

검역해충실험실에서 파밤나방의 온도별 생활사 및 2종 살충제에 대한 유충 감수성 조사

이지은 · 박영진*

농림축산검역본부 식물검역기술개발센터

Analysis of Life Cycle on *Spodoptera exigua* by Various Temperatures and Larval Susceptibility against Two Pesticides in Quarantine Pest Research Facility

Jieun Lee and Youngjin Park*

Plant Quarantine Technique Center, Animal and Plant Quarantine Agency, Gimcheon 39660, Korea

ABSTRACT: A Quarantine Pest Research Facility (QPRF) had been build in Animal and Plant Quarantine Agency and designed to ensure alien pests are safety contained inside the laboratory. Functions of QPRF including insect rearing, research, and physical containment facility were verified to check suitability as a research laboratory using the beet armyworm, *Spodoptera exigua*. As insect rearing and laboratory facility, *S. exigua* completed its development for 32.2 days at 25°C. Egg hatching, pupation, and adult eclosion showed 80, 86.6, and 90%. Two pesticides, fluxametamide and hydramethylnon showed high susceptibility against *S. exigua* larvae by spraying and dipping methods. As physical containment facility, male adults, which were artificially released from laboratory, did not capture in delta trap installed sex pheromone lure during winter season. Based on these results, QPRF will be used for study on alien insect species.

Key words: Quarantine Pest Research Facility, Beet armyworm, Life cycle, Fluxametamide, Hydramethylnon

초록: 농림축산검역본부는 해외해충 연구를 위해 밀폐능력을 갖춘 검역해충실험실을 구축하였다. 연구실험실로써 검역해충실험실의 적합성을 확인하기 위해 파밤나방을 이용하여 해충사육, 연구, 밀폐기능을 검증하였다. 해충사육 기능검증에서 한 세대의 파밤나방 완성에 필요한 온도별 생활사는 25°C에서 32.2일이 소요되었으며, 알 부화율은 80%, 유충 용화율은 86.6%, 번데기 우화율은 90%로 조사되었다. 연구기능 검증에서 살포법과 침지법을 이용하여 2종의 살충제(플록사메타마이드와 히드라메칠론)에 대한 고도의 유충 감수성을 확인하였다. 밀폐기능 검증에서는 겨울 동안 수행된 검역해충실험실의 유출시험에서 외부에 설치된 성페로몬 트랩에 파밤나방 수컷성충이 포획되지 않아 성충 유출은 없었다. 본 연구결과를 바탕으로 해외해충에 대한 다양한 연구가 검역해충실험실에서 가능할 것으로 판단된다.

검색어: 검역해충실험실, 파밤나방, 생활사, 플록사메타마이드, 히드라메칠론

최근 우리나라의 국제교역량 및 해외여행객 수의 증가는 기 후변화 요인과 더불어 자연생태계와 농업환경에 큰 피해를 줄 수 있는 해외병해충의 국내 침입 및 정착 가능성을 높이는 요인이 될 수 있다. 특히, 1996년부터 2014년까지 국내 침입이 보고

된 해외해충은 딱정벌레목, 노린재목, 나비목, 파리목, 총채벌레목, 벌목에 속하는 33종으로 매년 침입해충의 종수가 지속적으로 증가하고 있다(Lee et al., 2016). 이 가운데 파리목의 금지해충인 오리엔탈과실파리류의 국내 정착 시 사과와 같은 주요 농산물은 해외수출 중단의 피해가 발생할 수 있다(Lee et al., 2019). 2017년 세계자연보존연맹에 의해 100대 악성침입외래종으로 규정된 붉은불개미 군체가 국내 향만에서 처음으로 발

*Corresponding author: parky1127@korea.kr

Received January 5 2021; Revised February 16 2021

Accepted February 18 2021

견되어 농림축산검역본부에서 박멸작업을 진행하여 추가 확산 및 발생을 차단하였다(Lyu and Lee, 2017). 따라서 이러한 해외해충의 국내 침입 및 정착을 막기 위해서는 예찰 및 방제연구 또한 필요하다. 현재 농림축산검역본부에서는 침입 가능한 해외해충에 대한 선제적 연구수행을 위해 소규모 밀폐형 연구시설인 검역해충실험동을 2018년부터 구축하여 해충연구에 대한 적합성(사육시설, 연구, 밀폐기능) 연구를 수행하고 있다. 이를 위해 국내본포종을 대상으로 검역해충실험동에서 발육조사 및 살충제에 대한 생물검정을 수행하였으며, 동절기간 중 야외에 성페로몬 트랩을 설치하여 검역해충실험동의 해충 유출유무를 조사하여 연구시설의 적합성을 검증하였다.

본 연구에 시험곤충으로 사용한 파밤나방(*Spodoptera exigua*)은 나비목(Lepidoptera) 밤나방과(Noctuidae)에 속하는 해충으로 국내를 포함해 전 세계적으로 발생하는 나비목 주요 농업해충이다(Lee and Park, 2015; Han et al., 2013). 파밤나방에 의한 국내 농작물의 피해는 1980년대 후반부터 시설재배지가 확대됨에 따라 크게 문제가 되었고(Goh et al., 1991), 겨울기간내 이 해충의 국내 월동가능성으로 많은 농작물에 피해를 준다(Ahn et al., 1991; Kim and Song, 2000). 이러한 파밤나방은 온대지역에서 다기알콜류 생성을 기반으로 낮은 온도에서도 생존을 유지할 수 있는 내한성 기작을 보유하고 있다(Kim and Kim, 1997). 이는 가을의 야의 조건처럼 점진적인 온도감소가 파밤나방의 저온순화기능을 발현하여 낮은 온도에 대한 저항성을 가진다(Song et al., 1997; Zheng et al., 2011). 월동과 관련한 곤충의 내한성 유기는 온도와 같은 외부환경에 따라 생체에서 일어나는 거의 모든 화학반응이 변하며 이는 곤충의 생체반응의 변화를 일으켜 궁극적으로 곤충의 발육에 직접적인 영향을 주는 최대 환경인자가 된다(Chen et al., 2011). 따라서 월동연구의 기초자료가 되는 온도별 파밤나방의 발육률과 발육기간을 조사하여 온도가 파밤나방의 발육에 미치는 영향을 검역해충 실험동에서 수행하였다.

최근에 개발된 신규 살충제인 플록사메타마이드(Fluxamethamide)와 히드라메칠론(Hydramethylnon) 성분이 함유된 개미용 독먹이제를 대상으로 파밤나방 유충에 대한 감수성을 검역해충실험동 내부에서 조사하였다. 플록사메타마이드는 Insecticide Resistance Action Committee (IRAC)에 의해 구분된 살충제 작용기작 가운데 집파리를 대상으로 γ -aminobutyric acid (GABA)-gated chloride channels (GABA_{Cl}s)의 길항제 및 glutamate-gated chloride channels (GluCl_s)내의 효소활성 변화를 일으키는 중계자(allosteric modulator)로써 살충효과를 나타낸다(Asahi et al., 2018). 히드라메칠론은 붉은불개미(*Solenopsis invicta*)와 바퀴벌레 방제를 위한 약제로 개발 및 등록되

었다(Hollingshaus, 1987). 본 약제는 주로 세포 안에서 전자전달계 교란과 인산합성(phosphorylation) 과정을 억제하여 미토콘드리아 내에서 ATP 생성 저해와 산소 소비량을 감소시킨다(Bueno et al., 2013). 이는 궁극적으로 대상해충을 서서히 치사에 이르게 한다(Lovell, 1979).

식물검역은 생물안보 차원에서 국내 자연생태계와 농업환경을 보호하는 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 소규모로 건축된 검역해충실험동은 이러한 식물검역의 기능 강화 측면에서 해외해충의 생리·생태 및 방제 연구를 선제적으로 수행할 수 있으며, 궁극적으로 이들 해충의 국내 침입 시 신속하고 효과적인 박멸(또는 방제) 전략 수립에 기여할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 국내 처음으로 해외해충 연구를 목적으로 건립된 검역해충실험동의 운영을 위한 기초자료 확보를 목적으로 파밤나방의 생활사와 약제방제 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

검역해충실험동

해외해충을 연구하기 위한 소규모의 밀폐형 연구시설인 검역해충실험동은 149.85 m² 크기로 2018년 농림축산검역본부에 건립되었다. 실험동 내부는 3개의 실험실과 1개의 버퍼존(완충구역)으로 구성되었다. 실험실 내부해충의 외부유출을 방지하기 위해 실험동에는 현관과 전실을 두어 일반공간과 실험공간을 물리적으로 분리하였으며, 실험실과 실험실 사이에 버퍼존을 마련하였다. 공조기와 연결된 내외부의 배기구에는 0.25 mm의 두께의 US standard 80 mesh (0.18 mm)의 철망을 설치하였다.

시험곤충의 사육 및 생활사 조사

시험곤충인 파밤나방은 경북 안동시 풍천면 파밭에서 채집하여 농림축산검역본부의 검역해충실험동(온도 25 ± 1°C, 상대습도 60 ± 10%)에서 인공사료(Gho et al., 1991)를 이용하여 유충을 사육하였다. 성충은 유충과 동일한 사육조건에서 20%의 설량물을 제공하였으며, 교미 후 산란한 알을 수거하여 계대 사육을 진행하였다. 검역해충실험동 내부에서 해충의 사육환경을 조사하기 위해 인큐베이터(LI-IL450, LK Lab Korea, Namyangju, Korea)를 이용하여 검역해충실험동과 동일한 상대습도(60 ± 10%)로 설정한 후 16L:8D의 광조건에서 다양한 온도별(10, 20, 25, 및 30°C)로 파밤나방의 발육기간을 조사하였다. 성충에서 갓 산란한 알을 성충 케이지에서 분리하여, 해

부현미경(S8 APO, Leica Microsystems, Wetzlar, Germany)하에서 알 수를 조사하였다. 알 부화부터 용화 전까지 인공사료를 동일한 시간에 제공하였으며 성충이 될 때까지 24시간 간격으로 발육태별 발육기간 및 생존율을 조사하였다. 유충은 직경 10 cm의 유충사육용기(SPL Life Sciences, Pocheon, Korea)를 사용하여 2령부터 개체로 사육하였다.

2종의 살충제에 대한 파밤나방 유충의 약제 감수성 조사

신규 살충제인 플룩사메타마이드(Fluxametamide, Nisan Chemical Industry, Tokyo, Japan)와 2%의 히드라메칠론(Hydramethylnon) 성분이 함유된 개미용 독먹이제(Cleanbate powder, Kukbo Science, Cheongju, Korea)을 이용하였다. 약제 처리방법은 침지법과 살포법으로 파밤나방 유충 1령, 3령, 5령을 대상으로 감수성을 조사하였다. 이들 약제는 dimethyl sulfoxide (DMSO, Sigma-Aldrich Inc., MD, USA)에 ppm 단위로 균질화하였다. 침지법과 살포법에 이용된 플룩사메타마이드의 농도는 0, 0.01, 0.1, 0.5, 1, 및 2 ppm이며, 히드라메칠론은 0, 0.1, 1, 10, 100, 및 200 ppm이었다. 섭식에 의한 살충효과를 확인하기 위해 침지법을 이용하였으며, 일정한 크기로 절단된 인공사료(가로 1 cm, 세로 1 cm, 높이 0.5 cm)를 각 농도별로 준비된 10 ml의 약제에 30분간 침지한 후 10분간 크린벤치에서 건조시킨 후 유충에게 제공하였다. 접촉에 의한 살충효과를 확인하기 위해 살포법을 이용하였으며, 40 ml 미스트 스프레이(Beautiqlo, Seoul, Korea)를 이용하여 2 ml씩 살포하였다. 각 처리별로 직경 10 cm의 페트리디쉬를 사용하였으며, 그 안에는 90 mm 여과지(Advantec MFS, Inc., Tokyo, Japan)를 깔고 그 위에 유충 3마리를 놓아두었다. 약제농도 및 처리방법별 생물검정에는 처리별 30마리의 유충이 사용되었으며 각 3반복으로 구성되었다. 처리방법별 무처리구는 침지법에서 DMSO에 침지된 인공사료를 이용하였으며, 살포법에서는 2 ml의 DMSO를 살포하였다. 약제처리 24시간 후 유충에 대한 살충효과를 조사하였으며, 유충에 대한 사충판정은 핀셋으로 건드렸을 때 자의적인 움직임이 없는 것으로 하였다. 살충효과에 대한 생물검정의 살충율은 Abbott의 공식을 이용해 보정하였다(Abbott, 1925).

유출여부 확인을 위한 겨울기간 야외 성충 채집 조사

검역해충실험동 주변 30 m의 4방향에 파밤나방 수컷을 유인할 수 있는 델타트랩(Greenagrotech, Gyeongsan, Korea)에 성페로몬 루어를 부착한 후 지상 1 m 높이에 설치하였다. 검역

해충실험동 실험실 내부에서 인위적으로 파밤나방 수컷 120마리를 유출하였으며, 트랩 포획유무를 모니터링하였다. 모니터링 기간은 2018년 11월 30일부터 2019년 2월 28일까지 진행하였으며, 성페로몬 루어는 2주 간격으로 교체해 주었다.

통계분석

백분율 자료결과는 arcsine 변환 후 SAS의 PROC GLM (SAS Institute Inc., 1989)을 이용하여 ANOVA 분석 후 평균간 비교를 실시하였다. 살충제의 반수치사농도(LD₅₀)은 EPA Probit 분석 프로그램 Ver 1.5 (U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH)를 이용하여 실시하였다.

결과 및 고찰

검역해충실험동 전경 및 내부

검역해충실험동은 연중 일정한 환경조건(25 ± 1°C, 상대습도 60 ± 10%)의 유지가 가능하여 해충사육에 적합한 구조로 건축되었다(Fig. 1A). 실험동 내부에 있는 3개의 실험실을 통해 독립적인 공간에서 해충사육과 생리·생태 연구가 가능하다(Fig. 1B). 실험실 출입문 안쪽에는 에어커튼(Fig. 1C) 및 노란색 끈끈이 트랩(Fig. 1D)을 설치하여 성충과 유충의 실험실 외부유출을 차단할 수 있도록 하였다. 또한 각 실험실 내부에는 자외선 유인등(Fig. 1E)을 설치하여 내부에서 유출된 성충이 유인되도록 하였다. 특히, 연구자가 실험실 내부로 접근하기 위해서는 인터락 기능이 있는 에어샤워시설(Fig. 1F)과 버퍼존(Fig. 1B)을 두어 물리적으로 해충의 유출이 쉽지 않도록 설계하였다. 전 세계적으로 밀폐연구시설은 미생물체의 위해성 수준에 따른 생물안전등급(Biosafety Level, BSL) 기준에 의해 BSL I, II, III, IV의 위험군으로 구분된다(World Health Organization, 2014). 현재 국내에서는 BSL 기준을 적용한 검역해충 연구를 위한 밀폐형 연구시설이 없으며(Jung, 2013), 미생물 위험도에 따른 기준으로 해충 유출 위험도에 적용하기에는 다소 무리가 있는 것으로 판단된다. 따라서 검역본부에 건립된 검역해충실험동은 국내 발생이 보고되지 않은 검역해충에 대한 연구 및 국내 여건에 맞는 밀폐형 연구시설의 기준을 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

파밤나방의 온도별 발육기간 조사

사육온도가 높아질수록 파밤나방의 발육기간이 짧아지는

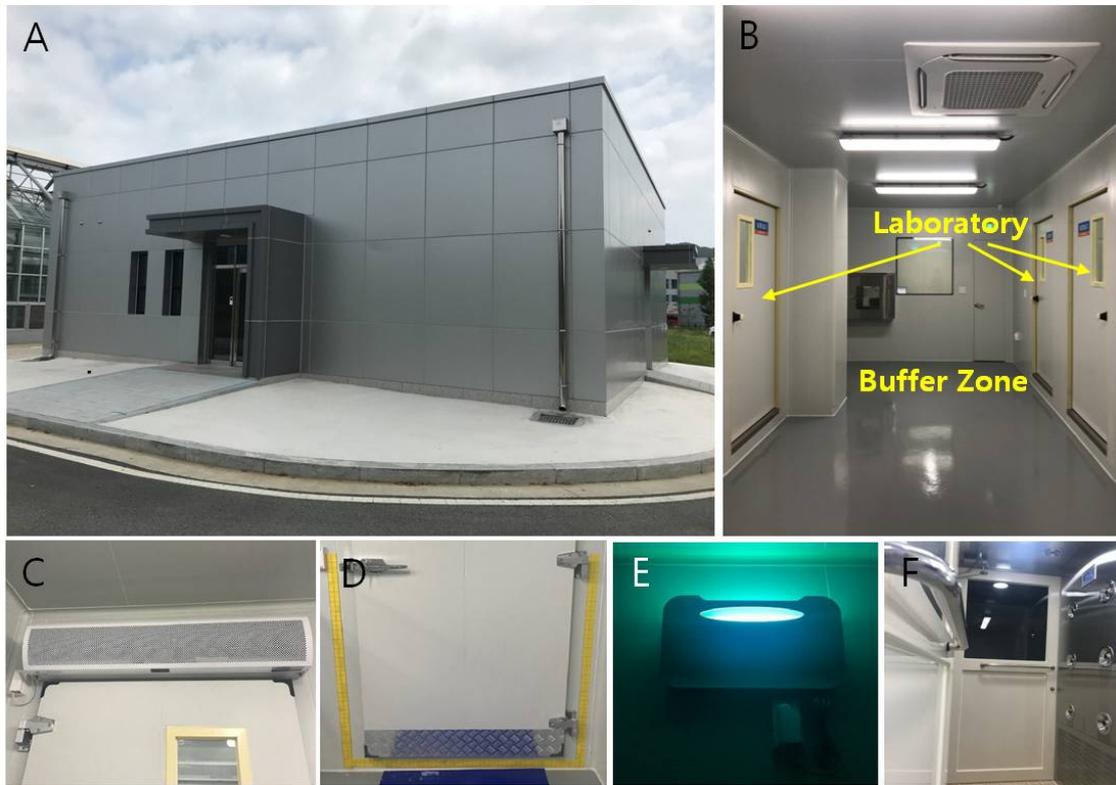


Fig 1. Quarantine Pest Research Facility (QPRF) in Animal and Plant Quarantine Agency, Republic of Korea. The front view of QPRF (A). The inner view of QPRF (B). Air curtain on top of inside door (C). Sticky mat on nearby inside door (D). UV light on laboratory (E). Air shower with interlock door (F).

Table 1. Developmental period of *Spodoptera exigua* at different temperatures in Quarantine Pest Research Facility

Temperature (°C)	Developmental period ¹ (Days)				
	Egg	Larva	Pupa	Adult	Σ
20	5.26 ± 0.08a	36.30 ± 0.28a	15.90 ± 0.20a	9.20 ± 0.15a	66.66 ± 0.62a
25	3.16 ± 0.08b	16.80 ± 0.17b	6.10 ± 0.20b	5.76 ± 0.17b	32.16 ± 0.51b
30	2.10 ± 0.05c	14.83 ± 0.08c	5.30 ± 0.05c	4.80 ± 0.05c	27.03 ± 0.08c

¹Different letters after mean values indicate significant difference among means in each temperature at Type I error = 0.05 (LSD test).

Table 2. Egg hatching, pupation, and adult eclosion rates of *Spodoptera exigua* at different temperatures in Quarantine Pest Research Facility

Temperature (°C)	Rate ¹ (%)		
	Egg hatching	Pupation	Adult eclosion
20	66.66 ± 3.33b	53.33 ± 6.66b	76.66 ± 3.33b
25	80.00 ± 5.77a	86.66 ± 3.33a	90.00 ± 5.77a
30	83.33 ± 3.33a	90.00 ± 5.77a	93.33 ± 6.66a

¹Different letters after mean values indicate significant difference among means in each temperature at Type I error = 0.05 (LSD test).

것을 확인하였다(Tables 1 and 2). 온도별 한 세대의 생활사를 완성하는데 20°C에서는 66.7일, 25°C에서는 32.2일, 30°C에

서는 27일이 소요되었다. 특히, 유충기간은 20°C에서 36.3일이 소요되어 가장 길었으며, 30°C에서 14.8일이 소요되어 온도가

높아질수록 유충기간이 짧아지는 것을 확인하였다(Table 1). 25°C 이상의 온도조건에서 80% 이상의 알 부화율, 86% 이상의 용화율 및 90% 이상의 성충 우화율을 확인하였으며, 20°C에서는 66.7%의 알 부화율, 53.3%의 용화율 및 76.7%의 성충 우화율이 관찰되어 25°C 보다 낮은 온도가 파밤나방의 발육에 통계적으로 유의미하게 영향을 미치는 것을 확인하였다(Table 2). 이러한 결과는 Choi and Park (2000)의 연구결과와 동일하게 확인되어 검역해충실험동의 사육환경이 안정적인 것을 확인할 수 있었다. 또한 저온에서는 파밤나방의 발육이 저해되고 온도가 높아짐에 따라 알 부화율의 증가와 각 발육태별 생존율

이 높아지는 것은 Lee et al. (1991)의 연구와 유사하여, 파밤나방의 사육조건은 25°C 이상에서 적합한 것으로 조사되었다.

파밤나방의 살충제 감수성

신규 살충제로 개발된 풀록사메타마이드에 대한 파밤나방 1령, 3령, 및 5령 유충에 대한 살충제 감수성을 살포법 및 침지법으로 조사하였다. 그 결과, 살포법에서 유충영기별 반수치사농도는 1령 0.12 ppm, 3령 0.32 ppm, 및 5령 0.72 ppm으로 조사되었다(Table 3). 침지법에서는 1령 0.12 ppm, 3령 0.56 ppm, 및 5

Table 3. Insecticidal effect of Fluxametamide against different larval stages of *Spodoptera exigua* by spraying method

Larval instar	No. of larvae ¹	LC ₅₀ (95% CL) ²	Slope ± SE	χ ²
1 st	450	0.12 (0.09-0.14)	2.41 ± 0.25	1.2294
3 rd	450	0.32 (0.19-0.45)	2.52 ± 0.23	3.7338
5 th	450	0.72 (0.47-1.26)	1.70 ± 0.14	4.5009

¹Mortality values were monitored at 24h after treatment.

²Results on LC₅₀ with 95% confidence limit (CL) of Fluxametamide to *S. exigua* larvae are expressed as gram.

Table 4. Insecticidal effect of Fluxametamide against different larval stages of *Spodoptera exigua* by dipping method

Larval instar	No. of larvae ¹	LC ₅₀ (95% CL) ²	Slope ± SE	χ ²
1 st	450	0.12 (0.11-0.21)	2.03 ± 0.18	2.3136
3 rd	450	0.56 (0.41-0.74)	2.35 ± 0.20	2.6944
5 th	450	0.79 (0.53-1.05)	4.04 ± 0.50	4.1900

¹Mortality values were monitored at 24h after treatment.

²Results on LC₅₀ with 95% confidence limit (CL) of Fluxametamide to *S. exigua* larvae are expressed as ppm.

Table 5. Insecticidal effect of Hydramethylnon against different larval stages of *Spodoptera exigua* by spraying method

Larval instar	No. of larvae ¹	LC ₅₀ (95% CL) ²	Slope ± SE	χ ²
1 st	450	1.264 (0.89-1.77)	1.22 ± 0.11	0.7590
3 rd	450	6.589 (2.87-14.07)	0.84 ± 0.07	2.9774
5 th	450	23.826 (11.93-49.16)	0.87 ± 0.08	2.5764

¹Mortality values were monitored at 24h after treatment.

²Results on LC₅₀ with 95% confidence limit (CL) of Hydramethylnon to *S. exigua* larvae are expressed as ppm.

Table 6. Insecticidal effect of Hydramethylnon against different larval stages of *Spodoptera exigua* by dipping method

Larval instar	No. of larvae ¹	LC ₅₀ (95% CL) ²	Slope ± SE	χ ²
1 st	450	1.811 (1.14-2.76)	1.03 ± 0.08	1.1458
3 rd	450	10.949 (4.87-23.63)	0.85 ± 0.07	3.0165
5 th	450	43.828 (25.99-76.74)	0.99 ± 0.09	1.7699

¹Mortality values were monitored at 24h after treatment.

²Results on LC₅₀ with 95% confidence limit (CL) of Hydramethylnon to *S. exigua* larvae are expressed as ppm.

0.79 ppm으로 조사되었다(Table 4). 본 연구를 통해서 폴룩사메타마이드의 처리 방법에 따른 약제 감수성의 통계적인 유의미한 차이는 없었다(Tables 3 and 4). 또한 개미 방제용 독먹이제로 이용되는 히드라메칠론의 유충영기별 반수치사농도는 살포법에서 1령 1.26 ppm, 3령 6.59 ppm, 및 5령 23.83 ppm으로 조사되었다(Table 5). 침지법에서는 1령 1.81 ppm, 3령 10.95 ppm, 및 5령 43.83 ppm으로 조사되었다(Table 6). 폴룩사메타마이드는 5령 유충까지 낮은 약량으로 높은 살충효과를 보여준 것과 달리 히드라메칠론은 약제처리방법에 따라 반수치사약량의 농도가 5령에서 크게 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 히드라메칠론을 이용해서 파밤나방을 방제할 때 초기의 어린 유충을 대상으로 방제하는 것이 보다 효과적일 것으로 판단된다. 이러한 연구결과를 바탕으로 폴룩사메타마이드는 파밤나방과 같은 나비목의 밤나방과에 속하며 검역해충(관리해충)으로 지정된 열대거세미나방(*S. frugiperda*)을 방제하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

유출여부 확인을 위한 동계기간 야외 성충 포획 조사

검역해충실험실 실험실에서 인위적으로 수컷 성충 120마리를 방사하였다. 동계 모니터링 기간(2018년 11월 30일 ~ 2019년 2월 28일) 동안 야외에 설치된 성페로몬 트랩에서 파밤나방 수컷의 포획유무를 조사하였으나, 트랩에서는 성충이 포획되지 않았다. 대부분의 성충은 실험실 내부에서 93마리, 버퍼존에서 27마리가 죽은 채로 발견되었다. 따라서 파밤나방 성충의 외부유출은 일어나지 않은 것으로 확인되었다. 본 연구시설은 다양한 검역해충을 연구하기 위해 구축된 시설로서 파밤나방 성충의 유출유무 조사결과 만으로 밀폐성능을 일반화하는 것은 무리가 있지만, 밀폐기능이 강화된 연구시설로서 다양한 검역해충에 대한 연구가 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서 검증된 시설의 신뢰성은 향후 외래해충에 대한 효과적인 검역 및 방역체계를 지원할 수 있는 연구시설로 효과적인 검역 및 방제체계를 지원할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 농림축산검역본부의 농림축산검역검사기술개발사업 “외래 식물해충 안전 연구시스템 개발을 위한 유출 위험도 평가 및 검증(F-1543086-2017-18-01)”에 의해 수행되었다. 또한 본 연구의 기초실험에 도움을 준 성세하 연구원에게 감사드립니다.

저자 직책 & 역할

이지은: 농림축산검역본부, 전문연구원; 실험수행 및 논문 작성

박영진: 농림축산검역본부, 농업연구사; 실험설계 및 논문 작성

모든 저자는 원고를 읽고 투고에 동의하였음.

Literature Cited

- Abbott, W.S., 1925. A method of computing the effectiveness of an insecticide. *J. Econ. Entomol.* 18, 265-267.
- Ahn, S.B., Lee, S.B., Cho, W.S., 1991. Leaf feeding insect pests and their damages on welsh onion and shallot fields in Chonrabukdo and Chonranamdo districts. *RDA J. Agri. Sci. Crop Prot.* 33, 66-73.
- Asahi, M., Kobayashi, M., Kagami, T., Nakahira, K., Furukawa, Y., Ozoe, Y., 2018. Fluxametamide: a novel isoxazoline insecticide that acts via distinctive antagonism of insect ligand-gated chloride channels. *Pestic. Biochem. Phys.* 151, 67-72.
- Bueno, F.C., Forti, L.C., Bueno, O.C., 2013. Toxicity of hydramethylnon to the leaf-cutting ant *Atta sexdens rubropilosa* Forel (Hymenoptera: Formicidae). *Sociobiol.* 60, 150-153.
- Chen, S., Slesicher, S.J., Tobin, P.C., Saunders, M.C., 2011. Projecting insect voltinism under high and low greenhouse gas emission conditions. *Environ. Entomol.* 40, 505-515.
- Choi, J.S., Park, Y.D., 2000. Effects of some temperatures on larval development, adult longevity and oviposition of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* Hübner. *Kor. J. Life Sci.* 10, 1-6.
- Gho, H.G., Lee, S.G., Lee, B.P., Choi, K.M., Kim, J.W., 1991. Simple mass-rearing of beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Hübner)(Lepidoptera: Noctuidae), on an artificial diet. *Kor. J. Appl. Entomol.* 29, 180-183.
- Han, J.H., Kim, H., Leam, H.T., Kim, J.J., Lee, S., 2013. Characteristics and virulence assay of entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* for the microbial control of *Spodoptera exigua*. *Kor. J. Pestic. Sci.* 17, 454-459.
- Hollingshaus, J.G., 1987. Inhibition of mitochondrial electron transport by hydramethylnon: a new amidinohydrazone insecticide. *Pest. Biochem. Physiol.* 27, 61-70.
- Jung, C., 2013. Standard laboratory design for plant quarantine. *Animal and Plant Quarantine Agency. Gimcheon.* p. 92.
- Kim, Y., Kim, N., 1997. Cold hardiness in *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae). *Environ. Entomol.* 26, 1117-1123.
- Kim, Y., Song, W., 2000. Indirect chilling injury of *Spodoptera exigua* in response to long-term exposure to sublethal low temperature. *J.*

-
- Asia Pac. Entomol. 3, 49-53.
- Lee, J., Lee, H., Kim, D.S., Kim, S., Park, J.S., Oh, J., Yu, Y., Lee, S., Lee, J., Jung, C., Cho, G., Hong, K.J., Lee, W., 2019. Monitoring reports about nine high risk insect pests in 2018. J. Asia Pac. Entomol. 58, 183-187.
- Lee, J.B., Park, Y., 2015. Insecticidal effect of an entomopathogenic fungus, *Beauveria bassiana* ANU1 to *Spodoptera exigua* and *Plutella xylostella* by different temperature and humidity conditions. Kor. J. Pestic. Sci. 19, 125-133.
- Lee, S.D., Ahn, S.B., Cho, W.S., Choi, K.M., 1991. Effect of temperature on the development of beet armyworm, *Spodoptera exigua* Hübner (Lepidoptera: Noctuidae). RDA J. Agri. Sci. Crop Prot. 33, 58-62.
- Lee, W., Lee, Y., Kim, S., Lee, J.H., Lee, H., Lee, S., Hong, K.J., 2016. Current status of exotic insect pests in Korea: comparing border interception and incursion during 1996-2014. J. Asia Pac. Entomol. 19, 1095-1101.
- Lovell, J.B., 1979. Amidinohydrazones - A new class of insecticides. Proc. Brit. Crop. Prot. Conf. Pests Dis. 2, 575.
- Lyu, D.P., Lee, H.S., 2017. The red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae: Myrmicinae) discovered in Busan sea port, Korea. Korean J. Appl. Entomol. 56, 437-438.
- SAS Institute Inc., 1989. SAS/STAT User's Guide, Release 6.03, Ed. Cary, NC, USA.
- Song, W., Kim, Y., Cho, J., Kim, H., Lee, J., 1997. Physiological factors affecting rapid cold hardening of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Hübner). Kor. J. Appl. Entomol. 36, 249-255.
- World Health Organization, 2014. Laboratory biosafety manual, Third edition. Korea Biotechnology Industry Organization. Seoul. p. 177.
- Zheng, X., Cheng, W., Zhang, F., Tang, B., Wang, S., 2011. Three heat shock proteins from *Spodoptera exigua*: gene cloning, characterization and comparative stress response during heat and cold shocks. Comp. Biochem. Physiol. 159B, 92-102.