



풍동실험에 의한 붓식 살포 농약의 노즐형태와 분사압력에 따른 비산 특성 분석

Analyzing Drift Patterns of Spray Booms with Different Nozzle Types and Working Pressures in Wind Tunnel

박진선^a · 이세연^b · 최락영^b · 정한나^b · 노현호^c · 유승화^d · 송호성^e · 홍세운^{f, †}

Park, Jinseon · Lee, Se-Yeon · Choi, Lak-Yeong · Jeong, Hanna · Noh, Hyun Ho · Yu, Seung-Hwa · Song, Hosung · Hong, Se-woon

ABSTRACT

With rising concerns about pesticide spray drifts, this study analyzed the drift patterns of two typically-used nozzles, XR nozzle and AI nozzle, concerning their working pressures and wind speeds by wind tunnel experiments. AI nozzle showed low drift potential with larger droplet sizes compared to XR nozzle. Airborne and deposition drifts of XR nozzle were two times higher than those of AI nozzle under high wind speeds ($\geq 2 \text{ m s}^{-1}$). In all cases, higher working pressures decreased the droplet sizes, thereby increasing the airborne and deposition drifts. Higher wind speeds also resulted in more airborne drifts, while ground deposition was increased under lower wind speeds. These effects of working pressures and wind speeds on the airborne and deposition drifts were observed at leeward distances less than 4 m from the nozzles. However, the airborne and deposition drifts were barely affected by the working pressures and wind speeds at leeward distances more than 11 m. The measurements were fitted to regression models of the drift curve with acceptable R^2 values greater than 0.8, demonstrating that further studies will be useful to settle domestic issues of spray drifts.

Keywords: Spray drift; pesticide; airborne droplet; ground deposition; total organic carbon; nylon screen; wind tunnel

1. 서론

농산물의 안전성을 확보하기 위하여 2019년부터 시행되고 있는 농약허용기준강화제도 (PLS, Positive List System)로 인

해 농약에 대한 안전관리 강화 방안이 시급히 요구되고 있다 (MAFRA, 2021). 특히 농약 살포 시 바람에 의한 농약의 비산으로 인해 허용되지 않은 농약이 주변의 타 작물에 퇴적 및 잔류하여 법적 분쟁을 야기하는 사례가 빈번히 발생하고 있다 (Noh et al., 2020a). 국내 농약 사용량은 1 ha 당 평균 10.2 kg으로 (KOSTAT, 2021) 전 세계에서 높은 수준에 있으므로 (Hong and Kim, 2018), PLS 제도 하에서 농약의 비산을 관리하여 농산물의 안전성을 확보하기 위한 노력이 필요하다.

농약 비산에 의해 발생할 수 있는 많은 환경, 생태, 보건적 문제들은 오래전부터 제기되고 있었으나 (Hong et al., 2021), 국내에서 농약의 비산에 대한 공학적 연구는 근래에 본격적으로 시작되고 있는 추세이다 (Hong and Kim, 2018; Kim and Hong, 2019; Park et al., 2020; Noh et al., 2020a; Noh et al., 2020b). 농약의 공기 중 비산은 농약 액적이 바람에 이루어지는 공기역학적 거동에 기인한다. 액적에 작용하는 바람에 의한 운송력, 중력에 의한 침강력, 지표 난류에 의한 상승부력, 액적 형상에 의한 항력 등에 의해 액적이 이동하게 되며, 여기서 중력과 지표 난류에 의한 연직 운동에 의해 액적의 퇴적이 이루어지고 비산 거리가 추정될 수 있다 (Hong et al., 2018). 즉, 농약 액적의 크기와 풍속, 풍향, 대기안정도 등의 기상 조건이 농약의 비산 정도에 가장 큰 영향을 미치는 인자이다. 이 외에도 기온과 습도는 증발에 의해 액적의 크기를 감소시

^a Research Professor, AgriBio Institute of Climate Change Management, Chonnam National University

^b Master Students, Department of Rural and Bio-systems Engineering; Education and Research Unit for Climate-Smart Reclaimed-Tideland Agriculture (BK21 four), Chonnam National University

^c Researcher, Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration

^d Researcher, Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration

^e Post-doctoral Researcher, Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration

^f Assistant Professor, Department of Rural and Bio-systems Engineering; AgriBio Institute of Climate Change Management; Education and Research Unit for Climate-Smart Reclaimed-Tideland Agriculture (BK21 four), Chonnam National University

† Corresponding author

Tel.: +82-62-530-2183, Fax: +82-62-530-2159

E-mail: hsewoon@jnu.ac.kr

Received: August 30, 2021

Revised: September 07, 2021

Accepted: September 09, 2021

키며, 대상 작물의 크기, 밀도, 형상은 농약 살포 시 작물을 투과하는 비산 가능량과 관련이 있으므로 결국 농약의 비산에 영향을 준다 (Hong et al., 2021).

농약 비산 문제에 대응하기 위하여 비산 커브 (Drift curve)를 통해 비산 가능 거리를 예측하거나 (Nuyttens et al., 2010; Cunha et al., 2012; Gil et al., 2018; Hong et al., 2018) 농약의 비산 가능성을 줄이기 위하여 큰 입경의 액적을 생성시키는 특수 노즐을 활용하는 연구들 (Guler et al., 2007; Ramsdale and Messersmith, 2017; Gregorio et al., 2019)이 진행되고 있다. 다양한 살포 방법과 노즐 장비에 대하여 비산 커브 데이터 베이스를 구축하는 것은 비산의 메커니즘을 이해하고 앞으로 농약의 비산을 평가하고 대처하는데 매우 중요한 자료가 될 수 있다 (Bonds and Leggett, 2015). 미국의 US EPA는 1990년에 이미 Spray drift task force를 조직하여 농약 비산 자료를 구축하였으며, 유럽 대다수 국가들도 2000년대에는 농약 비산문제에 적극적으로 대처하여 왔다. 농약의 비산은 기상, 작물, 지형 등 국지적인 요인들의 영향을 많이 받으므로, 국내 환경에 맞는 농약 비산 연구와 실측 자료 구축이 필요하다.

농약의 비산은 주로 감수지, 필터, 스크린 등의 소형 샘플러를 대상 작물 주변에 거리별로 설치하여 측정하는데, 시간과 비용의 한계로 정밀한 측정이 어렵다 (Zhu et al., 1994; Hong and Kim, 2018). 특히 예측 불가능한 풍향과 풍속으로 인해 풍하측에 설치해야 하는 샘플러의 위치를 결정하는데 변동성이 크기 때문에 주로 풍향이 ±30° 이내로 안정된 상태에서 비산 포집 실험을 진행하도록 권장하고 있다 (ASAE, 2013a). 따라서 현장 실험 수행에 시·공간적 제한 요인이 많아 일반적 결과를 도출하기 위한 대량의 측정 데이터 확보에 어려움이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 풍속과 풍향을 임의로 제어할 수 있으며, 동일한 환경 조건으로 반복 실험을 수행할 수 있는 풍동을 이용한 연구가 진행되고 있다 (Reichard et al., 1992; Endalew et al., 2009; Nuyttens et al., 2010; Torrent et al., 2017; Noh et al., 2020a). 풍동장치를 활용한 연구는 국내·외에서 다수의 연구가 진행되고 있으나, 풍동장치의 크기가 제한되므로 비산 거리가 짧고, 농약 살포

기가 작은 봄식 (Boom type) 살포에 한 해 연구가 진행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 환경 조건을 제어하여 반복 실험이 가능한 풍동장치를 활용하여 봄식 농약 살포에 대한 비산 특성을 규명하고자 하였다. 실험 수행을 위해 먼저 국내에서 봄식 농약 살포기에 주로 이용하는 두 가지 노즐 유형을 선정하고, 분사압력을 달리하여 액적을 살포하고, 풍동장치를 활용하여 다양한 풍속에 따라 비산 현상을 모의하였다. 실험을 통해 측정된 자료를 기반으로 다양한 비산 커브에 적용하여 노즐별 비산 경향을 분석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상 노즐과 입경 분포 측정

연구에 사용된 노즐은 국내·외에서 지상 및 항공방제 살포기에 주로 사용되는 TeeJet사 (미국)의 XR (Extended range flat spray tips) 노즐과 AI (Air induction flat spray tips) 노즐이다. XR 노즐은 봄 스프레이어, 과수원용 방제기, 항공방제 드론 등 다양한 방제기에 널리 사용되고 있는 가장 일반적인 노즐이며, AI 노즐은 공기가 채워진 액적을 생성시켜 적은 양의 약액으로 크기가 큰 액적을 생성시키는 특수 노즐이다. 액적의 크기가 클수록 비산 가능성은 낮아지므로, 일반적으로 비산 저감을 목적으로 사용되고 있다. 두 노즐의 특성은 Table 1과 같다.

노즐에서 생성되는 액적의 입경 분포는 레이저 회절 (Laser diffraction), 레이저 이미징 (Laser imaging), 레이저 위상 도플러 기술 (Laser-based phase-Doppler) 과 같은 레이저 기반 기술로 측정하도록 제안된다 (ASAE, 2013b). 본 연구에서는 0.1~2,000 μm 범위의 입경을 측정할 수 있는 레이저 회절 시스템 Spraytec (Malvern, UK)으로 노즐의 입경 분포를 측정하였다 (Fig. 1(a)).

노즐은 부채꼴형 플랫폼 노즐인데 반해 입경 측정은 레이저 빔에 의한 점 측정이므로, Fig. 1(b)와 같이 노즐로부터 2개 거리에서 각각 3개 위치에서 액적의 입경을 측정하였다. 입경

Table 1 Spray nozzle characteristics used in the study (* and ** indicate the condition at the highest working pressure and the lowest working pressure, respectively)

Nozzles	XR8002	AI8002
Type	Flat	Flat
Working pressure (psi)	15~60 (1~4 bar)	30~115 (2~8 bar)
Drop size	Fine*~Medium**	Coarse*~Ultra coarse**
Flow rate (L min ⁻¹)	0.46**~0.91*	0.65**~1.29*
Spray angle (°)	80	80

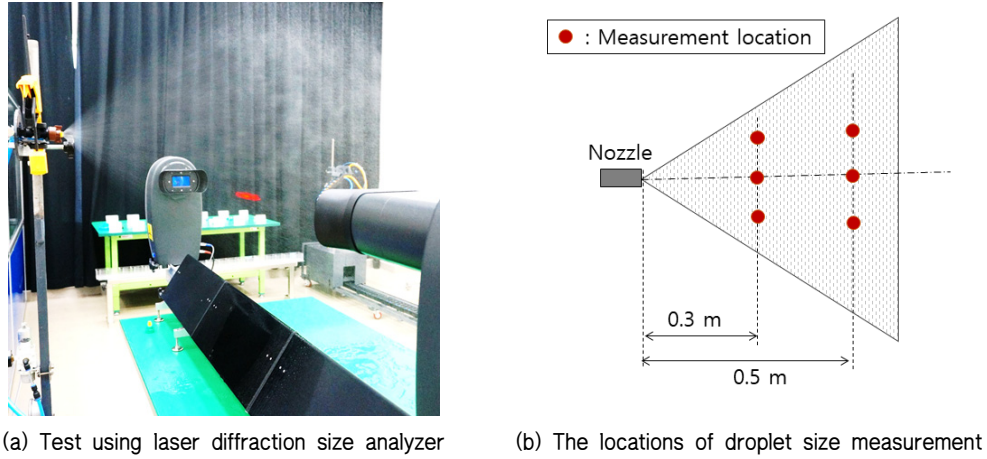


Fig. 1 Measurement of droplet size using PDPA

의 측정은 각 위치에서 5초간 3회 반복 측정하여 평균하였다. 다양한 입경 상태에 대해 측정하기 위하여 XR 노즐은 15 psi와 60 psi의 압력을 주어 각각 “Medium”과 “Fine” 크기의 입경이 생성되도록 하였고, AI 노즐은 30 psi와 60 psi의 압력을 주어 각각 “Ultra coarse”와 “Extremely coarse” 크기의 입경이 생성되도록 설정하여 입경 분포를 측정하였다. 입경의 분포는 Dv_{10} , Dv_{50} , Dv_{90} 의 세 인자로 나타내었으며, 여기서 Dv_{xx} 는 질량 누적 분포로 (xx)%에 해당하는 입경을 의미한다.

2. 비산 특성의 풍동실험

풍동실험은 폭 3 m, 높이 2 m, 길이 15 m의 토출식 경계층 풍동 (농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 소재)에서 수행하였다. 노즐은 1.2 m 높이에서 연직 하향으로 분무하도록 설치하였고, 노즐로부터 풍하 방향으로 2, 4, 7, 11, 15 m 거리에서 비산을 측정하였다. 노즐로부터 2 m 거리 이내는 노즐로 분사되는 대상 영역으로 간주하여 비산의 측정에서 제외하였

다. 공기 중 이동하는 농약 액적은 200 cm^2 ($20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$) 나일론 스크린을 바닥에서 0.3, 0.6, 0.9 m 높이에 설치하여 농약 액적을 포집하였고, 바닥에 침강하여 퇴적되는 농약 액적은 동일 지점의 바닥에 900 cm^2 ($30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$) 아크릴판을 놓아 포집하였다 (Fig. 2와 Fig. 3). 나일론 스크린의 포집효율은 Fox et al. (2004)의 풍동실험에 의하면 50~70%로 알려져 있다.

풍속을 0.5, 1, 2, 3 m s^{-1} 의 네 가지로 변화시키며, 두 노즐에 대하여 압력을 각각 XR 노즐은 15 psi와 60 psi, AI 노즐은 30 psi와 60 psi로 분사하여 농약의 비산량을 측정하였다. 모든 실험은 2회 반복하였으며, 매 실험마다 약액이 다음 실험에 영향을 미치지 않도록 나일론 스크린은 밀폐하여 분리 보관하였고, 아크릴판 또한 뚜껑이 있는 용기에 별도 보관하여 비산 약액의 영향을 받지 않도록 주의하였다. 농약은 유효성분이 없는 blank formulation의 액상수화제 ((주)팜한농 제공)를 물에 16배 희석하여 사용하였으며, 매 실험 10초간 분사하였다.

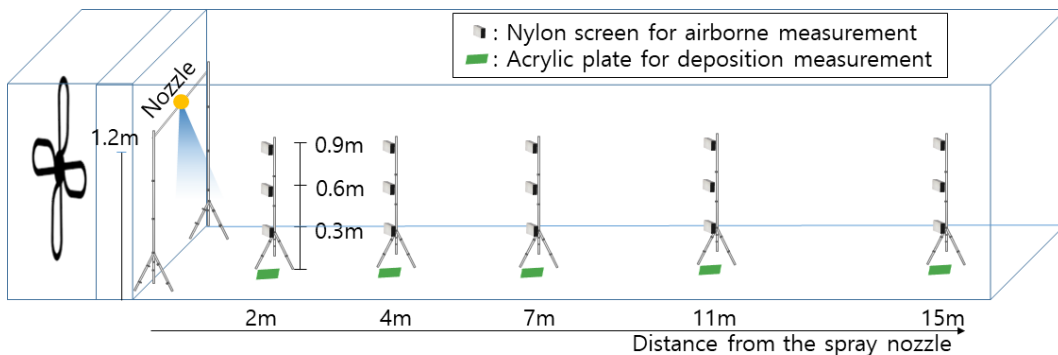


Fig. 2 Schematic diagram of wind tunnel experiment for spray drift measurement



Fig. 3 Scenes of spray drift experiment in wind tunnel

3. 비산량 정량 측정 방법

풍동실험에서 포집한 시료는 수거 후 실험실에서 TOC (총 유기탄소, Total organic carbon)를 측정하여 정량 분석하였다. 풍동실험 후 수거한 나일론 스크린은 3차 초순수 100 ml와 유리병에 넣고, 회전 교반기에서 150 rpm으로 10분 간 교반하여 세척한다. 이후 세척수를 40 ml 바이알에 옮겨 담은 후 TOC분석기 (multi N/C® 3100, Analytik Jena, Germany)를 이용하여 비정화성유기탄소방법 (NPOC, Non Purgeable Organic Carbon)으로 TOC 농도를 측정하였다. 이 후, TOC 농도에 최초 혼합한 초순수의 양 (100 ml)을 역산하여 나일론 스크린에 포집된 유기탄소의 양을 측정하였다. 동일한 방법으로 아크릴판은 600 ml의 초순수 세척수를 사용하여 아크릴판에 포집된 유기탄소의 양을 분석하였다. 실험 시 살포 전의 농약 혼합액의 TOC 농도를 측정하고 각 포집기에 포집된 유기탄소 양과 비교하여 각 포집기에 포집된 약액을 정량 분석하였다.

4. 비산 커브 추정

풍속 및 노즐 특성에 따른 비산 특성을 규명하기 위해서는 약액의 비산 양상을 대표하여 나타낼 수 있는 비산 커브 추정이 필요하다. 일반적으로 실험을 통해 확보한 농약 비산 데이터는 대부분 점 측정에 의존한 적은 양의 데이터이므로, 측정된 데이터를 적용하여 회귀분석에 의한 비산 커브를 추정하여 활용한다. 대부분의 모델들은 살포 위치로부터의 풍하 거리에 대한 함수로 표현하는데, 거리에 따라 비산량이 감소되는 형태로 나타난다. 감소 곡선의 형태는 지수, 로그, 거듭제곱 등 다양한 형태가 사용된다 (Hong et al., 2021). 붓식 살포기에 대해서는 풍하측 도달 거리 외에도 노즐 높이, 노즐 압력, 유량 등을 독립변수로 활용하기도 한다 (Smith et al., 2000; Nuyttens et al., 2007).

본 연구에서는 기존 연구들에서 제시된 비산 커브 중 압력, 풍속 등 인자를 독립변수로 활용 가능한 모델을 참고하여 다음과 같은 두 개의 비산 커브 모델을 결정하고, 풍동실험 결과들을 적용하여 비교하였다.

$$\log y = c_1 + c_2 \log x + c_3 P + c_4 V \quad (\text{Smith et al., 2000}) \quad (1)$$

$$y = x^{c_1} \times (c_2 + c_3 P + c_4 V) \quad (\text{Nuyttens et al., 2007}) \quad (2)$$

여기서 y 는 총 살포량에 대한 비산량의 비율, x 는 노즐로부터의 거리 (m), P 는 노즐의 압력 (psi), V 는 풍속 (m s^{-1}), c_1, c_2, c_3, c_4 는 회귀상수이다. 총 살포량은 풍동실험 시 측정하였으며, XR 노즐은 15 psi와 60 psi에서 각각 125 ml, 246 ml이며, AI 노즐은 30 psi와 60 psi에서 각각 175 ml, 256 ml이다.

III. 결과 및 고찰

1. 노즐의 입경 분포

XR 노즐과 AI 노즐의 입경분포 측정 결과는 Table 2와 같다. XR 노즐은 노즐로부터의 거리가 멀어지면서 입경이 전체적으로 약 $10 \mu\text{m}$ 내외로 커지는 것으로 나타났다. 반면 AI 노즐은 $Dv10$ 은 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 정도 증가하지만 $Dv50$ 과 $Dv90$ 은 오히려 $10 \sim 30 \mu\text{m}$ 정도 작아졌다. 일반적인 노즐에서는 노즐 출구에서 생성된 매우 작은 액적들은 짧은 시간 내에 소실되므로 거리가 멀어지면서 평균 입경이 커지는 것으로 보인다. 하지만 AI 노즐에서 생성된 액적은 내부에 공기가 채워져 있으므로 거리가 멀어질수록 큰 액적들이 파괴되면서 오히려 $Dv90$ 과 같은 큰 입경은 작아지는 것으로 판단된다. 노즐로부터의 거리에 따라 입경 분포에 차이가 발생하므로 농업용 노

Table 2 Spray droplet sizes of XR and AI nozzles according to the measurement location and working pressure

Nozzles	Pressures and Locations		Droplet sizes (μm)		
	Pressures	Distance (m)	Dv10	Dv50	Dv90
XR8002	15 psi	0.3	126.9 \pm 2.2	232.2 \pm 10.8	432.7 \pm 26.1
		0.5	126.2 \pm 4.6	241.6 \pm 4.0	451.4 \pm 11.7
	60 psi	0.3	74.0 \pm 1.0	151.5 \pm 1.1	300.8 \pm 1.9
		0.5	81.0 \pm 0.9	162.3 \pm 1.3	304.5 \pm 1.7
AI8002	30 psi	0.3	185.9 \pm 9.9	431.6 \pm 8.2	753.7 \pm 4.6
		0.5	205.7 \pm 15.0	423.2 \pm 9.4	742.4 \pm 3.6
	60 psi	0.3	143.3 \pm 3.8	366.5 \pm 11.2	712.5 \pm 9.3
		0.5	152.8 \pm 4.2	340.7 \pm 7.8	680.8 \pm 7.5

즐에 대한 연구에서는 노즐에서 0.5 m 거리에서 입경 분포를 측정하는 경우가 많다 (Nuyttens et al., 2009). 두 노즐 모두 큰 압력이 작용했을 경우 크기가 더 작은 액적이 생성되었다.

XR 노즐과 AI 노즐에서 생성된 액적의 입경 분포를 동일한 압력인 60 psi와 0.5 m 거리에 대하여 비교하면 AI 노즐에서 생성된 액적이 XR 노즐에 비해 약 2배 (Dv10, Dv50, Dv90)에 대해 각각 1.9, 2.1, 2.2배) 정도 크게 측정되었다. 비산 가능 입경은 외부 풍속, 살포 방법 등 다양한 요인에 의해 달라지나 일반적으로 큰 입경의 액적이 항상 비산 가능성이 작으므로 (Zhu et al., 1994), AI 노즐이 XR 노즐에 비해 비산 가능성이 작을 것이라 판단할 수 있다.

2. 노즐의 비산 특성

풍동실험에 의해 공기 중에서 비산되는 약액의 양과 바닥면에 퇴적되는 약액의 양을 각 샘플러의 단위면적당 질량으로 계산하여 비산된 약액량을 도출하였다. 또한 XR 노즐과 AI 노즐의 거리에 따른 공기 중 비산량을 Fig. 4에 나타내었다. 두 노즐 모두 공기 중 비산량은 풍속의 영향을 가장 크게 받는 것으로 나타났다. 풍속의 증가에 따라 비산량이 증가하며, 1 m s⁻¹ 낮은 풍속보다는 높은 풍속에서 비산량의 증가가 확연히 크게 나타났다. 특히 풍속이 2 m s⁻¹에서 3 m s⁻¹로 증가하면서 비산량은 2배 이상 증가하였다. 이러한 풍속의 영향은 낮은 풍속에서는 4 m 거리까지 나타났으며, 2 m s⁻¹의 높은 풍속에서는 7 m 거리까지 영향을 받는 것으로 나타났다.

분사 압력에 따라서는 낮은 압력에 비해 높은 압력일 때 공기 중 비산량이 최대 2배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 압력이 높아짐에 따라 액적의 입경이 작아지므로, 비산 가능한 액적의 물리적 양이 증가하기 때문이다. 노즐별로는 AI 노즐이 XR 노즐에 비해 공기 중 비산량이 1/2 이하로 감소되는 것으로 나타나 AI 노즐이 비산을 저감하는데 효과가 있는 것으로 나타났다. 단 이러한 특성은 2 m s⁻¹ 이상의 높은

풍속 조건에서만 해당하며, 낮은 풍속일 때는 유사한 수준이거나 오히려 약간 높게 나타나는 경향이 있다. 이는 Table 1에서 제시한 바와 같이 AI 노즐의 유량이 XR 노즐보다 높은 것이 원인인 것으로 판단된다.

바닥에 퇴적되는 비산량 또한 Fig. 5에 제시한 바와 같이 3m 이내에서 XR 노즐과 AI 노즐의 차이가 가장 크게 나타났으며 최대 2배 이상 차이를 보였다. XR 노즐의 경우 공기 중 비산량과 동일하게 압력이 낮을 때 비산량이 약 2배 이상 크게 나타났다. 풍속에 따라서는 공기 중 비산과는 반대로 낮은 풍속일수록 바닥에서의 비산량은 높아지는 경향을 보였다. 이는 높은 풍속에서는 농약 액적이 공기 중에 비산되는 경향이 크데 반해 풍속이 낮아질수록 바닥에 침강하여 퇴적되는 경향이 커지기 때문이다. 단, 모든 풍속과 압력 및 노즐의 조건 하에서도 약 7 m 거리 이후에는 20~40 $\mu\text{L cm}^{-2}$ 로 거의 일정하게 나타나므로, 다양한 인자의 영향은 약 4 m 이내의 거리에서만 비산 특성의 차이를 유도한다고 판단할 수 있다.

단위면적당 공기 중 비산량과 지면 퇴적량의 비 (A/D)를 비교한 결과는 Fig. 6과 같이 제시하였다. XR 노즐의 경우 풍속이 1 m s⁻¹ 이하에서는 2 m 위치에서의 비율이 1 이하로 지면에 퇴적되는 양이 더 많으며 거리에 따라 공기 중 비산량의 비율이 점차 증가하였다. 풍속이 2 m s⁻¹ 이상일 경우에는 공기 중 비산량이 최대 147배 높게 나타났으며, 거리에 따라 점차 감소하였다. AI 노즐의 경우에는 압력 15 psi, 풍속 0.5 m s⁻¹인 경우 (A/D = 0.8)를 제외하고는 모든 경우에 A/D가 1 이상을 나타내어 공기 중 비산량이 지면 퇴적량보다 높은 것으로 나타났다. AI 노즐은 액적 입경의 크기를 크게 하여 공기 중 비산 보다는 지면 퇴적을 늘려 전체 비산량을 감소시킬 것으로 예상하여 A/D가 1보다 작을 것으로 기대하였으나 A/D가 대체로 2~4 범위인 것으로 나타났다. 하지만 앞선 결과에서도 AI 노즐의 공기 중 비산량과 지면 퇴적량은 XR 노즐에 비해 현저히 작은 수준이므로 의도하였던 비산량 감소는 이

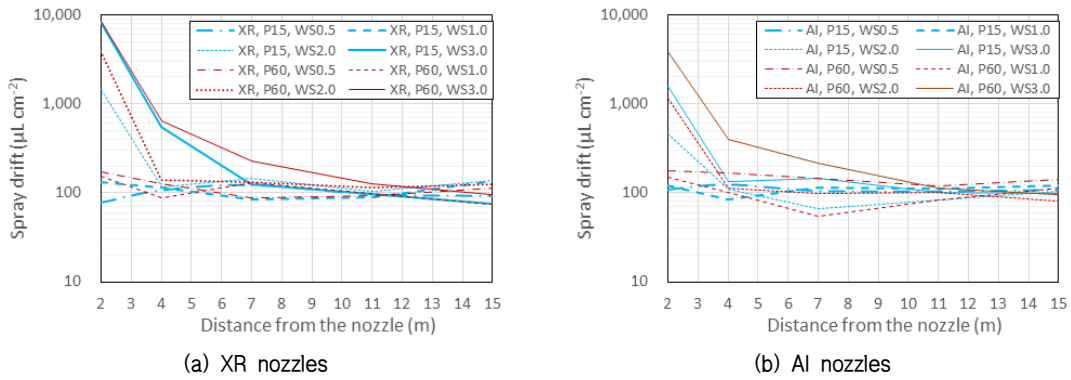


Fig. 4 Airborne spray drift by nozzle (P: pressure, WS: wind speed)

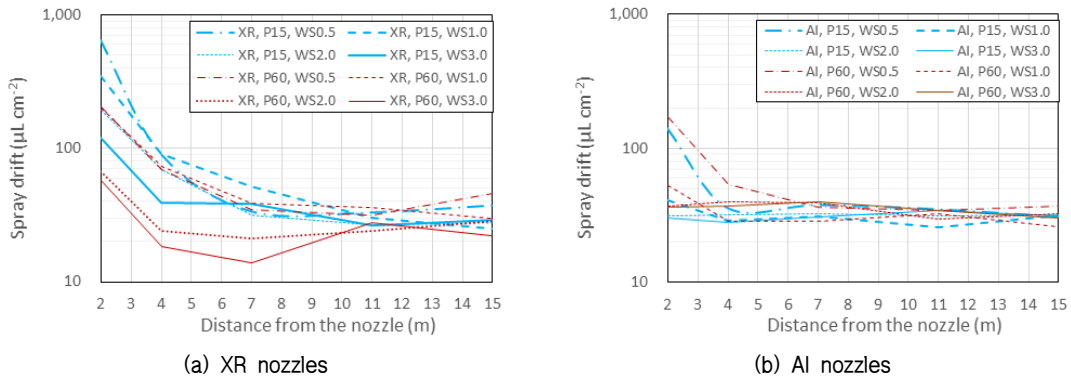


Fig. 5 Deposition spray drift by nozzle (P: pressure, WS: wind speed)

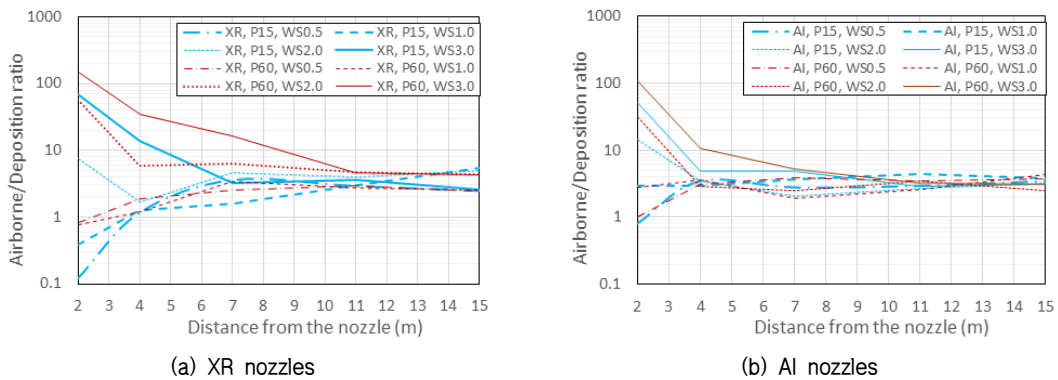


Fig. 6 Airborne/Deposition ratio by nozzle (P: pressure, WS: wind speed)

루어진 것으로 보인다. A/D가 1보다 크게 나타난 것은 AI 노즐에서 의도하였던 많은 양의 지면 퇴적이 2 m 거리 이내의 분사 대상 영역에서 이루어졌기 때문으로 판단된다. A/D는 거리 11 m 이내에서는 풍속, 압력, 노즐 등의 영향으로 서로 다른 값을 보이고 있으나, 약 11 m 이상의 거리에서는 위의 조건에 상관없이 약 2~4 정도의 일정한 값을 보이는 것으로

나타났다. 따라서 비산을 저감하기 위해 노즐이나 압력을 변경하는 조치들은 약 11 m 거리 이내에서 대부분의 저감 효과가 나타나며, 그 이상의 거리에서는 단위면적당 공기 중 비산과 지면 퇴적의 비율이 2~4 정도로 일정하게 비산이 이루어질 것으로 예상할 수 있다.

3. 비산 커브 추정

풍동 실험 결과를 두 가지 비산 커브 모델에 적용하여 분석한 결과는 Table 3과 같다. XR 노즐은 두 모델에 대해 모두 0.71~0.84의 결정계수를 보여 비산 커브 모델의 설명력이 높았다. 특히 식 (2)의 비산 커브 모델이 공기 중 비산과 지면 퇴적에 대해 각각 0.82와 0.84의 결정계수를 보여 XR 노즐의 비산 특성을 설명하는데 적합하였다. AI 노즐은 공기 중 비산에 대해서만 식 (2)의 비산 커브 모델이 0.83의 결정계수를 보인 반면, 지면 퇴적에 대해서는 모두 0.5 이하의 결정계수를 보여 비산 커브 모델이 비산 특성을 설명하는데 부적합한 것으로 판단되었다. 물론 모델의 적합도를 결정계수만으로 판단하는 것은 오해의 소지가 있다. 결정계수는 현재 측정된 데이터에 대해 회귀 모델을 일치시킨 결과이므로, 향후 추가로 측정된 실측값을 통해 현재 모델이 예측하는 결과를 비교함으로써 모델의 적합도를 재평가해 볼 수 있을 것이다.

식 (2)의 비산 커브 모델에 대한 XR 노즐과 AI 노즐의 데이

터 분포는 Fig. 7에 제시하였다. 거리 11 m 이상에서는 총 살포량에 대한 비산량의 비율이 0.0001 이하로 매우 작으며, 비산 커브 모델에 의해 추정된 비산량은 측정값에 비해 1/10~1/100 정도로 작게 모의되기도 한다. 하지만 값이 매우 작기 때문에 결정계수에는 큰 영향을 미치지 못하였다. 전반적으로 비산이 문제가 될 수 있는 수준, 예를 들어 약 0.001 이상 수준 (약 0.1% 이상)에서는 비산 커브 모델에 의한 예측값이 실측값보다 크게 나타났으므로, 비산 커브 모델이 농약 비산의 규제 목적으로 사용된다면 현상을 과소평가하지 않고 80% 이상의 설명력으로 적합할 것으로 판단된다. 농약의 독성 및 피해 대상에 따라 허용 가능한 비산량이 결정된다면, 본 비산 커브 모델을 통해 비산 거리를 추정할 수 있을 것이다.

IV. 결론

본 연구에서는 국내에서 주로 사용되는 농약 방제용 XR

Table 3 Regression analysis of two drift curves

Nozzles	Drift types	R ² for Eq. 1				R ² for Eq. 2			
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
XR	Airborne	0.71				0.82			
	Deposition	-5.613	-0.953	-0.012	0.550	-6.329	-0.660	-0.005	0.302
AI	Airborne	0.79				0.84			
	Deposition	-5.271	-0.862	-0.023	-0.310	-7.633	-0.241	-0.009	-0.117
AI	Airborne	0.50				0.83			
	Deposition	-2.000	-0.033	-0.001	0.072	-1.967	-0.019	0.000	0.016
AI	Airborne	0.33				0.47			
	Deposition	-1.977	0.019	0.000	-0.003	-1.999	0.006	-0.000	-0.001

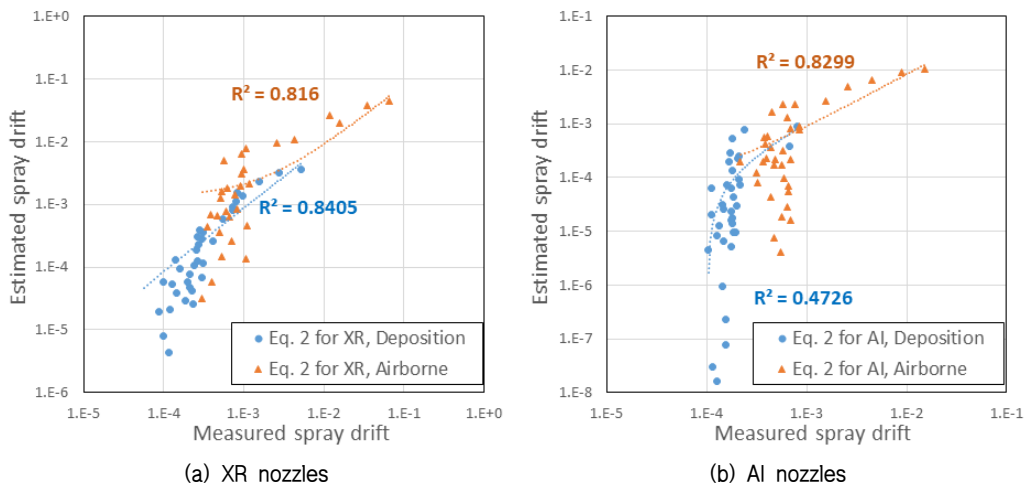


Fig. 7 Regression of drift curve for nozzle

노즐과 AI 노즐에 대하여 노즐의 작동 압력과 외부 풍속에 따른 비산 특성을 비교 분석하였다. 레이저 회절 시스템으로 입경 분포를 측정된 결과 AI 노즐은 공기가 채워진 액적을 생성하여 XR 노즐에서 생성되는 액적에 비해 입경이 약 2배 정도 크게 나타났으며, 이로 인해 농약의 비산이 저감되는 효과를 보였다.

풍동 실험 결과에 따르면 AI 노즐에 의해 발생하는 공기 중 비산량은 XR 노즐에 비해 약 1/2 정도로 나타났으며, 지면에 퇴적되는 비산량은 1/2 이하로 감소되는 것으로 나타났다. 단 이러한 비산 감소 효과는 2 m s^{-1} 이상의 높은 풍속에서만 나타났으며, 1 m s^{-1} 이하의 풍속에서는 공기 중 비산량은 노즐에 관계없이 유사한 수준을 보였다. 전반적으로 2 m s^{-1} 이상의 높은 풍속에서는 공기 중 비산의 비율이 높았으며, 반대로 1 m s^{-1} 이하의 낮은 풍속에서는 지면에 퇴적되는 비산량의 비율이 높았다. 또한 작동 압력이 높아지면 노즐에서 생성된 액적의 입경이 작아지면서 비산량이 증가하는 경향을 보였다. 하지만 이러한 풍속 및 작동 압력에 의한 비산량의 증가 및 저감 효과는 노즐로부터 약 4 m 거리 이내에서 명확히 나타나며 약 11 m 이상의 거리에서는 그 효과가 거의 나타나지 않았으므로, 장거리의 비산 저감 및 방지를 위해서는 추가적인 대책이 필요할 것이다.

본 연구는 농약의 비산 특성을 공학적인 풍동 실험을 통해 분석하고 이해하는데 의의가 있으며, 향후 현장 실험을 통해 다양한 상황에서의 농약 비산을 측정하고 비산 커브에 대한 데이터를 축적하는데 기반이 될 것이다. 또한 국내 농약 비산 문제에 대한 대안을 제시하기 위해서는 농약의 독성 및 허용량에 대한 지속적인 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 (과제번호: PJ0150532021)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. ASAE, 2013a. Procedure for measuring drift deposits from ground, orchard, and aerial sprayers. American Society of Agricultural and Biological Engineers Standard, ASAE S561.1 APR2004(R2013).
2. ASAE, 2013b. Spray nozzle classification by droplet spectra. American Society of Agricultural and Biological Engineers Standard, ASAE S572.1 MAR2009(R2013).
3. Bonds, J. A. S. and M. Leggett, 2015. A literature review of downwind drift from airblast sprayers: development of standard methodologies and a drift database. *Transactions of the ASABE* 58(6): 1471-1477. doi:10.13031/trans.58.11057.
4. Cunha, J. P., P. Chueca, C. Garcera, and E. Molto, 2012. Risk assessment of pesticide spray drift from citrus applications with air-blast sprayers in Spain. *Crop Protection* 42: 116-123. doi:10.1016/j.cropro.2012.06.001.
5. Endalew, A. M., M. Hertog, M. Delele, K. Baetens, T. Persoons, M. Baelmans, H. Ramon, B. Nicolaï, and P. Verboven, 2009. CFD modelling and wind tunnel validation of airflow through plant canopies using 3D canopy architecture. *International Journal of Heat Fluid Flow* 30: 356-368. doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.12.007.
6. Fox, R. D., R. C. Derksen, H. Zhu, R. A. Downer, and R. D. Brazeel, 2004. Airborne spray collection efficiency of nylon screen. *Transactions of the ASABE* 20(2): 147-152. doi:10.13031/2013.15883.
7. Gil, E., J. Llorens, M. Gallart, J. A. Gil-Ribes, and A. Miranda-Fuentes, 2018. First attempts to obtain a reference drift curve for traditional olive grove's plantations following ISO 22866. *Science of The Total Environment* 627: 349-360. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.01.229.
8. Gregorio, E., X. Torrent, S. Planas, and J. R. Rosell-Polo, 2019. Assessment of spray drift potential reduction for hollow-cone nozzles: Part 2. LiDAR technique. *Science of the Total Environment* 687: 967-977. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.151.
9. Guler, H., H. Zhu, H. E. Ozkan, R. C. Derksen, Y. Yu, and C. R. Krause, 2007. Spray characteristics and drift reduction potential with air induction and conventional flat-fan nozzles. *Transactions of the ASABE* 50(3): 745-754. doi:10.13031/2013.23129.
10. Hong, S. W. and R. W. Kim, 2018. CFD modeling of pesticide flow and drift from an orchard sprayer. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 60(3): 27-36. doi:10.5389/KSAE.2018.60.3.027 (in Korean).
11. Hong, S. W., L. Zhao, and H. Zhu, 2018. SAAS, a computer program for estimating pesticide spray efficiency and drift of air-assisted pesticide applications. *Computers and Electronics in Agriculture* 155: 58-68. doi:10.1016/j.compag.2018.09.031.
12. Hong, S. W., J. Park, H. Jeong, S. Lee, L. Choi, L. Zhao, and H. Zhu, 2021. Fluid dynamic approaches for prediction

- of spray drift from ground pesticide applications: a review. *Agronomy* 11(6): 1182. doi:10.3390/agronomy11061182.
13. Kim, R. W. and S. W. Hong, 2019. Applicability of optical particle counters for measurement of airborne pesticide spray drift. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 61(5): 79-87. doi:10.5389/KSAE.2019.61.5.079 (in Korean).
 14. KOSTAT, 2021. Use of pesticide and fertilizers. Statistics KOREA Government Official Work Conference. https://index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=2422. Accessed 20 Aug. 2021.
 15. MAFRA, 2021. Positive list system. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. <https://www.mafra.go.kr/PLS/2065/subview.do>. Accessed 20 Aug. 2021.
 16. Noh, H. H., C. J. Kim, B. C. Moon, T. G. Kim, D. Kim, M. S. Oh, D. S. Choi, Y. Y. Kim, H. S. Song, and K. S. Kyung, 2020. Drift patterns of aerial spraying pesticide caused by formulations and nozzles. *Korean Journal of Pesticide Science* 24(3): 278-285. doi:10.7585/kjps.2020.24.3.278 (in Korean).
 17. Noh, H. H., C. J. Kim, B. C. Moon, J. H. Ro, D. Kim, M. S. Oh, H. T. Kim, and K. S. Kyung, 2020b. Measurement of drift amount of ametoctradin+dimethomorph 47 (27+20)% suspension concentrate for unmanned aerial spraying caused by wind direction and speed. *Korean Journal of Pesticide Science* 24(1):43-50. doi:10.7585/kjps.2020.24.1.43 (in Korean).
 18. Nuyttens, D., M. De Schampheleire, K. Baetens, and B. Sonck, 2007. The influence of operator-controlled variables on spray drift from field crop sprayers. *Transactions of the ASABE* 50(4): 1129-1140. doi:10.13031/2013.23622.
 19. Nuyttens, D., M. De Schampheleire, P. Verboven, E. Brusselman, and D. Dekeyser, 2009. Droplet size and velocity characteristics of agricultural sprays. *Transactions of the ASABE* 52(5): 1471-1480. doi:10.13031/2013.29127.
 20. Nuyttens, D., M. De Schampheleire, P. Verboven, and B. Sonck, 2010. Comparison between indirect and direct spray drift assessment methods. *Biosystems Engineering* 105: 2-12. doi:10.1016/j.biosystemseng.2009.08.004.
 21. Park, J., S. Lee, H. Jeong, and S. W. Hong, 2020. A preliminary study on measurement of pesticide spray drift in the air. *In Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers Annual Meeting 2020*: 252-252. (in Korean).
 22. Ramsdale, B. K. and C. G. Messersmith, 2017. Drift-reducing nozzle effects on herbicide performance. *Weed Technology* 15(3): 453-460. doi:10.1614/0890-037X(2001)015[0453:DRNEOH]2.0.CO;2.
 23. Reichard, D., H. Zhu, R. Fox, and R. Brazee, 1992. Wind tunnel evaluation of a computer program to model spray drift. *Transactions of the ASABE* 35: 755-758. doi:10.13031/2013.28658.
 24. Smith, D. B., L. E. Bode, and P. D. Gerard, 2000. Predicting ground boom spray drift. *Transactions of the ASABE* 43(3): 547-553. doi:10.13031/2013.2734.
 25. Torrent, X., C. Garcera, E. Molto, P. Chueca, R. Abad, C. Grafulla, C. Roman, and S. Planas, 2017. Comparison between standard and drift reducing nozzles for pesticide application in citrus: Part I. effect on wind tunnel and field spray drift. *Crop Protection* 2017: 130-143. doi:10.1016/j.cropro.2017.02.001.
 26. Zhu, H., D. Reichard, R. Fox, R. Brazee, and H. Ozkan, 1994. Simulation of drift of discrete sizes of water droplets from field sprayers. *Transactions of the ASABE* 37: 1401-1407. doi:10.13031/2013.28220.