

노즐 특성에 따른 전기수력학적 단분산 미립화 효과에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Effect of Electrohydrodynamic Monodisperse Atomization According to Nozzle Characteristics

성기안*, 이창식**
K. A. Sung, C. S. Lee

Abstract

This study was performed to explore the liquid breakup and atomization characteristics for the classification of drop formation mode and background of uniform droplets generation in electrohydrodynamic atomization according to the change of experimental parameters such as nozzle material (stainless steel, teflon), fluid flow rate, applied electrical field and intensity, and frequency.

In results, from the classification map of drop formation modes according to the variation of applied AC voltage and frequency at a stainless nozzle, the droplet size was smaller than the outer diameter of the nozzle tip relatively in the spindle mode. The transition points became clearly to be moved toward the high applied voltage by rising the applied AC frequency beyond 450 Hz. Also, the droplet radius can be observed quite small in the frequency bandwidth of 350 ~ 450 Hz.

The droplet radiuses decrease as the applied voltage increases for a fixed applied AC frequency within the range from 50 Hz to 400 Hz. Over 400 Hz, the relation between the power intensity and the droplet size was not consistent with a continuous mechanism of liquid breakup. Thus, it is showed that the droplet size distribution using the teflon nozzle was analogous to the results of stainless steel, but the droplet size was bigger than that of stainless steel relatively in case of a teflon nozzle.

주요기술용어(Key Words): Electrohydrodynamic(전기수력학적), Monodispersion(단분산),
Back-illumination(후방조광법), Dripping(적하)

1. 서론

* 도립강원전문대학 기계자동차과

** 한양대학교 기계공학부

전기수력학적 미립화(electrohydrodynamic atomization)는 외부로부터 인가된 전기장과 이 동유체와의 상호작용에 의한 액체의 분산이 발

생하는 분무 현상이며, 유체의 대전 및 분열 메커니즘은 전기력의 효과와 관련된 한 부분으로서 매우 흥미 있는 연구분야이다.

정전기 또는 전기수력학적 분무 형태는 미립화의 한 방법으로서 액체의 표면적을 증가시키는 관점에서는 다른 미립화 형태와 동일하나, 액적을 전기적으로 대전시키는 방법에서는 상대적으로 장점을 가진다. 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.^{11, 12)}

이러한 미립화 형식은 크게 두 가지로 구별하며, 첫 번째 형식은 압축공기 또는 다른 방법(원심력, 압축 액체 등)을 이용하여 액체를 선행 미립화시키고 전기장을 인가하여 액적을 대전시키는 방법이다. 이러한 방법은 페인팅(Hines, Snyder 등), 농약 살포(Abdel-Salam, Kang 등), 연료 분사(Djuric 등, Shrimpton 등), 공해 제어(Bellan 등, Wang 등)와 같이 단위 시간당 공급되어야 하는 액체의 유량이 매우 많은 경우에 적합하지만 액체를 미립화 하기 위한 별도의 미립화 장치가 필요하다는 단점을 갖는다. 두 번째 형식은 단지 전기수력학적 힘을 이용하여 액체를 대전시키면서 미세 액적으로 분산시키는 방법이다. 이 형식은 별도의 미립화 장치가 필요하지 않으나 공급 유량이 많은 경우에는 적용하기가 적합하지 않다. 이 방법은 적은 공급 유량으로 미세하고 균일한 액적을 만들어야 하는 액체 금속 분무(Lohmann), 잉크젯 프린터(Atten 등), 파우더 재료(Borra 등, Fu), 필립 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.^{13, 4, 5, 6)}

모세관-관형 미립화 장치는 노즐의 재질 및 기하학적 형상, 분무 유량, 분사 액체의 물성치, 주위 기체의 특성 및 국소적 전기장(전압, 주파수)에 의해 액체의 분열 형태가 크게 달라진다고 Cloupeau 와 Prunet-Foch 등^{17, 18)}에 의해 연구되었으며, 다양한 분무 형태는 인가된 전기력에 의한 액체의 흐름 및 분열 형상의 영향과 역으로 이러한 액체의 흐름 및 분열 형상에 의한 전기력의 영향에 따라 복잡하게 나타난다. 따라서 전기수력학적 미립화에 관련된 연구는 대부분 실험에 의존하고 있으며, 미세한 균일 액적의 생성 조건을 찾기 위하여 다양한 실험적 연구가 선행되어야 한다.

균일한 크기의 액적은 해당 주파수와 진폭이 인가된 교란 방법에 의한 일정한 시간 간격에서 액체 분류의 분열에 의해 얻을 수 있다. 전기적 에너지를 사용한 미립화 방법은 친환경적이고 실용적인 장점이 있기 때문에 산업에 많이 응용되고 있으며, 단분산 액적들을 생성하는데 사용된 전기적 분산 기술은 폭넓은 주파수 대역에서 적용 가능하다.

분산 기구 장치에 대부분의 연구들이 직류 전기장을 이용하여 수행되었으나, 일반적으로 직류의 사용은 액적의 크기 또는 미립화 액적들의 방출 주파수를 제어하는데 어려움이 있다. 따라서, 균일 크기 액적 생성과 제어 가능한 상태로 전도성 액체를 정전기적으로 미립화 하기 위하여 직류 전기장에 교류 전기장을 중첩하는 방법들에 관심을 갖게 되었다. 또한, 교류 전기장 단독 상태에서도 미립화 과정이 교류 전기장 주파수와 연동된다면 제한적 조건 하에서 액적이 제어 될 수 있음이 연구되었다.^{9, 10, 11)}

안정적인 균일 액적을 얻기 위해 교류 전기장의 주파수를 사용한 연구가 Vonnegut 와 Neubauer¹²⁾에 의해 처음 수행되어, 간단한 기구 장치로 0.1 mm 직경 범위를 갖는 균일한 액적을 발생시켰다.

Sample 과 Bollini¹³⁾는 교류 전기장과 직류 전기장을 가변하여 교류 전기장의 주파수가 고유 미립화 생성 주파수에 근접하는 것을 관찰하였고, 직류 전기장의 20% 수준의 교류 전기

점을 포함하여 60~600 μm 액적을 형성하였다.

Sato¹¹⁾는 교류 전기장만으로 넓은 영역에서 균일한 액적을 발생시키는 방법들을 소개하였다. 특히, 4가지 교류 전기장 파형(sine wave, rectified negative wave, positive sine wave, positive square pulse wave)을 사용하여 액체 분산의 영향을 연구하였다.

Kim 등^{15, 16)}은 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.

Tang과 Gomez¹⁷⁾는 유량이 아주 낮은 5.8~42.4 $\mu\text{l}/\text{min}$ 조건으로 콘 제트 모드에서 단 분산 액적을 발생시켰으며 액적의 크기는 수 마이크로미터로 매우 작게 형성됐음을 보고하였다. 그러나, 이 모드는 고전압 전기력이 작업 액체의 높은 표면 장력을 극복해야 하기 때문에, 물과 같은 높은 표면 장력의 고 전도성 액체에 대해 세밀하게 액적이 형성되는 것은 매우 어렵다고 설명했다.

일반적으로 사용되는 전극 형상은 Cloupeau와 Prunet-Foch¹⁸⁾ 및 많은 연구자들에 의하여 사용된 모세관-판형 형식이지만, 집지전극판 상부에 축적된 액적에 의해 코로나 방전이 자주 발생하고 생성된 액적을 2차적으로 이용하기가 어려워 비실용적인 형상으로 알려져 있다. 따라서, 판 표면의 액체 유막을 감소하고 액적 경로 및 분무 과정을 명확하게 관찰할 수 있으며 생성된 액적을 가장 실용적으로 이용할 수 있는 모세관-고리 형식이 Balachandran¹⁹⁾ 및 Sung^{19, 20)} 등에 연구되었다. 한편, Jones와 Thong²¹⁾은 노즐과 판 사이의 전위 분포를 BEM 기법을 사용하여 전기 분포도를 연구하였다.

현재까지 전기수력학적 미립화에 대한 많은 연구가 수행되어 왔지만, 이러한 미립화 형식을 보다 넓은 응용 분야에 적용하기 위한 대진된 미소 균일 액적의 생성 방법에 관한 연구는 아직도 많은 부분이 규명되지 않았다. 특히, 많이 응용되는 스펀들 모드와 단순 액주 모드에서 분산을 제어하여 원하는 크기의 대전 균일

수용성 액적을 얻는 방법은 아직까지 많은 연구가 요망되고 있다.

따라서, 본 연구의 목적은 고압 교류 및 직류 전기장을 인가하여 대전 이완 효과에 의한 액적 형성 모드 변화 및 분류 맵을 구축하고, 여러 가지 실험적 인자에 따른 미립화 특성을 조사하여 대전된 미소 균일 수용성 액적의 생성 방법을 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. 아울러, 액체의 분열 형태는 이 장치의 노즐 특성 및 집지전극의 기하학적 형상, 분무 유량, 액체의 물성치, 주위 기체의 특성 및 국소 전기장에 의해 크게 달라지므로, 인가된 전기장의 종류 및 세기, 주파수 변동, 공급 유량, 그리고 노즐 재질 및 크기에 따른 액적 형성 모드의 분류 맵을 작성하고, 각각의 모드에서 얻어지는 액적의 평균 입경을 분석하였다.

실험은 미립화 특성에 대한 분무 유동 가시화 연구, 액적 형성 모드의 분류 및 노즐 재질에 따른 분열 과정 등으로 크게 구별하여 수행하였다.

고압 교류 및 직류 전기장의 분무 특성을 고찰하기 위해, 액체 분산과 액적 형성에서 특정한 동적 거동을 일으키는 인자들의 영향을 조사하였다. 액적의 입경 변화율이 급감하는 천이 영역을 조사하고, 교류 전기장의 세기와 주파수가 천이 영역에서 액주 분열 현상에 미치는 영향을 분석하였으며, 특정 전압과 주파수에 발생하는 코로나 방전에 의한 액적 형성 과정의 방해 효과도 살펴보았다.

또한, 노즐의 전도성 재질과 비전도성 재질의 분무 특성을 구하기 위해 스테인레스 강과 테프론 재질의 노즐 팁을 사용하여 액적 분열 형태의 가시화 영상을 분석하였다.

2. 실험장치

2.1 실험 장치의 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 사이에 직류 또는 교류 전압 인가 및 주파수 변동이 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 3포트 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.

접지전극 형식은 모세관-고리 전극형 방식으로 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 발생시 과전류의 흐름을 방지하도록 하였다.

고전압 공급부는 교류 고전압 발생기(최대전압 8 kV, 최대 전류 10 mA), 직류 고전압 발생기(Convertech, SHV30-20kV, 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.

노즐에 공급되는 고전압은 STS 재질의 경우 노즐을 통해 고전압 공급기와 연결되었고, 테프론 재질의 경우 노즐 몸체 안쪽에 전선을 삽입하여 고전압 공급기와 연결되었다. 노즐과 접지전극 사이에 걸리는 전압을 측정하기 위해 고전압 프로브(Tektronix 6015A)를 사용하였

다. 또한, 주 액적에 의해 흐르는 분무 전류와 접지전극으로 흐르는 방전 전류를 측정하기 위해 pA 전류까지 측정이 가능한 디지털 멀티미터(ED, EDM-4760)를 각각 사용하였다.

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

영상 획득 장비는 PC 슬롯에 장착된 프레임 그래버(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.

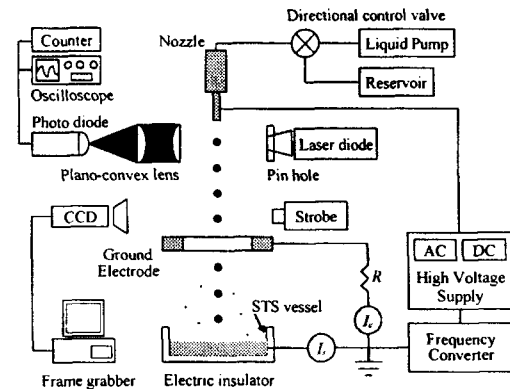


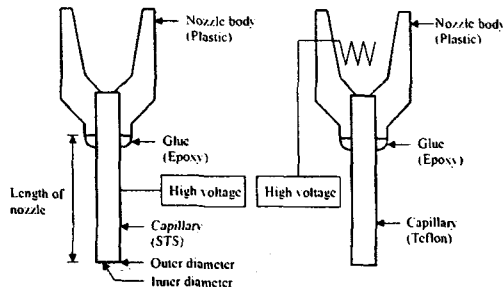
Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement

2.2 노즐의 구조

본 실험 장치에 적용된 분무 노즐 형식은 모세관 노즐이며, 액체 정밀 송출 장비에 사용되는 노즐의 재료로는 스테인레스 강(STS)과 테프론(teflon)이 사용되었다. 이들 노즐의 끝 부분은 액체가 일정하고 깨끗하게 배출되도록 둥글고 매끈하게 연마되었고, 노즐 몸체 안쪽은 액체가 부드럽게 흐르도록 완만한 경사를 가진다.

Fig. 2은 노즐의 형상을 나타낸 것이고, Table 2는 실험에 사용된 노즐의 규격을 표시

한 것이다.



(a) STS nozzle (b) Teflon nozzle
Fig. 2 Configuration of applied nozzles

Table 1 Specifications of applied nozzle

Capillary material	Gage	I.D. size [mm]	O.D. size [mm]	Length of nozzle[mm]	Legend
STS	25	0.25	0.50	12.7	STS 25G
Teflon	25	0.25	0.80	12.7	Teflon 25G

STS 튜브는 전기 전도성 재료로, 테프론 튜브는 비전도성 재료로 구분할 수 있을 만큼 전기 전도도에서 매우 큰 차이를 보이고, 표면적습 정도(wettability)에 있어서도 큰 차이를 갖는 재료이다.

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

2.3 입경 측정 및 분석 방법

많은 연구자들은 매우 작은 입자 또는 분무의 분열 과정을 측정하는 문제점에 직면해왔고, 기계적, 전자적 및 광학적인 여러 가지 정밀한 기법들이 수년 동안 개발되고 사용되었다. 그렇지만, 특히 액체 분무를 측정할 때 각

각의 기법들은 응용하려는 목적에 따라 그 자체의 장점과 한계가 있으므로 현재까지 한 가지 방법으로 모든 요구 사항을 만족시킬만한 기법은 없다. 그러므로, 액체 분무에 대한 입경 측정 기법을 선택할 때 측정 범위와 같은 중요한 요소들을 우선적으로 고려해야만 한다.

2.3.1 분무 유동 가시화 측정

액주의 분열 및 미립화 현상의 가시화를 위해서 흑백 FA용 CCD 카메라와 가변 단속 주기를 갖는 스트로브가 사용된다. CCD 카메라의 해상도는 768(수평)×493(수직)이며, 초점거리 180~450 mm 의 매크로 줌 렌즈와 접사링이 연결되어 심도 및 확대율을 조절할 수 있다. TTL 출력의 포토 다이오드 소자를 스트로브 광원 근처에 설치하여, 그 출력 신호를 프레임 그래버의 트리거 입력 신호로 사용한다. 빠르게 움직이는 액적의 정지상을 얻기 위해서 섬광 시간이 250 μs 정도의 광원을 사용하며, 스트로브가 1회 발광할 때마다 1매의 분무 가시화 영상을 획득하여 버퍼 메모리에 저장한다.

Fig. 1에서와 같이, 광원을 분무 유동 후면에 놓고 CCD 카메라를 분무 유동 정면에 설치하는 후방 조광법(back-illumination method)으로 촬영하고 얻어진 분무 가시화 영상은 컴퓨터에 저장한다. 분무 해석은 액적 입자의 이미지를 이용한 영상 처리 기법이 액적 형성 모드의 가시화 영상 획득 및 장비 구성을 위한 비용 측면에서 다른 기법들 보다 비교적 쉽고 저렴하다는 장점이 있다.

2.3.2 액적 발생 횟수 측정

Kim⁽²⁾, Sato⁽²²⁾, Balachandran 등⁽²³⁾은 레이저 광원의 경로가 액적에 의해 차단될 때 광다이오드에 수신된 신호 변화로부터 액적을 탐지하는 기법을 사용했다. 이 기법은 레이저 광원의 초점이 맞은 영역으로 지나가는 각각의 입자들 또는 액적들을 측정한다. 이러한 측정 기법의 동작 원리에 의해, 어떤 한순간에 단지 하나의 액적만 감지되므로 액적의 개수에 어느

정도 제한이 있고, 액적의 크기가 커서 레이저 광원의 경로를 충분히 막을 수 있어야만, 액적 발생 횟수의 측정이 가능하다. 따라서, 본 실험 영역에서 오차를 줄이고 액적 발생 횟수를 정확하게 측정하기 위해서 Fig. 3와 같은 장치를 구성한다.

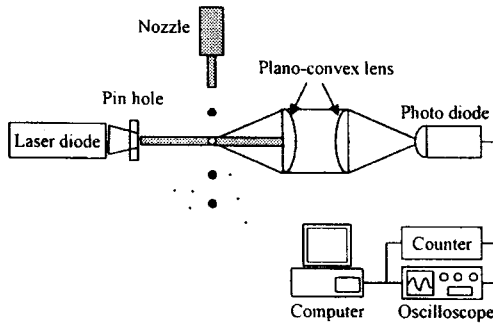


Fig. 3 Detection of droplet generation frequency using laser

핀 홀을 이용하여 레이저 광원(Ga-As 반도체 레이저, 파장 650~660 nm, 최대 출력 1 mW)이 분류가 분열하기 시작하는 액적 형성의 측정 영역을 조사할 수 있도록 조정한다.

액적이 레이저 광원을 지나게 되면 레이저 광원은 산란을 일으키고 이 산란광은 렌즈(plano-convex lens)에 집광되어 광 다이오드에 탐지된다. 수신된 산란광의 강도는 광 다이오드에서 전압 신호로 바뀌고 오실로스코프(Tektronix, TDS3034)에 저장되며, 동시에 주파수 카운터(ED, FC-1022)에 입력되어 일정한 시간 주기 동안에 발생된 액적의 수를 산출한다. 저장된 자료들을 분석하여 액적들 사이의 시간 간격을 구하고, 이 결과로부터 액적 생성이 규칙적으로 형성되고 있는지를 판정할 수 있다.

이러한 광학 측정 방법은 실험을 수행하는데 있어서 적절한 가격과 단순한 장치 구성으로 편리하지만, 이러한 방법은 분류의 분열 및 발생된 액적의 크기 등에 관한 충분한 정보를 제공하지 못하고, 단지 액적의 갯수만 제공한다. 그러므로, 분류의 형상 및 입경 등을 조사하기

위해 추가적으로 영상 처리 기법과 같은 다른 측정 기법을 필요로 한다.

2.3.3 영상처리기법을 이용한 입경 측정

영상 처리 기법을 이용한 입경 측정 기법은 다른 광학적인 측정 기법들에 비하여 비교적 단순한 구조를 갖고 있으며, 광학 시스템의 배열도 위상-도플러 기법에 비해 비교적 쉽다는 장점이 있다. 또한, 시스템을 구성하는 각 부품의 가격이 다른 기법에서 사용되는 장치에 비해 저렴하다. 광 산란법의 경우에는 공간상의 수밀도가 너무 높거나 낮으면 측정 결과를 신뢰할 수 없으나, 영상 처리 기법은 매우 낮은 수밀도에서도 정확한 입경 측정이 가능하다. 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, 명백한 오류는 측정 체적을 크게 설정하였을 경우 큰 액적들만 탐지되는 점이다. 일반적으로 12 mm의 심도에서 10×7 mm의 측정 체적을 설정하면, 약 15 μm의 분해능을 얻을 수 있다. 이러한 기법은 액체 분류의 분열 과정에 관한 정보뿐만 아니라 액적 형상에 관한 가시화 관측을 가능토록 하며, 실시간으로 영상을 기록하였다가 추후 분석이 가능하고, 장비 사용시 보정 작업이 필요 없는 장점을 가진다.

아울러, 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 측정한다. 본 연구에서 입경 측정 장치의 구성은

Fig. 4에 도시된 것과 같은 광원, 카메라 및 영상 저장 및 처리부 등 세 부분으로 구성된다.

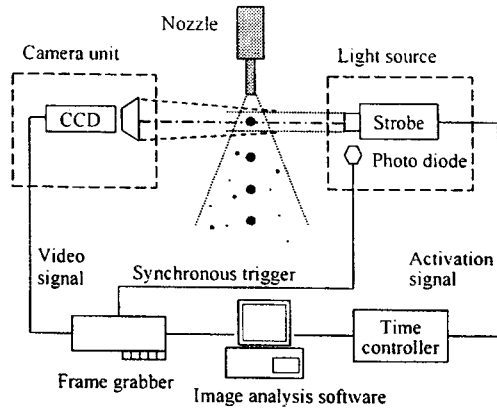


Fig. 4 Schematic diagram of droplet sizer using image processing method

스트로브와 동기된 CCD 카메라를 통해 가시화된 분무의 정지 화상은 원시 화상으로 기록되며, 프레임그래버를 통하여 디지털 신호로 컴퓨터에 저장된 후, 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 이를 제거한다.

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

2.4 실험 조건

실험에 사용된 작업 액체는 증류수이고, 주

의 기체 조감은 대기압 상태 및 20°C 온도의 공기가 사용된다. 일정한 온도를 유지하기 위해 히터 및 에어컨디셔너를 적절하게 사용하여 조절하였다. 본 실험에 사용된 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 재질에 따른 분열 과정 등으로 크게 구별되며, 각 실험 항목에 대한 입력 조건은 Table 4에 나타내었다.

모드 분류를 위한 분무 유동 가시화 실험은 1~4 ml/min의 공급 유량 범위와 주파수 변동을 갖는 교류와 직류 전원의 전기장에서 수행된다. 또한, 넓은 범위의 공급 유량 범위에서 STS 노즐을 가지고 실험을 수행한다.

노즐 재질에 따른 액적 형성 과정을 조사하기 위해, 도체 재질의 STS 노즐과 부도체 재질의 테프론 노즐에 대해 교류 및 직류 전기장을 인가하여 액체의 거동 및 액체 분열 과정을 상호 비교하기 위해 병행 실험을 수행한다. 이 실험에서 입력 교류 주파수는 모드 분류를 위한 분무 유동 가시화 실험에서 얻어진 작고 균일한 액적을 얻을 수 있는 영역의 입력 주파수를 사용한다.

Table 2 Liquid properties

Parameters	Distilled water
Conductivity K [S/m]	1×10^{-1}
Surface tension σ [N/m]	72.3×10^{-3}
Density ρ [kg/m ³]	1000
Relative permittivity ϵ_r	80
Viscosity η [Ns/m ²]	0.0013
Relaxation time $\tau = \epsilon_r \epsilon_0 / k$ [μ s]	1.77~3.5
Capillary time $\tau_c = (\rho r_1^3 / \sigma)^{1/2}$ [μ s]	117
Viscosity time $\tau_v = \rho r_1^2 / \eta$ [μ s]	7700

Table 3 Experimental conditions

Contents	Flow visualization			Drop formation with different nozzle material			
Flow rate [ml/min]	1.0~4.0			1.0~4.0			
Voltage [kV]	1~8.0 @AC			1~3.5 @AC			
				1~3.5 @DC			
Frequency [Hz]	50~850 @AC			400 @AC			
Material of nozzle	STS			STS / Teflon			
	Gage	I.D.	O.D.	Gage	I.D.	O.D.	
Size of nozzle [mm]	25	0.25	0.50	STS	25	0.25	0.50
				Teflon	25	0.25	0.80
Liquid	Distilled water			Distilled water			

3. 실험 결과

고전도 액체는 매우 짧은 대전 이완 시간을 갖는데, 이는 액체 표면을 등가 전위 상태로 만들고 전기적 응력의 방사 성분이 지배적인 정전기 힘이 되도록 하고, 방사 응력은 분무 과정에서 분류의 측면 불안정을 유발시켜, 물과 같은 고전도 액체를 정전기적으로 제어 가능한 형태로 분산시키는 것은 매우 어려운 일이다.

측면 파장은 폭넓은 액적 분포를 발생하고 다분산(polydisperse) 분무 및 분류를 좌우로 움직이는 휘핑 운동(whipping motion)을 초래한다. 과도한 표면 전하의 대전에 의해 발생되는 이러한 모드는 중화 방법으로 줄이거나 제거할 수 있다. 이러한 중화 방법 중의 하나는 노즐 끝단과 접지전극 사이에 교류 전기장을 중첩하는 방법과, 다른 하나는 분류의 평균 동기 주파수에 일치한 교류 주파수 전원을 사용하는 것이다.

모세관-환형 접지전극 형상에 대해, Takamatsu 등⁽²⁴⁾은 비균일 전기장에서 물 액적의 끝단에 작용하는 전기력을 다음 식으로 나타내었다.

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

식 (1)은 인가 전압 V [volt], 액적 반경 r [m], 노즐과 접지전극 사이의 간격 L [m], 상수 $a = 0.0634$ 의 함수로서 전기력을 표현한다. 액적 반경은 액체 유량 Q [m/s]와 액적 형성 주파수 f [Hz]의 함수로 대체 될 수 있다.

$$r = \left(\frac{3Q}{4\pi f} \right)^{1/3} \tag{2}$$

교류 전기장이 직류 전기장과 중첩되어 있으면, 전압 V 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = V_{DC} + V_{AC} \sin 2\pi ft \tag{3}$$

인가 전원의 매 사이클 변화에 동기해서 액적이 어느 정도 균일한 크기로 발생하는 영역인 동기영역에서, 액적 형성 주파수는 인가 교류 전기장의 주파수와 어느 정도 동일하므로, 상기 식을 정리하여 전기력을 산출하면 다음과 같다.

$$F_c = 4\pi \epsilon_0 a \left[1 + \left(\frac{3Q}{4\pi f} \right)^{1/3} / 2L \right]^2 \cdot (V_{DC} + V_{AC} \sin 2\pi ft)^2 \tag{4}$$

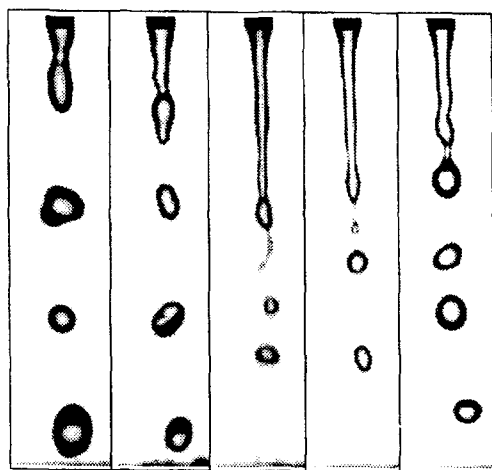
여기서, ϵ_0 는 자유 공간 유전율(8.854×10^{-12} C/N·m)이며, t [s]는 시간이다.

3.1 입력 주파수 변화의 영향

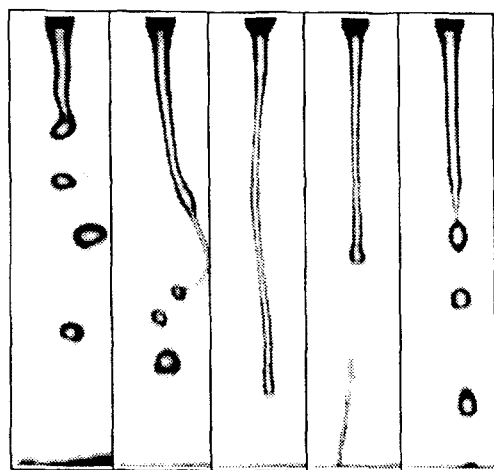
Fig. 5는 스테인레스 강 25G의 노즐에 대해 일정한 공급 유량 조건 (2.5 ml/min)에서, 인가 교류 전압 및 입력 주파수의 변화에 따른 액적 분산의 가시화 영상을 도시한 것이다. 그림은 인가 교류 전압 2 kV(Fig. 5(a)) 및 4 kV(Fig. 5(b)) 조건에서 각각 200 Hz부터 600 Hz까지 입력 주파수 변화에 따른 액주 분열 현상의 가시화를 보여준다.

인가 교류 전압 2 kV 경우, 200~300 Hz 영역에서는 전형적인 정맥류형 파동 모드가 보이

고 입력 주파수와 연동하여 액적이 방출되었다. 400 Hz 영역에서는 단순 액주 모드를 보이며 액적에 연결된 필라멘트가 생성되고, 이 필라멘트가 끊어져 매우 미세한 위성 액적을 발생시켰다. 또한, 400 Hz를 정점으로 입력 주파수의 점진적 증가는 액적의 방출 속도를 낮추고 아울러 분산된 액적의 크기를 증가시키는 경향을 보였다.



200 Hz 300 Hz 400 Hz 500 Hz 600 Hz
(a) Applied AC voltage : 2 kV



200 Hz 300 Hz 400 Hz 500 Hz 600 Hz
(b) Applied AC voltage : 4 kV

Fig. 5 Visualization for dispersion of liquid at AC voltage and frequency

(nozzle:STS 2G, flow rate:2.5ml/min)

인가 교류 전압 4 kV 경우, 200 Hz 까지는 정맥류형 파동 모드를 보이고 300 Hz 영역에서는 단순 액주 모드를 보였다. 또한, 간헐적으로 꼬이는 형태의 파동이 중첩되어 나타났다. 400 Hz 영역에서는 액주의 길이가 최대가 되고, 입력 주파수가 증가되면 액주가 끊어지면서 매우 미세한 위성 액적을 발생시켰다. 600 Hz 영역에서는 정맥류형 파동 모드로 되돌아와 균일한 액적을 발생시키는 경향을 보였다.

Fig. 6은 스테인레스 강 25G의 노즐에 대해 공급 유량 2.5 ml/min 및 공급 교류 전압 2 kV, 3 kV, 4 kV 조건에서, 입력 주파수의 변화에 따른 액적 평균 반경의 분포를 나타낸 것이다.

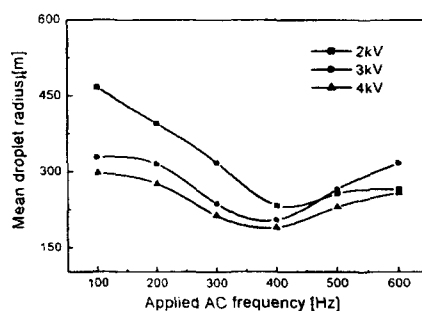


Fig. 6 Mean droplet radius for different voltages

(nozzle:STS 25G, flow rate:2.5ml/min)

그림에서 알 수 있듯이, 입력 교류 전압이 높을수록 액적 평균 반경은 작아지는 경향을 보였고 특히, 입력 주파수 400 Hz 근처 영역에서 액적 평균 반경이 최소가 됨을 보였다. 또한, 3 kV와 4 kV의 조건에 대한 액적 평균 반경의 변화는 비슷한 양상을 보였고, 액적의 크기는 인가 전기장의 세기뿐만 아니라 입력 주파수와도 밀접한 관계가 있음이 관측되었다.

일반적으로 인가 전압에 무관하게 입력 주파수 350~450 Hz 영역에서 액적의 입경이 가장 작아지는 현상이 나타났다. 100~400 Hz 까지

는, 동일한 주파수 영역에서 전압이 높을수록 액적의 입경이 작아지는 경향을 보였고, 400 Hz 이상부터는 전압의 세기와 액적의 입경 관계가 일정한 패턴을 갖지 않는 경향을 보였다. 이러한 결과는 입력 주파수와 인가 교류 전압의 변화에 따른 액적 형성 모드의 분류 결과와 동일한 결과를 보여주었다.

또한, 점차적으로 입력 주파수를 500 Hz 이상으로 증가시키면 적하 모드의 액적 형성 모드로 복귀하여 액적 평균 반경은 다시 크게 증가되는 현상을 보였다. 따라서, 입력 주파수의 특정한 영역이 액적 평균 반경의 크기 형성에 지배적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

3.2 액적 형성 모드의 분류

Fig. 7는 노즐 STS 25G에 대해 공급 유량 1.8 ml/min 및 입력 주파수를 50 Hz부터 850 Hz까지 50 Hz 단계로 공급되는 조건에서, 인가 교류 전압의 변화(0~8 kV)에 따른 액주 분열을 분석하여 영역별로 구간을 도식한 것이다.

중류수를 사용한 경우, 스피들 모드 영역은 노즐 외경에 비해 상대적으로 작고 균일한 액적을 얻을 수 있는 영역으로 입력 주파수가 약 450 Hz 대역에서 낮은 전압에서도 쉽게 천이된다. 이들 선도에서 보는 바와 같이 입력 주파수가 약 450 Hz 근처에서는, 적하 모드에서 스피들 모드로 변환되는 시점이 다른 주파수 영역에 비해 공급 전원의 전압이 낮은 것으로 나타났다. 50 Hz 경우와 비교하면 약 23%의 공급 전압으로 동일한 액주 분열의 미립화 효과를 얻을 수 있었다.

정맥류형 파동 모드와 꼬이는 형태의 파동 모드의 천이 과정도 주파수가 450 Hz까지 증가될 때 천이 시점이 저전압으로 이동하는데, 이러한 현상의 결과로 액주의 길이도 따라서 증가하게 된다. 이러한 시점에서 교란이 주어지면 하류로 진행하면서 축대칭 형태의 정맥류형 파동이 발생하고, 이 파동의 성장으로 인하여 액주가 끊어지게 되고 그 끝 부분에서 액적이 형성된다. 입력 주파수가 450 Hz를 정점으로

주파수 상승에 따른 모드 변환시점이 점차적으로 고전압으로 이동하는데, 이러한 이유는 명확하지 않으며 향후 더욱 연구를 확대 해볼만한 흥미로운 현상이다.

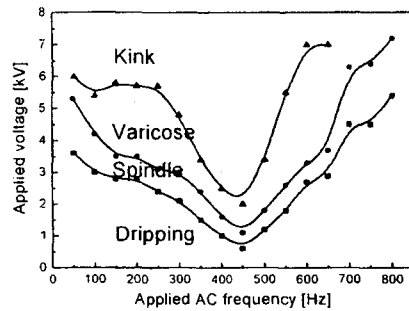


Fig. 7 Map of occurrence of disintegration region (nozzle:STS 25G, flow rate:1.8 ml/min)

교류 전원 3kV (50 Hz), 유량 3 ml/min 및 노즐 STS 25G 조건에서, 레이저 광원의 경로가 발생된 단분산 액적에 의해 차단될 때 광다이오드에 수신된 신호 변화를 수집하였다. 이 조건에서, 노즐과 집지전극 사이의 중앙 위치(노즐 끝단에서 하방 4 mm)를 통과하는 액적의 단위 시간당 발생율은 평균 약 64,300개 생성되었다.

3.3 노즐 재질의 영향

급속 노즐인 STS 노즐을 사용한 경우에는 액체 뿐만 아니라 노즐 자체를 통해서도 전류가 방전된다. 이러한 방전 현상은 방전 후 전하의 양이 감소하고 방전으로 인해 주위 환경이 산발적으로 바뀌기(공간 전하로 인해 주위 기체의 전기적 특성이 변함) 때문에, 표면에서의 간헐적인 코로나 방전이 일어난다.

또한, 급속 재질을 전극으로 사용한 경우에는 입력 전압에 따라 방전 전류가 급격하게 증가하면서, 코로나 방전 현상에 의해 액체 스피들의 성장 및 분열이 매우 불규칙하게 된다.

Fig. 8은 100 Hz의 교류 전압이 인가되었을 때 공급 유량 2 ml/min 조건에서 액주 분열 과정을 테프론 노즐 및 STS 노즐에 대하여 가시화 결과를 비교한 것이고, Fig. 9는 공급 유량 1 ml/min 조건에서 직류 전압이 인가되었을 때 노즐 끝단 액체의 거동 및 액적 분열 과정을 가시화한 것이다.

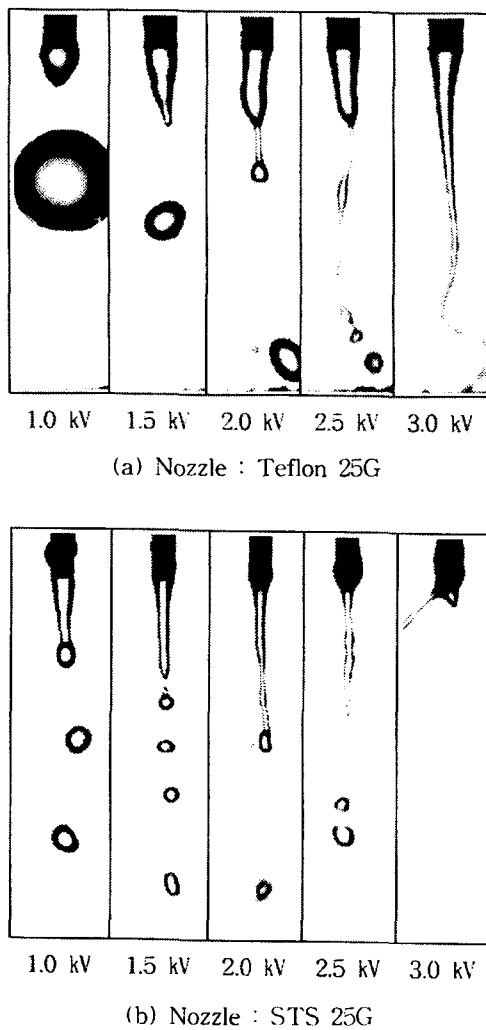


Fig. 8 Change of drop generation modes with different nozzle material
(AC voltage, flow rate:2 ml/min)

교류 전압이 인가되었을 때, 테프론 노즐의 경우 초기 적하 모드에서 전압이 증가할수록

인추형 스피들 모드로 천이하고 3.0 kV에서 보이는 파동 모드가 나타났다. STS 노즐은 초기부터 정맥류형 파동을 보였으며 전압 증가에 따라 액주가 성장함을 보였다.

직류 전압이 인가되었을 때, 테프론 노즐의 경우 적하 모드에서 스피들 모드로 천이됨을 보이며, 2.5 kV에서는 원형 메니스커스의 줄임 현상으로 액체 체적이 분리되는 현상이 발생되었다. STS 경우, 3.0 kV에서 액체 체적 흔들림이 나타나 액주 생성을 억제하였다.

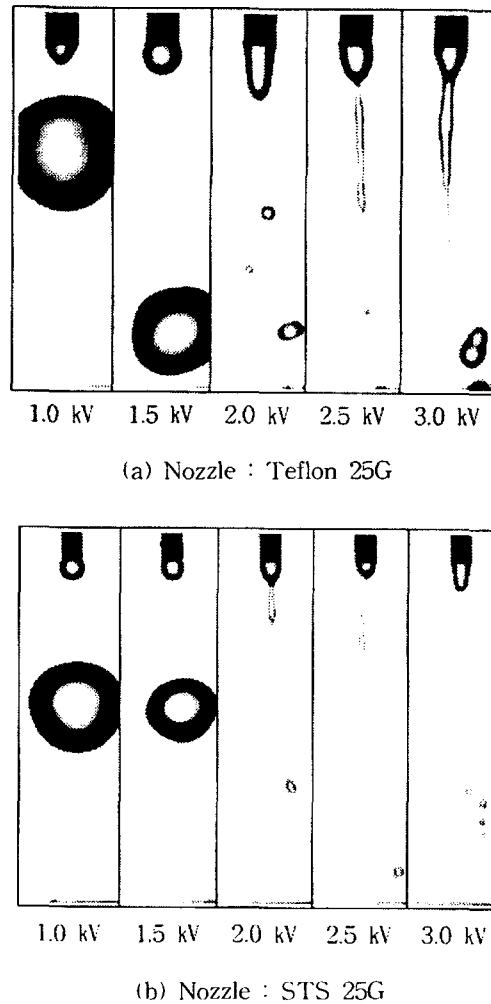
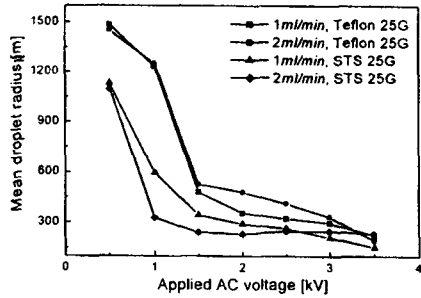
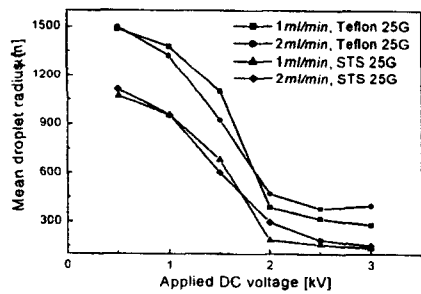


Fig. 9 Change of drop generation modes with different nozzle material
(DC voltage, flow rate:1 ml/min)

따라서, Fig. 10에 나타난 것처럼 STS 노즐의 경우에는 입력 전압이 2 kV 까지 증가함에 따라, 액적 평균 반경은 교류 전압의 경우 급격하게 감소하다가 완만해지는 곡선으로서 아래로 볼록한 컵 형태를 취하고, 직류 전압의 경우 천천히 감소하다가 완만해지는 오목한 모자 모양의 형태를 취한다. 아울러, 부도체 재질의 테프론 노즐의 경우에는 STS 노즐의 결과와 비슷한 형태를 취하지만 일반적으로 입경이 상대적으로 크게 발생되었다.



(a) Applied AC voltage



(b) Applied DC voltage

Fig. 10 Variation of mean droplet radius with different nozzle material

4. 결론

여러 가지 실험 매개 변수들의 범위 영역에서 전기수력학적 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 및 재질, 액체 유량, 공급 전기장의 종류 및 세기, 그리고 주파수 변동 등과 같은 실험적 인자가 액주 분열 및 액적 형성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 영상 처리 기법으로 액체 분열 과정의 가시화 영상을 획득하여 입경 예측 모델의 결과와 비교 분석하였으며, 전기수력학적 미립화 인자의 영향을 도출한 본 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 노즐 STS 23G, 공급 유량 2.5 ml/min 및 인가 교류 전압 2 kV, 3 kV, 4 kV 조건에서, 입력 주파수의 변화에 따른 액적 평균 반경의 실험적 분포는 입력 주파수 350~450 Hz 영역에서 액적의 입경이 가장 작아지는 현상이 나타났다. 50~400 Hz까지는, 동일한 주파수 영역에서 전압이 높을수록 액적의 입경이 작아지는 경향을 보였고, 400 Hz 이상부터는 전압의 세기와 액적의 입경 관계가 일정한 패턴을 갖지 않는 경향을 보였으며, 입력 주파수의 특정한 영역이 액적 평균 반경의 크기 형성에 지배적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

(2) 노즐 STS 25G 및 공급 유량 1.8 ml/min 조건에 대해, 교류 전압 및 주파수 변화에 따른 액주의 분열 영역 맵으로부터 입력 주파수가 약 450 Hz 근처에서, 적하 모드에서 스핀들 모드로 변환되는 시점이 다른 주파수에 비해 공급 전원의 전압이 낮게 나타났고, 50 Hz 경우와 비교하면 약 23%의 공급 전압으로 동일한 액주 분열의 미립화 효과를 얻을 수 있었다. 정맥류형 파동 모드와 꼬이는 형태의 파동 모드의 천이 과정도 주파수가 450 Hz까지 증가될 때 천이 시점이 저전압으로

로 이동하는 것으로 나타났다.

- (3) 금속 재질을 전극으로 사용한 경우에는 입력 전압에 따라 방전 전류가 급격하게 증가 하면서, 코로나 방전 현상에 의해 액체 스프링들의 성장 및 분열이 매우 불규칙하게 발생되었다. STS 노즐의 경우에는 입력 전압이 2 kV 까지 증가함에 따라, 액적 평균 반경은 교류 전압의 경우 급격하게 감소하다가 완만해지는 곡선으로서 아래로 볼록한 컵 형태를 취하고, 직류 전압의 경우 전천히 감소하다가 완만해지는 오목한 모자 모양의 형태를 취했다. 아울러, 부도체 재질의 테프론 노즐의 경우에는 STS 노즐의 결과와 비슷한 형태를 취하지만 일반적으로 입경이 상대적으로 크게 발생되었다.

참고문헌

1. Z. A. Huneiti, "Electrohydrodynamic atomisation of conducting liquid using an AC field superimposed on a DC field", Ph.D. thesis, Brunel university, England, 2000.
2. M. C. Kim, "Generation of monodisperse droplets by using electrohydrodynamic force", Ph.D. thesis, KAIST, Korea, 2003.
3. 이상용, "액체의 미립화", 민음사, pp. 31-108, 1996.
4. R. L. Hines, "Electrostatic atomization and spray painting", *J. Appl. Phys.*, Vol. 37, No. 7, pp.2730-2736, 1966.
5. 강태경, 이동현, 이채식, 김상철, 노수영, "직류정전대전 농약 살포 부착 특성", *한국액체미립화학회 학술대회논문집*, pp.68-75, 2003.
6. L. Bayvel, and Z. Orzechowski, "Liquid atomization", Taylor & Francis, 1993.
7. M. Cloupeau and B. Prunet-Foch, "Electrostatics spraying of liquids in cone-jet mode", *J. electrostatics*, Vol. 22, pp.135-159, 1989.
8. M. Cloupeau and B. Prunet-Foch, "Electrostatics spraying of liquids : main functioning modes", *J. electrostatics*, Vol. 25, pp.165-184, 1990.
9. 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, pp.850-855, 1994.
10. 성기안, 이창식, "전기수력학적 미립화에서 액적 형성에 영향을 미치는 인자에 관한 실험적 연구", *한국액체미립화학회지*, 제8권, 제2호, pp.24-30, 2003.
11. 성기안, 이창식, "전기수력학적 미립화에서 교류 주파수가 액적 분열에 미치는 영향", *한국액체미립화학회지*, 제9권, 제2호, pp.41-49, 2004.
12. B. Vonnegut, and R. Neubauer, "Production of monodisperse liquid particles by electrostatic atomisation", *J. Colloid Sci.*, Vol. 7, pp. 616-622, 1952.
13. S. B. Sample, and R. Bollini, "Production of liquid aerosol by harmonic electrical spraying", *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 41, No. 2, pp.185-193, 1972.
14. M. Sato, "The production of essentially uniform-sized liquid droplets in gaseous or immiscible liquid media under AC potential", *J. Electrostatics*, Vol. 15, pp.237-247, 1984.
15. 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*, pp.229-234, 2001.
16. 김명찬, 이상용, "전기수력학적 미립화에서 접지전극의 형상이 액적 형성에 미치는 영향", *한국액체미립화학회 학술강연회 논문집*, pp.121-127, 2000.
17. A. Gomez, and K. Tang, "Generation by electrospray of monodisperse water droplets for targeted drug delivery by inhalation", *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25,

pp.1237-1250, 1994.

18. M. Cloupeau, and B. Prunet-Foch, "Electrohydrodynamic spraying functioning modes : a critical review", *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, No. 6, pp.1021-1036, 1994.
19. K. Sung, and C. S. Lee, "Electrohydrodynamic induced liquid dispersion under the effect of AC frequency transition", *Proc. of ILASS-Asia 2004*, pp.60-69, 2004.
20. K. Sung, and C. S. Lee, "Factors influencing liquid breakup in electrohydrodynamic atomization", *J. of Applied Physics*, Vol. 96, No. 7, pp.3956-3961, 2004.
21. A. R. Jones, and K. C. Thong, "The production of charged monodisperse fuel droplets by electrical dispersion", *J. Phys. D : Appl. Phys.*, Vol. 4, pp.1159-1166, 1971.
22. M. Sato, "Formation of uniformly sized liquid droplets using spinning disk under applied electrostatic field", *IEEE Trans. Ind. Appls.*, Vol. 27, No. 2, pp.316-322, 1991.
23. W. Balachandran, W. Machowski, and C. N. Ahmad, "Electrostatic atomization of conducting liquids using AC superimposed on DC fields", *IEEE Trans. Ind. Appls.*, Vol. 30, No. 4, pp.350-355, 1994.
24. 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, pp.267-272, 1983.