Original article KOREAN JOURNAL OF APPLIED ENTOMOLOGY

한국응용곤충학회지
Korean J. Appl. Entomol. 53(4): 391-398 (2014)
DOI: http://dx.doi.org/10.5656/KSAE.2014.10.0.054

ⓒ The Korean Society of Applied Entomology
pISSN 1225-0171, eISSN 2287-545X

4종 해충의 발육과 생식에 대한 전자빔과 X-ray의 억제선량

윤승환 · 김민준 · 김현아 · 이선우 · 유대현 · 김현경 · 구현나 · 김길하*
충북대학교 농업생명환경대학 식물의학과

Doses of Electron Beam and X-ray Irradiation for Inhibition of Development and Reproduction in Four Insect Pests

Seung-Hwan Yun, Minjun Kim, Hyunah Kim, Seon-Woo Lee, Dae Hyun Yoo, Hyun Kyung Kim, Hyun-Na Koo and Gil-Hah Kim*
Department of Plant Medicine, College of Agriculture, Life and Environment Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

ABSTRACT: This study investigated inhibitory doses of electron beam and X-ray irradiation by comparing their effects on the development and reproduction of four insect pests (*Myzus persicae*, *Tetranychus urticae*, *Liriomyza trifolii*, *and Frankliniella intonsa*). When *M. persicae* nymphs were irradiated with 100 Gy of electron beam and 30 Gy of X-ray beam, offspring production by adults that developed from the treated nymphs was completely inhibited. When *M. persicae* adults were irradiated with 200 Gy of electron beam and 50 Gy of X-ray beam, emergence of the F_1 generation was inhibited. However, these two ionizing radiations did not affect adult longevity. When *T. urticae* eggs were irradiated with 150 Gy of electron beam and 50 Gy of X-ray beam, egg hatching was completely inhibited. When *L. trifolii* pupae were irradiated, the emergence rate decreased with increasing doses of X-ray irradiation. After *F. intonsa* adults were irradiated with 250 Gy of electron beam and 200 Gy of X-ray beam, egg hatching of the F_1 generation was completely suppressed.

Key words: Insect pests, Electron beam, X-ray, Inhibition dose

초 록: 4종 해충(복숭아혹진딧물, 점박이응애, 아메리카잎굴파리, 대만총채벌레)에 이온화에너지인 전자빔과 X-ray를 각각 조사하여 이들 해충의 발육과 생식에 미치는 영향을 비교하여 억제선량을 결정하였다. 복숭아혹진딧물 약충에 전자빔과 X-ray 조사 시, 전자빔의 경우에는 100 Gy, X-ray의 경우에는 30 Gy에서 우화성충의 산자가 완전히 억제되었다. 복숭아혹진딧물 성충의 경우 200 Gy (전자빔)와 50 Gy (X-ray)에서 각각 F_1 세대 약충의 우화가 억제되었다. 그러나 이들 두 이온화에너지 모두 성충수명에는 영향을 주지 않았다. 점박이응애의 알에서는 전자빔 150 Gy와 X-ray 50 Gy 선량에서 알의 부화가 완전히 억제되었다. 아메리카잎굴파리 번데기에서는 X-ray 조사선량이 증가할수록 우화율이 감소하였다. 대만총채벌레 성충에 조사 시 전자빔의 250 Gy와 X-ray의 200 Gy 선량에서 F_1 세대 알의 부화가 완전히 억제되었다.

검색어: 해충, 전자빔, X-ray, 억제선량

국가 간의 교역이 활발해짐에 따라 수출입으로 인한 검역물량이 증가하는 추세이며, 이로 인해 외래해충이 유입될 가능성이 높아지고 있다(Hallman, 1998; NPQS, 2010). 외래해충의 유입 문제는 국가 간 교역에 있어 큰 걸림돌로 작용하기 때문에 검역해충의 유입과 확산을 막기 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다(Schrader and Unger, 2003). 검역해충을 방제하기 위한 처리방법으로는 methyl bromide, phosphine, EDN 등을 이용한 훈증, 고온 및 저온 처리, 대기환경 조절 등이 있으며 이를 단독 또는 복합적으로 사용한다(Heather and Hallman, 2008). Methyl bromide는 인체에 유해하며 묘목류 및 과실류에 처리 시 약해가 발생한다. 또한 몬트리올 의정서에 오존층파괴 물질로 지정되어 전 세계적으로 사용을 감축하고 있는 실정이다(Miller and Mcdonald, 1995; Hallman, 1998; UNEP, 2009). 따라서 methyl bromide를 대체하여 사용할 수 있는 소독기법의 개발이 절실하다.

이온화에너지는 최근 들어 해충과 세균 방제를 위해 각광받고 있는 소독기법으로 국외에서는 이미 검역처리에 이용을 하

*Corresponding author: khkim@chungbuk.ac.kr
Received October 6 2014; Revised October 23 2014
Accepted October 30 2014

The Korean Society of Applied Entomology (KSAE) retains the exclusive copyright to reproduce and distribute for all KSAE publications.
The journal follows an open access policy.

고 있으며 국내에서는 의료용품 소독, 식품 특히 가공품의 소독, 반도체 등에서만 한정되어 사용되고 있다(Park et al., 2006). 이온화에너지는 효과적인 검역처리 기법으로 농산물에 피해를 최소화 할 수 있는 비화학적 기술이다(Hallman, 1998; Osouli et al., 2013). 가장 많이 사용하는 이온화에너지 종류에는 감마선(gamma-ray), 전자빔(electron beam), X-선(X-ray) 등이 있다(Hallman, 2004). 이들은 훈증처리 대비 짧은 처리시간과 잔류물질이 남지 않아 검역처리 방법으로 큰 이점을 가진다(Osouli et al., 2013). 실제 하와이에서 미국 본토로 파파야 외 10종의 과일과 5종의 채소를 운송하기 전에 과실파리 등에 대한 검역처리방법으로 이온화에너지를 사용하고 있다(Follett, 2004). 이온화에너지 조사를 통한 해충방제 기술은 다른 방제기술과는 다르게 빠른 살충효과보다는 비정상적인 발육과 생식을 유발하여 불임에 이르게 한다(Follett, 2006a; 2006b). 국외 연구사례를 살펴보면 *Epiphyas postvittana* (Lepidoptera: Tortricidae), *Ephestia kuehniella* (Lepidoptera: Pyralidae), *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae), *Sitotroga cerealella* (Lepidoptera: Pyralidae) (Ayvaz and Tuncbilek, 2006; Hallman and Phillips, 2008; Hallman and Hellmich, 2009; Jang et al., 2012) 등에서 감마선을 이용한 연구결과 보고가 대부분이다. 전자빔을 이용한 연구는 주로 soft-electron beam을 저장 곡식에 처리함으로써 저곡해충 발생정도를 비교한 연구가 주로 이루어져있다(Imamura et al., 2004; 2009). 국내에서의 이온화에너지를 이용한 해충연구도 많지 않지만 대부분 감마선을 이용하였다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서 전자빔과 X-선을 이용한 이유는 위에 기술한바와 같은 장점들을 이용하여 실제 검역기법으로 개발하기 위해 필요한 실험이기 때문이다. 현재 국내에서 해충을 이용한 전자빔 연구로는 Moon et al. (2010)에 의한 점박이응애(*Tetranychus urticae*), 복숭아혹진딧물(*Myzus persicae*), 담배가루이(*Bemisia tabaci*)가 있으며 Koo et al. (2011)은 배추좀나방(*Plutella xylostella*)에 대해 전자빔의 영향을 연구하였다. 또한 아메리카잎굴파리(*Liriomyza trifolii*)에서 전자빔은 세포내 DNA 손상을 유발하여 비정상적인 발육을 가져왔으며 수컷보다 암컷이 전자빔조사에 민감하게 반응하였다(Koo et al., 2012). 전자빔에 의한 충체 내 DNA 손상은 저선량일 경우 시간이 지날수록 세포내 repair system에 의해 자체적으로 회복이 되었지만 선량이 높아질수록 DNA 손상이 심각하여 완전히 회복되지 못함을 담배거세미나방(*Spodoptera litura*)에서 관찰하였다(Yun et al., 2014). Moon et al. (2010)의 연구에서는 대상해충을 완전히 억제할 수 있는 선량은 보고되지 않았으며 또한 국내에서 X-ray가 해충에 미치는 영향에 대한 연구는 현재까지 수행되지 않은 상황이다. 따라서 본 연구는 4종 해충, 복숭아혹진딧물, 점박이응애, 아메리카잎굴파리, 그리고 대만총채벌레(*Frankliniella intonsa*)에 대하여 전자빔과 X-ray 조사 시 발육과 생식에 나타나는 영향을 조사하여 이들을 완전히 억제할 수 있는 최적선량을 찾고 두 이온화에너지 종류에 따른 해충의 민감도를 비교하였으며 이온화에너지를 이용한 소독기법에 대한 기초자료를 제공하기 위해 수행 되었다.

재료 및 방법

실험곤충

실험에 사용된 복숭아혹진딧물과 점박이응애는 1998년 한국화학연구원에서 분양 받은 감수성계통을 각각 배추유묘와 강낭콩을 기주 식물로 하여 약제 처리 없이 누대 사육하였다. 아메리카잎굴파리는 2012년 전남 구례에서 채집하여 강낭콩을 기주 식물로 하여 누대사육 하였다. 대만총채벌레는 2012년 충북 청주에서 채집하여 강낭콩을 기주식물로 하여 누대사육하였다. 실험 곤충은 온도 24～27℃, 광주기 16L:8D, 상대습도 50～60% 조건에서 실내 사육하였다.

전자빔과 X-ray 조사

전자빔과 X-ray 조사는 대전에 소재한 EB-Tech(주)의 high energy linear accelerator (UEL V10-10S, 10 Mev, 1 mA, 10 Kw)를 사용하였다. 전자빔의 선량은 선량계로 측정한 후 실제 흡수되는 선량이 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400 Gy가 되도록 설정하였고 X-ray는 high energy linear accelerator에 converter를 장착하여 실제 흡수선량이 10, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 250, 300 Gy가 되도록 설정하였다.

곤충의 발육단계별 샘플 준비

복숭아혹진딧물은 water agar가 있는 petri dish(지름 3.5 cm)에 배추 잎 절편(지름 3.5 cm)를 올려놓고 1령 약충을 10마리씩 접종한 후 parafilm (Pechiney, Chicago, IL)으로 밀봉한 다음 전자빔과 X-ray를 조사하였다. 성충은 우화 24시간 이내의 것을 사용하였으며 약충과 같은 방법으로 접종한 후 전자빔과 X-ray를 각각 조사하였다. 1령 약충에 조사한 경우, 우화율과 우화성충의 수명 및 산자수를 조사하였다. 성충의 경우 성충의 수명, 산자수, F_1 세대 약충의 우화율을 조사하였다. 각 실험은 3반복으로 수행하였다.

점박이응애 알은 petri dish(지름 6.0 cm)에 모서리를 자른

탈지면을 깔고 물을 충분히 적신 후 강낭콩 잎 절편(지름 3.5 cm)을 탈지면 위에 올려놓은 후 점박이응애 암컷성충을 20마리씩 접종하여 12시간 동안 산란을 받았다. 성충을 제거하고 전자빔과 X-ray를 각각 조사하였다. 약충은 알에서 사용한 동일한 조건의 강낭콩 잎 절편에 알을 받은 후 2령 약충이 발생하였을 때 조사하였으며 성충은 우화한지 24시간 이내의 성충을 20마리씩 접종하여 조사하였다. 알에 조사한 경우, 부화율, 우화율과 우화성충의 수명, 산란수, F_1 세대 알의 부화율을 조사하였다. 약충에서는 우화율과 우화성충의 수명, 산란수 그리고 F_1 세대 알의 부화율을 조사하였다. 성충에서는 성충의 수명과 산란수 그리고 F_1 세대 알의 부화율을 조사하였다. 각 실험은 3반복으로 수행하였다.

아메리카잎굴파리 알은 사각형 아크릴 사육상(30 × 30 × 30 cm)에 성충을 30～50마리를 접종하여 24시간 동안 강낭콩 유묘에 산란을 받은 후 전자빔과 X-ray를 조사하였다. 유충은 알에서 한 방법과 동일하게 강낭콩 유묘에서 산란을 받은 후 알을 부화시켰으며 2령 유충이 있는 강낭콩 유묘를 전자빔과 X-ray를 각각 조사하였다. 번데기는 용화된지 24시간 이내의 번데기를 petri dish(지름 3.5 cm)에 30마리 씩 접종한 후 밀봉하여 전자빔과 X-ray를 각각 조사 하였다. 성충은 glass vial (2.5 × 7cm)에 우화한지 24시간 이내 성충을 각각 한 마리 씩 접종하여 전자빔과 X-ray를 각각 조사하였다. 실험은 3반복으로 수행하였다.

대만총채벌레 알은 water agar가 있는 petri dish(지름 3.5 cm)에 강낭콩 잎 절편(지름 3.5 cm)을 올린 후 암컷성충 15마리를 접종하여 밀봉한다. 24시간 동안 산란을 받은 후 성충을 제거하고 전자빔과 X-ray를 각각 조사하였다. 약충은 알의 방법과 동일하게 산란을 받은 후 부화 시킨 2령 약충을 water agar가 있는 petri dish(지름 3.5 cm)에 강낭콩 잎 절편(지름 3.5 cm)을 올린 후 15마리 씩 접종하여 조사하였다. 성충은 우화한지 24시간 이내의 성충을 약충에서와 동일하게 강낭콩 잎 절편(지름 3.5 cm)에 성충 10마리씩 접종 후 밀봉하여 전자빔과 X-ray를 각각 조사하였다. 모든 실험은 3반복으로 수행하였다. 실험조건은 온도 24～27℃, 광주기 16L:8D, 상대습도 50～60%를 유지하였다.

통계 분석

실험결과의 분석은 Tukey`s Studentized Range Test (SAS Institute, 2003) 방법을 이용하여 이온화에너지 조사량 간 차이를 비교하였다.

결과 및 고찰

전자빔과 X-ray 조사가 복숭아혹진딧물의 발육과 생식에 미치는 영향

전자빔과 X-ray 조사에 의한 복숭아혹진딧물에 대한 영향은 Table 1과 같다. 약충에 전자빔과 X-ray 조사 시 우화율과 우화에 성공한 성충의 수명에는 영향이 없었다. 이들 성충이 낳은 약충의 수는 선량이 증가할수록 줄어들었고 전자빔은 100 Gy에서, X-ray는 30 Gy 선량에서 완전히 산자를 억제하였다. 성충에 전자빔과 X-ray를 조사하였을 경우, 성충 수명에는 역시 영향이 없었다. 이온화에너지 선량이 증가 할수록 산자수가 감소하였으나 전자빔 200 Gy에서 2.2±1.3마리, X-ray 50 Gy에서 조차 3.5±1.3마리의 약충을 낳았다. 그러나 이들(F_1 세대)의 발육을 계속 관찰한 결과 우화에는 모두 실패하였다. 이처럼 복숭아혹진딧물 약충의 억제를 위해서는 전자빔 100 Gy, X-ray는 30 Gy가 필요하며 성충의 억제를 위해서는 전자빔 200 Gy, X-ray는 50 Gy가 필요하다. 선행연구에서도 대상 해충의 발육단계에 따라 요구되는 선량이 차이가 났는데 *Aspidiotus destructor* Signoret (Homoptera: Diaspididae)의 2령 약충에 X-ray 조사 시 60 Gy에서 F_1 세대의 2령 약충의 생성이 완전히 억제되었지만 성숙한 성충에 조사 시 200 Gy에서 F_1 세대의 2령 약충의 생성이 완전히 억제되었다(Follett, 2006a). 또한 Mexican leafroller (Lepidoptera: Tortricidae)에 X-ray 조사 시 알의 경우 90 Gy에서 부화가 억제되었으며 1령 유충에선 120 Gy에서 용화가 억제되었고 3령 유충에선 120 Gy에서 우화가 억제되었으나 5령 유충과 용화 후 1～2일 이내 번데기에선 선량이 증가함에 따라 우화율이 감소하였으나 150 Gy에서도 우화율이 완전히 억제되지 않았다(Follett, 2008).

전자빔과 X-ray 조사가 점박이응애의 발육과 생식에 미치는 영향

전자빔과 X-ray 조사가 점박이응애에 미치는 영향은 Table 2와 같다. 점박이응애 알에 전자빔과 X-ray 조사 시 선량이 증가할수록 부화율이 감소하였고 전자빔은 150 Gy에서, X-ray는 50 Gy에서 부화가 완전히 억제되었다. 약충에 두 이온화에너지를 각각 조사 시 우화율과 우화성충 수명에는 통계적 유의성을 보이지 않았다. 그러나 전자빔 400 Gy에서조차 일부 산란을 하였지만(1.3±1.9개), 산란된 알은 모두 부화 하지 못하였다. X-ray는 300 Gy 조사 시 산란이 완전히 억제되었다. 성충에 조사 시 복숭아혹진딧물과 마찬가지로 선량에 따른 성충수명에

Table 1. Effect of electron beam and X-ray irradiation on the emergence, longevity, fecundity, and F_1 emergence of *M. persicae*

Stage	Radiation	Dose (Gy)	n[a)]	Emergence (%)	Longevity (day)	No. of offspring (♀/total)	Emergence (F_1)(%)
				Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD
Nymphs	E-beam	150	90	86.9±7.1 a[b)]	13.3±3.5 a	0.0±0.0 a	-[C)]
		100	90	87.1±5.2 a	13.5±3.1 a	0.0±0.0 a	-
		50	90	90.0±6.4 a	13.7±4.0 a	31.7±10.0 c	-
	X-ray	30	90	86.8±3.5 a	13.9±4.0 a	0.0±0.0 a	-
		20	90	88.1±3.2 a	14.1±4.4 a	1.0±0.7 a	-
		10	90	88.8±4.4 a	14.3±4.4 a	11.1±4.9 b	-
	Control	0	90	90.7±5.8 a	14.0±3.6 a	34.6±8.0 c	-
Adults	E-beam	200	90	-	12.2±2.0 a	2.2±1.3 a	0.0±0.0 a
		150	90	-	12.8±2.0 a	2.6±1.3 ab	4.9±5.0 a
		10	90	-	13.1±2.5 a	3.1±1.5 ab	23.1±12.3 b
		50	90	-	13.0±3.7 a	27.8±6.9 d	83.6±7.8 d
	X-ray	50	90	-	13.3±3.0 a	3.5±1.3 ab	0.0±0.0 a
		30	90	-	12.8±4.0 a	5.7±2.5 ab	6.2±3.5 a
		20	90	-	13.8±3.9 a	7.1±1.7 b	45.3±3.4 c
		10	90	-	13.3±3.4 a	14.4±4.4 c	84.5±3.8 d
	Control	0	90	-	12.5±3.1 a	34.4±5.7 e	89.4±5.9 d

[a)]Sample size.
[b)]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, 2003).
[C)]Not experimented.

Table 2. Effect of electron beam and X-ray irradiation on the hatchability, emergence, longevity, fecundity, and F_1 hatchability of *T. urticae*

Stage	Radiation	Dose (Gy)	n[a)]	Hatchability (%)	Emergence (%)	Longevity (day)	No. of eggs (♀/total)	Hatchability (F_1)(%)
				Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD
Eggs	E-beam	150	179	0.0±0.0 a[b)]	-[C)]	-	-	-
		100	170	4.8±4.8 a	88.7±1.6 a	11.6±2.3 a	60.5±14.4 a	44.4±15.0 a
		70	151	36.3±4.3 b	87.0±2.0 a	10.3±4.2 a	50.1±22.0 a	49.9±13.0 ab
		50	187	79.4±5.5 b	87.6±6.6 a	9.2±3.4 a	57.6±14.6 a	72.1±19.7 bc
	X-ray	50	201	0.0±0.0 a	-	-	-	-
		30	200	1.2±1.9 a	-	-	-	-
		20	164	8.2±8.4 a	80.1±6.0 a	8.4±2.4 a	50.4±17.1 a	49.0±8.7 ab
		10	196	52.3±12.2 c	87.7±5.0 a	8.8±3.7 a	57.1±15.5 a	81.7±10.2 c
	Control	0	147	91.0±6.2 d	89.5±4.0 a	9.6±3.5 a	63.3±16.1 a	81.5±7.6 c
Nymphs	E-beam	400	90	-	88.5±3.7 a	12.8±3.7 a	1.3±1.9 a	0.0±0.0 a
		350	90	-	90.1±5.0 a	12.0±4.2 a	1.9±1.8 a	7.3±10.1 a
		300	90	-	89.6±3.9 a	13.0±4.7 a	4.6±6.5 a	36.5±27.1 a
		250	90	-	92.1±3.9 a	13.6±5.2 a	5.3±8.7 a	31.2±35.4 a
	X-ray	300	90	-	89.2±6.0 a	12.4±2.5 a	0.0±0.0 a	-
		250	90	-	91.7±3.9 a	12.4±3.4 a	0.9±2.4 a	13.5±17.7 a
		200	90	-	90.0±1.8 a	13.6±3.9 a	1.0±2.4 a	10.1±12.3 a
		150	90	-	88.2±5.8 a	13.6±3.5 a	6.7±9.0 a	26.7±22.7 a
	Control	0	90	-	91.1±1.9 a	13.0±3.4 a	50.7±18.4 b	91.3±3.8 b

Table 2. Continued

Stage	Radiation	Dose (Gy)	n[a)]	Hatchability (%)	Emergence (%)	Longevity (day)	No. of eggs (♀/total)	Hatchability (F_1)(%)
				Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD
Adults	E-beam	400	90	-	-	11.8±4.2 a	33.0±5.3 a	0.0±a a
		350	90	-	-	11.6±4.1 a	44.3±16.2 a	1.1±2.1 ab
		300	90	-	-	12.2±4.1 a	49.3±10.0 ab	16.7±9.3 c
		250	90	-	-	12.0±4.9 a	48.4±10.6 ab	12.9±10.9 bc
	X-ray	300	90	-	-	12.0±3.9 a	41.5±5.0 a	0.0±0.0 a
		250	90	-	-	11.9±4.3 a	43.3±8.9 a	2.0±3.9 ab
		200	90	-	-	12.0±4.6 a	52.6±8.3 ab	12.4±9.5 c
		150	90	-	-	12.8±3.5 a	43.5±16.0 a	22.1±12.4 c
	Control	0	90	-	-	11.9±3.8 a	67.8±24.4 b	90.4±5.1 d

[a)]Sample size.
[b)]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, 2003).
[C)]Not experimented.

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

Stage	Dose (Gy)	n[a)]	Hatchability (%)	Pupation (%)	Emergence (%)	Longevity (day)	No. of eggs (♀/total)	Hatchability (F_1)(%)
			Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD
Eggs	30	202	0.0±0.0 a[b)]	-[c)]	-	-	-	-
	10	166	35.2±4.5 b	87.5±9.2 a	47.6±18.9 a	-	-	-
	0	127	87.4±4.6 c	89.6±6.1 a	88.9±1.9 b	-	-	-
Larvae	70	242	-	84.0±4.8 a	0.0±0.0 a	-	-	-
	50	236	-	85.1±2.3 a	0.0±0.0 a	-	-	-
	30	244	-	81.1±4.8 a	1.0±1.7 a	-	-	-
	10	238	-	90.8±0.9 b	41.7±7.3 b	-	-	-
	0	205	-	87.8±1.9 ab	83.8±3.6 c	-	-	-
Pupae	100	90	-	-	0.0±0.0 a	-	-	-
	70	90	-	-	1.3±3.1 a	-	-	-
	50	90	-	-	23.8±3.1 b	-	-	-
	30	90	-	-	25.5±3.6 b	-	-	-
	10	90	-	-	73.5±10.1 c	-	-	-
	0	90	-	-	78.1±6.2 c	-	-	-
Adults	150	90	-	-	-	11.8±2.7 a	20.1±17.8 a	0.0±0.0 a
	100	90	-	-	-	11.2±3.2 a	35.4±20.5 a	0.7±1.2 a
	70	90	-	-	-	12.3±3.4 a	76.2±37.3 a	16.3±9.8 b
	50	90	-	-	-	9.0±2.2 a	78.6±60.7 a	18.8±14.7 b
	0	90	-	-	-	10.8±2.7 a	172.7±90.0 b	81.8±7.8 c

[a)]Sample size.
[b)]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, 2003).
[C)]Not experimented.

는 큰 영향이 없었다. 그러나 산란수는 무처리 대비 이온화에너지 처리구에서 통계적 차이는 없지만 다소 감소하는 경향을 나타내었다. F_1 세대 알의 부화는 선량이 증가 할수록 감소하였고 전자빔은 400 Gy에서, X-ray는 300 Gy에서 완전히 억제되었다.

X-ray 조사가 아메리카잎굴파리의 발육과 생식에 미치는 영향

아메리카잎굴파리에 전자빔이 미치는 영향은 우리 연구팀이 이미 보고를 하였는데 알, 유충, 번데기, 그리고 성충 모두 150 Gy 선량에서 억제가 되었다(Koo et al., 2012). X-ray 조사에 의한 아메리카잎굴파리에 대한 영향은 Table 3과 같다. 알에 X-ray 조사 시 조사선량이 증가할수록 부화율이 감소하였으며 30 Gy에서 완전히 억제되었다. 2령 유충에 X-ray 조사 시 모든 선량에서 용화에는 영향을 미치지 않았으나 30 Gy에서 약 1% 정도가 우화하였고 50 Gy에서는 우화가 완전히 억제되었다. 번데기에서는 선량이 증가할수록 점차적으로 우화율이 감소하였고 100 Gy에서 우화가 완전히 억제되었다. 성충에 X-ray 조사 시 역시 성충수명에는 큰 영향이 없었다. 그러나 산란수는 선량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였고 F_1 세대 알의 부화는 150 Gy에서 완전히 억제되었다.

전자빔과 X-ray 조사가 대만총채벌레의 발육과 생식에 미치는 영향

전자빔과 X-ray 조사에 의한 대만총채벌레에 대한 영향은 Table 4와 같다. 대만총채벌레 알에 전자빔과 X-ray 조사 시 선량이 증가함에 따라 알의 부화율이 현저히 감소하였으며 전자빔은 100 Gy에서, X-ray는 30 Gy에서 알의 부화가 완전히 억제되었다. 약충에서는 전자빔 150 Gy와 X-ray 30 Gy에서 우화가 완전히 억제되었다. 성충에서는 성충수명에는 모두 영향을 미치지 않았으며 전자빔은 250 Gy에서 5.4±1.8개, X-ray는 200 Gy에서조차 6.1±2.5개의 알을 낳았다. 그러나 모두 부화에 성공하지는 못하였다.

본 실험에 사용한 복숭아혹진딧물과 점박이응애 약충의 경우 전자빔과 X-ray조사 시 우화에 큰 영향은 없었으나, 아메리카잎굴파리와 대만총채벌레 유/약충의 경우 우화는 영향을 받는 것으로 나타났다. Follett (2006a; 2006b)의 연구에서도

Table 4. Effect of electron beam and X-ray irradiation on the hatchability, emergence, longevity, fecundity, and F_1 hatchability of *F. intonsa*

Stage	Radiation	Dose (Gy)	n[a)]	Hatchability (%)	Emergence (%)	Longevity (day)	No. of eggs (♀/total)	Hatchability (F_1)(%)
				Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD
Eggs	E-beam	100	87	0.0±0.0 a[b)]	-[C)]	-	-	-
		70	105	16.0±3.3 a	-	-	-	-
		50	89	85.5±4.0 b	-	-	-	-
	X-ray	30	125	0.0±0.0 a	-	-	-	-
		20	147	9.1±1.9 a	-	-	-	-
		10	120	69.5±8.8 b	-	-	-	-
	Control	0	103	88.2±3.7 b	-	-	-	-
Nymphs	E-beam	150	90	-	0.0±0.0 a	-	-	-
		100	90	-	10.0±12.6 a	-	-	-
		50	90	-	76.7±8.2 c	-	-	-
	X-ray	50	90	-	0.0±0.0 a	-	-	-
		30	90	-	0.0±0.0 a	-	-	-
		10	90	-	36.7±15.3 b	-	-	-
	Control	0	90	-	88.3±7.5 c	-	-	-
Adults	E-beam	250	90	-	-	11.1±3.0 a	5.4±1.8 a	0.0±0.0 a
		200	90	-	-	11.4±3.5 a	6.3±3.1 a	8.3±13.2 a
		100	90	-	-	11.8±3.0 a	6.7±2.7 a	38.2±31.2 b
	X-ray	200	90	-	-	11.0±3.0 a	6.1±2.5 a	0.0±0.0 a
		150	90	-	-	10.5±3.4 a	7.4±1.5 a	8.3±9.1 a
		100	90	-	-	10.9±3.2 a	7.0±2.8 a	6.3±6.7 a
	Control	0	90	-	-	10.7±3.3 a	33.9±15.3 a	82.4±5.2 c

[a)] Sample size.
[b)] 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, 2003).
[C)] Not experimented.

Aspidiotus destructor Signoret (Homoptera: Diaspididae)와 *Pseudococcus comstocki* Kuwana (White Peach Scale)에 이온화에너지 조사 시 억제에 요구되는 선량이 다르게 나타났으며 Mexican leafroller (Lepidoptera: Tortricidae)와 본 연구에서의 아메리카잎굴파리를 비교해 보면 각 해충의 유충단계에 이온화에너지 처리 시 Mexican leafroller 유충의 경우 용화가 억제되는 효과가 나타났지만 아메리카잎굴파리의 유충의 경우 용화에는 영향이 없었다(Follett, 2008). 또한 거짓쌀도둑거저리(*Tribolium castaneum*)와 화랑곡나방(*Plodia interpunctella*) 유충의 경우 전자빔 조사 시 우화가 완전히 억제되었으나 팥바구미(*Callosobruchus chinensis*)에서는 완전히 억제되지는 않았다(Imamura et al., 2004). 따라서 이온화에너지 조사는 해충의 종에 따라, 그리고 발육단계에 따라 억제하기 위한 선량이 달라짐을 알 수 있었다. Ayvaz and Tuncbilek (2006)의 연구에서는 Mediterranean flour moth (Lepidoptera: Pyralidae)에 감마선 조사 시 알과 어린유충에 200 Gy 조사 시 우화가 억제되었으며 번데기와 성충에서는 300 Gy 조사 시 F_1 세대의 알의 부화가 완전히 억제되었다. 앞에서 언급한 바와 같이 해충의 발육단계에 따라 억제하는 선량이 다르게 나타났으며 또한 발육단계가 성충에 가까워질수록 억제에 요구되는 선량이 높아짐을 알 수 있다. 즉, 발육단계가 후기에 다다를수록 이온화에너지에 대한 민감도가 낮아지는 것을 볼 수 있다.

4종 해충에 대한 최소 억제선량 가이드라인

위의 결과들을 총정리하면 Table 5와 같이 복숭아혹진딧물의 발육과 생식을 억제하기 위해서는 전자빔은 최소 200 Gy, X-ray는 50 Gy의 선량을 요구한다. 점박이응애는 전자빔 400 Gy, X-ray는 300 Gy, 아메리카잎굴파리는 전자빔 150 Gy, X-ray는 150 Gy, 그리고 대만총채벌레는 전자빔 250 Gy, X-ray는 200 Gy의 선량을 조사하여야 정상적인 발육과 생식을 억제할 수 있다. 이처럼 4종 해충 모두에서 발육과 생식억제를 위해 요구되는 최소 선량은 전자빔 보다는 X-ray가 낮았다. 이는 두 이온화에너지 조사장치의 dose-rate에 차이가 있기 때문이다. 해충 방제를 위해 요구되는 이온화에너지의 선량은 해충 종별, 해충의 각 발육단계별, 그리고 조사하는 이온화에너지 종류에 따라 차이가 있으므로 실제 검역에 응용하기 위해서는 대상 해충별 데이터베이스가 구축되어야 한다.

사 사

본 연구는 농림축산식품부 수출전략기술개발사업(Project No. 312045-03-1- HD080)에 의해 이루어진 것이다.

Literature Cited

Ayvaz, A., Tuncbilek, A.S., 2006. Effect of gamma radiation on life stages of the Mediterranean flour moth, *Ephestica kuehniella* zeller (Lepidoptera: Pyralidae). J. Pest Sci. 79, 215-222.

Follett, P.A., 2004. Irradiation to control insects in fruits and vegetables for export from Hawaii. Rad. Phys. Chem. 71, 163-166.

Follett, P.A., 2006a. Irradiation as a phytosanitary treatment for *Aspidiotus destructor* (Homoptera: Disapididae). J. Econ. Entomol. 99, 1138-1142.

Follett, P.A., 2006b. Irradiation as a phytosanitary treatment for white peach scale (Homoptera: Diaspidae). J. Econ. Entomol. 99, 1974-1978.

Follett, P.A., 2008. Effect of irradiation on mexican leafroller (Lepidoptera: Tortricidae) development and reproduction. J. Econ. Entomol. 101, 710-715.

Table 5. Minimum inhibition dose in four species of insect pests

Insect	Radiation	Inhibition dose on developmental stage (Gy)				Minimum inhibition dose (Gy)
		Eggs	Nymphs/Larvae	Pupae	Adults	
M. persicae	E-beam	-	100	-	200	200
	X-ray		30		50	50
T. urticae	E-beam	150	400	-	400	400
	X-ray	50	300		300	300
L. trifolii	E-beam[a)]	150	150	150	150	150
	X-ray	30	50	100	150	150
F. intonsa	E-beam	100	150	-	250	250
	X-ray	30	30		200	200

[a)]Source: Koo et al., 2012.

Hallman. G.J., 2004 Ionizing irradiation quarantine treatment against Oriental fruit moth (Lepidoptera: Tortricidae) in ambient and hypoxic atmospheres. J. Econ. Entomol. 97, 824-827.

Hallman, G.J., 1998. Ionizing radiation quarantine treatments. An. Soc. Entomol. Brasil 27, 313-323.

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.

Hallman, G.J., Phillips, T.W., 2008. Ionizing irradiation of adults of Angoumois grain moth (Lepidoptera: Gelechiidae) and Indianmeal moth (Lepidoptera: Pyralidae) to prevent reproduction, and implications for a generic irradiation treatment for insects. J. Econ. Entomol. 101, 1051-1056.

Heather, N.W., Hallman, G.J., 2008. Pest management and phytosanitary trade barriers. CABI International, Wallingford, Oxfordshire, United Kingdom.

Imamura, T., Todoriki, S., Miyanoshita, A., Horigane, A.K., Mitsuru, Y., Hayashi, T., 2009. Efficacy of soft-electron (low-energy electron) treatment for disinfestation of brown rice containing different ages of the maize weevil, *Sitophilus zeamais* Motschulsky Rad. Phys. Chem. 78, 627-630.

Imamura, T., Todoriki, S., Sota, N., Nakakita, H., Ikenaga, H., Hayashi, T., 2004. Effect of soft electron (low energy electron) treatment on three stored product insect pests. J. Stored Products Res. 40, 169-177.

Jang, E.B., McInnis, D.O., Kurashima, R., Woods, B., Suckling, D.M., 2012. Irradiation of adult *Epiphyas postvittana* (Lepidoptera: Tortricidae): egg sterility in parental and F1 generations. J. Econ. Entomol. 105, 54-61.

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., Yoon, C., Kim, G.H., 2012. Electron beam irradiation induces abnormal development and the stabilization of p53 protein of American serpertine leafminer, *Liriomyza trifolii* (Burgess). Rad. Phys. Chem. 81, 86-92.

Miller, W.R., Mcdonald, R.E., 1995. Low dose electron beam irradiation: a methyl bromide alternative for quarantine treatment of *Florida blueberries*. Proc. Fla. State Hort. Soc. 108, 291-293.

Moon, S.R., Son, B.K., Yang, J.O., Woo, J.S., Yoon, C., Kim, G.H., 2010. Effect of electron-beam irradiation on development and reproduction of *Bemisia tabaci*, *Myzus persicae*, *Plutella zylostella* and *Tetranychus urticae*. Korean J. Appl. Entomol. 49, 129-137.

NPQS, 2010. An export and import plants quarantine trends. National Plant Quarantine Service, Anyang.

Osouli, S., Ziaie, 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 flowers. Rad. Phys. Chem. 90, 111-119.

Park, J.H., Lee, J.M., Lee, S.C., 2006. Effect of electron-beam irradiation on the characteristics of Green tea (*Camellia sinensis* L.). J. Kor. Soc. Food Sci. Nut. 35, 774-779.

SAS Institute, 2003. SAS/STAT user's guide: statistics, version 9.1 Institute, Cary, N.C., U.S.A.

Schrader, G., Unger, J.G., 2003. Plant quarantine as a measure against invasive alien species: the framework of the international plant protection convention and the plant health regulations in the European union. Biol. Invasions 5, 357-364.

UNEP, 2009. Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. United National Environment Programme.

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). Rad. Phys. Chem. 96, 44-49.