

정전 분무 간접 하전 방식에서 미세액적 최적 발생 조건에 관한 연구

이지희¹, 김성환² , 정해영³ 

¹ 세명대학교 소방방재공학과

² 인하대학교 전기공학과

³ 세명대학교 소방방재학과

A Study on the Optimal Generation Conditions of Micro-Droplet in Electrostatic Spray Indirect Charging Method

Jihee Lee¹, Sunghwan Kim², and Haiyoung Jung³

¹ Department of Fire and Disaster Prevention Engineering, Semyung University, Jecheon 27136, Korea

² Department of Electrical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

³ Department of Fire and Disaster Prevention, Semyung University, Jecheon 27136, Korea

(Received October 13, 2023; Accepted October 31, 2023)

Abstract: This paper is a study on the optimal microdroplet generation conditions in indirect charging electrostatic spraying. Unlike the direct charging method, which applies power to the nozzle, the indirect charging method applies power to the discharge electrode between the nozzle and the collection electrode. Therefore, an electrically simplified system can be obtained by minimizing the insulation part a stable spray pattern can be obtained with a wide spray angle, and a stable spray pattern can be obtained with a wide spray angle. To conduct the study, an indirect charging type electrostatic spray visualization system was constructed and the static characteristics of the microdroplets were analyzed through image processing of the spray shape of the microdroplets. The total number of microdroplets and the number of microdroplets per power consumption are confirmed according to the changes in the distance between the discharge electrode and the collection electrode, the flow rate, and the applied voltage, which affect the generation of microdroplets, and using this, the optimal generation conditions are derived and the corresponding microdroplet size distribution was analyzed. As a result of the experiment, it was confirmed that the optimal generation condition was at a flow rate of 15 to 20 mL/min and a voltage of -22.5 to -25 kV in terms of the number of microdroplets, and at a flow rate of 15 to 20 mL/min and a voltage of -20 kV in terms of energy consumption efficiency.

Keywords: Microdroplets, Electrostatic spray, Indirect charging, Optimal generation conditions, Fine dust collection

1. 서론

최근 몇 년 동안, 전 세계적으로 계절과 무관하게 대기 중에 미세먼지 농도가 증가하고 있으며 이로 인한 대기오염에 대한 우려가 지속적으로 커지고 있다. 2019년 세계 공기질 보고서에 따르면 대한민국의 연평균 초미세먼지 (PM_{2.5})의 농도는 24.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 경제협력개발기구

✉ Haiyoung Jung; hyjung@semyung.ac.kr
Sunghwan Kim; saint1119@naver.com

Copyright ©2024 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://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.

(OECD) 회원국 중 가장 나쁘며 전 세계 98개국 중 26번째로 심각한 수준으로 나타났다 [1,2]. 대한민국의 2021년 전국 연평균 초미세먼지 농도는 OECD 가입국(수도) 기준 최하위 수준(총 38개국 중 35위)에 머무르고 있다 [3].

자연적, 화학적으로 생성되는 미세먼지는 인체에 직접적인 영향을 미치는데 호흡기 질환의 유병률과 중증률을 증가시키며 미세먼지에 취약한 계층의 사망률을 증가시킨다 [4,5]. 이러한 이유로 세계보건기구(WHO)의 산하 국제암연구소에서는 미세먼지를 1군 발암물질로 지정하였으며, OECD는 미세먼지에 의한 대기오염이 질병 증가, 의료비 상승, 노동 생산성 저하 등과 같은 다양한 사회적 문제를 야기시켜 2060년까지 지속적으로 경제적 손실을 발생시킬 것으로 예상하였다 [6]. 따라서 발전소, 화학공장 등 여러 산업분야에서 발생하는 미세먼지를 저감하기 위한 다양한 집진기들에 대한 연구들이 진행되고 있다.

미세먼지를 집진하는 방법에는 필터를 이용하는 여과 집진기, 원통 내 원심력을 이용한 원심력 집진기, 코로나 방전을 이용한 전기 집진기 등이 있다. 여과 집진기는 필터를 이용하여 취급이 간단하고 여러 가지 형태의 분진 포집이 가능하지만 습윤한 환경에서는 사용이 어렵고 필터의 소모로 인한 유지관리비가 비싼 단점이 있다 [7]. 원심력 집진기는 구조가 간단하고 부피가 작으며 유지보수에 유리하지만 미세입자에 대한 집진 효율이 낮으며 온도, 압력, 유해가스 등 주변 환경에 영향을 받기 쉽다 [8]. 마지막으로 전기 집진기는 다량의 분진 처리와 넓은 온도 범위에서 설계가 가능하며 운영비가 적다는 장점이 있지만 미세먼지가 대전되는 효율이 낮고 코로나 방전 시 발생하는 오존으로 인해 별도의 오존 제거 장치를 구비해야 하는 단점이

있다 [9]. 이러한 다양한 집진기들의 단점들을 해결하기 위해 습식 정전 분무 방식을 이용한 집진기에 대한 연구가 진행되고 있다.

정전 분무 방식은 대전된 미세액적을 발생시키는 방법에 따라 직접 하전 방식과 간접 하전 방식으로 나뉜다. 직접 하전 방식은 그림 1(a)와 같이 전도성 노즐에 직접 고전압을 인가하여 대전된 미세액적을 발생시키고, 부유하는 미세먼지를 대전된 미세액적으로 흡착하여 집진 전극으로 포집하는 방식이다 [10]. 반면에, 간접 하전 방식은 그림 1(b)와 같이 노즐과 집진 전극 사이에 유도 전극을 위치시키고 유도 전극에 고전압을 인가하여 미세액적을 발생시켜 미세먼지를 집진 전극으로 포집하는 방식이다 [11].

직접 하전 방식은 설계가 단순하고 시스템 구성이 용이한 장점이 있으나 수십 kV의 고전압을 전도성 노즐에 직접 인가하기 때문에 노즐과 분무액을 공급하는 배관 라인 전체에 절연을 강화해야 한다 [12,13]. 배관 라인의 절연 강화를 위해 추가적인 전기 절연 부품을 구비해야 하며, 분무액 수조에 대한 추가적인 애자 설치를 고려해야 하는 등 전체 시스템 구성의 복잡성이 증가한다. 반면에, 간접 하전 방식은 유도 전극만 절연시키면 되므로 시스템 구성을 단순화할 수 있고 유도 전극과 집진 전극 간의 거리 및 유도 전극의 형상에 따라 전기적으로 안정적이고 미세먼지 포집에 유리한 넓은 분무각을 얻을 수 있다 [14]. 이러한 이점을 기반으로 정전 분무 간접 하전 방식에서 다량의 미세먼지를 효과적으로 포집하기 위해서는 적절한 유량 조건, 유도 전극과 집진 전극 사이의 거리, 인가전압에 따라 미세액적의 개수 및 크기 분포 변화에 대한 연구가 필요하다.

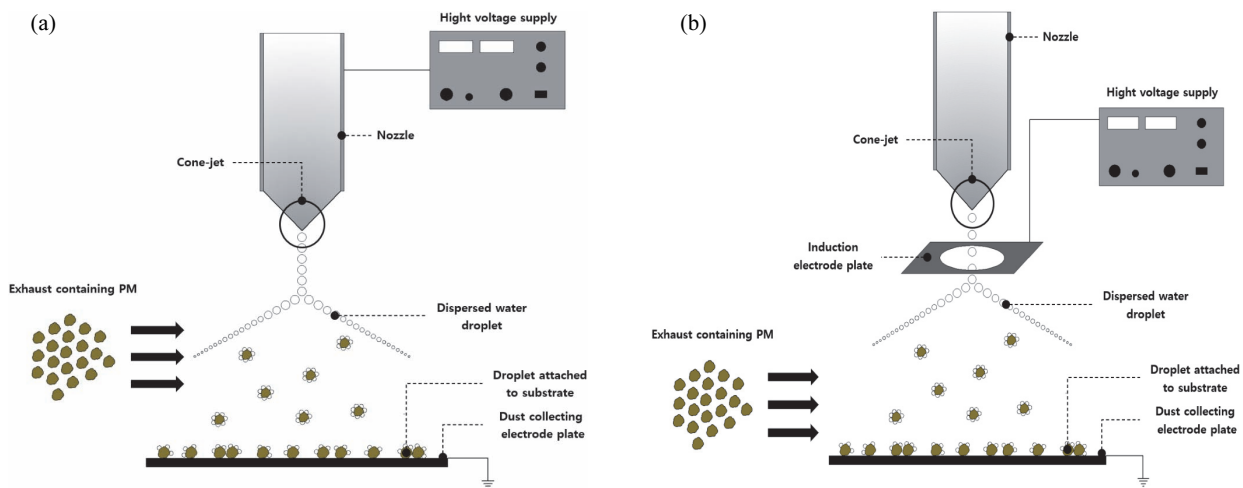


Fig. 1. Schematic diagram of electrostatic spray direct and indirect charging method: (a) direct charging type and (b) indirect charging type.

2. 이론적 배경

정전 분무를 이용한 집진 장치는 미세먼지 입자와 대전된 미세액적을 정전기적 인력으로 결합하고 이렇게 결합된 입자를 기존 기체 흐름에서 벗어나 집진 전극으로 이동하는 원리를 이용한다. 이러한 원리에 의해 집진 효율은 입자들의 정전기적 상호작용과 관성 충돌에 의존하며 Davenport *et al.*은 정전기적 상호작용에 관한 이론적인 집진 효율을 다음과 같이 제시하였다 [15-17].

$$\eta_{es} = \frac{16K_c C_c q_p q_d}{3\pi\mu V_r d_p d_d^2} \quad (1)$$

여기서, η_{es} 는 정전기적 상호작용에 의한 미세먼지 집진 효율, K_c 는 쿨롱 상수(Nm^2/C), C_c 는 커닝햄 보정계수, μ 는 점성계수, V_r 은 미세먼지 입자와 액적의 상대속도(m/s), d_d 는 미세액적의 직경(m), d_p 는 미세먼지 입자의 직경(m), q_d 는 미세액적의 전하량(C), q_p 는 미세먼지 입자의 전하량(C)을 의미한다.

또한, Kim *et al.*은 지름 $5 \mu m$ 이상 입자의 주요 메커니즘인 관성 충돌을 설명하는 스토크스 수를 $S_{th} = \frac{\rho_p V_r d_p^2}{18\mu d_d}$ 로 정의하고 미세액적의 물리적 특성과 스토크스 수를 이용하여 관성 충돌에 의한 집진 효율을 식 (2)와 같이 제시하였다 [17,18].

$$\eta_{imp} = 3.4(S_{th})^{\frac{2}{5}} = 3.4 \left(\frac{\rho_p V_r d_p^2}{18\mu d_d} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (2)$$

여기서, η_{imp} 는 관성 충돌에 의한 집진 효율, d_p 는 미세먼지 입자의 직경(cm), ρ_p 는 미세먼지 입자 밀도(g/cm^3), V_r 은 미세먼지 입자와 액적의 상대속도(cm/s), d_d 는 미세먼지 입자의 직경(cm)이다.

식 (1)과 (2)의 미세액적 크기와 집진 효율의 관계에서 미세먼지의 미세액적 크기가 너무 작아지면 집진 효율을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 하지만 미세액적의 크기가 너무 작아지면 집진기 내부에서 미세액적이 약 1초 이내에 증발하기 때문에 효과적인 포집을 위해서는 수십~수백 μm 로 생성해야 한다 [19].

Gañán-Calvo *et al.*은 액체의 특성과 유량을 이용하여 전기 전도성이 낮은 액체에 대하여 적용할 수 있는 액적의 크기에 관해 식 (3)을 제시하였다 [20].

$$d_d = 3.78 \times 0.6\pi^{-\frac{2}{3}} Q^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho\epsilon_0}{\gamma K} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (3)$$

여기서, d_d 는 미세액적의 크기(m), Q 는 액체의 유량(mL/min), ρ 는 액체의 밀도(g/cm^3), ϵ_0 는 진공 상태에서 유전율($8.85 \times 10^{12} C^2/Nm^2$), γ 는 표면장력(N/m), K 는 전기 전도계수(S/m)이다. 미세액적의 크기는 액체의 고유 특성에 의한 파라미터에 영향을 받으며 유량 조절을 통해 크기를 결정할 수 있다. 또한, Hartman *et al.*은 미세액적의 크기를 식 (4)와 같이 실험적으로 산정하였으며 미세액적의 크기는 액체의 유량과 방전 전류를 통해 결정할 수 있음을 제시하였다 [21].

$$D_d = \left(0.8 \times \frac{288\epsilon_0 \gamma Q^2}{I^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

본 연구에서는 이론적 배경을 바탕으로 가시화 장치를 제작하여 미세액적 특성을 관찰하고 집진 효율에 영향을 주는 전극 간 거리, 유량, 전압 변화를 조건으로 정전 분무 간접 하전 방식의 최적 발생 조건을 도출하였다.

3. 실험 방법

3.1 실험 장치

그림 2는 정전 분무 간접 하전 방식의 가시화 시스템 개략도이다. 가시화 시스템은 미세액적을 발생시키기 위한 정전 분무 발생부와 발생된 미세액적의 개수 및 크기 분포를 측정하기 위한 촬영부로 구성된다. 정전 분무 발생부는 전도성 액체를 노즐에 공급하는 실린지 펌프, 미세액적을 발생시키기 위한 유도 전극과 고전압 장치, 미세액적과 정전기적 결합을 통해 미세먼지를 포집하는 집진 전극으로 구성된다. 또한, 방전 및 누전에 대한 시스템 안전성을 위해 아웃박스는 절연체인 아크릴로 제작되었다. 촬영부는 배경광을 위한 LED 조명, 조명과 카메라를 동기화하는 스트로보스코프, 코로나 방전현상 촬영을 위한 디지털카메라와 미세액적 형상을 촬영하기 위한 머신 비전 카메라로 구성된다. SpinView 프로그램을 통해 분무 형상 이미지를 정밀하게 촬영하고 Open eVision 프로그램을 통한 이미지 분석을 통해 미세액적 개수 및 크기를 분석하였다. 표 1은 가시화 시스템의 세부 사양을 나타낸다.

3.2 실험 조건

정전 분무 간접 하전 방식에서 미세액적 발생에 가장 큰 영향을 주는 조건은 유도 전극과 집진 전극 간의 거리, 유

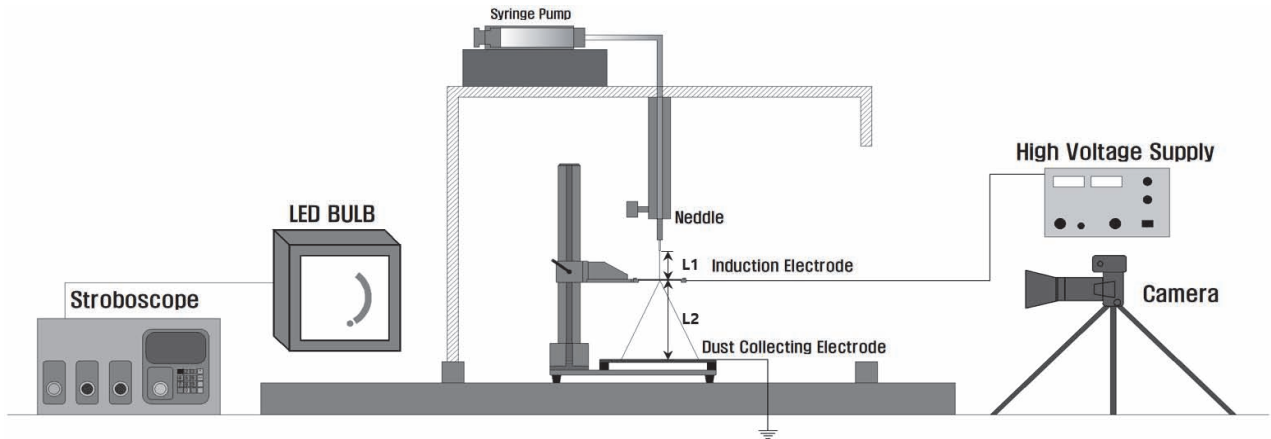


Fig. 2. Indirect charging type electro spray visualization system.

Table 1. Detailed specification of the experimental equipment.

Name	Specification
Syringe pump	NE-1000
Nozzle	KD505CS
Collection electrode	Stainless steel (300×300 mm)
Induction electrode	Stainless steel (100×100 mm)
Outbox	Acryl
High voltage power supply	B170
Stroboscope	LCP 24-30Q
Machine vision camera	BFS-U3-51S5M
Digital camera	Sony A7c
Photographing program	SpinView
Droplet analysis program	Open eVision

Table 2. Detailed specification of the experimental condition.

Condition	Value
Nozzle inner diameter (mm)	0.55
Discharge electrode hole (mm)	50
L1: Nozzle to discharge electrode distance (mm)	50
L2: Discharge to collection electrode distance (mm)	100, 200, 300
Flow rate (mL/min)	5~20
Voltage (kV)	-25~-15
Temperature (°C)	25
Solution	Tap water
Stroboscope duration (us)	15

량, 전압이다. 전극 간 거리는 일정거리 이하에서는 방전 전류의 급격한 증가와 함께 아크 방전으로 인한 스파크가 발생한다. 반면, 전극 간의 거리가 증가할수록 대전된 미세액적의 개수가 감소하는 경향이 있어 미세액적 개수와 분무각이 충분히 형성될 수 있도록 전극 간의 거리를 100, 200, 300 mm로 설정하였다.

유량은 미세면지와 접촉하는 미세액적의 생성 개수인 액기비를 높이기 위해 5 mL/min 이상의 높은 수준을 투입하여야 한다. 하지만 과도하게 빠른 속도의 투입량은 선형 분무구간을 증가시켜 분무 범위를 협소하게 하므로 이러한 특성을 고려하여 5~20 mL/min 범위에서 5 mL/min 단위로 설정하였다. 전압은 전극 간 거리와 유량을 고려하여 코로나 방전이 유효하게 일어나는 임계 전압 이상에서

스파크가 발생하지 않는 범위인 -25~-15 kV에서 -2.5 kV 간격으로 인가하였다. 표 2는 상세 실험 조건을 나타낸다.

3.3 Image processing

그림 3은 미세액적 개수와 미세액적 크기 산정을 위한 이미지 프로세싱 과정을 나타낸다. 고배율 카메라로 분무 형상을 촬영하고(step 1), Open eVision 프로그램의 FFT 필터를 통해 이진화하여 미세액적을 추출한다(step 2). 이진화된 이미지에서 gaussian filtering을 통해 음영을 보정하고 노이즈를 고려하여 유효한 미세액적을 필터링 한다(step 3). 미세액적의 개수 산정을 위하여 미세액적의 크기는 면적을 지름으로 환산하였다(step 4).

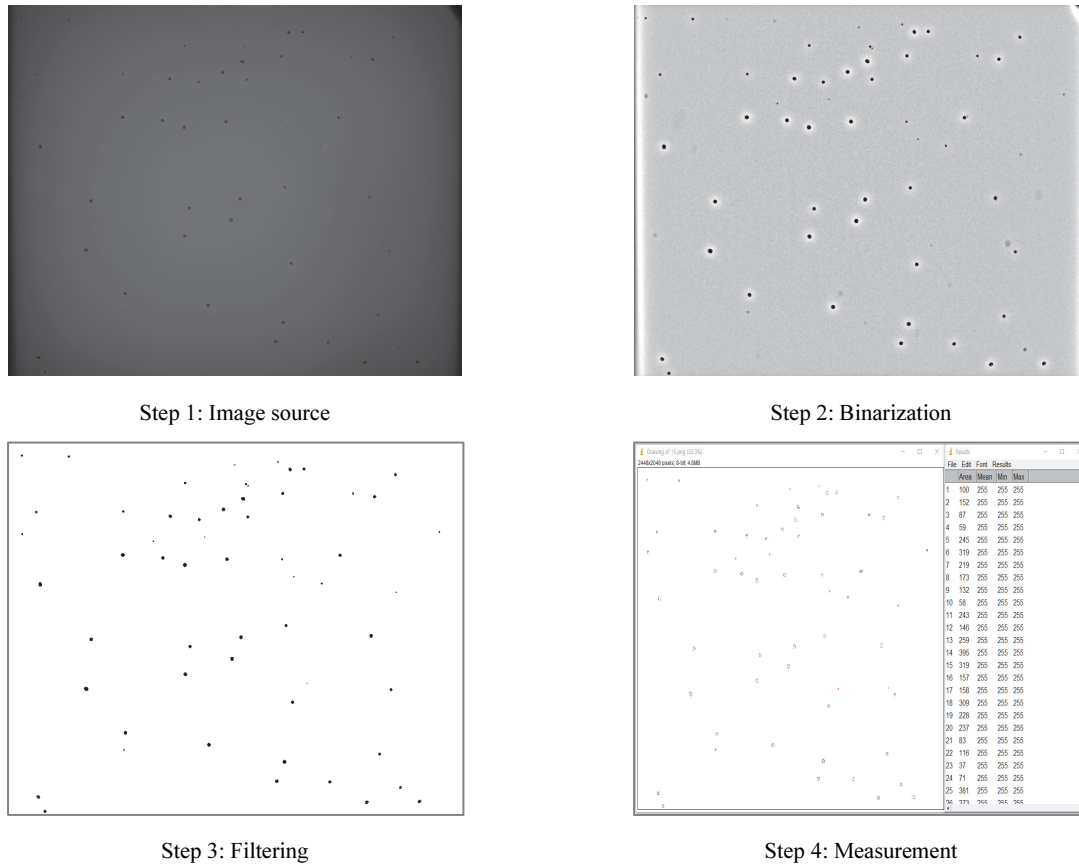


Fig. 3. Image processing procedure.

4. 실험 결과

4.1 노즐-유도 전극: 50 mm (L1), 유도 전극-집진 전극: 100 mm (L2)

4.1.1 미세액적 개수

그림 4(a)는 유도 전극과 집진 전극 거리 100 mm에서 유량과 전압에 따른 전체 미세액적 발생 개수이다. 전압과 유량이 증가할수록 전체 미세액적 발생 개수가 증가하는 경향을 보였으며, -25 kV를 초과하는 전압에서는 전류가 급격히 증가해 아크 방전이 일어났다. 또한, 전압 -20 kV 이상에서 미세액적 발생 개수는 크게 증가하였으며 유량 15 mL/min, 전압 -25 kV에서 미세액적은 316개로 최대 개수를 나타냈다.

그림 4(b)는 지름 1.0 mm 이하의 미세액적 개수를 분석한 결과이다. 유량 5, 10, 15, 20 mL/min에서 발생된 전체 미세액적 개수에서 1.0 mm 이하 미세액적 수의 비율은 각각 95, 98, 99, 99%를 나타냈다.

그림 4(c)는 소비전력당 전체 미세액적 개수를 분석한 결과이다. 전체 미세액적의 개수를 소비전력으로 나눈 값이 높을수록 에너지 소비당 미세액적 생성 효율이 높은 것을 확인할 수 있다. 미세액적 개수가 150개 이상 형성된 조건에서 유량 15, 20 mL/min에서 소비전력당 최대 미세액적의 개수는 각각 463개, 278개이며 15 mL/min, -20 kV에서 가장 높은 미세액적 생성 효율을 나타냈다.

미세액적 생성 개수는 전반적으로 유량과 전압에 비례하는 것을 확인할 수 있었다. 유량 15 mL/min 이하에서는 전압과 유량이 증가할수록 미세액적 생성 개수가 증가하지만 20 mL/min에서는 노즐-집진 전극 간의 짧은 전계 구간과 유속의 증가로 미세액적 생성 개수가 적어지며 급격한 방전전류의 증가로 인해 생성효율이 떨어짐을 확인할 수 있다. 미세액적 생성 개수 측면에서 유량 15 mL/min, 전압 -25 kV에서 최적 조건임을 확인하였고 에너지 소비 효율 측면에서 15 mL/min, 전압 -20 kV에서 최적 조건임을 확인하였다.

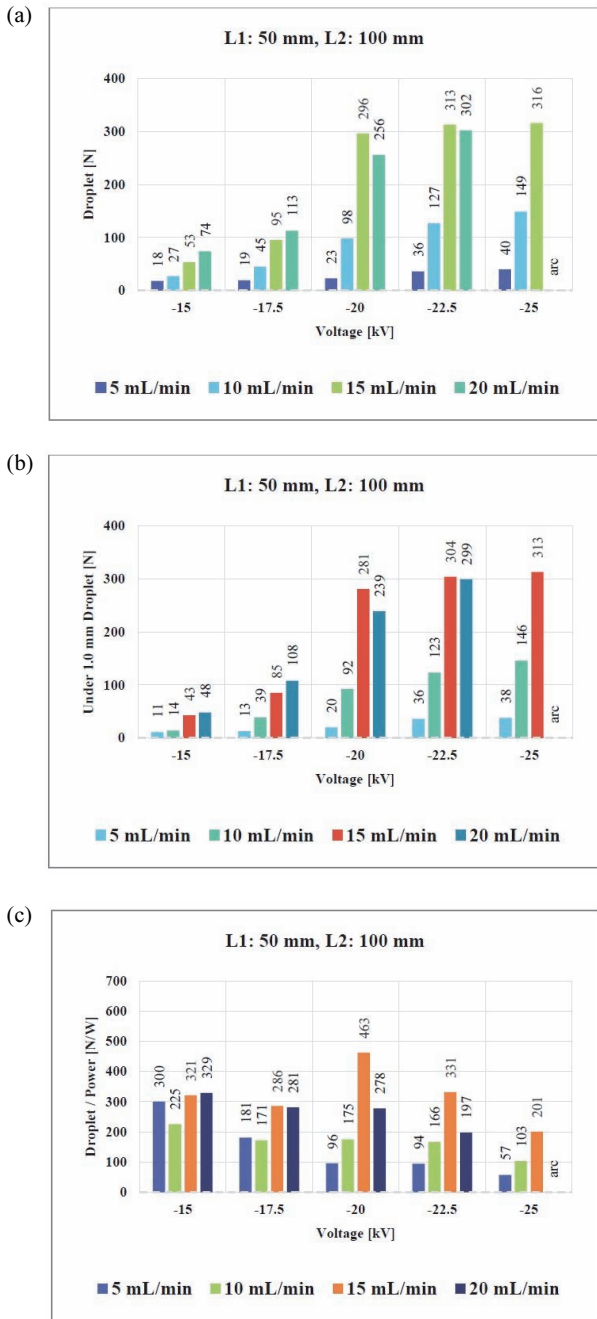


Fig. 4. Droplets according to flow rate and voltage at L2=100 mm: (a) total droplet, (b) under 1.0 mm droplet, and (c) total droplet/power.

4.1.2 미세액적 크기 분포

그림 5(a)는 유도 전극과 집진 전극 거리 100 mm에서 미세액적 크기에 따른 개수를 나타낸다. 15 mL/min, -25 kV에서 미세액적 개수가 최대로 발생하였고, 미립화된 형태의 미세액적 개수도 가장 많음을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 각 조건에서 미세액적의 크기 분포를 보여주고 있

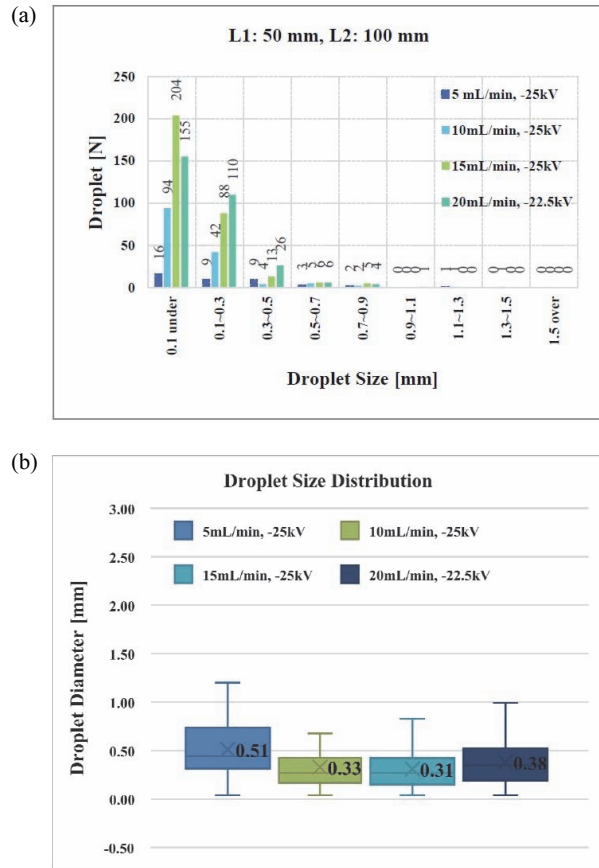


Fig. 5. The number of droplet and size distribution at L2=100 mm: (a) the number of droplet and (b) droplet size distribution.

다. 15 mL/min, -25 kV에서 미세액적의 평균 크기는 0.31 mm이며 대다수 미세액적의 크기는 0.5 mm 이하에 해당한다.

4.2 노즐-유도 전극: 50 mm (L1), 유도 전극-집진 전극: 200 mm (L2)

4.2.1 미세액적 개수

그림 6(a)는 유도 전극과 집진 전극 거리 200 mm에서 유량과 전압에 따른 전체 미세액적 발생 개수를 나타낸다. 전압과 유량이 증가할수록 전체 미세액적 발생 개수가 증가하는 경향을 보였으며, 유량 20 mL/min, 전압 -22.5 kV에서 297개로 최대 개수를 나타냈다.

그림 6(b)는 지름 1.0 mm 이하의 미세액적 개수를 분석한 결과이다. 유량 5, 10, 15, 20 mL/min에서 최대 개수에 대한 지름 1.0 mm 이하 미세액적 개수의 비율은 각각 90, 93, 98, 94%를 나타냈다.

유량이 증가할수록 미세액적 생성 개수는 증가하며 전

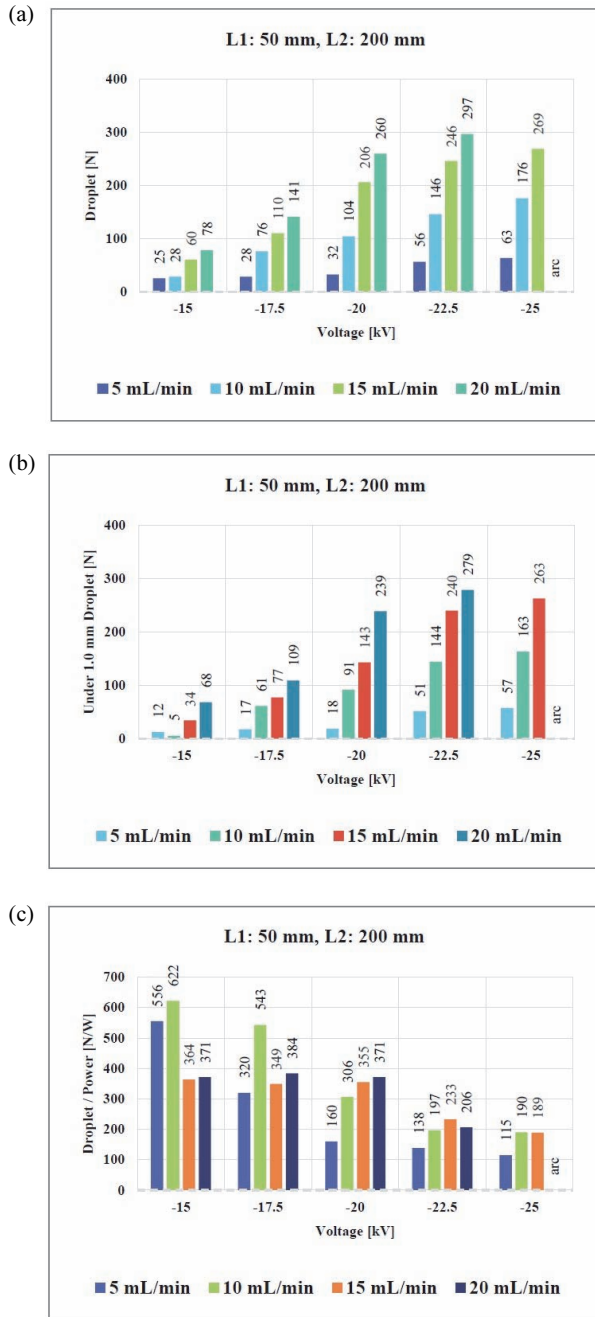


Fig. 6. Droplets according to flow rate and voltage at L2=200 mm: (a) total droplet, (b) under 1.0 mm droplet, and (c) total droplet/power.

압이 증가할수록 미세액적 생성 개수는 증가하지만 방전 전류의 증가로 인해 미세액적 생성 효율은 감소하는 경향을 보였다. 미세액적 생성 개수 측면에서 유량 20 mL/min, 전압 -22.5 kV에서 최적 조건임을 확인하였고 에너지 소비 효율 측면에서 20 mL/min, 전압 -20 kV에서 최적 조건임을 확인하였다.

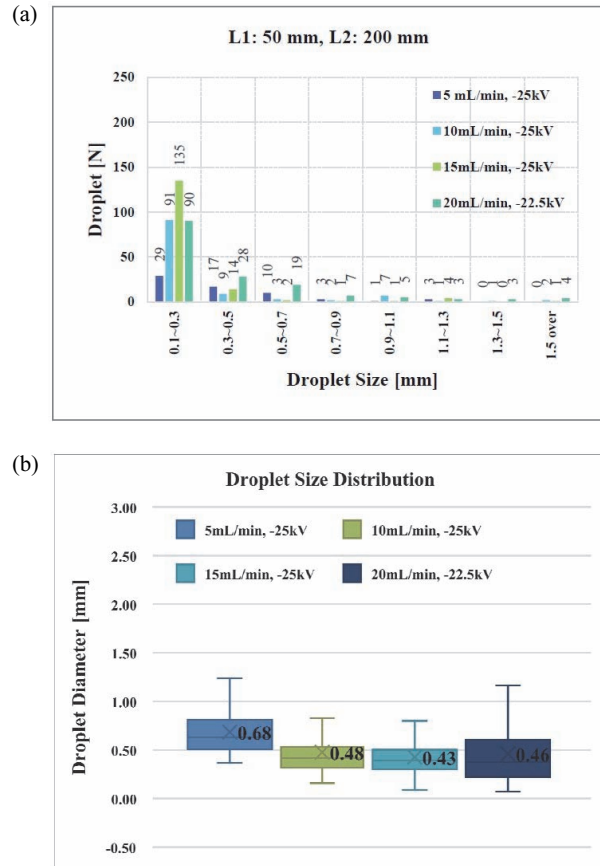


Fig. 7. The number of droplet and size distribution at 200 mm electrode distance: (a) the number of droplets and (b) droplet size distribution.

4.2.2 미세액적 크기 분포

그림 7(a)는 유도 전극과 집진 전극 거리 200 mm에서 미세액적 크기에 따른 개수를 나타낸다. 20 mL/min, -22.5 kV에서 미세액적 개수가 최대 발생하였고, 미립화된 형태의 미세액적 개수도 가장 많음을 확인할 수 있다. 그림 7(b)는 각 조건에서 미세액적의 크기 분포를 보여주고 있다. 20 mL/min, -22.5 kV에서 미세액적의 평균 크기는 0.46 mm이며 대다수 0.6 mm 이하에 해당한다.

4.3 노즐-유도 전극: 50 mm (L1), 유도 전극-집진 전극: 300 mm (L2)

4.3.1 미세액적 개수

그림 8(a)는 유도 전극과 집진 전극 거리 300 mm에서 유량과 전압에 따른 전체 미세액적 발생 개수를 나타낸다. 전압과 유량이 증가할수록 전체 미세액적 발생 개수가 증가하는 경향을 나타내며 유도 전극과 집진 전극의 거리가

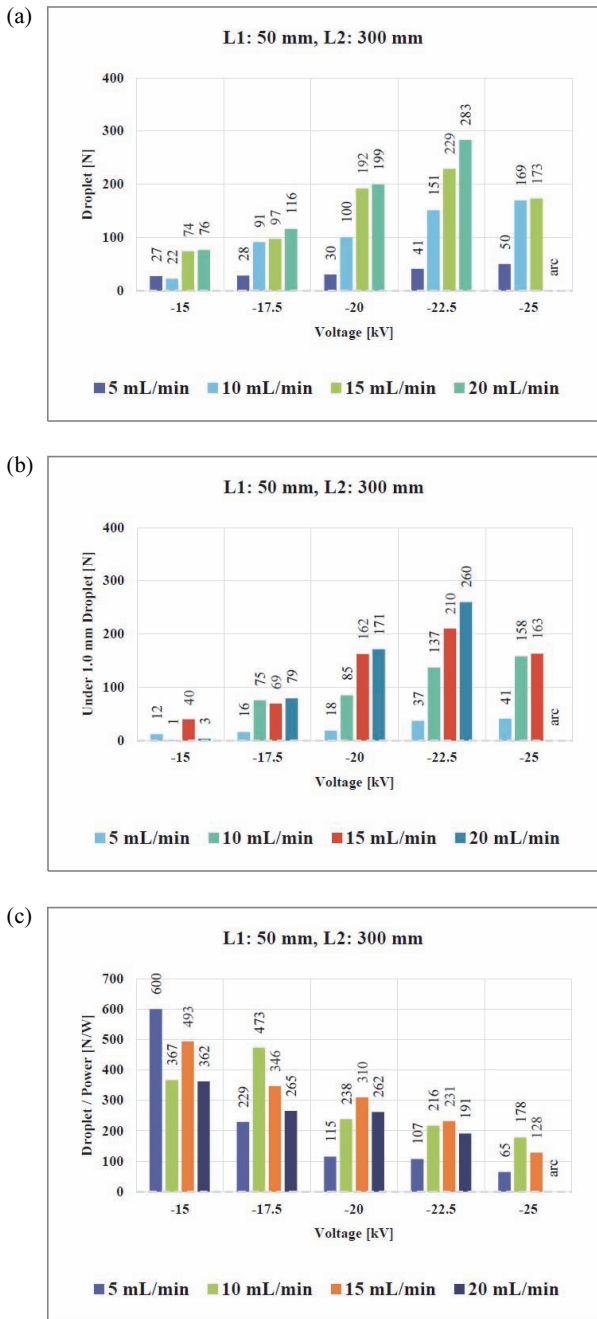


Fig. 8. Droplets according to flow rate and voltage at L2=300 mm: (a) total droplet, (b) under 1.0 mm droplet, and (c) total droplet/power.

길수록 미세액적 발생 개수가 줄어드는 경향을 보였다. 전압 -25 kV 이상에서는 방전전류가 급격히 증가하여 15 mL/min에서는 미세액적 발생 개수가 크게 증가하며 유량 20 mL/min, 전압 -22.5 kV에서 283개로 최대 미세액적 발생 개수를 나타냈다.

그림 8(b)는 지름 1.0 mm 이하의 미세액적 개수를 분석

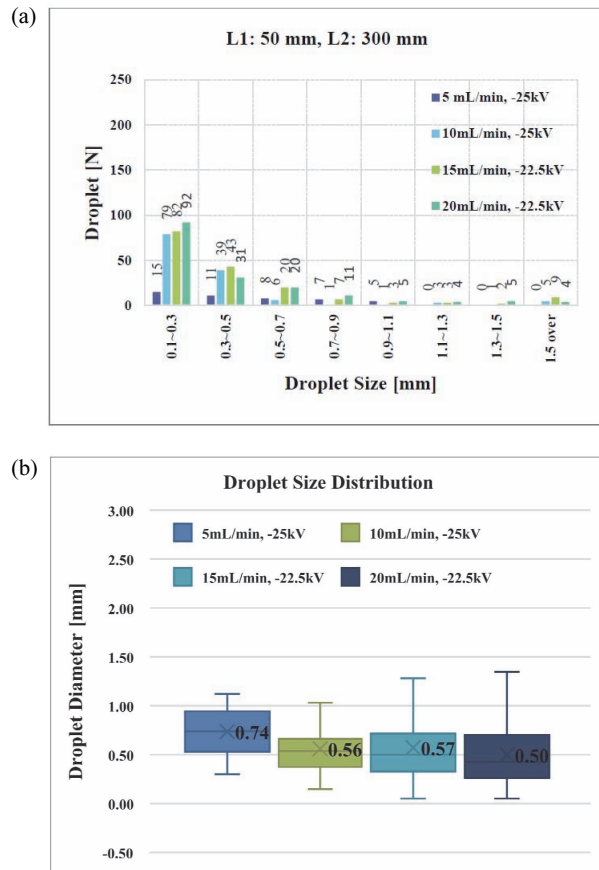


Fig. 9. The number of droplet and size distribution at 300 mm electrode distance: (a) the number of droplet and (b) droplet size distribution.

한 결과이다. 유량 5, 10, 15, 20 mL/min에서 최대 개수에 대한 1.0 mm 이하 미세액적 개수의 비율은 각각 82, 93, 92, 92%를 나타냈다.

그림 8(c)는 소비전력당 전체 미세액적 개수를 분석한 결과이다. 전체 미세액적의 수를 소비전력으로 나눈 값이 높을수록 에너지 소비당 미세액적 생성 효율이 높은 것을 확인할 수 있다. 미세액적이 150개 이상 형성된 조건에서 유량 10, 15, 20 mL/min에서 소비전력당 최대 미세액적의 개수는 각각 216개, 310개, 262개이며 15 mL/min, -20 kV에서 가장 높은 미세액적 생성 효율을 나타냈다.

4.3.2 미세액적 크기 분포

그림 9(a)는 유도 전극과 집진 전극 거리 300 mm에서 미세액적 크기에 따른 개수를 나타낸다. 20 mL/min, -22.5 kV에서 미세액적 개수가 최대로 발생하였고, 미립화된 형태의 미세액적 개수도 가장 많음을 확인할 수 있다.

그림 9(b)는 각 조건에서 미세액적의 크기 분포를 나타낸다. 20 mL/min, -22.5 kV에서 미세액적의 평균 크기는 0.5 mm이며 대다수 0.7 mm 이하에 해당한다.

5. 결론

본 연구에서는 미세먼지 집진을 위한 정전 분무 간접 하전 방식의 최적 발생 조건을 도출하였다. 정전 분무 가시화 시스템을 구성하여 미세액적 발생에 영향을 미치는 유량, 인가전압, 유도 전극과 집진 전극 간 거리의 변화에 따라 실험을 수행하였다. 전체 미세액적 수와 소비전력당 미세액적 개수를 확인하였고, 이를 통해 최적 발생 조건을 도출하였으며 그에 따른 미세액적 크기 분포를 분석하였다. 실험 결과 유량 15~20 mL/min, 전압 -25~-22.5 kV에서 미세액적 개수가 최대로 발생하였으며, 에너지 소비 효율 측면에서는 유량 15~20 mL/min, 전압 -20 kV가 미세액적 최적 발생 조건인 것을 확인하였다. 향후에는 본 연구의 결과를 바탕으로 직접 하전과 간접 하전 방식의 미세액적 생성 및 에너지 소비 효율에 대해 비교 분석하고 미세먼지 유입량의 변화에 따른 미세액적 발생량 조절이 가능한 최적 집진 효율에 관한 연구를 수행하고자 한다.

ORCID

Haiyoung Jung
Sunghwan Kim

<https://orcid.org/0000-0001-5531-2923>
<https://orcid.org/0000-0002-2020-6861>

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2021-KA164174). 본 과제(결과물)는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2021RIS-001).

REFERENCES

- [1] S. Lee, *Korean Soc. Environ. Sociol.*, **25**, 7 (2021). doi: <https://doi.org/10.22734/ECO.25.2.202112.001>
- [2] M. Kim, *Int. J. Tourism Hospitality Res.*, **35**, 131 (2021). doi: <https://doi.org/10.21298/IJTHR.2021.5.35.5.131>
- [3] H. Lee, T. Yoon, and Y. Lee, *Korean Energy Econ. Rev.*, **21**, 161 (2022). doi: <https://doi.org/10.22794/keer.2022.21.2.006>
- [4] A. S. Jang, *Korean J. Med.*, **88**, 150 (2015). doi: <https://doi.org/10.3904/kjm.2015.88.2.150>
- [5] W. Yang, *Health Welfare Forum*, **269**, 20 (2019). doi: <https://doi.org/10.23062/2019.03.3>
- [6] S. Kyung and S. Jeong, *J. Korean Med. Assoc.*, **60**, 391 (2017). doi: <https://doi.org/10.5124/jkma.2017.60.5.391>
- [7] J. Kim and J. J. Kim, *J. Korean Soc. Visualization*, **19**, 130 (2021). doi: <https://doi.org/10.5407/jksv.2021.19.3.130>
- [8] K. M. Jang, E. S. Jung, and J. M. Suh, *J. Environ. Sci. Int.*, **29**, 457 (2020). doi: <https://doi.org/10.5322/JESI.2020.29.5.457>
- [9] S. Park, J. Park, Y. Noh, Y. Choi, S. Kang, Y. Lee, and J. Choi, *J. Energy Climate Change*, **16**, 231 (2021). doi: <https://doi.org/10.22728/jecc.2021.16.2.231>
- [10] H. Liu, R. Tian, C. Liu, J. Zhang, M. Tian, X. Ning, X. Hu, and H. Wang, *Polymers*, **14**, 3975 (2022). doi: <https://doi.org/10.3390/polym14193975>
- [11] S. Choi, S. Kim, and H. Jung, *Electronics*, **12**, 2579 (2023). doi: <https://doi.org/10.3390/electronics12122579>
- [12] S. Kim, M. Jung, S. Choi, J. Lee, J. Lim, and M. Kim, *Exp. Therm Fluid Sci.*, **118**, 110151 (2020). doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusc.2020.110151>
- [13] Y. Cho, S. Kim, H. Lim, S. Choi, and M. Kim, *J. Mech. Sci. Technol.*, **33**, 4563 (2019). doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0853-5>
- [14] J. Choi, K. Jeong, and H. Jung, *Int. J. Fire Sci. Eng.*, **36**, 1 (2022). doi: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.75841f94>
- [15] S. Choi, S. Kim, and H. Jung, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 474 (2023). doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.5.6>
- [16] H. M. Davenport and L. K. Peters, *Atmos. Environ.*, **12**, 997 (1978). doi: [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(78\)90344-X](https://doi.org/10.1016/0004-6981(78)90344-X)
- [17] C. Carotenuto, F. Di Natale, and A. Lancia, *Chem. Eng. J.*, **165**, 35 (2010). doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.08.049>
- [18] H. T. Kim, C. H. Jung, S. N. Oh, and K. W. Lee, *Env. Eng. Sci.*, **18**, 125 (2001). doi: <https://doi.org/10.1089/10928750151132357>
- [19] M. K. Jung, S. Y. Kim, J. H. Lim, J. W. Lee, and S. H. Jeong, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, **46**, 121 (2022). doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2022.46.2.121>
- [20] A. M. Gañán-Calvo, *Phys. Rev. Lett.*, **79**, 217 (1997). doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.217>
- [21] R.P.A. Hartman, D. J. Brunner, D.M.A. Camelot, J.C.M. Marijnissen, and B. Scarlett, *J. Aerosol Sci.*, **31**, 65 (2000). doi: [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(99\)00034-8](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(99)00034-8)