

# 소나무재선충 매개충에 대한 항공방제 약제 탐색 및 무인항공기 살포에 의한 매개충의 약제 감수성

김준현\* · 남상준<sup>1</sup> · 송진영<sup>1</sup>국립산림과학원 산림병해충연구과, <sup>1</sup>농업회사법인(주)제주천지

## Selection of Aerial Spraying Control Agent and Susceptibility of Pinewood Nematode Vectors to Spraying Using Unmanned Aerial Vehicles

Junheon Kim\*, Sangjune Nam<sup>1</sup> and Jinyoung Song<sup>1</sup>

Forest Insect Pests and Diseases Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

<sup>1</sup>Agricultural Corporation JejuChunji, Jeju 63036, Korea

**ABSTRACT:** The efficacy of spinetoram sprayed from an unmanned helicopter to control two insect vectors of pine wood nematodes, *Monochamus alternatus* and *M. saltuarius* was assessed. By using a ULV (Ultra Low Volume) sprayer, the mortality rates of phenthoate, bifenthrin, etofenprox, and diflubenzuron, which are registered for use against coleopteran insects, indoxacarb and spinetoram, which are registered for use against lepidopteran insects, were evaluated for efficacy as aerial spraying agents. The ULV test, using 33- and 55-fold dilutions of phenthoate, bifenthrin, indoxacarb, and spinetoram demonstrated a 100% insect mortality rate upon contact and feeding mortality on the third day after treatment, while etofenprox and diflubenzuron exhibited a slightly lower mortality rate than the remaining compounds. Consequently, spinetoram was selected as a candidate pesticide for aerial spraying and its efficacy to control the insect vectors was assessed. The x 33 dilution of spinetoram resulted in a 98.6–100% control efficacy against two insect vectors. However, risk assessment for bees following aerial spraying will be necessary before applying the pesticide to control insect vectors.

**Key words:** *Monochamus alternatus*, *Monochamus saltuarius*, Unmanned helicopter, Aerial control

**초 록:** 본 연구에서는 소나무재선충의 매개충인 솔수염하늘소와 북방수염하늘소에 대하여 무인항공기 (무인헬리콥터)를 이용하여 스피네토람의 약효 및 약해를 조사하였다. 하늘소를 대상으로 등록된 펜토에이트 유제, 비펜트린 액상수화제, 하늘소를 제외한 딱정벌레가 대상인 에토펜프록스 유제, 디플루벤주론 수화제와 나방류에 방제 약제로 등록된 인독사카브 수화제, 스피네토람 액상수화제 6종을 ULV기로 살포하여 솔수염하늘소에 대한 섭식독과 접촉독을 확인한 후 선발하였다. ULV 시험 결과, 펜토에이트, 비펜트린, 인독사카브, 스피네토람의 33배, 55배 희석배수액은 처리후 3일차에 접촉독과 섭식독에서 100% 살충율을 보였으나, 에토펜프록스는 7일차 접촉독 살충율 88.9%(33배), 88.9%(50배), 섭식독 살충율 93.4%(33배, 50배), 디플루벤주론은 7일차 접촉독 살충율 83.3%(33배), 섭식독 80.3%, 53.9%(50배)로 조금 낮은 살충률을 보였다. ULV 시험에서 선발된 가장 적합한 스피네토람의 33배액을 무인항공기로 살포하여 솔수염하늘소와 북방수염하늘소에 대한 감수성을 평가한 결과, 98.6% - 100%의 살충율을 보였다. 그러나, 해당 약제의 매개충 방제에 적용하기 전에 항공 살포에 의한 꿀벌에 대한 위해성 평가가 필요할 것으로 판단되었다.

**검색어:** 솔수염하늘소, 북방수염하늘소, 무인항공기, 항공방제

\*Corresponding author: [junheonkim@korea.kr](mailto:junheonkim@korea.kr)

Received February 14 2023; Revised February 21 2023

Accepted February 23 2023

소나무류 생태의 가장 큰 위협이 되고 있는 소나무재선충병은 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)에 의해 발생되며, 스스로 이동능력이 없는 소나무재선충은 *Monochamus*속 (Coleoptera: Cerambycidae)의 하늘소를 매개충으로 하여 전파된다(Kobayashi et al., 1984; Sato et al., 1987; Sousa et al., 2001; EU Commission, 2020). 소나무재선충병의 확산을 방지하기 위하여, 매년 소나무재선충 매개충인 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*)와 북방수염하늘소(*Monochamus saltuarius*)의 우화시기에 맞춰 항공방제가 실시되고 있다(KFS, 2021). 2021년 현재 항공방제 면적은 점점 감소하고 있으나(KFS, 2021), 소나무재선충병 확산을 방지하기 위한 항공방제의 수효는 지속될 것으로 예상된다.

우리나라에서는 소나무재선충 매개충의 항공 방제 약제로는 티아클로프리드, 아세타미프리드, 아세타미드·뷰프로펜진, 아세타미드·에마멕틴벤조에이트 합제, 플루피라디퓨론 5종이 등록되어 있으며(Table 1), 주로 티아클로프리드와 아세타미프리드를 살포약제로 사용하고 있다 (KFS, 2021; RDA, 2023). 최근 EU에서는 네오니코티노이드 계열의 약제에 대하여, 클로티아니딘, 이미다클로프리드, 티아메톡삼3종은 꿀벌위해성을 이유로 온실 외 야외에서의 사용을 금지하였고, 티아클로프리드는 내분비교란 가능성이 있는 물질 및 대사물질의 지하수 오염문제로 사용금지를 하고 있다(EU Commission, 2020). 농촌진흥청에서는 아직 티아클로프리드가 사용에 특별한 제한을 두고 있지 않지만, 티아클로프리드가 내분비교란 가능성이 있는 물질과 그 대사물질의 지하수 오염문제로 인하여 EU에서 사용을 금지하고 있는 상황에서, 티아클로프리드를 대체할 약제의 선발이 필요하게 되었다.

국내 등록 농약 중 소나무재선충 매개충에 등록된 약제를 제외한 다른 종의 하늘소를 대상으로 등록된 약제로는 유기인제인 펜토에이트 유제와 피레스로이드계의 비펜트린 액상수화제가

가 있으며, 소나무재선충의 매개충과 동일한 딱정벌레목의 해충을 대상으로 등록된 약제 중 바구미류와 오리나무잎벌레에 대하여 피레스로이드계의 에토펜프록스 유제, 네오니코티노이드계의 디노테퓨란 액제와 벤조일 유레아인 디플루벤주론 수화제가 있다(RDA, 2023). 또한, 최근 매미나방의 대발생으로 인하여 소나무류의 피해가 보고되었다(Jung et al., 2020). 이에 매미나방의 방제시기가 소나무재선충병 매개충의 방제시기와 동일하여, 동시방제 약제로 나방류의 방제에 주로 사용되는 옥사디아진계 인독사카브 수화제와 스피노신계 스피네토람 액상수화제 대한 약제 효과를 확인하고자 하였다. 본 실험에서는 펜토에이트 유제, 에토펜프록스 유제와 비펜트린 액상수화제, 디플루벤주론 수화제, 인독사카브 수화제, 스피네토람 액상수화제 6종에 대한 약제 효과 검정하기로 하였다. 네오니코티노이드계인 디노테퓨란은 솔수염하늘소에 대한 약제로 티아클로프리드와 아세타미프리드가 등록되어 있어 선발하지 않았다.

본 실험에서는 소나무재선충 매개충에 대하여 등록되어 있지 않은 상기 6종의 약제에 대하여, 소나무재선충 매개충에 대한 접촉독과 섭식독을 평가하였고, 선발된 약제의 무인항공기 살포에 의한 약제 감수성을 평가하였다.

## 재료 및 방법

### 무인항공방제용 약제 선발 시험

#### 시험곤충

우화 후 7-10일된 솔수염하늘소 성충을 오상킨섹트(구리시, 경기도) 구매하여, 시험에 사용되기 전까지 실험실에서 소나무를 먹이로 주어 24±2°C, 60±5%RH, 14L:10D 조건에서 사육하였다. 구매 후 일주일 이내에 실험에 사용하였다.

**Table 1.** Registered agrochemicals against *Monochamus* spp. as aerial spray type

Agrochemical	A.I. <sup>1</sup> (%)	Spraying type <sup>2</sup>	Classification	Primary site of action (Mode of action classification <sup>3</sup> )
Thiachloprid	10	ULV, UAV	Neonicotinoid	nAChR Competitive modulator (4a)
Acetamiprid	10	ULV, UAV	Neonicotinoid	nAChR Competitive modulator (4a)
Acetamiprid+Buprofezine	4+15	ULV	Neonicotinoid and Thiadiazine	nAChR Competitive modulator (4a) Chitin biosynthesis inhibitor type 1 (16)
Acetamiprid+Emamectin benzoate	10+6	ULV	Neonicotinoid and <i>Streptomyces</i> product	nAChR Competitive modulator (4a) GluCl Channel allosteric modulator (6)
Flupyradifurone	17	ULV, UAV	Butenolide	nAChR Competitive modulator (4d)

<sup>1</sup>Active ingredient; <sup>2</sup>ULV: Ultra low volume, UAV: unmanned aerial vehicle; <sup>3</sup>Mode of action code is from the IRAC (IRAC, 2019)

## 시험 약제

시험에 사용한 약제는 총 6종으로 펜토에이트(phenthoate) 유제, 에토펜프로스(etofenprox) 유제, 비펜트린(bifenthrin) 액상수화제, 디플루벤주론(diflubenzuron) 수화제, 인독사카브(indoxacarb) 수화제, 스피네토람(spinetoram) 액상수화제였으며, 티아클로프리트(thiacloprid) 액상수화제는 대조약제로 사용하였다. 약제는 모두 약제 판매상을 통하여 구입하여 사용하였다. 사용된 약제는 유기인계, 피레스로이드계, 벤조일유레아, 옥사디아진, 스피노신으로 네오니코티노이드 계열이 아닌 약제를 사용하였다. 사용된 약제의 유효성분과 살충기작은 Table 2와 같다.

## 약제 효과 시험

섭식독(feeding effect)의 효과 확인하기 위하여 화분에 심겨 있는 10년생 소나무를 25 × 40 m<sup>2</sup>의 공터에 놓아 둔 후, ULV 살포기(FogS DH-FOGS; Daeho Green, Gimhae, Gyeongsangnam-do)를 이용하여 약제를 소나무에 골고루 살포하였다. 약제가 묻은 소나무 가지와 잎(약 150 g)과 솔수염하늘소 10쌍을 금속망(15 × 20 × 10 cm)에 넣은 후, 3일과 7일 후 생존율을 조사하였다. 접촉독(direct contact effect) 효과 확인을 위해 솔수염하늘소 10마리씩 들어있는 금속망(15 × 20 × 10 cm)을 25 × 40 m<sup>2</sup>

의 공터에 고루 퍼지게 놓고, ULV 살포기를 이용하여 약제를 골고루 살포하였다. 약제 살포 후, 금속망에는 약제가 살포되어 있지 않은 소나무 가지와 잎(약 150 g)을 먹이로 제공하여, 3일과 7일 후 생존율을 조사하였다.

섭식독과 접촉도 실험에 사용한 약제 살포량은 2 L/ 10 a에 해당하는 양으로 위 면적에 1 L를 살포하였고, 처리 농도는 33배와 50배 두 농도로 처리하였다. 대조구로는 어떤 약제도 살포하지 않았다. 각 약제에 대하여 각각 3반복 시험하였다.

## 무인항공 약효 시험

### 시험곤충

솔수염하늘소 및 북방수염하늘소는 오상킨섹트에서 사육한 우화 후 7-10일된 성충 개체를 구매하여, 실험실에서 10일간 소나무를 먹이로 사육하여(24 ± 2°C, 60 ± 5 %RH, 14L:10D), 시험에 사용하였다. 시험 곤충의 처리는 Kim et al. (2020)의 방식과 동일하게 수행하였다. 시험곤충의 정착을 위하여, 약제 살포 1일전 망(length 30 cm, diameter 11 cm)에 넣어 두고, 각 망에는 성충 10마리를 소나무 혹은 잣나무 가지를 함께 넣고, 소나무 혹은 잣나무의 수관을 3등분한 각 위치에 달아 두었다(30마리/구). 처리 후 성충은 망에 넣어 두고, 3일과 7일차에 생존수를 조사하였으며, 붓으로 자극하였을 때 움직임이 있는 개체만 살

**Table 2.** Property of insecticides used in this study

Agrochemical	Formulation <sup>1</sup>	A.I. <sup>2</sup> (%)	Classification	Primary site of action (Mode of action code <sup>3</sup> )	WHO Pesticide Hazard Class <sup>4</sup>	US EPA Carcinogenic potential <sup>5</sup>
Phenthoate	EC	2	Organophosphate	AChE inhibitor (1b)	II	Not listed
Etofenprox	EC	20	Pyrethroid	Sodium channel modulator (3a)	U	Not Likely to Be Carcinogenic to Humans
Bifenthrin	SC	2	Pyrethroid	Sodium channel modulator (3a)	II	Possible Human Carcinogen
Diflubenzuron	WP	25	Benzoylurea	Chitin biosynthesis inhibitor affecting CHS1 (15)	III	Group E-Evidence of Non- Carcinogenicity for Humans.
Indoxacarb	WP	10	Oxadiazine	Voltage-dependent sodium channel blocker (22)	II	Not Likely to Be Carcinogenic to Humans.
Spinetoram	SC	5	Spinosyn	nAChR allosteric modulator-Site 1 (5)	U	Not Likely to Be Carcinogenic to Humans.
Thiacloprid	SC	10	Neonicotinoid	nAChR modulator (4a)	II	Likely to Be Carcinogenic to Humans.

<sup>1</sup>EC: Emulsifiable concentrate, SC: Suspension concentrate, WP: Wettable powder; <sup>2</sup>Active ingredient; <sup>3</sup>Mode of action code is from the IRAC (IRAC, 2019); <sup>4</sup>List is from the WHO (WHO, 2009), U: unlikely to present acute hazard, II: moderately hazardous; <sup>5</sup>List is from the US EPA (US EPA, 2021)

아있는 것으로 간주하였다.

### 시험 약제

시험에 사용한 약제로는 선발된 스피네토람 액상수화제(주 성분함량 5%)로 33배 희석액을 2 L/10 a의 양으로 처리하였다. 약제처리는 농촌진흥청고시에 따라, 수목 캐노피(canopy)기준 4 m이상의 상공에서 15 km/h의 비행속도로 약제를 평행 살포 하였다(RDA, 2022). 약해 조사를 위하여 기준량(33배)와 배량 (16배)로 소나무에 살포하여 7일후 육안으로 조사하였다. 대조 구(Control)는 약제 처리를 하지 않았다.

### 무인헬리콥터과 노즐

시험에 사용된 무인헬리콥터과 노즐은 Kim et al. (2020)이 사용한 것과 동일한 기종(YAMAHA FAZER)과 노즐(TXVK-26, Teejet)을 사용하였다.

### 시험포장

시험포장은 Kim et al. (2020)등이 실시한 곳과 동일한 장소 였으며, 동일한 시험 포장 규격으로 단구제 3반복 시험을 할 수 있도록 구획하였다. 소나무림은 제주특별자치도 서귀포시 안 덕면 사계리와 제주시 애월읍 유수암리에서 수행하였다. 시험

포장의 규격은 각각 7.5 × 40 m, 총면적 1,150 m<sup>2</sup>, 구당 면적 300 m<sup>2</sup> 이며, 각 구간에는 10 m의 완충 지대를 설정하였다. 두 포장 모두 약제 처리 전 및 처리 후 7일까지 약효·약해 시험에 영향을 줄 만한 기상 상황은 없었다.

### 통계 처리

약제의 방제 효과의 유의성을 검정하기 위해 각 약제에 대한 사충율은 Abbott의 보정사충율로 보정한 후(Abbott, 1925), arcsine으로 변환하여 Tukey의 다중 검정을 실시하였다. 사충율(± 표준오차, SE)은 변환전의 값으로 나타내었다. 무인항공약제에 의한 생존율의 유의성은 *t*-검정을 이용하여 검정하였다. 통계에는 SAS Institute의 JMP (ver 9.02; Cary, NC)를 이용하였다.

### 결과 및 고찰

ULV를 이용한 약제 선발 실험 결과, 펜토에이트, 비펜트린, 인독사카브, 스피네토람, 대조약제인 티아클로프리드는 모두 농도에 관계없이 3일차에 솔수염하늘소에 대하여, 접촉독과 섭식독에 있어 100% 살충율을 보였다(Table 3). 에토펜프록스의 33배 및 50배 희석액의 접촉독 효과로 7일차에 모두 88.9%의 살충율을 보였고, 섭식독 효과로 7일차에 모두 93.4%의 살충율을 보였다. 디플루벤주론의 접촉독 효과는 33배 희석액에 3일차 90.0%, 7일차에 83.3%의 살충율을 보였으며, 섭식독 효

**Table 3.** Corrected mortality by agrochemicals against *Monochamus alternatus*

Agrochemical	Corrected mortality after treatment according to elapsed days (% , mean±SE)								
	Direct contact effect				Feeding effect				
	× 33 dilution		× 50 dilution		× 33 dilution		× 50 dilution		
	3 days	7 days	3 days	7 days	3 days	7 days	3 days	7 days	
Phenthoate	100a <sup>1</sup>	100a	100a	100a	100a	100a	100a	100a	100a
Etofenprox	96.7 ± 5.8a	88.9 ± 5.6b	93.3 ± 3.3b	88.9 ± 5.6b	88.1 ± 6.0a	93.4 ± 6.6a	88.1 ± 6.0a	93.4 ± 6.6a	
Bifenthrin	100a	100a	100a	100a	100a	100a	100a	100a	
Diflubenzuron	90.0 ± 5.8a	83.3 ± 9.6b	100a	100a	76.2 ± 15.8a	80.3 ± 11.4a	40.5 ± 11.9b	53.9 ± 13.2b	
Indoxacarb	100a	100a	100a	100a	100a	100a	100a	100a	
Spinetoram	100a	100a	100a	100a	100a	100a	100a	100a	
Thiacloprid	100a	100a	100a	100a	100a	100a	100a	100a	
Statistical values									
<i>F</i> -value ( <i>df</i> = 6, 14)	2.3333	3.1002	4.0000	4.0000	2.7092	2.3321	20.8107	11.9017	
<i>P</i> -value	0.0899	0.0380	0.0153	0.0153	0.0583	0.0900	<0.0001	<0.0001	

<sup>1</sup>The same letters within a column are not significantly different from each other (Tukey's test at *p* = 0.05)

과는 33배 희석액에 대하여 3일차 76.2%, 80.3%의 살충율을 보였다. 디플루벤주론50배 희석액의 접촉독 효과는 3일차 100%, 7일차에 100%의 살충율을 보였으나, 섭식독 효과는 3일차 40.5%, 7일차 53.9%의 살충율을 보였다. 무처리구의 경우 금속망 처리(접촉독 무처리구)에서는 3일차 100%, 7일차 56.7%의 생존율을 보였고, 소나무 망처리(섭식독 무처리구)에서는 3일차 70.0%, 7일차 63.3%의 생존율을 나타내었다.

본 실험 결과, 펜토에이트, 비펜트린, 인독사카브, 스피네토람이 항공방제 약제로 우수한 효과를 나타냄을 알 수 있었다.

유기인계 약제로는 국내에서는 지상살포용으로 페니트로티온이 등록되어 있고, 일본에서는 유기인계인 페니트로티온 수화제를 항공살포하고 있다(FAMIC, 2020). 펜토에이트의 급성어독성(LC<sub>50</sub> fish)의 경우 네오니코티노이드계인 이미다클로프리드의 84배, 티아메톡삼의 50배 높은 것으로 나타났다(Sumon et al., 2016; RDA, 2023). 본 실험에서는 피레스로이드계 약제로 에토펜프록스와 비펜트린의 접촉독과 섭식독을 검정하였다. 에토펜프록스는 농약 등록기준에 적합한 방제가를 보였으나, 다른 약제와 비교하여 다소 떨어지는 양상을 보였다. Choi et al. (2017)은 갈색날개매미충의 약제선발에서 에토펜프록스는 처리한 다른 네오니코티노이드계의 약제에 비하여 살충력이 다소 떨어지며, 성충밀도와 난괴수 저하에 효과가 없다고 보고하였다. 비펜트린의 경우, 살충효과는 좋았으나, US EPA (2021)에서 발암성 우려물질로 구분되어 있다. 인독사카브는 높은 살충효과를 보였으나, 본 실험에서는 수화제를 사용하였기에 항공방제에는 노력이 막힐 가능성이 있다. 추후에 액상수화제 혹은 유제에 대한 시험을 수행한 후 항공방제 약제로써의 약효평가가 필요할 것으로 판단된다. 스피네토람은 ULV시험

에서 솔수염하늘소에 대하여 높은 살충율을 보였다. 스피네토람은 *Saccharopolyspora spinosa* (Bacteria: Actinobacteridae)가 만드는 천연 spinosyns를 이용하여 합성하며, 접촉독과 섭식독을 나타내고 있다. 여러 해충에 대하여 효과가 보고되고 있으며(Dripps et al., 2011), 특히 나비목에 대하여 살충효과가 높고, 서양뒤영벌 *Bombus terrestris*에 대하여 spinosad보다 낮은 독성을 보이고 있다(Besard et al., 2011). 딱정벌레목의 해충 중 저장곡물해충에 대하여서도 높은 살충효과가 보고되었다(Vasilakos et al., 2012). 이러한 사유를 바탕으로, 효과가 좋았던 4종의 약제 중 스피네토람을 무인항공방제 약제로 선택하여, 매개충에 대한 감수성 실험을 수행하였다.

소나무재선충 매개충에 대한 살충제 감수성은 Table 4에 나타내었다. 소나무림 포장에서의 솔수염하늘소에 대한 스피네토람의 살충효과(방제가)는 서귀포시와 제주시에서 각각 3일차에 포장에서 83.4%와 82.4% 였으며, 7일차에는 100%와 98.6%였다. 소나무림 포장에서의 북방수염하늘소에 대한 살충효과(방제가)는 서귀포시와 제주시에서 각각 3일차에 포장에서 82.4%와 82.5% 였으며, 7일차에는 모두 100%였다.

본 실험 결과, 스피네토람 액상수화제는 솔수염하늘소와 북방수염하늘소에 우수한 방제 효과가 확인할 수 있어, 항공방제 농약으로 등록이 가능할 것으로 판단되었다. 항공 방제 약제는 지상 살포 방식과 달리 비산에 의한 비의도적 잔류, 특히 꿀벌에의 영향이 클 것으로 예상된다. 스피네토람의 꿀벌에 대한 섭식독성은 LD<sub>50</sub>값이 7.32 µg/bee이지만, 접촉독의 LD<sub>50</sub>값은 0.0023 µg/bee으로, 접촉독성이 높은 것을 판명되었다(Abdu-Allah and Pittendrigh, 2018). 이에 해당 약제의 살포 전에 항공 살포에 의한 꿀벌에 대한 위해성을 평가한 후, 살포되어야 할 것이다.

**Table 4.** Susceptibility of *Monochamus alternatus* and *Monochamus saltuarius* to spinetoram sprayed with unmanned helicopter at *Pinus densiflora* forest

Tree	Insect	Place	Treatment	3 days after treatment		7 days after treatment	
				Survival rate (% , mean±SE)	Corrected mortality (% , mean±SE)	Survival rate (% , mean±SE)	Corrected mortality (% , mean±SE)
<i>Pinus densiflora</i>	<i>Monochamus alternatus</i>	S	Spinetoram	15.5 ± 2.2***	83.4 ± 2.4	0***	100
		S	Control	93.3 ± 1.9	-	79.0±3.0	-
		J	Spinetoram	14.5 ± 2.2***	82.4 ± 1.1	1.1 ± 1.1***	98.6 ± 1.4
	<i>Monochamus saltuarius</i>	J	Control	82.2 ± 1.1	-	80.0 ± 3.3	-
		S	Spinetoram	14.4 ± 1.1***	82.4 ± 1.4	0***	100
		S	Control	82.2 ± 1.1	-	80.0±5.1	-
		J	Spinetoram	15.5 ± 2.2***	82.5 ± 2.5	0***	100
		J	Control	88.9 ± 1.1	-	85.6±1.1	-

Place: S: Seogwipo, J: Jeju, \*\*\*: Spinetoram and control are highly significant different (*t*-test, *p* < 0.001)

## Acknowledgments

This work was supported by National Institute of Forest Science (FE0703-2023-01-2023).

## Statements for Authorship Position & Contribution

Kim, J.: National Institute of Forest Science, Research Official; Designed the research, conducted the experiments, analyzed the results, wrote the initial manuscript and reviewed the manuscript.

Nam, S.: Agricultural Corporation JejuChunji, CTO; Conducted the experiments and reviewed the manuscript.

Song, J.: Agricultural Corporation JejuChunji, CEO; Conducted the experiments and reviewed the manuscript.

All authors read and approved the manuscript.

## Literature Cited

- Abbott, W.S., 1925. A method of computing the effectiveness of an insecticide. *J. Econ. Entomol.* 18, 265-267. doi: 10.1093/jee/18.2.265a
- Abdu-Allah, G.A.M., Pittendrigh, B.R., 2018. Lethal and sublethal effects of select macrocyclic lactones insecticides on forager worker honey bees under laboratory experimental conditions. *Ecotoxicology* 27, 81-88. doi: 10.1007/s10646-017-1872-6
- Besard, L., Mommaerts, V., Abdu-Allah, G., Smagghe, G., 2011. Lethal and sublethal side-effect assessment supports a more benign profile of spinetoram compared with spinosad in the bumblebee *Bombus terrestris*. *Pest. Manag. Sci.* 27, 81-88. doi: 10.1002/ps.2093
- Choi, Y.-S., Seo, H.-Y., Jo, S.-H., Whang, I.-S., Park, D.-K., 2017. Selection of systemic chemicals and attractiveness of sunflower to *Ricania* spp. (Hemiptera: Ricaniidae) adults. *Korean J. Appl. Entomol.* 56, 345-350. doi: 10.5656/KSAE.2017.10.0.026
- Dripps, J.E., Boucher, R.E., Chloridis, A.S., Cleveland, C.B., DeAmicis, C.V., Gomez, L.E., Paroonagian, D.L., Pavan, L.A., Sparks, T.C., B., W.G., 2011. The Spinosyn Insecticides. in: Lopez, O., Fernandez-Bolannos, J.G. (Eds.), *Green Trends in Insect Control*. Royal Society of Chemistry. Cambridge, UK, pp. 163-212.
- EU Commission, 2020. *Renewal of Approval: Neonicotinoids*. [https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/approval\\_active\\_substances/approval\\_renewal/neonicotinoids](https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/approval_active_substances/approval_renewal/neonicotinoids) (accessed on 18 December, 2022).
- FAMIC (Food and Agricultural Materials Inspection Center), 2020. *Agrochemical Registration Information System*. <http://www.famic.go.jp> (accessed on 20 December, 2022).
- IRAC (Insecticide Resistance Action Committee), 2019. *IRAC Mode of Action Classification Scheme*. Version 9.3.
- Jung, J.-K., Nam, Y., Kim, D., Lee, S.-H., Lim, J.-H., Choi, W.I., Kim, E.-S., 2020. Tree-crown defoliation caused by outbreak of forest insect pests in Korea during 2020. *Korean J. Appl. Entomol.* 59, 409-410. doi: 10.5656/KSAE.2020.10.0.054
- KFS (Korea Forest Service), 2021. *Statistical Yearbook of Forestry*. Korea Forest Service. Daejeon, Republic of Korea.
- Kim, J., Nam, S., Song, J., 2020. Susceptibility of pine wood nematode vectors to ULV insecticides sprayed from an unmanned helicopter. *Korean J. Appl. Entomol.* 59, 83-91. doi: 10.5656/KSAE.2020.03.0.005
- Kobayashi, F., Yamane, A., Ikeda, T., 1984. The Japanese pine sawyer beetle as the vector of pine wilt disease. *Annu. Rev. Entomol.* 29, 115-135. doi: 10.1146/annurev.en.29.010184.000555
- RDA (Rural Development Administration), 2022. *RDA Notification*, No. 2022-23 (Nov. 29, 2022).
- RDA (Rural Development Administration), 2023. *Pesticide Safety Information System*. <https://www.psis.rda.go.kr> (accessed on 21 February, 2023).
- Sato, H., Sakuyama, T., Kobayashi, M., 1987. Transmission of *Bursaphelenchus xylophilus* (STEINER et BUHRER) NICKLE (Nematoda, Aphelenchoididae) by *Monochamus saltuarius* (GEBLER) (Coleoptera, Cerambycidae). *J. Jpn. For. Soc.* 69, 492-496.
- Sousa, E., Bravo, M.A., Pires, J., Naves, P., Penas, A.C., Bonifácio, L., Mota, M.M., 2001. *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda: Aphelenchoididae) associated with *Monochamus galloprovincialis* (Coleoptera; Cerambycidae) in Portugal. *Nematode* 3, 89-91. doi: 10.1163/156854101300106937
- Sumon, K.A., Rico, A., Ter Horst, M.M.S., Van den Brink, P.J., Haque, M.M., Rashid, H., 2016. Risk assessment of pesticides used in rice-prawn concurrent systems in Bangladesh. *Sci. Total Environ.* 568, 498-506. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.014
- US EPA, 2021. *Chemicals Evaluated for Carcinogen Potential*, Washington D.C.
- Vassilakos, T.N., Athanassiou, C.G., Saglam, O., Chloridis, A.S., Dripps, J.E., 2012. Insecticidal effect of spinetoram against six major stored grain insect species. *J. Stored Prod. Res.* 51, 69-73. doi: 10.1016/j.jspr.2012.06.006
- WHO (World Health Organization), 2009. *The WHO recommended Classification of Pesticides by Hazard and Guidelines to Classification*. WHO. Stuttgart, Germany, p. 78.