Korean Journal of Environmental Agriculture Open Access https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.32
Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 336-347

Article https://www.korseaj.org

밭작물의 드론 방제 시 농약 비산량 예측 모델 개발

이세연[1], 박진선[2], 이채린[1], Daniel Kehinde Favour[1], 박지연[1], 유승화[3], 이춘구[3], 홍세운[1,2*]

A Spray Drift Curve Model for Pesticide Drift Prediction during Drone Spraying Applications for Field Crop

Se-Yeon Lee[1], Jinseon Park[2], Chae-Rin Lee[1], Kehinde Favour Daniel[1], Ji-Yeon Park[1], Seung-Hwa Yu[3], Chun-Gu Lee[3] and Se-Woon Hong[1,2*]

[1]전남대학교 지역·바이오시스템공학과 & BK21(4단계) 기후지능형 간척지 농업교육연구팀, [2]전남대학교 농업생명과학대학 기후변화대응 농생명연구소, [3]국립농업과학원 농업공학부 밭농업기계화연구팀
[1]Department of Rural and Bio-systems Engineering & Education and Research Unit for Climate-Smart Reclaimed-Tideland Agriculture (BK21 four), Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea,
[2]AgriBio Institute of Climate Change Management, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea,
[3]Upland Mechanization Team, Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, Jeonju 54875, Korea
* Correspondence: hsewoon@jnu.ac.kr

Abstract: Drift curves are widely used for predicting pesticide drift from ground applications because of their simplicity and practicality. However, developing drift curves suitable for the rapidly increasing drone-based aerial spraying remains challenging due to its complexity. This study assessed the applicability of existing drift curves for predicting spray drift in aerial applications and developed a new drift curve based on experimental data. Seventeen variables, including meteorological conditions, crop growth conditions, and drone operating factors, were analyzed for their influence on drift. The key factors were wind speed, atmospheric stability, crop height, and spraying height, differentiating from conventional models that emphasize temperature, wind speed, nozzle pressure, and flow rate. These differences highlight the effects of strong downwash and high-altitude spraying in drone applications. Additionally, the spatial pattern of drift showed a logarithmic decrease with distance, contrasting the exponential trend in ground-based models. The developed drift curve achieved high accuracy for predicting both airborne drift and ground deposition with R^2 of 0.71 and 074, respectively, offering a cost—effective alternative to field experiments for efficient drift management.

Keywords: Aerial spraying, Airborne drift, Atmospheric stability, Ground deposition, Logarithmic equation

https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.32

Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 336-347

Received: November 21, 2024
Revised: December 2, 2024
Accepted: December 6, 2024
Published: December 18, 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.

서 론

농업활동에서 작물의 안정적인 수확과 고품질의 식량 생산을 위해 농약 사용은 필수적이다. 그러나 농약 살포 과정에서 일부 농약은 유출, 침출, 물방울 이동, 증기

이동 등의 물리적 및 화학적 메커니즘에 의해 비산될 수 있다[1]. [2,3]에 따르면 농약 살포 과정에서 의도하지 않은 지역으로 비산되는 양은 살포량의 약 50%에 이른다고 보고되었고, 농업 활동이 활발한 지역에서는 농약 비산이 인간의 건강과 수생태계에 심각한 문제를 초래할 수 있다[4].

드론을 활용한 항공 방제 기술이 빠르게 발전하고 있으나, 드론은 특성 상 농약을 높은 고도에서 빠른 속도로 살포하기 때문에 지상 방제에 비해 농약 비산 위험이 더 큰 것으로 알려져 있다[5]. 농약 비산은 풍속, 풍향, 대기안정도와 같은 기상 조건과 작물 캐노피의 밀도와 높이, 분무 액적의 크기 등 여러 요인이 복합적으로 상호작용하여 발생한다[6,7]. 특히 드론으로 농약을 살포할 때는 다수의 로터에 의한 하향풍과 복합적인 운영 시스템으로 인해 살포된 액적이 작물에 도달하는 과정에서 더욱 복잡한 물리적·환경적 영향을 받는다[8,9]. 이러한 복잡성으로 인해 드론 방제 시 농약 비산을 정확히 예측하고 제어하는 것이 어려우며, 드론 방제의 효과적인 비산 관리 방안이 요구되고 있다.

농약 비산을 평가하고 최소화하기 위한 다양한 연구 방법이 제안되었다. 풍동 실험(Wind tunnel experiment) 및 비산 챔버(Drift Chamber)를 활용한 실험적 연구는 제어된 환경에서 농약 비산의 움직임을 정밀하게 추정할 수 있는 유용한 방법이다[10,11]. 또한, 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics; CFD) 시뮬레이션[12,13]과 대기 확산 모델[14]은 실험으로 측정하기 어려운 물리적 현상들을 구현하고, 공기 중 농약 입자의 이동 경로를 예측할 수 있는 대표적인 방법으로 활용된다. 그러나 이러한 방법들은 실제 자연 현상을 완벽하게 반영하는 데 한계가 있으며, 실험과 모델의 결과를 현장 상황에 맞게 적용하는 데 신중한 해석이 요구된다.

이를 보완하기 위한 방법으로 현장 실험 데이터를 활용하여 비산 곡선 모델을 만드는 연구가 다수 수행되었다[15,16]. 비산 곡선 모델들은 그 형태가 단순하여 현장에서 가장 쉽게 활용할 수 있는 비산량 예측 모델로서 널리 활용되어 오고 있다. 그러나 현재까지 현장 실험 데이터에 기반하여 만들어진 대부분의 비산량 예측 모델들은 지상 방제 상황을 기반으로 개발되었기 때문에, 항공 방제와 같은 새로운 기술에 적용하는 데 한계가 있다. 특히, 살포 대상지와 비산 지역에 존재하는 작물의 유무가 공기의 흐름을 제어하고 액적의 이동 경로에 영향을 미치지만, 이러한 다양한 요인들을 고려한 비산 곡선 모델은 부족한 상황이다. 따라서 드론 방제에 적합한 새로운 경험적 모델이 필요하며, 이는 현장 실험을 통해 측정된 다양한 비산 요인들을 종합적으로 반영해야 한다.

따라서, 본 연구의 목적은 현장 실험 데이터를 기반으로 드론 항공 방제에 의한 물리적 현상과 자연환경의 복잡성을 반영한 효과적인 비산 곡선 모델을 개발하는 것이다. 이를 위해, 먼저 지상 방제를 기반으로 개발된 기존의 비산 곡선 모델들이 항공 방제의 비산량 예측에 활용될 수 있는지 검토하였고, 이를 바탕으로 기존의 비산 곡선 모델들을 보완하여 드론 방제에 적합한 비산 곡선 모델을 개발하고자 하였다. 본 연구에서 제시하는 비산 곡선 모델은 국제 표준화 기구(ISO 22866) 및 미국농공학회(ASABE S561.1)의 규정을 준수하여 개발된 것이며, 이를 통해 현장에서의 실험적 연구를 대체할 수 있는 실용적 해결책을 제시하는 것을 목표로 하였다.

재료 및 방법

비산 실험 설계 및 방법

본 연구의 대상 작물은 국내에서 드론 방제가 가장 많이 수행되고 있는 밭작물인 콩, 감자, 마늘, 양파이다. 비산 실험은 전남대학교 나주 실습장에 위치한 비산 모의 시험 농경지에서 수행하였으며[17], Fig. 1과 같이 대상 구역을 20 m × 20 m로 한정하였다. 대상 구역에는 감자, 콩, 마늘 및 양파를 농작업 시기에 맞춰 순차적으로 식재하였다. 마늘과 양파는 동일하게 가을에 정식하고 봄에 수확하기 때문에, 대상 구역을 20 m × 10 m 크기의 두 구역으로 나누어 각각 마늘과 양파를 식재하였다. 감자는 9회, 콩은 24회, 마늘은 10회, 양파는 4회의 방제를 통해 총 47회의 현장 데이터를 확보하였다.

비산 모의 시험 농경지에는 1.8 m 고도와 10 m 고도에 기상대(Onset computer corporation, Bourne, USA)를 설치하였다. 공기 중 비산량과 지면 퇴적량을 측정하기 위해 대상 구역의 경계로부터 풍하 방향으로 1~27 m 거리에 지수적 간격으로 측정 장치를 배치하였다[18].

공기 중으로 비산된 살포액 총량은 두께 2.49 mm의 스트링(String)을 0~3 m 범위에서 10개의 서로 다른 높이(0.15 m, 0.45 m, 0.75 m, 1.05 m, 1.35 m, 1.65 m, 1.95 m, 2.25 m, 2.55 m, 2.85 m)에 5 m 길이로 배치하여 측정하였다. 대상 구역 경계로부터

https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.32
Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 336-347

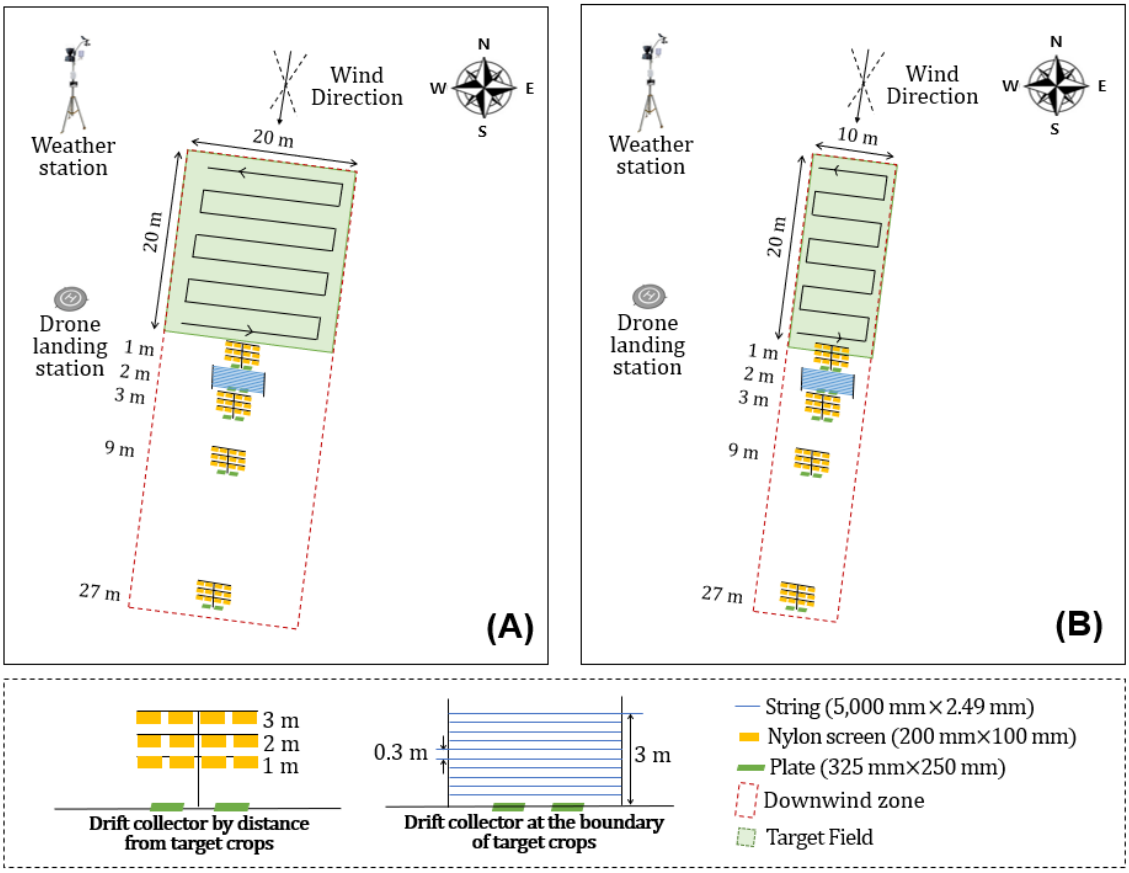


Fig. 1. Layouts of the test bench for the pesticide drift experiments: (A) Potato and bean, (B) Garlic and onion. The green area indicates the region where crops are planted and drone spraying occurs, while the downwind area shows the locations for drift measurement using strings, nylon screens, and plates.

스트링 설치 거리는 드론 하향풍에 의한 흔들림과 포집된 농약의 유실이 가장 적은 2 m로 결정하였다[17]. 또한, 200 mm × 100 mm 크기의 나일론 스크린이 거치된 삼각대를 대상 구역으로부터 풍하 방향으로 1 m, 3 m, 9 m, 27 m 거리에 설치하여 거리별 공기 중 비산량을 측정하였다. 공기 중 비산량 측정 시에 각 측정 장비 아래에 플레이트를 2개씩 배치하여 지면 퇴적량도 함께 측정하였다. 스트링, 나일론 스크린, 플레이트는 ISO 22866 표준[19]에 따라 농약 비산 실험에 적합한 장비로 검증된 바 있다[20-22].

현장 실험 중 농약에 의한 약해 피해와 주변 지역에 대한 농약 비산 피해를 방지하기 위하여 살포액은 농약 대신 추적 물질인 자일리톨(Xylitol, NOW Foods)을 사용하였다. 드론 방제 후, 공기 중 비산된 살포액을 포집한 스트링과 나일론 스크린은 100 mL 유리병에 수거하였으며, 지면에 퇴적된 살포액을 포집한 플레이트는 뚜껑을 닫아 안전하게 실험실로 이동하였다.

포집 장치에 침전된 살포액 정량화

비산 측정 시 포집 장치에 포집된 살포액을 정량화하는 것은 필수적이다. 본 연구에서는 비산 포집 장치에 포집된 살포액을 [22]이 제안한 방법에 따라 총유기탄소(Total Organic Carbon; TOC) 측정법으로 분석하였다. TOC 측정법은 살포액의 총질량을 TOC 질량으로 정량화하는 비용 효율적인 분석 기법이며, 식(1)에 따라 산출하였다.

$$D = \frac{(C_{sample} - C_{blank}) \times V_{sample}}{C_{tank} \times A_d} \quad (1)$$

여기서, D는 비산 포집 장치에 침전된 살포액의 양(mL/m^2) 또는 작물에 침전된 살포액의 양(mL/cm^2), C_{sample}는 비산 포집 장치에서 용해된 살포액의 TOC 농도(mg/L), C_{blank}는 빈 비산 포집 장치 초기 상태의 TOC 농도(mg/L1), C_{tank}는 드론 탱크 안에

https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.32
Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 336-347

있는 용액의 TOC 농도(mg/L), C_{sample}은 침전된 살포액과 3차 증류수의 양을 포함한 시험액의 부피(L), A_d는 바람 방향에 수직인 평면에서의 비산 포집 장치의 투영 면적(m^2)이다.

농약 비산 매개변수 측정 방법

드론에 의한 살포액의 비산은 다양한 변수가 복합적으로 작용하여 발생하는 현상이다. 본 연구에서 측정한 농약 비산을 유발하는 변수들을 Table 1에 제시하였으며, 각 항목의 구체적인 설명은 하위 항목에서 논의되었다.

기상 조건

비산은 자연적인 측면 바람의 영향을 크게 받기 때문에 드론 방제 실험에서 기상 조건 모니터링이 필수적이다. 본 실험에서는 지면으로부터 1.8 m 고도에서 풍속(m/s), 풍향(°), 기온(℃), 습도(%)를 측정하였다. 또한, 10 m 고도에서 상층 기온(℃)을 측정하여 대기안정도를 고려하였으며, 아래의 Bulk Richardson Number (Rb) 식(2)를 이용해 대기안정도를 계산하였다.

$$Rb = \frac{g}{T}\frac{(\Delta t/\Delta z)}{u^2}z^2 \quad (2)$$

여기서, Rb는 Bulk Richardson Number, g는 중력가속도(9.8 m/s), T는 두 고도에서 측정된 평균 기온의 절대온도(K), Δt는 두 고도 간의 기온 차이(℃), Δz는 고도 차이(m), u는 지상에서의 풍속(m/s)을 의미한다. 산정된 대기안정도는 Pasquill의 분류법을 적용하여 구분하였다[23]. 대기안정도는 A에서 F까지 6단계로 나뉘며, A는 가장 불안정한 상태를, F는 가장 안정적인 상태를 나타낸다.

작물 생육상태

콩, 감자, 마늘, 양파 작물의 생육 상태를 관찰하고자 하였으며, 대상 구역에서 임의로 선정된 3개의 작물에 대해 작물 높이(cm), 캐노피 면적(cm^2), 군락당 잎의 개수(개), 군락의 총 엽면적(cm^2)을 측정하였다. 엽면적은 LI-3000 (LI-COR, NE, US) 기기를 이용한 비파괴 방식으로 측정하였고, LAI를 산출하였다. 작물은 공기 흐름을 방해하며 살포된 액적의 비산 경로를 변화시킨다.

Table 1. Independent drift variables for fitting the drift curve model

Variables	Units	Model application Range
Wind Speed at 1.8 m [WS1.8]	m/s	0-5.6
Deviation Angle of Wind direction [DAWD]	°	0-30
Air Temperature [AT]	℃	8.5-26.5
Relative Humidity [RH]	%	45.3-94.1
Atmospheric Stability class [ASC]		1(Extremely unstable), 2(Moderately unstable), 3(Slightly unstable), 5(Slightly stable), 6(Moderately stable)
Crop Type [CT]		1(Bean), 2(Potatoes), 3(Garlic), 4(Onion)
Crop Height [CH]	cm	13-45
LAI (Leaf Area Index) [LAI]	cm^2/cm^2	0-4.4
Downwind Crop Height [DCH]	cm	0-60
Drone Spec [DS]		1(E616P), 2(SG-10P)
Nozzle Type [NT]		1(XR11002), 2(AI11002)
Spray Volume [SV]	L/ha	30-265
Spray Height [SH]	m	1.5-3.0
Flight Velocity [FV]	m/s	1.0-1.5
Spray Pressure [SP]	KPa	230-320
Dilution [D]		50-222
Pesticide Concentration [PC]	g/L	1.6-30.9

https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.32
Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 336-347

따라서 비산 측정 장비가 설치된 위치에서도 작물의 종류와 높이를 측정하였고, 이를 비산 곡선 모델의 입력 변수로 포함하였다.

드론 운용조건

본 연구에서 사용된 드론은 농업용 드론 E616P 헥사콥터(EFT Electronic Technology Co. Ltd, China)와 SG-10P 옥토콥터(Hankook Samgong Co., Ltd, South Korea)이다. E616P 헥사콥터와 SG-10P 옥토콥터의 로터의 개수는 각각 6개, 8개이다. 드론은 『무인항공살포기 안전사용 매뉴얼』 규정에 따라 운용되어 비행고도는 2~3 m, 비행속도는 1~2 m/s로 나타났다.

두 드론 모두 노즐을 4개씩 장착 가능하며, Teejet 사의 XR11002와 AI11002를 사용하였다(Teejet, Technologies, Springfield, IL, USA). XR11002 노즐은 항공 방제에 보편적으로 사용되는 flat-fan 타입으로 Fine 크기(145~225 μm)의 액적을 생성한다. AI11002 노즐은 공기 유도 노즐로 농약 비산을 줄이는 데 효과적이라고 알려져 있으며, Extremely Coarse 크기(503~665 μm)의 액적을 생성한다. 노즐의 압력은 280~320 Kpa로 고정하였다.

비산 곡선 모델

항공 방제의 비산량 실험 데이터를 활용하여 지상 방제 기준으로 제시된 대표적인 4개의 비산 곡선 모델들이 항공 방제에 적합한지 검토하였다. 첫 번째 비산 곡선은 [24]가 개발한 식(3)의 지수 방정식으로, 백분율로 표현된 상대적 비산량을 나타내는 가장 보편적인 모델이다.

- [24] model:

$$y = ax^{-b} \tag{3}$$

여기서, y는 백분율로 표현된 전체 비산량(%), x는 살포기로부터 거리(m), a와 b는 각각 최댓값, 지수를 나타내는 매개변수이다. 이 비산 곡선은 밭작물, 포도밭, 과수원, 홉을 대상으로 한 실험 데이터가 활용되었으며, 15 m 이내의 거리에서 a=21, b=-1.58이다. x=0 m에 대해 정의되지 않았으며, 0.4 m 이내의 거리에서 예측이 부정확하다.

[25]는 식(3)을 개선하여 포도밭에서 0.2 m ≤ x ≤ 15 m의 거리에 대해 적용 가능한 지수 방정식을 개발하였다. 기존의 식은 두 개의 매개변수로 구성된 단순한 형태였지만, [25]의 식(4)에서는 세 개의 매개변수를 도입하여 결정계수(R^2)가 0.97~0.99로 높아졌고 예측 정확도를 크게 개선하였다.

- [25] model:

$$y = a\left(1 - \frac{x^b}{x^b + c^b}\right) \tag{4}$$

여기서, y는 백분율로 표현된 전체 비산량(%), x는 살포기로부터 거리(m), a와 b는 각각 최댓값, 지수, 상수를 나타내는 매개변수이다.

로그 방정식으로 제시된 비산 곡선 모델은 [26]이 개발한 식(5)와 식(6)으로서, 이 방정식들은 거리와 비산량 간의 관계를 로그 함수로 설명하며, 비산에 영향을 미치는 주요 변수를 입력하여 비산 형태를 예측하는 데 사용된다.

- [26] model :

$$\log y = c_1 + c_2 \log x^* + c_3 V_{0.5} + c_4 H_n + c_5 T + c_6 V_{id} + c_7 P_n \tag{5}$$

$$\log y = c_1 + c_2 \log x^* + c_3 T + c_4 P_n + c_5 F_n \tag{6}$$

여기서, y는 전체 비산량(mL/m^2)이고, x^*는 목표 거리를 풍향 편차각의 코사인(cos)으로 나눈 수정된 목표 거리(m), c_i는 상수, $V_{0.5}$는 0.5 m 높이에서 풍속(m/s), P_n는 노즐의 높이(m), T는 기온(°C), V_{id}는 초기 하향 액적 속도(m/s), P_n는 노즐 압력(Kpa), F_n는 노즐 유량(mL/s)을 나타낸다. 본 실험에서는 풍속을 1.8 m 높이에서 측정하여 $V_{0.5}$에 1.8 m 높이의 풍속을 대입하였으며, 초기 하향 액적 속도(V_{id})는 노즐과 노즐의 기울기 각도를 사용하여 계산할 수 있지만[27], 드론에 적용되는 각도를 정확히 측정하기 어려워 이번 계산에서는 제외되었다. 노즐 유량은 측정된 살포 유량을 단위 변환 후 대입하였다. 식(5)는 잔디가 있는 2 m ≤ x ≤ 27.5 m 거리에 적합하며, R^2은 0.83이다. 식(6)은 x ≤ 312 m 거리에 적합하며, 작물과 방해물이 없는 구역에서 R^2이 0.87로

https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.32
Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 336-347

나타났다.

최종적으로 드론 방제 상황에 적합하도록 비산 곡선 모델의 입력변수, 변수들의 조건과 방정식의 형태를 조정하여 새로운 비산 곡선 모델을 개발하였다. [26]의 모델을 응용하여 "log(*Drift*) = *A*+*B*[log*x*]" 방정식에 매개변수를 추정하였고, 신뢰도는 결정계수(R^2), 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error; RMSE), 유의 확률(p-value)로 평가하였다.

비산 곡선 모델에 사용된 입력 독립 변수는 총 17개로 결정하였으며(Table 1), 대기안정도[ASC], 작물 종류[CT], 드론 종류[DS], 노즐 종류[NT]와 같은 문자형 변수는 숫자형으로 변환하였다. ASABE S561.1 기준에 따라 바람이 대상 구역에서 비산 구역으로 30° 이내의 각도로 불어왔을 때의 실험 데이터만을 활용하였고, 이를 풍향 편차각[DAWD]이라고 표현하였다. 이 변수는 식(5)와 식(6)의 수정된 거리(x^*) 계산에 사용되었다. 나주 비산 모의 시험 농경지에서는 'A'등급(매우 불안정한)과 'F'등급(매우 안정)의 대기안정도가 주로 나타났으며, 중립 상태인 'D'등급은 측정되지 않아 모델 인자 추정에서 제외되었다. 측정된 독립변수들에 대하여 MATLAB (R2024a, Mathworks Inc., USA)을 사용하여 시행착오를 통해 최적의 모델 인자를 찾고자 하였다. 비산 곡선 모델의 거리 및 높이에 따른 비산량 등고선은 Surfer 27 (Golden-Software Inc., Golden, CO, USA)을 사용해 작성하였고, 크리깅(Kriging) 방법을 이용해 신뢰성 있는 연속적인 2차원 등고선을 표현하였다.

결과 및 고찰

지상 방제 기반 비산 곡선 모델들의 적용성 검토

지상 방제를 기반으로 개발된 지수 방정식을 드론 방제의 비산 실험 데이터에 활용한 결과는 Table 2 및 Table 3과 같다. 공기 중 비산량은 1 m, 2 m, 3 m 높이를 평균하여 사용하였으며, 그 결과, 식(3)에서 R^2은 0.06, 식(4)에서 공기 중 비산량(%)과 지면 퇴적량(%)의 R^2은 각각 0.01, 0.16으로, 두 모델 모두 적합하지 않았다. 이는 지상 방제와 드론 방제의 살포 방식 차이로 인해 비산량의 감소 패턴이 다르게 나타나기 때문이다. 지상 방제는 노즐 수가 많고 살포 위치가 지면과 가까워 살포 초기 단계에서 큰 입자가 바로 지면에 떨어지며, Fig. 2와 같이 일정 거리 내에서 비산량이 급격하게 감소하는 경향이 나타난다. 반면, 드론 방제는 작물 위 약 2~3 m 고도에서 살포되며, 작물 높이에 따라 실제 살포고도는 더 높아진다. 따라서 드론 방제는 지상 방제보다 더 높은 고도에서 살포되며, 드론의 로터 하향풍의 영향으로 큰 입자는 작물로 바로 떨어지는 반면, 작은 입자는 바람의 영향을 받아 멀리 이동할 수 있다. 따라서 Fig. 2와 같이 드론 방제 시 비산량이 거리에 따라 완만하게 감소하는 패턴을 보였고, 적은 양이지만 먼 거리까지 비산이 발생하였다.

또한, 식(3)과 식(4)에서 사용된 거리(x)는 살포기로부터의 거리로 정의되었으나, 드론 방제 시에는 ASABE S387.1 기준에

Table 2. Results of fitting experimental data from drone spraying to the exponential equation of eq. (3) (0.4 m ≤ *x* ≤ 15 m) (*p*-value ≤ 0.001)

Regression model	Parameter		R^2	RMSE
	a	*b*		
$y = ax^{-b}$ (Airborne drift)	3.01	0.32	0.06	2.43
$y = ax^{-b}$ (Ground deposition)	2.21	0.36	0.06	1.74

Table 3. Results of fitting experimental data from drone spraying to the exponential equation of eq. (4) (0.2 m ≤ *x* ≤ 15 m) (*p*-value ≤ 0.001)

Regression model	Parameter			R^2	RMSE
	a	*b*	*c*		
$y = a(1-\frac{x^b}{x^b+c^b})$ (Airborne drift)	0.38	9.86	11.94	0.01	0.30
$y = a(1-\frac{x^b}{x^b+c^b})$ (Ground deposition)	6.09	1.18	0.21	0.16	0.69

https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.32
Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 336-347

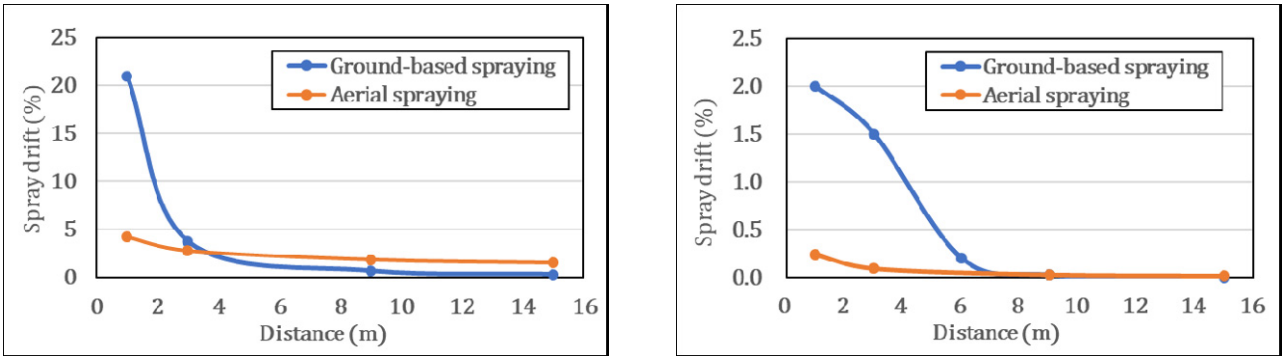


Fig. 2. Results of spray drift(%) obtained by distance into the fitted exponential equations derived from ground application and drone application: (a) corresponds to eq. 1, (b) corresponds to eq. 2 under low-drift conditions.

따라 대상 구역의 경계면으로부터 거리를 측정한다[18]. 드론 방제는 드론의 중심에서부터 고도에 따른 유효 살포폭까지 살포 범위가 확장되므로[28], 대상 구역의 경계로부터 일정 간격 안으로 들어가서 살포가 수행된다. 실험은 『무인항공살포기 안전사용 매뉴얼』 규정에 따라 비산 저감 조건에서 진행되어 비산량이 낮게 나타나는 경향이 있었지만, 드론 방제에서의 거리가 지상 방제에서 정의된 거리보다 멀어 비산량 범위 차이에 영향을 미친 것으로 판단되었다. 결과적으로, 지상 방제와 드론 방제의 비산 패턴에 큰 차이가 발생하였으며, 지수 방정식 기반의 비산 곡선 모델들은 드론 방제에서의 비산 특성을 충분히 반영하지 못하고, 신뢰할 수준에 미치지 못하여 적절하지 않은 것으로 평가되었다.

식(5)의 로그 방정식은 지수 방정식보다 공기 중 비산량(mL/m^2)의 R^2이 0.37로 더 높았다(Table 4). 대기안정도에 따라 신뢰도의 차이가 나타났으며, 공기 중 비산량의 경우 대기가 불안정한 조건(A)에서 R^2이 0.75까지 증가하였다. 또한, 지면 퇴적량의 경우 대기가 불안정 조건(A)에서 R^2이 0.11에서 0.81로 높아졌으며, 약간 안정한 조건(E)에서 R^2이 0.76까지 증가하였다. 대기안정도로 조건을 분류했을 때 모든 대기안정도에서 신뢰도가 일관되게 상승하지는 않았지만, 대기 조건이 드론 방제의 비산에 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다.

드론이 2~3 m 고도로 주행했을 때 대기안정도에 따른 비산의 차이는 Fig. 3에서도 확인할 수 있다. 지면으로부터의 높이 1 m, 2 m, 3 m에서는 공기 중으로의 비산, 0 m에서는 지면으로의 퇴적을 의미한다. 불안정한 대기 조건(A와 B)에서는 공기의 수직 방향으로 활발하게 이동하므로, 입자가 멀리 퍼지기보다는 가까운 거리로 상하로 확산하는 경향이 컸다. 이로 인해 가까운 거리에서 비산이 상대적으로 낮은 농도로 나타났다. 반면, 약한 불안정한 조건(C)에서는 수직 난류가 덜하고, 비산된 입자가 바람의 영향을 받아 더 멀리 이동하였다. 대기가 안정해질수록(E, F) 입자가 바람을 타고 이동하더라도 수직 확산이 제한되고,

Table 4. Results of fitting experimental data from drone spraying to the logarithmic equation of eq. (5) (2 m ≤ *x* ≤ 27.5 m, grass area) (*p*-value ≤ 0.001)

Regression model	Parameter						R^2	RMSE	Conditions
	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6			
$\log y = c_1 + c_2 \log x^* + c_3 V_{1.8} + c_4 H_n + c_5 T + c_6 P_n$ (Airborne drift)	-3.48	-0.13	0.54	0.34	0.04	0.00	0.37	0.23	
	-1.08	-0.30	0.57	0.18	0.03	0.00	0.75	0.11	ASC=A
	0.04	-0.57	-0.11	-0.19	0.00	0.00	0.29	0.10	ASC=B
	-16.43	0.02	-0.96	2.79	-0.12	0.05	0.44	0.21	ASC=C
	-0.06	-0.12	0.07	0.01	-0.02	0.00	0.04	0.45	ASC=E
$\log y = c_1 + c_2 \log x^* + c_3 V_{1.8} + c_4 H_n + c_5 T + c_6 P_n$ (Ground deposition)	-2.88	-0.45	-0.08	0.64	-0.03	0.01	0.11	0.31	
	5.76	-4.23	33.71	2.55	-1.35	0.04	0.81	0.12	ASC=A
	-0.05	-0.42	-0.09	-0.02	0.00	0.00	0.43	0.12	ASC=B
	3.07	-0.62	1.32	-3.94	-0.05	0.01	0.35	0.12	ASC=C
	5.15	-0.20	-24.94	2.55	-0.08	0.02	0.76	0.09	ASC=E

https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.32
Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 336-347

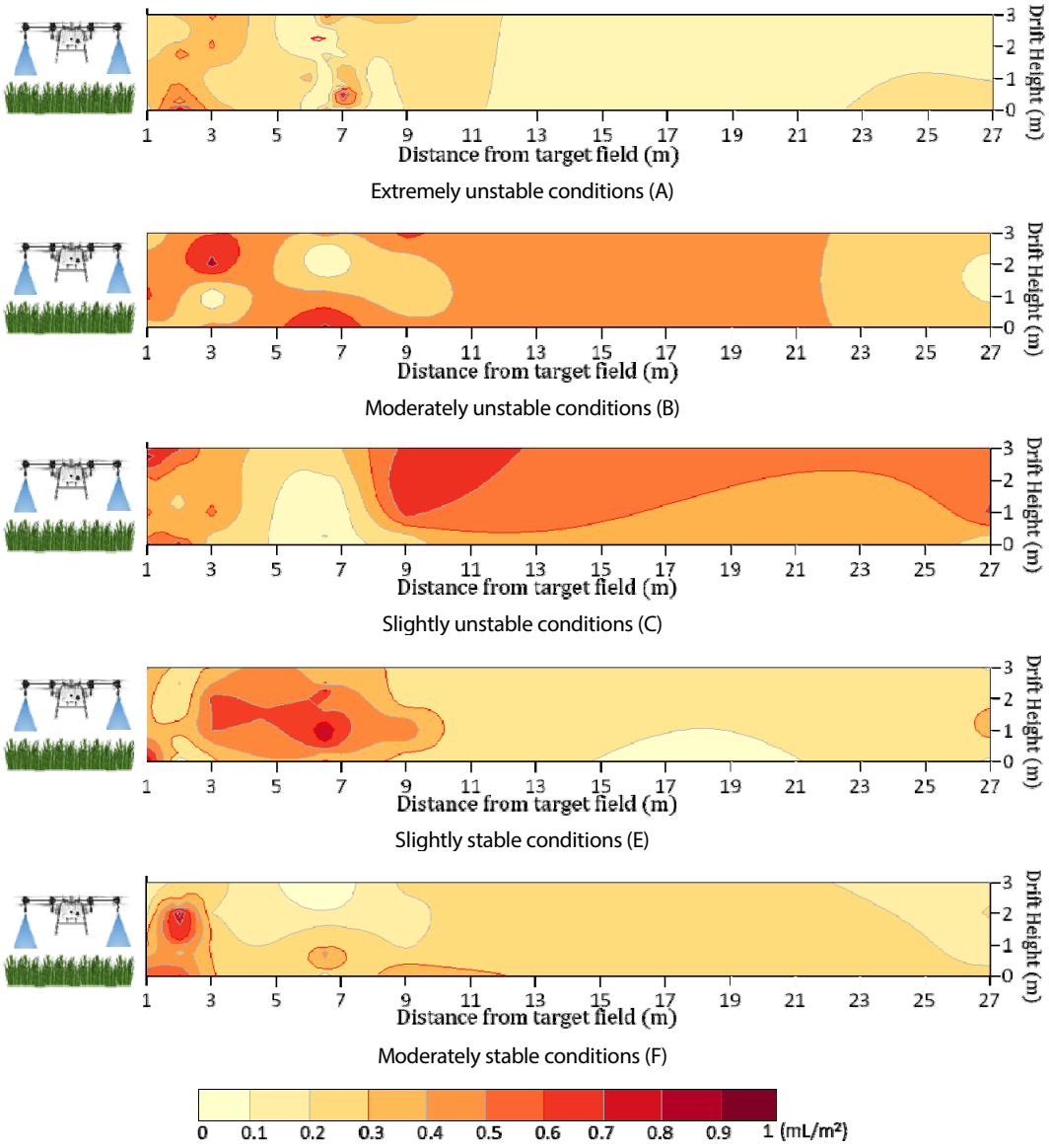


Fig. 3. Average spray drift (mL/m^2) distributions according to atmospheric stability when the drone flew at an altitude of 2~3 m.

가까운 거리에 퇴적되는 경향이 강해졌다. 따라서 대기안정도는 높은 고도에서 살포하는 드론 방제에 크게 영향을 미쳤다. 또한, 각 대기 상태에서 풍속($V_{1.8}$)의 영향이 클수록 비산량이 증가하여 신뢰도가 높아지는 경향이 나타났다. 식(5)의 로그 방정식에서 드론 방제에 의해 발생하는 액적의 이동에 하향풍이 노즐 압력보다 더 큰 영향을 미쳤다.

식(6)의 로그 방정식은 식(5)에서 노즐의 높이 매개변수가 제외되고, 살포 유량 매개변수가 추가되었다. 식(6)도 식(5)와 동일하게 1 m, 2 m, 3 m 높이에서 측정된 평균 공기 중 비산량 데이터를 사용하였으나, R^2이 0.09로 매우 낮아 신뢰할 수준에 미치지 못하였다(Table 5). 식(6) 또한 식(5)와 유사하게 대기안정도에 따라 신뢰도가 상승하는 경향을 보였으나, 대기가 약간 불안정한 조건(E)에서는 오히려 R^2이 더 낮아지는 현상이 관찰되었다. 또한, 노즐 압력은 식(5)에서와 마찬가지로 비산에 거의 영향을 미치지 않았으며, 살포 유량이 노즐 압력보다는 비산에 더 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 이를 통해 지상 방제와 드론 방제에서의 영향을 미치는 매개변수가 다를 수 있으며, 드론 방제에 적합한 매개변수를 사용하여 보다 정확한 비산 예측 모델을 개발할 수 있을 것이라고 판단하였다.

드론 방제에 의한 비산 곡선 모델

[26]의 로그 방정식에 드론 방제에 영향을 미치는 변수 17개 중 가장 유의한 매개변수를 선택하여 개발한 비산 곡선 모델은

https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.32
Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 336-347

Table 5. Results of fitting experimental data from drone spraying to the logarithmic equation of eq. (6) ($x \leq 312$ m, no obstruction field) (p-value ≤ 0.001)

Regression model	Parameter					R^2	RMSE	Conditions
	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5			
$\log y = c_1 + c_2 \log x^* + c_3 T + c_4 P_n + c_5 F_n$ (Airborne drift)	-2.10	-0.10	0.05	0.00	0.33	0.09	0.31	
	-6.97	-0.22	0.15	0.01	1.01	0.59	0.16	ASC=1
	-0.05	-0.81	0.00	0.00	-0.02	0.35	0.29	ASC=2
	-10.87	-0.15	0.63	-0.06	7.02	0.43	0.26	ASC=3
	1.00	0.11	-0.15	0.02	-2.50	0.05	0.40	ASC=5
$\log y = c_1 + c_2 \log x^* + c_3 T + c_4 P_n + c_5 F_n$ (Ground deposition)	1.23	-0.58	0.06	-0.02	-0.33	0.26	0.48	
	-22.79	-2.11	0.68	0.06	0.52	0.77	0.46	ASC=1
	-0.21	-0.18	-0.02	0.00	-0.11	0.26	0.12	ASC=2
	0.27	-0.39	0.08	-0.02	0.97	0.37	0.14	ASC=3
	208.34	-5.94	-3.47	-1.71	197.20	0.70	0.22	ASC=5

식(7)과 같고, 매개변수는 Table 6과 같다.

$$\log y = c_1 + c_2 \log x + c_3 WS_{1.8} + c_4 ASC + c_5 CH + c_6 SH \quad (7)$$

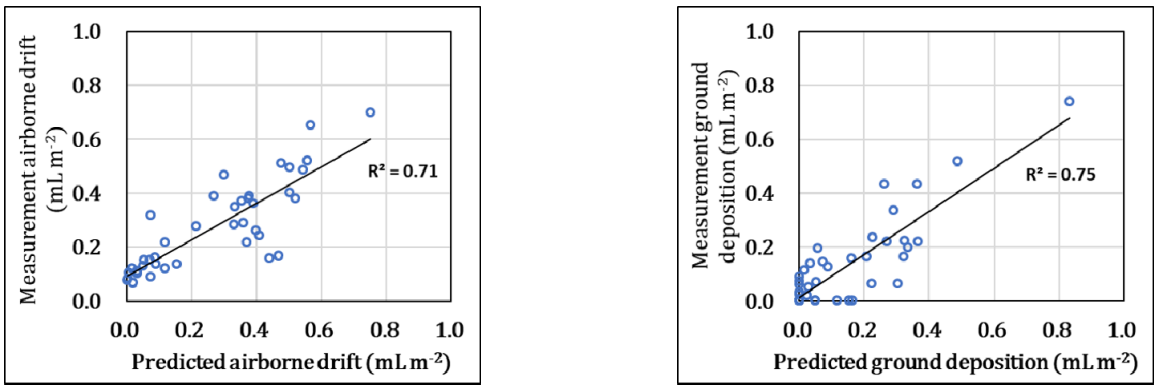
여기서, y는 공기 중 비산량 또는 지면 퇴적량(mL/m^2), x는 대상 구역 경계로부터 거리(m), $WS_{1.8}$는 1.8 m 높이에서 목표 위치로 부는 바람의 풍속(m/s), ASC는 대기안정도(A, B, C, E, F), CH는 밭작물의 높이(m), SH는 드론 살포 높이(m), c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6은 상수이다. 본 방정식은 대상 작물 경계로부터 거리(x)가 1 m부터 27 m 이내에 적합하며, 비산을 예측하고자 하는 위치에서 바람이 30° 이내로 불 경우에 적용할 수 있다. 바람의 풍향이 30°로 제한되어 [26]이 제안한 수정된 거리(x^*)와 같이 풍향 편차각을 고려하지 않았고, 비산을 예측하고자 하는 목표 거리(x)를 사용하였다. 기존 방정식들이 지면 퇴적량 예측에 초점을 맞춘 예측 방정식이었지만, 본 연구에서 제안한 드론 방제의 비산 곡선 모델은 공기 중 비산량과 지면 퇴적량을 모두 고려할 수 있게 설계되었다. 공기 중 평균 비산량에 대한 R^2은 0.71, RMSE는 0.12로 나타났으며, 지면 평균 퇴적량에 대한 R^2은 0.74, RMSE는 0.10이었다(Fig. 4). 본 방정식 개발에 사용된 데이터의 개수가 많고, 『무인항공살포기 안전사용 매뉴얼』에 따른 비산 저감 조건에서 실험이 수행되면서 비산량의 농도가 낮아 R^2 값이 기존의 지상 방제용 비산 곡선 모델들보다는 낮게 나타났다. 하지만, p-value는 0.001 이하로 통계적으로 유의하였다.

Table 6에 나타난 바와 같이 드론 방제에 의한 비산은 기상 조건(풍속, 대기안정도, 습도), 작물 생육상태(작물 높이)가 중요한 변수로 작용했다. 공기 중 비산량은 대상 경계로부터 거리가 멀어지고, 대기가 안정해지고, 작물의 높이와 살포고도가 높아짐에 따라 감소하였고, 풍속이 증가할 때는 증가하는 경향을 보였다. 또한, 지면 퇴적량은 대기가 안정하며, 대상 경계로부터 거리와 작물의 높이가 높아질수록 감소하였고, 풍속이 증가하고 살포고도가 높아질수록 증가하였다. 풍속은 지상 방제와 동일하게 드론 방제에서도 중요한 매개변수로 작용하였으며, 기온보다는 대기안정도를 적용했을 때 드론 방제에 의한 비산을 더 정확하게 나타내었다. 또한, 대상 작물의 높이와 살포고도가 큰 영향을 미쳤다. 작물의 키가 크고, 살포고도가 높을수록 액적이 더 높은 위치에서 분사되기 때문에 작은 액적이 더 멀리 비산되는 것으로 판단되었다. 비산 곡선 모델은 드론 살포고도 뿐만 아니라 기상 환경과 작물 생육 상태도 주 매개변수로 적용되었다.

Table 6. Spray drift equation parameters for drone spraying in field crops (1 m ≤ x ≤ 27 m) (p-value ≤ 0.001)

Conditions	Parameter						R^2	RMSE
	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6		
Airborne drift	-0.84	-0.24	0.47	-0.33	-3.15	-0.45	0.71	0.13
Ground deposition	-8.95	-1.06	7.87	-8.92	-4.70	4.60	0.75	0.09

https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.32
Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 336-347



(a) (b)

Fig. 4. Correlation between measured and predicted spray drift: (a) airborne drift, (b) ground deposition.

결 론

본 연구에서는 밭작물(콩, 감자, 마늘, 양파)을 대상으로 드론 항공 방제에 의한 농약의 비산량을 예측하기 위한 모델을 개발하였다. 드론 방제에 의한 비산량은 지상 방제에 비해 거리에 따라 완만하게 감소하였고, 이에 따라 매개변수와 무관하게 거리 증가에 따라 비산량이 일관되게 감소하는 지수 형태의 모델들에는 적합하지 않았다. 반면, 매개변수를 정확하게 선택한 경우 로그 형태의 모델에는 더 적합한 결과를 보였다. 지상 방제에서는 기온, 풍속, 노즐 압력, 노즐 유량의 매개변수가 사용되었지만, 드론 방제에서는 2~3 m 고도에서 1.5 m/s 이내의 속도로 주행할 경우, 풍속, 대기안정도, 작물의 높이, 살포고도가 중요한 매개변수로 작용하였다. 본 연구에서 제안한 드론 방제용 비산 곡선 모델은 공기 중 비산량과 지면 퇴적량에 모두 적용 가능하며, 거리에 따른 정량적 비산량을 도출할 수 있도록 설계되었다. 본 모델을 통해 비용과 시간이 많이 소요되는 현장 실험을 대체하여 비산량에 대한 예측값을 제안할 수 있으며, 비산을 저감할 수 있는 방제 및 기상 조건을 제안할 수 있을 것이라 기대된다. 단, 이 모델은 연구 조건 내에서 한정적으로 유의미한 결과를 제공하므로, 드론의 다양한 비행 고도와 속도, 농약 종류를 포함한 확장된 모델이 필요할 것으로 사료된다.

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

Author Contributions: S.-W.H. and S.-Y.L. conceived and designed the study; S.-W.H., J.-S.P., C.-R.L., J.-Y.P. and C.G.L. measured and collected the data; S.-Y.L. and J.P. contributed data or analysis tools; S.-Y.L. performed the analysis; S.-Y.L., S.-W.H. and S.-H.Y. revised the manuscript. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: This research was supported Research Program for Agricultural Science and Technology Development, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, South Korea (grant no.: PJ01706501).

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.32
Correspondence and requests for materials should be addressed to Se-Woon Hong.
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. Degrendele C, Okonski K, Melymuk L, Landlová L, Kukučka P, Audy O, Klánová J, Čupr P, Klánová J (2016) Pesticides in the atmosphere: A comparison of gas-particle partitioning and particle size distribution of legacy and current-use pesticides. Atmospheric Chemistry and Physics, 16(3), 1531-1544. https://doi.org/10.5194/acp-16-1531-2016.
2. Gil Y, Sinfortand C (2005) Emission of pesticides to the air during sprayer application: A bibliographic review. Atmospheric Environment, 39(28), 5183-5193. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.05.019.
3. Van Den Berg F, Kubiak R, Benjey WG, Majewski MS, Yates SR, Reeves GL, Smelt JH, Van der Linden AMA (1999) Emission of pesticides into the air. In Fate of Pesticides in the Atmosphere: Implications for Environmental Risk Assessment: Proceedings of a workshop, pp. 195-218, The Health Council of the Netherlands, Driebergen, The Netherlands.
4. Li H, Zhu H, Jiang Z, Lan Y (2022) Performance characterization on downwash flow and spray drift of multirotor unmanned agricultural aircraft system based on CFD. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 15(3), 1-8. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20221503.7315.
5. Salyani M, Cromwell RP (1992) Spray drift from ground and aerial applications. Transactions of the ASAE, 35(4), 1113-1120. https://doi.org/10.13031/2013.28708.
6. Hong SW, Park J, Jeong H, Lee S, Choi L, Zhao L, Zhu H (2021) Fluid dynamic approaches for prediction of spray drift from ground pesticide applications: A review. Agronomy, 11(6), 1182. https://doi.org/10.3390/agronomy11061182.
7. Smith DB, Harris FD, Goering CE (1982) Variables affecting drift from ground boom sprayers. Transactions of the ASAE, 25(6), 1499-1503. https://doi.org/10.13031/2013.33753.
8. Chen P, Ouyang F, Wang G, Qi H, Xu W, Yang W, Zhang Y, Lan Y (2021) Droplet distributions in cotton harvest aid applications vary with the interactions among the unmanned aerial vehicle spraying parameters. Industrial Crops and Products, 163, 13324. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113324.
9. Li Z, Jennings A (2017) Worldwide regulations of standard values of pesticides for human health risk control: a review. International Journal of Environmental Research and Public Health, 14(7), 826. https://doi.org/10.3390/ijerph14070826.
10. Carreño Ruiz M, Bloise N, Guglieri G, Ambrosio DD (2022). Numerical analysis and wind tunnel validation of droplet distribution in the wake of an unmanned aerial spraying system in forward flight. Drones, 6(11), 329. https://doi.org/10.3390/drones6110329.
11. Park J, Lee SY, Choi LY, Hong SW (2023) Analysis of effect on pesticide drift reduction of prevention plants using spray drift tunnel. Journal of Bio-Environment Control, 32(2), 106-114. https://doi.org/10.12791/KSBEC.2023.32.2.106.
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. Zhang H, Qi L, Wan J, Musiu EM, Zhou J, Lu Z, Wang P (2022) Numerical simulation of downwash airflow distribution inside tree canopies of an apple orchard from a multirotor unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer. Computers and Electronics in Agriculture, 195, 106817. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106817.
14. Yuan S, Arellano AF, Knickrehm L, Chang HI, Castro CL, Furlong M (2024) Towards quantifying atmospheric dispersion of pesticide spray drift in Yuma County Arizona. Atmospheric Environment, 319, 120262. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120262.
15. Hewitt AJ, Johnson DR, Fish JD, Hermansky CG, Valcore DL (2002) Development of the spray drift task force database for aerial applications. Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal, 21(30), 648-658. https://doi.org/10.1002/etc.5620210326.
16. Teske ME, Bird SL, Esterly DM, Curbishley TB, Ray SL, Perry SG (2002) AgDrift®: A model for estimating near-field spray drift from aerial applications. Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal, 21(3), 659-671. https://doi.org/10.1002/etc.5620210327.
17. Park J, Lee SY, Choi LY, Daniel KF, Hong SW (2023) Establishing and operating a test bench for assessment of pesticide drift by aerial application. Journal of Bio-Environment Control, 32(4), 423-433. https://doi.org/10.12791/KSBEC.2023.32.4.423.
18. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) (2004) ASABE S561.1, Procedure for measuring drift deposits from ground, orchard, and aerial sprayers. pp. 3-5. St. Joseph, MI, USA.
19. International Organization for Standard (ISO) (2005) ISO TC 23/SC 06 N 22866. Equipment for crop protection—Methods for the field measurement of spray drift. ISO, Geneva, Switzerland. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.12.002.
20. Lee SY, Park J, Lee CR, Choi LY, Daniel KF, Park JY, Hong SW (2024) Identification of major pesticide drift factors in aerial spraying through field experiments. Journal of Bio-Environment Control, 33(4), 361-372. https://doi.org/10.12791/KSBEC.2024.33.4.361.
21. Lee SY, Park J, Choi LY, Daniel KF, Hong SW, Noh HH, Yu SH (2023) Quantifying airborne spray drift using string collectors. Agronomy, 13(11), 2738. https://doi.org/10.3390/agronomy13112738.
22. Park J, Lee SY, Choi LY, Hong SW, Noh H, Yu SH (2022) Airborne-spray-drift collection efficiency of nylon screens: Measurement and CFD analysis. Agronomy, 12(11), 2865. https://doi.org/10.3390/agronomy12112865.
23. Irwin JS, Binkowski FS (1981) Estimation of the Monin-Obukhov scaling length using on-site instrumentation. Atmospheric Environ-

ment (1967), 15(6), 1091-1094. https://doi.org/10.1016/0004-6981(81)90111-6.1.
24. Ganzelmeier H, Rautmann D (2000) Drift, drift reducing sprayers and sprayer testing. Aspects of Applied Biology, 57, 1-10.
25. Otto S, Loddo SD, Baldoin C, Zanin G (2015) Spray drift reduction techniques for vineyards in fragmented landscapes. Journal of Environmental Management, 162, 290-298. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.07.060.
26. Smith DB, Bode LE, Gerard PD (2000) Predicting ground boom spray drift. Transactions of the ASAE 43(3), 547-553. https://doi.org/10.13031/2013.2734.
27. Goering CE, Bode LE, Gebhardt MR (1972) Mathematical model of spray droplet deceleration and evaporation. Transactions of the ASAE, 15(2), 220-225. https://doi.org/10.13031/2013.37871.
28. Lee SY, Park J, Lee CR, Choi LY, Daniel KF, Park JY, Hong SW (2024) Analysis of drone downwash and droplet deposition for improved aerial spraying efficiency in agriculture. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 66(5), 51-65. https://doi.org/10.5389/KSAE.2024.66.5.051.