J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.
Vol. 36, No. 5, pp. 474-481 September 2023
doi: https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.5.6
ISSN 1226-7945(Print), 2288-3258(Online)

Regular Paper

# 미세먼지 집진을 위한 직접 하전 방식 정전분무의 최적 동작 조건에 관한 연구

**최수기[1], 김성환[2], 정해영[1]**

[1] 세명대학교 소방방재학과

[2] 인하대학교 전기공학과

# The Study on the Optimal Operating Conditions of Direct Charging Type Electrospray for Particulate Matter Collection

Sugi Choi[1], Sunghwan Kim[2], and Haiyoung Jung[1]

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

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

(Received May 15, 2023; Revised June 11, 2023; Accepted July 1, 2023)

**Abstract:** This paper is an experimental study on the optimal operating conditions of direct charging type electrospray for particulate matter collection. To perform the research, a direct charging type electrospray visualization system was configured to photograph the spray shape of microdroplets, and experiments were performed with varying electrode distance, flow rate, and applied voltage, which are the main factors affecting the particulate matter collection efficacy. Through image processing, the total number of microdroplets according to each condition was analyzed, and the number of microdroplets with a diameter of 1.5 mm or less was confirmed. In addition, by calculating the number of microdroplets per power consumption according to the applied voltage, the optimal operating conditions were derived in terms of energy consumption efficacy, and the microdroplet size distribution was analyzed under the optimal operating conditions. As a result of the experiment, it was confirmed that the optimal operating condition was at a flow rate of 10 mL/min and a voltage of -20 kV in case of 5 mm electrode distance, and at a flow rate of 15 mL/min and a voltage of -30 kV in case of 100 mm electrode distance.

**Keywords:** Microdroplets, Electrospray, Fine dust collection, Image processing, Optimal operation conditions

## 1. 서 론

미세먼지에 의한 대기 오염은 세계적인 문제로 인식되고 있으며 이로 인해 전 세계적으로 약 700만 명이 사망하고 새로운 폐암 사례의 약 30%는 대기 오염과 관련이 있다고 보고된다 [1]. 대기 중에 포함된 미세먼지에의 노출은 종양 발달 중에 보이는 암의 여러 특징을 유도하며 폐에 축적되어 여러 호흡기 질환을 유발시킨다 [1,2]. 미세먼지는 화학적, 자연적으로 생성되는 고체 또는 액체 상태로 대기 중에 배출되는 혼합물로 직경에 따라 10 ㎛ 이하 크기는 PM-10, 2.5 ㎛ 이하 크기는 PM-2.5로 분류된다. 특히 PM-2.5는 입자가 미세하여 쉽게 걸러지지 않아 흡입 시 폐포까지 침투하여 호흡기 질환의 유병률과 중증률을 증

✉ **Haiyoung Jung; hyjung@semyung.ac.kr**

**Sunghwan Kim; saint1119@naver.com**

Copyright ©2023 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.

가시킨다. 또한 대기 중에 배출된 미세먼지는 식물의 성장에도 영향을 미쳐 생태계에 부정적인 영향을 주게 되며 여러 가지 사회적 비용을 발생시킨다. 따라서 산업현장, 화력발전소, 공장 및 실내공간 등에서 발생되는 미세먼지를 저감하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다.

미세먼지 집진기는 습식스크러버, 전기집진기 등이 주로 사용되고 있다. 습식스크러버는 해수를 이용하여 미세먼지를 집진할 수 있어 운영비용이 낮은 장점이 있지만, 설치 및 유지보수가 어렵고 폐수 발생으로 인한 2차 오염의 단점이 있다 [3]. 한편, 전기집진기는 전압을 인가하여 코로나 방전을 발생시키고 전기적으로 하전된 미세먼지를 집진 전극으로 포집시켜 미세먼지를 제거하는 방식이다. 이러한 방식은 다량의 미세먼지가 집진 전극에 축적되면서 집진 효율이 급격하게 감소되고, 미세먼지를 털어내는 과정에서 재비산하게 되어 화재를 유발할 수 있다 [4]. 따라서 습식스크러버, 전기집진기의 단점을 해결하기 위해 습식 정전분무 방식의 전기집진기에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

그림 1은 직접 하전 방식의 정전분무를 나타낸 그림이다. 전도성 액체를 노즐(nozzle)을 통해 공급하고 수에서 수십 kV 음의 고전압을 인가하면 액체 내의 이온들이 척력에 의해 액체의 표면으로 이동하게 된다. 액체 표면에 작용하는 표면 장력보다 이온들의 반발력과 인가되는 전기력이 커지면 액체는 미세액적 형태로 분무되는데, dripping, spindle, oscillating cone-jet, multi-jet, stable cone-jet mode 등과 같이 여러 가지 형태로 분무된다 [5,6]. 특히 일정 전압 이상에서 노즐 끝부분의 액체 곡면이 테일러 콘이라 불리는 원뿔 모양을 형성하며 전기응력과 표면장력, 정수압이 평형을 이루는 stable cone-jet mode가 형성되는데 이때 안정적인 정전분무가 가능함을 확인하였다 [7]. 기존의 정전분무에 관한 연구는 ~4 mL/h 수준의 소량의 액체를 사용하는 stable cone-jet mode에 대해 주로 진행되었다. 하지만 많은 양의 미세먼지를 효과적으로 집진하기 위해서는 미세먼지와 접촉하는 하전된 액체의 비율인 액기비가 높아야 하며, 높은 액기비를 얻기 위해서는 ~15 mL/min 수준의 높은 유량 공급이 필요하다. 높은 유량으로 공급되는 유체를 하전된 미세액적 형태로 분무시키기 위해서는 노즐과 집진 전극 거리, 유량, 인가전압의 최적 조건이 반영되어야 한다. 이러한 조건에서 형성된 하전된 미세액적들은 기존의 stable cone-jet mode와 상이한 형태의 분무양상을 보인다 [8]. 또한, 최근 보고된 높은 유량 조건에서의 정전분무 전기집진기에 대한 연구에서는 방전 전류의 특성과 용액의 전도성이 정전분무 특성에 영향을 주고 있음을 보고하고 있다 [9,10]. 다량의 미세먼지를 효과적으로 포집하기 위해서 많은 미세액적 개수와 더 미립화된 크기 분포를 만드는 다양한 조건이 반영된 최적

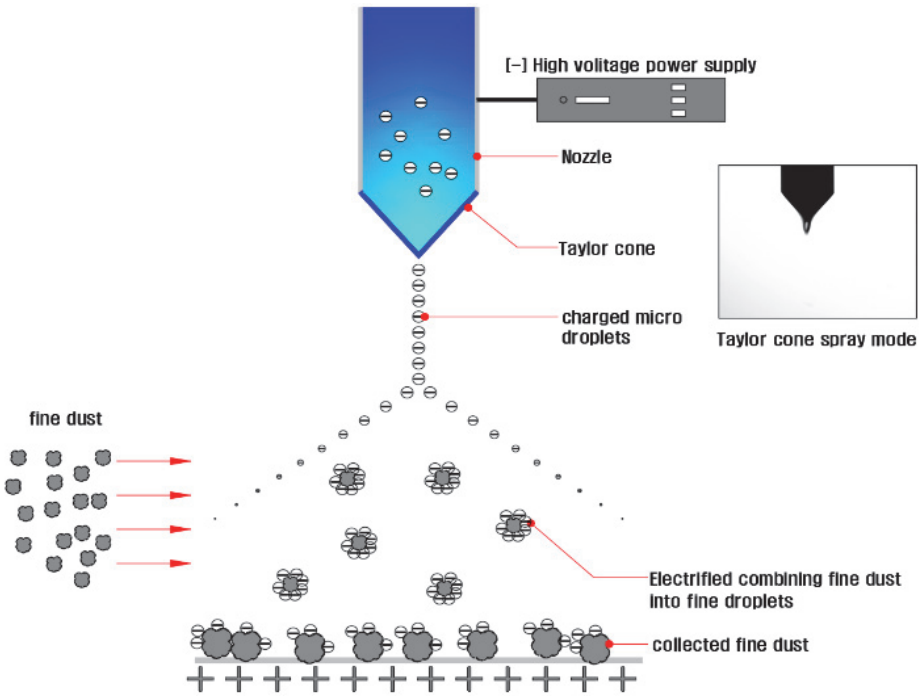



**Fig. 1.** Schematic diagram of electrospray method.

조건에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 미세먼지 집진 효율에 영향을 주는 주요 인자인 노즐과 집진 전극 사이의 거리, 유량, 인가전압의 변화에 따라 실험을 수행하여 높은 액기비를 형성시킬 수 있는 직접 하전 방식 정전분무의 최적 동작 조건에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 정전분무 이론

정전분무를 이용한 미세먼지 집진 방식은 하전된 미세액적의 정전기적 인력을 이용하여 미세먼지를 반대 극성의 전극으로 집진하는 것으로 집진 효율은 입자와 미세액적의 특성에 의해 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다 [11,12].

$$\eta_{es} = \frac{16K_cC_cQ_pQ_d}{3\pi\mu v_r D_p D_d} \quad (1)$$

여기서, $\eta_{es}$는 정전기적 인력에 의한 미세먼지 집진 효율, $K_c$는 쿨롱상수, $C_c$는 커닝햄 보정계수, $\mu$는 점성계수, $v_r$는 미세액적의 상대속도, $D_d$는 미세액적의 직경, $D_p$는 미세먼지 입자의 직경, $Q_d$는 미세액적의 전하량, $Q_p$는 미세먼지 입자의 전하량을 의미한다. 정전기적 인력에 의한 집진 효율은 미세먼지 입자와 미세액적의 하전량에 비례하고 직경에 반비례한다. 식 (1)로부터 시스템이 더 미립화된 미세액적의 분포를 발생시킨다면 더 높은 미세먼지 집진 효율을 기대할 수 있음을 알 수 있다. 하지만 하전된 미세액적의 직경이 10 ㎛ 이하로 매우 작아지면 상대습도가 90% 이상인 집진기 내부에서 미세액적은 약 1초 이내에 증발하므로 미세먼지 입자를 효과적으로 포집하기 위해서는 미세액적의 크기는 일정 크기 이상이어야 한다 [10].

Ganan-Calvo는 전기전도성이 낮은 액체에 대해서도 적용할 수 있는 미세액적의 크기 식을 식 (2)와 같이 제시하였다 [13].

$$D_d = 3.78 \times 0.6\pi^{-2/3}Q^{1/2}\left(\frac{\rho\varepsilon_0}{\gamma K}\right) \quad (2)$$

여기서, $D_d$는 미세액적의 직경, $Q$는 액체의 유량, $\rho$는 액체의 밀도, $\varepsilon_0$는 진공에서의 유전율, $\gamma$는 액체의 표면장력계수, $K$는 액체의 전기전도계수를 의미한다. 미세액적의 크기는 액체의 유량에 비례하며 전기전도도에는 반비례함을 알 수 있다. 더 나아가 Hartman 등은 정전분무에 의한 미세액적의 크기를 액체의 유량과 전류값을 이용하여 식 (3)과 같이 산정하였다 [14].

$$D_d = \left(0.8 \times \frac{288\varepsilon_0\gamma Q^2}{I^2}\right)^{1/3} \quad (3)$$

여기서, $\varepsilon_0$는 진공에서의 유전율, $\gamma$는 액체의 표면장력계수, $Q$는 액체의 유량, $I$는 방전전류를 의미한다. 식 (3)은 액적의 크기는 액적의 유량에 비례하고 방전전류에 반비례하는 경향 실험적으로 보여준다. 따라서 액체의 유량을 증가시키면서 방전전류가 증가하지 않도록 하는 동작 조건에서 더 미립화된 미세액적을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

한편, 노즐의 끝단에서 토출되는 유체가 하전된 미세액적 형태로 원만하게 분무되기 위해서는 식 (4)에 나타낸 노즐 오리피스에 형성되는 전계에 의존한다. 미세액적이 형성되는 전계의 세기는 노즐의 직경, 노즐과 집진 전극 간의 거리, 인가전압 등에 의해 결정된다 [15].

$$E = \left(\frac{2V}{r\ln\left(\frac{4d}{r}\right)}\right) \quad (4)$$

여기서, $E$는 노즐의 오리피스에 형성되는 전기장의 세기, $V$는 인가전압, $r$은 노즐의 내경, $d$는 노즐과 집진 전극 간의 거리를 의미한다.

본 연구에서는 이러한 이론적 배경을 바탕으로 미세먼지의 집진 효율에 영향을 주는 하전된 미세액적 개수와 크기를 분석하기 위하여 미세액적 생성에 영향을 미치는 노즐과 집진 전극 간의 거리, 유량, 인가전압의 조건을 변화하여 실험을 수행하였다.

## 3. 실험 내용

### 3.1 실험 장치

그림 2는 직접 하전 방식의 정전분무 가시화 시스템의 개략도이다. 가시화 시스템은 일정량의 분무액을 이용하여 미세액적을 발생시키는 정전분무 발생부와 정전분무의 특성과 발생된 미세액적의 크기 및 분포를 분석하기 위한 촬영부로 구성된다. 정전분무 발생부는 실린지 펌프(syringe pump)를 통해 일정량의 분무액을 공급하고 노즐을 통해 정전분무를 발생시키고 음전하로 하전된 미세액적을 발생시킬 수 있도록 노즐을 음의 고전압 장치에 연결된다. 집진 전극은 스테인리스강(stainless steel)으로 제작하여 음전하로 하전된 미세액적과 유입된 미세먼지를 정전기적으로 결합하여 포집할 수 있도록 시스템 접지에 연결되었으며, 가시화 시스템의 아웃박스(out-box)는 방전에 영향을 최소화하고 시스템 누전 방지를 위해 아크릴로

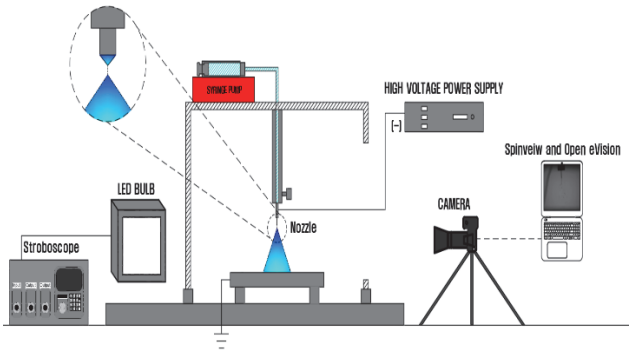



**Fig. 2.** Electrospray visualization system.

**Table 1.** Detailed specification of the experimental equipment.

| Name | Specification |
|---|---|
| Syringe pump | NE-1000 |
| Nozzle | KD505CS |
| Collection electrode | Stainless steel (600×600 mm) |
| Outbox | Acryl (600×600 mm) |
| High voltage power supply | B170 |
| Stroboscope | LCP 24-30Q |
| Machine vision camera | BFS-U3-51S5M |
| Digital camera | Sony A7c |
| Photographing program | Spinveiw |
| Droplet analysis program | Open eVision |

제작되었다. 촬영부는 배경광의 점멸을 위한 스트로보스코프, 미세액적의 정전분무 형상을 촬영하기 위한 머신 비전 카메라와 방전현상 촬영을 위한 디지털카메라로 구성된다. 미세액적 형상은 머신 비전 카메라와 SpinView 프로그램을 통해 정밀하게 촬영되고, 촬영된 이미지는 Open eVision 프로그램을 통해 미세액적 개수 및 크기가 분석되었다. 표 1은 가시화 장치의 각 구성 부품에 대한 세부 사양을 나타낸다.

### 3.2 실험 조건

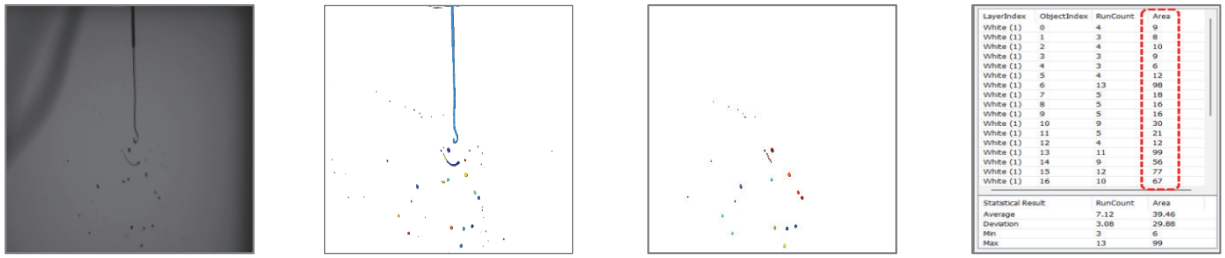
정전분무에서 미세액적 발생에 영향을 주는 주요 인자는 노즐과 집진 전극 간의 거리, 유량, 인가 전압이다. 노즐과 집진 전극 사이 거리는 가까울수록 전기장의 세기가 증가하므로 더 많은 미세액적이 생성될 것으로 예상되지만 일정 거리 이하에서는 방전전류가 급격히 증가하여 아크 방전을 유발시킬 수 있으므로 적절한 전극 간 거리가 필요하다. 유량은 공급이 늘어날수록 정전분무에 의한 미세액적 발생 개수가 증가하여 미세먼지 포집 능력이 증가할 것으로 예상되지만, 유량 공급이 과다하면 다량의 분무액이 노즐을 통해 빠른 속도로 토출되기 때문에 선형분무가 길어지고 이로 인해 정전분무 범위가 줄어들게 된다. 인가전압의 경우, 전압이 증가할수록 더 미립화된 미세액적이 증가하고 하전된 음전하의 증가로 인해 미세먼지 포집 능력이 증가할 것으로 예상된다. 하지만 음전하 발생을 위해서는 일정한 임계 전압 이상을 인가해야 하며, 일정 전압 이상에서는 유량과 전극 간의 거리에 따라 미세액적 개수가 증가분이 증가된 전압 대비 충분히 증가하지 않는 모습을 보일 수 있으므로 전압 범위 설정을 충분히 고려해야 한다. 표 2는 상세 실험 조건을 나타낸다. 본 연구에서는 이러한 직접 하전 방식 정전분무의 특성을 고려하여 전극 거리 50 mm와 100 mm에서 유량 5~20 mL/min까지 5 mL/min의 간격으로 실험을 수행하였으며, 미세액적이 충분히 발생할 수 있는 최소 전압에서 아크 방전이 일어나지 않는 범위인 -35 ~ -15 kV까지 -5 kV 간격으로 인가하였다. 정전분무 발생 이후 SpinView 프로그램을 통해 머신 비전 카메라의 초점을 노즐 끝으로 고정하고 다양한 변수에 따라 정전분무 형상을 동일한 조건과 위치에서 촬영하였다. 이후 촬영된 이미지를 Open eVision 프로그램으로 이미지 프로세싱을 통해 미세액적 개수 및 크기를 측정하였다.

**Table 2.** Detailed specification of the experimental device.

| Condition | Value |
|---|---|
| Nozzle inner diameter [mm] | 0.55 |
| Distance from plate [mm] | 50, 100 |
| Flow rate [mL/min] | 5~20 (step: 5) |
| Voltage [kV] | -35~-15 (step: -5) |
| Temperature [℃] | 25 |
| Solution | Tap water |
| Stroboscope duration [㎲] | 15 |

### 3.3 Image processing

그림 3은 Open eVision 프로그램을 통한 이미지 프로세싱 과정을 나타낸다. Step 1은 고배율 카메라로 촬영된 원본 이미지이며, step 2는 미세액적을 배경으로부터 추출하기 위해 Open eVision 프로그램을 통해 이진화한 형상이다. Step 3은 이진화된 이미지에서 겹침, 누락, 노이즈 등을 고려하여 유효한 미세액적을 필터링한 이미지를 나타내며 마지막으로 step 4에서는 다양한 조건에서 생성된 미세액적의 개수 및 크기를 측정한 내용을 나타낸다. 이미



Step 1: Image source Step 2: Binarization Step 3: Filtering Step 4: Measurement

**Fig. 3.** Image processing procedure.

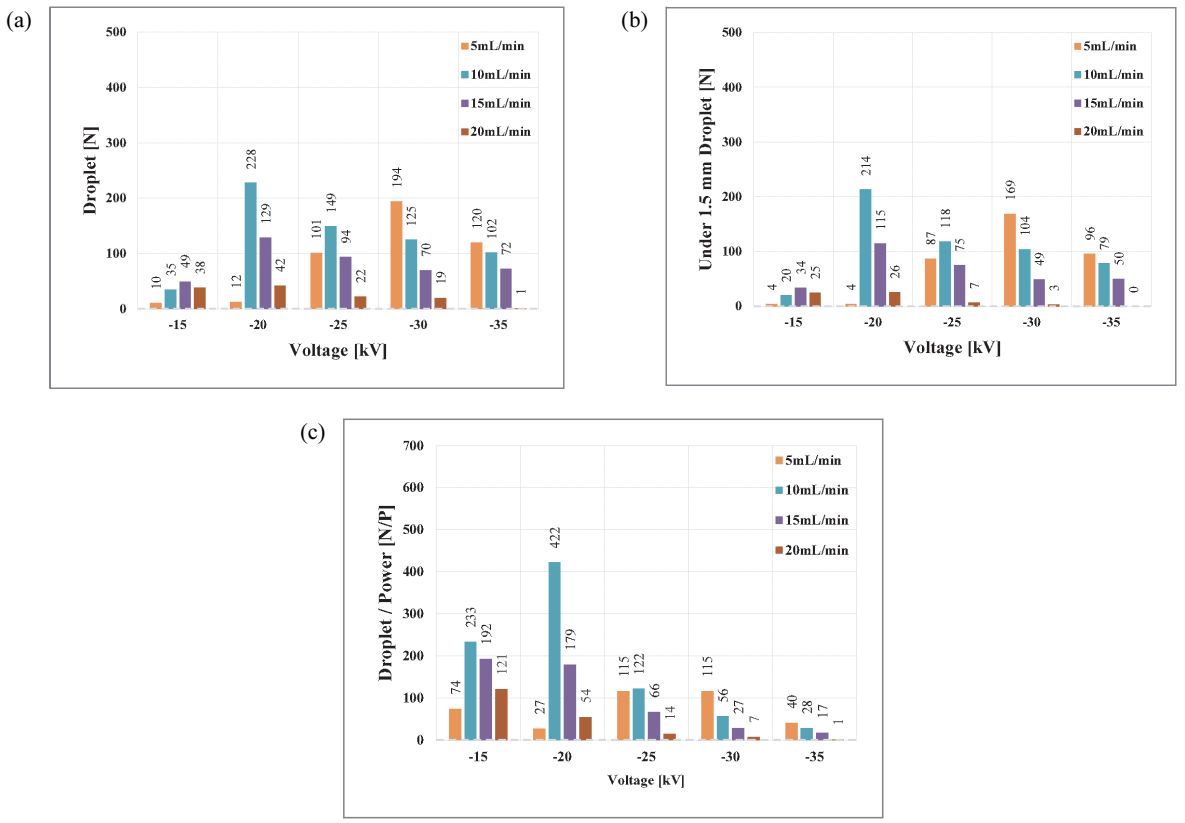



**Fig. 4.** Droplets according to flow rate and voltage at 50 mm electrode distance. (a) Total droplets, (b) under 1.5 mm droplets, and (c) total droplets/power.

지 프로세싱을 통해 측정된 미세액적의 크기는 원의 면적 값이며 이를 미세액적의 지름으로 환산하여 분석하였다.

## 4. 실험 결과

### 4.1 노즐과 집진 전극 거리 50 mm

#### 4.1.1 미세액적 개수

그림 4(a)는 전극 거리 50 mm에서 유량과 전압에 따른 전체 미세액적 개수를 분석한 결과이다. 전압이 증가할수록 전극 간 전계의 상승으로 인해 미세액적의 개수가 증가하는 경향을 보였으며 유량에 따라 최적 전압이 변하는 것을 확인하였다. 유량 5 ml/min에서는 -30 kV에서 최대 개수를 나타내지만 유량 10~20 mL/min에서는 -20 kV에서 최대 개수를 나타냈다. 전압 -15 kV 이상 구간과 유량이 높은 15 mL/min 일부 구간과 20 mL/min에서는 미세액적 생성 개수가 낮았다.

그림 4(b)는 지름 1.5 mm 이하의 미세액적 개수를 분석한 결과이다. 전체 미세액적의 개수와 유사한 경향을 보이

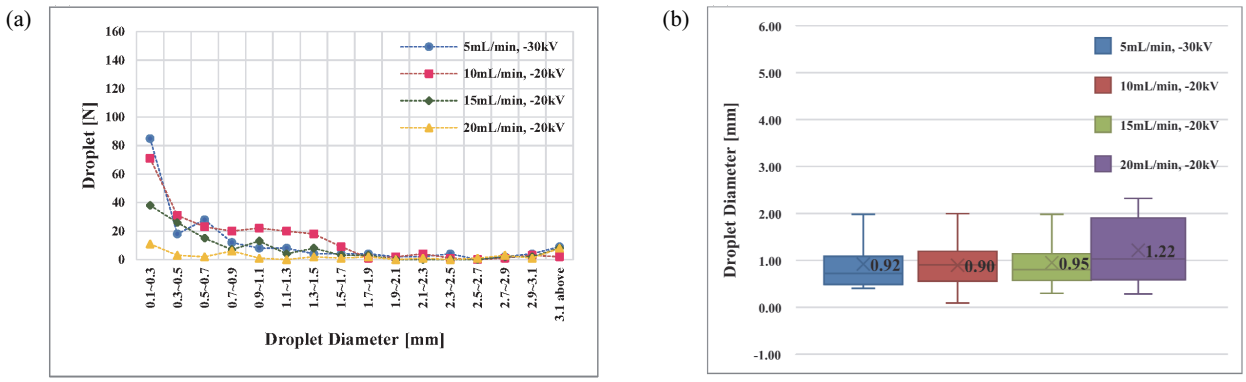



**Fig. 5.** The number of droplet and size distribution at 50 mm electrode distance. (a) The number of droplet and (b) droplet size distribution.

며 최대 개수에서 전체 개수에 대한 백분율은 5, 10, 15, 20 mL/min에서 각각 87, 94, 89, 62%를 나타냈다.

그림 4(c)는 소비전력당 전체 미세액적 개수를 분석한 결과이다. 전체 미세액적의 수를 소비전력으로 나눈 값이며 값이 높을수록 입력 에너지 대비 미세액적의 생성 비율이 높은 것을 의미한다. 미세액적이 100개 이상 형성된 조건에서 유량 5, 10, 15 mL/min에 따른 소비전력당 미세액적의 개수는 각각 115, 422, 179개이며 10 mL/min에서 가장 높은 미세액적 생성 효율을 나타냈다.

전압이 증가할수록 미세액적의 개수가 증가하는 경향을 보이지만 유량이 증가하면 최적 전압이 낮아짐을 확인할 수 있다. 유량 5 mL/min에서 미세액적 생성 개수는 높지만 방전 전류의 급격한 증가로 인해 소비전력당 생성 효율은 감소하며, 유량 20 mL/min에서는 유속이 증가하여 선형 분무 구간이 길어지고 노즐과 집진 전극 사이의 짧은 전계 구간으로 인해 미세액적의 생성 개수가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 미세액적 생성 개수와 소비전력당 미세액적 개수를 비교할 때, 유량 10 mL/min, 전압 -20 kV에서 최적 동작 조건임을 확인하였다.

#### 4.1.2 미세액적 크기 분포

그림 5(a)는 전극 거리 50 mm에서 미세액적의 크기에 따른 개수를 나타낸다. 미세액적이 최대로 발생한 유량과 전압 조건에서 비교하였으며 A (5 mL/min, -30 kV)와 B (10 mL/min, -30 kV)에서 더 미립화된 미세액적의 개수가 많음을 확인할 수 있다. 지름 0.1~0.3 mm의 미세액적 발생은 A 조건에서 더 많지만 전체 발생 개수와 지름 1.5 mm 이하에서 B 조건이 전체적으로 좋은 크기 분포를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 각 조건에서 미세액적의 크기 분포를 나타낸다. B 조건에서 미세액적의 평균 크기는 0.90 mm이며 대다수 1.5 mm 이하에 분포하고 있음을 알 수 있다.

### 4.2 노즐과 집진 전극 거리 100 mm

#### 4.2.1 미세액적 개수

그림 6(a)는 전극 거리 100 mm에서 유량과 전압에 따른 전체 미세액적 개수를 분석한 결과이다. 전압이 증가할수록 미세액적의 개수가 증가하였으며 전극 거리 50 mm보다는 -15~-10 kV 높은 전압에서 최대 개수가 형성되며 유량 5 mL/min과 20 mL/min에서는 낮은 유량과 빠른 유속으로 인해 미세액적 생성 개수가 100개 미만으로 낮은 경향을 보였다.

그림 6(b)는 지름 1.5 mm 이하의 미세액적 개수를 분석한 결과이다. 전체 미세액적 개수와 유사한 경향을 보이며 최대 개수에서의 전체 개수에 대한 백분율은 5, 10, 15, 20 mL/min에서 각각 46, 83, 89, 77%를 나타냈다. 미세액적의 발생이 충분히 일어나는 조건에서 더 작은 크기의 미세액적이 발생됨을 확인할 수 있다.

그림 6(c)는 소비전력당 전체 미세액적 개수를 분석한 결과이다. 전체 미세액적의 수를 소비전력으로 나눈 값이며 값이 높을수록 입력 에너지 대비 미세액적의 생성 비율이 높은 것을 의미한다. 미세액적이 100개 이상 형성된 조건에서 유량 5, 10, 15 mL/min에 따른 소비전력당 미세액적의 개수는 각각 115, 422, 179개이며 10 mL/min에서 가장 높은 미세액적 생성 효율을 나타냈다.

유량 10 mL/min에서는 전압의 증가에 따라 미세액적 개수는 증가하지만 급격한 방전전류의 증가로 -25 kV 이하에서는 소비전력당 미세액적 생성 개수는 오히려 감소하는 모습을 보인다. 또한 유량 5, 20 mL/min에서는 절대 유량의 감소와 유속의 증가로 인해 미세액적의 생성 개수 전체적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 미세액적 생성 개수와 소비전력당 미세액적의 생성 효율을 비교할 때, 유량 15 mL/min, 전압 -30 kV에서 최적 동작함을 확인하였다.

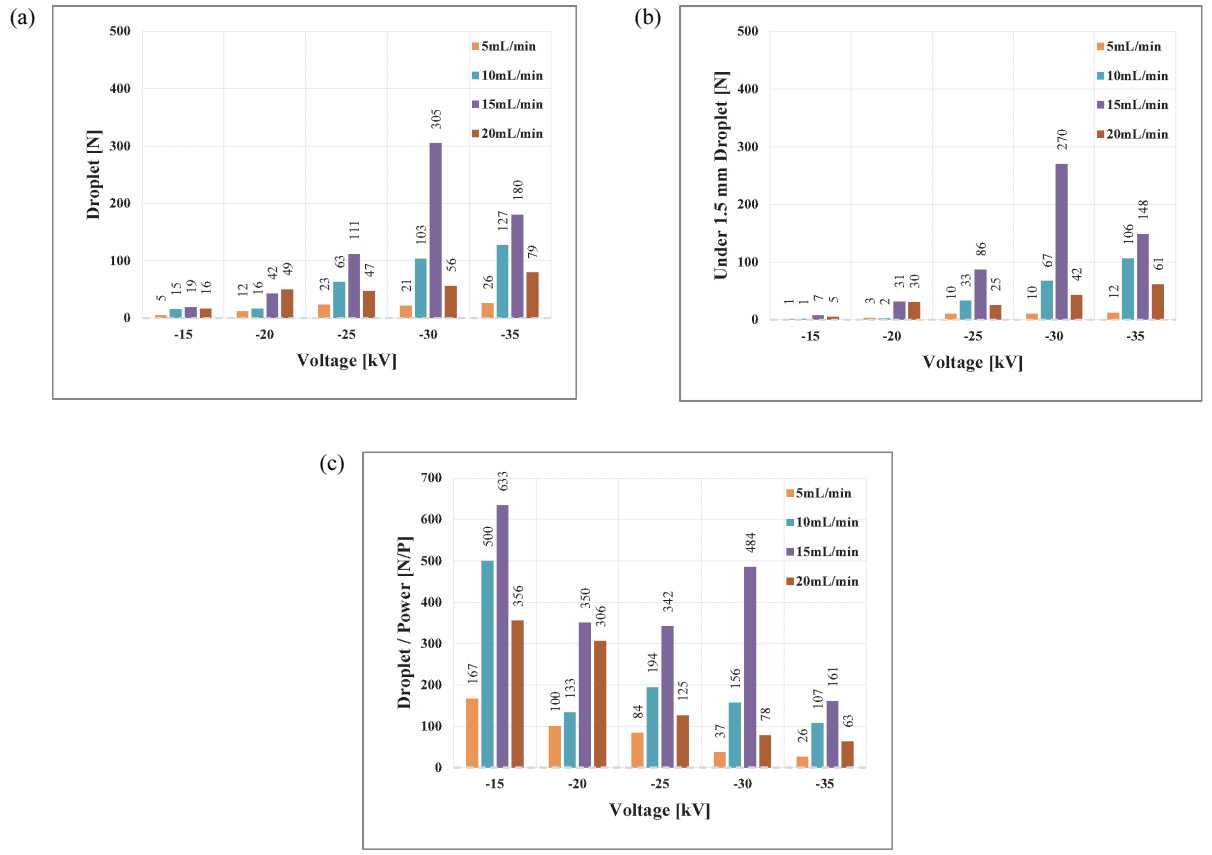



**Fig. 6.** Droplets according to flow rate and voltage at 100 mm electrode distance. (a) Total droplets, (b) under 1.5 mm droplets, and (c) total droplet/power.

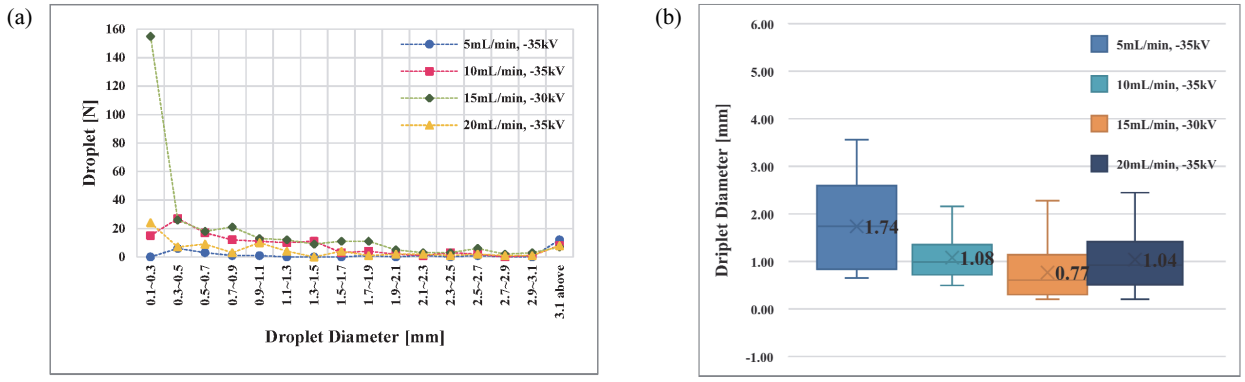



**Fig. 7.** The number of droplet and size distribution at 100 mm electrode distance. (a) The number of droplet and (b) droplet size distribution.

### 4.2.2 미세액적 크기 분포

그림 7(a)는 전극 거리 100 mm에서 미세액적의 크기에 따른 개수를 나타낸다. 미세액적이 최대로 발생한 유량과 전압 조건에서 비교하였으며 C (10 mL/min, -30 kV)에서 더 미립화된 미세액적의 개수가 많음을 확인할 수 있다. 대부분 지름 0.1~0.3 mm의 미세액적이 발생하며 전체 발생 개수와 지름 1.5 mm 이하에서 C 조건이 전체적으로 좋은 경향을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 그림 7(b)는 각 조건에서 미세액적의 크기 분포를 나타낸다. C 조건에서 미세액적의 평균 크기는 0.77 mm이며 대다수 1.5 mm 이하에 분포하고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 미세먼지 집진을 위한 직접 하전 방식 정전분무의 최적 도작 조건을 도출하였다. 연구의 수행을 위해 직접 하전 방식 정전분무 가시화 시스템을 구성하여 미세먼지 집진 효율에 영향을 주는 주요 인자인 전극 거리, 유량, 전압의 변화에 따라 실험을 수행하였다. 각 조건에 따른 전체 미세액적 개수와 지름 1.5 mm 미만의 미세액적 개수를 확인하고 소비전력당 미세액적 수를 구하여 미세액적 생성 효율 측면에서 결과를 비교하였다. 또한 미세액적 최대 발생 개수 조건에서 미세액적의 크기 및 분포를 분석하여 최적 동작 조건을 확인하였다. 실험 결과 전극 거리 50 mm에서는 유량 10 mL/min, 전압 -20 kV에서 미세액적 발생 최적 동작 조건을 가지며, 전극 거리 100 mm에서는 유량 15 mL/min, 전압 -30 kV에서 미세액적 발생 최적 동작 조건을 가지는 것을 확인하였다. 향후에는 본 연구의 결과를 바탕으로 정전분무 전기집진기 시작품을 제작하여 전기집진기에 유입되는 미세먼지 농도 변화에 따라 미세액적 발생량 조절이 가능한 최적 집진 효율에 관한 연구를 수행하고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2021-KA164174).

## REFERENCES

[1] M. Santibáñez-Andrade, Y. I. Chirino, I. González-Ramírez, Y. Sánchez-Pérez, and C. M. García-Cuellar, *Int. J. Mol. Sci.*, **21**, 136 (2019).
doi: https://doi.org/10.3390/ijms21010136

[2] C. I. Falcon-Rodriguez, A. R. Osornio-Vargas, I. Sada-Ovalle, and P. Segura-Medina, *Front. Immunol.*, **7**, 3 (2016).
doi: https://doi.org/10.3389/fimmu.2016.00003

[3] J. H. Kim, *Korean J. Atmos. Environ.*, **15**, 33 (1999).
UCI: I410-ECN-0101-2009-539-012123063

[4] S. Y. Kim, *Master's Thesis, Study on High-Performance Electrospray Electrostatic Precipitator for Ultrafine PM Removal*, p. 11-12, Chung-Ang University in Korea, Seoul (2021).

[5] Z. Wang, Q. Wang, B. Li, Y. Zhang, J. Wang, and J. Tu, *Exp. Therm Fluid Sci.*, **114**, 110054 (2020).
doi: https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110054

[6] Q. Wang, Z. Wang, S. Yang, B. Li, H. Xu, K. Yu, and J. Wang, *Exp. Therm Fluid Sci.*, **121**, 110260 (2021).
doi: https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110260

[7] G. I. Taylor, *Proc. R. Soc. A*, **313**, 453 (1969).
doi: https://doi.org/10.1098/rspa.1969.0205

[8] 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.expthermflusci.2020.110151

[9] 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

[10] M. K. Jung, S. Y. Kim, J. H. Lim, J. W. Lee, and S. H. Jeong, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.*, **46**, 121 (2022).
doi: https://doi.org/10.3795/KSME-B.2022.46.2.121

[11] H. M. Davenport and L. K. Peters, *Atmos. Environ.*, **12**, 997 (1978).
doi: https://doi.org/10.1016/0004-6981(78)90344-X

[12] C. Carotenuto, F. Di Natale, and A. Lancia, *Biochem. Eng. J.*, **165**, 35 (2010).
doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.08.049

[13] A. M. Gañán-Calvo, *Phys. Rev. Lett.*, **79**, 217 (1997).
doi: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.217

[14] 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

[15] Y. J. Yang, S. W. Kim, H. B. Kim, H. C. Yang, J. H. Lim, and K. H. Choi, *Clean Technol.*, **22**, 232 (2016).
doi: https://doi.org/10.7464/ksct.2016.22.4.232