



## ORIGINAL ARTICLES

## 전착제 종류 및 희석비에 따른 무인항공 살포 액적 특성과 DRIFTSIM 기반 비산 저감 가능성 평가

노현호<sup>1\*</sup> · 김창조<sup>2</sup> · 김소희<sup>1</sup> · 은혜란<sup>3</sup> · 김민석<sup>1</sup> · 김현우<sup>1</sup> · 최정윤<sup>1</sup><sup>1</sup>국립농업과학원 잔류화학평가과, <sup>2</sup>국립농산물품질관리원 안전성분석과,<sup>3</sup>국립농업과학원 식물병방제과

### Assessing the Impact of Surfactant Adjuvants on Droplet Size and Spray Drift Distance of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Pesticide Application

Hyun Ho Noh<sup>1\*</sup>, Chang Jo Kim<sup>2</sup>, So-Hee Kim<sup>1</sup>, Hye-Ran Eun<sup>3</sup>, Min-Seok Kim<sup>1</sup>,  
Hyun-Woo Kim<sup>1</sup>, and Jeong Yoon Choi<sup>1</sup><sup>1</sup>Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea,<sup>2</sup>Division of Safety Analysis, Experiment Research Institute,

National Agricultural Product Quality Management Service, Gimcheon 39660, Korea,

<sup>3</sup>Plant Disease Control Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

(Received on January 21, 2026. Revised on February 23, 2026. Accepted on February 24, 2026)

**Abstract** Our study investigated if surfactant adjuvants could modify the proportion of pesticide droplets to reduce the spray drift distance of unmanned aerial vehicle (UAV) pesticide applications. We quantified the drift distance using the DRIFTSIM model. A commonly used UAV nozzle (XR8002) was operated at 40 psi. We diluted commercially available adjuvants at 0.5–4% (v/v) with water to prepare the spray solutions. For each treatment, droplet spectra were measured in triplicates with a laser diffraction system (DV0.1, DV0.5/VMD [Volume Median Diameter], DV0.9, and volume fractions of fine droplets < 100  $\mu\text{m}$  and < 215  $\mu\text{m}$ ). The measured DV values were then applied to DRIFTSIM (array-of-droplets mode) to predict the spray drift distance under a wind speed of 2 m/s at discharge heights of 2 m and 1 m. Among the tested products, spreader-sticker and paraffin adjuvants increased the VMD and reduced the proportion of fine droplets compared to water droplets. This indicates low drift potential. To maximize the droplet size and VMD, the optimal dilution rates were 0.5% for spreader-sticker and 2% for paraffin. At discharge heights of 2 m and 1 m respectively, the predicted representative drift distances were 7.19 m and 2.52 m for water, 4.31 m and 1.2 m for spreader-sticker, and 6.26 m and 1.97 m for paraffin. The drift distance for each treatment reduced by approximately 65%, 72%, and 68%, respectively, when the discharge height was lowered to 1 m. Our study results demonstrate that increased adjuvant-based pesticide droplet size combined with lowered spray discharge height can serve as an effective strategy to reduce the spray drift distance in UAV pesticide applications.

**Key words:** Adjuvant, Droplet size, DRIFTSIM, Pesticide spray drift, Unmanned aerial vehicle (UAV)

## 서론

농작업에서 농약의 살포는 병해충으로부터 농작물을 보호

하기 위해 매우 중요하지만 높은 강도의 노동력을 요구하는 작업으로 최근 농업 종사자의 고령화에 따른 효율적인 농약 살포에 대한 요구가 끊이지 않고 있다. 이러한 측면에서 4차산업혁명 시대의 도래와 함께 드론이라고 불리는 무인멀티콥터를 이용한 농약 살포가 대중화되고 있다(Seong et al., 2014). 무인항공기를 이용하면 짧은 시간동안 넓은 면적

\*Corresponding author

E-mail: noh1983@korea.kr

에 농약을 살포할 수 있고 사람이 접근하기 어려운 지형의 필지도 공중에서 접근하기 때문에 쉽게 농약을 살포할 수 있다(Wang et al., 2019; Radoglou-Grammatikis et al., 2020). 하지만 공중에서 농약을 살포하기 때문에 비산으로 인한 비의도적 농약 오염에 대한 문제가 지속적으로 제기되고 있다. 또한 무인항공기를 이용한 농약 살포는 고농도의 희석액을 소량 살포하는 방식이기 때문에 약효와 약해에 대한 의문이 제기되고 있다. 특히 수도작물의 경우 방제시기가 장마와 태풍기간과 일부 겹치기 때문에 내강우성 향상과 약효 증진을 목적으로 전착제를 사용하는 경우가 많다.

우리나라에서 고착효과 및 확산효과를 증진시키는 tank mix adjuvant를 통칭하여 전착제로 분류하고 있으며, 농약 관리법제2조에서는 전착제도 농약으로 분류하고 있어서 무인항공으로 등록된 전착제만 항공살포가 가능하다. 그러나 현재 우리나라에는 무인항공으로 등록된 전착제가 없어 농업 현장에서는 유기농자재로 공시된 전착제를 사용하거나 등록되지 않은 전착제를 사용할 수밖에 없는 실정이다. 또한 우리나라에서 전착제를 등록하기 위해서는 농촌진흥청 고시 「농약 및 원제의 등록기준」 별표 10에 제시된 바와 같이 75%의 약량에 전착제를 혼합하여 살포한 처리구의 방제가와 100%의 약량으로 살포한 처리구의 방제가를 비교하여 전착제의 효과를 확인하여야 한다.

비산은 살포액의 입자가 바람 등의 요인으로 비표적 구역으로 흩날리는 현상이다. 최근 무인항공살포 농약이 비산의 주된 원인으로 지목되고 있으나 과수원에서 사용하는 SS기와 평야지대에서 사용하는 광역방제기에서도 비산이 발생하며, 인력 방제기 또한 비산을 완전히 피할 수는 없다. 농약 살포 과정에서 비산으로 주변 작물이 비의도적으로 오염될 경우 농약허용물질목록관리제도(Positive List System, PLS)에서 정한 일률기준을 초과하여 친환경 농산물 인증 취소 등의 문제가 발생할 수 있다. 비산은 풍향, 풍속의 영향이 가장 큰 자연적인 현상이며, 이를 물리적으로 제어하여 농약의 비산을 저감하는 것은 현실적으로 어렵다. 다만, 저비산 노즐 활용, 살포압력 조절 등 기체의 하드웨어적인 요소를 조절하여 비산을 일정부분 저감할 수 있다(Wang et al., 2018;

Nuttens et al., 2006; Zhu et al., 1994; Chen et al., 2021). 이러한 비산 저감 기술의 핵심은 살포 액적 크기를 증가시켜 미세액적이 바람에 의해 날아가는 것을 물리적으로 일정부분 감소시키는 것이다. 유럽 등 농업 선진국에서는 비산 저감을 통한 농약 사용량을 감소를 목표로 다양한 보조제(adjuvant) 개발이 활발하게 진행되고 있으며, 농업현장에서 적극적으로 활용되고 있다. 이 역시 살포 액적 크기를 증가시키는 것이 기술의 핵심이다. 또한 살포 액적 크기는 레이저 기반의 장치로 측정할 수 있으며, 살포 액적 크기 및 분포 변화 특성을 분석하여 비산 저감 가능성을 판단할 수 있다.

DRIFTSIM은 시뮬레이션을 기반으로 살포 액적의 비산 거리를 측정하는 프로그램으로 미국 농무부 산하 농업연구청(US Department of Agriculture-Agricultural Research Service, USDA-ARS)에서 개발하였다. 이 프로그램은 전산 유체 역학 프로그램인 FLUENT 기반으로 개별 액적 크기를 대규모의 데이터베이스에 외삽하여 비산거리를 예측하는 방식으로 개발되었다. 이 프로그램을 이용하면 최대 200 m까지의 비산거리를 예측할 수 있다. 각 살포 조건에서 측정된  $D_{V0.1}$ ,  $D_{V0.5}$ ,  $D_{V0.9}$ 를 입력하면 보다 정확한 비산거리 및 살포 액적의 분포 특성을 정밀하게 예측할 수 있다(Kruckeberg et al., 2012).

따라서 이 연구는 전착제의 액적 크기 특성을 분석하여 비산저감을 위한 전착제의 희석비를 최적화하고 이를 통해 측정된 살포 액적 크기를 기반으로 DRIFTSIM을 통해 실제 농업 현장에서 비산저감 효과를 과학적으로 검증하기 위하여 수행되었다. 이를 통해 국내 농업 환경에 최적화된 비산 저감 기술 개발을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 시험노즐 및 전착제

시험 노즐은 우리나라에서 농업용 무인항공기에 주로 사용하고 있는 80°의 분사각과 15-60 psi 압력 범위에서 운영이 가능한 확장형 부채꼴 스프레이 팁인 XR8002(Spraying Systems Co., Incheon, Korea)이었다. 전착제는 Table 1에 제시한 바와

**Table 1.** Lists of test surfactants (tank mix adjuvant)

Active ingredient	Content	Formulation
Spreader-sticker (S)	77%	DC <sup>a)</sup>
Polyoxyethylene-methyl polysiloxane (PP)	93%	SL <sup>b)</sup>
Polyether modified polysiloxane (PMP)	99%	SL
Siloxane (SX)	30%	SL
Blend of alkylaryl polyethoxylate and sodium salt of alkyl sulfonate alkylate (BA)	60%	SL
Paraffin (P)	24%	EW <sup>c)</sup>
Polyoxyethylene alkylarylether+Sodium ligno sulfonate (PS)	10%+20%	- <sup>d)</sup>

<sup>a)</sup>Dispersible concentrate, <sup>b)</sup>Soluble concentrate, <sup>c)</sup>Emulsion, <sup>d)</sup>It is not established formulation.



Fig. 1. Measurement of droplet size.

같이 유효성분을 기준으로 국내에 등록(2021년 기준)된 모든 제품을 구매하여 시험에 사용하였다. 전착제는 표준 희석비율이 없기 때문에 0.5, 1.0, 2.0, 4.0%로 희석(v/v)하여 측정 후 살포 액적 크기가 크게 나타나는 희석비로 최적화하였다.

**Droplet size 측정 및 비산 저감 평가 방법**

살포 액적 크기와 분포율은 레이저 회절 밀도 측정 장치(SprayTec, Malvern, UK)를 사용하였다. 이 장치는 전체 살포 액적 중 직경 기준 하위 10%의 크기(D<sub>v0.1</sub>), 중간 크기(D<sub>v0.5</sub>, volume median diameter, VMD), 상위 10%(D<sub>v0.9</sub>)의 크기를 측정할 수 있으며, 살포 액적 크기별 분포율도 측정할 수 있다. 노즐 팁과 살포 액적 크기 측정 장치(레이저 구역)와의 거리는 50 cm로 설정하였으며, 희석액을 40 psi의 압력으로 5초간 분사하여 3회 반복 측정하였다(Fig. 1). 이는 국제표

준화기구(International Organization for Standardization, ISO)와 미국 환경보호청(United States Environmental Protection Agency, EPA)에서 권장하는 측정 방법(ISO, 2018; EPA, 2016)으로 물을 전착제 희석액과 동일한 방법으로 살포하여 액적 크기를 측정한 후 전착제 살포 액적 크기가 물 살포 액적 크기보다 커지는 경우를 비산이 저감될 수 있는 것으로 평가하였다.

**DRIFTSIM을 이용한 비산 예측**

DRIFTSIM은 살포고도, 풍속, 습도, 온도, 살포압력 등의 기본적인 요인을 입력하고 예측하고자 하는 노즐팁을 선택하여 비산거리를 예측하도록 설계되어 있다. 이 연구에서는 시험노즐팁의 D<sub>v0.1</sub>, D<sub>v0.5</sub>, D<sub>v0.9</sub>를 실측 결과를 입력하고 array of droplets 모드로 비산거리와 살포 액적의 분포율을 예측하였다. 살포고도는 농업현장을 반영하기 위하여 2 m로 설정하였으며, 우리나라 최근 10년간 평균 풍속인 2 m/s에서 예측값을 도출하였다(Noh et al., 2024). 온도와 습도는 살포 액적 크기를 측정한 당시의 값을 입력하였으며, 살포압력은 살포 액적 크기 측정과 동일한 40 psi (275.8 kPa, 20 m/s)로 설정하였다(Fig. 2). 프로그램을 구동하면 살포 액적 크기를 범위로 제공하며, 각 살포 액적 크기 범위의 비율을 알 수 있다. 살포 액적 크기의 최대값과 비산 예측 거리를 이용한 회귀 방정식을 도출 후 실측한 VMD를 이용하여 예상 비산량을 산출하였다.

**통계분석**

살포 액적 크기는 각 처리별 3회 반복 실험 결과를 이용하였으며, 수집된 데이터는 SPSS (ver.23, IBM Corporation,

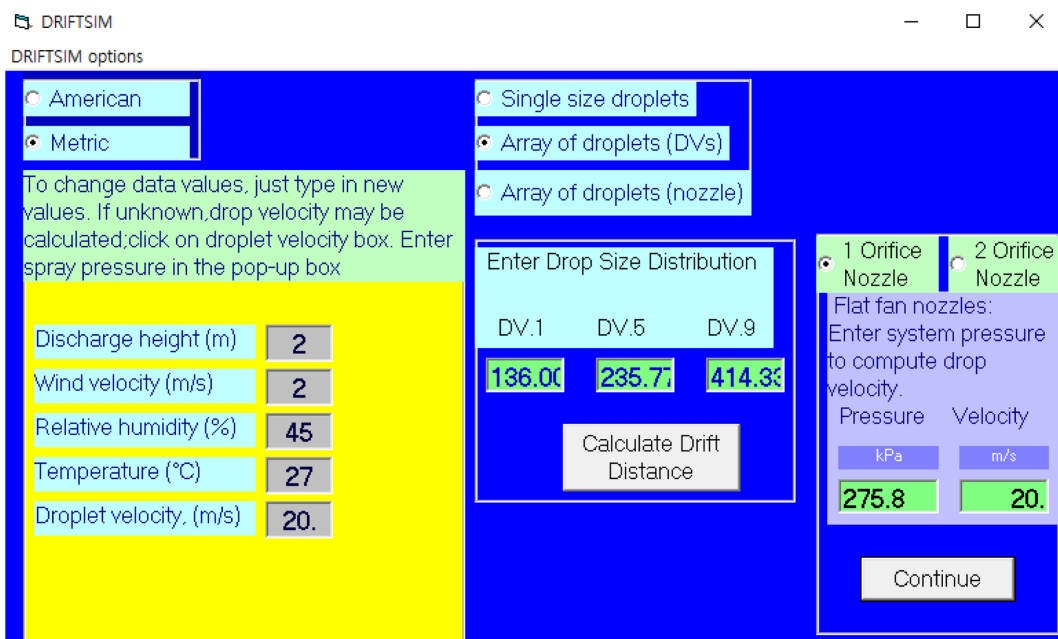


Fig. 2. Input data of DRIFTSIM for predicting drift distance.

Endicott, NY, USA) 소프트웨어를 이용하여 분석하였다. 각 변수 간 평균차이는 일원분산분석(ANOVA)을 수행하여 검정하였으며, 유의수준은  $p < 0.05$ 로 설정하였다. 유의차가 있는 경우, 평균 간 비교는 Tukey의 다중비교검정(Tukey's HSD test)을 실시하였다. 또한 살포 액적 크기 지표 간의 상관관계를 구명하기 위하여 피어슨 상관분석(Pearson's correlation analysis)을 수행하였다.

### 결과 및 고찰

#### 전착제 첨가 살포 액적 크기 및 희석배수 최적화

전체 살포 액적 중 100–200  $\mu\text{m}$  이하의 분포율이 높으면

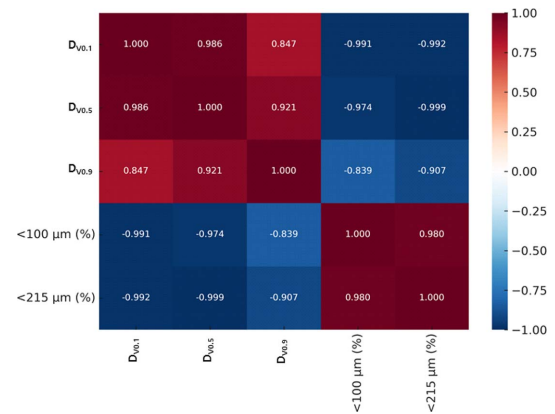


Fig. 3. Pearson correlation coefficient among various droplet size and distribution ratio of spreader-sticker surfactant solution.

Table 2. Average droplet size distribution rates of surfactant solutions according to dilution rates (n = 3)

Substance	Dilution rate (%)	Volume-average diameter ( $\mu\text{m}$ )			Distribution rate (%)	
		$D_{V0.1}$	$D_{V0.5}$	$D_{V0.9}$	< 100 $\mu\text{m}$	< 215 $\mu\text{m}$
Water	-	100.55	192.07	360.77	9.79	49.09
S <sup>a)</sup>	0.5	139.87 a <sup>b)</sup>	239.00 a	411.43 a	1.24 b	40.49 b
	1	136.00 ab	235.77 ab	414.33 a	1.63 ab	41.96 ab
	2	137.17 ab	235.00 ab	406.23 ab	1.44 b	42.07 ab
	4	130.10 b	226.47 b	395.20 b	2.32 a	45.55 a
PP <sup>b)</sup>	0.5	89.39 a	170.63 c	322.77 d	14.68 a	67.56 a
	1	91.43 a	181.70 b	367.83 c	13.36 b	62.19 b
	2	91.18 a	187.53 b	417.97 b	13.32 b	59.23 b
	4	89.42 a	197.77 a	496.60 a	13.80 ab	55.08 c
PMP <sup>c)</sup>	0.5	91.58 ab	177.87 c	337.47 c	13.39 a	64.45 a
	1	92.70 a	191.43 b	394.93 b	12.57 b	58.27 b
	2	90.38 b	187.47 b	397.80 b	13.52 a	59.52 b
	4	90.80 b	199.83 a	460.60 a	13.06 ab	54.75 c
SX <sup>d)</sup>	0.5	99.42 a	190.53 a	350.03 a	10.20 b	59.68 b
	1	91.01 b	171.43 b	317.37 b	13.91 a	67.69 a
	2	94.29 ab	182.37 ab	351.93 ab	12.22 ab	62.54 ab
	4	92.79 b	182.77 ab	371.73 ab	12.93 a	61.85 b
BA <sup>e)</sup>	0.5	98.04 a	183.90 ab	334.63 b	10.72 b	62.74 a
	1	97.06 a	186.77 ab	347.50 b	11.07 b	61.12 ab
	2	94.77 b	180.40 b	341.07 b	12.06 a	63.67 a
	4	94.96 b	190.07 a	390.20 a	11.83 a	58.97 b
P <sup>f)</sup>	0.5	108.37 ab	207.83 a	399.03 a	7.32 ab	52.73 b
	1	104.90 ab	197.53 b	373.77 b	8.26 ab	56.73 a
	2	110.13 a	209.47 a	398.70 a	6.77 b	52.17 b
	4	103.57 b	196.20 b	374.33 b	8.72 a	57.20 a
PS <sup>g)</sup>	0.5	96.50 b	183.50 c	343.17 b	11.38 a	62.39 a
	1	101.09 a	189.70 ab	348.37 ab	9.61 b	60.16 bc
	2	98.64 ab	187.37 bc	347.90 ab	10.50 ab	60.89 ab
	4	100.80 a	192.70 a	354.33 a	9.70 b	58.84 c

<sup>a)</sup>Spreader-sticker, <sup>b)</sup>Polyoxyethylene-methyl polysiloxane, <sup>c)</sup>Polyether modified polysiloxane, <sup>d)</sup>Siloxane, <sup>e)</sup>Blend of alkylaryl polyethoxylate and sodium salt of alkyl sulfonate alkylate, <sup>f)</sup>Paraffin, Polyoxyethylene alkylarylether+Sodium ligno sulfonate, <sup>g)</sup>Polyoxyethylene alkylarylether +Sodium ligno sulfonate, <sup>h)</sup>The same letter in the same column mean no significant differences within the same surfactant ( $p < 0.05$ ).

비산량이 증가한다는 다수의 보고(Hobson et al., 1993; Qin et al., 2010; Hoffmann et al., 2011)와 같이 살포 액적 크기는 비산 발생의 결정적인 요인이다. 이러한 보고를 기반으로 물과 전착제 희석액의 살포 액적 크기를 측정하여 물 살포 액적보다 전착제 살포 액적의  $D_{V0.1}$ ,  $D_{V0.5}$  및  $D_{V0.9}$  값이 커지고 200  $\mu\text{m}$  이하의 액적 분포율이 낮은 경우를 비산이 저감될 수 있는 살포조합으로 최적화할 수 있다. 또한 Fig. 3에 살포 액적 크기의 변화가 가장 명확한 Spreader-sticker (S)의 살포 액적 크기 측정결과를 이용한 피어슨 상관분석 결과를 제시하였으며,  $D_{V0.1}$ ,  $D_{V0.5}$  및  $D_{V0.9}$ 가 서로 강한 양의 상관 관계를 보였다( $p < 0.01$ ). 이 결과는  $D_{V0.1}$ 과 같이 단일 지표 만으로도 비산 가능성을 충분히 예측할 수 있음을 시사한다. 하지만 이 연구에서는 모든 살포 액적 크기의 지표를 종합

적으로 평가하여 최적의 희석비를 확립하였다.

전착제 비산 저감을 위한 최적의 희석비를 도출하기 위하여 각 희석비별 액적 크기를 ANOVA 분석하였으며, 그 결과는 Table 2에 제시하였다. Spreader-sticker (S)를 0.5%로 희석하여 살포한 액적의 평균  $D_{V0.1}$ ,  $D_{V0.5}$  및  $D_{V0.9}$ 는 각각 139.87, 239.00 및 411.43  $\mu\text{m}$ 이었으며, 4.0%로 희석한 경우에는 각각 130.10, 226.47 및 395.20  $\mu\text{m}$ 로 전착제의 농도가 높아 질수록 액적크기가 작아지는 경향을 보였다( $p < 0.05$ ). 또한 215  $\mu\text{m}$  이하 액적크기 분포율 역시 저농도로 희석했을 때 낮은 것으로 나타나 0.5% 희석액의 경우가 비산량이 가장 적을 것으로 판단되었다. Paraffin (P)을 유효성분으로 하는 전착제 경우 2.0%로 희석한 살포 액적의 평균  $D_{V0.1}$ ,  $D_{V0.5}$  및  $D_{V0.9}$ 가 각각 110.13, 209.47 및 398.70  $\mu\text{m}$ 로 다른 농도로

**Table 3.** Prediction results of droplet distribution and drift distance using the DRIFTSIM

Substance	Width ( $\mu\text{m}$ )	Portion of volume	Accumulation portion (%)	Drift distance (m)	
				Discharge height	
				2 m	1 m
S <sup>a)</sup>	35-105	0.01	1.00	10.5 <sup>c)</sup>	10.47 <sup>c)</sup>
	105-175	0.09	10.00	9.6	3.57
	175-217	0.22	32.00	4.65	1.56
	217-256	0.17	49.00	3.27	0.89
	256-295	0.14	63.00	2.43	0.49
	295-334	0.11	74.00	1.84	0.3
	334-373	0.08	82.00	1.38	0.2
	373-411	0.06	88.00	1.05	0.14
	411-450	0.12	100.00	0.8	0.1
P <sup>b)</sup>	28-83	0.00	0.00	7.26 <sup>c)</sup>	7.3 <sup>c)</sup>
	83-138	0.10	10.00	17.58	7.06
	138-193	0.22	32.00	6.6	2.41
	193-234	0.20	52.00	3.97	1.24
	234-275	0.14	66.00	2.86	0.69
	275-316	0.10	76.00	2.09	0.37
	316-357	0.07	83.00	1.56	0.23
	357-399	0.05	88.00	1.17	0.15
	399-440	0.12	100.00	0.87	0.11
Water	25-75	0.00	0.00	6.32 <sup>c)</sup>	6.34 <sup>c)</sup>
	75-126	0.10	10.00	18.74	8.85
	126-175	0.21	31.00	8.24	3.05
	175-212	0.19	50.00	4.78	1.62
	212-249	0.14	64.00	3.44	0.97
	249-286	0.11	75.00	2.58	0.56
	286-324	0.08	83.00	1.95	0.33
	324-361	0.05	88.00	1.5	0.21
361-398	0.12	100.00	1.16	0.15	

<sup>a)</sup>Spreader-sticker, <sup>b)</sup>Paraffin, <sup>c)</sup>Droplets completely evaporated before deposition

회석하여 살포한 경우보다 살포 액적 크기가 커지는 것으로 나타났다( $p < 0.05$ ). 또한 215  $\mu\text{m}$  이하의 액적 분포를 역시 2.0% 회석액이 52.17%로 가장 낮게 나타나 paraffin을 유효 성분으로 하는 것이 비산 저감 측면에서 유리할 것으로 판단되었다. Polyoxyethylene-methyl polysiloxane (PP)는  $D_{V0.5}$ 와  $D_{V0.9}$ 가 회석비가 높아질수록 유의적으로 증가하는 경향을 보였지만  $D_{V0.1}$ 은 회석비에 따라 액적크기의 변화는 차이가 없었다. Polyether modified polysiloxane (PMP)는 회석비에 따라 살포 액적 크기가 유의미하게 증가하는 경향을 보였으나  $D_{V0.1}$ 과  $D_{V0.5}$ 의 액적크기 변화 경향이 완전히 반대이기 때문에 회석비를 최적화하기 어려웠다. Siloxane (SX), Blend of alkylaryl polyethoxylate and sodium salt of alkyl sulfonate alkylate (BA), Polyoxyethylene alkylarylether+Sodium ligno sulfonate (PS)의 경우 회석비에 따른 살포 액적 크기의 변화 경향이 뚜렷하지 않았으며, 결정적으로 이 5가지의 전착제 회석액은 물 살포액의 미세입자 분포율보다 높아 비산 저감을 위한 전착제로 활용이 어렵다고 판단되었다.

#### 살포 액적 크기 분포와 비산거리 예측

물과 두 종류의 전착제 회석액을 살포하여 형성된 액적 크기를 DRIFTSIM 모델로 분석한 결과, 액적 크기에 따라 비산거리가 현저히 달라지는 경향이 나타났다(Table 3). 작은 액적일수록 공중에서 증발 및 이동 거리가 길어 비산에 취약한 것으로 확인되었으며, 반대로 큰 액적일수록 빠르게 침적하여 비산거리가 짧게 예측되었다. 물 처리에서는 75–126  $\mu\text{m}$  범위의 액적에서 최대 18.7 m(2 m 높이), 8.85 m(1 m 높이)의 비산거리가 산출되어 가장 큰 비산 위험을 보였다. 반면, spreader-sticker 전착제는 105–175  $\mu\text{m}$  액적에서 9.6 m(2 m), 3.57 m(1 m), paraffin 전착제는 83–138  $\mu\text{m}$  액적에서 17.6 m(2 m), 7.06 m(1 m)로 나타났다. 즉, 가장 비산에 취약한 구간에서 물 대비 spreader-sticker는 약 49%(2 m 기준), 60%(1 m 기준)의 비산 저감 효과를 보였으며, paraffin은 약 6%(2 m 기준), 20%(1 m 기준)의 저감 효과를 보였다. 또한  $D_{V0.5}$ 를 포함하는 액적크기 범위에서는 세 처리 간 차이가 더욱 뚜렷하게 나타났다. 물은 살포 액적 크기 175–212  $\mu\text{m}$  구간에서의 비산거리는 4.78 m(2 m), 1.62 m(1 m)이었지만 spreader-sticker 전착제는 175–217  $\mu\text{m}$  구간에서 4.65 m(2 m)와 1.56 m(1 m), paraffin 전착제는 193–234  $\mu\text{m}$  구간에서 3.97 m(2 m)와 1.24 m(1 m)로 모두 물보다 짧은 비산거리를 보였다. 이러한 결과는 전착제 첨가가 작은 액적의 발생을 억제할 뿐 아니라 유사한 크기의 액적에서도 상대적으로 비산 가능성을 줄일 수 있음을 시사한다.

각 처리의 VMD를 회귀식에 적용하여 대표적인 비산거리를 산출하였다(Table 4). 물 처리 VMD(192.07  $\mu\text{m}$ )의 비산거리는 7.19 m(2 m 높이) 및 2.52 m(1 m 높이)로 나타났으며, 이는 비산 위험의 기준값으로 볼 수 있다. Spreader-sticker

**Table 4.** Prediction drift distances of measured-VMDs using the regression equations by the nozzles and discharge height

Substance	VMD <sup>c)</sup> (mm)	Discharge height (m)	Equation	Drift distance (m)
S <sup>a)</sup>	239.00	2	$y = 32.456e^{-0.008x}$	4.31
		1	$y = 25.755e^{-0.013x}$	1.20
P <sup>b)</sup>	209.47	2	$y = 43.890e^{-0.009x}$	6.26
		1	$y = 35.065e^{-0.014x}$	1.97
Water	192.07	2	$y = 46.505e^{-0.010x}$	7.19
		1	$y = 43.106e^{-0.015x}$	2.52

<sup>a)</sup>Spreader-sticker, <sup>b)</sup>Paraffin, <sup>c)</sup>Volume median diameter

전착제 VMD(239  $\mu\text{m}$ )의 비산거리는 각각 4.31 m(2 m), 1.20 m(1 m)로 감소하여 물 대비 40% (2 m), 52% (1 m)의 비산 저감 효과를 보였다. Paraffin 전착제 VMD(209.47  $\mu\text{m}$ )의 비산거리는 6.26 m(2 m)와 1.97 m(1 m)로 물 대비 13%와 22% 저감되었다. 또한 살포 높이에 따른 변화 효과도 뚜렷하게 나타났다. 물 처리에서 살포 높이를 2 m에서 1 m로 낮출 경우 비산거리가 7.19 m에서 2.52 m로 약 65% 감소하였다. 동일 조건에서 spreader-sticker 전착제는 4.31 m에서 1.20 m로 약 72% 및 paraffin 전착제는 6.26 m에서 1.97 m로 약 69% 감소하였다. 이는 살포 높이 조절만으로도 상당한 비산 저감 효과를 기대할 수 있음을 보여준다.

이 연구 결과로 액적 크기 조절이 비산 저감에 결정적인 요소임을 재확인하였다. 이는 여러 선행 연구에서도 유사하게 보고된 바 있으며, 특히 전착제 사용이 droplet size 분포를 조절하여 비산을 줄일 수 있다는 연구들과 일치한다(Basilio et al., 2024; Zhang and Xiong, 2021). 또한 Hewitt 등(2024)은 전착제 사용이 fine droplets (<150  $\mu\text{m}$ )의 비율을 40–60% 수준으로 감소시키는 효과를 보고하며, 비산 저감 전략으로서의 활용 가능성을 강조한 바 있다. 특히 이 연구에서 spreader-sticker 전착제가 paraffin 전착제보다 더 우수한 비산 저감 효과를 나타낸 점은 전착제의 화학적 조성, 점도, 표면장력 조절 능력 등이 droplet 형성 과정(breakup, coalescence 등)에 미치는 영향이 다르기 때문으로 판단되었다(Curran et al., 1999).

살포 높이는 비산 저감을 위한 핵심 요인으로 확인되었다. 이 실험에서 살포 높이를 2 m에서 1 m로 낮추었을 때 비산거리가 약 65–72% 감소하여 현장 조건에서도 높이 조절이 매우 실용적인 비산 저감 전략이 될 수 있음을 시사한다(Palardy and Centner, 2017). 또한 살포액의 조성은 droplet breakup 과정과 drift 거동에 미치는 영향을 분석하며, 조성 변화가 액적 직경과 분포를 변화시켜 비산 특성에 직접적인 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있다(Fritz et al., 2010).

다만 이 연구는 모델 예측 기반으로 수행되어 실제 현장

조건(풍속, 난류, 온도, 습도 등)이 반영되지 못한 한계가 있다. 향후 연구에서는 실제 농업 환경에서 현장 검증과 함께 기상 변수와 전착제 효과를 종합적으로 고려할 필요가 있다.

## 결 론

이 연구를 통해 무인항공 농약 살포에서 전착제 첨가가 액적 크기 분포를 변화시켜 비산 가능성을 크게 줄일 수 있음이 확인되었다. 특히 spreader-sticker 전착제는 물 대비 40~52%의 비산 저감 효과를 보이며, paraffin 전착제도 일정 수준의 효과를 나타냈다. 더불어 살포 높이를 2 m에서 1 m로 낮춘 물리적 조치는 모든 처리에서 65% 이상 추가 저감을 가능하게 하였다. 이는 전착제의 화학적 효과와 살포 조건의 물리적 조정이 상호 보완적으로 작용하여 비산 저감 효과를 극대화할 수 있음을 보여준다. 따라서 이 연구는 전착제를 농약 비산 저감제(Drift Reduction Technology, DRT)로 활용할 수 있는 과학적 근거를 제공하며, 농약 살포 안전성 향상과 농작업자의 건강 보호, 주변 환경에 의한 비의도적 오염 방지 측면에서 중요한 의미를 가진다. 또한 전착제 활용은 농약 사용량 절감 및 살포 효율 개선과도 연결될 수 있어, 지속가능한 농업 생산체계 확립에 기여할 수 있다. 향후에는 다양한 전착제의 체계적 비교 평가와 실제 포장 환경에서의 현장 검증 연구를 통해 본 연구에서 제시한 결과를 보완하고, 국제적 DRT 인증 제도와 연계하여 국내 농업 현장에 적용 가능한 표준화된 비산 저감 기술로 발전시켜 나갈 필요가 있다고 판단된다.

## 감사의 글

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

## Author Information and Contributions

Hyun Ho Noh, Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Doctor of philosophy, Project administration, Supervision, Conceptualization, Investigation, Writing-original draft preparation, Writing-review & editing, <http://orcid.org/0000-0002-7568-8490>

Chang Jo Kim, Division of Safety Analysis, Experiment Research Institute, National Agricultural Product Quality Management Service, Doctor of philosophy, Investigation, Data analysis, <http://orcid.org/0000-0002-5872-9262>

So-Hee Kim, Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Researcher, Investigation, <https://orcid.org/0000-0003-3103-1099>

Hye-Ran Eun, Plant Disease Control Division, National Institute of Agricultural Sciences, Researcher, Investigation, <https://orcid.org/0000-0002-7768-0644>

Min-Seok Kim, Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Researcher, Investigation, <https://orcid.org/0009-0002-6399-3882>

Hyun-Woo Kim, Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Researcher, Investigation, <https://orcid.org/0009-0005-5217-2546>

Jeong Yoon Choi, Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Doctor of philosophy, Investigation, <https://orcid.org/0000-0002-7931-6408>

## 이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

## Literature Cited

- Basílio S, Furtado Junior MR, de Alcarença CB, da Vitória EL, Vargas BC, Privitera S, Caruso L, Cerruto E, and Manetto G. 2024. Effect of Adjuvants on Physical-Chemical Properties, Droplet Size, and Drift Reduction Potential. *Agriculture*. 14(12):2271.
- Chen S, Lan Y, Zhou Z, Deng X, and Wang J, 2021. Research advances of the drift reducing technologies in application of agricultural aviation spraying. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 14(5):1-10.
- Fritz BK, Hoffmann WC, and Bagley WE, 2010. Effects of spray mixtures on droplet size under aerial application conditions and implications on drift. *Applied Engineering in Agriculture*. 26(1):21-29.
- Hewitt AJ, 2024. Adjuvant use for the management of pesticide drift, leaching, and runoff. *Pest Manag. Sci.* 80(10):4819-4827.
- Hobson PA, Miller PCH, Walklate PJ, Tuck CR, Western NM, 1993. Spray drift from hydraulic spray nozzles: The use of a computer simulation model to examine factors influencing drift. *J. Agric. Eng. Res.* 54:293-305.
- Hoffmann WC, Fritz BK, Bagley WE, Lan Y, 2011. Effects of

- air speed and liquid temperature on droplet size. *J. ASTM Int.* 8(4):1-9.
- International Organization for Standardization (ISO), 2018. ISO 25358, Crop protection equipment - Droplet-size spectra from atomizers - Measurement and classification, ISO, Geneva, Switzerland, <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/c5db7bb1-5dae-4c1b-a64d-c5cd8a107ca4/iso-25358-2018>.
- Kruckeberg JP, Hanna HM, Steward BL, Darr MJ, 2012. The relative accuracy of DRIFTSIM when used as a real-time spray drift predictor. *Transactions of the ASABE*, 55(4):1159-1165.
- Nuyttens D, De Schampheleire M, Steurbaut W, Baetens K, Verboven P, Nicolaï B, Ramon H, Sonck B., 2006. Experimental study of factors influencing the risk of drift from field sprayers, Part 1: Meteorological conditions. *Asp. Appl. Biol.* 77(2):331-339.
- Palardy N, and Centner TJ, 2017. Improvements in pesticide drift reduction technology (DRT) call for improving liability provision to offer incentives for adoption. *Land Use Policy*. 69:439-444.
- Qin K, Tank H, Wilson SA, Downer B, Liu L, 2010. Controlling droplet-size distribution using oil emulsions in agricultural sprays. *At. Sprays*. 20(3):227-239
- Radoglou-Grammatikis P, Sarigiannidis P, Lagkas T, Moscholios I, 2020. A compilation of UAV applications for precision agriculture. *Comput. Netw.* 172:107148.
- Seong DG, Bea SM, Kim YG, Cho YC, Lee SD, Shim SI, Chung JS, 2014. Efficacy of Foliar Herbicide Treatment by Unmanned Helicopter under Water-Seeded Rice Cultivation. *Weed Turf. Sci.* 3(4):323-328.
- United States Environmental Protection Agency (EPA), 2016. U.S. EPA Generic Verification Protocol for Testing Pesticide Application Spray Drift Reduction Technologies for Row and Field Crops. EPA, US. <https://www.epa.gov/reducing-pesticide-drift/generic-verification-protocol-testing-pesticide-application-spray-drift>.
- Wang G, Lan Y, Yuan H, Qi H, Chen P, Ouyang F, Han Y, 2019. 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.
- Wang J, Lan Y, Zhang H, Zhang Y, Wen S, Yao W, Deng J, 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.
- Zhang X, and Xiong L, 2021. Effect of adjuvants on the spray droplet size of pesticide. *Coll. Surf. A.* 619:126557.
- Zhu H, Reichard DL, Fox RD, Brazee RD, Ozkan HE, 1994. Simulation of drift of discrete sizes of water droplets from field sprayers. *Trans. ASAE.* 37(5):1401-1407.
- Noh HH, Kim CJ, Kim SH, Yu SH, Kang YK, Lee CG, Lee SH, Kyung KS, 2024. Measurement of Droplet Size by the Nozzle Type and Spraying Pressure and Prediction of Drift Distance using the DRIFTSIM Model. *Korean J. Environ. Agri.* 43:82-91.
- Curran WS, Mcglamery MD, Liebl RAA, Lingenfelter DD, 1999. Adjuvants for Enhancing Herbicide Performance, *Agronomy Facts 37*, Penn State College of Agricultural Sciences, University Park, PA, USA.

## 전착제 종류 및 희석비에 따른 무인항공 살포 액적 특성과 DRIFTSIM 기반 비산 저감 가능성 평가

노현호<sup>1\*</sup> · 김창조<sup>2</sup> · 김소희<sup>1</sup> · 은혜란<sup>3</sup> · 김민석<sup>1</sup> · 김현우<sup>1</sup> · 최정윤<sup>1</sup>

<sup>1</sup>국립농업과학원 잔류화학평가과, <sup>2</sup>국립농산물품질관리원 안전성분석과, <sup>3</sup>국립농업과학원 식물병방제과

**요약** 이 연구는 무인항공기(UAV)를 이용한 농약 살포에서 전착제 첨가가 살포 액적 크기 분포를 변화시켜 비산(drift)을 저감할 수 있는지 평가하고 DRIFTSIM 모델을 이용해 비산거리를 정량적으로 예측하기 위하여 수행하였다. 국내 등록 전착제를 0.5-4.0%로 희석해 XR8002 노즐(40 psi) 조건에서 레이저 회절 장치로 액적 특성을 측정하고 실측 VMD를 기반으로 풍속 2 m/s에서 살포고도 2 m와 1 m의 비산거리를 비교하였다. 전착제 중 spreader-sticker와 paraffin 계열은 물 대비 VMD를 증가시키고 미세액적 비율을 낮추는 경향을 보여 비산 저감 가능성이 확인되었다. 최적 희석비는 spreader-sticker 0.5%, paraffin 2.0%로 도출되었다. 모델 예측 결과, 물 살포액의 VMD 기준 비산거리는 7.19 m (2 m)와 2.52 m (1 m)였으며, spreader-sticker는 4.31 m 및 1.20 m로 40-52% 감소, paraffin은 6.26 m 및 1.97 m로 13-22% 감소하였다. 또한 살포고도를 2 m에서 1 m로 낮추면 처리구 전반에서 비산거리가 추가로 65-72% 수준 감소 가능성을 확인하였다. 이러한 결과는 전착제 활용과 살포고도 저감이 상호 보완적인 비산저감기술(DRT)로 적용 가능성을 시사한다.

**주제어:** 비산, 비산저감기술, 전착제, 살포 액적 크기, DRIFTSIM