

전기역학적 스크린을 이용한 집진판 표면 위 입자 세정성능 연구

조윤희^{1),2)} · 신동호¹⁾ · 김영훈^{1),3)} · 박인용¹⁾ · 김상복¹⁾ · 이건희^{1)*} · 한방우^{1),2)*}

¹⁾한국기계연구원 지속가능환경연구소

²⁾과학기술연합대학원대학교 환경에너지기계공학과

³⁾연세대학교 기계공학과

(투고 2023년 6월 2일, 수정 2023년 7월 24일, 게재확정 2023년 7월 27일)

A study on cleaning performance of particles on collection plates using an electrodynamic screen

Yunhui Joe^{1),2)}, Dongho Shin¹⁾, Younghun Kim^{1),3)}, Inyong Park¹⁾, Sang Bok Kim¹⁾,
Gunhee Lee^{1)*}, Bangwoo Han^{1),2)*}

¹⁾Department of Sustainable Environment Research, Korea Institute of Machinery & Materials

²⁾Environmental & Energy Mechanical Engineering, University of Science and Technology (UST)

³⁾Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

(Received June 2 2023; Revised July 24 2023; Accepted July 27 2023)

Abstract

An electrostatic precipitator (ESP) has a low pressure drop and a high collection efficiency but its collection efficiency can be reduced due to dust accumulation on the collection plates during long-term operations. In order to maintain the initial dust collection efficiency, it is necessary to periodically clean the collection plates. The common cleaning methods are using physical impacts or water sprays. These cleaning methods can lead to damage to the collection plate or generate wastewater. Herein, we implemented an electrodynamic screen (EDS) for ESP cleaning and evaluated its surface cleaning performance of particles. The EDS is an electrostatic system that can electrostatically repel particles on surfaces, allowing it to clean the ESP without causing damage and wastewater generation. Our evaluation included the analysis of the effects of AC voltage characteristics, electrode configuration and environmental conditions on the cleaning performance of the EDS with the aim of achieving effective surface cleaning. It has been demonstrated that activating the EDS cleans up to 65% of the particles on the surface, which indicates about 94% of our target cleaning zone.

Keywords: electrostatic precipitator (ESP), dust accumulation, electrodynamic screen (EDS), cleaning efficiency

* Corresponding author.

Tel : +82-42-868-7939, Fax : +82-42-868-7284 (G. Lee)

Tel : +82-42-868-7068, Fax : +82-42-868-7284 (B. Han)

E-mail : gunhee@kimm.re.kr (G. Lee), bhan@kimm.re.kr (B. Han)

1. 서론

대기 중 부유하는 미세먼지는 입경이 작을수록 몸속 깊이 침투하여 심폐 질환을 유발하는 것으로 알려져 있다 (Pun et al., 2017; Lopuszanska and Samardakiewicz, 2020). 특히, 나노입자가 뇌 건강에 영향을 미칠 수 있는 위험성도 제기되면서 미세먼지로부터의 노출 최소화에 대한 필요성이 보고되고 있다 (Calderón-Garcidueñas and Ayala 2022). 미세먼지로부터의 인체 노출을 줄이는 방법으로 미세먼지 발생원에서의 배출 저감은 매우 효과적으로 알려져 있으며 (EPA, 2019), 이를 위해서는 배출원에서의 효과적인 미세먼지 포집 장치의 활용이 필수적이다. 대표적인 미세먼지 포집 장치로 백 하우스 (Bag house)와 전기집진기가 사용되고 있다. 백 하우스란 여러 개의 섬유 필터로 구성된 장치를 말하며 미세먼지가 촘촘한 필터 섬유를 통과하지 못하고 부딪혀 집진된다 (Park et al., 2012). 백 하우스는 집진효율이 높고 설치가 용이, 저렴한 장점이 있지만 촘촘한 필터 섬유로 인해 유로가 좁아져 압력손실이 큰 단점이 존재한다 (Thomas et al., 2001). 반면, 전기집진기는 미세먼지를 전기적인 성질을 띠게 만든 후 정전기력으로 포집하는 장치로 집진효율은 높으면서도 유동이 전기장이 형성된 평행한 집진판 사이를 지나가는 방식이기 때문에 직접 유로를 막지 않아 필터를 사용하는 장치에 비해 압력손실이 매우 낮다 (Mizuno, 2000). 따라서 전기집진기는 높은 유량의 배출가스를 효과적으로 처리할 수 있어 다양한 미세먼지 배출원에서 사용되고 있다. 하지만 미세먼지를 전기적인 성질을 띠게 하는 과정에서 오존이 발생하고 대부분 금속으로 구성되어 있어 금속의 부식을 일으킬 수 있는 환경에서는 사용이 어려운 단점이 존재한다 (Viner et al., 1992; Hall and Katz, 1976). 최근, 반도체 공정에서 배출되는 미세먼지를 저감하기 위해 내 부식성 하전부와 집진부로 구성된 전기집진기를 개발하고 (Kim et al., 2010) 지하철 역사의 실내 환경에서 전기집진기를 사용하기 위해 탄소섬유 전극을 이용한 저 오존 전기집진기를 개발 (Lee et al., 2022)하는 등 기존 전기집진기의 한계를 극복하고 성능 개선을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

하지만, 전기집진기 내 먼지 축적에 의해 집진효율이 감소하는 현상은 여전히 주요한 문제로 남아있다. 장기간 운전에 따른 먼지 축적은 전기장 세기를 약화해 전기집진기의 집진효율이 감소하는 문제를 초래한다 (Huang and Chen, 2003; Cid et al., 2021). 특히, 비저항이 높은 입자가 쌓일 경우 먼지 층 내에 전하가 포화되어 역 코로나 현상이 발생하며 이는 입자의 하전을 방해하여 전기집진기의 집진효율을 감소시킨다 (Miller, 2010). 따라서 장기간 운전 시에도 초기 집진효율을 유지하기 위해서는 집진된 먼지들을 주기적으로 세정해주는 작업이 필수적이다. 집진된 먼지를 제거하는 방법으로 크게 건식 및 습식 세정법이 사용되고 있다. 대표적인 건식 세정법으로 추타 (Rapping) 방식이 있으며, 추타를 이용한 세정 방식은 물리적인 충격을 집진판에 가해주어 먼지를 털어내는 방식이다 (Engelbrecht, 1981). 습식 세정법은 물을 분무하여 집진판에 집진된 먼지를 물로 씻어내는 방식이다 (Lin et al., 2010). 그러나 추타방식의 경우 반복적인 물리적 충격에 의한 전기집진기의 손상을 초래할 수 있으며, 추타 장비들을 가동하기 위한 부대설비가 필요하고 에너지가 추가로 소모된다는 단점이 있다. 습식 세정법의 경우 세정과정에서 대량의 폐수와 내부 부식, 녹 등이 발생할 수 있고 이에 따른 폐수처리, 유지보수 비용이 추가로 발생하게 된다 (Kim et al., 2011). 또한, 표면에 수막이 균일하게 형성되지 않으면 건반 (Dry spot)이 발생하여 일부 표면만 세정이 이루어질 수 있고 이를 해결하기 위해 더 많은 양의 물이 소비된다는 문제점이 존재한다 (Xu et al., 2016; Teng and Li, 2020). 따라서 효율적인 전기집진기의 활용을 위해서는 별도의 부대설비를 최소화하면서도 2차 오염 없이 효과적으로 전기집진기를 세정할 수 있는 기술개발이 필요하다. 사막의 태양광 패널과 우주 탐사에 사용되는 우주복 및 장비에 부착된 먼지를 제거하기 위해 정전기 먼지 제거 시스템인 전기역학스크린 (Electrodynamic screen, EDS)이 활용되고 있다 (Bernard et al., 2018; H. Kawamoto and T. Miwa, 2011). EDS를 구현하는 방법 중 하나는 EDS 필름을 사용하는 것으로 EDS 필름이란 유전체 필름 내에 두 개의 전극이 맞닿지 않게 배열된 구조를 가지는 필름을 말한다.

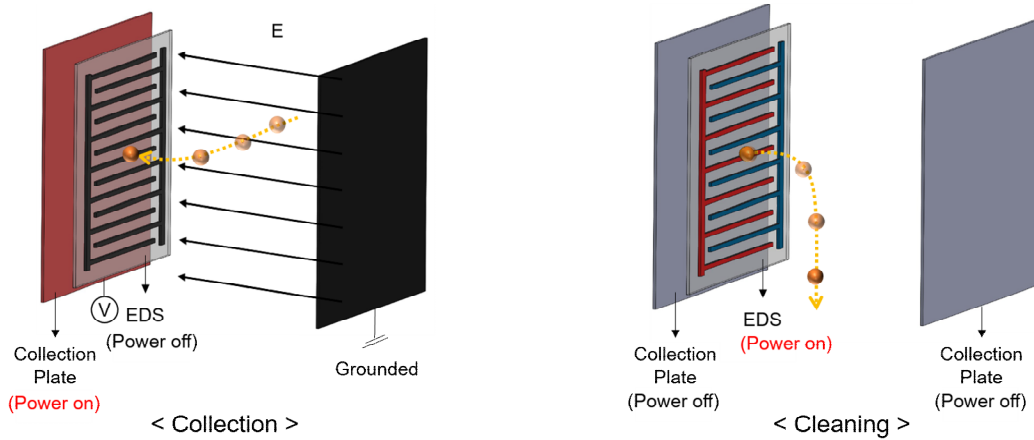


Figure 1. Cleaning of electrostatic precipitator (ESP) using electrodynamic screen (EDS)

(Mazumder et al., 2007). 전극에 전압을 인가하여 EDS를 작동시킬 수 있고 이때 필름 표면 위 먼지는 정전기력에 의해 표면에서 튀어 올라 제거된다(Jones et al., 2020). 그림 1과 같이 EDS 필름이 부착된 전기집진기를 작동하여 필름 표면 위에 먼지를 집진한 뒤 전극에 서로 다른 상을 가지는 교류전압을 인가하면 EDS가 작동되어 집진된 먼지의 세정이 가능하다. EDS는 정전기력을 이용한다는 점에서 전기집진기에 적용되었을 때 기존 세정법과 달리 물리적 충격에 의한 집진판 손상이 없고 폐수가 발생하지 않으며, 전원공급장치 외에 별도의 부대설비가 필요하지 않다. 더불어 EDS를 작동하는데 필요한 전력은 수 W 수준으로 매우 낮으므로 유지비용이 낮은 장점이 있다(Kawamoto and Shibata, 2015). 본 연구에서는 새로운 전기집진기 세정 기술로 EDS를 효과적으로 활용하기 위한 기초 연구를 수행하였다. 먼저, 전기집진기에 적용할 수 있는 서로 다른 전극구조를 가지는 EDS 필름들을 제작하였고 EDS 작동 시 각 EDS 필름 표면 위의 입자 세정성능을 평가하였다. 그 후 EDS의 표면 위 입자 세정성능을 극대화하기 위해 EDS의 입자 세정성능에 영향을 미칠 수 있는 변수(인가 전원 특성, 전극구조, 환경특성)들을 선정하고 각 변수가 세정성능에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 Electrodynamic screen (EDS) 구성

본 연구에서는 EDS 필름과 교류전원 공급장치를 이용하여 정전기 먼지 제거 시스템인 EDS를 구성하였다. 그림 2(a)는 전기집진기 적용을 위해 제작한 EDS 필름의 구성을 나타낸다. PET 필름 위에 두 개의 카본 전극을 맞닿지 않게 일정 거리 이격하여 손잡지 형태로 프린팅한 후 다시 PET 필름으로 밀봉해 제작하였다. 그림 2(b)와 같이 함수발생기 및 고전압 증폭기를 활용하여 생성한 교류전압을 EDS 필름에 내장된 전극에 인가할 때 전극 간 전기장이 형성되고 형성된 전기장에 의해 입자에는 유전영동력(F_{DEP})이 작용하며 하전된 입자의 경우 정전기력(F_e) 또한 작용한다. 나아가 기본적으로 표면 위 입자는 입자 무게에 따른 중력(F_g), 입자와 필름 표면 사이의 접착력(F_{adh})이 작용한다. 입자의 세정은 그림 2(b)에서 나타나는 것처럼 입자에 작용하는 모든 합력이 필름 표면으로부터 멀어지는 방향으로 작용할 때 입자가 표면으로부터 반발될 수 있고, 완전히 표면으로부터 탈리되었을 때 세정되었다고 표현할 수 있다.

2.2 EDS의 세정효율 평가 방법

EDS의 입자 세정성능은 필름 위 로딩한 입자 무게 대비 세정된 입자의 무게비로 평가하였으며, 다음의 식을 통해 도출할 수 있다.

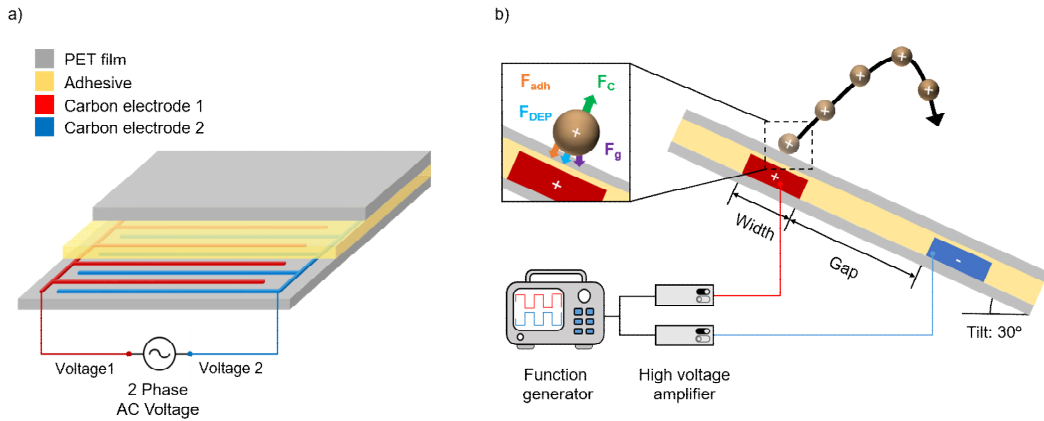


Figure 2. EDS configuration. (a) EDS film and (b) EDS operation based on applied AC voltage

$$Cleaning\ efficiency\ (\%) : \frac{Removed\ particles\ (mg)}{Loaded\ particles\ (mg)} \times 100 \quad (1)$$

필름 위 입자 로딩량은 로딩 전 필름 자체의 무게와 로딩 후 필름 무게 차이로 계산되며 전극 활성화에 의해 세정된 입자의 무게는 로딩 후 필름 무게에서 세정 후 필름의 무게를 빼 계산하였다. 입자는 A2 fine test dust (ISO 12103-1, Powder Technology Inc., Arden Hills, MN, USA)를 사용하였다. A2 fine dust는 입경이 0 ~ 80 μm 사이인 입자들로 구성되어 있으며 4, 20 μm 입경에서 질량농도 피크를 갖는 모달분포이다(PTI, 2016). 전체 입자의 69% ~ 77%가 이산화

규소이며 이산화규소는 3.9의 유전상수를 가지는 절연체이다(Gray et al., 2019). 입자의 로딩은 입자 발생기를 사용하여 필름 위에 균일하게 중력 침강시켰다. 그 후, 필름을 30도 각도로 기울인 채 EDS를 작동시켜 필름 표면 위 입자를 세정하였다. EDS의 효과적인 세정성능을 도출하기 위해 선정된 실험변수는 크게 세 가지로서 인가 교류전압의 특성, 전극구조 그리고 환경조건으로 선정하였다. 선정 변수들과 각 변수의 영향을 평가하기 위해 실험에 사용된 구체적인 변수들을 표 1에 나타내었다. 환경조건 중 상대습도의 영향을 평가는 온·습도 제어가 가능한 챔버를 구축하여 진행하였다.

Table 1. Factors of affecting EDB cleaning efficiency

| Signal characteristics | | | | Electrode configuration | | Environmental condition | |
|------------------------|----------------|---------------|----------------------|-------------------------|----------|-------------------------|---------------------------------------|
| Voltage [kV] | Frequency [Hz] | Wave form [-] | Phase difference [°] | Width [mm] | Gap [mm] | Relative humidity [%] | Surface loading [mg/cm ²] |
| 2 | 1 | Ramp | 60 | 1.5 | 0.5 | 40 | 0.5 |
| 3 | 50 | Sine | 120 | 2 | 1 | 50 | 1.7 |
| 4 | 100 | Square | 180 | 3 | 1.5 | 60 | 3.1 |
| 6 | - | - | - | 7 | 2 | 70 | 3.7 |
| 8 | - | - | - | - | - | 80 | 5.6 |
| - | - | - | - | - | - | 90 | - |

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인가 교류전압 특성에 따른 세정효율 평가

전극에 인가되는 교류전압의 크기, 진동수, 파형, 위상차에 따라 전극 간 형성되는 전기장의 특성이 달라질 수 있다. EDS 작동 시 입자에 작용하는 정전기력과 유전영동력은 각각 전기장의 세기와 전기장 세기의 불균일성에 의해 결정되는 힘이므로(Lee et al., 2019), 인가 교류전압의 특성은 EDS의 세정성능에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 인가 교류전압의 특성이 EDS 세정성능에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

첫 번째로 각 전극에 인가해주는 전압 크기의 영향을

알아보았다. 전압의 크기는 두 전극 사이에서 전위차에 의한 전기장 세기에 영향(kV/mm)을 주며 이러한 전기장 세기에 따른 세정효율 평가 결과는 그림 3(a)에 나타내었다. 실험에서 사용된 EDS 필름의 두 전극 간 간격은 2 mm이고 인가전압의 크기는 2 kV에서 8 kV까지 증가시키면서 실험을 진행하였다. 그 결과, 전기장 세기가 1 kV/mm일 때 세정효율이 21%로 가장 낮았으며 전기장 세기가 증가할수록 세정효율이 높아졌으나 2 kV/mm 이후 증가하지 않고 세정효율이 약 56%로 일정하였다. 1 kV/mm 조건에서는 EDS 필름 전체 면적 중에서 전극 인근 영역에서만 일부 세정이 이루어져 세정효율이 가장 낮았으며 이는 전극 인근을 제외한

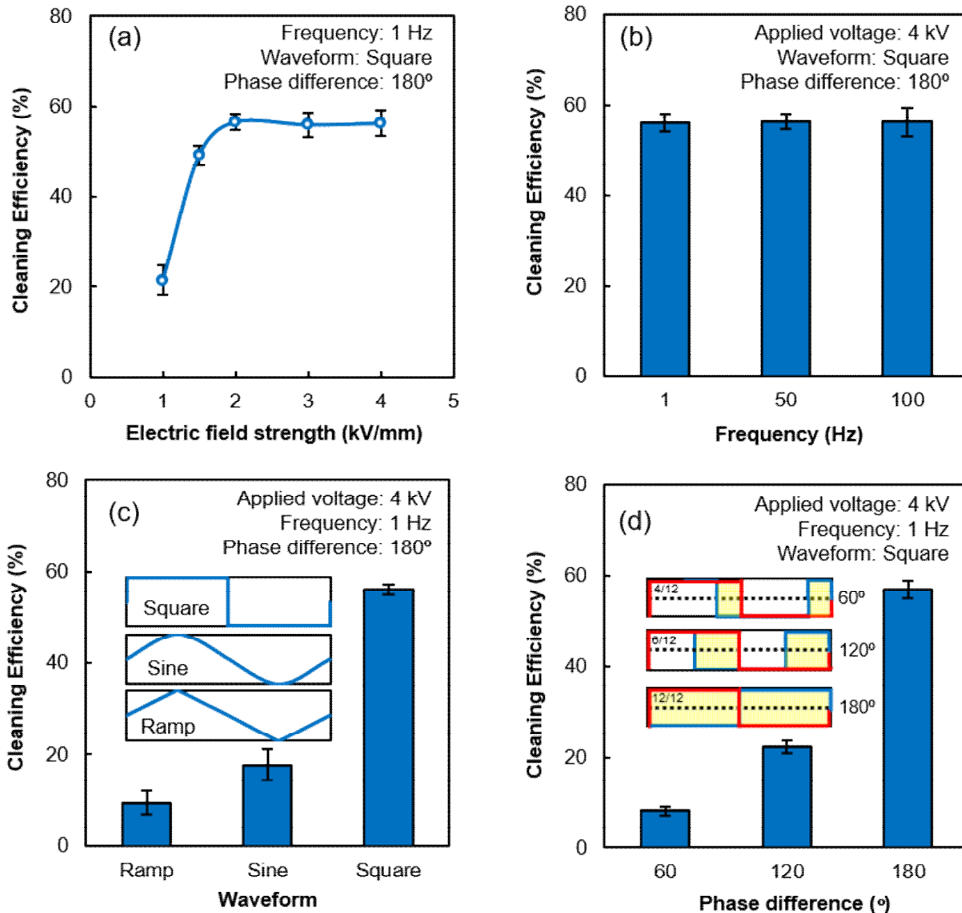


Figure 3. Cleaning efficiency according to (a) electric field strength, (b) frequency, (c) waveform and (d) phase difference (width: 0.5 mm, gap: 2 mm, RH 70%, 17 g/m²)

나머지 영역에서는 표면 위 입자를 반발시키기 위한 정전기력이 충분하지 않기 때문에 판단된다. 전기장 세기가 1 kV/mm에서 2 kV/mm로 증가할 때 정전기력이 점차 증가하여 전극 인근뿐만 아니라 더 많은 영역이 세정되면서 세정효율이 증가하였다. 특히, 2 kV/mm 이상의 전기장 세기에서는 여전히 전극 위에 입자들이 세정되지 않고 남아있는 현상이 발생하였고 이로 인해 세정효율이 증가하지 않는 것을 확인하였다.

두 번째로 표면 위 입자의 효과적인 세정이 이루어지는 전기장 세기인 2 kV/mm 조건에서 진동수의 영향을 그림 3(b)에 나타내었다. 1, 50, 100 Hz 조건의 진동수에서 진동수별로 30초간 세정하였을 때 세정효율이 약 56%로 유사하였고 해당 실험조건에서는 진동수 변화가 세정성능에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 진동수가 변할 때 전기장 세기는 일정하지만, 전기장 방향의 변화속도는 진동수에 비례해서 증가한다. 전기장 방향의 변화는 입자에 작용하는 힘의 방향의 변화를 의미하며 더 높은 진동수로 세정하는 것은 단위 시간 내 더 많은 횟수의 충격이 입자에 가해지는 것과 같다. 즉, 진동수 1 Hz와 100 Hz로 동일 시간 세정할 때 100 Hz 세정 시 입자에 작용하는 충격 횟수가 1 Hz에 비해 100배 많다. 위 실험결과에서 세정 진동수가 증가하여도 세정효율이 동일하게 나타난 이유는 1 Hz로 30초간 세정 시 이미 충분한 충격 횟수에 의해 전극 사이 영역의 입자들이 모두 세정되었기 때문에 판단할 수 있다.

세 번째로 파형의 영향을 그림 3(c)에 나타내었다. ramp, sine, square 파형의 세정효율은 9.5, 17.8, 56.3%로 square 파형에서 가장 높은 세정효율을 보였다. 각 파형의 최대 전압은 일정하지만, 두 교류전압이 형성하는 시간별 전위차는 파형 별로 다르다. square 파형의 경우 항상 최대 전위차를 형성하는 반면 sine 과 ramp 파형은 square 파형에 비해 형성할 수 있는 전위차 크기가 상대적으로 작다. 두 전극의 전위차가 작을수록 전극 간 형성되는 전기장 세기가 약해지기 때문에 표면 위 입자 세정에 필요한 정전기력 또한 약해진다. 따라서 입자를 세정할 수 있는 특정 전위차보다 큰 전위차를 형성하는 구간이 square, sine, ramp 순으로 크기 때문에 세정효율 또한 square 파형이 가장

크고 sine, ramp 순으로 큰 것으로 나타났다.

마지막으로 전극에 인가되는 두 교류전압의 위상차가 세정효율에 미치는 영향을 그림 3(d)에 나타내었다. 앞서 설명했듯이 표면 위 입자를 세정하기 위한 정전기력은 두 전극 전위차의 크기에 비례하는데 square 파형이라도 위상차가 60, 120° 일 때 두 교류전압의 전위차가 0 V로 정전기력이 발생하지 않는 구간이 존재하게 된다. 따라서 위상차가 존재하는 구간이 긴 180, 120, 60° 순으로 세정효율이 높은 것으로 나타났다.

상대습도 70% 조건에서 인가 교류전압 특성 중 진동수를 제외한 나머지 변수들은 특정 전위차 이상의 유지시간을 결정함으로써 세정성능에 큰 영향을 미치는 중요한 요소임을 알 수 있다. 이 중에서도 정전압의 크기와 유지시간이 중요한 요소라 할 수 있는데 그 이유는 파형과 위상차 측면에서 특정 전위차 이상의 유지시간을 최대로 형성시키는 조건인 square 파형, 위상차 180°에서 가장 효과적인 세정이 이루어지기 때문이다.

3.2 전극구조에 따른 세정효율 평가

EDS 필름 전극에 교류전압 인가 시 전극 간 전기장이 형성되는 데 이때 전기장이 형성되는 물리적인 공간이 EDS 필름의 표면 위 입자 세정성능에 미치는 영향을 평가하기 위해 전극의 두께(width)와 전극 간 간격(gap) 별 세정효율을 측정하였다. 전극에 인가되는 전압이 일정할 때 gap이 늘어나게 되면 전극 간 형성되는 전기장 세기가 낮아지게 되고 앞서 그림 3(a)에서 나타낸 바와 같이 EDS 필름의 세정효율 또한 감소하게 된다. 따라서 gap의 영향만을 평가하기 위해 gap이 커질수록 전극 인가전압을 늘려주어 전극 사이에는 2 kV/mm의 동일한 전기장 세기가 형성되도록 하였다. 이때 전압을 제외한 나머지 교류전압의 진동수, 파형, 위상차는 모두 동일하게 설정하여 평가하였다. gap에 따른 세정성능은 그림 4(a)에서 볼 수 있듯이 gap이 1.5 mm에서 7 mm로 증가함에 따라 세정효율이 52%에서 65%로 증가하는 것을 확인하였다. 반대로 width에 따른 세정성능은 그림 4(b)와 같이 width가 0.5 mm에서 2 mm로 증가함에 따라 세정효율이 57%에서 34%로 감소하는 것을 나타내었다. gap과 width의 크기에 따른 세정성능은 흥미롭게도 EDS 필름의 전체

면적 중 gap이 차지하는 면적을 의미하는 gap area to total area ratio와 유사한 양상을 나타내었다. 본 실험에서는 특정 크기의 EDS 필름을 사용하고 있기에 한정된 영역에서 gap이 증가하게 되면 배열될 수 있는 전극의 개수가 줄어들어 따라 전체 면적에서 전극의 면적은 줄고 gap이 차지하는 면적이 증가하게 된다. 마찬가지로 width가 작아지면 전체 면적에서 전극의 면적이 줄고 gap이 차지하는 면적이 늘어난다. 즉 세정 성능은 gap이 크고 width가 작을수록 높다고 할 수 있으며, 이는 앞서 그림 3의 실험결과에서 설명했듯이 전기장의 세기가 증가함에 따라 특정 조건 이상에서는 gap 영역의 입자가 모두 세정되지만 width 부분에 해당하는 전극 윗부분에는 입자가 일부 남아 세정성능이 향상하지 않는 현상과 동일한 양상인 것을 확인하였다. 이러한 현상에 대한 원인분석은 3.3 부분에서 기술할 예정이다. EDS의 높은 세정효율을 얻기 위해서는 남아 있는 입자를 최소화하기 위해 gap은 크고 width는 작아야 함을 알 수 있다. 하지만 gap이 증가할 경우 일정한 전기장 세기를 유지해주기 위해 전극에 인가되는 전압도 증가해야 한다. 그러나 출력 전압을 무한정 늘리기에는 유전체 필름의 절연파괴 등 이상 방전이 발생할 확률이 높아지기 때문에 인가전압을 높이는 데에는 한계가 존재한다. width도 마찬가지로 전극 프린팅 공정의 한계가 존재하므로 무한정 줄일 수는 없다. 따라서 EDS를 적용하고자 하는 여건에 따라 적절한 전극구조의 설계가 필요하다.

3.3 유한요소해석을 통한 입자 작용력 계산

앞서 EDS 세정 시 전체 면적 중 전극 윗부분에 해당하는 영역에 입자가 남아있었고 인가전압을 증가하여도 여전히 남아있는 것을 확인하였다. 이와 같은 현상을 분석하기 위해 COMSOL Multiphysics를 통한 finite-element method (FEM) 모델링을 수행하여 EDS 필름 표면 위 입자에 작용하는 유전영동력 (Dielectrophoretic force) 과 정전기력 (Coulomb force)을 계산하였다. 모델링은 gap이 2 mm이고 width가 0.5 mm인 전극구조에 양 전극의 전위차가 4 kV인 조건에서 입자는 1 μm 크기의 입자($\rho=2600 \text{ kg/m}^3$, charge number(Z)=200)를 대상으로 수행하

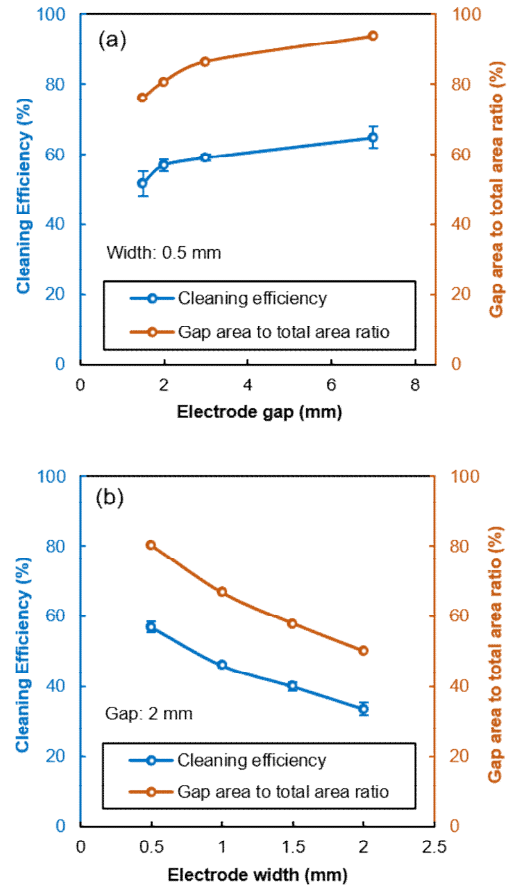


Figure 4. Cleaning efficiency according to (a) electrode gap and (b) electrode width (2 kV/mm, 1 Hz, square wave, phase difference: 180°, RH 70%, 17 g/m²)

였다. 우선 정전기력은 그림 5(a)와 같이 같은 극성을 가지는 전극 부근에서는 입자를 표면에서 반발되는 방향으로, 반대 극성의 전극 부근에서는 입자를 표면에 부착하는 방향으로 작용하였다. 전극 인근 영역에서 전기장 세기가 강해 정전기력 또한 큰 것을 확인할 수 있다. 다음으로 유전영동력은 그림 5(b)와 같이 전극의 극성과 관계없이 모든 전극의 모서리 방향으로 작용하며 모서리 부근에서 강하게 작용하였다. 이는 유전영동력이 전기장 세기 구배의 크기와 방향에 따라 결정되기 때문이다(Pething, 2016). 즉, 전기장 세기가 4.5 kV/mm로 가장 강한 전극 모서리 부근에서 전기장 세

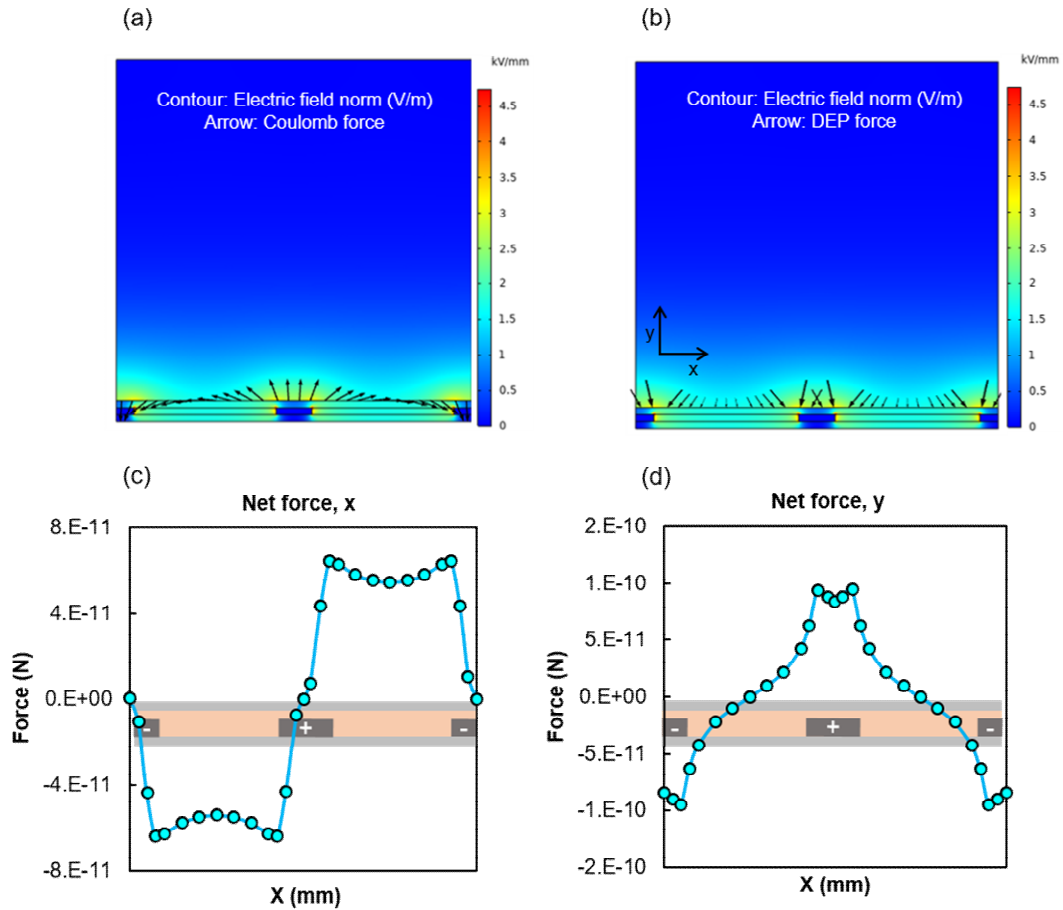


Figure 5. Finite-element method modeling of EDS (a) coulomb forces acting on particles on a surface, (b) dielectrophoresis (DEP) force, (C) X-axis component of net force and (d) Y-axis component of net force (width: 0.5 mm, gap: 2 mm, 2 kV/mm, $d = 1 \mu\text{m}$, $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$, charge number(Z) = 200)

기가 급격히 변하기 때문에 전극 모서리 방향으로 강하게 구배가 발생하였고 이에 따라 유전영동력이 작용했음을 알 수 있다. 마지막으로 유전영동력과 정전기력의 합력의 x축 성분과 y축 성분을 그림 5(c), (d)에 나타내었다. x축 성분의 경우 전극 위 영역에서는 크기가 0에 가깝고 전극 사이 영역에서 약 0.06 nN 크기의 힘이 같은 극성을 가지는 전극에서 양옆의 반대 극성의 전극으로 밀어내는 방향으로 작용하였다. y축 성분은 같은 극성의 전극 위 영역에서 약 0.07 nN으로 가장 크고 전극에서 멀어질수록 크기가 감소하다가 전극 사이 가운데 지점 이후 표면 방향으로의 힘이 작용하였

다. 즉 EDS 작동 시 전극 사이 영역에서는 같은 극성을 가지는 전극에서 양옆의 반대 극성을 가지는 전극 방향으로의 수평 방향 힘이, 전극 위 영역에서는 입자를 표면에서 반발하거나 부착시키는 수직 방향 힘이 지배적으로 작용한다. 이러한 힘으로 입자는 전극에서 전극으로 이동되고 전극 위에서는 반발되면서 표면에서 세정 될 수 있다. 하지만 반발된 입자 중 일부는 표면을 완전히 벗어나기 전에 입자와 반대 극성을 가지는 전극 위에서 표면 방향으로 작용하는 힘에 의해 표면에 재부착될 수 있다. 이때 합력의 크기는 약 0.1 nN으로 중력보다 약 4000배 크기 때문에 중력 침강속도보다

훨씬 빠른 속도로 표면을 향해 이동하게 된다. 입자가 표면에 빠른 속도 부착될 경우 표면과 입자 그리고 입자와 입자 간 접촉면적을 증가시키기 때문에 접착력이 증가할 수 있다(Hinds and Zhu, 2022). EDS 작동 전 증력 칩강으로 표면에 로딩된 입자는 비교적 약한 접착력을 가지고 있어 EDS 작동을 통해 충분히 반발시킬 수 있었던 반면, 전극 위 영역에 재부착된 입자는 접착력이 강하게 형성되어 세정이 잘 이루어지지 않을 수 있다. 따라서 앞서 그림 3(a)와 그림 4에서의 결과와 같이 전기장의 세기가 증가하여도 세정성능이 더 이상 증가하지 않아 전극 윗부분의 영역에 입자가 세정되지 않고 남아있는 것으로 판단된다. 또한, 입경이 작아 접착력이 다른 외력에 비해 지배적으로 작용하는 입자의 경우 EDS에 의한 세정이 어려울 수 있다. 하지만 EDS가 전기집진기에 적용되었을 때 집진부에서 입자 간 응집이 이루어지며 응집에 의한 입자의 성장이 충분히 이루어진다면 입자에 작용하는 전기역학적 힘이 지배적으로 작용하여 충분히 세정이 가능할 것으로 예상된다.

3.4 환경조건에 따른 세정효율 평가

전기집진기의 세정에 EDS가 적용될 때 EDS는 다양한 습도환경 조건에 놓일 수 있고 세정 주기에 따라 표면 위 로딩된 입자의 양이 다를 수 있다. 이에 상대습도와 로딩량과 같은 환경조건이 세정효율에 미치는 영향을 평가하였다. 먼저 상대습도가 세정효율에 미치는 영향을 평가한 결과 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이 상대습도 70%를 기준으로 세정효율이 다른 양상을 보였다. 상대습도가 70% 보다 낮은 조건에서는 40%에서 상대습도가 증가할수록 세정효율이 47.6%에서 53.8%로 증가하는 경향을 보였으나, 상대습도가 70%를 초과하는 경우 세정효율이 급격히 감소하여 상대습도 90% 조건에서 세정효율은 10%에 불과했다. 상대습도가 70% 이하 조건에서는 습도가 증가할수록 세정효율이 증가하였는데 이는 입자가 대기 중 수증기를 흡착하여 입자 간 결합력이 증가함에 따라 입자의 응집이 이루어졌기 때문으로 판단된다(Chen and Tao, 2000). 응집에 의해 입경이 증가하면 입자에 작용하는 힘 중 증력의 영향이 커져 기울어진 표면에서 입자를 보다 더 효과적으로 세정할 수 있기 때문이다. 반면 상대습도가 증가할

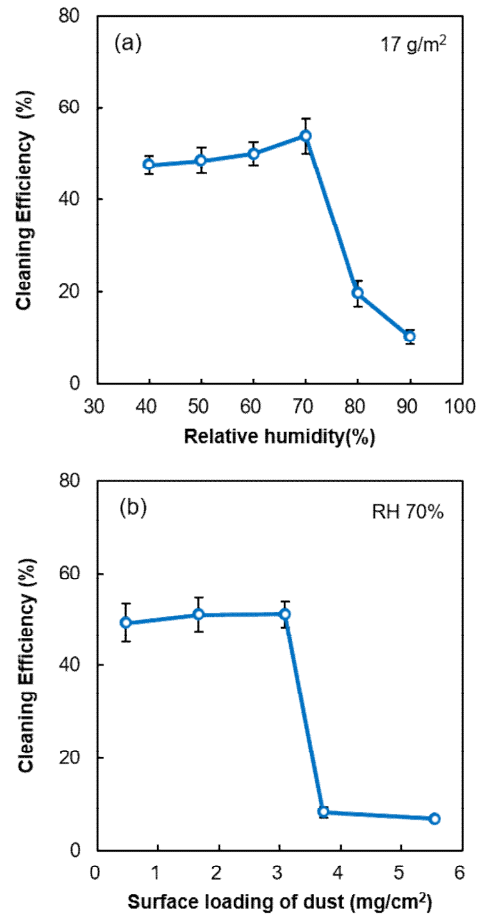


Figure 6. Cleaning efficiency according to (a) relative humidity and (b) surface lading of dust (2 kV/mm, 1 Hz, square wave, phase difference: 180°, width: 0.5 mm, gap: 2 mm)

수록 입자 표면에 흡착된 물 분자와 표면 간 작용하는 표면장력에 의해 접착력이 증가할 수 있다.(Busnaina and Elsaywy, 2000). 따라서 상대습도가 70%를 초과한 경우에는 입자의 응집에 의한 영향보다 표면장력에 의한 접착력이 지배적으로 작용하여 EDS에 의한 입자의 세정효율이 감소한 것으로 판단된다.

다음으로 로딩된 입자의 양에 따른 세정효율을 평가하였고 그 결과를 그림 6(b)에 나타내었다. 실험 결과 로딩량이 31 g/m² 보다 작을 때는 세정효율이 일정했으나 37 g/m² 이상에서는 세정효율이 급격히 감소하

였다. 31 g/m² 이하의 조건에서는 앞선 실험결과들과 마찬가지로 전극 사이의 gap 부분의 영역에서는 모든 입자가 세정이 되고 로딩량이 증가하여도 전체 로딩량 중 일정 비율의 입자만 전극 위에 남아있었기 때문에 세정효율이 일정한 것으로 판단된다. 반면, 37 g/m² 이상의 로딩량에서는 전극 위뿐만 아니라 전극 사이 gap 영역에서 세정이 이루어지지 않고 남아있는 입자가 존재하는 양상을 보였고 이로 인해 세정효율이 감소하는 것으로 판단하였다. 로딩량이 증가하면 동일한 EDS 필름 표면 면적에서 입자 층의 두께가 두꺼워지게 되는데 필름위에 형성된 입자 층은 절연체 역할을 하므로, 로딩량 증가는 전극 간 형성되는 전기장 세기를 감소시킨다. 따라서 37 g/m² 이상의 로딩량에서는 입자를 세정하기 위한 충분한 정전기력이 형성되지 않기 때문에 세정효율이 감소한 것으로 판단된다.

3.5 고습도 환경에서의 세정효율 평가

앞선 실험 결과에서 상대습도가 70%를 초과하는 조건에서는 세정효율이 급격히 감소하는 양상을 보이는 것을 확인하였다. 효과적인 EDS의 적용을 위해서는 고습도 조건에서도 저습도 조건과 같이 유사한 세정성능을 나타내는 것이 필요하다. 이를 위해 고습도 조건에서도 높은 세정성능을 달성할 방안에 대한 실험을 수행하였다. 앞서 진동수 변화에 따른 세정성능 평가 결과에서 진동수의 변화는 입자에 가해지는 충격의 빈도를 의미할 수 있다고 설명한 바 있다. 이에 높은 습도조건에서 입자에 가해지는 충격의 횟수를 증가한다면 부착력을 극복할 수 있을 것으로 판단하였고, 이를 확인하기 위해 다양한 습도 및 진동수 변화에 따른 세정성능을 평가를 수행하였다. 실험은 상대습도 40, 50, 60, 70, 80, 90%의 습도조건에서 1, 50, 100 Hz의 진동수로 30초 동안 세정하여 세정효율을 비교하였고 그 결과를 그림 7(a)에 나타내었다. 앞선 실험과 동일하게 1 Hz 조건에서는 상대습도가 40%에서 70%로 증가할 때 세정효율이 향상하다가 상대습도가 80%를 초과하면 세정효율이 급격히 감소하였다. 반면 50, 100 Hz 조건에서는 상대습도가 80%를 초과하여도 세정효율이 60% 이상으로 높았고 오히려 상대습도가 증가함에 따라 세정효율이 증가하는 추세를 보였다. 즉 동일한 시

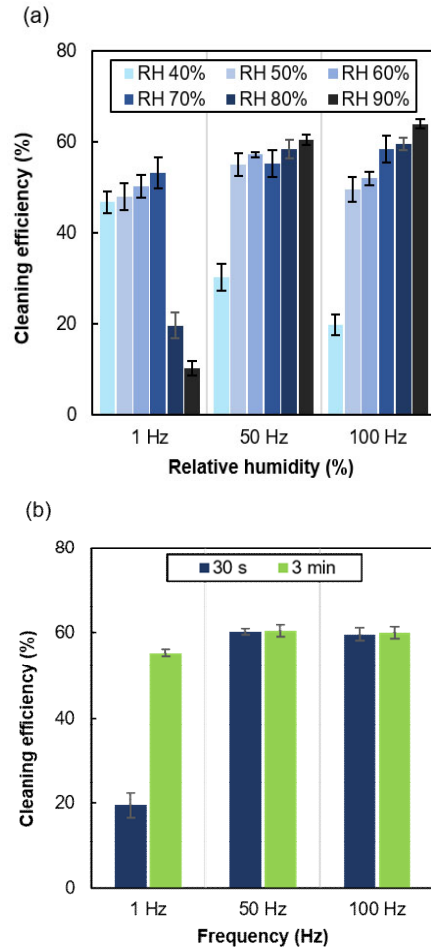


Figure 7. Cleaning efficiency according to (a) frequency at varying relative humidity and (b) cleaning time on relative humidity of 80% (2 kV/mm, 1 Hz, square wave, phase difference: 180°, width: 0.5 mm, gap: 2 mm, 17 g/m²)

간 안에 입자에 가해지는 충격의 횟수가 증가하여 세정성능 향상에 큰 영향을 주는 것으로 판단할 수 있다. 다음으로 충격 횟수가 세정성능 향상에 주요한 원인으로 작용하는지를 명확하게 확인하기 위해 80%의 고습도 조건에서 1 Hz를 인가하지만, 전원 인가 시간을 증가시키는 방법으로 전체 충격 횟수를 증가시키고 이에 따른 세정성능 평가를 진행하였다. 실험은 진동수 1, 50, 100 Hz로 각각 30초, 3분간 세정한 결과를 비교하였다. 그 결과 그림 7(b)와 같이 50, 100 Hz의 경우

30초와 3분 세정 시 세정효율이 동일했고 1 Hz 인 경우 30초 세정과는 다르게 3분 세정 시 높은 세정효율을 얻었다. 즉 1 Hz의 낮은 진동수로도 세정효율을 증가시킬 수 있음을 알 수 있었고, 고습도 상황에서 입자에 가해지는 충격 횟수 증가가 세정성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 그러나 상대습도가 40%로 낮은 경우 진동수가 증가할수록 오히려 세정효율이 감소하는 결과가 나타났다. 이는 진동수가 너무 높아 전극의 빠른 극성 변화를 입자의 움직임이 따라가지 못하기 때문으로 판단된다(Kawamoto and Shibata, 2015). 전극의 극성 변화가 너무 빠르면 기존에 형성된 전기장 방향으로의 정전기력이 입자에 작용하여 입자가 이동할 때 충분한 시간이 주어지지 않아 이동이 완료되지 않은 시점에서 전기장 방향이 반대로 바뀌어 입자가 다시 반대 방향으로 이동하게 된다. 따라서 높은 진동수 조건에서 입자는 짧은 거리를 빠르게 진동할 뿐 입자가 기판으로부터 떨어지는데 시간이 충분하지 않아 표면 위에서 제거되기 어려워 세정효율이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

5. 결론

전기집진기의 초기 집진 성능 유지를 위해서는 집진된 입자의 주기적인 세정이 필수적이며, 본 연구진은 기존 세정법들의 단점을 보완하는 세정방법으로 Electrodynamic screen (EDS)의 적용을 제안하였다. 전기집진기에 적용할 수 있는 EDS 필름을 제작하였으며 효과적인 집진판 세정을 위해 세정성능에 영향을 미치는 변수들을 선정하여 각 변수에 대한 최적화 실험을 진행하였다. 선정 변수는 크게 세 가지로 1. EDS 필름 활성화를 위해 전극에 인가되는 교류전압의 특성(전압, 진동수, 파형, 위상차), 2. 전극 배열 구조(width, gap), 3. 환경 조건(습도, 로딩량)이다. 그 결과, 세정성능 측면에서는 2 kV/mm, 1 Hz, square, 180°, gap: 7 mm, width: 0.5 mm, RH 70%, 17 g/m² 조건에서 약 65%의 세정효율을 얻을 수 있었다. 이때 세정되지 않은 약 35%의 입자들은 EDS 필름의 전극 윗부분 영역에만 남아있었고 전극 사이 영역은 모두 세정되었다. 이는 EDS 필름의 전체 면적 중 전극 사이 영역이 차지

하는 비율(gap area to total area ratio)로 약 94%에 해당하며 EDS 필름의 대부분 영역이 세정되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 EDS를 이용한 전기집진기 세정 시 집진판의 충분한 면적을 세정할 수 있으므로 효과적인 집진효율 회복을 기대할 수 있다. 다만, 위 연구 결과는 중력침강에 의해 로딩된 입자가 대상이므로 향후 EDS가 전기집진기에 적용되어 정전기력에 의해 입자가 로딩되었을 때의 세정효과에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

본 논문에서는 EDS의 효과적인 전기집진기 세정을 위한 선행연구로써 다양한 환경 및 선정 변수별 최적화된 EDS의 작동 조건을 제시하였다. EDS를 이용한 전기집진기 세정은 기존의 전기집진기 세정방식의 단점을 보완하면서도 유지비용은 낮은 새로운 세정방식으로 활용될 수 있다. 또한, 전기집진기 운행 정지 기간 중 세정하거나 2개의 집진부를 통해 집진과 세정을 번갈아 수행한다면 세정 시 재비산 문제를 극복할 수 있을 것으로 생각된다. 그 외에도 EDS는 별도의 부대 설비가 필요 없으므로 규모가 작아 추타 및 수 세정이 어려운 2단 전기집진기에도 효과적인 세정방안으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원으로 수행하였고, 이에 감사드립니다. (grant no. 20007027)

References

- Busnaina, A. A., & Elsaywy, T. (2000). The effect of relative humidity on particle adhesion and removal. *The Journal of Adhesion*, 74(1-4), 391-409.
<https://doi.org/10.1080/00218460008034538>
- Bernard, A. R., Eriksen, R., Horenstein, M. N., and Mazumder, M. K. (2018). Dust settles, we don't: The electrodynamic screen—A self-cleaning technology for concentrated solar power mirrors and photovoltaic panels, *MRS Energy and Sustainability*, 5, E12. <https://doi.org/10.1557/mre.2018.12>
- Chen, C. C., & Tao, C. J. (2000). Condensation of supersaturated water vapor on submicrometer particles of SiO₂ and TiO₂, *The Journal of Chemical Physics*, 112(22), 9967-9977.
<https://doi.org/10.1063/1.481633>
- Cid, N., Rico, J. J., Pérez-Orozco, R., and Larrañaga, A. (2021). Experimental study of the performance of a laboratory-scale esp with biomass combustion: discharge electrode disposition, dynamic control unit and aging effect, *Sustainability*, 13(18), 10344.
<https://doi.org/10.3390/su131810344>
- Calderón-Garcidueñas, L., and Ayala, A. (2022). Air pollution, ultrafine particles, and your brain: are combustion nanoparticle emissions and engineered nanoparticles causing preventable fatal neurodegenerative diseases and common neuropsychiatric outcomes?, *Environmental Science and Technology*, 56(11), 6847-6856.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04706>
- Engelbrecht, H. L. (1981). Rapping systems for collecting surfaces in an electrostatic precipitator, *Environment International*, 6(1-6), 297-305.
[https://doi.org/10.1016/0160-4120\(81\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0160-4120(81)90039-8)
- Gray, P. R., Hurst, P. J., Lewis, S. H., and Meyer, R. G. (2009). *Analysis and design of analog integrated circuits*, 5th ed. John Wiley & Sons.
- Hall, H. J., and Katz, J. (1976). Corrosion problems and solutions for electrostatic precipitators, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 26(4), 312-317.
<https://doi.org/10.1080/00022470.1976.10470255>
- Huang, S. H., and Chen, C. C. (2003). Loading characteristics of a miniature wire-plate electrostatic precipitator, *Aerosol science and technology*, 37(2), 109-121.
<https://doi.org/10.1080/027868203000950>
- Hinds, W. C., and Zhu, Y. (2022). *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*, John Wiley and Sons.
- Jones, D., Bernard, A. R., Hoffman, M., Chang, S., Wilkins, C., Eriksen, R., Ellinger, C., Garner, S., Rothacker, A., Theelen, C., and Mazumder, M. (2020). Transparent Electrodynamic Screen (EDS) Films—Industrial Production and Lamination onto PV Modules and CSP Mirrors for Self Cleaning Function, *MRS Advances*, 5(50), 2595-2602.
<https://doi.org/10.1557/adv.2020.351>
- Kim, H. J., Han, B. W., Hong, W. S., Shin, W. H., Song, D. K., Jung, S. H., Kim Y. J., Oh, W. S., Hwang, K. D., and Yoo, S. Y. (2010). Evaluation of fine-particle removal performance of novel ESP with highly durable chargers and collectors, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, 34(4), 423-428.

- <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2010.34.4.423>
- Kawamoto, H., and Miwa, T. (2011). Mitigation of lunar dust adhered to mechanical parts of equipment used for lunar exploration, *Journal of Electrostatics*, 69(4), 365-369. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2011.04.015>
- Kim, H. J., Han, B., Kim, Y. J., Hwang, K. D., Oh, W. S., Yoo, S. Y., and Oda, T. (2011). Fine particle removal performance of a two-stage wet electrostatic precipitator using a nonmetallic pre-charger, *Journal of the air and waste management association*, 61(12), 1334-1343. <https://doi.org/10.1080/10473289.2011.603994>
- Kawamoto, H., and Shibata, T. (2015). Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels, *Journal of Electrostatics*, 73, 65-70. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2014.10.011>
- Lin, G. Y., Tsai, C. J., Chen, S. C., Chen, T. M., and Li, S. N. (2010). An efficient single-stage wet electrostatic precipitator for fine and nanosized particle control, *Aerosol Science and Technology*, 44(1), 38-45. <https://doi.org/10.1080/02786820903338298>
- Lopuszanska, U., and Samardakiewicz, M. (2020). The relationship between air pollution and cognitive functions in children and adolescents: a systematic review, *Cognitive and Behavioral Neurology*, 33(3), 157-178. <https://doi.org/10.1097/WNN.0000000000000235>
- Lee, H., Sung, J. H., Kim, M., Kim, Y. S., Lee, Y., Kim, Y. J., Han, B., and Kim, H. J. (2022). Development of electrostatic-precipitator-type air conditioner for reduction of fine particulate matter in subway, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(3), 3992-3998. <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3160125>
- Mizuno, A. (2000). Electrostatic precipitation. *IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation*, 7(5), 615-624. <https://doi.org/10.1109/94.879357>
- Mazumder, M. K., Sharma, R., Biris, A. S., Zhang, J., Calle, C., and Zahn, M. (2007). Self-cleaning transparent dust shields for protecting solar panels and other devices, *Particulate Science and Technology*, 25(1), 5-20. <https://doi.org/10.1080/02726350601146341>
- Miller, B. G. (2010). Advanced flue gas dedusting systems and filters for ash and particulate emissions control in power plants, In *Advanced power plant materials, design and technology*, 217-243. <https://doi.org/10.1533/9781845699468.2.217>
- Minji Lee, Ji-Hye Kim, and Hyung-jun Koo. (2019). Dielectrophoresis for Control of Particle Transport: Theory, Electrode Designs and Applications, *Korean Chemical Engineering Research*, 57(2), 149-163. <https://doi.org/10.9713/kcer.2019.57.2.149>
- Park, B. H., Kim, S. B., Jo, Y. M., and Lee, M. H. (2012). Filtration characteristics of fine particulate matters in a PTFE/glass composite bag filter, *Aerosol and Air Quality Research*, 12(5), 1030-1036. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.03.0071>
- PTI, (2016). Arizona Test Dust (ATD) Safety Data Sheet. www.powdertechologyinc.com/wp-content/uploads/2012/08/SDS.01.Arizona-Test-Dust.4-Feb-2016.pdf

- PTI (2016). ISO 12103-1 ARIZONA TEST DUST CONTAMINANTS A2 FINE GRADES <https://www.powdertechologyinc.com/product/iso-12103-1-a2-fine-test-dust/>
- Pethig, R. (2016). Where is dielectrophoresis (DEP) going?, *Journal of The Electrochemical Society*, 164(5), B3049. <http://doi.org/10.1149/2.0071705jes>
- Pun, V. C., Kazemiparkouhi, F., Manjourides, J., and Suh, H. H. (2017). Long-term PM2.5 exposure and respiratory, cancer, and cardiovascular mortality in older US adults, *American journal of epidemiology*, 186(8), 961-969. <https://doi.org/10.1093/aje/kwx166>
- Thomas, D., Penicot, P., Contal, P., Leclerc, D., and Vendel, J. (2001). Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles experimental and modelling study, *Chemical Engineering Science*, 56(11), 3549-3561. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(01\)00041-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00041-0)
- Teng, C., and Li, J. (2020). Experimental study on particle removal of a wet electrostatic precipitator with atomization of charged water drops, *Energy and Fuels*, 34(6), 7257-7268. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c00646>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2019). Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter (Final Report), EPA/600/R-19/188. <https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=347534>
- Viner, A. S., Lawless, P. A., Ensor, D. S., and Sparks, L. E. (1992). Ozone generation in DC-energized electrostatic precipitators, *IEEE transactions on industry applications*, 28(3), 504-512. <https://doi.org/10.1109/28.137427>
- Xu, C., Chang, J., Meng, Z., Wang, X., Zhang, J., Cui, L., and Ma, C. (2016). Wetting properties and performance test of modified rigid collector in wet electrostatic precipitators, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 66(10), 1019-1030. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1173125>