

고전압 직류전기장에서 전기수력학적 분무 유동 가시화에 관한 연구

성 기 안†

A Study on the Visualization of Electrohydrodynamic Spray Flow in High DC Voltages

K. A. Sung

Key Words: Electrohydrodynamic(전기수력학적), Whipping motion(휘핑운동), Back-illumination (후방조광법), STS (스테인레스강), Mean drop radius(비구면 액적의 평균반경)

Abstract

An experimental study was performed to investigate the liquid breakup and atomization characteristics in electrohydrodynamic atomization according to the changing of experimental parameters such as nozzle size, fluid flow, and electrical intensity. An original electrohydrodynamic atomizer equipment was designed and manufactured for the analysis of spray visualization and the exploration of relationship between applied power and the behavior of liquid atomization. The image processing technique by using the back-illumination method was applied to visualize the distilled liquid breakup process and to examine the variation of the droplet size distribution. The results show that the spray modes of electrohydrodynamic atomization are closely connected by the strength of the electric stresses at the surface of the liquid film and the kinetic energy of the liquid jet leaving the needle tip.

1. 서 론

전기수력학적 미립화(electrohydrodynamic atomization)는 전기수력학적 힘을 이용하여 액체를 대전시키면서 미세 액적으로 분산시키는 방법이다. 액적을 대전시키면 액적간의 합착(coalescence)을 방지 할 수 있고 먼지 입자 등의 채집 효율을 증가시킬 수 있으며, 액적의 경로를 제어함으로써 응용 분야를 넓게 확장시킬 수 있다. 또한, 낮은 소비전력(수 mW)으로 액체를 미립화 할 수 있기 때문에 매우 경제적이다^(1, 2).

이 방법은 적은 공급 유량으로 미세하고 균일한 액적

을 만들어야 하는 액체 금속 분무(Lohmann), 잉크젯 프린터(Atten 등), 파우더 재료(Borra 등, Fu), 필름 생성(Hoyer 등, Zomeran 등) 등에 폭 넓게 적용될 수 있다. 또한, 균일 액적 생성은 분무 액적의 운동, 증발, 건조, 연소 등의 연구에 필수적이고, 매우 작고 균일한 액적의 경우에는 흡입 치료(inhalation therapy), 방사능 차폐(protection against radioactive contamination) 및 소독(disinfection) 등에 응용될 수 있다고 Bayvel 등에 의해 보고되었다⁽³⁻⁵⁾. Kim 등은 직류 전기장에서 노즐 재료 및 유량 조건의 변화가 액적 형성 과정 등에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하여 전도성 노즐과 비전도성 노즐에 대한 액적 형성 특징들을 보고하였다^(6, 7).

액체에 인가할 수 있는 전기장에는 교류, 직류 및 교류-직류 복합 전기장이 있다. 비록 이러한 종류의 전기장에 의해 발생된 여러 가지 공통적인 동적 효과가 있

(2006년 6월 12일 접수 ~ 2006년 9월 6일 심사완료)

†책임저자, 회원, 강원도립대학 기계자동차과

E-mail : kiansung@empal.com

TEL : (033)660-3462 FAX : (033)660-3465

을지라도, 분류와 액적에 특별한 동적 거동을 일으키고 확실하게 구별되는 효과들이 하나 또는 모든 종류의 전기장에서 관측된다⁽⁸⁾.

표면 안정성은 액체의 정전 미립화에 관한 연구에 매우 중요한 특성중 하나이다. 각기 다른 전기적 및 물리적 요소를 갖는 2상 액체 사이의 접촉면에 전기력이 작용하면 거시적 운동이 발생된다. 입력 전기장의 종류와 세기에 따라 전기장에 의해 유도된 운동들은 접촉면의 변형을 일으키고, 접촉면의 변형은 전기장 분포를 왜곡하고 차례로 평형 상태로부터 접촉면의 동적 안정 또는 불안정을 유발하는 전기적 교란을 일으킨다⁽⁹⁻¹³⁾.

현재까지 전기수력학적 미립화에 대한 많은 연구가 수행되어 왔지만, 이러한 미립화 형식을 보다 넓은 응용 분야에 적용하기 위한 대전된 미소 균일 액적의 생성 방법에 관한 연구는 아직도 많은 부분이 규명되지 않았다. 특히, 많이 응용되는 스피들 모드와 단순 액주 모드에서 분산을 제어하여 원하는 크기의 대전 균일 수용성 액적을 얻는 방법은 아직까지 많은 연구가 요망되고 있다. 또한, 다양한 분무 형태의 분열에 관련된 연구는 대부분 실험에 의존하고 있으며, 미세한 균일 액적의 생성 조건을 찾기 위하여 다양한 실험적 연구가 선행되어야 한다⁽¹⁴⁻¹⁶⁾.

따라서 본 연구의 목적은 고압 직류 전기장을 인가하여 대전 이완 효과에 의한 액적 형성의 가시화 맵을 구축하고, 여러 가지 실험적 인자에 따른 미립화 특성을 규명하고자 한다. 이를 위하여 고 전압을 이용한 미립화 장치를 독창적으로 개발하였고 분무 거동 및 미립화 특성 등을 여러 가지 분무 미립화 인자에 대하여 비교 검토하였다. 액체 분무에 대한 입경 측정 및 분석 기법으로 후방 조광법을 사용한 영상 처리 기법을 적용하여 액주의 분열 과정을 가시화하고 분무의 발달 과정, 액적의 입경 분포 및 액적의 형상 등과 같은 특성을 규명하였다.

2. 실험장치

2.1 실험장치의 구성

작업 액체의 액적 생성 모드 분류 및 미립화 특징을 규명하기 위하여 독창적인 전기수력학적 미립화 장치를 개발하였으며, 실험 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험 장치는 노즐에 작업 액체를 정해진 유량으로 일정하게 공급하는 액체 공급부, 노즐과 접지전극(모세관-고리전극형) 사이에 직류 또는 교류 전압 인가 및 주파수 변

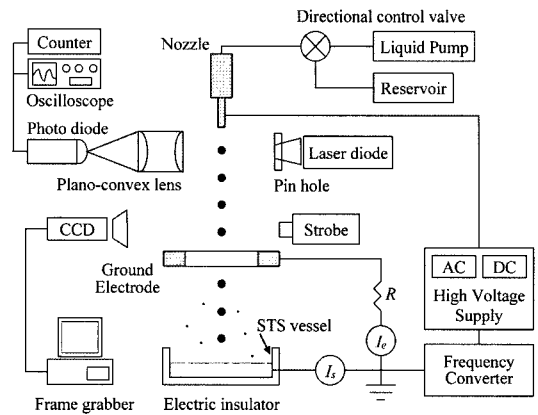


Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement

동이 가능한 고전압 공급부, 그리고 계측 장비 및 영상 분석 장비 등의 측정 기구로 구성된다.

액체 공급부는 스테핑 모터로 구동되는 초정밀 선형 액추에이터(SUS, XA-35L-200, 0.005 mm 이동량/pulse)와 실린더(Wise, WCS20-200), 작업 액체 경로 제어용 3 포트 2위치 전자 변환 밸브(SMC, VT301-022G), 작업 액체 저장 용기 및 시스템 제어기로 구성되어, 액체 시료를 0.3~60 ml/min 범위에서 원하는 공급 유량으로 일정하게 공급하는 장치이다.

고전압 공급부는 교류 고전압 발생기(최대 전압 8 kV, 최대 전류 10 mA), 직류 고전압 발생기(Convertech, SHV30-20 kV, 최대 전압 20 kV, 최대 전류 1.5 mA), 주파수 변환기(UBK, UBK-200, 40 Hz~5 kHz)로 구성되어 노즐과 접지전극 사이에 전기력을 인가한다.

액체 분무의 순간 영상은 접사링과 10배율의 매크로 줌 렌즈(Computar, MLH-10×)를 결합한 FA용 CCD 카메라(Sony, XC-77) 및 발광 단속 주기(2~20 Hz)를 갖는 스트로브를 사용하여 액체 분무의 순간 영상을 포착하였다.

영상 획득 장비는 PC 슬롯에 장착된 프레임그래버(National instruments, PCI-1411)를 사용하였으며, 이를 통하여 디지털 영상 신호로 변환되어 영상 처리 응용 프로그램(IMAQ vision)을 사용하여 액적 생성의 가시화 영상 및 액적의 입경 분포 등의 자료를 산출하였다.

Table 1은 액적 형성 및 분무 미립화 가시화에 관련된 시스템의 주요 제원이다.

2.2 노즐 및 접지전극 형상

Figure 2는 실험에 적용된 모세관-고리전극형 형상을

Table 1 Specifications of spray visualization system

CCD camera	Sensing area Resolution Lens mount Flange focal length	10.88 mm×8.16 mm 768(H)×493(V)pix C mount 17.526 mm
Macro-zoom lens	Max. magnification Max. aperture ratio Effective lens aperture Focus Back focal length	0.084~0.84 × 1 : 5.6 Front Φ30 mm, Rear Φ6.4 mm 180~450 mm 23.29 mm
Frame grabber	Resolution Transfer rates NTSC formats	640(H)×480(V)pix Up to 100Mbyte/s 29.97 frames/s
Light source	Flash frequency Output	2~20 Hz 11 J

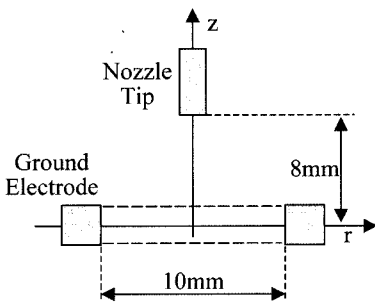


Fig. 2 Configuration of nozzle and ring ground electrode

보여준다. 이 접지전극 형식은 직경이 다른 노즐을 쉽게 탈착이 가능한 정착구와 노즐과 접지전극 사이의 거리를 0~75 mm 범위에서 가변 할 수 있는 기구로 구성하였고, 접지전극과 접지 사이에 10 MΩ의 저항을 연결하여 노즐과 접지전극간의 스파크 발생 시 과전류의 흐름을 방지하도록 하였다.

동일한 공급 전압 조건에서 노즐 끝과 접지전극 사이의 거리는 형성된 전기장의 크기와 관련된다. 거리가 짧을수록 높은 전기장이 형성되어 작업 액체에 전기력이 더 크게 작용하여 액적 형성에 영향을 크게 미친다. 그러나 노즐 끝과 접지전극 사이의 거리가 가까우면 분열된 액적이 접지전극에 충돌하여 코로나 방전이나 누전을 일으키기도 하며, 분산 액적을 응용 분야에 적용하는데 어려워 질 수 있다. 따라서 적절한 전기장을 형성하고 액적과 접지전극 사이의 충돌을 방지하여 알맞은 미립화를 얻기 위해 노즐과 접지전극 사이의 적절한 거리

조절이 필요하다.

Jone과 Thong(17)은 노즐 끝단과 접지전극 사이의 전기장세기를 다음 식으로 나타내었다.

$$E = \frac{\sqrt{2}V}{R_o \ln\left(\frac{4d}{R_o}\right)} \quad (1)$$

여기서, R_o 는 노즐 반경이며, d 는 전극간격, V 는 인가 전압이다.

많은 연구자들은 Jone 과 Thong의 이론적인 전기장의 세기와 실험적인 조사를 통하여, 모세관-고리 전극형 전극 형상에 대해 고리 전극의 내경이 10 mm의 경우 노즐과 접지전극 사이의 거리는 7~8 mm가 가장 적절하다고 보고하였다. 따라서 본 실험 장치에서도 10 mm의 고리 전극의 내경 및 8 mm의 노즐과 접지전극 사이의 거리를 적용하였다.

2.3 영상처리기법을 이용한 입경 측정

입경은 주위 기체와 분사 액체 사이의 열 및 물질전달 또는 화학반응 속도를 결정짓는 주요 분무특성중의 하나로 Lee⁽³⁾와 Chigier⁽¹⁸⁾ 등은 이에 관하여 많은 측정 방법들을 소개하였다.

이 중에서 영상 처리 기법을 이용한 입경 측정 기법은 다른 광학적인 측정 기법들에 비하여 비교적 단순한 구조를 갖고 있으며, 매우 낮은 공간상의 수밀도에서도 정확한 입경 측정이 가능하다. 또한, 시스템을 구성하는 각 부품의 가격이 다른 기법에서 사용되는 장치에 비해 저렴하다. 모세관-고리 전극형 전기수력학적 미립화 장치의 경우에도, 일반적으로 공간상의 액적 수밀도가 매우 낮고 매우 좁은 영역에 한정되어 액적들이 존재한다.

영상 처리 기법은 CCD 카메라의 사용과 적절한 광원 기술에 지배적이며, 광학 기기 세트의 고배율 확대로 인하여 이러한 기법의 정밀도는 매우 높아질 수 있다. 그리고 측정하는 액적을 직접 관찰할 수 있으므로 측정값의 신뢰성을 높일 수 있고, 큰 액적들이 존재하는 경우에는 입경 측정 영역에서 공기 저항 및 전기적 반발력에 의해 액적들이 비구형 형태를 갖는데, 이러한 비구형의 액적처럼 측정된 액적의 형상에 영향을 받지 않는 장점이 있는 측정 방법이다. 따라서 본 실험에서는 광학적인 입경 측정 방법 중 영상 처리 방법을 이용하여 입경을 측정하였다. 본 연구에서 입경 측정 장치의 구성은 Fig. 3에 도시된 것과 같은 광원, 카메라 및 영상 저장 및 처리부 등 세 부분으로 구성된다. 자료 분석에 사용된 영상 처리 응용 프로그램은 여러 가지 필터와 각종

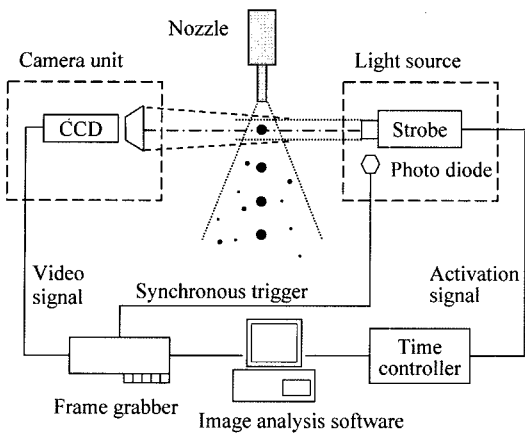


Fig. 3 Schematic diagram of droplet size using image processing method

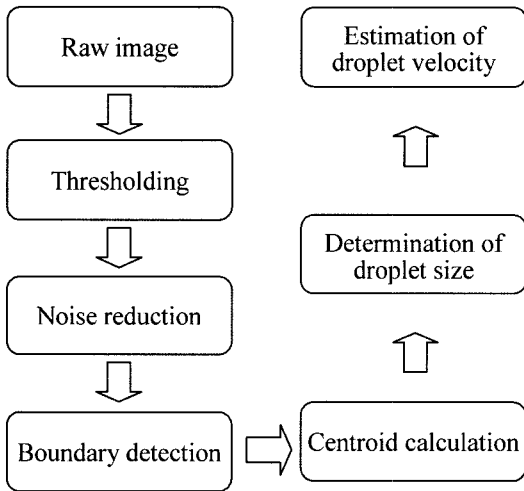


Fig. 4 Digital image processing procedures for a single frame

툴을 내장한 IMAQ vision을 사용하였다.

스트로브와 동기된 CCD 카메라를 통해 가시화 된 분무의 정지 화상은 원시 화상으로 기록되며, 프레임그라버를 통하여 디지털 신호로 컴퓨터에 저장된 후, Fig. 4에 표시한 디지털 이미지 처리 알고리즘을 통하여 분열된 액적의 모양 및 크기를 계산한다.

제 1 단계로, 실제 입자 정보가 담겨있는 원시 화상에서 분열된 액적의 영상 신호와 배경을 구분하기 위하여 그레이 레벨이 각각 0과 255가 되도록 스레스홀딩(thresholding)을 수행한다. 또한, 인식된 화상은 입자의 추적을 방해하는 노이즈를 포함하고 있으므로 저주파 통과 필터의 일종인 메디안(median) 필터를 적용하여

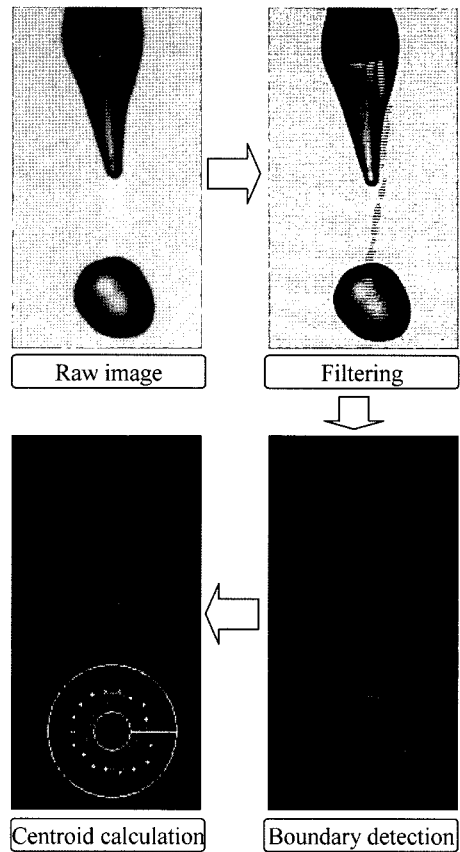


Fig. 5 Image processing example for a single frame

이를 제거한다.

제 2 단계는, 노이즈가 제거된 화상으로부터 분열된 액적의 모양 및 크기를 계산하기 위하여 비선형 프리윗트(prewitt) 필터를 사용하여 추적 입자의 경계선을 검출한다. 검출되어 선택된 액적으로부터 비구형 액적의 사영면적을 구하여 구형으로 등가시켜 도심 및 평균 반지름을 계산한다.

Figure 5는 전기수력학적 미립화에서 분열된 액적의 단일 정지 영상에 대한 가시화 수집 및 처리 과정의 예를 보여주고 있다. 노즐과 접지전극 사이에서 분열된 액적의 원시 화상을 기록하여, 영상 처리 응용 프로그램을 이용하여 노이즈 제거 및 액적의 경계면을 명확하게 구분한 후, 비구형 액적의 사영면적을 구하여 구형으로 등가시켜 평균 반지름을 픽셀(pixel) 단위로 계산한다. 1 픽셀의 정확한 물리적인 길이의 양은 노즐의 직경을 동일한 방법으로 계측하여 상대적으로 계산한다.

Table 2 Liquid properties

Parameters	Distilled water
Conductivity K [S/m]	1×10^{-4}
Surface tension ρ [N/m]	72.3×10^{-3}
Density ρ [kg/m ³]	1000
Relative permittivity ϵ_r	80
Viscosity η [Ns/m ²]	0.0013

Table 3 Experimental parameters

Parameters	Ranges		
Flow rate [ml/min]	1~4.0		
DC voltage [kV]	1~3.5		
Nozzle material	STS		
Nozzle size [gage]	Gage	I.D.	O.D.
	25G	0.25	0.50
	23G	0.33	0.64
	20G	0.60	0.91

2.4 실험조건 및 물성치

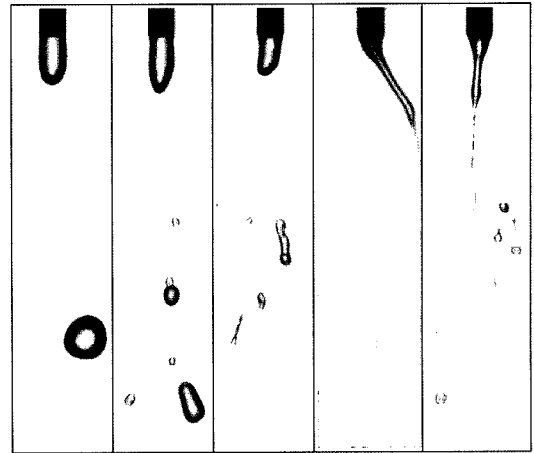
실험에 사용된 작업 액체는 증류수이고, 이 작업 액체에 대한 물성치는 Table 2에 나열되었다. 이러한 물성치들은 데이터 시트와 참고 문헌으로부터 수집되었다.

실험의 목적은 전기수력학적 미립화에 대한 분무 유동 가시화 연구, 액적 형성 모드의 분류 및 노즐 특성에 따른 분열 과정을 위한 실험 등으로 크게 구별되며, 실험 조건은 Table 3에 나타내었다.

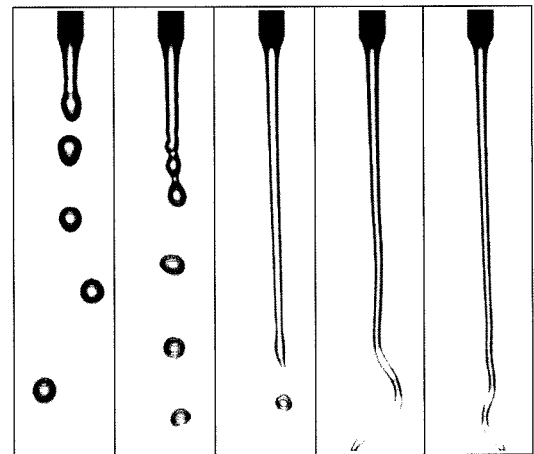
3. 실험결과 및 고찰

물과 같은 고전도 액체를 정전기적으로 제어 가능한 형태로 분산시키는 것은 매우 어려운 일이다. 고전도 액체는 매우 짧은 대전이완 시간을 갖는데, 이는 액체 표면을 등가 전위상태로 만들고 전기적 응력의 방사성분이 지배적인 정전기 힘이 되도록 하고, 방사 응력은 분무 과정에서 분류의 측면 불안정을 유발시킨다.

모세관-판형 접지전극 형상에 대해, Takamatsu 등⁽¹⁹⁾은 비균일 전기장에서 물 액적의 끝단에 작용하는 전기



1.5 kV 2.0 kV 2.5 kV 3.0 kV 3.5 kV
(a) Flow rate : 1 ml/min



1.5 kV 2.0 kV 2.5 kV 3.0 kV 3.5 kV
(b) Flow rate : 3 ml/min

Fig. 6 Spray visualization in DC voltage and flow rate (nozzle : STS 25G)

력을 다음 식으로 나타내었다.

$$F_e = 4\pi\epsilon_0 a \left(\frac{1+r}{2L}\right)^2 V^2 \quad (2)$$

식 (2)은 인가 전압 V [volt], 액적 반경 r [m], 노즐과 접지전극 사이의 간격 L [m], 상수 $a = 0.0634$ 의 함수로서 전기력을 표현한다.

직류 전기장내의 입력 전압 및 공급 유량 변화에 따른 분무 영향을 조사하기 위하여 실험 항목 인자를 액체 유량, 인가 전압, 노즐 재질 및 노즐 크기 등으로 구

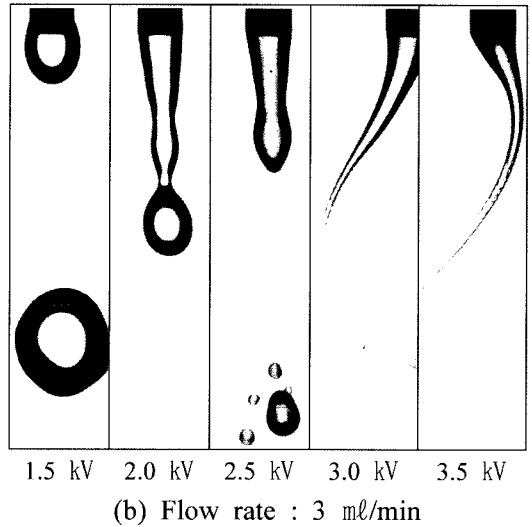
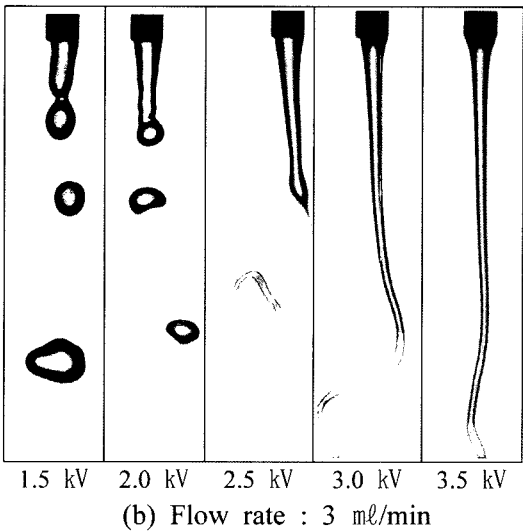
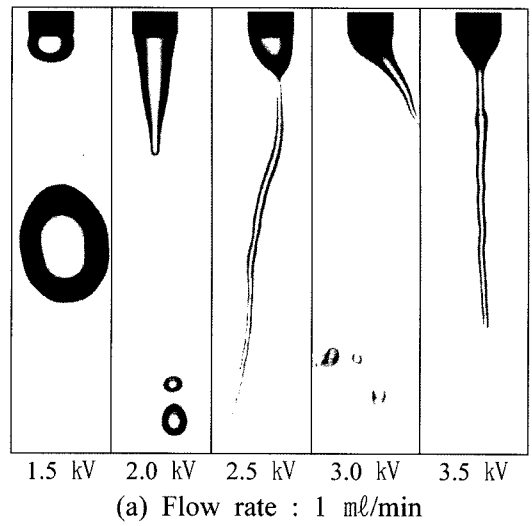
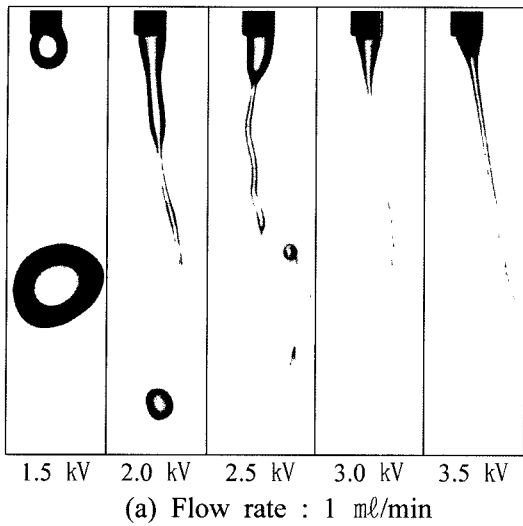


Fig. 7 Spray visualization in DC voltage and flow rate (nozzle : STS 23G)

Fig. 8 Spray visualization in DC voltage and flow rate (nozzle : STS 20G)

성하였다. Fig. 6부터 Fig. 8은 각각 노즐 STS 25G, STS 23G 및 STS 20G 과 공급 유량 1 ml/min 및 3 ml/min 조건에 대하여, 공급 직류 전압의 변화에 따른 액체 분열 형태를 가시화한 것이다.

최소 표면 에너지 특성으로부터, 분자와 표면 장력은 표면적과 분자들 사이의 거리를 축소하고 액체의 평형 상태를 유지하려는 경향을 가진다. 반면에, 전기력은 표면적을 확장시키려는 성질을 갖고 표면 전하에 의한 에너지 성분이 최소화 되도록 작용한다.

표면 에너지를 최소화하려는 서로의 경쟁 효과는 표

면적의 갑작스런 증가를 불러일으키고, 이러한 표면적 증가는 일부 액체 분류의 격렬한 측면 변위의 형태로 나타난다.

환선 필라멘트가 Fig. 6에 보이는 것처럼 분류의 하류 축 방향을 기준으로 교대로 양쪽 방향에서 형성된다. 분류의 끊어짐은 환선의 길이가 보여진 부분이 초기 길이의 수배로 늘어날 때 나타난다.

늘어난 필라멘트는 Fig. 7에 보이는 것처럼 필라멘트 끝단으로 갈수록 점점 줄어든 결과를 보이고 최대로 늘어난 후 미세액적으로 끊어진다. 주 액적이 이탈하는 동

안, 연결된 필라멘트의 비대칭은 가장 큰 불록면 성분의 순수 힘의 결과이다. 이 힘은 표면 전하의 존재에 기인하고 초기 측면 변위에 관련이 있다. 초기 측면 변위는 환선의 불록면에 축적된 표면 전하에 의해 가속력을 증가시키는 경향을 갖는다.

일반적으로, 한 개의 환선 생성은 두 번째 환선을 생성시키는 작용의 시작을 의미한다. 두 번째 환선은 Fig. 8에 보이는 것과 같이 일반적으로 동일한 평면에서 생성되지만 노즐 축 방향을 기준으로 반대 방향에서 발생된다.

콘 제트 모드는 가장 흥미로운 기능적 모드중의 하나이며, 노즐 끝단에 원추 형태의 액체 체적이 형성되고 콘의 정점에 액적들로 성장하는 가는 액주로 구성된다. 이 모드는 전기 전도도가 크게 변하는 액체에서 잘 관찰될 수 있으며 넓은 범위의 평균 입경을 갖는다.

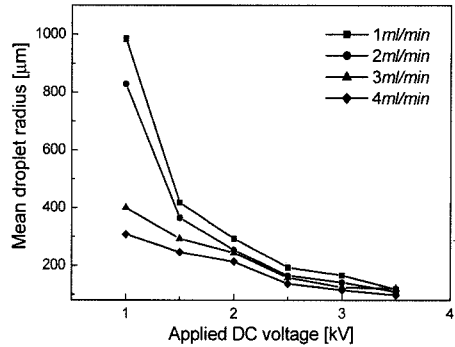
콘의 직경은 정점을 향해 아래쪽으로 갈수록 반경이 감소하므로 콘 끝으로 갈수록 전하들의 표면 밀도가 높아지고 콘 표면의 액체 유속은 더욱 빨라진다. 결국, 콘 끝에 모인 빠른 유속의 액체들은 콘 끝에서 표면 장력을 이기고 가는 액주를 형성한다. 이 가는 액주는 연속적으로 형성되며, 끊어져 액적을 형성하므로 콘 제트 모드에서는 노즐 직경보다 작은 액적이 만들어진다.

공급 유량이 많아지면 분류는 접지전극 쪽으로 더 성장하게 되고, 이러한 현상은 높은 전기장 효과를 가져온다. 표면 전하의 합은 초기 측면 운동을 발생시켜 매우 짧은 시간에 넓은 환선을 생성시키며 이러한 경우, Fig. 8과 같이 분류를 좌우로 움직이는 휘핑 운동은 매우 격렬해진다. 인가 직류 전압의 증가는 액체 유량을 증가시키는 것과 같은 효과를 갖는다.

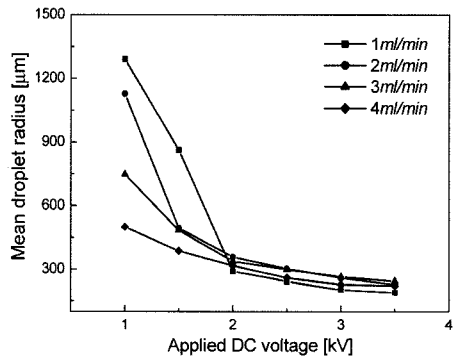
일정한 세기의 비 균일한 전기장이 액체에 인가되면, 작업 액체의 전도도에 따라 분류의 표면은 등가전위 상태가 된다.

전기장의 비 균일성이 분류의 상호 변형을 일으키고, 유도된 변형들의 크기는 인가 전기장의 세기와 비례한다. 이러한 변형의 움직임은 분류의 축에 수직하게 발생하며, 이와 같이 분류가 전기적으로 유도된 운동을 좌우로 움직이는 휘핑 운동 또는 측면 불안정성이라 부른다. 분류가 좌우로 움직이는 휘핑 운동과 액주가 끊어지는 현상은 정형화된 패턴으로 관측할 수 없고 무질서한 현상으로 나타난다.

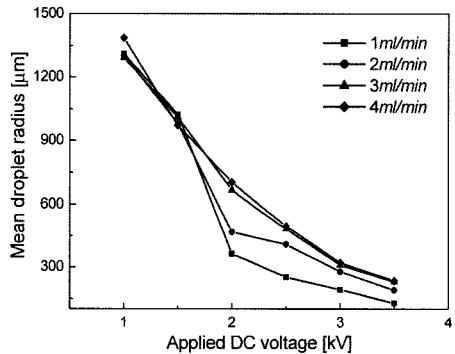
분류가 좌우로 움직이는 휘핑 운동 현상은 분류과 유



(a) Nozzle : STS 25G



(b) Nozzle : STS 23G



(c) Nozzle : STS 20G

Fig. 9 Mean droplet radius on relation to applied DC voltage

전율이 관련된 전하 이완 시간의 지배적 영향을 받아서 발생된다. 전하 이완 시간은 전기적으로 액주 및 액적이 평형 상태로 돌아 갈 수 있는 시간을 의미하며, 액주의 성장 또는 액주의 분열 시간 보다 이완 시간이 길면 액주는 전기적으로 비평형 상태에 놓이게 된다.

일반적인 조건 하에서 실제 미립화는 액체의 분류가 성장하여 완전히 대전된 후에 발생한다. 이러한 상태는

액체 분류의 선단에서 부분적으로 전기장 세기의 증가를 유발한다. 물과 같은 작업 액체의 고전도도와 짧은 대전 이완 시간 때문에, 액체 분류의 표면은 등가 전위 상태가 되어, 액체 분류는 확장된 전극으로 간주되며 액체 분류의 끝과 접지전극과의 간격이 짧아진다. 이러한 이유로 몇 승으로 증가된 국소 전기장은 유전 상수의 감소를 유발하고, 대전 이완 시간을 증가 및 표면의 대전 밀도를 감소시켜 분류를 좌우로 움직이는 휘핑 운동 현상을 발생시킨다.

Figure 9는 각각 노즐 STS 25G, STS 23G 및 STS 20G 과 공급 유량 1 ml/min, 2 ml/min, 3 ml/min 및 4 ml/min 조건에서, 인가 직류 전압의 변화에 따른 액적 평균반경의 실험적 분포를 나타낸 것이다. 일반적인 경향은 인가 직류 전압이 증가할수록 액적의 평균반경은 감소하고 이에 따라 균일한 액적을 형성하게 된다.

노즐 STS 20G 와 공급 유량 1 ml/min 및 2 ml/min 조건에 대해, 직류 전압 3 kV 영역에서 액체 체적의 흔들림 현상(pivoting)이 시작되고 3.5 kV 영역에서는 자주 발생하였다.

액체 체적 흔들림 현상은 입력 전압이 증가함에 따라 증가하고 액체 콘 및 스펜들의 생성을 지연시켜 큰 액적을 형성하기도 하지만, 반대로 안정한 액주 형성을 억제하여 균일한 액적 생성을 방해하기도 한다.

Figure 10은 노즐 STS 20G 와 공급 유량 2 ml/min 및 직류 전압 3.5 kV 조건에서, 노즐 끝단에 매달린 액체 체적의 흔들림 현상을 보여주고 있다.

노즐 크기에 무관하게 공급 유량이 많고 전압이 높을수록 꼬이는 형태의 파동 모드가 자주 발생하였으며, 노즐 크기가 작을수록 발생하는 시점이 저전압으로 이동하였다. 특히, 노즐 STS 25G, 공급 유량 1 ml/min 조건에서, 인가 직류전압 2.5 kV부터 액적이 떨어질 때 연결된 필라멘트의 분열에 의해 많은 수의 위성 액적들로 분열됨을 알 수 있다. 또한, 노즐 내경이 작고 공급유량 및 전압이 낮을수록 전형적인 정맥류형 파동모드가 명

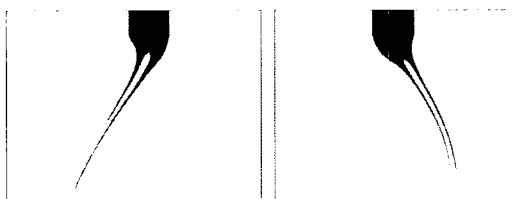


Fig. 10 Pivoting motion (nozzle : STS 23G, flow rate : 3 ml/min, applied DC voltage : 3.5 kV)

확하게 나타났다.

교류 전압 조건의 결과와 비교해보면, 액적 평균 반경의 급격한 감소는 더 낮은 전압 (1~1.5 kV) 부근에서 이루어지고 코로나 방전 현상도 낮은 전압(3 kV) 영역에서 발생하였다. 또한, 노즐 끝단과 접지전극 사이의 동일한 간격 조건에서 직류 전압이 교류 전압 보다 누설 전류가 발생하는 시점이 더 낮은 전압 영역에서 시작되었다.

4. 결 론

여러 가지 실험 매개 변수들의 범위 영역에서 전기 수력학적 미립화 방법을 통하여 다양한 입경 범위의 대전 균일 수용성 액적의 생성 방법을 실험적으로 연구하였다. 이러한 액체 미립화 방법의 연구는 많은 미립화 분야에 응용되는 단순 액주 모드의 대전된 균일 수용성 액적의 분산 방법이 널리 알려져 있지 않기 때문에 본 연구에서 도출된 실험적 결과는 중요한 의미를 갖는다.

액체 분산 특성을 분석하기 위하여 고유의 전기수력학적 미립화 기구 장치를 제작하였고, 노즐 크기, 액체 유량 및 공급 전기장의 세기 등과 같은 실험적 인자가 액주 분열 및 액적 형성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 영상 처리 기법으로 액체 분열 과정의 가시화 영상을 획득하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 노즐 STS 20G 와 공급 유량 1 ml/min 및 2 ml/min 조건에 대해, 인가 직류 전압 3 kV 영역에서 액체 체적의 흔들림 현상이 시작되고 3.5 kV 영역에서는 자주 발생하였다. 액체 체적 흔들림 현상은 입력 전압이 증가함에 따라 증가하고 액체 콘 및 스펜들의 생성을 지연시켜 큰 액적을 형성하기도 하지만, 반대로 안정한 액주 형성을 억제하여 균일한 액적 생성을 방해하는 것으로 나타났다.

2) 노즐 크기에 무관하게 공급 유량이 많고 입력 전압이 높을수록 꼬이는 형태의 파동 모드가 자주 발생하였으며, 노즐 크기가 작을수록 발생하는 시점이 저전압으로 이동하였다. 특히, 노즐 STS 25G, 공급 유량 1 ml/min 조건에서, 인가 직류 전압 2.5 kV부터 액적이 떨어질 때 연결된 필라멘트의 분열에 의해 많은 수의 위성 액적들로 분열되었고, 노즐 내경이 작고 공급 유량 및 인가 전압이 낮을수록 전형적인 정맥류형 파동 모드가 명확하게 나타났다.

참고문헌

- (1) Z. A. Huneiti, "Electrohydrodynamic atomisation of conducting liquid using an AC field superimposed on a DC field," Ph.D. thesis, Brunnel university, England, 2000, pp.1~45.
- (2) M. C. Kim, "Generation of monodisperse droplets by using electrohydrodynamic force," Ph.D. thesis, KAIST, Korea, 2003, pp. 1~55.
- (3) 이상용, "액체의 미립화," 민음사, 1996, pp.31~108.
- (4) M. Lohmann, H. Beyer, and A. Schmidt-Ott, "Size and charge distribution of liquid metal electrospray generated particles," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 28, 1997, pp.s349~s350.
- (5) L. Bayvel, and Z. Orzechowski, "Liquid atomization," Taylor & Francis, 1993, pp.37~122.
- (6) M. C. Kim, and S. Y. Lee, "Drop formation under the spindle mode in electrohydrodynamic spraying-effects of nozzle material and flow rate," *Proc. of ILASS-Asia 2001*, 2001, pp.229~234.
- (7) 김명찬, 이상용, "전기수력학적 미립화에서 접지전극의 형상이 액적 형성에 미치는 영향," 한국액체미립화학회 학술강연회 논문집, 2000, pp.121~127.
- (8) Z. Huneiti, and W. Balachandran, "Harmonic spraying of conducting liquids employing AC-DC electric fields," *IEEE Trans. Ind. Appls.*, Vol. 34, No. 2, 1998, pp.279~285.
- (9) M. Cloupeau and B. Prunet-Foch, "Electrostatics spraying of liquids in cone-jet mode," *J. electrostatics*, Vol. 22, 1989, pp.135~159.
- (10) M. Cloupeau and B. Prunet-Foch, "Electrostatics spraying of liquids : main functioning modes," *J. electrostatics*, Vol. 25, 1990, pp.165~184.
- (11) J. M. Grace, and J. C. M. Marijnissen, "A review of liquid atomization by electrical means," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, No. 6, 1994, pp.1005~1019.
- (12) W. Balachandran, W. Machowski, and C. N. Ahmad, "Electrostatic atomisation of conducting liquids using AC superimposed on DC fields," *IEEE Trans, Ind. Appls.*, Vol. 30, No. 4, 1994, pp.850~855.
- (13) 김명찬, 이상용, 김상수, 김유동, "스핀들 모드하의 전기수력학적 미립화를 통한 균일 미세 액적 생성," 대한기계학회논문집(B), 제25권, 제7호, 2001, pp.923~932.
- (14) K. Sung, and C. S. Lee, "Electrohydrodynamic induced liquid dispersion under the effect of AC frequency transition," *Proc. of ILASS-Asia 2004*, 2004, pp.60~69.
- (15) K. Sung, and C. S. Lee, "Factors influencing liquid breakup in electrohydrodynamic atomization," *J. of Applied Physics*, Vol. 96, No. 7, 2004, pp.3956~3961.
- (16) 성기안, 이창식, "전기수력학적 미립화에서 교류 주파수가 액적 분열에 미치는 영향," 한국액체미립화학회지, 제9권, 제2호, 2004, pp.41~49.
- (17) A. R. Jones, and K. C. Thong, "The production of charged monodisperse fuel droplets by electrical dispersion," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 4, 1971, pp.1159~1166.
- (18) N. Chigier, "Drop size and velocity instrumentation," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 9, 1983, pp.155~177.
- (19) T. Takamatus, M. Yamaguchi, and T. Katayama, "Formation of single charged drops in a non-uniform electric field," *J. Chem. Eng. of Japan*, Vol. 16, No. 4, 1983, pp.267~272.