

# 전자빔 조사가 감자뽕나방의 발육과 생식에 미치는 영향

조선란 · 안현모 · 엄태일 · 경예진 · 이승주 · 김현경 · 구현나 · 김길하\*

충북대학교 농업생명환경대학 식물의학과

## Effect of Electron Beam Irradiation on the Development and Reproduction of *Phthorimaea operculella* (Lepidoptera: Gelechiidae)

Sun-Ran Cho, Hyeonmo Ahn, Taeil Eom, Yejin Kyung, Seung-Ju Lee, Hyun Kyung Kim, Hyun-Na Koo and Gil-Hah Kim\*

Department of Plant Medicine, College of Agriculture, Life and Environment Science, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

**ABSTRACT:** The potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Zeller) has been known as a quarantine pest of potato. This study investigated inhibition doses of electron beam irradiation (EBM) by comparing their effects on the development and reproduction and DNA damage of the insect pest. Eggs (0-12 h old), larvae (3<sup>rd</sup> and 5<sup>th</sup> instar), pupae (less than 1 d old after pupation) and adults (less than 1 d old after emergence) were irradiated with increasing doses of EBM. The EBM with 150 Gy could not completely prevent the hatchability of eggs and pupation of the hatched larvae. The hatchability from the irradiated eggs were 19.3%. However, adult emergence from the irradiated eggs were completely inhibited. When 3<sup>rd</sup> and 5<sup>th</sup> instar larvae were irradiated at 100 Gy, the adult emergence from the irradiated larvae and the fecundity of the adults were completely inhibited. When pupae and adults were irradiated at 300 Gy and 400 Gy, respectively, the hatchability of the  $F_1$  eggs was completely inhibited. The alkaline comet assay on the level of DNA damage by EBM in *P. operculella* adults indicates that the EBM increased DNA damage level in a dose-dependent manner, and the damage was repaired in a time-dependent manner. These results may recommend EBM of 150 Gy as a phytosanitary treatment for *P. operculella*. However further confirmative study is required for the practical application of this EBM dose for *P. operculella* disinfestation.

**Key words:** Electron beam, *Phthorimaea operculella*, DNA damage

**조 록:** 감자뽕나방은 감자에 대한 검역 해충으로 알려져 있다. 본 연구는 전자빔 조사가 감자뽕나방의 발육 및 생식, 그리고 DNA 손상에 미치는 영향을 비교하고 억제선량을 조사하였다. 전자빔을 알(0-12시간 이내), 유충(3령과 5령), 번데기(용화 1일 이내), 그리고 성충(우화 1일 이내)에 선량을 증가시키면서 조사하였다. 전자빔 150 Gy는 알의 부화와 부화된 유충의 용화를 완전히 억제하였다. 조사된 알의 부화율은 19.3%였지만, 성충 우화는 완전히 억제되었다. 3령과 5령 유충에 100 Gy를 조사하였을 때, 성충의 우화와 생식은 완전히 억제되었다. 번데기와 성충에 각각 300 Gy와 400 Gy를 조사하였을 때,  $F_1$ 세대의 부화율이 억제되었다. 전자빔에 대한 감자뽕나방 성충의 DNA 손상 정도를 alkaline comet assay으로 분석하였으며, 전자빔 조사가 선량 의존적으로 감자뽕나방의 DNA 손상 정도를 증가시켰다. 이러한 결과는 감자뽕나방에 대한 식물 검역 처리법으로 전자빔 150 Gy를 권장할 수 있다. 하지만, 감자뽕나방을 방제하기 위해 전자빔을 현장에 적용하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

**검색어:** 전자빔, 감자뽕나방, DNA 손상

감자뽕나방(potato tuber moth, *Phthorimaea operculella*)은 뽕나방과에 속하며 주로 감자, 가지, 토마토, 파프리카 등 가지

과 작물의 해충으로서 유충이 기주의 성장점과 잎, 줄기, 과실 등의 조직에 파고들어가 서식한다(Fenemore, 1988). 특히 저장 또는 유통 중인 감자에 발생하며, 수량을 감소시키고 품질을 저하시켜 경제적 손실을 초래한다. 뿐만 아니라, 유충이 작물의 조직속에 파고들어가면서 생긴 구멍으로 균류나 세균에 의한 2차피해가 생긴다(Hanafi, 1999). 감자뽕나방은 EPPO (European

\*Corresponding author: [khkim@chungbuk.ac.kr](mailto:khkim@chungbuk.ac.kr)

Received March 23 2021; Revised April 20 2021

Accepted May 27 2021

and mediterranean Plant Protection Organization)와 대만에서 검역해충으로 규정하고 있다(EPPO, 2015). 식물검역처리법 중 훈증제인 메틸브로마이드가 몬트리올 의정서에서 오존층파괴물질로 지정되어 세계적으로 사용이 금지되고 있는 추세이며, 대체제로 에틸포메이트와 포스핀 등과 같은 화학적 처리방법과 이온화에너지, 저온처리, CO<sub>2</sub> 등과 같은 물리적 처리방법을 단독 또는 복합하여 해충을 방제하고 있다(Heather and Hallman, 2008; Nguyen et al., 2016; Kim et al., 2019, Cho et al., 2020b).

이온화에너지는 최근 해충과 세균방제에 이용되고 있는 소독기법으로 국외에서는 이미 검역처리법으로 이용하고 있다(Follett, 2004). 가장 많이 사용하는 이온화에너지는 감마선, X선, 전자빔 등이 있으며(Hallman, 2004), 이들은 훈증처리에 비해 짧은 처리시간과 잔류물질이 남지 않아 검역처리 방법으로 큰 이점을 가진다(Osouli et al., 2013). 전자빔은 on/off가 가능한 기계적인 장치를 이용하기 때문에 효율적이고, 고선량을 신속하게 조사할 수 있는 장점이 있지만, 감마선에 비해 투과력이 약해 대용량의 식품조사는 어렵다는 단점이 있다(Kwon, 2010). 하지만, 해충을 살충하려면 이온화에너지 선량을 높게 조사하여야 하는데(Moon et al., 2010), 이럴 경우에는 농산물의 품질에도 영향을 줄 수 있기 때문에 품질에 영향을 미치지 않는 적절한 선량을 이용하여야 한다(Chatterjee et al., 2012). 그러므로 병해충의 완전 사멸보다는 비정상적인 발육이나 불임을 유도하여 번식을 막는데 중점을 둔다(Follett, 2008; Hallman and Hellmich, 2009). Follett et al. (2007) 에 따르면, 미국에서는 모든 상품을 대상으로 해충을 방제하기 위해 generic irradiation treatment가 승인되었는데, 나비목 해충의 번데기와 성충을 제외한 대부분의 해충은 400 Gy 이하로 조사하여야 한다.

전자빔을 포함한 이온화에너지는 즉각적인 해충의 살충보다는 비정상적인 발육 또는 성충의 불임화를 초래하여 더 이상 번식을 하지 못하게 한다(Yun et al., 2014a; Koo et al., 2018; Cho et al., 2019; 2020a). 그 원인으로 이온화에너지를 해충의 세포에 조사할 경우 DNA의 손상을 야기하는데, DNA가 손상되면 세포는 이를 회복하기 위해 세포주기를 멈추고, 손상된 DNA를 회복하려고 한다(Fei and El-Deiry, 2003). 하지만 손상 많이 된 DNA는 정상수준까지 회복되는 것은 어렵다(Koo et al., 2012; Yun et al., 2014b; Koo et al., 2018).

EPPO와 대만에서는 감자뽕나방을 검역해충으로 지정하고 있을 만큼 주요한 해충이지만, 국내에서는 감자뽕나방을 대상으로 이온화에너지를 이용한 연구가 미비하다. 따라서 본 연구에서는 전자빔이 감자뽕나방의 발육과 생식에 미치는 영향을 분석하고, 전자빔 조사 선량에 따른 감자뽕나방의 DNA 손상

을 분석하였다.

## 재료 및 방법

### 실험곤충

실험에 사용된 감자뽕나방(*Phthorimaea operculella*)은 2011년 7월 국립식량과학원 고령지농업연구센터에서 분양받아 살충제 접촉없이 충북대학교 곤충생태 및 독성학 실험실에서 온도 25~27°C, 광주기 16L:8D, 상대습도 50~60%의 조건으로 누대 사육하였다. 감자뽕나방의 알은 암컷 성충의 산란을 유도하기 위하여 여과지에 직선으로 홈집을 1 cm 간격으로 낸 후 부채주름을 만들어 아크릴케이지(30 × 30 × 30 cm) 천장에 매달아 산란 받았다. 산란 받은 여과지는 breeding dish(φ 10 × 5 cm)에 넣은 다음 부화한 유충의 먹이로 5°C에서 보관된 감자의 덩이줄기를 잘라 주기적으로 넣어주었다. 번데기는 감자에서 골라 내어 성충 케이지에 넣는다. 아크릴케이지(30 × 30 × 30 cm)에 번데기를 넣고 성충 우화시 먹이원으로 5% 설탕물을 제공하였다.

### 전자빔 조사

본 연구에서 사용된 전자빔은 대전에 소재한 EB-Tech(주)의 High energy linear accelerator (UEL V10S, 10 MeV, 1 mA, 10 Kw)를 이용하였다. 전자빔의 선량은 alanine pellet dosimeter (Bruker biospin) 선량계로 측정하여 실제 흡수선량을 50, 100, 150, 200, 300, 그리고 400 Gy로 설정하였다. 조사선량에 따른 흡수선량의 범위는 Table 1과 같다.

### 감자뽕나방의 각충태에 대한 전자빔의 효과

알에 대한 효과 조사는 페트리디쉬(φ 6 × 1.5 cm)에 알(12시간 이내)을 넣은 다음, 전자빔을 조사한 후 각 선량별로 부화율

**Table 1.** Dose mapping (Mean ± SD) of electron beam

Target dose (Gy)	Absorbed dose (Gy)
50	51.2 ± 9.5
100	110 ± 7.9
150	150.4 ± 11.1
200	208.8 ± 4.6
300	300.3 ± 8.5
400	403.5 ± 7.2

을 조사하였다. 유충에 대한 효과 조사는 3령, 5령 충이 된 직후 감자 덩이줄기를 지름 5 cm, 높이 1 cm로 잘라 유충을 접종하고, 직경 12 cm insect breeding dish에 넣고 전자빔을 처리하였다. 각 선량별로 3령 유충은 용화율, 우화율, 유충기간, 사충률을 조사하였고, 5령 유충은 성충 수명을 추가적으로 조사하였다. 번데기에 대한 효과조사는 용화 된지 1일 이내의 번데기를 직경 3.5 cm petri dish에 접종한 후 전자빔을 조사하였다. 전자빔 조사 후 번데기의 우화율 및 우화한 암수 성충별 수명과 산란수,  $F_1$  세대의 부화율을 조사하였다. 산란수와  $F_1$  세대의 부화율을 조사하기 위해 원통형케이지(9 × 10 cm)에 암수 한 쌍씩 접종하여 먹이로 5% 설탕물을 공급하였고, 여과지를 넣어 산란받아 조사하였다. 성충에 대한 효과조사는 원통형케이지(φ 9 × 10 cm)에 암컷, 수컷을 따로 각각 넣어 전자빔을 조사하였다. 전자빔 조사 후 원통형케이지(φ 9 × 10 cm)에 암수 한 쌍씩 접종하고, 5%의 설탕물과 여과지를 넣어 산란받았으며, 성충 수명과 산란수,  $F_1$  세대의 부화율을 조사하였다. 알과, 유충, 번데기는 10마리씩 3반복으로 수행하였으며, 성충은 암컷과 수컷 5마리씩 3반복으로 수행하였다.

### DNA comet assays

감자뿌나방의 세포내 DNA 손상을 확인하기 위해 comet assay를 수행하였으며 Trevigen (Gaithersburg, MD, USA)사의 comet assay kit를 사용하였다. PBS (phosphate buffered saline) 용액에 전자빔이 조사된 감자뿌나방의 암컷 성충을 유리막대로 마쇄하여 100 μm strainer로 세포를 분리하였다. 분리한 세포 용액을 LMAgarose와 비율이 1:10이 되게 섞어준 다음 50 μl를 취하여 슬라이드에 도말하였다. 4°C 암조건에서 10분간 처리 후 슬라이드를 lysis solution에 4°C 암조건에 50분간 처리하였다. Alkaline unwinding solution을 이용하여 상온 암조건에

50분간 처리하였다. Alkaline electrophoresis solution에서 30분간 전기영동 후 슬라이드에 있는 solution을 제거하고 증류수에 5분간 두 번 washing 후 70% ethanol에 5분간 washing 하였다. 45°C에서 15분간 건조하였고 건조된 슬라이드에 SYBR Green을 100 μl 처리 후 4°C 암조건에 5분간 처리 후 슬라이드에서 SYBR Green을 제거한 다음 암조건에 건조시킨 후 confocal laser scanning microscope (TCS SP2 AOBS; Leica)을 이용하여 분석하였다. DNA 손상정도를 양적으로 확인해보기 위해 관찰된 세포 중 100개를 임의로 선별하여 CASP software (Comet Assay Software Project 1.2.2)를 이용하여 tail movement를 측정하였고 모든 실험은 3반복으로 수행하였다.

### 통계분석

본 연구에서 사용된 모든 통계분석은 Tukey's studentized range test (SAS Institute, 2016)을 이용하여 이온화에너지 조사 선량 간 차이를 비교하였다.

## 결과

### 전자빔의 감수성 조사

감자뿌나방의 알에 전자빔을 조사하였을 때 부화율은 선량이 증가함에 따라 감소하였고 200 Gy에서 100% 억제되었다 (Table 2). 알의 부화율은 100 Gy 선량에서 급격히 감소하였고, 우화율과 산란수,  $F_1$  세대의 부화율도 급격히 감소하였다. 하지만, 150 Gy 선량에서는 알에서 부화한 유충이 용화되는 것을 지지하지 못하였으나 우화하는 것은 완전히 억제할 수 있었다. 3령 유충에 전자빔을 조사하였을 때 용화율은 선량의 증가함에 따라 감소하였고, 100 Gy에서 우화가 100% 억제되었다 (Table

**Table 2.** Effect (Mean ± SD) of electron beam irradiation on the hatchability, pupation, emergence, longevity, fecundity, and  $F_1$  egg hatchability of *P. operculella* eggs

Dose (Gy)	N	Hatchability (%)	Pupation (%)	Emergence (%)	Longevity (day)	No. of eggs (♀/total)	Hatchability ( $F_1$ ) (%)
200	393	0.0 ± 0.0 c <sup>1</sup>	- <sup>2</sup>	-	-	-	-
150	298	19.3 ± 4.2 b	9.3 ± 3.1 b	0.0 ± 0.0 c	-	-	-
100	316	18.9 ± 3.4 b	14.0 ± 5.6 b	38.0 ± 3.6 b	9.6 ± 0.6 a	20.0 ± 3.6 b	22.1 ± 4.1 b
50	288	90.1 ± 9.0 a	84.0 ± 6.2 a	93.9 ± 3.1 a	10.8 ± 0.5 a	61.3 ± 4.5 a	95.3 ± 0.8 a
0	351	97.5 ± 1.6 a	93.3 ± 2.1 a	94.5 ± 1.2 a	10.5 ± 0.9 a	65.3 ± 4.9 a	97.3 ± 1.5 a

<sup>1</sup>Means within each column followed by the same letter are not significantly different at  $p < 0.05$  by Tukey's studentized range test (SAS Institute, Cary, NC, USA, 2016).

<sup>2</sup>Not determined

**Table 3.** Effect (Mean  $\pm$  SD) of electron beam irradiation on the pupation, emergence, longevity, fecundity and hatchability of *P. operculella* 3<sup>rd</sup> larvae

Dose (Gy)	N	Pupation (%)	Emergence (%)	Longevity (day)	No. of eggs (♀/total)	Hatchability ( $F_1$ ) (%)
200	60	11.7 $\pm$ 3.1 c <sup>1</sup>	0.0 $\pm$ 0.0 c	- <sup>2</sup>	-	-
100	60	18.8 $\pm$ 1.6 bc	0.0 $\pm$ 0.0 c	-	-	-
50	60	27.7 $\pm$ 6.4 b	44.0 $\pm$ 5.3 b	8.7 $\pm$ 0.7 a	61.3 $\pm$ 2.5 a	93.4 $\pm$ 2.5 a
0	60	91.8 $\pm$ 2.6 a	96.7 $\pm$ 5.8 a	9.1 $\pm$ 0.3 a	69.0 $\pm$ 6.6 a	97.2 $\pm$ 1.1 a

<sup>1</sup>Means within each column followed by the same letter are not significantly different at  $p < 0.05$  by Tukey's studentized range test (SAS Institute, Cary, NC, USA, 2016).

<sup>2</sup>Not determined.

**Table 4.** Effect (Mean  $\pm$  SD) of electron beam irradiation on the pupation, emergence, longevity, fecundity and hatchability of *P. operculella* 5<sup>th</sup> larvae

Dose (Gy)	N	Pupation (%)	Emergence (%)	Longevity (day)	No. of eggs (♀/total)	Hatchability( $F_1$ ) (%)
200	30	18.3 $\pm$ 2.9 c <sup>1</sup>	0.0 $\pm$ 0.0 c	- <sup>2</sup>	-	-
100	30	73.3 $\pm$ 5.8 b	39.0 $\pm$ 16.4 b	9.5 $\pm$ 0.4 a	0.0 $\pm$ 0.0 b	-
50	30	98.0 $\pm$ 3.5 a	90.3 $\pm$ 3.5 a	10.0 $\pm$ 1.4 a	58.0 $\pm$ 4.0 b	91.1 $\pm$ 1.2 b
0	30	99.0 $\pm$ 1.7 a	94.0 $\pm$ 5.3 a	10.2 $\pm$ 0.6 a	92.3 $\pm$ 9.1 a	97.3 $\pm$ 1.0 a

<sup>1</sup>Means within each column followed by the same letter are not significantly different at  $p < 0.05$  by Tukey's studentized range test (SAS Institute, Cary, NC, USA, 2016).

<sup>2</sup>Not determined.

**Table 5.** Effect (Mean  $\pm$  SD) of electron beam irradiation on the emergence, longevity, fecundity and hatchability of *P. operculella* pupae

Dose (Gy)	N	Emergence (%)	Longevity (day)	No. of eggs (♀/total)	Hatchability ( $F_1$ ) (%)
400	33	60.9 $\pm$ 2.9 c <sup>1</sup>	7.2 $\pm$ 0.4 b	0.0 $\pm$ 0.0 d	- <sup>2</sup>
300	33	72.4 $\pm$ 4.1 bc	6.9 $\pm$ 0.3 b	0.0 $\pm$ 0.0 d	-
200	102	79.3 $\pm$ 4.5 b	7.1 $\pm$ 0.7 b	16.0 $\pm$ 2.6 c	21.2 $\pm$ 5.3 c
100	97	84.3 $\pm$ 12.0 ab	7.3 $\pm$ 0.5 b	35.0 $\pm$ 6.6 b	64.7 $\pm$ 16.2 b
50	66	88.3 $\pm$ 11.9 ab	9.9 $\pm$ 1.0 a	61.7 $\pm$ 2.5 a	88.1 $\pm$ 8.9 ab
0	101	94.2 $\pm$ 4.0 a	10.1 $\pm$ 1.1 a	66.3 $\pm$ 7.4 a	93.2 $\pm$ 7.0 a

<sup>1</sup>Means within each column followed by the same letter are not significantly different at  $p < 0.05$  by Tukey's studentized range test (SAS Institute, Cary, NC, USA, 2016).

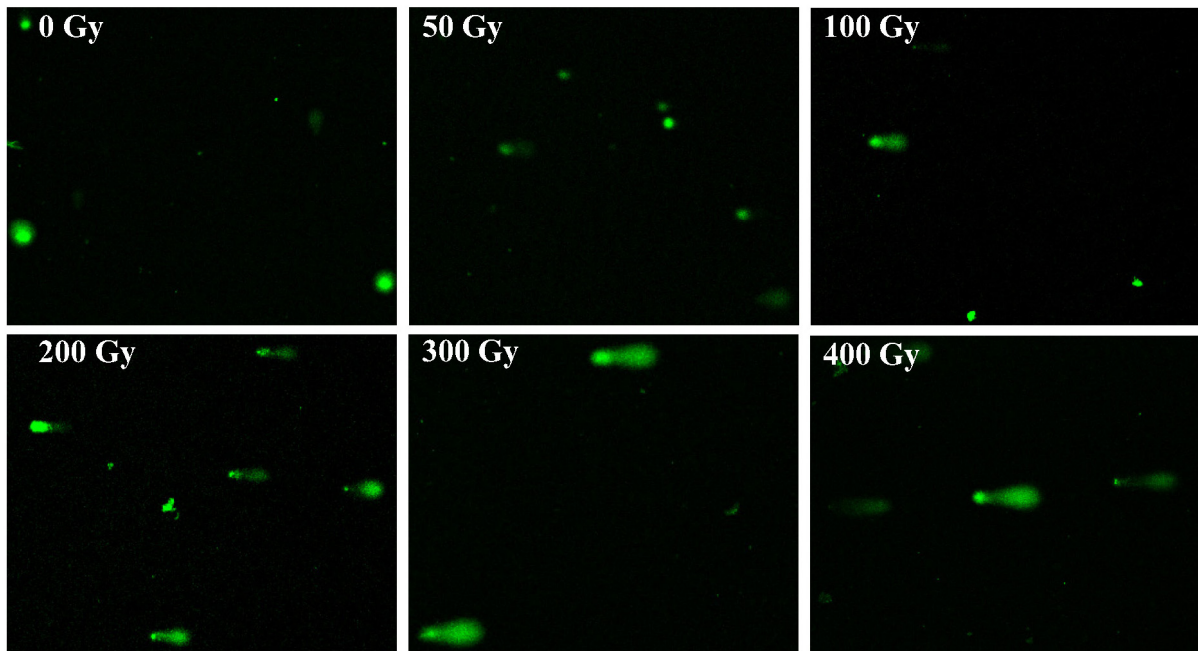
<sup>2</sup>Not determined.

**Table 6.** Effect (Mean  $\pm$  SD) of electron beam irradiation on the longevity, fecundity and hatchability of *P. operculella* adults

Dose (Gy)	N	longevity (day)	No. of eggs (♀/total)	Hatchability( $F_1$ ) (%)
400	62	6.7 $\pm$ 0.5 b <sup>1</sup>	0.0 $\pm$ 0.0 d	- <sup>2</sup>
300	43	7.9 $\pm$ 0.4 ab	9.7 $\pm$ 3.1 d	11.1 $\pm$ 1.9 d
200	153	9.2 $\pm$ 1.0 ab	24.7 $\pm$ 3.5 c	32.9 $\pm$ 3.4 c
100	112	9.8 $\pm$ 0.8 a	39.3 $\pm$ 4.2 b	68.8 $\pm$ 3.8 b
50	118	10.3 $\pm$ 1.5 a	62.0 $\pm$ 3.6 a	92.6 $\pm$ 1.5 a
0	124	10.2 $\pm$ 1.1 a	64.7 $\pm$ 7.5 a	96.9 $\pm$ 0.4 a

<sup>1</sup>Means within each column followed by the same letter are not significantly different at  $p < 0.05$  by Tukey's studentized range test (SAS Institute, Cary, NC, USA, 2016).

<sup>2</sup>Not determined.



**Fig. 1.** Representative images of the comet assay of electron beam induced DNA damage in *P. operculella* adults. The cells were harvested 5 h after *P. operculella* irradiation and analyzed under alkaline conditions using the comet assay kit.

3). 하지만, 5령 유충은 100 Gy에서부터 용화가 감소하였으며, 일부 성충으로 우화하였지만 산란은 하지 못하였다(Table 4). 200 Gy에서부터 용화가 급격히 감소하였고 우화가 완전히 억제되었다. 번데기에 전자빔을 조사하였을 때 400 Gy에서도 성충우화가 완전히 억제되지 않았으나, 300 Gy에서부터 산란이 완전히 억제되었다(Table 5). 우화한 성충의 수명은 100 Gy에서부터 무처리(0 Gy)와 비교했을 때 유의성이 나타났다. 성충에 전자빔을 조사하였을 경우 400 Gy에서 산란이 완전히 억제되었다(Table 6).

### 전자빔에 의한 DNA 손상

성충에 전자빔을 조사하였을 때 전자빔에 의한 감자뿌나방의 세포내 DNA 손상정도가 클수록 head부분은 작아지고 tail부분이 길어졌다(Fig. 1). 무처리구(0 Gy)의 tail길이는 짧거나 거의 나타나지 않아 DNA 손상이 거의 없었다. 그에 반해 전자빔의 선량이 높아짐에 따라 tail의 길이가 증가하였다.

### 고찰

본 실험을 통해 전자빔의 처리가 감자뿌나방의 정상적인 발육과 생식에 영향을 미친다는 것과 충태에 따라 최소 억제선량

이 다르다는 것을 알 수 있었다. 다른 곤충 종에 대한 이전 연구에서도 이온화에너지 조사를 받은 해충들은 발육 단계에 따라 발육이나 생식 억제효과의 차이를 보였다(Yun et al., 2014a; Koo et al., 2018, Cho et al., 2019; 2020a). 감자뿌나방의 충태 중에서 전자빔에 대해 가장 내성을 보인 단계는 성충이었고 가장 감수성인 발육단계는 3령 유충이었다. 본 연구와 비슷하게 나비목을 포함한 대부분의 해충들은 발육단계 중에서 성충 단계가 가장 radiotolerance (내성)인 것으로 알려져 있다(Follett and Neven, 2006; Koo et al., 2011; 2012; Yun et al., 2014a; Kim et al., 2015). 그렇기 때문에 USDA-APHIS (2006)에서는 나비목의 번데기와 성충을 제외한 나머지 해충의 발육 및 생식을 억제하기 위한 최소억제선량으로 400 Gy 이하를 제시하고 있으며, 검역 단계에서 육안으로 확인·제거 가능한 발육단계는 제외된다(Park et al., 2015). 본 연구 결과를 토대로, 감자뿌나방의 경우 번데기와 성충은 육안으로 확인이 가능하기 때문에 알과 유충 중에서 radiotolerance한 알을 기준으로 150 Gy를 억제선량으로 제시하고자 한다. 본 연구에서는 성충의 성별에 따라 radiotolerance를 확인해 보지는 않았으나, 일반적으로 수컷이 암컷보다 더 radiotolerance한 것으로 보고되고 있다(Ayvaz and Tuncbilek, 2006; Koo et al., 2011; 2012; Yun et al., 2014b). 선행연구에서도 배추좀나방, 아메리카잎굴파리, 담배겨세미나방은 수컷이 암컷보다 더 radiotolerance하다고 보고하였다

(Koo et al., 2011; 2012; Yun et al., 2014b). 그리고 전자빔은 감자뿌나방의 각 발육단계에 조사하였을 때, 번데기를 제외하고 우화된 성충의 수명보다는 우화와 산란, 그리고 F<sub>1</sub> 세대의 부화에 영향을 주었다. 이러한 결과는 담배가루이, 배추좀나방, 점박이응애, 아메리카잎굴파리, 그리고 복숭아혹진딧물에서도 동일하였다(Moon et al., 2010; Koo et al., 2011; Yun et al., 2014a).

일반적으로 조사 선량이 증가하면 살충효과도 증가하지만 높은 조사 선량으로 인해 농산물에 약해가 나타날 수 있다 (Seaton and Joyce, 1992; Tanabe and Dohino, 1995). 전자빔이 조사된 감자는 품종에 상관없이 발아가 억제되고, 조사되지 않은 감자보다 견고성과 중량을 감소시킨다(Etemadinasab et al., 2020). 본 연구에서는 감자뿌나방에 조사한 선량으로는 해충을 즉시 죽이지는 않았지만, 해충의 발육과 생식에 영향을 주었다. 선행 연구에 따르면, 감마선 500 Gy를 수컷 성충에 조사하면 정상충과 교미능력에 차이가 없는 불임 상태가 되었으며 (Rananavare et al., 1991), 감마선 150 Gy는 감자뿌나방을 완전 방제할 수 있다고 하였다(Haiba, 1994; 2000). 또한, Haiba et al. (2008)는 저선량(50, 70 Gy)을 조사하였을 때 보다 고선량(100, 150, 200 Gy)를 조사하였을 때, 감자뿌나방 성별에 상관없이 성충의 체내 단백질, 탄수화물, 지질의 양이 더 많이 감소한다고 보고하였다. 하지만, 감자뿌나방을 방제할 수 있는 선량이 아닌 저선량(1, 3, 5, 10 Gy)으로 감자에 조사할 경우, 오히려 감자가 생산하는 방충 물질의 분비가 억제되어 감자뿌나방의 섭식을 자극할 수 있다 (Saour et al., 1999). 그렇기 때문에, 이온화에너지를 조사할 농작물에 이상이 없으면서, 가해해충을 방제할 수 있는 선량을 찾아야 한다.

전자빔 조사에 의해 발육과 생식에 영향을 미치는 원인 중 하나인 DNA 손상을 민감하고 빠르게 확인할 수 있는 기술인 comet assay를 이용하여(Hasan et al., 2008; Shetty et al., 2017), 감자뿌나방의 충태 중에서 전자빔에 대해 가장 내성을 보인 성충의 DNA 손상정도를 분석하였다. DNA 손상정도는 전자빔 선량이 증가하면서 같이 증가하였는데, 이는 배추좀나방 유충도 전자빔에 의해 DNA 손상이 유발되었고, 전자빔 선량이 증가함에 따라 손상 정도도 증가하였다(Koo et al., 2011). 이 외에도 이온화에너지를 조사받은 여러 종류 해충의 충태와는 관계 없이 모두 DNA가 손상되었으나, DNA 손상을 유발하는 선량은 달랐다 (Imamura et al., 2004; Todoriki et al., 2006; Koo et al., 2012; Yun et al., 2014b; Kim et al., 2015). 본 연구에서는 손상된 DNA가 회복되는 것을 확인해보진 못하였으나, Yun et al. (2014b)의 연구에서는 담배겨세미나방 성충이 전자빔에 조사된 후 시간의존적으로 DNA가 회복되었으나, 100 Gy 이상에

서는 손상된 DNA가 더이상 회복하지 못하다고 보고하였다. 또한, 본 연구에서는 감자뿌나방 암컷 성충에서만 DNA 손상 정도를 확인하였으나, Kim et al. (2015)는 왕담배나방 성충 수컷이 암컷에 비해 2배 가까이 더 DNA가 손상되었다고 보고하였다. 이렇게 이온화에너지에 의해 해충의 DNA가 손상되는 것은 이온화에너지가 해충 내 세포 구성 요소에 작용하는 화학 결합을 파괴하고 free radical의 생성을 유발하여 산화 및 후속 손상을 일으키기 때문이다(Shetty et al., 2017). 또한, 이온화에너지는 해충의 체세포와 생식세포, 그리고 염색체의 손상을 일으키고 세포분열을 저해함으로써 DNA의 손상이 비정상적인 발육과 생식을 유발시킨다(Robinson, 2002; Hallman, 2004; Parker and Metha, 2007, Hallman, 2011).

결론적으로 전자빔 조사는 감자뿌나방의 발육과 생식에 영향을 미쳤을 뿐만 아니라, 감자뿌나방의 DNA 손상을 유발하였으며, 감자뿌나방에 대한 식물검역 소독처리 기준으로는 최소한 150 Gy가 필요하다고 판단된다. 하지만, 본 연구 결과가 국내 농산물 검역현장에서 응용되기 위해서는 농산물 수확 후 실제 포장 및 소독 단계에서 현장 적용을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 사 사

이 논문(연구실적물)은 2021학년도 충북대학교 연구년제 지원에 의하여 연구되었음.

## 저자 직책 & 역할

김길하 : 충북대, 교수; 실험설계 및 논문작성, 논문교정  
조선란 : 충북대, 박사후연구원; 실험수행, 논문작성  
안현모 : 충북대, 석사; 실험수행, 문헌조사  
엄태일 : 충북대, 석사과정; 실험수행, 문헌조사  
경예진 : 충북대, 박사과정; 실험수행  
이승주 : 충북대, 박사과정; 실험수행  
김현경 : 충북대, 박사; 논문교정  
구현나 : 충북대, 박사; 논문교정

모든 저자는 원고를 읽고 투고에 동의하였음.

## Literature Cited

Ayvaz, A., Tuncbilek, A.S., 2006. Effect of gamma radiation on life stages of the Mediterranean flour moth, *Ephestica kuehniella* zeller

- (Leppidoptera: Pyralidae). *J. Pest. Sci.* 79, 215-222.
- Chatterjee, S., Variyar, P.S., Sharma, A., 2012. Post- irradiation identification of papaya (*Carica papaya* L.) fruit. *Radiat. Phys. Chem.* 81, 352-353.
- 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 whitefly *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) and *Trialeurodes vaporariorum* in the exportation of fresh strawberries. *J. Econ. Entomol.* 112, 1611-1617.
- Cho, S.R., Shin, S., Ahn, H., Koo, H.N., Kim, Y., Kim, G.H., 2020a. Control of whitefly (Hemiptera: Aleyrodidae), *Trialeurodes vaporariorum*, with electron beam and X-ray radiation of fresh strawberries for export. *Insects.* 11, 337.
- Cho, S.W., Kim, H.K., Kim, B.S., Yang, J.O., Kim, G.H., 2020b. Combinatory effect of ethyl formate and Phosphine fumigation on *Pseudococcus longispinus* and *P. orchidicola* (Hemiptera: Pseudococcidae) mortality and phytotoxicity to 13 foliage nursery plants. *J. Asia-Pacific. Entomol.* 23, 152-158.
- EPPO website, Phthorimaea operculella. [https://www.eppo.int/MEETINGS/2015\\_meetings/wp\\_ppp.htm](https://www.eppo.int/MEETINGS/2015_meetings/wp_ppp.htm) (access on 27 May, 2015)
- Etemadinasab, H., Zahedi, M., Ramin, A.A., Kadivar, M.K., Shirmardi, S.P., 2020. Effects of electron beam irradiation on physicochemical, nutritional properties and storage life of five potato cultivars. *Radiat. Phys. Chem.* 177, 109093.
- Fei, P., El-Deiry, W.S., 2003. P53 and radiation responses. *Oncogene* 22, 5774-5783.
- Fenemore, P.G., 1988. Host-plant location and selection by adult moth, *Phthorimaea operculella* Zell. (Lepidoptera: Gelechiidae) a review. *J. Insect Physiol.* 3, 175-177.
- Follett, P.A., 2004. Irradiation to control insects in fruits and vegetables for export from Hawaii. *Radiat. Phys. Chem.* 71: 163-166.
- Follett, P.A., 2008. Effect of irradiation on Mexican leafroller (Lepidoptera: Tortricidae) development and reproduction. *J. Econ. Entomol.* 101, 710-715.
- Follett, P.A., Neven, L.G., 2006. Current trends in quarantine entomology. *Annu. Rev. Entomol.* 51, 359-385.
- Follett, P.A., Yang, M.M., Lu, K.H., Chen, T.W., 2007. Irradiation for postharvest control of quarantine insects. *Formosan Entomol.* 27, 1-15.
- Haiba, I.M., 1994. Disinfestation of different varieties of potato naturally or artificially infested by the potato tuber moth, *P. operculella* Zeller in the storage. *J. Arb. Nucl. Sci. Appl.* 27, 31-43.
- Haiba, I.M., 2000. Integration of ash and gamma-irradiation for controlling the potato tuber moth, *P. Operculella* Zeller in storage. *Bull. Ent. Soc. Egypt, Econ. Ser.* 27, 78-107.
- Haiba, I.M., Abd-El Aziz, M.F., 2008. Biochemical effects of potato irradiation on potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* Zeller (Lepidoptera Gelechiidae). *J. biolog. Sci.*, 1, 1-11.
- Hallman, G.J., 2004. Ionizing irradiation quarantine treatment against Oriental fruit moth (Lepidopter: Tortricidae) in ambient and hypoxic atmosphere. *J. Econ. Entomol.* 97, 824-827.
- Hallman, G.J., 2011. Phytosanitary applications of irradiation. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 10, 142-151.
- Hallman, G.J., Hellmich, R.L., 2009. Ionizing radiation as a phytosanitary treatment against European corn borer (Lepidoptera: Crambidae) in ambient, low oxygen, and cold conditions. *J. Econ. Entomol.* 102, 64-68.
- Hanafi, A., 1999. Integrated pest management of potato tuber moth in field and storage. *Potato Res.* 42, 373-380.
- Hasan, M.M., Todoriki, S., Miyanoshita, A., Immamura, T., 2008. Detection of gamma radiation-induced DNA damage in maize weevil, *Sitophilus zeamais* Mostchulsky (Coleoptera: Curculionidae) assessed using the comet assay. *Int. J. Radiat. Biol.* 84, 815-820.
- Heather, N.W., Hallman, G.J., 2008. Pest management and phytosanitary trade barriers. CABI International, Wallingford, Oxfordshire, UK. pp. 132-152.
- Imamura, T., Todorikia, S., Sotaa, N., Nakakita, H., Ikenagaa, H., Hayashib, T., 2004. Effect of "soft-electron" (low-energy electron) treatment on three stored-product insect pests. *J. Stored Prod. Res.* 40, 169-177.
- Kim, B., Song, J.E., Par, J.S., Park, Y., Shin, E.M., Yang, J., 2019. Insecticidal effects of fumigants (EF, MB, and PH3) towards Phosphine-Susceptible and -Resistant *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae). *Insects.* 10, 327. doi: 10.3390/insects10100327
- Kim, J., Chung, S.O., Jang, M., Jang, S.A., Park, C.G., 2015. Developmental inhibition and DNA damage of *Helicoverpa armigera* Hubner (Lepidoptera: Noctuidae) by gamma radiation. *Int. J. Radiat. Biol.* 91, 827-832.
- Koo, H.N., Yoon, S.H., Shin, Y.H., Yoon, C., Woo, J.S., Kim, G.H., 2011. Effect of electron beam irradiation on developmental stages of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *J. Asia-Pacific. Entomol.* 14, 243-247.
- Koo, H.N., Yun, S.H., Kim, H.K., Kim, G.H., 2018. Elucidation of molecular expression associated with abnormal development and sterility caused by electron beam irradiation in *Spodoptera litura* (F.) (Lepidoptera: Noctuidae). *Int. J. Radiat. Biol.* 95,1-8.
- Koo, H.N., Yun, S.H., Yoon, C., Kim, G.H., 2012. Electron beam irradiation induces abnormal development and the stabilization of p53 protein of American serpentine leafminer, *Liriomyza trifolii* (Burgess). *Radiat. Phys. Chem.* 81, 86-62.
- Kwon, J.H., 2010. Safety and understanding of irradiated food. Korea Safety Research Institute, Seoul, pp. 9-29.
- Moon, S.R., Son, B.K., Yang, J.O., Woo, J.S., Yoon, C.M., Kim, G.H., 2010. Effect of electron-beam irradiation on development and reproduction of *Bemisia tabaci*, *Myzus persicae*, *Plutella xylostella* and *Tetranychus urticae*. *Kor. J. Appl. Entomol.* 49, 129-137.
- Nguyen, T.T., Collins, p.J., Duong, T.M, Schlipalius, D.I., Ebert, P.R., 2016. Genetic conservation of phosphine resistance in the

- rice weevil *Sitophilus oryzae* (L.). J. Hered. 107, 228-237.
- Osouli, S., Ziale, F., Nejad, K.H.I., Moghaddam, M., 2013. Application of gamma irradiation on egg, active and quiescence stages of *Tetranychus urticae* Koch as a quarantine treatment of cut flower. Rad. Phys. Chem. 90, 111-119.
- Park, J.S., Jeong, S.Y., Kim, I., 2015. Confirmatory test of gamma irradiation against the larvae and pupae of *Helicoverpa arssulta* (Lepidoptera: Noctuidae) in paprika. Int. J. Indust. Entomol. 31, 103-106.
- Parker, A., Mehta, K., 2007. Sterile insect technique: A model for dose optimization for improved sterile insect quality. Fla. Entomol. 90, 88-95.
- Rananavare, H.D., Harwalkar, M.R., Rahalkar, G.W., 1991. Influence of modifying factors on induction of sterility and mating ability of potato tuberworm, *Phthorimaea operculella* (Zeller). J. Nucl. Agric. Biol. 20, 199-205.
- Robinson, A.S., 2002. Mutations and their use in insect control. Mutat. Res. 511, 113-132.
- Saour, G., Makee, H., Al-Oudat, M., 1999. Susceptibility of potato plants grown from tubers irradiated with stimulation doses of gamma irradiation to potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* Zeller (Lep., Gelechiidae). J. Appl. Entomol., 123, 159-164.
- SAS Institute, 2016. SAS user's guide: Statistics, version 9.4 ed. SAS Institute, Cary, NC.
- Seaton, K.A., Joyce, D.C., 1992. Gamma irradiation for insect deinfestation damages native Australian cut flowers. Sci. Hortic. 52, 343-355.
- Shetty, V., Shetty, N.J., Ananthanarayana, S.R., Jha, S.K., Chaubey, R.C., 2017. Evaluation of gamma radiation-induced DNA damage in *Aedes aegypti* using the comet assay. Toxicol. Ind. Health. 33, 930-937.
- Tanabe, K., Dohino, T., 1995. Responses of 17 species of cut flowers to electron beam irradiation. Res. Bull. Pl. Prot. Japan. 31, 89-94.
- Todoriki, S., Hasan, M., Miyanoshita, A., Immamura, T., Hayashi, T., 2006. Assessment of electron beam-induced DNA damage in larvae of chestnut weevil, *Curculio sikkimensis* (Heller) (Coleoptera: Curculionidae) using comet assay. Radiat. Phys. Chem. 75, 292-296.
- USDA-APHIS (U.S. Department of Agriculture-Animal and Plant Health Inspection Service), 2006. Treatments for fruits and vegetables. Rules and Regulations. Fed. Regist. 71, 4451-4464.
- Yun, S.H., Kim, M., Kim, H., Lee, S.W., Yoo, D.H., Kim, H.K., Koo, H.N., Kim, G.H., 2014a. Doses of electron beam and X-ray irradiation for inhibition of development and reproduction in four insect pests. Korean J. Appl. Entomol. 53, 391-398.
- Yun, S.H., Lee, S.W., Koo, H.N., Kim, G.H., 2014b. Assessment of electron beam-induced abnormal development and DNA damage in *Spodoptera litura* (F.) (Lepidoptera: Noctuidae). Radiat. Phys. Chem. 96, 44-49.