

4종의 Diamide계열 살충제에 대한 배추좀나방과 파밤나방의 지역계통별 감수성 평가

조선란 · 경예진 · 신소는 · 강원진 · 정대훈 · 이승주 · 박근호 · 김성일 · 조성우 · 김현경 · 구현나 · 김길하*

충북대학교 농업생명환경대학 식물의학과

Susceptibility of Field Populations of *Plutella xylostella* and *Spodoptera exigua* to Four Diamide Insecticides

Sun-Ran Cho, Yejin Kyung, Soeun Shin, Won-Jin Kang, Dae Hoon Jung, Seung-Ju Lee, Geun-Ho Park, Sung Il Kim, Sung Woo Cho, 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 present study evaluated the susceptibility of field populations of *Plutella xylostella* and *Spodoptera exigua* larvae to four diamide insecticides—chlorantraniliprole, cyantraniliprole, cyclaniliprole, and flubendiamide. All the four diamide insecticides induced 100% mortality in the populations from Seongju (SJ) and Geochang (GC) when treated at a concentration recommended for *P. xylostella*. However, a very low insecticidal activity was observed in the population from Pyeongchang (PC) with 42.3% 3 d after treatment with chlorantraniliprole. The relative resistance ratio of *P. xylostella* to cyclaniliprole was similar or low (0.1-6.3 folds) in all the four areas. However, the population from PC exhibited a high resistance ratio to chlorantraniliprole (1,196.3 folds), cyantraniliprole (105.6 folds), and flubendiamide (191.6 folds) compared with that of the susceptible strain *P. xylostella*. Further, the populations of *S. exigua* from Cheongju (CJ), Jindo (JD), and Yeonggwang (YG) were not completely controlled by the 4 diamide insecticides. These populations also showed high relative resistance ratio when compared with that of the susceptible strain *S. exigua*. In particular, the populations from CJ and JD showed 100,000-fold higher resistance ratio to flubendiamide. A comparison of susceptibility of *S. exigua* larvae to chlorantraniliprole between 2014 and 2017 showed that chlorantraniliprole induced 100% mortality in all populations in 2014, whereas a very low insecticidal activity was observed among the populations in 2017. The results of the present study indicate that the insect pests rapidly develop resistance to diamide insecticides. Therefore, alternative insecticides with a different mechanism of action and comprehensive control strategy are needed. This study can serve as a basis to control pests effectively using diamide insecticides.

Key words: *Plutella xylostella*, *Spodoptera exigua*, Chlorantraniliprole, Cyantraniliprole, Cyclaniliprole, Flubendiamide

초록: 4종의 diamide계열 살충제를 이용한 배추좀나방과 파밤나방의 지역계통별 감수성을 조사하였다. 배추좀나방의 경우 성주와 거창지역 집단에서 4종의 약제 모두 추천농도에서 100%의 살충활성을 보인 반면, 평창지역 집단에서는 chlorantraniliprole에 대해 42.3%의 낮은 살충활성을 보였다. 감수성계통 배추좀나방과 저항성비를 비교한 결과 cyclaniliprole은 비교적 4지역에서 유사하거나 낮은 저항성비(0.1~6.3배)를 보인 반면, 평창지역 집단은 chlorantraniliprole (1,196.3배)와 cyantraniliprole (105.6배), flubendiamide (191.6배)은 매우 높은 저항성비를 보였다. 파밤나방의 경우 청주와 진도, 영광지역의 집단 모두 4종의 약제에 낮은 감수성을 나타냈는데, 특히 청주와 진도지역의 집단은 flubendiamide에 대해 100,000배 이상의 저항성비를 보였다. 채집 연도(2014년과 2017년)에 따른 파밤나방에 대한 chlorantraniliprole의 감수성을 비교한 결과 2014년에 채집된 집단들은 모두 100%의 살충률을 보인 반면 2017년에 채집된 집단들은 살충활성이 매우 낮게 나타났다. 본 연구결과는 diamide계열 살충제가 빠르게 저항성이 발현되고 있으며 작용기작이 다른 약제와의 교호살포 등 종합적 방제전략을 수립하는데 기초자료가 될 수 있을 것이다.

검색어: 배추좀나방, 파밤나방, 클로란트라닐리프롤, 사이안트라닐리프롤, 사이아닐리프롤, 플루벤디아마이드

*Corresponding author: khkim@chungbuk.ac.kr

Received February 5 2018; Revised February 20 2018

Accepted February 21 2018

Diamide계열 살충제는 작용기작 분류군 중 28번(Mode of Action Group 28)에 속하며 ryanodine receptors (RyRs)의 조절제로 알려져 있다(IRAC, 2017). RyRs은 일반적으로 골격근과 심장근육에서 발현이 되는데, diamide계열 약제들은 곤충 근육의 RyRs에 결합하여 세포내 저장소에서 Ca^{2+} 의 방출을 활성화함으로써 근육의 마비 및 식욕억제와 같은 행동을 유발하여 궁극적으로 사망에 이르게 한다(Lahm et al., 2005; Cordova et al., 2006; Lanner et al., 2010; Santulli and Marks, 2015). 대표적인 약제로는 flubendiamide, chlorantraniliprole, cyantraniliprole 등이 있는데, 이들 약제는 나비목, 딱정벌레목, 파리목, 노린재목과 같은 곤충에게는 높은 살충활성을 보이지만 포유동물에게는 저독성을 나타낸다(Tohnishi et al., 2005; Hirooka et al., 2007; Lahm et al., 2007; Sattelle et al., 2008; Teixeira and Andaloro, 2013). 그러나 diamide계열 살충제들은 다른 계열의 약제와 비교하여 시장에 출시된 지 얼마되지 않았음에도 불구하고 최근 많은 나비목 해충에 대하여 저항성발현이 빠르게 나타나고 있다. 중국과 태국, 필리핀 등에서 배추좀나방(*Plutella xylostella*)에 대한 저항성발현에 관한 보고뿐만 아니라, 남미토마토나방(*Tuta absoluta*), 이화명나방(*Chilo suppressalis*), 차에모무늬잎말이나방(*Adoxophyes honmai*), 파밤나방(*Spodoptera exigua*)에 대해서도 chlorantraniliprole과 flubendiamide, cyantraniliprole의 저항성이 보고되고 있는데, 이는 diamide계열 약제의 작용점인 RyR의 돌연변이로 보고 있다(Wang and Wu, 2012; Uchiyama and Ozawa, 2014; Roditakis et al., 2015; Kang et al., 2017; Yao et al., 2017; Zuo et al., 2017).

배추좀나방은 나비목(Lepidoptera) 좀나방과(Plutellidae)에 속하며 주로 십자화과 식물을 가해하는 해충으로 전 세계적으로 심각한 피해를 일으키고 있다(Zalucki et al., 2012). 배추좀나방은 짧은 세대 기간으로 인하여 번식속도가 빠르고, 살충제에 대한 높은 선택압에 의해 90여개 이상의 화합물과 유기물에서 저항성을 나타낸다는 보고가 있다(Pu et al., 2010; APRD, 2017).

파밤나방은 나비목(Lepidoptera) 밤나방과(Noctuidae)에 속하며, 채소, 관상용 식물 및 목화를 포함한 다양한 작물을 섭식하는 광식성 해충으로 전 세계적으로 심각한 피해를 일으키고 있다(Metcalf and Flint, 1993). 파밤나방은 방제를 위해서 다양한 분류군의 약제가 사용되어져 왔기 때문에, 유기인계, 카바메이트계, 피레스로이드계, 디아미이드계 등을 포함한 39개 이상의 화합물과 유기물에서 저항성을 나타냈다(Brewer and Trumble, 1989; Aldosari et al., 1996; Moulton et al., 2000, Moulton et al., 2002; Osorio et al., 2008; APRD, 2017).

이와 같이 배추좀나방과 파밤나방은 살충제를 이용한 해충관리 프로그램이 필수적으로 요구되는 해충임에도 불구하고, 저항성 발달로 인하여 적절한 조치가 취해지지 못하고 있는 실정이다(Lee et al., 1993; Cho et al., 2001; Kim et al., 2010). 한편 국내에서는 아직까지 diamide계열의 약제 감수성에 관한 조사가 되어 있지 않은 실정으로 종합적방제 전략을 세우기 위해서는 각각의 약제에 대한 감수성의 모니터링이 필수적이다.

따라서 본 연구는 배추좀나방과 파밤나방의 지역별 야외집단을 채집하여 4종의 diamide계열 살충제에 대한 감수성 평가를 통하여 효과적인 방제대책의 기초자료를 제공하고자 수행하였다.

재료 및 방법

시험곤충

배추좀나방(*Plutella xylostella*)은 2017년도 9월에 피해가 발생한 강원도 평창(PC), 강릉(GN), 경북 성주(SJ), 경남 거창(GC)지역의 배추 노지재배지에서 유충과 성충을 채집하여 1~3세대 누대 사육하면서 실험에 사용하였다. 감수성계통은 충북대학교 독성학실험실에서 약제접촉 없이 10년 이상 누대 사육한 개체를 사용하였다. 배추좀나방 성충은 포트에서 키운 배추를 넣어 2일 동안 알을 받은 후 새로운 사육상자(30 × 30 × 30 cm)에 넣어 준다. 부화한 유충은 성충이 될 때까지 배추를 지속적으로 공급해주었다. 유충은 배춧잎을 먹이로 제공하였고 성충은 5% 설탕물을 제공하여 사육하였다. 모든 개체는 26 ± 1°C, 상대습도 60~70%, 16:8 (L:D)의 조건에서 사육되었다.

파밤나방(*Spodoptera exigua*)은 2014년 9월에 피해가 발생한 충남 아산(AS), 예산(YS), 경북 안동(AD), 전남 진도(JD), 그리고 2017년 8월에 충북 청주(CJ), 전남 진도(JD), 영광(YG), 경남 밀양(MY), 거창(GC) 지역의 파 노지재배지에서 유충과 알을 채집하여 충북대학교 독성학실험실에서 1~3세대 누대 사육한 후 실험에 사용하였다. 유산지로 만든 봉투(40 × 30 cm)에 설탕물을 적신 솜을 파밤나방의 성충과 함께 2일 동안 넣어주었다. 산란된 알들은 페트리디쉬(Φ 90 mm)에 넣고 2일 간격으로 인공사료를 공급하였다. 종령유충이 되면 10~12마리씩 나눠 사육하였다. 번데기는 breeding dish (Φ 90 × 40 mm)로 옮긴 후 우화하기 시작하면 유선지 봉투로 옮겨주었다.

감수성계통은 2017년 5월 농촌진흥청에서 누대사육 중인 파밤나방을 분양 받아 실험에 사용하였다.

시험곤충의 채집지역은 Fig. 1과 같다.



Fig. 1. Site and year of collection of two lepidopteran pests.

시험약제

4종의 diamide계 살충제는 현재 국내에서 시판되고 있는 제 품을 이용하였으며, 각 약제들에 대한 유효성분과 제형, 추천농 도 등은 Table 1과 같다.

약제 감수성 평가

배추좀나방에 대한 약제 감수성을 평가하기 위해서 3령초기 유충을 대상으로 잎침지법을 실시하였다. 감수성평가는 배춧잎 을 지름 5.5 cm인 원형으로 잘라 약액에 30초간 침지한 후 음건 한 후, 페트리디쉬(Φ 5.5 × 2.5 cm)에 배추좀나방 유충을 10마 리씩 접종하였다. 약제의 처리농도는 각 약제별 추천농도를 이 용하여 조사하였으며, 약제처리 1, 2, 3일 후 사충수를 조사하여 살충률을 구하였다. 저항성비는 약제처리 2일 후의 LC₅₀값을 이용하여 산출하였다. 모든 시험은 3반복으로 수행하였다.

Table 1. Tested insecticides

| Common name | Trade name (Korea name) | AI ^a (%) | Formulation ^b | Recommended dilution (X) | Recommended concentration (ppm) |
|---------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Chlorantraniliprole | 알타코아 | 5 | WG | 2,000 | 25 |
| Cyantraniliprole | 토리치 | 5 | DC | 2,000 | 25 |
| Cyclaniliprole | 라피탄 | 4.5 | SL | 2,000 | 22.5 |
| Flubendiamide | 애니충 | 20 | SC | 2,000 | 100 |

^aActive ingredient.

^bWG = water dispensible granule, SC = suspension concentrate, DC = dispersible concentrate, SL = soluble concentrate.

파밤나방에 대한 생물검정은 배춧잎을 지름 5.5 cm로 잘라 각 농도의 약액에 30초간 침지한 후 충분히 음건하고 바닥에 필 테페이퍼(Φ 5.5 cm)가 깔린 페트리디쉬(Φ 5.5 × 2.5 cm)에 넣 은 후 붓을 이용하여 2령 말기~3령 초기의 유충을 10마리씩 접 종하였다. 약제 처리 1, 2, 3, 4일 후에 사충수를 조사하여 살충 률을 구하였으며, 저항성비는 약제처리 3일 후의 LC₅₀값을 이 용하여 산출하였다. 모든 시험은 4반복으로 수행하였다.

모든 시험은 26 ± 1°C, 상대습도 60~70%, 16:8 (L:D)의 조 건에서 수행되었다.

데이터 분석

배추좀나방과 파밤나방에 대한 4종 약제의 살충률은 채집 지역과 약제처리 후 경과시간별로 Tukey's range test를 이용 하여 비교 분석하였고, 각 지역채집 계통별 약제의 LC₅₀ (ppm) 값은 probit analysis를 이용하였다(SAS Institute, 2009). 저항 비(Relative Resistance, RR)는 각 약제에 대한 감수성계통의 LC₅₀값을 기준으로 다음과 같이 산출하였다.

$$RR = \text{각 채집지역 계통의 LC}_{50} \text{ 값} / \text{감수성계통의 LC}_{50} \text{ 값}$$

결과 및 고찰

배추좀나방의 diamide 약제 감수성 평가

4개지역(PC, GN, SJ, GC)에서 채집한 배추좀나방 야외집단 을 대상으로 4종의 diamide계 약제들에 대한 약제 감수성을 조 사하였다(Fig. 2). 감수성 계통과 성주(SJ), 거창(GC) 지역에서 채집된 배추좀나방 집단들은 모두 100%의 살충률을 보였다. 강릉(GN)지역 계통에서 채집된 배추좀나방 집단들은 약제처 리 2일 후에는 flubendiamide를 제외한 3종의 약제에 100% 방 제되었다. 그러나 평창계통(PC)의 경우 chlorantraniliprole과

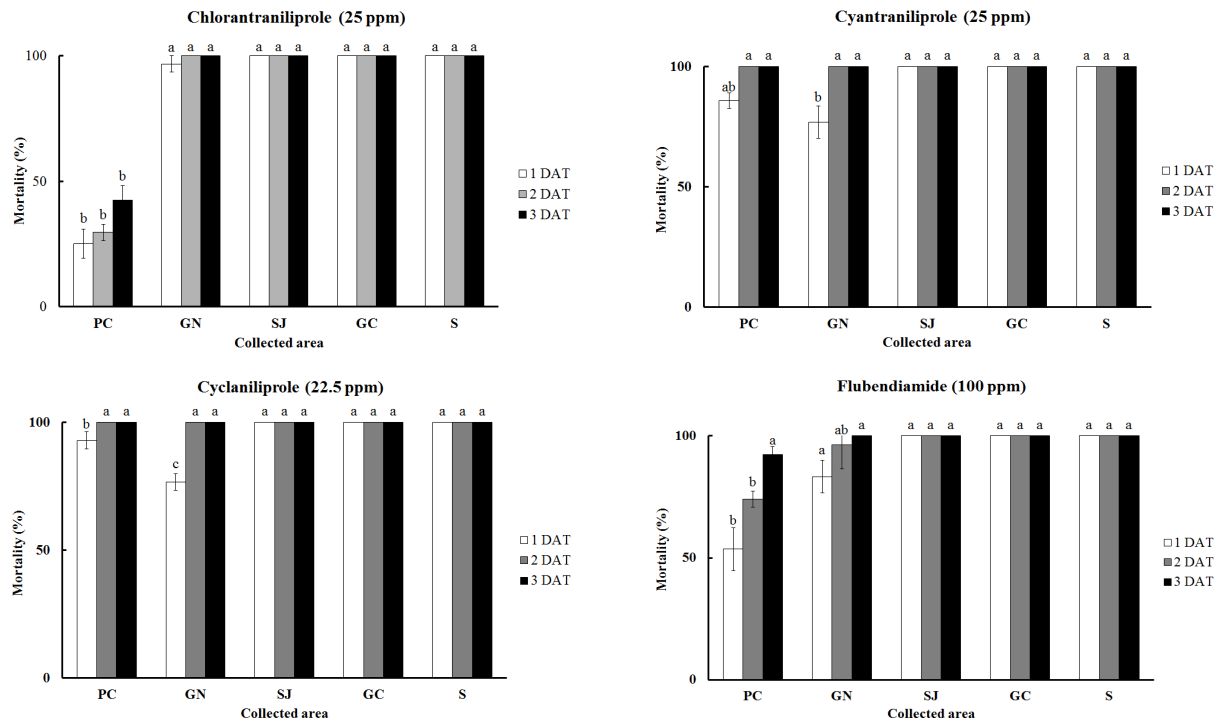


Fig. 2. Susceptibility of various field populations of *Plutella xylostella* to diamide insecticides. Means followed by the same letter within a graph were not significantly different at $P < 0.05$ using Tukey's range test (SAS Institute, 2009). PC, Pyeongchang; GN, Gangneung; SJ, Seongju; GC, Geochang; S, Susceptibility.

Table 2. Toxicity of four diamide insecticides to various field populations of *Plutella xylostella* larva during the 2 d exposure period

| Pesticides | Population | <i>n</i> | LC ₅₀ (ppm) (95% CL ^a) | Slope ± SE | χ^2 | RR ^b |
|---------------------|------------|----------|---|-------------|----------|-----------------|
| Chlorantraniliprole | PC | 240 | 35.89 (21.14-57.47) | 1.43 ± 0.20 | 51.10 | 1,196.3 |
| | GN | 270 | 1.21 (0.45-2.99) | 1.31 ± 0.22 | 36.93 | 40.3 |
| | SJ | 270 | 0.49 (0.33-0.72) | 2.32 ± 0.31 | 56.48 | 16.3 |
| | GC | 90 | 0.07 (0.03-0.14) | 0.74 ± 0.11 | 45.52 | 2.3 |
| | S | 330 | 0.03 (0.02-0.05) | 1.91 ± 0.32 | 35.30 | 1.0 |
| Cyantraniliprole | PC | 240 | 0.95 (0.34-2.06) | 0.80 ± 0.11 | 57.41 | 105.6 |
| | GN | 270 | 0.88 (0.35-1.85) | 1.15 ± 0.18 | 38.92 | 97.8 |
| | SJ | 270 | 0.43 (0.24-0.65) | 1.77 ± 0.24 | 55.88 | 47.8 |
| | GC | 90 | 0.02 (0.006-0.04) | 0.8 ± 0.12 | 45.78 | 2.2 |
| | S | 330 | 0.009 (0.003-0.03) | 1.24 ± 0.15 | 73.01 | 1.0 |
| Cyclaniliprole | PC | 240 | 0.10 (0.04-0.18) | 0.08 ± 0.56 | 86.51 | 3.3 |
| | GN | 270 | 0.19 (0.12-0.28) | 1.13 ± 0.15 | 74.11 | 6.3 |
| | SJ | 270 | 0.19 (0.05-0.35) | 1.35 ± 0.26 | 26.29 | 6.3 |
| | GC | 90 | 0.002 (0.0003-0.005) | 1.34 ± 0.28 | 23.28 | 0.1 |
| | S | 300 | 0.03 (0.03-0.04) | 2.08 ± 0.15 | 199.70 | 1.0 |
| Flubendiamide | PC | 210 | 9.58 (2.84-19.36) | 0.95 ± 0.16 | 34.10 | 191.6 |
| | GN | 240 | 1.35 (0.58-2.95) | 0.70 ± 0.07 | 89.14 | 27.0 |
| | SJ | 270 | 0.33 (0.14-0.52) | 2.04 ± 0.34 | 36.47 | 6.6 |
| | GC | 90 | 0.28 (0.13-0.61) | 0.65 ± 0.1 | 42.66 | 5.6 |
| | S | 270 | 0.05 (0.03-0.10) | 2.49 ± 0.43 | 32.75 | 1.0 |

^a95% Confidence limits.

^bRelative resistance.

PC, Pyeongchang; GN, Gangneung; SJ, Seongju; GC, Geochang; S, Susceptibility.

flubendiamide에 대해 약제처리 3일 후에도 100% 살충효과를 보이지 않았는데, 특히 chlorantraniliprole에 대해서는 3일 후에도 42.3%의 매우 낮은 살충률을 보였다.

배추좀나방 야외채집계통들에 대한 지역별 저항성비를 감수성계통(S)과 비교 분석하였다(Table 2). Cyclaniliprole에 대해 4지역 계통들은 유사하거나 낮은 저항성비(0.1~6.3배)를 보였으나 나머지 3약제에 대해서는 지역별로 저항성의 차이를 보였다. 특히 평창지역 계통(PC)은 chlorantraniliprole에서 1,196.3배의 매우 높은 저항성비를 보였으며 cyantraniliprole (105.6배)과 flubendiamide (191.6배)에서도 다른 지역에 비해 높은 저항성비를 나타내었다. 반면, 거창지역 계통(GC)은 4종의 약제에 대하여 가장 낮은 저항성비(0.1~5.6배)를 보였다.

최근 배추좀나방은 거의 모든 종류의 살충제에 대해서 저항성을 나타내고 있으며 미국, 일본, 필리핀, 태국, 중국, 타이완 등에서 diamide계열 약제에 저항성이 지속적으로 보고되고 있는데 중국 광둥 지역에서 chlorantraniliprole에 대하여 저항성비가 약 2,000배에 이르는 저항성 배추좀나방을 보고하였으며 flubendiamide에 대해서는 1,300배 이상의 저항성 집단이 보고되기도 하였다(Zhao et al., 2006; Pu et al., 2010; Troczka et al., 2012; Wang and Wu, 2012; Wang et al., 2013; Gong et al., 2014; Steinbach et al., 2015; Kang et al., 2017). 그러나

cyclaniliprole은 diamide계열 살충제 중에서도 가장 최근에 도입된 약제로 배추좀나방에 대하여 아직까지는 저항성이 보고되어 있지 않다(APRD, 2017). 배추좀나방에 대한 chlorantraniliprole과 flubendiamide의 교차저항성이 보고되기도 하였는데 이는 두 약제가 동일한 작용점을 가지고 있기 때문인 것으로 보인다(Wang et al., 2013). 따라서 배추좀나방 방제를 위해서 cyclaniliprole을 지속적으로 사용할 경우 장기적으로는 저항성 집단의 출현이 우려되기도 한다.

파밤나방의 diamide 약제 감수성 평가

4종의 diamide계열 살충제를 이용하여 2017년도에 5개지역(CJ, JD, YG, MR, GC)에서 채집된 파밤나방 야외집단의 약제 감수성을 조사하였다(Fig. 3). 파밤나방에 대한 diamide계 살충제의 감수성은 배추좀나방에 비해 비교적 낮게 나타났는데 청주(CJ), 진도(JD), 영광(YG)지역 집단들은 추천농도로 처리한 4종의 약제 모두에서 100% 살충효과를 보이지 않았다. 특히 진도지역에서 채집된 파밤나방은 모든 약제에 대해서는 처리한 지 2일 후에도 10% 이하의 낮은 살충률을 보였으며, 약제처리 4일 후에도 70% 이하의 낮은 살충률을 보였다. Flubendiamide에서는 4일 후에도 5%의 살충활성만을 보여 파밤나방에 대한

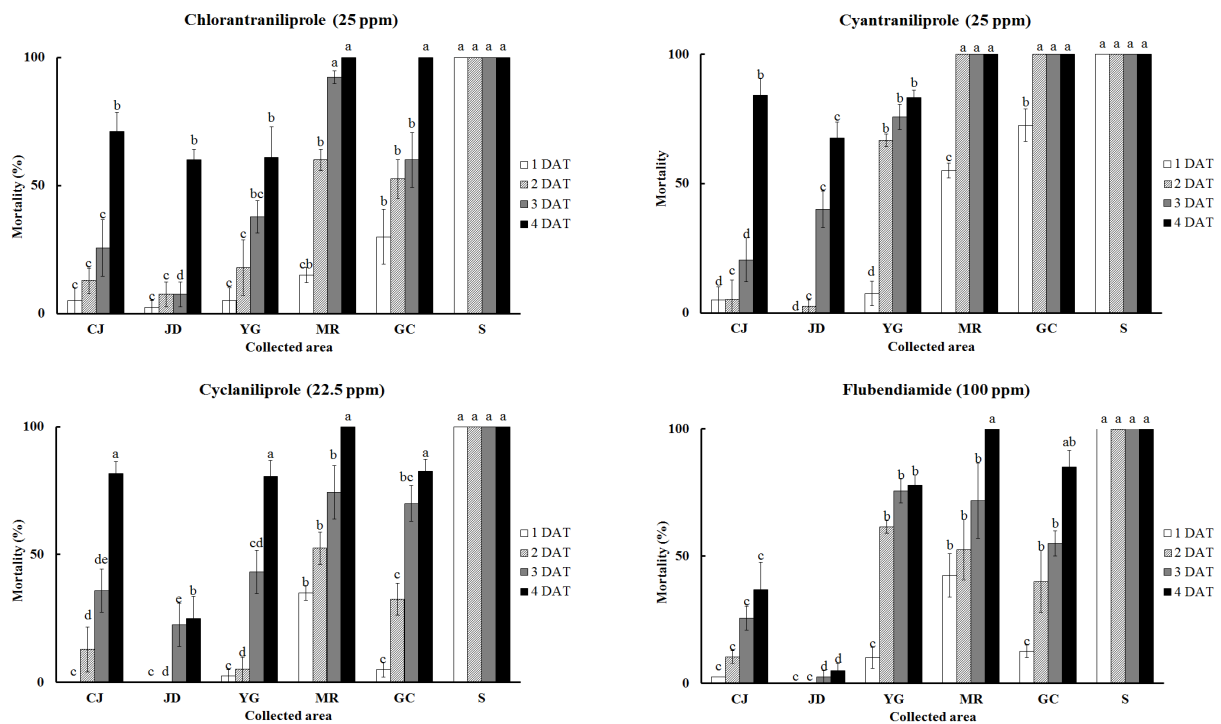


Fig. 3. Susceptibility of various field populations of *Spodoptera exigua* to diamide insecticides. Means followed by the same letter within a graph were not significantly different at $P < 0.05$ using Tukey's range test (SAS Institute, 2009). CJ, Cheongju; JD, Jindo; YG, Yeonggwang; MR, Miryang; GC, Geochang; S, Susceptibility.

Table 3. Toxicity of four diamide insecticides to various field populations of *Spodoptera exigua* larva during the 3 d exposure period

| Pesticide | Population | n | LC ₅₀ (ppm) (95% CL ^a) | Slope ± SE | x ² | RR ^b |
|---------------------|------------|-----|---|-------------|----------------|-----------------|
| Chlorantraniliprole | CJ | 200 | >25 | - | - | >2,500 |
| | JD | 200 | >25 | - | - | >2,500 |
| | YG | 200 | >25 | - | - | >2,500 |
| | MR | 200 | 1.77 (0.78-4.16) | 1.26 ± 0.18 | 47.69 | 177 |
| | GC | 200 | 10.06 (6.53-16.30) | 0.62 ± 0.07 | 79.05 | 1,006 |
| | S | 200 | 0.01 (0.0002-0.07) | 0.90 ± 0.23 | 15.59 | 1.0 |
| Cyantraniliprole | CJ | 80 | 1.81 (1.69-2.25) | 1.98 ± 0.63 | 9.83 | 22.6 |
| | JD | 200 | >25 | - | - | >312.5 |
| | YG | 200 | 1.66 (0.01-6.33) | 0.72 ± 0.15 | 21.83 | 20.8 |
| | MR | 240 | 0.09 (0.001-0.43) | 1.09 ± 0.30 | 13.12 | 1.1 |
| | GC | 240 | 0.08 (0.04-0.13) | 1.13 ± 0.11 | 111.62 | 1.0 |
| | S | 240 | 0.08 (0.04-0.13) | 1.43 ± 0.18 | 64.24 | 1.0 |
| Cyclaniliporle | CJ | 200 | >22.5 | - | - | >11,250 |
| | JD | 200 | >22.5 | - | - | >11,250 |
| | YG | 200 | >22.5 | - | - | >11,250 |
| | MR | 200 | 10.70 (4.81-21.17) | 2.58 ± 0.54 | 22.79 | 5,350 |
| | GC | 200 | 6.30 (4.85-8.14) | 1.18 ± 0.09 | 167.07 | 3,150 |
| | S | 240 | 0.002 (0.00009-0.02) | 1.16 ± 0.33 | 12.39 | 1.0 |
| Flubendiamide | CJ | 200 | >100 | - | - | >100,000 |
| | JD | 200 | >100 | - | - | >100,000 |
| | YG | 200 | 9.56 (0.81-27.24) | 0.75 ± 0.13 | 34.28 | 9,560 |
| | MR | 280 | 0.66 (0.006-6.51) | 0.36 ± 0.09 | 16.68 | 660 |
| | GC | 200 | 6.5 (4.99-8.25) | 1.14 ± 0.11 | 100.95 | 6,500 |
| | S | 240 | 0.001 (0.0002-0.003) | 1.22 ± 0.28 | 19.01 | 1.0 |

^a95% Confidence limits.

^bRelative resistance.

CJ, Cheongju; JD, Jindo, YG, Yeonggwang; MR, Miryang; GC, Geochang; S, Susceptibility.

diamide계열 약제의 감수성은 지역과 약제 종류에 따라 많은 차이가 있음을 알 수 있었다.

파밤나방에 대한 지역별 저항성비를 감수성계통과 비교 분석하였다(Table 3). 5개지역에서 채집된 파밤나방의 약제 저항성비를 분석한 결과 cyantraniliprole을 처리한 밀양과 거창지역을 제외하고는 모든 지역 집단에서 매우 높은 저항성비를 나타냈다. 청주와 진도, 영광에서는 4종의 약제 모두에서 매우 높은 저항성비가 관찰되었는데, 특히 청주와 진도지역에서 채집된 파밤나방의 경우 flubendiamide에 대해 100,000배 이상의 높은 저항성을 나타내었다.

파밤나방에 대한 chlorantraniliprole을 이용한 저항성 발현 탐색

본 연구결과를 통해 파밤나방에서 diamide계열 약제인 chlorantraniliprole이 짧은 기간에 저항성이 발현될 수 있음을 예측할 수 있었다. 따라서 2014년 5개지역 집단(CJ, JD, AS,

YS, AD)과 2017년 5개지역 집단(CJ, JD, YG, MR, GC)에 대한 약제감수성을 비교 하였다(Table 4).

2014년은 모든 지역 집단에서 chlorantraniliprole에 대하여 100%의 살충률을 나타내었으나, 2017년의 채집집단의 경우에는 7.5~92.3%로 살충률이 급격히 떨어졌다. Chlorantraniliprole은 중국에서 2008년부터 도입된 약제로 도입초기 16개의 지역에서 평가한 모든 개체군들은 감수성을 보였다(Wang et al., 2010). 하지만 2011년부터 중국 광동 지역에서 저항성 개체군들이 발견되면서 많은 저항성 발현에 관한 연구가 이루어지고 있는 약제로 중국에서 2009~2012년까지 16개 집단을 조사한 결과 chlorantraniliprole에 대한 저항성이 2~44배 높게 나타났으며, Shandong지역에서 2년 동안(2011~2012년) chlorantraniliprole과 flubendiamide의 감수성을 평가한 결과 모든 지역에서 LC₅₀값의 증가 즉, 감수성이 낮아지고 있음을 보고하였다(Wang and Wu., 2012; Che et al., 2013; Zhang et al., 2014). 또한 chlorantraniliprole약제에 대한 선택압 하에서 22세대 이후 LC₅₀값이 12배 증가했으며, 담배겨세미나방(*S. litura*)에 대해

Table 4. Comparison of susceptibility of various field populations of *Spodoptera exigua* larva to chlorantraniliprole

| Year | Mortality (%; mean ± SE) | | | | | |
|------|--------------------------|------------|-----------|-------------|------------|------------|
| 2014 | Population | CJ | JD | YG | MR | GC |
| | | 100 ± 0.0 | 100 ± 0.0 | 100 ± 0.0 | 100 ± 0.0 | 100 ± 0.0 |
| 2017 | Population | CJ | JD | AS | YS | AD |
| | | 25.6 ± 5.0 | 7.5 ± 4.8 | 37.8 ± 10.8 | 92.3 ± 4.1 | 60.0 ± 7.5 |

These data are from 3 days after treatment.

Sample size, *n* = 60.

CJ, Cheongju; JD, Jindo, YG, Yeonggwang; MR, Miryang; GC, Geochang; AS, Asan; YS, Yesan; AD, Andong.

서는 10세대가 지나면 감수성계통에 비해 80배 높은 저항성이 발달되어 chlorantraniliprole은 나비목에 대한 저항성 발현이 빠른 약제로 보여진다(Lai et al., 2011; Muthusamy et al., 2014).

지역에 따른 약제감수성의 차이는 농가의 살충제 선택과 이용방법에 따라서 저항성의 차이가 나타나는 것으로 보이는데 배추좀나방보다 파밤나방이 더 높은 저항성비를 나타내는 것은 이 해충들의 약제노출시간의 차이에 따른 영향으로 볼 수 있는데 배추좀나방의 기주인 배추와 파밤나방의 기주인 파의 재배기간의 차이로 인한 약제노출 횟수와 노출기간의 차이로 파밤나방이 더 빠른 저항성이 발현되는 것으로 생각된다(Che et al., 2013). 이것은 짧은 시간 동안 약제가 시장에 많이 도입되었거나, 살충제의 과용에 대한 결과임을 시사한다(Lai et al., 2011). 그러나 차에모무늬잎말이나방(*A. honmai*)에 대한 diamide 계열 살충제 2종(chlorantraniliprole, flubendiamide)을 이용한 연구 결과 총체내 약제의 잔류로 인해 지속적으로 노출될 경우 저항성이 빠르게 발현될 수 있음을 보고하였다(Uchiyama and Ozawa, 2014).

다양한 diamide 계열 약제의 저항성 발현에 대한 연구가 최근 보고되고 있으며 이러한 연구들은 결국 해충들이 diamide 계열 약제에 대하여 빠르게 저항성을 획득하고 있음을 말해준다.

그러므로 본 연구결과를 기초로 배추좀나방과 파밤나방의 효과적인 방제를 위한 diamide 계열 약제의 사용은 살충제 저항성 위원회(IRAC)에서 권장하는 작용기작이 다른 약제의 교호 살포와 종합적 방제전략이 필요할 것으로 생각된다.

Literature Cited

Aldosari, S.A., Watson, T.F., Sivasupramaniam, S., Osman, A.A., 1996. Susceptibility of field populations of beet armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) to cyfluthrin, methomyl, and profenofos, and selection for resistance to cyfluthrin. *J. Econ. Entomol.* 89, 1359-1363.

Arthropod Pesticide Resistance Database (APRD), 2017. <https://www.pesticideresistance.org/display.php?page=species&arId=571>. Accessed 19 January 2018.

Brewer, M.J., Trumble, J.T., 1989. Field monitoring for insecticide resistance in beet armyworm (Lepidoptera: Noctuidae). *J. Econ. Entomol.* 82, 1520-1526.

Che, W., Shi, T., Wu, Y., Yang, Y., 2013. Insecticide resistance status of field populations of *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) from China. *J. Econ. Entomol.* 106, 1855-1862.

Cho, J.M., Kim, K.J., Kim, S.M., Han, D.S., Hur, J.H., 2001. Diamondback moth (*Plutella xylostella* L.) resistance to organophosphorus and carbamate insecticides in Kangwon alpine vegetable croplands. *Korean J. Pest. Sci.* 5, 30-35.

Cordova, D., Benner, E.A., Sacher, M.D., Rauh, J.J., Sopa, J.S., Lahm, G.P., Selby, T.P., Stevenson, T.M., Flexner, L., Gutteridge, S., Rhoades, D.F., Wu, L., Smith, R.M., Tao, Y., 2006. Anthranilic diamides: a new class of insecticides with a novel mode of action, ryanodine receptor activation. *Pestic. Biochem. Physiol.* 84, 196-214.

Gong, W., Yan, H.H., Gao, L., Guo, Y.Y., Xue, C.B., 2014. Chlorantraniliprole resistance in the diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae). *J. Econ. Entomol.* 107, 806-814.

Hirooka, T., Nishimatsu, T., Kodama, H., Reckmann, U., Nauen, R., 2007. The biological profile of flubendiamide, a new benzenedicarboxamide insecticide. *Pflanzenschutz Nachrichten-Bayer-English Edition* 60, 183.

IRAC (Insecticide Resistance Action Committee), 2017. IRAC mode of action classification scheme. <http://www.irc-online.org/documents/moa-classification/>. Accessed 19 January 2018.

Kang, W.J., Koo, H.N., Jeong, D.H., Kim, H.K., Kim, J., Kim, G.H., 2017. Functional and genetic characteristics of Chlorantraniliprole resistance in the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Entomol. Res.* 47, 394-403.

Kim, Y.R., Cho, M.S., Oh, S.M., Kim, S.W., Youn, Y.N., Yu, Y.M., 2010. Resistance and susceptibility of diamondback moth, *Plutella xylostella* strains collected from different region in Korea to *Bacillus thuringiensis*. *Korean J. Pestic. Sci.* 14, 123-132.

Lahm, G.P., Stevenson, T.M., Selby, T.P., Freudenberger, J.H., Cordova, D., Flexner, L., Bellin, C.A., Dubas, C.M., Smith, B.K., Hughes, K.A., Hollingshaus, J.G., Clark, C.E., Benner, E.A., 2007. Rynaxypyr™: a new insecticidal anthranilic diamide that acts as a potent and selective ryanodine receptor activator. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* 17, 6274-6279.

- Lahm, G.P., Thomas, S.P., Freudenberger, J.H., Stevenson, T.M., Myers, B.J., Seburyamo, G., Smith, B.K., Flexner, L., Clark, C.E., Cordova, D., 2005. Insecticidal anthranilic diamides: a new class of potent ryanodine receptor activators. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* 15, 4898-4906.
- Lai, T., Li, J., Su, J., 2011. Monitoring of beet armyworm *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) resistance to chlorantraniliprole in China. *Pestic. Biochem. Physiol.* 101, 198-205.
- Lanner, J.T., Georgiou, D.K., Joshi, A.D., Hamilton, S.L., 2010. Ryanodine receptors: structure, expression, molecular details, and function in calcium release. *Cold Spring Harb Perspect Biol.* 2, a003996.
- Lee, S.C., Cho, Y.S., Kim, D.I., 1993. Comparative study of toxicological methods and field resistance to insecticides in diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae). *Korean J. Appl. Entomol.* 32, 323-329.
- Metcalf, R.L., Flint, W.P., 1993. Destructive and useful insects: their habitats and control, 5th edition. McGraw-Hill Book Company, Inc., NY.
- Moulton, J.K., Pepper, D.A., Dennehy, T.J., 2000. Beet armyworm (*Spodoptera exigua*) resistance to spinosad. *Pest Manag. Sci.* 56, 842-848.
- Moulton, J.K., Pepper, D.A., Jansson, R.K., Dennehy, T.J., 2002. Pro-active management of beet armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) resistance to tebufenozide and methoxyfenozide: baseline monitoring, risk assessment, and isolation of resistance. *J. Econ. Entomol.* 95, 414-424.
- Muthusamy, R., Vishnupriya, M., Shivakumar, M.S., 2014. Biochemical mechanism of chlorantraniliprole resistance in *Spodoptera litura* (Fab) (Lepidoptera: Noctuidae). *J. Asia Pac. Entomol.* 17, 865-869.
- Osorio, A., Martínez, A.M., Schneider, M.I., Díaz, O., Corrales, J.L., Avilés, M.C., Smagghe, G., Pineda, S., 2008. Monitoring of beet armyworm resistance to spinosad and methoxyfenozide in Mexico. *Pest Manag. Sci.* 64, 1001-1007.
- Pu, X., Yang, Y., Wu, S., Wu, Y., 2010. Characterisation of abamectin resistance in a field-evolved multiresistant population of *Plutella xylostella*. *Pest Manag. Sci.* 66, 371-378.
- Roditakis, E., Vasakis, E., Grispoli, M., Stavrakaki, M., Nauen, R., Gravouil, M., Bassi, A., 2015. First report of *Tuta absoluta* resistance to diamide insecticides. *J. Pest. Sci.* 88, 9-16.
- Santulli, G., Marks, A.R., 2015. Essential roles of intracellular calcium release channels in muscle, brain, metabolism, and aging. *Curr. Mol. Pharmacol.* 8, 206-222.
- SAS Institute, 2009. SAS user's guide; statistics, version 9.1 ed. SAS Institute, Cary, NC.
- Sattelle, D.B., Cordova, D., Cheek, T.R., 2008. Insect ryanodine receptors: molecular targets for novel pest control chemicals. *Invert. Neurosci.* 8, 107.
- Steinbach, D., Gutbrod, O., Lümmlen, P., Matthiesen, S., Schorn, C., Nauen, R., 2015. Geographic spread, genetics and functional characteristics of ryanodine receptor based target-site resistance to diamide insecticides in diamondback moth, *Plutella xylostella*. *Insect Biochem. Mol. Biol.* 63, 14-22.
- Teixeira, L.A., Andalaro, J.T., 2013. Diamide insecticides: Global efforts to address insect resistance stewardship challenges. *Pestic. Biochem. Physiol.* 106, 76-78.
- Tohnishi, M., Nakao, H., Furuya, T., Seo, A., Kodama, H., Tsubata, K., Fujioka, S., Kodama, H., Hirooka, T., Nishimatsu, T., 2005. Flubendiamide, a novel insecticide highly active against lepidopterous insect pests. *J. Pest. Sci.* 30, 354-360.
- Trocza, B., Zimmer, C.T., Elias, J., Schorn, C., Bass, C., Davies, T.G. E., Fidel, L.M., Williamson, M.S., Slater, R., Nauen, R., 2012. Resistance to diamide insecticides in diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) is associated with a mutation in the membrane-spanning domain of the ryanodine receptor. *Insect Biochem. Mol. Biol.* 42, 873-880.
- Uchiyama, T., Ozawa, A., 2014. Rapid development of resistance to diamide insecticides in the smaller tea tortrix, *Adoxophyes honmai* (Lepidoptera: Tortricidae), in the tea fields of Shizuoka Prefecture, Japan. *Appl. Entomol. Zool.* 49, 529-534.
- Wang, X., Khakame, S.K., Ye, C., Yang, Y., Wu, Y., 2013. Characterisation of field-evolved resistance to chlorantraniliprole in the diamondback moth, *Plutella xylostella*, from China. *Pest Manag. Sci.* 69, 661-665.
- Wang, X., Wu, Y., 2012. High levels of resistance to chlorantraniliprole evolved in field populations of *Plutella xylostella*. *J. Econ. Entomol.* 105, 1019-1023.
- Wang, X.L., Li, X.Y., Shen, A.D., Wu, Y.D., 2010. Baseline susceptibility of the diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae) to chlorantraniliprole in China. *J. Econ. Entomol.* 103, 843-848.
- Yao, R., Zhao, D.D., Zhang, S., Zhou, L.Q., Wang, X., Gao, C.F., Wu, S.F., 2017. Monitoring and mechanisms of insecticide resistance in *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae), with special reference to diamides. *Pest Manag. Sci.* 73, 1169-1178.
- Zalucki, M.P., Shabbir, A., Silva, R., Adamson, D., Shu-Sheng, L., Furlong, M.J., 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, 1115-1129.
- Zhang, P., Gao, M., Mu, W., Zhou, C., Li, X.H., 2014. Resistant levels of *Spodoptera exigua* to eight various insecticides in Shandong, China. *J. Pest. Sci.* 39, 7-13.
- Zhao, F., Wang, M., Li, J., 2006. Resistance of *Plutella xylostella* to nine insecticides in several field populations in China. *Chinese Bull. Entomol.* 43, 640-643.
- Zuo, Y., Wang, H., Xu, Y., Huang, J., Wu, S., Wu, Y., Yang, Y., 2017. CRISPR/Cas9 mediated G4946E substitution in the ryanodine receptor of *Spodoptera exigua* confers high levels of resistance to diamide insecticides. *Insect Biochem. Mol. Biol.* 89, 79-85.