차범위는 5% 이내로 확인되었다.

2.3. 미생물학적 평가

미생물학적 평가는 25 g의 시료와 225 mL의 멸균 인산완충용액을 멸균필터백(BagFilter 400S; Interscience Co., Puycapel, France)에 담고 자동균질기(BagMixer 400w; interscience Co.)로 60초간 균질화한 다음 멸균 인산완충용액으로 10배씩 연속희석한 희석 시료를 이용하여 확인하였다. 총 호기성 미생물은 PCA (plate count agar; Difco, Michigan, USA)에 희석 시료를 접종 후 37°C에서 24시간, 효모 및 곰팡이는 10% L(+)-Tartaric acid (Daejeong Chemicals and Metals Co., Siheung, Korea)를 첨가한 PDA (potato dextrose agar; pH 3.5, Difco)에 접종하고 25°C에서 72시간 배양한 다음 15~300개의 집락이 형성된 배지를

선별하여 log CFU g^{-1}으로 표기하였다

2.4. 색도

색도는 표준흑판과 표준백판(A-210; Konica Minolta)으로 보정한 색차계(CM-5; Konica Minolta Inc., Osaka, Japan)를 이용하였으며, 시료의 갓 부위를 달리하여 L*(명도, lightness), a*(적색도, redness) 및 b*(황색도, yellowness)를 측정하였다.

2.5. 경도

경도는 직경 5 mm의 원통형 probe가 부착된 물성측정기(TA-XT2i; Stable Micro Systems Co., Ltd., Godalming, UK)를 이용하여 확인하였으며, 측정 조건은 2.0 mm s^{-1}의 pre-speed, 0.5 mm s^{-1}의 test-speed, 2.0 mm s^{-1}의 post-speed로 진행하여 시료의 표면으로부터 60% 깊이까지 삽입할 때 저항값을 N으로 나타내었다.

2.6. 수분 함량, 수분 활성도 및 중량 손실률

수분 함량은 상압가열건조법[18]에 따라 미리 건조된 칭량병의 무게를 측정하여 시료 3 g을 담고 열풍건조기(MOV-212F; Panasonic Co., Osaka, Japnan)로 건조(105°C, 5시간)한 다음 데시케이터에서 30분간 방냉 후에 무게를 측정하였다. 시료의 항량은 2시간 건조하고 30분간 방냉을 반복하며 동일한 무게로 측정되었을 때, 아래의 방정식을 이용하여 백분율(%)로 표기하였다.

$$\text{Water content}\,(\%) = ([W_2 - W_3]/[W_2 - W_1]) \times 100$$

W_1: 칭량병의 질량(g)
W_2: 건조 전 시료의 질량(g) + 칭량병의 질량(g)
W_3: 건조 후 시료의 질량(g) + 칭량병의 질량(g)

수분활성도는 시료 3 g을 취하여 용기에 담은 후 수분활성도측정기(Labmaster-aw; Novasina Ag, Lachen, Switzerland)를 사용하여 20°C의 조건으로 측정하였다.

중량 손실률은 각 시료의 초기 중량과 저장기간 후 중량을 측정한 다음 아래의 방정식을 이용하여 백분율(%)로 나타내었다.

$$\text{Wight loss}\,(\%) = ([a - b]/a) \times 100$$

a: 저장 0일차 시료의 무게
b: 각 저장기간(0, 7, 14, 21 및 28일)별 시료의 무게

2.7. 통계처리

통계처리는 통계프로그램(minitab version 20.1.3; Minitab LLC, State College, Pennsylvania, USA)을 사용하여 각 시료간에 유의성을 분산분석(analysis of variance, ANOVA)으로 검증한 후 $p < 0.05$의 수준에서 사후검정(Tukey's test)을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 미생물학적 평가

팽이버섯의 전자선(0, 0.5, 1, 2 및 3 kGy) 조사 후 저장기간(0, 7, 14, 21 및 28일)에 따른 총 호기성 미생물, 효모 및 곰팡이의 변화는 Table 1에 나타냈다. 총 호기성 미생물은 저장 0일차 비조사구에서 3.40 ± 0.07 log CFU g^{-1}으로 나타났으나, 0.5와 1 kGy에 의해 각각 2.82 ± 0.18과 1.77 ± 0.25 log CFU g^{-1}으로 감소하였으며($p < 0.05$), 2 kGy 이상에서 검출한계 미만으로 나타났다. 저장기간이 증가함에 따라 총 호기성 미생물은 유의적으로 증가하여 저장 28일차에 비조사구에서 8.38 ± 0.20 log CFU g^{-1}으로 확인되었으나, 조사구(0.5, 1, 2 및 3 kGy)에서 각각 7.14 ± 0.15, 6.59 ± 0.02, 4.17 ± 0.06 및 2.13 ± 0.15 log CFU g^{-1}으로 감소하였다. 팽이버섯은 원통형의 다발성 구조로 인해 수확 후 잔여 미생물을 제어하는 데 어려움을 가지고 있기 때문에[3], 저장 28일차 비조사구의 총 호기성 미생물은 8.00 log CFU g^{-1} 이상의 높은 오염 수준을 보여주었다. Solberg 등[23]은 미생물학적 안전기준으로 조리되지 않은 식품에서 일반세균수가 6.00 log CFU g^{-1} 이하 수준을 기준치로 제시하였고, 신선 식품에서 일반세균수의 기준 규격이 설정되지 않았으나 7.00~8.00 log CFU g^{-1} 이상의 오염도가 존재할 경우 병원성 미생물이 없을지라도 면역 기능이 저하된 사람에게 식중독을 유발할 수 있으며[10], 높은 미생물 오염도는 버섯에서 미생물학적 안전성뿐만 아니라 키틴을 포함한 세포벽 구성물질의 분해로 연화와 갈변이 발생하기 때문에 품질을 저하시키는 것으로 알려져 있다[11]. 본 연구 결과, 팽이버섯은 2 kGy 이상의 전자선 조사에 의해 최대 28일의 저장기간 동안에도 5.00 log CFU g^{-1} 이하였으며, 표고버섯[19]과 양송이버섯[22]에서도 2 kGy에 의해 저장기간 동안 미생물학적 안전기준치 미만으로 본 연구와 유사한 결과을 나타내었다.

효모 및 곰팡이는 저장 0일차 비조사구에서 2.62 ± 0.06

Table 1. Microbiological evaluation (log CFU g^{-1}) of electron beam irradiated *Flammulina velvtipes* during storage

Storage (Day)	Irradiation dose (kGy)				
	0	0.5	1	2	3
Total aerobic bacteria					
0	3.40 ± 0.07^{aE}	2.82 ± 0.18^{bE}	1.77 ± 0.25^{cD}	N.D	N.D
7	5.37 ± 0.10^{aD}	4.29 ± 0.17^{bD}	3.30 ± 0.12^{cC}	N.D	N.D
14	6.45 ± 0.13^{aC}	5.49 ± 0.19^{bC}	4.83 ± 0.48^{bB}	2.80 ± 0.46^{cB}	N.D
21	7.35 ± 0.05^{aB}	6.27 ± 0.13^{bB}	5.22 ± 0.03^{cB}	3.91 ± 0.03^{dA}	1.80 ± 0.18^{eB}
28	8.38 ± 0.20^{aA}	7.14 ± 0.15^{bA}	6.59 ± 0.02^{cA}	4.17 ± 0.06^{dA}	2.13 ± 0.15^{eA}
Yeasts and molds					
0	2.62 ± 0.06^{aD}	2.03 ± 0.14^{bD}	1.59 ± 0.14^{cD}	N.D	N.D
7	3.74 ± 0.30^{aC}	3.18 ± 0.16^{bC}	2.22 ± 0.19^{cC}	N.D	N.D
14	4.12 ± 0.10^{aC}	3.86 ± 0.02^{aB}	2.80 ± 0.17^{bB}	1.74 ± 0.20^{cC}	N.D
21	5.04 ± 0.05^{aB}	4.09 ± 0.09^{bB}	3.15 ± 0.06^{cB}	2.95 ± 0.02^{cB}	1.79 ± 0.28^{dB}
28	6.02 ± 0.01^{aA}	5.96 ± 0.08^{aA}	4.70 ± 0.04^{bA}	3.35 ± 0.04^{cA}	2.31 ± 0.11^{dA}

Mean values (n = 3) with different superscript $^{(a\sim e)}$ within the same row are significantly different at $p < 0.05$.
Mean values (n = 3) with different superscript $^{(A\sim E)}$ within the same column are significantly different at $p < 0.05$.
N.D = not detected, Detection limits were < 1 log CFU g^{-1}.

log CFU g^{-1}으로 나타났으나, 0.5와 1 kGy에 의해 각각 2.03 ± 0.14와 1.59 ± 0.14 log CFU g^{-1}으로 감소하였으며 ($p < 0.05$), 2 kGy 이상부터는 검출한계 미만으로 나타났다. 저장기간이 증가함에 따라 효모 및 곰팡이는 유의적으로 증가하여 저장 28일차에는 비조사구에서 6.02 ± 0.01 log CFU g^{-1}으로 나타났으나, 조사구 (0.5, 1, 2 및 3 kGy)에서 각각 5.96 ± 0.08, 4.70 ± 0.04, 3.35 ± 0.04 및 2.31 ± 0.11 log CFU g^{-1}으로 감소되었다. Venturini 등[8]의 연구에 따르면 22종의 야생 및 재배된 신선 버섯에서 효모와 곰팡이 수가 평균 3.20~3.70 log CFU g^{-1}의 수준을 보고하였는데, 본 연구 결과 팽이버섯은 2 kGy 이상의 전자선 조사에 의해서 최대 28일까지 신선 버섯과 유사한 수준의 효모 및 곰팡이 수를 유지하는 것으로 확인되었다. 따라서 팽이버섯은 2 kGy 이상의 전자선 조사에 의해 최대 28일까지 미생물학적 안전성을 확보할 수 있는 것으로 확인되었다.

3.2. 색도

팽이버섯의 전자선 조사 후 저장기간에 따른 색도 변화는 Table 2에 나타냈다. 팽이버섯은 저장 0일차 전자선 조사에 의해 명도와 황색도가 유의적으로 감소하였으며, 최대 28일 저장기간 동안 모든 처리구는 명도가 감소하고 적색도와 황색도가 증가하여 갈변이 진행되는 것을 확인하였다. 그러나 저장 28일차 비조사구에 비해 1 kGy는 명도와 적색도가 증가하고 황색도가 감소하였으며 ($p < 0.05$), 2 kGy는 황색도가 유의적으로 감소하였으나, 3 kGy는 황색도가 증가하였다 ($p < 0.05$). Mami 등[24]과 Kwon 등[25]의 연구에 따르면 각각 전자선과 감마선 조사된 양송이버섯은 저장기간의 증가에 따라 명도가 감소하고 적색도와 황색도가 증가하여 본 연구 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 이러한 갈변은 저장기간 동안 미생물, malondialdehyde, 총 페놀 함량 및 산화효소 (polyphenol oxidase, peroxidase)의 증가와 항산화효소 (catalase, superoxide dismutase)의 감소에 기인한 것으로 알려져 있다[26]. 한편 식품 조사는 버섯에서 미생물과 polyphenol oxidase를 감소시켜 저장기간 동안 갈변을 지연할 수 있는 것으로 보고되었으나[27-29], 높은 조사선량에서는 조직의 손상을 유발하거나 항산화효소를 감소시켜 변색이 발생할 수 있다[30]. 그러므로 본 연구 결과, 팽이버섯은 1과 2 kGy의 전자선 조사에 의해 최대 28일 저장기간 동안 갈변 현상을 저해할 수 있는 것으로 확인되었다.

3.3. 경도

팽이버섯의 전자선 조사 후 저장기간에 따른 경도 변화는 Table 3에 나타냈다. 경도는 전자선 조사에 의한 변화가

Table 2. Hunter's color changes of electron beam irradiated *Flammulina velvtipes* during storage

Storage (Day)	Irradiation dose (kGy)				
	0	0.5	1	2	3
L*					
0	85.95 ± 1.97^{aA}	84.71 ± 1.99^{abA}	84.42 ± 1.55^{abA}	83.55 ± 1.49^{bA}	83.13 ± 1.40^{bA}
7	83.05 ± 0.94^{B}	83.25 ± 0.93^{A}	81.20 ± 3.69^{B}	81.62 ± 1.68^{AB}	82.48 ± 1.53^{AB}
14	80.55 ± 1.70^{BC}	80.54 ± 1.73^{B}	81.88 ± 2.03^{AB}	81.22 ± 1.84^{AB}	79.63 ± 2.82^{BC}
21	79.73 ± 1.72^{C}	80.18 ± 2.01^{BC}	81.00 ± 2.14^{B}	79.96 ± 2.97^{B}	79.40 ± 3.56^{C}
28	76.73 ± 2.97^{bD}	78.24 ± 1.22^{abC}	79.86 ± 2.17^{aB}	76.91 ± 1.71^{bC}	77.12 ± 1.55^{bC}
a*					
0	-1.50 ± 0.13^{C}	-1.54 ± 0.07^{C}	-1.56 ± 0.09^{C}	-1.56 ± 0.06^{C}	-1.54 ± 0.07^{C}
7	-1.40 ± 0.14^{BC}	-1.46 ± 0.06^{BC}	-1.45 ± 0.17^{BC}	-1.41 ± 0.08^{BC}	-1.40 ± 0.05^{BC}
14	-1.31 ± 0.18^{BC}	-1.38 ± 0.17^{BC}	-1.40 ± 0.11^{B}	-1.39 ± 0.14^{B}	-1.36 ± 0.10^{B}
21	-1.26 ± 0.19^{B}	-1.29 ± 0.20^{B}	-1.34 ± 0.08^{B}	-1.27 ± 0.18^{B}	-1.16 ± 0.21^{A}
28	-0.78 ± 0.18^{aA}	-0.85 ± 0.21^{abA}	-1.08 ± 0.09^{cA}	-0.97 ± 0.09^{abcA}	-1.03 ± 0.16^{bcA}
b*					
0	10.47 ± 0.81^{aC}	9.71 ± 0.80^{abC}	10.72 ± 1.19^{aB}	10.38 ± 0.81^{abC}	9.34 ± 0.67^{bD}
7	10.82 ± 0.61^{C}	10.87 ± 0.77^{BC}	10.72 ± 0.74^{B}	10.64 ± 0.59^{C}	10.84 ± 0.60^{C}
14	11.92 ± 0.72^{aB}	11.36 ± 0.96^{abB}	10.88 ± 0.75^{bB}	11.14 ± 0.33^{abBC}	11.13 ± 0.78^{abC}
21	12.30 ± 0.98^{abB}	11.70 ± 0.88^{bcB}	11.08 ± 0.59^{cAB}	11.59 ± 0.88^{bcB}	13.21 ± 0.98^{aB}
28	13.67 ± 0.53^{abA}	13.12 ± 1.20^{bcA}	11.95 ± 0.36^{dA}	12.66 ± 0.52^{cdA}	14.37 ± 0.40^{aA}

Mean values (n = 10) with different superscript $^{(a\sim d)}$ within the same row are significantly different at $p < 0.05$.
Mean values (n = 10) with different superscript $^{(A\sim D)}$ within the same column are significantly different at $p < 0.05$.

Table 3. Firmness changes (N) of electron beam irradiated *Flammulina velvtipes* during storage

Storage (Day)	Irradiation dose (kGy)				
	0	0.5	1	2	3
0	15.23 ± 2.31^{A}	15.63 ± 1.36^{A}	15.10 ± 2.34^{A}	15.35 ± 1.74^{A}	15.27 ± 1.70^{A}
7	14.61 ± 2.18^{AB}	14.30 ± 2.99^{AB}	14.00 ± 1.35^{AB}	14.23 ± 1.99^{AB}	14.37 ± 1.43^{AB}
14	13.60 ± 1.50^{AB}	13.52 ± 2.08^{AB}	13.71 ± 2.00^{AB}	14.23 ± 2.10^{AB}	14.01 ± 1.72^{AB}
21	12.43 ± 1.07^{BC}	12.14 ± 1.10^{B}	12.02 ± 1.73^{BC}	12.52 ± 2.43^{B}	12.46 ± 1.33^{BC}
28	11.31 ± 1.64^{C}	11.89 ± 1.60^{B}	11.45 ± 1.20^{C}	11.97 ± 1.11^{B}	11.65 ± 2.36^{C}

Mean values (n = 10) with different superscript $^{(A\sim C)}$ within the same column are significantly different at $p < 0.05$.

나타나지 않았으나 ($p > 0.05$), 저장기간이 증가함에 따라서 비조사구와 조사구 모두 경도가 유의적으로 감소하였다. Duan 등[31]은 양송이버섯에서 전자선 조사에 의해 경도의 증가를 확인하였으며, Xing 등[32]은 느티만가닥버섯에서 감마선 조사에 의해 경도의 유의적인 차이가 발생하지 않았고, Akarm 등[33]은 표고버섯에서 감마선 조사에 의해 경도가 감소하는 것을 보고하여, 식품 조사에 의한 경도 변화는 버섯의 종류와 조사조건 등에 따라 차이를 나타내었다. 버섯의 경도는 소비자가 판단하는 주요 품질 요인 중 하나이지만, 수확부터 소비시점까지 미생물 증식과 자가분해 효소로 인한 연화가 발생하는 것으로 알려져 있다[34]. 따라서 본 연구 결과에서 팽이버섯의 경도는 전자선 조사에 의한 영향은 없었으나, 저장기간의 증가에 따라 미생물 증식과 자가분해 효소에 의해 팽압 감소와 결합조

Table 4. Water content (%), water activity (A_w) and weight loss (%) changes of electron beam irradiated *Flammulina velvtipes* during storage

Storage (Day)	Irradiation dose (kGy)				
	0	0.5	1	2	3
Water content (%)					
0	88.32 ± 0.43	88.36 ± 0.27	88.00 ± 0.42	88.46 ± 0.10	88.43 ± 0.63
7	87.88 ± 0.57	87.91 ± 0.43	87.49 ± 0.34	88.16 ± 0.20	87.83 ± 0.14
14	87.90 ± 0.07	87.63 ± 0.33	87.71 ± 0.64	88.13 ± 0.64	87.43 ± 0.47
21	87.89 ± 0.37	87.54 ± 1.20	87.52 ± 0.11	87.81 ± 1.01	87.36 ± 0.33
28	87.56 ± 0.34	87.20 ± 0.63	87.61 ± 0.36	87.42 ± 0.59	87.71 ± 1.10
Water activity (A_w)					
0	0.942 ± 0.007	0.945 ± 0.004	0.944 ± 0.006	0.940 ± 0.008	0.937 ± 0.013
7	0.941 ± 0.001	0.937 ± 0.008	0.941 ± 0.003	0.942 ± 0.002	0.935 ± 0.007
14	0.943 ± 0.002	0.941 ± 0.001	0.942 ± 0.004	0.941 ± 0.002	0.941 ± 0.003
21	0.944 ± 0.008	0.945 ± 0.002	0.945 ± 0.003	0.943 ± 0.001	0.944 ± 0.002
28	0.942 ± 0.002	0.941 ± 0.002	0.939 ± 0.003	0.940 ± 0.003	0.940 ± 0.002
Weight loss (%)					
0	–	–	–	–	–
7	0.10 ± 0.00^{D}	0.10 ± 0.01^{D}	0.10 ± 0.00^{D}	0.10 ± 0.01^{D}	0.10 ± 0.01^{D}
14	0.14 ± 0.01^{C}	0.15 ± 0.00^{C}	0.15 ± 0.01^{C}	0.14 ± 0.01^{C}	0.15 ± 0.01^{C}
21	0.22 ± 0.01^{B}	0.20 ± 0.02^{B}	0.21 ± 0.00^{B}	0.22 ± 0.01^{B}	0.21 ± 0.01^{B}
28	0.59 ± 0.01^{A}	0.58 ± 0.01^{A}	0.59 ± 0.01^{A}	0.60 ± 0.02^{A}	0.58 ± 0.01^{A}

Mean values (n = 3) with different superscript $^{(A\sim D)}$ within the same column are significantly different at $p < 0.05$.

직 분해가 발생하여 경도가 감소하는 것으로 사료된다.

3.4. 수분 함량, 수분 활성도, 중량 손실률

팽이버섯의 전자선 조사 후 저장기간에 따른 수분 함량, 수분 활성도 및 중량 손실률 변화는 Table 4에 나타냈다. 수분 함량과 수분 활성도는 전자선 조사에 의해 유의적인 변화가 나타나지 않았으며 저장기간에 따른 차이도 나타나지 않았다($p > 0.05$). 반면 중량 손실률은 전자선 조사에 의한 변화는 발견되지 않았으나, 저장기간이 증가함에 따라 유의적으로 증가하는 경향이 나타났다. 일반적으로 신선한 버섯은 중량 대비 85~95%의 수분 함량을 가지는 것으로 알려졌는데[14], 버섯을 재배한 후 초기 중량에 비해 약 3~6% 이상의 수분이 손실되었을 경우에는 상업적인 상품가치성이 없다고 판단한다[6,8]. 이러한 수분 함량과 중량의 감소는 대개 높은 호흡률에 의한 수분 증발과 CO_2의 손실로 발생하게 되는데, 식품 조사는 산소의 확산 증가와 세포벽의 분리 억제를 통해 호흡을 감소시켜 수분과 중량 손실을 최소화하므로 노화과정을 지연시키는 것으로 알려져 있다[19,35]. 팽이버섯은 수분 함량과 수분 활성도가 최대 28일 저장기간 동안 비조사구와 조사구 간의 유의적인 차이가 발생하지 않았으며, 중량 손실률 또한 초기 중량에 비해 1% 이하로 확인되어 상업적인 상품가치성에 영향을 미치지 않는 수준임을 확인하였다. 따라서 본 연구 결과에서 팽이버섯은 최대 3 kGy 전자선 조사와 최대 28일의 저장기간 동안 수분 함량, 수분 활성도 및 중량 손실률의 변화에 특별한 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 신선 식품인 팽이버섯의 미생물학적 안전성과 저장성을 증진시키기 위한 기술로 전자선을 조사하여 조사선량(0, 0.5, 1, 2 및 3 kGy)과 저장기간(0, 7, 14, 21 및 28일)에 따른 미생물학적 및 이화학적 품질 변화에 미치는 영향을 평가하였다. 총 호기성 미생물, 효모 및 곰팡이는 2 kGy 이상의 전자선 조사에 의해 최대 28일 저장기간

동안 미생물 증식을 억제하는 데 효과적이었다. 한편 황색도는 3 kGy에서 증가하였으나 ($p > 0.05$), 2 kGy에서는 유의적으로 감소하여 갈변을 지연시킬 수 있을 것으로 판단되었다. 경도, 수분 함량, 수분 활성도 및 중량 손실률의 변화는 모든 처리구에서 품질에 영향을 미치지 않는 수준으로 확인되었다. 따라서 모든 품질특성 평가를 종합하였을 때, 팽이버섯에 2 kGy 전자선 조사는 최대 28일 저장기간 동안 미생물학적 안전성을 확보하고 품질을 유지할 수 있는 최적 선량으로 사료된다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국원자력연구원의 주요사업(523210-23)에 의해 수행되었으며, 그 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Hong HS, Kang NK, Lee JH, Choi YM and Nam JS. 2022. Nutritional Components and Antioxidant Activities of solvent Extracts from White and Brown *Flammulina velutipes*. *Kor. J. Food Nutr.* **35**(5):378-388. https://doi.org/10.9799/ksfan.2022.35.5.378
2. Yoo YB, Oh MJ, Oh YL, Shin PG, Jang KY and Kong WS. 2016. Development trend of the mushroom industry. *J. Mushrooms* **14**(4):142-154. https://doi.org/10.14480/JM.2016.14.4.142
3. Lee HD, Yu BK, Seo DS, Kim SR, Lee CJ and Kwak KS. 2021. Efficacy of *Listeria Innocua* Reduction on Enoki Mushrooms by Utilization of an Air Sterilization Device. *J. Mushrooms* **19**(3):210-215. https://doi.org/10.14480/JM.2021.19.3.210
4. KATI (Korea Agro-Fisheries & Food Distribution Corporation). 2020. Export statistics of Enoki mushroom. https://www.kati.net/product/basisInfo.do?lcdCode=MD163
5. RDA (Rural Development Administration). 2020. Production statistics of mushroom. https://www.nihhs.go.kr/farmer/statistics/statistics.do?t_cd=0206
6. Choi JW, Lim SY, Lee JH, Eum HL, Lee JS, Park HS, Im JH and Do KR. 2022. Developed Vacuum Film Packaging Method Maintains Quality of Enoki Mushrooms (*Flammulina velutipes*) during Simulated Vessel Export to Vietnam. *Kor. J. Packag. Sci. Tech.* **28**(2):133-142. https://doi.org/10.20909/kopast.2022.28.2.133
7. Choi JW, Jhune CS, Hong YP, Cho MA and Kim JK. 2012. Effect of 1-methylcyclopropene and microperforated film packaging on postharvest quality of king oyster mushroom (*Pleurotus eryngii*). *J. Mushrooms* **10**(4):191-197. https://doi.org/10.14480/JM.2012.10.4.191
8. Venturini ME, Reyes JE, Rivera CS, Oria R and Blanco D. 2011. Microbiological quality and safety of fresh cultivated and wild mushrooms commercialized in Spain. *Food Microbiol.* **28**(8):1492-1498. https://doi.org/10.1016/j.fm.2011.08.007
9. Choi JW, Kim SY, Choi MH, Lim SY, Yang HJ, Shin IS and Hong YP. 2020. Patent trend analysis for postharvest technology of fresh mushrooms. *J. Mushrooms* **18**(3):280-285. https://doi.org/10.14480/JM.2020.18.3.280
10. Donnelly CW and Briggs EH. 1986. Psychrotrophic Growth and Thermal Inactivation of *Listeria monocytogenes* as a Function of Milk Composition. *J. Food Prot.* **49**(12):994-998. https://doi.org/10.4315/0362-028X-49.12.994
11. Jiang T, Feng L and Li J. 2012. Changes in microbial and postharvest quality of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) treated with chitosan-glucose complex coating under cold storage. *Food Chem.* **131**(3):780-786. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.08.087
12. Choi JW, Yoon YJ, Lee JH, Kim CK, Hong YP and Shin IS. 2018. Recent research trends of post-harvest technology for king oyster mushroom (*Pleurotus eryngii*). *J. Mushrooms* **16**(3):131-139. https://doi.org/10.14480/JM.2018.16.3.131
13. Castellanos-Reyes K, Villalobos-Carvajal R and Beldarrain-Iznaga T. 2021. Fresh Mushroom Preservation Techniques. *Foods* **10**(9):2126. https://doi.org/10.3390/foods10092126
14. Fernandes A, Antonio AL, Oliveria MBPP, Martins A and Ferreira ICFR. 2012. Effect of gamma and electron beam irradiation on the physico-chemical and nutritional properties of mushrooms: A review. *Food Chem.* **135**(2):161-650. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.04.136
15. Lung HM, Cheng YC, Chang YH, Huang YH, Yang BB and Wang CY. 2015. Microbial decontamination of food by electron beam irradiation. *Trends Food Sci. Technol.* **44**(1):66-78. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.03.005
16. Song BS, Lee YJ, Moon BG, Go SM, Park JH, Kim JK, Jung K, Kim DH and Ryu SR. 2016. Comparison of bactericidal efficiency of 7.5 MeV X-rays, gamma-rays, and 10 MeV e-beams. *Radiat. Phys. Chem.* **125**:106-108. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.03.022
17. Jung YK, Lee JY, Kang TS, Jo CH, Lee JH, Choi JD and Kwon KS. 2016. Detection of irradiated food using photostimulated luminescence and thermoluminescence. *Kor. J. Food Sci. Technol.* **48**(5):399-404. https://doi.org/10.9721/KJFST.2016.48.5.399
18. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS). 2022. Food code. No. 2022-84. Available online: https://www.foodsafetykorea.go.kr/fsd/#/ext/Document/FC
19. Jiang T, Luo S, Chen Q, Shen L and Ying T. 2010. Effect of integrated application of gamma irradiation and modified atmosphere packaging on physicochemical and microbiological properties of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*). *Food Chem.* **122**(3):761-767. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.03.050
20. Koorapati A, Foley D, Pilling R and Prakash A. 2004. Electron-beam Irradiation Preserves the Quality of White Button Mush-

room (*Agaricus bisporus*) Slices. *J. Food Sci.* **69**(1):25-29. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb17882.x

21. Wani A, Hussanin PR, Meena RS, Dar MA and Mir MA. 2009. Effect of gamma irradiation and sulphitation treatments on keeping quality of white button mushroom *Agaricus bisporus* (*J. Lge*). *Int. J. Food Sci. Nutr*. **44**(5):967-973. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01773.x
22. Gautam S, Sharma A and Thomas P. 1998. Gamma irradiation effect on shelf-life, texture, polyphenol oxidase and microflora of mushroom (*Agaricus bisporus*). *Int. J. Food Sci. Nutr*. **49**(1):5-10. https://doi.org/10.3109/09637489809086398
23. Solberg M, Buckalew JJ, Chen CM, Schaffner DW, O'Neil K, Mcdoewll J, Post LS and Boderck M. 1990. Microbiological safety assurance system for foodservice facilities. *Food Technol*. **44**(12):68-73.
24. Mami Y, Peyvast G, Ziaie F, Ghasemnezhad M and Salmanpour V. 2014. Improvement of Shelf Life and Postharvest Quality of White Button Mushroom by Electron beam irradiation. *J. Food Process. Preserv*. **38**(4):1673-1681. https://doi.org/10.1111/jfpp.12129
25. Kwon JH, Byun MW and Cho HO. 1990. Browning and Color Characteristics in Msuhrooms (*Agaricus bisporus*) As Influenced by Ionizing Energy. *Kor. J. Food Sci. Technol*. **22**(5):509-513.
26. Fu Y, Yu Y, Tan H, Wang B, Peng W and Sun Q. 2022. Metabolomics reveals dopa melanin involved in the enzymatic browning of the yellow cultivars of East Asian golden needle mushroom (*Flammulina filiformis*). *Food Chem*. **370**(15):131295. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131295
27. Fernandes A, Antonio AL, Barreira JCM, Oliveira MBPP, Martins A and Ferreira ICFR. 2012. Effect of gamma irradiation on physical parameters of *Lactarius deliciosus* wild edible mushrooms. *Postharvest Biol. Technol*. **74**:79-84. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.06.019
28. Hou L, Lin J, Ma L, Qu S, Li H and Jiang N. Effect of ^{60}CO gamma irradiation on postharvest quality and selected enzyme activities of *Volvariella volvacea*. *Sci. Hortic*. **235**:382-390. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.074
29. Dong S, Guo J, Yu J, bai J, Xu H and Li M. 2022. Effects of electron-beam generated X-ray irradiation on the postharvest storage quality of *Agaricus bisporus*. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol*. **80**:103079. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103079
30. Lin X and Sun DW. Research advances in browning of button mushroom (*Agaricus bisporus*) Affecting factors and controlling methods. *Trends Food Sci Technol*. **90**:63-75. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.05.007
31. Duan Z, Xing Z, Shao Y and Zhao X. 2010. Effect of Electron Beam Irradiation on Postharvest Quality and Selected Enzyme Activities of the White Button Mushroom, *Agaricus bisporus*. *J. Agric. Food Chem*. **58**(17):9617-9621. https://doi.org/10.1021/jf101852e
32. Xing Z, Wang Y, Feng Z, Zhao Z and Liu X. 2007. Effect of ^{60}Co-irradiation on Postharvest Quality and Selected Enzyme Activities of *Hypsizygus marmoreus* Fruit Bodies. *J. Agric. Food Chem*. **55**(20):8126-8132. https://doi.org/10.1021/jf070941w
33. Akarm K, Ahn JJ, Baek JY, Yoon SR and Kwon JH. 2013. Absorbed-dose estimation and quality attributes of gamma-irradiated fresh shiitake mushrooms. *J. Sci. Food Agric*. **93**(3):634-640. https://doi.org/10.1002/jsfa.5875
34. Zivanovic S, Buescher RW and Kim KS. 2000. Textural Changes in Mushrooms (*Argricus bisporus*) Associated with Tissue Ultrastructure and Composition. *J. Food Sci*. **65**(8):1404-1408. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb10621.x
35. Wahid M and Kovacs E. 1980. Shelf-life extension of mushrooms (*Agaricus bisporus*) by gamma irradiation. *Acta Aliment*. **9**(4):357-366.