

〈논 문〉

## 열시스템에서 생성된 SO<sub>2</sub> 가스의 배출저감을 위한 정전기 분무 원리의 응용

정재윤\* · 변영철\* · 황정호\*\*

(1997년 1월 16일 접수)

### An Application of the Electrostatic Spray Technology to Increase Scrubbing Efficiency of SO<sub>2</sub> Emitted from Thermal Systems

Jae-Yoon Jung, Young-Chul Byun and Jung-Ho Hwang

**Key Words :** Spray Drying Absorber (SDA), Electrostatic Spray (정전기 분무), Limestone/Water Slurry (소석회/물 슬러리), Coulombic Repulsion (쿨론 반발)

#### Abstract

Emission control of acid exhaust gases from coal-fired power plants and waste incinerators has become an increasing concern of both industries and regulators. Among those gaseous emissions, SO<sub>2</sub> has been eliminated by a Spray Drying Absorber (SDA) system, where the exhaust gas is mixed with atomized limestone-water slurry droplets and then the chemical reaction of SO<sub>2</sub> with alkaline components of the liquid feed forms sulfates. Liquid atomization is necessary because it maximizes the reaction efficiency by increasing the total surface area of the alkaline components. An experimental study was performed with a laboratory scale SDA to investigate whether the scrubbing efficiency for SO<sub>2</sub> reduction increased or not with the application of a DC electric field to the limestone-water slurry. For a selected experimental condition SO<sub>2</sub> concentrations exited from the reactor were measured with various applied voltages and liquid flow rates. The applied voltage varied from -10 to 10kV by 1kV, and the volume flow rate of slurry was set to 15, 25, 35 ml/min which were within the range of emission mode. Consequently, the SO<sub>2</sub> scrubbing efficiency increased with increasing the applied voltage but was independent of the polarity of the applied voltage. For the electrical and flow conditions considered a theoretical study of estimating average size and charge of the atomized droplets was carried out based on the measured current-voltage characteristics. The droplet charge to mass ratio increased and the droplet diameter decreased as the strength of the applied voltage increased.

#### 기 호 설 명

A : 액주의 단면적  
d<sub>p</sub> : 액적 크기  
E<sub>a</sub> : 전기장 세기

e : 기본 전하량  
I : 전류  
m : 질량 유속  
m<sub>p</sub> : 액적 질량  
N : 액적의 개수  
q : 단위질량 당 액주의 전하량

\*연세대학교 대학원 기계공학과

\*\*회원, 연세대학교 기계공학과

$q_d$  : 단위질량 당 액적의 전하량  
 $U$  : 에너지  
 $V$  : 전기포텐셜

#### 그리스문자

$\gamma$  : 표면장력  
 $\epsilon_0$  : 진공 투과율  
 $\rho$  : 밀도  
 $\sigma$  : 전기전도상수

#### 하첨자

$p$  : 액적

## 1. 서 론

발전소, 소각로 등의 열 시스템에서 생성된 배가스내의 SO<sub>x</sub>의 배출을 억제하기 위해서 후처리용 세정장치가 사용되고 있다. 여러 세정장치 중 반건식 방식인 스프레이 건조 흡착기(Spray Dryer Absorber)는 황함량이 높은 석탄을 연소하는 대형 발전소 등에서 이미 탈황 설비로 많이 쓰이고 있는데 그 원리는 다음과 같다. 먼저 물과 석회(lime, CaO)를 혼합시켜 얻은 소석회(slaked lime, Ca(OH)<sub>2</sub>) 슬러리를 노즐로 주입시킨 뒤 이 알칼리 용액을 미립화(atomization)하여 산성가스를 포함한 고온의 배가스와 혼합시킨다. 미립화를 시키는 이유는 미립화에 의해 표면적이 커지면서 알칼리와 배가스의 접촉을 증가시켜 반응효율이 커지기 때문이다. 이 혼합으로 인하여 산성가스가 미립화된 액적(droplet)에 흡수되고 흡수된 산성가스는 액적내에서 확산에 의해 반응면으로 이동해 액상의 반응면에서 화학반응이 일어나 CaSO<sub>3</sub> 등의 입자상 염이나 미반응 알칼리가 된다. 이때 중금속이나 다이옥신/퓨란 등이 흡착될 수 있다. 화학반응을 통하면서 물은 완전 증발하며 염과 미반응 알칼리는 미세입자가 되어 떠다니게 된다. 이들 고체입자 잔류물은 SDA의 바닥에서 포집되거나 비산재에 묻어서 배가스와 함께 하류 공정의 백하우스로 들어가서 포집된다.

배가스와 분무액적의 접촉면적을 증가시키기 위해서는 분무액적의 크기를 줄여야 하는데 이를 위해서 정전기분무(electrostatic spray)원리<sup>(1~4)</sup>를 이용하였다. 넓은 의미의 정전기분무는 액체가 공압적인 방법 등에 의해 분사된 뒤에 전기장이 분사된

액적을 대전시키고 크기를 작게 만드는 것을 의미하고, 좁은 의미로는 전기장이 대전현상뿐만 아니라 미세한 액적의 분무 역할까지 하는 것을 의미한다. 후자의 경우를 수력학적 정전기분무(electrohydrodynamic spray)라고 말하기도 한다. 정전기분무를 사용할 경우 얻을 수 있는 효과는 입자가 하전됨으로써 얻을 수 있는 효과로써, 이로 인해 미립화된 액적의 응집현상(coagulation, coalescence)을 막고 자가분산에 의해 좀더 세밀한 크기의 액적을 얻어낼 수 있다. 이는 하전된 입자표면의 전기적 반발력과 유체의 표면장력에 의한 상호작용을 통해서 입자들이 깨지는 현상에 기인한다. 또한 하전된 입자는 이온화된 공해물질과의 정착이 용이하며 전기장의 분포에 따라 입자의 움직임이 쉽게 제어할 수 있다. 이러한 효과를 이용할 수 있는 분야에서 정전기분무를 응용하고 있으며, 일반적인 응용분야는 분무도장, 프린터에서의 잉크분사, 살충제 유포 등이다. 현재까지는 정전기미립화현상에 대한 완전한 이론이 존재하지 않으므로 주로 경험적, 실험적인 방법에 의존해 왔다.<sup>(5)</sup> 지금까지의 연구에 의하면 정전기미립화과정에 영향을 미치는 인자로 전극의 형태, 압력, 노즐로의 액체유량, 그리고 분무액체의 전기전도성, 유전상수, 밀도, 점성계수, 표면장력 등이 있다. Law와 Bowen<sup>(6)</sup>은 이 중 액체의 전기전도성 변화가 액적분사에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다. 지금까지 가장 많이 사용되어 온 전극의 형태는 모세관-평판형으로 모세관 형태의 분사노즐에 고압을 걸어주고 노즐로부터 일정거리 떨어진 곳에 판형의 집전극을 위치시킨 형태이다.<sup>(7~10)</sup> 또 다른 형태의 전극배열로는 모세관-링-평판이 있다.<sup>(11)</sup> 노즐에 가해지는 전압의 극성에 대해서는 Hines<sup>(3)</sup>와 Wang 등<sup>(12)</sup>은 음전압을, Grace와 Marijnissen<sup>(13)</sup>과 Cloupeau와 Prunet-Foch<sup>(14)</sup>는 양전압을 추천하였으나 전기분무의 여러 모드는 모세관 끝에 걸어주는 전압의 극성과는 무관하다.

본 연구는 정전기분무식 장치에서 형성된 대전액적의 거동을 여러 운전조건과 상호연관시켜 이해한 뒤 이 원리를 SDA 방식에 적용하여 장치의 성능향상을 꾀함을 연구목표로 하였다. 본 연구의 목적은 부가전압이 SDA에서의 산성가스 제거효율을 증가시키는지 여부를 알고자 함이다. 노즐에서의 슬러리 분사는 일반 2유체 압력노즐 분사방식을 이용하고 여기에 추가적으로 전기장이 가해졌을 때의 효과를

살펴본다. 즉, 본 연구에서는 이유체 노즐에서 액적을 공압적인 방법에 의해 분사시킴과 동시에 고전압에 의해 대전시킴으로써 입자의 크기를 줄이는 넓은 의미의 정전기분무를 세정기에 응용하는 실험을 행할 것이며 그 결과를 이론과 비교해보기로 한다. 이를 위한 인자들간의 관계식으로는, 가해진 전압에 대한 두 전극 사이의 전압분포, 액적의 크기, 액적의 전하량 등이 있다. 참고로 김진규<sup>(15)</sup>의 연구에서는 일반 SDA 공정에서 분무되는 액적의 크기가 약 100~300  $\mu\text{m}$ 의 범위에 있다고 하였고 실험실 규모의 SDA 장치 유량으로 5~20 ml/min를 사용하였다. 본 연구에서는 정전기분무의 원리가 산성가스의 제거효율을 향상시킬 수 있는지의 여부에 가장 중점을 두고 있으므로 상온의  $\text{SO}_2$  가스를 실험에 이용했으므로 실제로는 습식 세정기에 더 가까울 것이나, 습식공정이 다이옥신이나 퓨란과 같은 중금속의 흡착메커니즘이 없고 효율이 조금 더 높은 것 이외에는 반전식 세정기와 크게 다를 바가 없으므로 본 연구에서의 정전기분무 원리의 실제공정으로의 적용은 일반 세정장치를 그 대상으로 한다.

## 2. 정전기분무 이론

일반적으로 노즐에 고전압이 부가되면 노즐근처에서 액주(jet)가 시작되다가 곧 미립화된 액적이 형성된다. 이때 노즐과 접지판사이에 흐르는 전류  $I$ 는 다음과 같이 표시된다.<sup>(3)</sup>

$$I = \sigma EA + \dot{m}q \quad (1)$$

첫번째 항은 전도에 의한 전류량(conduction current)이고 두번째 항은 대류에 의한 전류량을 의미하는데(charge transport current),  $E$ 는 전기장 세기,  $\sigma$ 는 전기전도상수,  $q$ 는 단위질량 당 유체가 지나는 전하량(비전하량, specific charge),  $\dot{m}$ 은 질량유량,  $A$ 는 액주의 단면적이다. 따라서 액주 내에서는 전도가 지배적이다가 액주로부터 액적이 분리되어 형성되는 순간부터의 전류는 주로 대류에 의해서만 이루어지는데( $I \approx \dot{m}q$ ) 이때 생성된 액적의 크기가  $d_p$ 로 균일하고 액적 1개의 전하량이  $q_p$ 라고 하면 액적의 비전하량  $q_d (= q_p/m_p)$ 는

$$q_d = I/\dot{m} \quad (2)$$

이 된다. 여기서  $m_p$ 는 액적 1개의 질량이다(=

$\pi d_p^3 \rho / 6$ ,  $\rho$ =액체의 밀도). 그러므로 접지판에서의 전류값  $I$ 와 노즐에 주입되는 액체의 질량유량  $\dot{m}$ 을 실험에 의해 구할 수 있다면 액적의 비전하량  $q_d$ 를 계산할 수 있다. 식 (2)는 또한 다음과 같은 방법으로도 유도할 수 있다. 액주로부터 분리되어 단위 시간 당 접지판에 도달하는 액적의 개수를  $\dot{N}$ 라 하면  $I = \dot{N}q_p$ ,  $\dot{m} = \dot{N}m_p$ 의 관계식이 성립된다. 이 두 식에서  $\dot{N}$ 을 소거하면 식 (2)가 유도된다.

만약 관심사가 액적의 전하량  $q_p$ 를 알기 위해서 라면 액적의 크기  $d_p$ 를 먼저 알아야 한다. 이를 위해서 액체가 전기적으로 이상도체이고 액적의 크기가 균일하다고 가정하고 액주의 분열메커니즘에서 외부의 영향에 의한 2차분열을 고려하지 않은 경우 에너지 최소화 원리를 이용해 보자. 액주가 크기  $d_p$ 의 액적으로 쪼개진 뒤 갖는 에너지  $U$ 는 다음과 같이 표면장력  $\gamma$ 에 의한 에너지와 전기에너지의 합이 된다.<sup>(17)</sup>

$$U = \pi d_p^2 \gamma + \frac{q_p^2}{4\pi\epsilon_0 d_p} \quad (3)$$

액적은 액주로부터 미립화될 때 단위부피 당 최소에너지를 가지려는 경향을 띠므로,  $dU/dd_p = 0$ 에서 다음과 같은 Rayleigh 극한으로 표현된다.<sup>(14, 17-19)</sup>

$$d_p^3 = 6(8\gamma\epsilon_0)^{1/2} / \rho q_d \quad (4)$$

여기서  $\epsilon_0$ 은 액적이 분무되는 공간의 투과율(permittivity)이며 이는 거의 진공에서의 값과 같다. 식(4)는 또한 주어진 비전하량이 형성시킬수 있는 액적의 크기를 나타낸다. 이와같은  $d_p$ 와  $q_d$ 의 관계를 보여주는 Rayleigh 식 이외의 다른 관계식으로 Vonnegut와 Neubauer<sup>(20)</sup>와 Jones와 Thong<sup>(16)</sup>은 각각 다음의 식들을 유도하였다.

$$d_p^3 = 3\sqrt{3}(8\gamma\epsilon_0)^{1/2} / \rho q_d \quad (5)$$

$$d_p = \frac{27\sqrt{2}\epsilon_0 E_a}{2\rho q_d} \quad (6)$$

여기서  $E_a$ 는 노즐 끝에서의 전기장의 세기이다. 식 (4)와 식 (5)는 거의 유사한 반면 식 (6)에서는 전기장 세기가 관계된다는 점에서 특이하다. 본 연구에서는 식 (4)를 사용하였다.

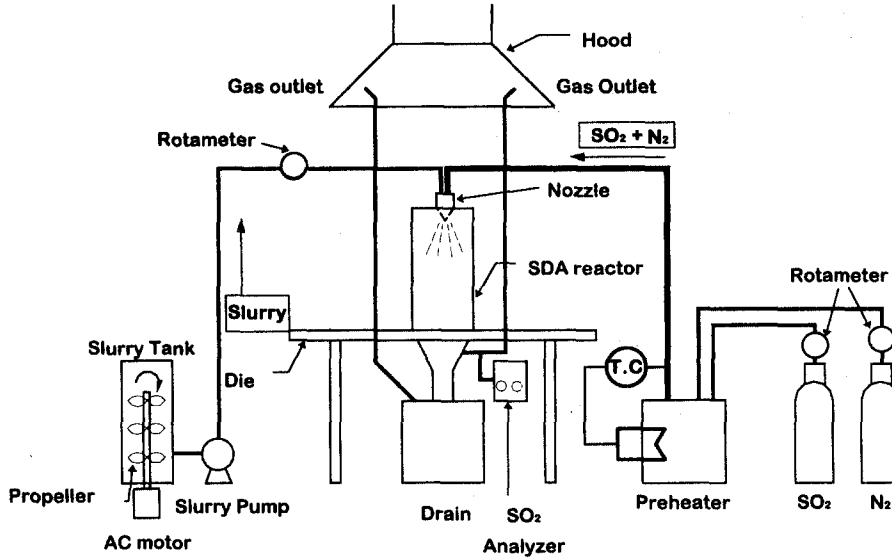


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

### 3. 실험 장치

Fig. 1에 나타난 바와 같이 실험장치는 크게 2유체 노즐부, 슬러리 공급부, 압축공기 공급부, 산성 가스 공급부, 세정기 본체, 미반응물 수거부, 고전압 공급부로 나뉜다. 슬러리로서는 순도 98%의 CaO(250 mesh)를 수돗물과 혼합하여 사용하였으며, 슬러리 저장통은 두께 1 cm, 지름 25 cm, 높이 60 cm의 원통형 아크릴로 제작하였다. 또한 슬러리속의 고체성분, 즉 CaO의 침전현상을 막기 위해 1600 rpm의 AC 모터 축에 직경 10 cm의 금속 프로펠러를 부착해 계속 저어서 저장통 속의 슬러리 농도를 균일하게 유지시켰다. 이는 슬러리 농도가 너무 높을 경우, 노즐의 구멍을 막고 미립화가 충분히 이루어지지 않을 가능성이 있기 때문이다. 슬러리를 분무노즐에 공급하기 위한 장치로써 microdiaphragm 펌프를 사용하였다. 실험시 사용하는 슬러리 유량에 비해 펌프용량 (6.5 l/min)이 매우 크므로 필요한 유량만을 보내고 나머지는 다시 저장통으로 돌아갈 수 있도록 by-pass를 만들었다. 펌프에서 보내진 슬러리는 strainer를 거쳐 유량계로 보내지는데 strainer는 큰 덩어리 (grit)를 걸러서 노즐이 막히는 것을 방지하는 역할을 한다. 노즐로는 내부혼합형 2유체노즐을 사용하였고 노즐에서 슬러리를 미립화시키기 위해서 압축공기를 이

용하였다. 이와 같이 서로 다른 경로를 통해 2유체 노즐에 공급된 슬러리와 압축공기는 노즐내부에서 혼합되어 공기의 압력에 의해 미세하게 분무된다. 2유체 노즐은 노즐 몸체, shut-off needle, 액체용 캡, 기체용 캡 등으로 이루어지며, 액체용 캡을 통과한 슬러리가 공급된 압축공기와 내부에서 혼합되어 기체용 캡을 통해 분사되는 구조를 가지며, shut-off needle은 유체의 흐름을 단속시키기 위해 사용한다. SO<sub>2</sub> 가스는 순도 99.99%의 것을 사용하였고 분무 압력을 일정하게 유지시키기 위한 운반기체로 N<sub>2</sub>를 이용했다. 배관의 중간 부분에는 역류를 막기 위해 역류 방지기를 부착하였다. 유량계를 거친 SO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>는 T자형 유니온을 통해 합쳐진 뒤 세정기 본체로 공급되었다.

세정기 본체는 슬러리와 SO<sub>2</sub>의 반응 및 미립화가 잘 일어나는지 살필 수 있도록 아크릴로 제작하였다. 모양은 직경 30 cm, 높이 60 cm의 원통형이며, 반응기의 밑부분은 깔때기 모양으로 만들어 미반응물이 잘 모여서 빠져나갈 수 있도록 만들었다. 염이나 슬러리가 반응용기의 벽면에 달라 붙었을 경우, 세척이 용이하도록 뚜껑은 개폐식으로 제작하였다. Fig. 2에서 보면 본체의 뚜껑부분에 1/4인치 탭을 내어 5개의 파이프를 통해 SO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>를 공급하는데 이는 보다 일정한 유선을 형성시키기 위함이고, 2유체 노즐을 뚜껑에서 18 cm 아래에 아크릴로 된 고정판을 이용해 설치한 이유는 SO<sub>2</sub>와

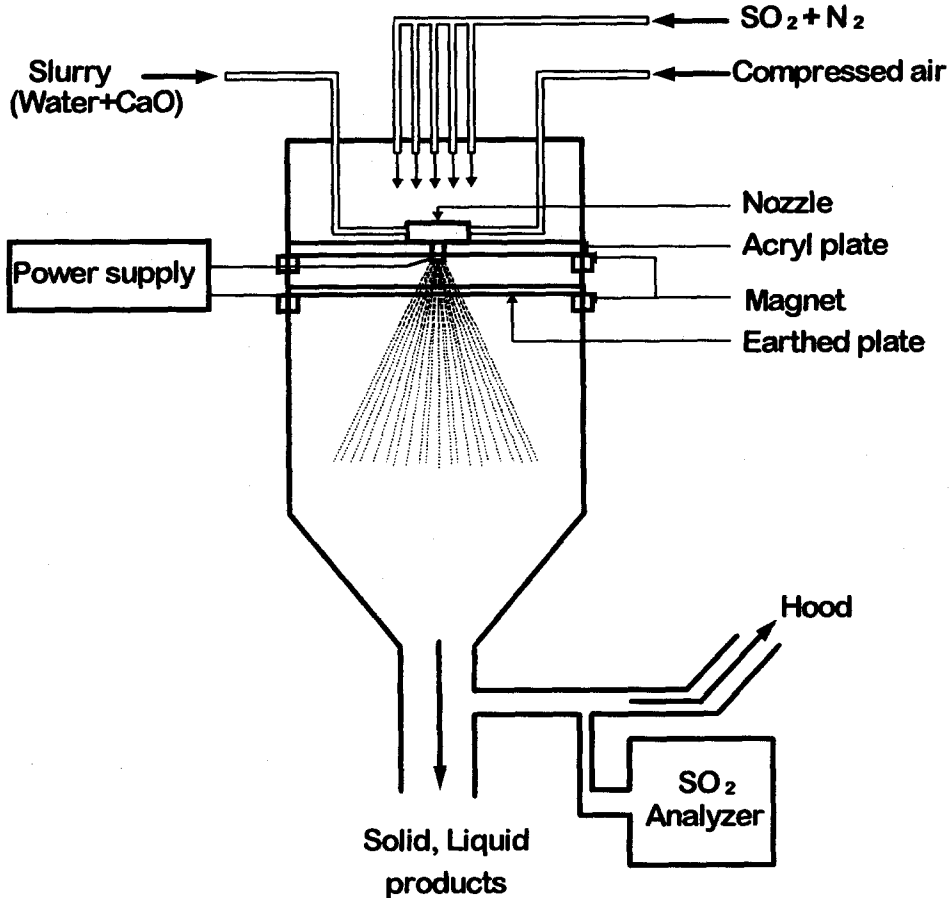


Fig. 2 System schematics

N<sub>2</sub>의 혼합기체가 수직방향으로 일정하게 공급된 후 반응이 일어나게 하기 위함이다. 노즐의 끝부분에 전극을 고정시켜 전압을 가하며, 적은 전압으로 큰 전기장세기를 얻어 전기분무효과를 배가시키기 위해 노즐과 접지판 사이의 거리를 방전이 일어나지 않는 최소거리인 2.5 cm로 정하였다. 접지판으로는 분사된 슬러리 액적이 접지판에 맺히지 않고 통과할 수 있도록 스테인리스 mesh를 사용하였으며 노즐 고정판 및 접지판은 자석을 이용해 고정시켜 상하 이동이 자유롭도록 설계하였다. 노즐과 접지판 사이에 고전압을 가하기 위하여 power supply (최대전압±10 kV, 최대전류 5 mA)를 사용하였다. 세정기 본체를 거쳐서 나온 미반응 알칼리, 염 및 기체 성분들은 가로 30×세로 30×높이 50 cm의 아크릴 통에 모이게 되는데, 이 중 기체 성분은 수거통의 중간에 뚫은 여러 개의 구멍을 통해 배기

후드로 흡입되도록 하고 액체 및 고체 성분은 수거통에 쌓은 뒤 실험이 끝나면 폐기하였고, 세정기와 미반응물 수거통 및 후드 사이는 PVC 파이프로 연결하였다. 이때 후드의 흡입력이 강한 점을 고려해 완전한 밀봉을 하지 않았는데 이는 완벽한 밀봉이 이루어질 경우 반응기 안의 압력이 너무 낮아져 반응이 제대로 이루어지기도 전에 후드속으로 가스성분이 빨려 들어가는 것을 방지하기 위함이다. SO<sub>2</sub> 가스의 농도를 측정하기 위해 포터블 가스 분석기를 사용하였는데 그 원리는 배출된 가스를 전해질에 흡수시킨 후 흡수된 가스가 황산으로 산화될 때 발생하는 전해전류가 흡수된 측정대상 성분(SO<sub>2</sub> 가스)의 농도에 비례함을 이용한 것이다.

Table 1 Properties of Water &amp; Slurry

	Water <sup>(21)</sup>	2% slurry	5% slurry
Surface tension[N/m]	0.07288	0.07293	0.07389
Electrical conductivity[S/m]	$1.25 \times 10^{-2}$	1.047	1.024
Permittivity[Coul <sup>2</sup> /N·m <sup>2</sup> ]	80.1		
Viscosity[kg/m·sec]	$1.006 \times 10^{-3}$	$(2.3 \sim 2.5) \times 10^{-3}$	$(2.4 \sim 2.6) \times 10^{-3}$

#### 4. 슬러리 물성치 측정

앞서 이론에서 제시한 식들을 이용하기 위해 슬러리의 물성치들(표면장력, 점성계수, 전기전도성)이 필요한 데 슬러리의 경우 혼합 조건에 따른 값의 변화가 크므로 물성치 값들을 기존 문헌에서 찾을 수 없으므로 여러 물성치들을 직접 측정하였으며 결과는 Table 1에 나타나 있다. 표면장력은 은으로 된 셀을 용액에 담근 뒤 셀이 용액의 표면으로 빠져나올 때 셀에 걸리는 힘을 통해 측정하였으며 물의 표면장력 값과 큰 차이가 없었다. 점성계수는 용액속에 회전봉을 담근 뒤 일정한 속도로 회전시킬 때 회전봉이 받는 토크의 크기로 측정하였으며 측정값을 표준용액에 대해 보정하였다. 전기전도성은 셀을 측정용액에 담근 후 셀 양쪽의 전극 사이에 일정 전류를 흐르게 할 때의 저항값을 이용해 측정하였다.

#### 5. 결과 및 고찰

정전기분무 원리를 응용하여 SO<sub>2</sub> 세정 효율의 증가여부를 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 슬러리의 유량은 5~50 ml/min의 범위로 하였으며 슬러리 분사를 위해 2유체노즐에 공급되는 압축공기의 유량은 3 l/min로 하였다. 이는 압축공기의 유량을 너무 크게 할 경우 노즐을 통해 분사된 액적의 크기가 너무 작고, 반응기내의 유동에 영향을 주게 되어 전압부가에 의한 효과를 떨어뜨릴 수 있기 때문이다. 또한 SO<sub>2</sub>의 유량은 40 ml/min로 하였고 N<sub>2</sub>의 유량은 2 l/min로 선정하였다. 주입시키는 슬러리의 농도는 노즐의 막힘현상을 방지하고, 전압에 의한 미립화 효과를 잘 살펴볼 수 있도록 SDA에서 사용하는 5~15 wt% 보다 낮은 2 wt%로 하였다. 따라서 SO<sub>2</sub>의 물농도에 대한 CaO

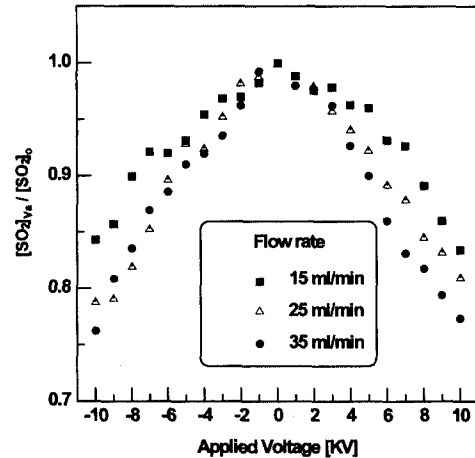


Fig. 3 SO<sub>2</sub> concentration with respect to applied voltage

의 물농도의 비로 계산되며 양분비는 0.05가 된다. 다음에 보여줄 Figs. 3~5의 결과는 3회 내지 4회 측정된 데이터를 평균한 값들이다.

먼저 슬러리를 분사하지 않은 상태에서, 즉 압축공기와 SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>를 분사했을 때 SO<sub>2</sub>농도를 측정하였다. SO<sub>2</sub>의 농도는 분사된 슬러리의 유동에 의한 영향을 고려해 반응후 가스가 빠져나가는 호퍼부분에 프로브를 삽입해 측정하였으며 약 1100 ppm의 농도를 얻었다. 다음 일정시간 동안 15, 25, 35 ml/min의 슬러리를 분사시킨 뒤 정상상태에 도달했을 때의 SO<sub>2</sub> 농도를 측정된 결과 각각의 슬러리 유량에 대해 700, 600, 450 ppm을 얻었다. 다음으로 15, 25, 35 ml/min의 슬러리 유량에 대해 각각 전압을 -10kV~10kV 범위에서 1 kV씩 변화시켜 가며 SO<sub>2</sub> 농도를 측정하였다. 그 결과는 Fig. 3에 나타나 있으며 y축은 전압을 가하지 않았을 때의 측정치, 즉 700, 600, 450 ppm으로 무차원화시킨 농도를 의미한다. Fig. 3에서 노즐에 가한 전압의 세기가 커질수록 SO<sub>2</sub> 제거효율이 증가하며 제거효

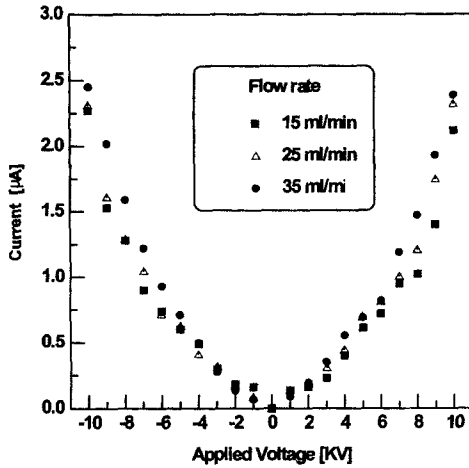


Fig. 4 Current/Voltage characteristics

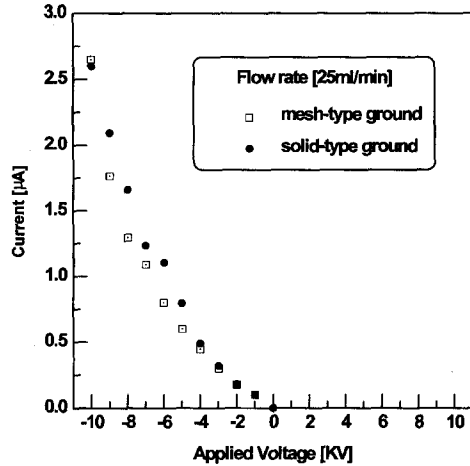


Fig. 5 Current/Voltage characteristics

울이 전압의 극성에는 무관함을 알 수 있었다. Fig. 3에 나타난 평균값의 표준편차는 유량과 전압에 따라 다소 차이는 있지만 대략 0.005~0.025이다. Fig. 4는 15, 25, 35 ml/min의 슬러리 유량에 대해 전압을 1 kV씩 변화시킬 때 노즐과 접지판 사이에 흐르는 전류의 값을  $10^{-8}$  A까지 측정가능한 디지털 전류계로 측정한 결과를 보여준다. 부가전압의 세기가 증가함에 따라 전류는 증가하며 이때 유량에 따른 변화는 미미하였다. Fig. 4의 데이터의 표준편차는 대략 0.05~0.2  $\mu$ A였다. Fig. 5에서는 접지판 형상에 따른 전류의 변화여부를 알아보다 접지판을 통과한 후에 액적이 전하를 띠는 지를 알아보았다. 이를 위해 주어진 슬러리 유량 25 ml/min에 대하여 접지판을 mesh형과 solid형으로 하여 음전압을 가하면서 전류를 측정하였다. -5 kV ~ -10 kV 구간에서 최대 0.7  $\mu$ A의 차이가 나지만 전반적으로 액적이 mesh를 통과할 때 대부분의 전하를 잃는다고 결론지을 수 있다. Fig. 5에서의 데이터의 편차는 0.03~0.25  $\mu$ A였다.

이번에는 측정된 전류와 슬러리의 질량유량을 이용해 액적의 비전하량과 크기를 앞에서 언급한 이론식으로 계산하였다. Fig. 6은 식 (2)로부터 비전하량의 평균값이 전압의 세기에 비례하고 유량에는 반비례함을 보여준다. Fig. 6은 또한 유량에 따른 비전하량값의 차이가 전압의 세기가 커질수록 점점 증가함을 보여준다. 이는 슬러리의 유량이 작을수록 슬러리가 노즐을 빠져나가기 전에 하전될 수 있는 시간이 길어지기 때문이라고 생각되며 전압의 세기가 셀수록 슬러리의 노즐체류시간이 비전하량

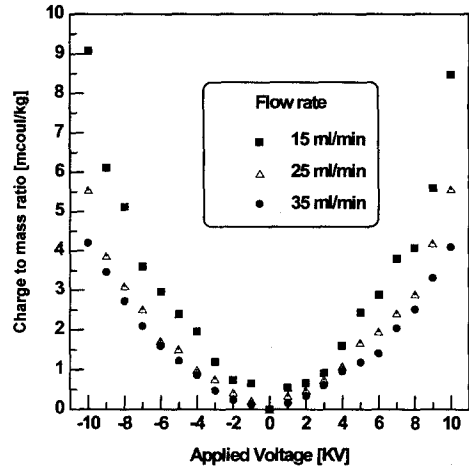


Fig. 6 Charge to mass ratio with respect to applied voltage

값에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. Fig. 6에 나타난 비전하량의 표준편차는 대략 0.1~0.5 mcoul/kg이다. Table 1에 나타난 물성치들을 식 (4)에 대입하면 분무액적의 크기에 대한 예측이 가능하며 그 결과는 Fig. 7에 나타나 있다. Fig. 7에서 유량이 클수록 액적의 직경이 크며 전압이 증가함에 따라 직경이 줄어들음을 볼 수 있다. 일반적인 SDA 시스템에서의 액적의 크기인 100~300  $\mu$ m<sup>(15)</sup>에 비해 액적의 직경이 크게 나타나는 이유는 본 실험에서 사용한 압축공기의 양이 일반 SDA에서 사용되는 값보다 작았기 때문이다. 압축공기의 유량을 증가시켜 액적크기를 작게 했을 때 부가전압에 따라

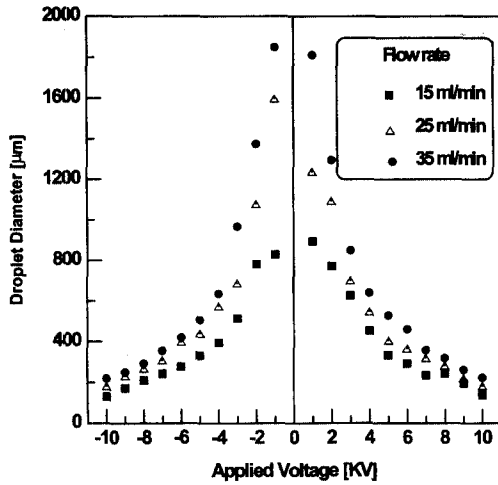


Fig. 7 Droplet diameter with respect to applied voltage

SO<sub>2</sub> 제거 효율을 측정할 경우 압축공기 유량이 작은 경우에 비하여 전기장 효과가 적었기 때문에 본 연구에서는 압축공기 유량이 작은 경우를 택하였다. Fig. 7에 나타난 액적크기의 표준편차는 고전압에서의 대략 10 µm이며 전압이 0에 접근할 때에는 200 µm의 편차를 갖게 된다. 이는 식 (4)에서 액적의 크기가 비전하량의  $-2/3$  승으로 나타나므로 비전하량의 크기가 작을 때 비전하량의 변화에 따른 액적의 크기변화가 크기 때문이다.

## 6. 결 론

지금까지 유량이 극히 작은 범위에 한정되어 연구가 진행되었던 정전기미립화 원리를 일반세정기에 응용하여 SO<sub>2</sub> 제거효율을 증가시킬 수 있는지에 대해 살펴보았다. 실험실 규모의 세정기시스템을 만들고 정전기미립화에서 주된 작동인자인 유량을 15, 25, 35 ml/min로, 부가전압을  $-10$  kV~ $10$  kV로 변화시켜가며 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

◆ 노즐에 가한 전압의 세기가 커질수록 SO<sub>2</sub> 제거효율이 증가하며 10 kV의 전압을 가했을 때 15, 25, 35 ml/min의 유량에서 각각 15, 20, 25 %의 효율증가를 얻었고 부가전압의 극성과는 무관하였다.

◆ 전극 사이를 흐르는 전류는 0~2.5 µA 범위의 값을 가지며 유량에 거의 무관하였다.

◆ 비전하량은 0~9 mcoul/kg 범위의 값을 가지며 전압에는 비례하나 유량에는 반비례하였다.

◆ 액적의 직경은 유량과 비례하며, 전압의 세기가 커질수록 유량에 따른 차이가 컸다.

실험실 규모의 세정기를 이용해 얻은 위의 결과를 실제 시스템에 응용할 경우 대용량의 SO<sub>2</sub> 처리를 위한 슬러리 유량의 증가와 슬러리를 분무시키기 위해 2유체노즐에 공급되는 압축공기 유량의 증가로 인해 슬러리가 충분히 하전되지 않을 수 있으므로 전압의 세기, 노즐의 형태 등을 변화시켜가며 정전기미립화 효과를 최대로 할 수 있도록 해야할 것이다.

## 후 기

본 연구는 과학재단 목적기초 (과제번호 95-0200-05-01-3) 지원의 일부로 진행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한 SO<sub>2</sub> 분석기를 대여해 준 홍익대학교 장호명 교수님과 실험장치 설계에 많은 조언을 주신 한양대학교 안강호 교수님께도 감사를 표합니다.

## 참고문헌

- (1) Law, S. E., 1983, "Electrostatic Pesticide Spraying: Concepts and Practice," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-19, pp. 160~168.
- (2) Abdel-Salam, M. S., Solioman, F. A. and Megahed, A. A., 1993, "Electrostatic-Based Pesticide Spray Systems. Part 1 : a Theoretical Investigation," *J. Physics. D : Appl. Phys.* Vol. 26, pp. 2082~2091.
- (3) Hines, R. L., 1966, "Electrostatic Atomization and Spray Painting," *J. Applied Physics*, Vol. 37, pp. 2730~2736.
- (4) Lawton, J. and Weinberg, F. J., 1969, *Electrical Aspects of Combustion*, Clarendon Press, Oxford.
- (5) Fernandez de la Mora, J., 1992, "The Effect of Charge Emission from Electrified Liquid Cones," *J. Fluid Mechanics*, Vol. 243, pp. 561~574.
- (6) Law, S. E. and Bowen, H. D., 1989, "Effects of Liquid Conductivity upon Gaseous Discharge of Droplets," *IEEE Transactions on Industry Appli-*



- cations*, Vol. 25, pp. 1073~1080.
- (7) Abbas, M. A. and Latham, J., 1967, "The Instability of Evaporating Charged Drops," *J. Fluid Mechanics*, Vol. 30, pp. 663~670.
- (8) Dunn, P. F. and Snarski, S. R., 1992, "Droplet Diameter, Flux, and Total Current Measurements in an Electrohydrodynamic Spray," *J. Applied Physics*, Vol. 71, pp. 80~84.
- (9) Ogata, S., Kawashima, T., Nakaya, O. and Shinohara, H., 1976, "Stability of Charged Drop Issuing from a Fine Capillary," *J. Chemical Eng. Japan*, Vol. 9, pp. 440~444.
- (10) Smith, D. P. H., 1986, "The Electrohydrodynamic Atomization of Liquids," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-22, pp. 527~535.
- (11) Mutoh, M. M., Kaieda, S. and Kamimura, K. K., 1979, "Convergence and Disintegration of Liquid Jets Induced by an Electrostatic Field," *J. Applied Physics*, Vol. 50, pp. 3174~3179.
- (12) Wang, S. H., Chang, J. S. and Berezin, A. A., 1993, "Atomization Characteristics of Electrohydrodynamics Limestone-water Slurry Spray," *J. of Electrostatics*, Vol. 30, pp. 235~246.
- (13) Grace, J. M. and Marijnissen, J. C. M., 1994, "A Review of Liquid Atomization by Electrical Means," *J. Aerosol Science*, Vol. 25, pp. 1005~1019.
- (14) Cloupeau, M. and Prunet-Foch, B., 1994, "Electrohydrodynamic Spraying Functioning Modes: A Critical Review," *J. Aerosol Science*, Vol. 25, pp. 1021~1036.
- (15) 김진규, 1993, 분무건조기형 준건식 세정기를 이용한 산성 및 휘발성 유기가스의 동시제거, KAIST 석사학위 논문.
- (16) 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.
- (17) Roth, D. G. and Kelly, A. J., 1993, "Analysis of the Disruption of Evaporating Charged Droplets," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-19. No. 5, pp. 771~775.
- (18) Pfeifer, B. J. and Hendricks, C. D., 1967, "Charge-to-mass Relationships for Electrohydrodynamically Sprayed Liquid Droplets," *The Physics of Fluids*, Vol. 10, pp. 2149~2154.
- (19) Whitby, K. T. and Liu, B. Y. H., 1966, The Electrical Behavior of Aerosols, Chapter 3 of Aerosol Science edited by C. N. Davies, Academic Press, New York.
- (20) Vonnegut, B. and Neubauer, R. L., 1952, "Production of Monodisperse Liquid Particles by Electrical Atomization," *J. Colloid Sci.*, Vol. 7, p. 616.
- (21) *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 1993, edited by D. R. Lide, CRC Press, Ann Arbor, MI.