농약과학회지 (Korean J. Pestic. Sci.)
Vol. 23, No. 2, pp. 70-78 (2019)
Open Access https://doi.org/10.7585/kjps.2019.23.2.70
ORIGINAL ARTICLES

Online ISSN 2287-2051
Print ISSN 1226-6183

소나무림에서 무인항공기를 이용한 솔수염하늘소 방제효과

이상명[1] · 정영학[1] · 정찬식[2] · 김동수[3] · 이상길[4] · 이동운[5]*

[1]㈜ 에스엠바이오비전, [2]산림청 남북산림협력단, [3]국립산림과학원 산림바이오소재연구소, [4]순천대학교 수목진단센터, [5]경북대학교 생태환경관광학부 생물응용전공

Control Efficacy of Aerial Spray using Unmanned Aerial Vehicle (Drone and Helicopter) against Japanese Pine Sawyer, *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) in Pine Forest

Sang Myeong Lee[1], Young Hack Jung[1], Chan Sik Jung[2], Dong Soo Kim[3], Sang Gil Lee[4] and Dong Woon Lee[5]*

[1]SMBioVision Co, Jinju, Gyeongnam 52849, Republic of Korea
[2]Korea Forest Service, Inter-Korean Forest Cooperation, Daejeon 35208, Republic of Korea
[3]Forest Biomaterials Research Center, National Institute of Forest Science, Jinju 52817, Republic of Kore
[4]Sunchon National University, Tree Diagnostic Center, Sunchon, Jeonnam 57922, Republic of Korea
[5]Major of Applied Biology, School of Environmental Ecology and Tourism, Kyungpook National University, Sangju, Gyeongbuk 37224, Republic of Korea

(Received on March 8, 2019. Revised on May 16, 2019. Accepted on May 23, 2019)

Abstract The Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* is a vector of pine wood nematode, *Bersaphlenchus xylophilus* in Korea, so there is one of the forest pests to be controlled. Ground control is limited in forest because of limited accessibility, mobility, and wide area. Therefore, there is a great demand for aviation control as an alternative control means. In recent years, there has also been a control using an unmanned aerial vehicle. This study investigated the effect of Japanese pine sawyer control on unmanned aircrafts, drone and unmanned helicopter which are generally used in Korea. The effect of Japanese pine sawyer control spray with thiacloprid 10% suspension concentrate in pine forest was higher than that of drones. The drones showed higher control effect in the middle crown than the upper crown, but unmanned helicopter was no difference in the position of crown in pine tree. The residual amount of unmanned helicopter was higher than that of drones after the aerial spraying of two unmanned aircrafts. The residual amount was more in the surface than on the pine tree. Correlation between thiacloprid detection rate and Japanese pine sawyer mortality after aerial spraying was higher in unmanned helicopter treatment but lower in drone treatment. In case of aerial control in forests, treatment according to the characteristics of forests is considered necessary.

Key words Aerial control, Drone, Forest, Japanese pine sawyer, Unmanned helicopter

<< ORCID
Dong Woon Lee
http://orcid.org/0000-0001-9751-5390

*Corresponding author
E-mail: whitegrub@knu.ac.kr

서 론

무인항공기(UAV; Unmanned aerial vehicle)는 조종사가 탑승하지 않고, 무선 또는 자동 조정에 의해 비행하는 비행체로 무선조종비행체, 드론, 로봇 비행체, 무인항공시스템 등의 이름으로 불리기도 한다(Yanushevsky, 2011). 무인항공기에는 수직이착륙기, 수평이착륙기, 틸트로터나 틸트 윙을 가진 하이브리드형, 덕트 팬형, 헬리콥터 등 다양한 종류들이 있고, 이러한 무인항공기는 목적이나 무게, 비행거리 등에 따라 세분하여 구분하기도 한다(Hassanalian and Abdelkefi, 2017).

무인항공기는 다양한 분야에 적용되고 있는데 비행구역에 따라 실내와 야외로 구분할 수 있고, 임무에 따라 군사용과 민간용으로 구분할 수 있으며 환경에 따라 수중이나 물 표면, 지표, 대기, 우주용 등으로 나눌 수 있다(Hassanalian and Abdelkefi, 2017). 농업분야에서는 수량지도 작성, 화학물질 함량 조사, 생육 지도 작성, 식생 스트레스 관찰, 작물 생육에 미치는 시비효과 분석과 같은 농업예측 분야나 농약의 살포, 병해충 발생 예찰이나 산불 감시 등에 활용되고 있다(Zhang and Kovacs, 2012; Lehmann et al., 2015; Mogili and Deepak, 2018). 또한 무인항공기 영상자료를 이용하여 농업직불제 이행점검 활용이나 농촌마을 개발 계획 및 설계, 가축 살처분 매몰지 모니터링과 같은 곳에 활용 가능성이 제시되고 있다(Park et al., 2015).

농업인구의 감소화와 고령화, 농업기계 분야의 첨단화와 농업기계화의 가속화에 따라 무인항공기를 이용한 항공방제의 수요는 증가 할 것으로 예상되고 있으며 특히 우리나라와 같이 소면적으로 다양한 작물을 재배하고 있는 곳에서의 유용성이 대두되고 있다(Ku et al., 2006; Kang et al., 2010; He et al., 2017).

우리나라에서는 다양한 농림해충 방제를 위하여 항공방제를 실시하고 있는데 주로 농경지에서는 벼 해충 방제를 위하여 6월에서 8월 사이에 1-2회 정도 실시하고 있으며(Jin et al., 2008) 산림의 경우 소나무재선충병의 매개충인 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*) 방제를 위하여 1989년부터 시행해 오고 있고(Kweon et al., 2003), 항공방제용 농약들이 등록되어 사용되고 있다(KCPA, 2019). 그러나 근래에 들어 사용이 증가하고 있는 농업분야 무인항공기를 이용한 농약살포와 관련해서는 농업기술실용화재단에서 농작업의 안전성과 효율성 도모를 위해 드론 성능 검정 항목을 설정하였지만 다양한 병해충들에 대한 구체적인 방제기준은 설정 되어 있지 않다(Choi et al., 2018).

솔수염하늘소는 소나무재선충의 매개충으로 우리나라와 일본, 중국, 대만을 비롯하여 라오스와 베트남 북부지역에 분포한다(Nakamura-Matori, 2008). 우리나라에서 솔수염하늘소는 주로 남부지방에서 소나무재선충을 매개하는 매개충으로 알려져 있는데(Kweon et al., 2006) 이들의 방제를 위하여 성충의 우화시기인 5월에서 7월 사이(Kim et al., 2003)에 항공방제를 실시하고 있다. 그러나 유인 헬리콥터를 이용하는 이러한 항공방제는 인가주변이나 고압선 통과지역에서 적용이 제한적이며 농경지 인접지역에서는 살포 된 약액의 표류와 비산에 의한 비 표적 작물의 오염 등의 문제가 상존하여 살포에 제한점으로 작용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 살포 약액의 표류, 비산이 상대적으로 적어 주변 농작물이나 인축에 대한 부작용이 상대적으로 적은 것으로 알려진 무인항공기의 솔수염하늘소 방제효과를 알아보기 위하여 무인헬기와 드론을 이용하여 수행하였다.

Fig. 1. Experimental site and design of treatment plot in Yangsan, Gyeongsangnamdo.
D; drone applied plot, H; unmanned helicopter applied plot. Number is replication.

재료 및 방법

약제 살포 대상지 선정 및 시험구 배치

무인항공기를 이용한 소나무재선충병 매개충 항공방제 대상지로는 양산시의 협조로 경남 양산시 물금읍 가촌리 1321번지 일대를 선정하였다(Fig. 1).

시험 구역 설정은 대상 시험지의 능선부를 중심으로 드론과 무인헬기 처리구역으로 각각 2 ha씩 구분하였고, 2 ha 구역 면적을 다시 3개의 plot으로 나누었다(Fig. 1). 드론을 이용한 약제 살포구는 북동사면으로 경사도는 10~20°이었고, 무인헬기 이용 약제 살포구는 남서사면으로 경사도는 15~20°였다(Table 1).

시험지는 소나무재선충병 피해지로 훈증 집재목이 산발적으로 존재하고 있었으며 2012년 나무주사가 이루어진 곳으로 상층목이 소나무(*Pinus densiflora*)가 우점하는 해발 59 m 이하의 산록지역 이었다.

Table 1. Geographical characteristics of survey area

UAV type	Latitude	Longitude	Elevation (m)	Azimuth	Slope
Unmanned helicopter	35°18′31.0″ 35°18′35.5″	129°00′13″ 129°00′09″	28~52	SW	15~20°
Drone	35°18′38.5″ 35°18′36.1″	129°00′07″ 129°00′12″	38~59	NE	10~15°

Fig. 2. Tested drone and unmanned helicopter.

Table 2. The characteristics of unmanned aerial vehicle (UAV) for experiment

Major data \ UAV type	Drone (DJI agras MG-1)	Helicopter (YAMAHA FAZER)
Body size (mm)	1,471*471*482 (open) 780*780*482 (fold)	3,665*770*1078 (with rotor) 2,782*770*1078 (without roter)
Tank capacity (*l*)	10	24~30
Spray speed of nozzle	0.5 *l*/min	6 *l*/min
Number of nozzle	4	4
Spray width (m)	4~6	7.5~10
Sprayed particle size (μm)	80~190 (model: TXVK-04)	80~150
Max. flight time (Min)	10 (10 *l* load)	10 (20 *l* load)
Spray capacity/1 time (ha)	0.4~0.6	1.0
Spray amount/day [area (ha) and time (h)]	8~12, 6~8	20~30, 7~8

약제살포 드론 및 무인헬기

무인항공기를 이용한 소나무재선충병 매개충 항공방제 효과 평가를 위해 농업법인 (주)제주천지가 보유하고 있는 무인헬기(Yamaha Fazer, Yamaha)와 하나산림기술(주)에서 보유하고 있는 드론(DJI agras MG-1, DJI)을 이용하였으며 (Fig. 2) 제원은 Table 2와 같았다.

솔수염하늘소 성충 준비와 방제효과 조사를 위한 임내 공시충 설치

시험에 사용된 솔수염하늘소 성충은 국립산림과학원 산림바이오소재연구소와 경남산림환경연구원으로부터 분양 받아 사용하였다. 분양 받은 솔수염하늘소 성충은 insect breeding dish (SPL, Korea)에 한 마리씩 개체 사육하면서 솔잎을 제거한 소나무 1~2년생 가지를 먹이로 제공하였고, 실험에 사용하기 전까지 3일에 한 번씩 먹이를 교체해 주었다. 약제살포 2일 전에 가로 20 cm, 세로 25 cm, 높이 10 cm 크기의

Fig. 3. Test insect cage for insecticidal efficacy (A) and installation on a Japanese black pine tree (B) in experimental forest.

철망 속에 솔잎을 제거한 1~2년생 소나무 가지와 솔수염하늘소 성충 10마리씩을 넣고, 임의로 드론과 무인헬기 처리구로 각각 나누어 표식 하였다.

Table 3. Installation site of tested insect and water sensitive paper for survey of control efficacy of each unmanned aerial vehicle (UAV)

UAV type	Experimental plot	Experimental tree	Location	Elevation (m)	DBH (cm)	Tree height (m)	Height of tested insect (m)	
							Upper	Middle
Drone	I	1	N 35°18′38.5″ E 129°00′12″	52	32	18	14	10
		2	N 35°18′38.5″ E129°00′12″	54	31	18	13	11
		3	N 35°18′38.6″ E 129°00′12″	54	35	18.5	16	13
	II	1	N 35°18′34.9″ E 129°00′09″	49	41	18	13.5	11
		2	N 35°18′34.9″ E 129°00′10″	53	41	18.5	9	13
		3	N 35°18′34.9″ E 129°00′10″	51	40	19	7	13
	III	1	N 35°18′35.1″ E 129°00′07″	46	31	18	8	13
		2	N 35°18′35.2″ E 129°00′07″	47	30	16.5	8	13
		3	N 35°18′35.2″ E 129°00′07″	42	26	15	8	13
Unmanned helicopter	I	1	N 35°18′31.2″ E 129°00′08″	46	30	13	10	8
		2	N 35°18′31″ E 129°00′08″	38	31	15	13	11.5
		3	N 35°18′31.4″ E 129°00′08″	47	25	14	10	8
	II	1	N 35°18′31.5″ E 129°00′09″	41	23	17	14	11
		2	N 35°18′32.6″ E 129°00′10″	35	32	17	13.5	11
		3	N 35°18′31.9″ E 129°00′09″	42	25	16	13	10
	III	1	N 35°18′34.2″ E 129°00′12″	41	24	17.5	13.5	11
		2	N 35°18′35.0″ E 129°00′11″	47	23	16.5	13.5	10
		3	N 35°18′35.0″ E 129°00′12″	33	26	17	13	10

드론과 무인헬기 시험지를 3구역으로 나누어 배치하고 (Fig. 1) 각각의 시험구에서 임의로 세 그루의 나무를 선정하였다. 솔수염하늘소 성충이 10마리씩 들어 있는 철망 케이지를 수관 상부(12~15 m)와 중부(8~11 m)의 두 부분으로 나누어 각각 1개씩 설치하였다(Fig. 3). 철망 케이지 설치는 직접 나무에 올라가 측지에 철망 케이지 끝부분을 노끈으로 묶어 고정 시켰다(Fig. 3). 시험구와 시험목의 위치는 GPS 장비(Explorist 610, Magellan)를 이용하여 좌표를 나타내었다(Table 3).

약제 살포

티아클로프리드 10% 액상수화제에 대한 사용약량은 ULV처리의 경우 30배액으로 10 a당 5 *l*이지만(KCP, 2019)

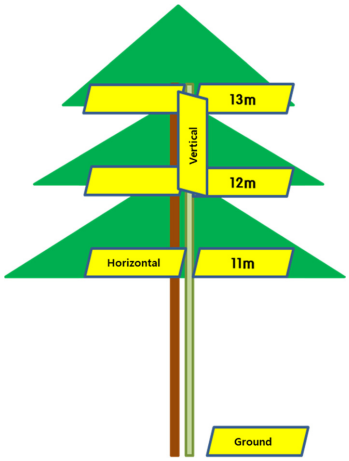

Fig. 4. Mimetic diagram of water sensitive paper setting on pine tree.

Fig. 5. Spray of thiacloprid 10% SC using drone (left) and unmanned helicopter (right) in experimental field.

드론이나 무인헬기의 처리 약량은 규정화 되어 있지 않아 드론이나 무인헬기 방제 업체에서 사용하고 있는 양으로 살포하였는데 드론을 이용한 약제 살포는 티아클로프리드 액상수화제 1 *l*를 40배액으로 희석하여 1 ha에 40 *l*씩 살포하였고, 무인헬기를 이용한 약제살포는 동일약제 1 *l*를 20배액으로 희석하여 1 ha에 20 *l* 살포하였다(Fig. 5).

약제살포는 2017년 7월 18일 수행하였는데 약제처리일 새벽에 0.8 mm의 강수가 있었으나, 약제처리 시간인 오전 8시에서 10시 사이에는 날씨가 맑았다 흐렸다를 반복하였고, 2.9 $^{m}/_{s}$의 남서풍이 불었다. 일 평균 온도는 28.4°C였고, 최저온도는 24.2°C, 최고온도는 35.3°C였다.

약제 잔류량 분석

시료채취 및 조제

약제 잔류량 분석을 위하여 드론과 무인헬기로 약제를 살포한지 4시간 경과 후 수관 상부와 중부의 2-3년생 가지를 채취하였고, 땅에 떨어진 약제의 잔류량을 측정하기 위하여 낙엽층의 솔잎을 모아 지퍼팩에 담았다. 채취한 시료를 실험실로 가져와 솔잎을 제거하고, 전정가위로 잘게 자른 다음 소형분쇄기(후드믹스, (주)대성아트론)로 분쇄하여 시료 300 g을 지퍼팩에 넣어 순천대학교 친환경농업센터에 분석을 의뢰하였다. 또한 다른 한편으로는 가지부와 솔잎부분의 농약 잔류량을 비교 분석하기 위해 채취한 동일 시료를 가지와 솔잎을 구분하여 같은 방법으로 분석하였다.

시료의 추출 및 정제

시료를 대형분쇄기에 넣고 분쇄한 10 g을 정밀히 달아 50 ml 원심분리관에 넣고 내부표준물질(0.1 mg/l triphenylphosphate)을 함유한 아세토니트릴 10 ml를 넣은 후, 10분간 진탕하였다. 원심분리관에 무수황산마그네슘 4.0 (±0.2) g, 염화나트륨 1.0 (±0.05) g, 구연산나트륨이수화물 1.0 (±0.05) g, disodium hydrogencitrate sesquihydrate 0.5 (±0.03) g을 넣고, 1분간 상하좌우로 흔들어 혼합한 후, 원심분리(3,000 rpm/min, 5분)하여 아세토니트릴층과 물층을 분리시킨 후 아세토니트릴층 아래의 시료액을 LC-MS/MS 시료추출액으로 사용하였다.

검량선 작성

10,000 μg/l 수준의 실험용 표준용액을 (1~2) ml 이상 준비한 후 6개의 2 ml 분석용 용기에 동 표준용액을 아세토니트릴으로 희석하여 10, 50, 200, 500, 1,000, 4,000, 10,000 μg/l로 만들어 사용하였다.

약제 입자 낙하수 조사

드론과 무인헬기를 이용하여 약제 살포시 낙하되는 입자의 크기와 단위면적당 낙하수를 조사하기 위하여 52 × 76 mm 크기의 감수지(TeeJet, Switzerland)를 높이별로 설치하였다. 길이 13 m 장대를 이용하여 높이 13, 12, 11 m에 좌우 대칭 수평방향과 12.5 m에 수직방향으로 감수지를 각각 1장씩 부착하였고 지면에도 수평방향으로 1장을 설치하였다(Fig. 4).

배치는 각 구당 세 그루씩 전체 9그루를 대상으로 배치하였고, 지면 배치는 반복당 1개소에 1장씩 3반복 처리하였다. 약제 살포 당일에는 새벽에 내린 비로 인하여 설치한 감수지가 물에 젖는 경우가 발생하여 8월 18일 감수지를 추가 설치한 후 입자의 낙하수를 조사하였는데 드론만 시험을 수행하였다. 일 평균 온도는 26.8°C였고, 최저온도는 23.1°C, 최고온도는 32.0°C였다. 평균풍속은 1.4 $^{m}/_{s}$였으며 강수량은 0.3 mm였으나 조사 당시에는 강우가 없어 영향을 미치지 않았다.

통계처리

약제살포 무인항공기 종류별 솔수염하늘소 방제 효과 시험의 결과는 Abbott (1925)의 방법으로 보정사충율을 구한 뒤 Duncan's multiple range test로 처리 평균간 차이를 분산분석하였다(PROC ANOVA)(SAS Institute, 1999). 약제살포 기종별에 따른 수관 위치별 약제 검출량 자료는 요인분석과(PROC GLM) 처리 평균간 차이를 분산 분석하였다(PROC ANOVA)(SAS Institute, 1999).

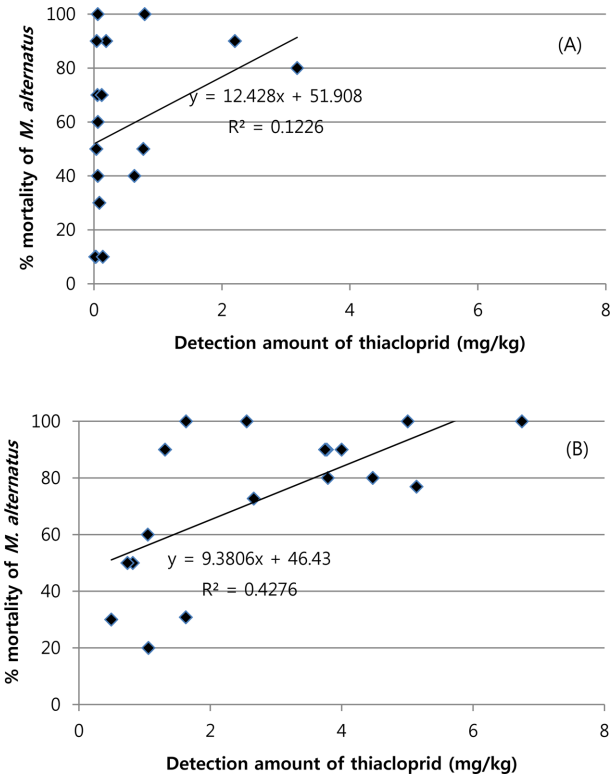

Fig. 6. Correlation between detection amount of thiacloprid 10% SC and mortality of *Monochamus alternatus* adult in pine forest. (A); spray with drone and (B); spray with unmanned helicopter.

결과 및 고찰

매개충 살충효과

솔수염하늘소 성충을 대상으로 티아클로프리드 10% 액상수화제를 살포 한 뒤 살충효과를 조사한 결과 전반적으로 드론에 비하여 무인헬기를 이용한 약제 살포구에서 살충효과가 높은 것으로 나타났지만 통계적 유의성은 없었다(Table 4). 또한 수관상부에 비해 수관중부에서 매개충의 살충효과가 다소 높은 것으로 나타났고, 이러한 경향은 드론 살포구에서 뚜렷한 경향을 보였지만 통계적 유의성은 없었다(Table 4).

티아클로프리드는 솔수염하늘소에 대하여 충체 살포 처리의 경우 처리 3일후에 500-4000배 희석 농도에서 93.3%의 치사율을 나타내었고(Cho et al., 2017), 북방수염하늘소(*M. saltuarius*)에 대해서도 충체 살포 시 4000배 희석 농도까지 93.3%의 높은 치사율을 보이는 약제이다(Han et al., 2008). 그러나 무인방제기를 이용한 방제시험에서는 방제효과가 가장 우수하였던 무인헬기 약제 처리 3일차에서도 솔수염하늘소에 대한 방제효과가 73.6%를 나타내었다. 이는 Jin et al., (2008)이 벼 포장에서 Bell 206 헬리콥터를 이용하여 흰등멸구 방제효과 조사 시 93.2%의 방제효과를 나타낸 결과와 직접적인 비교는 곤란하지만, 방제효과가 상대적으로 낮은 것으로 판단된다. 두 무인방제기의 방제효과는 비록 처리 약제의 희석배수와 처리량에 차이가 있지만 전체적인 유효성분량이 동일한 것을 감안하면 무인헬기가 드론에 비해 솔수염하늘소에 대한 항공방제 효과가 다소 우수하였다. 또한 무인헬기 처리구는 수관 상부와 중부의 방제효과에 차이가 적지만 드론의 경우 두 지점 사이의 방제 효과의 차이가 상대적으로 높게 나타나 방제효과의 안정성 측면에서도 드론에 비하여 무인헬기가 우수한 것으로 판단되지만 약제 살포 대상지의 입지환경이나 기종간의 차이, 노즐 차이 등을 고려한 방제 수단의 강구가 필요할 것으로 생각된다.

약제 검출량 분석

드론과 무인헬기 약제 살포 후 수관부 약제 잔류분석

약제 검출량 분석시 thiacloprid의 회수율은 가지의 경우 90.90~90.47%, 분석법의 검출한계는 0.05 ppm (y=6E+07x+4633.1, R^2=0.9995)이었다.

처리 약제의 검출량은 살포 무인항공기의 종류와 수관 위치별에 따라서도 차이를 보였으며 시험 대상목에 따라서도 차이를 보였다(Table 5). 무인항공기 종류별로는 무인헬기가 드론에 비하여 수관 내 위치와 상관없이 높은 검출량을 보였으나 조사 대상목별로 편차가 커서 통계적 유의성은 없었다(Table 6). 수관 내 조사위치에 따라 검출량의 차이를 보여 두 항공기 모두 지표면에서 검출량이 많았다. 수관 상부와 중부의 경우 무인헬기는 수관 상부에서 검출량이 많았고, 드론은 수관 중부의 검출량이 많아 무인항공기 기종에 따른 수관 내 검출량의 차이가 확인되었다(Table 5, 6).

모든 조사 대상 처리에서 높은 편차를 나타내었는데 무인헬기 처리에서는 지표 낙엽층에서의 약제 검출량은 최소

Table 4. Control efficacy of thiacloprid 10% suspension concentrate on adult of *Monochamus altenatus* depending on different unmanned aerial vehicle in pine forest

Treatment	Mean corrected mortality (%) ± SE					
	1 day after treatment		2 days after treatment		3 days after treatment	
	Upper crown	Middle crown	Upper crown	Middle crown	Upper crown	Middle crown
Drone	18.9 ± 16.8	51.1 ± 23.2	30.0 ± 16.8	57.1 ± 33.0	37.1 ± 7.2	63.4 ± 15.1
Unmanned helicopter	46.7 ± 33.0	38.6 ± 21.5	56.6 ± 33.0	60.0 ± 17.9	67.7 ± 23.0	67.0 ± 5.1

Daily data were statistically analyzed by Duncan's multiple range test but not significant.

Table 5. Analysis of variance for main effects and interaction of unmanned aerial vehicle (UAV) type, detection location in crown, and selected tree on detection amount of thiacloprid in pine tree forest

Source of variance	df	Mean square	F value	Pr > F
UAV type (T)	1	150.33	25.9	<.0001
Detection location in crown (L)	2	31.04	5.35	0.0096
Selected tree (S)	2	80.25	13.83	<.0001
T × L	2	51.33	8.84	0.0008
T × S	2	13.68	2.36	0.11
L × S	4	3.4	0.59	0.6756
T × L × S	4	17.05	2.94	0.0345

Table 6. Detection amount of thiacloprid in different location of tree spray with different unmanned aerial vehicle (UAV)

UAV type	Detection amount (mg/kg) ± standard deviation (Min-Max)		
	Upper crown	Middle crown	Ground surface
Drone	0.44 ± 0.66 (0.02-2.2)	0.51 ± 0.72 (0.04-3.18)	2.63 ± 2.4 (0.11-6.04)
Unmanned helicopter	3.01 ± 1.71 (0.74-6.74)	2.62 ± 1.59 (0.49-4.47)	7.96 ± 5.38 (1.29-24.44)

1.29 mg/kg, 최대 24.44 mg/kg으로 18배 정도의 차이를 보였으며 드론을 이용한 약제 살포구에서의 검출량도 수관상부에서는 최소 0.02 mg/kg, 최대 2.20 mg/kg으로 100배 이상 차이를 보였다(Table 6).

두 무인항공기 종류별에 따라 약제의 수관 내에서 검출량은 수관의 위치뿐만 아니라 선정 대상 나무에 따라서도 많은 편차를 보였는데 이는 산림 내에서 개별 수목들의 생장 차이와 구성 수종들의 차이에 의한 수관 울폐도의 차이 등으로 인하여 살포 된 약액이 조사 대상 위치로 도달되는 양에 차이를 보였기 때문으로 생각된다. 한편 전체적으로 무인헬기에 비하여 드론의 약제 검출량이 적게 나타났고, 무인헬기의 경우 수관 상부의 검출량이 높은 반면 드론에서는 수관 중부의 검출량이 높게 나타났는데 이는 두 기종의 하향풍 속도의 차이에 의한 것으로 생각된다. 드론은 2.5 m 높이에서 4.3 m/sec의 최대 하향풍속을 나타내다가 높이 올라갈수록 하향풍의 속도가 감소하는 경향을 보이고(Choi et al., 2018), 무인헬기의 경우 3 m 높이에서 최대 7.8 m/sec로(Kang et al., 2010) 드론에 비하여 하향풍의 속도가 현저히 빠른데 이러한 요인으로 인하여 검출량에 차이를 보이는 것으로 생각된다. 산림지역은 농경지와 달리 표고차가 심하고, 수종이나 경급, 울폐도 등이 입지별로 상이하기 때문에 벼 경작지와 같이 균일한 조건의 방제약제 살포 조건과는 큰 차이가 있다. Bell 206L 헬리콥터를 이용하여 acetamiprid를 산림에 살포 시 개활지의 경우 평균 낙하량이 4.06 mg/m^{2}로 인접한 소나무 숲의 지표면 낙하량 0.38 mg/m^{2}에 비해 10배 이상 차이를 보여(Kim et al., 2012) 산림 내 서식 수종에 의해 살포 된 약제의 도달량은 현저한 차이가 있었다. 따라서 수고가 높은 나무들이 밀집되어 있는 산림 내 항공살포는 살포 된 약액이 수관 내 고루 도달할 수 있는 방법을 적용하는 것이 필요한데 하향풍의 속도가 빠른 헬기가 드론에 비하여 용이 할 것으로 생각된다.

약제 살포 가지를 채취하여 솔잎과 가지 목질부를 각각 분리하여 시료를 조제한 다음 약제 검출량을 분석한 결과 솔잎에서는 4.40 ± 4.3 mg/kg이 검출되었고, 가지에서는 1.06 ± 1.1 mg/kg이 검출되어 단위량에 대한 검출량은 솔잎에서 많은 것으로 나타났다(Data did not shown). 이러한 현상은 시료의 단위무게에 대한 검출량으로 가지가 솔잎에 비해 무게 당 부피량이 적어 낙하 농약의 표면 부착량이 적었기 때문인 것으로 판단된다.

약제 검출량과 매개충 살충률과의 상관관계를 분석한 결과 드론의 경우 R^2값이 0.12으로 낮은 결정계수를 보였으나 무인헬기의 경우 R^2값이 0.43로 높은 결정계수 값을 보였다(Fig. 6). 무인헬기 처리의 경우 약제 검출량이 증가할수록 살충률이 높아지는 경향이었지만 드론의 경우 무인헬기에 비해 약제 검출량이 상대적으로 적고, 낮은 약제 검출량에서도 10-100%의 다양한 살충률를 보여 검출량의 차이에 따른 살충효과의 차이가 적게 나타났는데(Fig. 6). 이는 솔수염하늘소를 치사 시킬 수 있는 약량이 적기 때문으로 생각되며 배추를 가해하는 주요 해충에 대한 드론의 방제기준 설정 연구에서처럼(Choi et al., 2018) 솔수염하늘소 항공방제를 위한 최소 약량 기준이나 최적 약량 기준에 대한 연구도 추가로 수행되어야 할 것으로 생각된다.

약제 낙하 수 및 낙하입자 크기 조사

드론을 이용하여 티아클로프리드 액상수화제 살포 후 약제의 낙하 입자 수와 입자크기를 조사한 결과 처리 구별 낙하 입자 수는 큰 차이를 보였다(Table 7).

드론을 이용한 약제 살포 1반복 처리구의 경우에는 최소 2개, 최대 53개였고, 2반복 처리구의 경우에도 최소 0에서 최대 45개였다. 그러나 3반복 처리구의 경우에는 1, 2구와

Table 7. Number of spots on water sensitive paper according to different setting location in pine tree forest spray with drone

Experimental plot	Rep.	Number of spot in each height/40 cm^2 water sensitive paper				
		Horizontal face in different height (m)			Vertical face (m)	Ground (m)
		11	12	13	12.5	0
1p	1	2-10	6-7	4-10	1	27
	2	3-39	25-53	6-13	2	31
	3	7-33	12-45	21-21	10	-
2p	1	0-4	3-18	27-29	10	10
	2	0-4	3-9	5-13	1	2
	3	5-41	23-45	6-14	8	76
3p	1	427-467	402-411	413-450	54	108
	2	113-300	263-338	113-263	112	22
	3	41-70	75-133	165-168	1	1

- Missing data.

Table 8. Percentage by spot size falling on water sensitive paper after pesticide spray using drone in pine tree forest

Minimum and maximum percentage by spot size (mean percentage)		
0.2 mm > spot size	0.2 mm ≦ spot size < 0.5 mm	0.5 mm ≦ spot size
0~18.2 (11.6)	63.6~72.7 (67.7)	16.7~27.3 (20.7)

달리 최소 41개, 최대 467개로 구역별 입자 수에 큰 차이를 보였다. 반면 수직 높이에 따른 낙하 수에는 큰 차이를 보이지 않았으며 감수지 수평처리에서 낙하 입자 수가 많을 경우 수직처리 감수지 낙하 입자 수와 지면 낙하 입자 수가 많은 것으로 나타났다(Table 7).

드론을 이용한 약제살포 후 낙하되는 입자의 크기는 대부분 0.2~0.5 mm였고, 0.5 mm 이상이 20.7%, 0.2 mm 이하가 11.6%로 조사 되었다(Table 8).

드론에서 살포 한 약제의 입자 크기나 수는 드론의 약제 살포 높이나 살포 속도에 따라 차이를 보이며(Choi et al., 2018) 무인헬기의 경우도 노즐의 형태나 펌프나 붐의 종류 등에 따라 다양하게 나타난다(Kang et al., 2010). 또한 동일 살포지역 내에서도 낙하량에 차이를 보였는데 유인 헬리콥터를 이용하여 imidacloprid 살포 시 소나무림 내부보다 개괄지에서 처리 약제의 낙하량이 더 많았으며 acetamiprid 살포 시 지표면 4-5 m에 비하여 1-3 m 높이에서 더 많은 잔류량을 보였다(Kim et al., 2012). 따라서 산림 내에서 항공살포를 할 경우 항공기의 기계적 차이뿐만 아니라 임상의 구조나 특성에 의해서도 대상 해충의 서식 공간에 낙하되는 살포 약제의 낙하량에 차이가 날 것으로 생각된다. 그러므로 산림 내에서 항공방제는 이러한 특성들을 고려한 체계적이고 종합적인 방제가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

산림 내에서 무인항공기를 이용한 해충 방제는 지상방제가 어려운 현실과 넓은 면적, 거주지역과의 인접성 등 다양한 요인들로 인하여 필요성이 부각되고 있다. 본 연구는 이러한 필요성에 따라 드론과 무인헬기를 이용한 솔수염하늘소 방제 효과를 검토하였는데 지상방제에 비해서는 상대적으로 낮은 방제 효과를 보였으며 방제효과나 살포 된 약제의 낙하량 등을 고려할 때 드론보다는 무인헬기의 효과가 우수한 것으로 나타났다. 방제효과를 높이기 위해서는 산림의 울폐도나 임분의 구조를 감안한 적절한 항공방제법의 강구가 필요할 것으로 판단되며 비표적지로의 비산과 같은 문제에 대해서도 다양한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

Literature cited

Abbott, W. S. (1925) A method of computing the effectiveness of an insecticide. J. Econ. Entomol. 18(2):265-267.

Cho, W. S., D. -H. Jeong, J. S. Lee, H. K. Kim, S. -T. Seo and G. -H. Kim (2017) Insecticidal activity of Japanese pine sawyer (*Monochamus alternatus*) and toxicity test of honeybee (*Apis mellifera*) using 5 kinds of neonicotinoids. Korean J. Pestic. Sci. 21(1):33-41. (In Korean)

Choi, D. -S., K. -C. Ma, H. -J. Kim, J. -H. Lee, S. -A. Oh and S. -G. Kim (2018) control standards of three major insect pests of Chinese cabbage (*Brassica campestris*) using drones for pesticide application. Korean J. Appl. Entomol. 57(4):347-354. (In Korean)

Han, J. -H., J. -H. You, E. -H. Kim, J. -O. Yang, D. -J. Noh, C. Yoon and G. -H. Kim (2008) Susceptibility of pine sawyer, *Monochamus saltuarius* adults (Coleoptera: Cerambycidae) to commercially registered insecticides. Korean J. Pestic. Sci. 12(3):262-269. (In Korean)

Hassanalian, M. and A. Abdelkefi (2017) Classifications,

applications, and design challenges of drones: a review. Progress in Aerospace Sci. 91:99-131.

He, X., B. Jane, H. Andreas and L. Jan (2017) Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in East Asia. Int. J. Agric. & Biol. Eng. 10(3):18-30.

Jin, Y. -D., H. -D. Lee, H. -S. Shim, S. -G. Lee and O. -K. Kwon (2008) Selection and bioactivity of tank mix combinations of pesticides for aerial application. Korean J. Pestic. Sci. 12(4):403-413. (In Korean)

Kang, T. G., C. S. Lee, D. K. Choi, H. J. Jun, Y. M. Koo and T. H. Kang (2010) Development of aerial application system attachable to unmanned helicopter-Basic spraying characteristics for aerial application system-. J. Biosyst. Eng. 35(4):215-223. (In Korean)

Kim, C. -S., H. -Y. Kwon, K. -A. Son, G. -H. Gil and J. -B. Kim (2012) Fate of acetamiprid and imidacloprid aerially applied to the pine forest. Korean J. Pestic. Sci. 16(4):315-321. (In Korean)

Kim, D. S., S. M. Lee, Y. J. Chung, K. S. Choi, Y. S. Moon and C. G. Park (2003) Emergence ecology of Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae), a vector of pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. Korean J. Appl. Entomol. 42(4):307-313. (In Korean)

Korea Crop Protection Association (KCPA). (2019) A handbook on crop protection. http://www.koreacpa.org. Accessed 10 March 2019.

Ku, Y. M., C. S. Lee, T. S. Soek, S. K. Shin, T. G. Kang, S. H. Kim and T. Y. Choi (2006) aerial application using a small RF controlled helicopter (I)-status and cost analysis-. J. Biosystems Eng. 31(2):95-101. (In Korean)

Kwon, T. S., J. H. Lim, S. J. Sim, Y. D. Kwon, S. K. Son, K. Y. Lee, Y. T. Kim, J. W. Park, C. H. Shin, S. B. Ryu, C. K. Lee, S. C. Shin, Y. J. Chung and Y. S. Park (2006) Distribution patterns of *Monochamus alternatus* and *M. slatuarius* (Coleoptera: Cerambycidae) in Korea. Jour. Korean For. Soc. 95(5):543-550. (In Korean)

Kwon, T., Y. Park, Y. Kwon, M. Song, S. Shin and J. Park (2003) Effects of aerial pesticide application on arthropod communities in pine forests. Jour. Korean For. Soc. 92(6):608-617. (In Korean)

Lehmann, J. R. K., F. Nieberding, T. Prinz and C. Knoth (2015) Analysis of unmanned aerial system-based CIR images in forestry - a new prospective to monitor pest infestation levels. Forests 6(3):594-612.

Mogili, U. M. R. and B. B. V. L. Deepak (2018) Review on application of drone systems in precision agriculture. Procedia Computer Sci. 133: 502-509.

Nakamura-Matori, K. (2008) Pine wilt disease in Korea. In Pine wilt disease: Zhao, B. G., Eds; Springer, Japan. pp.26-32.

Park, J. -K., A. Das and J. -H. Park (2015) Application trend of unmanned aerial vehicle (UAV) image in agricultural sector: review and proposal. CNU J. Agricultural Sci. 42(3): 269-276. (In Korean)

SAS Institute (1999) SAS OnlineDoc, version 8. SAS Institue, Cary, NC.

Yanushevsky, R. (2011) Guidance of unmanned aerial vehicles. CRC Press, Boca Raton, FL. 376pp.

Zhang, C. and J. M. Kovacs (2012) The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. Precision Agric. 13(6):693-712.

소나무림에서 무인항공기를 이용한 솔수염하늘소 방제효과

이상명[1] · 정영학[1] · 정찬식[2] · 김동수[3] · 이상길[4] · 이동운[5]*

[1]㈜ 에스엠바이오비전, [2]산림청 남북산림협력단, [3]국립산림과학원 산림바이오소재연구소, [4]순천대학교 수목진단센터, [5]경북대학교 생태환경관광학부 생물응용전공

요 약 솔수염하늘소는 소나무재선충의 매개충으로 방제대상 산림해충이 하나이다. 산림은 접근성과 이동성의 제약과 넓은 면적으로 인하여 해충 방제시 지상방제가 제한적이다. 따라서 대체 방제 수단으로 항공방제의 수요가 많은데 근래에는 무인항공기를 이용한 방제도 이루어지고 있다. 본 연구는 우리나라에서 대표적으로 활용되고 있는 무인항공기(드론과 무인헬기)의 솔수염하늘소 방제 효과를 소나무림에서 티아클로프리드 10% 액상수화제를 살포한 후 조사하였다. 소나무림에서 솔수염하늘소 방제효과는 드론에 비하여 무인헬기가 다소 높았으며 드론은 수관 상부에 비하여 중부에서의 방제효과가 높았으나 무인헬기는 수관 위치별로 차이가 없었다. 두 무인항공기의 항공살포 후 약제 잔류량을 조사한 결과 드론에 비하여 무인헬기 처리구의 잔류량이 많았으며 수관 내보다는 지표면의 잔류량이 많았다. 항공살포 후 약제 검출량과 솔수염하늘소 치사율과의 상관관계는 무인헬기 처리구에서는 높았으나 드론처리구에서는 낮았다. 항공방제 시 산림의 특성을 고려 한 처리가 필요할 것으로 생각된다.

색인어 드론, 무인헬기, 산림, 솔수염하늘소, 항공방제