



ORIGINAL ARTICLES

고추 생육단계에 따른 무인항공 살포 농약의 잔류 분포 특성

김창조 · Xiu Yuan · 김 민 · 정희영¹ · 정해역² · 신용호³ · Xiongze Han⁴ · 민이기⁵ · 홍세운⁶ · 경기성⁷
손경애 · 정원태 · 이상협 · 노현호*국립농업과학원 잔류화학평가과, ¹경북대학교 응용생명과학부, ²(주)무성항공, ³동아대학교 응용생물공학과,
⁴강원대학교 바이오시스템기계공학과, ⁵(사)한국농업무인항공협회, ⁶전남대학교 지역바이오시스템공학과,
⁷충북대학교 환경생명화학학과

Residual Distribution of Spraying Pesticide According to Growth Stage of Pepper with Unmanned Aerial Vehicle

Chang Jo Kim, Xiu Yuan, Min Kim, Hee-Young Jung¹, Hae-Yuck Jung², Yongho Shin³, Xiongze Han⁴,
Yi-Gi Min⁵, Se-Woon Hong⁶, Kee Sung Kyung⁷, Kyeong-Ae Son, Won Tae Jeong, Sang-Hyeob Lee, Hyun Ho Noh*

Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea,

¹Department of Agricultural and Lifesciences, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea²MOOSUNG-Aviation Co., Ltd., 236-1 Sinpyeong-ro, Pyeongtaek 17916, Korea³Department of Applied biology, Dong-A University, Busan 49315, Korea⁴Department of Biosystem Engineering, College of Agricultural and Life Sciences, Kangwon National University,
Chuncheon 24341, Republic of Korea⁵Korea Agricultural Unmanned Aerial Vehicle Association⁶Department of Rural and Bio-systems Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea⁷Department of Agriculture, Life and Environment Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

(Received on December 4, 2023. Revised on December 6, 2023. Accepted on December 7, 2023)

Abstract This study aimed to investigate the residual distribution of pesticides in peppers with UAV across different growth stages and to look into the characteristics of difenoconazole in peppers concerning UAV application methods and sprayers. To assess the residual uniformity of difenoconazole at different levels of height (top, middle, bottom) and growth stages (early, mid, late), the coverage ratio (%) on Water sensitive paper (WSPs) was calculated. Additionally, the residues of difenoconazole were evaluated with variations in UAV application condition and sprayer equipment. The results revealed an horizontal coverage ratio was inconsistent with coefficient of variation (52.94-165.64%) in all test plots. In addition, The skewness of the coverage ratio based on height exceeded 1 in all growth stages, which means coverage ratio was unequally distributed. Especially, the coverage ratio of difenoconazole on WSPs decreased from the top to the bottom during the mid and late growth stages of pepper ($p < 0.01$). Moreover, kurtosis indicated considerable outliers with values of 0.54 and 8.47. Consequently, the aerial application was deemed most effective during the initial growth phase of peppers. However, doubling the application volume at the 5 km/h of flight speed with UAV resulted in an approximately twofold increase of the coverage of difenoconazole on WSPs at all heights. Therefore, it seems suitable for the mid to late growth stages of peppers. Thus, utilizing UAV appears to be a reasonable choice for Korean agriculture, particularly in cases where labor shortages are prevalent despite lower residue of difenoconazole compared to conventional sprayer plot.

Key words Unmanned aerial spraying, pesticide residue, residual distribution, water sensitive paper, pepper

*Corresponding author

E-mail: noh1983@korea.kr

서론

농약은 병해충과 잡초로부터 농작물을 보호하고 농업 생산성을 향상시키는 중요한 역할을 하고 있다(Carvalho, 2017; WHO, 2006). 지구 인구의 지속적인 증가에 따라 식량 생산성의 중요성은 더욱 강조되고 있으며(Hunter et al., 2017), 이러한 국제적 추세에서 농약은 농작물의 안전한 생육을 보장해주는 중요한 수단으로 그 활용성은 증가할 것으로 판단된다. 농약의 발달과 함께 농약 살포기 역시 발전하고 있다. 과거 배부식분무기로 농약을 살포했지만 현재에는 동력을 이용한 분무기, 스피드스프레이어, 광역방제기 등 다양한 살포기가 개발되어 활용되고 있다. 특히 무인항공기를 이용한 농약 살포는 초고령화 사회에 진입한 우리 농업현장의 부족한 노동력 문제를 해결할 수 있는 기술로 4차 산업혁명 시대의 도래와 함께 농업현장에 빠르게 확산되고 있다(Tsouros et al., 2019).

농약 항공살포는 살포기가 공중으로 진입하여 살포하기 때문에 농약 살포로 인한 작물의 훼손 가능성이 낮고 대면적의 농경지를 빠르고 쉽게 방제할 수 있다는 장점이 있다(Choi et al., 2018). 특히 수도작물과 같이 단지화되어 있는 경우 공동방제를 실현하여 효율적인 병해충 관리가 가능하다(Qing et al., 2017). 이러한 농약 항공살포의 장점은 농업 분야에서 긍정적인 영향을 미치고 있으며, 더 나아가 농업 생산성과 지속가능성을 높이는 데 기여하고 있다. 하지만 농약 항공살포는 고농도 희석액을 소량살포하고 관행적인 살포기보다 작은 살포액적을 분사하기 때문에 기상조건, 살포조건, 작물 생육 상태 등에 의해 부착량이 달라질 수 있고 이에 따라 약효도 달라질 수 있다(Wang et al., 2020; Chen et al., 2019; Wang et al., 2018).

농약 항공살포가 빠르게 확산됨에 따라 국내 농약 제조회사에서 다양한 작물에 무인항공기용 농약을 등록 신청하고 있으며, 2023년 6월까지 벼 등 22개 작물에 218개 품목 254개 제품의 농약이 등록되어 있다. 과거에는 벼, 배추, 양파 등 초본성 작물을 중심으로 등록되고 있었지만, 최근에는 고추, 옥수수, 소나무 등에도 등록되고 있다. 이러한 작물은 생육이 진행됨에 따라 무성해지는 특성을 지니고 있으며, 특히 고추의 경우 열매가 작물 안쪽에 자리하고 있어 항공살포한 농약의 도달할 수 있는 양이 매우 제한적이다. 이에 따라 이러한 작물에 항공방제 적용이 가능한지에 대한 연구와 작물별 항공살포 농약의 적정한 살포시기에 대한 연구 필요성이 제기되고 있다.

따라서 이 연구의 목적은 고추 생육기에 따른 항공살포 농약의 잔류분포를 조사하여 고추에 항공살포 하는 적정 시기를 제안하는 것이다. 또한 고추와 같은 초본성이 아닌 작물에서 농약 항공살포 특성을 이해함으로써 효율적인 농약 살포 방안을 모색하고 더 나아가 농업의 생산성을 향상시키

고 지속가능한 농업 환경을 조성하는데 기여하고자 이 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

시험작물 및 농약

시험작물은 고추로 정식일은 2023년 4월 28일이었으며, 시험농약은 고추 탄저병을 방제하고 무인항공기 농약으로 등록되어있는 difenoconazole+pyraclostrobin 12(4+8)% 액상수화제이었다. 잔류농약 분석은 처리구 간의 잔류 패턴을 비교하기 위함으로 합계를 살포하였지만 difenoconazole만 수행해도 무리가 없다고 판단하여 difenoconazole만 분석하였다. 시험농약의 항공살포 안전사용기준(pre-harvest interval, PHI)은 16배 희석액을 수확 3일 전까지 최대 3회 살포하는 것이며, 관행살포의 경우 2,000배 희석액을 수확 3일 전까지 최대 3회 살포하는 것이다. 또한 difenoconazole의 고추 중 잔류허용기준(maximum residue limit, MRL)은 1.0 mg/kg이었다.

시험포장 및 처리구 배치

포장시험은 경상북도 봉화군 법전면 눌산리에 위치한 노지고추 전문 재배지에서 수행하였다. 고추 생육기에 따른 항공살포 농약의 분포를 조사하기 위한 처리구 면적은 무인항공기의 살포 폭을 고려하여 생육기별로 120 m² (4 m w. × 30 m L.)로 설정하였으며, 관행처리구의 경우 40 m² (4 m w. × 10 m L.)이었다. 처리구간 교차 살포에 의한 오염을 방지하기 위하여 약 10 m의 완충대를 설정하였다.

감수지 설치

감수지(5.2 cm W. × 7.6 cm L.)는 고추 생육기별로 작물을 상, 중, 하로 구분하여 최대한 고추 주관부 근처에 5 m 간격으로 배치하였으며, 하부의 경우 고추의 생육 특성을 반영하여 감수지를 가로와 세로로 배치하였다(Fig. 1). 또한, 감수지는 고추 생육정도에 따라 높이를 달리하여 설치하였으며, 생육초기에는 canopy가 약 70 cm로 작은 상태이기 때문에 상부와 하부로만 구분하여 지면으로부터 30 cm와 70 cm 지점에 설치하였다. 생육중기에는 30 cm, 70 cm 및 120 cm 지점에 감수지를 설치하였으며, 생육후기에는 30 cm, 90 cm 및 150 cm 지점에 설치하였다.

약제살포 및 시료채취

시험에 사용한 무인항공기는 일본 야마하 제품인 YMR-08로 헬리콥터이었으며(살포폭 약 4 m), 노즐은 TeeJet사의 XR11002로 약 2.5 m의 고도에서 40 psi의 압력으로 11 km/h의 비행속도(저물량)로 살포하였다. 또한 살포물량에 따른 농약살포 효율을 조사하기 위하여 생육후기에 살포고도와

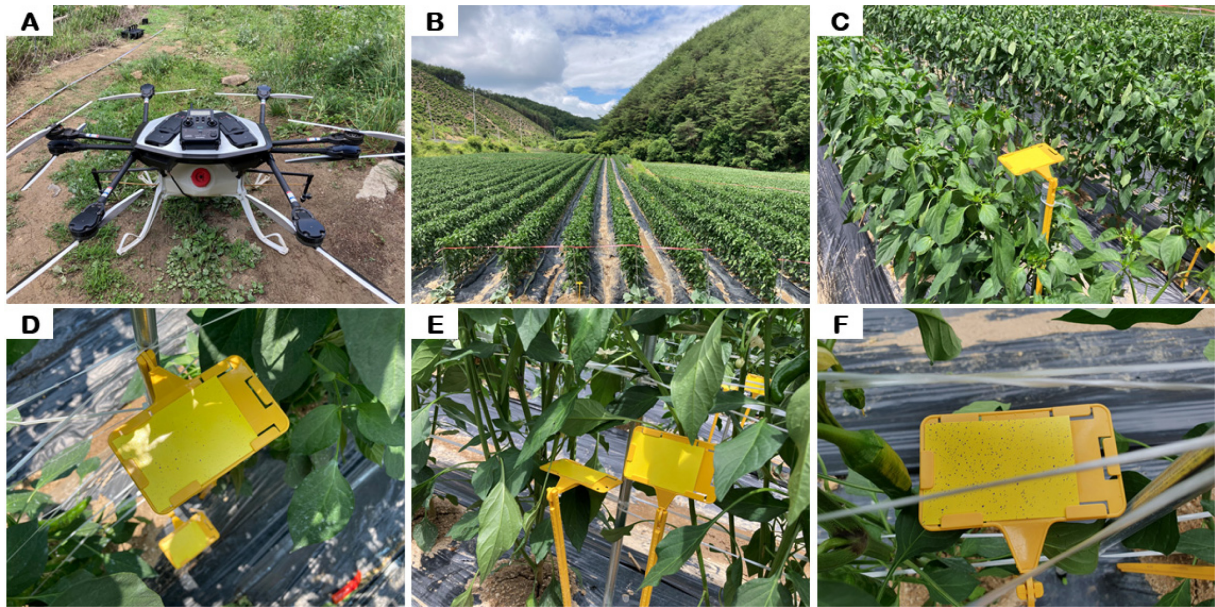


Fig. 1. The scene of field trials. A, The unmanned aerial vehicle used in the experiment; B, The view of the test site; C, Water sensitive paper placed on top of the pepper; D, Water sensitive paper placed in the middle of the pepper; E, Water sensitive paper placed on the bottom of the pepper; F, Water sensitive paper after pesticide application.

압력은 유지하고 5 km/h의 속도(고물량)로 살포하는 처리구를 별도로 배치하였다. 농약은 2023년 6월 23일에 1차 살포(생육초기)하였으며, 2차 살포는 7월 20일(생육중기), 3차 살포는 8월 17일(생육후기)에 살포하였다. 농약은 1차와 2차 살포일에 500 mL 탑재 후 각각 180과 190 mL 살포하였다. 생육후기에 저물량 처리구의 경우 탑재된 희석액 500 mL 중 170 mL 살포하였고, 고물량 처리구는 1,000 mL 중 340 mL 살포하였다. 관행 처리구는 D-3 2구 노즐이 장착된 한국 계양 제품인 충전식 분무기(KCS 1062)를 이용하여 생육중기 및 후기에 6,000 mL 살포하였다. 항공살포 후, 각 지점의 감수지는 개별 종이봉투에 담았고, 외부 수분을 차단하기 위해 지퍼백으로 밀봉하여 수분으로 인한 오염을 방지하였다. 고추 시료는 약제처리 당일 고추 높이를 구분하지 않고 무작위로 채취하여 항공살포 처리구와 관행 처리구의 농약 잔류량을 비교하였다. 관행 처리구 역시 약제살포 후 항공살포 처리구와 동일한 방법으로 시료를 채취하였으며, 시료는 실험실로 빠르게 운송하고 드라이아이스를 첨가하여 분쇄한 후 분석 전까지 -20°C 에서 냉동보관 하였다.

시약 및 기구

Difenoconazole (순도, >99.58%) 표준품은 Dr. Ehrenstofer GmbH (Augsburg, Germany)에서 구입하였다. Stock solution 조제시 사용된 methanol과 전처리 및 기기분석에 사용된 acetonitrile은 Merk (Darmstadt, Germany)제품 중 liquid chromatography (LC) 분석이 가능한 LiChrosolv 등급을 사용하였다. QuEChERS EN packet과 dispersive-SPE tube는

Agilent Technologies (California, US)의 제품을 사용하였다. 3차 증류수는 Wasserlab (de Navarra, Spain)의 Autwomatic Plus 1+2제품을 이용하였고, 이동상에 첨가된 formic acid (순도, >98.0%)는 Merk (Darmstadt, Germany)제품을 사용하였다. 전처리 과정 중 사용된 추출기는 SPEX Sample Prep (Metuchen, US)의 2010 Geno/Grinder 제품이었고, Vortex mixer는 Scientific industry (New York, US)의 Vortex-Genie 2 제품이었다. 또한, 원심분리기는 한일과학산업(주)(Incheon, Korea)의 Combi-514R 제품이었다.

잔류농약 분석법

시료 10 g을 50 mL conical centrifuge tube (Falcon™, USA)에 칭량 후 acetonitrile 10 mL를 첨가하여 1,300 rpm으로 5분간 진탕 추출하였다. 추출한 시료에 QuEChERS EN extraction packet (4 g magnesium sulfate, 1 g sodium chloride, 1 g trisodium citrate dihydrate, 0.5 g disodium hydrogencitrate sesquihydrate)을 첨가한 후 1,300 rpm에서 1분간 진탕하였으며, 이 후에 3,500 rpm에서 5분간 원심 분리하였다. 정제를 위해서 상징액 1 mL를 150 mg magnesium sulfate, 25 mg primary secondary amine (PSA) 및 2.5 mg graphitized carbon black (GCB)이 들어있는 dispersive-SPE tube에 첨가하여 30초간 교반한 후 12,000 rpm으로 5분간 원심 분리하였다. 그 후 상징액을 syringe filter (PTFE, 0.22 μm)로 여과하고 acetonitrile을 이용하여 50:50 (v/v)로 matrix matching한 후 Table 1에 제시한 LC-MS/MS 분석조건으로 잔류농약을 분석하였다.

Table 1. LC-MS/MS conditions for the residual analysis of difenoconazole in pepper

<LC condition>					
Instrument	ExionLC™, AB SCIEX, USA				
Column	ACQUITY UPLC® CSH C18, 2.1 mm I.D. × 100 mm L. (1.7 µm particle size)				
Flow rate	0.2 mL/min				
	A: 0.1% formic acid in distilled water				
	B: 0.1% formic acid in acetonitrile				
Mobile phase	Time (min)	A (%)	B (%)		
	0.0	80	20		
	0.8	80	20		
	1.0	10	90		
	5.8	10	90		
	6.0	80	20		
	10.0	80	20		
Injection volume	1 µL				
<Mass condition>					
Instrument	QTRAP 5500 system, AB SCIEX, USA				
Ionspray voltage	5500 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)
Difenoconazole	406.2	251.0	33	188.0	57

^{a)} Collision energy

분석법 검증

고추 중 difenoconazole의 정량한계 (Limit of quantitation, LOQ)는 크로마토그램 상 signal/noise ratio가 10 이상인 농도로 설정하였다(Saadati et al., 2013). 또한 고추 중 difenoconazole의 회수율 시험은 LOQ, LOQ의 10배 및 50배의 수준에서 수행하여 전처리법 및 기기분석법의 유효성을 판단하였다(FAO, 2016).

감수지 도포율 산출

감수지 도포율은 자체적으로 개발하여 저작권을 등록한 프로그램을 이용하여 산출하였다. 저작물의 명칭은 “약액의 입경 및 비산량 측정을 위한 감수시험지 도포율 산정 프로그램”이며, 등록번호는 제C-2022-050602호이다. 이 프로그램의 유효성을 검증하기 위하여 Fig. 2에 제시한 바와 같이 감수지 중 1, 2, 3 cm²의 면적에 물을 도포한 후 처리한 면적 도포율 대비 산출된 도포율을 산출하였다. 또한 처리한 면적을 동일하게 하고 표시 개수를 달리하여 산출하였다.

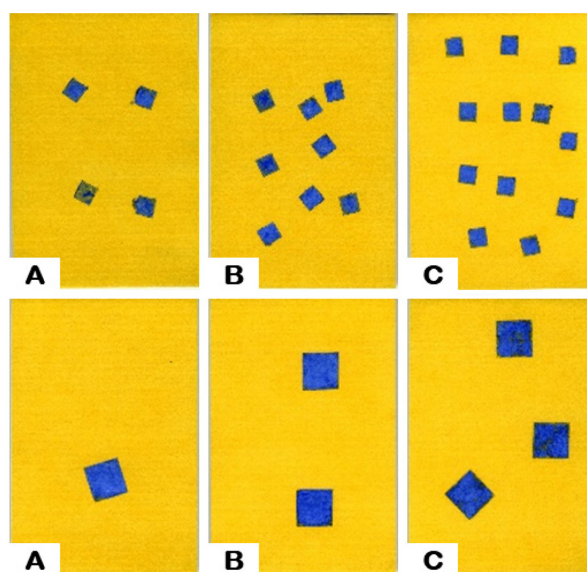


Fig. 2. Methods for water sensitive paper treatment to validate the accuracy of coverage calculation program. A, 1 cm² treatment; B, 2 cm² treatment; C, 3 cm² treatment.

통계분석

고추의 생육 시기, 감수지 배치 높이 및 농약 살포 방법에 따른 감수지 중 무인 항공살포 농약의 도포비와 고추 중 항공살포 농약의 잔류량을 통계분석 하기 위해서 SPSS (ver. 23, IBM Corporation, USA) 소프트웨어를 사용하였다. 고추의 생육 시기 및 감수지 배치 높이에 따른 무인 항공살포 농약의 도포비의 빈도(Frequency), Kruskal-Wallis 및 Spearman's rank correlation 분석을 통해 항공살포 농약의 분포 특성을 검정하였다. 또한, 고추 중 항공살포 농약의 잔류량은 일원 분산분석(one-way analysis of variance, ANOVA) 후 Duncan의 다중검정 (Duncan's multiple range test) 및 독립표본 t검정(Independent sample t-test)을 통해 살포방법에 따른 잔류량의 유의적 차이를 검정하였다($p < 0.05$).

결과 및 고찰

잔류농약 분석법 검증

고추 중 difenoconazole의 정량한계는 0.01 mg/kg이었다.

고추 중 시험농약의 회수율은 Table 2에 제시한 바와 같이 70.8-107.7%이었으며, RSD는 5.9% 이하로 처리농도별 회수율과 RSD는 FAO(2016) 기준에 부합하였다.

감수지 도포율 산출 프로그램 유효성

감수지 중 1, 2, 3 cm²에 해당하는 면적을 0.25 및 1 cm²의 크기로 3반복 도포한 결과 회수율은 89.5-110.3%로 처리면적과 개수에 상관없이 모두 우수한 결과를 보였다(Table 3). 따라서 도포율 산출 프로그램을 이용하여 감수지 도포율을 산출하는 것은 적절하다고 판단되었다.

고추 중 항공살포 농약의 잔류 균일도

동일 높이별 감수지 도포비의 변이계수를 산출한 결과 %RSD는 52.94-165.64%로 수평적인 잔류 균일도는 고추 생육과 관계없이 낮았다(Table 4). 이러한 불균일한 잔류는 배추(Kim et al., 2021a)와 쪽파(Kim et al., 2021b; Noh et al., 2019)에서도 발생하는 무인항공 살포농약의 공통점이다. 무인항공기는 기존 고정익 항공기를 대체할 수 있는 방제기

Table 2. Recovery of difenoconazole in pepper for the validation of residual method

Fortification (mg/kg)	Recovery (%)				RSD (%)
	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Mean ± SD	
0.01	76.4	74.2	70.8	73.8 ± 2.8	3.8
0.1	104.7	107.7	103.6	105.3 ± 2.1	2.0
0.5	95.7	101.3	107.6	101.5 ± 6.0	5.9

Table 3. Validation of program for calculating coverage of water sensitive paper

Treatment area (cm ²)	No. of treatment	Coverage of recovery (A, %)	Coverage of treatment (B, %)	Recovery (%) (A/B × 100)
1	1	2.5	2.5	99.8
		2.5	2.5	97.7
		2.5	2.5	99.4
	4	2.8	2.5	111.5
		2.9	2.5	113.9
		2.3	2.5	89.5
		5.0	5.1	98.5
2	2	5.3	5.1	104.2
		5.1	5.1	101.0
		5.6	5.1	110.3
	8	5.4	5.1	107.3
		5.3	5.1	104.3
		7.4	7.6	97.5
3	3	7.8	7.6	102.6
		7.7	7.6	102.0
		8.0	7.6	105.8
	12	8.2	7.6	108.4
		7.6	7.6	99.5

Table 4. Frequency analysis of coverage ratio of WSPs according to growth stage of pepper and placement of WSPs

Growth stage	Flight velocity (km/h)	Placement of WSP	Coverage ratio ^{a)} of WSP (%)				Skewness	Kurtosis
			Proportion	Mean ± SD (%RSD)	Median	Mode		
Early	11	Top	45.15	1.81 ± 2.08 (115.31)	1.51	0.00	1.62	2.39
		Middle	- ^{b)}	-	-	-		
		Horizontal	33.58	1.34 ± 1.7 (126.31)	0.45	0.00		
		Vertical	21.29	0.85 ± 1.41 (165.52)	0.21	0.00		
Middle	11	Top	45.52	1.82 ± 0.96 (52.94)	1.71	0.38	1.16	0.54
		Middle	25.71	1.03 ± 0.76 (74.26)	0.81	0.80		
		Horizontal	19.91	0.8 ± 0.73 (91.53)	0.53	0.21		
		Vertical	8.86	0.35 ± 0.39 (110.88)	0.22	0.00		
Late	11	Top	48.14	1.93 ± 2.1 (109.08)	1.5	0.11	2.58	8.47
		Middle	24.42	0.98 ± 1.13 (115.25)	0.44	0.44		
		Horizontal	16.75	0.67 ± 0.83 (123.54)	0.37	0.05		
		Vertical	10.71	0.43 ± 0.52 (121.07)	0.2	0.04		
Late	5	Top	41.34	1.65 ± 2.31 (139.66)	0.11	0.00	2.22	4.78
		Middle	25.4	1.02 ± 1.59 (156.31)	0.3	0.00		
		Horizontal	21.15	0.85 ± 1.04 (123.14)	0.48	0.01		
		Vertical	12.13	0.49 ± 0.67 (138.34)	0.1	0.01		

^{a)} Coverage ratio (%) = (each coverage of WSP/ total coverage of WSPs) × 100

^{b)} Considering canopy height of pepper, the coverages of both bottom and top were measured.

이기 때문에(Li et al., 2021b) 무인항공 살포조건, 살포액의 물성 등을 조정하여 살포 균일도 개선이 필요하다(Kim et al., 2023).

또한, 고추 생육기별 감수지 총 도포율 대비 상부·중부·하부 지점의 도포율의 비율을 산출한 결과(Table 4) 감수지 배치 높이별 도포비는 평균값 > 중앙값 > 최빈값의 순서와 같고(Doane and Seward, 2011), 왜도는 모두 1을 초과하여 감수지 배치 높이별 도포율은 우비대칭형(skewed right) 분포를 보였다(Rigby and Stasinopoulos, 2004). 즉, 감수지 중 무인항공 살포농약의 도포비는 높이에 따라 편중된 경향을 보였고, 모든 생육기에서 공통적으로 상부에서 하부지점으로 내려갈수록 약 12-37% 감소하는 경향을 보였다(Table 4).

이러한 경향은 옥수수(Yongjun et al., 2017), 포도(Biglia et al., 2022), 사탕수수(Zhang et al., 2020)와 같은 작물뿐만

아니라 사과(Wang et al., 2022) 아몬드(Li et al., 2021a) 및 귤(Tang et al., 2018)과 같은 나무에서도 동일하게 나타났다. 이는 무인항공기 로터에서 발생하는 하향풍은 살포 액적의 부착 및 분포에 영향을 주는 주요인이며(Chang et al., 2023), 작물의 canopy는 무인항공기의 하향풍을 저감시킨다는 보고를 고려했을 때(Yang et al., 2022), canopy가 발달된 작물의 경우 항공살포 농약의 잔류량은 높이에 따라 불균일하며, 특히 하부지점 대비 상부에 편중될 것으로 판단되었다. 따라서, 고추와 같이 canopy가 발달된 작물의 경우 효과적인 병·해충 예방을 위한 최적 무인항공방제법이 필요하다고 판단되었다.

고추 생육기에 따른 항공살포 농약의 잔류특성

고추 생육기에 따른 동일 높이별 감수지 도포비를 Krus-

Table 5. Kruskal-Wallis analysis of coverage ratio of water sensitive papers according to growth stage of pepper

Placements of WSPs	Growth stage	Flight velocity (km/h)	Mean rank	χ^2	P
Top	Early	11	48.72	5.260	0.154 (NS ^{b)})
	Middle	11	59.12		
	Late	11	53.24		
		5	40.92		
Middle	Early	11	- ^{a)}	4.845	0.089 (NS)
	Middle	11	45.36		
	Late	11	36.64		
		5	32.00		
Bottom	Early	11	51.92	2.032	0.566 (NS)
	Middle	11	56.60		
	Late	11	46.08		
		5	47.40		
Horizontal	Early	11	50.9	0.089	0.993 (NS)
	Middle	11	49.08		
	Late	11	51.40		
		5	50.62		
Vertical	Early	11	50.9	0.089	0.993 (NS)
	Middle	11	49.08		
	Late	11	51.40		
		5	50.62		

^{a)} Considering canopy height of pepper, the coverages of both bottom and top were measured.

^{b)} No significant differences exist at $p > 0.05$

Table 6. Spearman's correlation coefficients between height and coverage of WSPs according to growth stage of pepper

Growth stage	Flight speed (km/h)	Variables	Correlation coefficient	
			Height	Coverage
Early	11	Height	1	-
		Coverage	0.101	1
Middle	11	Height	1	-
		Coverage	0.486 ^{a)}	1
Late	11	Height	1	-
		Coverage	0.333 ^{a)}	1
	5	Height	1	-
		Coverage	-0.19	1

^{a)} There are significant differences at $p < 0.01$

kal-Wallis 분석한 결과(Table 5) 고추 상부·중부·하부 지점 별 감수지 중 무인항공 살포농약의 도포비는 생육기에 따라 차이를 보이지 않았다($p < 0.05$). 그러나 고추 생육에 따른 도포율의 침도를 고려했을 때(Table 4) 고추 생육초기 침도는 3에 근접한 값으로 상대적으로 정규분포에 근접한 경향을 보였지만, 생육중기 침도는 0.54로 완첨(Platykurtic) 분포를 보여 도포비의 최대값과 꼬리값의 차이가 상대적으로 적은 경향을 보였고, 생육 후기에는 3을 초과하여 급첨(Leptokurtic) 분포를 보임에 따라 상대적으로 도포비에 이상치(outlier)가 많이 발생한 경향을 보였다(Loperfido, 2020). 즉, 감수지 높이별 항공살포 농약의 도포비는 생육 초기에 이상치가 가장 적은 경향을 보였다.

생육기별 감수지 배치 높이에 따른 무인항공 살포농약의

도포비를 spearman's correlation 분석한 결과(Table 6) 고추 생육초기에 감수지 도포비는 높이에 따라 유의적인 차이를 보이지 않았지만($p < 0.01$), 생육중기와 후기의 상관계수는 0.333-0.486으로 약한 양적 상관관계를 보였다(Rovai et al., 2013). 이는 spearman 상관계수의 판별 기준에 따라 중간(moderate) 또는 강한(strong) 양적 상관관계를 보일 수 있다고 판단할 수 있다(Leclezio et al., 2015; Yan et al., 2019). 또한, 본 연구에서 고추열매의 특성을 반영하여 하부지점에 지면으로부터 수직으로 배치한 감수지 중 도포비는 동일 지점에 수평으로 배치된 감수지 대비 약 6-12%p 낮은 경향을 보였다는 점을 고려했을 때(Table 4), 고추가 생육함에 따라 하부지점의 고추 중 무인항공 살포농약의 잔류량은 상대적으로 낮을 것으로 판단되었다. 따라서 이러한 높이별 잔류

Table 7. Residue of difenoconazole in pepper according to growth stage of pepper and application method

Growth stage	Application method		P-value ^{c)}
	Residue (mean ± SD, mg/kg)		
	Conventional spray	UAV spray	
Early	- ^{a)}	0.09 ± 0.01 a ^{b)}	-
Mid	0.22 ± 0.02 a	0.03 ± 0.00 c	0.00
Late	0.11 ± 0.01 b	0.07 ± 0.01 b	0.00

a) Conventional spray was conducted at both mid and late stage of pepper
 b) The same small letters mean no significant differences within the same column at $p < 0.05$.
 c) There were significant differences between conventional spray and UAV spray at $p < 0.05$ level by t-test.

균일도를 개선하기 위해서는 고추 생육초기에 항공방제 하는 것이 유리할 것으로 판단되었다.

살포방법에 따른 항공살포 농약의 잔류특성

살포 기기에 따른 고추 중 difenoconazole 잔류량을 분석한 결과는 각각 Table 7에 제시하였다. 고추 중 difenoconazole 잔류량은 살포기와 관계없이 고추가 생육함에 따라 유의적으로 감소하는 경향을 보였으며($p < 0.05$), 모든 처리구에서 고추 중 difenoconazole의 잔류량은 잔류허용기준 (1 mg/kg) 미만으로 안전성에는 문제가 없다고 판단되었다 (Table 7). 또한, 고추 생육중기와 후기에 difenoconazole의 잔류량은 관행살포가 무인 항공살포 처리구보다 높은 경향을 보였다($p < 0.05$). 이는 고추 중 농약의 도포율은 관행살포가 무인항공살포 대비 높았다는 보고와 유의하였다(Xiao et al., 2020). 그러나 무인항공살포 및 관행살포에 따른 고

추와 밀 중 진딧물 방제효과는 비견할 수 있고, 작업 효율성은 무인항공방제가 관행살포 대비 높은 경향을 보였다(Wang et al., 2019a,b). 따라서 농업 노동력이 부족한 한국의 경우 무인항공 방제기를 이용하는 방법도 적절할 것으로 판단되었다(Kim et al., 2023).

또한, 5 km/h의 비행속도로 약제를 살포한 처리구(고물량)의 감수지 도포비는 11 km/h 처리구(저물량)와 달리 감수지 배치 높이(고추 상부·중부·하부 지점)와 유의한 관련성을 보이지 않았고($p < 0.01$, Table 6), 평균 도포율은 살포물량에 따라 증가하는 경향을 보였다(Fig. 3). 이는 무인항공기에 탑재된 희석액의 중량이 목화 중 살포 액적의 부착량 및 침투성과 양적 상관관계를 보였고(Zhan et al., 2022), 살포량이 증가함에 따라 사과나무 중 살포 액적의 도포율과 침투성이 개선되었다는 보고와 유사하였다(Wang et al., 2022).

또한, 무인항공기의 로터에서 발생하는 하향풍(down-

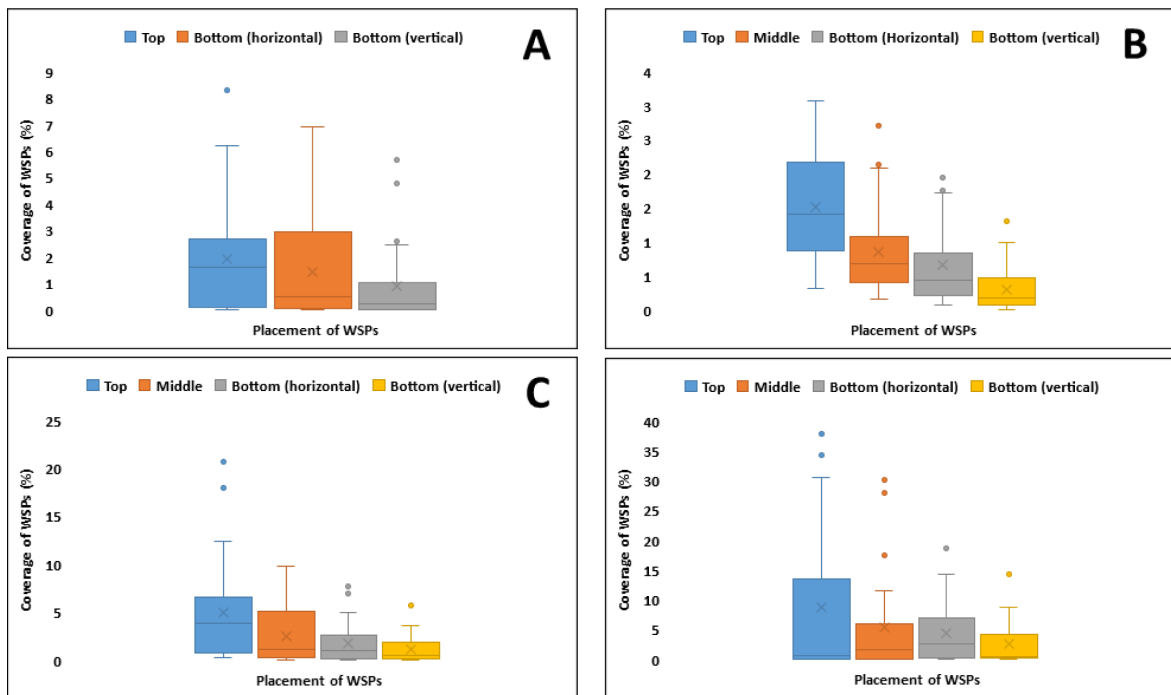


Fig. 3. Coverage of water sensitive paper according to pepper height by growth stage. A; Early stage, B; middle stage, C; late stage (11 km/h), D; late stage (5 km/h).

wash)은 바람과 같은 기상요인으로부터 발생하는 액적 (airborne droplet)의 비산을 저감 할 뿐만 아니라 작물의 canopy 내부로 액적이 침투할 수 있게 하며(Zhu et al., 2022), 와류가 강해질수록 살포 액적의 부착량 및 부착 균일도 개선되었다는 보고를 고려했을 때(Guo et al., 2019), 무인항공기 비행속도가 5 km/h인 처리구의 경우 11 km/h 처리구 대비 감수지 배치 높이에 따른 왜도와 침도값이 감소했다는 점과 유사하였다(Table 4). 따라서 고추와 같이 잎과 canopy가 발달한 작물 중 무인항공기를 이용한 농약 살포시 안전 사용기준에 준하여 살포하되 비행속도를 낮추고, 살포물량을 증가시키는 것이 효과적인 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ017000)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

Author Information and Contributions

Chang Jo Kim, Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Researcher, <http://orcid.org/0000-0002-5872-9262>

Yuan Xiu, 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-Young Jung, Department of Agricultural and Lifesciences, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Professor

Hae-Yuck Jung, MOOSUNG Aviation Co., Ltd., 236-1 Sinpyeong-ro, Pyeongtaek, 17916, Executive Director

Yongho Shin, Department of Applied biology, Dong-A University, Busan, 49315, Korea, Professor

Xiongzhe Han, Department of Biosystem Engineering, College of Agricultural and Life Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

Yi-Gi Min, Korea Agricultural Unmanned Aerial Vehicle Association

Se-Woon Hong, Department of Rural and Bio-systems Engineering, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Professor

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

Kyeong-Ae Son, Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Researcher

Won Tae Jeong, Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Researcher

Sang-Hyeob Lee, Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Researcher,

Hyun Ho Noh, Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Researcher, <http://orcid.org/0000-0002-7568-8490>

Conceptualization, Hyun Ho Noh; consultation, Kee Sung Kyung; field trials, Hyun Ho Noh, Chang Jo Kim, Yuan Xiu, Min Kim, Hee-Young Jung, Hae-Yuck Jung; formal analysis, Hyun Ho Noh, Chang Jo Kim; writing-original draft, Chang Jo Kim; writing-review & editing, Hyun Ho Noh; resources, Hee-Young Jung, Hae-Yuck Jung, Yongho Shin, Xiongzhe Han, Yi-Gi Min, Se-Woon Hong, Kyeong-Ae Son, Won Tae Jeong, Sang-Hyeob Lee; project administration, Hyun Ho Noh.

이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Literature cited

- Biglia A, Grella M, Bloise N, Comba L, Mozzanini E, et al., 2022. UAV-spray application in vineyards: Flight modes and spray system adjustment effects on canopy deposit, coverage, and off-target losses. *Sci. Total Environ.* 845:157292. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157292>
- Carvalho FP, 2017. Pesticides, environment, and food safety. *Food Energy Secur.* 6(2):48-60. <https://doi.org/10.1002/fes3.108>
- Chang K, Chen S, Wang M, Xue X, Lan Y, 2023. Numerical

- simulation and verification of rotor downwash flow field of plant protection UAV at different rotor speeds. *Front. Plant Sci.* 13:1087636. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1087636>
- Chen Y, Hou C, Tang Y, Zhuang J, Lin J, et al., 2019. An effective spray drift-reducing method for a plant protection unmanned aerial vehicle. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 12(5):14-20. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191205.4289>
- Choi DS, Ma KC, Kim HJ, Lee JH, Oh SA, et al., 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. <https://doi.org/10.5656/KSAE.2018.09.0.031>
- Doane DP, Seward LE, 2011. Measuring skewness: a forgotten statistic?. *J. Stat. Educ.* 19(2):1069-1898:1-18. <https://doi.org/10.1080/10691898.2011.11889611>
- 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.
- Guo S, Li J, Yao W, Zhan Y, Li Y, et al., 2019. Distribution characteristics on droplet deposition of wind field vortex formed by multi-rotor UAV. *PLoS ONE.* 14(7):e0220024. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220024>
- Hunter MC, Smith RG, Schipanski ME, Atwood LW, Mortensen DA, 2017. Agriculture in 2050: recalibrating targets for sustainable intensification. *Bioscience*, 67(4): 386-391. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix010>
- Kim CJ, Jeong WT, Kyung KS, Lee HD, Kim D, et al., 2021a. Dissipation and distribution of picarbutrazox residue following spraying with an unmanned aerial vehicle on chinese cabbage (*Brassica campestris* var. *pekinensis*). *Molecules*, 26(18):5671. <https://doi.org/10.3390/molecules26185671>
- Kim CJ, Lee RK, Shin HJ, Moon BC, Kim HT, et al., 2021b. Residue and distribution characteristics of dimethomorph sprayed with agricultural multicopter onto tree onion. *Korean J. Pestic. Sci.*, 25(2):138-148. <https://doi.org/10.7585/kjps.2021.25.2.138>
- Kim CJ, Yuan X, Kim M, Kyung KS, Noh HH, 2023. Monitoring and risk analysis of residual pesticides drifted by unmanned aerial spraying. *Sci. Rep.* 13(1):10834. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36822-w>
- Leclezio L, Jansen A, Whittemore VH, de Vries PJ, 2015. Pilot validation of the tuberous sclerosis-associated neuropsychiatric disorders (TAND) checklist. *Pediatr. Neurol.* 52(1):16-24. <https://doi.org/10.1016/j.pediatrneurol.2014.10.006>
- Li X, Giles DK, Niederholzer FJ, Andaloro JT, Lang EB, et al., 2021a. Evaluation of an unmanned aerial vehicle as a new method of pesticide application for almond crop protection. *Pest Manag. Sci.* 77(1):527-537. <https://doi.org/10.1002/ps.6052>
- Li X, Giles DK, Andaloro JT, Long R, Lang EB, et al., 2021b. Comparison of UAV and fixed-wing aerial application for alfalfa insect pest control: evaluating efficacy, residues, and spray quality. *Pest Manag. Sci.* 77(11):4980-4992. <https://doi.org/10.1002/ps.6540>
- Loperfido N, 2020. Kurtosis-based projection pursuit for outlier detection in financial time series. *Eur. J. Financ.* 26(2-3):142-164. <https://doi.org/10.1080/1351847X.2019.1647864>
- Noh HH, Moon BC, Kim CJ, Kwon HY, Ro JH, et al., 2019. Residual characteristics of picarbutrazox and its metabolite TZ-1E by aerial spraying with agricultural multi-copter in shallot. *Korean J. Pestic. Sci.* 23(3):162-171. <https://doi.org/10.7585/kjps.2019.23.3.162>
- 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. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20171003.3075>
- Rigby RA, Stasinopoulos DM, 2004. Smooth centile curves for skew and kurtotic data modelled using the Box-Cox power exponential distribution. *Stat. Med.* 23(19):3053-3076. <https://doi.org/10.1002/sim.1861>
- Rovai AP, Baker JD, Ponton MK, 2013. *Social Science Research Design and Statistics: A Practitioner's Guide to Research Methods and IBM SPSS*. Watertree Press: Chesapeake, V.A., USA, 2013.
- Saadati N, Abdullah MP, Zakaria Z, Sany SBT, Rezayl M, et al., 2013. Limit of detection and limit of quantification development procedures for organochlorine pesticides analysis in water and sediment matrices. *Chem. Cent. J.* 7(63). <https://doi.org/10.1186/1752-153X-7-63>
- Tang Y, Hou CJ, Luo SM, Lin JT, Yang Z, et al., 2018. Effects of operation height and tree shape on droplet deposition in citrus trees using an unmanned aerial vehicle. *Comput. Electr. Agric.*, 148:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.026>
- Tsouros DC, Bibi S, Sarigiannidis PG, 2019. A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 10(11):349. <https://doi.org/10.3390/info10110349>
- Wang C, Liu Y, Zhang Z, Han L, Li Y, et al., 2022. Spray performance evaluation of a six-rotor unmanned aerial vehicle sprayer for pesticide application using an orchard operation mode in apple orchards. *Pest Manag. Sci.* 78(6):2449-2466. <https://doi.org/10.1002/ps.6875>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139793>
- Wang G, Lan Y, Yuan H, Qi H, Chen P, et al., 2019a. Comparison of spray deposition, control efficacy on wheat aphids and working efficiency in the wheat field of the unmanned aerial vehicle with boom sprayer and two conventional knapsack sprayers. *Appl. Sci.* 9(2):218. <https://doi.org/10.3390/app9020218>

/doi.org/10.3390/app9020218

Wang G, Lan Y, Qi H, Chen P, Hewitt A, et al., 2019b. Field evaluation of an unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer: effect of spray volume on deposition and the control of pests and disease in wheat. *Pest Manag. Sci.* 75(6):1546-1555. <https://doi.org/10.1002/ps.5321>

Wang S, Zhang Q, Yu Y, Chen Y, Zeng S, et al., 2018. Residues, dissipation kinetics, and dietary intake risk assessment of two fungicides in grape and soil. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 100:72-79. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2018.10.015>

World Health Organization (WHO), 2006. Pesticides and their application: for the control of vectors and pests of public health importance (No. WHO/CDS/NTD/WHOPES/GCDPP/2006.1). World Health Organization.

Xiao Q, Du R, Yang L, Han X, Zhao S, et al., 2020. Comparison of droplet deposition control efficacy on phytophthora capsica and aphids in the processing pepper field of the unmanned aerial vehicle and knapsack sprayer. *Agronomy.* 10(2):215. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020215>

Yan Z, Wang S, Ma D, Liu B, Lin H, et al., 2019. Meteorological factors affecting pan evaporation in the Haihe River Basin, China. *Water*, 11(2):317. <https://doi.org/10.3390/w11020317>

Yang S, Xu P, Jiang S, Zheng Y, 2022. Downwash characteristics and analysis from a six-rotor unmanned aerial vehicle configured for plant protection. *Pest Manag. Sci.* 78(4):1707-1720. <https://doi.org/10.1002/ps.6790>

Yongjun Z, Shenghui Y, Chunjiang Z, Liping C, Lan Y, et al., 2017. Modelling operation parameters of UAV on spray effects at different growth stages of corns. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 10(3):57-66. <http://10.3965/j.ijabe.20171003.2578>

Zhan Y, Chen P, Xu W, Chen S, Han Y, et al., 2022. Influence of the downwash airflow distribution characteristics of a plant protection UAV on spray deposit distribution. *Biosyst. Eng.* 216:32-45. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.016>

Zhang XQ, Song XP, Liang YJ, Qin ZQ, Zhang BQ, et al., 2020. Effects of spray parameters of drone on the droplet deposition in sugarcane canopy. *Sugar Tech*, 22:583-588. <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00792-z>

Zhu Y, Guo Q, Tang Y, Zhu X, He Y, et al., 2022. CFD simulation and measurement of the downwash airflow of a quadrotor plant protection UAV during operation. *Comput. Electron. Agric.*, 201:107286. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107286>

고추 생육단계에 따른 무인항공 살포 농약의 잔류 분포 특성

김창조 · Xiu Yuan · 김 민 · 정희영¹ · 정해역² · 신용호³ · Xiongze Han⁴ · 민이기⁵ · 홍세운⁶ · 경기성⁷
손경애 · 정원태 · 이상협 · 노현호*

국립농업과학원 잔류화학평가과, ¹경북대학교 응용생명과학부, ²(주)무성항공, ³동아대학교 응용생물공학과, ⁴강원대학교 바이오시스템기계공학과, ⁵(사)한국농업무인항공협회, ⁶전남대학교 지역바이오시스템공학과, ⁷충북대학교 환경생명화학학과

요약 이 연구는 고추의 생육기에 따른 항공살포 농약의 잔류 분포를 조사하고 살포기별 고추 중 농약의 잔류특성을 구명하기 위하여 수행되었다. 고추 생육기(초기, 중기, 후기)에 따라 감수지를 높이별(상부, 중부, 하부)로 설치하여 항공살포 농약의 도포비를 이용하여 잔류분포를 조사하였다. 또한 항공살포 방법 및 살포기에 따른 농약 잔류량을 조사하여 잔류특성을 구명하였다. 시험 결과 지면으로부터 수평에 배치된 감수지 중 무인항공 살포농약의 도포비의 변이계수는 52.94-165.64%로 불균일한 경향을 보였다. 왜도는 모든 생육기에서 1을 초과하여 높이에 따른 감수지 중 무인항공 살포농약의 도포비의 편중된 경향을 보였다. 특히 생육중기와 후기에 도포비는 상부에서 하부로 내려갈수록 감소하는 경향을 보였으며($p < 0.01$), 첨도는 0.54 및 8.47로 이상치가 많이 발생한 것으로 나타났다. 따라서 무인항공 살포는 고추 생육 초기에 실시하는 것이 가장 효율적이라고 판단되었다. 그러나 5 km/h의 속도로 비행하여 2배의 살포 물량을 처리했을 때 모든 높이에서 평균 도포율이 약 2배 증가하였으므로 고추 생육중기 또는 후기에 적합한 무인항공 방제법이라고 판단되었다. 또한, 고추 중 difenoconazole의 잔류량은 관행살포시 0.11-0.22 mg/kg으로 항공살포 처리구 대비 높은 경향을 보였지만, 모든 처리구에서 약효 및 안전상에 문제가 없으므로 농업 노동력이 부족한 한국의 경우 무인항공방제기를 이용하는 것이 합리적이라고 판단되었다.

색인어 항공살포, 잔류농약, 잔류분포, 감수지, 고추