



5종의 네오니코티노이드계 약제에 대한 솔수염하늘소의 살충활성과 꿀벌독성

조우성 · 정대훈 · 이재선 · 김현경 · 서상태¹ · 김길하*
 충북대학교 농업생명환경대학 식물외과학과, ¹국립산림과학원

Insecticidal Activity of Japanese Pine Sawyer (*Monochamus alternatus*) and Toxicity Test of Honeybee (*Apis mellifera*) using 5 Kinds of Neonicotinoids

Woo Seong Cho, Dae-Hoon Jeong, Jae Seon Lee, Hyun Kyung Kim, Sang-Tae Seo¹ and Gil-Hah Kim*

Department of Plant Medicine, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea
¹Korea Forest Research Institute, Seoul 02455, Korea

(Received on February 15, 2017. Revised on March 6, 2017. Accepted on March 13, 2017)

Abstract Susceptibility and persistence of Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* adults, and acute contact toxicity, foliage contact toxicity, and residual toxicity to honeybee, *Apis mellifera* were evaluated by using 5 kinds of neonicotinoid pesticides. All neonicotinoids pesticides showed over 80% mortality 48 hour after body spray treatment. However, only 2 kinds of acetamiprid ME and acetamiprid+buprofezin showed over 80% mortality in the twig dipping treatment. All of the five neonicotinoid pesticides used in *M. alternatus* adults showed residual effect of 60-80% mortality, but the efficacy decreased rapidly after 1 day of treatment. Acetamiprid ME showed the lowest toxicity in the acute and foliage contact toxicity test of *A. mellifera*. The residual toxicity of leaves on *A. mellifera* was very low in acetamiprid ME and acetamiprid+buprofezin. However, the residual toxicity of all pesticides treatments decreased to 10-30% after 1 day of treatment and further decreased with time. These results indicate that acetamiprid ME among five neonicotinoid agents showed a high insecticidal activity in the *M. alternatus* adults, while it exhibited relatively low contact and residual toxicity in the *A. mellifera*. It is thought that acetamiprid ME can be effectively used for the control of the *M. alternatus* adults as vector of pine wilt disease.

Key words *Apis mellifera*, Insecticidal activity, *Monochamus alternatus*, Pesticide, Residual toxicity

<< ORCID
 Gil-Hah Kim
<http://orcid.org/0000-0001-6256-8759>

서론

하늘소류(Cerambycidae)는 딱정벌레목(Coleoptera)에 속하며 전세계적으로 약 35,000여종이 보고되었다(Lawrence, 1982). 일반적으로 하늘소류는 죽어가는 나무를 주로 가해하지만, *Monochamus*속의 하늘소류는 번데기에서 우화한

성충들이 성숙(obligatory maturation)하기 위해서 필수적으로 살아있는 나무를 가해하기도 하여 피해를 주기도 한다(Hiratsuka et al., 1995; Zhang and Linit, 1998; Hanks, 1999). 이들 하늘소류가 매개하는 수목병 중 가장 중요한 질병으로 소나무재선충병(Pine wilt disease)이 있는데 이것은 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)에 의해 발병되는 것으로 이 병원선충은 스스로 이동할 능력이 없어 매개충 즉, 하늘소류가 건전한 나무 수피를 갉아먹을 때와 산란 시

*Corresponding author
 E-mail: khkim@chungbuk.ac.kr

생기는 상처를 통하여 감염 된다(Mamiya and Enda, 1972; Edwards and Linit, 1992; Ostry and Anderson, 1995; Evans et al., 1996). 소나무재선충병은 근래에 극동아시아로 급격히 확산되었는데 일본의 경우 우연히 유입된 솔수염하늘소(*M. alternatus*)를 통하여 퍼져나갔으며 국내에서도 솔수염하늘소가 주요 매개충으로 보고되었다(Evans et al., 1996; Chung, 2002). 솔수염하늘소(*M. alternatus*)는 국내 남부지방의 소나무와 잣나무림에 널리 분포하고 있으며 이들은 북방수염하늘소(*M. saltuarius*)와 함께 소나무재선충을 매개하여 소나무재선충병을 발생시키는 것으로 알려져 있다(Sato et al., 1987; Kobayashi et al., 2003). *Monochamus*속의 종들은 한국뿐 만 아니라 일본, 대만, 중국, 북미, 서유럽 등의 지역에서 소나무재선충병을 유발하여 매우 심각한 피해를 주고 있으며 국내에서는 1988년 부산에서 소나무재선충병이 최초로 발생이 확인되어 보고 되었다(Linit, 1988; Makihara, 1988; Yi et al., 1989; Chung et al., 2002; Makihara, 2004).

일반적인 방제법으로는 소나무재선충병이 발생하면 발생 지역의 나무를 벌채 후 훈증처리 또는 소각을 통한 물리적 방제와 항공살포, 나무주사를 이용한 화학적 방제방법들이 시행되고 있으나 효과적인 방제효과를 나타내지 못하는 실정이다(KFRI, 2007). 단기간에 넓은 면적을 방제하기 위해서 항공방제방법이 이용되는데 최근 들어 장기간 사용되어온 항공 살포 방제법에 대한 방제 효과와 환경에 미치는 영향에 대한 검증이 꾸준히 요구되고 있는 실정이다(KFRI, 2007).

본 연구에서는 솔수염하늘소에 대한 네오니코티노이드계 살충제 5종을 이용하여 분무와 침지를 이용한 살충효과와 잔효성을 확인하였으며 환경에 미치는 영향을 평가하기 위해 꿀벌에 대한 급성 및 엽상접촉독성과 잔류독성을 평가하였다.

재료 및 방법

실험곤충

솔수염하늘소(*M. alternatus*)는 (주)오상킨섹트(예산, 한국)에서 번데기를 구입하여 실험하였다. 우화한 성충은 소나무 신초를 먹이로 공급하면서 페트리디쉬($\varnothing 10 \times 4$ cm)에 한 개체씩 사육하였다. 실내사육조건은 온도 $25 \pm 2^\circ\text{C}$, 광주기 16L:8D, 상대습도 45~75%로 하였다.

꿀벌은 서양종(*A. mellifera*)으로 충북대학교 야외사육장에서 건강한 일벌을 채집하여 사용하였다.

실험약제

본 실험에 사용된 약제는 네오니코티노이드계 5종의 약제(thiacloprid SE, acetamiprid SL, acetamiprid ME, acetamiprid+buprofezin EC, thiacloprid+buprofezin SC)를 사용하였다. 실험약제들의 일반명, 제형, 유효성분함량 및 추천 농도는 Table 1과 같다(KCPA, 2016).

Table 1. List of 5 insecticides tested

Insecticides	AI ^{a)} (%) and Formulation ^{b)}	Recommended concentration (X)
Neonicotinoids		
Acetamiprid	5 SL	1,000
Acetamiprid	10 ME	2,000
Thiacloprid	10 SC	1,000
Mixtures		
Acetamiprid+Buprofezin	4+15 EC	1,000
Thiacloprid+Buprofezin	20+5 SC	2,000

^{a)}Active ingredient.

^{b)}SL=soluble concentrate, ME=microemulsion, SC=suspension concentrate, WG=water dispersible granule, EC=emulsifiable concentrate.

솔수염하늘소 살충제 감수성 평가실험

충체분무법(body spray method)

5종의 약제에 대한 급성접촉독성을 알아보기 위하여 충체분무법을 사용하였다. 충체분무법은 솔수염하늘소를 1마리씩 개체 사육한 페트리디쉬($\varnothing 10 \times 4$ cm)에 소형분무기(1회 토출량: 0.12 cc)로 표준살포량의 배량, 기준량, 1/2배량, 1/4배량, 1/8배량의 5가지 농도로 희석된 약액을 5회 분무 살포하고 성충을 꺼내어 새로운 페트리디쉬에 넣고 소나무 신초 부근 가지를 5~6 cm로 잘라 먹이로 공급하였다. $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 조건에서 처리 후 24시간, 48시간, 72시간 후의 사충수를 조사하였다. 음성대조구는 동일한 방법으로 증류수를 처리하였다. 모든 실험은 5마리를 한 반복으로 3반복 수행하였다.

가지침지법(twig dipping method)

가지침지법은 소나무(*Pinus densiflora*) 신초 부근 가지 5~6 cm를 잘라 약액에 30초간 침지처리 한 후 음지에서 30분 건조시킨 후 페트리디쉬에 1마리씩 공시충과 함께 넣어 주었다. 표준살포량의 배량, 기준량, 1/2배량, 1/4배량, 1/8배량의 5가지 농도로 희석된 약액을 처리하였고 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 조건에서 처리 후 24시간, 48시간, 72시간 후의 사충수를 조사하였다. 음성대조구는 동일한 방법으로 증류수를 처리하였다. 모든 실험은 5마리를 한 반복으로 3반복 수행하였다.

잔효성시험(residual test)

5종 약제를 야외환경에서 소나무 가지에 소형분무기(1회 토출량: 0.12 cc)를 이용하여 약제 처리한 후 약제처리 0일, 1일, 3일, 5일 후에 가지를 잘라 페트리디쉬에 공시충 1마리와 함께 넣고, $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 조건에서 24시간, 48시간 후의 사충수를 조사하였다. 약제 처리농도는 각 농약별 표준살포량의 기준량과 배량, 2가지 농도로 하였다. 음성대조구는 동일한 방법으로 증류수를 처리하였다. 모든 실험은 5마리를 한 반복으로 3반복 수행하였다.

꿀벌의 약제 독성 평가실험

급성접촉독성시험(acute contact toxicity test)

꿀벌에 대한 급성접촉독성시험 방법은 농촌진흥청 고시 ‘농약 및 원제의 등록기준’ 별표 13, 환경생물 독성 시험기준과 방법에서 ‘꿀벌 급성독성시험’에 따라 수행하였다. 실험에 사용된 약제는 솔수염하늘소 성충에 대하여 사용한 5종 약제에 대하여 실험을 진행하였다. 활동성이 좋은 일벌(어린개체 제외)을 채집하여 CO₂로 벌들을 마취시킨 후 꺼내어 소형분무기(1회 토출량: 0.12 cc)로 5회 분무 살포하여 약액이 벌의 체체에 충분히 묻도록 하였다. 원통형 케이지(Ø 15 × 5 cm)에 꿀벌을 10마리씩 넣어 25 ± 2°C, 암조건에서 4시간, 24시간, 48시간 후의 사충수를 조사하였다. 실험기간 중 급식은 50% 자당용액을 충분히 섭취하도록 하였고, 약제 처리농도는 각 농약별 표준살포량의 배량, 기준량, 1/2

배량의 3가지 농도로 희석하여 사용하였다. 음성대조구는 동일한 방법으로 증류수를 처리하였다. 모든 실험은 10마리를 한 반복으로 3반복 실시하였다.

엽상접촉독성시험(leaflet contact toxicity test)

솔수염하늘소 성충에 대하여 사용한 5종의 약제에 대해 실험을 진행하였다. 충북대학교 인근의 아까시나무(*Robinia pseudoacacia*) 잎에 소형분무기(1회 토출량: 0.12 cc)로 약액이 흐를 정도로 약제를 골고루 살포한 후 음지에서 30분 건조시킨 후 원통형 케이지(Ø 15 × 5 cm)에 넣었다. 급성접촉독성시험과 동일한 방법으로 진행하였고, 채집한 꿀벌은 암조건에 노출시킨 후 4시간, 24시간, 48시간 후에 사충수를 조사하였다. 약제 처리농도는 각 농약별 표준살포량의 배량, 기준량, 1/2배량의 3가지 농도로 희

Table 2. Comparative toxicity of 5 insecticides against *M. alternatus* adults by body spray treatment

Insecticide	Dilution (X)	Mortality (% , mean ± SD)		
		24 h	48 h	72 h
Neonicotinoids				
Acetamiprid SL	500	100 ± 0.0 a ⁹⁾	100 ± 0.0 a	100 ± 0.0 a
	1000	100 ± 0.0 a	100 ± 0.0 a	100 ± 0.0 a
	2000	73.3 ± 6.7 abcde	86.7 ± 6.7 ab	100 ± 0.0 a
	4000	66.7 ± 6.7 abcde	86.7 ± 6.7 ab	100 ± 0.0 a
	8000	13.3 ± 6.7 ghi	13.3 ± 6.7 d	20.0 ± 11.5 de
Acetamiprid ME	1000	93.3 ± 6.7 ab	100 ± 0.0 a	100 ± 0.0 a
	2000	80.0 ± 11.5 abcd	80.0 ± 11.5 ab	100 ± 0.0 a
	4000	66.7 ± 6.7 abcde	80.0 ± 0.0 ab	100 ± 0.0 a
	8000	53.3 ± 6.7 cdef	66.7 ± 6.7 abc	100 ± 0.0 a
	16000	13.3 ± 13.3 ghi	33.3 ± 13.3 cd	33.3 ± 13.3 cd
Thiacloprid	500	86.7 ± 6.7 abc	100 ± 0.0 a	100 ± 0.0 a
	1000	73.3 ± 6.7 abcde	80.0 ± 11.5 ab	100 ± 0.0 a
	2000	60.0 ± 0.0 bcdef	66.7 ± 6.7 abc	100 ± 0.0 a
	4000	40.0 ± 0.0 efgh	53.3 ± 6.7 bc	93.3 ± 6.7 a
	8000	26.7 ± 6.7 fghi	33.3 ± 6.7 cd	60.0 ± 0.0 bc
Mixtures				
Acetamiprid+Buprofezin	500	73.3 ± 6.7 abcde	86.7 ± 6.7 ab	93.3 ± 6.7 a
	1000	66.7 ± 6.7 abcde	80.0 ± 11.5 ab	86.7 ± 6.7 ab
	2000	46.7 ± 6.7 defg	66.7 ± 6.7 abc	80.0 ± 0.0 ab
	4000	46.7 ± 6.7 defg	60.0 ± 0.0 bc	60.0 ± 0.0 bc
	8000	0.0 ± 0.0 i	0.0 ± 0.0 d	0 ± 0.0 e
Thiacloprid+Buprofezin	1000	66.7 ± 6.7 abcde	86.7 ± 6.7 ab	100 ± 0.0 a
	2000	60.0 ± 0.0 bcdef	86.7 ± 6.7 ab	100 ± 0.0 a
	4000	53.3 ± 6.7 cdef	86.7 ± 6.7 ab	86.7 ± 6.7 ab
	8000	26.7 ± 6.7 fghi	53.3 ± 6.7 bc	73.3 ± 6.7 ab
	16000	6.7 ± 6.7 hi	6.7 ± 6.7 d	20.0 ± 20.0 de
Control	-	0.0 ± 0.0 i	0.0 ± 0.0 d	0.0 ± 0.0 e

⁹⁾ Means followed by the same letter within a column are not significantly different at p=0.05 by Tukey's Studentized Range Test (SAS Institute, 2004).

석하여 사용하였다. 음성대조구는 동일한 방법으로 증류수를 처리하였다. 모든 실험은 10마리를 한 반복으로 3반복 실시하였다.

엽상잔류독성시험(foilage residual toxicity test)

5종의 약제를 야외의 아까시나무 잎에 소형분무기(1회 토출량: 0.12 cc)를 이용하여 각 농약별 표준살포량의 기준량, 배량의 2가지 농도를 약액이 흐를 정도로 살포한 후 약제처리 0일, 1일, 3일, 5일 후에 각각 원통형 케이지($\varnothing 15 \times 5$ cm)에 넣고, 급성접촉독성시험과 동일한 방법으로 채집한 꿀벌을 CO₂로 마취시킨 후 각 케이지에 10마리씩 접종하였다. 시험기간 중 급식은 50% 자당용액을 충분히 섭취하도록 하고, 암조건에 노출시켰으며 24시간, 48시간 후에 사충수를 조사하였다. 음성대조구는 동일한 방법으로 증류수를 처리

하였다. 모든 실험은 10마리를 한 반복으로 3반복 실시하였다.

데이터 분석

솔수염하늘소와 꿀벌에 대한 살충률 분석과 잔류에 대한 날짜별 차이에 관한 실험결과 분석은 Tukey's studentized range test로 비교하였다. 솔수염하늘소와 꿀벌에 대한 조사 시간별 잔류독성에 관한 살충률의 비교는 t-test를 통하여 수행하였다(SAS Institute, 2009).

결과 및 고찰

솔수염하늘소 살충제 감수성

5종의 살충제를 5가지 농도로 솔수염하늘소 성충에 대한 총체분무법을 이용하여 검정하였다(Table 2). 총체 분무법의

Table 3. Comparative toxicity of 5 insecticides against *M. alternatus* adults by twig dipping treatment

Insecticide	Dilution (X)	Mortality (% , mean \pm SD)		
		24 h	48 h	72 h
Neonicotinoids				
Acetamiprid SL	500	66.7 \pm 6.7 abc ^{a)}	73.3 \pm 6.7 abc	80.0 \pm 11.5 ab
	1000	40.0 \pm 11.5 abcd	60.0 \pm 11.5 abc	66.7 \pm 13.3 abcd
	2000	33.3 \pm 6.7 abcd	53.3 \pm 17.6 abc	66.7 \pm 13.3 abcd
	4000	33.3 \pm 6.7 abcd	53.3 \pm 6.7 abc	66.7 \pm 13.3 abcd
	8000	6.7 \pm 6.7 cd	6.7 \pm 6.7 bc	6.7 \pm 6.7 cd
Acetamiprid ME	1000	80.0 \pm 11.5 a	86.7 \pm 6.7 a	86.7 \pm 6.7 a
	2000	73.3 \pm 6.7 ab	80.0 \pm 11.5 ab	86.7 \pm 6.7 a
	4000	53.3 \pm 6.7 abcd	66.7 \pm 13.3 abc	80.0 \pm 11.5 ab
	8000	46.7 \pm 6.7 abcd	66.7 \pm 17.6 abc	66.7 \pm 17.6 abcd
	16000	6.7 \pm 6.7 cd	6.7 \pm 6.7 bc	6.7 \pm 6.7 cd
Thiacloprid	500	73.3 \pm 17.6 ab	73.3 \pm 17.6 abc	80.0 \pm 11.5 ab
	1000	73.3 \pm 13.3 ab	73.3 \pm 13.3 abc	73.3 \pm 13.3 abc
	2000	40.0 \pm 23.1 abcd	40.0 \pm 23.1 abc	66.7 \pm 6.7 abcd
	4000	33.3 \pm 6.7 abcd	33.3 \pm 6.7 abc	53.3 \pm 6.7 abcd
	8000	6.7 \pm 6.7 cd	6.7 \pm 6.7 bc	6.7 \pm 6.7 cd
Mixtures				
Acetamiprid+Buprofezin	250	73.3 \pm 6.7 ab	80.0 \pm 11.5 ab	86.7 \pm 13.3 a
	500	60.0 \pm 11.5 abcd	73.3 \pm 17.6 abc	80.0 \pm 20.0 ab
	1000	60.0 \pm 20.0 abcd	73.3 \pm 13.3 abc	73.3 \pm 17.6 abc
	2000	46.7 \pm 26.7 abcd	46.7 \pm 26.7 abc	53.3 \pm 24.0 abcd
	4000	13.3 \pm 6.7 bcd	33.3 \pm 17.6 abc	53.3 \pm 24.0 abcd
Thiacloprid+Buprofezin	1000	60.0 \pm 0.0 abcd	66.7 \pm 6.7 abc	73.3 \pm 6.7 abc
	2000	53.3 \pm 17.6 abcd	53.3 \pm 17.6 abc	60.0 \pm 20.0 abcd
	4000	40.0 \pm 11.5 abcd	53.3 \pm 6.7 abc	53.3 \pm 17.6 abcd
	8000	20.0 \pm 0.0 abcd	26.7 \pm 6.7 abc	33.3 \pm 6.7 abcd
	16000	6.7 \pm 6.7 cd	6.7 \pm 6.7 bc	13.3 \pm 13.3 bcd
Control		0.0 \pm 0.0 d	0.0 \pm 0.0 c	0.0 \pm 0.0 d

^{a)} Means followed by the same letter within a column are not significantly different at p=0.05 by Tukey's Studentized Range Test (SAS Institute, 2004).

로 처리하여 솔수염하늘소에 대한 급성접촉독성을 확인한 결과 5종의 약제 모두 기준량 처리 48시간 후 80% 이상의 살충효과를 보였다. 그 중 90% 이상의 살충효과를 보인 약제는 thiacloprid와 acetamiprid SL, acetamiprid ME 3종이었다. 이들 약제에 대한 활성은 제품간 제형의 차이가 있었으나 같은 하늘소류인 북방수염하늘소에 대해서도 90% 이상 높은 살충활성을 나타냈다(Han et al., 2008). 1/8배량으로 약제처리 72시간이 지난 후에는 thiacloprid만을 제외하고 모두 낮은 살충률을 보였으나 단제처리에서는 1/4배량 희석한 약제 처리구에서도 90% 이상의 높은 살충률을 보였다.

5종의 살충제에 대한 솔수염하늘소 성충에 대한 가지침지법을 이용한 섭식독성을 검정하였다(Table 3). 가지침지법으로 처리한지 48시간 후 80% 이상의 살충효과를 보인 약제는 acetamiprid ME와 혼합제 acetamiprid+buprofezin 2종이었으며, 90% 이상의 살충효과를 보인 약제는 없었다. 그러나 북방수염하늘소에서는 수화제 형태인 acetamiprid WP가 100%의 살충활성을 나타냈다(Han et al., 2008). 이는 종의 종류에 따른 차이도 있겠으나 약제의 제형에 따라 차이를 나타나는 것으로 보인다.

충체분무법과 가지침지법에서 솔수염하늘소는 약제에 대한 감수성 결과 가지침지법을 이용한 감수성평가에서 약제 활성이 더 낮게 나타났다. 이는 솔수염하늘소 성충이 약제에 대하여 섭식독성보다는 접촉독성을 갖는 것으로 보인다. 그러나 북방수염하늘소에 대한 실험에서 acetamiprid와 thiacloprid는 2가지 실험방법에서 살충활성에 대한 큰 차이

를 보이지 않았으나 카바메이트계(Bensultap)와 피레스로이드계(Etofenprox, fenpropathrin), 혼합제(indoxacard+spinosad)의 경우 충체분무에서는 거의 효과가 없었으나 가지침지법에서는 100%의 살충효과가 나타났다고 하였다(Han et al., 2008). 이는 본 실험과는 반대로 접촉독성보다는 섭식독성이 작용한 것으로 나타났는데 이러한 결과는 약제 특성의 차이로 생각된다. 즉, 살충제 감수성의 차이를 나타내는 것은 살충제의 작용경로와 작용부위에 따라 차이가 있고 처리방법에 따라서도 효과에 차이를 보인다는 것이다(Aida, 1983).

본 실험 결과는 일반적으로 나타나는 약제활성과 같이 직접처리 시 가장 높은 독성을 보이며 그 다음으로 섭식독성 앞에 잔류된 약제에 대한 영향을 평가하는 염상잔류독성 순으로 나타나는 것과 유사한 결과를 보인다(Kim et al., 2008).

잔효성

솔수염하늘소 성충에 대하여 살충활성 검정에 이용한 5종의 살충제에 대하여 잔효성을 검정하였다. (Fig. 1). 실험결과 처리 직후에는 60~80%의 살충효과가 나타났으나 약제 처리 후 시간이 지날수록 살충활성이 감소하여 처리한지 1일 후부터는 20% 이하의 낮은 살충활성이 나타났다. 앞선 실험에서도 섭식독성이 비교적 낮게 나온 것으로 봤을 때 약제를 처리하면 솔수염하늘소의 섭식을 저해하여 살충활성을 감소 시키는 것으로 보이는데 이는 약제처리로 인하여 먹이 기피현상이 나타나는 것으로 보인다(Poland et al., 2006). 또한 약제 처리한 가지를 야외환경에 그대로 노출시

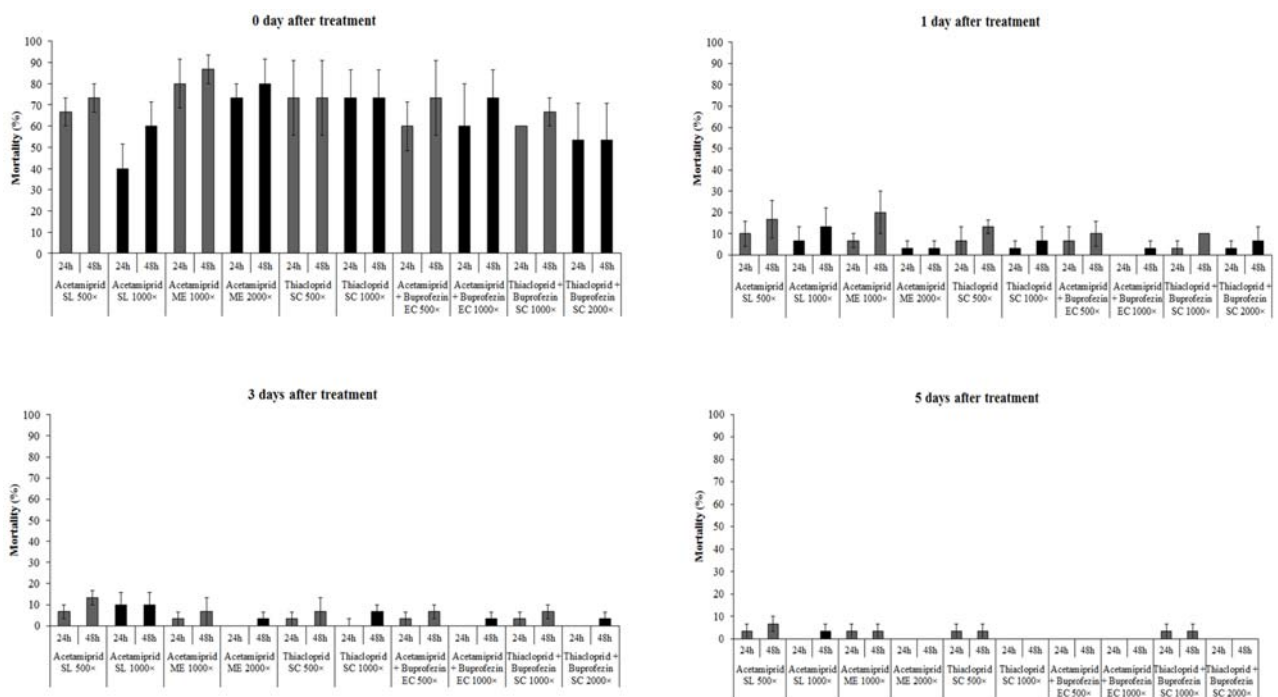


Fig. 1. Residual effects of 5 insecticides against *M. alternatus* adults by pine tree spray treatment under the field condition. The values are presented as the mean ± SE.

Table 4. Comparative toxicity of 8 insecticides against *A. mellifera* adults by body spray treatment

Insecticide	Dilution (X)	Mortality (%; mean \pm SD)		
		4 h	24 h	48 h
Neonicotinoids				
Acetamiprid SL	500	40.0 \pm 15.3 bc	40.0 \pm 15.3 bc	43.3 \pm 18.6 bc
	1000	6.7 \pm 6.7 cd	6.7 \pm 6.7 cd	33.3 \pm 20.3 bc
	2000	6.7 \pm 6.7 cd	6.7 \pm 6.7 cd	6.7 \pm 6.7 bc
Acetamiprid ME	1000	33.3 \pm 14.5 bc	36.7 \pm 14.5 bcd	36.7 \pm 14.5 bc
	2000	20.0 \pm 10.0 bcd	23.3 \pm 12.0 bcd	30.0 \pm 5.8 bc
	4000	10.0 \pm 5.8 cd	10.0 \pm 5.8 cd	16.7 \pm 8.8 cd
Thiacloprid	500	36.7 \pm 3.3 bc	43.3 \pm 3.3 bc	46.7 \pm 6.7 bc
	1000	16.7 \pm 6.7 bcd	20.0 \pm 5.8 bcd	23.3 \pm 6.7 bcd
	2000	0.0 \pm 0.0 d	0.0 \pm 0.0d	20.0 \pm 20.0 bcd
Mixtures				
Acetamiprid+Buprofezin	500	70.0 \pm 15.3 a	70.0 \pm 15.3 a	70.0 \pm 15.3 a
	1000	43.3 \pm 24.0 bc	46.7 \pm 21.9 b	50.0 \pm 20.0 abc
	2000	26.7 \pm 3.3 bc	26.7 \pm 3.3 bcd	26.7 \pm 3.3 bcd
Thiacloprid+Buprofezin	1000	56.7 \pm 18.6 b	56.7 \pm 18.6 ab	60.0 \pm 15.3 ab
	2000	16.7 \pm 8.8 bcd	20.0 \pm 11.5 bcd	23.3 \pm 14.5 bcd
	4000	3.3 \pm 3.3 cd	3.3 \pm 3.3 cd	3.3 \pm 3.3 cd
Control	-	0.0 \pm 0.0 d	10.0 \pm 0.0 cd	10.0 \pm 0.0 cd

^{a)} Means followed by the same letter within a column are not significantly different at $p=0.05$ by Tukey's Studentized Range Test (SAS Institute, 2004).

킴으로써 약제의 활성이 외부환경에 의하여 영향을 받아 감소한 것으로 생각되어진다(Choi et al., 1989).

꿀벌 급성접촉독성

네오니코티노이드계 살충제는 저독성으로 알려진 약제로 널리 사용되고 있으나 꿀벌독성이 높다는 연구결과가 알려져 EU에서는 몇몇 네오니코티노이드계 약제(imidacloprid, clothianidin, thiamethoxam 등)에 대해서 금지하는 법안을 통과시켰다(Iwasa et al., 2004; Ahn et al., 2008; Cho et al., 2010). 그리하여 본 연구는 이들 약제를 제외하고 선발한 5종의 살충제를 이용하였다.

5종의 살충제에 대한 꿀벌의 접촉독성을 조사하기 위하여 충체분무법을 처리한 결과 고농도일수록 독성이 높아졌으며, 5종의 약제 중 혼합제 2종(thiacloprid+buprofezin, acetamiprid+buprofezin)에서는 단제를 처리했을 때와 비교하여 유사하거나 더 높은 꿀벌 독성을 보였다. 그러나 혼합제인 acetamiprid+ethofenprox와 acetamiprid+indoxacarb를 처리했을 시에는 100%의 높은 꿀벌독성이 관찰되어 혼합제로 사용된 약제에 따라 꿀벌이 받는 영향에 차이를 보인다는 것을 알 수 있었다(Ahn et al., 2008). 또한 동일한 약제임에도 다양한 제형의 acetamiprid(WP, SL, WG)와 thiacloprid SC에서는 독성을 보이지 않았으나 이들을 포함하는 몇몇 혼합제에서는 100%의 꿀벌독성이 관찰되었다(Ahn et al., 2013). 이는

acetamiprid에 의한 독성이 아닌 혼합제와 관련된 독성으로 생각된다. 본 연구결과에서도 혼합제보다는 단제가 비교적 꿀벌독성이 낮았고 고농도 일수록 그 차이가 커짐을 알 수 있었다. 그러나 이러한 꿀벌에서의 결과는 솔수염하늘소에 대한 약제의 분무처리시보다 감수성이 더 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이것은 충에 따른 약제의 생체내 흡수, 분해 및 대사과정에서 차이를 보이기 때문인 것으로 생각된다(Jung et al., 2000).

꿀벌 엽상접촉독성

급성접촉독성 실험과 동일한 살충제를 이용하여 꿀벌의 엽상접촉독성을 조사하였다(Table 5).

살충제를 식물체에 살포하였더라도 꿀벌이 약제 처리된 식물체에 접촉하게 되면 약제에 영향을 받게 된다(Cho et al., 2010). 본 실험결과에서도 고농도 일수록 독성이 높아졌으나 급성접촉독성에 비교하면 약제에 따른 결과에 차이를 보였다. Acetamiprid ME와 acetamiprid+buprofezin에서는 직접접촉독성보다 낮은 꿀벌 독성을 보였으나 그 외 약제에서는 더 높은 독성을 보였다. 이는 같은 약제라도 농약의 제형에 따라 독성의 차이를 보일 수 있다는 것이고 꿀벌의 먹이탐색 습성으로 약제가 묻어있는 잎을 빨아먹어 섭식독성으로도 영향을 미친 것으로 보인다(Choi et al., 1989; Ahn et al., 2013). 5종의 약제 중 thiacloprid와 acetamiprid SL, thiacloprid+

Table 5. Comparative toxicity of 8 insecticides against *A. mellifera* adults by false acacia foliage spray treatment

Insecticide	Dilution (X)	Mortality (%; mean \pm SD)		
		4 h	24 h	48 h
Neonicotinoids				
Acetamiprid SL	500	23.3 \pm 3.3 ab ^{a)}	36.7 \pm 6.7 bc	86.7 \pm 8.8 ab
	1000	6.7 \pm 6.7 bc	26.7 \pm 12.0 c	73.3 \pm 17.6 abc
	2000	3.3 \pm 3.3 bc	10.0 \pm 0.0 d	36.7 \pm 17.6 bcd
Acetamiprid ME	1000	0.0 \pm 0.0 c	10.0 \pm 10.0 d	20.0 \pm 10.0 cd
	2000	0.0 \pm 0.0 c	3.3 \pm 3.3 e	13.3 \pm 3.3 de
	4000	0.0 \pm 0.0 c	0.0 \pm 0.0 e	0.0 \pm 0.0 e
Thiacloprid	500	43.3 \pm 8.8 a	80.0 \pm 11.5 a	96.7 \pm 3.3 a
	1000	20.0 \pm 5.8 ab	66.7 \pm 8.8 ab	93.3 \pm 3.3 a
	2000	16.7 \pm 12.0 b	53.3 \pm 21.9 b	56.7 \pm 23.3 bc
Mixtures				
Acetamiprid+Buprofezin	500	0.0 \pm 0.0 c	10.0 \pm 5.8 d	16.7 \pm 12.0 cde
	1000	0.0 \pm 0.0 c	0.0 \pm 0.0 e	13.3 \pm 3.3 de
	2000	0.0 \pm 0.0 c	0.0 \pm 0.0 e	0.0 \pm 0.0 e
Thiacloprid+Buprofezin	1000	6.7 \pm 3.3 bc	66.7 \pm 14.5 ab	90.0 \pm 5.8 a
	2000	3.3 \pm 3.3 bc	26.7 \pm 14.5 c	76.7 \pm 14.5 abc
	4000	0.0 \pm 0.0 c	20.0 \pm 10.0 cd	46.7 \pm 29.1 bc
Control	-	0.0 \pm 0.0 c	10.0 \pm 0.0 d	16.7 \pm 3.3 cde

^{a)} Means followed by the same letter within a column are not significantly different at $p=0.05$ by Tukey's Studentized Range Test (SAS Institute, 2004).

buprofezin에서 약제처리 48시간 후 80%이상의 높은 꿀벌독성을 보인 반면 acetamiprid ME, acetamiprid+buprofezin은 독성이 낮아 꿀벌에 안전한 것으로 나타났다(Table 5).

꿀벌 엽상잔류독성 시험

솔수염하늘소 성충에 사용한 5종의 살충제에 대해 표준살포량의 기준량, 배량 2가지 농도로 꿀벌의 엽상잔류독성을 조사하였다(Fig. 2).

실험결과 대부분의 약제는 시간이 경과할수록 독성이 낮아졌으며, 약제 처리 1일 후 독성이 급격하게 감소하였다. 이는 일반적으로 알려진 네오니코티노이드계의 약제들이 높은 잔류독성을 보인 것과는 반대되는 결과인데 기존 연구에서는 본 실험에 사용된 acetamiprid와 thiacloprid는 접촉독성이 낮았기에 잔류독성에 대한 연구는 진행되지 않았었고 본 실험에 사용된 약제는 제형과 혼합제의 차이를 보이기에 기존 실험결과와 차이를 보인 것 같다(Ahn et al., 2008). 꿀벌의 잔류독성에 관한 살충률을 시간(0, 1, 3, 5일)에 따른 차이를 통계 처리한 결과 acetamiprid ME (24시간, $P=0.5458$; 48시간, $P=0.1414$)와 acetamiprid+buprofezin (24시간, $P=0.6657$; 48시간, $P=0.9559$)을 처리한 처리구에서는 날짜에 따른 통계적 유의성이 나타나지 않았다. 그러나 솔수염하늘소에서의 잔류독성검정에서는 모든 약제에 대하여 처리후 시간에 따른 통계적으로($P<0.0001$) 차이가 매우 큰 것으로 나타났다. 같은 약제인 acetamiprid는 액제(SL)의 독

성이 미탁제(ME, microemulsion)보다 높게 나타났는데 이는 같은 acetamiprid라도 제형에 따라 활성의 차이를 보이는 것 같다. 미탁제(ME)는 다른 제형에 비해 점착성(viscosity)이 떨어져 잔류효과가 감소한 것으로 보이며, acetamiprid+buprofezin는 살충활성이 IGR계통의 약제인 buprofezin보다는 acetamiprid에 의해 나타나는 것으로 보여, 이는 합제의 acetamiprid 함량이 낮아 살충활성이 감소하는 것으로 생각된다(Pratap and Bhowmilk, 2010). 또한 꿀벌에 대한 잔류독성실험 역시 약제처리 후 야외에서 노출시킨 것으로 그에 따라 약효가 감소한 것으로 생각된다. 약제의 잔류독성은 약제의 구조적 특성과 제형, 환경조건, 처리시기에 따라 차이를 보이기 때문에 같은 약제라 하여도 심한 차이를 보일 수 있다(Choi et al., 1989). 또한 약제처리 후 약효가 나타나는 시간에서도 차이를 보였는데 약제 처리 24시간 후에는 약효가 높지 않았으나 48시간이 되면 살충률에 차이를 보이는 경우가 있었다(Fig. 2). 약제의 특성에 따라 달리 나타날 수 있어 시간에 따른 약효 활성 검정실험이 중요하다 할 수 있다. 일반적으로 잔효성이 우수한 살충제는 지속적인 방제 효과를 보여 경제성이 있을 수 있지만 잔류성이 길면 환경에 부작용을 미칠 수도 있다(Han et al., 2008). 그러므로 약제처리 시에는 제형과 처리방법을 고려하고 꿀벌의 활동시기 또한 고려하여야 할 것이다.

이와 같은 결과를 토대로 솔수염하늘소에 대한 살충 효과와 꿀벌에 대한 급성접촉독성, 엽상접촉독성, 엽상잔류독성

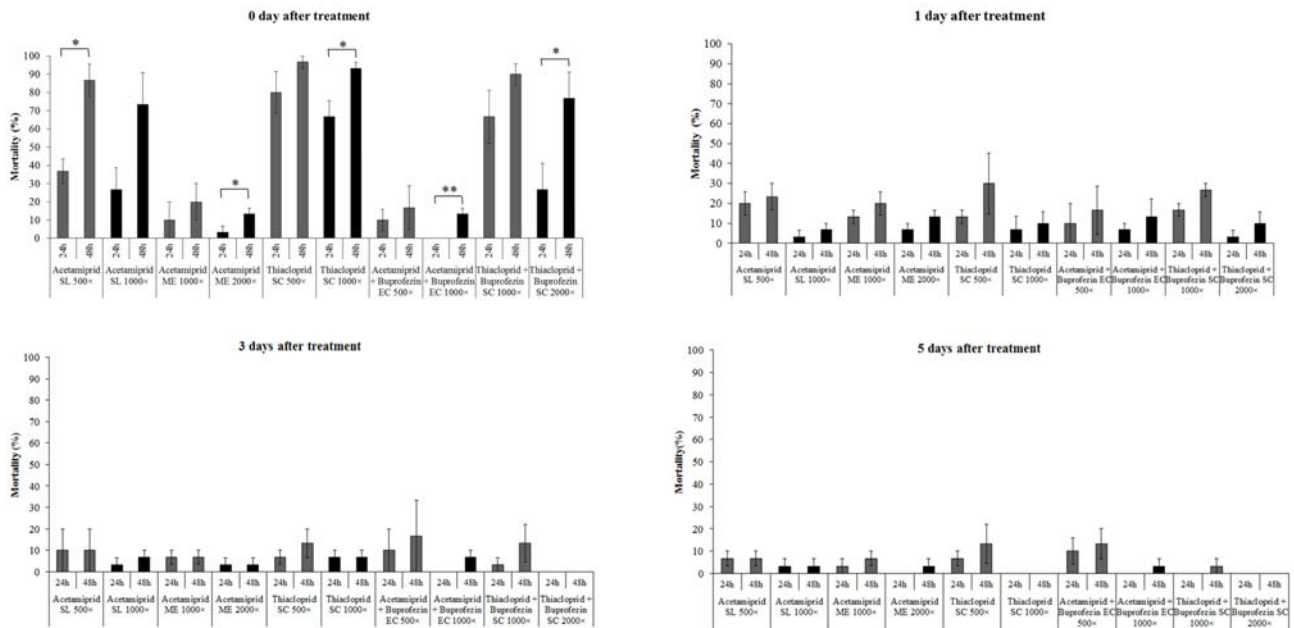


Fig. 2. Residual toxicity of 5 insecticides against *A. mellifera* adults by false acacia foliage spray treatment under the field condition. The values are presented as the mean \pm SE. The significance of the difference compared with the 24h and 48h value is indicated by * $P < 0.1$, ** $P < 0.01$.

을 종합적으로 고려했을 때, acetamiprid ME 약제를 선발하여 사용할 경우 솔수염하늘소에 대한 살충 효과는 높으면서 꿀벌에 대한 영향이 적어 솔수염하늘소 방제에 이용가능 할 것으로 생각된다. 그러나 살충제를 이용하여 솔수염하늘소 방제에 적용하기 위해서는 야외환경인 산림에서의 농약의 잔효 및 살충효과가 검증이 되어야 할 것으로 보인다.

감사의 글

본 논문은 2016년도 산림과학연구원 과제(FE0702-2016-01-2016)의 지원으로 수행되었습니다.

Literature Cited

Ahn K. S., M. G. Oh, H. G. Ahn, C. M. Yoon and G. H. Kim (2008) Evaluation of toxicity of pesticides against honeybee (*Apis mellifera*) and bumblebee (*Bombus terrestris*). Korean J. Pestic. Sci. 12:382-390.

Ahn, K. S., C. M. Yoon, K. H. Kim, S. Y. Nam, M. G. Oh and G. H. Kim (2013) Evaluation of acute and residual toxicity of insecticides registered on strawberry against honeybee (*Apis mellifera*). Korea. J. Pestic. Sci. 17:185-192.

Aida, S. (1983) In vitro test method. The latest agricultural chemical biological assay method. National Rural Education Association, Tokyo, Japan. pp. 232-271.

Cho, K. W., H. J. Park, C. H. Bae, Y. S. Kim, D. C. Shin, S. Y. Lee, S. H. Lee, C. K. Jung, Y. K. Park, B. S. Kim and K. S. Lee (2010) Residual toxicity of bifenthrin and imidacloprid

to honeybee by foliage treatment. Korean J. Pestic. Sci. 14: 226-234.

Choi, S. Y., Y. S. Kim, M. R. Lee, H. W. Oh and B. K. Jeong (1989) Studies on the acute and chronic toxicities of pesticides to the honeybees, *Apis mellifera*. Korean J. Apicul. 4:85-89.

Chung, Y. J. (2002) Occurrence and spread of pine wilt disease in Korea. Tree Protec. 7:1-7.

Edwards, O. R. and M. J. Linit (1992) Transmission of *B.xylophilus* through oviposition wounds of *M. carolinensis*. J. Nematol. 24:133-139.

Evans, H. F., D. G. McNamara, H. Braash, J. Chadoeuf and C. Magnusson (1996) Pest risk analysis (PRA) for the territories of the European Union (as PRA area) on *Bursaphelenchus xylophilus* and its vectors in the genus *Monochamus*. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin 26:199-249.

Han, J. H., J. H. You, E. H. Kim, J. O. Yang, D. J. Noh, C. M. Yoon and G. H. Kim. (2008). Susceptibility of pine sawyer, *Monochamus saltuarius* adults (Coleoptera: Cerambycidae) to commercially registered insecticides. Korea. J. Pestic. Sci. 12:262-269.

Hanks, L. M. (1999) Influence of the larval host plant on reproductive strategies of cerambycid beetles. Annu. Rev. Entomol. 44:483-505.

Hiratsuka, Y., D. W. Langor and P. E. Crane (1995) A field guide to forest insects and diseases of the prairie provinces. Northern Forestry Centre Special report 3.Canadian Forest Service, p. 297. Edmonton, Canada.

Iwasa, T., N. Motoyama, J. T. Ambrose and R. M. Roe (2004)

- Mechanism for the differential toxicity of neonicotinoid insecticides in the honey bee, *Apis mellifera*. *Crop Prot.* 23: 371-378.
- Jung, Y. H., J. U. Kim, J. H. Kim, Y. D. Lee, C. H. Lim and J. H. Huh (2000) The latest pesticide science. pp. 570. Sigmappress, Seoul, Korea.
- Kim, B. S., Y. K. Park, Y. H. Lee, M. H. Joeng, A. S. You, Y. J. Yang, J. B. Kim, O. K. kwon and Y. J. Ahn (2008) Honeybee acute and residual toxicity of pesticides registered for strawberry. *Korea. J. Pestic. Sci.* 12:229-235.
- Kobayashi, H., A. Yamane and R. Iwata (2003) Mating behavior of the pine sawyer, *Monochamus saltuarius* (Coleoptera: Cerambycidae) *Appl. Entomol. Zool.* 38:141-148.
- Korea Crop Protection Association (KCPA) (2016) Agrochemicals user's guide book.
- Korea Forest Research Institute (2007) Annual report of monitoring for forest insect pests and diseases in Korea. Korea Forest Research Institute, Seoul. pp. 23-26.
- Lawrence, J. F. (1982) Coleoptera, In Parker, S. (Ed.), *Synopsis and classification of living organisms*. McGraw Hill, New York. pp. 482-553.
- Linit, M. J. (1988) Nematode-vector relationships in the pine wilt disease system. *J. Nematol.* 20:227-235.
- Makihara, H. (1988) Kinds and life history of vector insects: History of and current research on pinewood nematode. National Association for Forest Pests Control. Tokyo, Japan. pp. 44-64.
- Makihara, H. (2004) Two new species and a new subspecies of Japanese Cerambycidae (Coleoptera). *Bull. FFPRI* 390:15-24.
- Mamiya, Y. and N. Enda (1972) Transmission of *Bursaphelenchus lignicolus* (Nematoda: Aphelenchiodae) by *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae). *Nematologica* 25:252-261.
- Ostry, M. E. and N. A. Anderson (1995) Infection of *Populus tremuloides* by *Hypoxyylon mammatum* ascospores through *Saperda inornata* galls. *Can. J. For. Res.* 25:813-816.
- Poland, T. M., R. A. Haack, T. R., R. A., Petrice, D. L., Miller, and L. S. Bauer (2006). Laboratory evaluation of the toxicity of systemic insecticides for control of *Anoplophora glabripennis* and *Plectrodera scalator* (Coleoptera: Cerambycidae). *J. Econ. Entomol.* 99:85-93.
- Pratap, A. P. and D. N. Bhowmick (2010). Pesticides as microemulsion formulations. *J. Disper. Sci. Technol.* 29: 1325-1330.
- SAS Institute (2009) SAS user's guide; statistics, version 9.1ed. SAS Institute, Cary, NC.
- Sato, H., T. Sakuyama and M. Kobayashi (1987) Transmission of *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhner) Nickle (Nematode, Aphelenchoididae) by *Monochamus saltuarius* (Gebler) (Coleoptera, Cerambycidae). *J. Jpn. For. Soc.* 69: 492-496 (in Japanese with English Summary).
- Yi, C. K., B. H. Byun, J. D. Park, S. I. Yang and K. H. Chang (1989) First finding of the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* (Stemer et Buhner) Nickle and its insect vector in Korea. *Res. Rep. Inst.* 38: 141-149.
- Zhang, X. and M. J. Linit (1998) Comparison of oviposition and longevity of *Monochamus alternatus* and *M. carolinensis* (Coleoptera: Cerambycidae) under laboratory conditions. *Environ. Entomol.* 27:885-891.

5종의 네오니코티노이드계 약제에 대한 솔수염하늘소의 살충활성과 꿀벌독성

조우성 · 정대훈 · 이재선 · 김현경 · 서상태¹ · 김길하*

충북대학교 농업생명환경대학 식물의학과, ¹국립산림과학원

요약 5종의 살충제를 사용하여 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*) 성충에 대한 약제 감수성과 잔효성을 조사하였고 꿀벌(*Apis mellifera*)에 대한 급성 및 엽상접촉독성과 엽상잔류독성을 평가하였다. 약제 처리 후 48시간 기준 총체 분무법을 이용하였을 시 5종의 네오니코티노이드계 약제 모두 80% 이상의 살충률을 보였다. 그러나 가지 침지법에서 80% 이상의 살충률을 보인 약제는 acetamiprid ME, acetamiprid+buprofezin 2종이었다. 솔수염하늘소 성충에 사용한 5종의 약제에 대한 잔효성 실험에서는 모든 약제에 대하여 60-80%의 살충활성이 나타났으나, 약제처리 1일 후에는 약효가 급격히 감소하였다. 솔수염하늘소 성충에 사용한 5종의 약제에 대한 꿀벌의 급성독성과 엽상접촉독성실험에서는 acetamiprid ME가 가장 낮은 독성을 보였다. 꿀벌에 대한 엽상잔류독성을 조사한 결과에서는 acetamiprid ME와 acetamiprid+buprofezin 2종의 약제에서 매우 낮은 잔류독성을 보였다. 그러나 약제처리 1일 후에는 모든 처리약제의 잔류독성이 10-30% 이하로 감소하였고, 시간이 지남에 따라 잔류독성은 더욱 감소하였다. 이러한 결과를 통해서 본 실험은 5종의 네오니코티노이드계 약제 중 acetamiprid ME가 솔수염하늘소에는 높은 살충활성을 보인 반면에 꿀벌에 대해서는 비교적 낮은 접촉 및 잔류독성을 보였기에 소나무재선충병 매개충 방제에 acetamiprid ME가 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

색인어 솔수염하늘소, 꿀벌, 살충제, 살충활성, 잔류독성