

정전분무 방전극을 이용한 습식 전기집진장치의 미세먼지 집진효율 평가

Evaluation of Particle Collection Efficiency in a Wet Electrostatic Precipitator Using an Electro sprayed Discharge Electrode

김 흥 직 · 김 종 현¹⁾ · 김 종 호*

한서대학교 환경공학과, ¹⁾국립환경과학원 대기공학연구과

(2015년 9월 30일 접수, 2015년 10월 29일 수정, 2015년 11월 30일 채택)

Hong-Jik Kim, Jong-Hyeon Kim¹⁾ and Jong-Ho Kim*

Department of Environmental Engineering, Hanseo University

¹⁾Air Pollution Engineering Division, National Institute of Environmental Research

(Received 30 September 2015, revised 29 October 2015, accepted 30 November 2015)

Abstract

The wet electrostatic precipitator (wet ESP) is an effective control device which removes submicron particles re-entrained in a collection plate and water soluble gas. However, its collection efficiency decreases, as its operation is subject to water-induced distortion of the collection electrode. In order to make up for the limitation, we modified the wet ESP system by installing electro sprayed discharge electrodes. The modified wet ESP system can wash both the collection plate and discharge electrode.

As a result, we were able to fabricate a compact wet ESP with a small specific collecting area ($0.18 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{min})$) that can accomplish a high collection efficiency of fine particles (97.1%). In addition, the device obtained a relatively low specific corona power of approximately $10 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{min})$.

Key words : Fine particle, Wet ESP, Electro sprayed discharge electrode, Specific collecting area, Specific corona power

1. 서 론

화력발전, 폐기물 소각, 반도체 제조 등과 같은 연소 및 생산 공정에서 배출되는 대기오염물질 중 먼지는 그 크기가 작은 미세먼지 ($\text{PM}_{2.5}$) 형태로 배출된다 (Jin

et al., 2012; Ehrlich *et al.*, 2007), 미세먼지는 크기가 매우 작고, 무게도 가벼워서 대기중에서는 중력 침강 보다는 강우에 의한 세정 (Rain out과 Wash out) 효과에 의해 제거되는데 그 제거율은 낮은 것으로 알려져 있다 (Hinds, 1999).

미세먼지는 호흡을 통해 인체의 폐 속 깊숙이 유입 되어 심각한 호흡기 질환을 일으킬 수 있으며, 중금속 이나 다환방향족탄화수소 (PAHs)와 같은 유해 대기오

*Corresponding author.

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

염물질(Hazardous Air Pollutants)을 포함한 경우에는 더 큰 악영향을 미칠 수도 있다(Seo *et al.*, 2014; Oravisjarvi *et al.*, 2014; Chayasak, 2011; Chow *et al.*, 2010; Pacyna, 2010; Kim *et al.*, 2008). 또한 대기환경 중에서는 가시광선을 산란·흡수하여 시정거리의 감소를 일으킬 수 있고, 구름의 응결핵으로 작용하여 기상이변을 야기할 수도 있으며, 다른 대기오염물질들이 반응할 수 있는 매개체 역할도 한다(Hobbs *et al.*, 1993).

우리나라의 대기환경기준 항목 중 먼지에 관련한 것은 총부유먼지(Total Suspended Particulate, TSP)으로 그 기준치는 1983년에 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (연평균)으로 설정되었고, 1995년에 PM_{10} 이 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (연평균)으로 설정되었다. 2015년에는 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 기준치가 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (연평균)으로 설정되어 관리되고 있다. 이러한 대기환경기준을 달성하기 위하여, 배출원의 규제인 배출허용기준도 점차적으로 강화되고 있다. 예를 들어 고체연료를 사용하는 발전시설의 경우에 그 용량에 따라 차이는 있으나, 2004년 $50(6) \text{mg}/\text{Sm}^3$ 이었던 것이 2005년~2014년 $30(6) \text{mg}/\text{Sm}^3$, 2015년 이후에는 $20(6) \text{mg}/\text{Sm}^3$ 로 강화되었다(Kim *et al.*, 2014a). 따라서 점점 강화되는 배출허용기준을 준수하기 위해 기존 집진장치를 개보수하여 효율을 최대한 높이거나(Best Available Retrofit Technology, BART) 보다 높은 효율의 새로운 집진장치들로 교체하는 등의 대기오염물질 배출을 저감하기 위한 노력들이 절실히 필요하다.

먼지를 고효율로 처리하는 장치로는 여과집진기와 전기집진기, 혹은 하이브리드집진기 등이 사용되고 있으며, 이 중 전기집진기는 고용량에서도 적은 압력손실로 운영할 수 있는 경제적인 장치이다. 그러나 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 범위의 먼지들은 적은 하전량과 재비산(Re-entrainment) 등의 문제로 집진효율이 상대적으로 낮아서 이를 해결하기 위한 전치하전(Pre-charging), 펄스 코로나 하전(Pulse-corona discharging) 등의 여러 연구가 진행되고 있다(Sung *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2012; Carotenuto *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2010; Bologna, 2009; Jaworek *et al.*, 2007).

전기집진의 집진기작은 일반적으로 3단계로 구분하는데 먼지의 하전, 먼지의 집진극 부착, 집진극에 부착된 먼지의 탈착 등이다. 집진극에 쌓인 먼지는 기계적

인 두드림(Mechanical rapping)으로 털어내는데, 이 과정에서 먼지의 전기적 특성인 전기비저항(Particle's resistivity)에 따라 재비산, 역코로나(Back corona) 등이 발생하여 집진효율이 떨어지는 문제가 발생하기도 한다. 이를 해결하기 위해 집진극에 부착된 먼지를 물로 씻어내는 습식전기집진기(Wet electrostatic precipitator)가 개발되었으며, 이것은 이산화황(SO_2), 염화수소(HCl), 암모니아(NH_3)와 같이 물에 잘 용해되는 가스상 오염물질도 제거할 수 있는 장점이 있다(Carotenuto *et al.*, 2010; Jaworek *et al.*, 2006; Altman *et al.*, 2001). 이러한 습식 전기집진기에 대한 최근 연구는 집진극에 물을 수막의 형태로 흐르게 하여 건조지역이 생기지 않도록 하는 것과 부식문제를 해결하기 위해 집진기의 재질을 PVC로 제작하고 세정수인 물을 집진극의 역할을 하게 하는 것 등이다(Wang and You, 2013; Kim *et al.*, 2012; Saiyasitpanich *et al.*, 2007).

또한 습식 집진기에 정전분부(Electrospray)를 적용하는 연구들이 진행되고 있는데, 정전분무란 전도성 액체가 통과하는 노즐(Nozzle)에 고전압을 인가하면 미세한 액적(Droplet)이 형성되어 분무되는 현상이다. 노즐과 액체에 고전압이 인가되면 액체 속의 이온들이 척력과 인력에 의해 액체표면으로 이동하게 된다. 액체표면에 작용하는 전기력과 양이온들의 반발력이 액체의 표면장력보다 커져서 노즐 끝에서 표면전단응력(Surface tangential stress)을 받아 실과 같이 매우 가는 액체줄기(Liquid ligament)가 형성된다. 액체줄기 끝과 액체줄기 표면에 작용하는 표면전단응력의 교란에 의해 액체줄기가 끊어지면서 미세한 액적들이 형성된다(Bailey, 1998; Michelson, 1990).

이러한 정전분부의 응용은 연료분무, 정전도장 및 박막코팅, 물질의 분자질량 분석, 농약살포 등 다양한 분야에서 활발하게 진행되고 있는데(Verdoold *et al.*, 2014; Oliver, 2004), 대기오염 방지분야에서는 아직 초기 연구단계로 하전액적 스크리버, 전기집진기 전단의 전치하전 등 몇 개의 연구가 있을 뿐이다(Carotenuto *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2010; Jaworek *et al.*, 2007).

본 연구에서는 정전분무를 응용한 방전극을 제작하고 전기집진장치에 설치하여 정전분부 액적으로 집진극을 세척하는 또 다른 형태의 습식 전기집진기를 개발하고 그 성능을 평가하였다.

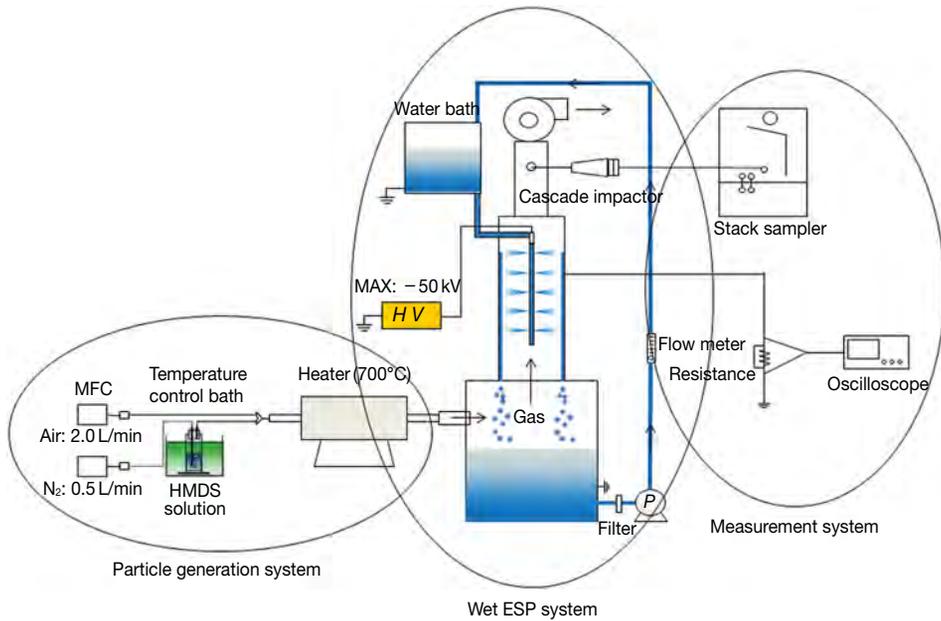


Fig. 1. Experimental setup to measure the collection efficiency of the wet ESP system.

2. 연구 방법

2.1 실험장치의 구성

본 연구를 위하여 그림 1과 같이 실험실 규모의 청정풍동에 습식 전기집진 시스템을 제작하였다. 본 실험은 전기집진기 내에서 재비산할 수 있는 입자의 농도가 중요하기 때문에 실험장치의 내부를 청정상태로 유지하기 위해 공기 유입부에 HEPA filter를 설치하였다. 그리고 실험용 먼지의 발생장치, 습식 전기집진장치, 측정장치로 구성하였다.

습식 전기집진장치는 그림 2와 같이 원통형태(Cylindrical type)로 내경 110 mm, 길이 300 mm, 아크릴 재질의 원통 내부에 알루미늄 테이프로 마감하여 집진판의 역할을 하도록 제작하였다. 정전분무 방전극(Electro-sprayed discharge electrode)은 구리 재질로 외경 3 mm, 내경 1.6 mm, 두께 0.7 mm, 길이 300 mm의 튜브(tube) 형태이다. 이 구리 튜브에 40 mm 간격마다 4방향으로 28개의 노즐을 뚫었는데, 이는 튜브에 물이 통과되면서 분무될 때 겹치는 부분이 적으면서 집진극에 물이 골고루 분사되는 것과 집진극도 세정되는 효과를 고려하였다. 노즐의 크기는 직경 0.25 mm와 0.5 mm 크기로 2개의 정전분무 방전극을 제작하였다.

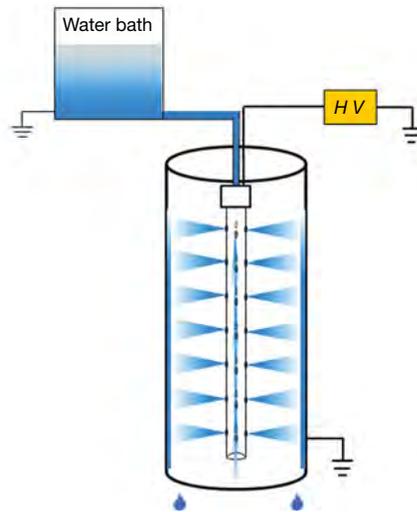


Fig. 2. Schematic diagram of the wet ESP with electro-sprayed discharge electrode.

실험에 사용한 물은 수돗물로 전기전도도가 220~230 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (17.5°C)이며, 정전분무 방전극에 인가하는 고전압은 그림 2와 같이 직접하전 방식이며, 고전압 인가장치(HMP2500-50K-50mA-SR, zipao, Korea)는 고전압을 최대 -50 kV까지 인가할 수 있다.

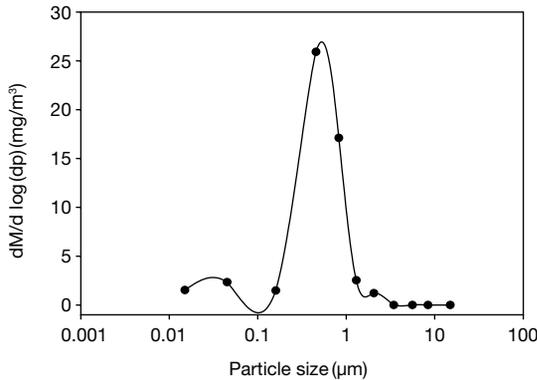


Fig. 3. Size distribution of test particles.

실험용 입자는 Hexamethyldisilazane ((CH₃)₃SiNHSi (CH₃)₃) 이하 HMDS 용액을 전구물질로 사용하였는데, 항온수조 (30°C)에 HMDS 용액이 담긴 임핀저를 넣고 질소가스를 0.5 L/min로 공급하여 HMDS 증기를 발생시켰다. 발생한 HMDS 증기를 공기 (2 L/min)와 함께 전기로 (700°C)에 통과시켜 입자를 발생하였는데, 증기 상태로 전기로에 들어간 HMDS는 산화과정을 거쳐서 SiO₂, SiO₄ 등 안정한 산화물이 형성된다.

먼지 발생장치에서 발생시킨 실험용 먼지의 평균농도는 21.5 mg/m³ (n=10)이었으며, 편차는 1.41 mg/m³이다. 또한 발생시킨 먼지의 입경분포는 그림 3과 같이 발생되는 먼지의 대부분이 0.1~1 µm 영역이며, 이러한 범위의 먼지는 전기집진기에서 낮은 집진효율을 나타내고 있는 크기와 유사하다. 따라서 본 연구의 목적에 적합한 먼지라고 판단된다.

먼지의 측정은 전기집진장치를 통과하여 유체가 안정되는 지점에서 측정하였으며, 먼지의 크기별 농도를 파악하기 위해 In-stack cascade impactor (DLPI, Dekati, Finland)를 사용하였다. 집진효율은 다음의 식으로 계산하였다.

$$\text{Collection efficiency} = (\text{Mass concentration at wet ESP off} - \text{Mass concentration at wet ESP on}) / (\text{Mass concentration at wet ESP off}) \times 100$$

사용한 여지는 직경 25 mm, PTFE-T 재질이며, 여지는 110°C에서 3시간 건조시킨 후 사용하였고 먼지 채취 전후 3시간 이상 항온, 항습상태의 데시케이터에서 보관하였으며, 여지 무게는 10⁻⁵ g까지 측정할 수 있는

Table 1. Basic parameters in the ESP system with electro-sprayed discharge electrode in this study.

Parameter	This study	Typical values
Gas velocity (m/sec)	1.0	0.6~1.8
Temperature (°C)	20~25	100~250
Electrical field strength (kV/cm)	-2.5~-5.0	~-7.0
Specific collecting area (m ² /(m ³ /min))	0.18	0.25~2.1
Specific corona power (W/(m ³ /min))	~35	1.75~17.5

전자저울 (Auw220d, Shimadzu, Japan)로 측정하였다. 전기집진장치의 전기적 특성은 오실로스코프 (TDS 2014B, Tektronix, USA)와 Probe (P2220, Tektronix, USA)로 파악하였다. 집진극에 연결된 접지선에 10kΩ의 저항을 연결하여 저항 양쪽단의 전압을 측정하였으며, 3회 측정된 전압 값의 평균을 이용하여 전류값 및 전력량을 계산하였다.

집진기 내 유속은 열선풍속계 (TSI, 9515, USA)로 측정하였다.

2.2 실험 방법

본 연구의 목적은 새로운 형태의 정전분무 방전극을 제작하고 전기집진장치에 설치하여 전기적 특성과 집진효율을 측정하여 그 성능을 평가하는 것으로, 기존의 전기집진기와 비교하는 것이 필요하다. 따라서 정전분무 방전극에 물을 공급할 경우 (습식상태)와 공급하지 않을 경우 (건식상태)에 대해서 전기적 특성과 집진효율을 측정하였다.

방전극에 인가하는 전압은 -13.75~-27.50 kV로 변화시켰으며, 이를 전기장 강도 (Electrical field strength)로 환산하면 -2.5~-5.0 kV/cm이다. 집진기 내 가스의 유속은 1 m/sec이며, 이를 실험용 전기집진장치의 조건에서 유량으로 계산하면 0.57 m³/min이다. 표 1은 본 실험의 전기집진장치 운전요소 값을 일반적인 전기집진기의 값과 비교하여 나타낸 것이다 (Kim *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2010; Cooper and Alley, 2002).

3. 결과 및 고찰

3.1 전류-전압 특성

본 연구의 실험용 전기집진기에 대한 전류-전압특성을 그림 4에 나타내었다. 방전극에 물을 공급하지 않는

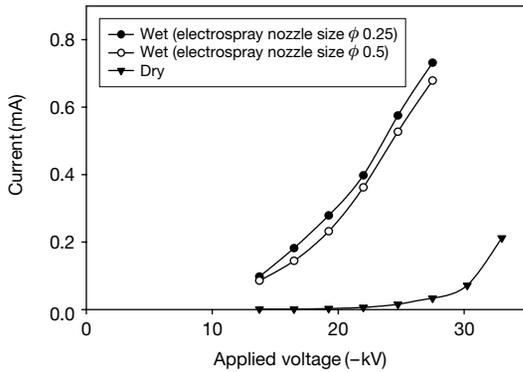


Fig. 4. Voltage-current characteristics in the ESP.

건식의 경우에 인가전압 -20 kV부터 코로나 방전이 발생하기 시작하였으며, 인가전압이 증가할수록 전류량도 증가하였다. 정전분무 방전극에 물을 공급한 정전분무(습식)의 경우도 인가전압이 증가하면 방전전류도 증가하는데, 건식의 경우보다 훨씬 더 급격한 전류의 증가를 나타내었다. 물의 표면장력은 0.072 N/m (20°C)로 비교적 높아서 정전분무가 발생할 때에는 높은 고전압이 필요하며, 이는 높은 전류를 흐르게 할 수도 있다 (Kim *et al.*, 2014b). Spark over 현상은 정전분무 방전극에 물을 공급하지 않는 경우(건식)에 -38 kV, 물을 공급하는 경우(습식)에는 -30 kV에서 관찰되었다.

또한 정전분무 방전극에서 물의 분무량은 노즐 직경이 0.5 mm일 때 400 mL/min, 0.25 mm일 때 200 mL/min로 측정되었는데, 인가전압의 변화에 따라 분무량은 변하지 않았다. 방전전류량은 물의 분무량이 많을 때 보다 적을 경우에 좀 더 많이 흐르는 것으로 관찰되었다. Wang and You (2013)의 연구에서 코로나 방전전류는 가스의 상대습도에 큰 영향을 받는다고 보고하고 있는데, 이것은 가스 중에 수분이 많으면 이온 이동도 (Ion mobility)가 감소되기 때문이라고 설명하고 있다 (Nouri *et al.*, 2012). 본 연구에서 정전분무량이 200 mL/min과 400 mL/min일 때 가스 중의 수분량은 각각 17.8 g/m³, 21.3 g/m³이었다.

그림 5는 정전분무 방전극의 건식과 습식(방전극 노즐 크기 0.25 mm)에 대하여 인가전압의 변화에 따른 코로나 방전 사진이다. 인가전압이 증가함에 따라 코로나 방전의 발광정도가 선명하여지는 것을 관찰할 수 있으며, 특히 습식일 경우 더욱 선명함을 알 수 있다.

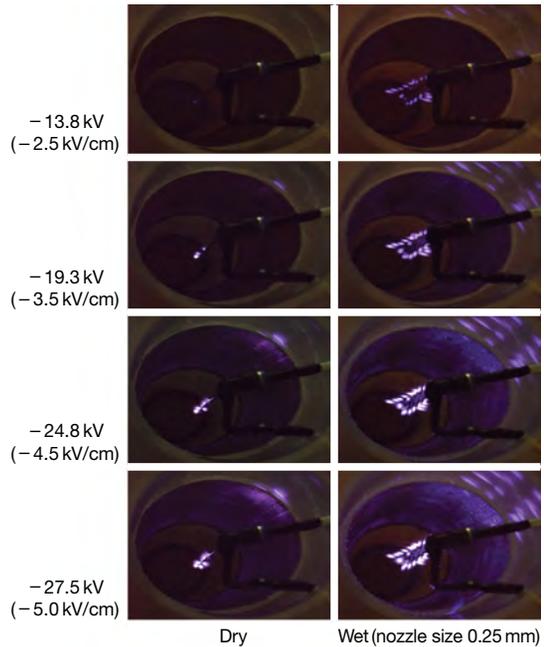


Fig. 5. Corona discharge shape caused by applied voltage (electrical field strength).

또한 정전분무 액적의 물줄기를 따라 코로나 방전이 발생하는 것도 관찰되는데, 이것은 액적의 표면에서 코로나 방전 현상이 관찰되는 Kim *et al.* (2014b)의 연구와도 유사하다.

3.2 집진효율

그림 6은 전기장 강도 변화에 따른 집진효율을 나타낸 것이다. 건식의 경우에 전기장 강도가 -2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 kV/cm일 때 집진효율은 각각 23.4, 37.2, 50.8, 58.6, 67.6, 73.4%로 나타났다. 습식의 경우에는 노즐의 크기가 0.5 mm이고, 전기장 강도가 -2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 kV/cm일 때 집진효율은 각각 52.1, 69.8, 90.5, 94.0, 94.9, 96.6%이며, 노즐의 크기가 0.25 mm일 때 집진효율은 각각 56.6, 78.1, 93.0, 95.4, 96.1, 97.1%로 나타났다.

일반적인 전기집진기에서 나타나는 것과 같이 건식과 습식 모두 전기장 강도가 커질수록 집진효율이 증가하였다. 동일한 전기장 강도에서는 건식보다 습식일 때 집진효율이 더 높게 나타났는데, 본 연구의 전기집진장치는 방전극에서 액적이 분무되므로 세정집진 기

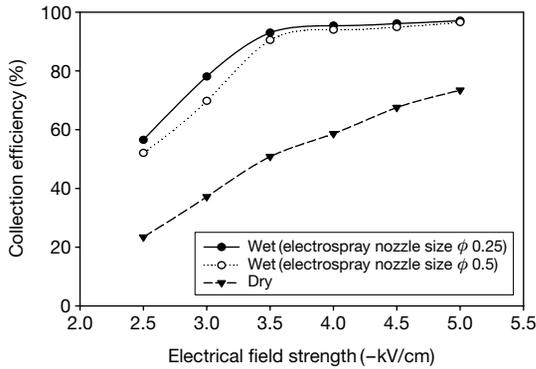


Fig. 6. Total collection efficiency versus electrical field strengths in the ESP.

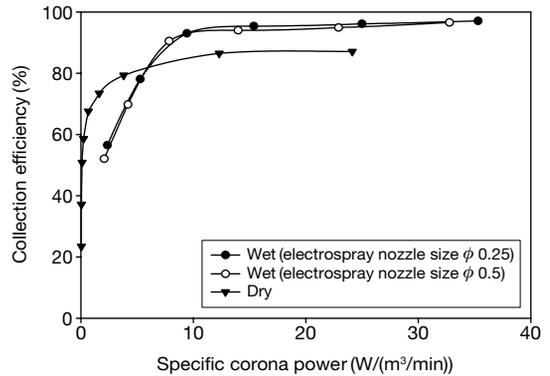


Fig. 7. Total collection efficiency versus specific corona power in the ESP.

작이 부가되어 집진효율이 향상되었으리라 판단된다.

또한 습식의 경우에 정전분무 방전극의 노즐 직경이 0.5 mm일 때보다 0.25 mm일 때 다소 높은 집진효율을 나타내었는데, 이는 세정집진 특성으로 설명할 수 있으며, 정전분무 액적의 크기가 작으면 확산, 직접차단, 정전인력 등의 집진기작이 증대되어 집진효율이 높아졌으리라 사료된다(Kim *et al.*, 2014a; Jaworek *et al.*, 2013). 노즐을 통한 정전분무시 분무액적의 크기는 같은 조건일 때 분무유량에는 비례하고, 인가전류량에는 반비례하는 연구 등이 보고되고 있으며(Hartman *et al.*, 2000; Gañán-Calvo *et al.*, 1997), 그림 4에서 볼 수 있듯이 노즐직경이 0.25 mm인 방전극이 0.5 mm인 방전극에서 보다 적은 분무량과 높은 전류량을 나타내고 있다.

그림 7은 코로나 전력량과 집진효율의 관계를 나타낸 것인데, 코로나 전력비(Specific corona power/flow rate, P/Q)는 전기집진기를 운전하는 중요한 요소 중의 하나이다. 본 실험의 결과는 일반적인 코로나 전력비인 1.75~17.5 W/(m³/min) 범위에서 정전분무 방전극의 노즐직경이 0.5 mm인 경우에 집진효율이 51.0~94.1%로 나타났으며, 노즐직경이 0.25 mm인 경우에는 집진효율이 55.0~96.1%로 나타났다. 이것은 표 1과 비교하면 일반적인 전기집진기의 코로나 전력비와 유사한 것을 알 수 있다.

또한 전기집진기를 설계할 때 중요한 요소 중의 하나가 비집진면적(Specific collecting area)이다. 본 연구의 정전분무 방전극을 설치한 습식 전기집진장치는 비집

진면적이 0.18 m²/(m³/min)로 표 1에 나타낸 일반적인 전기집진기에 적용하는 0.25~2.1 m²/(m³/min)과 비교하면 매우 낮으며, 낮은 비집진면적에서도 높은 집진효율을 나타내고 있음을 알 수 있다(Kim *et al.*, 2012).

그림 8은 노즐 직경이 0.25 mm인 정전분무 방전극을 사용한 습식 전기집진장치에서 측정된 전기장 강도별, 먼지의 크기별 부분집진효율과 본 장치의 설계와 운전변수를 Deutsch 모델식에 적용하여 산출한 예측값을 나타낸 것이다(Najafabadi *et al.*, 2014). 그림 8에서 볼 수 있는 것과 같이 측정값과 예측값 모두에서 0.1~1.0 μm 범위의 집진효율이 상대적으로 낮은 것을 볼 수 있는데, 이는 일반적인 전기집진장치의 먼지 크기별 집진효율 곡선과 대체적으로 일치하고 있다(Saiyasitpanich *et al.*, 2007; Bayless *et al.*, 2004).

또한, 전기장 강도가 커지면서 집진효율이 향상되는 것을 볼 수 있으며, 실측값이 예측값보다 높은 것으로 나타났다. 이는 Deutsch 모델식에 정전분무에 의한 세정집진효과가 고려되지 않았기 때문이며, 정전분무 효과는 전기장 강도별로 다소 차이가 나지만 약 20~40% 정도의 집진효율 향상이 있는 것으로 나타났다. 이에 대한 자세한 연구가 추후 이루어져야 할 것이다.

$$\eta = \left[1 - \exp\left(-\frac{\omega A}{Q}\right) \right] \times 100 \quad (1)$$

$$\omega = \frac{(n_d + n_p)eEC_c}{3\pi\mu d_p} \quad (2)$$

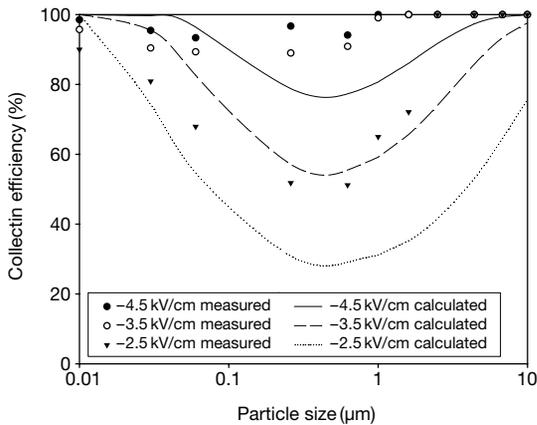


Fig. 8. Partial collection efficiency in the ESP (electro-spray nozzle size 0.25 mm).

$$n_d = \frac{d_p}{2K_E e^2} kT \ln \left[1 + \frac{\pi K_E d_p c_i e^2 N_i t}{2kT} \right] \quad (3)$$

$$n_f = \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \left(\frac{Ed_p^2}{4K_E e} \right) \quad (4)$$

여기서, ω 는 먼지의 이동속도 (m/s), A 는 집진면적 (m^2), Q 는 유량 (m^3/sec), n_d, n_f 는 확산 및 전기장 하전 수, e 는 전자의 전하량 ($1.6 \times 10^{-19} C$), E 는 전기장 강도 (V/m), C_c 는 커닝햄 미끄럼 보정계수, μ 는 가스의 동점성계수, d_p 는 먼지의 크기 (m), K_E 는 상수 ($9.0 \times 10^9 Nm^2/C^2$), k 는 Boltzman 상수 ($1.38 \times 10^{-23} J/K$), T 는 절대온도 (K), c_i 는 이온의 평균속도 (표준대기 240 m/s), N_i 는 이온농도 (ion/m^3), t 는 시간 (s), ε 는 먼지의 유전상수 ($SiO_2; 4.5$) 이다.

4. 결 론

본 연구는 정전분무 방전극을 설치한 습식 전기집진장치를 제작하여 전류-전압 특성실험과 집진효율실험을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 정전분무 방전극을 설치한 습식 전기집진장치의 전압-전류특성은 일반적인 코로나 방전 후에 인가 전압을 높이면 급격하게 높아지는 전류량보다 더 급격하게 커지는 특성을 나타냈다. 정전분무 액적

에서 코로나 방전현상을 관찰하였으며, 코로나 전류량을 급격하게 높이는 원인이라 사료된다.

- 2) 집진효율은 전기장강도가 증가할수록 높아지며, 먼지의 크기별 부분집진효율은 $0.07 \sim 1.0 \mu m$ 범위에서 낮은 일반적인 전기집진 특성을 나타냈다. 정전분무 방전극을 설치한 습식 전기집진장치는 미세먼지에 대하여 적은 비집진면적 (SCA; $0.18 m^2 (m^3/min)$)에서도 높은 집진효율을 나타냈으며, 코로나 전력비도 일반적인 범위 내인 약 $10 W/(m^3/min)$ 에서 높은 집진효율을 나타냈다.

References

Altman, R., B. Wayne, and R. Isaac (2001) Wet electrostatic precipitation demonstrating promise for fine particulate control. *Power Eng.*, 1-7.

Bailey, A.G. (1998) *Electrostatic spraying of liquids*. Jhon Wiley & Sons Inc., 60-75.

Bologa, A., H.R. Paur, H. Seifert, T. Wascher, and K. Woletz (2009) Novel wet electrostatic precipitator for collection of fine aerosol, 11th International Conference on Electrostatics, *J. Electrostat.*, 67(2-3), 150-153.

Carotenuto, C., F.D. Natale, and A. Lancia (2010) Wet electrostatic scrubbers for the abatement of submicronic particulate, *Chem. Eng. J.*, 165(1), 35-45.

Chayasak, R., Y. Tirawanichakul, and P. Tekasakul (2011) Application of Electrostatic Precipitator in Collection of Smoke Aerosol Particles from Wood Combustion, *Aerosol Air Quality Res.*, 11, 90-98.

Chow, J.C., J.G. Watson, D.H. Lowenthal, L.-W.A. Chen, and N. Motallebi (2010) Black and organic carbon emission inventories: Review and Application to California, *J. Air & Waste Management Assoc.*, 60, 497-507.

Cooper, C.D. and F.C. Alley (2002) *Air pollution control; A design approach*. Waveland Press, Inc., 209-217.

Ehrlich, C., G. Noll, W.-D. Kalkoff, G. Baumbach, and A. Dreiseidler (2007) PM_{10} , $PM_{2.5}$ and $PM_{1.0}$ -Emissions from industrial plants-Results from measurement programmes in Germany, *Atmos. Environ.*, 41(29), 6236-6254.

Ganan-Calvo, A.M., J. Davila, and A. Barrero (1997) Current and Droplet size in the Electro spraying of Liquids. Scaling laws, *J. Aerosol Sci.*, 28(2), 249-275.

- Hartman, R.P.A., D.J. Brunner, D.M.A. Camelot, J.C. Marijnissen, and B. Scarlett (2000) Jet break-up in electrohydrodynamic atomization in cone jet mode, *J. Aerosol Sci.*, 31(1), 65-95.
- Hinds, W.C. (1999) *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons, Inc., 304-314.
- Hobbs, P.V. (1993) *Aerosol-Cloud-Climate Interaction*. Academic Press, Inc., 75-93.
- Jaworek, A., A. Krupa, A.T. Sobczyk, M. Szudyma, T. Antes, W. Balachandran, F.D. Natale, and C. Carotenuto (2013) Submicron particles removal by charged sprays. *Fundamentals, J. Electrostat.*, 71(3), 345-350.
- Jaworek, A., A. Krupa, and T. Czech (2007) Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review, *J. Electrostat.*, 65(3), 133-155.
- Jaworek, A., W. Balachandran, M. Lackowki, J. Kulon, and A. Krupa (2006) Multi-nozzle electrospray system for gas cleaning processes, *J. Electrostat.*, 64, 194-202.
- Jin, H.A., J.H. Lee, K.M. Lee, H.K. Lee, B.E. Kim, D.W. Lee, and Y. Hong (2012) The estimation of PM_{2.5} emission and their contribution analysis by source categories in Korea, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 28(2), 211-221. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.G., H.J. Kim, M.H. Lee, and J.H. Kim (2014a) Experimental study on the enhancement of particle removal efficiency in spray tower scrubber using electrospray, *Asian J. Atmos. Environ.*, 8(2), 89-95.
- Kim, H.H., Y. Teramoto, N. Negishil, A. Ogata, J.H. Kim, B. Pongrác, Z. Machala, and A.M. Gañán-Calvo (2014b) Polarity Effect on the Electrohydrodynamic (EHD) Spray of Water, *J. Aerosol Sci.*, 76, 98-114.
- Kim, J.H., H.J. Yoo, Y.S. Hwang, and H.G. Kim (2012) Removal of particulate matter in a tubular wet electrostatic precipitator using a water collection electrode, *The Scientific World J.*, 532354.
- Kim, J.H., H.S. Lee, H.H. Kim, and A. Ogata (2010) Electrospray with electrostatic precipitator enhances fine particles collection efficiency, *J. Electrostat.*, 68(4), 305-310.
- Kim, K.H., Y.J. Hong, R. Pal, E.C. Jeon, Y.-S. Koo, and Y. Sunwoo (2008) Investigation of carbonyl compounds in air from various industrial emission sources, *Chemosphere*, 70(5), 807-820.
- Michelson, D. (1990) *Electrostatic Atomization*, IOP Publishing Ltd, 82-91.
- Najafabadi, M., H.B. Tabrizi, A. Aramesh, and M.A. Ehteram (2014) Effects of geometric parameters and electric indexes on performance of a vertical wet electrostatic precipitator, *J. Electrostat.*, 72(5), 402-411.
- Nouri, H., N. Zouzou, E. Moreau, L. Dascalescu, and Y. Zeboudj (2012) Effect of relative humidity on current-voltage characteristics of an electrostatic precipitator, *J. Electrostat.*, 70(1), 20-24.
- Oiliver, W. (2004) *Electrohydrodynamic spraying - Transport, mass and heat transfer of charged droplets and their application to the deposition of thin functional films*, Ph D thesis, University of Tubingen, The Swiss.
- Oravisjarvi, K., M. Pietikainen, J. Ruuskanen, S. Niemi, M. Lauren, A. Voutilainen, R.L. Keiski, and A. Rautio (2014) Diesel particle composition after exhaust after-treatment of an off-road diesel engine and modeling of deposition into the human lung, *J. Aerosol Sci.*, 69, 32-47.
- Pacyna, J.M., K. Sundseth, E.G. Pacyna, W. Jozewicz, J. Munthe, M. Belhaj, and S. Astrom (2010) An assessment of costs and benefits associated with mercury emission reductions from major anthropogenic sources, *J. Air & Waste Management Assoc.*, 60(3), 302-315.
- Saiyisitpanich, P., T.C. Keener, S.J. Khang, and M. Lu (2007) Removal of diesel particulate matter (DPM) in a tubular wet electrostatic precipitator, *J. Electrostat.*, 65(10-11), 618-624.
- Seo, S.J., Y.K. Seo, Y.J. Hwang, D.H. Jung, and S.O. Back (2014) Application of adsorption sampling and thermal desorption with GC/MS analysis for the measurement of low-molecular weight PAHs in ambient air, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 30(4), 362-377. (in Korean with English abstract)
- Sung, J.H., H.N. Jang, S.K. Back, B.M. Jung, Y.C. Seo, Y.S. Kang, and C.K. Lee (2014) Performance of removal efficiency for mercury compounds using hybrid filter system in a coal-fired power plant, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 30(3), 261-269. (in Korean with English abstract)
- Verdoold, S., L.L.F. Agostinho, C.U. Yurteri, and J.C.M. Marijnissen (2014) A generic electrospray classification, *J. Aerosol Sci.*, 67, 87-103.
- Wang, X. and C. You (2013) Effects of thermophoresis, vapor, and water film on particle removal of electrostatic precipitator, *J. Aerosol Sci.*, 63, 1-9.