

이온화에너지를 이용한 수출용 큰느타리버섯의 긴수염버섯파리 방제

안현모 · 조선란 · 구현나 · 김길하*
충북대학교 식물의학과

Control of *Lycoriella ingenua* (Diptera: Sciaridae) in Exports of King Oyster Mushroom, *Pleurotus eryngii*, using Ionizing Radiation

Hyeonmo Ahn, Sun-Ran Cho, Hyun-Na Koo and Gil-Hah Kim*

Department of Plant Medicine, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

ABSTRACT: King oyster mushrooms are one of the major fresh agricultural products which their exports are increasing every year in Korea. *Lycoriella ingenua*, is notorious insect pest in agriculture, especially in mushroom production. Larvae of *L. ingenua* cause mainly direct crop damage and adults are vectors of several dangerous fungal pathogens. In this study, the effects of electron beam, X-ray, and gamma-ray irradiation on the development and reproduction of *L. ingenua* were evaluated. In addition, to find the optimal dose to control *L. ingenua* in a box filled with king oyster mushrooms, an empirical experiment was conducted for each radiation. As a result, the development and reproduction of *L. ingenua* were inhibited at 50 Gy for all electron beam, X-ray, and gamma-ray irradiation. Additionally, at the top, middle, and bottom of the export box filled with king oyster mushrooms, the development and reproduction of *L. ingenua* were inhibited by electron beam with 150 Gy, X-ray with 100 Gy, and gamma-ray with 50 Gy. These results can be provided as basic data for establishing an integrated quarantine management system when exporting mushrooms. It will also contribute to the safety of agricultural products and the strengthening of export competitiveness.

Key words: Ionizing radiation, Mushrooms, *Lycoriella ingenua*, Plant quarantine

초 록: 국내 큰느타리버섯은 매년 수출이 증가하고 있는 주요 신선 농산물 중 하나이다. 긴수염버섯파리는 농업, 특히 버섯생산에 피해를 주는 악명높은 해충이다. 긴수염버섯파리의 유충은 주로 농작물에 직접 피해를 유발하고 성충은 몇몇 위험한 진균 병원체의 매개체 역할을 한다. 본 연구에서는 전자빔, 엑스선, 그리고 감마선의 조사선량에 따른 긴수염버섯파리의 발육 및 생식에 미치는 영향을 평가했다. 또한 큰느타리버섯이 채워진 박스 안에서 긴수염버섯파리를 제어할 수 있는 최적선량을 찾기 위해 방사선 및 에너지량에 따른 실증실험을 수행하였다. 그 결과 전자빔, 엑스선, 감마선 모두 50 Gy에서 긴수염버섯파리의 발육 및 생식이 억제되었다. 또한 큰느타리버섯이 채워진 수출용 박스 상, 중, 하 위치에서 긴수염버섯파리는 전자빔 150 Gy, 엑스선 100 Gy, 그리고 감마선 50 Gy에서 발육 및 생식을 억제하는 것으로 나타났다. 이러한 결과들은 수출 검역 통합관리 시스템 구축의 기초자료로 제공될 수 있다. 또한 농산물의 안전성 확보와 수출경쟁력 강화에 기여하리라 사료된다.

검색어: 이온화에너지, 버섯, 긴수염버섯파리, 식물검역

긴수염버섯파리(*Lycoriella ingenua*)는 파리목(Diptera) 검정날개버섯파리과(Sciaridae)에 속하는 해충으로 국내 큰느타리버섯, 느타리버섯, 양송이, 표고버섯 등과 같은 버섯 재배지에서 지속적으로 피해를 주고 있는 해충이다(Kim et al., 1999;

Lee et al., 1999; Lee et al., 2015; Kang et al., 2016; Lee et al., 2016). 긴수염버섯파리의 발육단계별 기간은 온도에 따라서 차이가 있지만, 24°C에서 알 5.4일, 유충 13.5일, 번데기 4.6일로 총 23~24일이 소요된다(Lee et al. 2015). 일반적으로 긴수염버섯파리 성충은 흑색 또는 암갈색을 띠고 3~4 mm 정도의 크기이며, 수컷(2.44~3.10 mm)보다 암컷(3.40~3.77 mm)이 크다(Lee et al., 1999). 긴수염버섯파리 유충은 썩은 유기물, 식물, 그리고 곰팡이 균사를 섭식한다. 보통 식물의 뿌리를 가해

*Corresponding author: khkim@cbnu.ac.kr

Received July 20 2023; Revised November 8 2023

Accepted November 23 2023

하기 때문에 대부분 원예 작물의 해충으로 인식되며(Menzel et al., 1997), 우리나라뿐만 아니라 호주, 미국, 러시아, 영국의 버섯 산업에 경제적 손실을 일으키고 있다. 긴수염버섯파리로 인한 미국의 버섯생산량 손실은 전체 생산의 20%에 이르고, 양송이버섯도 17% 정도가 감소될 정도로 버섯재배 농가에서는 큰 문제가 되는 해충이다(Mazin et al., 2018). 이 해충은 뿌리이리응애(*Hypoaspis miles*)와 곤충병원성 선충인 *Steinernema feltiae* (원충목)를 이용하여 생물적 방제를 하거나(Jess and Schweizer, 2009), 유충과 성충을 대상으로 화학적 방제제인 살충제를 처리하기도 한다(Kim et al., 2001). 하지만, 2019년 1월부터 시행되는 ‘농약 허용물질 목록 관리제도(PLS, Positive List System)’로 인해 살충제 사용에 제한이 있다. 또 다른 화학적 방제로는 농림축산검역본부에서 시행하는 methyl bromide와 같은 훈증제 등이 있다. Methyl bromide는 오존층을 파괴하는 오염물질로 지정되었고, 인체에 치명적인 위해물질로 보고되어 2006년 몬트리올 의정서에 의해 사용이 금지되었다(United Nations Environment Programme, 2006). 이러한 화학적 방제를 대체할 방법으로 물리적 방법이 필요한 실정이다.

물리적 방법에는 저온·고온처리, 환경조절열처리, 극초단파, 이온화에너지인 감마선(gamma-ray), 엑스선(X-ray), 전자빔(electron beam) 등이 있다. 이 중에서 이온화에너지는 에너지가 식품을 통과하여 열에너지로 소멸하므로 화학적 방제와 다르게 잔류물질이 남지 않고 처리시간도 짧다는 장점이 있다(Osouli et al., 2013). 이온화에너지의 식품조사 연구는 Roentgen (1895)과 Becquerel (1896)이 X선과 자연방사능을 발견하면서 시작되었다. 이후 이온화에너지를 이용하여 담배 해충을 제어하는 데 사용되었고 조사선량에 따라 곤충의 생식에 영향을 주는 것을 밝혀냈다(Hunter, 1912; Morgan and Runner, 1913; Runner, 1916). 해충 방제 외에 향신료를 소독하거나 멸균하는 데 사용되고, 감자 싹의 발아를 억제하여 저장성을 증가시키는 데 사용되기도 하였다(Diehl, 1995; Kume et al., 2009). 해충 소독에 이용되는 이온화에너지는 저선량에서는 농산물 품질에 영향이 없지만 고선량(600 ~ 1000 Gy)에서는 영향을 받을 수 있다(Follett and Lower, 2000). 또한 상품의 화학적 구조, 숙성 속도, 영양 성분, 색상, 질감, 향 등에 영향을 줄 수 있다. 하지만 딸기, 사과, 파파야, 복숭아, 감자 등 몇몇 농산물은 조사선량 1000 Gy 이하에서는 영양학적으로 최소한의 영향만 받는다(Barkai-Golan and Follett, 2017). 그러므로 해충의 생식을 억제하면서 상품 품질에 미치는 영향은 최소화하는 적정선량을 찾아야 농산물 품질에 영향이 없으며 이온화에너지 처리시간을 감소시켜 비용을 절감할 수 있다. 또한, 긴수염버섯파리와 같은 파리목 해충들은 검역 관리 및 방제에 methyl bromide의

사용을 공시하고 있지만 국제식물보호협약, 국제식량농업기구 및 국제원자력기구에서는 세계 각국에 이온화에너지 조사 기술을 식물위생수단의 대안 방법의 하나로 권고하고 있다.

따라서 본 연구에서는 검역처리기법으로 사용되는 전자빔, 엑스선, 그리고 감마선을 사용하여 긴수염버섯파리의 발육단계별 감수성 평가를 수행하였다. 또한 큰노타리버섯이 채워진 수출용 박스 내 위치별 흡수선량을 측정하여 수출 큰노타리버섯의 긴수염버섯파리 방제 관련 기초자료를 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

실험곤충

이온화에너지 조사 실험에 사용된 긴수염버섯파리는 2019년 충청남도 부여에 소재한 큰노타리버섯 농가에서 성충으로 채집하였으며, 채집해 온 성충은 흡충기를 이용하여 15 mL 튜브에 10 ~ 20마리씩 흡충 한 다음, 얼음이 들어있는 아이스박스에 10초 동안 놓아두었다. 움직임이 둔해진 성충은 PDA 배지를 분주한 petridish (6.0 × 1.5 cm)에 접종하여 산란을 받았다. PDA 배지를 분주한 petridish에 느타리버섯 균사를 접종하고, 27 ± 2°C 항온기에서 15 ~ 20일 동안 배양하여 긴수염버섯파리 유충의 먹이로 사용하였다. 부화한 유충은 느타리버섯 균사가 접종된 petridish에 옮겨 계대사육 하였다.

이온화에너지 조사

전자빔 조사는 대전에 소재한 EB-Tech(주)에서 이루어졌으며 high energy linear accelerator (UEL V10S, 10 MeV, 1 mA, 10 Kw)를 이용하였다. 엑스선 조사는 이 장치에 converter를 장착하여 이용하였다. 감마선 조사는 전북 정읍에 소재한 한국원자력연구원에서 이루어졌으며, ⁶⁰Co에서 방출하는 감마선을 이용한 고준위 감마선 조사장치(490 kCi capacity; MDS, Nordion, Canada)를 사용하였다. Blank에서 각 이온화에너지의 흡수선량은 빈 petridish (6.0 × 1.5 cm)안에 alanine pellet dosimeter (Bruker biospin, USA)를 넣고 30, 50, 100, 150, 200, 300, 400 Gy의 선량을 조사한 다음 Bruker EMS 104 EPR analyzer (Bruker Instruments, 한국원자력연구원, 정읍)를 이용하여 실제 흡수선량을 측정하였다. 수출용 큰노타리버섯이 채워진 박스 내 실제 흡수선량은 현재 수출에 사용되고 있는 박스(외포장: 골판지, 내부상품포장: OPP재질) 높이에 따라 상, 중, 하 3 구역으로 나누고, 각 구역마다 4개의 모서리와 중앙에 alanine pellet dosimeter를 설치하고 큰노타리버섯을 채워 각 이온화

너지의 실제 흡수선량을 측정하여 선량 균일성 비율(Dose Uniformity Ratio, DUR = Dosemax / Dosemin)을 계산하였다(Fig. 1). 실제 목표선량은 50, 100, 150 Gy로 설정하였다.

긴수염버섯파리에 대한 이온화에너지 감수성 평가 및 박스 내 실증실험

긴수염버섯파리 알은 PDA를 분주한 petridish에 수컷, 암컷 각각 10마리씩 접종하여 24시간 동안 산란을 받고 성충을 제거한 후 각 이온화에너지를 처리하였다. 유충은 PDA 배지를 분주하고 느타리버섯 균사를 접종한지 15~20일이 지난 petridish에 3령 유충을 접종하여 사용하였고, 번데기는 유충이 용화한 지 1~2일 지난 번데기를 사용하였다. 성충은 PDA 배지를 분주하고 느타리버섯 균사를 접종한지 15~20일이 지난 petridish에 우화한지 24시간 이내의 성충을 접종하여 이온화에너지를 처리하였다. 큰느타리버섯 실제 수출 박스에서의 실증실험은 먼저 각 발육단계별 긴수염버섯파리를 petridish에 넣고 큰느타리버섯

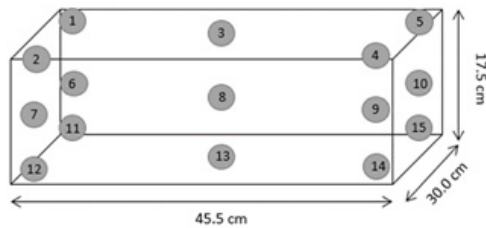


Fig. 1. Position of alanine pellets for dose mapping in the mushroom box.

수출 박스 내 상, 중, 하 위치에 배치한 후 큰느타리버섯을 채웠다. 각각의 이온화에너지 처리 후 부화율, 용화율, 산란수, F_1 세대의 부화율을 조사하였고, 모든 실험은 3회 반복하여 실험하였다.

통계분석

실험결과에 대한 통계분석은 Tukey's range test를 사용하여 (SAS Institute, 2009) 이온화에너지 선종별 · 선량별 차이를 비교하였다.

결과

Blank에서 전자빔, 엑스선, 감마선의 선량별 편차 분석 및 비교

Blank에서 전자빔의 흡수선량 분석 결과, 목표선량 30 Gy 조사 시 최소 7.5 Gy와 최대 7.9 Gy로 나타났다(Table 1). 50 Gy 조사 시 최소 44.3 Gy와 최대 62.0 Gy로, 400 Gy 조사 시 최소 395.4 Gy, 최대 437.2 Gy로 흡수되었다. 엑스선의 경우 목표선량 30 Gy 조사 시 최소 23.6 Gy와 최대 27.4 Gy, 50 Gy 조사 시 최소 50.2 Gy와 최대 55.9 Gy로, 그리고 400 Gy 조사 시 최소 404.0 Gy, 최대 437.0 Gy로 측정되었다. 감마선의 경우 목표선량 30 Gy 조사 시 최소 42.9 Gy와 최대 43.3 Gy로, 50 Gy 조사 시 최소 46.0 Gy와 최대 48.4 Gy로, 400 Gy 조사 시 최소 384.1 Gy, 최대 402.6 Gy로 나타났다. 이와 같이 이온화에너지의 흡수선량은 목표선량이 높아질수록 차이가 커졌다.

Table 1. Dose mapping of electron beam, X-ray, and gamma-ray in blank

Radiation	No. Replication	Dose (Gy)						
		30	50	100	150	200	300	400
Electron beam	1	7.7	44.7	107.8	150.3	203.6	320.3	414.3
	2	7.9	62.0	103.4	152.2	198.5	310.3	437.2
	3	7.5	44.3	101.7	161.0	227.1	339.9	395.4
	$D_{max} - D_{min}$	0.4	17.7	6.1	10.7	28.6	29.6	41.8
X-ray	1	24.7	55.9	94.4	156.1	197.9	326.0	404.0
	2	23.6	53.1	100.8	160.8	203.6	311.0	420.0
	3	27.4	50.2	91.3	152.9	220.6	335.0	437.0
	$D_{max} - D_{min}$	3.8	5.7	9.5	7.9	22.7	24	33.0
Gamma-ray	1	42.9	47.2	104.5	146.7	209.0	299.7	384.1
	2	43.1	46.0	100.6	152.3	212.0	297.6	390.8
	3	43.3	48.4	101.0	149.5	206.0	301.1	402.6
	$D_{max} - D_{min}$	0.4	2.4	3.9	5.6	6.0	3.5	18.5

긴수염버섯파리 발육 및 생식에 미치는 전자빔의 효과

Table 1에서 보였듯이 전자빔 흡수선량의 변이폭을 감안하여 긴수염버섯파리 감수성 평가는 50 ~ 150 Gy로 수행하였다 (Table 2). 알에 전자빔 50 Gy 조사 결과, 부화율이 100% 억제되었다. 유충은 선량이 높아질수록 용화율, 우화율, 산란수가 감소하였으며, F_1 세대 부화율은 50 Gy에서 완전히 억제되었다. 번데기는 선량이 높아질수록 우화율이 감소하였으며, F_1 세대 부화율은 50 Gy에서 100% 억제되었다. 성충은 선량이 높아질수록 산란수가 감소하였으며, 50 Gy에서 F_1 세대 부화율은 100% 억제되었다.

긴수염버섯파리 발육 및 생식에 미치는 엑스선의 효과

엑스선 조사 결과, 긴수염버섯파리 알은 50 Gy에서 부화율이 100% 억제되었다 (Table 3). 유충은 선량이 높아질수록 용화율, 우화율, 산란수가 감소하였으며, F_1 세대 부화율은 50 Gy에서 완전히 억제되었다. 번데기는 선량이 높아질수록 우화율이 감소하였으며, 우화한 성충이 일부 알을 낳았지만 부화하지는 못

했다. 성충은 선량이 높아질수록 산란수가 감소하였으며, 50 Gy를 조사받은 성충이 낳은 알은 F_1 세대에서 부화율이 100% 억제되었다.

긴수염버섯파리 발육 및 생식에 미치는 감마선의 효과

감마선 조사 결과, 긴수염버섯파리 알은 50 Gy에서 부화율이 완전히 억제되었다 (Table 4). 유충의 용화율은 50 Gy에서 3.3%로 무처리 대비 감소하였으나 성충으로의 우화는 전혀 성공하지 못하였다. 번데기는 선량이 높아질수록 우화율, 산란수가 감소하였으며, F_1 세대 부화율은 50 Gy에서 100% 억제되었다. 성충은 선량이 높아질수록 산란수가 감소하였으며, 50 Gy에서 9.2개의 알을 낳았지만, 부화는 전혀 하지 못했다.

큰노타리버섯이 채워진 박스 내 위치별 흡수선량 분석 및 비교

큰노타리버섯이 채워진 박스 내 상, 중, 하 위치에 선량계를 각각 설치하고 전자빔 실제 흡수선량을 측정한 결과, 목표선량

Table 2. Effect of electron beam irradiation on the hatchability, pupation, emergence, fecundity and F_1 hatchability of *L. ingenua*

Stage	Dose (Gy)	N ³⁾	Hatchability (%)	Pupation (%)	Emergence (%)	No. of eggs (♀/total)	Hatchability (%) (F_1)
Eggs	150	183	0.0 ± 0.0 b ¹⁾	- ²⁾	-	-	-
	100	254	0.0 ± 0.0 b	-	-	-	-
	50	255	0.0 ± 0.0 b	-	-	-	-
	0	537	63.5 ± 3.0 a	-	-	-	-
Larvae	150	90	-	42.2 ± 13.5 b	50.9 ± 4.3 b	3.9 ± 3.4 b	0.0 ± 0.0 b
	100	90	-	74.4 ± 10.7 b	61.7 ± 11.5 b	3.8 ± 0.7 b	0.0 ± 0.0 b
	50	90	-	88.9 ± 5.1 b	67.4 ± 3.8 b	10.1 ± 1.2 b	0.0 ± 0.0 b
	0	90	-	95.6 ± 1.9 a	92.0 ± 7.2 a	36.5 ± 10.6 a	47.1 ± 6.6 a
Pupae	150	90	-	-	40.0 ± 10.0 b	5.3 ± 0.6 b	0.0 ± 0.0 b
	100	90	-	-	74.4 ± 11.7 a	5.4 ± 0.7 b	0.0 ± 0.0 b
	50	90	-	-	81.1 ± 6.9 a	5.7 ± 1.4 b	0.0 ± 0.0 b
	0	60	-	-	86.7 ± 7.6 a	38.1 ± 7.8 a	49.2 ± 11.7 a
Adults	150	50	-	-	-	3.6 ± 1.4 b	0.0 ± 0.0 b
	100	50	-	-	-	7.5 ± 1.8 b	0.0 ± 0.0 b
	50	50	-	-	-	9.5 ± 1.4 b	0.0 ± 0.0 b
	0	60	-	-	-	39.3 ± 2.6 a	54.3 ± 4.2 a

All data are Mean ± SD

1) Means within each column followed by the same latter are not significantly at $P < 0.05$ by Tukey's studentized range test (SAS Institute, 2009)

2) Not experiment

3) Pooled number of separate experiments

Table 3. Effect of X-ray irradiation on the hatchability, pupation, emergence, fecundity and F_1 hatchability of *L. ingenua*

Stage	Dose (Gy)	N ^{*3)}	Hatchability (%)	Pupation (%)	Emergence (%)	No. of eggs (♀ / total)	Hatchability (%) (F_1)
Eggs	150	133	0.0 ± 0.0 b ¹⁾	- ²⁾	-	-	-
	100	255	0.0 ± 0.0 b	-	-	-	-
	50	208	0.0 ± 0.0 b	-	-	-	-
	0	537	63.5 ± 3.0 a	-	-	-	-
Larvae	150	90	-	28.9 ± 11.7 c	45.6 ± 27.2 a	0.9 ± 0.8 b	0.0 ± 0.0 b
	100	90	-	56.7 ± 5.8 b	60.4 ± 20.4 a	3.8 ± 1.1 b	0.0 ± 0.0 b
	50	90	-	65.6 ± 5.1 b	61.2 ± 5.9 a	13.8 ± 5.0 b	0.0 ± 0.0 b
	0	90	-	95.6 ± 1.9 a	92.0 ± 7.2 a	36.5 ± 10.6 a	47.1 ± 6.6 a
Pupae	150	90	-	-	22.2 ± 6.9 b	2.9 ± 2.8 b	0.0 ± 0.0 b
	100	90	-	-	40.0 ± 8.8 b	5.1 ± 3.0 b	0.0 ± 0.0 b
	50	90	-	-	80.0 ± 12.0 a	5.3 ± 0.8 b	0.0 ± 0.0 b
	0	60	-	-	86.7 ± 7.6 a	38.1 ± 7.8 a	49.2 ± 11.7 a
Adults	150	52	-	-	-	4.0 ± 1.1 b	0.0 ± 0.0 b
	100	64	-	-	-	4.6 ± 0.6 b	0.0 ± 0.0 b
	50	66	-	-	-	10.2 ± 1.3 b	0.0 ± 0.0 b
	0	60	-	-	-	39.3 ± 2.6 a	54.3 ± 4.2 a

All data are Mean ± SD

1) Means within each column followed by the same letter are not significantly at $P < 0.05$ by Tukey's studentized range test (SAS Institute, 2009)

2) Not experiment

3) Pooled number of separate experiments

Table 4. Effect of gamma-ray irradiation on the hatchability, pupation, emergence, fecundity and F_1 hatchability of *L. ingenua*

Stage	Dose (Gy)	N ^{*3)}	Hatchability (%)	Pupation (%)	Emergence (%)	No. of eggs (♀ / total)	Hatchability (%) (F_1)
Eggs	150	309	0.0 ± 0.0 b ¹⁾	- ²⁾	-	-	-
	100	270	0.0 ± 0.0 b	-	-	-	-
	50	398	0.0 ± 0.0 b	-	-	-	-
	0	537	63.5 ± 3.0 a	-	-	-	-
Larvae	150	90	-	0.0 ± 0.0 b	-	-	-
	100	90	-	0.0 ± 0.0 b	-	-	-
	50	90	-	3.3 ± 3.3 b	0.0 ± 0.0 b	-	-
	0	90	-	95.6 ± 1.9 a	92.0 ± 7.2 a	-	-
Pupae	150	90	-	-	42.2 ± 35.6 a	1.6 ± 0.9 b	0.0 ± 0.0 b
	100	90	-	-	55.6 ± 15.0 a	2.6 ± 0.3 b	0.0 ± 0.0 b
	50	90	-	-	72.2 ± 19.0 a	5.3 ± 2.0 b	0.0 ± 0.0 b
	0	60	-	-	86.7 ± 7.6 a	38.1 ± 7.8 a	49.2 ± 11.7 a
Adults	150	44	-	-	-	3.7 ± 1.0 a	0.0 ± 0.0 b
	100	80	-	-	-	5.2 ± 1.2 b	0.0 ± 0.0 b
	50	79	-	-	-	9.2 ± 1.1 b	0.0 ± 0.0 b
	0	60	-	-	-	39.3 ± 2.6 a	54.3 ± 4.2 a

All data are Mean ± SD

1) Means within each column followed by the same letter are not significantly at $P < 0.05$ by Tukey's studentized range test (SAS Institute, 2009)

2) Not experiment

3) Pooled number of separate experiments

50 Gy 조사 시 최소 13.2 Gy (하), 최대 162.0 Gy (상)로 148.8 Gy의 차이가 발생하였고, 150 Gy 조사 시 최소 49.9 Gy (하), 최대 178.4 Gy (상)로 128.5 Gy의 차이가 발생하여 목표선량이 높아짐에 따라 최소 흡수선량과 최대 흡수선량의 차이가 증가하였다(Table 5). 위치별 선량 균일성 비율(Dose uniformity ratio, $DUR = Dose_{max}/Dose_{min}$)을 측정된 결과 50 Gy에서 12.3, 100 Gy에서 6.3, 150 Gy에서 3.6으로 선량이 증가할수록 DUR 값이 감소하였으며, 하단부의 흡수선량이 가장 낮았다.

엑스선에서는 목표선량 50 Gy 조사 시 최소 28.4 Gy (하), 최대 46.2 Gy (상)로 17.8 Gy의 차이가 발생하였고, 150 Gy 조사 시 최소 82.5 Gy (하), 최대 135.9 Gy (상)로 53.4 Gy의 차이가 발생하였다. 위치별 DUR을 측정된 결과 50 Gy에서 1.6, 100 Gy는 1.6, 150 Gy는 1.6으로 DUR값이 균일하게 나타났으며, 큰느타리버섯이 쌓여있는 하단부에서 흡수선량이 가장 낮았다.

감마선 실제 흡수선량을 측정된 결과, 목표선량 50 Gy 조사 시 최소 43.3 Gy (하), 최대 53.4 Gy (상)로 10.1 Gy의 차이가 발생하였고 150 Gy 조사 시 최소 132.4 Gy (중), 최대 160.8 Gy (상)로 28.4 Gy의 차이가 발생하였다. 위치별 DUR을 측정된 결과 50 Gy는 1.2, 100 Gy는 1.2, 150 Gy는 1.2로 DUR값이 균일하게 나타났으며, 큰느타리버섯이 쌓여 있는 중단부에서 흡수선량이 가장 낮았다. 이 결과를 바탕으로 전자빔은 하, 엑스

선은 하, 그리고 감마선은 중 위치에서 실증평가를 실시하였다.

전자빔에 의한 큰느타리버섯 박스 내 긴수염버섯파리의 방제효과

큰느타리버섯이 채워진 수출 박스에 전자빔 100 Gy 조사 시 박스 하단 부분의 가장 낮은 흡수선량이 20.6 Gy로 긴수염버섯 파리에 대한 전자빔의 감수성 평가의 최하 선량인 50 Gy보다 낮은 선량으로 나타났다. 따라서 이에 버섯 박스 실증평가에서는 전자빔 150 Gy를 조사하였다(Table 6). 그 결과 긴수염버섯 파리 알은 부화가 완전히 억제되었으며, 유충의 용화율은 18.8%였고 우화율은 58.2%였다. 우화한 성충이 낳은 알은 5.0%였으나 전부 부화하지는 못했다. 번데기의 우화율은 52.9%였고 우화한 성충이 낳은 알은 10.2%였으나 마찬가지로 부화율은 0%였다. 성충의 산란율은 12.6%으로 무처리 대비 감소하였으며 F_1 세대의 부화율은 0%으로 완전히 억제되었다.

엑스선에 의한 큰느타리버섯 박스 내 긴수염버섯파리의 방제효과

큰느타리버섯이 채워진 수출 박스에 엑스선 100 Gy 조사 시

Table 5. Dose mapping of electron beam, X-ray, and gamma-ray in mushroom boxes

Position	Pellet No.	50 Gy			100 Gy			150 Gy		
		Electron beam	X-ray	Gamma-ray	Electron beam	X-ray	Gamma-ray	Electron beam	X-ray	Gamma-ray
Top	1	129.6	43.9	49.1	116.3	101.3	102.8	139.7	132.1	154.7
	2	92.7	46.2	47.1	115.9	103.9	104.7	178.4	131.8	154.3
	3	89.4	43.7	53.4	101.6	118.1	98.9	130.2	134.5	151.0
	4	92.2	39.4	45.5	128.9	118.0	101.9	169.3	134.7	160.8
	5	162.0	41.0	52.6	123.5	116.4	94.4	131.5	135.9	137.9
Middle	6	93.3	32.2	50.6	92.4	90.8	98.2	137.9	106.0	144.1
	7	48.3	35.3	52.5	87.5	92.9	96.2	123.7	107.2	150.0
	8	55.2	37.4	47.1	86.1	96.4	95.7	118.1	109.8	143.4
	9	47.9	30.0	51.2	95.6	100.5	97.0	135.7	109.3	136.2
	10	86.8	33.8	44.8	105.5	99.0	88.2	113.7	119.9	132.4
Bottom	11	29.5	28.9	53.2	54.3	79.8	105.5	94.8	84.0	155.0
	12	18.3	29.2	50.2	40.2	73.6	104.8	96.4	90.2	153.7
	13	13.7	28.4	43.3	20.6	82.2	101.7	86.4	82.5	149.9
	14	19.6	29.0	49.5	34.5	87.2	102.2	49.9	88.5	152.5
	15	13.2	30.3	49.8	53.1	88.4	95.2	68.2	94.8	143.1
$D_{max} - D_{min}$		148.8	17.8	10.1	108.3	44.5	17.3	17.3	53.4	28.4
$DUR = Dose_{max} / Dose_{min}$		12.3	1.6	1.2	6.3	1.6	1.2	1.2	1.6	1.2

박스 하단 부분의 가장 낮은 흡수선량이 73.6 Gy로 긴수염버섯 파리에 대한 엑스선의 감수성 평가의 최하 선량이 50 Gy보다 높은 선량이 나타났다. 따라서 버섯 박스 실증평가에서는 엑스선 100 Gy를 조사하였다(Table 7). 그 결과 긴수염버섯파리 알은 엑스선 100 Gy에서 부화가 완전히 억제되었다. 유충의 경우 용화율은 41.8%, 우화율은 69.0%였고 이들 우화한 성충이 낳은 알은 9.0%였지만 F_1 세대의 부화율은 0%였다. 번데기의 경우 우화율은 58.9%였고 우화한 성충의 산란율은 9.6%였으나, F_1 세대의 부화율은 0%으로 완전히 억제되었다. 성충의 산란율은 11.2%으로 무처리 대비 감소하였으나, F_1 세대의 부화율은 완전히 억제되었다.

감마선에 의한 큰느타리버섯 박스 내 긴수염버섯파리의 방제효과

큰느타리버섯이 채워진 수출 박스에 감마선 50 Gy 조사 시 버섯 박스 하단 부분의 가장 낮은 흡수선량이 43.3 Gy로 긴수염버섯파리에 대한 감마선의 감수성 평가의 최하 선량이 50 Gy보다 다소 낮았다. 하지만, DUR 측정결과 균일성을 보였기 때문에 버섯 박스 실증평가에서는 감마선 50 Gy를 조사하였다 (Table 8). 그 결과 긴수염버섯파리 알의 경우 부화율은 0%으로 완전히 억제되었으며, 유충의 경우 용화율은 22.4%, 우화율은 69.0%, 이들 우화한 성충이 낳은 알은 2.0%였으나 F_1 세대의 부화율은 0%로 완전히 억제되었다. 번데기의 경우 우화율

Table 6. Effects of electron beam irradiation on *L. ingenua* in the bottom position of the mushroom box

Stage	Dose (Gy)	N ^{*3)}	Hatchability (%)	Pupation (%)	Emergence (%)	No. of eggs (%)	Hatchability (%) (F_1)
Eggs	150	851	0.0 ± 0.0 b ¹⁾	- ²⁾	-	-	-
	0	937	48.2 ± 7.7 a	-	-	-	-
Larvae	150	1100	-	18.8 ± 7.2 b	58.2 ± 9.6 b	5.0 ± 5.2 b	0.0 ± 0.0 b
	0	561	-	50.5 ± 14.3 a	83.9 ± 9.9 a	36.8 ± 9.8 a	54.5 ± 13.0 a
Pupae	150	1003	-	-	52.9 ± 4.3 b	10.2 ± 2.7 b	0.0 ± 0.0 b
	0	1114	-	-	75.2 ± 8.2 a	31.6 ± 2.3 a	51.7 ± 6.7 b
Adults	150	1018	-	-	-	12.6 ± 5.5 b	0.0 ± 0.0 b
	0	1000	-	-	-	31.5 ± 11.0 a	60.1 ± 9.8 a

All data are Mean ± SD

1) Means within each column followed by the same latter are not significantly at $P < 0.05$ by Tukey's studentized range test (SAS Institute, 2009)

2) Not experiment

3) Pooled number of separate experiments

Table 7. Effects of X-ray irradiation on *L. ingenua* in the bottom position of the mushroom box

Stage	Dose (Gy)	N ^{*3)}	Hatchability (%)	Pupation (%)	Emergence (%)	No. of eggs (%)	Hatchability (%) (F_1)
Eggs	100	285	0.0 ± 0.0 b ¹⁾	- ²⁾	-	-	-
	0	937	48.2 ± 7.7 a	-	-	-	-
Larvae	100	1029	-	41.8 ± 9.2 ab	69.0 ± 16.5 a	9.0 ± 4.7 b	0.0 ± 0.0 b
	0	561	-	50.5 ± 14.3 a	83.9 ± 9.9 a	36.8 ± 9.8 a	54.5 ± 13.0 a
Pupae	100	1270	-	-	58.9 ± 4.9 a	9.6 ± 2.6 b	0.0 ± 0.0 b
	0	1114	-	-	75.2 ± 8.2 a	31.6 ± 2.3 a	51.7 ± 6.7 b
Adults	100	1000	-	-	-	11.2 ± 1.7 b	0.0 ± 0.0 b
	0	1000	-	-	-	31.5 ± 11.0 a	60.1 ± 9.8 a

All data are Mean ± SD

1) Means within each column followed by the same latter are not significantly at $P < 0.05$ by Tukey's studentized range test (SAS Institute, 2009)

2) Not experiment

3) Pooled number of separate experiments

Table 8. Effects of gamma-ray irradiation on *L. ingenua* in the middle position of the mushroom box

Stage	Dose (Gy)	N ^{*3)}	Hatchability (%)	Pupation (%)	Emergence (%)	No. of eggs (%)	Hatchability (%) (F ₁)
Eggs	50	1133	0.0 ± 0.0 b ¹⁾	- ²⁾	-	-	-
	0	937	48.2 ± 7.7 a	-	-	-	-
Larvae	50	1000	-	22.4 ± 0.0 b	69.0 ± 27.3 a	2.0 ± 1.7 b	0.0 ± 0.0 b
	0	561	-	50.5 ± 14.3 a	83.9 ± 9.9 a	36.8 ± 9.8 a	54.5 ± 13.0 a
Pupae	50	1000	-	-	32.0 ± 7.6 b	5.4 ± 2.7 b	0.0 ± 0.0 b
	0	1114	-	-	75.2 ± 8.2 a	31.6 ± 2.3 a	51.7 ± 6.7 b
Adults	50	1015	-	-	-	13.7 ± 3.9 b	0.0 ± 0.0 b
	0	1000	-	-	-	31.5 ± 11.0 a	60.1 ± 9.8 a

All data are Mean ± SD

1) Means within each column followed by the same letter are not significantly at $P < 0.05$ by Tukey's studentized range test (SAS Institute, 2009)

2) Not experiment

3) Pooled number of separate experiments

은 32.0%였고 우화한 성충이 낳은 알은 5.4%이나 F₁ 세대의 부화율은 완전히 억제되었다. 성충의 산란율은 13.7%으로 무처리 대비 감소하였으나, F₁ 세대의 부화율은 0%로 완전히 억제되었다.

고찰

본 연구에서는 전자빔, 엑스선, 그리고 감마선 등 3종 이온화 에너지에 의한 긴수염버섯파리의 발육단계별 감수성을 평가하였고, 큰느타리버섯 수출에 있어 존재할 수 있는 긴수염버섯파리의 방제를 위한 이온화에너지의 억제선량을 비교·분석하였다. 먼저 blank상에서 선종별 흡수선량의 편차를 확인하기 위해 30 ~ 400 Gy의 목표선량으로 처리하고 흡수선량의 변이폭을 관찰한 결과 3종 이온화에너지 모두 조사선량이 높아질수록 흡수선량과 목표선량의 차이가 증가하였으며 감마선, 엑스선, 전자빔 순으로 선량의 차이가 적었다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 각 이온화에너지의 물리적인 특성 차이(Kwon, 1998; Eustice and Bruhn, 2012; Loaharanu et al., 2007) 때문이다.

선종별 흡수선량 조사 결과를 바탕으로 3종 이온화에너지의 변이폭을 감안하여 긴수염버섯파리 발육단계별 감수성 평가는 50 ~ 150 Gy로 수행하였다(Table 2, 3, 4). 그 결과 전자빔, 엑스선 그리고 감마선 모두 긴수염버섯파리의 발육 및 생식은 50 Gy에서 완전히 억제되었다. 국제원자력기구(IAEA)에서 제공하는 IDIDAS (International Database on Insect Disinfestation and Sterilization)의 자료에 따르면, 검정날개버섯파리과(Sciaridae)에 속하는 *Bradysia coprophila*는 감마선 40 Gy에서 발육 및 생식이 억제된다고 보고하여(Crouse, 1950) 본 연구결과

와 유사한 선량을 보여준다. 긴수염버섯파리의 모든 발육단계별 억제선량은 이온화에너지 종류와 상관없이 그리고 동일한 선량에서 발육이 억제되었으나 다른 연구에서는 해충종과 층태별 생식 제어선량이 차이가 나기도 했다. 아메리카잎굴파리(*Liriomyza trifolii*)는 엑스선 조사 시, 알에서는 30 Gy, 유충에서는 50 Gy, 번데기에서는 100 Gy, 성충에서는 150 Gy에서 발육과 생식이 억제되었으며, 복숭아혹진딧물(*Myzus persicae*)은 엑스선 조사 시, 약충에서는 30 Gy, 성충에서는 50 Gy에서 발육과 생식이 억제되었으며, 전자빔 조사 시, 약충에서는 100 Gy, 성충에서는 200 Gy에서 억제되었다(Yun et al., 2016). 담배가루이(*Bemisia tabaci*)는 감마선 조사 시, 알에서는 50 Gy, 유충에서는 150 Gy, 성충에서는 100 Gy에서 발육과 생식이 억제되었으며, 온실가루이(*Trialeurodes vaporariorum*)는 감마선 조사 시, 알에서는 50 Gy, 유충에서는 150 Gy, 성충에서는 70 Gy에서 발육과 생식이 억제되었다(Cho et al., 2019). 또한 본 연구에서는 암수 성별에 대한 감수성 차이의 연구는 수행하지 않았으나, 암수에 따라 생식 억제 선량이 다르게 나타나는 경우도 있다. *Anastrepha suspensa* (과실파리과)에 감마선 조사 시 수컷 번데기는 50 Gy에서, 암컷 번데기는 25 Gy에서 산란을 하지 못한다는 보고가 있다(Walder and Calkins, 1993). 마찬가지로 담배겨세미나방(*Spodoptera litura*)는 전자빔 조사된 층체와 조사되지 않은 층체의 상호교배 시 암컷이 수컷보다 전자빔에 더 민감하다는 보고도 있다(Yun et al., 2014). *Ceratitis capitata* (지중해과실파리)의 생식 억제선량은 엑스선에서 91.2 Gy, 감마선에서 124.9 Gy로 이온화에너지의 종류에 따라 억제선량이 달랐다(Mastrangelo et al., 2010). 따라서 이온화에너지에 대한 해충의 억제선량을 결정할 때 해충의 종

별, 해충의 각 발육단계별, 이온화에너지의 종류에 따라 달라지며 이를 방제에 이용하기 위해서는 위에서 언급한 요소를 고려한 데이터베이스가 구축되어야 한다.

본 실험에서 긴수염버섯파리의 억제선량을 연구한 결과 전자빔, 엑스선 그리고 감마선 모두 50 Gy가 나왔으나, 큰느타리버섯이 채워진 수출용 버섯 박스에서는 목표선량과 흡수선량이 다르게 나올 수 있으므로 실증실험을 추가로 진행하였다. 전자빔의 경우 조사선량이 일정 깊이까지 증가하다 그 이후로는 계속해서 감소하며(Kim et al., 2012) 물을 기준으로 최대 5 cm를 투과할 수 있고(Strydom et al., 2005), 엑스선은 70 cm (Cleland and Pageau, 1987), 감마선은 약 160 cm까지 투과한다(Hayward, 1952). 그리고 Follett and Lower (2000)은 검역처리에 필요한 흡수선량에 대해 위양성(false positive)을 초래할 수 있어, 상업적인 방사선 조사 시 DUR을 확인해야 한다 보고하였다. 또한 DUR은 일반적으로 1.6~3.0 사이의 범위를 가지며, 이 값보다 높으면 상품을 균일하게 조사하기 어렵다 보고하였다(Cleland, 2006; Mehta and O'Hara, 2006; Follett and Weinert, 2009). 그러므로 이온화에너지를 이용하여 수출박스 내 해충을 방제하기 위해서는 실제 박스 내부의 공간위치별 흡수선량을 필히 확인하여야 한다. 본 실험에서 큰느타리버섯이 채워진 수출박스 내 공간위치별(상, 중, 하) 흡수선량과 DUR을 확인한 결과 (Table 5), 박스 내부에서도 조사선량이 높아질수록 흡수선량의 차이는 증가하였으며, 전자빔과 엑스선은 수출 박스 상단부에서 하단부로 갈수록 실제 흡수선량이 감소하였고, 감마선의 경우는 중단부로 갈수록 실제 흡수선량이 감소하였다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 각 이온화에너지의 조사방식의 차이 때문인데 전자빔과 엑스선은 조사대상이 컨베이어 벨트를 타고 지나갈 때 위에서부터 아래로 조사되는 방식으로 투과력의 영향을 크게 받고, 감마선은 조사대상이 회전하면서 전체적으로 에너지를 받게 되므로 골고루 투과가 되며 투과력도 전자빔이나 엑스선보다 훨씬 크다(Song et al., 2016). 앞에서 설명했듯이 이온화에너지의 물리적인 특성 차이와 침투력의 차이로 감마선, 엑스선, 전자빔 순으로 선량의 차이가 적었으며, 선량의 균일성 비율도 낮아져 감마선, 엑스선, 전자빔 순으로 박스 내 공간위치별로 균일하게 조사되었다. 상품이 밀집되어 있거나, 상자 내부가 넓은 제품일수록 선량 균일성 비율값이 높아지는데 이러한 이유는 이온화에너지 선량이 거리의 제곱만큼 감소하며(Cleland, 2006; Follett and Weinert, 2009), 물질의 두께가 두꺼워질수록 투과 선량이 감소하기 때문이다(Lee, 1994). Yun et al. (2016)의 결과에 따르면, 장미와 국화는 수분함량의 차이, 꽃송이의 모양, 잎의 밀도, 크기, 수 등에 따라 같은 해충 일지라도 방제가 가능한 요구 선량이 다를 수 있다고 보고하였

다. 이러한 결과는 이온화에너지의 특성, 버섯의 수분함량, 모양, 크기, 포장재 재질, 구조 등에 따라 흡수선량이 다르게 나타날 수 있음을 보여준다. 따라서 이들 이온화에너지 중 전자빔과 엑스선은 상자에 채워져 있는 큰느타리버섯을 통과하면서 감마선과 다르게 흡수선량이 감소하여 중단부와 하단부에는 목표하는 억제선량보다 낮은 선량이 조사될 것이다. Yun et al. (2015, 2016)의 결과에 따르면 전자빔과 엑스선은 하단부로 내려갈수록 흡수선량이 낮아졌으나, 감마선 흡수선량은 전체적으로 균일하게 조사되었으며 그 중 중단부에서 흡수선량이 가장 낮았으며, Koo et al. (2017)의 결과에 따르면 백합이 채워져 있는 상자의 꽃노랑총채벌레와 대만총채벌레는 전자빔 200 Gy 조사 시, 상단부, 중단부는 생식이 100% 억제되었지만 하단부는 억제하지 못했다. 본 실험은 전자빔 100 Gy 조사 시 큰느타리버섯이 채워진 박스 하단부 흡수선량은 20.6 Gy로 긴수염버섯파리에 대한 전자빔의 감수성 평가의 최하 선량인 50 Gy보다 낮은 선량이 조사되었다. 그러므로 큰느타리버섯 박스 내 긴수염버섯파리의 방제효과 실험에는 전자빔 150 Gy를 조사하였다. 엑스선은 100 Gy 조사 시 큰느타리버섯 박스 하단 부분의 가장 낮은 흡수선량은 73.6 Gy로 긴수염버섯파리에 대한 엑스선의 감수성 평가의 최하 선량인 50 Gy보다 높아 큰느타리버섯 박스 방제효과 실험에는 100 Gy를 조사하였고, 감마선은 박스 내 가장 낮은 흡수선량이 43.3 Gy로 긴수염버섯파리에 대한 감마선의 감수성 평가의 최하 선량인 50 Gy보다 다소 낮지만 선량 균일성 비율 측정결과 균일성을 보이기 때문에 감마선은 50 Gy로 조사하였다. 그 결과 전자빔은 150 Gy, 엑스선은 100 Gy, 감마선은 50 Gy에서 긴수염버섯파리의 모든 발육단계별 발육과 생식을 완전히 억제하였다(Table 6, 7, 8). 이처럼 큰느타리버섯이 채워진 박스 내 긴수염버섯파리의 발육과 생식을 제어하기 위해서는 이온화에너지 선종별 감수성 차이를 보였다. 본 연구와 비슷하게, 온실가루이에서도 전자빔에서 150 Gy, 엑스선에서 150 Gy, 감마선에서 100 Gy로 억제선량이 다르게 나타났다(Cho et al., 2019). 이온화에너지 종류별 억제선량을 무시하고 동일한 선량으로 조사 시 대상 품목에 약해가 나타날 수 있다. Kim et al. (2012)는 고선량의 이온화에너지에 의해 장미와 국화에서 절화수명이 단축, 개화억제, 엽록소 함량에 영향을 미칠 수 있다고 보고하였다. 이 외에도 같은 작물이어도 품종이 다르면 이온화에너지의 감수성도 다르게 나타날 수도 있으며(Sangwanangkul et al., 2008), 식품의약품안전청(2012)에서 감마선 허용 식품별 흡수선량은 감자, 양파, 마늘은 150 Gy, 밤은 250 Gy, 버섯은 1000 Gy 이하를 고시하였다.

본 연구에서 확인한 전자빔, 엑스선, 감마선에서의 억제선량은 큰느타리버섯의 상품성에 영향을 미치지 않을 것으로 예상

되어(Yeom et al., 2023) 수출 큰느타리버섯 박스 내 긴수염버섯파리의 방제를 위해 충분히 사용 가능한 소독기술이 될 것으로 보인다. 따라서 위 결과들은 효율적인 검역기술의 대안으로 수출 검역통합관리 시스템 구축의 기초자료로 제공될 수 있으며 농산물의 안전성 확보와 수출경쟁력 강화에 기여하리라 사료된다.

사 사

이 성과는 2017년 과학기술정보통신부 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017M2A2A6A02019716).

저자 직책 및 역할

안현모: 충북대, 석사과정; 실험수행, 논문작성
조선란: 충북대, 박사후과정; 실험수행, 논문작성
구현나: 충북대, 초빙교원; 실험설계, 논문작성
김길하: 충북대, 교수; 실험설계

모든 저자는 원고를 읽고 투고에 동의하였음.

Literature Cited

- Barkai-Golan, R., Follett, P.A., 2017. Irradiation for quality improvement, microbial safety and phytosanitation of fresh produce. Academic Press, London, UK.
- Cho, S.-R., Koo, H.-N., Shin, S., Kim, H.K., Park, J.-H., Yoon, Y.S., Kim, G.-H., 2019. Gamma-ray irradiation control of whiteflies *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) and *Trialeurodes vaporariorum* in the exportation of fresh strawberries. *J. Econ. Entomol.* 112, 1611-1617.
- Cleland, M.R., 2006. Advances in gamma ray, electron beam, and X-ray technologies for food irradiation, in: Sommers, C.H., Fan, X. (Eds.), *Food irradiation research and technologies*. Blackwell Publishing, Ltd, Oxford, pp. 11-35.
- Cleland, M.R., Pageau, G.M., 1987. Comparisons of X-ray and gamma-ray sources for industrial irradiation processes. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, B 24, 967-972.
- Crouse, H.V., 1950. The differential response of male and female germ cells of *Sciara coprophila* (Diptera) to irradiation. *Am. Nat.* 84, 195-202.
- Diehl, J.F., 1995. Safety of irradiated foods. CRC Press, FL, USA.
- Eustice, R.F., Bruhn, C.M., 2012. Consumer acceptance and marketing of irradiated foods. in: Fan, X., Sommers, C.H. (Eds.), *Food irradiation research and technology*, second edition. Blackwell Publishing, Ltd, Oxford, pp. 173-195.
- Follett, P.A., Lower, R.A., 2000. Irradiation to ensure quarantine security for *Cryptophlebia* spp. (Lepidoptera: Tortricidae) in sapindaceous fruits from Hawaii. *J. Econ. Entomol.* 93, 1848-1854.
- Follett, P.A., Weinert, E.D., 2009. Comparative radiation dose mapping of single fruit type and mixed-fruit boxes for export from Hawaii. *J. Food Process. Preserv.* 33, 231-244.
- Hayward, E., 1952. The electron spectra produced by a ⁶⁰Co Source in water. *Phys. Rev.* 86, 493-495.
- Hunter, W., 1912. Results of experiments to determine the effect of Roentgen rays upon insects. *J. Econ. Entomol.* 5, 188-193.
- Jess, S., Schweizer, H., 2009. Biological control of *Lycoriella ingenua* (Diptera: Sciaridae) in commercial mushroom (*Agaricus bisporus*) cultivation: a comparison between *Hypoaspis miles* and *Steinernema feltiae*. *Pest Manag. Sci.* 65, 1195-1200.
- Kang, M.G., Jo, W.S., Kim, W.H., Lee, S.H., Kwon, O.S., 2016. Effect of *Lycoriella ingenua* on the production of *Pleurotus ostreatus*. *J. Mushroom.* 14, 197-201.
- Kim, G.H., Yoo, J.S., Koo, C.D., Lee, S.G., Park, J.D., 2001. Selection of insecticides for controlling *Lycoriella mali* in *Letinula edodes* sawdust cultivation. *Kor. J. Pesticide Sci.* 5, 62-66.
- Kim, J.B., Kim, G.H., Han, B.S., Kwon, H.J., Jeong, H.Y., 2012. Development of quarantine technique and treatment system on export floricultural crop using an electron beam irradiation. *iPET*, pp. 1-303.
- Kim, S.R., Choi, K.H., Cho, E.S., Yang, W.J., Jin, B.R., Sohn, H.D., 1999. An investigation of the major dipteran pests on the oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) in Korea. *Kor. J. Appl. Entomol.* 38, 41-46.
- Koo, H.N., Yun, S.H., Kim, H.J., Kim, H.K., Kim, G.H., 2017. X-ray irradiation control of *Frankliniella occidentalis* and *Frankliniella intonsa* (Thysanoptera: Thripidae) in the exportation of freshly cut Lily flowers. *J. Econ. Entomol.* 110, 416-420.
- Kume, T., Furuta, M., Todoriki, S., Uenoyama, N., Kobayashi, Y., 2009. Status of food irradiation in the world. *Radiat. Phys. Chem.* 78, 222-226.
- Kwon, J.H., 1998. Application of irradiation technology to preserving and improving qualities of agricultural products. *J. Food Sci. Nut.* 3, 295-301.
- Lee, B.J., Lee, M., Kim, Y.G., Lee, S.G., Lee, B.E., Seo, G.S., 2016. Occurrence and control of mushroom flies during *Agaricus bisporus* cultivation in Chungnam, Korea. *J. Mushroom* 14, 100-104.
- Lee, B.J., Lee, M.A., Kim, Y.G., Lee, K.W., Lee, B.E., Seo, G.S., 2015. Damages and developmental characteristics of fungus gnat, *Lycoriella ingenua* (Diptera: Sciaridae) in button mushroom cultivation. *J. Mushroom* 13, 145-150.
- Lee, H.S., Kim, K.C., Park, C.G., Shin, W.K., 1999. Description of fungus gnat, *Lycoriella mali* Fitch (Diptera: Sciaridae) from Korea. *Kor. J. Appl. Entomol.* 38, 209-212.

- Lee, Y., 1994. Method of radiographic testing and industrial application. *J. Weld. Join.* 12, 35-40.
- Loaharanu, P., Kava, R., Choi, E., 2007. Irradiated foods. American Council on Science and Health, Irradiated Foods. 6th Ed. American Council on Science and Health, New York, pp. 5-50.
- Mastrangelo, T., Parker, A., Jessup, A., Pereira, R., Orozco-Dávila, D., Islam, A., Dammalage, T., Walder, J.M.M., 2010. A new generation of X-ray irradiators for insect sterilization. *J. Econ. Entomol.* 103, 85-94.
- Mazin, M., Andreadis, S.S., Jenkins, N.E., Rajotte, E.G., 2018. The mushroom sciarid fly, *Lycoriella ingenua*, benefits from its association with green mold disease (*Trichoderma aggressivum*) in commercial mushroom production. *J. Pest Sci.* 91, 815-822.
- Mehta, K., O'Hara, K., 2006. Dosimetry for food processing and research applications. *Food Irradiat. Res. Technol.* 105-125.
- Menzel, F., Mohrig, W., Papp, L., Darvas, B. 1997. Family sciaridae, in: Papp, L., Darvas B. (Eds.), Contributions to a manual of palaeartic diptera (with special reference to flies of economic importance). Science Herald, Budapest, pp. 51-69.
- Morgan, A., Runner, G., 1913. Some experiments with Roentgen rays upon the cigarette beetle, *Lasioderma serricorne* Fabr. *J. Econ. Entomol.* 6, 226-230.
- Osouli, S., Ziaie, F., Nejad, K.H.I., Moghaddam, M., 2013. Application of gamma irradiation on eggs, active and quiescence stages of *Tetranychus urticae* Koch as a quarantine treatment of cut flowers. *Radiat. Phys. Chem.* 90, 111-119.
- Runner, G., 1916. Effect of Rontgen rays on the tobacco, or cigarette, beetle, and the results of experiments with a new form of Rontgen tube. *J. Agric. Res.* 6, 383-388.
- Sangwanankul, P., Saradhulthat, P., Paull, R.E., 2008. Survey of tropical cut flower and foliage responses to irradiation. *Postharv. Biol. Technol.* 48, 264-271.
- Song, B.S., Lee, Y.J., Moon, B.G., Go, S.M., Park, J.H., Kim, J.K., Jung, K., Kim, D.H., Ryu, S.R., 2016. Comparison of bactericidal efficiency of 7.5MeV X-rays, gamma-rays, and 10MeV e-beams. *Radiat. Phys. Chem.* 125, 106-108.
- Strydom, W., Parker, W., Olivares, M., 2005. Electron beams: physical and clinical aspects. in: Podgorsak, E.B. (Ed.), Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students. IAEA, Vienna, pp. 273-299.
- United Nations Environment Programme (UNEP). 2006. Handbook for the Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer, 7th ed. Ozone Secretariat, Nairobi. Kenya.
- Walder, J.M.M., Calkins, C., 1993. Effects of gamma radiation on the sterility and behavioral quality of the caribbean fruit fly, *Anastrepha suspensa* (Loew) (Diptera: Tephritidae). *Sci. Agr.* 50, 157-165.
- Yeom, S.J., Lee, G.A., Kim, S.S., Yoon, K.N., Song, B.S., Park, J.H., Kim, Y.M., Kim, J.K., 2023. Effect of quality characteristics of enoki mushroom (*Flammulina velutipes*) by electron-beam Irradiation. *J. Radiat. Indust.* 17, 75-82.
- Yun, S.H., Koo, H.N., Kim, H.K., Cho, S., Kim, G.H., 2015. Effects of electron beam irradiation on six insect pests in different sections of flower boxes for export. *J. Asia-Pacific Entomol.* 18, 629-636.
- Yun, S.H., Koo, H.N., Kim, H.K., Yang, J.O., Kim, G.H., 2016. X-ray irradiation as a quarantine treatment for the control of six insect pests in cut flower boxes. *J. Asia-Pacific Entomol.* 19, 31-38.
- Yun, S.H., Lee, S.W., Koo, H.N., Kim, G.H., 2014. Assessment of electron beam-induced abnormal development and DNA damage in *Spodoptera litura* (F.) (Lepidoptera: Noctuidae). *Radiat. Phys. Chem.* 96, 44-49.