



총 설

전기집진기의 집진효율 향상을 위한 연구동향

Research Trends on Enhancing the Collection Efficiency of Electrostatic Precipitators

이명화^{1),2)}, 김종호^{3),*}

¹⁾강원대학교 건축토목환경공학부, ²⁾강원대학교 미세먼지통합관리학과,
³⁾한서대학교 환경토목건축학과

Myong-Hwa Lee^{1),2)}, Jong-Ho Kim^{3),*}

¹⁾Department of Environmental Engineering, Kangwon National University,
Chuncheon, Republic of Korea

²⁾Department of Integrated Particulate Matter Management, Kangwon National University,
Chuncheon, Republic of Korea

³⁾Department of Environmental Engineering, Hanseo University, Seosan, Republic of Korea

접수일 2025년 3월 20일
수정일 2025년 4월 10일
채택일 2025년 4월 11일

Received 20 March 2025
Revised 10 April 2025
Accepted 11 April 2025

*Corresponding author
Tel : +82-(0)41-660-1431
E-mail : kimjh@hanseo.ac.kr

Abstract Electrostatic precipitators (ESPs) are extensively utilized for removing particulate matter exhausted from industrial facilities due to their high collection efficiency at high gas velocities. However, ESPs exhibit lower collection efficiency for particles sized between 0.1 to 1 μm due to low charging efficiency by diffusion and field charging. To enhance ESP performance, strategies such as increasing the collection area, improving charging efficiency, and preventing particle re-entrainment are essential. Various designs of collection plates have been proposed to maximize the collection area, while advancements in particle chargers with high ion generation have improved charging efficiency. Methods to maintain high electric field strength have also been employed to boost the migration velocity of particles towards collection plates. Additionally, wet electrostatic precipitators (WESPs) reduce re-entrainment by forming a water film on the collection plates, and the introduction of electro spraying technology further enhances charging efficiency and minimizes re-entrainment. This study reviews research trends focusing on these innovations, aiming to address ESP limitations and improve particulate matter removal efficiency in industrial applications.

Key words: Electrostatic precipitator, Specific collection area, Particle charging, Migration velocity, Re-entrainment

1. 서 론

발전소, 제철소, 정유시설 등과 같은 대형 산업시설에서는 배기가스의 유량이 크기 때문에 높은 유속에서도 미세먼지를 고효율로 제거할 수 있는 전기집진기가 널리 이용되고 있다. 만약 1 m/min의 여과속도로 미세먼지를 제거하도록 설계된 여과집진기를 이용하여 이러한 대용량의 배기가스를 처리하고자 한다면, 더욱 넓은 설치 부지가 필요할 것이다. 따라서 대용량의 배기가스가 배출되는 산업시설에는 집진효율이 여과집진기보다 높지는 않지만, 약 0.6~2.4 m/s (36~144

m/min)의 높은 유속에서 95% 이상의 집진효율을 보이고 압력손실이 낮아 동력비가 적게 소요되는 전기집진기가 매우 효과적이다(Shen and Pereira, 1979).

일반적으로 전기집진기는 하전부와 집진부로 구성되어 있다. 하전부에서는 방전극에 음의 고전압을 인가하여 유입되는 배기가스를 이온화시키고 음이온이 다량으로 존재하는 영역을 만들어줌으로써 유입되는 먼지가 음이온과 충돌하여 하전이 되도록 한다. 집진부에서는 이렇게 하전된 먼지가 방전극과 집진극 사이의 전기장(1단 전기집진기) 또는 집진극과 집진극 사이의 전기장(2단 전기집진기)에 의하여 제거되게

된다(An *et al.*, 2021).

각국에서는 국민들의 건강보호차원에서 대기오염 물질의 배출허용기준을 점차 강화하고 있기 때문에 (Parisi and Natale, 2024; Wang *et al.*, 2020), 이를 만족시키기 위해서는 집진효율을 높여서 미세먼지 배출량을 줄여야 하는 현실적인 문제에 당면해 있다. 그러나 전기집진기는 먼지를 하전시켜야만 제거할 수 있는 설비이기 때문에, 확산하전이나 전계하전에 의한 하전효율이 낮은 0.1~1 μm 의 먼지에 대한 집진효율이 낮은 문제점이 있다(Masuda and Hosokawa, 1995).

따라서 전 세계적으로 전기집진기의 집진효율을 높이기 위한 연구들이 널리 이루어지고 있으며, 본 논문에서는 이론적인 관점에서 이들 연구에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 전기집진기의 집진효율에 영향을 미치는 인자

전기집진기의 집진효율을 예측하는 방법은 1922년 Deutsch에 의해 처음으로 제안되었다(Deutsch, 1922).

그림 1과 같은 전기집진기 구조에서, “① 가스와 먼지는 수직(z 방향)으로의 혼합 없이 x 방향으로 일정속도 u 로 이동한다. ② 먼지는 x 축의 모든 위치에서, y 축과 z 축 방향으로 균등하게 분포되어 있다. ③ 하전영역과 집진영역은 구분되어 있지 않고 균일하다(즉, 먼지는 y 축 방향으로 빠르게 종말속도 ω 에 도달함). ④ 집진된 먼지의 재비산은 없다”라는 가정하에서 전기집진기의 집진효율, η 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{Aw}{Q}\right) \quad (1)$$

여기에서, A 는 집진판의 면적(m^2), ω 는 먼지의 집진판으로의 이동속도(m/s), Q 는 배기가스의 유량(m^3/s)을 나타낸다.

먼지에 대한 Re 수(Re_p)가 1보다 작은 Stokes 영역에서 ω 는 아래의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$w = Z_p E = \frac{C_c n e E}{3\pi\mu d_p} \quad (2)$$

여기에서, Z_p 는 먼지의 전기이동도($\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$), E 는 전기장의 세기(V/m), C_c 는 커닝햄 미끄럼보정계수(-),

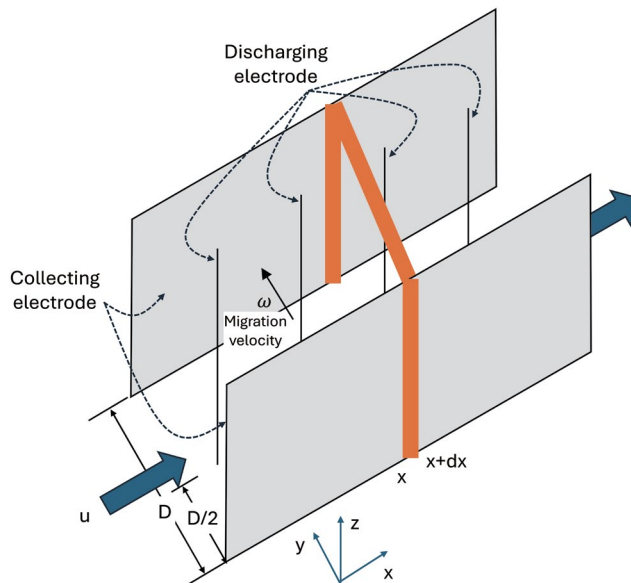


Fig. 1. Geometrical configuration of an electrostatic precipitator.

n 은 먼지의 하전수(개), e 는 기본전하량($=1.6 \times 10^{-19}$ C/개), μ 는 배기가스의 점도($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$), d_p 는 먼지의 크기(m)를 나타낸다.

전기집진기의 집진효율 예측식에서 볼 수 있는 바와 같이, 먼지의 집진효율을 높이기 위해서는 A 를 넓게 하거나, ω 를 빠르게 하거나, Q 를 줄이는 방법이 있다. 그러나 처리유량을 줄일 수는 없기 때문에, A 를 넓게 하거나, ω 를 빠르게 하는 연구들이 진행되고 있다. 또한 전기집진기의 효율예측식을 유도하는 데 있어서의 “먼지의 재비산이 없다”라는 가정을 현실화시키기 위한 연구들도 진행되고 있다. 여기서는 이들에 대한 연구들을 소개하고자 한다.

3. 전기집진기의 효율향상

3.1 집진면적의 극대화

식(1)에서 볼 수 있는 바와 같이, 배기가스를 처리하는데 있어서 집진판의 면적이 클수록 집진효율이 높아짐을 알 수 있다. 몇몇 연구자들은 물결 모양의 집진판을 이용하여 집진면적을 넓혔으며, 이것이 공간전하분포와 집진효율에 미치는 영향을 파악하였다(González *et al.*, 2023; Choi *et al.*, 2021).

González *et al.* (2023)은 평판형 집진판(Flat)과 W 모양과 물결 모양이 혼재되어 있는 집진판(WwW)을 사용하였을 때의 공간전하분포를 그림 2에 나타내었다. 형상들 간에 현저한 차이를 보이지는 않지만, 방전

극 주변 전하의 강도가 크고 멀어질수록 약해진다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 3을 살펴보면, 평판형의 집진판에 비하여 W 모양의 집진판을 사용하였을 때 집진효율이 증가하였으며, W 모양과 물결 모양의 형상을 결합한 것(wWwPs, WwWPs)이 보다 효과적임을 보여주었다.

그 외에도 확산사전과 전계사전이 약하게 작용하는 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 크기의 먼지에 대한 집진효율은 여전히 가장 낮음을 알 수 있다. 그러나 그들의 연구에서는 전기장의 세기가 변화하기 때문에 집진면적이 집진효율에 미치는 영향만을 도출해내기는 어렵다.

집진면적의 영향만을 실험적으로 증명하기 위해서는 다른 인자(전기장의 세기, 유량)들을 고정시킨 상태에서 집진판의 면적만을 변화시켜야 한다. Kim *et al.* (2012a)은 반도체 제조공정에 2단 전기집진기(1단에는 Carbon brush 전극과 탄소섬유 강화 고분자를 이용하여 단극이온을 발생시키며, 2단에는 내부에 알루미늄 판이 들어있는 PVC 판들로 전기장을 형성하여 먼지를 집진)를 도입하여 미세먼지를 제거하는 연구를 수행하였다.

그들은 그림 4에서 동일한 전기장 및 유량에서 집진판의 길이를 늘림(즉, 집진판의 면적이 늘어남)에 따라 집진효율이 급격하게 높아짐을 보였다. 2 m/s 의 높은 유속에서 하전기에 6 또는 8 kV의 전압을 인가하여 이온을 발생시키고, 집진극에 12 kV의 전압을 인가하여 전기장을 형성시켜 $0.3 \mu\text{m}$ 의 KCl 먼지 제거실험을 한 결과, 동일한 높이의 집진판 길이를 증가시킬

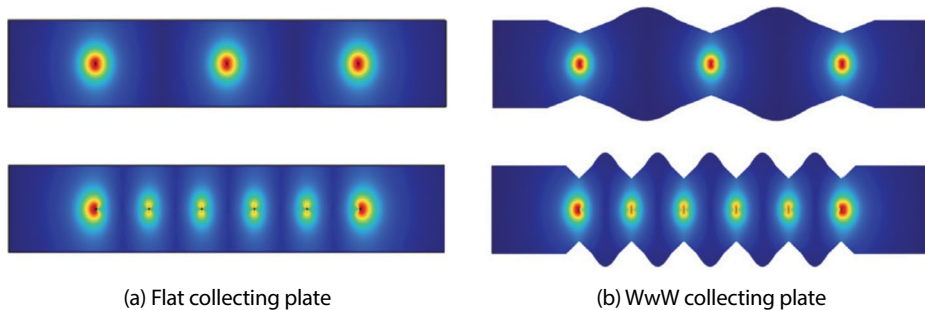


Fig. 2. Space charge distribution in ESP with 3 and 7 corona wires (Modified from González *et al.*, 2023).

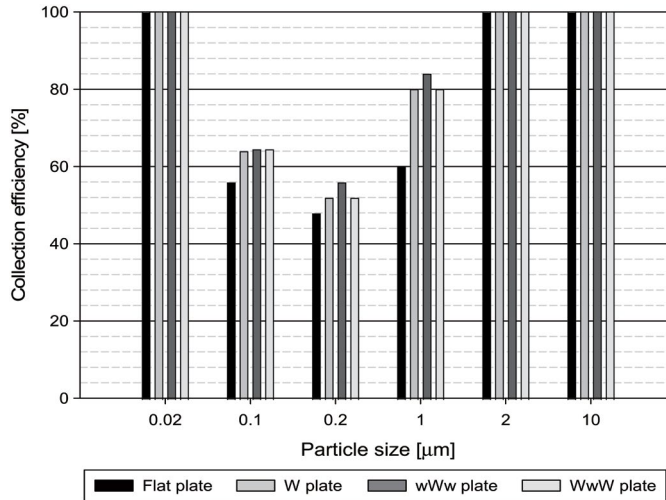


Fig. 3. Particle collection efficiency of ESP with several collecting plates (Modified from González *et al.*, 2023).

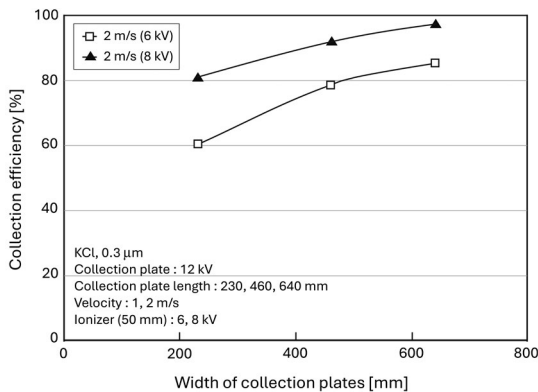


Fig. 4. Particle collection efficiency of the ESP against the width of collection plates for different polluted air velocities and applied voltages to the charger (Modified from Kim *et al.*, 2012a).

에 따라 집진효율이 급격하게 상승함을 보였다.

그러나 일반적으로 전기집진기의 성능을 나타내는데 있어서, 식 (1)의 단위유량 대비 집진판의 면적(A/Q)을 의미하는 비집진면적(Specific Collection Area, SCA)을 사용하고 있다. Zhu *et al.* (2012)은 30 MW 석탄화력발전소에 장착된 전기집진기의 성능을 평가하였으며, 비집진면적(동일한 집진면적에 대하여 처리유량을 조절)에 따른 집진효율 변화는 그림 5와 같다.

그림에서 Y축은 (1-집진효율)을 계산한 통과율로 표시하고 있으며, 비집진면적이 커짐에 따라서 로그 축으로 나타낸 통과율이 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 그러므로 집진효율은 비집진면적이 증가함에 따라 지수적으로 증가함을 의미한다. 이를 고려하여 식 (1)을 변환하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln(1-\eta) = -w \frac{A}{Q} \quad (3)$$

따라서 그림 5의 그래프에서 기울기가 w 가 됨을 알 수 있다.

그림 5(a)는 단상 TR을 사용하였을 때, 그림 5(b)는 3상 TR을 사용하였을 때, 비집진면적에 따른 먼지의 통과율을 나타낸 것이다. 그래프의 기울기로부터 3상의 전압을 사용하였을 때, 값이 커짐을 알 수 있다.

3.2 집진판으로 이동속도 향상

전기집진기에서 먼지의 집진판으로의 이동속도 w 를 빠르게 하기 위해서는 식 (2)에서 볼 수 있는 바와 같이, 먼지의 하전수 n 을 높이거나 전기장의 세기 E 를 크게 하는 방법이 있다. n 을 높이기 위해서는 먼지의 하전 메커니즘에 대한 이해가 필요하다. 에어로졸은 주로 주위환경 중에 존재하는 양이온과 음이온에 의하

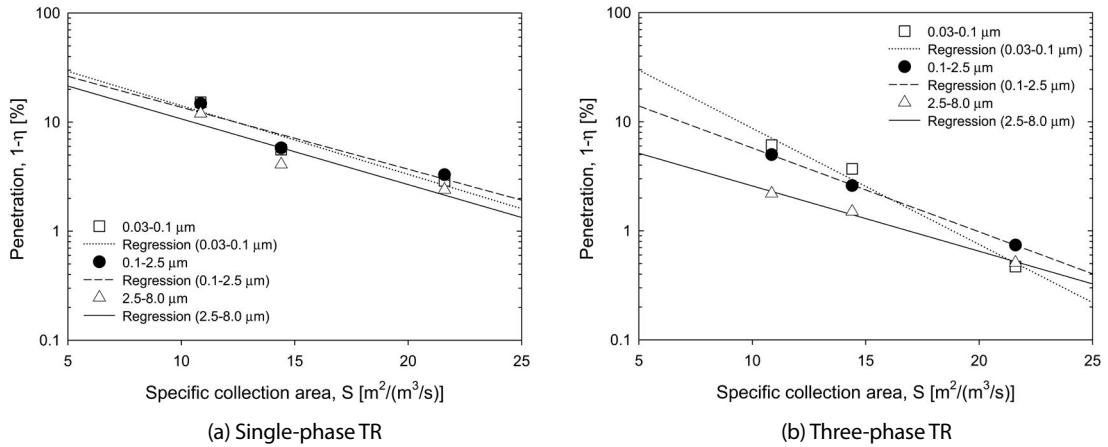


Fig. 5. Grade penetration versus the specific collection area and particle diameters with the single-phase TR and the three-phase TR at 69 kV and 62 mA (Modified from Zhu *et al.*, 2012).

여 확산하전과 전계하전으로 하전된다. 확산하전은 양이온과 음이온들이 확산에 의해 불규칙하게 움직이면서 먼지와 만나서 먼지를 하전시키는 것이고, 전계하전은 전기장에 의해 양이온과 음이온이 이동하는 곳에 먼지를 통과시켜 하전시키는 것을 말한다. 이 과정에서 먼지가 갖게 되는 하전수는, 식 (4)의 확산하전식, 식 (5)의 전계하전식에 의해 결정된다(Hinds and Zhu, 2022).

$$n_D(t) = \frac{d_p k T}{2K_E e^2} \ln \left[1 + \frac{\pi K_E d_p \bar{c}_i e^2 N_i t}{2kT} \right] \quad (4)$$

$$n_F(t) = \left(\frac{3\epsilon}{\epsilon + 2} \right) \left(\frac{Ed_p^2}{4K_E e} \right) \left(\frac{\pi K_E e Z_i N_i t}{1 + \pi K_E e Z_i N_i t} \right) \quad (5)$$

여기에서, k 는 볼츠만 상수 ($= 1.38 \times 10^{-23}$ J/K), T 는 절대온도(K), K_E 는 비례상수 ($= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9$ (N·m²)/C²), \bar{c}_i 는 이온의 평균 열속도(표준상태에서 240 m/s), N_i 는 이온의 농도(개/m³), ϵ 은 먼지의 유전상수(-), Z_i 는 이온의 이동도($= 0.00015$ m²/(V·s))를 나타낸다. 먼지의 유전상수는 구성하는 물질의 특성에 의존하게 된다.

전기집진기 내에서는 확산하전과 전계하전이 동시에 이루어지고, 유입되는 먼지는 이 두 가지 하전 메

커니즘의 영향을 받아 하전이 되게 된다. 그러므로 하전수, n 은 식 (6)과 같이 확산하전에 의한 하전수 n_D 와 전계하전에 의한 하전수 n_F 의 합으로 표현된다.

$$n(t) = n_D(t) + n_F(t) \quad (6)$$

여기에서, 먼지의 하전수는 이온의 발생농도에 크게 의존함을 알 수 있다. 이온의 발생농도를 높이기 위하여, 다양한 종류의 하전기(단극이온 하전기, 양극이온(bipolar ion) 하전기)가 사용되고 있으며, 단극이온 하전기로는 코로나 하전기가 대표적이며 양극이온 하전기로는 방사성 동위원소와 Soft X-ray가 대표적이다(Tiggles *et al.*, 2015). 1단 전기집진기의 경우에는 그 자체가 코로나 하전기의 역할을 하지만, 2단 전기집진기의 경우에는 전단이 코로나 하전기로 작용한다. 단극이온 하전기를 이용하여 먼지의 하전효율을 높이는 것은 많은 연구자들에 의하여 수행되었다(Zheng *et al.*, 2019; Liao *et al.*, 2018; Nouri *et al.*, 2016).

Liao *et al.* (2018)은 2단 전기집진기에서 유전물질이 코팅된 집지전극을 사용하여 하전을 시켰으며, 하전효율이 낮은 서브마이크로미터 먼지에 대한 하전특성과 와이어-판형 전기집진기에서의 집진효율을 평가하였다. 그들은 하전기의 도입에 의해 전기집진기의 집진효율이 12.1~15.9% 상승함을 보였다. Zheng *et al.*

al. (2019)은 동일한 전기장의 세기 (-4.4 kV/cm)에서 배기가스의 온도가 27°C 에서 90°C 로 높아짐에 따라 가스분자의 평균자유행정이 길어져서 더 큰 에너지를 갖게 되므로 $0.73 \mu\text{m}$ 먼지의 하전수가 140개에서 183개까지 높아져 하전효율이 30% 상승하였음을 보였다. 또한 동일한 크기의 먼지에 대하여 먼지의 유전상수가 4.5에서 11.8로 높아짐에 따라 평균하전수가 98%까지 증가하였으며, 상대습도가 30%에서 80%까지 높아짐에 따라 $0.1 \mu\text{m}$ 보다 큰 먼지의 하전효율이 50% 이상 상승하였음을 보였다. Nouri *et al.* (2016)도 실험실 규모의 전기집진기에서 집진효율에 미치는 상대습도의 영향을 파악하였으며, 상대습도가 높아짐에 따라 집진효율이 높아짐을 보였다. 이상과 같은 연구 결과는 식 (4), (5)로부터 도출할 수 있으며, 온도가 높아짐에 따라 확산하전의 효과가 커지고, 상대습도가 높아짐에 따라 유전상수가 큰 물분자가 먼지표면에 부착하게 되어 전하를 많이 보유하여 식 (5)의 첫 번째 항이 커지며, 강해진 전기장으로 먼지와 이온들 사이의 충돌빈도가 늘어나서 전계하전의 효과가 커짐을 알 수 있다.

전기집진기에서 집진효율이 낮은 서브마이크로미터 크기 먼지의 하전효율을 높이기 위한 또 다른 방법은 양극이온을 활용하는 것이다. 양이온과 음이온을 동시에 발생시켜 먼지와 충돌시키게 되면 양으로 하전된 먼지와 음으로 하전된 먼지가 서로 응집하여 성장하게 되고, 이는 전계하전으로 하전효율을 높일 수 있다(Zhu *et al.*, 2010; Kanazawa *et al.*, 1993). 즉, 먼지가 서로 응집하게 되면 그 크기(d_p)가 커지게 되고, 식 (5)에 의하여 먼지의 표면적에 비례하는 전계하전에 의하여 먼지의 하전수는 더욱 증가하게 된다. 이로 인해 식 (2)의 먼지의 집진판으로의 이동속도가 빨라져 집진효율이 증가하게 된다. Kanazawa *et al.* (1993)은 양극이온 하전기를 사용하지 않았을 때보다 사용하였을 때, $0.3\sim 1 \mu\text{m}$ 먼지의 비율이 75%에서 18% 감소하였으며, $1 \mu\text{m}$ 보다 큰 먼지의 비율이 25%에서 82%로 증가함을 보였다. 이러한 효과로 인하여 서브마이크로미터 크기의 먼지에 대한 집진효율 또한 약

80%까지 증가하였다. Zhu *et al.* (2010)도 양의 코로나와 음의 코로나를 동시에 발생시키는 양극이온 하전기를 이용하여, 다양한 크기의 먼지에 대하여 전기집진기 집진효율이 98% 이상 달성가능함을 보였다.

최근에는 단극이온 발생기와 양극이온 발생기를 결합한 연구로서, Kulkarni *et al.* (2002)과 Lee *et al.* (2016)은 1단 전기집진기에 Soft X-ray를 장착하여 양극이온을 다량으로 만들어냈으며, 이로 인하여 코로나 개시전압을 낮출 수 있을 뿐만 아니라 먼지의 하전효율을 높여서 전기집진기의 집진효율을 높일 수 있다는 것을 보였다. 이제까지 식 (2)의 먼지의 하전수, n 값을 크게 하여 식 (1)에 있는 먼지의 집진판으로의 이동속도를 빠르게 함으로써 전기집진기의 집진효율을 높이는 연구를 살펴보았다.

전기집진기에서 ω 를 높이는 또 다른 방법으로는 방전극과 집진극 사이의 거리를 좁히거나 인가전압을 높여서 전기장의 세기를 크게 하는 것과 방전극의 형상을 날카롭게 만들어 코로나 전류를 크게 하는 것이 있다. Kim *et al.* (2001)은 파일릿 규모의 전기집진기를 이용하여 동일한 인가전압에서 집진판의 간격을 조절하였을 때, 집진판의 간격을 줄일수록 코로나 전류가 증가할 뿐만 아니라 전기장의 세기도 증가하므로 집진효율을 높일 수 있음을 보였다. 또한 Bidoggia *et al.* (2020)은 세일오일 발전시설에서 배출되는 전기집진기에 사용되는 고전압발생장치를 다양화하여 그 성능을 평가하였다. 그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이, 마이크로 펄스 고전압발생장치를 사용하였을 때 스파크가 일어나는 최대전압이 직류 고전압발생장치를 사용하였을 때보다 높아서 전기장의 세기를 높일 수 있으므로, 먼지의 이동속도를 증가시켜 집진효율을 높일 수 있음을 알 수 있다. 이는 DC 전압에서는 스파크가 일어나는 조건이 주파수가 높은 마이크로 펄스 전압에서는 스파크가 일어나지 않으므로, 더욱 높은 펄스전압을 높일 수 있다는 것을 의미한다.

방전극 형상의 영향에 대해서는, Fujishima *et al.* (2004)이 방전극과 집진극 사이에 발생하는 전기유체역학적(electrohydrodynamic) 유체의 흐름이 집진효

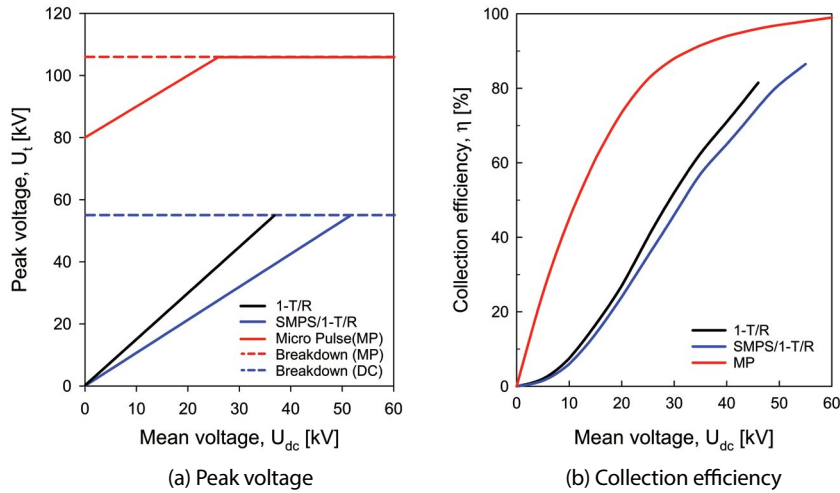


Fig. 6. Peak voltage and collection efficiency as functions of mean voltage in various power supplies (Modified from Bidoggia *et al.*, 2020).

율에 영향을 미친다고 보고하였다. 그들은 이온풍 또는 코로나풍으로 불리는 전기유체역학적 흐름의 유속이 1~10 m/s 정도로 높아서 집진기 내부 유속과의 비율에 따라 하전된 먼지를 집진극으로 이동시키는 과정뿐 아니라 집진판에 집진된 먼지의 재비산에도 영향을 미친다고 하였다. 그 이후 다수의 연구자들이 전기집진기를 설계하는 데 있어 이온풍의 효과를 반드시 고려하여야 한다고 주장하였다(Yan *et al.*, 2021; Dong *et al.*, 2019; Farnoosh *et al.*, 2011).

3.3 집진판에서의 먼지 재비산 억제와 습식 전기집진기

건식 전기집진기의 경우에는 집진판에 부착된 먼지들이 물리적인 힘이나 정전기적 반발력으로 재비산(re-entrainment)되거나 역코로나(back corona)가 발생하여 집진효율이 낮아지는 현상이 발생하게 된다. 집진판에서 재비산의 원인은 먼지의 전기비저항(particle resistivity) 때문인 것으로 알려져 있다. 전기비저항이 낮은 경우(10^7 ohm-cm 이하)에는 집진판에 부착된 먼지가 쉽게 전하를 잃어버려 정전기적 인력을 상실하므로 유체흐름 속으로 재비산하게 되며, 전기비저항이 높은 경우(10^{10} ohm-cm 이상)에는 집진판

에 전하가 쌓이므로 역코로나가 발생하고 절연파괴가 되면서 재비산이 발생하게 된다(Katz, 1980; White, 1974). 재비산 문제에 대응하기 위하여, 기존에 설치된 전기집진기에서는 물, 암모니아, SO_3 와 같은 첨가제를 소량 주입하여 먼지의 전기비저항을 조절(conditioning)하였다(Bickelhaupt, 1975; Cook, 1975; Dismukes, 1975). 반면, 신규 설계되는 전기집진기에는 상기 방법 이외에 먼지의 전기비저항이 온도에 따라 다르다는 점을 토대로 고온(hot-side) 혹은 저온(cold-side) 전기집진기를 고려하였다(Matts, 1975; Walker, 1975). 또한, 역코로나를 억제하기 위해서 집진된 먼지층의 전류밀도를 코로나가 발생하는 전기장 강도보다 낮게 유지하는 간헐하전(intermittent energization)과 고주파 펄스 하전(high frequency pulse energization) 방식의 고전압 인가장치를 도입하였다(Mizuno, 2000; Hall, 1990; Tachibana and Matsumoto, 1990). 그리고 집진판에 쌓인 먼지를 추타(rapping)로 제거하는 방법 이외에도 긁거나(scraping) 솔질(brushing)하는 방법과 집진판을 물로 세척하는 방법 등이 이용되고 있다(Misaka *et al.*, 1998).

특히 물을 이용하는 습식 전기집진기는 점착성, 폭발성, 가연성, 부식성이 있는 먼지의 처리와 SO_2 , H_2S ,

HCl 등과 같은 수용성 가스를 동시에 처리할 수 있는 장점과 함께 온도 감소로 인한 배기가스의 체적 감소 덕분에 송풍기의 부하를 줄일 수 있는 부가적인 장점도 있다(Badami *et al.*, 2023; Duan *et al.*, 2022; Ali *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2014). 최초의 전기집진기도 1900년대 초 제련소에서 발생하는 황산미스트를 제거하기 위해 습식 전기집진기로 개발되어 사용되었다(Cooper and Alley, 2011).

그러나, 물을 사용하므로 집진장치의 부식, 폐수처리 등의 단점이 있으므로, 부식문제를 해결하기 위하여 폴리염화비닐(Polyvinyl chloride), 섬유강화플라스틱(Fiber Reinforced Plastics), 테릴렌(Terylene) 혹은 폴리프로필렌(Polypropylene) 섬유 등을 집진판으로 사용하는 연구가 진행되었다(Ali *et al.*, 2018; Su *et al.*, 2018; Son *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2016; Huang *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2012b; Chang *et al.*, 2011; Bayless *et al.*, 2004).

Huang *et al.* (2014)과 Kim *et al.* (2012b)은 폴리염화비닐(PVC) 재질의 집진판 상부에서 물을 흘려 수막(water film)이 잘 형성되도록 하였다. 그들은 기존 금속 재질의 집진판에서 발생하는 비균질 수막(dry spot)이 형성되지 않도록 집진판 표면 거칠기를 조절하였다. Pilot 규모의 장치 평가결과, 코로나 전류-전압 특성도 금속 재질의 건식 전기집진기와 유사하고, 1 μm 이하의 먼지 집진효율도 99.5% 이상으로 나타났다.

또한 많은 연구자들이 친수성인 폴리프로필렌 섬유로 제작한 막(membrane)을 집진판으로 사용하였으며, semi-pilot 규모의 실험에서 코로나 전류-전압 특성과 집진효율이 양호한 것으로 나타났다(Ali *et al.*, 2018; Su *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2016; Bayless *et al.*, 2004). 특히 섬유막이 모세관 현상으로 물을 공급함에 따라 물의 흐름도 일정한 분포를 나타내었으며, 이로 인해 물 사용량도 줄어든다는 것을 알았다.

습식 전기집진기에서 물 사용량은 폐수처리를 동반하므로 폐수를 줄이기 위해 또 다른 방법인 액적 분무방법이 연구되었으며, 분무형 스크리버와 유사한

Table 1. Operational conditions and performance of wet ESPs.

Internal structure	Water supply	Electrical field strength (kV/cm)	Particle size (μm)	Inlet concentration (mg/m^3)	SCA ($\text{m}^2/(\text{m}^3/\text{min})$)	Removal efficiency (%)	Liquid/Gas ratio (L/m^3)	Reference
Wire to plate	Water film	4.56~4.78	0.0168~0.615	4000	1.3~2.6	84.1~99.7	2.95~5.89	Lin <i>et al.</i> , 2010
Wire to plate	Water film	2.13	0.3~10	560	0.44	20~75	3.86	Wang and You, 2013
Wire to plate	Water film	20~45*	0.07~2.5	21.5~55.6	-	60~72	0.025	Su <i>et al.</i> , 2018
Wire to plate	Atomized spray	3.67	0.01~10	-	0.42~0.54	79~100	0.5~1	Yang <i>et al.</i> , 2017
Wire to plate	Charged droplet	2~4	0.37~2.66	252~2177	0.87~1.92	80~99	0.021~0.046	Teng and Li, 2021
Wire to plate	Charged droplet	2~5	0.02~3.8	393~7318	1.34~1.40	93.5~97.8	0.09~0.17	Teng <i>et al.</i> , 2020
Cylindrical	Water film	3.3~4.5	0.05~2	59.5	0.28~0.83	76.2~99.7	2.38	Kim <i>et al.</i> , 2012b
Cylindrical	Water film	5.6~8.02	0.02~0.8	2.8~15.9	1.49	92~99	0.27~0.38	Saiyatsipanish <i>et al.</i> , 2006
Cylindrical	Water bead	4~8	0.01~2.5	-	0.022~0.042	80~90	0.0051	Sadeghpour <i>et al.</i> , 2021

*unit: kV, only applied voltage is provided in the literature

연구도 진행되었다(Lee *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2017; Natale *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2014; Jaworek *et al.*, 2007). 액적분무형은 수막형보다 적은 물 사용량을 나타내었으며, 액기비(Liquid/Gas ratio)가 수막형은 1 L/m³ 이상일 때 고효율을 나타내지만 액적분무형은 더 낮은 액기비에도 높은 집진효율을 나타냈다. Teng *et al.* (2020)과 Teng and Li (2021)는 하전액적을 분무하여 평판형 전기집진기의 성능을 실험실 규모로 평가하였으며, 아주 낮은 액기비(0.09~0.17 L-liquid/m³-gas)로 운전하더라도 하전액적 공급에 따른 높은 방전전류와 먼지의 응집효과로 인해 93.5~97.8%의 높은 집진효율을 달성하였다. 또한 정전분무(electrospray) 시스템을 전기집진기 전단에 설치하여 미세먼지의 집진효율을 향상시키는 연구도 진행되었다. Kim *et al.* (2010)은 실험실규모의 정전분무, 건식전기집진기 복합 시스템에서 적은 물사용량(액기비; 0.0007 L/m³)을 사용했음에도 불구하고, 230 nm 먼지의 부분집진효율을 39.6% 높였다. Xie and Qian (2015)은 공기 조화용 2단 전기집진기 전단에 정전분무장치를 장착한 실험에서 적은 물사용량(액기비; 0.00004 L/m³)으로 PM₁의 집진효율을 19.9% 향상시켰으며, 정전분무 및 2단 전기집진기 시스템의 인가전압을 적절하게 조절함으로써 오존발생량을 줄일 수 있음을 보였다.

앞에서 설명한 연구들과 유사한 연구들에 대하여 그 운전조건과 전기집진기의 성능을 표 1에 나타내었다. 연구 결과를 종합하면, 먼지의 재비산을 막기 위하여 집진판의 먼지를 물로 세정하는 습식 전기집진기를 도입함으로써 기존의 건식 전기집진기보다 높은 SCA 값(0.022~2.6 m²/(m³/min))과 집진효율을 확보할 수 있으며(Cooper and Alley, 2011), 분무법으로 물을 공급하면 수막형보다 물 사용량을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 산업시설에서 널리 이용되고 있는 전기집진기의 집진효율을 보다 높이는 방법에 대하여

이론적인 관점에서 검토하였다. 전기집진기는 비교적 높은 가스처리 속도에서도 먼지 제거효율이 높다는 장점을 가지고 있다. 그러나 확산하전과 전계하전에 의한 하전효율이 낮은 0.1~1 μm 크기 먼지에 대한 집진효율이 낮은 문제점이 있다. 따라서 이를 해결하기 위한 많은 노력들이 이루어지고 있으며, 그 방안으로서 집진판의 면적을 넓히거나 하전효율을 높이는 방법이 있으며, 집진된 먼지가 재비산하지 않도록 하는 연구도 이루어지고 있다. 집진면적을 넓히기 위하여 다양한 형상의 집진판이 설계되고 있으며, 먼지를 효과적으로 하전시킬 수 있는 단극이온 하전기, 양극이온 하전기, Soft X-ray 등이 도입되어지고 있다. 또한 전기장의 세기를 높이기 위해서 집진극의 간격을 좁히거나 마이크로 펄스 고전압발생장치를 이용하여 인가전압을 더욱 높이고 있다. 그 외에도 집진된 먼지의 재비산을 막기 위하여 습식 전기집진기를 도입하고 있으며, 폐수처리량을 줄이면서도 보다 높은 집진효율을 달성할 수 있는 정전분무와 전기집진기가 결합된 습식 전기집진시스템이 활용되고 있다.

감사의 글

이 성과는 정부(환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 사업장 미세먼지 지능형 최적 저감관리 기술개발사업(과제번호 : RS-2023-00219242)과 미세먼지관리 특성화대학원사업의 경제적인 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Ali, M., Pasic, H., Alam, K., Tiji, S.A.N., Mannella, N., Silva, T., Liu, T. (2016) Experimental study on cross-flow wet electrostatic precipitator, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66(12), 1237-1244. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1209258>
- Ali, M., Al-Majali, Y.T.A., Kennedy, M., Alam, K. (2018) Integration of novel hybrid composite discharge electrode with semi-pilot novel cross-flow electrostatic precipitator,

- Journal of Air Pollution Control Association, 68(12), 1346-1356. <https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1509807>
- An, S.-H., Lee, T., Kim, Y.-S., Kim, Y.-J., Han, B., Kim, H.-J. (2021) The study on collection efficiency of two-stage electrostatic precipitator using non-metallic electrode for improve corrosion resistance and light weight, Particle and Aerosol Research, 17(2), 21-27, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.11629/jpaar.2021.17.2.021>
- Badami, M.M., Tohidi, R., Aldekheel, M., Farahani, V.J., Verma, V., Sioutas, C. (2023) Design, optimization, and evaluation of a wet electrostatic precipitator, Atmospheric Environment, 208, 119858. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119858>
- Bayless, D.J., Alam, M.K., Radcliff, R., Caine, J. (2004) Membrane-based wet electrostatic precipitation, Fuel Processing Technology, 85, 781-798. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.11.025>
- Bickelhaupt, R.E. (1975) Surface resistivity and the chemical composition of fly ash, Journal of Air Pollution Control Association, 25(2), 148-152. <https://doi.org/10.1080/00022470.1975.10470063>
- Bidoggia, B., Larsen, M.K., Poulsen, K., Skriver, K. (2020) Reduction of dust emission by Coromax micro-pulse power supplies at an oil shale fired power plant, Journal of Electrostatics, 105, 103447. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103447>
- Chang, J., Dong, Y., Wang, Z., Wang, P., Ma, C.C. (2011) Removal of sulfuric acid aerosol in a wet electrostatic precipitator with single terylene or polypropylene collection electrodes, Journal of Aerosol Science, 42, 544-554. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2011.05.006>
- Choi, H.-Y., Park, Y.-G., Ha, M.-Y. (2021) Numerical simulation of the wavy collecting plate effects on the performance of an electrostatic precipitator, Powder Technology, 382, 232-243. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.12.070>
- Cook, R.E. (1975) Sulfur trioxide conditioning, Journal of Air Pollution Control Association, 25(2), 156-158, <https://doi.org/10.1080/00022470.1975.10470065>
- Cooper, C.D., Alley, F.C. (2011) Air Pollution Control-A Design Approach, Fourth edition, Waveland Press, Inc., U.S.A.
- Deutsch, W. (1922) Bewegung und Ladung der Elektrizitätsträger im Zylinderkondensator, Annals of Physics, 68, 335-344. <https://doi.org/10.1002/andp.19223731203>
- Dismukes, E.B. (1975) Conditioning of fly ash with ammonia, Journal of Air Pollution Control Association, 25(2), 152-156. <https://doi.org/10.1080/00022470.1975.10470064>
- Dong, M., Zhou, F., Shang, Y., Li, S. (2019) Numerical study on electrohydrodynamic flow and fine-particle collection efficiency in a spike electro-plate electrostatic precipitators, Power Technology, 351, 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.03.046>
- Duan, L., Huang, Q., Ji, R., Li, S. (2022) A predictive model of synergistic particulate-SO₃ removal in ultralow cold-side electrostatic precipitators, Journal of Aerosol Science, 159, 105850. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105850>
- Farnoosh, N., Adamiak, K., Castle, G.S.P. (2011) Three-dimensional analysis of electrohydrodynamic flow in a spiked electrode-plate electrostatic precipitators, Journal of Electrostatics, 69, 419-428. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2011.06.002>
- Fujishima, H., Ueda, Y., Tomimatsu, K., Yamamoto, T. (2004) Electrohydrodynamics of spiked electrode electrostatic precipitators, Journal of Electrostatics, 62, 291-308. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2004.05.06>
- González, A.-A., Fayyad, M.-B., Iváncsy, T. (2023) The effect of combining wavy and W-type collecting electrodes on the properties of electrostatic precipitators, Journal of Electrostatics, 123, 103818. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2023.103818>
- Hall, H.J. (1990) History of pulse energization in electrostatic precipitation, Journal of Electrostatics, 25(1), 1-22. [https://doi.org/10.1016/0304-3886\(90\)90034-5](https://doi.org/10.1016/0304-3886(90)90034-5)
- Hinds, W.C., Zhu, Y. (2022) Aerosol Technology. 3rd ed. New York: Wiley-Interscience, 277-301.
- Huang, C., Ma, X., Wang, M., Sun, Y., Zhang, C., Tong, H. (2014) Property of the PVC Dust Collecting Plate Used in Wet Membrane Electrostatic Precipitator, IEEE Transactions on Plasma Science, 42(11), 3520-3528. <https://doi.org/10.1109/TPS.2014.2359973>
- Jaworek, A., Krupa, A., Czeć, T. (2007) Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review, Journal of Electrostatics, 65, 133-155. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2006.07.012>
- Kanazawa, S., Ohkubo, T., Nomoto, Y., Adachi, T. (1993) Submicron particle agglomeration and precipitation by using a bipolar charging method, Journal of Electrostatics, 29(3), 193-209. [https://doi.org/10.1016/0304-3886\(93\)90024-2](https://doi.org/10.1016/0304-3886(93)90024-2)
- Katz, J. (1980) Factors Affecting Resistivity in Electrostatic Precipitation, Journal of the Air Pollution Control Association, 30(2), 195-201. <https://doi.org/10.1080/00022470.1980.10465939>

- Kim, H.-G., Kim, H.-J., Lee, M.-H., Kim, J.-H. (2014) Experimental study on the enhancement of particle removal efficiency in spray tower scrubber using electrospray, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 8(2), 89-95. <https://doi.org/10.5572/ajae.2014.8.2.089>
- Kim, H.-J., Han, B., Kim, Y.-J., Yoa, S.-J., Oda, T. (2012a) Integration of a nonmetallic electrostatic precipitator and a wet scrubber for improved removal of particles and corrosive gas cleaning in semiconductor manufacturing industries, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(8), 905-915. <https://doi.org/10.1080/10962247.2012.686893>
- Kim, J.H., Lee, H.S., Kim, H.H., Ogata, A. (2010) Electrospray with electrostatic precipitator enhances fine particles collection efficiency, *Journal of Electrostatics*, 68(3), 305-310. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2010.03.002>
- Kim, J.-H., Yoo, H.-J., Hwang, Y.-S., Kim, H.-G. (2012b) Removal of particulate matter in a tubular wet electrostatic precipitator using a water collection electrode, *The Scientific World Journal*, 2012, 532354. <https://doi.org/10.1100/2012/532354>
- Kim, Y.-J., Ha, B.-K., Jeong, S.-H., Hong, W.-S., Yoa, S.-J., Yoo, J.-S. (2001) A study on the collection characteristics of a wide plate-spacing electrostatic precipitator - I. Effect of plate spacing and type of discharge electrode, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 13(10), 939-946, (in Korean with English abstract).
- Kulkarni, P., Namiki, N., Otani, Y., Biswas, P. (2002) Charging of particles in unipolar coronas irradiated by in-situ soft X-rays: enhancement of capture efficiency of ultrafine particles, *Journal of Aerosol Science*, 33(9), 1279-1296. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(02\)00067-8](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(02)00067-8)
- Lee, K., Lee, K.I., Jeon, S.Y., Kim, S. (2019) Preparation of monodisperse charged droplets via electrohydrodynamic device for the removal of fine dust particles smaller than 10 μm , *Advanced Powder Technology*, 30(1), 190-198. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.10.022>
- Lee, M.-H., Kim, J.-H., Biswas, P., Kim, S.-S., Suh, Y.J., Jang, H.D., Bhang, S.H., Yu, T., Kim, J.H., Cho, K. (2016) Enhanced collection efficiency of nanoparticles by electrostatic precipitator with needle-cylinder configuration, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16, 6884-6888. <https://doi.org/10.1166/jnn.2016.11322>
- Liao, Z., Li, Y., Xiao, X., Wang, C., Cao, S., Yang, Y. (2018) Electrostatic precipitation of submicron particles with an enhanced unipolar pre-charger, *Aerosol and Air Quality Research*, 18(5), 1141-1147. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.08.0261>
- Lin, G.Y., Tsai, C.-J., Chen, S.-C., Chen, T.-M., Li, S.-N. (2010) An efficient single-stage wet electrostatic precipitator for fine and nanosized particle control, *Aerosol Science and Technology*, 44, 38-45. <https://doi.org/10.1080/02786820903338298>
- Masuda, S., Hosokawa, S. (1995) *Electrostatic precipitation, Handbook of electrostatic processes*, Marcel Dekker, New York, 441-479.
- Matts, S. (1975) "Cold-side" precipitator, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 25(2), 146-148. <https://doi.org/10.1080/00022470.1975.10470062>
- Misaka, T., Akasaka, A., Yabuta, H., Oura, T., Hirano, M., Yamazaki, M., Asano, H. (1998) Recent application of moving-electrode type electrostatic precipitator, *Proc. 7th International Conference on Electrostatic Precipitation*, 508-515.
- Mizuno, A. (2000) Electrostatic precipitation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 7(5), 615-624. <https://doi.org/10.1109/94.879357>
- Natale, F.D., Carotenuto, C., D'Addio, L., Jaworek, A., Krupa, A., Szudyga, M., Lancia, A. (2015) Capture of fine and ultrafine particles in a wet electrostatic scrubber, *Journal of Environmental Chemical Engineering* 3, 349-356. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.11.007>
- Nouri, H., Zouzou, N., Dascalescu, L., Zebboudj, Y. (2016) Investigation of relative humidity effect on the particles velocity and collection efficiency of laboratory scale electrostatic precipitator, *Process Safety and Environmental Protection*, 104, 225-232. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.09.001>
- Parisi, A., Natale, F.D. (2024) An analytical model-based assessment of wet electrostatic scrubbing for mitigating fine and ultrafine particles emissions in domestic biomass boilers, *Journal of Electrostatics*, 129, 103921. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2024.103921>
- Park, H.-W., Lee, C.H., Choi, S., Park, D.-W. (2014) Continuous treatment of hydrogen sulfide on a large scale using wet-electrostatic precipitator, *Chemical Engineering Journal*, 243, 448-454. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.01.03>
- Sadeghpour, A., Oroumihyeh, F., Zhu, Y., Ko, D.D., Ji, H., Bertozzi, A.L., Ju, Y.S. (2021) Experimental study of a string-based counterflow wet electrostatic precipitator for collection of fine and ultrafine particles, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 71(7), 851-865. <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1869627>
- Saiyasitpanich, P., Keener, T.C., Lu, M., Khang, S.J., Evans, D.E. (2006) Collection of Ultrafine Diesel Particulate Matter (DPM) in Cylindrical Single-Stage Wet Electrostatic

- Precipitators, *Environmental Science and Technology*, 40, 7890-7895. <https://doi.org/10.1021/es060887k>
- Shen, T.T., Pereira, N.C. (1979) Electrostatic Precipitation, in *Air and Noise Pollution Control. Handbook of Environmental Engineering, Vol 1*. Edited by Wang, L.K., Pereira, N.C., Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-6236-7_4
- Son, C., Lee, W., Jung, D., Lee, D., Byon, C., Kim, W. (2016) Use of an electrostatic precipitator with wet-porous electrode arrays for removal of air pollution at a precision, *Journal of Aerosol Science*, 100(7), 118-128. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2016.07.005>
- Su, L., Du, Q., Wang, Y., Dong, H., Gao, J., Wang, M., Dong, P. (2018) Purification characteristics of fine particulate matter treated by a self-flushing wet electrostatic precipitator equipped with a flexible electrode, *Journal of Air Pollution Control Association*, 68(7), 725-736. <https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1460635>
- Tachibana, N., Matsumoto, Y. (1990) Intermittent energization on electrostatic precipitators, *Journal of Electrostatics*, 25(1), 55-73. [https://doi.org/10.1016/0304-3886\(90\)90037-V](https://doi.org/10.1016/0304-3886(90)90037-V)
- Teng, C., Fan, X., Li, J. (2020) Effect of charged water drop atomization on particle removal performance in plate type wet electrostatic precipitator, *Journal of Electrostatics*, 104, 103426. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103426>
- Teng, C., Li, J. (2021) Performance of reduction on particle emission by combining the charged water drop atomization and electric field in wet electrostatic precipitator, *Process Safety and Environmental Protection*, 155, 543-554. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.09.035>
- Tigges, L., Wiedensohler, A., Weinhold, K., Gandhi, J., Schmid, H.-J. (2015) Bipolar charge distribution of a soft X-ray diffusion charger, *Journal of Aerosol Science*, 90, 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.07.002>
- Walker, A.B. (1975) Hot-side precipitator, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 25(2), 143-145. <https://doi.org/10.1080/00022470.1975.10470061>
- Wang, K., Yang, L., Li, J., Sheng, Z., He, Q., Wu, K. (2020) Characteristics of condensable particulate matter before and after wet flue gas desulfurization and wet electrostatic precipitator from ultra-low emission coal-fired power plants in China, *Fuel*, 278, 118206. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118206>
- Wang, X., Chang, J., Xu, C., Wang, P., Cui, L., Ma, C. (2016) Electrical characteristics of electrostatic precipitator with a wet membrane-based collecting electrode, *Journal of Electrostatics*, 80(2), 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2016.02.003>
- Wang, X., You, C. (2013) Effects of thermophoresis, vapor, and water film on particle removal of electrostatic precipitator, *Journal of Aerosol Science*, 63, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.04.003>
- White, H.J. (1974) Resistivity problem in electrostatic precipitator, *Journal of Air Pollution Control Association*, 24(4), 314-338. <https://doi.org/10.1080/00022470.1974.10469923>
- Xie, K., Quan, H. (2015) The effects of electrospray-based electrostatic precipitator for removing particles, *Procedia Engineering*, 121, 684-691. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.003>
- Yan, D., Zhang, Z., Gong, H., Ya, Y. (2021) Effects of barbed tubular electrode corona discharge EHD flow on submicron particle collection in a wide-type ESP, *Journal of Electrostatics*, 109, 103545. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103545>
- Yang, Z., Zheng, C., Chang, Q., Wan, Y., Wang, Y., Gao, X., Cen, K. (2017) Fine particle migration and collection in a wet electrostatic precipitator, *Journal of Air Pollution Control Association*, 67(4), 498-506. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1260074>
- Zheng, C., Duan, D., Chang, Q., Liu, S., Yang, Z., Liu, X., Weng, W., Gao, X. (2019) Experiments on Enhancing the Particle Charging Performance of an Electrostatic Precipitator, *Aerosol and Air Quality Research*, 19(6), 1411-1420. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.11.0400>
- Zhu, J., Zhang, X., Chen, W., Shi, Y., Yan, K. (2010) Electrostatic precipitation of fine particles with a bipolar pre-charger, *Journal of Electrostatics*, 68(2), 174-178. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2009.12.005>
- Zhu, J., Zhao, Q., Yao, Y., Luo, S., Guo, X., Zhang, X., Zeng, Y., Yan, K. (2012) Effects of high-voltage power sources on fine particle collection efficiency with an industrial electrostatic precipitator, *Journal of Electrostatics*, 70(3), 285-291. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2012.03.009>

Authors Information

이명화 (강원대학교 건축토목환경공학부 부교수, 미세먼지통합관리학과 부교수)
(myonghwa@kangwon.ac.kr)
김종호 (한서대학교 환경토목건축학과 교수)
(kimjh@hanseo.ac.kr)