

# 스핀들 모드하의 전기수력학적 미립화를 통한 균일 미세 액적 생성

김명찬\* · 이상용† · 김상수\*\* · 김유동\*  
(2000년 12월 11일 접수, 2001년 5월 11일 심사완료)

## Generation of Uniform Fine Droplets Under Spindle Mode in Electrohydrodynamic Atomization

Myoung Chan Kim, Sang Yong Lee, Sang Soo Kim and Yu Dong Kim

**Key Words :** Uniform Droplets(균일 액적), Electrohydrodynamic Spray(전기수력학적 분무), Spindle Mode(스핀들 모드), Discharge Current(방전전류), Charge-to-Mass Ratio(비전하량)

### Abstract

A series of experiments were conducted to generate fine liquid(water) drops through the electrohydrodynamic atomization process. The atomization mode depended on flow rate and DC voltage input. For water, having electric conductivity larger than  $10^{-7}$  S/m, the spindle mode turned out to be the only mode to generate uniform-size drops within the range of 30 – 450 microns that have wide applications. Within this mode, both the uniformity and the fineness of drops were improved at an optimum voltage input for a given flow rate. This optimum voltage increased with increasing of the liquid flow rate. Another important parameter considered was the nozzle material with different electric conductivity and liquid wettability. A stainless-steel nozzle (the material with high electric conductivity and high liquid wettability) and a silica nozzle (the electrically non-conducting material with low liquid wettability) were tested and compared; and more uniform drops could be obtained with the silica nozzle.

기호설명

하첨자

$d$  : 액적

DC : direct current  
 $d$  : diameter  
 $I$  : 전류  
 $f$  : 주파수  
 $\dot{Q}$  : 유량  
 $q_d$  : 비전하량

그리스문자

$\epsilon$  : 유전율  
 $\sigma$  : 표면장력  
 $\rho$  : 밀도

### 1. 서론

액체가 미립화 되면 액체의 전체적인 표면적이 넓어지게 되므로 분산된 액적과 주위 기체 사이의 열 및 물질전달(증발과 응축 등), 그리고 화학반응이 촉진된다. 전기수력학적(electrohydrodynamic) 분무 방법은 액체 미립화의 한 방법으로서 액체의 표면적을 증가 시킨다는 점에서는 다른 미립화 방법과 동일하나, 액적이 전기적으로 대전 된다는 점에서 큰 이점을 가진다. 액적을 대전 시키면 액적 간의 합착을 방지할 수 있고 액적의 경로를 제어 할 수 있다. 또한 미립화에 사용되는 전기에너지는 매우 작기 때문에 경제적인 미립화 방법이다. 따라서, 페인팅,<sup>(1,2)</sup> 농약 살포,<sup>(3)</sup> 연료분사,<sup>(4,5)</sup> 공해 제어,<sup>(6-8)</sup> 액체 금속 분무,<sup>(9)</sup> 잉크젯 프린터,<sup>(10)</sup> 콜로

\* 한국과학기술원 기계공학과  
\*\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과  
† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과  
E-mail : e\_hyunny@cais.kaist.ac.kr  
TEL : (042)869-3026 FAX : (042)869-8207

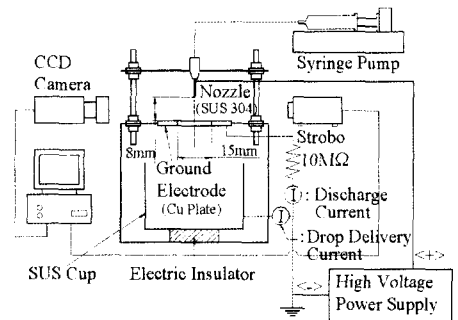
**Table 1** Formation of drops under DC electric field

Mode	Cone Jet	Micro-Dripping	Spindle	Simple Jet	Dripping
Average Dropsize [ $\mu\text{m}$ ]	Less than 10	10~200	30~450	More than 200	More than 300
Size Distribution	Mono-disperse <sup>[17]</sup>	Relatively Uniform <sup>[18]</sup>	Disperse <sup>[18]</sup>	Widely Disperse <sup>[18]</sup>	Mono-disperse <sup>[18]</sup>

**Table 2** Application of 30 – 450 micron droplets<sup>(16)</sup>

Mechanical Engineering	Environmental Protection	Transport	Agriculture	Power Engineering	Painting
Oil mist lubrication, Liquid metal atomization	Gas scrubbing, Pollution propagation protection	MPI engine, Jet turbine engine,	Aerosol generator, Pest control, Weed control	Burner, Water cooling	Coating, Spray painting

이드 생성,<sup>(11)</sup> 파우더 제조,<sup>(12,13)</sup> 필름 생성,<sup>(14,15)</sup> 등에 넓게 적용될 수 있다. 또한, 균일 액적의 생성은 액체의 운동, 증발, 건조, 연소 등의 연구에 필수적이고 매우 작고 균일한 액적의 경우에는 흡입 치료(inhalation therapy), 소독(disinfection), 방사능 차폐(protection against radioactive contamination) 등에 응용<sup>(16)</sup>될 수 있다. Table 1은 DC 전기장을 적용할 때 나타나는 액체 분열 모드를 보여 주고 있다. 원추형 분류(cone jet) 모드는 직류 전압만으로 노즐의 직경과 전극형태에 관계없이 단분산 액적을 얻을 수 있다.<sup>(17)</sup> 이러한 경우에 단분산 액적의 크기는 유체의 전기전도도, 유전율 상수, 표면 장력 등의 물성치에 강하게 의존하며 수 마이크로 이하의 단분산 액적 생성이 가능하다. 이에 비해 적하(dripping)와 단순액주 형성(simple jet) 모드에서 얻어지는 액적의 크기는 노즐의 직경에 의존하므로 작은 액적을 얻기 위해서는 작은 직경의 노즐이 필요하다. 그러나, 작은 직경의 노즐은 막히기 쉽고 제작이 어려우므로 대부분의 연구자들이 사용한 노즐의 내경은 150  $\mu\text{m}$  이상(외경은 300  $\mu\text{m}$  이상)이었다. 미소적하(microdripping) 모드는 10  $\mu\text{m}$ 에서 200  $\mu\text{m}$ 의 지름을 갖는 단분산 액적을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있으나 다른 어떤 모드보다도 노즐의 형태와 표면재질의 젖음도(wettability) 같은 실험적 세부 사항에 의존한다. 또한,  $10^{-7}$  S/m를 초과하는 전기전도를 갖는 액체(대표적으로 물)를 대상으로 한 Cloupeau와 Prunet-Foch<sup>(18)</sup>의 실험에서는 미소적하 현상을 볼 수 없었다. Table 2에서 볼 수 있듯이 대부분의 미립화 응용분야는 Table 1의 스피들(spindle) 모드에서 얻어지는 30 – 450 마이크로 입경의 액적을 이용한다. 따라서, 이



**Fig. 1** Experimental setup for electrohydrodynamic spraying experiments

러한 입경 영역에서 균일 액적의 생성은 실제 적용을 위해 매우 중요하다. 그러나, 아직까지 기존 연구자들은 스피들 모드에서 균일 액적을 얻을 수 없었고 균일 액적을 얻을 수 없는 이유를 명확하게 설명하지 못했다. 따라서, 현재 연구의 목적은 액적 형성 과정의 가시화, 입경 분포, 방전전류, 비전하량 등의 측정을 통해 균일 액적을 만들 수 있는 공급유량, 입력전압, 노즐 재질 등의 실험 조건을 찾고 그 이유를 밝히는 것이다.

## 2. 본 론

### 2.1 실험 장치

본 연구에서 액적을 전기수력학적으로 미립화시키기 위해 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같다. 실험 장치는 노즐에 분사액체를 공급하는 액체 공급부와 노즐과 접지전극 간에 전압을 걸어주는 고전압 공급부 그리고 측정 장비로 구성된다. 원하는

공급유량을 일정하게 공급하기 위해 주사기 펌프 (syringe pump, Orion model 305)를 사용하였으며, 고전압 공급을 위해서는 최대 전압 30 kV 와 최대 전류 5 mA 를 갖는 DC 고전압 전원 공급기(DC high voltage supply, KSC Co.)를 연결한다. 노즐과 접지전극 사이에 걸리는 전압을 측정하기 위해 고전압 프루브(high voltage probe, Tectronix model 6015A)를 사용한다. 노즐과 접지전극 간의 스파크 발생 시 과전류 방지를 위해 접지 전극(ground electrode)과 어스(earth) 사이에 10 M $\Omega$ 의 저항을 연결한다. 접지전극과 노즐 사이의 축방향 거리는 8 mm 고 정하였다. 공급 액체로는 전기전도도 1.0 $\times 10^{-4}$  S/m 인 초정수(ultra pure water)를 사용한다. 노즐 재질의 영향을 보기 위해서 SUS 노즐과 silica 노즐을 시험한다. SUS 노즐의 내경 및 외경은 각각 0.3mm, 0.13mm 이고 silica 노즐의 내경 및 외경은 각각 0.32mm, 0.1mm 이다.

액체 분무의 순간상은 CCD 카메라(Toshiba, Model NB.1K537K)와 10 msec 의 셔플 시간을 가지는 스트로보에 의해 얻어지고 컴퓨터에 저장되었다. 액주 형성 과정을 연속적으로 관찰하기 위해서는 고속카메라(Kodak Ektapro hi-spec Motion analyzer, Model 1000-E)가 사용되었다. 비디오 카메라의 기록율(recording rate)은 12000frames/sec 고 영상의 해상도는 256 $\times$ 192 이다. 입경 분포를 측정하기 위해서는 영상처리 기법을 이용한 PAMA(particle motion analyzer system, V-Tek)가 사용되었다. 노즐과 접지전극(Cu 판) 사이의 방전전류(discharge current)는 멀티미터(HP 3458A)를 사용해 측정했다. 단위 시간 당 액적 형성 회수의 측정을 위해서는 레이저 다이오드, 집광 렌즈 그리고 광다이오드로 구성된 측정장치가 사용되었다.

## 2.2 실험 결과

### 2.2.1 액적 형성 모드의 분류

Fig. 2 는 공급유량 1 $\times 10^{-4}$ ml/s 에서 입력전압 증가에 따른 분무 유동 변화의 예이다. 0 ~ 2kV 까지는 노즐 외경에 비해 상당히 큰 액적이 매달리는 적하 모드를 나타낸다. 입력 전압 4kV 에서는 노즐 외경에 비해 매우 작은 액주가 형성되어 끊어지는 스피들 모드가 나타나지만 입력전압 6kV 이상에서는 입력 전압이 증가함에 따라 노즐 끝에서 끊어지는 액주의 길이가 길어져 액적의 크기가 증가하는 현상이 나타난다. 액주의 길이가 길어져 매우 큰 액적이 형성되지만, 노즐 외경에 비해 가는 액주가 형성되어 끊어지기 때문에 여기서는 연

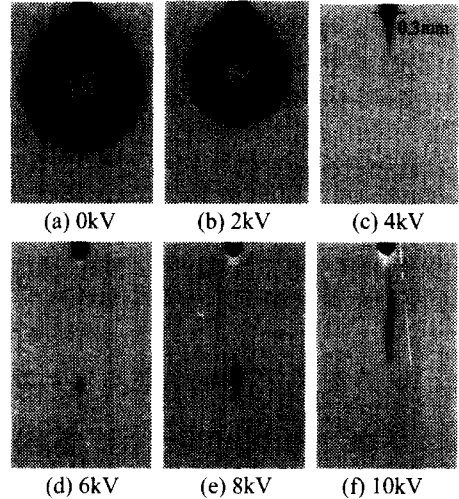


Fig. 2 Change of the drop generation mode with the voltage input  
(Liquid flow rate: 1 $\times 10^{-4}$ ml/s, SUS nozzle)

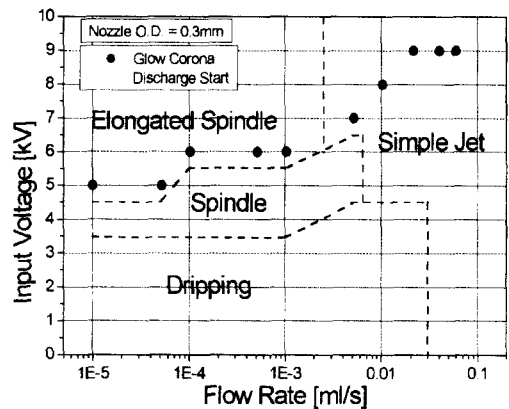


Fig.3 Classification of the drop generation mode

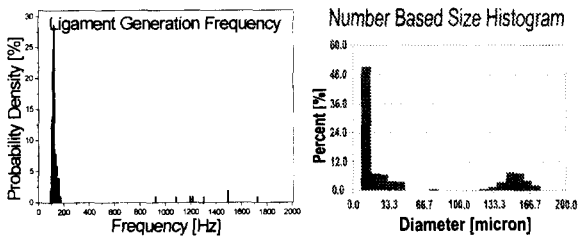
장 스피들(elongated spindle) 모드라는 용어를 사용하였다. 입력 전압 6kV 이상에서는 노즐 끝에 매달린 액적 주위로 밝은 부분이 나타나는데, 이것이 공기 이온화로 인한 발광 코로나 방전(glow corona discharge)이다. 가시적 코로나 방전 현상이 일어나는 영역에서는 코로나 방전이 일어나기 직전의 입력전압 조건에서 만들어지는 액적보다 큰 액적이 발생하며 입력전압이 증가함에 따라 액적의 크기가 커진다(Fig. 2 (d) - (e)). 이는 발광 코로나로 인한 공간전하가 전기장의 세기를 약화시켜 액주의 분열을 방해<sup>(18)</sup>하기 때문이다. 따라서, 스피들 모드는 미세한 미립화 액적을 얻을 수 있는 최적의 모드로 판단된다. 앞으로 30 - 450 마이크로 크기의 액적을 얻기 위한 실험은 스피들 모드가 나타나는 공급유량 및 입력전압으로 제한한다.

입력전압 및 공급유량 변화에 따른 액적 형성 모드의 선도를 Fig. 3 과 같이 나타내었다. 적하 모드는 공급유량(0.03ml/s 미만)이 작고 낮은 전압(3.5kV 미만)에서 나타난다. 단순액주 형성 모드는 많은 공급유량에서만 볼 수 있다. 스펠들 모드는 대체로 3.5 - 5.5kV,  $10^{-5}$  -  $10^{-2}$ ml/s 의 범위에서 나타난다. Fig. 3 의 등근 점(solid dot)은 발광 코로나의 출현을 나타낸다. 발광 코로나는 스펠들 모드의 위쪽 영역의 경계가 된다.

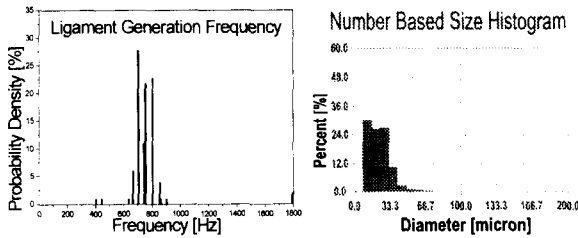
2.2.2 입력전압 및 공급유량 변화가 액적 형성에 미치는 영향

Fig. 4 는 DC 입력전압 변화에 따른 입경분포를 보여준다. Fig. 4 의 오른쪽 그림들은 고속카메라를

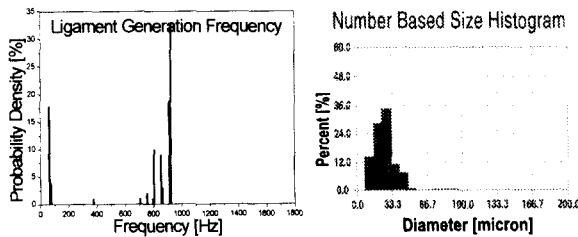
이용하여 한 개의 액주(liquid ligament)와 다음 액주 생성 사이의 경과시간(elapsed time)을 측정하여 얻어진 DC 입력전압 변화에 따른 확률 분포(probability density distribution)다. Fig. 4(a)의 확률 분포에서 볼 수 있듯이 이 입력전압에서 액주 생성 주기는 약 0.1s(100Hz)로 길기 때문에 기본적으로 굵은 액주가 형성된다. 굵은 액주가 액적으로 분열 시 한 개의 큰 액적과 작은 위성 액적들로 분열되면서 Fig. 4(a)의 입경분포에서 볼 수 있는 150 $\mu$ m 부근의 큰 액적이 나타나고 위성 액적들에 의해 30 $\mu$ m 부근의 입경분포가 나타난다. DC 입력전압을 3.5kV 에서 3.75kV 로 증가 시키면 Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이 단위 시간 당 액주 생성이 많아지면서 가는 액주가 형성되고 이 액주가 분열되면서 미세한 입경이 형성된다. DC 입력전압이 3.75kV 에서 4kV 로 증가하면 Fig. 4(c)의 확률분포와 같이 긴 액적 생성 경과 시간을 가지는(낮은 주파수 영역) 굵은 액주들이 다시 나타난다. 이 굵은 액주의 분열에 의해 큰 액적이 발생하면서 DC 입력전압 4.0kV 에서의 평균입경(Fig. 4(c)의 입경분포)이 DC 입력전압 3.75kV 에서의 평균입경(Fig. 4(b)의 입경분포)보다 증가한다.



(a) DC: 3.50kV, SMD=148 $\mu$ m



(b) DC: 3.75kV, SMD=37 $\mu$ m



(c) DC: 4.00kV, SMD=44 $\mu$ m

(Liquid flow rate:  $1 \times 10^{-4}$  ml/s, SUS nozzle)

Fig. 4 Variation of the probability density distribution of the ligament generation frequency and the drop size distribution with the voltage input

Fig. 5 는 DC 입력전압 및 공급유량 변화에 따른 평균입경(SMD)의 변화를 보여준다. 공급유량에 따라 최소 평균입경을 갖는 DC 입력전압이 존재하고 공급유량이 작을수록 낮은 입력전압에서 최소 평균입경을 가짐을 볼 수 있다. 공급유량이 증가하면 미립화해야 할 액체의 양이 증가하므로 최소 평균입경을 갖는 DC 입력전압이 증가한다.

Fig. 6 은 입력전압 변화에 따라서 접지전극을 통해 흐르는 방전전류(discharge current)의 변화를 보여준다. 여기서 한 개의 데이터 포인트는 각 측

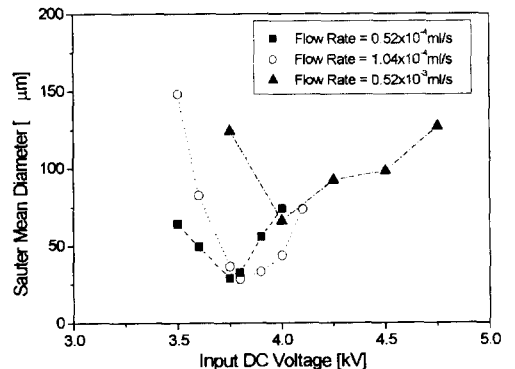


Fig. 5 Variation of SMD with the DC voltage input (SUS nozzle)

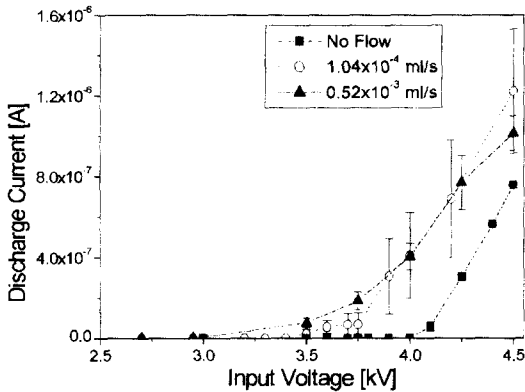


Fig. 6 Variation of the average discharge current through the ground electrode with the DC voltage input(SUS nozzle)

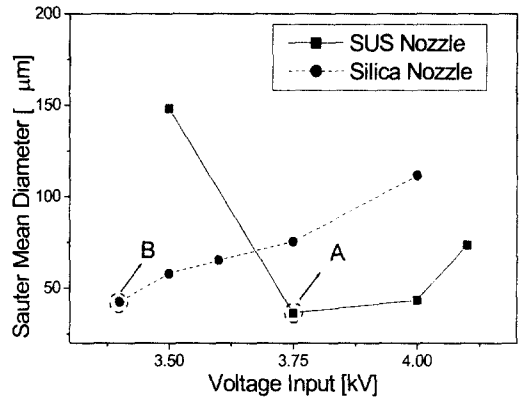
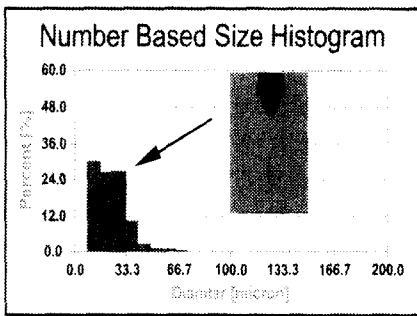
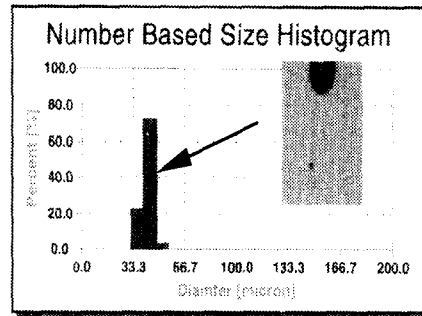


Fig. 7 Variation of SMD with voltage input for different material of nozzle (Flow rate =  $1 \times 10^{-4}$  ml/s)



(a) SUS, DC 3.75kV, SMD=37 $\mu$ m



(b) silica, DC 3.4kV, SMD=44 $\mu$ m

Fig. 8 Drop size distribution at minimum SMD

정 조건에서 2000 개의 측정값을 평균한 값이고 오차 구간(error bar)은 측정 데이터의 범위를 나타낸다. 입력전압 증가에 따른 방전전류의 시작점(inception point)은 공급유량이 더 많은 경우에 더 일찍 일어난다. 이것은 액주 끝단과 접지전극 사이의 유효 거리(effective distance)가 공급유량이 증가함에 따라 가까워지기 때문이다. 방전전류의 시작점을 지나면 방전전류는 빠르게 증가하고 방전전류의 변화 폭도 커진다. 특히, 최소 평균입경을 나타내는 입력전압을 지나면 방전전류의 변화 폭과 크기가 이전 전압의 경우보다 급격하게 증가한다. 이것이 액주 형성을 불안하게 하여 간헐적으로 큰 액적들이 형성되며, 결과적으로 최소 평균입경 이후에 평균입경을 증가 시킨다.

### 2.2.3 노즐 재질이 액적 형성에 미치는 영향

Fig. 7 은 스핀들 모드 영역에서 SUS 노즐과 silica 노즐을 사용한 경우에 입력전압 변화에 따

른 평균입경(SMD)의 변화를 보여준다. Fig. 7 에서 SUS 노즐의 경우에는 Fig. 5 의 경우와 동일하게 입력전압이 증가함에 따라 SMD 가 감소했다가 증가하는 형태로서 아래로 볼록한 포물선 형태를 취하고 Fig. 7 의 점 A 와 같이 최소값을 가진다. 이에 비해 silica 노즐의 경우에는 스핀들 모드가 나타나는 최저 입력전압(Fig. 7 의 점 B, 3.4kV)에서 가장 작은 평균입경을 가지고 입력전압이 증가함에 따라 평균입경이 증가한다.

SUS 노즐을 사용한 경우에 최소 평균입경을 가지는 입력전압 조건(Fig. 7 의 점 A)과 silica 노즐을 사용한 경우에 최소 평균입경을 가지는 최저 입력전압 3.4kV(Fig. 7 의 점 B)의 입경분포를 Fig. 8 에서 비교해 보았다. Fig. 8(a)는 SUS 노즐을 사용한 경우로 Fig. 4(b)와 동일한 조건으로서 콘으로부터 떨어져 나온 가는 액주가 여러 개의 작은 액적으로 분열되므로 평균입경은 가장 작게 나타난다. 그러나, 액주가 한 개 또는 여러 개로 분열되면서

다양한 크기의 액적이 형성되므로 비록 Fig. 4(a)와 (c)보다는 낮기는 하지만 Fig. 8(b)에 비하여 상대적으로 입경분포가 넓어진다. 따라서 노즐의 재질로 silica 를 사용할 경우에 입력전압을 잘 조절한다면 동일한 유량조건에서도 SUS 를 재질로 사용할 경우에 비하여 좀 더 균일한 입경을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이 현상을 좀 더 상세히 살펴보면 다음과 같다.

Fig. 9는 공급유량  $1 \times 10^{-4}$  ml/s 에서 SUS 노즐 및 silica 노즐에서 입력전압 증가에 따른 방전전류의 변화를 보여준다. Fig. 9 에서 보면 SUS 노즐에서는 입력전압 3.75kV 이후로 급격하게 방전 전류가 증

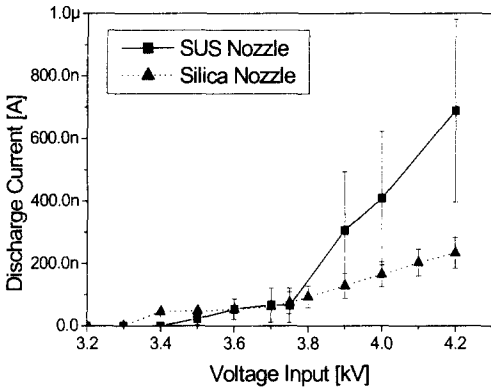


Fig. 9 Comparison of the discharge current with the material of nozzle (Flow rate =  $1 \times 10^{-4}$  ml/s)

가하지만 silica 노즐의 경우는 계속해서 완만한 증가를 보인다. Silica 노즐은 비전도성이기 때문에 전류 방전이 액체를 통해서만 이루어지지만 SUS 노즐의 경우는 액체뿐만 아니라 노즐 자체로도 전류를 방전시킨다. 기존의 연구에서도 SUS 같은 전도성 재질을 진극으로 사용한 경우에는 입력전압에 따라 방전전류는 급격하게 증가하는 것으로 알려져 있다.<sup>(9)</sup> 따라서, 높은 입력전압(약 3.8kV)에서는 SUS 노즐을 사용한 경우의 방전 전류가 silica 노즐을 사용한 경우의 방전전류보다 커진다. Fig. 7 에서 평균입경의 최소값을 보이는 점 A 는 입력전압 3.75kV 에서 나타나고 Fig. 9 에서 이 입력전압 이상에서는 방전전류의 변화폭이 크게 증가하면서 액주 형성이 불안해지므로 평균입경이 증가한다. 그러나, silica 노즐의 경우에는 스핀들 모드가 나타나는 입력전압 3.4kV 에서 3.75kV 까지 평균 방전전류가 SUS 노즐의 경우보다 크지만 방전전류의 변화폭이 거의 없는 매우 안정된 형태를 보인다. 이것은 SUS 노즐을 사용한 경우에 비해 silica 노즐을 사용한 경우가 스핀들 모드가 나타나는 초기 입력전압 조건에서 전류를 방전시키기 유리한 끝이 뾰족한 액체 체적이 자주 만들어지고 액체 콘이 매우 규칙적으로 나타남을 의미한다. 과연, 이 입력전압에서 실제로 끝이 뾰족한 액체 체적이 자주 규칙적으로 만들어 지는지 확인하기 위해 스핀들 모드가 나타나기 시작하는 입력전압에서 SUS 노즐 및 silica 노즐을 사용한 경우에 액적 형성 과정을 Fig. 10 에 나타내었다. SUS 노즐의

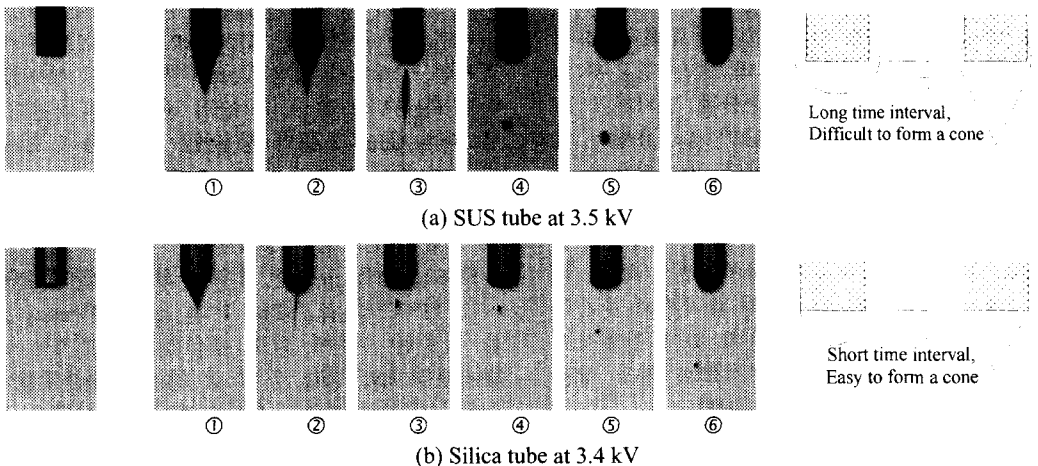


Fig. 10 Different stages of drop formation

경우(Fig. 10(a))에는 매달리는 액체가 노즐 측면 벽을 따라 타고 올라가는 형태를 취하고 노즐 끝 주위로 배가 나온 형태로 액체 체적이 매달린다. 이에 비해 silica 노즐의 경우(Fig. 10(b))는 노즐 측면을 따라 타고 올라가는 액체가 거의 없으므로 액체 체적이 노즐 외경과 같은 크기로 매달린다. 이는 노즐 재질이 SUS 인 경우가 silica 인 경우 보다 젖음(wetting)이 잘 일어나는 것을 의미한다. 노즐 재질에 따른 젖음도(wettability)의 차이로 노즐 끝에 매달리는 액적의 형태가 차이를 보이고 이로 인해 SUS 노즐의 경우에는 보다 많은 양의 액체 체적을 큰 모양으로 만들어야 하기 때문에 silica 노즐보다 큰 모양의 액체 체적을 만들기 어렵다. 날카로운 콘 끝에는 많은 전하가 모여들어 높은 전하 밀도를 나타내므로 표면장력을 이기고 가는 액주가 만들어 진다. 결국, 이 액주가 분열되어 노즐 지름보다 작고 균일한 액적을 형성한다. 따라서 SUS 노즐의 경우에 좀 더 불규칙한 액적이 형성되게 된다.

노즐 재질의 차이가 입경분포와 단위 시간당 액적 생성 회수에 미치는 영향을 살펴보기 위해 스펙들 모드가 시작되는 입력전압에서 입경분포와 단위 액적 생성 회수의 오실로그램을 Fig. 11 에 나타내었다.

레이저 빔을 액적의 이동 경로상에 놓으면 레이저 빔은 액적에 의해 산란되고 이 산란광(diffraction ray)은 렌즈(plano convex lens)를 이용하여 광다이오드(photodiode)에 집광시킬 수 있다. 이 산란광 신호로부터 단위 시간당 액적 발생 회수를 측정할 수 있다. Fig. 11 에서 SUS 노즐을 사용한 (a)와 silica 노즐을 사용한 (b)의 경우를 비교해보면 SUS 노즐의 경우는 액적이 레이저 경로를 지나는 경우에 발생하는 오실로그램상의 신호 형태가 동일하지 않고 액적의 발생 시간 간격이 silica 노즐의 경우에 비해 매우 길다(두 오실로그램의 시간 스케일이 다름에 유의하기 바란다). 이것은 Fig. 11 의 입경분포에서도 알 수 있듯이 SUS 노즐의 경우 생성되는 액적의 크기와 액적의 속도가 일정하지 않고 노즐 끝에 매달린 액체 체적이 silica 노즐에 비해 크게 성장함을 의미한다. silica 노즐의 경우(Fig. 11(b))는 액적이 레이저 경로를 지나는 경우에 발생하는 오실로그램 상의 신호 형태가 매우 규칙적인 형태와 주기를 가지므로 오실로그램을 FFT 처리하여 액적 생성 주기를 하나의 값으로 얻을 수 있다. 이 경우에 FFT 처리를 통해 얻어진 주 주파수는 1350Hz 이다. Silica 노즐의 경우 일정한 크기의 액적이 얻어지므로 다음과 같은 식을 사용하여 액적의 크기를 예측할 수 있다.

$$d = \left( \frac{6Q}{\pi f_d} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

식 (1)에 의해 얻어진 액적의 크기는  $52\mu\text{m}$  이고 입경측정에서 얻어진 평균 입경(SMD)인  $44\mu\text{m}$  보다 15%정도 크게 나온다. 그 이유는 SMD가 측정된 입경들의 표면적 전체 분에 부피 전체의 비로부터 얻어진 평균값이고 FFT로부터 얻어진 시간 간격은 액적 발생 시간 간격 중 가장 자주 나타나는 시간 간격이므로 SMD와 FFT로부터 얻어진 평균입경은 정의(definition)에 있어 차이를 보인다. 따라서, 액적의 크기가 보다 균일하고 액적 형성 시간 간격이 보다 규칙적이라면, 입경측정에서 얻어진 평균 입경(SMD)과 액적 형성 회수 측정을 통해 얻어진 입경 사이의 차이는 더욱 작아질 것이다.

Fig. 1 의 SUS 컵에 모인 액적에 의해 흐르는 전류(drop delivery current)를 측정하여 공급유량으로 나누면 다음과 같이 비전하량(charge-to-mass ratio)을 구할 수 있다.

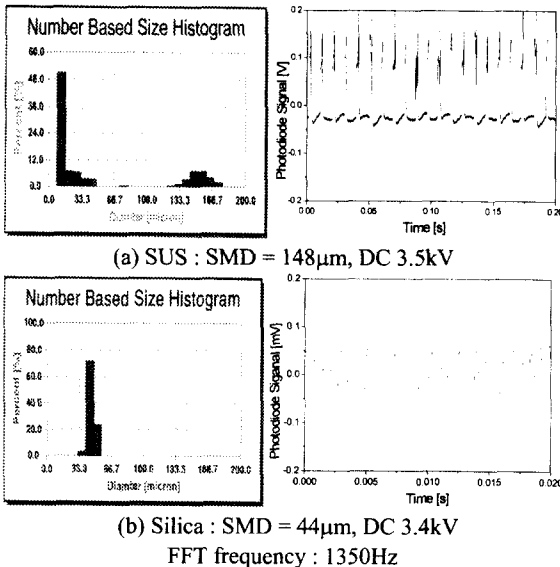


Fig. 11 Comparison of the drop size distribution and oscillogram of drop generation with the material of nozzle (Flow rate =  $1 \times 10^{-4}$  ml/s)

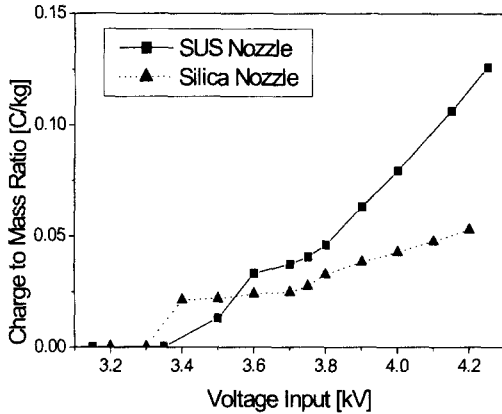


Fig. 12 Comparison of the charge to mass ratio between the material of nozzle (Flow rate =  $1 \times 10^{-4}$  ml/s)

$$q_d = \frac{I}{\rho Q} \tag{2}$$

공급유량이 매우 미소하므로 액적을 분열시키는 주된 힘은 전기력(electric force)이 된다. 따라서 다음과 같은 Rayleigh 한계(limit)<sup>[20]</sup>를 이용할 수 있다.

$$d = \{6(8\sigma\epsilon)^{1/2} / \rho q_d\}^{2/3} \tag{3}$$

이 값은 표면장력 에너지와 전기 에너지의 합이 최소인 경우의 값이며 이 직경에 해당하는  $q_d$  보다 큰 대전량을 가지면 전기력이 표면장력을 이기고 더 작은 액적으로 다시 분열된다.

Fig. 12는 SUS 노즐 및 silica 노즐을 사용한 경우에 입력전압 변화에 따른 비전하량의 변화를 보여 준다. 전체적으로 보아서는 입력전압 증가에 따른 비전하량의 증가 기울기가 SUS 노즐을 사용한 경우에는 매우 크고 silica 노즐을 사용한 경우에는 완만하다. 그런데 silica 노즐을 사용한 경우에 스핀들 모드가 시작되는 입력전압(3.4kV)에서의 비전하량은 SUS 노즐의 경우에 스핀들 모드가 시작되는 입력전압(3.5kV)에서의 비전하량에 비해 훨씬 크다. 미립화 된 액적의 크기가 모두 동일하다면 식 (3)을 통해 알 수 있듯이 비전하량이 클수록 작은 크기의 액적이 만들어지므로 silica 노즐을 사용한 경우가 SUS 노즐을 사용한 경우에 비해 작은 크기의 액적을 얻을 수 있다. 따라서, 비전하량의 크기로부터 추정한 결과는 Fig. 11의 평균입경 비교 결과

Table 3 Comparison between the measured SMD and the drop diameters obtained from eqs. (1) and 1/2 of Rayleigh limit

Type		Silica Nozzle
Voltage Input		3.4 kV
Dropsize [μm]	SMD	44
	from eq. (1)	52
	from 1/2 of Rayleigh limit	47

와 그 경향이 일치한다. 액적이 적하 되는 경우에 측정된 비전하량은 대략 Rayleigh 한계의 1/2 값이 됨을 Sample 과 Bollini<sup>[21]</sup>은 실험적으로 밝혔다. 특히, silica 노즐을 사용하고 3.4kV의 전압을 걸어주었을 경우에 Rayleigh 한계 비전하량의 1/2 값에 의한 액적의 크기를 구해보면 Table 3과 같다.

현재 영상처리 기법을 통해 측정된 평균입경, 액적 형성 회수 측정을 통해 얻어진 입경, Rayleigh 한계치의 1/2로 계산된 입경 모두가 비슷한 값을 나타냄을 Table 3의 비교를 통해 알 수 있다. 따라서, 균일 액적이 얻어지는 조건에서는 액적 형성 회수와 비전하량 측정값으로부터 SMD의 예측이 어느 정도 가능함을 알 수 있다.

### 3. 결론

스핀들 모드가 나타나는 공급유량 및 입력전압 범위를 찾고 이 영역에서 공급유량 및 입력전압 변화가 액적 형성에 미치는 영향을 살펴보았다. 두 가지 재질의 노즐을 사용하여 비교하였고 그 결과 silica 노즐을 사용한 경우에 대전된 균일한 액적을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 물을 사용한 경우에 스핀들 모드는 미세한 미립화 액적을 얻을 수 있는 최적의 모드로 판단된다.

(2) 스핀들 모드 영역에서 입력전압이 증가함에 따라 평균입경은 감소했다가 증가하므로 최소 평균입경을 가지는 입력전압이 존재하고 이 입력전압은 공급유량이 작을수록 낮은 입력전압에서 나타난다.

(3) 최소 평균입경을 가지는 입력전압이 존재하는 이유는 최소 평균입경을 나타내는 입력전압을 지나면 방전전류의 변화 폭과 크기가 급격하게 증



가하여 액주 형성을 불안해지고, 이에 따라서 큰 액적들이 간헐적으로 발생하기 때문이다.

(4) Silica 노즐을 사용한 경우에 SUS 노즐을 사용한 경우보다 균일한 액적을 얻을 수 있었다. 그 이유는 silica 노즐이 SUS 노즐에 비해 액체 콘을 형성하기 쉬우므로 액체 콘을 만들기 위해 더 낮은 입력전압이 요구되고 입력전압이 낮아지면 방전전류의 변화폭과 크기가 상대적으로 작아지므로 액주 형성과 액주로부터의 액적 형성이 좀 더 규칙적으로 되기 때문이다.

(5) Silica 노즐을 사용한 경우에 스펀들 모드가 시작되는 입력전압에서 측정된 평균입경, 액적 형성 회수 측정을 통해 얻어진 입경, Rayleigh 한계치의 1/2 로 계산된 입경이 15%이내에서 모두 일치하는 좋은 결과를 얻었다. Silica 노즐을 사용하고 스펀들 모드가 나타나는 공급유량 및 입력전압에서 액적을 만들면 작고 균일한 액적을 얻을 수 있고 비전하량으로부터 액적의 크기를 예측할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단의 지원 연구(KOSEF, 95-0200-05-01-3)로 시작되어 특정 기초 연구(KOSEF, 98-0200-03-01-3), 산학 협력 연구(KOSEF, 98-2-09-0401-2), 그리고 국가지정 연구실 사업(과제명 : 에너지 환경 문제 해결을 위한 미세입자 제어 기술, KISTEP, 99-N-NL-01-C-022)의 일환으로 지속되어 오고 있으며, 이와 아울러 BK21 사업의 일부 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

(1) Hines, R. L., 1966, "Electrostatic Atomization and Spray Painting," *J. Appl. Phys.*, Vol. 37, No. 7, pp. 2730~2736.  
 (2) Snyder, H. E., Senser, D. W., Lefebver, A. H. and Coutinho, R., S., 1989, "Drop size Measurements in Electrostatic Paint Sprays," *IEEE Trans. Ind. Appls.*, Vol. 25, No. 4, pp. 720~727.  
 (3) Abdel-Salam, M. S., Soliman, F. A. and Mgahed, A. A., 1993, "Electrostatic-Based Pesticide Spray Systems. part 1 : a Theoretical Investigation," *J. Phys. D:Appl. Phys.*, Vol. 26, pp. 2082~2091.  
 (4) Djuric, Z., Balachandran, W. and Wilson, C. W., 1998, "Electrical Field and Space Charge Modelling in a Viscous Fluid Flow in a Nozzle," *J. Phys.: Appl. Phys.*, Vol. 31, pp. 2132~2144.  
 (5) Shrimpton, J. S., Yule, A. J. and Watkins, A. P., 1997,

"Performance Data of an Electrostatic Atomizer for Highly Resistive Liquids," *Proc. of ICLASS-'97*, pp. 625~632.

(6) Bellan, J. and Harstad, K., 1997, "Mechanical and Electrostatic Dispersion of a Polydisperse Cluster of Drops for Soot Control," *Proc. of ICLASS-'97*, pp. 617~624.

(7) Wang, S. H., Chang, J. S. and Berezin, A. A., 1993, "Atomization Characteristics of Electrohydrodynamic Limestone-water Slurry Spray," *J. Electrostatics*, Vol. 30, pp. 235~246.

(8) 변영철, 황정호, 1998, "실험실 규모 정전기 분무형 반건식세정기의 SO<sub>2</sub> 제거효율 향상에 대한 계산 및 실험적 연구," 대한기계학회논문집(B), 제 22 권, 제 8 호, pp. 1111~1120.

(9) Lohmann, M., Beyer, H. and Schmidt-Ott, A., 1997, "Size and Charge Distribution of Liquid Metal Electrospray Generated Particles," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 28, pp. s349~s350.

(10) Atten, A. and Oliveri, S., 1992, "Charging of Drops Formed by Circular jet Breakup," *J. Electrostatics*, Vol. 29, pp. 73~91.

(11) Kidd, P. W., 1968, "Parametric Studies with a Single-Needle Colloid Thruster," *J. Spacecraft*, Vol. 5, No. 9, pp.1034~1039.

(12) Borra, J-P., Camelot, D., Marijijnissen, J. C. M. and Scarlett, B., 1997, "A new Production Process of powders with Defined Properties by electrohydrodynamic Atomization of Liquids and Post-production Electrical Mixing," *J. Electrostatics*, Vol. 40&41, pp. 633~638.

(13) Fu, D., 1995, "Processing of Porcelain Enamel Glass Powders for Electrostatic Spraying, Powder Technology," Vol. 85, pp. 65~69.

(14) Hoyer, B., Sorensen, G., Jensen, N., Nielsen, D. B. and Larsen, B., 1996, "Electrostatic Spraying : A Novel Technique for preparation of Polymer Coatings on Electrodes," *Anal. Chem.*, Vol. 68, pp. 3840~3844.

(15) Zomeren, A. A. V., Kelder, E. M., marijijnissen, J. C. M. and Schoonman, J., 1994, "The Production of Thin Films of LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> by Electro spraying," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, No. 6, pp. 1229~1235.

(16) Bayvel, L. and Orzechowski, Z., 1993, *Liquid Atomization*, Taylor & Francis, London, Chap. 1, 2, pp. 7~22, 109.

(17) Rosell-Llompart, J. and de La Mora, J. Fernandez, 1994, "Generation of Monodisperse Droplets 0.3 to 4μm in Diameter from Electrified Cone-Jets of Highly Conducting and Viscous Liquids," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, No. 6, pp. 1093~1119

(18) Cloupeau, M. and Prunet-Foch, B., 1990, "Electrostatic Spraying of Liquids: Main Functioning

Modes," *J. Electrostatics*, Vol. 25, pp. 165~184.

(19) Oglesby, Sabert, Nichols, Grady B., 1978, *Electrostatic Precipitation*, Marcel Dekker, Inc., chap. 3, pp. 50.

(20) 이재복, 황정호, 1999, "전기 분무 시스템의 전

기수력학적 특성," 대한기계학회논문집(B), 제 23권, 제 8호, pp. 1031-1039.

(21) Sample S. B. and R. Bollini, 1972, "Production of Liquid Aerosols by Harmonic Electrical Spraying," *J. Colloid and Interface Sci.*, Vol. 41, No. 2, pp. 185-193.