

노즐 타입과 살포 압력에 따른 Droplet Size 측정 및 DRIFTSIM을 이용한 비산 거리 예측

노현호¹, 김창조², 김소희¹, 유승화³, 강연구³, 이춘구³, 이상협¹, 경기성^{4*}

Measurement of Droplet Size by the Nozzle Type and Spraying Pressure and Prediction of Drift Distance using the DRIFTSIM Model

Hyun Ho Noh ¹, Chang Jo Kim ², So-Hee Kim ¹, Seung-Hwa Yu ³, Younkoo Kang ³, Chun-Gu Lee ³, Sang-Hyeob Lee ¹ and Kee Sung Kyung ^{4*}

¹국립농업과학원 잔류화학평가과, ²국립농산물품질관리원 안전성분석과, ³국립농업과학원 발농업기계화연구팀, ⁴충북대학교 환경생명화학학과

¹Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea, ²Division of Safety Analysis, Experiment Research Institute, National Agricultural Product Quality Management Service, Gimcheon 39660, Korea, ³Upland mechanization team, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea, ⁴Department of Environmental and Biological Chemistry, College of Agriculture, Life and Environment Science, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea
* Correspondence: kskyung@cbnu.ac.kr

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.08>

Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 82-91

Received: July 24, 2024
Revised: August 18, 2024
Accepted: August 20, 2024
Published: August 30, 2024

Online ISSN: 1233-4173
Print ISSN: 1225-3537



© The Korean Society of Environmental Agriculture 2024



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: This study was carried out to measure droplet size and to predict drift distances using DRIFTSIM model under various nozzle and spraying pressure conditions. The XR nozzle produced approximately 50% of droplets small enough to drift significantly, with increased drift distances when the spraying height was reduced. The DG nozzle generated relatively larger droplets and exhibited shorter drift distances. The TP nozzle showed similar characteristics to the XR nozzle but had reduced drift distances when the height was lowered. The AI nozzle primarily produced larger droplets, making it the most effective in minimizing drift. This study confirms the impact of spraying pressure and height on droplet size and drift distance. The XR and TP nozzles generated a higher proportion of small droplets, increasing drift potential, while the AI nozzle was the most effective in reducing drift. The DG nozzle was identified as the most suitable nozzle, considering both drift reduction and crop surface adhesion efficiency. Therefore, adjusting spraying pressure and height can significantly minimize drift-related issues.

Keywords: Drift distance, DRIFTSIM, Droplet size, Nozzle, Spraying pressure

서론

무인헬기와 무인멀티콥터는 항공안전법에서 초경량비행장치로 분류하고 있으며, 항공 안전법에 초경량비행장치는 「항공기와 경량 항공기 외에 공기의 반작용으

로 뜰 수 있는 장치로 자체 중량, 좌석 수 등 국토교통부령으로 정하는 기준에 해당하는 동력비행장치, 행글라이더, 패러글라이더, 기구류 및 무인비행장치 등을 말한다」고 정의하고 있다(MOLEG, 2024). 우리나라는 1990년대 후반부터 무인항공기를 이용한 농약 살포가 시작되었으며, 최근에는 고령화와 부녀화로 인해 노동력이 부족한 우리나라 농업 현장의 상황과 맞물려 빠르게 보급되고 있다. 농약 살포용 무인항공기는 주로 무인헬기를 이용하다 최근에는 드론이라고 불리는 무인멀티콥터의 활용이 증가하고 있는 추세이다[1].

농약을 살포하기 위해서는 농작물을 재배하는 필지에 사람이 직접 들어가기 때문에 작물 손상이 생길 수 있으며, 살포자는 다량의 농약에 노출될 수밖에 없다. 하지만 무인항공기는 공중에서 농작물에 접근하여 살포하기 때문에 농약 살포 과정에서 발생하는 작물 손상과 농약 노출을 최소화할 수 있으며, 사람이 접근하기 어려운 지형의 필지에도 쉽게 농약을 살포할 수 있다[2,3]. 또한 넓은 면적을 빠르게 살포할 수 있어 시간적 경제적 효율이 우수한 살포 방법이다.

무인멀티콥터는 일반적으로 작물로부터 2~3 m 상공에서 농약을 살포하며, 무인헬기는 3~4 m의 고도에서 농약을 살포하기 때문에 바람 등의 영향으로 표적한 구역 이외로 농약이 비산될 수밖에 없다. 만약 주변에 다른 작물이 재배되고 있고 항공 살포한 농약이 비산되어 그 작물에 잔류하게 된다면 의도치 않은 농약 오염이 발생하게 된다[4]. 또한 해당 작물에 잔류허용기준이 설정되어 있지 않다면 농약허용물질목록관리제도(positive list system, PLS)에서 정한 기준인 0.01 mg/kg을 초과하여 출하 금지 등의 행정적 처분을 받아 농업인에게 불이익이 돌아가게 된다[5]. 무인항공기를 이용한 농약 살포는 피해 갈 수 없는 시대적 요구이며, 대중화되고 있는 살포 방법임이 분명하다. 따라서 비산으로 인한 피해를 최소화하기 위한 다양한 노력이 필요한 시점이다.

비산을 저감하기 위해서는 비산 요인에 대한 이해가 필요하다. 농약의 비산은 풍속, 풍향 등의 환경적인 영향이 주요 요인이지만 이는 사람이 제어할 수 있는 비산 요인이 아니다. 인위적으로 조절 가능한 비산 요인은 대표적으로 살포 압력, 노즐 타입, 비행고도, 살포액의 물리성 등이 있다[6-11]. 살포 압력을 낮추면 droplet size가 커져 비산 가능성이 낮아지고 큰 droplet size를 분사하는 노즐 팁을 사용하면 물리적으로 비산을 줄일 수 있다. 또한 비행고도가 높아지면 작은 droplet size는 더 멀리 비산될 수밖에 없으며, 살포액의 물리성을 변화시켜 인위적으로 droplet size를 키우면 비산을 줄일 수 있다[12-17]. 결국 인위적으로 조절 가능한 비산 요인은 droplet size 의존성이 크다. 이 중에서 droplet size를 가장 쉽게 조절할 수 있는 것은 노즐 타입을 변경하는 것이다.

Droplet size는 레이저 회절(laser diffraction), 레이저 이미징(laser imaging), 레이저 위상 도플러(laser-based phase doppler)와 같은 레이저 기반의 기술로 측정하도록 권장하고 있다(ASAE, 2013). 그중 레이저 회절 측정기를 이용하는 것이 일반적이다. 이 측정기를 이용하면 droplet size와 전체 살포액의 부피 평균 그리고 droplet size의 분포까지 알 수 있다. Droplet size는 $D_{V0.1}$, $D_{V0.5}$, $D_{V0.9}$ 로 구분하여 측정되며 각각은 전체 droplet size의 하위 10% 중 최대 크기, 중간 크기, 상위 10% 중 최소 크기를 의미한다. $D_{V0.5}$ 는 Volume Median Diameter (VMD)로 표현하는데 VMD가 작을수록 비산 가능성이 높은 것으로 평가하며, 특히 VMD가 100~200 μm 이하인 droplet은 비산에 취약하다는 보고가 있다[18-20]. Droplet size를 측정하여 상대적인 비산 정도를 파악할 수 있지만 우리가 살포한 농약이 어느 정도의 거리까지 비산될 수 있는지는 알 수 없기 때문에 비산 거리를 예측할 수 있는 프로그램인 DRIFTSIM이 개발되었다.

DRIFTSIM은 시뮬레이션 기반 droplet의 비산 거리를 예측하는 프로그램이다. 이 프로그램은 전산 유체 역학 프로그램인 FLUENT를 사용하여 살포액의 단일 물방울에 대해 계산된 비산 거리를 대규모의 데이터베이스에서 외삽하는 방식으로 개발되었으며, USDA ARS 공식 홈페이지에서 다운로드 받을 수 있다. 이 프로그램은 최대 200 m까지의 비산 거리를 예측할 수 있으며, 온도, 살포 고도, 살포 압력, 상대습도, 풍속, droplet의 $D_{V0.1}$, $D_{V0.5}$, $D_{V0.9}$ 를 입력하면 비산 거리를 예측하여 텍스트 파일로 제공한다[21].

따라서 이 연구는 우리나라 농업 현장에서 주로 사용하는 4가지 노즐의 droplet size를 측정하고 DRIFTSIM을 이용한 비산 거리를 예측하여 비산 저감을 위한 방안을 제시하기 위하여 수행되었다.

재료 및 방법

노즐 종류 및 제원

시험에 사용된 노즐은 XR8002, DG8002, TP8002, AI8002 (Spraying Systems Co., Incheon, Korea) 노즐이었다. XR 노즐은 확장형 부채꼴 스프레이 팁(Extended range flat fan nozzle)으로 15~60 psi의 넓은 압력 범위에서 운영이 가능하여 우리나라 농약 살포용 무인항공기에 가장 널리 적용하고 있다. DG 노즐은 비산 방지 부채꼴 스프레이 팁(Drift guard flat spray nozzle)으로 희석액이 orifice로 살포되기 전 노즐 내 pre-orifice에서 유량을 조절하여 작은 droplet의 분포를 줄여서 보다 큰 droplet을 생성하는 노즐이다. TP 노즐은 부채꼴 스프레이 팁(Tapered pattern flat spray nozzle)으로 균일 살포를 위해 고안되었으며, XR 노즐보다 좁은 범위의 압력에서 적용할 수 있다. AI 노즐은 공기 유도식 부채꼴 스프레이 팁(Air induction flat spray nozzle)으로 droplet에 공기를 주입하여 부피를 증가시켜 큰 droplet을 생성하는 노즐이다.

Droplet size 측정 방법

노즐에 따른 droplet size와 분포를 조사하기 위해서 레이저 회절 밀도 측정 장치(SprayTec, Malvern, UK)를 사용하였다(Fig. 1). ISO와 EPA의 droplet size 권장 측정 방법과 같이 노즐 팁과 droplet 측정 구역(laser zone)과의 거리는 50 cm로 세팅하였으며, 살포 압력은 40 psi를 유지하였다(ISO, 2018; EPA, 2016). 또한 살포 압력에 따른 droplet size의 변화를 조사하기 위해 20 psi의 압력에서도 측정하였다. 살포액은 물을 이용하였으며, 각 노즐별로 5초간 분사하여 3반복 측정하였다. 이 연구에서 사용한 레이저 회절 밀도로 droplet을 측정하면 $D_{V0.1}$, $D_{V0.5}$ (VMD), $D_{V0.9}$ 등의 droplet size와 droplet size별 분포율을 알 수 있으며(Fig. 1), 각 측정값은 비산 가능성을 가늠할 수 있는 척도로 활용할 수 있다.

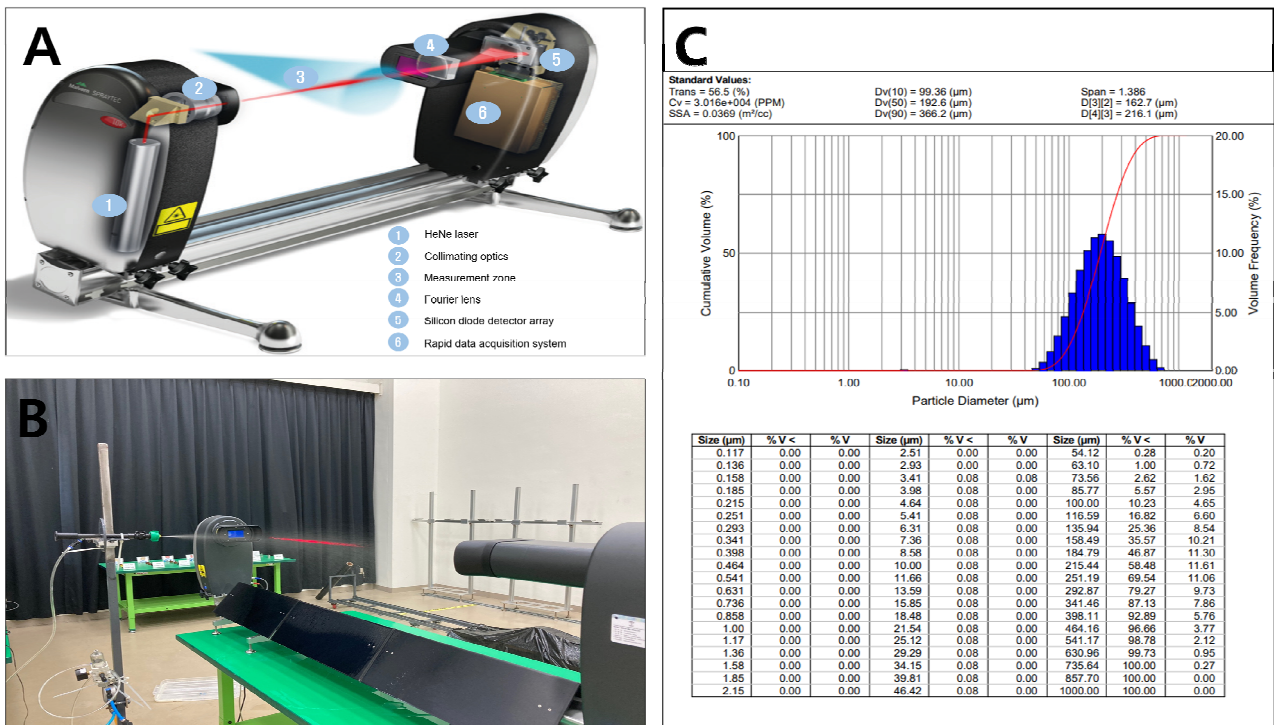


Fig. 1. Scenes for measuring droplet size with He-Ne laser diffraction.

A, He-Ne laser diffraction (This picture is provided by the manufacturer); B, Measuring droplet size; C, Result Table after measurement of droplet size.

DRIFTSIM을 droplet 분포율 및 비산 거리 예측

DRIFTSIM 프로그램을 실행시키면 Fig. 2에 제시한 바와 같이 살포 높이, 풍속, 습도, 온도, 분사 속도를 입력해야 한다. 살포 고도는 무인멀티콥터의 일반적인 높이인 2 m를 적용하였고 고도에 따른 비산 거리를 예측하기 위하여 1 m 고도에서의 droplet의 행적을 도출하였다. 풍속은 우리나라 10년간 평균 풍속인 2 m/s를 적용하였으며, 습도와 온도는 droplet 측정 당시의 평균 온·습도를 입력하였다. 분사 속도는 측정 시 살포 압력인 40 psi (275.8 kPa)를 입력하여 자동 계산된 20 m/s를 적용하였다. Droplet size는 single size droplet과 array of droplet을 선택할 수 있다. Single size droplet은 단일 droplet의 비산 거리를 예측하는데 사용할 수 있으며, array of droplet은 $D_{V0.1}$, $D_{V0.5}$, $D_{V0.9}$ 의 실측 결과가 있는 경우 사용할 수 있다. 이 연구에서는 array of droplet을 선택하여 노즐별 droplet의 분포율과 비산 거리를 예측하였다. 또한 범위로 제시된 예상 droplet size의 최대값과 비산 예측 거리를 이용하여 회귀곡선을 작성하였으며, 이를 이용하여 실측한 VMD의 droplet size의 예상 비산량을 산출하였다.

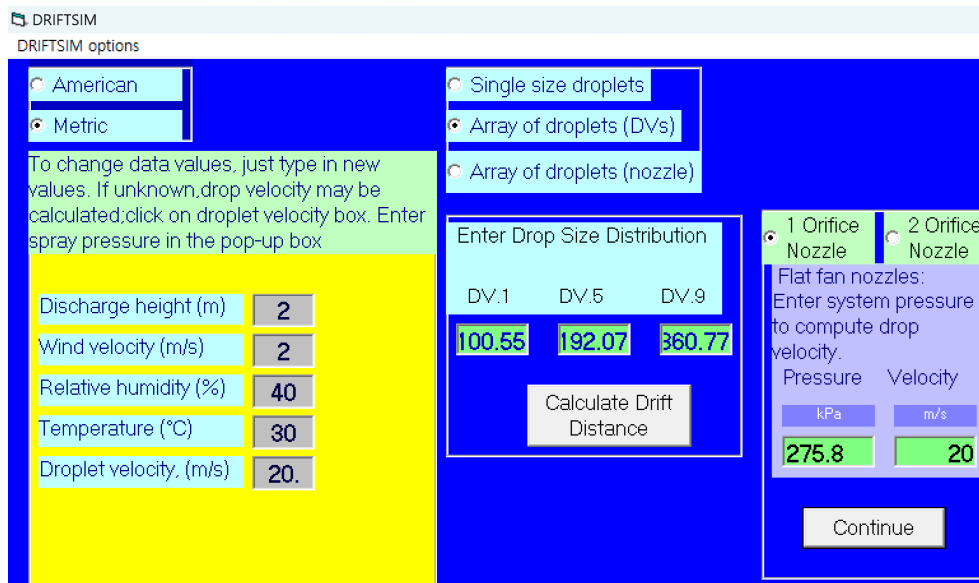


Fig. 2. Parameters entered in DRIFTSIM program to predict droplet size and distribution rate by test nozzles.

결과 및 고찰

노즐에 따른 droplet size 측정 결과

XR 노즐을 이용하여 40 psi의 압력으로 물을 살포한 droplet의 평균 $D_{V0.1}$ 은 Table 1에 제시한 바와 같이 100.55 μm 였으며, $D_{V0.5}$ 와 $D_{V0.9}$ 의 경우 각각 192.07 μm 과 360.77 μm 으로 시험 노즐 중 가장 작은 droplet이 살포되는 경향이였다. DG 노즐의 평균 $D_{V0.1}$, $D_{V0.5}$ 및 $D_{V0.9}$ 는 각각 107.07 μm , 218.30 μm 및 445.73 μm 이었으며, TP 노즐의 경우 각각 98.77 μm , 194.27 μm 및 379.30 μm 이었다. AI 노즐의 평균 $D_{V0.1}$ 이 305.93 μm 로 다른 노즐의 VMD보다 큰 droplet이 살포되는 것으로 나타났다. VMD 기준 DG 노즐은 XR 노즐 보다 droplet size가 약 13.66% 증가하였으며, AI 노즐은 약 166.8% 증가하였다. TP 노즐의 경우 XR 노즐과 유사한 droplet size를 보였다. 또한 XR 노즐로 살포한 전체 droplet 중 100 μm 이하의 비율은 평균 9.79%였으며, 215 μm 이하의 비율은 평균 58.88%였다. DG 노즐은 100 μm 이하의 droplet 분포율은 7.94%였으며, 215 μm 이하는 49.07%로 나타났다. TP 노즐의 경우 10.47%(100 μm 이하)와 57.60%(215 μm 이하)의 분포율을 보였으며, AI 노즐은 215 μm 이하에서만 1.18%의 분포율을 보였다.

살포 압력을 20 psi로 조절하면 Table 2에 제시한 바와 같이 모든 노즐에서 droplet size는 증가하였으며, 작은 droplet을 생성하는 비율은 현저히 감소하였다. XR 노즐을 이용하여 20 psi로 살포하면 $D_{V0.1}$, $D_{V0.5}$ 및 $D_{V0.9}$ 가 40 psi로 살포했을 때보다 각각 56.0%, 53.7% 및 57.9% 증가하였으며, 100 μm 와 215 μm 이하의 droplet 분포율은 각각 8.9배와 2.2배 감소하였다. DG

노즐과 TP 노즐 역시 XR 노즐과 같이 droplet size가 증가하면서 비산 가능성이 높은 작은 droplet의 생성 비율은 감소하였다. AI 노즐의 경우 살포 압력이 낮아지면서 역시 droplet size가 증가하였지만 $D_{V0.1}$ 과 $D_{V0.5}$ 에서만 각각 19.5%와 6.1% 증가하였다. 이러한 결과는 살포 압력과 droplet size의 변화는 상관관계가 있다는 것을 시사하지만 AI 노즐과 같이 큰 droplet을 생성하는 노즐은 압력을 낮춘다고 해도 droplet size의 변화는 크지 않다는 것을 보여준다.

Droplet size가 작을수록 비산 가능성이 높다는 보고와 같이 droplet size는 비산을 유발하는 중요한 요인이다[22]. Hobson et al.(1993)은 100 μm 이하인 droplet은 비산에 취약하다고 보고하였으며[23], Hoffmann et al.(2011)과 Qin et al.(2010)은 각각 150 μm 과 200 μm 이하의 droplet을 생성하면 비산량이 증가한다고 보고하였다[19,20]. XR 노즐은 우리나라 농업 현장에서 가장 많이 사용하고 있는 노즐로 기존의 문헌과 이 연구 결과를 고려한다면 XR 노즐보다 DG 노즐 또는 AI 노즐을 사용하는 것이 비산 저감 측면에서는 합리적이라고 판단되었다.

Table 1. Volume-average diameter and distribution rate of droplet by different nozzle type and spraying pressure

Nozzle	Rep.	Volume-average diameter (μm)						Distribution rate (%)			
		$D_{V0.1}$		$D_{V0.5}$		$D_{V0.9}$		$\leq 100 \mu\text{m}$		$\leq 215 \mu\text{m}$	
		40 psi	20 psi	40 psi	20 psi	40 psi	20 psi	40 psi	20 psi	40 psi	20 psi
XR	1	99.4	164.0	192.6	299.4	366.2	566.3	10.2	0.5	58.5	24.9
	2	100.6	149.0	191.4	290.5	358.6	570.0	9.8	1.9	59.2	28.7
	3	101.7	157.5	192.2	295.8	357.5	572.5	9.4	0.8	59.0	26.7
	Mean	100.6	156.8	192.1	295.2	360.8	569.6	9.8	1.1	58.9	26.8
DG	1	108.0	166.7	220.3	320.5	450.6	622.2	7.7	0.5	48.5	22.5
	2	108.4	168.1	218.6	325.2	440.9	630.0	7.6	0.5	49.0	21.9
	3	104.8	165.6	216.0	324.2	445.7	624.8	8.6	1.3	49.8	22.2
	Mean	107.1	166.8	218.3	323.3	445.7	625.7	8.0	0.8	49.1	22.2
TP	1	96.7	152.6	189.4	301.1	372.5	592.3	11.2	1.6	59.4	26.8
	2	98.1	153.3	194.7	302.4	383.2	599.5	10.7	1.2	57.3	26.8
	3	101.5	152.5	198.7	302.6	382.2	595.4	9.5	1.7	56.1	26.7
	Mean	98.8	152.8	194.3	302.0	379.3	595.7	10.5	1.5	57.6	26.8
AI	1	306.3	367.9	512.9	544.1	785.1	766.7	0.0	0.0	1.2	0.0
	2	306.1	364.4	512.8	543.7	785.1	771.0	0.0	0.0	1.2	0.0
	3	305.4	364.1	511.9	543.3	784.6	770.6	0.0	0.0	1.2	0.0
	Mean	305.9	365.5	512.5	543.7	784.9	769.4	0.0	0.0	1.2	0.0

Table 2. Change in droplet size with decrease in spraying pressure from 40 psi to 20 psi

Nozzle	Increase rate of volume-average diameter (%)			Distribution rate ¹⁾	
	$D_{V0.1}$	$D_{V0.5}$	$D_{V0.9}$	$\leq 100 \mu\text{m}$	$\leq 215 \mu\text{m}$
XR	55.9	53.7	57.9	8.9	2.2
DG	55.8	48.7	40.8	10.0	2.2
TP	54.8	55.7	57.5	7.0	2.1
AI	19.5	6.1	-	-	-

¹⁾Distribution rate of droplet size at 40 psi/distribution rate of droplet size at 20 psi

Droplet size에 따른 노즐별 비산 거리 예측 결과

DRIFTSIM과 실측한 droplet size를 이용하여 비산 거리를 예측한 결과는 Table 3에 제시하였다. XR 노즐은 40 psi의 살포 압력에서 25~398 μm 의 droplet을 생성할 것으로 예측되었으며, 그중 10%의 분포율을 보이는 25~126 μm 의 droplet은 대기 중으로 증발될 것으로 예측되었다. 또한 전체 droplet 중 비산 가능성이 높은 약 200 μm 이하의 droplet은 약 50%로 분포하였으며, Table 1에 제시한 실측한 결과와 큰 차이를 보이지 않았다. 증발될 것으로 예측되는 droplet을 제외하면 최대 8.47 m 비산될 것으로 예측되었다. 회귀곡선식을 이용한 VMD의 droplet 비산 거리는 Table 4에 제시한 바와 같이 약 6.16 m로 예상되었다. 따라서 XR 노즐로 2 m의 고도에서 살포하면 전체의 약 50%는 약 6 m 지점까지 비산될 가능성이 있다고 판단되었다. 하지만 살포 고도를 1 m로 변경하면 대기 중으로 증발되는 droplet이 감소하여 최대 9.87 m까지 비산될 것으로 예측되었으며, 약 200 μm 이하 droplet은 약 1.6 m까지 비산될 것으로 예측되어 2 m 고도에서 살포한 droplet보다 약 3배 비산 거리가 짧아지는 것으로 나타났다. 또한 실측한 VMD와 회귀곡선식을 이용한 비산 거리는 고도를 낮추면 2.16 m로 약 2.85배 비산 거리가 짧아지는 것으로 나타났다.

DG 노즐은 최소 27 μm 에서 최대 494 μm 의 droplet을 생성할 것으로 예측되었으며, 그중 약 10%인 134 μm 이하의 droplet은 증발될 것으로 예측되었다. 또한 약 200 μm 이하의 droplet은 전체의 약 32%의 비율로 생성될 것으로 예측되어 Table 1에 제시한 실측 결과와는 상이한 결과가 도출되었다. 하지만 실측 결과와 예측 결과 모두 XR 노즐로 살포하여 생성된 droplet보다 크기가 커지는 것으로 나타났다. 대기 중으로 증발될 것으로 예측되는 droplet을 제외하면 DG 노즐로 살포하면 최대 6.41 m 비산될 것으로 예측되었다. 또한 회귀곡선식을 이용한 VMD droplet의 비산 거리는 약 4.96 m로 예상되어 XR 노즐로 살포하는 것보다 DG 노즐로 살포하면 비산이 저감될 것으로 판단되었다. 또한 살포 고도를 1 m로 낮추면 약 200 μm 이하의 droplet은 약 2.27 m 비산될 것으로 예측되어 2 m 고도에서 살포했을 때보다 약 2.8배 비산 거리가 짧아지는 것으로 나타났다. 또한 실측한 VMD와 회귀곡선식을 이용한 비산 거리는 고도를 낮추면 약 1.84 m로 약 2.8배 비산 거리가 짧아지는 것으로 나타났다.

TP 노즐은 123 μm 이하의 droplet이 약 10% 생성되며, 이 droplet들은 대기 중으로 증발될 것으로 예측되었다. 또한 219 μm 이하의 droplet은 약 52%가 생성될 것으로 예측되어 Table 1에 제시한 실측 결과와 유사한 것으로 나타났다. 대기 중으로 증발될 것으로 예측되는 droplet을 제외하면 TP 노즐로 살포할 경우 최대 8.34 m 비산될 것으로 예측되었으며, 회귀곡선식을 이용한 VMD의 비산 거리는 6.13 m인 것으로 나타났다. TP 노즐의 droplet size와 분포율은 XR 노즐과 유사한 결과를 보였다. TP 노즐 역시 살포 고도를 2 m에서 1 m로 낮추면 비산 거리가 짧아지는 경향을 보였다. 특히 비산 가능성이 높은 약 200 μm 이하의 droplet은 2 m의 고도보다 약 3.1배 짧아진 약 1.47 m의 비산 거리를 보였다. 또한 DRIFTSIM을 이용하여 예측한 droplet size에 따른 비산 거리를 이용한 회귀곡선식에 실측한 VMD를 대입하여 산출한 예상 비산 거리 1 m의 고도에서 약 2.56 m로 2 m의 고도보다 약 2.4배 짧아지는 것으로 나타났다.

AI 노즐은 다른 시험 노즐과 비교하여 가장 큰 droplet을 생성하는 것으로 나타났다. AI 노즐로 살포하면 대기 중으로 증발되는 droplet은 생성되지 않을 것으로 예측되었으며, 비산 가능성이 높은 200 μm 이하의 droplet도 거의 생성되지 않는 것으로 나타났다. 또한 76~229 μm 의 droplet은 8.1 m까지 비산될 것으로 예측되었으나 이 범위의 droplet의 분포율은 유효한 소수 자리에서 0.00%로 나타났다. 따라서 Table 3에 제시한 바와 같이 AI 노즐로 2 m의 고도에서 살포하면 229~382 μm 범위의 droplet이 가장 작은 크기이며, 이 범위의 droplet은 최대 1.92 m 비산될 수 있는 것으로 나타났다. 회귀곡선식을 이용하여 VMD droplet의 비산 거리는 최대 약 0.87 m로 나타나 droplet size를 증가시키는 방법으로 비산을 저감하기 위해서는 AI 노즐이 가장 효율적인 것으로 나타났다. 살포 고도를 낮추면 1.92 m까지 비산될 것으로 예측되었던 droplet의 비산 거리는 약 6.2배 짧아져 약 0.31 m의 지점에 비산될 것으로 예측되어 AI 노즐로 저고도 살포하는 경우가 최대로 비산을 저감할 수 있는 방법인 것으로 나타났다.

농약의 잔류량과 약효는 작물 표면의 농약 부착량에 의존적이며, 부착량은 droplet의 접촉각, 잎 표면 특성 등 다양한 요인에 의해 결정되며, droplet size가 커지게 되면 리바운딩되어 작물 표면의 부착량이 감소하게 된다[15,24,25]. 작물의 표면에서 droplet은 부착(adhesion), 튕김(bounce), 부서짐(shatter)의 3가지 현상을 보인다[26]. 이 현상은 droplet size에 따라 다르게 발생하는데 droplet이 111 μm 인 것은 작물 표면에 바로 부착하지만 236 μm 인 droplet은 작물 표면에서 튕겨진 후 부착하였으며, 357 μm 의 droplet은 작물 표면에 떨어지면 부서지고 흩어지면서 부착한다는 보고가 있다[27]. 또한 400 μm 이상인 droplet은 낮은 부착율을 보인다는 보고도 있다[28]. 결론적으로 XR 노즐과 TP 노즐은 비산 가능성이 높은 200 μm 이하의 droplet size를 생성하는 비율이 50%를 초과하고 AI 노즐은 부착량을 저하시키는 400 μm 이상의 droplet size를 생성하는 비율이 72%를 초과하기 때문에 시험

노즐 중 DG 노즐이 비산을 저감하면서 부착 효율을 보장할 수 있는 노즐이라고 판단되었다. 또한 어떠한 노즐을 사용하더라도 비산의 위험이 있는 경우 살포 압력을 낮추거나 비행고도는 낮추는 방법으로 비산의 피해를 최소화할 수 있을 것으로 판단되었다.

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

Nozzle	Width (μm)	Portion of volume	Accumulation portion (%)	Drift distance (m)	
				Discharge height	
				2 m	1 m
XR	25-75	0.00	0	5.55 ¹⁾	5.53 ¹⁾
	75-126	0.10	10	15.94 ¹⁾	9.87
	126-175	0.21	31	8.47	3.07
	175-212	0.19	50	4.80	1.60
	212-249	0.14	64	3.42	0.96
	249-286	0.11	75	2.56	0.54
	286-324	0.08	83	1.93	0.32
	324-361	0.05	88	1.48	0.21
	361-398	0.12	100	1.13	0.15
DG	27-80	0.01	1	6.00 ¹⁾	6.08 ¹⁾
	80-134	0.09	10	17.57 ¹⁾	8.21
	134-204	0.22	32	6.41	2.27
	204-252	0.21	53	3.49	0.99
	252-301	0.13	66	2.39	0.47
	301-349	0.10	76	1.69	0.26
	349-397	0.07	83	1.18	0.16
	397-446	0.05	88	0.83	0.11
	446-494	0.12	100	0.59	0.08
TP	25-74	0.00	0	5.42 ¹⁾	5.39 ¹⁾
	74-123	0.10	10	15.50 ¹⁾	10.39
	123-179	0.22	32	8.34	3.02
	179-219	0.20	52	4.51	1.47
	219-259	0.14	66	3.20	0.84
	259-299	0.10	76	2.34	0.45
	299-339	0.07	83	1.76	0.28
	339-379	0.05	88	1.30	0.18
	379-419	0.12	100	0.96	0.12
AI	76-229	0.00	0	8.10	2.94
	229-382	0.10	10	1.92	0.31
	382-443	0.18	28	0.88	0.11
	443-511	0.14	42	0.57	0.08
	511-580	0.14	56	0.37	0.06
	580-648	0.13	69	0.27	0.05
	648-717	0.10	79	0.21	0.04
	717-785	0.08	87	0.17	0.03
	785-853	0.13	100	0.14	0.03

¹⁾Droplets completely evaporated before deposition

Table 4. Prediction drift distance of measured-VMD using the regression equation by the nozzles and discharge height

Nozzle	VMD ¹⁾ (μm)	Discharge height (m)	Equation	Drift distance (m)
XR	192.07	2	$y = 32.1784e-0.0086x$	6.16
		1	$y = 46.6703e-0.0160x$	2.16
DG	218.3	2	$y = 27.9912e-0.0079x$	4.96
		1	$y = 30.2156e-0.0128x$	1.84
TP	194.27	2	$y = 32.2471e-0.0085x$	6.13
		1	$y = 44.8892e-0.0147x$	2.56
AI	512.53	2	$y = 25.8498e-0.0066x$	0.87
		1	$y = 4.3731e-0.0066x$	0.15

¹⁾Volume median diameter

결론

이 연구는 다양한 노즐과 살포 압력에 따른 droplet size를 측정하고 이를 기반으로 DRIFTSIM model을 이용한 비산 거리를 예측하기 위하여 수행되었다. 노즐별 droplet size 측정 결과 XR과 TP 노즐이 다른 노즐보다 작은 크기의 droplet을 생성하는 것으로 나타났다. AI 노즐은 가장 큰 droplet을 생성하여 AI 노즐이 비산을 저감할 수 있는 노즐인 것으로 확인되었지만 droplet의 작물 표면 부착량 등을 고려하면 DG 노즐을 선택하는 것이 합리적인 것으로 판단되었다. 살포 압력을 40 psi에서 20 psi로 낮추면 XR 노즐, TP 노즐 및 DG 노즐에서 생성되는 droplet size는 40.8~57.9% 증가하였으며, AI 노즐은 다른 노즐에 비해 증가 폭이 크지 않았다. 실측한 droplet size를 이용하여 비산 거리를 예측한 결과 살포 고도를 낮추면 모든 노즐에서 비산 거리가 단축되는 것으로 예측되었다. 따라서 무인항공기를 이용하여 농약을 살포할 때 비산이 우려되는 경우 살포 압력과 고도를 낮추는 간단한 방법으로 비산을 최소화할 수 있을 것으로 판단되었다.

Data Availability: All data are available in the main text or in the Supplementary Information.

Author Contributions: K.K.S., N.H.H. and K.C.J. designed the study; N.H.H. wrote the manuscript; K.K.S. reviewed the manuscript; N.H.H., K.C.J., K.S.H., Y.S.H., K.Y.G., L.C.G. and L.S.H. measurement and collected the data. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment: This work was supported by the Agricultural Research and Development Program (No. PJ017000), National Institute of Agricultural Sciences (NAS), Rural development administration (RDA), Republic of Korea.

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.08>

Correspondence and requests for materials should be addressed to Hyun Ho Noh.

Peer review information Korean Journal of Environmental Agriculture thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Reprints and permissions information is available at <http://www.korseaj.org>

References

1. 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 & Turfgrass Science*, 3(4), 323-328. <https://doi.org/10.5660/WTS.2014.3.4.323>.
2. 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. *Applied Science*, 9(2), 218. <https://doi.org/10.3390/app9020218>.
3. Radoglou-Grammatikis P, Sarigiannidis P, Lagkas T, Moscholios I (2020) A compilation of UAV applications for precision agriculture. *Computer Networks*, 172, 107148. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107148>.
4. Wang C, Herbst A, Zeng A, Wongsuk S, Qiao B, Qi P, Bonds J, Overbeck V, Yang Y, Gao W, He X (2021) Assessment of spray deposition, drift and mass balance from unmanned aerial vehicle sprayer using an artificial vineyard. *Science of the Total Environment*, 777, 146181. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146181>.
5. Kim CJ, Lee R, Yuan X, Kim M, Shin HJ, Kim L, Kyung KS, Noh HH (2022) Residual pattern of pesticides drifted by unmanned aerial vehicle (UAV) spraying and drift reduction using maize (*Zea mays* L.). *The Korean Journal of Pesticide Science*, 26(2), 103-120. <https://doi.org/10.7585/kjps.2022.26.2.103>.
6. 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. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(6), 5-12.
7. Nuyttens D, De Schampheleire M, Steurbaut W, Baetens K, Verboven P, Nicolai B, Ramon H, Sonck B (2006) Experimental study of factors influencing the risk of drift from field sprayers, Part 1: Meteorological conditions. *Aspects of Applied Biology*, 77(2), 1-8.
8. Zhu H, Reichard DL, Fox RD, Brazee RD, Ozkan HE (1994) Simulation of drift of discrete sizes of water droplets from field sprayers. *Transactions of the ASAE*, 37(5), 1401-1407. <https://doi.org/10.13031/2013.28220>.
9. Chen S, Lan Y, Zhou Z, Deng X, Wang J (2021) Research advances of the drift reducing technologies in application of agricultural aviation spraying. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(5), 1-10.
10. Liu Q, Chen S, Wang G, Lan Y (2021) Drift evaluation of a quadrotor unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer: Effect of liquid pressure and wind speed on drift potential based on wind tunnel test. *Applied Science*, 11(16), 7258. <https://doi.org/10.3390/app11167258>.
11. Tan Y, Chen J, Norton T, Wang J, Liu X, Yang S, Zheng Y (2018) The computational fluid dynamic modeling of downwash flow field for a six-rotor UAV. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 5(2), 159-167. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2018216>.
12. Wen S, Han J, Ning Z, Lan Y, Yin X, Zhang J, Ge Y (2019) Numerical analysis and validation of spray distributions disturbed by quad-rotor drone wake at different flight speeds. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, 105036. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105036>.
13. Yang F, Xue X, Cai C, Sun Z, Zhou Q (2018) Numerical simulation and analysis on spray drift movement of multirotor plant protection unmanned aerial vehicle. *Energies*, 11(9), 2399. <https://doi.org/10.3390/en11092399>.
14. Bueno MR, da Cunha JPAR, de Santana DG (2017) Assessment of spray drift from pesticide applications in soybean crops. *Biosystems Engineering*, 154, 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.10.017>.
15. Chen S, Lan Y, Zhou Z, Ouyang F, Wang G, Huang X, Deng X, Cheng S (2020) Effect of droplet size parameters on droplet deposition and drift of aerial spraying by using plant protection UAV. *Agronomy*, 10(2), 195. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020195>.
16. 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. In *Pesticide Formulation and Delivery Systems: 32nd Volume, Innovating Legacy Products for New Uses*, pp. 96-113. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP104403>.
17. 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. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(6), 5-12.
18. Arvidsson T, Bergström L, Kreuger J (2011) Spray drift as influenced by meteorological and technical factors. *Pest Management Science*, 67(5), 586-598. <https://doi.org/10.1002/ps.2114>.
19. Qin K, Tank H, Wilson SA, Downer B, Liu L (2010) Controlling droplet-size distribution using oil emulsions in agricultural sprays. *Atomization and Sprays*, 20(3), 227-239. <https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.v20.i3.40>.
20. Hoffmann WC, Fritz BK, Bagley WE, Lan Y (2011) Effects of air speed and liquid temperature on droplet size. *Journal of ASTM International*, 8(4), 1-9.
21. 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. <https://doi.org/10.13031/2013.42234>.
22. De Ruiter H, Holterman HJ, Kempenaar C, Mol HGJ, de Vlieger JJ, van de Zande, JC (2003) Influence of adjuvants and formulations on the emission of pesticides to the atmosphere: A literature study for the Dutch Research Programme Pesticides and the Environment (DWK) theme C-2. Report 59, Plant Research International B.V., Wageningen, The Netherlands.

23. 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. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 54(4), 293-305. <https://doi.org/10.1006/jaer.1993.1022>.
24. Wang H, Shi H, Li Y, Wang Y (2014) The effects of leaf roughness, surface free energy and work of adhesion on leaf water drop adhesion. *PloS one*, 9(9), e107062. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107062>.
25. Dorr GJ, Kempthorne DM, Mayo LC, Forster WA, Zabkiewicz JA, McCue SW, Belward JA, Tuner IW, Hanan J (2014) Towards a model of spray-canopy interactions: interception, shatter, bounce and retention of droplets on horizontal leaves. *Ecological Modelling*, 290, 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.11.002>.
26. Mercer GN, Sweatman WL, Forster WA (2010) A model for spray droplet adhesion, bounce or shatter at a crop leaf surface. In *Progress in Industrial Mathematics at ECMI 2008*, pp. 945-951. Berlin, Heidelberg: Springer.
27. Massinon M, De Cock N, Forster WA, Nairn JJ, McCue SW, Zabkiewicz JA, Lebeau F (2017) Spray droplet impaction outcomes for different plant species and spray formulations. *Crop Protection*, 99, 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.05.003>.
28. Qin WC, Qiu BJ, Xue XY, Chen C, Xu ZF, Zhou QQ (2016) Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers. *Crop Protection*, 85, 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.03.018>.