

# 교류 고전압을 이용한 대전액체의 전기수력학적 미립화에 관한 실험적 연구

성 기 안†

## An Experimental Study on the Electrohydrodynamic Atomization of Conducting Liquid Using the AC High Voltages

K. A. Sung

**Key Words:** Electrohydrodynamic(전기수력학적), Whipping motion(휘핑운동), Varicose wave(정맥류형 파동), Drop formation(액적형성)

### Abstract

An experimental study was performed to explore the drop formation and atomization characteristics in electrohydrodynamic atomization with flow rate, power supply, voltage frequency, and nozzle size. A basic electrohydrodynamic atomizer equipment was developed for the analysis of spray visualization and tested for the exploration of relationship between several experimental parameters. In results, the varicose wave had been taken place and the small droplets had been generated less than outer diameter of nozzle on the conditions of 25G of nozzle, flow rate of 2 mL/min, and applied frequency of 50 kHz at AC power over 5 kV voltage. The whipping motion had been grown at applied frequency of 400 kHz and AC power around 2 kW voltage

### 1. 서 론

수용성 대전액체의 전기수력학적 미립화(electrohydrodynamic atomization)는 액체가 강력한 국소 전기장에 노출되었을 때 정전기적 힘이 액체에 작용하여 액체 표면적이 확장 및 분열되는 현상이며, 노즐 특성, 액체의 물성(표면장력, 전기전도율, 점도, 밀도 등), 공급 유량, 고전압의 특성 등이 미립화에 크게 영향을 미치는 것으로 연구되었다<sup>(1~3)</sup>.

액적을 대전시키면 액적간의 합착을 방지 할 수 있고, 액적의 경로를 제어함으로써 여러 응용분야(액체-금속

슬러리 분무, 차폐, 페인팅)에 적용될 수 있고 낮은 소비 전력(수 mW)으로 액체를 미립화 할 수 있기 때문에 매우 경제적이다.<sup>(4,5)</sup>

현재까지 전기수력학적 미립화에 대한 많은 연구가 수행되어 왔지만, 이러한 미립화 방식을 응용 분야에 적용하기 위한 대전된 미소균일액적의 생성 방법에 관한 연구는 아직도 많은 부분이 규명되지 않았다. 특히, 많이 응용되는 스피들 모드와 단순 액주 모드에서 액적 생성을 제어하여 원하는 크기의 대전 균일 수용성 액적을 얻는 방법은 아직까지 많은 연구가 요망되고 있다.<sup>(1,3)</sup>

본 연구는 고압 교류 전기장을 인가하여 대전 이완 효과에 의한 액적 형성 과정을 가시화하고, 여러 가지 실험적 인자에 따른 미립화 특성을 조사하였다. 그러나 이러한 실험기구를 통하여 액체를 미립화 하는 것은 일반적인 가압분무방식의 경우와 달리 전기장의 형태, 미립화 기구의 형상 및 액체의 물성 등에 따라 다양한 분

(2008년4월11일 접수 ~ 2008년5월23일 심사완료)

†책임저자, 회원, 강원도립대학 자동차과

E-mail : kiansung@empal.com

TEL : (033)660-8262 FAX : (033)660-8265

무 특성을 나타내므로 액적 분열의 특성을 완벽하게 규명하는 것은 매우 어려운 일이다.<sup>(5, 6)</sup>

따라서, 대전된 액적의 입경 및 실험조건에 대한 현재까지의 선행연구 결과를 바탕으로 본 연구에서는 전기수력학적 미립화를 통한 일정한 입경범위의 균일액적 생성 메커니즘 및 주요 인자에 관한 결과들을 도출하는데 주안점을 두었다.

## 2. 실험 장치

### 2.1 실험 장치의 구성

전기수력학적 미립화 특성 및 액적 분열을 조사하기 위하여 초기단계의 미립화 기구장치를 개발하였으며, 실험 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험 장치는 노즐에 정압 및 정속으로 유량을 일정하게 공급하는 작업유체 공급부, 노즐과 접지전극(모세관-고리 전극형) 사이에 전압 및 주파수 변동이 가능한 고전압 공급부, 그리고 계측 장비 및 영상 분석 장비 등의 측정 기구로 구성된다.

작업유체 공급부는 스테핑 모터로 구동되는 초정밀 선형 액추에이터(SUS, XA-35L-200, 5 μm 이동량/pulse) 및 시스템 제어기로 구성되며, 액체시료를 0.3~60 ml/min 범위에서 정압 및 정속으로 유량을 공급한다.

접지전극 형식은 모세관-고리 전극형 방식으로 노즐과 접지전극 간격을 0~75 mm 범위에서 가변 할 수 있는 기구로 구성하였다. 많은 연구자들은 Jones과 Thong<sup>(7)</sup>의 이론적인 전기장의 세기와 실험적인 조사를 바탕으로, 모세관-고리 전극형 전극 형상에 대해 고리 전극의 내경이 10 mm의 경우 노즐과 접지전극 간격은

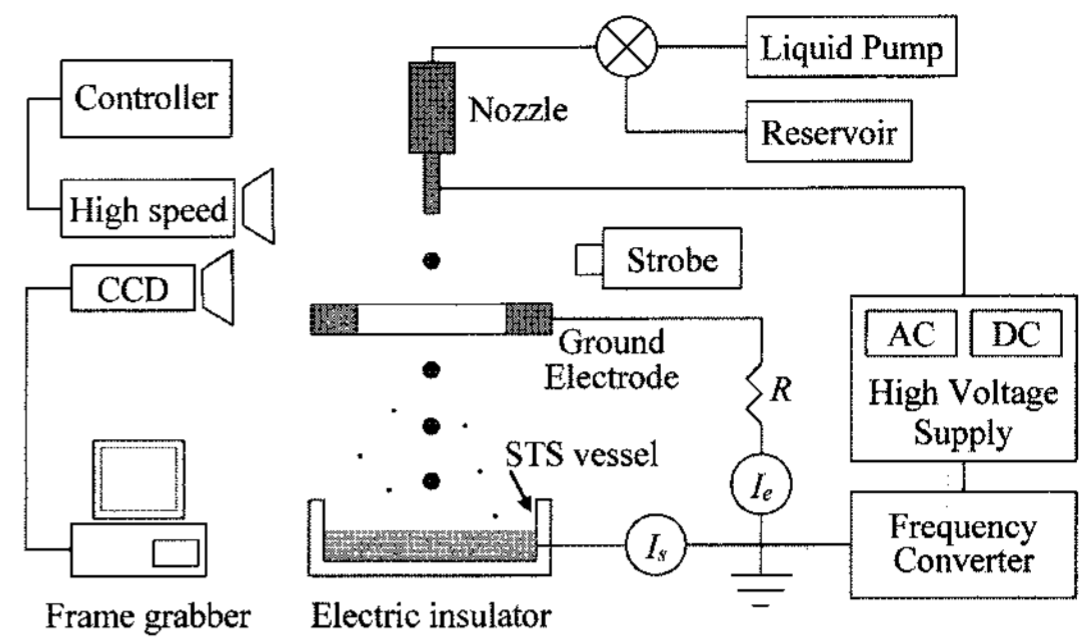


Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement

7~8 mm 가 가장 적절하다고 보고하였다.<sup>(1, 8)</sup> 따라서, 본 실험 장치에서도 10 mm의 고리 전극의 내경 및 8 mm의 노즐과 접지전극 간격을 적용하였다.

고전압 공급부는 교류 고전압 발생기(최대 전압 8 kV, 최대 전류 10 mA) 및 주파수 변환기(UBK, UBK-200, 40 Hz~5 kHz)로 구성되어 노즐과 접지전극 사이에 국소 전기장을 발생한다.

액적 정지 영상은 매크로 줌 렌즈(Computar, MLH-10x)를 결합한 FA용 CCD 카메라(Sony, XC-77), 주기적으로 발광하는 스트로브, PC 슬롯에 장착된 프레임 그래버(National instruments, PCI-1411)를 사용하여 포착하고, 디지털 고속카메라(Photron, Fastcam-ultima 512) 및 제어기를 통하여 액적 분열의 가시화 영상을 획득한다.

액적의 입경분포 등의 자료산출을 위해 디지털 영상 처리프로그램(NI IMAQ vision)을 사용하고, 액적의 생성 및 추적 등을 위해 입자추적프로그램(Image Systems, TEMA)을 사용하였다.

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

Table 1 Specifications of spray visualization system

| Component         | Specifications  | Values  |
|-------------------|---|---|
| CCD camera        | Sensing area<br>Resolution<br>Flange focal length                       | 10.88 mm × 8.16 mm<br>768(H) × 493(V)pix<br>17.526 mm     |
| Macro-zoom lens   | Max. magnification<br>Max. aperture ratio<br>Focus<br>Back focal length | 0.084~0.84 ×<br>1 : 5.6<br>180~450 mm<br>23.29 mm         |
| Frame grabber     | Resolution<br>Transfer rates<br>NTSC formats                            | 640(H) × 480(V)pix<br>Up to 100 Mbyte/s<br>29.97 frames/s |
| High speed camera | Resolution<br>Frame rate  | 512(H) × 512(V)pix<br>Max. 32,000fps                      |

## 2.2 입경 측정 및 분석 방법

많은 연구자들은 매우 작은 입자 또는 분무의 분열 과정을 정밀하게 측정하는 문제점에 직면해왔으며, 기계적, 전자적 및 광학적인 여러 가지 정밀한 기법들이 수년 동안 개발되고 사용되었지만, 특히 액체 분무를 측정할 때 각각의 기법들은 응용하려는 형식에 따라 그 자체의 장점과 한계가 있으므로 현재까지 한가지 방법으로 모든 요구 사항을 만족시킬만한 기법은 없다. 따라서 입경 측정시 아래와 같은 문제점들을 고찰해야 한다.<sup>(9, 10)</sup>

- 분무에 의해 생성된 넓은 범위의 액적 분포(주 액적과 위성 액적)
- 분무 과정에서 생성된 많은 수의 액적들
- 액적들의 다양한 속도
- 미립화 장비에서 발생된 전기적 간섭으로
- 인한 액적의 궤적효과(분무액적들이 미립화 장비의 접지 부분으로 끌려가는 현상)
- 렌즈와 광학장비에 흡착된 액적에 의한 측정 오차 유발

### 2.2.1 영상처리기법을 이용한 입경 측정

영상처리기법을 이용한 입경측정방법은 다른 광학적인 측정기법들에 비하여 비교적 단순한 구조이지만, CCD 카메라의 사용과 적절한 광원 기술에 지배적이고, 측정체적을 크게 설정하였을 경우 큰 액적들만 탐지되는 단점이 있다.<sup>(3)</sup> 일반적으로 12 mm의 심도에서 10×7 mm의 측정 체적을 설정하면, 약 15 μm의 분해능을 얻을 수 있다. 이러한 기법은 액체의 분열과정 및 동적 거동에 관한 정보 뿐 만 아니라 액적형성에 관한 가시화 관측 등 많은 양의 유용한 정보를 제공한다.<sup>(11)</sup>

본 연구에서 사용된 영상 처리 응용 프로그램은 여러 가지 필터와 각종 툴을 내장한 NI IMAQ vision을 사용하였다. 액적의 원시화상에서 스레스홀딩(Thresholding)을 수행하여 그레이 레벨로 변환한 후 메디안(Median) 필터를 사용하여 노이즈를 제거한다. 이후 비선형 프리위트(Prewitt) 필터를 사용하여 액적 입자의 경계선을 검출하고, 이로부터 액적의 사영면적을 등가 하여 도심 및 평균 지름을 추출한다.

### 2.3 실험 조건

실험에 사용된 전기력의 종류는 주파수 변조가 가능한 교류전압이며 노즐과 접지전극 사이에 국소적인 전기장을 발생시킨다. 작업 액체에 인가된 교류 전기장에 의해 발생된 일반적 동적 효과는 여러 종류가 있으며,

Table 2 Experimental parameters

| Parameters              | Ranges                |      |      |
|-------------------------|-----------------------|------|------|
| Flow rate [ml/min]      | 1~4.0                 |      |      |
| Applied AC voltage [kV] | 1~7.5                 |      |      |
| Applied frequency [Hz]  | 50~850                |      |      |
| Nozzle material         | Stainless steel (304) |      |      |
| Nozzle size [mm]        | Gage                  | I.D. | O.D. |
|                         | 25G                   | 0.25 | 0.50 |
|                         | 23G                   | 0.33 | 0.64 |
|                         | 20G                   | 0.60 | 0.91 |

Table 3 Liquid properties

| Parameters                            | Distilled water       |
|---------------------------------------|-----------------------|
| Conductivity $K$ [S/m]                | $1 \times 10^{-4}$    |
| Surface tension $\sigma$ [N/m]        | $72.3 \times 10^{-3}$ |
| Density $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]   | 1000                  |
| Relative permittivity $\epsilon_r$    | 80                    |
| Viscosity $\eta$ [Ns/m <sup>2</sup> ] | 0.0013                |

액체 분산과 액적 형성과정에서 특정한 동적 거동을 일으키는 인자들의 효과 및 영향들이 다양한 실험 조건에서 고찰되었다.

실험 조건에 따른 미립화 효과를 조사하기 위하여 Table 2과 같이 실험 조건들을 설정하였으며, 본 실험에 사용된 작업 액체에 대한 물성치는 Table 3에 나열되었고, 이 값들은 데이터 시트와 참고 문헌으로부터 수집되었다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

물과 같은 고전도 액체를 정전기적으로 제어 가능한 형태로 분산시키는 것은 매우 어려운 일이다. 고전도 액체는 매우 짧은 대전이완시간을 갖는데, 이는 액체 표면을 등가 전위 상태로 만들고 전기적 응력의 방사 성분이 지배적인 정전기 힘이 되도록 한다. 이 방사 응력은 분무 과정에서 액주의 측면 불안정을 유발시킨다.<sup>(12)</sup>

모세관-판형 접지전극 형상에 대해, Takamatsu 등<sup>(13)</sup>은 비균일 전기장에서 물 액적의 끝단에 작용하는 전기력을 다음 식으로 나타내었다.

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

여기서, 인가 전압  $V$  [volt], 액적 반경  $r$  [m], 노즐과 접지전극 사이의 간격  $L$  [m], 상수  $\alpha = 0.0634$ 의 함수로써 전기력을 표현한다. 액적 반경은 액체 유량  $Q$  [ $m^3/s$ ]와 액적 형성 주파수  $f$  [Hz]의 항으로 대체 될 수 있다.

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

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

$$V = V_{DC} + V_{AC} \sin 2\pi ft \quad (3)$$

인가 전원의 매 사이클 변화에 동기해서 액적이 어느 정도 균일한 크기로 발생하는 영역인 동기영역에서, 액적 형성 주파수는 인가 교류 전기장의 주파수와 어느 정도 동일하므로, 식 (2)와 식 (3)을 식 (1)에 대입하여 전기력을 산출하면 다음과 같다.

$$F_e = 4\pi\epsilon_0\alpha\left(1 + \left(\frac{3Q}{4\pi f}\right)^{1/3} \frac{1}{2L}\right)^2 (V_{DC} + V_{AC}\sin 2\pi ft)^2 \quad (4)$$

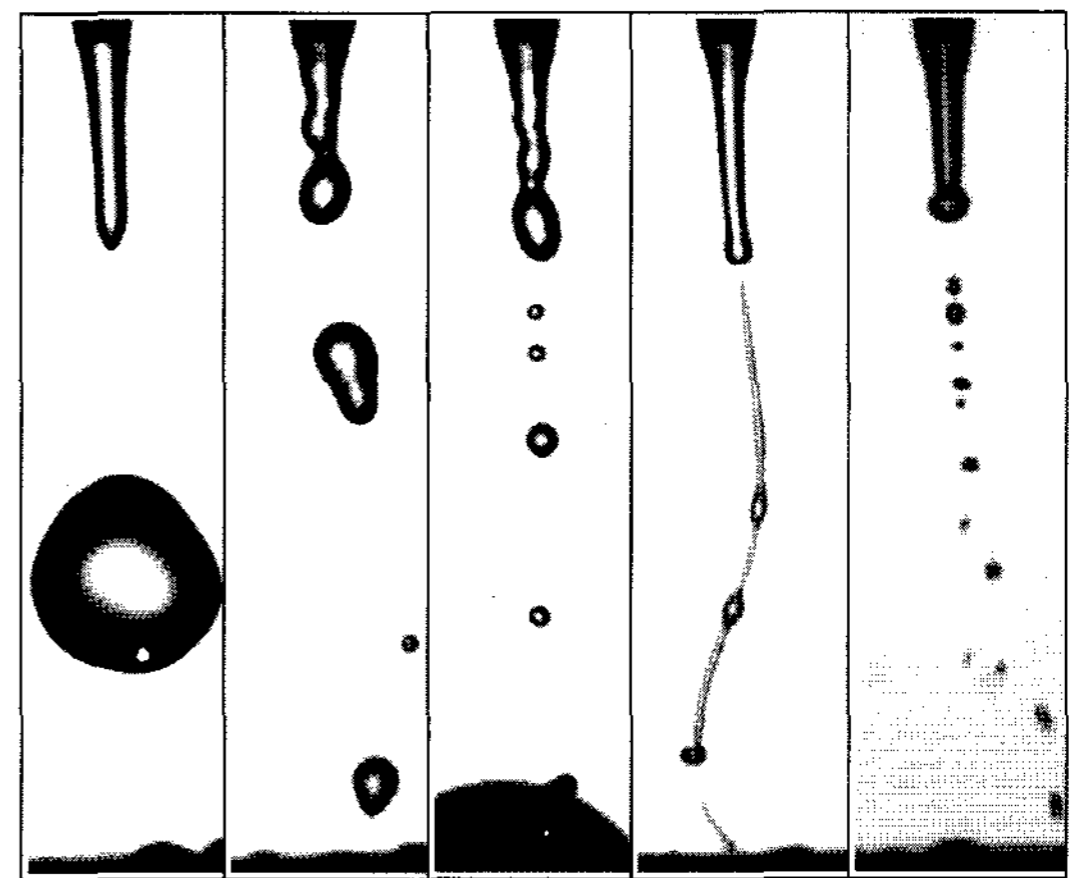
여기서,  $\epsilon_0$ 는 자유 공간 유전율( $8.854 \times 10^{-12} \text{ C/N} \cdot \text{m}^2$ )이며,  $t$  [s]는 시간이다.

순수 교류 전기장만 인가될 경우 ( $V_{DC}=0$ ), 분무 유동 가시화 실험에 사용된 실험 조건 범위 중에서 유량  $Q = 1 \text{ ml/min}$ , 노즐과 접지전극 사이의 간격  $L = 0.008 \text{ m}$ , 입력 주파수  $f = 50 \text{ Hz}$ , 인가 교류 전압  $V = 3 \text{ kVp-p}$ 에 대해, 전기력이 입력 주파수의 2배로 진동하므로, 분류의 분열 주파수는 교류 전기장의 2배가 된다.

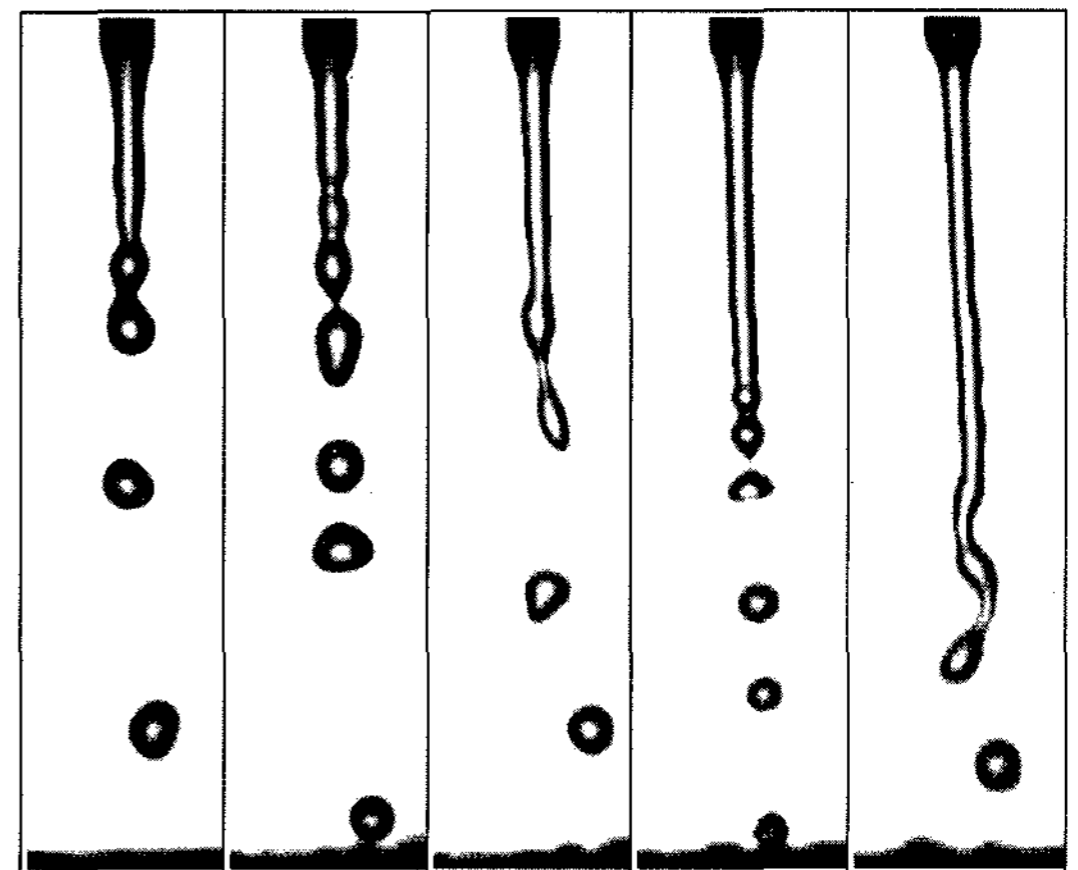
### 3.1 교류전기장의 액적 생성 가시화

Figure 2는 노즐 25G 및 입력 주파수 50Hz 조건에 대하여, 교류전압 및 공급유량 변화에 따른 액주의 길이 변화 및 액적의 분열 과정을 나타낸 것이다.

2.0 mL/min 유량 조건의 경우(Fig. 2(a)), 적하 모드에서 액적은 상대적으로 노즐의 외경보다 크고 중력에 의해 노즐 끝에 매달리거나 떨어지며, 스피들 모드에서는 노즐의 외경에 비해 작은 액주가 형성되어 끊어지는 현상이 나타났다. 약 3 kV까지 적하 모드 현상이 일어나며, 4 kV 근처에서 미립화가 발생하면서 스피들 모드가 보이다가, 5 kV 영역부터 정맥류형 파동이 발생하여 노즐외경에 보다 상대적으로 작은 액적이 발생되었다. 약 6 kV 근처에서 액적에 필라멘트가 연결되어 나타나는 단순 액주 모드가 간헐적으로 발생하였고, 인가 전압이 상승하면서 조금 더 작은 입경의 정맥류형 파동이 생성



(a) Flow rate : 2 ml/min



(b) Flow rate : 3 ml/min

Fig. 2 Change of drop generation modes with AC applied voltage and flow rate at 25G of nozzle and 50 Hz of frequency

되었다.

3.0 ml/min 유량 조건의 경우(Fig. 2(b)), 3 kV 입력 전압부터 전형적인 정맥류형 파동이 발생하여 노즐 외경 크기와 유사한 액적을 단분산시키며, 입력 전압이 점차적으로 증가할수록 입경은 작아지고 7 kV 부터는 꼬이는 형태의 파동이 발생되었다.

각각의 유량 조건에 대해, 액주의 길이는 인가 전압이 증가함에 비례하여 점차로 증가하고, 다양한 크기의 균일한 액적은 유도된 전기장 및 공급 유량에 의해 스피들 모드의 초기에서 발생하며, 스피들 모드에서 공급 유량이 증가되면 액적의 입경은 감소하는 경향을 보였다.

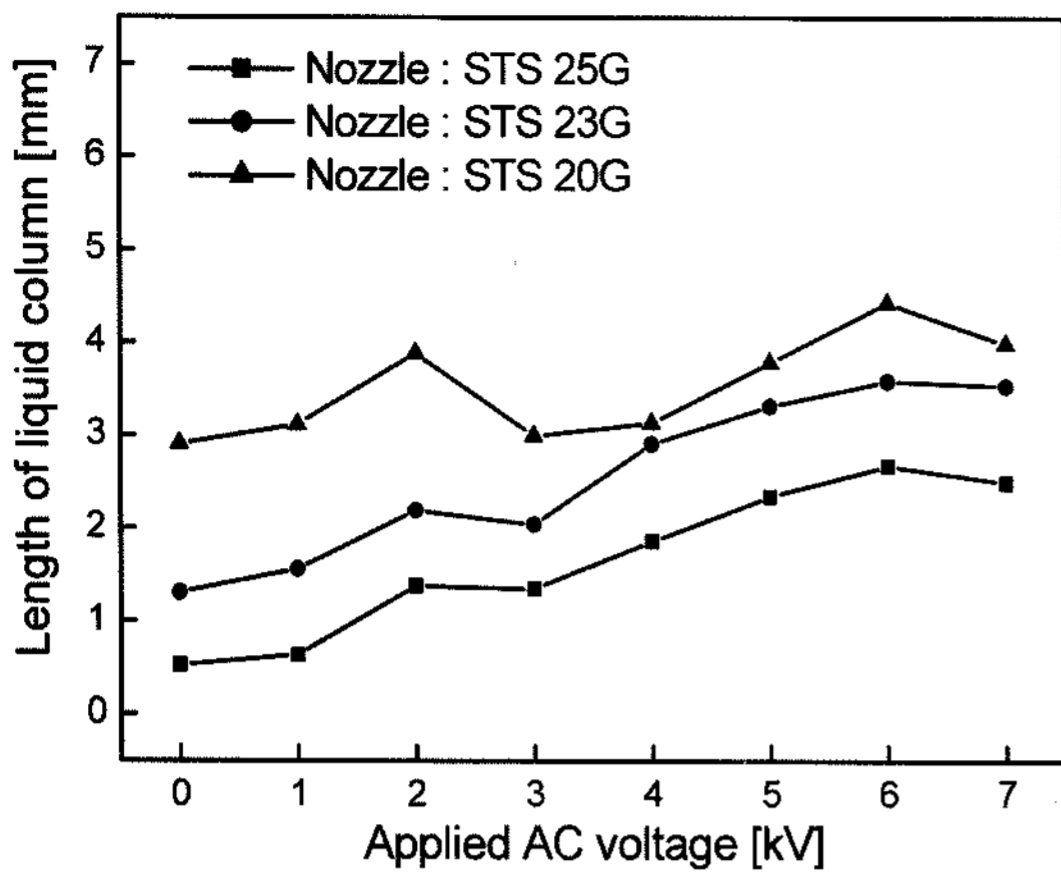


Fig. 3 Effect of flow rate on length of liquid column

교류전압 5~6 kV 영역에서는 공급 전원의 매 사이클 변화에 동기해서 액적의 크기가 어느 정도 균일하게 발생되는데, 이러한 영역을 동기 영역(Synchronous region)이라 부르며<sup>(1)</sup>, 동기 영역을 넘어서면(6-kV 이상) 액주의 분열은 매우 불안정하고 큰 폭의 각도로 액적이 불규칙하게 방출되며 미세 분열의 횟수가 증가되었다.

인가된 교류전압이 증가될수록 분산된 액적 입경은 작아지며 공급 유량이 많아질수록 액적 입경 또한 감소함을 보여준다.

### 3.2 액주의 분열

Figure 3은 노즐 25G, 23G 및 20G 각각에 대해 공급 유량 2.7 ml/min 및 교류 주파수 60 Hz 조건에서, 교류전압의 변화에 따른 액주 길이의 실험적 분포를 보여준다.

일반적인 경향은 교류전압이 증가할수록 액주의 길이는 증가되지만, 교류전압 2 kV까지 액주 분열은 전기력보다 중력의 영향이 더 지배적이어서 적하 모드가 발생하여 액주의 길이가 약간 증가되는 경향을 보이다가, 인가 교류 전압 3 kV 영역에서 전기력에 의한 액주 분열이 시작되어, 액적 형성 과정이 발생하며 액주의 길이는 약간 짧아진다.

액주 형성 과정이 시작한 후, 액주의 길이는 노즐 내경의 크기와 무관하게 길어지지만 액주의 폭은 상대적으로 가늘어지며, 액주의 길이는 교류전압 6 kV에서 최대가 된 후, 점차로 전기력 세기가 증가함에 따라 액주의 길이는 약간 감소함을 보였다.

### 3.3 휘핑 운동 현상

Figure 4는 3종류 실험 조건에서 분류가 좌우로 움직

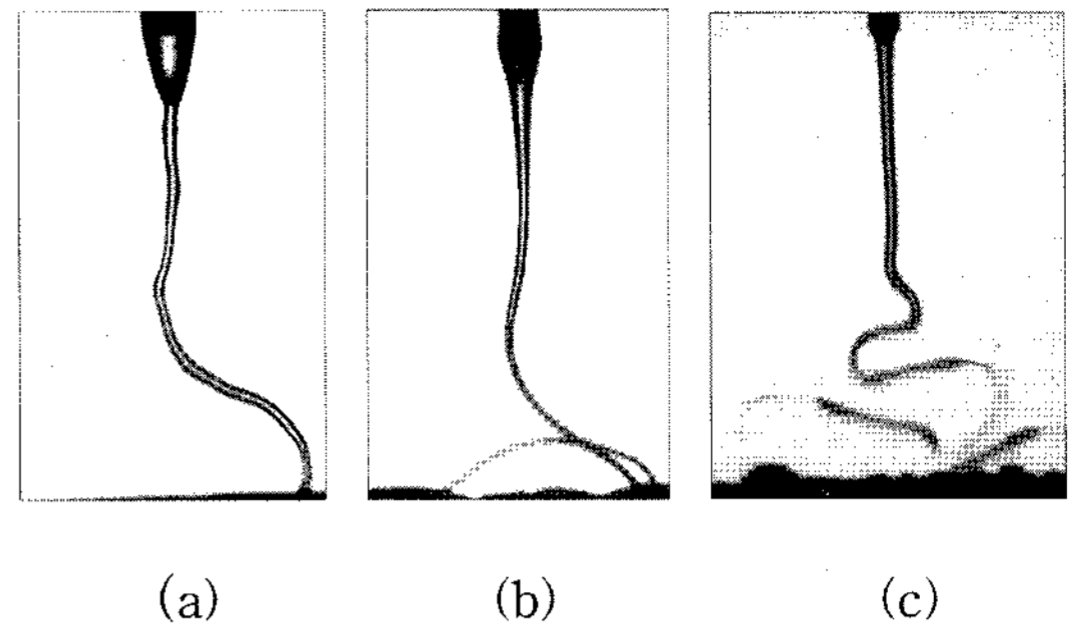


Fig. 4 Whipping motion of jets

이는 휘핑 운동 현상을 보여준다. 이러한 휘핑 운동 현상은 분극과 유전율이 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.<sup>(14)</sup>

일반적인 조건 하에서 실제 미립화는 액체의 분류가 성장하여 완전히 대전된 후에 발생하며, 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 4(a)은 노즐 20G, 공급 유량 2.5 ml/min, 교류전압 2 kV 및 입력 주파수 400 Hz의 경우이고, Fig. 4(b)은 노즐 23G, 공급 유량 3.0 ml/min, 교류전압 7 kV 및 입력 주파수 50 Hz의 경우이며, Fig. 4(c)은 노즐 25G, 공급 유량 3.0 ml/min, 교류전압 6 kV 및 입력 주파수 50 Hz의 경우에 대해, 분류가 좌우로 움직이는 휘핑 운동이 발생하는 현상을 보여준다.

휘핑 운동은 입력 주파수가 50 Hz의 경우, 대략 교류전압 6 kV부터 간헐적으로 발생되었으나 7 kV에서는 자주 발생되었으며, 노즐 내경이 작을수록(25G) 액적의 거동이 더욱 활발하게 움직임을 보였다. 공급 유량이 증대되거나 노즐 내경이 작아질수록 액주의 길이가 증대되어, 노즐 끝단과 접지전극 사이의 간격이 짧아지고 국소 전기장의 세기가 강하게 성장하여 액주를 비평형 상

태로 놓이게 한다. 또한, 교류전압이 낮더라도(약 2 kV) 입력 주파수가 높은 400 Hz 영역에서는 휘핑 운동이 자주 발생되었다.

#### 4. 결 론

초기단계의 고전압을 이용한 전기수력학적 미립화 기구장치를 개발하였고, 이를 이용하여 미립화 특성에 대한 액주분열 및 액적형성 등에 대해 실험을 수행하였고, 여러 가지 실험 조건들의 변화(노즐 크기, 액체 유량 및 공급 전기장의 세기 등)를 통하여 대전 균일 수용성 액적의 다양한 입경 크기의 액적 생성 방법을 실험적으로 연구하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 50 Hz 교류 고전압을 노즐(25G)과 2.0 ml/min 유량 조건에 인가한 경우, 5 kV 영역부터 정맥류형 파동이 발생하여 노즐외경에 보다 상대적으로 작은 액적이 발생되었다. 3.0 ml/min 유량 조건의 경우, 입력 전압이 점차적으로 증가할수록 입경은 작아지고 7 kV 부터는 꼬이는 형태의 파동이 발생되었다.

2) 인가된 교류 주파수가 높은 400 Hz 영역에서는 교류전압이 낮더라도(약 2 kV) 분류가 좌우로 움직이는 휘핑 운동이 자주 발생되었고, 낮은 주파수(50 Hz) 경우는 대략 6 kV부터 간헐적으로 휘핑 운동이 발생되었으며, 노즐 내경이 작을수록(25G) 더욱 활발하게 움직임을 보였다.

#### 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, 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) R. L. Hines, "Electrostatic atomization and spray painting", J. Appl. Phys., Vol. 37, No. 7, 1966, pp. 2730~2736.
- (5) M. Cloupeau and B. Prunet-Foch, "Electrostatics spraying of liquids in cone-jet mode", J. electrostatics, Vol. 22, 1989, pp. 135~159.
- (6) M. Cloupeau and B. Prunet-Foch, "Electrostatics spraying of liquids : main functioning modes", J. electrostatics, Vol. 25, 1990, pp. 165-184.
- (7) 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.
- (8) 김명찬, 이상용, "전기수력학적 미립화에서 접지전극의 형상이 액적 형성에 미치는 영향", 한국액체미립화학회 학술강연회 논문집, 2000, pp. 121~127.
- (9) M. Sato, "Formation of uniformly sized liquid droplets using spinning disk under applied electrostatic field", IEEE Trans. Ind. Appls., Vol. 27, No. 2, 1991, pp. 316~322.
- (10) 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, 1994, pp. 350~355.
- (11) 성기안, "고전압 직류전기장에서 전기수력학적 분무 유동 가시화에 관한 연구", 한국액체미립화학회지, 제 11권, 제3호, 2006, pp.131~139.
- (12) 성기안, 이창식, "전기수력학적 미립화에서 액적 형성에 영향을 미치는 인자에 관한 실험적 연구", 한국액체미립화학회지, 제8권, 제2호, 2003, pp. 24~30.
- (13) T. Takamatus, M. Yamaguchi, and T. Katayama, "Formation of single charged drops in a non-uniform electric field", J. Chem. Eng. of Japan.
- (14) 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.