

무인항공기를 활용한 유인항공기용 작물보호제에 대한 소나무재선충 매개충의 약제 감수성

김준헌* · 남상준¹ · 송진영¹

국립산림과학원 산림병해충연구과, ¹농업회사법인(주)제주천지

Susceptibility of Pine Wood Nematode Vectors to ULV Insecticides Sprayed from an Unmanned Helicopter

Junheon Kim*, Sangjune Nam¹ and Jinyoung Song¹

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

¹Agricultural Corporation JejuChunji, Jeju 63036, Korea

ABSTRACT: We assessed efficacy of spraying pesticides from an unmanned helicopter to control two insect species, *Monochamus alternatus* and *M. saltuarius*, which are vectors of pine wood nematodes. Control efficacy of thiacloprid FL (33×), acetamiprid ME (33×), and flupyradifurone SL (33×) was determined by placing caged insects in the canopy of pine trees (*Pinus* sp). Water-sensitive paper was used to record the spray pattern of pesticide droplets and the degree of coverage; furthermore, we investigated peripheral scattering due to spraying. The three pesticides showed > 96% control efficacy against the targeted vectors, and pesticide droplet spray patterns were similar. Peripheral scattering was observed up to 20 m in front and 10 m to the left, right, and behind the targeted area. The coverage index of all the directions at 5 and 10 m distance was 6-7 and 2, respectively.

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

초록: 본 연구에서는 소나무재선충을 매개하는 매개충 솔수염하늘소와 북방수염하늘소에 대하여 무인항공기(무인헬리콥터)를 이용하여 유인항공용 방제 약제의 약효 및 약해를 조사하였다. 약효는 소나무와 잣나무의 수간을 3등분한 곳에 대상 곤충을 케이지에 넣어 매달아 두어 살충효과를 조사하였다. 시험약제로는 티아클로프리드 액상수화제, 아세타미프리트 미탁제, 플루피라디퓨론 액제를 각각 33배로 희석하여 살포하였고, 감수지를 이용하여 살포 약제의 낙하입자를 측정하고 피복도를 조사하였다. 약제 살포에 의한 주변 비산거리 및 비산량을 조사하였다. 세 약제 모두 솔수염하늘소, 북방수염하늘소에 대하여 96%이상의 우수한 살충 효과를 보였다. 낙하입자 분석 결과 낙하입자는 균일한 양상을 보였다. 주변 비산 현상 분석 결과, 약제 살포시 무인헬리콥터 진행방향으로 20 m의 비산을 보였고, 좌우, 후방으로 10 m의 비산이 확인되었다. 낙하입자수에 의한 비산량 조사 결과, 모든 방향에서 5 m내에서 낙하입자지수 6-7이었고, 10 m지점에서는 낙하입자지수 2를 기록하였다.

검색어: 무인항공기, 무인헬리콥터, 솔수염하늘소, 북방수염하늘소, 항공방제

소나무재선충병은 1988년 부산 금정산 지역에 최초로 발생하여 피해지역이 2019년 4월 기준으로 전국 117개 시,군,구로 확대되고 있다. 발생 피해목 본수는 2014년 218만본에서 2019년 49만본으로 감소하였다(KFRI, 2007; Korea Forest Service, 2020).

스스로 이동능력이 없는 소나무재선충(*Bursaphelenchus*

xylophilus)은 *Monochamus* 속(Coleoptera: Cerambycidae)의 하늘소를 매개충으로 하며, 이들이 성충으로 우화 탈출하면서 건전목의 신초를 후식하거나, 산란할 때 발생하는 수피의 상처 부위를 통하여 전파된다(Kobayashi et al., 1984; Sato et al., 1987; Naves et al., 2001).

우리나라에서는 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*)와 북방수염하늘소(*M. saltuarius*)가 매개충으로 알려져 있으며, 남부지방에서는 주로 소나무가 솔수염하늘소에 의해 피해를 입

*Corresponding author: junheonkim@korea.kr

Received January 28 2020; Revised March 4 2020

Accepted March 25 2020

고 있고, 중부지방에서는 주로 잣나무가 북방수염하늘소에 의해 피해를 입고 있다(KFRI, 2007).

소나무재선충병 방제를 위해 피해목을 제거한 후 훈증, 파쇄 소각 처리를 하여 소나무재선충 및 매개충을 제거하거나, 예방 나무주사를 이용하여 소나무재선충의 침입을 방지하고 있다. 또한, 매개충의 밀도를 줄이기 위하여 유인헬기를 이용한 항공 방제로 년 2~3회 티아클로프리드 또는 아세타미프리드를 살포하고 있다(Korea Forest Service, 2015).

현재 소나무재선충 매개충 방제 약제는 유인헬기용으로만 등록되어 있다(RDA, 2020). 최근 농약허용물질목록관리제도(Positive List System; PLS)가 시행됨에 따라, 유인헬기에 의한 항공방제는 비산에 의한 비의도적 오염 문제의 가능성이 제기되고 있다. 무인항공기는 유인헬기에 비하여 비산거리가 짧으며, 비산이 적어(Lee et al., 2018), 무인헬리콥터와 함께 정밀 방제가 가능할 것으로 예상되어, 유인헬기 항공방제로 인한 비의도적 오염 문제를 줄일 수 있으리라 생각된다.

무인항공기는 무인헬리콥터와 무인멀티콥터(드론)을 포함하는데, 무인헬리콥터와 무인멀티콥터는 농촌진흥청의 농약 및 원제의 등록기준에 의하여 동일한 기준이 적용된다(RDA, 2018). 무인항공기의 산림방제의 적용에 있어서, 산림방제약

제 살포 용량, 살포폭, 비행 시간 등과 인력배치와 효율성을 고려하였을 때, 무인헬리콥터가 방제에는 더 효율적으로 판단된다. 그러나, 무인항공기는 기체에 따라 비행 고도, 속도, 하향풍, 살포압력, 분사각, 약제비산 등 여러 가지 부분에서 차이점이 존재하기 때문에, 실증 시험을 통하여 약제의 효과를 검정하고 유인헬기와 구별되는 무인항공기의 사용기준이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 소나무재선충 매개충(솔수염하늘소, 북방수염하늘소)에 등록된 ULV (Ultra Low Volume; 초미립자) 약제를 대상으로 소나무 및 잣나무에서의 소나무재선충 매개충에 대한 실증시험을 통해 약효 및 약해를 검정하여 무인항공기의 사용기준이 될 수 있는 근거자료를 제시하고자 한다.

재료 및 방법

시험포장

소나무림에서의 솔수염하늘소 및 북방수염하늘소에 대한 약제 시험은 제주특별자치도 제주시 애월읍 유수암리와 서귀포시 안덕면 사계리 소재 소나무림에서 수행되었고, 잣나무림에서의 북방수염하늘소에 대한 약제 시험은 강원도 춘천시 동

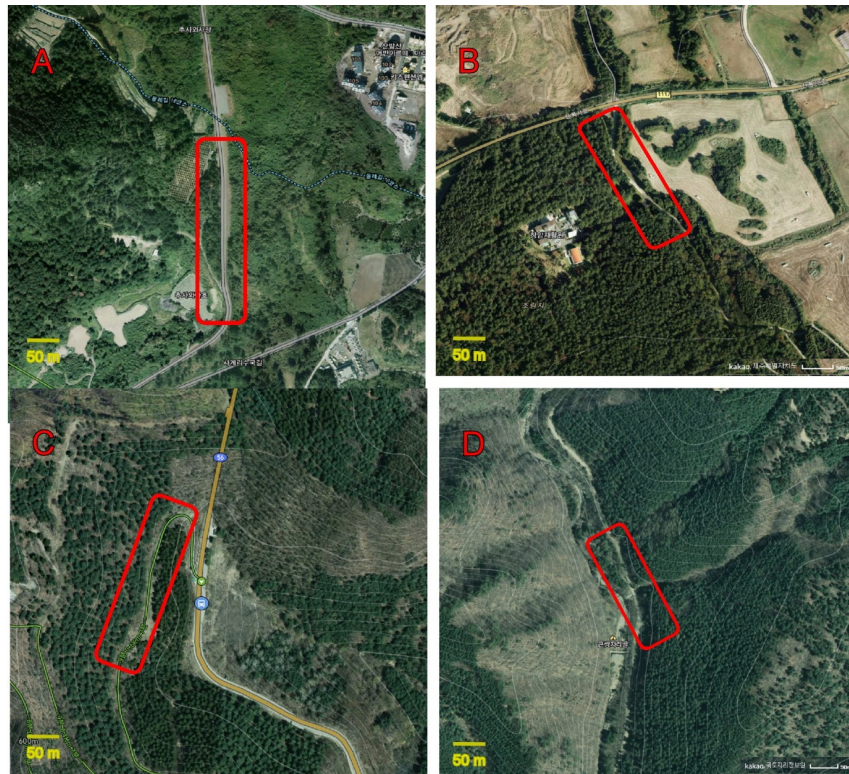


Fig. 1. Locations of pesticide spraying from an unmanned helicopter. A: Seogwipo, Jeju B: Jeju, Jeju C: Chuncheon, Kangwon, D: Hongcheon, Kangwon.

면 및 홍천군 화촌면 소재 국유림의 잣나무림에서 수행되었다. 시험포장의 규격은 각각 $7.5 \times 40 \text{ m}^2$, 총면적 1250 m^2 , 구당 면적 300 m^2 이며, 각 구간에는 10 m의 완충 지대를 설정하였다. 모두 단구제 3반복 시험을 할 수 있도록 구획하였으며, 포장시험지는 Fig. 1과 같다. 소나무와 잣나무는 10년생 이상으로 높이가 15 m 이상이었다. 살포된 약제의 낙하입자 분석을 위해 시험포장에 감수지(water and oil sensitive paper, $76 \times 52 \text{ mm}$, TeeJet Technologies, Louisville, KY)를 X자 형태로 시험포장 내부에 배치하였다(RDA, 2018). 약해 조사는 경우, 기준량은 약제살포구내의 시험곤충을 설치하지 않은 소나무와 잣나무를 선정하여 조사하였고, 배량은 $7.5 \times 20 \text{ m}^2$ 의 면적에 살포하여 조사하였다. 두 포장 모두 약제 처리 전 및 처리 후 7일까지 약효·약해 시험에 영향을 줄 만한 기상 상황은 없었으며, 시험포장 기상상황은 Table 1와 같다. 실증시험 시 서귀포 포장에 0.1

mm의 강우가 기록되었으며, 약제 살포는 비가 오지 않을 때 실시하였다.

시험곤충

본 연구에 사용된 솔수염하늘소 및 북방수염하늘소는 오상킨섹트(구리, 경기)에서 사육한 성충 개체 또는 솔수염하늘소 및 북방수염하늘소에 감염된 피해목으로부터 우화된 성충 개체를 소나무를 기주로 사육한 것이다($24 \pm 2^\circ\text{C}$, $60 \pm 5\% \text{ RH}$, 14L:10D). 시험 곤충은 망에 정착하게 하기 위하여, 약제 살포 1일전 망(length 35 cm, diameter 15 cm)에 넣어 두었다(Fig. 2A). 각 망에는 성충 10마리를 소나무 가지와 함께 넣고, 소나무 혹은 잣나무의 수간을 3등분한 각 위치에 달아 두었다(Fig. 2B). 처리 후 성충은 망에 넣어 두고, 3일과 7일차에 생충수를

Table 1. Weather data at the test plot during the experimental period

Date	Location	Temperature ($^\circ\text{C}$)			Rainfall (mm)	Wind direction	Wind velocity (m/sec)	Remark
		Low	High	Mean				
Jul. 2.		19.8	23.4	21.6	0.0	-	-	-
Jul. 3.		20.7	25.1	22.0	0.1	NW	1.7-2.0	Sprayed
Jul. 4	Jeju	19.0	27.3	23.2	0.0	-	-	-
Ju. 5.		21.6	29.2	24.7	0.0	-	-	-
Jul. 11.		21.6	27.2	23.2	0.0	-	-	-
Jul. 24.		25.3	29.6	26.7	0.5	-	-	-
Jul. 25.	Kangwon	25.2	26.4	29.4	0.0	SW	1.2	Sprayed
Jul. 26		25.6	27.2	25.6	70.0			
Aug. 1.		23.7	27.2	25.6	0.0	-	-	-

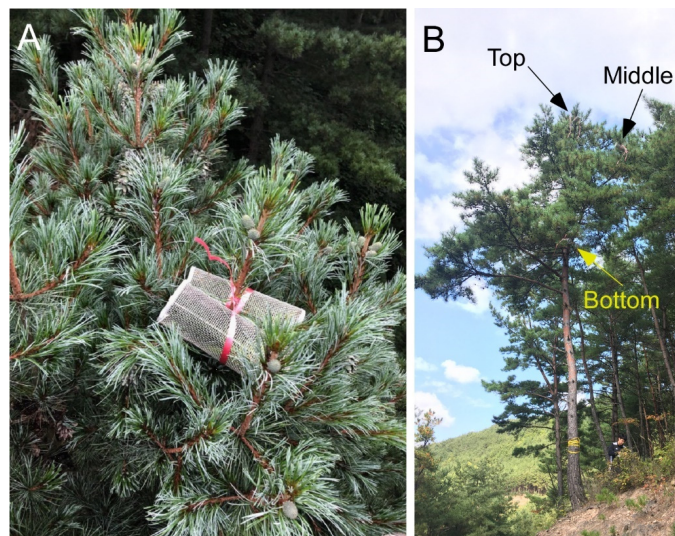


Fig. 2. Experimental set-up (A: caged insects; B: position of a cage on a tree).

조사하였으며, 붓으로 자극하였을 때 움직임이 있는 개체만 살아있는 것으로 간주하였다.

시험약제

시험에 사용한 약제는 총 3종으로 티아클로프리드(thiacloprid) 액상수화제, 아세타미프리트(acetamiprid) 미탁제, 플루피라디퓨론(flupyradifurone) 액제이다. 이들은 소나무재선충 매개충에 대해 ULV용으로 등록된 약제로 유인항공기 방제에 사용되고 있다. 시험약제들의 제형, 유효성분, 살포 희석 농도 및 추천 희석농도는 Table 2과 같다. 약제처리는 수목 캐노피(canopy) 기준 4 m 이상의 상공에서 15 km/h의 비행속도로 약제를 평행 살포하였다.

무인헬리콥터

시험에 사용된 무인헬리콥터는 야마하에서 제작한 YAMAHA FAZER로서 규격은 총길이 3,665 mm (L) × 770 mm (W) ×

1,078 mm (H), 주날개 직경 3,115 mm. 꼬리날개 직경 550 mm, 중량 24 Kg, 살포기는 Yamaha L-43이며, 노즐(TXVK-26, Teejet)은 4개로, 12 L 약제통 총 2개를 탑재할 수 있다. L43 살포기는 토출압력 1.4 Bar에서 16 L/ha의 살포량을 가지며, 노즐에 걸리는 압력은 5-7 bar이다. 비행조절은 Yamaha attitude control system II (YACS II)이며, 산림분야의 경우 약 1 ha의 면적을 8분 내외로 방제할 수 있다.

무인헬리콥터의 살포에 따른 비산거리 및 비산량

비산거리 및 비산량에 대한 정보를 수집하기 위해, 평지에서 비행방향의 좌(L), 우(R), 전(F), 후(r), 후우(rR), 후좌(rL) 방향에 0.3, 1, 5, 10, 30 m마다 감수지(76 × 52 mm, TeeJet Technologies)를 설치(6 direction × 5 water sensitive papers/direction) 하고, 분산조사지표를 통하여 결과를 분석하였다. 감수지는 Fig. 3A와 같이 설치하였다. 위의 약제실험과 동일한 무인헬리콥터와 살포기를 이용하여, 아세타미프리드를 살포하였다. 비행 고도는 3-5 m였으며, 시속 15 km로 20 m 비행하였다.

Table 2. Data on insecticides used in the experiment

Common name	Active ingredient (%)	Formulation	Sprayed dilution	Recommended dilution
Thiacloprid	10	Flowable, FL	× 33, 5L/10a	× 33, 5L/10a
Acetamiprid	10	Microemulsion, ME	× 33, 5L/10a	× 200, 5L/10a
Flupyradifurone	17.09	Soluble Liquid, SL	× 33, 5L/10a	× 33, 5L/10a

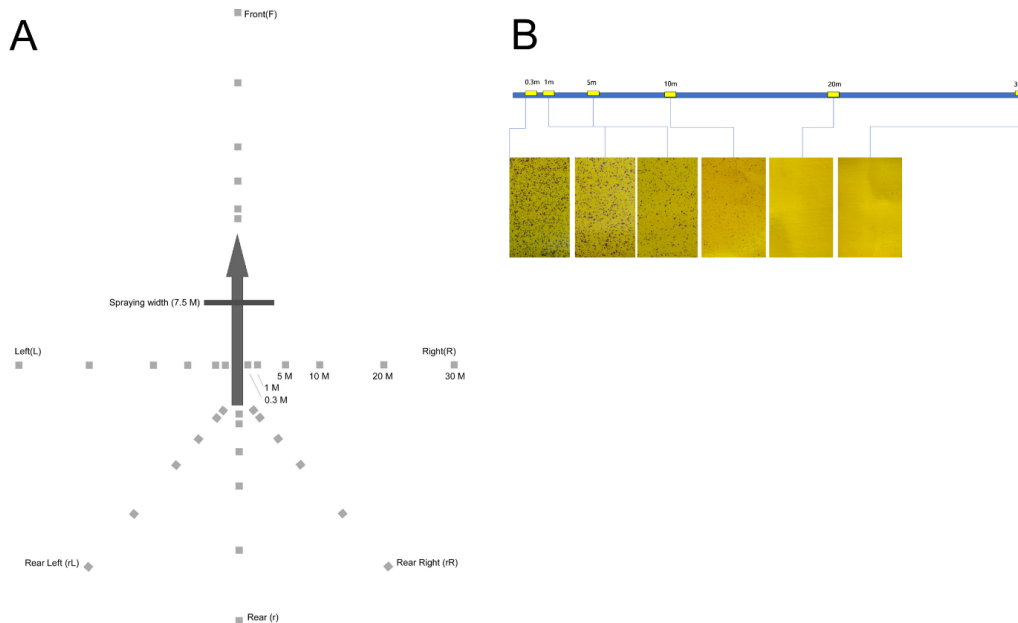


Fig. 3. Assessment of peripheral scattering during pesticide spraying; A: placement of water-sensitive papers (gray squares); the arrow indicates flight direction; B: exemplary drop dispersion pattern at the rear (r) position.

통계처리

소나무재선충 매개충에 대한 무인헬리콥터용 약제의 방제 효과의 유의성을 검정하기 위해 JMP (SAS Institute)를 이용하여 생충율을 arcsine으로 변환하여 Tukey의 다중검정을 실시하였다. 생충율(\pm 표준오차, SE)은 변환전의 값으로 나타내었다. 수간내 위치에 따른 약제 효과는 수간내 상, 중, 하의 위치에 설치한 망실에서의 매개충 살충율을 약제별로 비교하여 검증하였다. 장소에 의한 영향이 없었고(Table S1, S3), 7일차는 각 약제별, 위치별 생충율의 차이가 적어 분석되지 않았다. 이에 3일차 생충율을 약제별로 위치에 따른 살충효과를 분석하였다. 또한 감수지를 이용한 약제의 낙하입자 분석을 위해 ImageJ (National Institute of Health)를 사용하여 피복도(coverage)를 측정하였다.

결과 및 고찰

소나무재선충 매개충에 대한 살충제 감수성은 Tables 3~5에 나타내었다. 서귀포시 소나무림 포장에서 솔수염하늘소에 대한 티아클로프리드, 아세타미프리드, 플루피라디푸론은 살포에 따른 살충효과는 3일차에 98.9%, 98.5, 92.8%였고, 7일차에는 100%, 100%, 98.6%의 방제가를 보였다.

제주시 소나무림 포장에서 티아클로프리드, 아세타미프리드, 플루피라디푸론의 살충효과는 3일차 100%, 96.5%, 95.4%

였고, 7일차에는 모두 100%의 방제가를 보였다(Table 3). 소나무림 포장에서 북방수염하늘소에 대한 티아클로프리드, 아세타미프리드, 플루피라디푸론의 방제효과는 3일차에 서귀포 포장 92.8%이상 제주 포장 95.2%이었고, 7일차에 두 포장 모두 98.6%의 이상의 방제가를 보였다(Table 4). 잣나무림 포장에서의 북방수염하늘소에 대한 세 약제의 방제 효과는 춘천 포장에서 3일차 90.6% 이상, 7일차 96.2% 이상이었고, 홍천 포장에서는 3일차 93.2% 이상, 7일차 98.8%이상의 방제가를 보였다 (Table 5).

이 실험의 결과, 세 약제 모두 솔수염하늘소와 북방수염하늘소에 대한 방제 효과가 우수함을 확인할 수 있었다. 플루피라디푸론은 다른 두 약제에 비하여 살충효과가 조금 낮았지만, 3일차 90.6% 이상, 7일차 96.2%이상의 방제가로 다른 두 약제와 통계상 유의한 차이는 없었다. 처리 7일 후 기준량(33배) 및 배량(16배)에서의 소나무와 잣나무의 약해는 발생하지 않았다.

수간의 상, 중, 하 위치에 따른 약제별 살충효과를 확인한 결과, 티아클로프리드, 아세타미프리드, 플루피라디푸론 모두 위치에 따른 살충효과의 차이는 없었다(Table 6).

농업용 무인헬리콥터의 약효·약해 시험의 경우, 시험곤충의 위치를 특별히 규정하고 있지 않다. 산림병해충 방제의 경우, 수목의 수고가 높고, 해충이 수간에 어느 곳에서나 분포가 가능하기에 약제가 수간 내 고루 살포되어야 한다. 이에, 산림용 무인헬리콥터의 약효·약해 시험의 경우, 시험곤충의 위치를 수간 내 고루 분포시킴으로 약제가 수간 고루 살포되어 약효를 나타

Table 3. Susceptibility of *Monochamus alternatus* to insecticides sprayed from an unmanned helicopter in a *Pinus densiflora* forest

Place	Insecticide	n ¹	3 days after treatment		7 days after treatment	
			Mean survival rate (%)	Corrected mortality (%)	Mean survival rate (%)	Corrected mortality (%)
Seogwipo	Thiacloprid	3	1.1 \pm 1.1b ²	98.9 \pm 1.1	0b ²	100
	Acetamiprid	3	1.4 \pm 1.0b	98.5 \pm 1.1	0b	100
	Flupyradifurone	3	6.6 \pm 1.9b	92.8 \pm 2.2	1.1 \pm 1.1b	98.6 \pm 1.4
	Control	3	93.2 \pm 1.9a	-	83.4 \pm 1.8a	-
	Statistical value	-	$F_{3,8} = 145.99$ $p < 0.0001$	-	$F_{3,8} = 296.61$ $p < 0.0001$	-
Jeju	Thiacloprid	3	0b	100	0b	100
	Acetamiprid	3	3.3 \pm 1.9b	96.5 \pm 2.0	0b	100
	Flupyradifurone	3	13.3 \pm 1.1b	95.4 \pm 1.3	0b	100
	Control	3	96.7 \pm 1.9a	-	88.9 \pm 2.9a	-
	Statistical value	-	$F_{3,8} = 136.04$ $p < 0.0001$	-	$F_{3,8} = 709.23$ $p < 0.0001$	-

¹30 individuals were used for each replicates (n).

²The same letters within a column in each pace are not significant different (Tukey's test at $p = 0.05$).

Table 4. Susceptibility of *Monochamus saltuarius* to insecticides sprayed from an unmanned helicopter in a *Pinus densiflora* forest

Place	Insecticide	n ¹	3 days after treatment		7 days after treatment	
			Mean survival rate (%)	Corrected mortality (%)	Mean survival rate (%)	Corrected mortality (%)
Seogwipo	Thiacloprid	3	1.1 ± 1.1b ²	98.9 ± 1.1	0b ²	100
	Acetamiprid	3	1.4 ± 1.0b	97.4 ± 0.9	0b	100
	Flupyradifurone	3	6.7 ± 1.9b	92.8 ± 2.2	1.1 ± 1.1b	98.6 ± 0.0
	Control	3	93.3 ± 1.9a	-	83.4 ± 1.8a	-
	Statistical value	-	$F_{3,8} = 145.99$ $p < 0.0001$	-	$F_{3,8} = 296.62$ $p < 0.0001$	-
Jeju	Thiacloprid	3	1.1 ± 1.1b ¹	98.8 ± 1.2	0b	100
	Acetamiprid	3	3.3 ± 1.9b	96.2 ± 3.6	0b	100
	Flupyradifurone	3	4.4 ± 1.1b	95.2 ± 1.2	1.1 ± 1.1b	98.6 ± 1.4
	Control	3	93.7 ± 0.4a	-	83.3 ± 1.9a	-
	Statistical value	-	$F_{3,8} = 133.75$ $p < 0.0001$	-	$F_{3,8} = 292.32$ $p < 0.0001$	-

¹30 individuals were used for each replicates (n).²The same letters within a column in each pace are not significant different (Tukey's test at $p = 0.05$).**Table 5.** Susceptibility of *Monochamus saltuarius* to insecticides sprayed from an unmanned helicopter in a *Pinus koraiensis* forest

Place	Insecticide	n ¹	3 days after treatment		7 days after treatment	
			Mean survival rate (%)	Corrected mortality (%)	Mean survival rate (%)	Corrected mortality (%)
Chuncheon	Thiacloprid	3	7.8 ± 1.1b ²	91.8 ± 1.0	0b ²	100
	Acetamiprid	3	2.2 ± 1.1b	97.7 ± 1.2	0b	100
	Flupyradifurone	3	8.9 ± 2.9b	90.6 ± 3.1	3.3 ± 0b	96.2 ± 0.1
	Control	3	94.3 ± 1.2a	-	90.0 ± 1.9a	-
	Statistical value	-	$F_{3,8}=152.75$ $p<0.0001$	-	$F_{3,8}=1395.63$ $p<0.0001$	-
Hongcheon	Thiacloprid	3	2.2 ± 1.1b	97.7 ± 1.10	0b	100
	Acetamiprid	3	2.2 ± 1.1b	97.7 ± 1.1	0b	100
	Flupyradifurone	3	6.7 ± 3.8b	93.2 ± 4.0	1.1 ± 1.1b	98.8 ± 1.2
	Control	3	97.8 ± 1.1a	-	91.5 ± 1.0a	-
	Statistical value	-	$F_{3,8} = 72.33$ $p < 0.0001$	-	$F_{3,8} = 392.53$ $p < 0.0001$	-

¹30 individuals were used for each replicates (n).²The same letters within a column in each pace are not significant different (Tukey's test at $p = 0.05$).

내는지에 대한 검증이 필요하다. 본 실험에서는 수간내 시험군 충을 고르게 분포(상, 중, 하)시킨 후 약효 시험을 처리하였으며, 그 결과, 수간내 위치에 관계없이 약효가 있음이 증명되었는데, 이는 살포약제가 고르게 살포되었다는 간접적인 증거라 할 수 있을 것이다.

살포약제 낙하입자의 분석은 농약 및 원제의 등록기준의 낙

하분산조사법에 의하여 시행하였다(RDA, 2018), 이는 낙하액적의 입경을 크기에 따라 4단계로 구분하고, 단위 면적(cm²)당 낙하액적의 수를 입경 단계별로 차등을 두어 8단계로 구분하여 약제의 낙하 입자 패턴을 구분한다. 실증 시험에 사용된 약제의 입자낙하 양상은 약제에 의해 크게 다르지 않았다(Table 7). 낙하입수는 가장 작은 입경인 A단계가 가장 많았다. A단계

Table 6. Insect survival rate as a function of net positioning and type of insecticides three days after the treatments

Position of insect net	Survival rate (Mean, %)					
	<i>M. alternatus</i> on <i>P. desiflora</i> ¹			<i>M. saltuarius</i> on <i>P. koraiensis</i> ²		
	Thiacloprid	Acetamiprid	Flupyradifurone	Thiacloprid	Acetamiprid	Flupyradifurone
Upper	1.7	1.7	3.3	5.0	1.7	10.0
Middle	0	3.3	6.7	3.3	1.7	8.3
lower	0	1.7	5.0	3.3	6.7	5.0
Statistical value	$F_{2,15}=0.2778$ $P=0.7613$	$F_{2,15}=0.9059$ $P=0.4266$	$F_{2,15}=0.2656$ $P=0.7703$	$F_{2,15}=0.2000$ $P=0.8209$	$F_{2,15}=1.2939$ $P=0.3031$	$F_{2,15}=0.4165$ $P=0.6667$

Position of insect net	Survival rate (Mean, %); <i>M. saltuarius</i> on <i>P. desiflora</i>					
	Jeju			Seogwipo		
	Thiacloprid	Acetamiprid	Flupyradifurone	Thiacloprid	Acetamiprid	Flupyradifurone
Upper	0	0	6.7	0	3.3	10
Middle	0	10	0	6.7	6.7	10
lower	0	0	6.7	3.3	10	6.7
Statistical value	-	$F_{2,15}=3.7005$ $P=0.0898$	$F_{2,15}=2.000$ $P=0.2160$	$F_{2,15}=0.5263$ $P=0.6158$	$F_{2,15}=0.4362$ $P=0.6654$	$F_{2,15}=0.2989$ $P=0.7521$

¹Mortality data from 2 regions (Jeju, Seogwipo) were pooled because it did not affect survival (Table S1).

²Mortality data from 2 regions (Chuncheon, Hongcheon) were pooled, because did not affect survival (Table S3).

Table 7. Coverage index on water-sensitive paper at the experimental sites

Location	Insecticide	Coverage Index (Mean, No of dropped particle/cm)			
		Particle diameter			
		A (0.2 mm)	B (0.5 mm)	C (1.0 mm)	D (1.5 mm)
Jeju	Thiacloprid	6.4	1.9	0.6	0.4
	Acetamiprid	6.6	1.7	0.9	0.7
	Flupyradifurone	6.4	2.0	0.9	0.7
Hongcheon	Thiacloprid	6.7	2.6	1.4	1.0
	Acetamiprid	6.6	2.1	1.4	0.6
	Flupyradifurone	6.1	2.6	1.4	0.6

지수 6의 낙하입자수 64개/cm²인데, 각 약제의 낙하입자 수는 평균 6.1~6.7점대로, 64~127개/cm²의 입자가 낙하한 것으로 판단된다.

주변으로의 비산거리 및 비산량을 시험한 결과, 진행방향 앞쪽(F)으로는 거의 비산하지 않았으나, 진행방향의 뒤쪽(r)으로는 20 m지점까지 비산하여, 10 m지점에서까지만 비산이 확인된 다른 방향에 비해서 조금 더 멀리 비산한 결과를 보였다 (Table 8.) 무인헬리콥터의 살포폭이 7.5 m임을 감안하며, 실제 최대 비산거리는 좌우방향으로 각각 7m 전후로 판단된다. 입자는 모두 0.2 mm의 A 단계였으나, 비산되는 양은 거리에 따라 차이를 보여, 거리가 멀수록 비산되는 양이 적었다. 0.3 m와 1.0 m

는 낙하지수 8였으나, 10 m 지점에서는 낙하지수 1-2로, 32배의 차이를 보였다 (Table 8, Fig. 3B).

비산에 영향을 미치는 가장 큰 요인은 입자크기이며, 이는 입자를 발생시키는 노즐의 종류 따라 다양하게 나타난다 (ASABE, 2009). 이에 무인항공기 살포기는 작물 방제에 적합한 액제 입자 크기로서 체적중간직경 (Volume Median Diameter; VMD) 가 106-235 μm이 되도록 노즐을 결정한다. 사용된 노즐 TXVK-26는 원형살포형 팁 형태로서 살포입자의 크기는 미국농생기술협회 (ASABE) 기준으로 노즐압력이 7 bar 이하일 경우, 살포 입자는 fine VMD 범위의 106-235 μm이며, 8 bar 이상일 경우 살포입자가 very fine으로 61-105 μm의 규격이다 (TeeJet, 2020).

Table 8. Coverage index of peripheral scattering of pesticide droplets sprayed from an unmanned helicopter

Position	Droplet particle and coverage index					
	0.3 ¹	1.0	5	10	20	30
Front (F)	A ²³³	-	-	-	-	-
Rear (r)	A8	A7-A8	A5	A4	A1-A2	
Left (L)	A7-A8	A7-A8	A6-A7	A3	-	-
Right (R)	A7-A8	A7-A8	A6-A7	A3	-	-
Rear Left (rL)	A8	A7-A8	A7	A2	-	-
Rear Right (rR)	A8	A7-A8	A7	A2	-	-

¹Distance (M) of water sensitive paper from the flight direction.

²Discrimination of droplet particle diameter according to RDA (2018).

³Coverage index according to RDA (2018).

본 실험에서 사용된 살포기의 토출압력과 살포량에 의해, 이때 노즐에 걸리는 압력이 5-7 bar이기에, 살포되는 입자크기는 fine 으로 106-235 μm의 VMD를 가지게 된다. 항공방제는 살포 노즐, 살포기 등에 의해 살포 거리, 분무입자 등 살포 양상에 차이를 보인다(Kang et al., 2010; Lim and Song, 2009). 이에 약효에 영향을 미칠 수 있는 노즐, 살포기 와 같은 약제 살포에 영향을 미치는 요인에 대하여 고려해야 할 것으로 여겨진다.

대상 약제중 티아클로프로리드와 아세타미프리드는 네오니코티노이드 계통으로 니코틴 아세틸콜린 수용체와 경쟁적으로 작용하는 기작을 통해 살충효과를 나타내는 성분이다. 티아클로프로리드와 아세타미프리드는 소나무재선충 매개충의 항공방제 약제로 가장 많이 사용되고 있다. 네오니코티노이드 계통의 약제는 꿀벌에 대한 위해성이 보고되어 있고(Woodcock et al., 2017), EU에서는 티아메톡삼, 클로티아니딘, 이미다클로프로리드에 대한 야외에서의 사용을 금지하였다(EU Commission, 2020). 아세타미프리드의 경우, 꿀벌위해성이 적어 EU에서는 사용 갱신을 허용하였다(EFSA, 2016; EU Commission, 2020) 반면, 티아클로프로리드의 경우 내분비교란 우려물질로 최근에는 EU에서는 사용 연장을 금하였다(EU Commission, 2020). 플루피라디퓨론은 *Stemona japonica*에서 유래한 stemfoline 구조를 기초하여 새로운 구조로 뷰텐놀라이트(butenolides)계통이다(Nauen et al., 2015). 그러나, 플루피라디퓨론 역시 니코티노이드 계열과 동일하게 니코틴 아세틸콜린 수용체와 경쟁적으로 작용하는 기작을 통해 살충효과를 나타내는 성분이다(Bell et al., 2020). 현재 소나무재선충 매개충의 항공방제 약제로 등록된 약제는 대부분 네오니코티노이드 계통이거나, 니코틴 아세틸콜린 수용체의 길항제이다. 이는 네오니코티노이드 계통의 꿀벌 위해성과, 동일 작용기작 약제의 반복사용으로 인한 저항성 발현 가능성이 있기에, 소나무재선충 매개충의 약제

의 종류를 확대할 필요가 있을 것으로 판단된다. 이를 위해 향후 약해나 주변 비산문제를 고려한 다양한 실증 시험이 필요할 것이며, 이에 따른 무인헬리콥터 방제제등록시험의 가이드 라인 설정이 필수적이라고 판단된다.

사 사

본 연구를 위해 시험지를 제공하여 주신 제주 도청, 흥천국유림관리소, 춘천국유림관리소 관계자분들과 시험충을 제공하여 주신 산림바이오소재연구소 김동수 박사님, 난대아열대산림연구소 강경식님, 국립산림과학원 최지예, 백승현, 정중현님, 통계에 조언을 주신 국립산림과학원 남영우 박사님께 감사드립니다.

Supplementary Information

Supplementary data are available at Korean Journal of Applied Entomology online (<http://www.entomology2.or.kr>).

Statements for Authorship Position & contribution

Kim, J.: National Institute of Forest Science, Researcher; designed the research, statistical analysis, and wrote the initial manuscript.

Nam, S.: Agricultural Corporation JejuChunji, CTO, designed the research, and conducted the experiments.

Song, J.: Agricultural Corporation JejuChunji, CEO, designed the research.

All authors read and approved the manuscript.

Literature Cited

- American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) 2009. ASAE/ASABE S572.1 Spray Nozzle Classification by Droplet Spectra: St. Joseph, MI.
- Bell, H.C., Benavides, J.E., Montgomery, C.N., Navratil, J.R.E., Nieh, J.C., 2020. The novel butenolide pesticide flupyradifurone does not alter responsiveness to sucrose at either acute or chronic short-term field-realistic doses in the honey bee, *Apis mellifera*. *Pest Manag. Sci.* 76, 111-117.
- European Food Safety Authority (EFSA) 2016. Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance acetamiprid. *EFSA J.* 14, 4610. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4610>.
- EU Commission, 2020. Renewal of approval: Neonicotinoids. <http://ec.europa.eu> (accessed on 19. Jan. 2020).
- Kang, T.G., Lee, C.S., Choi, D.K., Jun, H.J., Koo, Y.M., Kang, T.H., 2010. Development of aerial application system attachable to unmanned helicopter - Basic spraying characteristics for aerial application system. *J. Biosyst. Eng.* 35, 215-223.
- Korea Forest Research Institute (KFRI) 2007. Annual report of monitoring for forest insect pest and diseases in Korea. Korea Forest Research Institute, Seoul, Korea.
- 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.
- Korea Forest Service, 2015. Control Manual for Pine Wilt Disease. (amended on 25 Sep. 2017).
- Korea Forest Service, 2020. http://www.forest.go.kr/newkfsweb/html/HtmlPage.do?pg=/conser/conser_020103.html&mn=KFS_02_02_01_03 (accessed on 21 Jan 2020).
- Lee, S.M., Jung, Y.H., Yoo, E.J., 2018. Residual pattern of pesticide for aerial application in accordance with the corresponding PLS. National Institute of Forest Science, Seoul, Korea.
- Lim, S.-H., Song, B.-H., 2009. Measuring the characteristic of aerial spray by rotary wing. *J. Korean Soc. Aviat. Aeronaut.* 17, 46-51.
- Nauen, R., Jeschke, P., Velten, R., Beck, M.E., Ebbinghaus-Kintscher, U., Thielert, W., Wölfel, K., Hassa, M., Kunz, K., Raupach, G., 2015. Flupyradifurone: A brief profile of a new butenolide insecticide. *Pest Manag. Sci.* 71, 850-862.
- Naves, P., Mota, M.M., Pires, J., Penas, A.C., Sousa, E., Bonifácio, L., Bravo, M.A., 2001. *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda; Aphelenchoididae) associated with *Monochamus galloprovincialis* (Coleoptera; Cerambycidae) in Portugal. *Nematode* 3, 89-91.
- Rural Development Administration (RDA) 2018. Registration Standard of Pesticide. Notification No. 2019-26.
- Rural Development Administration (RDA) 2020. Pesticide Information Service. <http://pis.rda.go.kr/>.
- 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.
- TeeJet, 2020. banding nozzles. www.teejet.com (accessed on 21. Jan. 2020).
- Woodcock, B.A., Bullock, J.M., Shore, R.F., Heard, M.S., Pereira, M.G., Redhead, J., Ridding, L., Dean, H., Sleep, D., Henrys, P., Peyton, J., Hulmes, L., Saráspartak, M. Edwards, M., Gernersch, E., Knäbe, S., Pywell, R.F., 2017. Country-specific effects of neonicotinoid pesticides on honey bees and wild bees. *Science* 356, 1393-1395.