농약과학회지 (Korean J. Pestic. Sci.)
Vol. 26, No. 2, pp. 103-120 (2022)
Open Access https://doi.org/10.7585/kjps.2022.26.2.103
ORIGINAL ARTICLES

Online ISSN 2287-2051
Print ISSN 1226-6183
Check for updates

무인항공 살포 농약의 비산잔류 모니터링 및 옥수수(*Zea mays L.*)를 이용한 비산 저감

김창조 · 이래근 · YUAN XIU · 김 민 · 신희정 · 김이선 · 경기성[1] · 노현호*
국립농업과학원 잔류화학평가과, [1]충북대학교 농업생명환경대학 환경생명화학과

Residual Pattern of Pesticides Drifted by Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Spraying and Drift Reduction using Maize (*Zea mays L.*)

Chang Jo Kim, RaeKeun Lee, Xiu Yuan, Min Kim, Hee Jeong Shin, Leesun Kim, Kee Sung Kyung[1], Hyun Ho Noh*

Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea
[1]Department of Environmental and Biological Chemistry, College of Agriculture, Life and Environment Science, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

(Received on May 14, 2022. Revised on May 30, 2022. Accepted on June 8, 2022)

Abstract This study was carried out to survey residual pattern of pesticides drifted in surrounding crops by agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) and to study the applicability of maize as a anti-drift crop. Azoxystrobin, dinotefuran, etofenprox, hexaconazole, and metaflumizone were sprayed onto rice in Seocheon and Boryeong with agricultural UAV. The field crops nearby rice paddy sprayed by agricultural UAV were collected considering distance from sprayed area and the windbreak around sprayed area. Pearson's correlation analysis and risk assessment were implemented for studying the correlations of residues of pesticides with factors of collected field crops ($p < 0.05$) and safety investigation of residual pesticides, respectively. To investigate the applicability of maize as an anti-drift crop, the drift reduction rate (%) was estimated by measuring the coverages (%) of WSPs placed according to distance (m) and altitude (m) on treatment plot and untreated control plot after unmanned multi-copter and helicopter spray. Each residue of pesticides had a negative correlation with distance from sprayed area except the metaflumizone which was not detected in most samples ($p < 0.05$). The residue of pesticides in collected sites tended to be affected by presence of windbreak and crop species around sprayed area. And %acceptable daily intake found to be 0.00002-0.08276%. Maize grown around treatment plot reduced 63.65-92.07% of drift with 0-10 m in length and 0.5-1 m in height with unmanned multi-copter and helicopter spray. Thus, it was confirmed that growing crop with well developed canopy such as maize could capture airborne spray drift by aerial application.

Key words agricultural UAV, drift, residual characteristic, anti-drift crop

서 론

농약은 전 세계적으로 증가하는 인구의 식량 수요를 충족시킬 수 있는 수단으로서 전 세계적으로 널리 사용되고 있다(Carvalho, 2017). 농약 살포기는 수동식 분무기에서 전동식 분무기로 발전하였으며, 현재는 농약 살포용 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)가 아시아뿐만 아니라 유럽 등 여러 나라의 농업에 도입되어 활용되고 있다(Xue et al., 2016; Mogili and Deepak, 2018; Radoglou-Grammatikis et al., 2020; Freeman and Freeland, 2015). 또한 무인항공기는 농약 살포 용도 뿐만 아니라 농경지 작물 및 토양 모니터링, 인공수분, 병해충 예찰, 파종 등의 농작업에 사용되고 있다(Kim et al., 2019). 특히 UAV를 이용한 농약 살포는 농촌의 심각한 노동력 부족 문제(Kim et al., 2021)와 작업자의 농약 노출 등 기존의 방제 방법을 사용할 때 발생하

*Corresponding author
E-mail: noh1983@korea.kr

는 문제(Damalas and Eleftherohorinos, 2011; Lan and Chen, 2018)들을 해결할 수 있다(Tsouros et al., 2019; Faiçal et al., 2017). 따라서 1980년도부터 2020년까지 국내 개인농가 가구 및 경지면적은 감소했지만, 개인농가 가구 대비 경지면적은 증가하고 있는 우리나라의 경우(KOSTAT, 2020a; KOSTAT, 2020b) UAV를 이용한 방제 시 노동생산성 향상을 통한 농업 생산성 개선이 가능하다(OECD, 2011).

하지만 농업용 UAV를 이용한 농약 살포시 농약 살포액의 종류, 살포 액적 크기, 살포 장치 등의 살포 조건 및 풍향, 풍속 등의 기상요인에 의해 비산이 발생함에 따라 비의도적인 오염이 발생한다(Wang et al., 2018). 특히, 우리나라는 2019년 1월부터 농약의 안전관리를 강화하고자 농약허용물질관리목록(Positive List System, PLS)이 전면 시행됨에 따라 작물에 잔류허용기준(Maximum Residue Limit, MRL)이 설정되어 있지 않은 농약은 일률기준인 0.01 mg/kg을 적용하고 있다. 이에 따라 비의도적 농약 오염으로 인한 문제가 대두되었으며, 특히 항공살포 농약은 비산되어 주변 작물에 잔류하여 PLS 기준을 초과할 우려가 제기되었다. 현재 국립농산물품질관리원 등 국가기관에서는 유통 전후 농산물 중 잔류농약 안전성 조사를 통해 농작물 중 잔류농약의 잔류허용기준 및 PLS 일률기준 초과 시 즉각적인 조치를 취하고 있다(Park et al., 2019). 하지만 수도작 주변에 재배 중인 농작물의 경우 시장으로 유통되지 않고 농민이 섭취하는 경우도 빈번하며, 기준을 초과하는 작물을 섭취 시 인체에 위해를 가할 가능성이 있다(Park et al., 2020). 따라서 농업용 UAV를 이용한 농약 살포 후 인근 작물에 대한 비산 잔류 모니터링이 필요하다.

또한 항공살포 농약의 비산을 저감하기 위해 노즐 종류(Nuytten et al., 2007), 비산저감제(Fritz et al., 2012), 제형(Hilz and Vermeer., 2013), 살포압력(Creech et al., 2015) 및 살포고도(Tang et al., 2020; Zheng et al., 2018) 등에 대한 연구가 이루어지고 있고, 국내에서는 “농약 살포용 무인항공기 안전사용 매뉴얼”이 배포되어 농업용 UAV를 이용하여 농약 살포시 비의도적 오염을 저감할 수 있는 방안들을 제시하였다(NAS, 2020). 하지만 항공방제 시 비산은 풍향 및 풍속과 같은 기상요인에 의해 큰 영향을 받기 때문에(Hewitt et al., 2002), 항공방제지 인근에 바람의 영향을 저감하기 위한 방안이 필요하다. 이는 방풍림으로 바람의 영향에 의한 비산을 저감 시킬 수 있다는 보고(De Schampheleire et al., 2009)를 고려했을 때 방풍림을 항공방제지 인근에 배치하면 바람에 의한 농약의 비산을 어느 정도 저감시킬 수 있을 것이다. 또한 방풍림의 종류, 높이, 밀도 등에 따라 상이한 비산 저감효과를 보이므로(Ucar and Hall., 2001), 항공살포가 이루어지는 수도작 또는 밭작물 인근에 재식 가능하며 비산 저감 가능성이 있는 방풍림 선택이 중요하다. 옥수수는 잎이 무성하고 논에 농약을 살포하는 시기에 생육이 왕성하여 작물 키가 크기 때문에 일정간격으로 재배하면 항공살포에 의한 농약의 비산을 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

따라서 이 연구는 농업용 UAV를 이용한 농약 살포지역 인근 작물 중 잔류농약 모니터링 및 위해성 평가를 통해 항공살포 농약의 비산에 따른 잔류특성을 구명하고, 항공방제 필지 주변에 옥수수를 재배하여 물리적 비산 저감 가능성을 조사하여 농가에서 손쉽게 적용할 수 있는 비산 저감 방안을 모색하고자 수행되었다

재료 및 방법

항공방제 작물잔류 모니터링 약제살포 및 시료채취

항공방제는 각 지역의 농협 및 지자체 등에서 방제 대상 병해충과 농약을 선정하였고, 농약 살포를 위한 지적도를 작성한 후 방제업체가 일괄 투입되어 동시다발적으로 실시되었다. 항공살포 대상 작물은 벼이었으며, 보령시에 살포된 농약은 azoxystrobin+hexaconazole 11.5(6.5+5)% 액상수화제와 etofenprox+metaflumizone 11(8+3)% 유현탁제이었으며, 서천군의 경우 azoxystrobin+hexaconazole 13(12+1)% 액상수화제와 dinotefuran+etofenprox 13(5+8)% 미탁제이었다. 또한 방제 예정 필지 및 항공방제지 인근 작물 재식여부 확인을 위해 충남 서천군과 보령시의 살포 예정지의 지적도를 확보하였다(Fig. 1).

시료는 항공방제가 종료된 후 보령시 독산리 등의 20개 지점과 서천군 영모리 등의 24개 지점에서 채취하였다. 시료는 무인항공 살포가 종료된 후 살포구역을 찾아가 주변에 다른 작물의 재배 여부를 확인하고 벼 이외 작물이 재배되고 있는 경우 가식부위 중심으로 채취하였으며, 콩의 경우 농약 살포 당시 열매가 맺히지 않아 부득이하게 잎을 채취하였다. 또한 시료채취 구역의 환경조건(이격거리, 장애물 유무, 논둑 높이 등)을 조사하여 야장에 기록하였으며, 이를 잔류특성 구명의 기초자료로 활용하였다(Fig. 2). 채취한 시료는 고추, 대파, 들깻잎, 가지, 연잎, 옥수수, 옥수수잎, 토마토, 호박, 호박잎 및 머위이었으며, “작물잔류성 시험의 기준 및 방법”에 준하여 (MOLEG, 2016) 드라이아이스를 첨가하여 마쇄 후 분석 전까지 –20°C 냉동실에 보관하였다.

시약 및 기구

Azoxystrobin (순도, >99.2%), dinotefuran (순도, >95.6%), etofenprox (순도, >99.1%) 및 hexaconazole (순도, >98.7%) 표준품은 Dr. Ehrenstofer GmbH사 (Augsburg, Germany)에서 구입하였고, (*E*)-metaflumizone (순도, >98.0%)과 (*Z*)-metaflumizone (순도, >99.0%)은 FUJIFILM Wako Chmical Corporation (Osaka, Japan)에서 구입하여 사용하였다. 추출용매인 acetonitrile은 Merk (Darmstadt, Germany)의 liquid

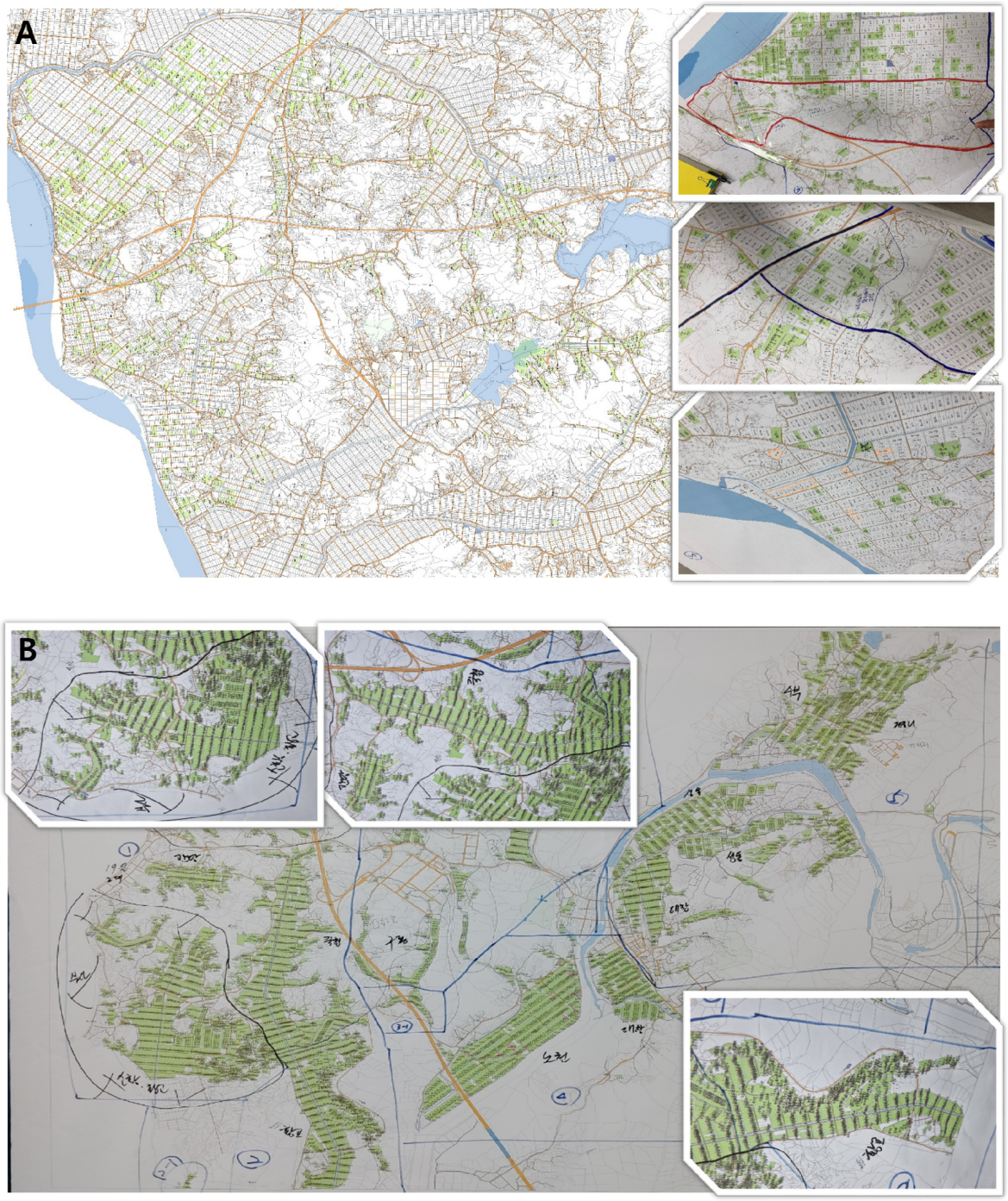

Fig. 1. A land registration map for spraying pesticides onto rice with agricultural UAV. A; Seocheon, B; Boryeong. Sprayed areas were colored with green in map.

chromatography (LC) 분석이 가능한 LiChrosolv® 등급을 사용하였다. 이동상으로는 Wasserlab사(de Navarra, Spain)의 Autwomatic Plus 1+2제품을 이용하여 3차 증류수를 제조하여 사용하였으며, methanol은 Merk (Darmstadt, Germany)의 LC등급을 사용하였다. 이동상에 첨가된 formic acid (순도, >98.0%)와 ammonium formate (순도, >99.0%)는 Merk (Darmstadt, Germany)제품을 사용하였다. QuEChERS EN packet과 dispersive-SPE tube는 Agilent Technoligies (California, US)의 제품을 사용하였다. 추출기는 SPEX SamplePrep (Metuchen, US)의 2010 Geno/Grinder® 제품을 사용하였다. Vortex mixer는 Scientific industry (New York, US)의 Vortex-Genie 2 제품을 사용하였고, 원심분리기는 한일과학산업(주)(Incheon, Korea)의 Combi-514R 제품을 사용하였다.

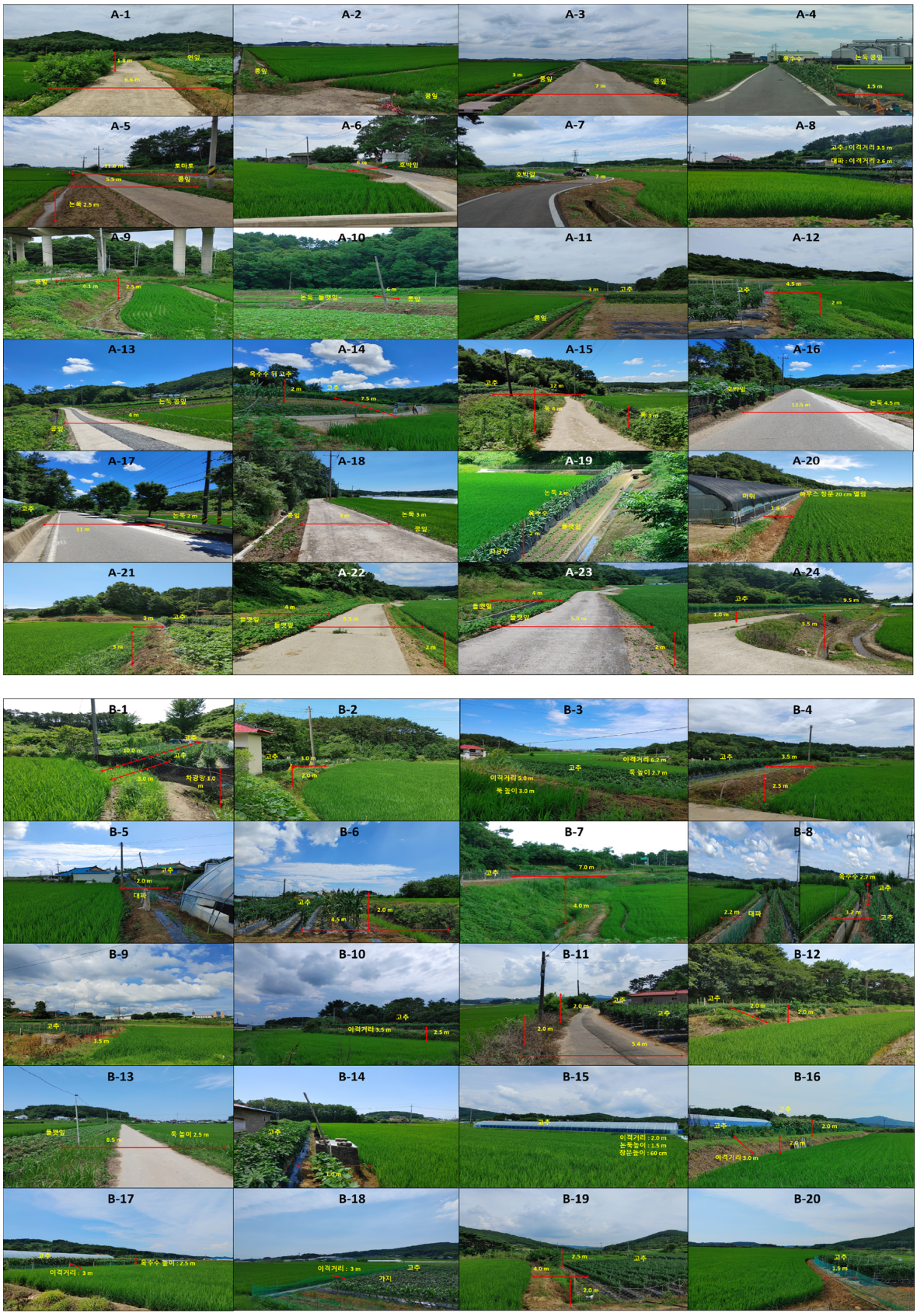

Fig. 2. The scenes of locations in which the field crops were collected nearby rice paddy after agricultural UAV spraying. A-1~24; Seocheon, B-1~20; Boryeong.

표준용액 조제

표준용액을 조제하기 위하여 azoxystrobin 약 10.08 mg, dinotefuran 약 10.46 mg, etofenprox 약 10.09 mg, hexaconazole 약 10.13 mg, (*E*)-metaflumizone 약 10.20 mg 및 (*Z*)-metaflumizone 약 10.10 mg을 칭량 후 각각 10 mL의 acetonitrile에 용해하여 1,000 mg/L의 stock solution을 조제하였다. Stock solution은 acetonitrile로 희석하여 1, 10, 50, 100 mg/L의 working solution으로 조제한 후 이를 다시 acetonitrile로 희석하여 10, 20, 40, 100, 200, 400 μg/L의 검량선 작성용 표준용액을 조제하였다.

잔류농약 분석법

마쇄한 시료 10 g을 50 mL conical centrifuge tube (Falcorn™, US)에 칭량 후 acetonitrile 10 mL를 첨가하여 1,300 rpm으로 5분간 진탕 추출하였다. 추출한 시료에 4 g magnesium sulfate, 1 g sodium chloride, 1 g trisodium citrate dihydrate, 0.5 g disodium hydrogencitrate sesquihydrate (QuEChERS EN extraction packet)을 첨가 후 1,300 rpm에서 5분간 진탕였으며, 이 후 3,500 rpm에서 5분간 원심 분리하였다. 정제를 위해 상징액 1 mL를 150 mg magnesium sulfate, 25 mg primary secondary amine (PSA)이 들어있는

Table 1. LC-MC/MS condition for the residual analysis of azoxystrobin, dinotefuran, etofenprox, hexaconazole, and metaflumizone in collected samples

<LC condition>			
Instrument	ExionLC™, AB SCIEX, USA		
Column	Halo C18, 2.1 mm I.D. × 100 mm L. (2.7 μm particle size)		
Flow rate	0.3 mL/min		
Mobile phase	A: 5 mM ammonium formate + 0.1% formic acid in distilled water		
	B: 5 mM ammonium formate + 0.1% formic acid in methanol		
Mobile phase	Time (min)	A (%)	A (%)
	0.0	30	70
	2.0	30	70
	2.5	15	85
	4.5	15	85
	4.7	5	95
	5.0	5	95
	6.5	30	70
	8.5	30	70
Injection volume	1 μL		

<Mass condition>			
Instrument	QTRAP 5500 system, AB SCIEX, USA		
Ionspray voltage	5,500 V	Nebulizer gas	50 psi
Curtain gas	20 psi	Drying gas	50 psi
Collision gas	10 psi	Scan type	MRM mode
Drying gas Temp.	500°C	Ion source	ESI+

<MRM condition>

Compound	Precursor ion (*m/z*)	Ion transition			
		Quantitation ion (*m/z*)	CE[a)] (eV)	Confirmation ion (*m/z*)	CE (eV)
Azoxystrobin	404.1	372.1	4	344.1	10
Dinotefuran	203.2	129.1	8	114.1	10
Etofenprox	394.2	177.1	18	107.0	12
Hexaconazole	314.1	70.1	6	159.0	12
Metaflumizone	507.0	178.0	10	287.2	10

[a)]Collision energy

dispersive-SPE (d-SPE) tube에 넣고 vortex mixer를 이용하여 30초간 교반 후 12,000 rpm에서 5분간 원심 분리하였다. 원심 분리한 상징액은 syringe filter (PTFE, 13 mm, 0.22 μm)로 여과 후 acetonitrile을 이용하여 50:50 (v/v)로 matrix matching한 후 Table 1에 제시한 LC-MS/MS 분석조건으로 잔류농약을 분석하였다.

분석법 검증

정량한계 (Limit of quantitation, LOQ)는 matrix-matched standard의 signal 대비 noise의 비가 크로마토그램 상 10 이상인 농도로 설정하였으며(Mekonen S et al., 2016), PLS 일률기준을 고려하였다. 직선성의 경우 5개 농도 이상의 matrix-matched standard를 분석하여 분석 농약의 양(ng) 대비 peak 면적의 회귀직선식으로 산출된 상관계수로 판단하였다. 또한 확립된 잔류농약 분석법은 시험 농약의 LOQ 및 10 LOQ 수준에서 회수율 시험을 수행 후 FAO(2016)에 제시된 기준에 따라 유효성과 재현성을 판단하였다.

위해성 평가

항공방제시 비산에 의한 잔류농약 검출량이 MRL 및 PLS 기준을 초과한 농산물에 대해 일일섭취추정량(estimated daily intake, EDI)과 %acceptable daily intake (%ADI)를 산출하여 안전성을 평가하였다. EDI는 식(1)을 통해 산출하였고, 산출 시 필요한 식품섭취량은 한국보건산업진흥원 “2019년 국민영양통계”(KHIDI, 2019)를 참고하였다. 가식부위가 아닌 옥수수잎과 연잎의 경우 위해성 평가에서 제외하였다.

%ADI는 식(2)를 통해 산출하였고, 산출 시 필요한 일일섭취허용량(acceptable daily intake, ADI)과 한국인 전 연령 평균체중(55 kg)은 각각 국립농업과학원 “농약의 일일섭취허용량”(MOLEG, 2021)과 식품의약품안전처 “인체적용제품 위해성평가 공통지침서”(MFDS, 2019)를 참고하였다. 또한, LOQ 미만인 농약의 경우 위해성 평가시 노출량을 과소평가할 수 있기 때문에 잔류량을 LOQ/2인 0.005 mg/kg을 적용하였다(WHO, 2009).

$$EDI\ (mg/kg\ bw/day) = \{Residual\ concentration\ (mg/kg) \times daily\ food\ intake\ (g/person/day)\} / 1{,}000 \quad (1)$$

$$\%ADI = (EDI/ADI) \times 100 \quad (2)$$

통계분석

수도작에 농업용 UAV를 이용하여 농약 살포 시 살포 지역으로부터 이격거리 및 장애물 높이와 같은 시료 채취 요소와 주변 작물 중 비산에 따른 항공살포 농약의 잔류량 간의 상관관계를 조사하기 위해 SPSS (ver. 26, IBM Corporation, USA) 소프트웨어를 사용하여 Pearson 상관분석 (Pearson’s correlation analysis)을 실시하였다($p < 0.05$).

옥수수 재식 및 비산 저감률 측정 방법

무인 항공살포 시 옥수수 재식에 따른 항공살포 농약의 비산 저감 가능성을 조사하기 위하여 포장시험은 국립농업과학원 포장에서 수행되었다. 무인항공기는 처리구와 대조구 비교 시 풍향 및 풍속 등의 기상조건을 상쇄시키기 위하여 2대의 기체를 이용하여 동시에 살포하였으며, 무인 멀티콥터와 무인 헬리콥터의 유효 살포폭은 각각 4 및 7.5 m이었다. 노즐은 무인 항공방제시 일반적으로 사용되고 있는 XR11002 (TeeJet technologies, Switzerland)이 사용되었다. 해당 노즐은 Fine 및 Medium에 해당하는 입경을 생성하며, 이는 체적평균직경(Volume Mean Diameter, VMD)이 106~340 μm인 액적을 형성한다고 보고되었다(ASABE, 2009).

옥수수(*Zea mays L.*)는 모내기와 동일한 시점에 논에 재배되었고, 옥수수 재식은 Fig. 3과 같이 무인 멀티콥터 및 헬리콥터의 살포 폭을 고려하여 무인 항공살포지 양 측면에 약 50 cm 간격으로 2줄 재식하였다. 또한 감수지(Water Sensitive Paper, WSP, TeeJet technologies, Switzerland)는 4 m 간격으로 약 0.5 및 1 m 높이에 설치하였으며, 지면에서 30 cm 높이로 작물로부터 약 1, 2, 3, 5, 7 및 10 m에 설치하였다.

무인 항공살포는 수도작 방제가 실시되는 7월에 진행되었다. 무인 멀티콥터 및 헬리콥터의 살포고도와 비행속도는 “농약 살포용 무인항공기 안전사용 매뉴얼”에 준하여 각각 2 및 3 m 고도에서 10 및 15 km/h의 속도로 비행하였으며(NAS, 2020), UAV 등록 농약의 사용량 중 하나인 1.6 L/10a 및 살포면적을 고려하여 물을 3회 반복 살포하였다. 이때 옥수수의 키는 약 1.2~1.8 m이었고, WSP는 스캐너(DS-360W, Epson, China)를 이용하여 1,200 dpi로 스캔 후 Kim et al. (2017)의 방법과 같이 ImageJ 1.50 (US National Institutes of Health, Maryland, US) 프로그램을 이용하여 WSP 면적 대비 살포입자 부착 면적(도포율)을 산출하였다. 또한 처리구 및 대조구 WSP 중 산출된 도포율은 식(3)에 적용 후 옥수수 재식에 따른 비산저감률을 산출하여 방풍림으로서의 적용 가능성을 평가하였다.

$$Drift\ reduction\ rate\ (\%) = \{(Total\ coverage\ of\ WSP\ in\ control\ plot - Total\ coverage\ of\ WSP\ in\ treatment\ plot) / Total\ coverage\ of\ WSP\ in\ control\ plot\} \times 100 \quad (3)$$

결과 및 고찰

잔류농약 분석법 검증

분석 대상농약인 azoxystrobin, hexaconazole, dinotefuran, etofenprox 및 metaflumizone의 LOQ는 0.01 mg/kg이었고, 5개 농도 이상의 matrix-matched standard를 분석한 결과 상관계수(r^2) ≥ 0.99 이상으로 높은 직선성을 나타냈다. 서천군

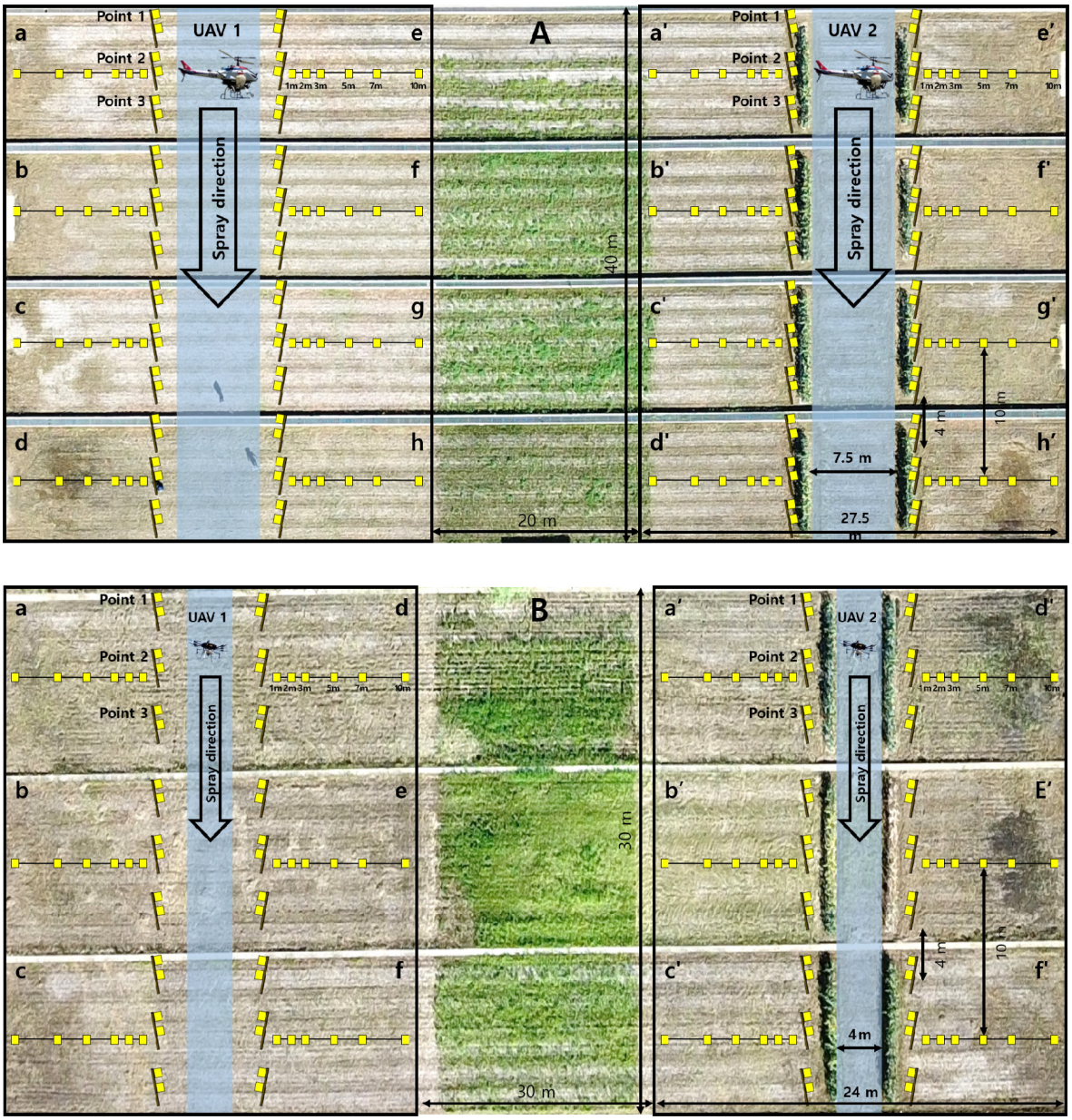

Fig. 3. Scenes of field trials for the applicability test of maize as an anti-drift crop with unmanned multi-copter and helicopter spraying. A; aerial shot of untreated control plot (left) and treatment plot (right) with unmanned helicopter, B; aerial shot of untreated control plot (left) and treatment plot (right) with unmanned multi-copter

과 보령시에서 채취한 작물 중 azoxystrobin, dinotefuran, etofenprox, hexaconazole 및 metaflumizone의 회수율은 72.89 ~ -115.84% 범위이었으며, RSD는 모두 10.55% 이하로 확립된 분석법은 적합하였다고 판단되었다.

이격거리에 따른 비산 특성

채취된 시료 중 항공살포 농약의 잔류량은 Table 2에 제시하였으며, 이격거리와 잔류량과의 상관관계를 구명하기 위하여 Pearson 상관분석을 실시한 결과는 Table 3에 제시하였다. Azoxystrobin, dinotefuran, etofenprox 및 hexaconazole의 잔류량은 이격거리와 부적 상관관계를 나타내는 것으로 볼 때($p < 0.05$), 항공살포 지역으로부터 이격거리가 증가함에 따라 비산량이 감소하는 것으로 판단되었다. 이는 Bueno et al. (2017)의 연구에서 사용한 비산량 예측 모델식 german drift model, dutch drift model 및 IMAG와 거리별 비산량을 측정한 결과 모두 붐스프레이 살포지역으로부터 거리가 증가함에 따라 비산량이 저감되었다는 보고와 유사하였다. 하지만 metaflumizone의 경우 대부분의 시료에 LOQ 이하로 검출되어 이격거리와 상관관계를 판단하기 어렵다고 판단되었으며, 이는 metaflumizone의 함량이 3% 미

Table 2. The residues of the azoxystrobin, dinotefuran, etofenprox, hexaconazole, and metaflumizone in collected samples according to distance and windbreak

Location	No.	Crop	Distance from sprayed area (m)	Windbreak (height, m)	Residue (mean±SD[c], mg/kg)				
					Azoxystrobin	Dinotefuran	Etofenprox	Hexaconazole	Metaflumizone
Boryeong	1	Chili pepper	3.0	Shading net (1.0)	0.02±0.00	-	0.05±0.00	<LOQ	<LOQ
			10.0		<LOQ	-	0.02±0.00	<LOQ	<LOQ
	2	Chili pepper	3.0	-	0.20±0.01	-	0.40±0.01	<LOQ	0.04±0.00
			4.0	-	0.03±0.00	-	0.07±0.00	<LOQ	<LOQ
	3	Chili pepper	5.0	-	0.02±0.00	-	0.04±0.00	<LOQ	<LOQ
			6.2	-	<LOQ	-	0.02±0.00	<LOQ	<LOQ
	4	Chili pepper	3.5	-	0.02±0.00	-	0.03±0.01	<LOQ	<LOQ
			6.5	-	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	5	Chili pepper	2.0	-	0.03±0.00	-	0.03±0.00	<LOQ	<LOQ
			12.0	-	0.07±0.00	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
		Welsh onion	0.5	-	0.14±0.00	-	0.1±0.01	<LOQ	0.02±0.00
	6	Chili pepper	4.5	Maize (2.0)	0.17±0.01	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
			11.5		0.24±0.01	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	7	Chili pepper	7.0	-	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
			12.0	-	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	8	Chili pepper	3.2	-	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
			9.2	-	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
			3.2	Maize (2.7)	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
		Welsh onion	2.2	-	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	9	Chili pepper	1.5	-	0.02±0.00	-	0.05±0.00	<LOQ	<LOQ
			11.5	-	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	10	Chili pepper	3.5	-	<LOQ	-	0.01±0.00	<LOQ	<LOQ
			10.0	-	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	11	Chili pepper	5.4	Tree (2.0)	0.14±0.00	-	0.01±0.00	<LOQ	<LOQ
			5.4	-	0.23±0.00	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	12	Chili pepper	2.0	-	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
			6.0	-	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	13	Perilla leaves	8.5	-	2.04±0.01	-	5.60±0.17	<LOQ	1.58±0.09
	14	Chili pepper	1.0	-	0.05±0.01	-	0.05±0.02	<LOQ	<LOQ
	15	Chili pepper	2.0	In vinyl house	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	16	Chili pepper	3.0	-	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
			10.0	-	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
			4.0	Maize (2.0)	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ

Table 2. continued

Location	No.	Crop	Distance from sprayed area (m)	Windbreak (height, m)	Residue (mean±SD[c], mg/kg)				
					Azoxystrobin	Dinotefuran	Etofenprox	Hexaconazole	Metaflumizone
Boryeong	17	Chili pepper	3.0	Maize (2.5)	0.37±0.02	-	0.01±0.00	<LOQ	<LOQ
	18	Chili pepper	3.0	-	0.37±0.01	-	0.38±0.03	<LOQ	0.07±0.00
			45.5	-	<LOQ	-	0.01±0.00	<LOQ	<LOQ
		Eggplant	3.0	-	0.04±0.00	-	0.04±0.00	<LOQ	0.01±0.00
			45.5	-	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	19	Chili pepper	4.0	-	0.16±0.00	-	0.21±0.00	<LOQ	0.02±0.00
			4.0	Tree (2.5)	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
			5.0	-	0.04±0.00	-	0.06±0.00	<LOQ	<LOQ
			7.0	-	0.02±0.00	-	0.02±0.00	<LOQ	<LOQ
			9.0	-	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
			10.0	-	<LOQ	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	20	Chili pepper	1.5	-	0.18±0.02	-	0.19±0.01	<LOQ	0.02±0.00
			10.0	-	0.01±0.00	-	0.02±0.00	<LOQ	<LOQ
Seocheon	1	Lotus leaves	6.6	Tree (1.8)	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
			26.6		<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
	2	Soybean leaves	0.8	-	1.08±0.01*	0.56±0.02*	4.60±0.11*	0.11±0.00*	-
	3	Soybean leaves	3.0	-	1.89±0.01*	1.79±0.14*	4.88±0.20*	0.37±0.01*	-
			7.0	-	1.37±0.08*	0.70±0.04*	2.14±0.27*	0.16±0.02*	-
	4	Maize	1.5	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
		Soybean leaves	1.2	-	1.81±0.02*	1.22±0.06*	4.47±0.10*	0.29±0.01*	-
	5	Tomato	11.8	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
		Soybean leaves	5.5	-	0.85±0.06*	0.35±0.03*	1.33±0.13*	0.07±0.00*	-
	6	Pumpkin leaves	6.0	-	0.02±0.00*	0.02±0.00	0.03±0.00	0.01±0.00*	-
	7	Pumpkin	7.0	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
		Pumpkin leaves	7.0	-	0.06±0.00*	0.05±0.00	0.10±0.00	<LOQ	-
	8	Chili pepper	3.5	-	0.15±0.01	0.10±0.00	0.15±0.01	0.02±0.00	-
			5.9	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
			2.0[a)]	-	0.02±0.00	0.06±0.00	<LOQ	<LOQ	-
	9	Welsh onion	2.6	-	0.73±0.01	0.39±0.01	0.55±0.01	0.05±0.01	-
		Soybean leaves	4.1	-	0.15±0.00*	0.05±0.00*	0.19±0.01*	0.02±0.00*	-
	10	Perilla leaves	0.5	-	0.34±0.01	0.25±0.01	0.50±0.02	0.02±0.00	-
		Soybean leaves	6.0	-	0.19±0.00*	0.05±0.00*	0.24±0.00*	0.02±0.00*	-
			20.0	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-

Table 2. continued

Location	No.	Crop	Distance from sprayed area (m)	Windbreak (height, m)	Residue (mean±SD[c], mg/kg)				
					Azoxystrobin	Dinotefuran	Etofenprox	Hexaconazole	Metaflumizone
Seocheon	11	Chili pepper	3.0	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
			20.0	-	<LOQ	<LOQ	0.01±0.00	<LOQ	-
		Soybean leaves	0.5	-	1.55±0.01*	0.95±0.07*	3.09±0.09*	0.23±0.00*	-
	12	Chili pepper	4.5	-	<LOQ	<LOQ	0.01±0.00	<LOQ	-
			10.0	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
	13	Soybean leaves	0.5	-	2.34±0.02*	0.90±0.07*	8.22±0.13*	0.78±0.07*	-
			4.5	-	0.79±0.03*	0.05±0.00*	0.95±0.03*	0.07±0.00*	-
	14	Chili pepper	7.5	-	0.29±0.01	0.03±0.00	0.03±0.01	<LOQ	-
			22.5	-	0.53±0.04	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
			7.5	Maize (2.0)	0.18±0.01	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
		Soybean leaves	5.5	-	1.44±0.04*	0.25±0.03*	2.46±0.08*	0.19±0.01*	-
	15	Chili pepper	12.0	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
			22.0	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
	16	Pumpkin leaves	12.5	-	0.08±0.01*	0.03±0.00	0.10±0.01	<LOQ	-
	17	Chili pepper	11.0	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
	18	Soybean leaves	0.5	-	1.30±0.06*	0.27±0.00*	2.46±0.14*	0.14±0.01*	-
			3.0	-	0.80±0.01*	0.13±0.01*	1.15±0.04*	0.07±0.00*	-
	19	Maize	0.5	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
		Maize leaves	0.5	-	1.42±0.00*	1.48±0.09*	2.84±0.26*	0.13±0.00*	-
		Perilla leaves	2.5	Maize (2.0), shading net (1.0)	0.19±0.01	0.12±0.01	0.46±0.01	0.02±0.00	-
	20	Giant butterbur	1.8	In vinyl house[b]	0.14±0.01	0.05±0.00*	0.12±0.00*	0.01±0.00*	-
			6.0		0.02±0.00	<LOQ	0.02±0.00*	<LOQ	-
	21	Chili pepper	3.0	-	<LOQ	<LOQ	0.01±0.00	<LOQ	-
			6.5	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
	22	Perilla leaves	5.5	-	0.31±0.01	0.20±0.01	0.65±0.03	0.01±0.00	-
			9.5	-	0.02±0.00	0.02±0.00	0.08±0.00	<LOQ	-
	23	Perilla leaves	5.5	-	0.46±0.02	0.3±0.01	1.07±0.02	0.02±0.00	-
			9.5	-	<LOQ	<LOQ	0.05±0.00	<LOQ	-
	24	Chili pepper	9.5	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
			19.5	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-

[a]Distance from the side of sprayed area, [b]About 20 cm of side window of vinyl house was opened during spraying pesticide with agricultural UAV, [c]Standard deviation, *The residue of pesticides exceeded MRL or PLS uniform standard

Table 3. Pearson's correlation Coefficient between each residue of sprayed pesticides and variables of collected samples

Variable	Correlation coefficient				
	Azoxystrobin	Dinotefuran	Etofenprox	Hexaconazole	Metaflumizone
Distance[a)]	-0.232*	-0.396*	-0.219*	-0.204*	0.013
Height[b)]	-0.113	-0.130	-0.136	-0.108	-0.078

[a)]Distance from sprayed area (m), [b)]Height of windbreak (m), *Correlation is significant at the 0.05 level

만이라 다른 농약에 비해 잔류 가능성이 낮기 때문이라고 판단되었다. 또한 보령에 살포된 hexaconazole의 경우 함량이 5%로 metaflumizone보다 높았지만, 보령에서 채취된 시료 중 잔류량은 모두 LOQ 미만이었다. 이는 농약의 증기압이 높을수록 휘발이 더 잘되었고(Park and Lee., 2011), 잔류농약의 소실률이 더 커지는 경향을 보인다는 보고(Zongmao and Haibin., 1988)와 풍속 및 온도와 같은 기상요인은 농약 살포시 농약의 휘발률에 영향을 준다는 보고(Keikotlhaile and Spanoghe., 2011)를 고려했을 때, hexaconazole은 증기압이 1.8×10^{-2} mPa으로 항공방제시 휘발에 의한 낮은 잔류량을 보인 것으로 판단되었다. 하지만 항공방제지 인근 작물을 이격거리별로 채취하였을 때, 고추 중 metaflumizone의 잔류량은 이격거리가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈으므로(보령 2, 18, 19 및 20번, Table 2) 항공살포 농약의 잔류량은 이격거리가 증가함에 따라 잔류량이 감소하는 경향을 보인다고 판단되었다.

또한 농업용 UAV는 rotor의 하강기류는 살포된 농약의 액적 분포에 영향을 줄 수 있다(Shi et al., 2019). 특히 항공방제 시 rotor와 관련된 기체가 기울어짐(Bae and Koo, 2013), rotor의 회전수(Qing et al., 2017) 및 살포고도(Tang et al., 2020) 등의 UAV의 살포 조건으로부터 비산이 발생할 수 있다고 판단된다(Ahmad et al., 2020). 따라서 항공방제 인접지역에서 재배된 작물의 경우 상대적으로 비산에 의한 영향을 받기 쉽다고 판단되므로 완충지를 배치함으로써 비산 저감 효과를 기대할 수 있다고 판단된다. 그러나 풍속과 같은 기상학적 요인에 의해 완충지의 효과가 없을 수도 있기 때문에(Brown et al., 2004) 집약적인 농업을 하는 국내 농업에서 단순히 이격거리를 늘리기 위한 완충지를 단독으로 배치하는 것은 어려움이 있다고 판단된다.

장애물에 따른 비산 특성

항공방제지 인근 장애물의 높이와 농약의 비산 잔류량을 Pearson 상관분석한 결과(Table 3) 모든 농약에서 상관관계가 없는 것으로 나타났는데($p < 0.05$), 이는 채취한 시료 중 약 17%만 항공방제지 인근에 장애물이 존재하여 충분한 표본이 확보되지 않았기 때문으로 판단되었다(Table 2). 작물이 비닐하우스에서 재배되어 외부와 차단된 경우(보령 15, Table 2)는 비산에 의한 영향을 받지 않았지만, 비닐하우스의 측창이 열려있는 경우(서천 20, Table 2) 잔류농약이 검출된 점으로 미루어볼 때 비닐하우스 재배 농산물이라고 하더라도 주변에 항공살포 계획이 있다면 측장과 출입문을 닫아 비산으로 인한 비의도적 농약 오염을 예방해야 한다고 판단되었다.

또한 동일한 장소 및 거리에서 채취한 시료이지만 나무나 옥수수 등과 같은 장애물 뒤에서 채취한 시료의 잔류량이 그렇지 않은 경우(보령 19번, 서천 14번, Table 2)보다 잔류량이 낮은 경향을 보였다. 이는 재식된 방풍림의 밀도나 높이에 따라 차이는 있지만 붐 스프레이를 이용한 약제 살포시 방제지역 인근에 생울타리(Davis et al., 1994), 옥수수(Vieira et al., 2018) 및 인공적인 방풍림(Brown et al., 2004)을 재식했을 때 모두 비산 저감 효과를 나타냈다는 연구 결과와 유사하였다. 따라서 방풍림 역할을 할 수 있는 작물 등을 항공방제 필지 인근에 재식한다면 비산 저감 효과를 기대할 수 있다고 판단된다.

작물별 비산 잔류 특성

무인 항공방제지 인근에서 채취한 시료 중 항공살포 농약의 잔류량을 비교한 결과 옥수수에서는 LOQ 미만이었지만, 콩잎, 들깻잎 및 옥수수잎의 경우 상대적으로 높은 경향을 보였다(서천 4, 19번, Table 2). 이는 살포된 농약의 경우 주로 작물표면에 잔류하지만(Ahmed et al., 2011) 옥수수는 껍질을 벗겨서 전처리한 후 잔류농약 분석하기 때문에(MOLEG, 2016), 상대적으로 항공살포 농약의 비산에 따른 잔류의 영향이 적다고 판단된다.

각 필지마다 살포량과 환경조건이 다르지만 들깻잎과 콩잎 중 농약의 잔류량이 고추, 가지 등의 작물 중 잔류량보다 높은 경향을 보였다(Table 2). 작물 중 농약 잔류량을 결정하는 다양한 요인이 있지만 비표면적은 잔류 정도를 결정하는 중요한 요인인데 콩잎과 들깻잎과 같은 엽채류는 고추와 가지 등과 같은 과채류보다 비표면적이 크기 때문에 더 높은 잔류량을 보이는 것으로 판단되었다(Farha et al., 2018). 또한 Noh et al. (2019)는 넓은 비표면적을 지닌 들깻잎과 상추에 metrafenone을 살포한 후 잔류농약을 분석한 결과 들깻잎의 잔류량이 상추의 잔류량 대비 약 1.5배 높았다는 보고와 같이 들깻잎의 경우 표면에 솜털이 있어 농약이 부착하기 좋은 환경이기 때문에 높은 잔류량을 보인 것으로 판단되었다.

항공방제지 인근 필지에 고추와 가지가 혼재되어있는 경

우 동일한 이격거리에서 시료를 채취하여 잔류농약을 분석한 결과 가지 중 농약의 잔류량이 고추보다 약 6.3-10.8배 더 낮은 경향을 보였다(보령 18번, Table 2). 이는 물리화학적 성질 및 제형이 다른 4종의 농약을 방울토마토와 완숙토마토에 살포했을 때, 살포 일수 및 횟수에 관계없이 비표면적이 완숙 토마토 대비 약 2배 이상 넓은 방울토마토 중 잔류량이 약 1.4-2.4배 높은 경향을 나타냈다는 보고(Kwon et al., 2004)와 같이 동일한 과채류이더라도 작물의 크기, 비표면적 등에 따라 비산에 의한 잔류량에 차이가 있을 수 있다고 판단된다. 또한 머위, 옥수수잎, 호박잎, 콩잎을 제외하고는 농약이 비산되어 잔류되었다고 해도 MRL을 초과하는 경우는 없었는데 이는 항공방제 대상 작물과 주변 작물에 모두 등록되어 있었기 때문이다. 콩잎의 경우 MRL이 설정된 농약이 없어 PLS 일률기준을 적용받게 되지만 콩잎이 유통되는 경우는 거의 없고, 벼에 항공살포하는 시기는 콩 열매가 맺히지 않은 시기이므로 가식부위에는 직접적인 노출이 없기 때문에 비산으로 인해 문제가 발생할 가능성은 낮을 것으로 판단되었다. 반면에, 항공방제 대상 작물과 주변 작물의 종류가 동일하거나 두 작물 모두에 등록되어 있는 농약이라고 한다면 항공살포 농약이 주변 작물에 비산되었다고 하더라도 잔류허용기준을 초과하는 경우는 없었다.

무인항공기를 이용한 농약 살포는 이제 영농현장에서 반드시 필요한 농작업이며, 이로 인한 비산 문제는 우리가 반드시 해결해야 하는 과제이다. 항공살포 전 주변에 미리 공지하여 시설하우스의 출입문과 측창을 닫도록 유도하고, 주변에 다른 작물이 재배중인 경우 특히 수확기에 임박한 경우는 두 작물에 모두 등록되어 MRL이 설정되어 있는 농약을 사용한다면 비산되더라도 피해를 최소화할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 작물의 종류, 표면특성 및 재배조건 등에 따라 농약 잔류특성이 달라질 수 있기 때문에(Fujita et al., 2012; Fantke and Juraske, 2013) 항공살포에 의해 농약이 비산되었을 경우 잔류가 많을 것으로 예상되는 작물이 주변에 재배되고 있으면 각별한 주의가 필요할 것으로 판단되었다.

위해성 평가

잔류허용기준 및 PLS 일률기준을 초과한 농산물에 대해 위해성을 평가한 결과(Table 4) 해당 농산물을 섭취한 경우 검출된 4종의 항공살포 농약의 %ADI는 모두 0.00002-0.08276%이었다. 또한, 농산물은 세척 등과 같은 일련의 가공과정을 거친 후 섭취하기 때문에(Krol et al., 2000) 잔류농약에 의한 위해성은 더 낮을 수 있다고 판단된다. 하지만 농업용 UAV를 이용한 방제시 고농도의 희석액을 살포하고, 살포된 액적은 다양한 기상요인에 의해 비산 될 수 있으므로(Wang et al., 2020) 모니터링을 통한 주의가 필요하다고 판단된다.

Table 4. Dietary risk assessment for the pesticide that exceeded MRL or PLS uniform standard in collected samples

Commodity	Distance from sprayed area (m)	Pesticide	MRL or PLS	Residue (mg/kg)	Food daily intake (g/person/day)	EDI[a)] (mg/kg bw/day)	ADI[b)] (mg/kg bw/day)	%ADI[c)]
Soybean leaves	0.8	Azoxystrobin	0.01	1.08	0.03	0.00003	0.2	0.000
		Dinotefuran		0.56		0.00002	0.02	0.002
		Etofenprox		4.60		0.00014	0.03	0.008
		Hexaconazole		0.11		0.00000	0.005	0.001
	3.0	Azoxystrobin	0.01	1.89		0.00006	0.2	0.001
		Dinotefuran		1.79		0.00005	0.02	0.005
		Etofenprox		4.88		0.00015	0.03	0.009
		Hexaconazole		0.37		0.00001	0.005	0.004
	7.0	Azoxystrobin	0.01	1.37		0.00004	0.2	0.000
		Dinotefuran		0.70		0.00002	0.02	0.002
		Etofenprox		2.14		0.00006	0.03	0.004
		Hexaconazole		0.16		0.00000	0.005	0.002
	1.2	Azoxystrobin	0.01	1.81		0.00005	0.2	0.000
		Dinotefuran		1.22		0.00004	0.02	0.003
		Etofenprox		4.47		0.00013	0.03	0.008
		Hexaconazole		0.29		0.00001	0.005	0.003
	5.5	Azoxystrobin	0.01	0.85		0.00003	0.2	0.000
		Dinotefuran		0.35		0.00001	0.02	0.001
		Etofenprox		1.33		0.00004	0.03	0.002
		Hexaconazole		0.07		0.00000	0.005	0.001

Table 4. continued

Commodity	Distance from sprayed area (m)	Pesticide	MRL or PLS	Residue (mg/kg)	Food daily intake (g/person/day)	EDI[a] (mg/kg bw/day)	ADI[b] (mg/kg bw/day)	%ADI[c]
Soybean leaves	4.1	Azoxystrobin	0.01	0.15		0.00000	0.2	0.000
		Dinotefuran		0.05		0.00000	0.02	0.000
		Etofenprox		0.19		0.00001	0.03	0.000
		Hexaconazole		0.02		0.00000	0.005	0.000
	6.0	Azoxystrobin	0.01	0.19		0.00001	0.2	0.000
		Dinotefuran		0.05		0.00000	0.02	0.000
		Etofenprox		0.24		0.00001	0.03	0.000
		Hexaconazole		0.02		0.00000	0.005	0.000
	0.5	Azoxystrobin	0.01	1.55		0.00005	0.2	0.000
		Dinotefuran		0.95		0.00003	0.02	0.003
		Etofenprox		3.09		0.00009	0.03	0.006
		Hexaconazole		0.23		0.00001	0.005	0.002
	0.5	Azoxystrobin	0.01	2.34		0.00007	0.2	0.001
		Dinotefuran		0.90		0.00003	0.02	0.002
		Etofenprox		8.22		0.00025	0.03	0.015
		Hexaconazole		0.78		0.00002	0.005	0.009
	4.5	Azoxystrobin	0.01	0.79		0.00002	0.2	0.000
		Dinotefuran		0.05		0.00000	0.02	0.000
		Etofenprox		0.95		0.00003	0.03	0.002
		Hexaconazole		0.07		0.00000	0.005	0.001
	5.5	Azoxystrobin	0.01	1.44		0.00004	0.2	0.000
		Dinotefuran		0.25		0.00001	0.02	0.001
		Etofenprox		2.46		0.00007	0.03	0.004
		Hexaconazole		0.19		0.00001	0.005	0.002
	0.5	Azoxystrobin	0.01	1.30		0.00004	0.2	0.000
		Dinotefuran		0.27		0.00001	0.02	0.001
		Etofenprox		2.46		0.00007	0.03	0.004
		Hexaconazole		0.14		0.00000	0.005	0.002
	3.0	Azoxystrobin	0.01	0.80		0.00002	0.2	0.000
		Dinotefuran		0.13		0.00000	0.02	0.000
		Etofenprox		1.15		0.00003	0.03	0.002
		Hexaconazole		0.07		0.00000	0.005	0.001
Pumpkin leaves	6.0	Azoxystrobin	0.01	0.02	0.110	0.00000	0.2	0.000
		Hexaconazole		0.01		0.00000	0.005	0.001
	7.0	Azoxystrobin		0.06		0.00001	0.2	0.000
	12.5	Azoxystrobin		0.08		0.00001	0.2	0.000
Giant butturbur	1.8	Dinotefuran	10.0	0.05	0.370	0.00002	0.02	0.002
		Etofenprox		0.12		0.00005	0.03	0.003
		Hexaconazole	0.01	0.01		0.00000	0.005	0.002
	6.0	Etofenprox		0.02		0.00001	0.03	0.000

[a]Estimated daily intake (mg/kg bw/day) = [{Residual concentration (mg/kg) × daily food intake (g/person/day)}/55 kg (Average body weight of Korean adults)]/1,000, [b]Acceptable daily intake, [c]%Acceptable daily intake = (EDI/ADI) × 100

Table 5. The WSP coverages of spraying solution with multi-copter and helicopter

UAV	Treat-ment plot	Position of WSP[a)]	Coverage (Mean±SD, n=3, %)											
			Distance from spraying area (m)						Height from ground (m)					
									Point 1		Point 2		Point 3	
			1	2	3	5	7	10	0.5	1	0.5	1	0.5	1
Unmanned multi-copter	Maize	a’	-[b)]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		b’	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.13±0.22	-
		c’	-	-	-	-	-	-	-	-	0.07±0.12	-	0.23±0.39	0.06±0.10
		d’	0.53±0.24	0.28±0.13	0.07±0.12	-	-	-	0.27±0.14	0.28±0.14	0.35±0.19	0.63±1.09	0.06±0.11	0.19±0.21
		e’	1.33±0.09	0.75±0.26	0.48±0.04	0.15±0.26	0.14±0.25	0.11±0.20	0.59±0.39	2.44±1.99	0.59±0.39	0.93±0.68	0.22±0.11	0.24±0.08
		f’	0.63±0.31	0.65±0.24	0.35±0.10	0.04±0.07	0.05±0.09	-	0.63±0.81	0.58±0.55	0.43±0.06	0.57±0.31	0.21±0.18	0.62±0.55
	Control	a	1.35±1.21	0.45±0.40	-	-	-	-	0.85±1.18	1.00±1.65	1.71±1.50	1.34±1.92	1.38±1.21	2.14±2.17
		b	0.46±0.44	-	-	-	-	-	1.60±1.50	1.15±1.99	1.17±1.03	0.93±1.37	1.88±2.14	1.53±2.41
		c	0.39±0.68	-	-	-	-	-	0.58±0.58	0.21±0.19	0.71±0.73	-	0.25±0.43	-
		d	2.70±0.77	2.15±0.62	1.84±0.68	0.50±0.54	0.26±0.29	0.07±0.13	4.64±3.39	2.89±2.76	4.47±2.80	3.77±3.54	3.63±2.42	2.50±1.36
		e	3.44±4.87	0.99±1.16	0.75±0.83	0.25±0.44	0.12±0.21	0.05±0.09	3.88±5.04	7.12±5.52	2.80±2.95	1.77±2.46	2.63±2.34	2.03±2.13
		f	2.09±1.82	1.46±1.90	0.99±1.72	0.32±0.56	0.20±0.35	-	0.37±0.33	0.56±0.32	1.53±2.65	1.89±2.54	1.73±1.73	2.66±3.87
Unmanned helicopter	Maize	a’	0.09±0.16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		b’	0.09±0.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		c’	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		d’	0.03±0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		e’	0.35±0.31	0.22±0.20	0.06±0.11	-	-	-	-	0.04±0.07	0.09±0.16	-	0.09±0.16	-
		f’	0.25±0.26	0.33±0.30	0.15±0.15	-	-	-	0.11±0.19	0.17±0.15	-	-	0.11±0.11	0.11±0.10
		g’	0.16±0.19	0.20±0.26	0.07±0.09	-	-	-	0.03±0.05	0.04±0.07	0.07±0.12	-	0.13±0.09	0.24±0.21
		h’	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Control	a	0.52±0.33	0.06±0.11	-	-	-	-	0.31±0.40	-	0.18±0.32	0.05±0.09	0.18±0.31	-
		b	0.20±0.18	0.08±0.14	-	-	-	-	0.16±0.28	-	-	-	0.45±0.78	0.28±0.49
		c	0.31±0.27	0.05±0.09	-	-	-	-	0.40±0.17	0.24±0.33	0.74±0.89	0.28±0.32	0.43±0.42	0.73±0.8
		d	0.30±0.51	0.28±0.27	0.04±0.07	-	-	-	0.40±0.37	0.13±0.16	0.18±0.31	10.55±18.27	0.33±0.15	0.14±0.15
		e	0.62±0.88	0.64±0.71	0.52±0.74	0.33±0.57	0.22±0.24	0.06±0.11	0.76±0.79	0.35±0.51	1.18±2.05	0.48±0.83	0.79±0.72	0.70±1.21
		f	0.73±0.23	0.44±0.11	0.16±0.14	0.11±0.10	0.05±0.08	-	0.58±0.23	0.38±0.53	1.28±1.41	0.24±0.21	0.32±0.42	0.03±0.05
		g	0.56±0.63	0.38±0.4	0.2±0.35	0.08±0.14	0.03±0.05	-	0.13±0.22	0.05±0.09	0.18±0.31	0.08±0.14	0.16±0.17	0.10±0.16
		h	-	-	-	-	-	-	0.13±0.22	-	-	-	-	0.03±0.05

[a)]The each section of the set of WSPs in treatment plots of Fig. 3, [b)]Spraying solution was not detected in WSP

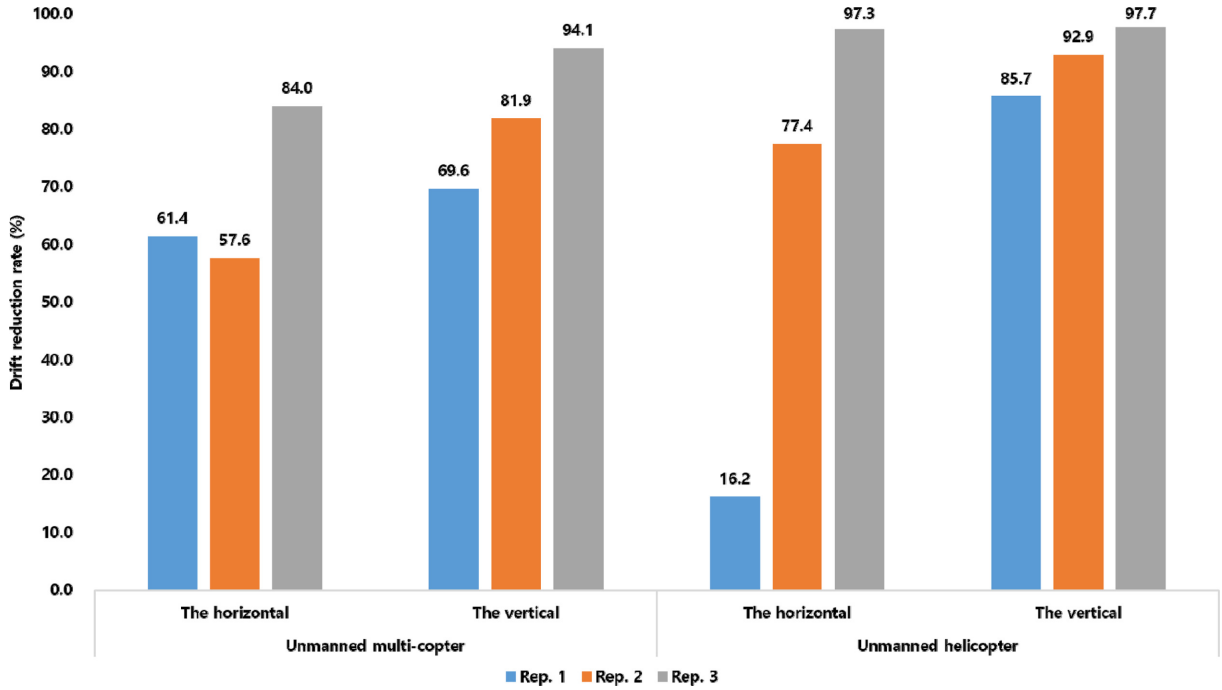

Fig. 4. The drift reduction rate (%) by planting maize in two rows with unmanned multi-copter and helicopter spraying

물리적 비산 저감 작물 적용성 시험

무인 멀티콥터와 헬리콥터를 이용한 물 살포 후 WSP 도포율을 조사한 결과는 Table 5에 제시하였다. 항공살포 경로 양 측면에 옥수수를 재식함에 따라 무인 멀티콥터 및 헬리콥터 처리구는 대조구 대비 1-10 m 이격거리에서 각각 평균 67.68와 63.65%의 비산 저감율을 보였고, 0.5-1 m 높이에서는 각각 평균 81.86와 92.07%의 비산 저감율을 보였다(Fig. 4). Wenneker and Van De Zande (2008)은 방풍림은 비산 저감 효과가 있었으며, Otto et al. (2009)는 생울타리(hedgerow)의 밀도가 높으면 바람의 식물부 투과도가 적으므로 비산을 저감시킬 수 있다고 보고하였는데, 이는 방풍림을 구성하는 작물의 크기와 개수에 따라 바람 및 비산 저감에 영향을 주기 때문이라고 판단되었다(Ucar and Hall., 2001). 그러나 방풍림의 밀도가 너무 높은 경우 바람의 투과성이 떨어짐에 따라 바람이 방풍림을 타고 흘러 비산 저감 효과를 감소시키게 된다(Mercer, 2009; Ucar and Hall., 2001; De Schampheleire et al., 2009). 따라서 방풍림 재식 시 바람 및 비산 저감 효과에 영향을 줄 수 있는 방풍림의 높이, 넓이, 투과성, 식물 잎의 크기 및 재식 장소 등과 같은 요인들이 고려되어야 한다고 판단된다(Mercer, 2009). 또한 붐스프레이를 이용한 약제 살포시 옥수수를 8줄로 심었을 경우 옥수수의 식물부의 밀도가 적절하여 최대 80~90%의 비산 저감 효과를 보였다는 보고(Vieira et al., 2018)를 고려했을 때, 국내 항공방제 시 비산 저감을 위한 방풍림으로 옥수수를 재식하는 것이 적절하다고 판단되었다.

현재 항공살포 농약의 비산을 저감하고자 살포방법, 노즐, 살포압력, 살포속도, 살포량 및 비산저감제 첨가 등에 대한 연구가 이루어지고 있지만, 풍향 및 풍속 등과 같은 조절 불가능한 기상요인이 존재하기 때문에(Felsot et al., 2010), 농업용 UAV의 살포조건을 조절하는 방법만으로는 비산을 저감하는데 한계가 있다고 판단된다. 따라서 농업용 UAV의 살포 조건을 조절하는 동시에 옥수수와 같은 작물을 항공방제 필지 주변에 재배한다면 바람과 같은 기상조건에 의한 액적의 비산을 최소화 할 수 있을 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호:PJ01505305)과 2022년도 농촌진흥청 학·연협동연구과정 지원사업에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

Author Information and Contributions

Chang Jo Kim, Chemical Safety Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Researcher, http://orcid.org/0000-0002-5872-9262

RaeKeun Lee, Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural

Development Administration, Researcher

Xiu Yuan, Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Researcher

Min Kim, Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Researcher

Hee Jeong Shin, Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Researcher

Leesun Kim, Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Researcher

Kee Sung Kyung, Department of Environmental and Biological Chemistry, College of Agriculture, Life and Environment Science, Professor

Hyun Ho Noh, Chemical Safety Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Researcher, http://orcid.org/0000-0002-7568-8490

Establishment of experimental plan, Hyun Ho Noh, Chang Jo Kim

Presentation of methodology, Kee Sung Kyung

Experimental participation, Hyun Ho Noh, Chang Jo Kim, RaeKeun Lee, Hee Jeong Shin, Xiu Yuan, Min Kim

Analysis, Chang Jo Kim, Hyun Ho Noh, RaeKeun Lee, Hee Jeong Shin, Xiu Yuan, Min Kim

Writing, Chang Jo Kim

이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Literature cited

Ahmad F, Qiu B, Dong X, Ma J, Huang X, et al.., 2020. Effect of operational parameters of UAV sprayer on spray deposition pattern in target and off-target zones during outer field weed control application. Comput. Electron. Agric., 172:105350.

Ahmed A, Randhawa MA, Yusuf MJ, Khalid N, 2011. Effect of processing on pesticide residues in food crops: a review. J. Agric. Res., 49(3):379-390.

American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), 2009. ASABE S572.1 Droplet Size Classification. St. Joseph, MI, US.

Bae Y, Koo YM, 2013. Flight attitudes and spray patterns of a roll-balanced agricultural unmanned helicopter. Appl. Eng. Agric., 29(5):675-682.

Brown RB, Carter MH, Stephenson GR, 2004. Buffer zone and windbreak effects on spray drift deposition in a simulated wetland. Pest Manag. Sci., 60(11):1085-1090.

Bueno MR, da Cunha JPA, de Santana DG, 2017. Assessment of spray drift from pesticide applications in soybean crops. Biosyst. Eng., 154:35-45.

Carvalho FP, 2017. Pesticides, environment, and food safety. Food Energy Secur., 6(2):48-60.

Creech CF, Henry RS, Fritz BK, Kruger GR, 2015. Influence of herbicide active ingredient, nozzle type, orifice size, spray pressure, and carrier volume rate on spray droplet size characteristics. Weed Technol, 29(2):298-310.

Damalas CA, Eleftherohorinos IG, 2011. Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. Int. J. Environ. Res. Public Health, 8(5):1402-1419.

Davis BNK, Brown MJ, Frost AJ, Yates TJ, Plant RA, 1994. The effects of hedges on spray deposition and on the biological impact of pesticide spray drift. Ecotoxicol. Environ. Safety, 27(3):281-293.

De Schampheleire M, Nuyttens D, Dekeyser D, Verboven P, Spanoghe P, et al., 2009. Deposition of spray drift behind border structures. Crop Prot., 28(12):1061-1075.

Faiçal BS, Freitas H, Gomes PH, Mano LY, Pessin G, et al., 2017. An adaptive approach for UAV-based pesticide spraying in dynamic environments. Comput. Electron. Agric., 138:210-223.

Fantke P, Juraske R, 2013. Variability of pesticide dissipation half-lives in plants. Environ. Sci. Technol., 47(8):3548-3562.

Farha W, Abd El-Aty AM, Rahman MM, Jeong JH, Shin HC, et al., 2018. Analytical approach, dissipation pattern and risk assessment of pesticide residue in green leafy vegeTables: A comprehensive review. Biomed. Chromatogr., 32(1), e4134., pp1-18

Felsot AS, Unsworth JB, Linders JB, Roberts G, Rautman D, et al., 2010. Agrochemical spray drift; assessment and mitigation-A review. J. Environ. Sci. Health B, 46(1):1-23.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2016. Submission and evaluation of pesticide residues data for the estimation of maximum residue levels in food and feed. Pesticide Residues, FAO, pp.27-32.

Freeman PK, Freeland RS, 2015. Agricultural UAVs in the US: potential, policy, and hype. Remote Sens. Appl. Soc. Environ., 2:35-43.

Fritz BK, Hoffmann WC, Wolf RE, Bretthauer S, Bagley WE,

2012. Wind tunnel and field evaluation of drift from aerial spray applications with multiple spray formulations. J. ASTM Int., 9(11):1-18.

Fujita M, Yajima T, Iijima K, Sato K, 2012. Comparison of the variability in the levels of pesticide residue observed in Japanese cabbage and grape units. J. Agric. Food Chem., 60(6):1516-1521.

Hilz E, Vermeer AW, 2013. Spray drift review: The extent to which a formulation can contribute to spray drift reduction. Crop Prot., 44:75-83.

Hewitt AJ, Johnson DR, Fish JD, Hermansky CG, Valcore DL, 2002. Development of the spray drift task force database for aerial applications. Environ. Toxicol. Chem. 21(3):648-658.

Keikotlhaile BM, Spanoghe P, 2011. Pesticide residues in fruits and vegeTables. pp.243-252. In: Stoytcheva M, Pesticides - Formulations, Effects, Fate, InTech, Rijeka, Croatia.

Kim CJ, Lee RK, Shin HJ, Moon BC, Kim HT, et al., 2021. Residue and distribution characteristics of dimethomorph sprayed with agricultural multicopter onto tree onion, Korean J. Pestic. Sci., 25(2):138-148.

Kim J, Kim S, Ju C, Son HI, 2019. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications. IEEE Access, 7:105100-105115.

Kim SS, Kwon HY, Lee KS, 2017. Study on water volume standard for pesticide application with LWA (Leaf Wall Area) model in apple orchard. Korean J. Pestic. Sci., 21(2):114-122.

Korea Health Industry Development Institute (KHIDI), 2019. National Food & Nutrition Statistics https://www.khidi.or.kr/kps/dhraStat/result2?menuId=MENU01653&gubun=age1&year=2019, (Accessed Jan. 7. 2022)

Krol WJ, Arsenault TL, Pylypiw HM, Incorvia Mattina MJ, 2000. Reduction of pesticide residues on produce by rinsing. J. Agric. Food Chem., 48(10):4666-4670.

Kwon HY, Kim JB, Lee HD, Ihm YB, Kyung KS, et al., 2004. Estimate of pesticide residues in tomato varieties using ratio of surface area to weight. Korean J. Pestic. Sci., 8(1):30-37.

Lan Y, Chen S, 2018. Current status and trends of plant protection UAV and its spraying technology in China. Int. J. Precis. Agric. Aviat., 1(1):1-9.

Mekonen S, Argaw R, Simanesew A, Houbraken M, Senaeve D, et al., 2016. Pesticide residues in drinking water and associated risk to consumers in Ethiopia. Chemosphere, 162:252-260.

Mercer GN, 2009. Modelling to determine the optimal porosity of shelterbelts for the capture of agricultural spray drift. Environ. Model. Softw., 24(11):1349-1352.

Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), 2019. Common Guidelines for Risk Assessment of Human Products. Cheongju, Korea

Ministry of Government Legislation (MOLEG), 2016. https://law.go.kr/admRulSc.do?menuId=5&subMenuId=41&tabMenuId=183#J2363393, (Accessed Jan. 7. 2022)

Ministry of Government Legislation (MOLEG), 2021. https://law.go.kr/admRulSc.do?menuId=5&subMenuId=41&tabMenuId=183#J2363365, (Accessed Jan. 7. 2022)

Mogili UR, Deepak BBVL, 2018. Review on application of drone systems in precision agriculture. Procedia Comput. Sci., 133:502-509.

National Institute of Agricultural Sciences, 2020. Manual of Unmmaned Aerial Vehicle (UAV) for Spraying pesticide (revised edition).

Noh HH, Jo SH, Lee JW, Shin ES, Shin HW, et al., 2019. Residual Characteristics of fungicide metrafenone in perilla leave, lettuce and ponytail radish and estimation of reducing residual concentration. Korean J. Pestic. Sci., 23(1):51-59.

Nuyttens D., Baetens K., De Schampheleire M. Sonck B., 2007. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. Biosyst. Eng., 97(3):333-345.

Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2011. Fostering Productivity and Competitiveness in Agriculture. OECD. pp.29-45.

Otto S, Lazzaro L, Finizio A, Zanin G, 2009. Estimating ecotoxicological effects of pesticide drift on nontarget arthropods in field hedgerows. Environ. Toxicol. Chem., 28(4):853-863.

Park BJ, Lee JH, 2011. Worker Exposure and Volatilization Pattern of Cadusafos, Ethoprophos and Probenazole after Applying Granular Type Formulation on Soil in Greenhouse. Korean J Environ Agric. 30(2):160-165.

Park BK, Jung SH, Kwon SH, Ye EY, Lee HJ, et al., 2020. Monitoring and risk assessment of pesticide residues on stalk and stem vegeTables marketed in Incheon metropolitan area. J. Food Hyg. Saf., 35(4):365-374.

Park JE, Lee MY, Kim SH, Song SM, Park BK, et al., 2019. A survey on the residual pesticides on agricultural products on the markets in Incheon from 2016 to 2018. Korean J. Environ Agric., 38(3):205-212.

Qing T, Ruirui Z, Liping C, Min X, Tongchuan Y, et al., 2017. Droplets movement and deposition of an eight-rotor agricultural UAV in downwash flow field. Int. J. Agric. Biol. Eng., 10(3):47-56.

Radoglou-Grammatikis P, Sarigiannidis P, Lagkas T, Moscholios I, 2020. A compilation of UAV applications for precision agriculture. Comput. Netw., 172:107148.

Shi Q, Mao H, Guan X, 2019. Numerical simulation and experimental verification of the deposition concentration of an unmanned aerial vehicle. Appl. Eng. Agri., 35(3):367-376.

Statics Korea (KOSTAT), 2020a, Summary of census agriculture, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1NG0001&conn_path=I2 (Accessed Mar. 7. 2022)

Statics Korea (KOSTAT), 2020b, Agricultural land area, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1EB001&conn_path=I2 (Accessed Mar. 7. 2022)

Tang Q, Zhang R, Chen L, Deng W, Xu M, et al., 2020. Numerical simulation of the downwash flow field and droplet movement from an unmanned helicopter for crop spraying. Comput. Electron. Agric., 174:105468.

Tsouros DC, Bibi S, Sarigiannidis PG, 2019. A review on UAV-based applications for precision agriculture. Information, 10(11):349.

Ucar T, Hall FR, 2001. Windbreaks as a pesticide drift mitigation strategy: a review. Pest Manag. Sci., 57(8):663-675.

Vieira BC, Butts TR, Rodrigues AO, Golus JA, Schroeder K, et al., 2018. Spray particle drift mitigation using field corn (Zea mays L.) as a drift barrier. Pest Manag. Sci., 74(9): 2038-2046.

Wang G, Han Y, Li X, Andaloro J, Chen P, et al., 2020. Field evaluation of spray drift and environmental impact using an agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer. Sci. Total Environ., 737:139793.

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(6):5-12.

Wenneker M, Van de Zande JC, 2008. Spray drift reducing effects of natural windbreaks in orchard spraying. Asp. Appl. Biol., 84:25-32.

World Health Organization (WHO), 2009. Chapter 6, Dietary exposrue assessment of chemicals in food. pp.19-21

Xue X, Lan Y, Sun Z, Chang C, Hoffmann WC, 2016. Develop an unmanned aerial vehicle based automatic aerial spraying system. Comput. Electron. Agric., 128:58-66.

Zheng Y, Yang S, Liu X, Wang J, Norton T, et al., 2018. The computational fluid dynamic modeling of downwash flow field for a six-rotor UAV. Front. Agric. Sci. Eng., 5(2):159-167.

Zongmao C, Haibin W, 1988. Factors affecting residues of pesticides in tea. Pestic. Sci., 23(2):109-118.

무인항공 살포 농약의 비산잔류 모니터링 및 옥수수(*Zea mays L.*)를 이용한 비산 저감

김창조 · 이래근 · YUAN XIU · 김 민 · 신희정 · 김이선 · 경기성[1] · 노현호*

국립농업과학원 잔류화학평가과, [1]충북대학교 농업생명환경대학 환경생명화학과

요 약 이 연구는 항공살포지 인근 작물의 잔류농약 모니터링을 통해 비산 잔류 특성을 구명하고, 항공살포 구역 주변에 재식한 옥수수의 물리적 비산 저감 작물 적용 가능성을 평가하기 위해 수행되었다. 잔류농약 모니터링 대상은 서천군 및 보령시 벼에 무인항공기로 살포한 azoxystrobin, dinotefuran, etofenprox, hexaconazole 및 metaflumizone 이었다. 시료는 항공방제 구역 주변 작물을 대상으로 채취하였으며, 살포구역과 시료채취 구역의 이격거리, 장애물 존재 여부 등을 기록하여 비산잔류 특성을 구명하는 자료로 활용하였다. 잔류농약 분석 결과는 Pearson 상관분석을 통해 살포 농약의 잔류량과 시료 채취 요인 간의 상관관계를 평가하였고($p < 0.05$), 위해성 평가를 통해 잔류농약 안전성을 조사하였다. 또한 옥수수 재식에 따른 물리적 비산 저감 효과를 평가하기 위해 농업용 무인 멀티콥터와 헬리콥터를 이용한 물 살포 후 대조구 대비 옥수수를 재식한 처리구의 거리 및 높이 별 감수지 도포율을 비교하여 비산 저감율을 산출하였다. 비산 잔류 모니터링 결과 항공살포 농약의 비산잔류량은 이격거리와 부적 상관관계를 보였으며($p < 0.05$), 장애물 존재 여부와 작물의 형태적 특성에 따라 비산 잔류특성이 달라지는 경향을 보였다. 또한 비산잔류량을 바탕으로 산출한 %acceptable daily intake는 0.00002-0.08276%으로 나타났다. 항공살포지 주변에 옥수수를 재배한 경우 무인 멀티콥터 및 헬리콥터를 이용한 살포시 대조구 대비 평균 약 63.65-92.07%의 비산저감율을 보여 옥수수와 같이 잎이 무성하고 키가 큰 작물이 항공살포 농약의 비산을 물리적으로 저감시킬 수 있다고 판단되었다.

색인어 농업용 UAV, 비산, 잔류특성, 비산 저감 작물