

## 와이어-실린더형 습식 전기집진기의 수막 유무에 따른 집진 특성 비교

우 창 규<sup>1)</sup> · 조 원 기<sup>1),2)</sup> · 김 학 준<sup>1)</sup> · 김 용 진<sup>1)</sup> · 한 방 우<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>한국기계연구원 환경기계연구실

<sup>2)</sup>충남대학교 기계공학과

(2018년 10월 15일 투고, 2018년 11월 1일 수정, 2018년 11월 4일 게재확정)

## Comparison of particle collection characteristics in a wire-cylindrical wet electrostatic precipitator with and without a water film

Chang Gyu Woo<sup>1)</sup> · Won Ki Cho<sup>1),2)</sup> · Hak-Joon Kim<sup>1)</sup> · Yong-Jin Kim<sup>1)</sup> · Bangwoo Han<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>*Department of Environmental Machinery, Korea Institute of Machinery & Materials*

<sup>2)</sup>*Mechanical Engineering, Chungnam National University*

(Received 15 Oct 2018; Revised 1 Nov 2018; Accepted 4 Nov 2018)

### Abstract

People's environmental concerns for fine particles in Korea lead to the strong necessity of improving the performance of environmental control systems. Wet electrostatic precipitators (ESPs) are considered as one of the alternatives to overcome the limit of previous dry ESPs, the re-entrainment of collected particles during rapping and back corona problem for high electrical resistivity dusts etc. In this study, a wire-cylindrical ESP with a thin water film has been developed. Particle collection characteristics were compared in the ESP with operations of water film on and off. Particle collection efficiencies at various applied voltages as well as voltage-current curves were almost the same in the ESP with and without a water film. Particle collection performance for PM1.0, PM2.5 and PM10 in the wet ESP with a water film was constantly maintained with operation time even in the high dust loading environment. This results indicate that a uniform water film in our wet ESP was successfully formed with a very thin layer without any dry spot and therefore could continuously clean the collected particles on the inner wall of the ESP without any performance degradation.

**Keywords:** fine particles, collection, coating, water-film, cleaning

---

\* Corresponding author.

Tel : +82-42-868-7068, Fax : +82-42-868-7284

E-mail : [bhan@kimm.re.kr](mailto:bhan@kimm.re.kr)

## 1. 서론

최근 미세먼지 주의보, 경보와 같은 한반도의 고농도 미세먼지 발생이 빈번함에 따라 국민들의 건강에 대한 우려가 증가하고 있다. 미세먼지는 크기가 작아 기관지와 폐까지 쉽게 도달할 수가 있어 세계보건기구(WHO)에서는 1군 발암물질로 지정하고 있다(Hamra et al., 2014). 미세먼지는 주로 화석연료를 연소시키는 과정에서 발생하는데 화력발전소, 제철소, 소각장과 디젤 자동차, 선박 등이 주된 발생원으로 알려져 있다. 특히 화력발전소의 경우 개수는 많지 않지만 배출 규모가 산업 시설 중 가장 크기 때문에 미세먼지 발생의 핵심 원인으로 인식되고 있다. 이러한 배경에서 최근 발전사들은 미세먼지 배출 저감을 목적으로 환경설비들에 대해 대대적인 성능개선을 진행하고 있거나 진행을 준비하고 있다. 질소산화물(NOx) 배출 저감을 위해서 선택적촉매환원장치(selective catalytic reduction; SCR)의 촉매층을 2단에서 3단으로 증설하고, 황산화물(SOx) 저감을 위해서 배연탈황장치(flue gas desulfurization; FGD)의 미스트 제거장치를 개선하거나 열교환기를 회전형에서 비누설형(non-leakage gas-gas heater)으로 전환시키는 사업을 추진하고 있으며, 미세먼지 제거 성능을 높이기 위해 기존의 전기집진기(electrostatic precipitator, ESP)의 최종단을 이동 전극형 집진기(Zhao et al., 2018)로 바꾸거나 탈황장치 최종단에 습식 전기집진기(Sui et al., 2016)의 설치를 고려하고 있다. 기존의 건식 전기집진기는 분진 비저항이 높은 먼지가 포집되었을 때 분진에 쌓인 전하가 포화되어 역코로나 현상(Wiggers, 2007)이 발생할 수 있고 집진판 세정을 위한 추타 과정 중에 포집된 먼지가 배기 gas와 함께 집진기 출구로 배출되는 재비산(Ferge et al., 2004) 문제가 발생하여 먼지 배출 농도를 수  $\text{mg}/\text{m}^3$  이하로 관리하기가 어려운 문제가 있다.

한편 습식 전기집진기는 집진판에 간헐적 또는 연속적으로 물을 분무하여 집진판에 포집된 먼지를 물과 함께 중력으로 씻어내는 전기집진기로서 집진할 때 분진 비저항에 의한 역코로나 현상을 억제할 수 있고 세정 시 추타 과정이 필요 없으므로 먼지의 재비산을 억제할 수 있어 건식 전기집진기보다 미세먼지 집진효율을 향상시킬 수 있다. 또한 습식 전

기집진기는 미세먼지 뿐만 아니라 수은(Huang et al., 2018)이나 응축성 미세먼지(Yang et al., 2017)도 일부 처리할 수도 있어 미국, 중국 등에서는 환경 규제 강화에 따른 대응 방안으로 우선적으로 고려되고 있다. 대부분의 습식 전기집진기는 집진판 상단에 위치한 분무 노즐을 통해 간헐적으로 물을 분무시키는 방식을 적용하고 있었으나 최근 들어 집진판 표면을 친수화시킨 뒤 얇은 수막을 형성시켜 연속적으로 물을 공급하는 수막형 습식 전기집진기의 개발이 활발해지고 있다(Lin et al., 2010; Kim et al., 2011; Wang and You, 2013). 하지만 습식 전기집진기의 집진판에 균일하게 수막을 형성시키지 못할 경우 건반(dry spot) 영역이 발생하여 분진이 쌓이게 되면 더 이상 원활한 세정이 이루어지지 않아 문제가 될 수 있다. 따라서 수막형 습식 전기집진기는 집진판 표면에 균일하게 수막을 형성시키고 건반이 발생하지 않도록 유지하는 것이 매우 중요하다. 평판형 전기집진기의 경우 평판 표면 수막의 균일한 상태를 쉽게 확인할 수 있으나 원통형 전기집진기의 경우 원통 내부 집진판의 수막 형성 상태를 쉽게 파악하기가 어려운 문제가 있다.

본 연구에서는 와이어-실린더 구조의 수막형 습식 전기집진기를 개발하였다. 특히 원통 내부 집진판에 수막이 균일하게 잘 형성되었는지를 확인하기 위해 수막 유무에 따른 전압-전류 특성과 인가전압별 집진효율을 비교해 보았다. 또한 분진이 지속적으로 쌓일 때 수막 유무에 따른 집진 성능 변화를 관찰하여 수막형 전기집진기의 분진 부하에 따른 집진 성능 유지 여부를 살펴보았다.

## 2. 실험장치

그림 1은 본 실험의 장치 구성도를 나타내고 있다. 본 연구에 사용된 전기집진기는 직경 100 mm, 길이 1200 mm의 와이어-실린더형 반응기로 구성되었다. 방전 전극으로는 직경 0.5 mm의 텅스텐 와이어를 사용하였다. 집진판의 친수화를 위해 전기집진기 내벽은 입경 15 nm 크기의  $\text{TiO}_2$  나노입자 수용액을 분무장치를 이용하여 균일하게 코팅하였고 코팅과 건조 과정을 3회 반복해서 진행하였다. 전기집진기 내벽 상단에는 지속적으로 물을 공급할 수 있

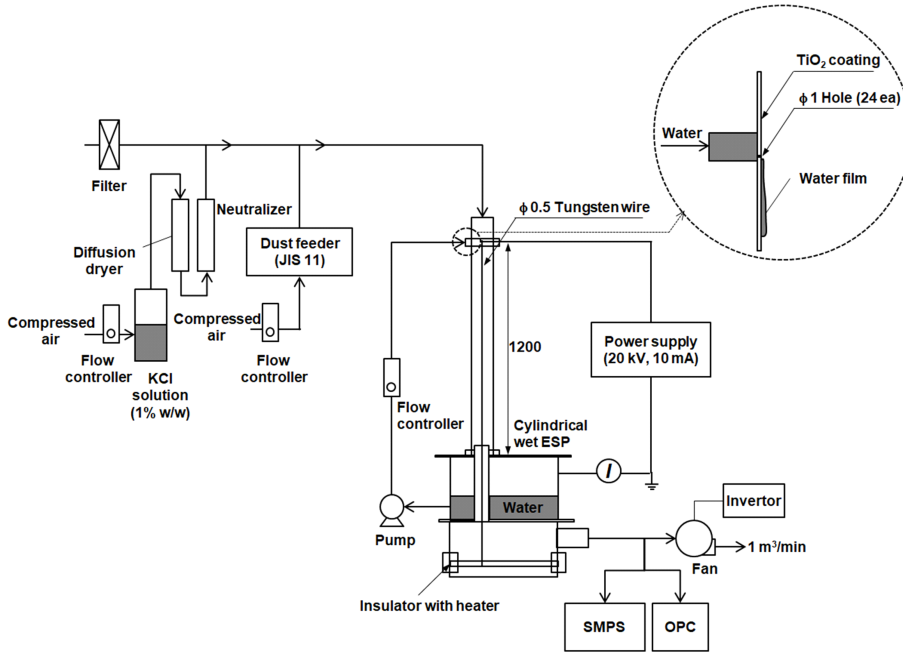


Fig. 1. Experimental setup in this work

도록 직경 1 mm의 24개의 작은 구멍을 설치하였다. 전기집진기 하단에는 물과 배기가스를 분리하기 위해 전기집진기 내경보다 작은 직경 90 mm의 관을 내부에 삽입하여 수막의 물은 상단부의 수조로 떨어지고 배기가스는 내부 관을 통해 하단부의 배기 관으로 배출되도록 구성하였다. 하단부의 와이어 고정부는 수분으로 인한 절연 파괴 문제를 해결하기 위해 전기 히터로 국부적으로 가열하여 수분의 응축을 억제할 수 있도록 하였다. 순환펌프와 유량계로 균일 수막용 물 공급량을 제어할 수 있도록 하였고 본 연구에서는 약 2.7 L/min/m<sup>2</sup>의 유량으로 고정하여 공급하도록 하였다. 이는 기존의 습식 전기집진기의 물 공급량인 2.3 L/min/m<sup>2</sup>과 거의 유사한 수준이다(Lin et al., 2010). 고전압 전원공급장치로는 음극(-)의 20 kV, 10 mA 용량을 갖는 직류 고전압 전원장치(Korea Switching)를 사용하였다. 전압과 전류는 2대의 멀티미터(Model 107, Fluke)를 각각 병렬과 직렬로 연결하여 측정하였고, 전압 측정에는 고전압 측정용을 위해 1000:1 고전압 프로브(P6015A, Tektronix)를 연결하여 사용하였다. 시험입자로는

KCl 수용액 1% (w/w)를 아토마이저(atomizer; Model 3076, TSI)를 이용하여 분무시켜 발생시킨 뒤 확산 건조기(diffusion dryer)와 Kr-85 중화기(neutralizer)를 통과시켜 수분과 정전기를 제거하도록 하였다. 분진 부하(dust loading) 조건을 모사하기 위해서 JIS 11 분진을 이젝터 방식의 분진공급장치를 이용하여 1 회당 17 g씩 반복적으로 주입하였다. 전기집진기 후단에서는 인가전압에 따른 시험입자의 크기분포 변화 측정을 위해 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS; Model 3936, TSI)를 사용하였고 분진 부하 조건에서 PM1.0, PM2.5, PM10의 변화 측정을 위해 Optical Particle Counter (OPC; Model 1.109, GRIMM)을 사용하였다.

### 3. 실험결과

그림 2는 개발된 원통형 습식 전기집진기의 수막 유무에 따른 전압-전류 특성을 보여주고 있다. 수막 유무에 상관없이 방전 전류가 생성되기 시작하는

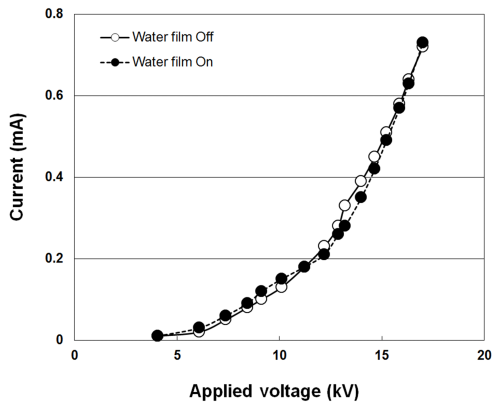


Fig. 2. Voltage-current curve of the wet-ESP with water film on and off

개시전압이 약 5 kV 정도로 비슷하였고, 방전전류도 10 kV 인가 시 약 0.13-0.15 mA, 15 kV 인가 시 약 0.42-0.45 mA, 17 kV 인가 시 약 0.73 mA를 나타내어 비슷한 특성을 보여주었다. 즉 수막 유무에 상관없이 전압-전류 특성 곡선이 거의 유사한 특성을 나타내었는데 이는 원통 내부 집진판에 수막이 매우 얇게 형성되어 전극 사이의 간격에 영향을 거의 주지 않음으로써 와이어-실린더 내부에 형성되는 전기장의 세기에도 큰 차이가 없다는 것을 의미한다. 즉 얇은 수막을 형성시킨 습식 전기집진기의 전기적 특성이 수막을 형성시키지 않은 건식 전기집진기와 거의 유사한 특성을 나타내는 것을 보여준다.

그림 3(a)는 1 m<sup>3</sup>/min의 유량으로 고정시키고 KCl 시험입자를 주입한 뒤 습식 전기집진기의 수막 유무에 따른 인가전압별 크기분포 변화를 보여주고 있다. 그림 3(a)에서 0 kV는 전기집진기에 전압을 인가하지 않았을 때의 KCl의 초기 크기분포를 의미한다. 0 kV에서 수막 유무에 따른 크기분포 차이가 거의 없었고 이는 KCl 시험입자가 본 실험을 진행하는 동안 매우 균일하게 발생하고 있음을 보여주고 있다. KCl 시험입자의 초기 크기분포는 평균 직경이 기하평균 기준으로 약 102.6 nm이었고, 기하표준편차는 약 2.0, 총 입자개수는 약 2.8-3.0 × 10<sup>5</sup> 개/cm<sup>3</sup>를 나타내었다. 전기집진기에 인가하는 전압을 높일수록 평균 직경이 조금씩 증가하여 14 kV에서 약 113 nm, 16 kV에서 약 121 nm, 18.2 kV에서 약 122 nm를 나타내었고, 수농도가 전체적으로 감소하여

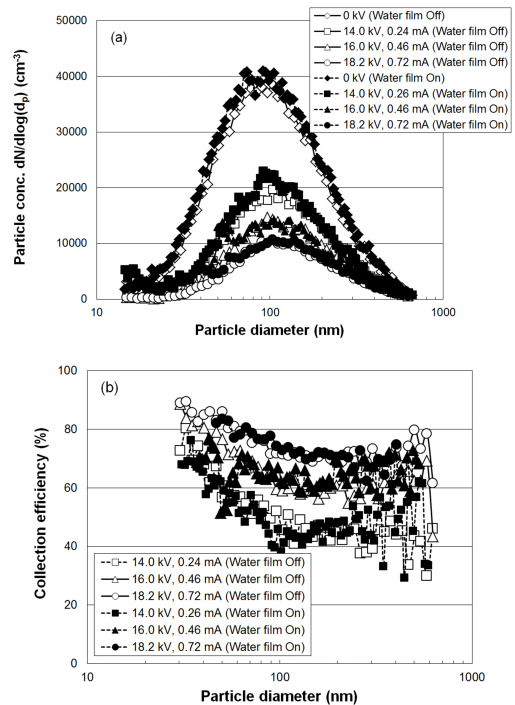


Fig. 3. (a) Size distributions and (b) collection efficiencies of the particles in the wet ESP with water film on and off at different applied voltages

14 kV에서 1.3-1.4 × 10<sup>5</sup> 개/cm<sup>3</sup>, 16 kV에서 약 1.0 × 10<sup>5</sup> 개/cm<sup>3</sup>, 18.2 kV에서 약 7.1 × 10<sup>4</sup> 개/cm<sup>3</sup>를 나타내었다. 그림 3(b)는 수막 유무에 따른 인가전압별 집진효율을 보여주고 있다. 여기에서 전기집진기의 집진효율( $\eta$ )은 다음의 식으로 산출하였다.

$$\eta = \left\{ 1 - \left( \frac{N_o}{N_i} \right) \right\} \times 100 \quad (1)$$

여기서,  $N_i$ 와  $N_o$ 는 각각 전기집진기에 전압을 인가하지 않았을 때와 인가했을 때의 입자 크기별 수농도를 의미한다. 인가전압이 높아질수록 전체적으로 집진효율이 향상되었고 특히 100 nm 이하에서는 입경이 작을수록 집진효율이 높아지고 300 nm 이상에서는 입경이 클수록 집진효율이 높아지는 전형적인 U자형의 집진효율(Huang and Chen, 2002)을 나타내었다. 이는 100 nm 이하 영역에서는 확산하전(diffusion charging)의 지배를 받아 입자하전수가 입

경에 비례하여 증가하지만 입자의 이동을 방해하는 항력 또한 입경에 비례하여 증가하고 미끄럼보정계수(Slip correction factor)까지 고려되어 입자가 커질수록 항력이 입자하전수 보다 더 빨리 증가함으로써 이동속도(migration velocity)가 감소하지만, 100 nm 이상의 영역에서는 전계하전(field charging)의 지배를 받아 입자 하전수가 입경의 제곱에 비례하여 항력 보다 더 빨리 증가하기 때문이다(Hinds, 1999). 수막 유무에 따른 인가전압별 크기분포가 유사하였으므로 인가전압별 집진효율도 수막 유무에 관계없이 거의 유사하게 나타났다. 즉 앞에서 언급한 것과 같이 수막 유무에 따른 전압-전류 특성 차이가 거의 없었으므로 수막 유무에 따른 인가전압별 크기분포나 집진효율 차이도 거의 없는 것으로 나타났다.

그림 4는 1 m<sup>3</sup>/min의 유량 조건에서 50, 80, 120 및 300 nm 크기의 입자에 대해 수막 유무별 소비전력에 따른 집진효율 변화를 나타내고 있다. 각각의 입자 크기와 관계없이 Deutsch-Anderson식에서와 같이 소비전력이 증가할수록 전기집진기의 집진효율이 증가하는 특성을 나타내었다. 소비전력이 일정할 때 50 nm에서 가장 높은 집진효율을 나타내었고 80 nm에서 그 다음 높은 집진효율을 나타내었으며 120 nm와 300 nm는 거의 비슷한 집진효율을 나타내었다. 이는 그림 3(b)에서 볼 수 있듯이 120 nm와 300 nm 크기 영역이 U자 형태 집진효율의 가장 낮은 영역대에 같이 존재하기 때문이다. 또한 단위 유량 당

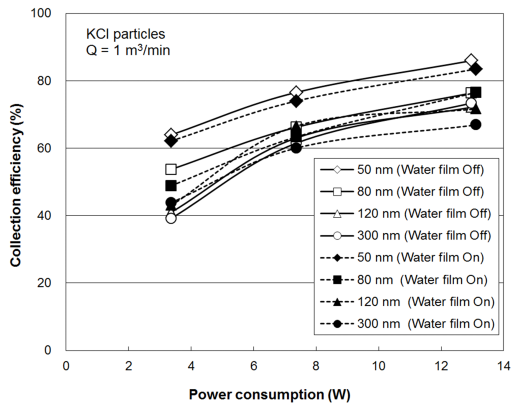


Fig. 4. Collection efficiencies of the particles with various sizes in the wet ESP with water film on and off at different power consumption

소비전력으로 살펴보면 약 3.5 W/(m<sup>3</sup>/min)에서 최소 40% 이상, 약 7.5 W/(m<sup>3</sup>/min)에서 최소 60% 이상, 약 13 W/(m<sup>3</sup>/min)에서 최소 70% 이상의 집진효율을 얻을 수 있었다. 앞의 결과와 마찬가지로 수막 유무에 따른 소비전력별 집진효율의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

그림 5(a)는 수막이 없을 때 18 kV를 인가한 건식 전기집진기로 JIS 11 분진을 지속적으로 투입했을 때 시간에 따른 PM1.0, PM2.5 및 PM10의 집진효율 변화를 나타내고 있다. 분진을 과도하게 주입했기 때문에 시간이 지날수록 집진효율이 지속적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 건식 전기집진기의 경우 집진판을 주기적으로 청소해주지 않을 경우 집진판 내부의 전기장의 세기 감소로 집진성능이 쉽게 저하될 수 있음을 보여준다. 특히 PM1.0의 작은 입자 영역대에서 시간에 따른 성능 저하가 더 큰

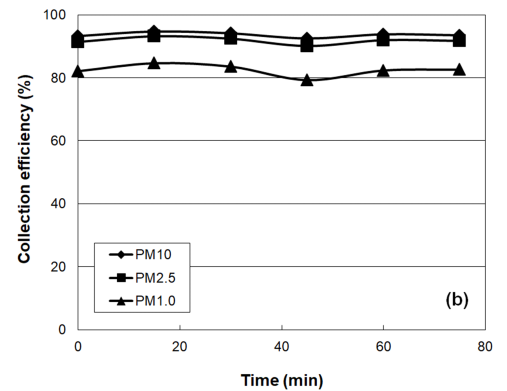
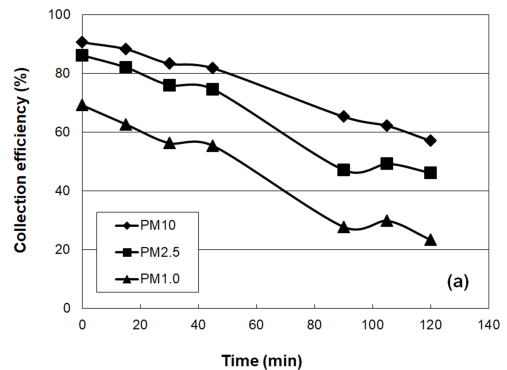


Fig. 5. (a) Change of collection efficiencies of PM1.0, PM2.5 and PM10 in the wet ESP with water film (a) off and (b) on with time during JIS 11 powder loading

것으로 나타났다. 한편 그림 5(b)는 수막을 형성시킨 동일한 인가전압의 습식 전기집진기에서 JIS 11 분진을 계속 투입했을 때의 시간에 따른 PM1.0, PM2.5 및 PM10의 집진효율 변화를 보여주고 있다. 과도한 분진 부하 조건임에도 불구하고 시간이 경과하더라도 PM1.0, PM2.5 및 PM10의 집진효율이 지속적으로 유지되는 것을 알 수 있다. 이는 수막이 원통 내부의 집진판에 균일하게 잘 형성되어 분진이 집진판에 포집되더라도 수막과 함께 중력으로 아래의 수조로 이동함으로써 항상 초기 상태의 전기장의 세기를 잘 유지하고 있음을 보여준다. 즉 수막형 습식 전기집진기는 균일하게 수막을 형성시킬 경우 지속적으로 집진과 세정을 동시에 진행하므로 포집된 먼지에 의한 집진효율 성능 저하 문제나 비저항이 높은 먼지의 재비산 문제를 극복할 수 있어 초기 성능을 지속적으로 유지할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 원통형 수막형 습식 전기집진기를 개발하여 수막 유무에 따른 전기방전 특성과 전기 집진효율을 비교해 보았다. 습식 전기집진기는 물을 사용하기 때문에 집진기 내부의 전기 특성 변화를 쉽게 일으킬 수 있다. 본 연구에서는 원통형 집진판 내벽으로 얇은 균일 수막을 형성하여 전극 간격에 큰 영향을 주지 않게 하였고 수막이 없는 건식 전기 집진기와 인가전압별 집진효율을 거의 유사하게 유지할 수 있었다. 한편 본 연구의 수막형 전기집진기는 포집된 먼지를 지속적으로 물과 함께 세정시킬 수 있어 고농도의 분진이 투여되는 조건에서도 초기의 집진 성능을 지속적으로 유지할 수 있었다. 이러한 결과로부터 개발된 수막형 습식 전기집진기는 건반(dry spot) 없이 얇은 수막을 균일하게 형성시키고 전기적 이상 없이 안정적으로 운전이 가능함을 확인할 수 있었다. 향후 습식 전기집진기는 건식 전기집진기의 분진 재비산 문제를 극복하고 강화되는 미세먼지 규제에 대응할 수 있는 차세대 환경설비로 더욱 각광받을 수 있을 것으로 예상된다.

#### 감사의 글

이 연구는 환경부 환경산업선진화기술개발사업의 지원을 받아 수행되었고 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Ferge, T., Maguhn, J., Felber, H., and Zimmermann, R. (2004). Particle collection efficiency and particle re-entrainment of an electrostatic precipitator in a sewage sludge incineration plant, *Environmental Science and Technology* 38(5), 1545-1553.
- Hamra, G. B., Guha, N., Cohen, A., Laden, F., Raaschou-Nielsen, O., Samet, J. M., Vineis, P., Forastiere, F., Saldiva, P., Yorifuji, T., and Loomis, D. (2014). Outdoor particulate matter exposure and lung cancer: A systematic review and meta-analysis, *Environmental Health Perspectives*, 122(9), 906-911.
- Hinds, W. C. (1999). *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 2nd Ed., New York, John Wiley & Sons, Inc.
- Huang, S.-H, and Chen, C.-C. (2002). Ultrafine aerosol penetration through electrostatic precipitators, *Environmental Science and Technology*, 36(21), 4625-4632.
- Huang, Y., Yin, Z., Chen, Y., and Guo X. (2018). Experimental study on gaseous elemental mercury removal by wet electrostatic precipitators, *Fuel*, 234, 1337-1345.
- 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 & Waste Management Association*, 61(12), 1334-1343.
- 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, 38-45.

- Sui, Z., Zhang, Y., Peng, Y., Norris, P., Cao, Y., and Pan, W.-P. (2016). Fine particulate matter emission and size distribution characteristics in an ultra-low emission power plant, *Fuel*, 185, 863-871.
- Wang, X., and You, C. (2013). Effects of thermophoresis, vapor, and water film on particle removal of electrostatic precipitator, *Journal of Aerosol Science*, 63, 1-9.
- Wiggers, H. (2007). Measurement of dust resistivity. Back corona in electrostatic precipitators, *VGB PowerTech*, 87(3), 93-96.
- Yang, Z., Zheng, C., Zhang, X., Li, C., Wang, Y., Weng, W., and Gao, X. (2017). Sulfuric acid aerosol formation and collection by corona discharge in a wet electrostatic precipitator, *Energy Fuels*, 31(8), 8400-8406.
- Zhao, H., He, Y., and Yao Y. (2018). Study on brush of moving electrode type electrostatic precipitator (MEEP), *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 121, 052024.