플랜트 저널 제18권 제1호(2022) / pp. 50-54

배가스 내 미세먼지 제거를 위한 고성능 집진 기술에 대한 연구

김소연*, 김민성**†, 최상미*, 정민규*, 이진욱*
*중앙대학교 에너지시스템공학과, **†중앙대학교 에너지시스템공학부

A Study on High performance Electrical Precipitation Technology for PM Removal in Exhaust Gas

Soyeon Kim*, Minsung Kim**†, Sangmi Choi*, Minkyu Jung*, Jinwook Lee*
*Department of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University,
**School of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University

ABSTRACT : The demand for high-efficiency dust collectors is rapidly increasing to remove PM from exhaust gas emission facilities, such as thermal power plants, steel mills, and industrial cogeneration plants, as the Pmemission standards have been strengthened. In this study, the electrospray is adapted for existing electrosratic precipitator(EP) to remedy its shortcomings and to improve the performance. Electrospray has been mainly used for the purpose of generating very fine droplets, but fir the purpose of EP, the flow rate over 10 mL/min per nozzleis required, and a high flow rate condition of 65 to 200 times is required. The electrospray of high flow rate has a completely different spray shape from the low flow rate condition, and was visualized through various figures such as corona discharge photographs and shadow images.

초록 : 미세먼지 배출 허용 기준이 강화됨에 따라 화력발전소, 제철소, 산업용 열병합 발전소 등 배가스 배출 시설의 미세먼지 제거를 위해 고효율 집진장치 수요가 급증하고 있다. 본 연구에서는 기존 전기집진기에 정전분무 기술을 도입하여 단점을 보완하고 성능을 향상시키는 연구를 진행 중이다. 정전분무는 매우 미세한 액적을 생성하는 목적으로 주로 사용되어왔지만, 집진을 목적으로 할 때는 그 유량이 10mL/min으로 65 ~ 200배에 달하는 고유량 조건이 필요하다. 고유량의 정전분무는 저유량과는 완전하게 다른 분무 형상이 나타나며 코로나 방전 사진 촬영, 그림자 촬영법 등 다양한 촬영을 통하여 이를 가시화하였다.

Key words : Electrospray;ESP (정전분무), Electrostatic precipitator;EP (전기 집진), Paticulate Matter;PM (미세먼지), Corona discharge (코로나 방전)

† Corresponding Author, minsungk@cau.ac.kr

1. 서 론

1.1 연구 배경

미세먼지(particulate matter, PM)와 초미세 먼지는 연소 공정 후단에서 배출되어 대기 오염을 일으키는 원인이 된다.

입경이 작을수록 인체에 유입되어 호흡기 질환을 유발하고, 식물의 성장 장애 등 환경에 유해한 영향을 미친다고 보고된다. 이에 따라 미환경보호국(EPA), 유럽연합(EU) 뿐만 아니라 우리나라의 경우 지름이 2.5um보다 작은 PM2.5에 대해 대기 환경 규제를 실시하고 있다. 대기 환경 기준을 달성하기 위하여 규제물질에 대한 배출허용 기준도 강화되었다. 점점 강화되는 기준을 준수하기 위해 기존 집진 장치의 효율을 향상시키는 연구 혹은 고성능 집진 장치 개발이 필요하다.

현재 주로 사용하고 있는 고성능 집진 장치에는 여과집진기, 전기집진기, 하이브리드 집진기 등이 있으며, 이 중 전기집진기는 고용량에서도 적은 압력손실과 높은 집진 효율을 가진 장치이다. (Jaworeket al., 2007) 배가스에 포함된 미세먼지를 제거하기 위해 화력발전소에서는 주로 전기 집진 방식(electrostatic precipitator)을 이용하고 있다.

전기 집진 방식은 배가스가 대전된 판 사이로 통과할 때 정전기적 특성에 의해 먼지가 집진판에 흡착되는 원리로 PM5이하 포집 효율 95%로 우수하다. 흡착된 먼지를 제거하는 방식에 따라 건식과 습식으로 분류된다. 건식 집진기의 경우 집진극에 누적된 먼지를 래핑을 통해 탈착시키나, 먼지의 전기비저항에 따라 재비산, 역코로나(back corona), 스파크 방전에 따른 화재 등이 발생하여 집진효율이 떨어지는 문제점 때문에 집진극에 부착된 먼지를 물로 연속적으로 씻어내는 습식 전기 집진 방식의 개발이 활발히 이루어져왔다. 재비산 문제를 해결하여 집진 효율은 향상되나, 흡착되어 있는 먼지를 씻어내기 위해 다량의 물을 사용한다. 뿐만 아니라 사용된 대량의 물은 오염수가 되어 후처리 과정에 추가적인 비용이 소요된다.

이러한 재비산 문제와 물 사용량 등에 대한 문제를 해결하기 위해 정전분무 기술을 집진기에 도입하여 새로운 형태의 집진기를 개발하려는 연구가 시작되고 있다. (Kim et al., 2014)

1.2 정전분무 집진 기술

정전분무란(Electrospray) 전도성 액체를 노즐을 통해 흘려보내면서 정전압을 인가시켜 액체속의 이온들이 척력과 인력에 의해 액체 표면으로 이동하게 하고, 이 때 표면장력보다 큰 쿨롱반발력이 발생하는 정도의 전압을 인가시키면 척력에 의해 미세한 액적으로 분사되는 현상을 의미한다.

물은 표면장력이 0.072N/m로 정전분무 분야에서 주로 쓰이는 표면장력 0.021~0.023N/m 범위의 에탄올, 메탄올과 같은 휘발성 용액들 보다 큰 편이다. 표면장력이 크면 액적으로 분무시키기 위해 더 큰 전압이 필요하다. 인가 전압이 공기의 코로나 방전 개시 전압 이상이 되면 공기를 통하여 전기가 흐르는 방전 현상이 발생하기 때문에 물을 정전분무 용액으로 잘 사용하지 않았다. 그러나 전기집진에서의 코로나 방전은 포집의 원리가 되며, 생성된 물 액적은 매우 높은 하전량을 가지고 있어 0.1um 입경 이하의 먼지도 원활하게 이온 결합하여 집진할 수 있다.

1.3 정전분무 습식 전기집진기

정전분무 습식 전기집진기는 전기집진기의 형태에 정전분무 장치를 결합한 형태이다. Figure 1은 정전분무 습식 전기집진기 중 사이클론 형태의 집진기에 대한 모식도이다. 습식 전기집진기와 같이 집진된 먼지를 제거하기 위해 물을 사용하는 것이 아니라 물리적 충돌과 전기적 인력으로 직접 먼지를 포집하고 이를 중력을 이용하여 바로 아래로 제거하기 때문에 집진극에서 슬러지 형태로 먼지가 남아 집진효율이 떨어지는 습식 전기집진기와 다르게 높은 집진효율을 유지할 수 있다. 전압을 걸어주기만 하면 물이 넓게 분무되어 먼지와 접촉 면적이 커지므로 집진에 사용하는 물 사용량을 현저하게 줄일 수 있다. 액체와 배가스를 직접적으로 접촉시키는 스크러버의 경우 액기비(배가스 m3를 처리하는 데 필요한 액체의 양, L/ m3)가 통상적으로 8 정도인데 반해 정전 분무 집진 방식은 액기비가 2정도로 매우 적은 양의 물을 사용한다. 이를 이용하여 집진효율 뿐만 아니라 물 사용량과 오염수 후처리 비용을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 집진을 위한 정전분무의 유량 및 전압에서 실험을 통하여 분무 특징에 대하여 연구하고자 한다.

2. 본 론

정전분무는 주로 질량분석기의 이온발생기 혹은 박막 코팅에 이용되어 미세입자를 분무하는 용도로 활용되어 왔다. 크기가 일정한 미세입자를 얻을 수 있는 콘젯 모드(Cone-jet mode)가 가장 많이 쓰이고, 콘젯 모드를 통해 생성된 액적이 가지는 전류와 액적 크기의 상관관계 식이 calvo(1999)등에 의해 주로 연구되어 왔다. 에탄올의 콘젯 모드를 촬영하여 Fig.2에 나타내었다.

그러나 집진을 위한 정전분무는 일정한 크기의 미세 액적보다는 먼지 입자보다 크기가 큰 액적이 방출되는 것이 중요하다. 단일 노즐에 대한 유량은 최대 20mL/min으로 일반적인 정전분무 유량의 65~200배에 달하는 고유량 조건이다. 이 때 고유량이라는 것은 정전분무에 일반적으로 사용하는 유량에 비해 고유량이라는 것이고, 습식 전기집진기나 스크러버에 비해서는 매우 적은 수준이다.

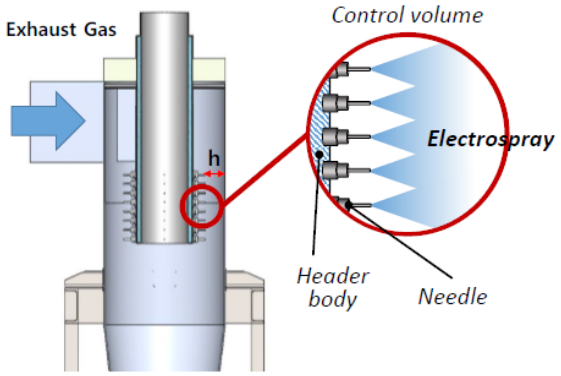

Fig. 1 Cyclone ESP precipitator scheme

Fig. 2 Cone-jet mode of electrostatic spray under low flow rate (Ethanol, 0.03mL/min, -8.6kV)

이러한 고유량의 액체를 미립화 하기 위해서는 더 높은 인가전압이 필요하다. 이 연구에서 쓰인 실험 조건을 Table 1에 나타내었다. Fiugre 3에는 실험 장치의 장치도를 나타내었다.

고유량, 고전압 정전분무는 분무 형상이 이전과 다른 양상을 보인다. 표면장력과 관성력이 크기 때문에 콘이 형성되지 않고 액주(jet)이 긴 형태로 나타난다. 이 젯이 전기장에 의해 진동 혹은 회전하면서 분무되기 때문에 콘젯 모드가 나타나지 않고 전압에 따라 분무 형상이 크게 달라진다. Figure 4는 물의 고유량 정전분무에서 전압에 따라 나타나는 두가지 형상을 촬영한 것이다. 액적은 전압이 낮을 때 방울이 뚝뚝 떨어지는 Drippping 모드를 지나 액주가 흔들리면서 분무 범위가 2D 현상(Fig.4 왼쪽)을 이룬다. 이후 인가 전압이 커지면 액주가 회전하면서 3D 분무(Fig.4 오른쪽)가 나타난다.

Table 1 Scale comparison of experimental conditions

	Typical value	This study
Flow rate	uL/h ~ 0.3 mL/min	~ 20 mL/min
Voltage	~ 10 kV	~ (- 50) kV
Needle diameter	~ 0.1 mm i.d. ~ 0.5 mm o.d.	0.67 mm i.d. 1.07 mm o.d.
Electrodes distance	4 ~ 50 mm	50 mm

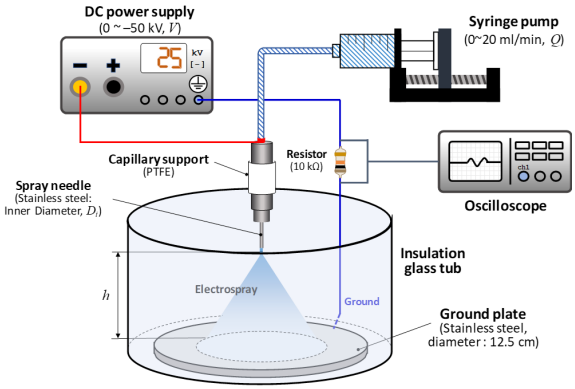

Fig. 3 Electrospray experimental apparatus in this study

Fig. 4 Electrospray forms under high flow rates of water

Figure 5는 Fig.4를 매우 빠른 광원을 이용하여 그림자

촬영을 한 것이다. 빛에 매우 짧게 노출되므로 순간적인 분무 사진을 촬영할 수 있고, 이 때 노즐의 직경과 비교하여 액적의 크기를 측정할 수 있다. 왼쪽 사진은 2D 분무를 촬영한 것이며, 젯과 액적들이 사인파를 이루며 면을 형성한다. 오른쪽 사진은 인가 전압이 왼쪽 보다 더 클 때, 젯이 삼차원으로 회전하면서 분무된다.

코로나 방전은 전하가 집중 분포되어 있는 표면에서 한계 전위차를 넘어서면 순간적으로 다량의 전하가 방출되는 현상으로 광전하가 방출되므로 보라색의 빛을 띈다. 이 빛을 통하여 고유량 정전분무의 분무 형상도 확인할 수 있다. 먼저 저유량 물 정전분무의 코로나 방전을 동일한 전압에서 여러번 촬영한 것을 Fig. 6에 나열하였다. 물의 저유량 정전분무에서 코로나 방전은 고유량과 다른 형태를 띈다. 코로나 방전이 일어나기 때문에 완전한 Taylor cone이 유지되지는 않지만 코로나 방전은 콘의 끝에서만 나타난다.

Fig. 5 Shadow image of Fig.4 using strobe light.

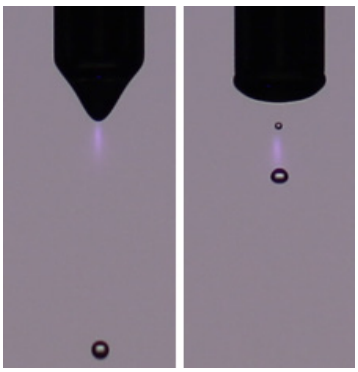

Fig. 6 Corona discharge image of electrospray under low flow rate (water, 0.03mL/min, – 8.5kV)

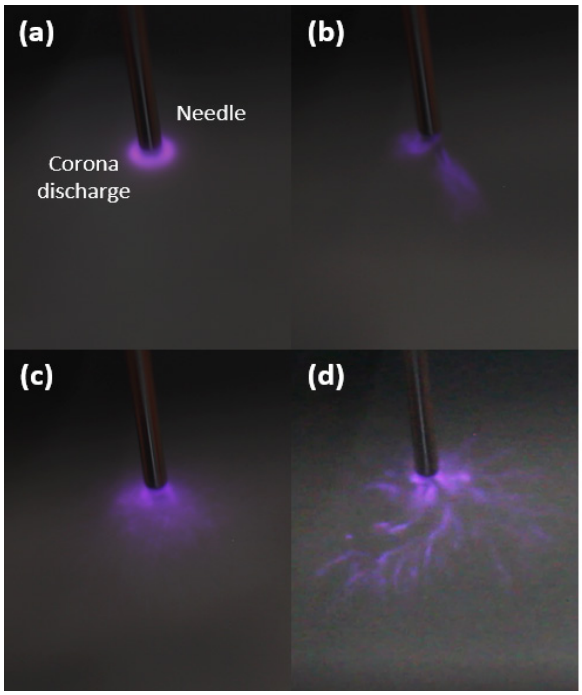

Fig. 7 Corona discharge image of dry needle (a) and electrospray (b ~ d); (water, 10mL/min)

Figure 7에 유량 10mL/min에서 물 정전분무의 전압별 코로나 방전을 촬영하여 분류하였다. Figure 7 (a)는 유량이 0mL/min일 때, 즉 금속 바늘에 전압만 인가한 것이다. (b~d)는 수돗물 10mL/min에서 전압이 증가함에 따라 2D 분무, 2D 회전 분무, 3D 분무를 촬영한 것이다. (a)와 (b~d)를 비교하여 보면 보라색의 빛이 분무를 하지 않았을 때에는 금속 표면에서 방출되고, 분무 시에는 액체의 표면에서 빛이 나는 것을 알 수 있다. 이것을 통하여 정전분무 시에는 액체의 표면에서부터 방전이 시작된다는 것을 알 수 있다. 또한 고유량 정전분무에서는 코로나 방전을 통해 분무 형상을 확인할 수 있다는 것을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 집진기에 정전 분무 기술을 활용하기 위한 고유량 정전분무의 분무 형상과 코로나 방전을 가시화하였다. 결론은 다음과 같다.

(1) 표면장력이 큰 물은 분무되기 위하여 큰 인가전압이 필요하고 고유량에서는 저유량과 다른 분무 형상을 나타낸다.
(2) 집진을 위해 고유량 물 정전분무를 활용할 경우 3D 분무가 분무 영역이 넓으므로 집진효율이 높을 것으로 예상된다.
(3) 코로나 방전의 빛을 관찰하는 것으로 쉽게 고유량 정전분무에서의 분무 형상을 구분할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(KETEP No. 20192050100060, No. 20192050100060), 한국에너지기술연구원(KIER C0-2412-0), 한국 연구재단(NRF No. 2019R1A2C108869412), 환경부(KEITI No. 2020003060005)의 지원으로 수행한 연구과제입니다.

참고문헌

(1) Kim, H. -J., Kim, J. -H., and Kim, J. -H., 2015, "Evaluation of Particle Collection Efficiency in a Wet Electrostatic Precipitator Using an Electrosprayed Discharge Electrode," *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 36, No. 6, pp. 530~537.
(2) A J. Fernandez de la Mora, I.G. Loscertales, 1994, "The current emitted by highly conducting Taylor cones", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 260, pp. 155~184.
(3) A. Jaworek, A. Krupa, 1997, "Studies of the corona discharge in EHD spraying", *Journal of Electrostatics*, 40-41, pp. 173~178.
(4) H.H. Kim, Y. Teramoto, N. Negishi, A. Ogata, J.H. Kim, B. Pongrac, Z. Machala, Alfonso M. and Ganan-Calvo, 2014, "Polarity effect on the electrohydrodynamic (EHD) spray of water", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 76, pp. 98~114.
(5) G. W. Trichel, 1938, "The mechanism of the negative point to plane corona near onset", *Physical Review*, Vol. 54, pp. 1078~1084.