



공기 중 농약 비산의 측정을 위한 광학 입자 측정기의 적용성 평가

Applicability of Optical Particle Counters for Measurement of Airborne Pesticide Spray Drift

김락우^a · 홍세운^{b, †}

Kim, Rack-Woo · Hong, Se-Woon

ABSTRACT

With desires for safe food, there is growing concern that pesticide spray drift will expose people, plants, and the environment to pesticide residue and potential negative effects thereof. For highly efficient, safe spray application, technologies for measuring the spray drift should be developed and improved with some urgency. This study investigated the applicability of two optical particle counters (OPCs), which are mostly used to measure airborne particle mass concentration, for measurement of airborne pesticide spray drift. Experiments were conducted in a controlled laboratory and an ash tree orchard to evaluate the handiness and accuracy of two OPCs, OPC 1 and OPC 2. The experimental results indicated that the OPC 1 was better applicable to the measurement of spray drift in the field while the use of the OPC 2 was limited due to its narrow range of measurable droplet sizes. The readings of the OPC 1 produced highly accurate results ($R^2=0.9637$) compared to the actual spray drift. For better application of OPCs, this study suggests the OPCs should be positioned properly to inhale spray droplets of the appropriate size and concentration.

Keywords: Airborne droplet; optical particle counter; pesticide; spray deposition; spray drift

1. 서 론

전 세계적으로 많은 양의 농약이 사용되고 있지만, 기존 연구에 따르면 살포된 농약 중 약 2~5% 만이 농작물에 도달하며 (Miller, 2004), 약 50% 이상이 살포 지역을 벗어나 비산될 수 있는 것으로 알려져 있다 (Jensen and Olesen, 2014). 비산된 농약은 바람에 의해 인근 주거지나 농경지 및 생태계로 유입되어 건강상의 문제나 생태계와 환경의 오염을 야기할 수 있으며 (Mamane et al., 2015; De Schampheleire et al., 2007), 최근에는 인근의 친환경 농지에 유입되어 유기농 농산물에 피해를 입히는 사례도 빈번히 나타나고 있다. 국내 농약의 사용량은 1 ha 당 평균 9.3 kg으로 세계 최고 수준이지만 (2016년 기준, Kostat, 2019), 아직 국내에서는 농약의 비산량과 비산 거리 및 영향 정도를 측정하는 연구는 전무한 실정이다 (Hong and Kim, 2018).

공기 중에 비산되는 농약액 입자들을 측정하는 방법은 대부분 종이나 필터, 패트리 디쉬 또는 판재 등의 포집기에 입자들을 침적시켜서 포집한 후, 포집된 양을 측정하는 것이다 (Bueno et al., 2017; Zhao et al., 2014). 포집기를 수평으로 놓는 경우에는 중력에 의해 침강하는 농약액 입자를 포집하게 되므로, 바람에 의한 이동 속도가 중력에 의한 침강속도보다 작거나 입자의 크기가 충분히 큰 경우에 효과적이다 (Pompe et al., 1992). 반면 수직으로 놓인 포집기들은 바람에 의한 수평적인 이동량을 측정하는데 효과적이다 (Miller et al., 1992). 하지만 실제로 공기 중의 농약액 입자가 포집기에 충돌하여 포집되는지 여부는 공기역학적인 분석이 필요하다. 종이나 판재 등의 포집기는 바람이 포집기를 우회하게 되므로, 농약액 입자 또한 바람과 함께 우회하면서 포집기에 충돌하지 않는 경우가 많다. 이에 Fox et al. (2004)는 나일론 스크린을 포집기로 사용하여 바람이 포집기를 투과하면서 농약액 입자들이 스크린에 충돌하도록 하여 포집의 효율을 50-70%로 높였다. 이와 같이 포집기의 포집 효율은 포집기의 형태와 바람에 대한 방향, 공기역학적 특성, 기상 조건, 재질, 농약액 입자의 크기 등에 따라 변화하며, 농약의 비산을 정확히 측정하기 위해서는 포집 및 측정 방법에 대한 연구가 필요하다.

공기 중의 농약액 입자를 포집한 이후, 이들을 질량 또는 질량농도로 표현하기 위해서는 정량적인 계측이 필요하다. 농약 성분들은 크로마토그래피 방법으로 측정이 가능하지만,

^a Graduate student, Department of Rural Systems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Korea.

^b Assistant Professor, Department of Rural and Biosystems Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Korea.

[†] Corresponding author

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

E-mail: hsewoon@jnu.ac.kr

Received: August 7, 2019

Revised: August 21, 2019

Accepted: August 22, 2019

실험상의 안전성을 위해 대부분 물에 농약 대신 염료나 형광 물질 등의 추적물질을 혼합하여 실험을 수행하며, 이때 포집기에 포집된 추적물질의 질량은 분광계로 측정한다. 현재 흔히 사용되고 있는 농약 비산의 측정 방법은 추적물질을 다양한 포집기를 이용하여 포집하고 분광계로 측정하는 방법으로써, 측정의 정확도가 높지만 실험에 많은 비용과 장비가 필요하고 분석에 많은 시간이 소요되는 단점이 있다 (Arvidsson et al., 2011; Chen et al., 2013). 따라서 편의성과 정확성을 겸비한 측정 방법을 개발하기 위한 지속적인 노력이 요구된다.

본 연구에서는 농약의 공기 중 비산을 측정하기 위하여 광학 입자 측정기를 사용하고 이의 적용 가능성을 검토하였다. 광학 입자 측정기는 공기 중에 부유하고 있는 입자상 물질들의 수를 레이저를 사용한 광산란 방식으로 측정하여 질량 농도를 계측하는 장비로서, 최근 미세먼지, 에어로졸 등의 농도를 간편히 측정하는데 활용되고 있으나 농약 비산을 측정하기 위해 사용된 사례는 전무하다. 따라서 본 연구에서는 광학 입자 측정기를 사용하여 공기 중 비산되는 농약액 입자의 질량농도를 측정하고 이를 기존의 측정 방법에 의한 결과와 비교하여 편의성과 정확성을 검토하였다.

II. 재료 및 방법

1. 광학 입자 측정기

광학 입자 측정기 (OPC, optical particle counter)는 일정 유량으로 공기를 흡입하며 흡입된 공기에 레이저를 가하고, 공기 중에 포함된 입자들이 레이저와 만날 때 나타나는 산란 특성을 분석하여 입자의 크기와 개수를 추정하는 기기이다. 본 연구에서는 Table 1과 같이 두 가지 종류의 휴대용 광학 입자 측정기를 농약 비산의 측정에 사용하였다. OPC 1은 공기 중 입자 농도를 비교적 간단히 측정할 수 있는 기기로서 5가지 입자의 입경 크기에 대한 질량 농도를 측정한다. OPC 2는 52가지 입경 크기로 세분하여 측정이 가능하다. 두 기기 모두 고체의 먼지뿐만 아니라 공기 중에 부유하고 있는 액체 방울의 측정이 가능하여 본 연구에서 활용되었다.

2. 농약 비산의 측정 방법

광학 입자 측정기를 이용하여 측정한 결과의 정확도를 추정하려면 신뢰성있는 농약 비산의 측정 방법이 필요하다. 따라서 추적물질을 이용하여 농약 비산의 질량 농도를 측정하는 방법을 병행하여 수행하였다.

가. 추적물질을 이용한 측정

물에 농약 대신 2g L⁻¹의 형광염료 BS (Brilliant Sulfaflavine, MP Biochemicals, Inc., Aurora, Ohio)을 섞어 살포하고, 농약의 비산이 발생할 것으로 예상하는 곳에 20 cm × 20 cm 크기의 나일론 스크린을 수직으로 설치하여 바람에 의해 비산되는 농약액 입자를 포집하였다. 비산이 종료되면 나일론 스크린을 수거하여 스크린에 침적된 형광염료를 증류수로 씻어내고, 형광염료가 포함된 증류수 혼합물을 형광분광계 (LS 50B, PerkinElmer, Seer Green, UK)로 분석하여 나일론 스크린에 침적된 형광염료의 질량을 추정한다. 이후 최초 살포 혼합액의 형광염료 농도로 나누어서 나일론 스크린에 침적된 농약액의 양 (μL cm⁻²)을 추정하였다. 세부적인 분석절차는 Chen et al. (2013)에 나타나 있으며, 본 측정 방법의 신뢰성은 Fox et al. (2004)와 You et al. (2019)에서 과학적으로 검토되어 왔다.

나. 광학 입자 측정기를 이용한 측정

OPC 1과 OPC 2를 농약의 비산이 발생할 것으로 예상되는 곳에 놓고 농약의 살포 전후의 대기 중 입자 질량 농도를 측정하였다. OPC 1과 OPC 2는 각각 1초와 5초 간격으로 대기 중 질량 농도를 샘플링하여 기록하도록 설정하였다. 흡입유량은 각각 3L min⁻¹와 5L min⁻¹로 설정하였다. 이때 1초 간격으로 샘플링된 OPC 1의 측정값은 오르내림 변동이 너무 커지기 때문에 OPC 2와 유사하게 5초간의 이동평균값으로 변환하여 분석하였다. OPC 1과 OPC 2 모두 입경별 질량 농도를 합산한 전체 입자 (Total PM)의 질량 농도를 분석 대상으로 결정하였다.

농약 살포 전의 60초간의 측정 자료를 배경 농도로 가정하고, 농약 살포 후의 180초간의 측정 자료를 분석하여 배경 농도를 상회할 때 비산이 발생하는 것으로 판단하였다. 이에 비

Table 1 Technical specifications of the optical particle counters (OPCs) used in this study

Abbreviation	OPC1	OPC2
Instrument	DustTrak DRX Aerosol Monitor, Model 8533	Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer, Model 3321
Manufacture	TSI Incorporated, Minnesota, USA	
Measurable particle sizes	PM1, PM2.5, respirable, PM10, Total PM	52 channels from 0.5 to 20 μm
Range	0.001 - 150 mg m ⁻³	0.001-10 ⁴ #particles cm ⁻³
Measurable particles	dust, smoke, fumes, mist droplets	Airborne solids and non-volatile liquids

산이 발생하는 경우의 측정값을 모두 평균하여 비산량의 질량 농도 (mg m^{-3})를 추정하였다.

3. 실험 방법

광학 입자 측정기를 활용하여 농약의 비산을 측정하는 사례는 전무하므로, 우선 실내 간이 실험을 통해 광학 입자 측정기가 공기 중의 액체 방울을 감지하는지 실험하고, 현장 실험을 통해 기존의 측정 방법인 추적물질을 이용한 방법과 함께 사용하여 측정 결과를 비교하였다.

가. 실내 간이 실험

실내 간이 실험은 Fig. 1과 같이 액체 방울을 생성하는 노즐의 연직 아래에 OPC 1과 OPC 2를 교대로 두고 노즐에서 액체 방울을 생성할 때 광학 입자 측정기에 감지되는 질량 농도를 측정하였다. 노즐에서 생성된 액체 방울들은 아래로 분사되면서 공간적으로 확산되므로, 높이에 따라 공기 중 질량 농도가 작아지게 된다. 따라서 노즐로부터 두 곳의 높이 (Position-1과 Position-2)에서 각각 측정하여 비교하였다. 특히, OPC 1의 경우에는 너무 큰 입자가 유입되지 않도록 유입부캡 (Inlet cap)을 장착하여 사용하도록 권장하고 있는데, 이러한 유입부캡이 실험 대상인 물방울을 흡입을 막거나, 물방울이 유입부캡에 흡착될 수 있기 때문에 유입부캡의 유무에 따른 결과도 비교하였다.

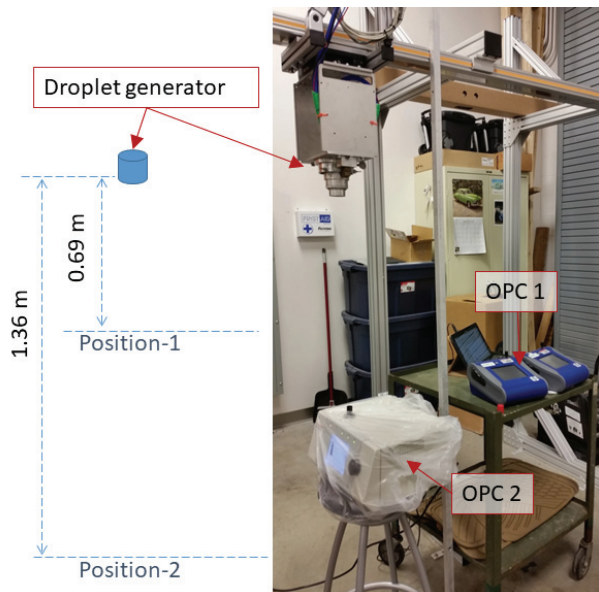


Fig. 1 Picture and schematic of laboratory test

나. 현장 실험

현장 실험은 2018년 6월 26일에 미국의 오하이오 농업 R&D 센터 (OARDC)의 시험포장에서 수행되었다. 시험포장에는 40×40 그루의 물푸레나무가 약 $2.4 \text{ m} \times 4.6 \text{ m}$ 의 간격으로 식수되어 있다. Fig. 2와 같이 마지막 열에 트랙터와 과수원용 농약 살포기로 농약을 살포하면서 마지막 열로부터 거리 20, 40, 80 m의 위치에서 농약의 비산을 측정하였다. 측정 위치가 나무로부터 북쪽에 위치하므로, 바람이 남서풍~남풍~남동풍으로 불 때 실험을 수행하였다. 실험은 풍향 조건이 적절히 유지되는 시간에 맞춰 총 3회 반복하여 수행하였으며,

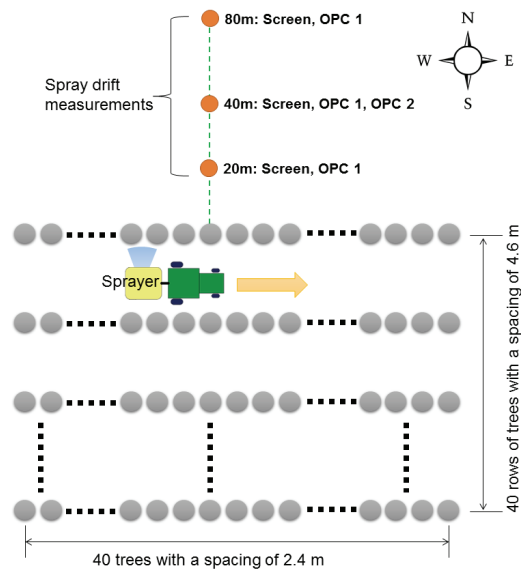


Fig. 2 Schematic diagram of experimental design

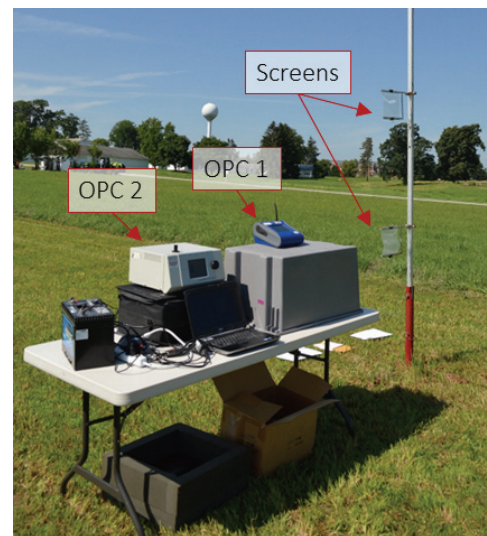


Fig. 3 Picture of experimental setup

실험이 진행되는 동안 휴대용 기상대를 설치하여 외부 기상을 측정하였다.

추적물질을 이용한 비산량 측정은 거리 20, 40, 80 m에서 수행하였다. 세 지점에 폴대를 세우고, 높이 1 m와 2 m에 나일론 스크린을 설치하여 비산량을 측정한 후, 두 높이에서 측정된 값을 평균하여 비산량을 산출하였다. OPC 1은 20, 40, 80 m에 모두 설치하였으며, OPC 2는 40 m 위치에만 설치하였다. OPC 1과 OPC 2는 공기흡입부가 지면에서 약 1.5 m 높이에 위치되도록 테이블위에 올려놓고 실험을 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 실내 간이 실험 결과

실내 상황에서 공기 중에 부유중인 미세 물방울들의 농도를 OPC 1과 OPC 2를 이용하여 측정한 결과는 Table 2와 같다. 노즐에서 물방울을 분사시키기 전 실험실 내의 공기 중 총 부유 입자들의 배경 농도를 측정한 결과는 1.66~1.93 $\mu\text{g m}^{-3}$ 으로 매우 낮았으므로, 실험 결과에 관여할만한 오차의 요소는 매우 적었다. 노즐에서 물방울을 분사하면서 노즐과 가까운 Position-1에서 측정된 농도를 보면, OPC 1은 약 117.92 $\mu\text{g m}^{-3}$ 을 나타낸 반면 OPC 2는 22.94 $\mu\text{g m}^{-3}$ 으로 약 1/5 정도 작은 값을 나타냈다. 노즐에서 먼 위치인 Position-2에서도 OPC 1은 57.04 $\mu\text{g m}^{-3}$ 인 반면, OPC 2는 11.47 $\mu\text{g m}^{-3}$ 으로 약 1/5 정도로 낮은 값을 나타냈다. 한편, OPC 1의 경우, 유입부캡을 제거했을 경우 Position-1에서의 측정값은 약 53.96 $\mu\text{g m}^{-3}$ 가 증가하였으며, Position-2에서는 약 42.7 $\mu\text{g m}^{-3}$ 정도 크게 측정되었다.

위 결과는 실험에 사용된 광학 입자 측정기인 OPC 1과 OPC 2 모두 공기 중에 부유중인 스프레이 물방울들을 감지할 수 있음을 명확히 보여준다. 하지만 OPC 2, OPC 1 (with inlet cap), OPC 2 (without inlet cap)의 세 경우에서 보이는 측정값의 큰 차이는 측정값의 신뢰도에 대한 검토가 필요함을 보여준다. 특히 일반적으로 OPC 2가 OPC 1에 비해 더 정확하다고 알려져 있으나, 본 실험에서는 가장 낮은 측정값을 보였다.

이러한 차이는 광학 입자 측정기가 측정할 수 있는 입자의 입경의 상한 때문으로 여겨진다. 스프레이 노즐에서 발생된 물방울들은 수 μm 에서 수십 μm , 또는 그 이상이나 이하의 다양한 크기로 형성이 되는데, 현재 이러한 입경의 분포를 측정하는 방법은 고가의 고해상도 초고속카메라와 영상분석 기술을 활용하는 방법이 사용된다. 본 실험에서는 노즐에서 발생된 물방울들의 입경 분포를 측정할 수는 없었으나, 노즐과 측정부의 거리가 가깝기 때문에 큰 물방울들이 상당히 많았

Table 2 Concentrations of spray droplets in the air measured at position-1 and position-2 by OPC 1 and OPC 2. The unit is $\mu\text{g m}^{-3}$

	Position-1	Position-2
Background concentration	1,66	1,93
OPC 1 (with inlet cap)	117.92±19.14	57.04±6.01
OPC 1 (without inlet cap)	171.88±17.74	99.74±28.32
OPC 2	22.94±4.78	11.47±2.79

을 것으로 추정된다. OPC 2의 경우는 측정 가능한 입자의 입경이 20 μm 이며, OPC 1은 기술지침서에 명확히 설명되지는 않았으나 Total PM의 측정이 가능하므로 20 μm 보다는 큰 것으로 추정된다. 이에 따라 OPC 2의 측정값이 OPC 1의 측정값보다 5배 정도 높게 나타난 것으로 판단된다. 특히, OPC 1의 경우 큰 입자들은 유입부캡에 의해 걸러지게 되는데, 이러한 유입부캡을 제거하였을 때 측정값이 42.7~53.96 $\mu\text{g m}^{-3}$ 정도 증가한다는 것은 해당량 만큼은 큰 입자들이 더 감지되었음을 의미한다.

따라서, 현장에서 농약의 비산을 측정하기 위하여 OPC 1과 OPC 2의 광학 입자 측정기를 활용하고자 한다면, 비산 중인 물방울이 충분히 크지 않도록 주의할 필요가 있다. 실제로 스프레이된 농약액 입자들은 노즐에서 분사되는 과정에서 분열 (break-up)되거나 공기 중에서 증발에 의해 그 크기가 점점 작아지는 경향이 있다 (Hong et al., 2018). 농약 비산의 측정 위치가 농약의 살포 위치와 적절한 거리를 유지하고 있다면 광학 입자 측정기를 농약의 비산을 측정하는데 활용할 수 있을 것으로 예상되며, 정확한 활용 방법에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것이다.

2. 현장 실험 결과

가. 농약의 비산량 측정 결과

세 번의 반복된 현장 실험 동안 기상 데이터의 평균값은 Table 3에 제시되어 있으며, 추적물질과 스크린을 사용하여 농약의 비산을 측정한 결과는 Table 4와 같다. 단위인 $\mu\text{L cm}^{-2}$ 는 스크린에 침적된 농약액의 양을 의미한다. 각 거리별 비산량은 20 m에서 0.021~0.273 $\mu\text{L cm}^{-2}$, 40 m에서 0.007~0.106 $\mu\text{L cm}^{-2}$ 으로 나타나 거리가 멀수록 감소하였다. 전반적으로 Exp 3 > Exp 1 > Exp 2 순으로 비산량이 크게 나타났는데, Table 3의 기상자료와 비교해보면, 풍속이 큰 영향을 미쳤을 거라 판단할 수 있다. 많은 연구들에서 풍속을 농약 비산에 영향을 미치는 주 요인으로 고려했으며, 풍속이 높을수록 농약액 입자의 비산 거리가 증가한다고 보고하였다 (Baetens et al., 2007). 측정된 기상자료에서 Exp 3가 수행될 시 풍속이

Table 3 Average meteorological conditions during three spray drift experiments

Factor Exp #	Wind speed (m s ⁻¹)	Wind direction (°)	Air temperature (°C)	Rel. humidity (%)
Exp 1	1.16±0.53	220.2±30.6	25.8±0.1	49.9±1.1
Exp 2	0.89±0.37	193.9±29.4	26.7±0.1	45.2±3.3
Exp 3	3.24±0.72	205.2±15.1	28.0±0.1	38.9±2.1

Table 4 Spray drift measured three times at 20, 40, and 80 m leeward from target trees. The unit is $\mu\text{L cm}^{-2}$. H1 and H2 indicate the sampling measured at a height of 1 m and 2 m, respectively

Exp # Distance	Exp 1			Exp 2			Exp 3		
	H1	H2	Avg.	H1	H2	Avg.	H1	H2	Avg.
20 m	0.097	0.075	0.086	0.024	0.017	0.021	0.311	0.236	0.273
40 m	0.070	0.081	0.076	0.006	0.007	0.007	0.111	0.101	0.106
80 m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

3.24 m s⁻¹로 가장 높았으며, Exp 2가 수행될 때 0.89 m s⁻¹로 가장 낮았으므로, 비산량 결과가 풍속의 영향과 일치하게 나타났다. Farooq and Salyani (2004)에 따르면 기온이 높고 습도가 낮을수록 농약액 입자의 증발이 빠르고 입경 크기가 작아져서 비산거리가 증가한다고 알려져 있으나, 본 실험에서는 세 번의 반복 실험동안 기온과 습도의 차이가 크지 않을 뿐만 아니라 비산량 결과의 경향과 일치하지도 않았다.

세 번의 실험동안 거리 80 m 위치에서는 비산량이 검출되지 않았다. 일반적으로 과수원용 농약살포기를 사용할 경우 수 백 미터까지 농약이 비산될 수 있으므로 (Hong et al., 2018), 40 m 위치에서 검출된 비산량으로 예상할 때 80 m 위치에서 미량이라도 검출되는 것이 타당할 것이다. 샘플링 지점에서 검출되지 않은 가장 큰 이유는 풍향일 것으로 판단된다. 세 번의 실험동안 풍향은 정남풍이 불지는 않았지만 남

서풍 (225°) 이내의 바람이 불어왔으므로, 당초 계획한 대로 실험이 진행되었다. 하지만 세 번의 실험에서 모두 남서풍에 가까운 바람이 불면서 거의 대부분의 농약액 입자가 80 m 거리에서는 샘플링 지점을 지나쳐 비산된 것으로 판단된다.

나. 광학 입자 측정기에 의한 비산량 측정 결과

농약액의 살포 전후로 광학 입자 측정기 OPC 1에 기록된 공기 중 부유 입자의 농도 변화는 Fig. 4~6에 나타나 있다. 농약 살포 시점인 '0 s'를 기준으로 살포 전에는 비교적 부유 입자 농도가 일관되게 낮은 수준을 유지하였으며, 농약 살포 이후 일시적으로 크게 상승하였다. 상승하는 시점은 20 m 위치에서 가장 빨랐으며, 40 m 위치에서는 이보다 수 초정도 늦었으며, 80 m 위치에서는 매우 늦거나 상승하는 형태가 뚜렷하게 나타나지 않은 경우도 있었다.

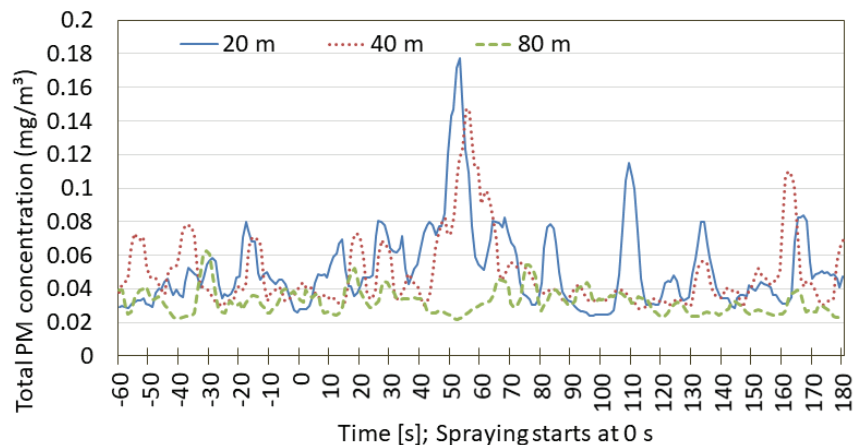


Fig. 4 Variation in total PM concentration (OPC 1) at three distances with time from -60 s to 180 s during Exp 1

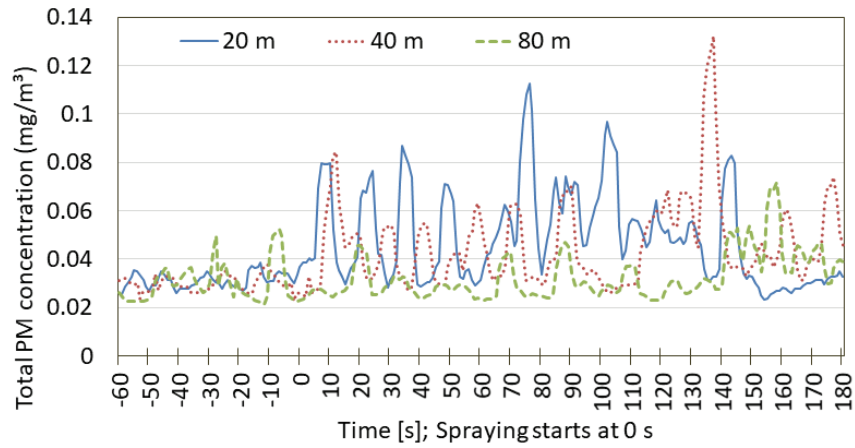


Fig. 5 Variation in total PM concentration (OPC 1) at three distances with time from -60 s to 180 s during Exp 2

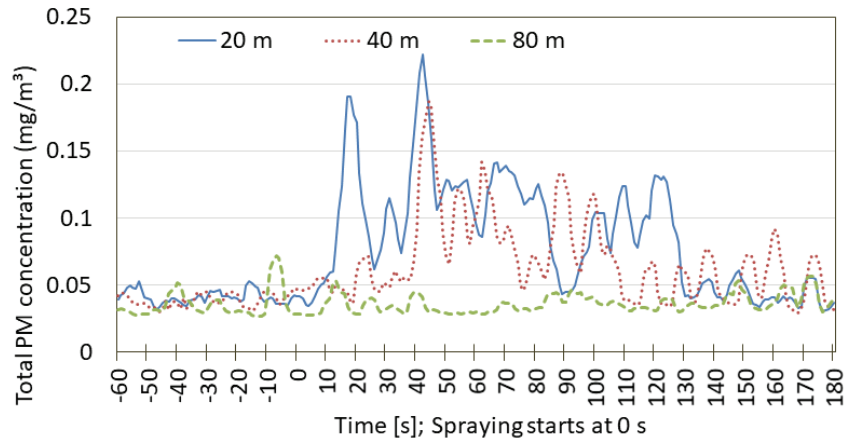


Fig. 6 Variation in total PM concentration (OPC 1) at three distances with time from -60 s to 180 s during Exp 3

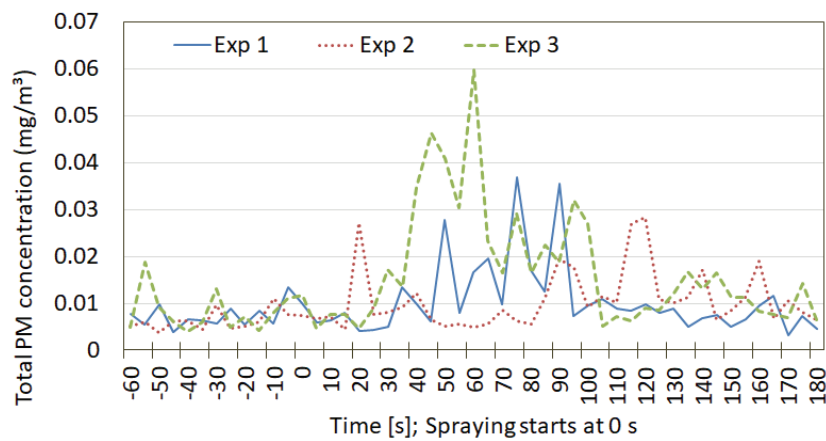


Fig. 7 Variation in total PM concentration (OPC 2) with time from -60 s to 180 s during Exp 1, 2 and 3

농약액의 살포 후 공기 중 부유 입자의 농도가 상승하는 형태를 살펴보면, Exp 1에서는 Fig. 4와 같이 1회 정도 피크값을 보였으며, Exp 3에서는 Fig. 6와 같이 1회 피크값을 보인 후 2~3회 정도 낮은 수준의 피크값을 연속하여 보이는 경우도 나타났다. 이러한 경우들은 살포된 농약액 입자들이 공기 중에서 한 덩어리의 플룸(plume) 형태로 이동하면서 광학 입자 측정기에 감지된 것으로 추정된다. Exp 2의 경우에는 Fig. 5와 같이 뚜렷한 피크값이 없이 낮은 수준의 농도가 연속하여 반복적으로 나타났는데, 이는 앞선 형태와는 달리 농약액 입자들이 바람의 돌풍 등에 의해 여러 덩어리의 플룸으로 분리되면서 광학 입자 측정기에 감지되었기 때문으로 판단된다. 단, 모든 경우에 대하여 농약의 살포 후 오랜 시간 후에 간헐적으로 감지되는 높은 농도들은 나무에 침적되어 있던 농약액들이 바람에 의해 재비산되면서 기기에 감지된 것으로 추정된다.

Fig. 7는 40 m 위치에 설치된 OPC 2에서 감지된 부유 입자의 농도를 보여주고 있다. OPC 1과 마찬가지로 농약액의 살포 전과 후의 차이가 분명히 나타나며, 농도의 피크값이 나타

나는 시점도 OPC 1의 40 m 위치에서의 기록과 거의 일치하는 것으로 나타났다. 단 Exp 2의 측정 결과는 Fig. 5와 같이 농도의 피크값이 분명히 구분되지 않았다. OPC 2에서 측정된 부유 입자의 농도 값은 전반적으로 OPC 1에서 측정된 값에 비해 1/5 정도로 작았는데, 이는 실내 간이 실험 결과와 일치하였다. 이는 농약 살포 후 40 m 떨어진 위치에서도 여전히 20 μm 보다 큰 입경을 가진 농약액 방울들이 많이 존재한다는 것을 의미한다.

Figs. 4~7의 결과에서 배경 농도를 제하고 농약 비산에 의한 상승된 농도만을 평균한 비산량의 질량 농도는 Table 5와 같이 계산되었다. OPC 1을 20 m와 40 m 거리에서 측정한 경우 측정된 비산량의 질량농도는 0.0195~0.0565 mg m⁻³ 범위로 나타났으며, OPC 2에서 측정된 비산량의 질량농도는 0.0068~0.0136 mg m⁻³으로 나타났다. OPC 1은 80 m 위치에서도 작은 값은 질량 농도가 산출되었는데, 앞선 비산량 측정 결과에서는 80 m 위치에서 농약액의 비산이 검출되지 않았으므로, 이를 농약액의 비산이라기보다는 외부 요인에 의한 오차로 보아야 한다. 광학 입자 측정기를 이용한 방법은 공기

Table 5 Average PM concentrations during spray drift measured by OPC 1 and OPC 2. The unit is mg m⁻³

OPCs	Exp #	Exp 1	Exp 2	Exp 3
OPC 1	20 m	0.0262	0.0230	0.0565
	40 m	0.0276	0.0195	0.0365
	80 m	0.0054	0.0112	0.0067
OPC 2	40 m	0.0068	0.0062	0.0136

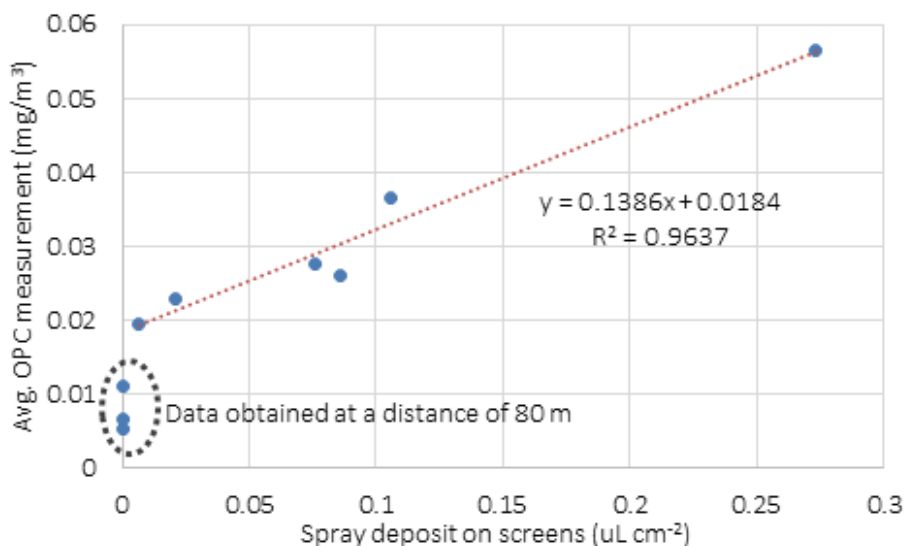


Fig. 8 Comparison of spray deposition on screens and OPC 1 measurements, R² is calculated excluding the data obtained at a distance of 80 m

중의 농약액 방울뿐만 아니라 모든 부유 물질들을 감지하므로, 농약액 방울이 아닌 다른 부유 물질이 감지된 것으로 판단된다. 과수원용 농약 살포기는 강한 송풍으로 발생시켜 나무 깊숙이 침투시키는데, 나무에 도달하는 바람의 풍속은 10 m s^{-1} 이상의 강풍으로서 (Hong and Kim, 2018) 잎을 떨어뜨리고 주변 바다과 수풀의 먼지와 식물 부스러기 등을 비산시키는 경우가 많다. 따라서 80 m 거리에서 OPC 1에 감지된 질량농도는 이렇게 비산된 먼지와 부스러기 등이 원인일 가능성이 높다. 풍향이 정남풍이어서 농약액 방울들이 80 m 위치에 도달하더라도, 농약액 방울들의 농도와 외부 요인에 의한 오차를 구분해 낼 수 있을 지에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것이다. 특히, OPC 2의 경우에는 40 m 위치에서도 관측된 농도가 매우 낮기 때문에 외부 요인에 의한 오차의 영향이 더 클 것으로 예상된다.

Fig. 8은 광학 입자 측정기 OPC 1으로 측정된 평균 질량농도와 추적물질을 이용하여 측정된 비산량을 비교한 결과이다. 두 측정값 간의 물리적 의미와 단위가 일치하지 않으므로 직접적인 비교는 불가능하지만, OPC 1의 경우에는 $R^2=0.9637$ 로 광학 입자 측정기로 측정된 결과가 실제 비산량과 상당한 유의한 관계를 가짐을 보이고 있다. 단, 80 m 위치에서는 비산량이 없으므로, 분석에서 제외하였다. OPC 2는 비교를 위한 측정 수가 부족하지만, 감지되는 농도가 매우 낮고 외부 영향에 의한 오차의 가능성을 고려하여 현장 실험에 적합하지는 않은 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구는 농약의 공기 중 비산을 측정하기 위하여 두 가지의 광학 입자 측정기를 사용하고 이들의 적용 가능성을 검토하였다. 농약의 비산량을 측정하는 현행의 실험 방법들은 실험에 많은 시간과 비용이 드는 반면, 대기 중의 미세먼지, 에어로졸 등의 농도를 간편히 측정하는데 활용되는 광학 입자 측정기를 사용하여 농약의 비산을 측정한 사례는 없었다. 본 연구에서는 실내 간이 실험을 통해 광학 입자 측정기가 농약액과 같은 액체 방울의 측정에 적용가능한지 검토하였고, 과수원용 농약 살포기를 이용한 현장 실험을 통해 실제 비산량과 비교 검토하였다. 이를 통해 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 농약의 비산 측정 위치에서 광학 입자 측정기에 의해 측정된 공기 중 부유물질의 농도는 농약의 살포 전과 살포 후 확연히 다른 값을 보이므로, 광학 입자 측정기를 이용한 농약의 비산 측정이 충분히 가능하다.
2. 실험에 사용된 광학 입자 측정기들은 기기가 측정할 수

있는 입자 크기의 상한 때문에 큰 입경의 농약액 방울들을 측정하는데 한계가 있다. 따라서 비산 중인 농약액 방울들이 충분히 크지 않도록 비산의 측정 위치가 농약의 살포 위치와 적절한 거리를 유지할 필요가 있다.

3. 과수원용 농약 살포기는 강한 바람을 일으키면서 농약을 살포하므로, 농약액 입자 외에도 먼지나 식물 부스러기 등을 비산시켜 광학 입자 측정기의 측정값에 오차를 유발할 수 있으므로 주의가 필요하며, 공기 중 농약액 입자의 농도가 이러한 오차의 가능성보다 충분히 크도록 측정 위치의 조정이나 기기의 선택이 필요하다.
4. OPC 2는 측정 가능한 입경의 범위가 좁고, 따라서 외부 영향에 의한 오차의 가능성과 영향 정도가 커서 현장 실험에는 적합하지 않다.
5. OPC 1를 사용하여 20 m와 40 m 거리에서 농약액의 비산을 측정한 결과는 실제 비산량과 비교하여 $R^2=0.9637$ 로 상당히 유의한 관계를 보였으며, 따라서 OPC 1은 농약의 비산을 쉽게 측정하는데 활용될 수 있을 것이다. 단, 현장 실험 시 풍향 조건의 한계로 인해 80 m 거리에서의 결과는 비교할 수 없었으므로, 먼 거리에서의 활용성에 대해서는 추가적인 검토가 필요할 것이다.
6. 액체 방울들의 측정 과정에서 광학 입자 측정기 내부로의 침적 등에 의해 측정의 정확도와 장비의 내구성에 영향을 줄 수 있으므로, 이에 대해서는 기술적인 고찰이 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이며 (NRF-2019R111A3A01055863), 이에 감사를 표합니다.

REFERENCES

1. Arvidsson, T., L. Bergström, and J. Kreuger, 2011. Comparison of collectors of airborne spray drift: Experiments in a wind tunnel and field measurements. *Pest Management Science* 67(6): 725-733. doi:10.1002/ps.2115.
2. Baetens, K., D. Nuyttens, P. Verboven, M. De Schamphelleire, B. Nicola, and H. Ramon, 2007. Predicting drift from field spraying by means of a 3D computational fluid dynamics model. *Computers and Electronics in Agriculture* 56(2): 161-173. doi:10.1016/j.compag.2007.01.009.

3. Bueno, M. R., J. P. Cunha, and D. G. de Santana, 2017. Assessment of spray drift from pesticide applications in soybean crops. *Biosystems Engineering* 154: 35-45. doi:10.1016/j.biosystemseng.2016.10.017.
4. Chen, Y., H. E. Ozkan, H. Zhu, R. C. Derksen, and C. R. Krause. 2013. Spray drift and off-target loss reductions with a precision air-assisted sprayer. *Transactions of the ASABE* 56(6): 1273-1281. doi:10.13031/trans.56.10173.
5. De Schampheleire, M., P. Spanoghe, E. Brusselman, and S. Sonck, 2007. Risk assessment of pesticide spray drift damage in Belgium. *Crop Protection* 26(4): 602-611. doi:10.1016/j.cropro.2006.05.013.
6. Farooq, M., and M. Salyani, 2004. Modeling of spray penetration and deposition on citrus tree canopies. *Transactions of the ASABE* 47(3): 619-628. doi:10.13031/2013.16091.
7. Fox, R. D., R. C. Derksen, H. Zhu, R. A. Downer, and R. D. Brazeo, 2004. Airborne spray collection efficiency of nylon screen. *Applied Engineering in Agriculture* 20: 147-152. doi:10.13031/2013.15883.
8. 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.
9. Hong, S. W., and R. W. Kim, 2018. CFD modeling of pesticide flow and drift from an orchard sprayer. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 60(3): 27-36. doi:10.5389/KSAE.2018.60.3.027 (in Korean).
10. Jensen, P. K., and M. H. Olesen, 2014. Spray mass balance in pesticide application: A review. *Crop Protection* 61: 23-31. doi:10.1016/j.cropro.2014.03.006.
11. Kostat, 2019. Pesticide and fertilizer uses. http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=2422. Accessed 01 Aug. 2019.
12. Mamane, A., C. Raheison, J. F. Tessier, I. Baldi, and G. Bouvier, 2015. Environmental exposure to pesticides and respiratory health. *European Respiratory Review* 24: 462-473. doi:10.1183/16000617.00006114.
13. Miller, G. T., 2004. *Sustaining the earth*, 6th edition. Thompson learning, Inc. Pacific Grove, California. 9: 211-216.
14. Miller, D. R., W. E. Yendol, and M. L. McManus, 1992. On the field sampling of pesticide spray distributions using Teflon spheres and flat cards. *Journal of Environmental Science and Health, Part B* 27: 185-208. doi:10.1080/03601239209372774.
15. Pompe, J. C. A. M., H. J. Holterman, and B. C. P. M. van Straelen, 1992. Technical aspects of pesticide application. Wageningen Agricultural University. Netherlands, 49-50.
16. You, K., H. Zhu, and J. R. Abbott, 2019. Deposition of fluorescent dye Brilliant Sulfaflavine on stainless steel screens as spray collectors. *Transactions of the ASABE* 62(2): 495-503. doi:10.13031/trans.13136.
17. Zhao, H., C. Xie, F. Liu, X. He, J. Zhang, and J. Song, 2014. Effects of sprayers and nozzles on spray drift and terminal residues of imidacloprid on wheat. *Crop Protection* 60: 78-82. doi:10.1016/j.cropro.2014.02.009.