

# 초미세먼지 제거를 위한 유전체 분리판을 적용한 전기집진 특성연구 Performance Evaluation of the Dielectric Electrostatic Precipitator for Collecting Ultra Fine Particles

김세훈\* · 장영혜\* · 방주엽\* · 심규형\* · 박민찬\* · 이재근\* · 안영철\*\*\*  
Se-Hun Kim\*, Young-Hye Jang\*, Ju-Yup Bang\*, Gyu-Hyoung Sim\*,  
Min-Chan Park\*, Jae-Keun Lee\* and Young-Chull Ahn\*\*\*

(Received 28 January 2020, Revision received 06 February 2020, Accepted 06 February 2020)

**Abstract:** There are several important parameters for improving the air cleaning system, such as fine dust removal efficiency, pressure drop across the system, and maintenance convenience. Although an electrostatic precipitator (ESP) has a high potential for maintaining good indoor air quality, the dust collection efficiency of particulate matter less than 2.5 μm particle size (PM2.5) should be improved at the higher air flow rate. In this study, an electrostatic precipitator with a dielectric separator for improving the removal of fine dusts is designed and evaluated. The dielectric separator inserted in the ESP can prevent the occurrence of short electrodes. Further due to the electrical polarization of the dielectric separator in the electric field, it is possible to increase the electrostatic force and improve the collection efficiency by reducing the distance at positive electrode-to-positive electrode. The dust collection efficiency of the dielectric separator ESP based on the air filter performance method of KS B 6740 at the test conditions of the particle size of 0.3 μm and the face velocity of 2 m/s is found out increasing 26%, compared to the conventional ESP without the dielectric separator.

**Key Words :** Dielectric electrostatic precipitator, Air cleaner, Collection efficiency, Dielectric, Dielectric separator

\*\*\* 안영철(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-0377-8101) : 교수, 부산대학교 건축공학과  
E-mail : ycahn@pusan.ac.kr, Tel : 051-510-2492  
\*김세훈(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5408-5650) : 연구원, 에코에너지기술연구소  
\*장영혜(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2000-9892) : 연구원, 에코에너지기술연구소  
\*방주엽(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1711-0217) : 연구원, 에코에너지기술연구소  
\*심규형(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2482-7673) : 연구원, 에코에너지기술연구소  
\*박민찬(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9433-261X) : 연구원, 에코에너지기술연구소  
\*이재근(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4224-0099) : 대표이사, 에코에너지기술연구소

\*\*\* Young-Chull Ahn(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-0377-8101) : Professor, Department of Architectural Engineering, Pusan National University.  
E-mail : ycahn@pusan.ac.kr, Tel : 051-510-2492  
\*Se-Hun Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5408-5650) : Researcher, Eco Energy Research Institute.  
\*Young-Hye Jang(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2000-9892) : Researcher, Eco Energy Research Institute.  
\*Ju-Yup Bang(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1711-0217) : Researcher, Eco Energy Research Institute.  
\*Gyu-Hyoung Sim(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2482-7673) : Researcher, Eco Energy Research Institute.  
\*Min-Chan Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9433-261X) : Researcher, Eco Energy Research Institute.  
\*Jae-Keun Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4224-0099) : President, Eco Energy Research Institute.

— 기 호 설 명 —

- F : Electrostatic force
- $q_1, q_2$  : Signed magnitudes of the charges
- $\eta$  : Dust collection efficiency (%)
- $k_e$  : Coulomb's constant( $8.987 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{C}^{-2}$ )
- $C_0$  : Downstream particle count concentration ( $\text{ea}/\text{m}^3$ )
- $C_i$  : Upstream particle count concentration ( $\text{ea}/\text{m}^3$ )

1. 서 론

급속화된 산업화의 부작용으로 발생된 초미세먼지 대응에 관한 연구가 세계적으로 매우 활발하게 이루어지고 있다. 국내 초미세먼지 농도는 이미 WHO 권고기준( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 선진국(일본 11.9, 미국  $7.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )을 초과한 수치를 나타내고 있으며, 극심한 대기정체(풍속 2 m/s 이하)로 인해 고농도 유지 기간이 1주일(기간 : '19.3.1~7)가량 지속되는 등 '15년 초미세먼지 측정 이래 최고 수준의 고농도 현상을 보이고 있다.<sup>1)</sup>

이러한 환경 하에서 가정, 사무실 등의 실내 밀폐환경에서는 상용화된 공기청정기를 통해 초미세먼지를 포집하는 것이 가능하지만, 지하역사를 비롯한 다중이용시설과 같은 반밀폐·대면적 환경인 경우 공기청정기만으로 대응하기에는 한계가 있다. 다중이용시설의 대형 공조설비 내부에 적용되는 초미세먼지 제거 기술로는 여과필터방식의 HEPA(High Efficiency Particulate Air)필터와 전기집진 방식이 있다. HEPA 필터의 경우 높은 압력손실에 의한 에너지손실, 소음 증가, 필터교체, 유지관리 증가 등의 단점이 존재한다. 전기집진기의 경우 산업용 집진시설로는 많이 사용하고 있으나, 가정/사무실용의 경우 높은 풍량에서 미세먼지 집진효율이 낮으며, 고전압사용에 따른 내구성을 개선하기 위해 아직도 많은 연구개발이 진행 중에 있다.<sup>2,3)</sup>

전기집진기의 경우 전극에 고전압을 인가하여 방출된 고밀도의 전하가 미세먼지에 흡착되어 집진확률을 높이는 원리로 작동한다. 하전부와 집진부를 직렬로 배치시키는 이단식 전기집진 기술이

널리 사용 중에 있으며<sup>4,6)</sup> 집진효율이 다소 낮고 고전압 인가로 인한 전극 간 통전 발생, 유해물질인 오존을 발생하는 문제점이 있다.<sup>7-10)</sup> 그래서 최근에 전기집진기의 성능향상을 위해 카본전극 양면을 고분자 물질인 PET로 코팅한 유전체 전극 기술이 개발, 보급되었다. 유전체 전극을 집진부 고전압부에 적용 시 전극간 간격을 좁힐 수 있고 그로 인해 집진면적을 증가시킬 수 있으며, 전극 간 통전을 줄이고 기존의 전기집진기 대비 성능을 향상시킬 수 있는 등의 이점은 있으나 여전히 높은 유속에서의 집진효율은 한계를 보이고 있다.

본 연구에서는 이러한 기존 기술들의 한계를 극복하기 위하여 공기청정기를 비롯한 대형공조설비에 설치 가능한 유전체분리판 적용 전기집진 기술을 개발하고 집진성능 특성을 분석하였다.

2. 유전체 분리판 집진기술

Fig. 1은 전기장 내에 위치한 유전체 분리판의 분극 메커니즘을 설명한 것으로, 유전체(Dielectric Substance)는 절연체를 전기장 내에 놓았을 때 유전체 내부에서 전기쌍극자 모멘트가 형성되어 표면에 전하가 유기되는 물질이다. 유전체는 전기장 안에서 극성을 지니게 되는 절연체로 도체와 달리 전하가 통과하지 않지만 쌍극자 모멘트를 형

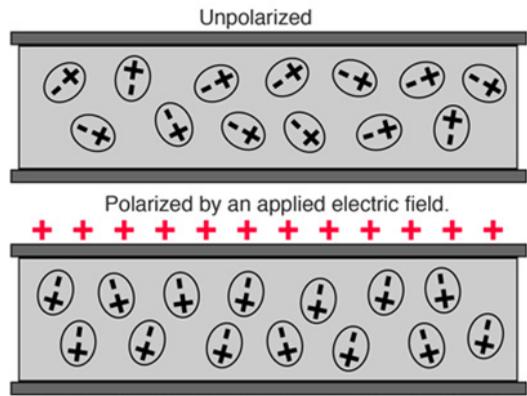


Fig. 1 Polarization mechanism of the dielectric separator by forming dipole moment in the electric field

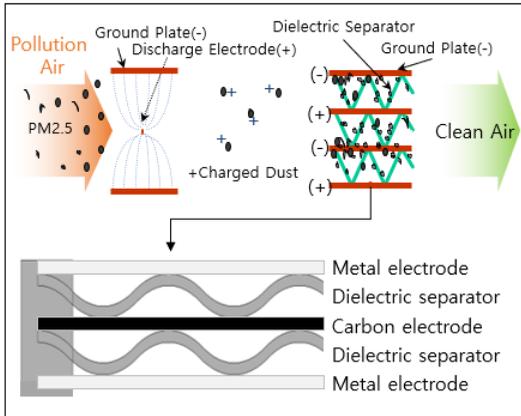


Fig. 2 Schematics of the two stage electrostatic precipitator applied the dielectric separator between the precipitator electrodes

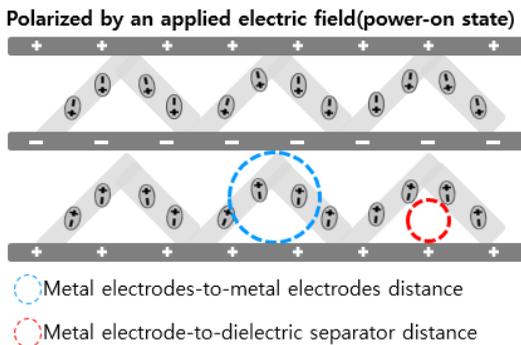


Fig. 3 Mechanism of improving dust collection efficiency in the electrostatic precipitator applied the dielectric separator

성하여, 전기적 분극을 형성함과 동시에 DC전류를 차단할 수 있다. 이러한 유전체 분리판의 특성은 집진전극과 유사한 용도로 적용되어 집진면적을 증가시키고 동시에 절연체로서 고전압전극 간 과전류를 방지시킬 수 있다.

Fig. 2는 본 연구를 통해 개발된 유전체 분리판을 적용한 2단식 전기집진기의 구조이다. 2단식 전기집진기는 코로나방전을 통해 공기를 이온화시켜 미세먼지를 대전시키는 대전부(Corona Precharger)와 대전된 미세입자를 강한 전기장에 의해 생성된 정전기력으로 포집하는 집진부(Dust

Collector)로 구성되어 있다.<sup>11)</sup> 본 연구에서 대전부와 집진부는 각각 와이어-전극판(Wire-plate) 방식과 카본양면에 PET 코팅된 금속전극-카본전극으로 구성되어 있으며 집진부 내의 전극 사이 사이에 유전체 분리판(Dielectric Separator)을 배치하여 전극 간 전류흐름을 차단하는 격벽을 형성하였다.

Fig. 3은 유전체 분리판 삽입으로 집진판간 거리감소로 인한 정전기력 증가효과를 보여준다. 식 (1)은 정전기력을 나타내는 Coulomb의 식으로 거리 r만큼 떨어진 2개의 전하사이에서 작용하는 척력을 나타내며<sup>12)</sup>, 유전체 분리판의 분극으로 인해 집진부 내부에 동일극성의 전극간 거리를 감소시켜 입자에 작용하는 정전기력을 높이고, 또한 집진면적을 증대시켜 집진효율을 높일 수 있다.

$$F_{electrostatic} = k_c \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1)$$

### 3. 실험방법

#### 3.1 유전체 전기집진기 사양

Table 1은 본 연구에서 제작한 전기집진기의 주요 사양을 나타낸 것으로, 대전부 전극은 0.1 mm 직경의 텅스텐 와이어를 사용하였으며, 집진부 고전압 판은 카본전극 양면에 PET를 코팅하여 집진판의 집진면적을 0.93 m<sup>2</sup> 수준으로 형성하였다. 유전체 분리판은 ABS소재의 물결형 구조체로 고전압판과 집진판 사이에 삽입하였다.

유전체 분리판 적용효과를 판단하기 위해 분리판 미적용 제품을 함께 분석하였고, 섬유상 필터와의 상대적인 성능비교를 위하여 가정용 공기청정기에 장착되는 E11 등급의 HEPA급 필터에 대한 집진효율 및 압력손실도 함께 분석하였다.

#### 3.2 성능평가

Fig. 4는 본 실험에 사용한 집진 성능평가 장치의 개략도이며, 필터의 집진효율 및 압력손실을 측정하기 위하여 KS B 6141 “환기용 공기 필터 유니트” 기준을 적용하였다.<sup>13)</sup>

집진성능은 0.3 μm 입자를 기준으로 한 계수법

Table 1 Specifications of the two stage electrostatic precipitator with the dielectric separator

Parameter		Specification
Corona Precharger (1st stage)	Discharge Electrode	Material: Tungsten Size : $\Phi 0.1 \times 450 \text{ mm} \times 8 \text{ ea}$ Applied Voltage (Vc) : 0~8 kV
	Ground Plate	Material : Aluminum Size : 17 mm $\times$ 450 mm $\times$ 9ea Plate-to-plate spacing : 32 mm
Dust Collector (2nd stage)	High Voltage Plate	Material : Carbon, Polyethylene terephthalate (PET) Size : 17 mm $\times$ 450 mm $\times$ 61 ea Plate-to-plate Spacing : 4 mm Applied Voltage (Vc) : 5.2 kV
	Ground Plate	Material : Aluminum Size : 17mm $\times$ 450 mm $\times$ 61 ea Plate-to-plate spacing : 4 mm
	Dielectric Separator	Material : Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Size : 17 mm $\times$ 450 mm $\times$ 123 ea Plate-to-plate spacing : 2 mm

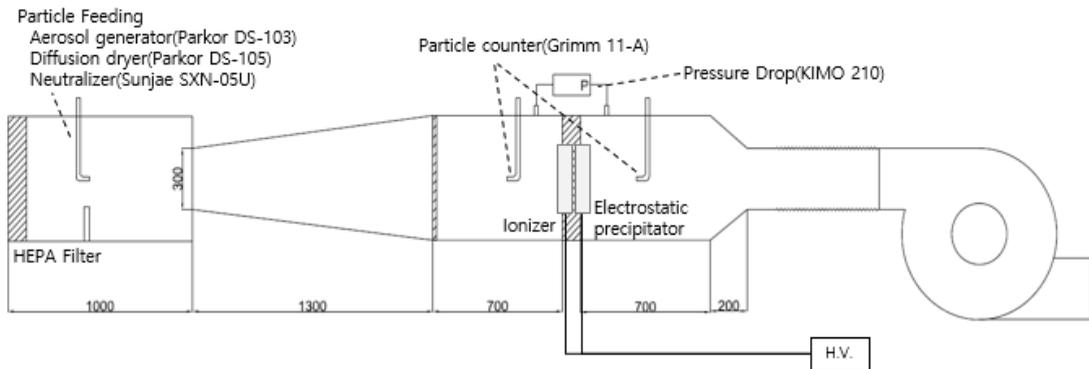


Fig. 4 Schematic diagram of evaluating the performance of the dielectric separator ESP

으로 평가하였으며 집진효율  $\eta$ 를 산정하는 식 (2)는 다음과 같다.

$$\eta = \left(1 - \frac{C_0}{C_i}\right) \times 100 \quad (2)$$

## 4. 실험결과

### 4.1 전기집진기의 전압-전류 특성

Fig. 5는 유전체 분리판 적용 여부에 따른 전기 집진기의 대전부에서 인가전압별 전류특성을 나

타낸 것이다. 집진부의 5.2 kV 인가조건에서 대전부의 코로나방전 개시전압은 5.8 kV이며, 유전체 삽입 유무에 상관없이 인가전압에 따른 전류 값이 유사함을 알 수 있다. 이는 유전체 분리판 삽입의 유무가 대전부의 전기적 특성에 차이를 유발하지 않는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 인가전압 조건을 각각 대전부 6.5 kV, 집진부 5.2 kV로 선정하고 평가를 진행하였다. 인가전압 선정을 위해 오존발생량 평가를 선행하였으며, 해당 인가조건에서의 오존 발생량은 0.015 ppm으로 공기청정협회<sup>(14)</sup>의 오존 규제치

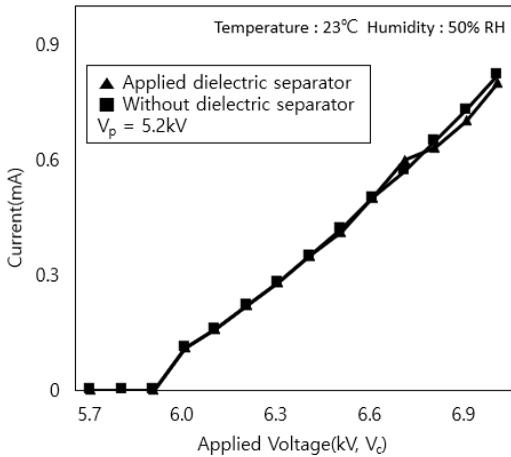


Fig. 5 Current-voltage characteristics of the two stage electrostatic precipitator applied with and without the dielectric separator

인 0.03 ppm보다 적은 양의 오존이 발생하는 것으로 확인되었다.

#### 4.2 유전체 분리판 적용에 따른 성능비교

Table 2는 0.3 μm 입자에서 유전체 분리판 적용 여부에 따른 집진효율과 압력손실 비교 결과를 나타내었다. 유전체 분리판이 적용된 전기집진기는 풍속 1 m/s에서 99.70%, 풍속 2 m/s에서 93.59%로 유전체 분리판이 미적용된 전기집진기 대비 집진효율이 각각 6.11%, 23.62% 가량 개선되었다. 이는 앞서 유전체분리판 기술 원리에서 설

명한 유전체분리판 삽입에 따른 정전기력 증대 및 집진면적 확대에 따른 효과로 판단된다. 압력 손실의 경우, 유전체분리판 적용으로 인해 미적용 제품 대비 약 10~25 Pa 증가하였지만 일반적인 공기청정기용 HEPA급 필터에 비해 압력손실 증가량이 50% 이하 수준으로 분석되었다. 이러한 결과를 통해 향후 유전체 분리판이 적용된 전기 집진기를 기존 공조설비에 적용할 경우 압력손실 증가에 의한 시스템 부하증가의 우려 없이 직접 적용이 가능할 것으로 예상된다.

Fig. 6은 유전체분리판 적용 유무조건에서 제품의 대전부 인가전압(V<sub>c</sub>)에 따른 집진효율 비교를 나타내었다. 풍속 2.0 m/s 조건에서 두 제품 모두 대전부의 인가전압이 증가할수록 집진효율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 유전체 분리판 적용 제품의 경우 대전부 인가전압이 6.5 kV에서 7.0 kV로 증가함에 따라 집진효율은 93.59%에서 97.09%로 증가하였고, 유전체 분리판 미적용 제품의 경우는 집진효율이 69.97%에서 79.35%로 증가하였다. 대전부의 인가전압이 증가할수록 코로나 방전 전류가 증가하여 와이어 근처에서 이온 발생량이 증가하고 이로 인해 이온 확산에 의한 입자의 하전 비율 또한 증가하였기 때문에 판단된다. 이는 와이어-관형 대전부를 사용한 선행연구 결과와 유사한 경향이다.<sup>11)</sup> 그러나 대전부 인가전압 증가 시, 집진성능은 향상되나 오존발생량 또한 증가하므로 오존발생 기준을 만족하는 최적의 인가전압 조건 확립이 필요하다.

Table 2 Comparison of the dust collection efficiency and pressure drop in the conventional ESP, the dielectric separator ESP and E11 HEPA grade filter

Parameters	Face Velocity (m/s)	Collection Efficiency (%)	Pressure Drop (Pa)	Applied Voltage (kV)	
				Corona Pre-charger	Dust Collector
Conventional ESP (without dielectric separator)	1.0	97.20	2.96	6.5	5.2
	2.0	66.97	10.26		
Dielectric Separator ESP	1.0	99.70	13.92		
	2.0	93.59	37.83		
HEPA Grade Filter (E11)	1.0	99.45	36.90	-	
	2.0	97.29	81.00		

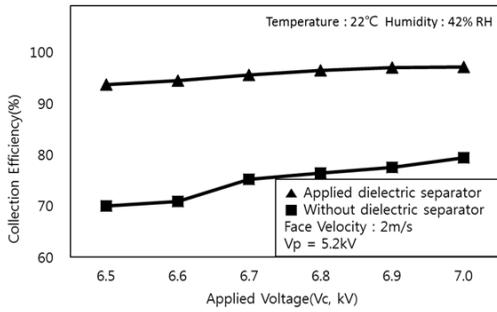


Fig. 6 Comparison of the dust collection efficiency as a function of applied voltage in the charged part of the dielectric separator ESP

### 4.3 면속도 별 PM2.5 집진성능

Fig. 7은 유전체 분리판 적용제품의 유속에 따른 PM2.5 제거성능을 나타내었다. 유속은 1 m/s에서 4 m/s까지 변화시켰으며, 유속이 증가함에 따라 집진성능은 98.44%, 94.66%, 78.09%, 58.04% 순으로 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 4m/s의 비교적 높은 유속에서도 PM2.5 초미세먼지의 집진효율이 58% 수준을 나타내고 있는데, 실제 다중이용시설의 대형공조설비의 설계유속이 대부분 2~4 m/s 수준임을 감안한다면 본 개발품을 적용하였을 경우 최소 58% 수준 이상의 초미세먼지 저감효과를 기대할 수 있으며, 낮은 압력손실로 공조시스템 부하증가를 최소화하여 적용이 가능할 것으로 판단된다.

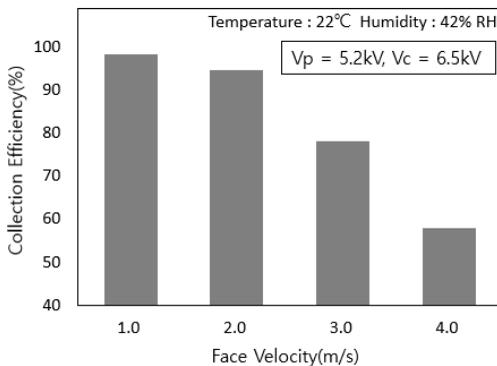


Fig. 7 Dust collection efficiency of the dielectric separator ESP as a function of face velocity

## 5. 결 론

본 연구에서는 공기청정기를 비롯한 대형공조설비에 설치 가능한 유전체분리판 적용 전기집진기의 집진특성을 연구하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

1) 유전체 분리판을 2단 전기집진기의 집진부 전극 사이에 배치하여 전극 간 직류전류가 흐를 수 없도록 격벽을 형성하여 전류흐름을 차단하여, 스파크 방지가 가능하였고, 유전체 구조 내의 전기분극으로 인해 정전기력이 증가하고 집진면적을 증대시켜 집진효율을 상승시키는 효과가 있음을 확인하였다.

2) 0.3  $\mu\text{m}$  크기의 입자에서 유전체 분리판 적용 전기집진기의 집진효율은 유속 1 m/s에서 유전체 분리판 미적용 전기집진기 대비 6.11% 높은 99.70%이었으며, 2 m/s에서는 23.62% 높은 93.59%의 집진효율을 나타내었다.

3) 유전체 분리판 적용 전기집진기의 대전부 인가전압을 6.5 kV에서 7.0 kV로 증가시켰을 때, 면속도 2 m/s 기준, 93.59%에서 97.09%로 집진효율이 증가하였다.

4) 유전체 분리판 적용 전기집진기의 면속도별 PM2.5 집진효율 평가결과, 풍속 4 m/s의 높은 유속에서도 58% 수준 이상의 PM2.5 집진성능을 확인하였다.

본 연구를 통해 개발된 유전체 분리판을 적용한 2단 전기집진기는 설계유속이 2~4 m/s 수준인 다중이용시설의 대형공조설비에 적용 시 최소 58% 이상의 PM2.5 초미세먼지 저감성능을 보일 것으로 기대되며, 일반 HEPA급 필터 대비 낮은 압력손실을 가지고 있어 대형공조설비의 부하 증가를 최소화 하여 기존 설비에 대한 교체 없이 직접 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지기술개발사업의 일환으로 지원받아 수행한 연구과제입니다(과제번호 : 20172010000350).

## Author contributions

S. H. Kim; Writing-original draft. Y. H. Jang & J. Y. Bang; Data curation. G. H. Sim; Formal analysis. M. C. Park; Investigation. J. K. Lee; Funding acquisition. Y. C. Ahn; Writing-review & editing.

## References

1. Government, 2019, Comprehensive Plan of Fine Dust Management, The 3rd Special Measure Committee on Fine dust.
2. I. K. Kim and S. J. Yoa, 2010, "Collection Characteristics of Multi-layer Multi-stage Porous Plate System", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 10-16.
3. S. J. Yoa, 2013, "Dust Collection Characteristics of Multi-layer Multi-stage Porous Plate System with Ionizer and Dielectric-Substance", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 63-72. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2013.17.6.063>)
4. E., Moller, 1920, Art of Separating Suspended Particles from Gases, U.S. Patent No. 1,357,466. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
5. W. A. Schmidt, 1920, "Means for Separating Suspended Matter from Gases", U. S. Patent No. 1,343,285. Washington, DC: U. S. Patent and Trademark Office.
6. G. W. Penney, 1975, "Adhesive Behavior of Dust in Electrostatic Precipitation", *Journal of the Air Pollution Control Association*, Vol. 25, pp. 113-117.
7. M. Okubo, T. Yamamoto, T. Kuroki and H. Fukumoto, 2016, "Electric Air Cleaner Composed of Nonthermal Plasma Reactor and Electrostatic Precipitator", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 37, pp. 1505-1511. (<https://doi.org/10.1109/28.952528>)
8. S. Shi, S. Zhu, E. S. Lee, B. Zhao and Y. Zhu, 2016, "Performance of Wearable Ionization Air Cleaners: Ozone Emission and Particle Removal", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 50, pp. 211-221. (<https://doi.org/10.1080/02786826.2016.1139045>)
9. S. I. Cheong, Y. M. Choi, Y. C. Ahn, J. K. Lee, E. C. Kangk and E. J. Lee, 2006, "A Study on the Electrostatic Precipitation as a Function of Resistivity using Various Indoor Dusts", In *Proceedings of the SAREK Conference*, pp. 448-453.
10. B. Y. Han, Y. J. Kim, H. J. Kim, Y. B. Kim, S. K. Jang and W. S. Lee, 2006, "Characteristics of Ozone Emission and Negative Ion Generation for Indoor Air Cleaners", *Korean Society for Indoor Environment*, Vol. 3, pp. 417-427.
11. B. Y. Han, H. J. Kim, Y. J. Kim, J. S. Jang, and S. H. Lee, 2012, "Collection Efficiency and Air Cleaning Capacity of Two-Stage Electrostatic Precipitator for its Application to Indoor Air Cleaning", *Korean Society for Indoor Environment*, Vol. 9, pp. 285-298.
12. W. C. Hinds, 2012, *Aerosol Technology*, Wiley-Interscience.
13. KS B 6141, 2017, Air Filter Units for Ventilation, Korean Standard.
14. SPS-KACA002-132, 2018, Indoor air cleaner, Korea Air Cleaning Association Standard.