

## 분무탑식 스크러버에서 이류체 정전분무에 의한 집진효율의 향상

### Collection Efficiency Enhancement of Spray Tower Scrubber by Introducing Electro spray with Two-flow Nozzle

황 유 성 · 김 종 호\* · 김 종 현

한서대학교 환경공학과

(2010년 3월 31일 접수, 2010년 5월 31일 수정, 2010년 6월 4일 채택)

You-Seong Hwang, Jong-Ho Kim\* and Jong-Hyeon Kim  
*Department of Environmental Engineering, Hanseo University*

(Received 31 March 2010, revised 31 May 2010, accepted 4 June 2010)

#### Abstract

There have been a number of efforts to satisfy national emission regulations and reduce the amount of emitted air pollutants. There are several air pollution control devices, however, only wet scrubber is efficiently used to remove particulate matters and gaseous pollutants, even if it has minimum collection efficiency in the particle size range of 0.1 ~ 1  $\mu\text{m}$ . This study aimed to improve the collection efficiency of a spray tower type scrubber by introducing an electro spray system with two-flow nozzle. We found that the collection efficiency of a spray tower type scrubber was similar to that of a conventional wet scrubber. However, installation of an electro spray system in the scrubber resulted in drastic further improvement of collection efficiency comparing to that of a conventional scrubber, which is 26%, 35.2%, and 45.1% at the liquid to gas ratio of 0.26 L/m<sup>3</sup> and 19.9%, 35.1%, and 42.5% at 0.34 L/m<sup>3</sup> for the applied voltage of -30 kV, -35 kV, and -40 kV, respectively.

Therefore, we found that the introduction of an electro spray system is very effective to improve the collection efficiency of a spray tower type scrubber.

**Key words** : Electro spray, Two-flow nozzle, Spray tower type scrubber, Collection efficiency

#### 1. 서 론

산업시설에서 배출되는 유해대기오염물질 중 입경 1  $\mu\text{m}$  이하의 먼지는 먼지 그 자체로도 유해성이 있으며, 먼지에 포함되어 있는 구성성분에 따라서도 인체, 혹은 대기환경에 유해성을 더 증가시킬 수 있는

것으로 알려져 있다. 대기환경 중으로 배출된 미세먼지는 호흡에 의해 인체에 유입되어 호흡기 질환 등을 유발하는데, 몇몇 연구자들이 동물실험을 통해서 이를 증명하였다(Englert, 2004; Samanta *et al.*, 1998). 또한, 대기중에서 가시광선을 산란·흡수하여 시정 거리를 감소시키며, 태양복사량을 변화시켜 온실효과 혹은 냉각현상으로 기상이변을 야기하며, 대기 중에서 다른 오염물질들이 반응할 수 있는 매개체의 역할도 한다(Hoobs *et al.*, 1993).

\*Corresponding author.

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

미세먼지에 대한 이러한 피해사례가 점차적으로 늘어남에 따라 그에 대한 규제가 점점 강화되는 추세에 있는데, 미국 EPA에서는 1987년 처음 PM<sub>10</sub>에 대한 규제를 채택한 이래 1997년 PM<sub>2.5</sub>규제를 실시하는 등 점차 작은 크기의 먼지의 규제를 강화하고 있다.

먼지를 처리하는 장치로는 여과집진장치, 전기집진기, 스크러버 등이 있으며, 이 중 습식 스크러버는 처리가스 중의 먼지와 세정액을 접촉시켜 먼지를 제거하기 때문에 세정액을 별도로 처리해야 하는 문제점이 있다. 그러나 세정액을 사용하기 때문에 오히려 폭발성이 있는 위험한 먼지의 제거와 가스상 오염물질과의 효과적인 처리 측면에서 많이 이용되고 있는 처리장치이다(Kim, 1999).

일반적으로 산업계에서 많이 사용하는 습식 스크러버의 종류로는 분무탑(spray tower)식, 충전탑(packed tower)식, 와류(vortex)식, 벤투리(venturi)식이 있다. 이 중 분무탑식, 충전탑식 스크러버의 집진효율은 작은 입자에 대해 비교적 낮은 것으로 알려져 있다(Cooper and Alley, 2002). 또한 우리나라의 산업 시설에는 배출원의 종류 및 규모에 따라 많은 습식 스크러버가 설치되어 운영되고 있으며, 점차적으로 엄격해지고 있는 배출원에서의 먼지규제기준에 따라 기존의 집진장치의 효율향상이나, 새로운 집진장치를 설치하는 등의 노력들이 절실히 필요한 실정이다(Lee *et al.*, 2006).

본 연구에서는 습식 스크러버의 집진효율을 향상시키는 하나의 방안으로 정전분무 노즐을 이용하는 방법을 실험적으로 고찰하였다. 기존 분무탑 형태의 스크러버에서 이류체 노즐에 고전압을 인가하여 분진의 집진효율을 향상시키는 실험을 수행하였다.

## 2. 정전분무의 이론

정전분무(electrospray)에서는 전도성 용액을 노즐에 통과시키면서 양(+)·음(-)의 고전압을 인가하면 노즐과 액체속의 이온들이 척력과 인력에 의해 액체표면으로 이동하게 된다. 노즐에 인가되는 전압이 작을 경우에는 액체표면에 작용하는 전기력과 양이온들의 반발력이 액체의 표면장력보다 작기 때문에 액적이 분무되지 않지만, 전압을 증가시키면 액체

표면에 작용하는 전기력과 양이온들의 반발력이 액체의 표면장력보다 커지면서 노즐 끝부분에서 액적이 분무된다(Bailey, 1998; Michelson, 1990).

이 노즐에 전압을 더 증가시키게 되면 노즐 끝에서 액체곡면이 cone 모양을 형성하는데 이것을 Taylor cone (Taylor, 1964)이라 부른다. 이때 Taylor cone 끝에서 표면전단응력(surface tangential stress)을 받아 실과 같이 매우 가는 액체기둥(liquid ligament)이 형성되고, 액체기둥 끝에서 액체기둥 표면에 작용하는 표면전단응력의 교란에 의해 미세한 액적들로 나누어지게 된다(Kim, 2003).

액체가 미립화되면 액체의 비표면적이 증가하여 분산된 액적과 주위 기체 사이의 열 및 물질전달이 용이해져서 증발이나 응축, 화학반응이 잘 일어날 수 있으며(Park *et al.*, 2006), 정전분무를 통해 발생된 액적들은 단분산 분포를 나타내며, 액적표면에 많은 하전량을 가지고, 같은구성을 가지기 때문에 액적끼리 서로 결합하지 않는다(Ganan-Calvo *et al.*, 1997).

이러한 정전분무를 이용하여 연료분무, 입자하진, 과수방제기, 잉크젯 프린터, 정전도장 및 박막코팅, 생화학 물질의 분자질량 분석 등 다양한 응용분야에서 연구가 진행되고 있다(Oliver, 2004; Kim, 2003).

대기오염 방지분야에 정전분무를 이용한 연구는 하전액적을 스크러버에 이용한 연구, 전기집진기 전단에 입자를 하전시켜 효율을 증가시키는 연구 등등 몇 개의 연구보고가 있을 뿐이다(Hwang, 2010; Lee, 2009; Jaworek *et al.*, 2006; Pilat *et al.*, 1974).

이류체 분무는 공기량으로 액적의 크기를 조절하고, 공기유동으로 여러 분무형상을 만들 수 있어 여러 산업분야에서 이용되고 있다. 이러한 이류체 노즐에 고전압을 인가하여 인가전압이 높아지면 분무되는 액적의 크기가 작아지면서 액적의 하전량도 커지며, 분무되는 액적의 평균속도가 커지는 것으로 알려져 있으며(Kim and Bae, 2001), 이러한 특성을 스크러버의 집진효율 향상을 위해 적용해 보고자 한다.

## 3. 실험방법

본 연구를 위하여 그림 1과 같이 실험실규모의 청정풍동에 분무탑형식의 스크러버 시스템을 제작하였다. 본 실험은 작은 입자의 농도가 중요한 요소이기

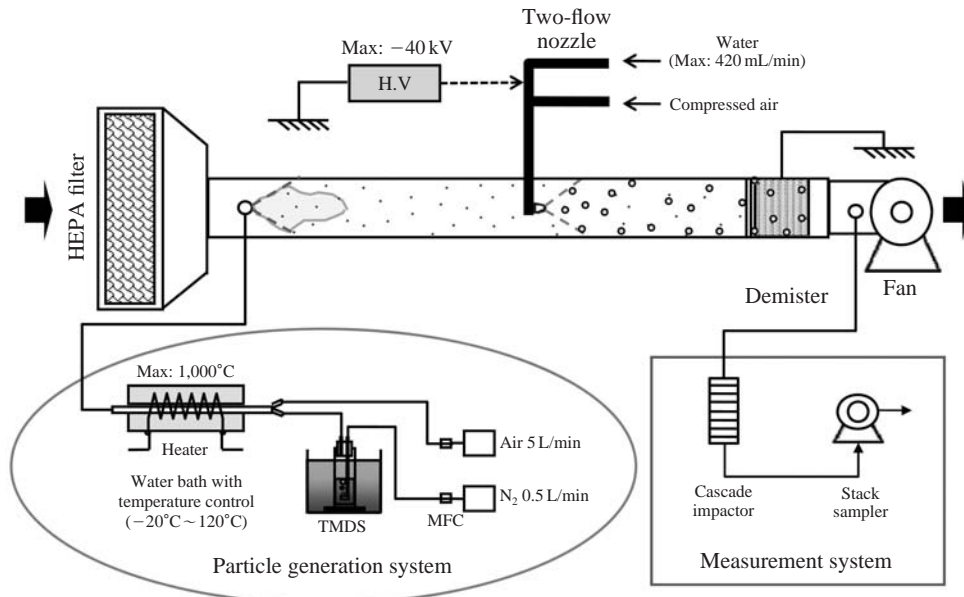


Fig. 1. Experimental setup to measure the collection efficiency of a spray tower scrubber.

때문에 실험장치의 내부를 청정상태로 유지하기 위해 공기 유입부에 HEPA filter를 설치하였다. 그리고 실험용 먼지의 발생장치, 정전분무노즐, 미스트제거장치 (demister) 순서로 구성하였다.

실험용 입자는 1,1,3,3-tetramethyl disiloxane((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>SiH)<sub>2</sub>O, Aldrich)을 임핀저에 주입하고 질소가스로 bubbling하여 TMSD 증기를 공기와 함께 튜브형 전기로 (F-1000, 서주과학)를 통과시킴으로 SiO<sub>2</sub>, SiO<sub>4</sub>의 형태로 발생시켰다. 증기상태로 전기로에 들어간 TMSD는 산화과정을 거쳐서 안정한 산화물을 형성한 후, 포화 증기농도 이상으로 존재하는 산화물은 핵생성 (Nucleation), 응축 (Condensation), 응집 (Coagulation) 과정을 거치면서 입자로 성장하게 된다 (Hwang, 2010; Lee *et al.*, 2005).

정전분무 스크리버는 250 mm (H) × 250 mm (W) × 800 mm (L)의 크기이며, 그림 1에 나타난 것처럼 가스의 흐름 방향으로 노즐을 설치하여 물을 분사하며, 후단에 스테인레스 스틸 재질의 미스트제거장치 (Demister)를 설치하였다. 송풍기는 터보팬으로 최대풍량은 5 m<sup>3</sup>/min이며 inverter로 조절할 수 있다. 정전분무노즐은 이류체 노즐로서 물을 약 400 mL/min, 공기를 2 kg/cm<sup>2</sup> 압력으로 분사하며, 고전압발생장치

(KSH P40/5CN, 한국스위칭)는 음 (-)전압을 0 ~ -40 kV까지 인가시킬 수 있도록 제작하였다.

발생된 입자의 측정은 in-stack cascade impactor (series 220, Sierra instruments, Inc.)를 이용하였으며, 시료를 3회 측정하여 평균값으로 중량농도를 산출하였다.

본 실험에서는 연구의 목적에 맞게 분무탐식 스크리버의 집진효율을 이류체 분무노즐에 고전압을 인가하는 방식으로 향상시키기 위하여 분무노즐에 -30, -35, -40 kV의 고전압을 인가하면서 집진효율을 측정하였다. 이와 더불어 정전분무에 사용되는 물 분사량에 따른 집진효율을 파악하기 위하여 분무량을 320, 420 mL/min로 변화시키면서 집진실험을 수행하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 입자발생

본 실험의 목적에 적절한 분진을 발생시키기 위하여 질소가스는 0.5 L/min, 공기는 5 L/min, 튜브형 전기로의 온도는 약 1,000°C로 조절하고, TMSD 증기

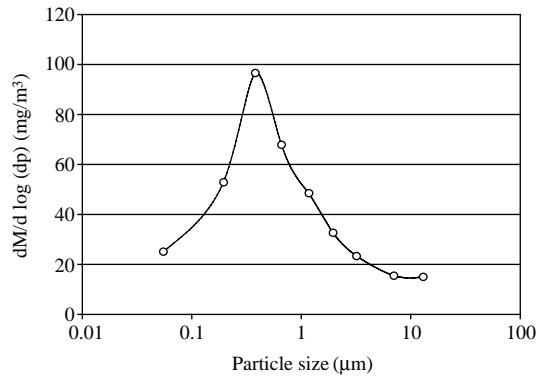


Fig. 2. Size distribution of test particles.

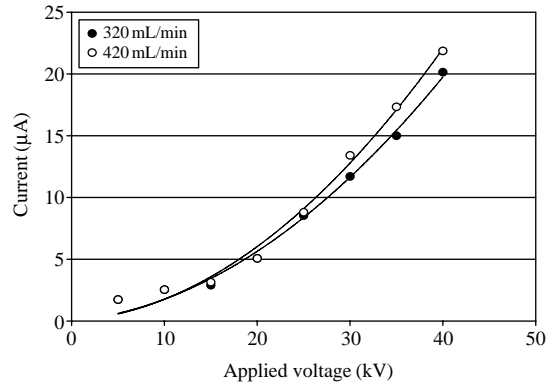


Fig. 4. Voltage-current characteristics in electro-spray nozzle (negative polarity).

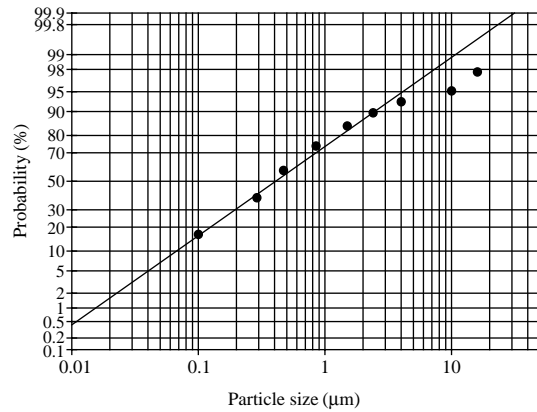


Fig. 3. A log-probability graph in test particles.

를 실험장치에 유입시켜면 분진의 발생농도가 약 120 mg/m<sup>3</sup> 정도가 된다. 이는 산업시설에서 배출되는 일반적인 농도범위 (50~200 mg/m<sup>3</sup>)를 고려할 때 적절하다고 판단된다 (Kim *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 1995).

또한 발생시킨 분진의 입경분포는 그림 2와 같다. 대부분의 분진이 0.1~2.0 μm 영역이며, 약 0.3 μm 정도의 크기에서 가장 높은 농도를 나타내고 있는데, 이러한 크기는 스크리버뿐만 아니라 여러 집진장치들의 낮은 집진효율을 나타내고 있는 크기의 영역과 유사하다. 기하평균 (geometric mean)과 기하편차 (geometric standard deviation)는 그림 3에 나타난 것과 같이 누적확률지를 이용하여 산출하였으며, 기하평균이 0.4 μm, 기하표준편차가 1.45로 나타났다.

일반적으로 기하표준편차가 1.2 이하일 때 단분산 (monodisperse) 입자라 하고, 그 이상을 다분산 (polydisperse) 입자라 하는데, 본 실험에서 발생시킨 입자는 기하편차가 1.45로 나타나 다분산상태임을 알 수 있다 (Hinds, 1982).

#### 4. 2 전류 · 전압특성

정전분무노즐에 인가된 전류-전압의 측정은 Oscilloscope (TDS 2014B, Tektronix)를 이용하였으며, 측정결과는 그림 4에 나타났다.

이류체 노즐에 인가되는 노즐의 전압이 높아짐에 따라 전류값도 서서히 증가하여 -40 kV (물 분사량, 420 mL/min)를 인가했을 때 22 μA 전류가 측정되었다. 또한 물 분무량이 많아지면 비교적 낮은 전압에서는 비슷한 전류량으로 측정되었으나, -25 kV보다 높은 전압을 인가하면 분무량이 많은 경우에 좀 더 많은 전류량이 측정되었다.

#### 4. 3 집진실험

먼저 이류체 노즐에 공급하는 물의 양을 320, 420 mL/min로 변화시키고 인가하는 고전압을 -30 kV, -35 kV, -40 kV로 변화시켰을 때의 집진효율을 그림 5에 나타났다. 물분무량과 처리가스유량을 비교하여 액기비로 나타내면, 320, 420 mL/min일 때 각각 0.26, 0.34 L/m<sup>3</sup>이다.

액기비가 0.26 L/m<sup>3</sup>일 때보다 0.34 L/m<sup>3</sup>일 때 집진효율이 높은 것으로 나타났고, 인가전압이 커질수록 집진효율이 높은 것으로 나타났다.

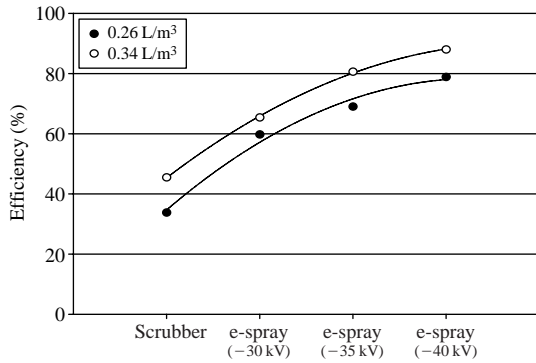


Fig. 5. Particle collection efficiency in an electro spray nozzle scrubber.

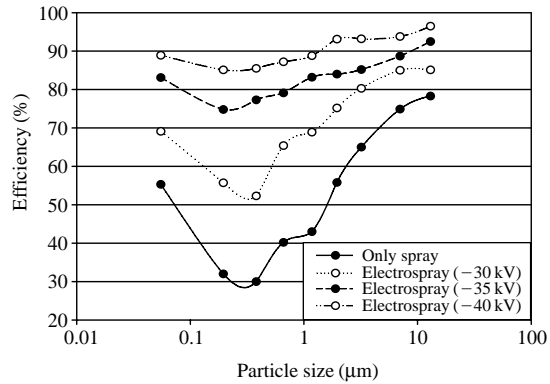


Fig. 7. Particle collection efficiency of a spray tower scrubber with an electro spray system.

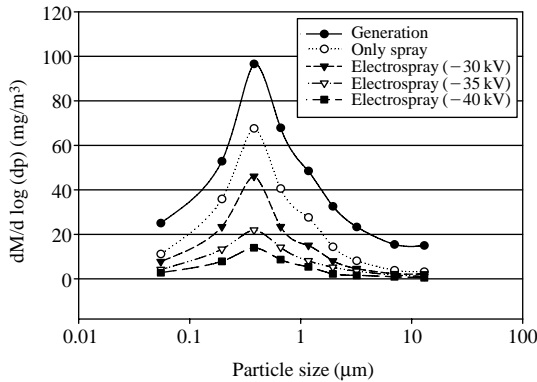


Fig. 6. Effect of charged droplet on the particle size distribution.

액기비가 0.26 L/m<sup>3</sup>이고, 물만 분무했을 때와 분무 노즐에 고전압을 -30 kV, -35 kV, -40 kV로 인가 하였을 때, 집진효율은 각각 33.8%, 59.8%, 69.0%, 78.9%로 측정되었다. 또한 액기비가 0.34 L/m<sup>3</sup>일 때의 집진효율은, 물분무만 했을 때, 분무노즐에 고전압을 -30 kV, -35 kV, -40 kV로 인가하였을 때, 각각 52.7%, 70.8%, 83.1%, 90.2%로 나타났다.

또한, 그림 6과 그림 7에는 액기비가 0.34 L/m<sup>3</sup>일 때 정전분무 노즐에 인가되는 전압에 따른 입경별 분진의 농도 및 집진효율을 나타내었다. 정전분무를 하지 않았을 때의 총 집진효율은 45.5% 정도이며, 입경별 집진효율은 0.1~1.0 μm의 영역이 전체적으로 낮게 나타났고 약 0.3 μm 크기의 집진효율은 아주

낮은 30% 정도이다.

일반적으로 대부분의 집진장치가 관성력과 확산력의 교차영역인 0.1~1.0 μm 부분에서 집진효율이 낮은 현상을 나타내는데 (Lim *et al.*, 2006; Kim, 1999; Hinds, 1982), 본 연구에서도 같은 결과를 보여주고 있다.

그림 7에 이류체 노즐에 고전압이 -30 kV, -35 kV, -40 kV로 높아짐에 따라 입경별 집진효율의 향상을 나타내었는데, 0.3 μm 입자의 집진효율이 단순히 물만 분무했을 때보다 약 55.5%까지 향상되는 것을 볼 수 있었다. 따라서 분무탐식식의 스크리버도 분무노즐에 고전압을 인가하여 집진효율을 향상시킴으로 엄격해지는 배출허용기준을 어느 정도는 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 4 정전분무의 효과

일반적으로 스크리버의 집진효율은 처리입자의 크기별로 구분하여 0.05 μm보다 작은 경우에는 확산력이 지배적이며, 0.05~1 μm의 영역에서는 확산, 충돌, 차단 등이 모두 고려되며, 1 μm보다 큰 경우에는 관성충돌이 지배적이다 (Hinds, 1982). 본 연구에서 발생된 입자의 크기는 그림 2에 나타난 것과 같이 약 0.1~10 μm이므로 확산, 충돌, 차단 등의 모든 제거 기작이 함께 고려되어야 할 것으로 판단된다.

확산에 의한 집진효율은 액적의 크기가 작고, 액적과 입자 간의 상대속도가 작고, 액적의 갯수가 많으면 집진효율이 높아지며, 관성충돌에 의한 집진효율

은 Stokes 수의 크기에 따라 적용하는 식이 다소 차이가 있으나, 액적의 크기는 작을수록, 액적의 평균속도는 커질수록 집진효율이 커지는 것으로 알려져 있다. 또한 차단에 의한 집진효율은 액적이 작고 액적의 갯수가 많을수록 집진효율이 높아진다(Lim *et al.*, 2006; Jung and Lee, 1998).

본 연구에서 이류체 노즐에 인가된 고전압으로 인하여 액적의 크기가 작아지며(Kim and Bae, 2001), 같은 유량이 분무될 때 액적의 크기가 작아지므로 액적의 갯수가 많아져서 집진효율이 증가한 것으로 사료된다.

또한, 분무되는 액적이 작아지면 이에 따라 액적의 하전량도 증가되는데(Park *et al.*, 2006), 하전된 액적과 입자와의 전기적 응집에 의해서도 집진효율이 향상되었으리라 사료된다(Sachchida *et al.*, 2002).

## 5. 결 론

본 연구에서는 기존의 분무탑식 스크리버에서 이류체 노즐에 고전압을 인가하여 분진의 집진효율을 향상시켰다.

1. 기존의 분무탑식 스크리버의 집진효율이 액기비 0.26, 0.34 L/m<sup>3</sup> 조건에서 각각 33.8%, 52.7%로 측정되었으며, 분무노즐에 -40 kV의 고전압을 인가하였을 때는 78.9%와 90.2%의 집진효율을 나타내, 각각 45.1%와 37.5%의 집진효율 향상을 시켰다.

2. 입경별 집진효율은 액기비 0.34 L/m<sup>3</sup> 조건에서 실험을 수행하였는데, 0.1 ~ 1.0 μm 영역의 집진효율이 30%에서 분무노즐에 -40 kV의 고전압을 인가하였을 때 90.2%로 향상되었다.

따라서 먼지의 배출허용기준을 만족시키지 못하는 분무탑식 스크리버에서, 기존의 이류체 분무노즐에 고전압을 인가하는 방법을 도입하여 배출허용기준을 만족할 수 있으리라 기대된다.

## 참 고 문 헌

- Bailey, A.G. (1998) *Electrostatic Spraying of Liquids*, John Wiley & Sons Inc., 107-115.
- Cooper, C.D. and F.C. Alley (2002) *Air Pollution Control; A Design Approach*, Waveland Press, Inc.
- Englert, N. (2004) Fine particles and human health-a review of epidemiological studies, *Toxicology Letters*, 149, 235-242.
- Ganan-Calvo, A.M., J. Davila, and A. Barrero (1997) Current and droplet size in the electrospraying of liquids. scaling laws, *J. Aerosol. Sci.*, 28(2), 249-275.
- Hinds, W.C. (1982) *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons Inc., 428-430, 191-196.
- Hobbs, P.V. (1993), *Aerosol-Cloud-Climate interaction*, Academic Press, Inc., 75-84.
- Hwang, Y.S. (2010) *Removal of Fine Particles using Charged-droplet Scrubber*, Master Thesis, Hanseo University. (in Korean with English abstract)
- Jaworek, A., W. balachandran, M. Lackowki, J. Kulon, and A. Krupa (2006) Multi-nozzle electrospray system for gas cleaning processes, *Journal of Electrostatics*, 64, 194-202.
- Jung, C.H. and K.W. Lee (1998) Filtration of fine particles by multiple liquid droplet and gas bubble system, *Aerosol Sci. & Tech.* 29(5), 389-401.
- Kim, J.H. (1999) The basic study on development of electro-charged scrubber, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 15(1), 33-39. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.H. and C.S. Bae (2001) Liquid atomization and spray characteristics in electrostatic spray of twin fluids, *Korean J. of Mechanical Science and Technology B*, 25(11), 1552-1560. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.H., U.H. Hwang, and S.D. Kim (1999) Effects of corona wind on the collection efficiency of electrostatic precipitator, *Korean J. of KSEE*, 21(7), 1323-1330. (in Korean with English abstract)
- Kim, K.T. (2003) *Effects of the external electric field on electrospray characteristics*, Master Thesis, Korea advanced Institute of Science and Technology. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.D., J.H. Kim, and C.K. Bong (1995) A study on the characteristics of dust emission and electrostatic precipitation at the B-C oil combustion, *Korean J. of KSEE*, 17(12), 1271-1277. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.S. (2009) *Development of collection efficiency in electrostatic precipitator using electrospray*, Master Thesis, Hanseo University. (in Korean with English abstract)
- Lee, M.H., K. Cho, A.P. Shah, and P. Biswas (2005) Nanostructured sorbents for capture of cadmium species in combustion environments, *Environ. Sci. & Technol.*,



- 39(21), 8481-8489.
- Lee, M.H., S.B. Kim, Y.S. Hwang, J.H. Kim, and G.S. Kim (2006) Effective control of fine particles using an electrostatic coagulation between particle and water droplet, *J. of ILASS-KOREA*, 11(2), 98-104. (in Korean with English abstract)
- Lim, K.S., S.H. Lee, and H.S. Park (2006), Prediction for particle removal efficiency of a reverse jet scrubber, *Journal of Aerosol Science*, 37, 1826-1839.
- Michelson, D. (1990) *Electrostatic Atomization*, IOP Publishing Ltd., 43-49.
- Oliver, W. (2004) *Electrohydrodynamic spraying-transport, mass and heat transfer of charged droplets and their application to the deposition of thin functional films*, PhD thesis, University of Tübingen, The Swiss.
- Park, M.G., Y.G. Choi, and S.S. Kim (2006) Spray characteristics of charged injected 2-fluid nozzle for non-conducting liquid, *J. of ILASS-KOREA*, 11(3), 155-160. (in Korean with English abstract)
- Pilat, M.J., S.A. Jaasund, and L.E. Sparks (1974) Collection of aerosol particles by electrostatic droplet spray scrubbers. *Environ. Sci. Technol.*, 6, 360-362.
- Sachchida, N.T. and R.G. Harrison (2002) Enhancement of contact nucleation by scavenging of charged aerosol particles, *Atmospheric Research*, 62, 57-70.
- Samanta, A.M., K.A. Berube, F.D. Pooley, and R.J. Richards (1998) The response of lung epithelium to well characterised fine particles, *Life Sciences*, 62(19), 1789-1799.
- Taylor, G.L. (1964) Disintegration of water drop in an electric field, *Proc. R. SOC.*, A280, 383-397.