

## 배가스 내 PM1.0 미세먼지 제거를 위한 정전분무 습식 전기집진기에 대한 연구

조연주\*, 임현정\*, 김소연\*\*, 최상미\*\*, 정민규\*\*, 김민성\*†

\*중앙대학교 에너지공학과, \*\*중앙대학교 에너지시스템공학부

## Study on Wet Electric Precipitation with Electrospray for Removal of PM1.0 in Exhaust Gas

Yeonjoo Cho\*, Hyunjeong Lim\*, Soyeon Kim\*\*, Sangmi Choi\*\*,

Min Kyu Jeong\*\*, and Minsung Kim\*\*†

\*Department of Energy Engineering, Chung-Ang University,

\*\*School of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University

(Received June 8, 2018; Revised June 15, 2018)

**ABSTRACT** : The need to improve the performance of the dust collector by increasing the fine dust pollution in Korea is eminent. In this study, electrostatic spray wet electrostatic precipitator is used to remove Particulate Matter (PM). In order to enter the Cone-jet mode, which is the most stable spray mode among the various modes of electrostatic spraying, an appropriate voltage-flow condition must be satisfied, and a voltage-flow interval enabling this can be expressed as Stability Island. The voltage at which the conduit mode starts in the Stability Island section is referred to as the electrostatic spray minimum voltage (Onset Voltage). However, the conventional electrostatic spray is uses a very low flowrate, at most few millilitres per minute. The use of much higher flowrates has introduced different patterns of electrospray modes. In this study, the different spray modes will be studied in detail.

**초 록** : 최근 한국의 미세 먼지 오염도가 급격히 증가함에 따라 배가스 내 미세먼지를 더욱 효과적으로 집진할 수 있는 기술에 대한 관심 또한 증가하였다. 본 연구에서는 습식 전기집진기와 사이클론 집진기에 정전분무 기술을 결합하여 집진 성능의 증대를 목표로 한다. 정전분무는 일반적으로 질량분석, 혹은 반도체 코팅에 이용되므로 그 유량이 매우 적다. 분무 액적과 미세먼지의 이온결합을 통하여 집진을 해야하는 본 연구의 특성상 기존 정전분무의 유량에 대비하여 매우 큰 유량을 사용하게 된다. 따라서 기존의 정전분무 시작 전압, 혹은 분무 형상과는 다른 형상을 보일 수 있다. 본 연구에서는 기존 정전분무와는 다른 유량 및 전압 범위를 사용함으로써 예상되는 다양한 형상 특성을 살펴보고자 한다.

**Key words** : Power Plant(발전설비), Exhaust Gas(배가스), Electric Precipitator (전기집진기), Electrostatic Spray (정전분무)

† Corresponding Author, minsungk@cau.ac.kr

## 1. 서론

미세먼지와 초미세먼지는 각각 지름이 10  $\mu\text{m}$ 와 2.5  $\mu\text{m}$ 보다 작은 입자로, 각각 PM10, PM2.5로 표기된다. 최근 대기 오염의 주요 원인으로 지목되는 미세먼지에 대한 대기환경 기준이 전세계적으로 점차 강화됨에 따라 화력발전소와 같이 미세먼지를 다량으로 배출하는 설비에 대한 배출허용기준이 엄격해지고 있다. 화력발전소와 산업용 연소시설은 전체 미세먼지 배출량의 약 60% 가량을 차지하며, 미세먼지 절감을 위해서 앞의 시설들에서 사용하는 집진설비의 성능 증대를 고려할 수 있다.

전기 집진기(electrostatic precipitator) 중에서도 건식 전기 집진기는 화력발전소에서 주로 사용된다. 먼지가 대전된 판 사이를 통과하면서 정전기에 의해 집진극에 흡착되는 방식으로, 운전시간이 길어질 경우 집진극에 먼지가 누적되어 흡착성능이 저하된다. 누적된 먼지를 털어내는 래핑(rapping) 과정에서 먼지가 재비산되어 집진 효율 저하가 수반된다. 습식 전기집진기는 이러한 단점을 극복하기 위해 집진극을 물로 세정하여 집진성능은 높였으나, 집진극에 불균일한 수막이 형성되고 많은 양의 오염수가 발생되는 문제점이 있다.

본 연구에서 이러한 문제들의 대안으로 습식 전기 집진기에 정전분무 기술을 결합하였다. 정전분무 기술은 주로 적은 유량으로 정전도장(Electrostatic Spray Painting), 혹은 질량분석에 사용된다. 이러한 정전분무 기술을 전기 집진기에 도입하기 위하여 정전분무 모드에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 정전분무 이론

### 2.1. 정전분무 이론 설명

노즐에 고전압을 인가하면 노즐을 통과하는 전도성 액체가 대전된다. 대전된 물은 노즐 끝에서 전자기력에 의해 뾰족한 모양의 테일러콘(Taylor cone)을 형성한다. 테일러 콘의 끝 부분에서 방출된 액체는 짧은 선형 분무구간을 지나 액체 입자간 척력에 의해 미세한 액적으로 분사된다. 이러한 현상을 정전분무라 한다.

전도성 액체로는 물을 사용하여 노즐에 음전압(negative voltage)을 인가하면 노즐을 통과하는 물은 음전하를 띤다. 미세먼지 입자는 양전하를 띠므로 물과 미세먼지가 이온결합을 통하여 중화되고, 이 입자가 집진극에 부착된 후 세정된다.

### 2.2. 정전분무 모드

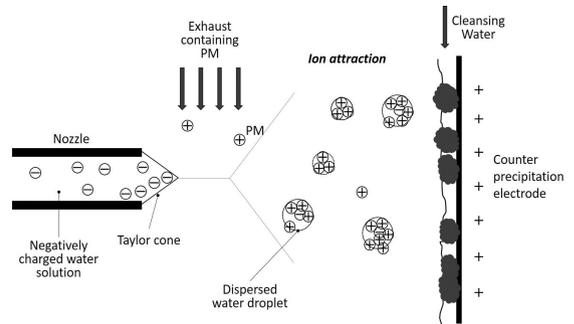


Fig. 1 Wet Electrostatic precipitation with electrostatic spray

정전분무는 인가 전압과 유량에 의해 여러 형태(모드)를 보인다. 전계(Electric field)가 없을 때 액체는 불규칙한 형상으로 시간 간격을 두고 노즐 출구에서 방울져 떨어진다. 모세관에 전압을 서서히 인가하면 액적의 방출 빈도와 크기는 점점 감소하기 시작한다. 액체방울 방출 시 직경은 모세관의 직경보다 크게 유지되며, 적은 빈도로 큰 방울의 방출이 일어난다. 이를 Dripping Mode라 한다.

Spindle Mode는 축적된 액적이 그 부피로 인하여 모세관으로부터 분리되는 현상과 전기적 영향으로 분무가 일어나는 현상이 동시에 관찰되는 독특한 분사형태를 가진다.

Oscillating Mode(Precession Mode)는 인가된 전압이 Cone-jet Mode에 진입하는 전압(정전분무 시작전압)에 근사했으나 아직 충분히 크지 못할 때 나타난다. 테일러콘이 형성되기 시작하지만 수직분사구간이 조금씩 흔들리는(oscillating) 모습을 보인다.

콘젯모드는 테일러콘과 수직분사구간, 그리고 액적분사구간이 안정적으로 나타나는 모드이다. 콘젯모드가 관찰 가능한 액체의 전기전도도 범위는 매우 넓으며 평균 입자 크기 범위 또한 다양하게 나타난다. 따라서 대다수의 정전

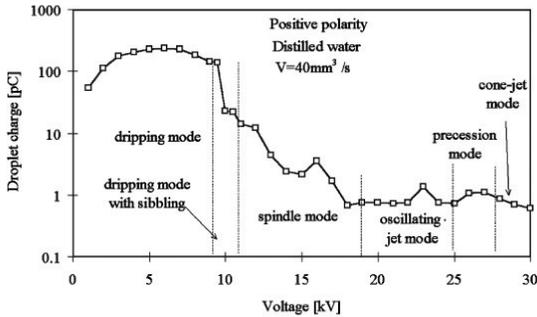


Fig. 2 The effect of the voltage on the size and charge of the water droplets generated by the EHD method. (10)

분무 연구는 콘젯모드를 대상으로 한다.

유량이 인가전압에서의 정전분무 최소유량보다 아주 클 경우 전기적 인력에 의한 분무현상이 나타나지 않고 방전극에서 분사된 jet이 집진극으로 직접 분출되며 단락현상이 일어날 수 있다.

### 3. 정전분무 기술의 적용

본 연구의 습식 정전분무 집진기에 사용된 정전분무 기술과 기존 정전분무 기술의 응용에 가장 큰 차이로 유량과 전압을 예로 들 수 있다. 기존의 정전분무 기술로 약 10kV 이하의 전압과, nl/min ~ 수 ml/min의 저유량을 사용하였다. 그러나 본 연구에는 미세먼지의 집진이 목적으로 배가스 용량을 고려할 때 약 10~20 ml/min을 적정유량으로 계산할 수 있다(8). 이는 기존 유량의 최대 100배에 달하며, 유량에 따라 변하는 정전분무 형상이 기존의 연구와 크게 달라질 수 있다.

또한 정전분무 용액으로 물을 사용함으로써 기존의 많은 연구와는 다르게 된다. 테일러콘에서는 전기적 힘이 정전분무 용액의 표면장력보다 클 때 테일러콘의 끝에서 분사가 일어날 수 있다. 따라서 표면장력이 작은 용액을 사용할 경우 더 작은 전압을 인가하여 정전분무를 일으킬 수 있다. 대기압과 상온 조건에서 물을 사용하여 안정적인 콘젯모드를 일으키는 것은 불가능하다고도 여겨졌으나(9), Jaworek은 실험을 통하여 물을 사용한 안정적인 콘젯모드 사용이 가능하며, 유량 및 전압에 따른 모드의 변화를 Fig.2와 같이 제시하였다 (10).

콘젯모드를 명확히 제시할 수 없는 점 또한 정전분무 기술의 응용에 큰 단점으로 작용한다. 물을 이용한 정전분무에서 Jaworek과 Park(11)은 각각 일반적인 콘젯모드의 형상에는 일치점을 보였으나, 콘젯모드에 근사한 모드를 다르게 명명할 것인지, 혹은 콘젯모드로 포함시킬지에 대해서는 의견의 차이를 보인다.

### 4. 결론

정전분무 습식 전기집진기에서의 정전분무 기술 사용을 위하여 정전분무 가능 범위와 모드에 대해서 살펴보았다. 콘젯모드에서의 운전을 위하여 정전분무 최소전압 이상, 코로나 전압 이하의 전압에서 운전이 필요하나 상대습도가 높은 집진기 내부 특성상 위 범위에 대한 자세한 연구가 필요하다.

또한 배가스 특성을 고려한 온도, 상대습도에 대한 정전분무 전압 및 유량 및 범위에 대한 연구를 진행할 예정이다.

### 후 기

본 과제는 산업통상자원부의 에너지기술개발사업 (KETEP No. 20161120200090, KETEP No. 20168510011420)과 산업핵심기술개발사업(KEIT No. 10063187)의 지원으로 수행한 연구 과제입니다.

### 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) H. Nouri, N. ZouZou, E. Moreau, L.

- Dascalescu, Y. Zebboudj, 2012, "Effect of relative humidity on current-voltage characteristics of an electrostatic precipitator", *Journal of Electrostatics*, Vol.70 pp.20-24.
- (3) Smith, D. 1986, "The Electrohydrodynamic Atomization of Liquids", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.IA-22. NO. 3, pp. 527-535.
- (4). R. P. A. Hartman, D. J. Brunner, D. M. A. Camelot, J. C. M. Marijinissen, and B. Scarlett, 1999, "Electrohydrodynamic atomization in the cone-jet mode physical modeling of the liquid cone and jet", *Journal of Aerosol Science*, Vol.30, pp.823-849.
- (5) Sir Geoffrey Taylor, F. R. S., 1964, "Disintegration of water drops in an electric field", *Proc. R. Soc. Lond. A*.
- (6) C.H. Chen, 2011, "Electrohydrodynamic stability, in *Electrokinetics and Electrohydrodynamics in Microsystems*", Springer, pp. 177-220.
- (7) A. R. JONES, and K. C. THONG, 1971, "The production of charged monodisperse fuel droplets by electrical dispersion", *Journal of Physics D : Applied Physics*, Vol.4. NO. 8. pp. 1159.
- (8) Cho Y., 2017, "Study on Dust Particulate Removal in Exhaust Gas using Electrostatic Spray", *The magazine of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, Vol. 46, No. 12, pp. 50-54
- (9) Borra J.P., Ehouarn P., Boulaud D. , 2004, "Electrohydrodynamic atomisation of water stabilised by glow discharge? Operating range and droplet properties", *J. Aerosol Sci.*, Vo. 35, No. 11, pp.1313-1332
- (10) Jaworek A., Krupa A., 1999, "Classification of the modes of EHD Spraying", *J. Aerosol Sci.*, Vol. 30, No. 7, pp.873-893
- (11) Park I., Kim S., Hong W., Kim S., Jaworek A., Krupa A., 2015, "Classification of electrohydrodynamic spraying modes of water in air at atmospheric pressure", *J. Aerosol Sci.*, Vol. 89, pp 26-30. 