

타워형 방제기를 활용한 밀식 사과원 저약량 방제 효과 분석

전종훈, 신배연, 윤태명, 반승현*

Effectiveness of Low-Volume Spraying with Tower-Type Sprayers in High-Density Apple Orchards

Jong Hoon Jeon , Bae Yeon Shin , Tae Myung Yoon  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.2024.43.31>

Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 326-335

Received: November 18, 2024

Revised: November 28, 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.

Abstract: Despite advancements in apple orchard systems, pesticide application volumes in Korea remain stagnant, ranging from 2,500 to 4,000 L/ha, often without specific guidelines. High pesticide volumes increase costs, pose health risks, and contribute to environmental degradation through drift. This study evaluated a tower-type sprayer's performance in high-density apple orchards, comparing low-volume (2,500 L/ha) and high-volume (4,000 L/ha) applications. Key metrics included drift, canopy coverage, mite density, and cost analysis. The results showed 1,500 RPM for 2,500 L/ha reduced drift compared to 2,000 RPM for 4,000 L/ha, though both exhibited drift up to 8 meters. Canopy coverage exceeded 80% across treatments, ensuring effective pesticide distribution. Mite density was controlled effectively with no significant differences, and fruit quality remained consistent. Economic analysis revealed total costs of 606,680 KRW for 2,500 L/ha and 1,111,760 KRW for 4,000 L/ha, indicating that the low-volume spraying reduced total costs by approximately 46% compared to the high-volume treatment, primarily due to decreased pesticide use, fuel, and labor. These findings suggest 2,500 L/ha is a cost-efficient and sustainable option, reducing environmental impact and resource use. Further research should address diverse pest species and adapt strategies for evolving orchard systems.

Keywords: High-density apple cultivation, Pest management, Pesticide drift, Pesticide spray volume, Tower sprayer

서 언

우리나라의 밀식 사과 재배 체계는 1996년 M.9 대목 도입과 함께 “신 경북형 사과 생산 체계 개발에 관한 연구”와 “사과 고밀식 왜화 재배용 수형 개발 연구”를 기반으로 발전해 왔다. 이후 키 큰 세장방추형(Tall spindle) 및 다축형(Multi-lead-er) 등 다양한 밀식 재배 체계를 도입하여 조기 다수확과 고품질의 과실 생산을 목표로 선진 사과 재배 환경을 구축하고, 관리 효율성을 증대하는 데 기여하고 있

다[1,2]. 이처럼 재배 환경 변화에 따라 농약 사용 방법 또한 변화가 필요하지만, 현재 사과원 내 농약 살포량은 지난 15여 년간 4,000 L/ha로 크게 변하지 않았다[3,4]. 재배 환경에 맞지 않는 농약 사용은 결국 과다 노출로 이어져 작업자의 건강을 해치고, 농산물의 안전성과 생산비 증가의 문제를 초래한다[5]. 또한 이로 인해 발생하는 농약 비산(drift)은 식생 자원에 부정적인 영향을 끼치는 것으로 여겨진다[6]. 이에 해외에서는 비산량 감소와 수관 내 균일한 살포가 가능한 타워형 방제기를 도입하여 농약 사용량을 절감하고 환경적 영향을 줄이는 노력을 기울여왔다[7]. 특히, 타워형 방제기는 방사형 방제기에 비해 농약이 수관에 고르게 분포되어[8], 비산을 효과적으로 줄일 수 있어 과원 적정 약량 살포와 농약 허비 감소에 적합하다[9,10].

국내에서도 최근 밀식 사과원에서 타워형 방제기를 활용한 연구가 진행되고 있으며, 기존 축형(axial) 방제기 대비 약 20% 더 높은 살포 효율을 보여주고 있다[11,12]. 이처럼 타워형 방제기는 국내에서도 약량 절감과 환경 개선에 큰 효과를 나타내고 있지만, 현재 관련 연구가 부족하고, 특히 기존 연구도 살포 효율을 물을 이용해 평가하는 방식으로 진행되어 농약 비산에 대한 분석이나 실제 농약 살포 시의 효율성은 다루지 못했다. 이러한 한계로 인해 타워형 방제기의 실제 현장 적용 시 농약 사용 효율성이나 환경적 영향을 구체적으로 평가하기 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는 타워형 방제기를 이용해 1년 동안 2,500 L/ha와 4,000 L/ha의 농약 살포량을 비교함으로써, 국내 밀식 사과원 환경에서 농약 비산 정도 및 적정 살포량을 도출하고자 한다. 이를 통해 타워형 방제기의 농약 절감 효과, 환경적 효율성, 경제적 이점을 구체적으로 평가하고, 국내 사과원에 적합한 방제 기준을 마련하는 데 기여하고자 한다.

재료 및 방법

시험 과원 설정

시험 과원은 경상북도 청송군 안덕면에 위치한 10년생 ‘Fuji’/M9 (*Malus domestica* Borkh.) 사과원으로, 나무 간 간격은 4.0 × 2.0 m이며, 평균 수고는 4.3 m, 평균 수폭은 2.3 m로 나타났다.

살포 구획은 저약량 처리구(2,500 L/ha)와 고약량 처리구(4,000 L/ha)로 나누어 총 3구획으로 설정하였으며, 각 약량 처리구 획 간 혼입을 방지하기 위해 완충지(2,500 L/ha)를 8열로 설정하였다. 살포 약량은 국내 사과원의 평균 방제 약량과 농촌진흥청의 농약 인축독성 시험 성적서를 기준으로 설정하였다[3,4]. 각 약량 처리구는 생육 시기, 환경, 방제기 운용 조건에 따라 ±50 L의 차이를 두었다.

또한 방제 시 기후의 영향을 최소화하기 위해 풍속이 2 m/s 이하일 때 방제를 진행하였으며, 장마철과 같은 긴급 방제를 제외한 모든 방제는 오전 7시에서 9시 사이에 실시하였다.

방제기 운용 설정

본 시험에서 사용한 방제기는 2008년에 국내에서 축형 방제기로 제작되어 2022년 타워형으로 사용 농가에서 분사 노즐 위치를 개조하였다. 본 개조 방제기는 기존 방제기에 1.5 m의 타워형 노즐을 배치함으로써 약액을 더 높은 곳까지 분사하도록 하였다(Table 1). 단위 면적 당 살포 물량에 맞는 적정한 방제 운용을 설정하기 위해 본 실험에서는 Equation 1의 공식을 활용하였고[13], 각 약량에 맞는 설정값을 대입하여 방제기를 운용하였다(Table 2).

Table 1. Technical characteristics of the sprayer used in this study

Classification	Airblast sprayer
Spray type	Axial/Tower
Machine year (modified)	2008 (2021)
Tank capacity (L)	500
Fan type	Axial
N° of nozzles	21
Max height (mm)	1,820

Table 2. RPM, nozzle pressure, and speed at different spray volumes in the High-Density apple orchard system

Spray Volume (L/10a)	RPM	Nozzle Pressure (Mpa)	Speed (Km/h)
2,500	1,500	1.5	2.2
4,000	2,000	2.0	1.2

방제 운용 차이에 따른 살포 약량 측정

이번 실험은 설정한 두 약량 중 적절한 살포 약량을 확인하기 위해 진행하였다. 잎의 앞·뒷면의 약제 피복률(%)을 평가하기 위해, 과원 내 정상적인 생육을 보이는 나무를 선정하고 수고와 수폭에 따라 수관을 총 9구역으로 나누어 감수지를 부착하였다 (Fig. 1). 각 구역은 상·중·하로 나누고, 각 구역 내에서 잎의 앞면과 뒷면에 각각 감수지를 부착하였다. 방제기 운용 설정에 따라 양방향으로 모두 주행하며 각각 1회씩 살포하였으며, 살포 후 감수지를 완전히 건조한 뒤 각 위치별로 구분하여 밀폐 봉투에 보관하였다. 감수지 수관 피복률 분석은 Scanner (Samsung, SL-C483)를 이용하여 600 dpi 해상도로 컬러 스캔한 후 Jpeg 파일 형태로 저장하였다. 저장된 Jpeg 형태의 파일은 ImageJ program (US National Institutes of Health, Maryland, USA)을 통해 8-bit로 흑백 변환한 후 프로그램 내 Threshold 기능을 이용하여 흑백으로 표현하였다. 변환된 감수지는 픽셀 크기(0-infinity)와 원형도 (0.00~1.00)를 조정하여 감수지 피복율을 측정하였다.

응애 밀도 비교 분석

본 연구에서는 살포 약량에 따른 농약과 생물 간의 관계성을 평가하기 위해, 사과원에 발생하는 잎응애과(Trtranychidae) 중 점박이응애(*Tetranychus urticae* Koch)의 생육과 밀도를 관찰하여 약량별 응애 분포 밀도의 변화를 비교하고 방제 효과를 검증하였다. 응애 방제에 사용한 약제는 Abamection 유효 성분 등을 포함한 시중 판매되는 약제로 응애 밀도 예찰에 따라 총 4회 살포하였으며, 약액 희석 시 각 제조사의 안내 기준을 참고하여 제조하였다. 응애 분포 밀도 조사는 각 살포 구역 내 생육이 고른 10주의 나무를 대상으로, 응애 발생이 가장 많은 4월부터 9월까지 일주일 간격으로 휴대용 현미경을 사용해 현장에서 예찰 하였다. 또한, 각 구역에서 어린잎과 성숙 잎을 무작위로 100장 채취하여 실체 현미경으로 응애 밀도를 분석하였다. 밀도 조사는

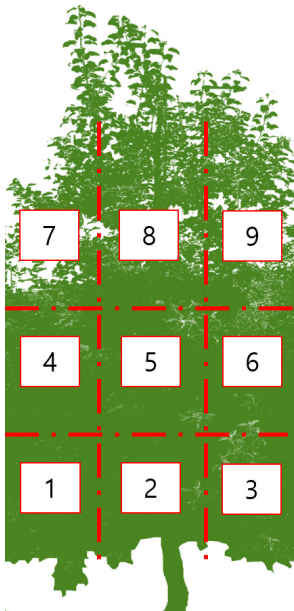


Fig. 1. Placement of water-sensitive papers in different canopy sections for spray coverage analysis. Water-sensitive papers were attached to different canopy sections of the tree to assess spray coverage. The canopy was divided into nine distinct zones: lower (0.0-1.5 m), middle (1.6-3.0 m), and upper (3.1-4.3 m) parts of the tree.

Each of these height ranges was further divided into left, middle, and right sections of the canopy. This setup allows for the evaluation of spray distribution across both vertical and horizontal planes within the tree canopy.

농촌진흥청의 응애 예찰 방법을 참고하여 수행하였으며, 현장 예찰 밀도가 40~60%에 도달할 경우 농가에 방제를 권고하는 기준을 적용하였다.

방제 운용 차이에 따른 비산 시험

비산 시험은 실험 설계에 따라 각 방제 운용 설정에 따른 살포 확산 정도를 평가하기 위해 진행되었다. 특히, 방제기의 회전수(RPM) 차이는 송풍 팬의 속도와 농약 분사량에 영향을 미치기 때문에, 이를 비교하기 위해 2,500 L/ha 조건에서 1,500 RPM, 4,000 L/ha 조건에서 2,000 RPM을 사용하여 비산 평가 시험을 계획하였다. 감수지(76 × 52 mm, Syngenta, Basel, Switzerland)는 5 m 높이의 막대에 1 m 간격으로 부착하고, 목표 열에서 2열 간격(-8 m), 4열 간격(-16 m), 6열 간격(-24 m) 떨어진 위치에 설치하였다. 방제기는 각 설정 조건에 따라 운용되었으며, 2,500 L/ha 처리구는 2.2 km/h, 4,000 L/ha 처리구는 1.2 km/h의 속도로 양방향으로 1회씩 주행하며 살포를 3회 진행하였다. 살포 후 감수지는 완전히 건조된 후 각 위치별로 구분하여 밀폐 봉투에 보관하였다. 피복률 분석은 살포 약량 시험과 동일하게 ImageJ 프로그램을 이용하여 진행하였으며, 각 위치별 평균 피복률과 표준편차를 계산하였다.

과실 품질 분석

과실 품질 분석은 각 약량 처리구(2,500 L/ha 및 4,000 L/ha)에서 채취한 사과를 대상으로 경도, 당도, 산도를 측정하여 약량 차이에 따른 과실의 품질 변화를 평가하였다. 과실은 각 처리구 내 10주에서 각각 무작위로 9개의 과실을 11월 16일에 수확하여 품질 분석을 진행하였다. 모든 품질 지표는 각 과실당 3회 반복 측정한 평균값을 산출하여 신뢰성을 높였다.

과실의 경도는 과실 경도 측정기(CN/GY-4, Tsingtao Toky, China)를 사용하여 7.9 mm 직경의 헤드로 측정하였다. 과실의 적도 부위를 기준으로 120° 간격으로 3회 측정한 후, 각 과실의 평균 경도를 계산하였다. 측정된 경도는 kg/cm² 단위로 표현하였다.

과실의 가용성 고형물 함량(SSC)은 디지털 굴절계(PAL-BX/ACID5, Atago, Japan)를 사용하여 측정하였다. 각 과실의 3개 부위에서 즙을 채취하여 120° 간격으로 추출된 과즙을 통해 평균 당도를 구하였다. 당도는 °Brix 단위로 표현하였다.

산도(TA)는 1% 페놀프탈레인 용액 1 ml를 첨가한 5 ml의 과즙을 0.1 N NaOH 용액으로 적정하여 측정하였다. 결과는 사과산(malic acid)으로 환산하여 %로 나타내었다.

방제경제분석

본 연구에서 각 약량 처리에 따른 방제 비용을 평가하기 위해, 각 처리 구역에서 발생한 농약 비용, 주유비, 인건비 등을 산출하여 비교 분석하였다.

농약 비용은 살포 약량에 맞는 적정 농약량을 기준으로 응애 방제시 발생한 4회분을 계산한 것을 기준으로 산정하였다. 주유비는 방제 시 운용에 필요한 연료 소비량을 기준으로 각 처리구 구역 간 차이를 고려하여 계산하였다. 인건비는 각 약량 설정에 따른 작업 시간에 따라 비용을 산출하였으며, 노동 비용은 동일한 시간 단가를 적용하여 계산하였다.

통계처리

본 연구 데이터 분석은 Python 3.11.2 (Python Software Foundation, USA)를 사용하여 수행되었으며, 약량 처리구 간 농약 피복률, 비산율, 응애 밀도 차이를 검증하기 위해 Welch의 t-검정(Welch's t-test)을 사용하였다. 분석 결과는 $p < 0.05$ 수준에서 통계적 유의미함을 나타내었다.

결과 및 고찰

살포 약량에 맞춘 방제기 운용 설정

살포 약량이 다르면 방제기의 주요 운용 변수를 조정해야 하는데, [13]에서 제시하는 Equation 1에 따라 계산한 결과, 2,500 L/ha 처리구에서는 1,500 RPM, 노즐 압력 1.5 MPa, 주행 속도 2.2 km/h로, 4,000 L/ha 처리구에서는 2,000 RPM, 노즐 압력

2.0 MPa, 주행 속도 1.2 km/h로 설정되었다(Table 2). 4,000 L/ha 처리구와 동일한 2,000 RPM을 2,500 L/ha 처리구에도 적용하려면 주행 속도를 높여야 했으나, 밀식 사과원의 구조적 특성과 물리적 환경을 고려했을 때, 높은 주행 속도는 사고 위험을 증가시킬 수 있다고 판단하였다. 이에 따라 주행 속도를 상대적으로 낮게 설정하면서도, 회전수 조절을 통해 분사 거리와 분포 균일성을 최적화하였다.

$$\text{Spray volume (L/ha)} = \frac{\text{Flow rate (L/min)} \times \text{Factor (600)} \times \text{Open nozzles (pieces)}}{\text{Row width} \times \text{Tractor speed (km/h)}} \quad (1)$$

본 연구에서 활용한 살포 약량 공식은 주요 운용 변수를 기반으로 설계되었으며, 교정 과정을 통해 다양한 환경 조건에서도 농약의 효율성을 유지할 수 있다. 따라서 회전수, 노즐 압력, 주행 속도 등의 운용 변수가 다소 달라지더라도 과원 내 동일한 살포 약량을 보장할 수 있으며[13], 이를 적절히 조정함으로써 과원 내에서 최적의 방제 효과를 얻을 수 있다. 특히 국내에서는 이러한 공식과 방제기 운용 방식을 실제로 적용한 사례가 드물며, 농업 현장에서의 실질적인 활용 역시 매우 제한적이어서 추가적인 연구와 실험적 검증이 필요하다.

결론적으로 본 연구는 회전수와 주행 속도의 조합을 통해 농약 효율성과 안전성을 동시에 확보하고자 하였으며, 본 공식을 통해 계산된 운용 변수는 다양한 환경 조건에서도 일관된 방제 성능을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

방제 운용 차이에 따른 살포 약량 측정

나무 수고에 따른 살포 약량별 피복률 분석을 살펴보면(Table 3), 2,500 L/ha 잎 앞면 하단부(0.0~1.5 m)의 평균 피복은 100%를 기록하였으며, 중단부(1.6~3.0 m)는 88.7%, 상단부(3.1~4.3 m)는 약 80%로 나타났다. 잎 뒷면에서는 하단부가 96.3%, 중단부가 85.9%, 상단부가 81.4%의 피복률을 보였다. 4,000 L/ha 처리에서는 잎 앞면 하단부의 평균 피복률이 99.2%, 중단부가 96.8%, 상단부가 89.1%로 나타났으며, 잎 뒷면에서는 하단부가 100%, 중단부가 95.1%, 상단부가 86.2%로 나타났다.

두 약량 간 피복률 차이는 통계적으로 유의미하였으며, 1999년 국립원예특작과학원에서 제시한 점박이 응애 방제 기준 적정 감수지 피복률인 75%를 고려할 때, 2,500 L/ha 처리로도 충분한 방제가 가능할 것으로 판단된다. 이에 본 실험의 살포 약량과 응애 밀도 비교 분석 결과와 상호 연계할 수 있다. 또한 점박이응애는 주로 잎 뒷면에 서식하므로 잎 뒷면의 피복률이 방제에 중요한 요소이다. 그러나 본 실험에서는 잎 앞면과 뒷면의 피복률 차이가 크지 않았으며, 약량 증가에 따른 피복률 차이도 비교적 작게 나타났다. 다만, 이 연구는 국내에서 일반적으로 사용하는 방사형 방제기가 아닌 타워형 방제기를 사용하였으므로 방제기 형태에 따라 피복률 결과가 달라질 수 있다[11].

감수지는 농약 분무 품질을 평가하기 위한 유용한 도구로 분무 조정과 같은 수관 내 방제의 신뢰성 있는 데이터를 제공할 수 있다[14]. 방제 시 감수지의 적정 피복률은 기후 및 조건에 따라 상이하지만, 캐나다 등 북미 지역은 20~50%로 제시한다. 그러나 본 실험은 앞선 점박이 응애 방제를 기준으로 이 범위에 속하는 감수지가 전체 실험한 감수지 중 비율이 70% 이상일 때, 농약 처리가 효과적이라고 판단하였다. 이처럼 연구자들 간 감수지 피복률에 대한 이견이 나타나는 이유는 기후, 수형, 병해충, 농약, 방제기 특성 등의 다양한 요인에 따라 적정 피복률이 달라질 수 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 점박이

Table 3. Canopy coverage rates under different spray volumes in the High-Density apple orchard system

Location	Height (m)	Average (%) $\pm$ SD ^{a)}	
		2,500 L/ha ^{b)}	4,000 L/ha
Front	3.1 ~ 4.3	79.3 $\pm$ 7.3 b	89.1 $\pm$ 3.9 a
	1.6 ~ 3.0	88.7 $\pm$ 5.1 b	96.8 $\pm$ 2.9 a
	0.0 ~ 1.5	100 a	99.2 $\pm$ 0.2 a
Back	3.1 ~ 4.3	81.4 $\pm$ 4.1 a	86.2 $\pm$ 5.7 a
	1.6 ~ 3.0	85.9 $\pm$ 4.6 b	95.1 $\pm$ 2.4 a
	0.0 ~ 1.5	96.3 $\pm$ 3.2 b	100 a

^{a)} Standard deviation (SD) represents the variation within the same height.

^{b)} Different letters within columns indicate significant differences based on Welch's t-test ($p < 0.05$).

응애를 중심으로 방제 피복률을 평가하였으나, 다양한 병해충에 대해 적정 감수지 피복률을 도출하는 추가 연구가 필요하다.

또한, 본 연구에서 설정한 회전수, 노즐 압력, 주행 속도는 기존 연구에서 확인된 타워형 방제기의 장점과 방사형 방제기와의 차이를 반영하여 선정되었다. [11]의 연구에 따르면, 타워형 방제기는 방사형 방제기에 비해 송풍 팬의 회전 방향과 노즐 배치가 더 고르게 분사될 수 있도록 설계되어 밀식 사과원과 같은 좁은 수관 구조에서 높은 방제 효율을 나타낸다. 타워형 방제기의 회전수와 노즐 압력을 조절함으로써 방제 범위를 효과적으로 조정할 수 있으며, 본 연구에서는 약량별 방제 효과를 극대화하기 위해 2,500 L/ha에서는 1,500 RPM과 1.5 MPa, 4,000 L/ha에서는 2,000 RPM과 2.0 MPa로 설정하였다. 이와 같은 설정은 타워형 방제기의 분사 특성과 밀식 사과원의 구조적 특성에 맞춰 방제 효과를 최적화하고 자원 절감을 실현하기 위한 시도로 볼 수 있다.

점박이 응애 발생 밀도 비교 분석

4월부터 9월까지 각 약량 구획의 주간별 응애 발생 밀도를 비교 분석한 결과는 Fig. 2에 나타나 있다. 첫 번째 방제와 두 번째 방제 사이인 4월 14일부터 6월 2일 이전까지는 2,500 L/ha 처리에서 4,000 L/ha 처리에 비해 응애 밀도가 빠르게 상승하는 경향을 보였으나, 5월 26일 두 약량의 평균 응애 밀도는 각각 52%와 56%로 비슷한 수준이었다. 6월 2일부터 7월 14일까지 두 약량 간 차이는 크지 않았고, 7월 21일 방제 후에는 응애 밀도가 급격히 감소하였다. 이후 두 약량 모두 최고 40%의 응애 밀도를 기록하였으나, 약량 간 유의미한 차이는 확인되지 않았다. 이러한 결과는 두 약량 모두 점박이 응애 방제에 충분한 효과를 보였음을 시사한다.

본 연구는 응애 발생율을 바탕으로 방제 효과를 간접 평가하였으며, 이는 응애 밀도가 일정 수준 이하로 유지되거나 낮아지는 결과를 통해 방제가 효과적임을 나타낸다. 특히 2,500 L/ha의 낮은 약량에서도 발생율이 높지 않은 점은 방제 효과가 안정적으로 유지되고 있음을 보여준다. 점박이응애는 전 세계적으로 농작물의 주요 해충으로, 고온 및 짧은 생육 주기로 인해 방제가 중요한 해충으로 꼽히며[15], 최근에는 이상 기후와 약제 저항성 발달로 인해[16], 점박이응애 관리의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 본 연구 결과, 두 약량 모두에서 점박이 응애 발생율이 적정 수준으로 유지되었으며, 농촌진흥청의 인축독성평가 방제 기준을 충족하는 수준으로 관리가 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

방제 효과는 방제기 형태, 분사 특성, 수형, 기상 등의 복합적인 요인에 따라 달라지는데, 본 연구에서 사용된 타워형 방제기는

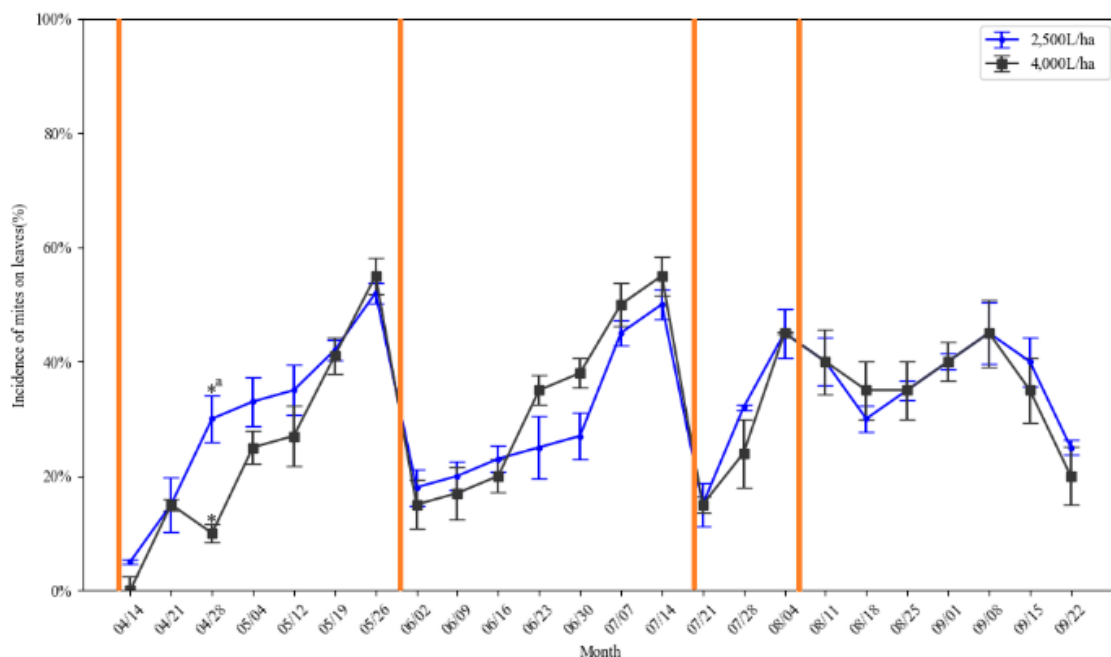


Fig. 2. Incidence of mites on leaves under different spray volume treatments (spraying events are indicated with orange lines).

^{a)} Significant differences between spray volumes at specific time points were determined using Welch's t-test ($p < 0.05$), indicated by asterisks (*) on the graph. ^{b)} The error bars represent the variability of the data points, indicating the standard deviation.

방사형 방제기의 살포 방식을 개선한 형태로, 밀식 사과원에서 높은 방제 효율을 보이는 것으로 알려져 있다. [10]에 따르면 타워형 방제기는 기존 축형 방제기에 비해 비산을 약 35~37% 줄이는 효과가 있으며, 이는 목표 지점에 더욱 효율적으로 분사할 수 있는 근거가 된다. 본 연구에서 타워형 방제기를 사용한 결과, 낮은 약량에서도 방제 효과가 충분히 나타난 것은 이러한 설계적 특성과 일치하는 결과로 볼 수 있다. 또한 [11]의 현장 비교 연구에 따르면, 타워형 방제기가 상단 및 하단 수관 구역에서 일관된 피복률을 제공하며 밀식 사과원과 같은 수관 구조에서 효과적인 방제 효율성을 보인다.

방제 운용 차이에 따른 비산 시험

살포 약량 차이에 따른 비산 시험의 감수지 피복률 결과(Fig. 3)를 보면, 2,500 L/ha 처리에서 왼쪽 열의 2열 거리(-8 m)에서 피복률은 85.9%였고, 오른쪽 열은 51.8%를 기록하였다. 4열 거리(-16 m)에서는 왼쪽 열이 3.1%, 오른쪽 열이 8.7%였으며, 6열 거리(-24 m)에서는 양쪽 모두 0%의 피복률을 나타냈다. 4,000 L/ha 처리에서는 왼쪽 열의 2열 거리에서 94.1%, 오른쪽 열에서 66.4%의 피복률이 나타났고, 4열 거리에서는 왼쪽 열이 2.9%, 오른쪽 열이 11.4%였다. 6열 거리에서는 2,500 L/ha와 동일하게 0%의 피복률을 보였다.

좌우 열에 따른 차이를 살펴보면, 두 약량 모두 2열 거리에서 왼쪽 열과 오른쪽 열의 피복률 차이가 크게 나타났다. 이는 방제기의 송풍 팬 회전 방향에 따른 차이로 추정할 수 있다. [12]에 따르면, 본 시험에서 사용된 방제기와 같은 일반적인 축형(axial) 방제기는 송풍 팬의 회전 방향에 따라 좌우 송풍 분포가 다르게 나타난다. 이러한 차이로 인해 좌우 방향뿐만 아니라 높이에 따른 분포도 불균일해질 수 있다. 특히, 방사형과 타워형 방제기 운용 방식에서 나타나는 송풍 차이는 방제 효율에 중요한 요인으로, [17]의 연구에서는 접선유입형(tangential) 송풍 장치가 좌우 송풍 분포의 불균형 문제를 개선할 수 있는 방안으로 제안되었다. 이에 따라, 타워형 방제기와 같은 개선된 설계가 필요한 이유를 확인할 수 있다.

또한 4열 거리에서 오른쪽 열의 피복률이 더 높게 나타난 점은 본 실험 과원의 전정 및 생육 상태의 차이에 기인한 것으로 추정된다. 통계적으로 유의미하지는 않으나, 2열 거리와 상반된 결과가 나온 점을 볼 때, 동일한 세장방추형 수형체계에서도 수고 및 수관 상태에 따라 피복률 차이가 발생할 수 있음을 시사한다[11]. 따라서 과원의 적절한 수형 구성이 방제 효율성에 중요한 요인임을 확인할 수 있다.

과실 품질 분석

과실 품질 분석을 통해, 다른 살포 약량이 최종 제품에 미치는 영향을 확인하기 위해 응애 분포 밀도 및 농약 피복률 평가

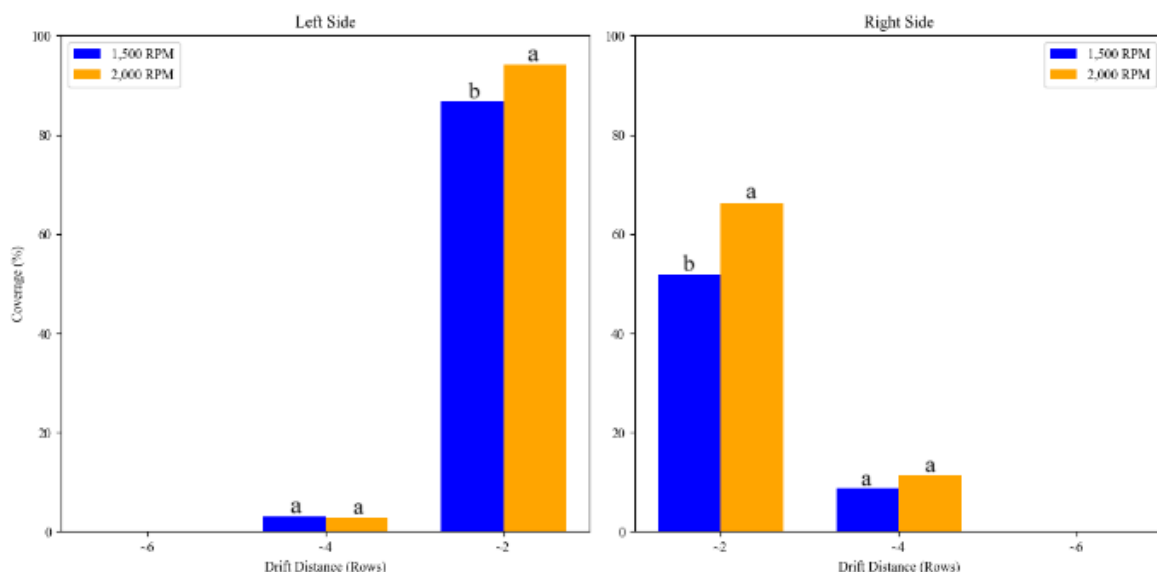


Fig. 3. Distance from the target row on the left side (m), Distance from the target row on the right side (m).

^{a)} The coverage rates of water-sensitive papers placed in the same direction and distance under two spray volume treatments were evaluated using Welch's t-test ($p < 0.05$)

외에도 과실 품질을 추가로 분석하였다. 과실의 주요 특성인 경도, 가용성 고형물, 산도(Table 4)를 검사한 결과, 2,500 L/ha와 4,000 L/ha 두 약량 처리 간에 과실 품질에서 유의미한 차이는 나타나지 않았다. 이는 농약 살포량 차이에도 불구하고 두 처리가 과실 품질을 유지하는 데 있어 동일하게 효과적임을 시사한다. 모든 처리에서 일관된 과실 품질이 확인됨에 따라, 살포량을 줄이더라도 사과와의 경도, 당도, 산도가 저하되지 않음을 의미한다.

Table 4. Effect of different spray volumes on fruit firmness, soluble solids, and acidity with SD

Spray Volume (L/10a)	Firmness (kg/cm ²)	Soluble Solids (°Brix)	Acidity (%)
2,500	3.67 ± 0.10 a ^{a)}	14.8 ± 0.5 a	0.42 ± 0.03 a
4,000	3.51 ± 0.09 a	14.9 ± 0.4 a	0.31 ± 0.02 a

^{a)} Different letters within columns indicate significant differences based on Welch's t-test ($p < 0.05$).

방제경제분석

2,500 L/ha와 4,000 L/ha의 두 처리구에 대한 응애 방제 비용을 비교한 Table 5를 보면, 총 방제 비용은 2,500 L/ha 처리 구역에서 606,680원이었으며, 4,000 L/ha 처리 구역에서는 1,111,760원으로 나타나, 고약량 처리구가 약 83% 더 높은 비용을 보였다.

Table 5. Economic comparison of spraying costs for four spider mite control applications between 2,500 L/ha and 4,000 L/ha treatments in apple orchards

Cost	2,500 L/ha (KRW)	4,000 L/ha (KRW)
Pesticide	509,600	933,000
Fuel	54,280	99,960
Labor	42,800	78,800
Total	606,680	1,111,760

^{a)} Calculated as the duty-free fuel price (1,057 KRW per liter) multiplied by the fuel consumption per hectare during inter-row driving distance.

농약 비용의 경우, 2,500 L/ha 처리구에서는 509,600원, 4,000 L/ha 처리구에서는 933,000원이 소요되어 큰 차이를 보였으며, 이는 살포 약량에 따라 농약 소모량이 직접적으로 증가한 결과로 해석된다. 또한 연료비와 인건비 역시 고약량 처리구에서 각각 42,800원과 78,800원으로 저약량 처리구보다 높은 비용을 나타냈다. 이는 고약량 처리 시 더 높은 회전수 설정으로 농약 분사 효율을 높이기 위해 주행 속도를 줄임으로써 작업 시간이 길어지면서 발생한 추가 비용으로 판단된다.

종합적으로 2,500 L/ha의 저약량 살포가 농약, 연료 및 인건비 절감에 기여할 수 있으며, 총 방제 비용을 약 46% 절감할 수 있다. 또한 저약량 살포는 비산 감소와 농약 절감을 통해 환경적 오염 방지와 자원 절약에 기여할 수 있어, 경제적 효율성과 환경적 지속 가능성 측면에서 더 적합한 방제 방안임을 시사한다.

본 연구는 한국의 밀식 사과원에서 타워형 방제기를 활용하여, 관행적인 약량 대비 절반 수준의 낮은 약량을 사용하더라도 해충 방제 효과와 과실 품질이 유지되는지를 확인하기 위해 수행되었다. 기존 관행 약량인 4,000 L/ha와 이를 약 절반으로 줄인 2,500 L/ha를 비교한 결과, 농약 피복률, 과실 품질, 그리고 응애 방제 효과에서 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 특히, 낮은 살포량인 2,500 L/ha에서도 4,000 L/ha와 유사한 방제 효과를 보였으며, 80% 이상의 농약 피복률을 달성하였고, 잎의 응애 밀도, 과실 경도, 가용성 고형물, 산도 등의 과실 특성에서도 차이가 없었다. 이는 살포량을 2,500 L/ha로 줄여도 해충 방제와 과실 품질 유지에 충분하며, 자원 절약과 환경 보호 측면에서 의미 있는 전략이 될 수 있음을 시사한다.

이번 연구는 국내외 사과원에서 주요 해충으로 알려진 점박이응애에 초점을 맞추어 생육 기간 동안의 응애 분포 밀도를 추적하여 방제 효과를 평가한 기초 자료를 제공했다. 다만, 이번 연구가 점박이응애에 한정된 점은 한계로 남아 있으며, 동일한 살포 전략이 다른 병해충이나 질병에 대해 적용될 수 있을지는 추가 연구가 필요하다.

또한, 최근 사과 재배 체계가 다축형 구조 등으로 빠르게 변화하고 있는 상황에서, 이러한 구조적 변화가 해충 관리에 미치는 영향을 이해하는 것도 중요하다. 과원 구조와 재배 방식이 변화함에 따라 그에 맞는 해충 방제 전략 역시 지속적으로 발전하고 개선되어야 한다. 궁극적으로 고밀도 사과원의 장기적 지속 가능성과 효율성을 확보하기 위해 변화하는 과원 체계를 반영한 포괄적이고 유연한 해충 관리 계획을 수립하는 것이 중요한 과제가 될 것이다.

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

Author Contributions: J.H. Jeon conceived and designed the research, led the experiment, and drafted the manuscript; B.Y. Shin conducted the experiment, collected and analyzed the data; T.M. Yoon provided expert advice and contributed to overall research planning; S.H. Ban 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 study was supported by agricultural research project for the Daesan Rural Foundation in 2023.

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.31>

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

1. 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>.
2. Dorigoni A (2016) Innovative fruit tree architecture as a nexus to improve sustainability in orchards. *Acta Horticulturae*, 1137, 1-10. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1137.1>.
3. Kwon HY, Hong SM, Kim SS, Paik MK, Lee HS, Kim DB, Moon BC (2017) Survey of planting system and pesticide spray method on apple orchards in Korea. *The Korean Journal of Pesticide Science*, 21, 9-16. <https://doi.org/10.7585/kjps.2017.21.1.9>.
4. Jeon JH, Yoon TM, Ban SH (2024) Survey on cultivation practices and pest management in Korean apple orchards. *The Korean Journal of Pesticide Science*, 28(3), 227-240. <https://doi.org/10.7585/kjps.2024.28.3.227>.
5. Calumpang SM (1996) Exposure of four Filipino farmers to parathion-methyl while spraying string beans. *Pesticide Science*, 46(1), 93-102. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9063\(199601\)46:1<93::aid-ps324>3.0.co;2-m](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9063(199601)46:1<93::aid-ps324>3.0.co;2-m).
6. Fornasiero D, Mori N, Tirello P, Pozzebon A, Duso C, Tescari E, Bradascio R, Otto S (2017) Effect of spray drift reduction techniques on pests and predatory mites in orchards and vineyards. *Crop Protection*, 98, 283-292. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.04.010>.
7. Fox R, Derksen R, Zhu H, Brazee R, Svensson SA (2008) A history of air-blast sprayer development and future prospects. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 51(2), 405-410. <https://doi.org/10.13031/2013.24375>.
8. An Q, Li D, Wu Y (2020) Deposition and distribution of myclobutanil and tebuconazole in a semidwarf apple orchard by hand-held gun and air-assisted sprayer application. *Pest Management Science*, 76(12), 4123-4130. <https://doi.org/10.1002/ps.5968>.
9. Blanco MN, Fenske RA, Kasner EJ, Yost MG, Seto E, Austin E (2019) Real-time monitoring of spray drift from three different orchard sprayers. *Chemosphere*, 222, 46-55. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.092>.
10. Kasner E, Fenske R, Hoheisel G, Galvin K, Blanco M, Seto E, Yost M (2019) Spray drift from three airblast sprayer technologies in a modern orchard work environment. *Annals of work exposures and health*, 64(1), 25-37. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxz080>.
11. Jeon JH, Shin BY, Kim SH, Yoon TM, Ban SH (2024) Spray volume field evaluation of radial and tower-type air-blast sprayers in high-density apple orchards. *The Korean Journal of Pesticide Science*, 28(3), 215-226. <https://doi.org/10.7585/kjps.2024.28.3.215>.
12. Jeon JH, Shin BY, Kim SH, Yoon TM (2024) Comparison of spraying and blowing patterns by air-blast sprayers for efficient pesticide

- spraying in high-density apple orchards. The Korean Journal of Pesticide Science, 28(2), 127-140. <https://doi.org/10.7585/kjps.2024.28.2.127>.
13. Andersen P, Jørgensen M (2010) Calibration of Sprayers. Julius-Kühn-Archiv, Quedlinburg, Germany.
 14. Moor A, Langenakens J, Vereecke E, Jaeken P, Lootens P, Vandecasteele P (2000) Image analysis of water sensitive paper as a tool for the evaluation of spray distribution of orchard sprayers. Aspects of Applied Biology, 57, 329-341.
 15. Adesanya AW, Lavine MD, Moural TW, Lavine LC, Zhu F, Walsh DB (2021) Mechanisms and management of acaricide resistance for *Tetranychus urticae* in agroecosystems. Journal of Pest Science, 94(3), 639-663. <https://doi.org/10.1007/s10340-021-01342-x>.
 16. Stumpf N, Zebitz CPW, Kraus W, Moores GD, Nauen R (2001) Resistance to organophosphates and biochemical genotyping of Acetylcholinesterases in *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae). Pesticide Biochemistry and Physiology, 69(2), 131-142. <https://doi.org/10.1006/pest.2000.2516>.
 17. Thorat DS, Jyoti B, Khadatkhar A (2022) Precision spraying technologies for orchard crops. Indian Horticulture, 67(4), 34-36.