

# 실험실 규모 정전기 분무형 반건식 세정기의 SO<sub>2</sub> 제거효율 향상에 대한 계산 및 실험적 연구

변 영 철\* · 황 정 호\*\*

(1998년 1월 15일 접수)

## Numerical and Experimental Study on the Increase of Removal Efficiency of SO<sub>2</sub> in a Laboratory Scale Electrostatic Spray Drying Absorber

Young-Cheol Byun and Jung-Ho Hwang

**Key Words :** SDA(반건식세정기), Electrostatic Spray(정전기분무), Spray Visualization(분무가시화), Charging Mechanism(대전원리)

### Abstract

Spray Drying Absorber(SDA) system, where the combustion product gas is mixed with atomized limestone-slurry droplets and then the chemical reaction of SO<sub>2</sub> with alkaline components of the liquid droplets forms sulfates, has been widely used to eliminate SO<sub>2</sub> gas from coal-fired power plants and waste incinerators. Liquid atomization is necessary because it can maximize the reaction efficiency by increasing the total surface area and dispersion angle of the alkaline components. First, numerical calculations using FLUENT are carried out to investigate SO<sub>2</sub> concentration distribution and thus to calculate SO<sub>2</sub> removal efficiency. So to attain the optimized spray conditions, then an electrostatic spraying system is set up and spray visualization is performed to show the effect of an electric field on overall droplet size. Next, the effect of an electric field on the concentrations of SO<sub>2</sub> is experimentally examined. Field strength is varied from -10 kV to 10 kV and configurations of conduction charging and induction charging are utilized. Consequently, the electrostatic removal efficiency of SO<sub>2</sub> increases about 30% with the applied voltage of ±10 kV but is independent of polarity of the applied voltage. It is also found that the conduction charging configuration results in higher efficiency of SO<sub>2</sub> removal than the induction charging configuration. Finally, the effect of slurry temperature on SO<sub>2</sub> removal is studied. The temperature influences on the electrostatic removal efficiency of SO<sub>2</sub>.

### 기 호 설 명

I : 전류

m<sub>p</sub> : 액적 질량

m : 슬러리 질량 유량

N : 액적의 수

q<sub>d</sub> : 단위질량 당 액적의 전하량

q<sub>p</sub> : 액적의 전하량

V : 전압

r : 반경방향 성분

z : 축방향 성분

\*연세대학교 대학원 기계공학과

\*\*회원, 연세대학교 기계공학과

그리스문자

- $\eta_s$  : 슬러리 주입으로 인한 SO<sub>2</sub> 제거효율
- $\eta_E$  : 전기적 효과에 의한 SO<sub>2</sub> 제거효율
- $\eta_T$  : 슬러리 주입과 전기적 효과에 의한 SO<sub>2</sub> 제거효율

1. 서 론

일반적인 분무건조(Spray Drying) 기술은 화학, 식품, 생화학 등의 다양한 산업에서 넓은 응용범위를 가지면서 적용, 발전되어 온 분야이며<sup>(1)</sup> 이 기술을 응용한 분무 건조 흡착기(Spray Drying Absorber, SDA)는 미세 입자 슬러리(slurry)를 분사시켜 슬러리 입자가 건조되면서 산성가스와 반응하는 용기이며 유향합량이 높은 석탄을 연소하는 대형발전소에서 탈황 설비로 많이 쓰이고 있다. Fig. 1은 일반적인 SDA의 한 형태를 보여주며 작동 원리는 노즐에 주입된 소석회(Ca(OH)<sub>2</sub>) 슬러리가 미립화되어 산성가스를 포함한 고온의 배연과 혼합되어 일어나는 흡수, 화학반응, 흡착반응이다. 분무 액적 내에서 SO<sub>2</sub> 가스와 슬러리의 화학반응에 대한 연구는 전달현상, 용해와 침강공정, 역반응들이 중복되어 나타나는 복잡한 특성 때문에 그 응용범위에 비해 상대적으로 뒤떨어져있다.<sup>(2)</sup> 이러한 SDA 방식의 산성가스 제거효율을 증가시키기 위해 흡수제의 개선 및 신희수제의 개발, 흡수제의 재활용 그리고 접촉방법의 개선 등의 연구가 최근에 계속

진행되고 있다. 그 중에서도 분무도장,<sup>(3)</sup> 실층제유포,<sup>(4)</sup> 프린터에서의 잉크분사<sup>(5)</sup> 등에서 많이 응용되고 있는 정전기 분무 원리를 일반적인 SDA로 적용하여 SO<sub>2</sub> 제거 효율 증대 가능성을 진단하는 연구가 정재윤 등<sup>(6)</sup>에 의해 수행되었다.

정전기 분무(electrostatic sprayinig, electro-spray)란 일반적으로 액체가 공압적인 방법이나 다른 방법에 의해 분사된 뒤에 전기장이 분사된 액적을 대전시키고 크기를 작게 만 드는 것을 의미하고, 좁은 의미로는 전기장이 대전현상 뿐만 아니라 미세한 액적의 분무의 역할까지 하는 수력학적 전기분무(electrohydrodynamic spray)를 의미한다. 즉, 대전현상으로 인해 전하는 주로 액체표면으로 물리게 되며, 이때 액체표면의 형태는 표면장력에 의하여 유지되지만 전기장 세기가 표면장력보다 커지면 액체표면에서의 전하들간의 강한 쿨롱 반발력으로 인하여 액체가 불안정해지면서 미립화되어 액적들을 형성한다. 또한 하전된 입자는 이온화된 공해물질과의 접촉이 용이하며 전기장의 분포에 따라 입자의 움직임을 쉽게 제어할 수 있다. 이러한 정전기 분무 현상에서 노즐과 판 사이에 분사된 액적들의 거동영역은 Fig. 2와 같이 크게 대전지역, 전달지역, 부착지역으로 나누어진다.<sup>(7)</sup> 액적의 대전 메커니즘은 크게 전도대전(conduction charging)과 유도대전(induction charging) 방법으로 구별된다. Fig. 2에서 노즐에 고전압이 부가된다면 초기에 전기적으로 중성인 액체가 노즐을 통과하면서 부가전압의 극성으로 대전되어 분무된다. 반면, 노즐을 접지시키고 수 cm 떨어진 거리에 고전압이 가해지는 판을 위치시키면 액적들이 부가 전압의 극성과 반대로 대전되어 분무되는 현상이 발생한다. 전자의 경우를 전도대전, 후자를 유도대전이라고 한다.<sup>(8)</sup> 두 가지 메커니즘은 대전 과정에서의 큰 차이는 없

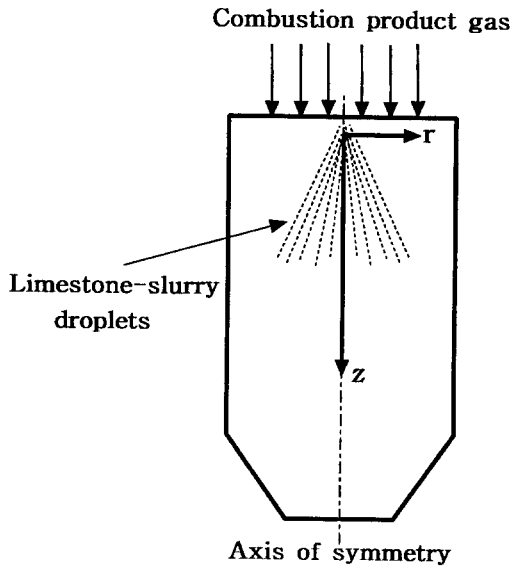


Fig. 1 SDA schematics.

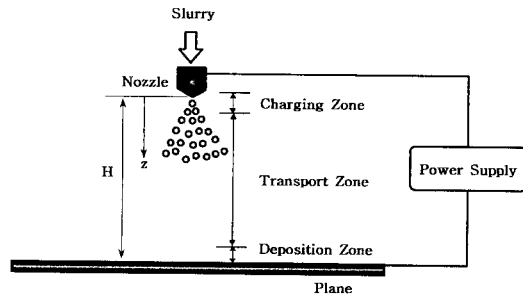


Fig. 2 Droplet behavior zones when a high voltage is applied between the nozzle and the plane.

지만 응용하고자 하는 용도와 기술적인 문제점 등에 대한 적절한 고려가 필요하다.

비교적 분무 유량이 많은 응용분야에서의 정전기 분무 연구로 Elmoursi와 Speck<sup>(7)</sup>이 회전식 종모양 분무기를 사용한 정전기 분무도장에서 공간전하를 고려하여 전기장의 세기 등을 구하였고, Castle과 Inculet<sup>(9)</sup>은 과수원 분무에서의 공간전하의 영향을 부착물 측면에서 살펴보았다. Pilat 등<sup>(10)</sup>은 세정기 내에서 하전된 액적의 입자 제거 효율향상을 실험적으로 나타냈으며 Sumiyoshitani 등<sup>(11)</sup>은 하전된 액적으로의 미세 입자 포집을 가시화하였다. Yang과 Carleson<sup>(12)</sup>은 다양한 액체의 분사시 전기장이 액적 전하 밀도, 액적 부피, 액적의 속도, 물질전달률 및 흡수율 등에 미치는 영향을 실험적으로 파악하였다. 또한 산성가스 제거 측면에서의 연구로 Carleson과 Berg<sup>(13)</sup>는 0.5, 1.0, 1.5m<sup>3</sup>/min의 유량으로 순수한 물을 분사하는 모세관형 노즐에 8.0 kV/cm까지의 전기장을 가했을 때 SO<sub>2</sub>의 액적으로의 흡수량이 증가함을 보였으며 전기장을 가했을 경우에 생기는 액적의 직경과 같은 직경을 수력학적으로 얻기 위해서 상대적으로 적은 동력이 소요됨을 보였다. 본 연구와 유사한 소석회 슬러리 분사의 응용 연구로서 최근 Wang 등<sup>(14)</sup>은 30m<sup>3</sup>/min의 슬러리 유량에 대해 10~35 kV로 전압을 변화시켜가며 실험을 수행한 결과 액적의 직경과 비전하량의 변화를 보여주었다. 정재윤 등<sup>(6)</sup>은 실험실 규모의 SDA 장치내에서 15, 25, 35m<sup>3</sup>/min으로 소석회 슬러리를 분사하는 노즐에 -10~10 kV의 전압을 가하여 SO<sub>2</sub> 제거효율의 향상을 결과로 얻어서 높은 유량에 대해서도 정전기 분무의 적용 가능성을 확인하였다.

본 연구는 정재윤 등<sup>(6)</sup>에 대한 계속 연구로서 먼저 SDA 내에서 열 및 물질전달, 화학반응, 분무 입자 거동을 살펴보고 SO<sub>2</sub> 제거를 위한 최적 분무 조건을 정성적으로 파악하고 정전기 분무 원리를 적용했을 때의 분무형태 변화를 가시화하였다. 그

리고 온도 등 실험 조건의 변화를 통해서 정전기 분무의 성능 향상을 위한 최적의 형상 및 대전 메커니즘에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 수치계산

본 연구에서는 FLUENT를 이용하여 SDA 내 열유체 유동 현상을 규명하였으며 질량, 운동량, 에너지, 농도 보존 방정식 등을 주위 유동장, 분무 액적 각각에 대해 적용 해석한 후 서로 연계시켜 주유동과 입자를 동시에 계산하는 two-way coupling 방법을 사용하였다. 주유동에 분산되어 있는 입자의 체적분율이 약 0.01 이하로 작기 때문에 Euler-Lagrange 방법을 사용하였으며 주유동은 2차원 축대칭, 비압축성, 정상상태 난류 유동으로 가정하였고 SDA 내로 균일한 속도로 유입된다고 보았다. Soret 및 Dufour 효과는 무시하였으며 입자 운동에 대해서는 중력에 의한 영향만 고려하였다. 계산에 사용된 모든 물성치는 상수라고 가정하였다. 반응기 형상은 실험에 사용된 크기에 바탕을 두었으며 Fig. 3과 같이 높이 1 m, 가스가 유입되는 입구부분의 직경은 0.3 m, 가스가 배출되는 출구부분은 0.1 m로 선정하였다.

노즐의 위치  $r=0$ ,  $z=0.05$  m에서 유입되는 슬러리 유량은 15, 25, 35m<sup>3</sup>/min으로 고정하였고 각도  $\theta$ 의 원추형태로 N개의 액적들이 283 K의 온도로 분사된다고 가정하였다. 노즐에 주입되는 공기의 유량은 3l/min으로 고정시켰다. SDA로 주입되는 연소생성물로는 SO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>로 가정하였고 각각의 질량분율은 0.05, 0.95라고 하였다. 가스의 유입속도는 0.1 m/sec로 고정하였으며 유입온도는 300 K로 정하였다. SDA 입구와 출구를 제외한 외벽은 단열조건을 적용하였다. Ca(OH)<sub>2</sub> 슬러리와 SO<sub>2</sub>와의 화학 반응, SO<sub>2</sub>의 물에 대한 확산<sup>(2)</sup>을 함께 고려하여 SO<sub>2</sub> 제거에 영향을 미치는 인자들을 정성적으로 비교, 파악하였으며 SO<sub>2</sub> 제거 효

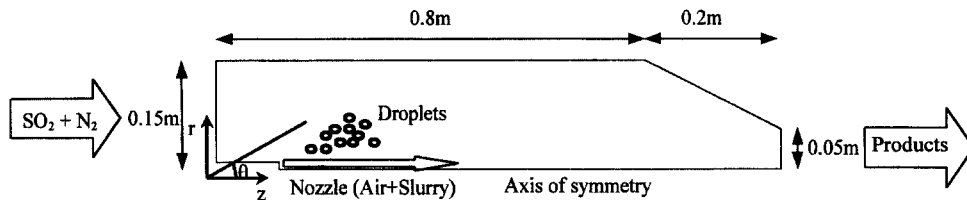
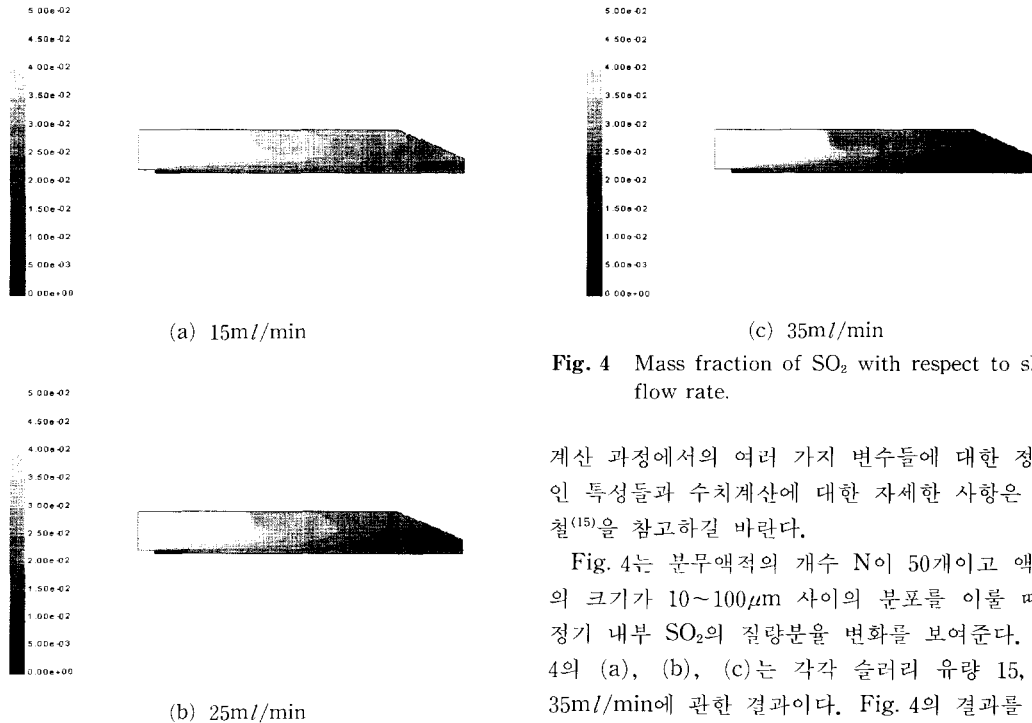


Fig. 3 Calculation domain.

**Table 1** Properties and constants for calculation.

Physical Properties <sup>(16)</sup>				
	SO <sub>2</sub> (gas)	water (liquid)	Ca(OH) <sub>2</sub> (solid)	CaSO <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O (solid)
Molecular weight (kg/kmol)	64.09	18	74.09	156
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2.77	998.2	2240	2320
Constant pressure specific heat (J/kg-K)	731	4182	1181	579
Thermal conductivity (W/m-K)	0.0104	0.6		
Viscosity (kg/m-s)	1.2e-05	0.001003		
Latent heat (J/kg)		2263073		
Vaporization temperature (K)		284		
Binary diffusivity (cm <sup>2</sup> /sec)	1.49e-05	1.49e-05		
Constants for chemical reaction <sup>(2)</sup>				
Mass stoichiometric coefficient	Pre-exponential factor (1/sec)	Activation energy (kJ/kmol)		
1.2	3.0634e+07	4.09e+04		

**Fig. 4** Mass fraction of SO<sub>2</sub> with respect to slurry flow rate.

계산 과정에서의 여러 가지 변수들에 대한 정성적인 특성들과 수치계산에 대한 자세한 사항은 변영철<sup>(15)</sup>을 참고하길 바란다.

Fig. 4는 분무액적의 개수  $N$ 이 50개이고 액적들의 크기가  $10\sim 100\mu\text{m}$  사이의 분포를 이룰 때 세정기 내부 SO<sub>2</sub>의 질량분율 변화를 보여준다. Fig. 4의 (a), (b), (c)는 각각 슬러리 유량 15, 25, 35ml/min에 관한 결과이다. Fig. 4의 결과를 바탕으로 슬러리 주입으로 인한 세정기 출구에서의 SO<sub>2</sub> 제거 효율  $\eta_s$ 를 계산했다. 제거효율은 다음과 같이 정의된다.

율을 산출하였다. 계산에 사용된 액적과 기체의 물성치 및 필요한 상수들은 Table 1에 나타내었다.

$$\eta_s = 1 - \frac{[\text{SO}_2]_{w/o \text{ slurry}}}{[\text{SO}_2]_{w/ \text{ slurry}}} \quad (1)$$

분자와 분모는 각각 슬러리를 분사시켰을 때와 슬러리가 없을 때의 SO<sub>2</sub> 농도를 의미한다. Fig. 5를 보면 슬러리 유량 15, 25, 35ml/min에 대한 SO<sub>2</sub> 제거 효율이 약 48.5, 64.8, 75.1%임을 알 수 있다. Fig. 5는 또한 실험에서 구한 SO<sub>2</sub> 제거효율을 보여주는데(뒤에서 언급) 계산으로 구한 효율과 실

험에서 구한 36, 54, 63%를 비교할 때 대략 10% 정도의 오차가 남을 알 수 있다.

### 3. 실험장치와 방법

정전기 분무 원리를 가스 세정 시스템에 적용시키기 위해 Fig. 6과 같은 실험실 규모의 세정기를 이용하였다.<sup>(6)</sup> 주입시키는 슬러리의 농도는 노즐의 막힘 현상을 방지하고, 전압에 의한 효과를 잘 살펴볼 수 있도록, 일반적인 분무 건조 흡착기에서 사용하는 값(5~15 wt%)보다 낮은 2 wt%로 하였다. 따라서 SO<sub>2</sub>와 CaO의 몰농도의 비로 계산되는 화학 양론비(Ca/S)는 약 0.05가 되며 이는 실제의 시스템에서 요구되는 1.2<sup>(17)</sup>보다 작다. 또한 슬러리 제조시 CaO의 낮은 용해도로 인한 침전과 막힘 현상을 방지하기 위해서 외관상 담황갈색을 띄며 음이온성을 가지는 첨가제(Temol NN 8906)를 CaO 무게의 1% 정도 첨가하여 CaO의 침전 양을 줄였다.

실험은 먼저 노즐 부분에 직접 고전압을 가하는 전도대전 형태를 취하여 -10~10 kV 전압을 가하였다. 접지판은 노즐 아래 3 cm 부분에 위치시켰으며, 분사된 슬러리 액적이 판에 맺히지 않고 통

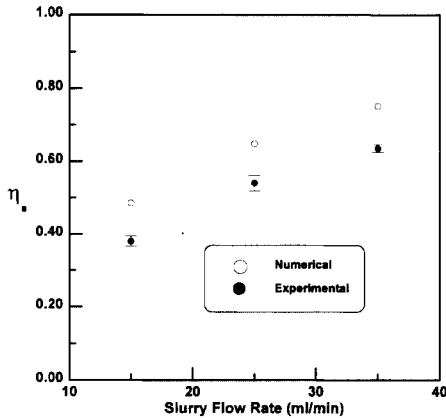


Fig. 5 Removal efficiency of SO<sub>2</sub> with respect to slurry flow rate.

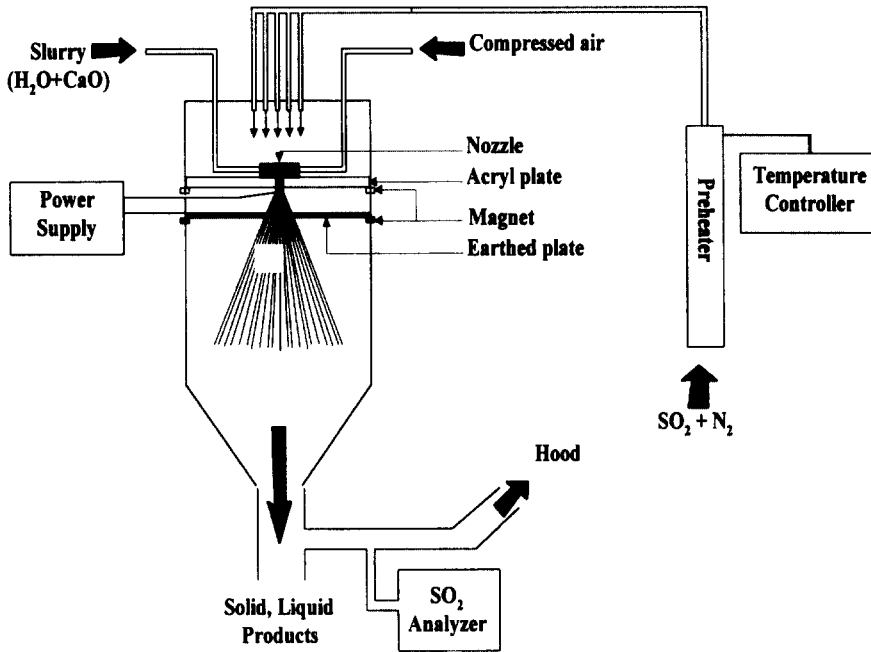


Fig. 6 System schematics.

과할 수 있도록 방사 형태를 사용하였다. 주어진 슬러리 유량 공급시 부가전압을 1 kV씩 변화시켜가며 각각의 전압에 대한 SO<sub>2</sub> 농도를 측정하였고 노즐과 집지판 사이의 전류량을 측정하였다. SO<sub>2</sub> 농도는 반응기 출구에 프로브를 삽입하여 측정하였고 전류측정에는 디지털 전류계를 이용했다. 노즐에 주입되는 슬러리 유량은 15, 25, 35 ml/min으로 변화시켰다. 마찬가지로 전극의 형태를 위 방법과는 반대로 방사 형태의 판에 고전압을 가하고 슬러리가 분무되는 노즐을 접지시키는 유도대전 형태를 취하여 동일한 방법으로 실험하고 서로의 결과들을 비교하였다. 그리고 슬러리의 온도 변화가 전류량과 SO<sub>2</sub> 제거 효율에 어떤 영향을 주는지 살펴 보았다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 분무 가시화

NIKON F801 카메라, ASA 1600 필름, 62 mm 구경 28~82 mm ZOOM 렌즈를 사용하여 상온의 슬러리를 분무량 15ml/min, 그리고 압축공기를 3l/min으로 고정된 상태에서 실행되었다. Fig. 7은 셔터 스피드를 1/8000 sec로 하여 촬영한 결과이다. 먼저 (a)는 전기장을 가하지 않은 상태이며 (b)는 노즐에 직접 -10 kV를 가했을 때인데 전기장을 가한 (b)의 액주의 길이가 (a)에 비해 현저히 줄어들어 볼 수 있고 반발력으로 인한 분무 각도의 증가와 액적의 크기도 약간 작아지는 것을 볼 수 있다. 액적들의 크기는 전기장을 가하지 않았을

때 약 300~1900  $\mu\text{m}$ 이지만 전기장을 가했을 때 대체로 균일하게 약 150~600  $\mu\text{m}$ 로 작아진다. 이는 계산<sup>(6)</sup>에 의해서 얻어진 1900  $\mu\text{m}$ (전기장이 없는 경우)와 200  $\mu\text{m}$ (전기장이 존재하는 경우)와 정성적으로 비슷한 결과이다.

##### 4.2 전류 및 전압 분포

Fig. 8은 전도대전과 유도대전 형태를 가지고 각각 -10~10 kV 범위에서 1 kV씩 변화시켜가면서 상온의 슬러리를 분사했을 때 측정된 전류값의 평균을 나타낸다. 이 때 측정기기에서 보여주는 전류값의 편차는 무시할 정도로 작았다. Fig. 8에서 전도대전의 경우 0~1.55  $\mu\text{A}$  사이의 값으로 극성에

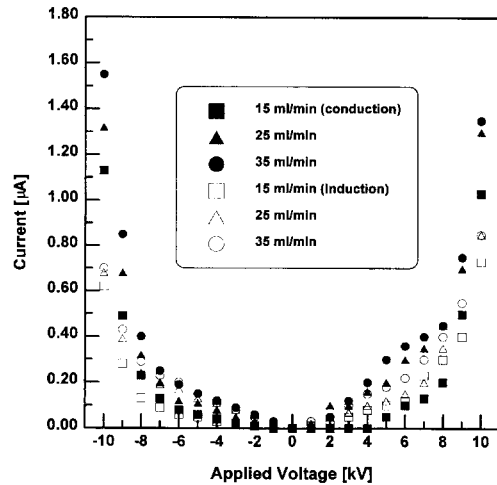
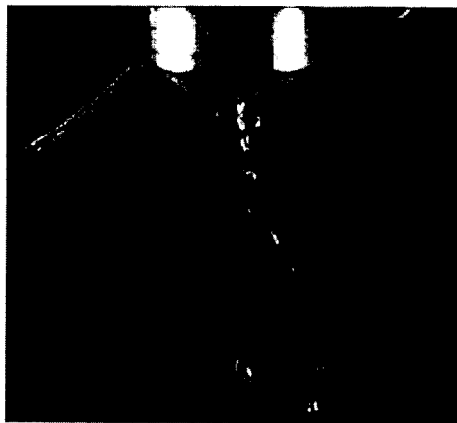


Fig. 8 Current/voltage characteristics.



(a) (a) 0 kV



(b) -10 kV

Fig. 7 Visualization with 1/8000 speed (slurry flow rate=15ml/min).

상관없이 대칭형태를 보이며 특히 ±8 kV 이상에서 급격한 전류량의 증가를 보여주고 있어서 일정한 전압 이상에서 액적의 하전량이 증가하고 또한 액적의 분열을 가지고 음을 알 수 있다. 유도대전 경우 역시 부가 전압에 대해 전류값이 대칭형태를 가지면서 일정하게 증가하는 경향을 보이나 전도대전에 비해서 상대적으로 낮은 0~0.85 μA 사이의 전류값을 가진다. 액적의 대전 메커니즘에 따른 전류량을 볼 때 전도대전에서 음전압을 가했을 경우와 유도대전에서 양전압을 가했을 경우, 즉 둘다 액적이 음극성으로 대전된 경우 전류량이 상대적으로 약간 더 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 9는 상온의 슬러리 유량 25ml/min에서 대전 메커니즘에 따른 액적의 비전하량(charge to mass ratio)을 비교한 그래프이다. 비전하량  $q_d$ 는 노즐과 판 사이에 흐르는 전류량  $I$ 와 노즐에 유입되는 슬러리 유량  $m$ 으로부터 다음과 같이 계산되었다.<sup>(6)</sup>

$$q_d = \frac{q_p}{m_p} = \frac{I}{m} \quad (2)$$

$m_p$ 와  $q_p$ 는 단위액적의 질량과 전하량을 의미한다. Fig. 9에서 전도대전이 유도대전보다 액적의 비전하량이 크게 나타났는데 이는 전도대전의 경우 노즐 근처에서의 전기장 세기가 유도대전에 비해 상대적으로 크기 때문에<sup>(7)</sup> 액적의 대전량에서 차이가 나타나기 때문이다. 즉, 이를 검증하기 위해서 본 실험에서는 전도, 유도대전의 경우에 대해서 1000 : 1 고전압 프로브를 사용하여 노즐과 판 사이에서의 중심축 방향 전압분포를 측정하여 Fig. 10과 같은 결과를 얻었다. Fig. 10에서 볼 때 10 kV 전도대전의 경우와 10 kV 유도대전을 비교하면 전도대전의 경우가 노즐 근처에서 전압구배(전기장 세기)가 크며 마찬가지로 -10 kV 전도대전과 -10 kV 유도대전의 경우에도 같은 경향을 볼 수 있다. Fig. 10은 또한 공간 전하가 없는 경우에 Jones와 Thong에 의해 얻어진 해석해<sup>(18)</sup>를 보여주며 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

### 4.3 전기장 세기와 SO<sub>2</sub> 제거 효율

먼저 슬러리를 분사하지 않은 상태에서, 즉 압축공기와 SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>를 분사했을 때 세정기 출구에서의 SO<sub>2</sub> 농도를 측정하여 약 1100 ppm을 얻었다. 다음 일정시간 동안 15, 25, 35ml/min 슬러리를 상

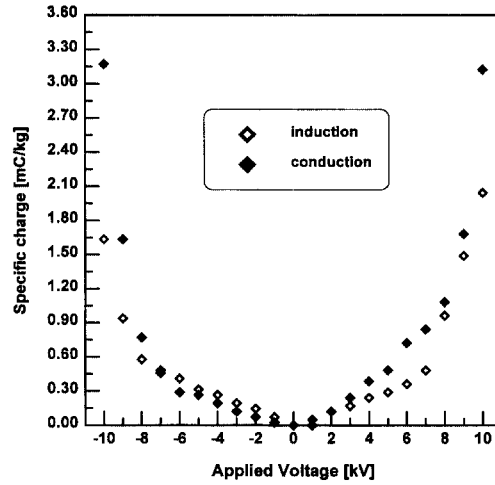


Fig. 9 Charge to mass ratio with respect to applied voltage (slurry flow rate=25ml/min).

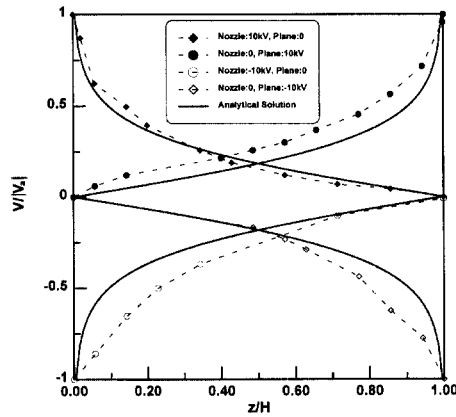


Fig. 10 Voltage distributions along the center line between the nozzle and the plane ( $V$  : voltage,  $V_a$  : applied voltage).

온에서 분사시킨 뒤 정상상태에 도달했을 때의 SO<sub>2</sub> 농도를 측정된 결과 각각 약 700, 500, 400 ppm을 얻을 수 있었다. 따라서 전기장을 가하지 않았을 때 세정기의 효율은 약 36, 54, 63% 정도인데 (Fig. 5), 일반적인 세정기의 효율(약 80%)보다 낮은 이유는, 양론비를 0.05로 낮추었고 전기장 효과를 보기 위해 압축공기의 유량을 작게 하여 노즐 분무 각도 및 액적의 크기면에서 차이가 발생하면서 비롯된 것으로 보인다. 위의 결과를 바탕으로 각각의 슬러리 유량에 대해 전압을 -10~10 kV범위에서 1 kV씩 변화시켜가며 SO<sub>2</sub> 농도를 측정하였다. Fig. 11은 전도대전과 유도대전 각각의 형태를

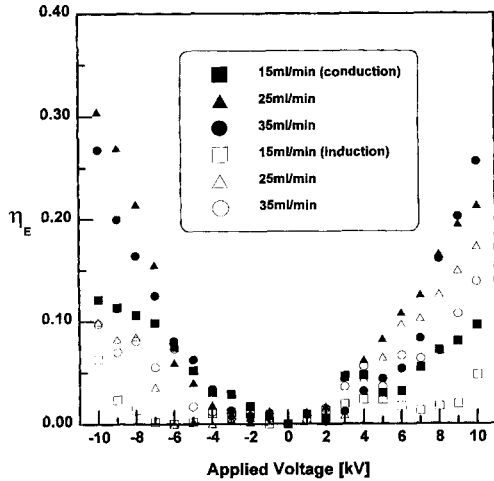


Fig. 11 Electrostatic removal efficiency of  $\text{SO}_2$  with respect to applied voltage.

면 상태에서 다음의 식으로 정의되는 정전기적  $\text{SO}_2$  제거효율  $\eta_E$ 를 나타낸다.

$$\eta_E = 1 - \frac{[\text{SO}_2]_{w/\text{Electric field}}}{[\text{SO}_2]_{w/o \text{ Electric field}}} \quad (3)$$

여기서 분모와 분자는 각각 전기장을 가하지 않고 정상상태에 도달했을 때 측정된  $\text{SO}_2$  평균 농도와 전기장을 가했을 때 측정된  $\text{SO}_2$ 의 평균 농도이다. 측정은 3회 내지 4회 하였으며 Fig. 11에서 표준편차는 0.005~0.02였다. Fig. 8에서와 같이 Fig. 11에서도 유도대전인 경우 양전압에서 약간 높은 효율을 보이지만 대략 전압의 극성에 무관함을 보여 준다. 또한 전도대전 형태가 유도대전보다 10~20% 정도 높은 효율을 보이고 있으며  $\pm 8$  kV 이상의 고전압에서 증가량이 커지는 경향을 볼 수 있다. Fig. 11은 또한 주어진 전기장 세기에서 미립화의 촉진으로 인한  $\text{SO}_2$  제거 효율 변화는 25, 35ml/min의 슬러리 유량에 대해서 별 차이를 보이지 않고 있다.

식 (1)에서 정의한 일반적인 세정기 효율과 식 (3)에서 정의되는 전기장 효과를 함께 고려하였을 경우 본 세정기의 총효율  $\eta_T$ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\eta_T = 1 - (1 - \eta_s)(1 - \eta_E) \quad (4)$$

따라서 슬러리 유량 15, 25, 35ml/min에 대해서 유도대전의 경우 39, 60, 69%, 그리고 전도대전의

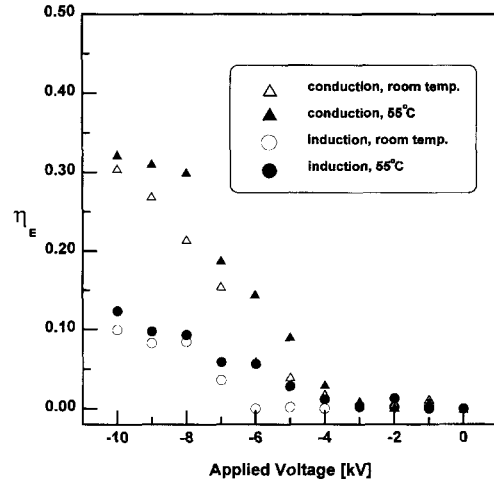


Fig. 12 Electrostatic removal efficiency of  $\text{SO}_2$  at slurry temperature of  $55^\circ\text{C}$  (slurry flow rate =  $25\text{ml}/\text{min}$ ).

경우 42, 66, 73%의 총효율을 얻을 수 있다. 이와 같이 두 메커니즘에서의 제거효율 차이는 다음과 같이 설명된다. 전도대전의 경우 Fig. 2에서 노즐 근처 대전지역의 전기장 세기에 비례하여 그 근처에서 액적들이 대전되는 양이 증가함에 따라 쿨롱 반발력 세기 역시 증가하여 분사각도와 액적들의 총표면적이 증가되어서  $\text{SO}_2$  제거에 유리하다. 반면 유도대전의 경우 판과 집진된 노즐사이의 거리에 의해 판 근처의 전기장 세기는 증가하는 반면 상대적으로 노즐 근처의 전기장 세기가 감소하기 때문에 액적의 대전량이 줄어들어 분사각도가 넓어지지 못함에서 기인한 것으로 보인다.

#### 4.4 슬러리 온도의 영향

유량  $25\text{ml}/\text{min}$ 으로 분무되는 슬러리의 온도를 변화시켰을 때 전류에 미치는 영향은 약 5% 미만으로 무시할 정도였다. 그러나 슬러리 온도상승은 Fig. 12에 나타난 바와 같이 정전기적  $\text{SO}_2$  제거효율에 영향을 미침을 알 수 있다. 분무 액적들의 온도가 올라감에 따라 표면장력이 감소하여 그만큼 액적의 분열이 시작되는 임계전압이 낮아져서<sup>(19)</sup> 미립화의 효과를 증가시키기 때문에  $\text{SO}_2$  제거 효율이 약간 상승한 결과가 나왔다. Fig. 11에서와 마찬가지로 측정은 3~4회 하였으며 Fig. 12에서의 표준편차는 대략 0.005~0.04였다.



## 5. 결 론

정전기 분무 원리를 일반적인 SDA에 적용하여 SO<sub>2</sub> 제거효율 증가와 정전기 분무의 성능 향상을 위한 최적의 형상 및 대전 메커니즘에 대한 연구를 수행하였다. 먼저 SDA 내에서 SO<sub>2</sub> 농도분포를 수치계산 하였으며 출구에서의 SO<sub>2</sub> 제거효율을 산출하여 실험결과와 비교했다. 그리고 정전기 분무 원리를 적용했을 때의 분무형태 변화를 가시화하여 노즐에서 분무되는 액주의 길이가 전기장을 가하지 않았을 때에 비해서 현저히 줄어들고 반발력으로 인한 분무 각도의 증가와 액적의 크기도 균일하게 약간 작아지는 것을 볼 수 있었다. SDA 내부로 분무되는 액적을 대전시키기 위해서 전도대전과 유도대전 형태를 취하여 각각 -10~10 kV 범위에서 1 kV씩 변화시켜가면서 전류값과 SO<sub>2</sub> 제거효율을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

◆ 동일한 슬러리 유량 조건에서 전도대전 방법이 유도대전 방법에 비해 대전 지역에서의 전기장 세기 차이에 따른 영향으로 액적이 가지는 비전하량이 더 크고 ±8 kV 이상의 고전압에서 그 증가율이 커진다.

◆ 동일한 슬러리 유량 조건에서 전압의 극성에 무관하게 비슷한 SO<sub>2</sub> 제거효율을 보이고 있으며 전기장 세기에 의한 효율 상승은 전도대전 형태가 유도대전에 비해서 10~20% 정도 높은 효율을 보이고 있는데 그 증가율이 ±8 kV 이상의 고전압에서 두드러진다.

◆ 슬러리 액적의 온도 상승은 액적의 표면장력 감소를 유발하여 액적이 분열되기 시작하는 임계전압을 낮추어 미립화 효과를 증가시켜서 SO<sub>2</sub> 제거효율이 약간 상승한 결과를 나타냈다.

## 후 기

본 연구는 과학재단 목적기초(과제번호 95-0200-05-01-3) 지원의 일부로 진행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. 그리고 SO<sub>2</sub> 가스 분석기를 대여해 준 홍익대학교 장호명 교수님께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Masters, K., 1972, *Spray Drying : An Introduction to Principles, Operational Practice and Applications*, Leonard Hill Books, London.
- (2) Ruhland, F., Kind, R. and Weiss, S., 1991, "The Kinetics of the Absorption of Sulfur Dioxide in Calcium Hydroxide Suspension," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 46, No. 4, pp. 939~947.
- (3) Hines, R. L., 1966, "Electrostatic Atomization and Spray Painting," *J. Appl. Phys.*, Vol. 37, pp. 2730~2736.
- (4) Law, S. E., 1983, "Electrostatic Pesticide Spraying : Concepts and Practice," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. IA-19, pp. 160~168.
- (5) Agui, T. and Nakajima, M., 1977, "Drop Formation Characteristics of Electrostatic Ink Jet using Water-based Ink," *IEEE Trans. Electron Dev.*, Vol. 24, pp. 262~266.
- (6) 정재윤, 변영철, 황정호, 1997, "열시스템에서 생성된 SO<sub>2</sub> 가스의 배출저감을 위한 정전기 분무원리의 응용," 대한기계학회논문집 제21권, 제8호, pp. 1068~1076.
- (7) Elmoursi, A. A. and Speck, C. E., 1991, "Electrical Characterization of a Charged Workpiece Grounded-Sprayer Electrostatic Painting System," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 27, No. 2, pp. 311~315.
- (8) Greason, W. D., 1992, *Electrostatic Discharge in Electronics*, Wiley, England.
- (9) Castle, G. S. P. and Incelet, I. I., 1983, "Space Charge Effects in Orchard Spraying," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. IA-19, No. 3, pp. 476~480.
- (10) Pilat, M. J., Jaasund, S. A. and Sparks, L. E., 1974, "Collection of Aerosol Particles by Electrostatic Droplet Spray Scrubbers," *Env. Sci. Tech.*, Vol. 8, pp. 360~362.
- (11) Sumiyoshitani, S., Okada, T. and Hara, M., 1984, "Direct Observation of the Collection Process for Dust Particles from an Air Stream by a Charged Water Droplet," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. IA-20, No. 2, pp. 274~281.

- (12) Yang, W. and Carleson, T. E., 1990, "Several Effects of Electric Fields on Liquid Extraction," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 26, No. 2, pp. 366~373.
- (13) Carleson, T. E. and Berg, J. C., 1983, "The Effect of Electric Fields on the Absorption of Pure Sulfur Dioxide by Water Drops," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 38, No. 6, pp. 871~876.
- (14) Wang, S. H., Chang, J. S., and Berezin, A. A., 1993, "Atomization Characteristics of Electrohydrodynamics Limestone-water Slurry Spray," *J. Electrostatics*, Vol. 30, pp. 235~246.
- (15) 변영철, 1998, 전기미립화를 이용한 반전식 세정기의 효율향상에 대한 수치 및 실험적 연구, 연세대학교 석사학위논문.
- (16) *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 1993, edited by D. R. Lide, CRC Press, Ann Arbor, MI.
- (17) 김진규, 1993, 분무건조기형 준전식 세정기를 이용한 산성 및 휘발성 유기가스의 동시제거, KAIST 석사학위논문.
- (18) Jones, A. R. and Thong, K. C., 1971, "The Production of Charged Monodisperse Fuel Droplets by Electrical Dispersion," *J. Phys. D : Appl. Phys.*, Vol. 4, pp. 1159~1166.
- (19) Michelson, D., 1990, *Electrostatic Atomization*, Adam Hilger, England.