전기 분무 시스템의 전기수력학적 특성

이 재 복* · 황 정 호**

(1999년 1월 25일 접수)

Electrohydrodynamic Characteristics of an Electro-Spray System

Jae-Bok Lee and Jung-Ho Hwang

Key Words: Electrospray(전기분무), Electrical Conductivity(전기전도도), Droplet Size(액적 크기), Droplet Charge(액적 전하량), Cone-Jet Mode(원뿔형 액주 모드)

Abstract

Electrospraying comprises the generation of liquid droplets by applying a high voltage to the surface of a liquid. By monitoring the current and the flow rate it was possible to obtain a stable cone jet mode in a given condition. In this work the liquid contained NaCl particles resolved in distilled water. The NaCl particles increased concentration of the ionized solution and thus increased electrical conductivity of the liquid, which was inversely proportional to the flow rate in the cone jet mode. A number of sprayed droplets were sampled and dried enough, and then the size of NaCl particles were measured. The measured droplet diameter was a little larger than two theoretical diameters, Rayleigh diameter and mobility diameter.

기호설명

A :액주 중심에서 일정거리에 있는 궤면 상의 단면적
A_x :축방향 분무 면적
C_c :미끄럼 보정 상수
d :분무 액적 직경
H :노즐과 접지판 거리
h :NaCl입자 평균 높이
I :전류
L :NaCl입자 평균 길이
$\dot{N}$:단위시간당 접지판에 도달하는 액적 외 개수
n_x :분무 액적의 축방향 농도
q :전하량
$\triangle R$:궤면 상의 미소거리
R_c :노즐의 반경
t_l :유동층 두께
u_x :분무 액적의 축방향 속도
V,Vo :전압, 노즐 인가전압
v :액적의 부피
W_R :액적의 에너지
α :비례 상수
γ :표면장력
μ :공기의 점성 계수
ρ :액체의 밀도
σ :전기 전도도

* 연세대학교 대학원 기계공학과
** 회원, 연세대학교 기계공학과

하첨자
R,θ :궤면 상의 좌표

1. 서 론

액체의 미립화 기술의 개발은 농약 살포나 도장 그리고 연료 분무에 이르기까지 주된 관심사이지만 기존의 분무 방식은 많은 양의 농약이나 도료의 손실, 엔진 내부에서의 불완전 연소 가능성 등의 단점들로 문제 시 되고 있다. 이와 관련해 최근 들어 전기장을 가하여 액적을 대전시키고 미립화를 촉진하는 전기 분무(Electrospray)방식에 대한 연구가 진행되었다. 기존의 분무방식들이 공압을 이용한 반면에 전기 분무 방식은 고전압을 전도성 모세관에 인가하여 대상 유체가 접지판으로 분무되는 일련의 과정을 의미한다. 즉 전기 분무란 액체의 전도성을 이용하여 단극성 대전 액체를 만들고 전위차에 의해 형성된 전기장에 의해 분무되는 원리이다. Fig. 1은 전위차에 따라서 생기는 여러 가지 발생모드를 보여준다. 전기장이 없는 경우(상태①) 노즐 출구의 궤면에서는 정수력학적인 압력과 모세 압력의 평형이 형성되지만 전기장이 있는 경우(상태②)는 궤면 상의 표면 전하에 의한 정전기적 압력이 추가된다. 이러한 궤면 상의 안정된 압력 평형 상태를 지나 궤면 상의 전위가 임계전위 이상으로 커지게 되면(상태③-⑥)축 상에서 액주(jet)의 형태로 유체기둥이 분출되며 이 유체는 대전되어 있으므로 분출된 만큼에 해당하는 전하의 손실을 보상하기 위해서 전도 전류가 흐르게 된다. 이때 상태④는 상당히 안정된 상태로 원뿔형 액주(cone-jet) 모드라 불리며 다른 모드에 비해 액적의 크기 분포가 단분산(monodisperse)에 가까운 분무를 한다.

Gomez와 Tang[1]은 일정 유량에서 전기장으로 인한 액체 표면에서의 불안정성과 물통의 힘에 인한 액적의 분열을 연구했으며, Rulison과 Flagan[2]은 액체 간의 전기전도도의 영향을 연구하였다. 비슷한 연구가 Smith[3]에 의해서도 수행되었는데 유량과 전기전도도가 서로 반비례함을 수학적으로 유도했다. Joffre 등[4]은 전기적 압력에 의해서 변하는 궤면의 모양을 계산하여 전기장과 액적 생성의 관계를 연구하였다. Grace와

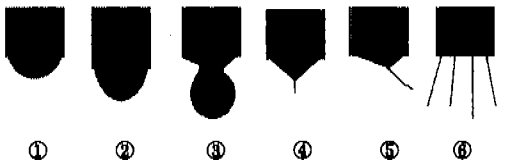


Fig. 1 ①no electric field existing state, ②-⑥ electric field existing, ②no dripping, ③ dripping, ④cone-jet ⑤unstable cone-jet, ⑥ multi jet (unstable).

Marijnissen[5]은 전기적 방법에 의한 여러 가지 분무에 대해 체계적인 정리를 하였다. Cloupeau와 Prunet-Foch[6]는 원뿔형 모드를 비롯한 여러 가지 모양과 특성에 관해서 연구를 하였다. 실제 분무 모양을 결정짓게 되는 노즐 끝에서의 현상에 대해서도 많은 연구가 진행되었는데 Mestel[7]은 분무되는 노즐 끝에서의 수직 응력과 접선 응력의 관계를 통해 레이놀드 수가 높은 경우의 원뿔형 모드에 대해 수학적인 해석을 하였고, Harris와 Basaran[8]은 전기장 내에서 노즐 끝에 매달려 있는 전도성 액적의 형상에 대해 연구하였다. Naqwi[9] 및 Rosell 등[10]은 PDPA나 APS을 사용하여 전기 분무에 의해 생성된 액적의 크기에 관해 연구했고 이규운과 안강호[11]는 DMPS를 이용해 초미세 입자 발생을 연구했다.

본 논문은 NaCl 수용액을 이용한 전기 분무 시스템의 특성을 소개하고 NaCl 수용액의 농도를 변화시켜 달라지는 전기전도도, 액적의 속도, 전류 및 전위 분포 등 전기수력학적인 조건으로 입경을 예측하고 이를 이론값 및 실험값과 비교했다.

2. 이 론

전기 분무 형태는 전위차에 의해 형성된 전기장, 액적의 전기적인 특성, 그리고 액적의 크기와 전하량에 의해 결정된다. 다음은 Fig. 1의 여러 모드 중 원뿔형 액주(cone-jet)에 대한 이론적 전개를 소개한다.

2.1 분무 영역에서의 전위 분포

Fig. 1에서 설명한 전기 분무 현상을 규명하기 위해서는 Fig. 2와 같은 노즐-평판 구조에서의 전

위차에 의한 분무 원리를 이용하는데 노즐-평판 구조는 진공 혹은 대기 상태에서의 비선형 전위 분포를 가진다. 액적의 분무 시는 대전된 액적으로 인한 공간전하 분포가 존재하고 이로 인해 전위 분포가 달라지므로 복잡한 수치 계산이 요구되는 반면 공간 전하를 무시한 경우는 해석해가 존재하며 무차원 좌표 $\bar{z}(=\frac{z}{H}), \bar{r}(=\frac{r}{R_c})$로 다음과 같이 표현된다.[12] 이때 H, R_c는 각각 노즐부터 접지판 거리, 노즐의 반경이고 V_o는 인가 전압이다.

$$\frac{V}{V_o} \simeq \frac{1}{\ln(4H/R_c)} \times \ln\left[\frac{(\bar{r}^2+\bar{z}^2)^{1/2}+\bar{z}}{(\bar{r}^2+(2-\bar{z})^2)^{1/2}+(2-\bar{z})}\right] \quad (1)$$

2.2 전기전도도와 분무 유량

Fig. 2는 또한 Fig. 1④의 원뿔형 액주 모드를 보여준다. 이때 유체 궤면(meniscus)의 R, θ방향 전기장 성분 E_R, E_θ는 Ohm의 법칙과 힘의 평형으로부터 구해진다. Ohm의 법칙은 $\frac{I}{A}=\sigma E_R$로 표시되는데 이때 A는 거리 R에서의 궤면 단면적, σ는 전기전도도, I는 전류이다. 단면적 A는 $2\pi R^2(1-\cos\theta_o)$이므로 E_R은 다음과 같이 전기전도도에 반비례함을 알 수 있다. 이때 θ_o은 접촉각으로 49.3°이다.[5]

$$E_R=\frac{I}{2\pi R^2\sigma(1-\cos\theta_o)} \sim \frac{1}{\sigma} \quad (2)$$

또한, 유체 궤면에서 표면장력에 의한 압력 $\frac{\gamma\cot\theta_o}{R}$과 정전기력에 의한 압력 $\frac{\varepsilon_o E_\theta^2}{2}$이 평형을 이루므로 E_θ는 다음과 같이 표시되며 이 때 γ, ε_o는 각각 표면장력, 공기의 유전상수이다.[7]

$$E_\theta=\left[\frac{2\gamma\cot\theta_o}{\varepsilon_o R}\right]^{1/2} \quad (3)$$

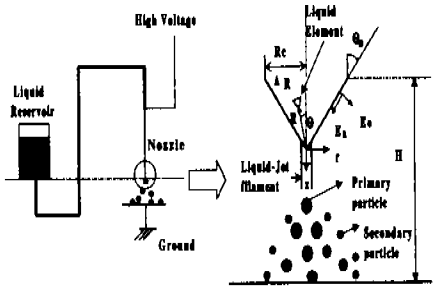


Fig. 2 Schematic diagram of spraying and meniscus of liquid surface.

한편 요소범위 $R\sim R+\triangle R$에 유체의 연속식, 전하량 연속식, 유체 운동 방정식을 적용시키면 다음의 식들이 유도된다.[3]

$$Q=2\pi R\sin\theta_o u t_l \quad (4)$$

$$2\pi R\sin\theta_o\varepsilon_o E_\theta u+I=0 \quad (5)$$

$$2\pi R\sin\theta_o\rho u^2|_{R+\triangle R}-2\pi R\sin\theta_o\rho u^2|_R = 2\pi R\sin\theta_o\varepsilon_o\triangle R E_R E_\theta \quad (6)$$

여기서 Q는 액주를 통과하는 분무 유량이고, u는 궤면 유체의 속도, t_l은 유체 유동층 두께이다. 식 (6)에 식 (2)~(5)를 대입하면 유량 Q는 다음과 같이 전기전도도에 반비례한다.

$$Q=\frac{4\pi\varepsilon_o\sin\theta_o\cos\theta_o t_l}{(1-\cos\theta_o)}\cdot\frac{\gamma}{\rho\sigma}\sim\frac{1}{\sigma} \quad (7)$$

2.3 액적의 비전하량 및 크기

2.2절에서 설명한 원뿔형 액주 모드에서는 r=z=0에서 형성된 액주가 결국은 액적들로 분열(fission)되게 된다. 따라서 분열 전에 전도에 의해서 형성되는 전류는 분열 후에는 대류 전류로 변환되며 이로부터 액적의 크기 분포가 단분산 이라는 가정 하에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I=A_x q n_x u_x \quad (8)$$

여기서 A_x, n_x, u_x는 각각 축 방향으로의 위치에 따른 분무 단면적, 분무 농도 및 속도이고 q는 액적의 전하량이다. 확산에 의한 영향이 전기

력에 의한 영향에 비해 무시될 수 있다면 액적 외 속도 u_z는 전기 이동도 $\frac{qC_c}{3\pi\mu d}$와 전기장 E_z의 곱이므로 식 (8)은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{I}{A_z} = \frac{C_c}{3\pi\mu d} q^2 n_z E_z \qquad (9)$$

이때 C_c는 미끄럼 보정 계수이며 μ, d는 각각 공기의 점성 계수와 액적의 크기이다. 또한 단위 시간당 평판에 도달한 액적의 개수를 $\dot{N}$이라 할 때, 식 (9)의 전류 I는 $\dot{N}q$가 되며 분무 유량 Q 역시 $\dot{N}v$로 표시할 수 있다.(v는 액적의 부피로 $\frac{1}{6}\pi d^3$). 유량의 정의에 의해 $Q = A_z u_z n_z v$가 되므로 액적 부피 당 전하량(비전하량) q/v는 I/Q와 같게 된다. 이들 관계식을 식 (9)에 대입하면 식 (10)으로 정리된다.

$$d_{(mobility)} = \left[\frac{18\mu}{C_c} \frac{Qu_z}{IE_z} \right]^{1/2} \qquad (10)$$

이때 분무 공간에서의 속도와 전기장의 세기인 u_z, E_z는 분무 액적의 위치에 따라 서로 다른 값을 갖게 되는데[14] 액적이 종단 속도에 도달한 후의 속도와 전기장 세기인 경우에 액적이 1㎛이상이라고 가정하면($C_c \simeq 1$) 액적의 직경을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d_{(mobility)} \simeq \left[18\mu \frac{Q}{I} \frac{u_z}{E_z} \right]^{1/2} \qquad (11)$$

한편 액적의 크기와 비전하량의 관계는 에너지 법에 의해서도 얻을 수 있다. 먼저 크기 d인 액적의 전하량 q와 표면장력 γ에 의해 전기적, 유체역학적 에너지 W_R은 $\frac{q^2}{4\pi\varepsilon_o d} + \pi d^2\gamma$이며 $\frac{\partial W_R}{\partial d} = 0$으로 액적의 최대 비전하량(Rayleigh limit)[15]이 구해진다.

$$q/v = 12(2\varepsilon_o\gamma)^{\frac{1}{2}} / d^{\frac{3}{2}} \qquad (12)$$

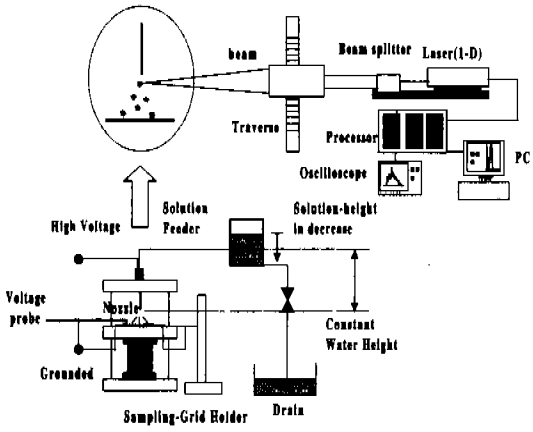


Fig. 3 Experimental set-up.

이때 비전하량은 앞에서 언급한 바와 같이 I/Q로 대치되므로 다음과 같이 액적의 직경이 얻어진다.

$$d_{(Rayleigh)} = \left\{ 12(2\varepsilon_o\gamma)^{\frac{1}{2}} \frac{Q}{I} \right\}^{\frac{2}{3}} \qquad (13)$$

3. 실험 장치 및 방법

실험 장치는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 노즐-평판 방식을 사용하였으며 (-)전압(0 ~-10kV)을 노즐에 인가하였고 평판은 접지시켰다(이하 -표시 무시). 노즐은 의료용 바늘을 가공하여 만들었으며(내경 0.3mm, 외경 0.5mm) 접지판은 노즐로부터 약 30mm에 위치시켰다. 노즐로의 유량은 전기적 압력에 의해 공급되는데 먼저 정수력학적인 압력에 의해서는 노즐에서 나오는 유량이 없게 하기 위해서 노즐 끝에서의 높이가 약 10cm의 위치에 수조를 설치하여 연결하였다. 수조 내 수면의 높이는 항상 일정한 상태를 유지시켰으며 유량의 측정은 노즐로 흐르는 유체가 단위시간당 관을 통과한 이동 거리를 측정하여 계산하였다. 노즐에 주입되는 용액은 증류수 400cc에 대해 NaCl 0.1, 1, 10g(0.025, 0.25, 2.5 wt%)을 용해시켜 만들었다. NaCl 입자의 크기는 동시에 접지한 표본 고정대를 제작하고 표본 채집판(구리)으로 신속한 샘플링을 하여 SEM사진을 찍어서 측정하였다. 용액의 전기전도도는 전기전도계, 전위 분포는 1000:1의 고전압 프로브로, 전류값은 전원와

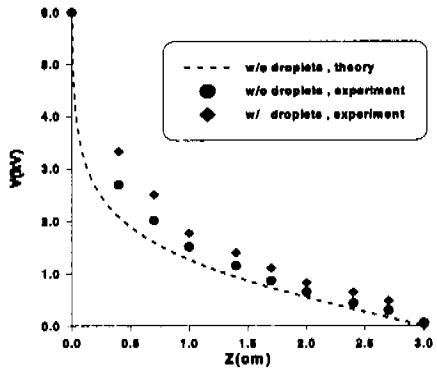


Fig. 4 Voltage distribution along the distance between the nozzle and the grounded plate(r=0).

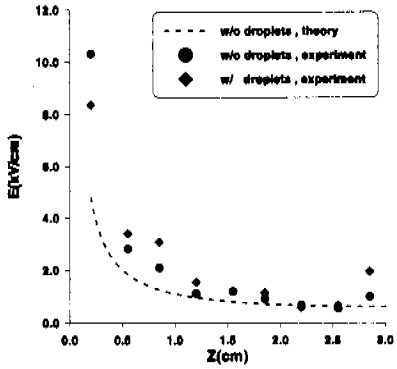


Fig. 5 Electric field distribution along the distance between the nozzle and the grounded plate(r=0).

전류계를 μA이하로 확장시켜 측정하고 노즐 끝에서부터 축 방향 속도는 5W Ar-ion 레이저를 사용하는 자동 상관 방식의 LDV(Dandec ;후방 산란형)를 사용해 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 전위 분포

노즐에 6kV를 인가하였을 때 NaCl 수용액의 농도를 변화시키며, 액적 분무의 유무에 따라 노즐로부터 접지판에 이르는 거리에 대한 전위 분포를 측정하였다. 그 결과 NaCl 수용액의 농도에 따라서는 거의 차이가 없으며 측정값의 편차는 측정 장비의 오차 범위 내에 있었다. Fig. 4는 그 결과를 보여주며 식 (1)의 해석해와 유사한 전위 분포를 보였다. 노즐 근처에서 접지판으로 가까워질수록 분무 상태에서 측정한 전위 분포는 분무가 없을 때에 비해 약 20-55%만큼 전위가 증가하는데 이는 대전된 분무 액적으로 인한 공간 전하 효과에 기인한다. Fig. 5는 전기장의 세기를 Fig. 4로부터 계산한 결과인데 분무가 있을 경우 노즐 주위에서 전기장의 세기가 작아지나 접지판에 가까운 부근에서는 전기장 세기가 커지는데 액적에 의한 공간 전하 효과로 설명되며 이는 관련 이론[16]과도 잘 일치한다.

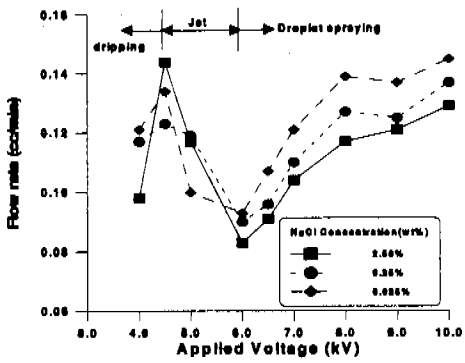


Fig. 6 Effect of NaCl concentrations on the sprayed flow rate at various applied voltages.

4.2 전기 분무 특성

주어진 NaCl 농도에 대해 전압을 0에서 10kV까지 변화시킬 때 Fig. 1과 같은 모드 변화를 얻을 수 있었다. 전압이 0-4kV까지는 액적이 거의 떨어지지 않지만 4-6kV에서는 액적이 정기적인 주기를 가지고 하나씩 분사되면서 전압의 증가에 따라 그 속도가 빨라지며(dripping mode) 6-8kV에서 실제로 원뿔형 액주가 생겨 성장하고 9-10kV에서는 불규칙한 액주 상태로 분무되는데 이때는 거의 액적 모양은 보이지 않는 액주만의 상태를 나타냈다(unstable jet mode).

Fig. 6은 노즐에 주입되는 용액 내 NaCl 농도를 변화시키면서 전압의 증가에 따라 유량을 3회 측정하여 평균했는데, 이때 표준편차는 최대 0.01cc/min이다. 6kV이하의 낮은 인가 전압 영역에서는 불안정성이 커서[3] 유량 변화의 특성 해석은 어려우나 그 이상의 전압에서는 비교적 안

Table 1 NaCl concentration versus conductivity of NaCl solution.

NaCl(g)	Concentration (wt%)	Conductivity (mS/cm)
0.1	0.025	5.39
1	0.25	61.2
10	2.5	320

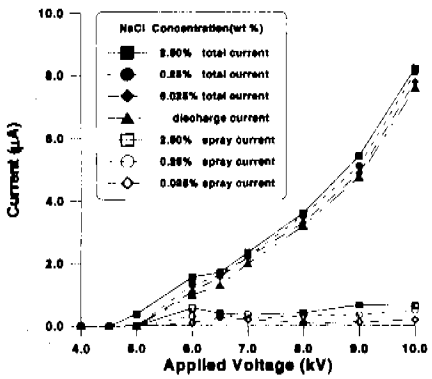


Fig. 7 Current/voltage characteristics.

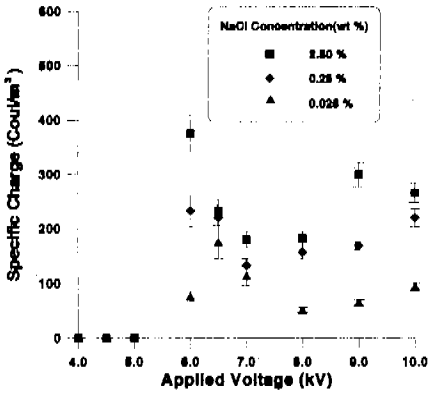


Fig. 8 Effect of applied voltage and NaCl concentration on specific charge.

정된 액적 상태로 분무되었고, 수용액의 NaCl 농도가 증가함에 따라 유량은 감소했다.

이는 Table 1의 전기전도도 실험 결과와 식 (7)에 의해 설명된다. 유량과 용액의 전기전도도는 식 (7)에서 보듯이 서로 반비례하는데 Table 1에 나타난 바와 같이 측정 결과 NaCl 함량과 전기전도도가 비례한다. 따라서 Fig. 6의 결과인 NaCl 농도와 유량비가 반비례함이 설명된다.

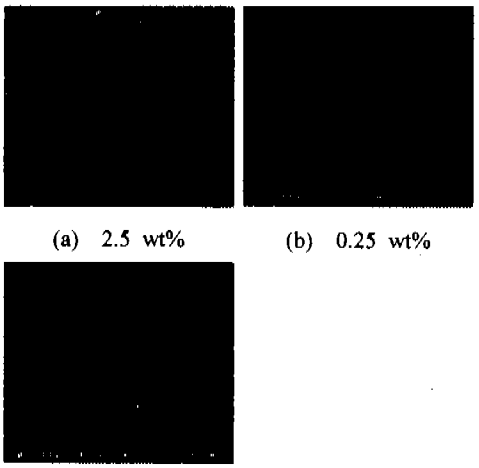
이번에는 노즐에 인가한 전압의 변화에 따른 전류값이 Fig. 7에 나타나있는데 3회 측정했으며 표준편차는 5kV에서 최대 0.35μA이지만 기타 영역에서는 0.02μA이하이다. 분무가 없을 때에도 약 5kV이상에서 전류가 흐르는데 이는 방전(discharge)에 의한 영향 때문이다. 따라서 분무시 측정되는 전류값은 방전에 의한 전류와 앞의 이론에서 언급한 분무 액적에 의한 전류(대류 전류)가 중첩된 값이다. 전체 전류 중 방전 전류가 전체의 40-90%를 차지하며 두 전류값의 차이로 분무에 의한 전류를 구할 수 있는데 이는 액적 표면의 전하와 분무 유량에 의해 결정된다. 액적이 주기를 가지고 떨어지는 전압의 범위인 4-5kV에서는 전류는 거의 흐르지 않는데 비해 6-7kV에서 상대적으로 높은 전류값을 가지는데 이때가 원뿔형 액주 모드로서 안정된 분무 상태이다. 인가전압이 8kV까지는 전압의 증가에 따라 전류가 감소하다가 9-10kV에서 다시 증가하는데 이는 액주 상태로 분무될 때 추가 발생되는 전도 전류에 의해서이다. 한편 NaCl의 함량에 따라 생기는 전기전도도 차이에 의해서도 전류값이 다른데 NaCl의 함량이 클수록, 즉 전기전도도가 클수록 분무 유량 당 전하량의 증가를 의미한다. Fig. 6과 7로부터 인가전압의 증가에 따른 유량과 전류의 관계가 얻어진다. 앞에서 언급한 바와 같이 Fig. 8의 비전하량은 전류와 유량의 비로 표시될 수 있으며 NaCl 함량이 증가하면 전기전도도가 증가하고 이에 따라 비전하량이 증가한다. 비전하량은 원뿔형 액주 모드인 6-7kV에서 최대이며 NaCl 함량이 작을수록 인가 전압은 높다. 또한 8-10kV에서 다시 증가하는데 이는 앞서 언급한 전도 전류에 의해서이다.

4.3 NaCl입자의 크기

Fig. 9는 원뿔형 액주 모드인 6kV에서 얻어진 액적으로부터 포집 되어 물이 증발되고 남은 NaCl 입자를 SEM사진으로 찍은 결과이며 NaCl 함량이 클수록, 즉 농도가 클수록 NaCl입자의 크기가 커짐을 알 수 있다.

Fig. 10은 이 중 몇 개를 확대한 사진을 보여주며 NaCl 입자는 증발 시간에 따라 차이가 있지만 대부분 투영 정사각형의 모양을 형성한다. Fig. 11은 Fig. 9로부터 NMD(number mean diameter)를

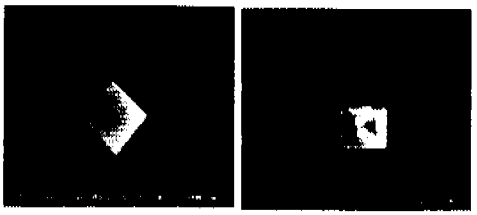
구해 NaCl 수용액의 농도에 따라 크기를 보여주는데 NaCl 농도가 증가함에 따라 NaCl입자의 크기는 1-10㎛의 범위 내에서 비례적으로 증가했다.



(a) 2.5 wt% (b) 0.25 wt%

(c) 0.025 wt%

Fig. 9 Sampled NaCl particles.



(a) ~ 0.8㎛ (b) ~ 30㎛

Fig. 10 Morphology of NaCl particles.

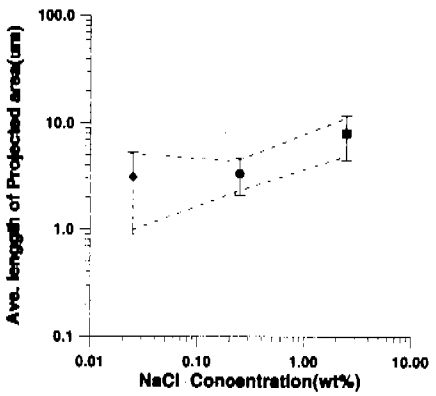


Fig. 11 Dried NaCl particle sizes for various NaCl concentrations (V_o=6kV).

4.4 액적의 크기

NaCl용액 액적의 크기는 측정된 NaCl입자의 크기로부터 다음과 같이 구할 수 있다. 용액 내 용해되어 있는 NaCl과 증류수의 질량비는 액적 분무 후에도 유지된다고 가정하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\left(\frac{m_{NaCl}}{m_{water}}\right)_{용액}=\left(\frac{\rho_{NaCl}\,v_{NaCl}}{\rho_{water}\,v_{water}}\right)_{액적} \tag{14}$$

이 식에서 좌변은 각각 용액을 이루는 NaCl과 증류수의 질량비로부터 실험에서 구해지며, 우변의 v_{NaCl}은 사진을 통해 알 수 있는 정사영 면적 L^2과 결정의 높이 h의 곱이므로 최종적으로 액적으로 분무되어 접지판에서 증발된 물의 부피 v_{water}를 알 수 있다. 여기서 NaCl 입자의 높이 h는 사진으로 식별될 수 없으므로 정사영 면적의 평균 길이 L에 비례한다고 가정한다(=α L). 액적의 부피는 $v_{NaCl}+v_{water}$이므로 액적의 직경 d는 다음과 같이 구해진다.

$$d_{(calculated)}=\left[\frac{6}{\pi}\,\alpha L^3\left(\frac{\rho_{NaCl}}{\rho_{water}}\cdot\left(\frac{m_{water}}{m_{NaCl}}\right)_{용액}+1\right)\right]^{\frac{1}{3}} \tag{15}$$

Fig. 12는 α 를 1이라 가정하고, NaCl의 비중 $\left(=\frac{\rho_{NaCl}}{\rho_{water}}\right)$인 2.165[17]를 대입하여 계산한 결과를 보여준다. Fig. 12는 또한 식 (11)과 (13)에 소개된 $d_{(mobility)}$와 $d_{(Rayleigh)}$를 보여준다. 이 계산을 위해서는 실험에서 구한 Q, I, E값이 필요하며 추가적으로 속도 u_z의 측정이 필요하다. Fig. 13은 1차원 LDV를 사용해 얻은 위치별 1024개 데이터를 처리한 결과인데 액적의 속도는 노즐 주변에서 높은 전기장으로 인해 급가속되고 약 15mm위치에서 종단 속도에 도달했다. 분무 액적은 NaCl 수용액 농도에 따라서는 초기 속도에만 차이가 클 뿐 그 이후에는 큰 차이가 없으며 접지판에 가까울 질수록 분무 액적의 농도가 희박해져서 20mm이상의 위치에서의 속도 측정은 불가능했다.

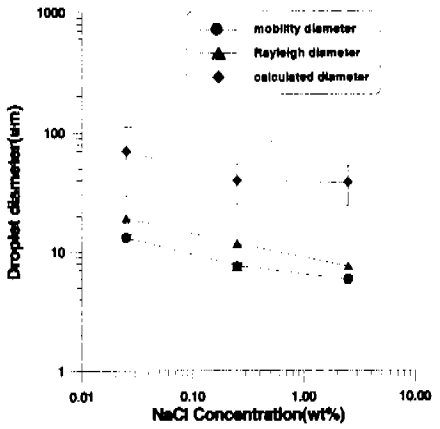


Fig. 12 Droplet diameters for different NaCl concentrations.

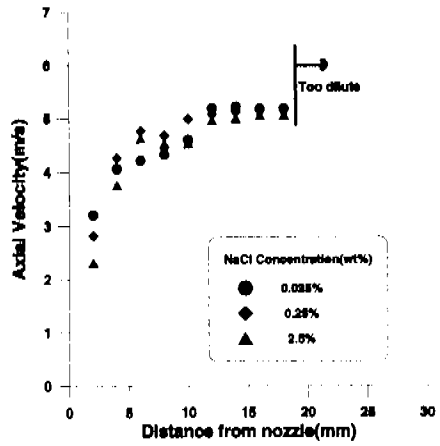


Fig. 13 Droplet velocities for various NaCl concentrations(V_o=6kV).

위와 세 가지 직경에 대해서 NaCl 입자의 크기로부터 계산한 액적의 직경이 가장 크게 예측되는데 이는 접지판에 부착된 액적의 모양이 관성력 및 전기력에 의해 원래의 구형을 유지하지 못하고 넓게 퍼지게 되며 이로부터 얻어진 NaCl 입자의 크기 또한 2차원적인 모양인데 비해 이를 정육면체로 가정하였기 때문이다. 한편 액적의 운동성을 이용하여 계산된 직경은 Rayleigh 직경과 비교해 약간 작은데 그 이유는 (9), (10)의 식 유도에서 횡 방향으로 액적의 크기 뿐 아니라 속도도 일정하다는 가정 때문이다.

5. 결 론

본 실험은 전위 분포, 유량, 전류, 비전하량, NaCl 입자 및 액적의 크기 등 전기 분무시 전기수력학적 특징에 관해 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 공간 전하를 무시하고 해석적으로 구한 전위 분포는 같은 조건에서의 실험 결과와 비교해 유사한 경향을 보였으며, 분무 시 측정된 전위 분포는 전기장 세기가 상대적으로 약한 접지판 부근 영역에서 분무가 없을 때 보다 측정 전압이 55%정도 큰데 이는 전하를 띤 액적으로 인한 공간 전하 효과 때문이다.

(2) 전기분무에서 전압의 증가에 따라 여러 가지 분무모드를 가지며 그중 비교적 안정된 원뿔형 액주모드가 6-7kV에서 관찰되었고, 이 영역에서는 NaCl 함량에 따라 전기전도도가 증가할수록 유체 궤면 내의 전기장의 세기가 작아져 유량이 감소하였다.

(3) 분무 시 측정된 전류값은 전체의 80-90%에 해당하는 방전 전류가 존재하며 이를 배제한 분무만에 의한 전류는 상대적으로 작은 양인데 6-8kV의 원뿔형 모드 영역에서 커졌다가 전압 증가에 따라 작아지며 다시 액주가 형성되어 전도 전류가 생긴 9-10kV에서 증가하였고 전기전도도가 클수록 액적의 대전량이 많아 전류값이 크다.

(4) 분무된 액적의 크기 변화는 물이 증발하고 남은 NaCl 입자의 크기를 통해 고찰했는데 NaCl 입자의 크기는 농도에 비례하지만 분무 액적의 크기는 반비례하였는데 이는 NaCl 함량에 따른 전기전도도의 증가로 인해 유량이 감소했기 때문이다.

(5) 액적의 운동성, 최소 에너지 이론 및 무영 NaCl 입자의 크기 등으로부터 액적의 크기를 예측했으며 그 결과 무영 NaCl 입자의 크기로부터 구한 직경이 다소 크게 예측한 반면 운동성은 기존의 최소 에너지 이론으로 구한 직경보다 약간 작게 예측되었다.

후 기

본 연구는 교육부(과제번호 ME-97-A-10) 지원의 일부로 진행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Gomez, A. and Tang, K., 1994, "Charge and Fission of Droplets in Electrostatic Sprays," *Phys. Fluids*, A6, pp. 404~414.

(2) Rulison, A. J. and Flagan, R. C., 1994, " Electrospray Atomization of Electrolytic Solutions," *J. Colloid and Interface Sci.*, Vol. 167, pp. 135~145.

(3) Smith, D. P. H., 1986, "The Electro Hydrodynamic Atomization of Liquid," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. IA-22, pp. 527~535.

(4) Joffre, G. H., Prunet-Foch, B., Berthomme, S. and Cloupeau, M., 1982, "Deformation of Liquid Menisci Under the Action of an Electrical field," *J. Electrostatics*, Vol. 13, pp. 151~165.

(5) Grace, J. M. and Marijnissen, J. C. M., 1994, "A Review of Liquid Atomization by Electrical Means," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, pp. 1005~1019.

(6) Cloupeau, M. and Prunet-Foch, B., 1994, "Electrohydrodynamic Spraying Function Modes : Critical Review," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, pp. 1021~1036.

(7) Mestel, M., 1994, "The Electrohydrodynamic Cone-Jet at High Reynolds Number," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, pp. 1021~1036.

(8) Harris, M. T. and Basaran, O. A., 1993, "Capillary Electrohydrostatics of Conducting Drops Hanging from a Nozzle in an Electric Field," *J. Colloid and Interface Sci.*, Vol. 161, pp. 389~413.

(9) Naqwi, A. A., 1994, "In Situ Measurement of Submicron Droplets in Elecrosprays Using a Planar Phase Doppler System," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, pp. 1201~1211.

(10) Rosell-Llompart, J. and Fernandez de la Mora, J., 1994, "Generation of Monodisperse Droplets 0.3 to 0.4㎛ in Diameter from Electrified Cone-Jets of Highly Conducting and Viscous Liquids," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, pp. 1093~ 1119.

(11) 이규윤, 안강호, 1997, "전기-수력학적 방법에 의한 초미세 입자 발생에 관한 연구," 대한기계학회논문집 제22권 제11호, pp. 1983~1988.

(12) 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.

(13) Cloupeau, M. and Prunet~Foch, B., 1988, "Electrostatic Spraying of Liquids in Cone Jet Mode," *J. Electrostatics*, Vol. 22, pp. 135~159.

(14) Ganan-Calvo, A. M., Lasheras, J. C., Davila, J. and Barrero, A., 1994, "The Electrostatic Spray Emitted from an Electrified Conical Meniscus," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, pp. 1121 ~1142.

(15) Rayleigh, J. W. S., 1879, "On the Conditions of Instability of Electrified Drops, with Applications to Electric Discharge from Liquid Points," *Proc. R. Soc.*, Vol. 29, pp. 71~83.

(16) Electrostatic Precipitation, 1978, edited by Sabert Oglesby and Grady B. Nichols, Marcel Dekker. Inc, New York and Basel.

(17) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 1993, edited by D. R. Lide, CRC Press, Ann Arbor, MI.