

다축형 사과원에서 타워형 방제기의 RPM, 주행 속도 및 송풍 조건에 따른 방제 효율 및 비산 특성 분석

전종훈, 최백균, 반승현*

Analysis of Spray Efficiency and Drift Characteristics of Tower Sprayers in Multi-Leader Apple Orchards Under Varying RPM, Driving Speeds, and Airflow Conditions

Jong Hoon Jeon , Baek Gyun Choi  and Seunghyun Ban 

경북대학교 농업생명과학대학 원예학과

Department of Horticulture, College of Agriculture and Life Science, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

* Correspondence: sh@knu.ac.kr

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.08>

Agric. Environ. Sci. 2025, 44, 68-77

Received: December 23, 2024

Revised: January 14, 2025

Accepted: February 5, 2025

Published: February 27, 2025

Online ISSN: 2233-4173

Print ISSN: 1225-3537



Check for updates

© The Korean Society of Environmental Agriculture 2025



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: In this study, we evaluated the spraying efficiency and drift characteristics of tower sprayers in multi-leader apple orchards and proposed optimal spraying standards. This research addresses the challenges of pesticide drift and uneven droplet distribution, which impact spraying precision and environmental sustainability. The results demonstrated that disabling the air-assist significantly reduced pesticide drift, while the combined effect of revolutions per minute (RPM) and driving speed on spraying efficiency and drift patterns was significant. Air-assist was shown to increase droplet drift beyond the fifth row, whereas disabling it substantially mitigated this effect. Furthermore, droplet size and distribution varied considerably under different air-assist conditions, emphasizing the need for tailored spraying strategies in planar orchard layouts. The results of this study provide essential insights for improving spraying efficiency and minimizing environmental impacts, thereby supporting the development of precision spraying technologies and sustainable orchard management practices.

Keywords: Air-assist, Apple orchard, Coverage, Drift, Nozzle deposits

서론

과거 사과재배체계는 주로 거대수 중심의 소식 재배 형태로 수고를 높게 유지하여 전체적인 수세 안정을 도모하는 형태였다[1]. 그러나 지나치게 높은 수고는 과도한 그늘 형성으로 인한 수광률 감소를 초래하여 과실 품질 저하 및 수형 관리에 많은 노동력을 필요로 하는 등 문제가 발생하였다[2,3]. 1960년대에 유럽을 중심으로 왜성 대목을 이용한 고밀식 재배체계(high density planting system)가 도입되면서, 사과나무의 수고와 수폭이 감소한 세장방추형 수형이 보급되었으며, 이로 인

해 기존 거대수 중심 재배 방식에 비해 수광률이 증가하면서 조기 고품질 과실 생산과 다수확이 가능해졌다[4-6]. 이러한 변화는 과원 관리 비용을 절감시키고, 시장 요구에 신속히 대응할 수 있는 밀식 재배체계를 자리 잡게 했다. 이후 재배기술이 발전하면서 2000년대 초, 이탈리아의 묘목 회사 Mazzoni에서 2축 측지 묘목 개발이 이루어졌고[7], 이후 다축형 재배로 확대되며 평면형 수형 도입이 본격화되었다[8].

사과 재배체계 변화는 국내에도 큰 영향을 미쳐 이와 관련된 연구와 고밀식 사과 재배체계를 근간으로 한 재배가 활발해지고 있다[8,9]. 특히 평면형 과원은 나무 수형을 2D 형태로 구성하여 유지와 관리가 용이하며, 방제기 및 고소작업차와 같은 기계화 작업이 수월해 노동 효율성을 높인다[10,11]. 이처럼 평면형 과원은 효율적인 사과 생산이 가능하고 정밀 과수농업의 기반으로 평가받으나, 아직까지 다축 평면형 과원에 대한 방제 기술의 연구가 미비한 실정이다.

현재 과수원 방제는 주로 방제기를 통해 이루어지며[12], 국내에서 주로 사용되고 있는 Speed Sprayer, Air-blast Sprayer (이하 SS기)는 과거 수고 약 7 m, 수폭 약 4 m에 달하는 거대수 재배체계에 적합하도록 설계되었다[13]. 그러나 기존 SS기는 살포된 농약 중 20~55%만 작물에 묻고 나머지 45~80%는 공기 중으로 비산(drift)되거나 지면으로 낙하하는 문제가 발생하고 있다[14]. 비산은 농약 잔류물 증가와 환경오염, 생태계 교란 문제를 유발하는 요인으로[15,16], 해외에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 기존 방사형 방제기의 노즐 배치를 수직형으로 배치하는 등 밀식 재배체계에 적합한 타워형 방제기를 연구하고 있다[13]. 이를 통해 과원 내 방제 효율성을 높이고 농약의 비산을 줄여 환경오염의 요소를 최소화하고 있다.

그러나 국내 연구는 평면형 과원에서 타워형 방제기의 방제 효율 및 비산에 대한 연구가 부족한 상황이다. 특히 세장방추형에 비해 수폭과 수고가 좁고 낮은 평면형 수관에서는 기존 방제 기준을 적용할 경우, 농약 남용 및 비산 문제가 심화될 가능성이 크다. 따라서 본 연구는 평면형 과원에서 타워형 방제기의 방제 효율성과 비산 특성을 평가하여 다축 평면형 과원에서 타워형 방제기의 최적화된 방제 기준을 제안하고자 한다.

재료 및 방법

시험포장 및 공시 방제기

본 시험은 대구광역시 군위군 효령면 경북대학교 농대실습장(36.112177, 128.642461)에 위치한 2.7 × 1.2 m 간격으로 재식된 5년차 'Fuji'/M9 (*Malus domestica* Borkh.) 과원에서 진행되었다. 평균 수고는 3.3 m, 최대 수폭은 1.1 m로, 생육이 균일한 5주의

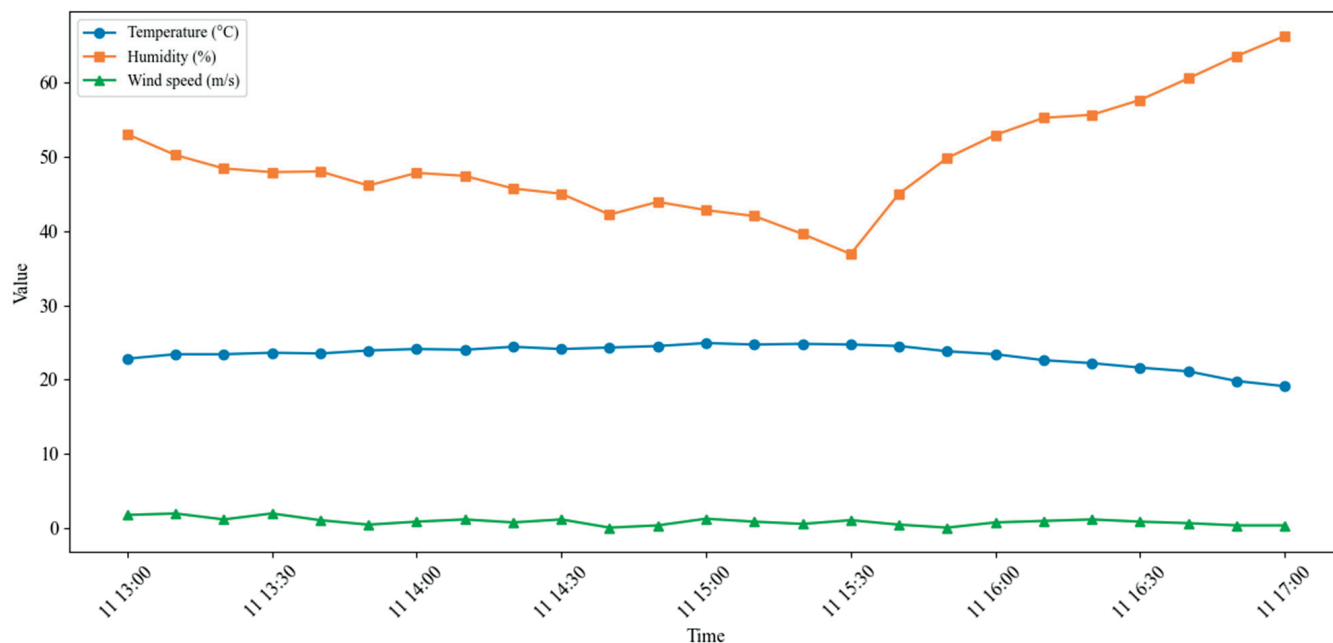


Fig. 1. Environmental data recorded during experiment time.

나무를 열마다 선정하였다. 시험포장의 조건은 최대 풍속 2.0 m/s 이하, 평균 습도 70% 이하에서 방제를 수행하였다(Fig. 1). 시험에 사용된 방제기는 2006년 생산된 국내 축형 방제기의 노즐을 2021년에 수직(타워)형으로 개조한 형태로, 최대 높이 2.3 m, 양방향 총 20개의 노즐을 갖추었다. 이러한 노즐 개조는 일부 농가에서 실제로 적용하고 있는 방제기 개선 방법으로, 기존 방제기의 구조를 크게 변경하지 않고 구현할 수 있어 기술적 진입 장벽이 낮다. 특히, 방제 효율 향상과 농약 비산 저감을 위해 간단한 노즐 배치 변경만으로도 타워형 방제기와 유사한 형태로 운영할 수 있어 농가 재현성이 높은 방법으로 평가된다.

감수지 데이터 수집 분석 및 시각화

실험은 물을 이용하여 방제 열(1~5열) 간의 피복률 및 물방울 비산 분포를 평가하기 위해 감수지를 사용하였다. 감수지는 방제 열 내 각 나무의 잎 앞뒤를 포함하여 평균 수고와 너비를 기준으로 9개 구역으로 나누어 부착하였다(Fig. 2). 모든 실험 조건은 왕복 주행으로 1회 방제하였으며, 반복 실험(3회)을 통해 데이터의 신뢰성을 확보하였다. 나뭇잎 앞뒤에 부착된 감수지는 방제 후 수거하여 고해상도로 스캔하였으며, Python (3.11.2, Python Foundation, USA) 기반 OpenCV를 활용해 분석하였다. 감수지 이미지를 디지털화한 뒤, 전체 면적 대비 물방울 피복 면적을 계산하여 열별 피복률을 산출하였고, 물방울의 평균 면적과

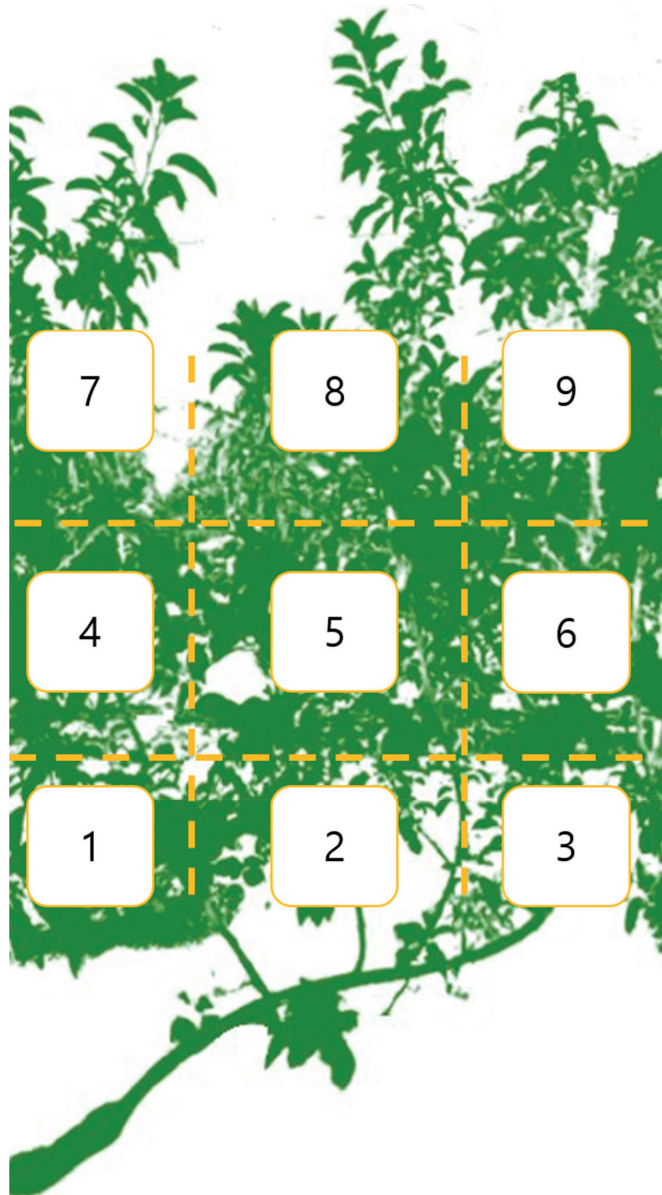


Fig. 2. Method of attachment of water sensitive paper in multi-axis apple orchard.

표준편차를 계산하여 송풍 조건과 방제 열 간의 물방울 분포 차이를 평가하였다. 수집된 데이터를 바탕으로 송풍 유무와 주행 속도에 따른 물방울 분포 및 피복률을 시각화하였으며, 통계 분석은 ANOVA 및 Tukey 사후검정($p < 0.05$)을 통해 유의미한 차이를 평가하였다.

회전수(Revolutions Per Minute, RPM)와 주행 속도에 따른 방제 피복률

회전수(1,000, 1,500, 2,000 rpm)를 독립 변수로 설정하여 저속 2단 주행 조건에서 방제 열 간 피복률을 비교하였다. 방제 열 내 각 나무의 앞뒤에 감수지를 부착하였으며, 가장 높은 피복률을 기록한 회전수 조건에서 주행 속도를 저속 3단(1.8 km/h)과 고속 1단(3.1 km/h)으로 변경하여 추가적으로 피복률의 평균값과 표준편차를 계산하여 방제 열 간 균일성을 평가하였다.

송풍 유무에 따른 열 간 방제 비산 피복률 및 물방울 분포 조건 분석

최적 피복률을 기록한 회전수 조건에서 저속 3단과 고속 1단 주행 조건으로 송풍 유무에 따른 비산 효과를 평가하였다. 송풍을 켜 조건(on)과 끈 조건(off)으로 구분하여 방제 열(1~5열) 간 피복률을 비교하였으며, 각 열의 좌우 평균 피복률과 표준편차를 계산하였다. 특히, 방제 열 중 2열을 기준으로 비산된 물방울의 크기와 분포를 세부적으로 분석하였다. ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers) 기준에 따라 물방울 크기를 미세(fine, 32.6 pixel^2 이하), 중간(medium, $32.6 \sim 293.57 \text{ pixel}^2$), 큰(coarse, 293.57 pixel^2 이상)으로 분류하여 분석하였으며, 송풍 조건과 주행 속도가 물방울 분포에 미치는 영향을 평가하였다. 수집된 데이터는 상관분석을 통해 물방울 면적과 피복률 간의 연관성을 도출하였고, 방제 열 간 피복률 변화 패턴을 시각화하여 송풍 조건 및 주행 속도에 따른 비산 특성을 직관적으로 분석하였다.

결과 및 고찰

회전수와 주행 속도에 따른 방제 피복률

저속 2단 주행 속도에서 회전수(1,000, 1,500, 2,000 rpm)에 따른 방제 열 간 감수지 피복률을 분석한 결과(Table 1), 회전수 1,000 조건에서는 높이 2.2~3.3 m 구간의 앞면 평균 피복률이 $98.1 \pm 0.3\%$, 뒤쪽은 $97.3 \pm 0.7\%$ 로 나타났으나, 이를 제외한 모든 조건에서 높이와 위치(앞/뒤)에 관계없이 피복률이 100%로 기록되었다. 이러한 결과는 다축형 사과원에서 방제기의 설계와 주행 조건이 낮은 회전수에서도 안정적인 살포 효과를 제공했음을 시사한다. 또한, 회전수 1,000 조건에서 주행 속도를 1.8 km/h (저속 3단)과 3.1 km/h (고속 1단)으로 설정하여 방제 열 간 감수지 피복률을 비교한 결과(Table 2), 1.8 km/h 조건에서는 모든 높이와 위치에서 피복률이 100%로 나타났으나, 3.1 km/h 조건에서는 높이 2.2~3.3 m의 앞쪽 평균 피복률이 $97.1 \pm 1.7\%$, 뒤쪽은 $98.9 \pm 0.4\%$ 로 나타나 주행 속도가 증가할수록 피복률의 소폭 감소가 관찰되었다. 반면, 중단(1.1~2.2 m) 및 하단(~1.1 m)에서는 모든 조건에서 피복률이 100%로 유지되었다.

본 실험 결과에서는 대부분의 조건에서 피복률이 95~100% 수준으로 나타나 약제가 다축형 수관 내부에 고르게 분포되었음을 확인할 수 있었다. 그러나 기존 연구에 따르면, 100%에 가까운 피복률은 과도한 살포로 간주되어 약제 낭비를 초래할 가능성이 있다[17]. 또한, 높은 피복률은 감수지 내 물방울 중첩 현상으로 분석 정확도를 저하시킬 수 있으며, 감수지 피복률이 70~80%를 초과할 경우 과잉 방제로 간주될 수 있다[18]. 이에 본 연구에서 확인된 100% 피복률은 방제 효율보다는 과잉 방제 가능성을 시사하며, 현재 우리나라의 기존 방제 방법 등은 평면 수관을 가진 본 과원 형태에서는 맞지 않을 수 있음을 보여준다. 따라서 다축형 사과원의 구조적 특성을 반영한 정밀 방제 운용이 필요함을 시사한다.

효율적인 방제를 위해서는 방제기의 설계를 조정하거나 운용 조건을 최적화할 필요가 있다. 일반적으로 올바른 방제기 조정은 살포 대상에 따라 주행 속도, 공기량, 액체 유량, 노즐 및 노즐 방향을 최적화하는 것을 포함한다[19]. 예를 들어, 노즐 구경 크기, 개방 노즐 수, 노즐 압력 등을 조정하거나[20], 공기 흐름을 조절하는 방법이 고려될 수 있다. 본 연구에서는 다축형 수관이 좁은 수폭과 균일한 가지 분포를 가지므로, 회전수를 조절하여 송풍 유무를 고려하는 것이 필요함을 확인하였다. 이러한 점에서 본 연구는 다축형 수관 구조에 적합한 방제 운용 기준을 제시하고, 약제 낭비를 줄이며 환경적 영향을 최소화할 수 있는 지속 가능한 방제 전략의 필요성을 시사한다.

Table 1. Coverage of water sensitive paper by sprayer at different RPMs and height with Standard deviation^z

RPM	Height (m)	Location	Average±SD (%) ^z
1,000	2.2~3.4	Front	98.1±0.3 a ^y
		Back	97.3±0.7 a
	1.1~2.2	Front	100a
		Back	100a
	~1.1	Front	100a
		Back	100a
1,500	2.2~3.4	Front	100a
		Back	100a
	1.1~2.2	Front	100a
		Back	100a
	~1.1	Front	100a
		Back	100a
2,000	2.2~3.4	Front	100a
		Back	100a
	1.1~2.2	Front	100a
		Back	100a
	~1.1	Front	100a
		Back	100a

^y Different letters within columns indicate significant difference based on one-way ANOVA and Tukey's HSD test ($p<0.05$).

Table 2. Coverage of water sensitive paper (WSP) by sprayer at different speeds and heights with Standard deviation^z

Speed (km/h)	Height (m)	Location	Average±SD(%) ^z
1.8	2.2~3.4	Front	100a
		Back	100a
	1.1~2.2	Front	100a
		Back	100a
	~1.1	Front	100a
		Back	100a
3.1	2.2~3.4	Front	97.1±0.1.7 ab
		Back	98.9±0.4 ab
	1.1~2.2	Front	100a
		Back	100a
	~1.1	Front	100a
		Back	100a

^y Different letters within columns indicate significant difference based on one-way ANOVA and Tukey's HSD test ($p<0.05$).

송풍 유무에 따른 열 간 방제 비산 피복률

1,000 RPM을 기준으로 송풍 유무와 주행 속도에 따른 방제 비산 피복률을 비교한 결과(Fig. 3), 송풍 유무 및 주행 속도 조건에 상관없이 방제 열에서는 모두 100% 피복률을 보였다. 송풍을 켜 조건인 2열에서는 저속 2단(1.8 km/h)과 고속 1단(3.1 km/h)의 좌우 평균 피복률이 각각 57.6%와 50.1%로 나타났으며, 3열에서는 각각 16.8%와 18.1%로 감소하였다. 반면, 송풍을 끈 조건에서는 2열에서 평균 피복률이 저속 2단 47.7%, 고속 1단 44.9%로 나타났고, 3열에서는 각각 12.8%와 12.5%로 급격히 감소하였다. 이후 4열에서는 송풍 유무와 관계없이 피복률이 낮은 수준을 보였으나, 5열에서는 송풍을 끈 조건에서 비산액이 검출되지 않은 반면, 송풍을 켜 조건에서는 각각 1.4%와 2.5%가 확인되었다.

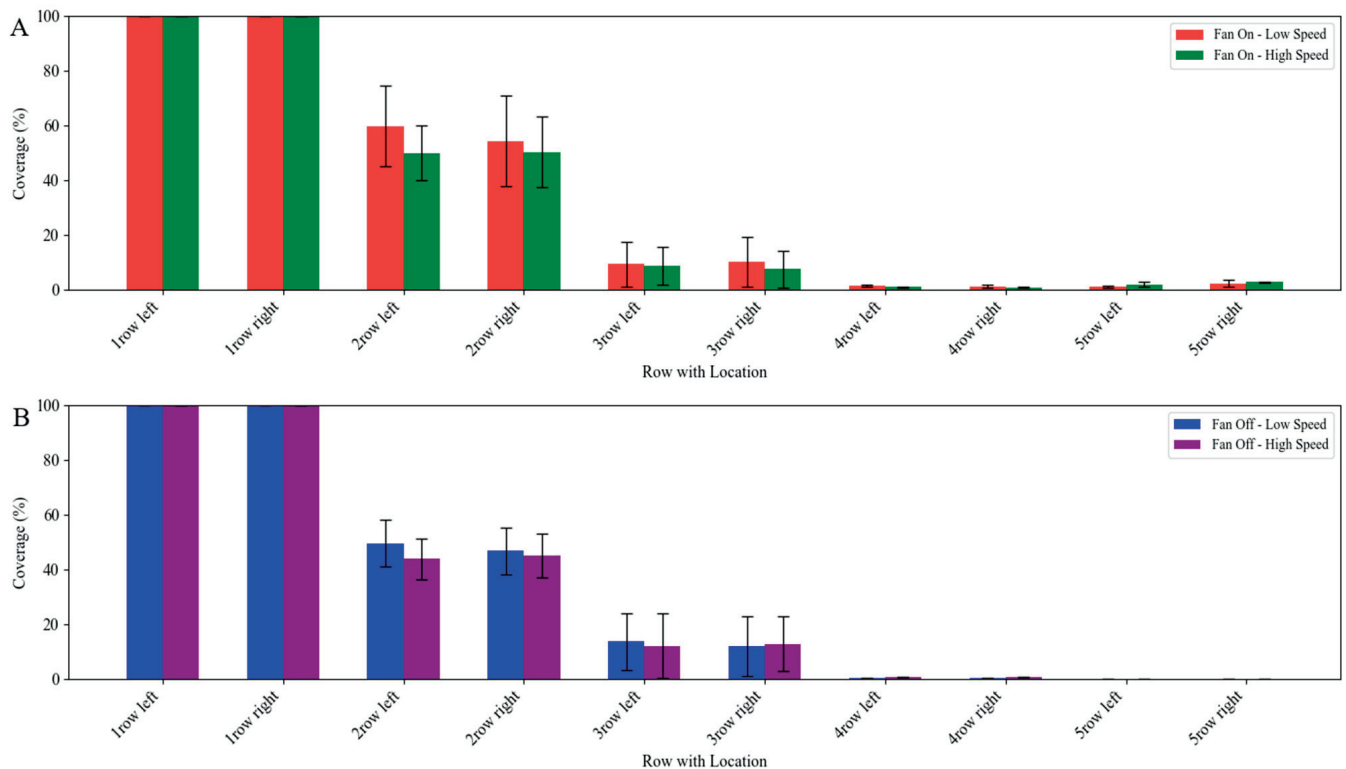


Fig. 3. Inter-row drift coverage comparison: effect of fan operation and low-speed (A) and high-speed (B) in tower sprayers.

송풍을 켜 조건에서는 물방울이 5열까지 약제가 도달한 것은 송풍이 비산량을 증가시켜 약제 낭비와 환경오염 가능성을 시사한다. 반대로 송풍을 끈 조건에서는 비산량이 급격히 감소하며 4열과 5열에서는 비산액이 거의 검출되지 않았다. 그러나 2열과 3열의 평균 피복률을 살펴보면, 송풍의 유무에 따른 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 방제기의 설계와 재식거리 특성을 고려해야 할 필요가 있다. 먼저 본 방제기의 노즐 배치는 수직(타워)형으로 설계되어 노즐의 분무가 과수 수관 내부로 침투하여 피복률을 향상시키는 장점이 있다[21]. 또한, 본 실험 과원은 2.7 m의 좁은 재식거리와 1.1 m 이하 수폭의 평면형 수관 구조로 방제기에서 분사된 약액이 송풍의 유무와 상관없이 2열과 3열까지 도달하도록 기여했을 가능성이 크다.

또한 3열에서 송풍을 끈 조건이 송풍을 켜 때보다 소폭 더 높은 평균 피복률이 나타났는데 이는 송풍의 영향이 크다고 볼 수 있다. 일반적으로 송풍 속도가 높을수록 물방울을 멀리 보내며[22], 물방울의 크기 등에 따라 분사된 약액이 바람에 의해 더 먼 거리로 이동될 수 있다. 다시 말해, 송풍을 켜 때 분사된 약액이 3열을 넘어 4, 5열로 넘어갔을 가능성이 높다. 특히, 본 시험에서 사용한 방제기의 송풍 형태는 축형(axial) 방식으로 설계되어 원형 팬(fan)의 공기 흐름이 약액을 멀리 비산시키는 방식이다. 이러한 방식은 1950년대부터 사용되어졌으나[13], 현재 수고와 수관 부피가 약 3~4 m 내외, 1.5 m 내외로 감소하여 유럽 등에서는 이러한 기존 방식이 현대 수관 구조와 맞지 않아 비산 가능성을 증가시킨다고 보고되었다. 이처럼 축형 팬에서 나오는 송풍이 수관 측면과 상단으로 약액을 살포하여 작업 속도를 높이는 데 기여하지만, 적절히 설정되지 않으면 비산 및 지면 침적이 크게 발생할 수 있다[19]. 따라서 송풍이 약액을 3열보다 더 먼 4열과 5열까지 비산시킨 것은 수관 형태, 방제기 구조와 송풍의 영향 때문으로 판단된다. 해외에서는 송풍에 의한 비산을 줄이기 위해 송풍 강도를 조절하거나 송풍을 제거하는 방안을 제안하고 있으며, tangential, multi-fan, Variable-Rate Technology (VRT) 등의 다양한 송풍 설계를 중심으로 한 정밀 방제 시스템이 개발되고 있다[23-26]. 이러한 정밀 방제 시스템은 다축형 과원 등 평면형 과원에서 최적의 효과를 나타낼 것으로 예상된다.

주행 속도와 송풍의 상호작용을 고려하면, 2열에서는 속도와 관계없이 비슷한 피복률을 보였으나, 3열 일부와 5열에서는 고속 주행에서 더 높은 피복률이 나타났다. 이는 송풍과 주행 속도가 상호작용하여 물방울의 도달 범위를 조절했음을 시사한다. 주행 속도는 물방울의 공간적 위치에 영향을 미치는 주요 요인으로[27], 특히, 고속 주행 시 물방울의 공중 체류 시간이 짧아지는 반면, 송풍의 영향으로 물방울이 더 멀리 비산된다[28,29]. 이에 본 실험에서도 송풍 유무와 상관없이 주행 속도에 따라 열 간 비산 정도가 일부 차이가 나타남을 확인하였다.

모든 조건에서 2열과 3열의 표준편차가 크게 나타난 것은 다축형 사과원의 구조적 특성과 방제 열 간 비산 특성의 차이에 기인했을 가능성이 있다. 일반적으로 다축형 수관은 좁은 수폭과 제한적인 재식 거리의 평면형 구조를 가지는데[30], 이는 약액 분포와 패턴에 큰 영향을 미칠 수 있다. CFD (Computational Fluid Dynamics) 모델 연구에 따르면, 원뿔형과 가지형 두 가지 수형에서 비산 및 퇴적 패턴에서 차이를 보였다[31]. 송풍의 속도와 방향은 수관의 크기, 잎, 밀도, 재식거리 등 구조적인 요인에 따라 조절해야 하는데[32,33], 본 시험 과원 또한 축 간 간격 차이, 과실 유무 및 결실 가지의 위치분포 차이가 공기 흐름과 약액 분사 흐름에 영향을 주었을 가능성이 있다. 이러한 요인으로 인해 피복률 변동성이 증가하고 표준 편차가 크게 나타났으며, 따라서 축 간 간격과 수관 형태에 따른 추가적인 공기 흐름 분석이 필요하다.

결론적으로, 송풍의 유무에 따라 약제가 목표 부위에 더 집중적으로 도달하며 비산을 효과적으로 억제할 수 있기 때문에 다축형 사과원에 적절한 방제 전략이 필요하다.

송풍 유무에 따른 2열의 비산 물방울 면적

물방울의 비산 특성과 크기 분포를 분석한 결과(Fig. 4), 주행 속도와 송풍 조건은 방제 효율과 환경적 영향을 결정짓는 중요한 요인으로 나타났다.

저속 2단(1.8 km/h) 주행 속도(A)에서는 송풍을 켜 조건에서 미세 물방울의 개수가 3,221개, 중간 물방울 756개, 큰 물방울 104개로 관찰되었다. 반면, 송풍을 끈 조건에서는 미세 물방울의 개수가 4,339개로 증가하였고, 중간 물방울은 454개, 큰 물방울은 검출되지 않았다. 이는 송풍을 켜 조건에서 미세 물방울이 충돌과 합병을 거쳐 중간 또는 큰 물방울로 변환되었음을 시사한다. 반면, 송풍을 끈 조건에서는 물방울의 본래 크기가 유지되며 표적 부위에 안정적으로 부착되었음을 보여준다.

고속 1단(3.1 km/h) 주행 속도(B)에서도 유사한 경향이 나타났다. 송풍을 켜 조건에서 미세 물방울의 개수는 2,449개, 중간 물방울은 181개, 큰 물방울은 35개로 나타났다. 반면, 송풍을 끈 조건에서는 미세 물방울의 개수가 4,605개로 크게 증가하였고, 중간 물방울은 19개, 큰 물방울은 검출되지 않았다. 이는 고속 주행에서도 송풍의 영향이 물방울의 비산 및 크기 증가에 중요한 역할을 했음을 보여준다. 방제 시 물방울의 크기와 범위를 고려해야 하는데[34], 신젠타(Syngenta)에서 제시한 적정 물방울 면적에 따르면, 본 시험에서 가장 많이 피복된 미세 물방울은 살균제와 살충제의 적정 피복 기준(20~30 drops/cm², 50~70 drops/cm²)을 충족시킨다. 특히 송풍을 끈 조건에서 더 많은 미세 물방울이 유의미하게 많다는 것을 가정하면, 다축 방제 시 송풍을 조절할 필요가 있다.

이처럼 송풍을 켜 조건에서는 강한 공기 흐름이 미세 물방울의 충돌과 합병을 촉진하여 중간 및 큰 물방울의 비율이 증가하였다. 반면, 송풍을 끈 조건에서는 물방울이 본래의 크기를 유지하며 표적 부위에 균일하게 분포할 가능성이 높았다. 이러한 결과는 송풍 사용이 물방울 크기와 비산 패턴에 미치는 영향을 강조하며, 송풍 제거가 비산 억제와 방제 효율 향상에 기여할 수 있음을 보여준다. 노즐에서 분사된 물방울 크기는 노즐 종류와 공기 흐름 속도에 따라 달라지는데[35], 송풍 등 공기 흐름 속도가 클수록 큰 물방울 형태가 더 많이 생성된다[19]. 이에 주행 속도보다 송풍 유무가 물방울 액적 형상에 더 많은 기여를 했을 것으로 보인다. 따라서 다축형 사과원에서는 송풍 조건에 따라 물방울 분포와 비산 특성이 크게 달라질 수 있어 다축형 사과원의 평면형 구조에서는 방제기 운용 방법에 따라 송풍이 없는 방제 조건에서 더욱 균일한 분포를 기대할 수 있다.

본 연구는 다축형 사과원에서 타워형 방제기 이용 시 회전수 및 주행 속도와 송풍 조건이 방제 효율과 물방울 크기 분포에 미치는 영향을 분석하여 다축형 사과원의 효율적인 방제 전략 수립을 위한 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 하였다.

실험 결과, 방제 열 간 수관 내에서 높은 피복률이 유지되었으나, 약제 종류에 따라 과잉 방제에 대한 우려가 있을 가능성이 제기되었다. 또한, 방제 열 외 비산 정도와 2열 비산 물방울 면적 분석 결과에서는 방제기 운용 조건에 따라 달라지나, 기본적으로 송풍을 끄는 것이 비산을 약제 오용을 줄이는 데 효과적임을 확인하였다. 이는 기존 세장방추형 재배 체계와 달리 수폭이 1.1 m 이하로 좁은 다축형 사과원의 구조적 특성을 고려한 방제 조건 최적화의 중요성을 시사하며, 지속 가능한 농업 실천에 기여할 수 있는 유용한 자료로 활용될 수 있다. 다만, 본 연구는 실험 환경에서 물을 사용하여 진행되었기 때문에 실제 약제를 사용할 경우나, 방사형 방제기를 사용했을 때, 일부 결과가 달라질 가능성이 있다. 따라서 향후 연구에서는 약제의 물리적 특성(점성, 밀도 등)이 방제 효율과 비산에 미치는 영향을 분석하고, 방제 열에 대한 적정 피복률 검정을 추가로 진행하는 것이 필요하다. 이에 본 연구는 타워형 방제기를 이용하여 송풍 유무, 주행 속도 등 방제기 운용의 조건 분석으로, 미래 재배체제로 평가받는 다축형 과수원에 최적화된 방제 조건을 구체화하고, 이를 자동화 또는 정밀 농업 기술과 연계할 수 있는 연구의 기초를 마련하고자 하였다.

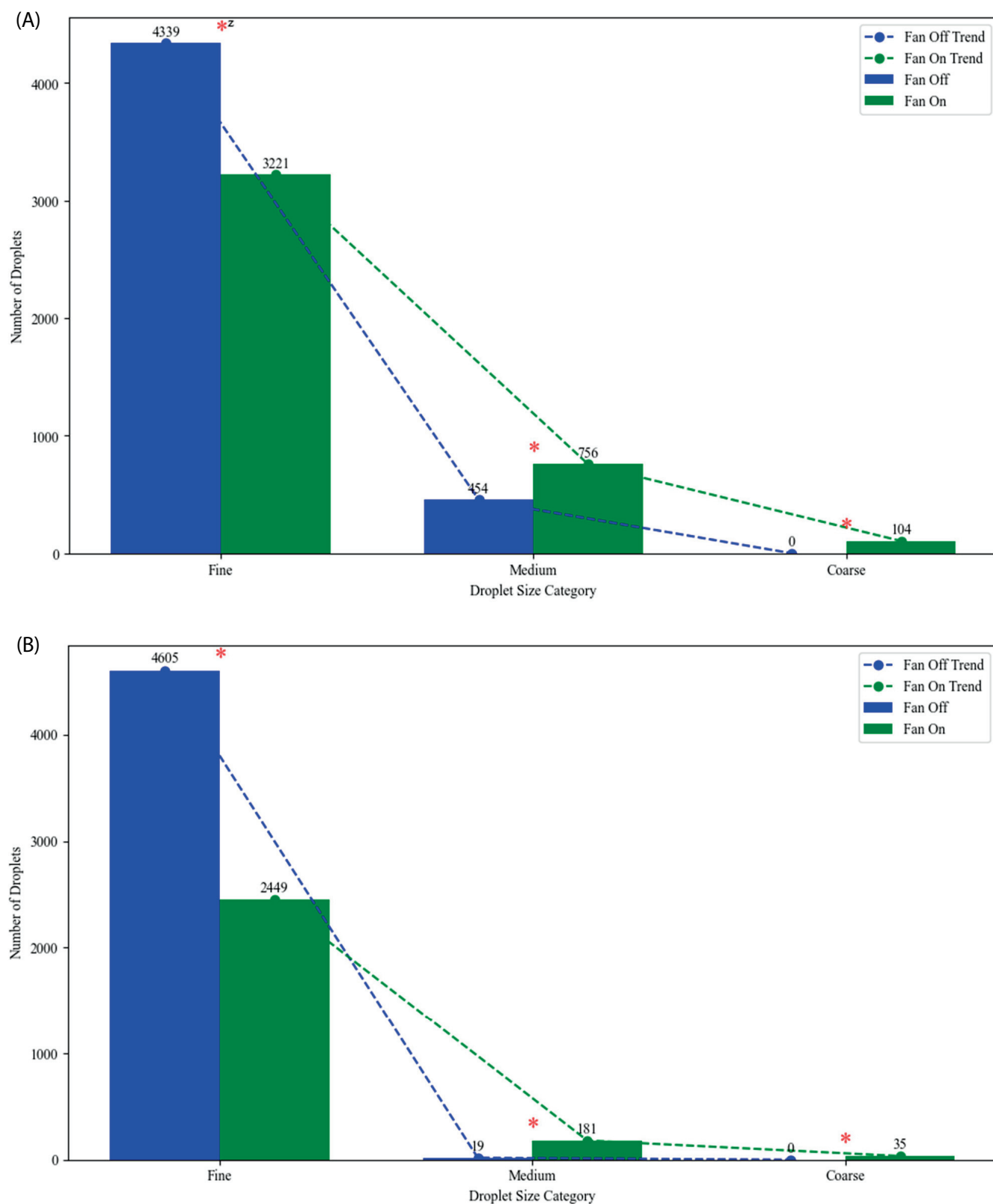


Fig. 4. Effect of fan operation on droplet size distribution under low-speed (A) and high-speed (B) conditions in multi-axis apple orchard spraying.

Different letters within columns indicate significant difference based on one-way ANOVA and Tukey's HSD test ($p < 0.05$).

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

Author Contributions: J.H.J conceived and designed the research, led the experiment, and drafted the manuscript; B.G.C conducted the experiment, collected and analyzed the data; S.H.B supervised the project, reviewed and revised the manuscript, and approved the final version for submission.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: This research was supported by Kyungpook National University Research Fund, 2023.

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.08>

Correspondence and requests for materials should be addressed to Seunghyun Ban.

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

- Hampson C, Quamme H, Kappel F, Brownlee R (2004) Varying density with constant rectangularity: I. effects on apple tree growth and light interception in three training systems over ten Years. *HortScience*, 39(3), 501-506. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.39.3.501>.
- Robinson TL, Hoying S, Reginato G (2011) The tall spindle planting system: Principles and performance. *Acta Horticulturae*, 903, 571-579. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.903.79>.
- Yang S, Park M, Song Y, SaGong D, Yoon T (2009) Influence of tree height on vegetative growth, productivity, and labour in slender spindle of 'Fuji'/M. 9 apple trees. *Journal of Bio Environment Control*, 18(4), 492-501. <https://doi.org/10.7235/hort.2015.13190>.
- Robinson T (2011) Advances in apple culture worldwide. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 33, 37-47. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000500006>.
- Marini RP, Fazio G (2018) Apple rootstocks: History, physiology, management, and breeding. *Horticultural Reviews*, 45, 197-312. <https://doi.org/10.1002/9781119431077.ch6>.
- Cain JC (1970) Optimum tree density for apple orchards. *Horticultural Science*, 5, 232-234.
- Dorigoni A, Micheli F (2018) Guyot training: A new system for producing apples and pears. *European Fruit Magazine*, 2, 18-23.
- Park IH, Han SG, Kim CS, Jeong YJ, Jeon JH, Yoon TM (2024) Early performance of multi-leader apple training systems in Korea. *Horticultural Science and Technology*, 42(1), 104-116. <https://doi.org/10.7235/HORT.20240009>.
- Choi BH, Kim C, Jeong YJ, Jeon JH, Shin BY, Yoon T (2023) Configuration of the tree shape in a bi-axis apple orchard using 'Fuji'/M.9 grafted plants – Tree growth and productivity during early years according to the planting distance. *Horticultural Science and Technology*, 41(5), 560-570. <https://doi.org/10.7235/HORT.20230048>.
- Dorigoni A, Lezzer P, Dallabetta N, Serra S, Musacchi S (2011) Bi-axis: An alternative to slender spindle for apple orchards. *Acta Horticulturae*, 903, 581-588. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.903.80>.
- Musacchi S, Iglesias I, Neri D (2021) Training systems and sustainable orchard management for European pear (*Pyrus communis* L.) in the Mediterranean area: a review. *Agronomy*, 11(9), 1765. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091765>.
- Lešnik M, Stajniko D, Vajs S (2015) Interactions between spray drift and sprayer travel speed in two different apple orchard training systems. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(9), 3017-3028. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0724-7>.
- Fox R, Derksen R, Zhu H, Brazee R, Svensson SA (2008) A history of air-blast sprayer development and future prospects. *Transaction of the ASABE*, 51(2), 405-410. <https://doi.org/10.13031/2013.24375>.
- Law SE, Cooper SC (1988) Depositional characteristics of charged and uncharged droplets applied by an orchard air carrier sprayer. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 31(4), 984-989. <https://doi.org/10.13031/2013.30810>.
- Carazo-Rojas E, Pérez-Rojas G, Pérez-Villanueva M, Chinchilla-Soto C, Chin-Pampillo JS, Aguilar-Mora P, Alpizar-Marín M, Masís-Mora M, Rodríguez-Rodríguez CE et al. (2018) Pesticide monitoring and ecotoxicological risk assessment in surface water bodies and sediments of a tropical agro-ecosystem. *Environmental Pollution*, 241, 800-809. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.020>.
- Damalas CA, Eleftherohorinos IG (2011) Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. *International Journal Environmental Research and Public Health*, 8(5), 1402-1419. <https://doi.org/10.3390/ijerph8051402>.

17. Salyani M, Zhu H, Sweeb R, Pai N (2013) Assessment of spray distribution with water-sensitive paper. *Agricultural Engineering International*, 15(2), 101-111.
18. Salyani M, D. Fox R (1999) Evaluation of spray quality by oil and water-sensitive paper. *Transactions of the ASAE*, 42(1), 37-43. <https://doi.org/10.13031/2013.13206>.
19. Garcera C, Moltó E, Izquierdo H, Balsari P, Marucco P, Grella M, Gioelli F, Chueca P (2022) Effect of the airblast settings on the vertical spray profile: Implementation on an on-line decision aid for citrus treatments. *Agronomy*, 12(6), 1462. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061462>.
20. Salyani M (2000) Optimization of deposition efficiency for airblast sprayers. *Transactions of the ASAE*, 43, 247-253. <https://doi.org/10.13031/2013.2699>.
21. Panneton B, Lacasse B, Thériault R, Thériault A (2005) Penetration of spray in apple trees as a function of airspeed, airflow, and power for tower sprayers. *Canadian Biosystems Engineering* 47(2), 2-13.
22. Grella M, Marucco P, Balsari P (2019) Toward a new method to classify the airblast sprayers according to their potential drift reduction: Comparison of direct and new indirect measurement methods. *Pest Management Science*, 75(8), 2219-2235. <https://doi.org/10.1002/ps.5354>.
23. Khot L, Ehsani R, Maja JM, Campoy J, Wellington C, Al-Jumaili A (2014) Evaluation of deposition and coverage by an air-assisted sprayer and two air-blast sprayers in a citrus orchard. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 57, 1007-1013. <https://doi.org/10.13031/trans.57.10419>.
24. Friso D (2016) Design of the optimized and downsized axial fan for the air carrier orchard sprayers. *Contemporary Engineering Sciences*, 9(23), 1137-1149. <https://doi.org/10.12988/CES.2016.66117>.
25. Kasner EJ, Fenske RA, Hoheisel GA, Galvin K, Blanco MN, Seto EY, Yost MG (2018) Spray drift from a conventional axial fan airblast sprayer in a modern orchard work environment. *Annals of Work Exposures and Health*, 62(9), 1134-1146. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxy082>.
26. Triloff P, Knoll M, Lind K, Herbst E, Kleisinger S (2013) *Low Loss Spray Application-The Scientific Basis*. pp. 127-134, 4th edition. Julius-Kühn-Archiv, South Tyrol, Italy.
27. Musiu EM, Qi L, Wu Y (2019) Evaluation of droplets size distribution and velocity pattern using computational fluid dynamics modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*, 164, 104886. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104886>.
28. Dai S, Ou M, Du W, Yang X, Dong X, Jiang L, Zhang T, Ding S, Jia W (2023) Effects of sprayer speed, spray distance, and nozzle arrangement angle on low-flow air-assisted spray deposition. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1184244. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1184244>.
29. Van J, Stallinga H, Michielsen J, Van Velde P (2005) Effect of sprayer speed on spray drift. *Annual Review of Agricultural Engineering*, 4(1), 129-142.
30. Dorigoni A, Micheli F (2019) Development of a cultivation system for multi-leader trees. *European Farming Model*, 5, 8-13.
31. Hong SW, Kim RW (2024) CFD modeling of pesticide flow and drift from an orchard sprayer. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 60(3), 27-36. <https://doi.org/10.5389/KSAE.2018.60.3.027>.
32. Balsari P, Marucco P, Oggero G, Tamagnone M (2008) Study of optimal air velocities for pesticide application in vineyard, *Aspects of Applied Biology*, 84(6), 417-423.
33. Balsari P, Marucco P, Oggero G, Tamagnone M (2008) Study of Optimal air Velocities for Pesticide Application in Vineyard, pp. 417-423, Association of Applied Biologists, UK.
34. Fessler L, Fulcher A, Lockwood D, Wright W, Zhu H (2020) Advancing sustainability in tree crop pest management: Refining spray application rate with a laser-guided variable-rate sprayer in apple orchards. *HortScience*, 55(9), 1522-1530.
35. Czaczuk Z (2012) Influence of air flowdynamics on droplet size in conditions of air-assisted sprayers. *Atomization and Sprays*, 22, 275-282. <https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.v22.i4>.