



강원, 충청, 호남 지역 배추좀나방 개체군의 살충제 저항성 모니터링

권혜리¹ · 윤영남¹ · 김희지^{2*}¹충남대학교 농업과학연구소, ²국립농업과학원 농업생물부 양봉생태과Insecticide Resistance Monitoring of the Diamondback Moth (*Plutella xylostella*) in Gwangwon, Chungcheong and Jeonra Provinces in KoreaHye Ri Kwon¹, Young Nam Youn¹, Hee Ji Kim^{2*}¹Institute of Agricultural Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea²Apiculture Division, Department of Agricultural Biology, National Institute of Agricultural Science, RDA, Wanju 55365, Republic of Korea

(Received on September 13, 2024. Revised on October 14, 2024. Accepted on October 18, 2024)

Abstract Causing significant economic losses globally, the diamondback moth, *Plutella xylostella*, is a major pest of cruciferous crops. Various chemical insecticides have been widely used to manage *P. xylostella* populations. Currently, frequent applications of insecticide are necessary due to the rapid reproductive rate of *P. xylostella* (9~12 generations per year). The frequency of insecticide use has subsequently led to the development of insecticide resistance both domestically and internationally. This study aimed to determine regional pesticide resistance patterns and develop effective and economic control strategies for *P. xylostella* management in Korea. While previous research focused on the Gyeonggi and Yeongnam regions, this study collected population samples from the Gangwon, Chungcheong, and Honam regions to evaluate resistance levels to etofenprox and methoxyfenozide, the two commonly used insecticides for *P. xylostella*. In Gangwon, resistance ratios to etofenprox were particularly high, with a 303.8-fold (CEI 7.8) increase in Chuncheon and 60.7-fold (CEI 4.5) increase in Inje, indicating a high level of resistance. Methoxyfenozide resistance ratios were 71.4-fold (CEI 2.5) in Chuncheon, indicating a possible onset of resistance. In Chungcheong, Goesan exhibited significantly high etofenprox resistance at 230.7-fold (CEI 27.3), indicating significant resistance. Although resistance to etofenprox was also observed in Daejeon with resistance ratios of 15.8-fold (CEI 1.4), the level was considered cautionary. In Honam, resistance ratios to etofenprox were significantly higher in both Wanju and Jinan, reaching 192.7-fold (CEI 25.6) and 21.0-fold (CEI 14.1), respectively. Furthermore, high levels of resistance to methoxyfenozide were observed in Wanju, with resistance ratios of 98.7-fold (CEI 5.2). The results of our study demonstrated, albeit with varying degrees of resistance across insecticides and locales, the development of insecticide resistance in diamondback moth populations from three regions. These findings underscore the need for effective resistance management strategies to ensure sustainable crop production.

Key words Diamondback moth, Insecticides, Insecticide resistance monitoring

*Corresponding author
E-mail: hj914@korea.kr

서론

배추좀나방(*Plutella xylostella* L.)은 배추(*Brassica rapa* L.), 무, 양배추, 케일과 같은 십자화과 작물에 가장 많은 피해를 주는 대표 해충으로 나비목(Lepidoptera) 집나방과(Yponomeutoidea)에 속하는 해충이다. 배추좀나방은 전세계적으로 분포하고 있으며, 중국, 미국, 남아프리카를 포함한 80개국 이상에서 피해가 보고된 바 있다(Li et al., 2016; Machekano et al., 2017; Philips et al., 2014; Talekar and Griggs, 1986). 배추좀나방의 섭식행동은 유충 단계에서 발생하며 령기가 높을수록 섭식량이 많으며 령기에 따라 섭식 양상이 다른 것이 특징이다. 1령충은 주로 잎의 해면엽육조직을 등글게 갉아먹어 구멍을 내지 않고 망사형태의 섭식증상을 나타내지만 노숙유충은 아래 잎표면을 주로 가해하여 보통 잎 단면의 위층인 왁스층을 제외한 모든 조직을 섭식하여 잎에 구멍을 낸다(Jeon et al., 2005). 따라서 배추좀나방의 이러한 섭식 형태는 미관상 배추의 상품 가치를 저하시키고 동시에 배추의 품질과 관련된 요소인 경도, 엽록소, 당 등에 영향을 미치고(Kim et al., 2000), 세계 경제에 연간 40억 달러 이상의 경제적 손실을 입히는 것으로 보고되어 있다(Kim and Lee, 1991).

전 세계적으로 배추좀나방에 의한 피해를 예방하기 위한 연간 관리 비용은 40~50억불 이상 지출된다(Zalucki et al., 2012). 연간 9~12세대의 많은 발생세대수로 인한 살충제의 오남용에 따라 저항성에 유의해야 하는 대표해충으로 1953년 DDT에 대해 최초 살충제저항성이 발표된 후(Ankersmit, 1953), 유기인계와 카바메이트계(Noppun et al., 1983), 피레스로이드계(Hama, 1987), 곤충성장조절제(insect growth regulator, IGR) 계통(Perng et al., 1988)에 대해 저항성이 보고되었고, 교차저항성 또한 발달되어 여러 논문이 보고된 바 있다(Banazeer et al., 2022). 뿐만 아니라 미생물 농약인 *Bacillus thuringiensis* (Bt)계(Song, 1991; Tabashnik et al., 1990)에 대해서도 저항성이 보고된 바 있어, 배추좀나방 방

제문제가 날로 심각해지고 있다.

국내에서는 대관령지역 배추좀나방 개체군에서 Bt계 약제에 대한 저항성 발달이 41.3배(Song, 1991), 유기인계 3.3~61.1배, 피레스로이드계 7.2~141.7배, 유기염소계 10.5~33.3배 살충제 저항성이 발달한 것으로 조사되었고(Lee et al., 1993), 이후 카바메이트계(Cho et al., 2001), Bt계(Kim et al., 2010) 약제 또한 저항성 발달이 보고되었다. 또한 경기, 영남 권역에서의 단제로 이루어진 살충제 8종에 대하여 배추에 대한 배추좀나방의 저항성 발달에 대해 조사된 바 있다(Kim et al., 2023).

이러한 배추좀나방의 살충제 저항성 발달 상황에서 중요한 것은, 주요 작물인 배추에 발생한 배추좀나방의 살충제 저항성 발생 정도를 지속적으로 조사하여 배추좀나방의 방제에 적합한 약제를 선택하고 저항성 발생 가능성을 제한 및 지연시키는 정보를 제공하는 것이다. 이전 연구에서는 국내 5개 권역 중 경기, 영남 2개 권역의 배추좀나방 저항성에 대하여 보고하였고(Kim et al., 2023), 본 연구에서는 강원도, 충청, 호남 권역의 3개 시·군의 배추 재배지에서 채집된 배추좀나방 개체군에 대하여 약제저항성 취득 정도를 파악하였다. 따라서 국내 배추좀나방 저항성 발달에 대한 연구를 통해 농업 현장에서 배추좀나방을 관리하는데 기초자료를 제공하기 위하여 수행되었다.

재료 및 방법

배추좀나방 채집 및 사육

배추좀나방(*P. xylostella*) 지역 개체군 채집은 강원, 충청, 호남 권역의 배추 주산지인 각 3개의 시·군에서 채집하였다. 2022년 7월부터 강원은 춘천, 인제, 홍성, 충청은 청양, 괴산, 대전, 호남은 장성, 완주, 진안의 배추 재배지에서 채집하였다(Table 1). 지역 개체군의 유지 및 증식은 오염을 방지하기 위하여 각각의 아크릴케이지(30 × 30 × 60 cm)에 배추 유묘(일품봄배추, 아시아배추)를 정기적으로 공급하였다. 온

Table 1. Site of *Plutella xylostella* collection

Collection sites	Coordinate	Collection date	
Laboratory susceptible strain	-	-	
GangWon	Chuncheon	37°50'42"N 127°41'33"E	22.07.15
	Inje	37°57'41"N 128°04'22"E	22.11.04
	Hoengseong	37°26'50"N 128°04'40"E	23.10.23
ChungCheong	Cheongyang	36°25'22"N 126°56'06"E	23.06.05
	Goesan	36°46'22"N 127°42'21"E	22.08.04
	Daejeon	36°22'04"N 127°21'15"E	22.11.23
HoNam	Jangseong	37°50'42"N 127°41'33"E	22.12.16
	Wanju	37°57'41"N 128°04'22"E	22.12.16
	Jinan	37°26'50"N 128°04'40"E	23.06.09

도는 25 ± 2°C, 상대습도 50~60%, 광조건 16L:8D 조건에서 누대 사육하였다. 실험에 사용할 감수성 개체군을 평가하고자 충남대학교 곤충생리학실험실에서 10년 이상 살충제에 노출시키지 않고 누대사육한 개체군 S1과 (주)동방아그로(충남 부여군)에서 15년 이상 살충제에 노출시키지 않고 누대 사육한 개체군 S2를 분양 받아 실험을 수행하였다.

시험약제 선발

본 연구에 사용한 살충제는 배추에 등록되어 사용되고 있는 배추좀나방 방제용 살충제 중 Insecticide Resistance Action Committee (IRAC)에서 제시한 계열 구분에 따라서 14개의 단제를 우선 선발하여 그 중 사용량이 많은 살충제 8종을 계통별로 선발하였다. 약제는 Pyrethroids계 1종(etofenprox), Spinosyns계 1종(spinetoram), Avermectins계 1종(emamectin benzoate), Pyrroles계 1종(chlorfenapyr), Diacylhydrazines계 1종(methoxyfenozide), Oxadiazines계 1종(indoxacarb), Diamides계 1종(cyantraniliprole), Meta-diamides계 1종(fluxametamide)를 선발하였다. 각 약제별 유효성분, 제형, 추천농도(ppm) 및 계통 등의 정보는 Table 2와 같다.

시험약제에 대한 생물검정

배추좀나방의 생물활성검정방법은 IRAC에서 제안한 ‘IRAC SUSCEPTIBILITY TEST METHOD 018’에 따른 엽침지법(leaf dipping method)을 기초로 하여 연구실에 맞게 변형하여 수행하였다. 배춧잎 절편(지름 6 cm)을 각 농도의 살충제 용액에 30초간 침지 후 3시간 동안 음건하였다. Petri dish (Cat. No. 10090, SPL Life Sciences, Korea)에 여과지(Filter-paper No. 1, ADVANTEC Group, Japan)를 깔고 배춧잎 건조를 방지하기 위해 증류수로 적신 후, 그 위에 약액에 엽침지한 배춧잎을 올리고 실내 증식한 배추좀나

방 2~3령 유충을 10마리씩 6반복으로 접종하였다. 접종 후 온도 25 ± 2°C, 상대습도 50~60%, 광조건 16L:8D 조건에서 보관하였다. 사충수 조사는 72시간 후에 수행하였으며, methoxyfenozide는 IRAC에서 IGR로 분류되어 지효성 살충제 효력 확인 기준인 120시간 후에 사충수를 조사하여 약효를 판단하였다.

통계처리 및 저항성 비교

약제별 반수치사농도(LC₅₀) 산출은 Abbott의 공식을 따른 보정사충률을 산출한 후(Abbott, 1925), SPSS (version 13.0, SPSS, USA)를 이용한 probit 분석을 수행하였다(Finney, 1971). 또한 지역 개체군 LC₅₀ 값을 구하고 실험실 감수성 개체군 S2의 LC₅₀ 값과 비교한 값인 저항성비(RR₅₀, resistance ratio)를 산출하였다. 그리고 배추좀나방 지역 계통에 대한 약제별 효율을 검정하기 위해 방제효과지수(Control efficacy index, CEI)를 이용하였는데, LC₉₀ 값을 약제별 추천 농도로 나누어 표시하고 그 수치를 비교해 상대적 저항성 정도 비교에 사용하였다.

결과 및 고찰

감수성 개체군 평가 및 선발

저항성 수준을 비교하기 위해 감수성 개체의 평가가 필요하다. 따라서 Kim et al. (2023)에서 감수성 개체로 개체군 S1과 개체군 S2의 살충제 감수성 평가 결과, 개체군 S2의 LC₅₀ 값은 etofenprox 0.224 ppm, spinetoram 0.006 ppm, emamectin benzoate 0.010 ppm, chlorfenapyr 0.831 ppm, methoxyfenozide 0.060 ppm, indoxacarb 0.012 ppm, cyantraniliprole 0.003 ppm, 그리고 fluxametamide 0.004 ppm으로 개체군 S1에 비하여 현저히 낮게 나타났다. 개체군 S1은 대부분의 살충제에 대해 지역별 개체군보다 높은

Table 2. Characteristics of the used insecticide against *P. xylostella* in this study

Insecticide	Chemical class	A.I. (% ^{a)})	Formulation	Recommended concentration (ppm)	IRAC ^{b)} mode of action classification
Etofenprox	Pyrethroids	20	EC ^{c)}	100	3a
Spinetoram	Spinosyns	5	WG ^{d)}	25	5
Emamectin benzoate	Avermectins	2.15	EC	10.8	6
Chlorfenapyr	Pyrroles	10	SC ^{e)}	50	13a
Methoxyfenozide	Diacylhydrazines	21	SC	105	18
Indoxacarb	Oxadiazines	5	SC	50	22a
Cyantraniliprole	Diamides	5	EC	25	28
Fluxametamide	Meta-diamides	9	EC	45	30

^{a)}A.I.: Active ingredient

^{b)}IRAC: Insecticide Resistance Action Committee

^{c)}EC: Emulsifiable

^{d)}WG: Water dispersible granule

^{e)}SC: Suspension concentrate

LC₅₀ 값이 나오는 경우가 있어서 개체군 S2를 실험실 감수성 개체군으로 선발하였고, 이 개체군 S2를 이용하여 저항성 발달 정도를 검토하였다(Table 3) (Kim et al., 2023). 본 논문에서는 선발된 S2 개체군의 LC₅₀ 값과 지역별 개체군의 LC₅₀ 값을 비교한 값인 저항성비(RR₅₀, resistance ratio) 산출하고자 인용하였다. 강원, 충청, 호남지역 계통에 대한

약제별 효율을 검증하고자 선발된 S2 개체군의 LC₉₀ 값을 사용하여 방제효과지수(Control efficacy index, CEI)를 산출하였다.

배추좀나방에 대한 지역별 저항성 평가

국내 5개 권역 중 강원, 충청, 호남 3개 권역 3개의 시·군

Table 3. Compare of LC₅₀ (ppm) values to each insecticide after treatment for 3 days with susceptible *P. xylostella* S1 and S2 population (Methoxyfenozide, values after 5 days of treatment)

Insecticide	S1	S2	
	LC ₅₀ (ppm) (95%CL) ^{a,b)}	LC ₅₀ (ppm) (95%CL)	LC ₉₀ (ppm) (95%CL)
Etofenprox	102.592 (71.993~126.818)	0.224 (0.113~0.378)	4.849 (2.652~11.665)
Spinetoram	0.224 (0.158~0.314)	0.006 (0.0006~0.015)	0.095 (0.051~0.258)
Emamectin benzoate	0.312 (0.263~0.382)	0.010 (0.004~0.017)	0.131 (0.075~0.318)
Chlorfenapyr	2.758 (2.043~3.642)	0.831 (0.543~1.237)	10.744 (6.291~22.537)
Methoxyfenozide	9.372 (6.943~12.549)	0.060 (0.011~0.157)	6.520 (2.876~24.427)
Indoxacarb	0.230 (0.149~0.341)	0.012 (0.001~0.030)	0.191 (0.102~0.516)
Cyantraniliprole	0.317 (0.216~0.455)	0.003 (0.0001~0.011)	0.366 (0.151~1.275)
Fluxametamide	2.491 (1.852~3.294)	0.004 (0.00007~0.16)	0.148 (0.060~0.414)

^{a)}S1 LC₅₀ and S2 LC₅₀ data is quoted from Kim et al. (2023)'s paper.

^{b)}CL: Confidential limits

Table 4. LC₅₀ and LC₉₀ values to each insecticide with Chuncheon population *P. xylostella* after treatment for 3 days (Methoxyfenozide, values after 5 days of treatment)

Insecticide	LC ₅₀ (ppm) (95%CL) ^{a)}	LC ₉₀ (ppm) (95%CL)	Slope ± SE	RR ₅₀ ^{b)}	CEI ^{c)}
Etofenprox	68.053 (46.903~112.449)	784.720 (358.751~3,147.995)	1.207 ± 0.183	303.8	7.8
Spinetoram	0.332 (0.229~0.475)	2.577 (1.631~4.788)	1.411 ± 0.149	55.3	0.1
Emamectin benzoate	0.090 (0.059~0.133)	0.979 (0.589~1.961)	1.234 ± 0.132	9.0	0.1
Chlorfenapyr	3.644 (2.517~5.331)	34.669 (20.244~74.903)	1.310 ± 0.145	4.4	0.7
Methoxyfenozide	4.284 (2.433~7.751)	258.204 (94.034~1,299.289)	0.720 ± 0.094	71.4	2.5
Indoxacarb	0.832 (0.571~1.194)	6.987 (4.384~13.129)	1.387 ± 0.143	69.3	0.1
Cyantraniliprole	0.206 (0.145~0.291)	1.299 (0.836~2.390)	1.604 ± 0.177	68.7	0.1
Fluxametamide	2.220 (1.523~3.243)	22.099 (13.073~45.969)	1.284 ± 0.135	555.0	0.5

^{a)}CL: Confidential limits

^{b)}RR₅₀: Resistance ratio = LC₅₀ value of a field strain/LC₅₀ of LC₅₀ value of laboratory strain

^{c)}CEI: Control efficacy index = LC₉₀ value of a field strain/Recommended concentration

배추 재배지에서 배추좀나방을 채집하여 증식한 후 엽침지 법으로 생물검정을 진행하였다. 강원권 춘천 개체군의 저항성비는 etofenprox 303.8배, spinetoram 55.3배, emamectin benzoate 9.0배, chlorfenapyr 4.4배, methoxyfenozide 71.4배, indoxacarb 69.3배, cyantraniliprole 68.7배, fluxametamide 555.0배로 나왔으며, etofenprox에서 비교적 높은 CEI 값 (7.8)을 보였다(Table 4). 강원권 인제 개체군의 저항성비는

etofenprox 60.7배, spinetoram 18.8배, emamectin benzoate 6.7배, chlorfenapyr 2.3배, methoxyfenozide 9.3배, indoxacarb 36.8배, cyantraniliprole 54.0배, fluxametamide 125.5배로 나왔으며, etofenprox에서 비교적 높은 LC₉₀ 값(448.820 ppm)과 CEI 값(4.5)을 보였다(Table 5). 강원권 횡성 개체군의 저항성비는 etofenprox 4.0배, spinetoram 48.0배, emamectin benzoate 2.2배, chlorfenapyr 0.1배, methoxyfenozide 6.4배,

Table 5. LC₅₀ and LC₉₀ values to each insecticide with Inje population *P. xylostella* after treatment for 3 days (Methoxyfenozide, values after 5 days of treatment)

Insecticide	LC ₅₀ (ppm) (95%CL) ^{a)}	LC ₉₀ (ppm) (95%CL)	Slope ± SE	RR ₅₀ ^{b)}	CEI ^{c)}
Etofenprox	13.592 (8.155~25.409)	448.820 (165.641~2,282.218)	0.844 ± 0.113	60.7	4.5
Spinetoram	0.113 (0.090~0.140)	0.402 (0.295~0.644)	2.319 ± 0.293	18.8	0.0
Emamectin benzoate	0.067 (0.045~0.097)	0.537 (0.333~1.041)	1.415 ± 0.157	6.7	0.1
Chlorfenapyr	1.903 (1.216~3.011)	39.357 (19.726~107.078)	0.974 ± 0.108	2.3	0.8
Methoxyfenozide	0.556 (0.356~0.830)	5.964 (3.600~11.989)	1.244 ± 0.139	9.3	0.1
Indoxacarb	0.442 (0.299~0.638)	3.707 (2.313~7.053)	1.387 ± 0.147	36.8	0.1
Cyantraniliprole	0.162 (0.111~0.235)	1.273 (0.781~2.538)	1.433 ± 0.161	54.0	0.1
Fluxametamide	0.502 (0.354~0.709)	3.138 (2.019~5.747)	1.611 ± 0.172	125.5	0.1

^{a)}CL: Confidential limits

^{b)}RR₅₀: Resistance ratio = LC₅₀ value of a field strain/LC₅₀ of LC₅₀ value of laboratory strain

^{c)}CEI: Control efficacy index = LC₉₀ value of a field strain/Recommended concentration

Table 6. LC₅₀ and LC₉₀ values to each insecticide with Hoengseong population *P. xylostella* after treatment for 3 days (Methoxyfenozide, values after 5 days of treatment)

Insecticide	LC ₅₀ (ppm) (95%CL) ^{a)}	LC ₉₀ (ppm) (95%CL)	Slope ± SE	RR ₅₀ ^{b)}	CEI ^{c)}
Etofenprox	0.905 (0.281~1.894)	40.017 (20.515~108.264)	0.779 ± 0.120	4.0	0.4
Spinetoram	0.288 (0.128~0.501)	5.093 (2.903~11.721)	1.027 ± 0.152	48.0	0.2
Emamectin benzoate	0.022 (0.002~0.070)	1.508 (0.712~4.413)	0.699 ± 0.141	2.2	0.1
Chlorfenapyr	0.077 (0.005~0.254)	3.873 (1.810~10.489)	0.754 ± 0.016	0.1	0.1
Methoxyfenozide	0.381 (0.059~1.017)	24.182 (11.766~72.726)	0.711 ± 0.132	6.4	0.2
Indoxacarb	0.020 (0.000~0.140)	5.572 (1.909~21.608)	0.522 ± 0.136	1.6	0.1
Cyantraniliprole	0.440 (0.255~0.675)	4.322 (2.649~8.717)	1.291 ± 0.171	146.6	0.2
Fluxametamide	0.445 (0.175~0.822)	10.022 (5.567~23.858)	0.947 ± 0.143	111.2	0.2

^{a)}CL: Confidential limits

^{b)}RR₅₀: Resistance ratio = LC₅₀ value of a field strain/LC₅₀ of LC₅₀ value of laboratory strain

^{c)}CEI: Control efficacy index = LC₉₀ value of a field strain/Recommended concentration

indoxacarb 1.6배로 나타났다. cyantraniliprole 146.6배, fluxametamide 111.2배로 비교적 높게 나타났으나 CEI가 0.5 이하로 낮게 나타나 약효 감소 현상이 나타나지 않았다 (Table 6).

충청권 청양에서는 저항성비가 etofenprox 2.4배, emamectin benzoate 4.2배, chlorfenapyr 0.1배, methoxyfenozide 2.4배, indoxacarb 0.5배, fluxametamide 16.8배로 나타났다.

Spinetoram 43.6배, cyantraniliprole 101.7배로 비교적 높게 나타났으나 CEI가 0.5 이하로 낮게 나타나 저항성 발현은 의심되지 않는다(Table 7). 충청권 괴산에서는 저항성비가 etofenprox 230.7배, spinetoram 57.3배, emamectin benzoate 13.4배, chlorfenapyr 2.4배, methoxyfenozide 20.0배, indoxacarb 91.1배, cyantraniliprole 129.7배, fluxametamide 174.5배로 나왔으며, etofenprox에서 비교적 높은 CEI 값인

Table 7. LC₅₀ and LC₉₀ values to each insecticide with Cheongyang population *P. xylostella* after treatment for 3 days (Methoxyfenozide, values after 5 days of treatment)

Insecticide	LC ₅₀ (ppm) (95%CL) ^{a)}	LC ₉₀ (ppm) (95%CL)	Slope ± SE	RR ₅₀ ^{b)}	CEI ^{c)}
Etofenprox	0.526 (0.126~1.188)	20.305 (10.535~54.370)	0.808 ± 0.139	2.4	0.2
Spinetoram	0.262 (0.124~0.434)	3.222 (1.903~7.177)	1.175 ± 0.183	43.6	0.1
Emamectin benzoate	0.042 (0.004~0.130)	7.517 (3.107~35.577)	0.568 ± 0.112	4.2	0.7
Chlorfenapyr	0.065 (0.002~0.276)	11.472 (4.816~44.694)	0.571 ± 0.126	0.1	0.2
Methoxyfenozide	0.145 (0.002~0.773)	122.515 (39.162~1,504.365)	0.438 ± 0.107	2.4	1.2
Indoxacarb	0.006 (0.000~0.073)	0.855 (0.063~2.778)	0.592 ± 0.199	0.5	0.0
Cyantraniliprole	0.305 (0.109~0.599)	12.263 (6.306~33.518)	0.799 ± 0.120	101.7	0.5
Fluxametamide	0.067 (0.004~0.209)	1.965 (0.933~5.052)	0.208 ± 10.351	16.8	0.0

^{a)}CL: Confidential limits

^{b)}RR₅₀: Resistance ratio = LC₅₀ value of a field strain/LC₅₀ of LC₅₀ value of laboratory strain

^{c)}CEI: Control efficacy index = LC₉₀ value of a field strain/Recommended concentration

Table 8. LC₅₀ and LC₉₀ values to each insecticide with Goesan population *P. xylostella* after treatment for 3 days (Methoxyfenozide, values after 5 days of treatment)

Insecticide	LC ₅₀ (ppm) (95%CL) ^{a)}	LC ₉₀ (ppm) (95%CL)	Slope ± SE	RR ₅₀ ^{b)}	CEI ^{c)}
Etofenprox	51.684 (5.518~159.002)	2733.569 (608.826~45,607.766)	0.744 ± 0.121	230.7	27.3
Spinetoram	0.344 (0.238~0.491)	2.639 (1.671~4.893)	1.448 ± 0.150	57.3	0.1
Emamectin benzoate	0.134 (0.091~0.195)	1.208 (0.746~2.320)	1.344 ± 0.138	13.4	0.1
Chlorfenapyr	1.989 (1.409~2.785)	13.375 (8.629~24.376)	1.548 ± 0.163	2.4	0.3
Methoxyfenozide	1.198 (0.557~2.309)	40.139 (16.023~189.804)	0.840 ± 0.101	20.0	0.4
Indoxacarb	1.093 (0.771~1.536)	7.148 (4.639~12.806)	1.571 ± 0.162	91.1	0.1
Cyantraniliprole	0.389 (0.263~0.560)	3.493 (2.182~6.621)	1.344 ± 0.141	129.7	0.1
Fluxametamide	0.698 (0.471~1.014)	6.758 (4.156~13.083)	1.300 ± 0.135	174.5	0.2

^{a)}CL: Confidential limits

^{b)}RR₅₀: Resistance ratio = LC₅₀ value of a field strain/LC₅₀ of LC₅₀ value of laboratory strain

^{c)}CEI: Control efficacy index = LC₉₀ value of a field strain/Recommended concentration

27.3이 나타났다. Cyantraniliprole과 fluxametamide는 저항성비는 비교적 높았으나 CEI가 0.2 이하로 낮게 나타나 저항성 발현이 의심되지 않는다(Table 8). 충청권 대전에서는 저항성비가 etofenprox 15.8배, spinetoram 22.2배, emamectin benzoate 8.0배, chlorfenapyr 2.0배, methoxyfenozide 3.9배, indoxacarb 27.8배, cyantraniliprole 62.7배, fluxametamide 54.5배로 나타났고, 그 중 etofenprox의 CEI가 1 이상 나타

나 약제 사용에 주의가 필요하다(Table 9).

호남 장성에서는 저항성비가 etofenprox 23.3배, spinetoram 18.3배, emamectin benzoate 9.5배, chlorfenapyr 2.4배, methoxyfenozide 13.9배, indoxacarb 31.1배, cyantraniliprole 60.0배, fluxametamide 53.0배로 나타났고, 모두 CEI가 1 이하로 확인되었다(Table 10). 호남 완주에서는 저항성비가 etofenprox 192.7배, spinetoram 12.2배, emamectin benzoate

Table 9. LC₅₀ and LC₉₀ values to each insecticide with Daejeon population *P. xylostella* after treatment for 3 days of treatment (Methoxyfenozide, values after 5 days of treatment)

Insecticide	LC ₅₀ (ppm) (95%CL) ^{a)}	LC ₉₀ (ppm) (95%CL)	Slope ± SE	RR ₅₀ ^{b)}	CEI ^{c)}
Etofenprox	3.537 (2.099~5.9611)	135.456 (58.321~491.594)	0.809 ± 0.099	15.8	1.4
Spinetoram	0.133 (0.096~0.184)	0.645 (0.423~1.197)	1.868 ± 0.231	22.2	0.0
Emamectin benzoate	0.080 (0.056~0.112)	0.473 (0.311~0.839)	1.662 ± 0.185	8.0	0.0
Chlorfenapyr	1.635 (1.074~2.461)	23.696 (13.216~54.154)	1.104 ± 0.200	2.0	0.5
Methoxyfenozide	0.234 (0.129~0.374)	3.350 (1.936~7.379)	1.109 ± 0.144	3.9	0.0
Indoxacarb	0.333 (0.261~0.387)	0.720 (0.564~1.244)	3.826 ± 0.080	27.8	0.0
Cyantraniliprole	0.188 (0.133~0.260)	0.936 (0.630~1.620)	1.840 ± 0.214	62.7	0.0
Fluxametamide	0.218 (0.163~0.285)	0.655 (0.478~1.031)	2.683 ± 0.357	54.5	0.0

^{a)}CL: Confidential limits

^{b)}RR₅₀: Resistance ratio = LC₅₀ value of a field strain/LC₅₀ of LC₅₀ value of laboratory strain

^{c)}CEI: Control efficacy index = LC₉₀ value of a field strain/Recommended concentration

Table 10. LC₅₀ and LC₉₀ values to each insecticide with Jangseong population *P. xylostella* after treatment for 3 days (Methoxyfenozide, values after 5 days of treatment)

Insecticide	LC ₅₀ (ppm) (95%CL) ^{a)}	LC ₉₀ (ppm) (95%CL)	Slope ± SE	RR ₅₀ ^{b)}	CEI ^{c)}
Etofenprox	5.223 (3.306~7.698)	71.351 (42.962~146.666)	1.129 ± 0.130	23.3	0.7
Spinetoram	0.110 (0.083~0.146)	0.350 (0.252~0.561)	2.556 ± 0.326	18.3	0.0
Emamectin benzoate	0.095 (0.065~0.137)	0.745 (0.468~1.407)	1.433 ± 0.153	9.5	0.1
Chlorfenapyr	2.009 (1.375~2.931)	20.483 (12.116~42.740)	1.271 ± 0.135	2.4	0.4
Methoxyfenozide	0.833 (0.526~1.259)	10.874 (6.463~22.003)	1.149 ± 0.122	13.9	0.1
Indoxacarb	0.373 (0.279~0.493)	1.204 (0.843~2.168)	2.520 ± 0.395	31.1	0.0
Cyantraniliprole	0.108 (0.121~0.261)	1.517 (0.948~2.887)	1.384 ± 0.150	60.0	0.1
Fluxametamide	0.212 (0.173~0.247)	0.452 (0.377~0.608)	3.898 ± 0.631	53.0	0.0

^{a)}CL: Confidential limits

^{b)}RR₅₀: Resistance ratio = LC₅₀ value of a field strain/LC₅₀ of LC₅₀ value of laboratory strain

^{c)}CEI: Control efficacy index = LC₉₀ value of a field strain/Recommended concentration

Table 11. LC₅₀ and LC₉₀ values to each insecticide with Wanju population *P. xylostella* after treatment for 3 days (Methoxyfenozide, values after 5 days of treatment)

Insecticide	LC ₅₀ (ppm) (95%CL) ^{a)}	LC ₉₀ (ppm) (95%CL)	Slope ± SE	RR ₅₀ ^{b)}	CEI ^{c)}
Etofenprox	43.155 (25.041~89.804)	2,557.903 (695.761~32,266.530)	0.723 ± 0.124	192.7	25.6
Spinetoram	0.073 (0.048~0.107)	0.571 (0.351~1.164)	1.435 ± 0.184	12.2	0.0
Emamectin benzoate	0.339 (0.224~0.504)	4.364 (2.528~9.302)	1.155 ± 0.122	33.9	0.4
Chlorfenapyr	1.569 (1.038~2.332)	20.201 (11.705~43.064)	1.155 ± 0.122	1.9	0.4
Methoxyfenozide	5.920 (3.215~11.650)	545.589 (163.771~4,191.805)	0.652 ± 0.093	98.7	5.2
Indoxacarb	0.995 (0.682~1.424)	8.392 (5.289~15.688)	1.384 ± 0.144	82.9	0.2
Cyantraniliprole	0.631 (0.425~0.921)	6.658 (4.029~13.245)	1.253 ± 0.130	210.3	0.3
Fluxametamide	0.615 (0.456~0.828)	2.290 (1.570~4.058)	2.244 ± 0.302	153.8	0.1

^{a)}CL: Confidential limits

^{b)}RR₅₀: Resistance ratio = LC₅₀ value of a field strain/LC₅₀ of LC₅₀ value of laboratory strain

^{c)}CEI: Control efficacy index = LC₉₀ value of a field strain/Recommended concentration

Table 12. LC₅₀ and LC₉₀ values to each insecticide with Jinan population *P. xylostella* after treatment for 3 days (Methoxyfenozide, values after 5 days of treatment)

Insecticide	LC ₅₀ (ppm) (95%CL) ^{a)}	LC ₉₀ (ppm) (95%CL)	Slope ± SE	RR ₅₀ ^{b)}	CEI ^{c)}
Etofenprox	4.696 (1.463~10.172)	1,406.119 (370.487~19,923.875)	0.518 ± 0.095	21.0	14.1
Spinetoram	0.559 (0.007~0.154)	1.942 (0.974~4.986)	0.832 ± 0.169	93.2	0.1
Emamectin benzoate	0.020 (0.002~0.622)	0.993 (0.477~2.639)	0.760 ± 0.153	2.1	0.1
Chlorfenapyr	3.160 (2.071~4.649)	35.861 (21.755~71.015)	1.215 ± 0.129	3.8	0.7
Methoxyfenozide	0.817 (0.249~1.690)	29.470 (15.420~78.666)	0.823 ± 0.133	13.6	0.3
Indoxacarb	0.007 (0.000~0.079)	1.408 (0.214~4.580)	0.560 ± 0.172	0.6	0.0
Cyantraniliprole	0.015 (0.000~0.079)	1.397 (0.517~4.128)	0.654 ± 0.166	0.4	0.1
Fluxametamide	0.935 (0.539~1.449)	10.742 (6.495~21.907)	1.209 ± 0.154	233.8	0.2

^{a)}CL: Confidential limits

^{b)}RR₅₀: Resistance ratio = LC₅₀ value of a field strain/LC₅₀ of LC₅₀ value of laboratory strain

^{c)}CEI: Control efficacy index = LC₉₀ value of a field strain/Recommended concentration

33.9배, chlorfenapyr 1.9배, methoxyfenozide 98.7배, indoxacarb 82.9배, cyantraniliprole 210.3배, fluxametamide 153.8배로 나타났고, 그 중 CEI가 높게 나온 etofenprox는 25.6, methoxyfenozide는 5.2로 약제 사용에 주의가 요구된다(Table 11). 호남 진안 개체군의 저항성비는 etofenprox 21.0배, spinetoram 93.2배, emamectin benzoate 2.1배, chlorfenapyr 3.8배, methoxyfenozide 13.6배, indoxacarb

0.6배, cyantraniliprole 0.4배, fluxametamide 233.8배로 나왔으며, etofenprox에서 비교적 높은 CEI 값(14.1)을 보였다 (Table 12).

배추좀나방에 대한 약제별 저항성 평가

Pyrethroids 계통인 etofenprox는 신경축색에 위치한 Na⁺ 통로의 개폐를 저해하여 신경전달을 교란시키는 것으로 알

려져 있고, 신경활동전위 아래에 있는 신경막의 sodium 투과성을 일시적으로 증가시키도록 조절하여 sodium channel의 역학을 변화시켜 곤충 신경조절능력을 방해하는 속효성 살충제이다(Pauron et al., 1989; Soderlund et al., 2002). 국내 배추좀나방의 etofenprox 저항성 연구결과 지역 개체군에서는 LC₅₀ 값이 1.1~2.3 ppm, 저항성비가 1.1~2.8배로 나타나 낮은 수준의 저항성이 보고되었다(Jeong et al., 2017). 그리고 경기와 영남 권역 지역개체군 저항성 연구에서는 LC₅₀ 값이 5.229~10.002 ppm으로 비교적 높은 값이 나왔으나 저항성비를 비교하였을 때 비교적 높지 않은 값이 산출되어 저항성 발현지역은 없는 것으로 보고된 바 있다(Kim et al., 2023). 하지만 본 연구에서는 etofenprox의 저항성 평가 결과, 강원, 충청, 호남의 모든 지역에서 다른 약제에 비하여 높은 수준의 저항성을 보였다. 그 중에서도 LC₉₀ 값이 강원 춘천은 784.720 ppm 충청 괴산은 2,733.569 ppm, 호남 완주는 2,557.903 ppm, 진안은 1,406.119 ppm으로 높게 나타났는데, 이를 추천 농도량으로 나눈 CEI가 춘천 7.8, 괴산 27.3, 완주 25.6, 진안 14.1로 나타나 높은 수준의 저항성 개체군으로 판단되었다. 그리고 강원 인제 개체군도 LC₉₀ 값이 448.820 ppm으로 확인되었고 감수성 개체군 대비 저항성비가 60.7배, CEI가 4.5로 나타나 저항성 발현이 의심된다. 충청 대전은 저항성비 15.8배, CEI가 1.4로 나타나 저항성 발현 주의단계로 판단된다.

Spinosyns 계통인 spinetoram은 토양방선균인 *Saccaropolyspora spinosa*가 생성하는 spinosyns에서 파생되는 물질을 이용한 살충제로 곤충신경계의 시냅스 후막에 존재하는 니코틴아세틸콜린 수용체(nicotinic acetylcholine receptors, nAChR)와 GABA 수용체를 표적으로 작용하여 신경교란을 유발한다(Shimokawatoko et al., 2012; Sparks et al., 2020). 국내 경기, 영남 권역에서 spinetoram에 대한 배추좀나방 저항성 연구에서 LC₅₀ 값이 0.141~0.363 ppm으로 저항성이 발현된 지역은 없었다(Kim et al., 2023). 본 연구의 Spinetoram의 저항성 평가 결과, LC₅₀ 값은 0.073~0.559 ppm, LC₉₀ 값은 0.350~5.093 ppm이고, CEI가 1 이하로 나타나 해당 약제 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Emamectin benzoate는 토양방선균인 *Streptomyces avermitilis* MA-4680 (NRRL 8165) 균주에서 분리된 macrocyclic lactone 그룹인 avermectin 계열의 하나이다(Jasson and Dybas, 1998). 이는 신경 연결 부위의 GABA 수용체에 매우 친화력이 높아 결합을 통해 세포막의 Cl⁻ 이온의 침투력을 증진시켜 신경자극의 중단을 초래하여 마비를 유발하여 섭식을 중단시키고 결과적으로는 치사에 이르게 한다(Jasson et al., 1997). 국내 저항성 연구에서 지역개체군에서 LC₅₀ 값 0.8~1.2 ppm, 저항성비 0.1~1.4배로 저항성이 발달하지 않은 것으로 보고된 바 있다(Jeong et al., 2017). 또한 경기, 영남 권역에서는 LC₅₀ 값이 0.036~1.268 ppm으로 저

항성 발현된 지역이 없다고 보고되었다(Kim et al., 2023). 본 연구에서는 LC₅₀ 값은 0.020~0.339 ppm, LC₉₀ 값은 0.473~7.517 ppm이고, CEI가 1 이하로 나타나 강원, 충청, 호남 권역에서 저항성이 발현된 지역은 없는 것으로 판단된다.

Pyrrroles 계통인 chlorfenapyr는 미토콘드리아의 ATP (adenosine triphosphate) 생산과정 중 산화적 인산화를 방해함으로 ATP 생산을 방해하여 세포기능장애와 그에 따른 해충의 치사를 유발한다(Raghavendra et al., 2011). 경기, 영남 권역에서는 LC₅₀ 값이 1.577~2.997 ppm, 저항성비가 0.02~2.84배로 나왔으나, 감수성 개체군의 LC₅₀ 값이 0.831 ppm으로 비교적 높게 나와 저항성을 가지고 있다고 보고된 바 있다. 본 연구에서는 chlorfenapyr의 저항성 평가 결과, LC₅₀ 값은 0.065~3.644 ppm, LC₉₀ 값은 3.873~39.357 ppm으로 나타났다. 비교적 LC₉₀ 값이 높게 나타나서 대상약제에 대한 해충의 저항성은 발달하였다고 의심되나, CEI가 1 이하이므로 해당 약제 사용은 가능한 것으로 판단된다. 그러나 주의를 갖고 관찰할 필요가 있다고 생각된다.

Diacylhydrazines 계통의 methoxyfenozide는 1996년에 개발되어, 곤충성장조절제(insect growth regulator, IGR)로 탈피호르몬 수용체(ecdysone receptor)에 작용하여 작용하여, 나방 유충의 비정상적인 탈피를 유도하여 치사에 이르게 하는 살충제로 여러 작물에서 나비목 해충 방제 목적으로 사용되고 있다(Smagghe et al., 2003). 경기, 영남 권역에서는 저항성 연구 결과 LC₅₀ 값이 2.274~7.643 ppm, 저항성비 37.90~367.28배로 나타났다. 특히 경기 권역의 여주, 포천, 영남 권역의 통영에서 높은 저항성비가 보고된 바 있다(Kim et al., 2023). Methoxyfenozide의 저항성 평가 결과, LC₅₀ 값은 0.234~5.920 ppm으로 나타났고 LC₉₀ 값은 5.964~545.589 ppm으로 비교적 높게 나타났다. 호남 완주에서 저항성비는 98.7배, CEI는 5.2로 나타나 저항성 발달 지역으로 판단된다. 그리고 강원 춘천에서 저항성비는 71.4배, CEI는 2.5로 나타나 저항성 발달 의심지역으로 판단된다.

Oxadiazines 계통의 Indoxacarb는 유기인계, 카바메이트계, 피레스로이드계 살충제에 대해 저항성이 발달된 해충의 방제를 위해 최초로 상업화된 pyrazoline type이다(McCann et al., 2001; Tomlin, 2003). 이는 sodium channels을 차단하여 화학신호의 전달을 방해하고 운동신경계를 교란함으로써 해충을 치사에 이르게 하는 살충제이다(Wing et al., 2000). 국내 배추좀나방의 저항성 연구에서 지역개체군의 LC₅₀ 값이 0.8~1.4 ppm으로 나타나 양양, 태백, 무주, 해남, 제주 지역에서는 저항성이 발달하지 않은 것으로 보고되었다(Jeong et al., 2017). 그리고 경기와 영남 권역에서의 저항성 연구에서는 LC₅₀ 값이 0.515~1.034 ppm으로 유사한 결과를 보였으나, 저항성비는 경기권역의 여주와 용인, 영남 권역의 김해와 상주에서 약 50배 내외로 나타나 중간 정도

의 저항성이 발달하였다고 보고된 바 있다(Kim et al., 2023). 본 연구에서 Indoxacarb의 저항성 평가 결과, LC₅₀ 값은 앞선 결과들과 유사하게 0.006~1.093 ppm로 나타났고, LC₅₀ 값은 0.720~8.392 ppm이고, CEI가 1 이하로 나타나 강원, 충청, 호남 권역에서는 저항성이 발현된 지역은 없는 것으로 판단된다.

Diamides 계통의 cyantraniliprole은 작용기작 분류군 중 28번(Mode of Action Group 28)에 속하며 ryanodine receptors (RyRs)의 조절제로 알려져 있다(IRAC, 2024). 이 약제는 곤충 근육의 RyRs에 결합하여 근육 세포내에서 Ca²⁺의 방출을 활성화함으로써 근육의 마비 및 식욕억제와 같은 행동을 유발하여 치사에 이르게 한다(Cordova et al., 2006; Lahm et al., 2005, 2007; Sattelle et al., 2008). 국내에서는 2017년 9월 피해가 발생하였던 평창, 강릉, 경북 성주, 경남 거창 지역에서 배추좀나방의 cyantraniliprole 저항성 연구에서 LC₅₀ 값이 0.002~0.95 ppm으로 낮은 값이 확인되었으나, 평창 개체군에서는 105.6배의 높은 저항성비가 보고되었다(Cho et al., 2018). 경기, 영남 권역의 연구에서는 LC₅₀ 값이 0.343~0.674 ppm으로 확인되었으나, 경기도 여주와 용인에서 100배 이상의 높은 저항성비를 보였고, 특히 영남권 김해와 상주에서는 138.00, 224.67배의 높은 저항성비를 보여 저항성이 발달한 것으로 보고된 바 있다(Kim et al., 2023). 하지만 본 연구에서의 강원, 충청, 호남 권역에서의 cyantraniliprole의 저항성 평가 결과, LC₅₀ 값은 0.015~0.631 ppm, LC₉₀ 값은 0.936~12.263 ppm이고, CEI가 1 이하로 나타나 저항성 발현된 지역은 없는 것으로 판단된다.

Meta-diamides 계통의 fluxametamide는 기존의 diamide 계에서 개량된 살충제로 신경전달물질에서 억제적 작용을 하는 GABA(Gamma-aminobutyric acid)의 전달을 차단하고 신경교란을 유발하여 해충의 성장, 섭식, 번식력 등 다양한 생리·생화학적 과정에 영향을 주어 치사에 이르게 하는 작용기작을 가졌다(Jeschke, 2021; Quan et al., 2016; Umetsu and Shirai, 2020). 경기, 영남 권역에서의 배추좀나방 저항성 연구에서는 LC₅₀ 값이 0.256~1.213 ppm으로 나타났으나, 경기 여주에서 저항성비가 64.00배, 경기 용인에서는 비교적 높은 195.25배의 저항성비가 보고된 바 있다. 그리고 영남 권역 김해와 상주에서는 저항성비가 89.50배와 303.25배로 저항성 발달이 보고되었다(Kim et al., 2023). 본 연구에서는 fluxametamide의 저항성 평가 결과, LC₅₀ 값은 0.067~2.220 ppm으로 나타났고, LC₉₀ 값은 0.452~22.099 ppm으로 나타났다. 비교적 LC₉₀ 값이 높게 나타났지만 CEI가 1 이하로 나타나 강원, 충청, 호남 세 권역에서는 저항성이 발현된 지역은 없는 것으로 판단된다.

현재 국내에 등록된 대다수 배추좀나방 살충제는 추천 희석 배수가 배추흰나비, 담배거세미나방, 파밤나방 등과 같이

충체가 비교적 크며 살충효과를 보기 위한 다량의 성분을 투입해야 하는 그러한 해충들과 같은 배수로 희석하여 방제 하도록 등록되어 있다. 이로 인해 배추좀나방의 살충제 감수성 실험 결과 높은 살충율이 나타난 것으로 보인다. Endersby et al. (2008)은 주로 사용되는 살충제에 대하여 저항성 개체만 생존하는 연구 결과를 보고한 바 있다. 이는 곧 저항성이 높게 나타난 살충제는 해당 지역에서의 사용량이 많은 살충제라 판단할 수 있다.

저항성 연구에 있어서 RR₅₀과 CEI의 두 지수의 관계를 회귀분석을 통해 선형적 관계가 아닌 독립적인 지수라고 보고된 바 있고, 두 지수 모두 저항성 발달 수준을 평가하는데 이용하는 지수이지만, 서로 다른 의미를 가지는 것을 확인할 수 있다(Kang et al., 2023). RR₅₀은 돌연변이 유무, 해독 효소 발현량의 차이 등 집단간 차이를 비교할 때 적합하고, CEI는 해충에 대한 약제의 효력을 평가하거나, 야외 집단의 해충이 약제에 대해 저항성이 얼마나 발달했는지 평가하는 모니터링 연구에 적합한 것으로 보인다. 따라서 앞선 결과와 같이 RR₅₀과 CEI 값 수치의 정도는 항상 일치하지 않는다는 것을 염두해야 한다.

배추좀나방의 효율적인 방제를 위한 연구는 다양한 방면으로 시행되고 있고 새로운 작용기작의 약제나 대체 방제법의 활용을 통해 효과적인 배추좀나방 방제 관련 연구가 지속적으로 필요한 것으로 생각된다. 뿐만 아니라 현재 등록되어 시판되고 있는 약제들의 저항성 발현 정도를 파악하여 그에 따른 지역이나 작물별로 적절한 약제 선택이 가장 중요하다. 따라서 배추좀나방의 살충제 저항성 발달수준을 지속적으로 모니터링하고 그 정보를 바탕으로 배추좀나방 방제 관리에 효과적인 약제선택을 할 수 있도록 농가에 정확하게 정보를 전달할 수 있는 방안을 모색하고, 저항성 정보를 기반한 최선의 약제 처방이 이루어질 수 있도록 관리하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 “농촌진흥청 농작물 주요 해충에 대한 농약 저항성 조사(RS-2022-RD010420)”의 과제를 통해 지원받아 수행되었습니다.

Author Information and Contribution

Hye-Ri Kwon, Institute of Agricultural Science, Chungnam National University, Postdoctoral researcher, <http://orcid.org/0009-0005-3816-2800>

Young-Nam Youn, Institute of Agricultural Science, Chungnam National University, Professor, <http://orcid.org/0000-0002-4956-1904>

Hee-ji Kim, National Institute of Agricultural Science, Postdoctoral researcher, <http://orcid.org/0009-0005-3816-2800>

이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Literature Cited

- Abbott WS, 1987. A method of computing the effectiveness of an insecticide. *J. Am. Mosquito Control Association*, 3(2): 302-303.
- Ankersmit GW, 1953. DDT-resistance in *Plutella maculipennis* (Curt.) (Lep.) in Java. *Bull. Entomol. Res.*, 44(3):421-425.
- Banazeer A, Afzal MBS, Hassan S, Ijaz M, Shad SA, et al., 2022. Status of insecticide resistance in *Plutella xylostella* (Linnaeus) (Lepidoptera: Plutellidae) from 1997 to 2019: Cross-resistance, genetics, biological costs, underlying mechanisms, and implications for management. *Phytoparasitica* 50:465-485.
- Cho JM, Kim KJ, Kim S, Hur JH, Han DS, 2001. Diamondback moth (*Plutella xylostella* L.) resistance to organophosphorus and carbamate insecticides in Kangwon alpine vegetable croplands. *Korean J. Pestic. Sci.* 5(1):30-35. (In Korean)
- Cho SR, Kyung Y, Shin S, Kang WJ, Jeong DH, et al., 2018. Susceptibility of field populations of *Plutella xylostella* and *Spodoptera exigua* to four diamide insecticides. *Korean J. Appl. Entomol.* 57(1):43-50. (In Korean)
- Cordova D, Benner EA, Sacher MD, Raul JJ, Sopa JS, et al., 2006. Anthranilic diamides: a new class of insecticides with a novel mode of action, ryanodine receptor activation. *Pestic. Biochem. Physiol.* 84(3): 196-214.
- Endersby NM, Ridland PM, Hoffmann AA, 2008. The effects of local selection versus dispersal on insecticide resistance patterns: Longitudinal evidence from diamondback moth (*Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae)) in Australia evolving resistance to pyrethroids. *Bull. Entomol. Res.* 98(2):145-157.
- Finney DJ, 1971. Statistical logic in the monitoring of reactions to therapeutic drugs. *Methods. Inf. Med.* 10(4):237-245.
- Hama H, 1987. Development of pyrethroid resistance in the diamondback moth, *Plutella xylostella* Linn (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Appl. Entomol. Zool.* 22(2):166-175.
- Jansson R, Brown R, Cartwright B, Cox D, Dunbar DM, et al., 1997. Emamectin benzoate: A novel avermectin derivative for control of lepidopterous pests. In Proceedings of the 3rd International Workshop on Management of Diamondback Moth and Other Crucifer Pests. MARDI, Kuala Lumpur, Malaysia. 29 Oct.-01 Nov. pp. 171-177.
- Jansson RK, Dybas RA, 1998. Avermectins: biochemical mode of action, biological activity and agricultural importance. In *Insecticides with novel modes of action*. Springer-verlag Berlin Heidelberg GmbH. Germany. pp. 152-170.
- Jeon HY, Kim HH, Yang CY, Jang HI, Mok IG, et al., 2005. Damage and control threshold of the diamondback moth (*Plutella xylostella* L.) in Chinese cabbage. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* 23(3):333-336. (In Korean)
- Jeong IH, Lee SK, Gao Y, Jeon SW, Park B, et al., 2017. Assessment of resistance levels of *Plutella xylostella* field populations to 11 pesticides and concept establishment for pesticide efficacy index. *Korean J. Pestic. Sci.* 21(2):214-223. (In Korean)
- Jeschke P, 2021. Status and outlook for acaricide and insecticide discovery. *Pest Manag. Sci.* 77(1):64-76.
- Kang DH, Lee YN, Kim SE, Moon HH, Kim SY, et al., 2023. Susceptibility assessment of cotton aphid, *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) field populations in Korea to 11 insecticides. *Korean J. Pestic. Sci.* 27(3):259-271. (In Korean)
- Kim HJ, Ko H, Youn YN, 2023. Insecticide resistance monitoring in Korean local populations of diamondback moth (*Plutella xylostella*) (I). *Korean J. Agri. Sci.* 50(4):829-840. (In Korean)
- Kim JY, Lee EJ, Park SK, Choi GW, Baek NK, 2000. Physicochemical quality characteristics of several Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* RuPR) cultivars. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* 18(3):348-352. (In Korean)
- Kim MH, Lee SC, 1991. Bionomics of diamond-back moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) in southern region of Korea. *Korean J. Appl. Entomol.* 30(3):169-173. (In Korean)
- Kim YR, Cho MS, Oh SM, Kim SW, Youn YN, et al., 2010. Resistance and susceptibility of diamondback moth, *Plutella xylostella* strains collected from different region in Korea to *Bacillus thuringiensis*. *Korean J. Pestic. Sci.* 14(2):123-132. (In Korean)
- Lahm GP, Selby TP, Freudenberger JH, Stevenson TM, Myers BJ, et al., 2005. Insecticidal anthranilic diamides: a new class of potent ryanodine receptor activators. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* 15(22):4898-4906.
- Lahm GP, Stevenson TM, Selby TP, Freudenberger JH, Cordover D, et al., 2007. Rynaxypyr™: a new insecticidal anthranilic diamide that acts as a potent and selective ryanodine receptor activator. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* 17(22): 6274-6279.
- Lee SC, Cho YS, Kim DI, 1993. Comparative study of toxicological methods and field resistance to insecticides in diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae). *Korean J. Appl. Entomol.* 32(3):323-329. (In Korean)
- Li Z, Zalucki MP, Yonow T, Kriticos DJ, Bao H, et al., 2016. Population dynamics and management of diamondback moth (*Plutella xylostella*) in China: The relative contributions of climate, natural enemies and cropping patterns. *Bull. Entomol. Res.* 106(2):197-214.
- Machekano H, Mvumi BM, Nyamukondiwa C, 2017. Diamondback Moth, *Plutella xylostella* (L.) in Southern Africa:

- research trends, challenges and insights on sustainable management options. *Sustainability*. 9(2):91.
- McCann SF, Annis GD, Shapiro R, Piotrowski DW, Lahm GP, et al., 2001. The discovery of indoxacarb: oxadiazines as a new class of pyrazoline-type insecticides. *Pest Manag. Sci.* 57(2):153-164.
- Noppun V, Mitata T, Saito T, 1983. Susceptibility of four strains of the diamondback moth, *Plutella xylostella* L., against insecticides. *J. Pest. Sci.* 8:595-599.
- Pauron D, Barhanin J, Amichot M, Pralavorio M, Berge JB, et al., 1989. Pyrethroid receptor in the insect Na⁺channel: Alteration of its properties in pyrethroid resistant flies. *Biochemistry* 28(4):1673-1677.
- Peng F, Yao M, Hung C, Sun C, 1988. Teflubenzuron resistance in diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae). *J. Econ. Entomol.* 81(5):1277-1282.
- Philips CR, Fu Z, Kuhar TP, Shelton AM, Cordero RJ, 2014. Natural history, ecology, and management of diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae), with emphasis on the United States. *J. Integ. Pest Manag.* 5(3); D1-D11.
- Quan LF, Zhang HJ, Sun L, Li YY, Yan WT, et al., 2016. Research advances in sublethal effect of pesticide. *J. Agri.* 6(5):33-38.
- Raghavendra K, Barik TK, Sharma P, Bhatt RM, Srivastava HC, et al., 2011. Chlorfenapyr: A new insecticide with novel mode of action can control pyrethroid resistant malaria vectors. *Malaria J.* 10(1):16.
- Sattelle DB, Cordova D, Cheek TR, 2008. Insect ryanodine receptors: molecular targets for novel control chemicals. *Invert. Neurosci.* 8:107.
- Shimokawatoko Y, Sato N, Yamaguchi T, Tanaka H, 2012. Development of the novel insecticide spinetoram (Diana®). Sumitomo Chemical Co. Ltd. Tokyo. Tokyo, Japan.
- Smagghe G, Pineda S, Carton B, Estal PD, Budia F, et al., 2003. Toxicity and kinetics of methoxyfenozide in greenhouse-selected *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae). *Pest Manag. Sci.* 59(11):1203-1209.
- Soderlund DM, Clark JM, Sheets LP, Mullin LS, Piccirillo VJ, et al., 2002. Mechanism of pyrethroid neurotoxicity: implications for cumulative risk assessment. *Toxicology* 171(1):3-59.
- Song SS, 1991. Resistance of diamondback moth (*Plutella xylostella* L.: Yponomeutidae: Lepidoptera) against *Bacillus thuringiensis* Berliner. *Korean J. Appl. Entomol.* 30(4):291-293. (In Korean)
- Sparks TC, Crouse GD, Benko Z, Demeter D, Giampietro NC, et al., 2021. The spinosyns, spinosad, spinetoram, and synthetic spinosyn mimics-discovery, exploration, and evolution of natural product chemistry and the impact of computational tools. *Pest Manag. Sci.* 77(8):3637-3649.
- Tabashnik BE, Cushing NL, Finson N, Johnson MW, 1990. Field development of resistance to *Bacillus thuringiensis* in diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae). *J. Econ. Entomol.* 83(5):1671-1676.
- Talekar NS, Griggs TD, 1986. Diamond back moth management. Proceedings of the first international workshop, Tainan, Taiwan. 11-15. Mar.
- Talekar NS, Shelton AM, 1993. Biology, ecology, and management of the diamondback moth. *Annu. Rev. Entomol.* 38(1):275-301.
- Tomlin CDS, 2003. The pesticide manual. BCPC. Alton, New Hampshire. pp. 572-573.
- Umetsu N, Shirai Y, 2020. Development of novel pesticides in the 21st century. *J. Pest. Sci.* 45(2):54-74.
- Wing KD, Sacher M, Kagaya Y, Tsurubuchi Y, Mulderig L, et al., 2000. Bioactivation and mode of action of the oxadiazine indoxacarb in insects. *Crop Protect.* 19(8-10):537-545.
- Zalucki MP, Shabbir A, Silva R, Adamson D, Shu-Sheng L, et al., 2012. Estimating the economic cost of one of the world's major insect pests, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae): Just how long is a piece of string? *J. Econ. Entomol.* 105(4):1115-1129.

강원, 충청, 호남 지역 배추좀나방 개체군의 살충제 저항성 모니터링

권혜리¹ · 윤영남¹ · 김희지^{2*}

¹충남대학교 농업과학연구소, ²국립농업과학원 농업생물부 양봉생태과

요 약 배추좀나방은 전 세계의 십자화과 작물에 발생하여 경제적 손실을 유발하는 농업해충으로 이를 제어하기 위해 다양한 화학 살충제가 이용되고 있다. 연간 9~12세대의 많은 발생 세대수로 인하여 잦은 살충제 살포로 저항성이 국내 및 국제적으로 지속적으로 보고되고 있다. 따라서 국내 배추좀나방에 대한 효율적이고 경제적인 제어방법을 고안하기 위해 지역별 저항성을 모니터링하는 것을 목표로 한다. 이전 연구에서는 경기, 영남권역에 대해 조사하였고, 본 연구에서는 강원, 충청, 호남 권역의 3개 지역에서 배추좀나방 살충제 저항성비(RR_{50})와 약효지수(Control Effect Index, CEI)로 평가하였다. 강원 춘천에서는 etofenprox에 대해 RR_{50} 은 303.8배, CEI 값 7.8로 나타났고, 강원 인제에서는 저항성비가 60.7배, CEI는 4.5로 높은 수준의 저항성 발달로 판단된다. 강원 춘천에서는 메톡시페노자이드의 저항성비가 71.4배, CEI는 2.5로 저항성 발현의 주의단계로 판단된다. 충청 괴산의 etofenprox에 대해 RR_{50} 은 230.7배, CEI는 27.3으로 나타나 높은 수준의 저항성 발달로 판단된다. 충청 대전의 etofenprox에 대해 RR_{50} 은 15.8배, CEI는 1.4로 나타나 저항성 발현 주의단계로 판단된다. 호남 완주의 etofenprox에 대해 RR_{50} 은 192.7배, CEI는 25.6으로 나타났다. 호남 진안에서는 etofenprox에 대해 RR_{50} 은 21.0, CEI는 14.1로 나타났다. 호남 완주와 진안은 etofenprox에 대해 저항성이 발달된 것으로 판단된다. 호남 완주에서 methoxyfenozide에 대해 RR_{50} 은 98.7배, CEI는 5.2로 나타나 methoxyfenozide에 대해 저항성이 발달된 것으로 판단된다. 결론적으로 3개 권역에서 발생하는 배추좀나방은 일부 살충제에 대하여 약제 및 지역간 차이는 있었으나 저항성이 발달된 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 지속 가능한 작물 생산을 보장하기 위해 효과적인 저항성 해충군 관리에 기여할 것으로 판단된다.

색인어 배추좀나방, 살충제, 살충제 저항성 모니터링