



산림에서 항공살포에 의한 살포액 도달량 변화와 이에 따른 꿀벌 위해성

김민중¹ · 강용락² · 정종국^{1,3} · 김준현^{1*} · 정철의^{2,4*}¹국립산림과학원 산림병해충연구과, ²안동대학교 식물의학과, ³강원대학교 산림과학부, ⁴안동대학교 농업과학기술연구소

Variation of Droplets Deposition Rate by Aerial Spray under the Forest and Its Honeybee Risk

Min-Jung Kim¹, Yong Rak Kang², Jong-Kook Jung^{1,3}, Junheon Kim^{1*}, Chuleui Jung^{2,4*}¹Forest Entomology and Pathology Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Republic of Korea²Department of Plant Medicals, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea³Department of Forest Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea⁴Agricultural Science and Technology Research Institute, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea

(Received on February 6, 2023. Revised on March 20, 2023. Accepted on March 22, 2023)

Abstract Forestry aerial spray is the use of manned or unmanned aircraft, or multicopters, to control forest pests. In Korea, this method has been frequently used to manage the vectors of pinewood nematode and outbreak pests in forests. However, concerns about the negative impact of aerial spray on honeybees have been raised, leading to a need for reevaluating registered pesticides for aerial spray and examining honeybee risks when selecting new items for the Korea Forest Service. In forests, the risk impact on honeybees can vary due to the residues and fate of pesticides being affected by the spatial characteristics of the target forest. In this study, we investigated and quantified the deposition rate of aerial spray solutions at different locations in the forest using a multicopter application. Water-sensitive papers were installed at the upper, middle, and lower parts of pine crowns to measure the deposition rate of the aerial spray solution. The droplet deposition rate was also investigated in ground spaces under the crown, semi-opened spaces, and open spaces. The droplet deposition rate from aerial sprays was significantly different depending on the degree of crown coverage. Using the median values of deposition rate, it was estimated that 21.2% of the spray solution could reach the ground covered by the pine crown, compared to the top of the canopy. Based on this result, we evaluated the potential risks of aerial spray on honeybees. The evaluation of honeybee risk in forest space will aid in the selection criteria for pesticides for aerial application. However, even for less risky pesticides, it is important to consider the flowering period of target tree species and lower vegetation, as well as the degree of crown coverage, before conducting aerial control in forests.

Key words Aerial spray, Pesticide residue, Forest space, Hazard quotient, Honeybee risk assessment, Residual time

서 론

국내에서 항공방제란 병해충 방제에 항공기(유인헬기)나 드론(무인헬리콥터, 무인멀티콥터)을 이용하는 것을 말한다(산림청훈령 제 1433호). 산림 항공방제는 넓은 면적의 산림

에서 발생하는 병해충 방제에 주로 이용되며, 특히 우리나라에서는 소나무재선충 매개충 방제의 주요 수단으로 여겨져 왔다(Kwon et al., 2005; Lee et al., 2019; Kim et al., 2020; Suh et al., 2021; Kim et al., 2022). 매년 소나무재선충을 매개하는 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*)와 북방수염하늘소(*M. saltuarius*)의 우화시기에 맞춰 감염목이 존재하는 숲과 주 변부를 중심으로 항공방제가 실시되어 왔지만, 2023년부터는 유인헬기를 이용한 대면적 항공방제는

*Corresponding authors

E-mails: junheonkim@korea.kr (J. Kim)
cjung@andong.ac.kr (C. Jung)

중단되었다(KFS, 2023). 이 밖에도 밤나무림의 복숭아명나방(*Conogethes punctiferalis*)과 같은 농업 해충들이나 생활권 주변 돌발해충을 대상으로도 항공방제가 실시되고 있다(KFS, 2023). 2022년 기준 항공방제 면적은 약 23,082 ha로 2017년 44,752 ha와 비교하면 최근 5년간 감소추세에 있으나(KFS, 2023), 현재 소나무재선충뿐 아니라 돌발해충의 발생 빈도가 증가하고 있는바, 항공방제의 수요는 지속될 것으로 예상된다.

살충제는 곤충의 생리적 반응에 기초하여 개발되었기 때문에 대상 해충 외에도 꿀벌 등 비표적 곤충에도 잠재적인 위해성을 가질 수 있다(Pisa et al., 2015; Hopwood et al., 2016). 무분별한 살충제 살포는 화분매개자인 꿀벌에 치사 및 아치사효과를 줄 수 있으며 결과적으로 봉군의 건강, 양봉 산물의 생산성, 화분매개 서비스에 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Im et al., 2016; Gradish et al., 2019). 특히 2000년대 이후 전 세계적으로 가장 널리 사용된 네오니코티노이드(아세타미프리트, 티아클로프리트 등) 계열 살충제의 꿀벌 위해성이 지속적으로 제기되었다(Eiri and Nieh, 2012; Stewart et al., 2014; Chon et al., 2019; Capela et al., 2022). 이에 따라 국내를 비롯하여 전 세계적으로 네오니코티노이드 계열 살충제의 꿀벌 영향에 대한 재평가가 이루어지고 있으며 유럽에서는 3종의 네오니코티노이드계 살충제(이미다클로프리트, 티아메톡삼, 클로티아니딘)의 사용 제한이 결정되는 등 규제가 강화되었다(Leader et al., 2022). 국내 항공방제에서도 역시 등록 살충제의 재평가와 신규 등록이 필요하며, 따라서 항공살포 특성을 고려한 꿀벌 위해성 평가가 요구된다.

살충제의 환경영향평가는 기본적으로 사용될 물질이 환경영향에 있어 허용되는 수준인지, 이 물질을 사용하였을 때 사전에 설정한 보호 목표를 충족할 수 있는지 파악하는 과정이다(Johnson et al., 2010; EFSA, 2013; Rortais, 2017). 보호 목표는 환경에 대한 허용할만한 수준의 노출을 의미하며, 꿀벌에 대한 보호 목표는 살충제가 급성 또는 만성 노출되었을 때, 꿀벌의 행동과 그에 따른 봉군의 생존 및 발달에 무시할만한 수준의 영향으로 구체화할 수 있다(EPPO, 2010a, 2010b; EFSA, 2013; US EPA et al., 2014). 항공방제를 비롯한 살충제 살포시 꿀벌에 대한 위해성은 살충제의 독성(내재적 요인)과 살포 과정에서 노출하게 될 살충제 농도(외재적 요인)에 의해 결정된다(Liu and Pope, 2020). 즉 살충제의 독성은 위해(Hazard) 요인이며, 살포 상황에서 비표적 생물체의 노출 가능성은 위해의 크기와 결합하여 위해성(Risk, 위험)으로 나타내게 된다(Stahlmann and Horvath, 2015). 따라서 반수치사량(LD₅₀)이 높은 저독성 약제를 선발하더라도 꿀벌이 고농도의 살충제에 노출되는 상황에서는 위해성이 있을 수 있다(Bliss et al., 1935). 그러므로 사전에 항공살포용 살충제가 충분히 안전한 수준인지 평가하는 것은 대

체 살충제 선별 및 등록과 위해성 평가 결과에 따른 영향 완화 전략을 세우는 데에 중요하다. 하지만 산림 항공살포는 살충제의 종류, 분사 노즐의 크기, 살포 고도 등에 영향을 받으며, 특히 산림 환경에 따라 달라질 수 있으므로 위해성의 크기를 사전에 추정하기 어렵다(APVMA, 2017, Wang et al., 2018, Kim et al., 2022).

산림 항공방제 시 목표 수종의 수관부에 도달하는 살충제 양은 산림의 공간 특성에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Wallace et al., 1995; Kim et al., 2020; APVMA, 2017; APVMA, 2019). 이미다클로프리트(Imidacloprid)의 항공방제 시 수목으로 차폐된 지점의 살충제 지표 도달량은 예상 포장 살포량의 11~19%였으며, 페니트로티온(Fenitrothion)은 토양과 낙엽층에 28.4%가 도달하여 예상 살포량보다 작은 양이 수관 아래에 도달하였다(NIFOS, 2005). Lee et al. (2019)은 무인항공기(멀티콥터, 드론)로 티아클로프리트(Thiacloprid)를 살포하였을 때 수관부의 살충제 도달량의 변이가 매우 심하다고 보고하였다. 유인 헬기(Bell 206L)로 아세타미프리트(Acetamiprid)와 이미다클로프리트를 살포하였을 때는 소나무 숲 지표면에서 각각 예상 살포량의 2~4%, 1~3%가 도달했지만, 개활지에서는 8~41%가 도달하여 수관부에 의한 차폐가 산림에서의 살충제 행적에 영향을 미치는 것으로 보고하였다(Kim et al., 2012). 즉, 현행 항공방제 시 대상 산림으로의 살충제 도달량의 변이가 매우 크며, 이에 따라 꿀벌 등의 비표적 생물에 미치는 위해성의 크기가 산림 공간에 따라 달라질 것으로 예상된다. 따라서 산림의 수직적 공간 분포에 따른 살충제 잔류량에 대한 정량적인 분석은 산림 항공방제시 공간에 따른 잠재적 위해성을 추정하는 데에 중요한 정보를 제공할 수 있다. 이에 본 연구에서는 소나무림을 대상으로 수관 분포에 따른 항공 살포액 도달량을 추정하였고, 이를 이용하여 산림 공간에 따른 꿀벌에 대한 살충제 위해성을 모의 평가하였다. 이 결과를 바탕으로 산림 항공방제용 살충제 선정 및 위해 완화 전략 수립에 활용할 수 있는 방안을 제안하고자 한다.

재료 및 방법

항공 살포액 도달량 조사

2021년 10월 18일에 안동시 임하면 천전리 소재 5,000 m²의 소나무림(36°32'08.6"N 128°51'10.1"E)과 안동시 송천동의 3,000 m²의 소나무림(36°32'48.4"N 128°47'36.4"E)에서 멀티콥터를 이용하여 항공 살포액의 도달량을 조사하였다. 두 시험 대상지 모두 경사가 없는 지형으로 흉고직경 20 cm, 수고 10 m 이상의 소나무로 구성되어 있었다. 수관 및 수관 아래의 살충제 도달량의 차이를 조사하기 위해 임하면(안동시) 소나무림에서 15개, 송천동(안동시) 소나무림에서 9개 나무를 각각 선정 후 감수지 (52 mm × 76 mm) (TeeJet,

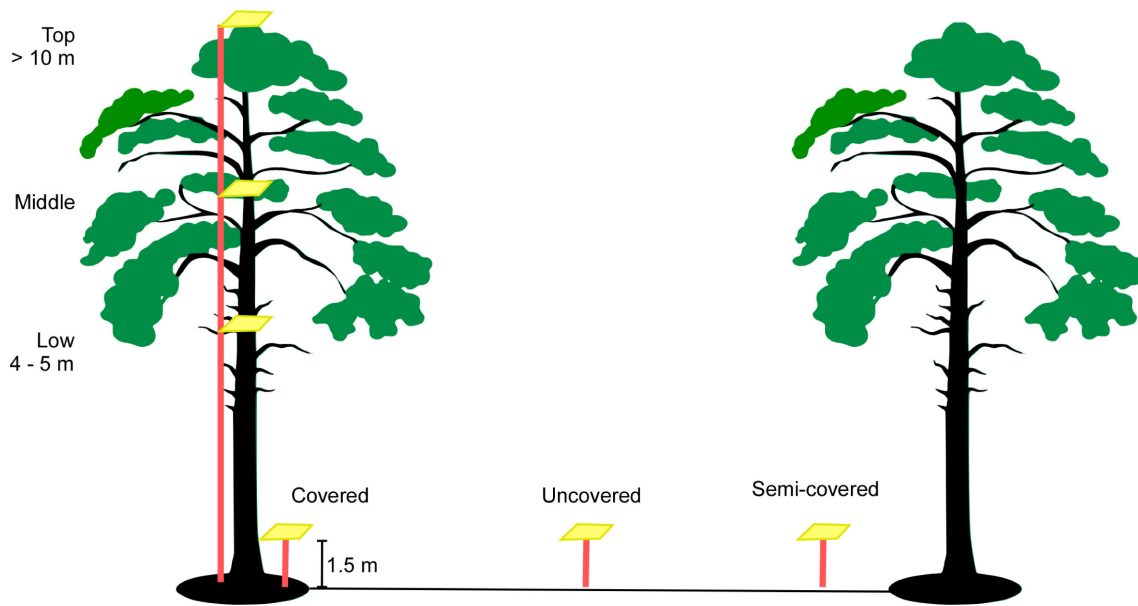


Fig. 1. Schematic diagram for estimation of deposition rate by drone spray. Yellow square depicts water sensitive paper.

IL, USA)를 설치하였다. 수관부의 살포액 도달량 조사는 수관 상부(Top; 수관부 꼭대기로부터 1 m 공중), 수관 내부(Middle; 수관부 중심), 수관 하부(Low; 수관이 끝나는 지중)에서 수행하였다(Fig. 1). 수관 아래 살포액 도달량의 분포는 수관에 의한 울폐율에 따라 달라질 것으로 예상하였다. 따라서 수관 아래 지점(Covered), 수관이 끝나는 지점(Semi-covered), 수관으로 가려지지 않은 개방된 지점(Uncovered)의 지상 1.5 m 위치에 감수지를 설치하였다(Fig. 1). 수관부에는 조사 수목의 높이보다 긴 지지대를 수직으로 세운 후 각 높이(Top, middle, low)당 5개의 감수지를 배치하였다. 살포액 도달량 조사 지점의 높이를 조절하기 위해 5개 감수지를 지면과 수평이 되도록 줄에 고정된 후 지지대 꼭대기에 설치한 도드레를 이용하였다. 수관 아래 지면에서는 각 조사 지점에 지지대를 세운 후 클립으로 지점당 3개의 감수지를 고정하여 설치하였다. 살포액으로는 물을 이용하였다(2L/10a). 살포는 바람이 없는 시간대를 골라 실시하였고, 당시 기온은 17.5°C 내외였다. 멀티콥터는 Intosky사의 E-610 모델(Incheon, Korea)을 사용하였으며, 살포 30분 전에 감수지 배치를 완료하였다. 살포 직후 감수지를 수거하여 변색을 방지하기 위해 지퍼백에 담아 보관하였다. 감수지의 물 부착 면적은 수거한 감수지를 스캔하여 이미지 파일로 만든 후 Matlab 소프트웨어(ver. R2021b, The mathWorks, Inc., Natick, MA)를 이용하여 산출하였다. 감수지에서 물 부착 면적은 *convull* 함수를 이용하여 계산하였다. 감수지에서 색이 변색된 곳을 하나의 입적으로 보고 볼록 다각형(Convex hull)으로 추출한 후 전체 감수지 부분의 픽셀 개수 대비 다각형 내 픽셀 수를 이용하여 살포액 부착률을 계산하였다.

데이터 분석

소나무림 내 수관 위치와 분포가 살포액 부착 비율에 미치는 영향을 파악하기 위해 선형 혼합 모형(Linear mixed effect model) 분석을 수행하였다. 살포 지점들의 주변 환경에 따른 영향을 배제하여 분석하기 위해 조사 나무를 임의 효과로 설정하였고, 감수지 설치 위치(Top, Middle, Low, Covered, Semi-covered, Uncovered)를 고정 효과로 하였다. 분석은 R 4.1.1에서 *lme4* 패키지를 이용하여 수행하였다(R Core Team, 2021). 고정 효과의 통계적 유의성은 Type II Wald chi-square 검정을 이용하였다. 사후검정은 Tukey 다중비교 방법으로 *multcomp* 패키지를 이용하여 수행하였다.

위해성 지수 산출

멀티콥터 실험 결과 값을 바탕으로 플루피라디퓨론(Flupyradifurone) 액제, 스피네토람(Spinetoram) 액상수화제의 항공살포시 산림 공간에 따른 위해도성 지수를 모의 산출하였다. 현재, 플루피라디퓨론은 무인항공기를 이용한 북방수염하늘소 및 솔수염하늘소와 유인헬기를 이용한 솔수염하늘소 방제용으로 등록되어있고, 스피네토람은 무인항공기를 이용한 북방수염하늘소와 솔수염하늘소 방제용으로 살충제 약효시험을 마쳤다(RDA, 2022). 플루피라디퓨론의 포장 살포량 AR (Application rate) ($g \text{ a.i. ha}^{-1}$)은 농약안전정보시스템에 명시된 희석배수와 추천 살포량을 이용하여 구하였다(RDA, 2022) (Table 1). 플루피라디퓨론은 현재 무인항공기와 유인헬기에 적용되는 희석배수와 추천 살포량이 다르므로 꿀벌 노출이 최대가 되는 시나리오를 검토하기 위해 AR 값이 더욱 높은 유인헬기로의 살포 상황을 가정하였다. 스피네토람은 살충제 약효 시험에서 적용했던 희석배수와

Table 1. Recommended usage on selected pesticides and risk index for honey bee in condition of aerial application

Insecticide (Active ingredient; a.i, %)	Dilution rate	Application amount (L/10a)	Application rate (g a.i./ha)	Risk index				RT ₂₅ (Day)
				LD ₅₀		HQ		
				Contact	Oral	Contact	Oral	
Flupyradifurone SL (17.09)	×33	5	258.9	200	1.2	1.3	215.8	< 1
Spinetoram SC (5)	×33	2	30.3	0.024	0.14	1262.5	216.4	3

LD₅₀: 50% Lethal Dose

HQ: Hazard Quotient

RT₂₅: 25% Residue Time

면적당 살포량으로 AR을 산출하였다(Table 1). 평가 대상 살충제들의 반수치사량(LD₅₀) (μg a.i. bee⁻¹)은 Pesticide Properties Database(PPDB)(AERU, 2022)에 명시된 값들을 이용하였다. 위해지수(HQ, Hazard Quotient)는 농약등록시험 절차에 명시된 방법으로 산출하였다(Eq. 1). 엽상잔류시험 결과값인 RT₂₅ (days) (살충제 살포 후 시간 경과별로 수거한 잎에 노출된 꿀벌의 25%가 사망하는 시간)은 제품에 명시된 꿀벌 독성 경고문구로부터 추정하였다(Table 1).

$$HQ = \frac{AR}{LD_{50}} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$AR_B = AR \times \frac{D_B}{D_T} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$HQ_B = \frac{AR_B}{LD_{50}} \quad (\text{Eq. 3})$$

HQ: Hazard Quotient, AR: Application Rate, LD₅₀: 50% Lethal Dose

AR_B: application rate under crown by aerial spray, D_T: Deposition rate at top of crown by aerial spray, D_B: Deposition rate under crown by aerial spray

HQ_B: Hazard quotient under crown by aerial spray

항공살포시 수관 아래에서 살포액의 도달량(AR_B)은 멀티콥터 시험 결과로부터 추정하였으며, 추정에는 수관 상부 도달량의 중앙값(D_T)과 수관 아래 지상부 도달량(D_B)의 중앙값 비를 이용하였다. 수관 아래 살충제 도달량 AR_B는 Eq.

2로 산출하였고, AR_B를 이용해서 수관 아래에서의 위해지수 HQ_B를 구하였다(Eq. 3). RT₂₅가 1일을 초과한 스피네토람에 대해서는 수관 아래 도달한 살충제의 잔류 기간 RT_{25B}를 산출하였다(Eq. 4). RT_{25B}는 스피네토람의 RT₂₅값과 반감기(t_{1/2})를 이용하여 Eq. 4로 추정하였다(Appendix 1). 계산에는 PPDB(AERU, 2022)에 명시된 작물 표면에서의 반감기(2.62일)를 이용하였다.

$$RT_{25B} = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \times \ln \frac{D_B}{D_T} + RT_{25} \quad (\text{Eq. 4})$$

결 과

항공 살포액 도달량

멀티콥터 시험 결과 전체 감수지 면적 대비 물방울이 부착된 면적 비율(%)은 Table 2와 같다. 수관 상부(Top)에서는 감수지 전체 면적 대비 최대 14.4%, 평균 1.39%의 살포액이 도달하였다. 살포액 도달량은 소나무림에서 수관 내 위치와 지상부에서 수관 차폐 정도에 따라서 유의미한 차이를 보였다(Wald $\chi^2 = 60.116$; df = 5; $p < 0.001$) (Table 2). 수관 상부(Top)의 살포액 도달량은 수관 하부(Lower) 및 수관 아래 지점(Covered)에 비해 많았다. 반면에 수관으로 차폐되지 않은 지점(Uncovered)은 수관 상부(Top)의 도달량과 유의미한 차이를 보이지 않았다($p > 0.05$). 살포액 도달량의 변동성은 수관부에서 지표면보다 상대적으로 큰 것으로 나타났다(Table 2). 살포액 도달량의 중앙값을 기준으로 했을 때 수관 아래 지점(0.14%)에서는 수관 상단

Table 2. Droplets deposition rate by multicopter spray according to the location in pine forest

Part	Location	Droplet deposition rate (%)		Coefficient of variation
		Mean ± S.D.	Median	
Within crown	Top	1.39 ± 2.334a ^{a)}	0.66(D _T)	1.68
	Middle	1.03 ± 1.659ab	0.38	1.61
	Lower	0.69 ± 1.235bc	0.26	1.79
Under crown	Uncovered	1.45 ± 1.683a	0.67	1.16
	Semi-covered	0.91 ± 1.066ab	0.40	1.17
	Covered	0.30 ± 0.385c	0.14(D _B)	1.28

^{a)}Different letters in a column indicate significant difference according to mixed effect models (Tukey's test, $p < 0.05$).

Table 3. Adjusted risk index for vegetation under pine crown incorporating estimated deposition rates of two insecticides

Insecticide (active ingredient; a.i, %)	AR _B (g a.i./ha) ^{a)}	Risk index under crown		
		HQ _B ^{b)}		RT _{25B} ^{c)} (days)
		Contact	Oral	
Flupyradifurone (17.09)	54.9	0.3	45.8	< 1
Spinetoram (5)	6.4	267.8	45.9	< 1

^{a)}Application rate (AR) under crown

^{b)}Hazard quotient (HQ) under crown

^{c)}Residual time (RT₂₅) under crown

부(0.66%) 대비 약 21.2%의 살충제가 도달할 것으로 추정되었다(Table 2).

위해성 지수 산출

살충제 도달량의 차이 때문에 수관 아래에서의 꿀벌 성충 위해성 지수는 큰 차이를 보였다. Eq. 1을 이용하여 농약안전정보시스템에 명시된 희석배수와 AR로 스피네토람의 HQ를 계산하였을 때 꿀벌 성충의 접촉과 섭식에서 각각 1262.5, 216.4로 산출되었다(Table 1). 반면에 수관 아래에서 예상되는 살충제 도달량 AR_B를 적용하였을 때는 접촉 및 섭식 HQ_B가 각각 267.8과 45.9로 나타났다(Table 3). 잔류 기간에서도 수관 아래에서의 초기 도달 농도가 낮아 잔류에 의해 꿀벌 접촉 독성이 있을 것으로 예상되는 기간(RT_{25B})이 짧아질 것으로 나타났다(Table 3). 플루피라디퓨론은 농약안전정보시스템에 명시된 희석배수와 추천 AR을 적용하였을 때 HQ가 꿀벌 접촉 및 섭식에서 각각 1.3, 218.5로 계산되었다(Table 1). 반면 수관 아래의 살충제 도달량 추정치로 계산했을 때는 접촉 및 섭식 HQ_B < 50으로 나타났다.

고찰

본 연구에서는 항공 살포액 도달량의 산림 내 분포를 정량화하고 그에 따른 꿀벌 위해성 크기의 변화를 모의 평가하였다. 살포액 도달량의 변이가 수관에 의한 차폐 정도에 따라 크게 달라질 수 있음을 입증하였고, 따라서 울폐율이 높은 산림에서는 하부 식생에 방문하는 꿀벌이 실제 포장 살포량에 의해 추정된 살충제의 양보다 작은 양에 노출될 것으로 나타났다. 멀티콥터 실험 결과 수관 아래에서는 수관 상부 표면에 비해서 21.2%의 살포액이 도달하였다. 이 추정치는 수관의 부피를 고려하지 않고 AR이 수관의 표면에만 도달할 것으로 가정하여 산출한 값이기 때문에, 실제 수관 아래에서는 더욱 낮은 양의 살포액이 도달할 것으로 보인다(NIFOS, 2005; Kim et al., 2012). 하지만 항공살포 살충제가 환경에 노출되는 방식에는 살포액의 입자 크기나 살포 고도, 기상 등 다른 요인들이 영향을 주기 때문에, 보다 정확한 추정을 위해서는 이미 수행되었던 연구 자료들을 포함하여 다양한 살포 시나리오를 검토해야 할 것이다. 수

관으로 가려진 지점과 달리 산림내 개방 공간에서는 수관 상단부와 비슷한 양의 살포액이 도달하였다. 이는 울폐율이 낮은 산림에서 살충제 항공살포시 비산 및 집중 살포를 저감하기 위한 대책이 더욱 요구된다는 것을 암시한다. 산림의 울폐율은 산림 환경과 시간 및 공간 특성에 따라 동적으로 변하는 요인이기 때문에, 이들 요인에 대한 사전 검토가 필요할 것이다.

현재 국내에 등록된 살충제들은 농약관리법의 독성 표시 기준에 따라 HQ ≥ 50인 제품에 대해 꿀벌 독성 문구와 주의사항을 제품 겉면에 표기하도록 하고 있다(RDA, 2022). 꿀벌 독성은 Tier 2의 잔류 독성 시험결과(RT₂₅)를 바탕으로 4단계로 구분하며, 잔류 기간에 따라 개화기 살포를 피하도록 권고하는 것이 주의사항의 핵심이다. 그러나 본 연구에서 제시한 바와 같이 산림 항공방제에서는 농경지와 달리 산림 공간 및 살충제 살포 방식의 특성 때문에 하부 식생을 포함한 다양한 살충제 노출 환경을 검토할 필요가 있다. 기본적으로 꿀벌 독성 문구가 표기되지 않는 살충제(HQ < 50)는 항공방제시 집중적으로 살포되는 경우를 제외하고 꿀벌 성충의 급성 접촉 및 섭식에 있어 산림 공간에서 전반적으로 안전할 것으로 예상된다. 하지만 대상 해충 및 작물(수종)에 적용할 수 있는 살충제의 종류가 제한되고, 많은 제품이 꿀벌 위해성(e.g., HQ > 50)이 있는 것으로 분류되기 때문에 기존 제품들을 대상으로 위해성을 상황별로 세분화하여 평가하고 이에 따른 구체적인 위해 완화 전략을 세우는 것이 필요하다.

본 연구에서는 살충제 항공살포시 산림 공간에 따른 위해성 지수 재평가 방식(Eq. 3)으로 살포액 도달량 비를 이용한 방법을 제안하였다. 이는 꿀벌 독성 평가의 Tier 1 시험으로부터 탐지된 꿀벌 위해성을 재평가(Tier 2)하는 과정이다(EPPO, 2010a, 2010b; EFSA, 2013; US EPA et al., 2014). 본 연구에서는 위해성 재평가를 위해 산림 공간에 따른 살충제 도달량 추정치를 이용하였다. 이 방식은 기존의 위해도 산출 방식 체계 안에서 노출량 정량 수식을 통해 사전에 위해성의 크기를 모의할 수 있다는 장점이 있다. 향후 다양한 산림 환경에서 살포액 도달량을 정량화할 수 있다면, US EPA(2014)에서 제공하는 Bee-REX 모델과 같이 데이터베이스를 기반으로 꿀벌 위해성을 사전에 모의 평가할 수 있

는 시스템이 마련될 수 있다. 특히 살충제의 제형과 노즐의 종류에 따라 살포액 입적의 크기가 달라지므로, 실제 살충제 희석액을 이용한 실험 데이터 축적이 필요하다. 산림 환경 및 공간별 위해성 지수 재평가 방식은 또한 구체적인 위해 완화 전략 수립에 도움을 줄 수 있다. 예를 들어 수관 아래 식생에서도 높은 위해성 지수가 산출된 살충제는 대상 수목의 개화기가 아니더라도 사전에 하부 식생의 종류와 개화기를 검토해야 한다. 이 경우에는 하부 식생과 대상 수목의 개화기를 모두 고려하여 항공방제 시기를 결정해야 할 것이다. 또한 식생의 계절변화와 그에 따른 울폐율 변화에 따른 살충제 차폐효과를 고려하여 항공살포 의사 결정에 활용할 수 있다.

국내외에서 항공 살포용 살충제만을 위한 꿀벌 위해성 평가 가이드라인은 개발되어 있지 않으나, 항공방제 특성을 고려한 위해 완화 전략 수립 기준에 관한 사례는 존재한다. 호주에서는 Risk Quotient(RQ, 위험지수) 값을 이용하는 미국의 가이드라인을 준용하여 평가를 진행하는데, 꿀벌 분공을 보호하기 위해 성충급성접촉 LD₅₀값으로부터 규제 허용 수준(Regulatory acceptable level; RAL) ($\mu\text{g a.i. ha}^{-1}$)을 역으로 산출하고 살충제 항공살포에 따른 풍하거리(downwind distance) 모형을 이용하여 완충 지대 결정에 활용하고 있다(APVMA, 2017, 2019). 본 연구의 위해성 지수 산출 방식은 살포액 도달량 비를 바탕으로 수관 아래 노출량(AR_B)을 정량화하고 위해성의 크기(HQ_B, RT_{25B})를 평가하는 방식이다. 이는 살충제 풍하거리 모형을 이용하여 완충 지대를 결정하는 호주의 가이드라인과 유사하나, 본 연구에서는 살충제의 산림 내 수직적 분포에 중점을 두었다는 점에서 차이가 있다. 호주의 완충 지대 결정 방식은 농경지 항공방제에서 비산에 따른 꿀벌 위해성을 평가하는 방식이다. 따라서 살충제가 목표 농경지에 도달하지 못하고 주변부로 확산할 위험을 평가하는 것으로 볼 수 있다. 반면 산림 항공방제에서 목표지점은 산림의 수관부이므로 수관에 도달하지 못하고 하부 식생으로 도달하는 살충제에 대한 위해성을 모의 평가하였다. 향후 살충제 입자 특성과 산림 환경 특성에 따른 살충제 행적 연구가 필요하며, 축적된 데이터를 바탕으로 체계적인 평가를 할 수 있는 방안이 추가로 요구된다.

현재 소나무재선충 매개충에 대해 등록된 살충제는 35여 종이다(RDA, 2022). 이 중 15%가 항공방제용으로 등록되어 있으며, 원제의 성분은 아세타미프리트, 티아클로프리트, 뷰프로페진, 에마멕틴벤조에이트, 플루피라디퓨론이다. 이 중 플루피라디퓨론을 제외하고는 모두 환경 잔류 기간이 상대적으로 긴 네오니코티노이드 살충제들이다(Simon-Delso et al., 2015). 따라서, 이들 살충제에 대한 꿀벌 만성 독성 평가가 추가로 요구될 것으로 보인다. 예를 들어 티아클로프리트는 HQ < 50인 살충제로 농약관리법의 독성 표시 기준에 따라 꿀벌에 안전한 것으로 표기되어 있으며, 추가적

인 엽상잔류시험이 요구되지 않고 있다. 하지만 급성 접촉 시 꿀벌 성충의 사망률 이외에도 기억력의 감퇴와 만성 접촉 시 외역 활동, 귀소율 및 의사소통에 부정적인 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Tison et al., 2016, 2017). 따라서 잔류 기간이 긴 살충제는 성충만성독성 및 유충 독성을 평가할 수 있는 시험법의 제도화가 필요하다(Paik et al., 2016). 또한 이 평가값들은 항공살포 이후 살충제의 행적 분석(거동 분석), 환경과 지표적 생물에 미치는 영향 분석의 매우 중요한 기초 자료가 될 것이다. 본 연구에서 제안하는 산림 환경 내 살충제 도달량 추정 방식을 기반으로 하여 꿀벌 등 지표적 생물에 대한 위해성 평가를 통해 화분매개자 및 유용 곤충의 보호 기반이 마련되기를 바란다.

Author Information and Contribution

Min-Jung Kim, Forest Entomology and Pathology Division, National Institute of Forest Science, Postdoctoral researcher, <http://orcid.org/000-0001-5949-5296>

Yong Rak Kang, Department of Plant Medicals, Andong National University, Ph.D. student

Jong-Kook Jung, Department of Forest Science, Kangwon National University, Assistant Professor

Junheon Kim, Forest Entomology and Pathology Division, National Institute of Forest Science, Researcher, <http://orcid.org/000-0001-5204-3369>

Chuleui Jung, Agricultural Science and Technology Research Institute, Andong National University, Professor, <http://orcid.org/000-0001-8134-9279>

Conceptualization, Min-Jung Kim, Jong-Kook Jung, Junheon Kim and Chuleui Jung; methodology, Min-Jung Kim and Chuleui Jung; investigation, Min-Jung Kim and Yong Rak Kang; data curation, Min-Jung Kim and Yong Rak Kang; writing-original draft preparation, Min-Jung Kim; writing-review and editing, Min-Jung Kim, Jong-Kook Jung, Junheon Kim and Chuleui Jung; supervision, Junheon Kim and Chuleui Jung

감사의 글

본 연구는 국립산림과학원(Project No. FE0703-2023-01-2023)과 교과부 이공계대학 중점연구소과제(NRF-2018R1A6A1A03024862) 지원으로 수행되었습니다.

이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Appendix: Derivation of Equation 4

시간 t 에서 살충제 농도 N_t 는 살충제 초기농도 N_0 에 대해 지수적으로 감소한다고 가정하면 (1)로 표현할 수 있다. 여기서 λ 는 물질 특이적 붕괴 상수이다.

$$N_t = N_0 \times e^{-\lambda t} \quad - (1)$$

(1)의 양변에 자연로그를 취하면 (2)로 표현할 수 있고, 시간 t 는 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\ln N_t = \ln N_0 - \lambda t \quad - (2)$$

$$\lambda t = \ln\left(\frac{N_0}{N_t}\right) \quad - (3)$$

$$t = \ln\left(\frac{N_0}{N_t}\right) / \lambda \quad - (4)$$

반감기 $t_{1/2}$ 는 초기농도 N_0 가 절반으로 감소하는 시간이므로 (3)에 의해 (5)와 같이 쓸 수 있다. 따라서 상수 λ 는 (6)으로 정의할 수 있다.

$$\lambda t_{1/2} = \ln\left(\frac{N_0}{1/2 \times N_0}\right) = \ln 2 \quad - (5)$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad - (6)$$

시간 RT_{25} 에서 살충제의 농도는 (7)과 같이 표현할 수 있으므로,

$$N_{RT_{25}} = N_0 \times e^{-\lambda RT_{25}} \quad - (7)$$

따라서 초기 농도 조건이 N'_0 으로 다를 때 살충제가 $N_{RT_{25}}$ 가 되기 까지 걸리는 시간 RT'_{25} 은 (8)과 같이 쓸 수 있고, (7)에 의해 (9-10)으로 표현할 수 있다.

$$RT'_{25} = \ln\left(\frac{N'_0}{N_{RT_{25}}}\right) / \lambda \quad - (8)$$

$$RT'_{25} = \ln\left(\frac{N'_0}{N_0 \times e^{-\lambda RT_{25}}}\right) / \lambda \quad - (9)$$

$$RT'_{25} = \frac{1}{\lambda} \times \ln\left(\frac{N'_0}{N_0}\right) + RT_{25} \quad - (10)$$

(6)에 의하여 (10)은 (11)과 같이 쓸 수 있다.

$$RT'_{25} = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{N'_0}{N_0}\right) + RT_{25} \quad - (11)$$

$N'_0 = N_0 \times D_B / D_T$ 라고 가정하면, (11)은 (12)가 된다.

$$RT'_{25} = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{D_B}{D_T}\right) + RT_{25} \quad - (12)$$

Literature cited

- AERU [Agriculture and Environment Research Unit], Pesticide Properties DataBase. URL: <https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/index.htm> (Accessed on 1. Dec. 2022).
- APVMA [Australian Pesticides and Veterinary Medicines Authority], 2017. Roadmap for insect pollinator risk assessment in Australia. Kingston. Australia. p. 52.
- APVMA [Australian Pesticides and Veterinary Medicines Authority], 2019. Spray drift risk assessment manual: Stage one. Kingston. Australia. p. 65.
- Bliss CI, 1935. The calculation of the dosage-mortality curve. *Ann. Appl. Biol.* 22:134-167.
- Capela N, Xu M, Simões S, Azevedo-Pereira HMVS, Peters J, et al., 2022. Exposure and risk assessment of acetamiprid in honey bee colonies under real exposure scenario in *Eucalyptus* sp. landscapes. *Sci. Total Environ.* 840:156485.
- Chon K, Kim B-S, Lee H, Park Y-K, You AS, et al., 2019. Acute and chronic toxicity of Imidacloprid on honeybee larvae. *Korean J. Pestic. Sci.* 23(3):177-186.
- EFSA [European Food Safety Authority], 2013. Guidance Document on the risk assessment of plant protection products on bees (*Apis mellifera*, *Bombus* spp. and solitary bees). *EFSA Journal* 11(7):3295.
- Eiri DM, Nieh JC, 2012. A nicotinic acetylcholine receptor agonist affects honey bee sucrose responsiveness and decreases waggle dancing. *J. Exp. Biol.* 215(12):2022-2029.
- EPPO [European and Mediterranean Plant Protection Organization], 2010a. Environmental risk assessment scheme for plant protection products, Chapter 10. Risk assessment to honey bees. *OEPP/EPPO Bullet.* 40:323-331.
- EPPO [European and Mediterranean Plant Protection Organization], 2010b. EPPO standards PP1/170-Test methods for evaluating the side effects of plant protection products on honeybees. *OEPP/EPPO Bullet.* 40:313-319.
- Gradish AE, van der Steen J, Scott-Dupree CD, Cabrera AR, Cutler GC, et al., 2019. Comparison of pesticide exposure in honey bees (Hymenoptera: Apidae) and bumble bees (Hymenoptera: Apidae): Implications for risk assessments. *Environ. Entomol.* 48(1):12-21.
- Hopwood J, Code A, Vaughan M, Biddinger D, Shepherd M, et al., 2016. How Neonicotinoids Can Kill Bees: The Science Behind the Role These Insecticides Play in Harming Bees.

- The Xerces Society for Invertebrate Conservation, Portland, OR. Pp.76.
- Im JT, Chon KM, Park KH, Choi YS, Lee ML, et al., 2016. Acute toxicity of larval honeybee to the most common pesticides detected in pollen. *J. Apic.* 31(4):273-279.
- Johnson RM, Ellis MD, Mullin CA, Frazier M, 2010. Pesticides and honey bee toxicity-USA. *Apidologie* 41:312-331.
- KFS [Korea Forest Service], 2023. Korea Forest Service: Aerial Control Statistics. URL: <https://www.forest.go.kr> [Accessed on 1. Mar. 2023]
- Kim CJ, Lee R, Xiu Y, Kim M, Shin HJ, et al., 2022. Residual pattern of pesticides drifted by unmanned aerial vehicle (UAV) spraying and drift reduction using maize (*Zea mays* L.). *Korean J. Pestic. Sci.* 26(2):103-120.
- Kim C-S, Kwon H-Y, Son K-A, Gil G-H, Kim J-B, 2012. Fate of acetamiprid and imidacloprid aerially applied to the pine forest. *Korean J. Pestic. Sci.* 16(4):315-321.
- Kim J, Nam S, Song J, 2020. Susceptibility of pine wood nematode vectors to ULC insecticides sprayed from an unmanned helicopter. *Korean J. Appl. Entomol.* 59(2):83-91.
- Kwon T-S, Song M-Y, Shin S-C, Park Y-S, 2005. Effects of aerial insecticide sprays on ant communities to control pine wilt disease in Korean pine forests. *Appl. Entomol. Zool.* 40(4):563-574.
- Leader M, Kim M-J, Li Z, 2022. Risk regulation and mitigation in the Asia-Pacific region. pp. 69-77. In: AASSA (Eds.). Risk assessment of Neonicotinoids in the Asia-Pacific region. KAST, Seongnam, Korea.
- Lee SM, Hung YH, Jung CS, Kim DS, Lee SG, et al., 2019. Control efficacy of aerial spray using unmanned aerial vehicle (drone and helicopter) against japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) in pine forest. *Korean J. Pestic. Sci.* 23:70-78.
- Liu J, Pope CN, 2020. Chapter 21 - Intrinsic and Extrinsic Factors that Can Modify Toxicity, Pp. 285-293. In: Pope CN, Liu J (Eds.). An Introduction to Interdisciplinary Toxicology. Academic Press, Inc. MA, USA.
- NIFOS. 2005, Effects of aerial spray for control of pine wilt disease on pine forest ecosystem, Seoul, Korea. p. 175.
- Paik MK, Im JT, Chon K, Park K-H, Choi Y-S, et al., 2016. Synergistic and antagonistic interactions for pesticide mixtures to honeybee larvae toxicity. *Korean J. Environ. Agric.* 35(4):241-246.
- Pisa LW, Amaral-Rogers V, Belzunces LP, Bonmatin JM, Downs CA, et al., Effects of neonicotinoids and fipronil on non-target invertebrates. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22:68-102.
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- RDA [Rural Development Administration]. 2022. Pesticide Safety Information System. URL: <https://psis.go.kr> (Accessed on 1. Dec. 2022)
- Rortais A, Arnold G, Dorne J-L, More SJ, Sperandio G, et al., 2017. Risk assessment of pesticides and other stressors in bees: Principles, data gaps and perspectives from the European Food Safety Authority. *Sci. Total Environ.* 587-588: 524-537.
- Simon-Delso N, Amaral-Rogers V, Belzunces LP, Bonmatin JM, Chagnon M, et al., 2015. Systemic insecticides (neonicotinoids and fipronil): trends, uses, mode of action and metabolites. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22:5-34.
- Stahlmann R, Horvath A, 2015. Risks, risk assessment and risk competence in toxicology. *Ger. Med. Sci.* 13:1-16.
- Stewart SD, Lorenz GM, Catchot AL, Gore J, Cook D, et al., 2014. Potential exposure of pollinators to neonicotinoid insecticides from the use of insecticide seed treatments in the Mid-Southern United States. *Environ. Sci. Technol.* 48(16):9762-9769.
- Suh DY, Jung J-K, Lee SK, Seo S-T, 2021. Effect of aerial spraying of thiacloprid on pine sawyer beetles (*Monochamus alternatus*) and honey bees (*Apis mellifera*) in pine forests. *Entomol. Res.* 51(2):93-89.
- Tison L, Hahn M-L, Holtz S, Rößner A, Greggers U, et al., 2016. Honey bees' behavior is impaired by chronic exposure to the neonicotinoid thiacloprid in the field. *Environ. Sci. Technol.* 50(13):7218-7227.
- Tison L, Holtz S, Adeoye A, Kalkan Ö, Irmisch NS, et al., 2017. Effects of sublethal doses of thiacloprid and its formulation Calypso® on the learning and memory performance of honey bees. *J. Exp. Biol.* 220:3695-3705.
- US EPA, Health Canada PMRA, California Department of Pesticide Regulation, 2014. Guidance for Assessing Pesticide Risks to Bees. Washington, D.C. USA. p. 59.
- Wallace DJ, Picot JJC, Chapman TJ, 1995. A numerical model for forestry aerial spraying. *Agric. For. Meteorol.* 76(1):19-40.
- Wang J, Lan Y, Zhang H, Zhang Y, Wen S, et al., 2018. Drift and deposition of pesticide applied by UAV on pineapple plants under different meteorological conditions. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 11:5-12.

산림에서 항공살포에 의한 살포액 도달량 변화와 이에 따른 꿀벌 위해성

김민중¹ · 강용락² · 정종국^{1,3} · 김준현^{1*} · 정철의^{2,4*}

¹국립산림과학원 산림병해충연구과, ²안동대학교 식물의학과, ³강원대학교 산림과학부, ⁴안동대학교 농업과학기술연구소

요약 산림 항공방제는 병해충 방제에 유인 항공기나 무인항공기 또는 멀티콥터를 이용하는 것을 말하며, 국내에서는 광범위한 산림에서 발생하는 소나무재선충 매개충 및 돌발 병해충 방제에 많이 이용되고 있다. 최근 항공방제에 따른 꿀벌 위해성 우려가 지속적으로 제기되고 있어 항공살포용 살충제의 재평가는 물론 신규 약제 선정 과정에 심도있는 꿀벌 위해성 검토가 필요하다. 산림에서는 살포 방식 및 공간 특성에 따라 살충제의 잔류 및 행적이 달라질 수 있으므로 꿀벌 위해성의 크기가 달라질 수 있다. 본 연구에서는 멀티콥터를 이용하여 산림 공간에 따른 살포액의 도달량을 추정하고, 이를 바탕으로 꿀벌 위해성 평가의 개선점을 제시하고자 하였다. 수관 상부, 중심부, 하부와 지중에서 수관 아래, 수관 주변부, 개방된 지점에 감수지를 설치하고 멀티콥터를 이용하여 물을 살포한 후 살포액 도달량을 정량화하였다. 그 결과, 항공살포액은 수관 상부에서 더 많이 도달하였고, 수관으로 차폐되지 않은 지점은 수관 상부와 유의미한 차이가 없었다. 수관 상부의 살포액 도달량의 중앙값을 기준으로 수관 아래 지중에는 21.2%의 살포액이 도달하였다. 수관 아래의 살충제 도달 추정치로 꿀벌 위해성을 평가한 결과, 위해지수(Hazard Quotient; HQ)와 잔류시간(Residual time to 25% bee mortality; RT₂₅)은 살충제 등록 당시의 값보다 낮을 것으로 추정되었다. 따라서 산림의 공간 특성에 따라서 꿀벌 위해성 역시 달라질 것으로 예상되나, 산림에서 살충제 도달량에 영향을 미칠 수 있는 요인들의 추가적인 검토가 필요할 것으로 보인다.

색인어 항공방제, 살충제 잔류량, 산림 공간, 위해지수, 꿀벌 영향평가, 잔류시간