

Droplet Size 조절을 통한 항공살포 농약의 비산 저감: Lecithin 보조제의 효과

노현호¹, 김소희¹, 김동주², 오은빈², 최정도², 문지효², 김창조³, 경기성^{2*}

Reduction of Drift in Aerial Pesticide Application through Regulation of Droplet Size: Effect of Lecithin Adjuvant

Hyun Ho Noh ¹, So-Hee Kim ¹, Dong Ju Kim ², Eun Been Oh ², Jeong Do Choi ², Jee Hyo Moon ²,
Chang Jo Kim ³ and Kee Sung Kyung ^{2*}

¹국립농업과학원 잔류화학평가과, ²충북대학교 환경생명화학학과, ³국립농산물품질관리원 안전성분석과

¹Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea, ²Department of Environmental and Biological Chemistry, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea, ³Division of Safety Analysis, Experiment Research Institute, National Agricultural Product Quality Management Service, Gimcheon 39660, Korea

* Correspondence: kskyung@cbnu.ac.kr

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.22>

Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 233-241

Received: October 18, 2024

Revised: October 26, 2024

Accepted: October 31, 2024

Published: November 11, 2024

Online ISSN: 2233-4173

Print ISSN: 1225-3537



Check for
updates

© 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 analyzed the effect of lecithin adjuvant on droplet size and drift reduction during pesticide application, and evaluated its effectiveness by predicting drift distances using the DRIFTSIM model. A flat fan nozzle (XR8002) was used to compare the droplet sizes of water and lecithin adjuvant mixtures, measured with a laser diffraction system. Droplet size parameters (D_{V10} , D_{V50} , D_{V90}) were compared, and the drift distance for each solution was predicted using the DRIFTSIM model. The results showed that the lecithin adjuvant significantly increased droplet size compared to water. At 40 psi, the D_{V10} , D_{V50} , and D_{V90} of the lecithin mixture increased by 42.7%, 35.4%, and 35.5%, respectively, compared to water. This trend was also observed at higher pressures. Drift predictions indicated that the lecithin adjuvant mixture reduced drift distances by up to 35% compared to water. In particular, droplets smaller than 100 μm , which are more prone to drift and evaporation, were significantly reduced in the lecithin mixture, demonstrating its effectiveness in drift reduction. Additionally, lowering the spray height from 2 m to 1 m further shortened the drift distance, emphasizing the importance of height control in drift reduction. Overall, lecithin adjuvant can be an effective tool for increasing droplet size and reducing pesticide drift, contributing to minimizing environmental impact and enhancing pesticide efficiency during application. These findings suggest that lecithin adjuvant has potential as a sustainable pesticide management strategy in agricultural practices.

Keywords: DRIFTSIM, Droplet size, Lecithin adjuvant, Pesticide drift

서론

농약 살포액의 droplet size는 부착량, 약효, 약해, 잔류성에 영향을 미치며, 최근 이슈가 되고 있는 비산에도 많은 영향을 미친다. Droplet size가 작으면 부착량이 많아지고 이에 따라 농약 잔류농도가 높아지기도 하며, 약효 지속성이 길어질 수 있지만 반대로 부착량이 많아지면 약해의 위험도 존재한다[1]. 또한 작은 크기의 droplet은 비산에 매우 취약하며, 지름을 기준으로 100~200 μm 인 크기의 droplet의 비율이 높으면 비산량이 많아진다는 다수의 보고가 있듯이 비산은 droplet size에 매우 의존적이다 [2-4]. 이처럼 droplet size는 부착량, 비산을 포함하여 농약 살포시 다양한 부분에 영향을 미친다.

살포액의 droplet을 키우는 것은 공학적으로는 매우 복잡한 메커니즘을 갖지만 air induction 노즐이나 drift guard 노즐과 같이 큰 droplet을 살포할 수 있는 노즐을 사용하면 간단하게 해결할 수 있다[5,6]. 하지만 너무 큰 droplet은 또 다른 문제를 야기한다. 작물에 살포된 농약 희석액은 작물 표면에 도달하면 부착(deposition), 부서짐(shatter), 튕김(bounce) 현상을 보이는데 큰 droplet은 작물 표면에서 부서지거나 튕김 현상으로 부착율이 저하되어 또 다른 비산을 야기하거나 약효가 저하될 수 있다[7]. 특히 droplet size가 400 μm 를 초과하게 되면 튕김 현상으로 부착율이 매우 저조해진다는 보고가 있다[8]. 약효 보장을 위해서 작은 크기(140~200 μm)의 droplet이 살포되어야 하는데 이렇게 되면 비산량이 증가할 수밖에 없는 것이다[9].

노즐의 사용뿐만 아니라 살포액의 물리성을 개선하여 droplet size를 키우는 방법도 있다. 노즐에서 희석액이 분사되면 바로 droplet 상태로 분무되는 것이 아니라 노즐 팁에서 액막(liquid sheet)이 형성된 후 시간이 지나면서 액막의 두께가 얇아지면서 액주(ligament)로 분열되고 액주로부터 droplet이 생성되게 된다. 여기서 액막의 크기와 액막 형성의 지속성이 droplet size를 결정하게 되고 adjuvant가 결정적인 역할을 할 수 있다[10].

무인항공기를 이용한 농약 살포는 공중으로 작물에 접근하기 때문에 농약 살포로 인한 작물의 훼손이 거의 없으며, 관행적인 농약 살포 방법에 비해 살포자에 대한 농약 노출량도 현저히 감소하였다. 또한 대면적의 농경지를 빠르게 살포할 수 있다는 장점을 앞세워 우리나라를 포함한 동북아시아를 중심으로 무인항공기를 이용한 농약 살포가 확대되고 있다[11-13]. 무인항공기는 2~4 m의 상공에서 농약을 살포하기 때문에 풍향, 풍속 등의 기상 조건의 영향을 받아 비산이 발생하게 된다. 이때 주변에 다른 작물이 재배되고 있는 경우 비산으로 인한 비의도적 농약 잔류로 인해 다양한 문제가 발생하게 된다. 특히 우리나라는 아직까지 관행 재배 필지와 친환경 재배 필지가 혼재되어 있는 경우가 많은데 관행 재배 필지에서 살포한 농약이 비의도적으로 친환경 재배 필지에 비산되어 잔류되면 친환경인증 취소 등의 행정처분이 내려지게 되고 농업인 간 분쟁이 발생할 수도 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 농약관리법이 개정되어 2023년 1월부터 항공방제업 신고제가 도입되었고 농약피해분쟁조정위원회도 설치되었다. 하지만 이러한 제도적 장치는 이미 비산이 발생하여 피해가 발생 후 문제를 해결하기 위한 것으로 이러한 분쟁을 사전에 차단하기 위해서는 농약 항공살포 당시 비산을 저감할 수 있는 방법으로 농약을 살포하는 것이 중요하다.

국내에서 농약 제품을 판매하기 위해서는 다양한 연구 결과를 제출한 후 농촌진흥청의 승인을 받아야 한다. 그 과정에서 약효 실험 결과를 제출하며, 법적인 유효 방제가 이상을 보이면 농약이 등록된다. 하지만 농약 항공살포는 고농도의 희석액을 소량 살포하기 때문에 약효가 검증되었다 하더라도 약효 저하에 대한 논란이 끊이지 않고 있다. 우리나라에서 전착제는 농약 살포액의 고착성과 확산성을 증가시켜 농약의 효과 증진을 목적으로 사용하고 있다[14]. 현재까지 무인항공 살포에 등록된 전착제는 없지만 약효 증진을 위한 도구로 고려할 필요는 있다.

결론적으로 항공살포 농약은 비산으로 인한 피해를 사전 예방하고 약효를 보장할 수 있는 살포 방법을 개발하는 것이 매우 중요한 문제로 인식될 수 있다. 따라서 이 연구는 lecithin adjuvant를 첨가한 살포액의 droplet size 변화를 조사하고 DRIFTSIM 모델을 이용하여 측정된 droplet size를 이용하여 비산 거리를 예측함으로써 비산 저감 방안을 제시하기 위해 수행되었다.

재료 및 방법

시험 Adjuvant 및 노즐

시험에 사용한 Lecithin adjuvant는 lecithin 48.8% 유제로 유럽에서 농약 사용량 저감하고 droplet의 확산성을 향상시키는 데 사용하고 있다. 또한 이 adjuvant는 노즐의 액막 형성의 지속성을 향상시켜 균일한 droplet을 형성한다. 따라서 Lecithin adjuvant 첨가 살포액이 droplet size를 키워 비산을 저감할 수 있는 도구로 활용할 수 있는지 검토하기 위하여 XR8002 (Spraying

Systems Co., Incheon, Korea) 노즐을 이용하여 물 살포액과 lecithin adjuvant 첨가 살포액의 droplet size를 측정하여 비교하였다. 시험에 사용된 노즐은 확장형 부채꼴 스프레이 팁(Extended range flat fan nozzle)으로 분사 각도는 80°이며, 15~60 psi의 넓은 압력 범위에서 운영이 가능하다는 장점으로 우리나라 농업용 무인항공기에 가장 널리 적용하고 있다.

Droplet size 측정 방법

레이저 회절 밀도 측정기(SprayTec, Malvern, UK)는 노즐에서 분사되는 droplet size를 측정하기 위해 적합한 장치이다. 이 장치로 droplet size를 측정하면 전체 살포액 중 하위 10%에 해당하는 droplet size를 나타내는 D_{V10} , 중간 크기의 droplet size인 D_{V50} (volume median diameter, VMD), 상위 10%에 해당하는 droplet size를 나타내는 D_{V90} 을 포함하여 droplet size별 분포율, 전체 droplet의 부피 평균 등 다양한 정보를 확보할 수 있다.

살포액의 droplet size를 측정하는 방법은 ISO와 EPA의 가이드라인에 자세히 제시되어 있다. 이 가이드라인에는 droplet size를 측정하기 위해서는 노즐 팁과 droplet size 측정 구역(laser zone)과의 거리는 50 cm로 규정되어 있으며, 살포 압력은 40 psi로 유지할 것을 권장하고 있다(ISO, 2018, ISO 25358, Crop protection equipment - Droplet-size spectra from atomizers - Measurement and classification; EPA, 2016, U.S. EPA Generic Verification Protocol for Testing Pesticide Application Spray Drift Reduction Technologies for Row and Field Crops). 이 연구에서는 살포 압력에 따른 droplet size의 변화를 조사하기 위하여 20, 40, 145 psi의 압력으로 측정하였으며, ISO 가이드라인에 따라 5초간 droplet size를 측정하였다.

Droplet의 비산 거리 예측

Droplet의 비산 거리를 예측하기 위해서는 살포 지점으로부터의 이격 거리에 따른 비산량을 이용한 비산 커브를 도출하고 이 커브를 이용한 회귀식을 이용하여 비산 거리를 예측하는 것이 일반적이다[15]. 하지만 비산 커브를 확보하기 위해서는 야외 또는 실내 풍동시험장에서 대규모의 실험이 필요하다. DRIFTSIM 모델에 살포 높이, 풍속, 습도, 온도, 분사 속도 등 살포 조건과 실측한 droplet size를 입력하면 간편하게 비산 거리와 droplet size의 분포를 예측할 수 있다(Fig. 1). DRIFTSIM은 USDA-ARS (United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service)에서 개발한 시뮬레이션 기반 droplet의 비산 거리를 예측하는 모델로 전산유체역학 프로그램을 이용하여 살포액의 단일 droplet의 비산 거리에 대한 대규모 데이터베이스에 외삽하는 방식으로 개발되었다.

The screenshot shows the DRIFTSIM options window. On the left, under 'DRIFTSIM options', 'Metric' is selected. Below this, a text box explains: 'To change data values, just type in new values. If unknown, drop velocity may be calculated; click on droplet velocity box. Enter spray pressure in the pop-up box.' A table of input parameters is shown:

Parameter	Value
Discharge height (m)	2
Wind velocity (m/s)	2
Relative humidity (%)	55
Temperature (°C)	28
Droplet velocity (m/s)	14.1

On the right, 'Single size droplets' is selected, and 'Array of droplets (DV's)' is chosen. Below this, 'Enter Drop Size Distribution' is shown with three values: DV.1: 97.9, DV.5: 203.8, DV.9: 371.7. A 'Calculate Drift Distance' button is present. To the right of this, '1 Orifice Nozzle' and '2 Orifice Nozzle' are options, with '2 Orifice Nozzle' selected. Below this, a text box says: 'Flat fan nozzles: Enter system pressure to compute drop velocity.' A table of calculated results is shown:

Pressure (kPa)	Velocity (m/s)
275.8	14.14

A 'Continue' button is at the bottom right.

Fig. 1. Parameters entered into the DRIFTSIM program.

이 연구는 무인 항공살포 농약의 비산에 초점을 맞추고 있으므로 이 모델에 살포 높이는 일반적인 무인 멀티콥터의 비행고도인 2 m를 적용하였다. 풍속은 우리나라 10년간 평균 풍속인 2 m/s를 적용하였으며, 습도와 온도는 droplet 측정 당시의 평균

온습도를 입력하였다. Droplet size는 single size droplet과 array of droplet을 선택할 수 있는데 무인항공기에는 2개 이상의 노즐이 장착되기 때문에 array of droplet에서 2 orifice nozzle 모드를 선택하였다. 분사속도는 측정 시 살포 압력을 입력하여 자동 계산된 값을 적용하였다.

또한 모델에서 제공하는 droplet size 범위에 따른 비산 거리를 이용하여 비산 커브를 작성하고 이 커브에서 도출된 회귀곡선을 이용하여 lecithin adjuvant 첨가 살포액과 물 살포액의 실제 D_{V50} 의 비산 거리를 예측하여 lecithin adjuvant 첨가 살포액의 비산 저감 가능성을 평가하였다.

결과 및 고찰

노즐에 따른 Droplet size 측정 결과

Droplet size 측정의 기준 압력인 40 psi로 물을 살포했을 때 D_{V10} 의 평균 droplet size는 Table 1에 제시한 바와 같이 97.9 μm 이었으며, D_{V50} 과 D_{V90} 은 각각 203.8 μm 과 371.7 μm 이었다. 살포 압력을 20 psi로 줄이면 D_{V10} 은 약 48.3%가 증가하여 145.2 μm 로 나타났으며, D_{V50} 과 D_{V90} 은 각각 41.2%와 41.7%가 증가하여 287.8 μm 과 526.6 μm 의 droplet size를 보였다. 살포 압력을 145 psi로 증가시키면 D_{V10} , D_{V50} 및 D_{V90} 은 각각 65.3 μm , 116.5 μm 및 218.7 μm 으로 40 psi 살포액의 droplet size보다 약 33.3~42.8% 감소하는 것으로 나타났다. Lecithin adjuvant를 물로 희석하여 살포한 후 droplet size를 측정한 결과, 40 psi의 압력에서 D_{V10} 은 Table 1에 제시한 바와 같이 139.7 μm 이었으며, D_{V50} 과 D_{V90} 은 각각 276.0 μm 과 503.5 μm 로 측정되었다. 살포 압력을 20 psi로 낮추어 측정한 결과 D_{V10} 은 약 39.2%가 증가하여 194.5 μm 로 측정되었으며, D_{V50} 과 D_{V90} 은 모두 약 50%가 증가하여 각각 415.2 μm 과 756.7 μm 의 droplet size를 보였다. 살포 압력을 145 psi로 높이면 droplet size는 약 20.6~35.1%가 감소하여 각각 90.7 μm , 189.7 μm 및 399.6 μm 을 보였다. 물 살포액과 lecithin adjuvant 첨가 살포액의 droplet size를 비교 분석한 결과, lecithin adjuvant를 첨가하면 40 psi 기준 D_{V10} , D_{V50} 및 D_{V90} 은 각각 약 42.7%, 35.4% 및 35.5%가 증가하는 것으로 나타났다. 특히 살포 압력을 145 psi로 증가시켜 droplet size를 작게 살포한 경우도 D_{V50} 과 D_{V90} 은 각각 약 62.8%와 82.7% 증가하는 경향을 보였다. 또한 100 μm 이하의 droplet은 모두 비산된다고 가정했을 때, 40 psi 기준으로 물 살포액은 전체 살포액 중 13.6%가 비산될 가능성이 있는 것으로 나타났으나 lecithin adjuvant 첨가 살포액의 경우 1.2%로 lecithin adjuvant를 첨가하면 비산량이 획기적으로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 고압으로 살포하여 droplet size가 작아진 경우에도 물을 살포하면 전체 살포액 중 28.2%의 droplet이 비산될 가능성이 있었지만, lecithin adjuvant를 첨가하면 3.8%만이 비산 가능성이 있는 것으로 나타났다. Droplet size는 비산을 결정하는 핵심적인 요인으로 100~200 μm 이하의 droplet 분포가 높을수록 비산량은 증가한다는 보고를 감안하면 lecithin adjuvant 첨가가 droplet size를 증가시키고 이에 따라 비산이 저감될 수 있음을 시사한다[16-18]. 또한 살포 압력이 증가하면 droplet이 작아지면서 비산량이 증가할 수 있다고 판단되었다.

물 살포 Droplet의 비산 거리 예측 결과

DRIFTSIM에 실측한 물 살포액의 droplet size를 입력하여 예측한 비산 거리는 Table 2에 제시하였다. 물을 20 psi로 살포하면

Table 1. Volume-average diameter and distribution ratio of droplet with lecithin adjuvant and water solution

Spray solution	Pressure (psi)	Volume-average diameter (um)						Distribution ratio of 100 um or less (%)	
		D _{V10}		D _{V50}		D _{V90}			
		Mean (n=3)	SD	Mean (n=3)	SD	Mean (n=3)	SD	Mean (n=3)	SD
Lecithin adjuvant	20	194.5	5.4	415.2	1.8	756.7	6.3	0.0	0.0
	40	139.7	0.9	276.0	1.4	503.5	3.9	1.2	0.3
	145	90.7	1.7	189.7	3.9	399.6	2.9	3.8	0.1
Water	20	145.2	1.4	287.8	1.6	526.6	1.5	3.9	0.2
	40	97.9	0.3	203.8	2.0	371.7	4.1	13.6	0.2
	145	65.3	0.9	116.5	1.4	218.7	7.3	28.2	0.4

Table 2. Prediction result of droplet distribution and drift distance of water spray solution using the DRIFTSIM

Spray pressure (psi)	Width (μm)	Portion of volume	Accumulation portion (%)	Drift distance (m)	
				Discharge height	
				2 m	1 m
20	36-109	0.01	1	12.45 ¹⁾	12.37 ¹⁾
	109-182	0.09	10	9.74	4.09
	182-254	0.20	30	4.53	1.87
	254-309	0.19	49	3.06	1.14
	309-363	0.14	63	2.31	0.78
	363-418	0.11	74	1.79	0.55
	418-472	0.08	82	1.42	0.41
	472-527	0.06	88	1.16	0.32
	527-581	0.12	100	0.96	0.26
40	24-73	0.01	1	6.95 ¹⁾	7.01 ¹⁾
	73-122	0.09	10	19.94 ¹⁾	10.52
	122-176	0.19	29	8.63	3.4
	176-215	0.18	47	4.94	1.84
	215-254	0.14	61	3.60	1.20
	254-293	0.11	72	2.74	0.77
	293-333	0.09	81	2.14	0.51
	333-372	0.07	88	1.67	0.33
	372-411	0.12	100	1.33	0.24
145	16-49	0.00	0	4.33 ¹⁾	4.34 ¹⁾
	49-82	0.10	10	10.61 ¹⁾	10.55 ¹⁾
	82-109	0.23	33	19.06 ¹⁾	10.33
	109-131	0.19	52	13.84	4.45
	131-153	0.14	66	8.43	2.82
	153-175	0.10	76	6.00	1.86
	175-197	0.07	83	4.55	1.23
	197-219	0.05	88	3.57	0.77
	219-241	0.12	100	2.88	0.46

¹⁾ Droplets completely evaporated before deposition.

droplet size는 최소 36 μm 에서 최대 581 μm 인 것으로 예상되었으며, 40 psi와 145 psi에서는 각각 24~411 μm 와 16~241 μm 로 살포 압력이 증가하면서 droplet size는 작아지는 것으로 나타났다. 살포 고도를 2 m로 가정하고 20 psi로 살포했을 때 공기 증으로 휘발되는 droplet을 제외하고 퇴적되는 droplet은 최대 9.74 m 비산되는 것으로 나타났으며, 전체 살포액 중 88%가 1 m 이상 비산되는 것으로 나타났다. 모든 조건은 동일하게 하고 살포 고도를 1 m로 낮추면 퇴적되는 droplet은 최대 4.09 m가 비산되는 것으로 나타났으며, 전체 droplet 중 약 51%는 1 m 이하의 비산을 보였다. 살포 압력을 40 psi로 증가시키면 전체 droplet의 10%는 공기 증으로 휘발되고 최대 비산 거리는 8.63 m인 것으로 예측되었다. 또한 가장 큰 droplet은 1.33 m 비산될 것으로 예측되었다. 살포 고도를 1 m로 낮추고 40 psi의 압력으로 살포한 것으로 가정하면 공기 증으로 휘발되는 droplet이 감소하여 퇴적되는 droplet의 최대 비산 거리는 10.52 m인 것으로 예측되었으며, 가장 큰 droplet은 0.24 m 비산되는 것으로 나타났다. 살포 압력을 145 psi로 증가시키면 2 m 살포 고도에서 전체 droplet의 약 33%가 공기 증으로 휘발되는 것으로 나타났으며, 퇴적되는 droplet (109~131 μm)의 최대 비산 거리는 13.84 m인 것으로 예측되었다. 살포 고도를 낮추면 휘발되는 droplet이 감소하여 82~109 μm 범위의 droplet이 최대 10.33 m 퇴적 비산될 것으로 예측되었다. DRIFTSIM에서 예측한 droplet size와 비산 거리를 이용하여 40 psi 압력으로 물 살포액을 실측한 D_{V50} 의 비산 거리를 예측한 결과는 Table 3에 제시한 바와 같이 2 m 고도에서 5.83 m 비산되는 것으로 나타났으며, 고도를 1 m로 낮추면 2.64 m 비산되는 것으로 나타났다.

Table 3. Prediction result of droplet distribution and drift distance of lecithin adjuvant spray solution using the DRIFTSIM

Spray pressure (psi)	Width (μm)	Portion of volume	Accumulation portion (%)	Drift distance (m)	
				Discharge height	
				2 m	1 m
20	49-146	0.01	1	19.73 ¹⁾	11.74
	146-243	0.09	10	5.47	2.31
	243-355	0.18	28	2.77	1.00
	355-435	0.18	46	1.75	0.53
	435-516	0.14	60	1.27	0.36
	516-596	0.11	71	0.96	0.26
	596-676	0.09	80	0.75	0.20
	676-757	0.07	87	0.60	0.16
	757-837	0.13	100	0.49	0.13
40	35-105	0.01	1	11.64 ¹⁾	11.67 ¹⁾
	105-175	0.09	10	9.91	3.88
	175-244	0.20	30	4.39	1.58
	244-296	0.19	49	2.82	0.81
	296-348	0.14	63	2.04	0.47
	348-400	0.11	74	1.49	0.28
	400-452	0.08	82	1.10	0.19
	452-504	0.06	88	0.83	0.14
	504-555	0.12	100	0.64	0.11
145	23-68	0.03	3	6.34 ¹⁾	6.33 ¹⁾
	68-113	0.06	9	17.63 ¹⁾	4.75
	113-122	0.05	14	14.66	4.84
	122-137	0.03	17	11.37	3.72
	137-153	0.04	21	8.05	2.68
	153-168	0.06	27	6.24	1.96
	168-184	0.09	36	5.11	1.48
	184-200	0.18	54	4.25	1.09
	200-215	0.46	100	3.59	0.78

Lecithin adjuvant 첨가 살포 droplet의 비산 거리 예측 결과

DRIFTSIM에 실측한 lecithin adjuvant 첨가 살포액의 droplet size를 입력하여 예측한 비산 거리는 Table 4에 제시하였다. 희석액을 20 psi로 살포했을 때 최소 49 μm 에서 최대 837 μm 의 droplet이 생성될 것으로 예측되었다. 살포 압력을 40 psi와 145 psi로 증가시키면 droplet size는 각각 35~555 μm 와 23~215 μm 로 작아지지만, 물 살포액의 droplet size보다 큰 것으로 예측되었다. 살포 고도를 2 m로 가정하고 20 psi의 압력으로 살포하면 49~146 μm 범위의 droplet은 모두 공기 중으로 휘발될 것으로 나타났으며, 146~243 μm 범위의 droplet부터 지상으로 퇴적되어 5.47 m 비산되는 것으로 예측되었다. 최대 droplet size로 예상된 757~837 μm 범위의 droplet의 비산 거리는 0.49 m로 나타났다. 살포 고도를 1 m로 낮추면 공기 중으로 휘발되는 droplet은 없는 것으로 나타났으며, 49~146 μm 범위의 droplet이 11.74 m 비산되는 것으로 나타났다. 고도를 낮추면서 휘발되어 공기 중으로 비산되는 양이 감소하면서 퇴적되는 비산량이 증가하는 것으로 나타났으나, 동일한 크기의 droplet의 비산 거리는 더 짧은 것으로 나타났다. 또한 2 m 고도에서 살포하면 전체 droplet 중 약 60%는 1 m 이상 비산되는 것에 비해 고도를 1 m로 낮추면 약 28%의 droplet이 1 m 이상 비산되는 것으로 나타났다. 살포 압력을 40 psi로 높이면 105 μm 이하의 droplet은 2 m 고도에서 모두 공기 중으로 휘발되는 것으로 나타났으며, 175 μm 이하의 droplet은 9.91 m 지점에 퇴적되어 비산되는 것으로 예측되었다. 최대 droplet size로 예상되는 504~555 μm 범위의 droplet은 0.64 m 비산되는 것으로 나타났으며, 전체 droplet의 82% 이상은 1 m 이상 비산되는 것으로 예측되었다. 살포 고도를 1 m로 낮추면 2 m 고도에서와 마찬가지로 가장 작은 크기

Table 4. Prediction drift distance of measured-VMD using the regression equation by spray solution and discharge height at 40 psi

Spray solution	VMD ¹⁾ (μm)	Discharge height (m)	Equation	Drift distance (m)
Water	203.8	2	$y = 27.1973e - 0.0076x$	5.83
		1	$y = 34.1501e - 0.0126x$	2.64
Lecithin	276.0	2	$y = 25.3023e - 0.0069x$	3.79
		1	$y = 15.0786e - 0.0094x$	1.13

¹⁾ Volume median diameter (D_{V50}).

범위인 35~105 μm droplet은 공기 중으로 휘발되는 것으로 나타났으며, 최대 비산 거리는 105~175 μm 범위의 droplet의 3.88 m인 것으로 예측되었다. 또한 전체 droplet 중 30%는 1 m 이상 비산되는 것으로 나타났다. 살포 압력을 145 psi로 증가시키면 2 m 고도에서 전체 droplet 중 12%가 공기 중으로 휘발되는 것으로 나타났으며, 그때 droplet size 범위는 23~113 μm였다. 비산되어 지상으로 퇴적되는 droplet size는 113 μm 이상인 것으로 나타났으며, 그때 비산 거리는 14.66 m인 것으로 예측되었다. 살포 고도를 낮추면 휘발되는 droplet이 감소하여 68~113 μm 범위의 droplet이 4.75 m 지점까지 비산되어 퇴적될 것으로 예측되었다. DRIFTSIM에서 예측한 droplet size와 비산 거리를 이용하여 40 psi 압력으로 lecithin adjuvant 살포액을 실측한 D_{V50} 의 비산 거리를 예측한 결과는 Table 4에 제시한 바와 같이 2 m 고도에서 3.79 m 비산되는 것으로 나타났으며, 고도를 1 m로 낮추면 1.13 m 비산되는 것으로 나타났다. 살포된 droplet은 작물의 표면에서 부착, 튕김, 부서짐과 같이 3가지 형태로 변화하게 되는데 이 역시 droplet size에 의존적이며, 부착율은 약효와 깊은 관련이 있다. Droplet size가 111 μm보다 작으면 튕김이나 부서짐 없이 바로 작물 표면에 부착하게 되고 236 μm의 droplet은 작물 표면에서 튕김 현상 후 부착하게 된다[18]. Droplet size가 357 μm이면 작물 표면에서 부서지고 흩어지면서 부착하며, 400 μm 이상인 droplet은 작물 표면의 부착율이 낮아지게 된다[8]. Lecithin adjuvant 첨가 살포액의 D_{V50} 의 droplet size는 276 μm이며, DRIFTSIM에서 예측한 droplet size의 분포율을 고려하면 lecithin adjuvant 첨가에 따라 부착 효율이 저하되지 않을 것으로 판단되었다.

결론

이 연구는 농약 살포에 있어 lecithin adjuvant가 droplet size와 비산 저감에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고, 이를 DRIFTSIM 모델을 통해 예측한 비산 거리를 비교함으로써 lecithin adjuvant의 활용 가능성을 평가하였다. 첫째, droplet size 측정 결과에서 lecithin adjuvant를 첨가한 경우 물 살포액에 비해 모든 압력 조건에서 droplet size가 증가하는 것으로 나타났다. 특히 40 psi 조건에서 D_{V10} , D_{V50} , D_{V90} 이 각각 물에 비해 42.7%, 35.4%, 35.5% 증가하여 droplet의 크기가 전반적으로 커졌다. 이러한 결과는 lecithin adjuvant가 노즐에서 액막 형성의 지속성을 높여 더 균일하고 큰 droplet을 형성함으로써 비산을 줄이는 데 기여할 수 있음을 시사한다. 둘째, DRIFTSIM을 이용한 비산 거리 예측 결과에서도 lecithin adjuvant 첨가 살포액은 물 살포액에 비해 비산 거리가 감소하는 경향을 보였다. DRIFTSIM 예측 결과와 회귀식을 통해 예측한 결과에 따르면 40 psi 압력과 2 m 고도에서 lecithin adjuvant 첨가 살포액의 최대 비산 거리는 3.79 m로, 물 살포액의 5.83 m보다 약 35% 감소한 것으로 나타났다. 특히 100 μm 이하의 droplet은 비산 및 휘발 가능성이 매우 크기 때문에 lecithin adjuvant 첨가로 이러한 작은 droplet의 발생이 크게 감소시킬 수 있을 것으로 판단되었다. 셋째, 살포 고도를 2 m에서 1 m로 낮출 경우 비산 거리가 더 감소하는 경향을 보였다. 40 psi 조건에서 lecithin adjuvant를 첨가한 살포액의 경우 1 m 고도에서는 비산 거리가 1.13 m로 감소하였으며, 이는 살포 고도와 압력 조절이 비산 저감에 중요한 변수임을 시사한다.

따라서 본 연구는 lecithin adjuvant가 droplet size를 증가시켜 농약 비산을 효과적으로 저감할 수 있는 유용한 방법임을 입증하였으며, 무인항공기와 같은 농업용 장비를 이용한 살포에서 환경적 피해를 최소화할 수 있는 기술적 대안으로 제시될 수 있음을 시사한다. 특히 농약 비산에 민감한 환경에서 lecithin adjuvant의 적용은 농약 오염 저감 및 작물 보호에 기여할 수 있으며, 적절한 살포 압력과 고도를 조절함으로써 농약의 효율적인 사용이 가능할 것이다. 이러한 연구 결과는 향후 농업 분야에서 친환경적 농약 관리 전략 수립에 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

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

Author Contributions: K.K.S. and N.H.H. designed the study; N.H.H. wrote the manuscript; K.K.S. reviewed the manuscript; N.H.H., K.S.H., K.D.J., O.E.B., C.J.D., M.J.H., and K.C.J. 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.

Acknowledgments: This work was supported by a funding for the academic research program of Chungbuk National University in 2024.

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.22>

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

- 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>.
- 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>.
- 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>.
- 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.
- Dorr GJ, Hewitt AJ, Adkins SW, Zhang H, Noller B (2013) A comparison of initial spray characteristics produced by agricultural nozzles. *Crop Protection*, 53, 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.06.017>.
- 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 Journal of Environment Agriculture*, 43, 82-91. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.08>.
- Mercer GN (2009) Modelling to determine the optimal porosity of shelterbelts for the capture of agricultural spray drift. *Environmental Modelling & Software*, 24(11), 1349-1352. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.05.018>.
- 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>.
- Dorr GJ, Kempthorne DM, Mayo LC, Forster WA, Zabkiewicz JA, McCue SW, Belward JA, Tuner JW, 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>.
- Koh KU, Lee SY (2002) Spray angle of hollow cone liquid sheet discharged from simplex swirl spray nozzle. *Journal of ILASS-Korea*, 7(4), 1-8.
- 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>.
- 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 Sciences*, 9(2), 218. <https://doi.org/10.3390/app9020218>.
- 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>.
- Chang SW, Kim KD (2021) Evaluation of surfactant and spraying time to improve the effect of colorant on the putting green of

- a golf course. *Weed & Turfgrass Science*, 10(3), 319-326. <https://doi.org/10.5660/WTS.2021.10.3.319>.
15. Park JS, Lee SY, Choi YL, Jeong HN, Noh HH, Yu SH, Song HS, Hong SW (2021) Analyzing drift patterns of spray booms with different nozzle type and working pressures in wind tunnel. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 63(5), 39-47. <https://doi.org/10.5389/KSAE.2021.63.5.039>.
 16. 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>.
 17. 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.
 18. 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>.