

# 에탄올( $C_2H_5OH$ ) 연료의 전기수력학적 미립화 특성에 관한 실험적 연구

성 기 안<sup>†</sup>

## An Experimental Study on the Atomization Characteristics of Electrohydrodynamic for Ethanol( $C_2H_5OH$ ) Fuel

K. A. Sung<sup>†</sup>

**Key Words:** Electrohydrodynamic(전기수력학적), Whipping motion(휘핑운동), Drop formation(액적형성), Back-illumination(후방조광법)

### Abstract

An experimental study was performed to explore the atomization characteristics as the drop formation and the liquid breakup of an ethanol fuel using an electrohydrodynamic atomizer. A developed electrohydrodynamic atomizer controlled by a high AC power, a variable frequency, and a liquid feeding was used for the experiments. The test had been considered a disperse atomization processing at 450~4200V applied power, 200~400 Hz frequency, and 1~3 ml/min ethanol feeding to achieve a uniformed droplet formation. The goal of the research was to investigate the possibility of the liquid breakup for an ethanol fuel in an electrohydrodynamic atomizer. The results showed that the mean droplet radius decreased as the applied voltage increased or as the applied AC frequency increased. The whipping motion had been grown at the specified voltages due to the applied frequency.

### 1. 서 론

액체의 전기수력학적 미립화는 액체와 접한 전극의 표면에서 발생하는 현상과 분열이 일어나는 영역내의 자유 표면에서 발생하는 현상에 의해 크게 영향을 받는다.

액주 또는 액막이 강력한 전기장에 노출되었을 때 정전기적 힘이 액체에 작용하여 액체 표면적을 확장하려는 성질을 갖는다. 이러한 확장과 표면적을 최소화하려는 표면 장력과의 대립에 의해 미립화가 발생되며 낮은 소비전력(수 mW)으로 다양한 크기의 액적을 생성할 수 있는 장점을 가진다.<sup>(1~3)</sup>

액적 형성 및 크기에 영향을 미치는 중요한 변수로

는 전기 전도도 및 표면장력 등이 있으며,<sup>(4)</sup> 이러한 각각의 물성치 영향은 다음과 같다.

전기수력학적 미립화는 전기 저항률( $\rho_R$  [ $\Omega m$ ])에 크게 영향을 받으며, 전기 전도도( $K$  [S/m])는 이러한 저항률에 상반된 물성치이다. 저항률의 값에 따라 작업 액체는 전도성 (conducting), 반전도성 (semiconducting) 및 부도성 (insulating) 같이 크게 3 종류로 구분될 수 있으며, 본 실험에 사용된 에탄올은 반전도성으로 구분된다.

중류수, 에탄올 및 경유에 대한 인가전압에 따른 저항률 변화를 Fig. 1에 도시하였다. 그래프로부터 인가전압이 증가하면 전기 저항률이 감소됨을 알 수 있다.

작업 액체의 전기 전도도는 정전기적 분무 과정에 매우 중요한 매개 변수이다. 전기 전도도가 너무 작은 경우( $10^{-8} \sim 10^{-11}$  S/m의 범위), 액체는 체적내에 충분한 자유전하이송체가 없기 때문에 정전기적으로 분무될 수 없다. 전하이송체가 액체에 실려서 분사될 때, 자유전하들은 표면을 향해 이동하며 전기장 때문에 접선 방향

(2009년3월11일 접수 ~ 2009년 6월 22일 심사완료)

<sup>†</sup>책임저자, 회원, 강원도립대학 자동차과

E-mail : kiansung@empal.com

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

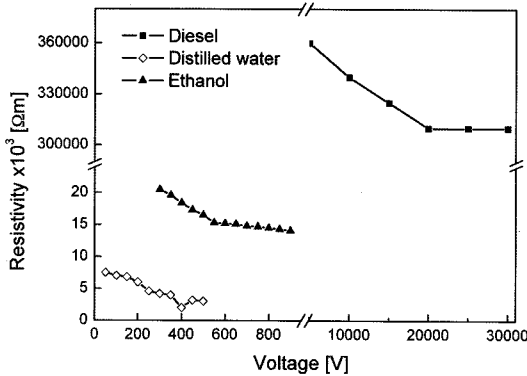


Fig. 1 Variation of resistivity with voltage<sup>(1)</sup>

전기 응력을 발생한다. 높은 전기 전도도를 가지는 액체의 경우에는 상대적으로 풍부한 전하이송체 때문에 전도 전류가 지배적이 된다.<sup>(1)</sup>

Efimov 등<sup>(5)</sup>의 연구에 따르면, 전기장이 없을 때의 표면장력에 대한 전기장이 있을 때의 표면장력의 비는 고전압이 1 kV일 때 표면 장력비는 약 20% 감소하고, 4 kV일 때 원래 값의 약 29% 정도로 감소함을 발표하였다.

Sato 등<sup>(6)</sup>은 증류수, 에탄올, 메탄올 및 벤젠에 대해 고전압 전기장 조건에서 액체의 표면장력의 변화를 연구하였다. 벤젠의 경우를 제외하고, 고전압 전기장이 인가되면 액체 표면장력이 감소함을 보이고, 표면장력의 감소는 인가전압의 제곱에 비례함을 제시하였다.

안정된 콘 제트를 형성하기 위해서는 전기력이 표면장력을 극복하여야 하며, 표면장력이 클수록 더 강한 전기장의 세기가 요구되지만, 전기장이 강할수록 콘 주위의 기체와 전기적 방전을 일으킬 가능성도 높아진다.

현재까지 전기수력학적 미립화에 대한 많은 연구가 수행되어왔지만, 전기 전도도가 높은 수용성 액체에 대한 미립화 특성들이 대다수이다.<sup>(7, 8)</sup> 따라서, 본 연구는 동력 발생이 가능한 연료중의 하나인 에탄올( $C_2H_5OH$ )을 대상으로, 액적 형성과정 및 실험 매개변수 변화에 따른 분열된 액체의 미립화 특성을 관찰하는데 역점을 두었다.

## 2. 실험구성

### 2.1 실험장치의 구성

전기수력학적 미립화 특성 및 액적 분열을 조사하기

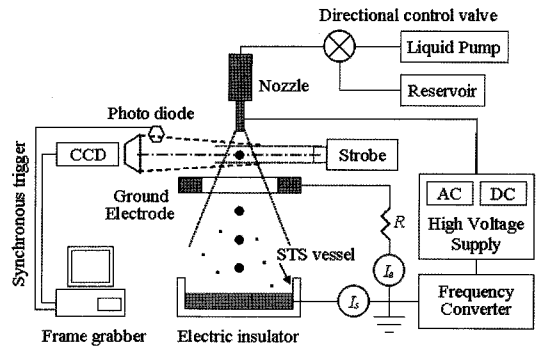


Fig. 2 Schematic diagram of experimental arrangement

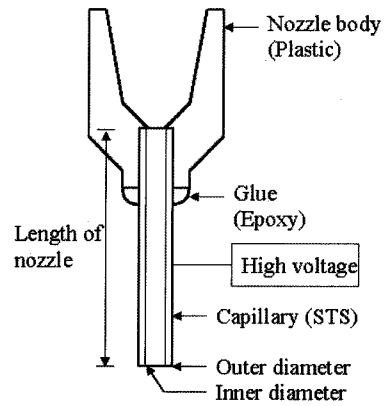


Fig. 3 Configuration of applied nozzles

위한 실험 장치의 개략도는 Fig. 2와 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 및 영상분석장비 등의 측정 기구로 구성된다.

Jones과 Thong<sup>(9)</sup>이 제시한 모세관-고리 전극의 내경이 10 mm의 경우 노즐과 접지전극 간격은 7~8 mm가 가장 적절하다는 것을 근거로, 본 실험에 사용된 접지전극 간격은 8 mm를 적용하였다.

액적의 정지영상은 매크로 줌 렌즈(Computar, MLH-10x)를 결합한 CCD 카메라(Sony, XC-77), 스트로브 및

Table 1 Specifications of applied nozzle

Capillary material	Gage	Nozzle size		Length of nozzle[mm]
		I.D.[mm]	O.D.[mm]	
STS	25	0.25	0.50	17.9

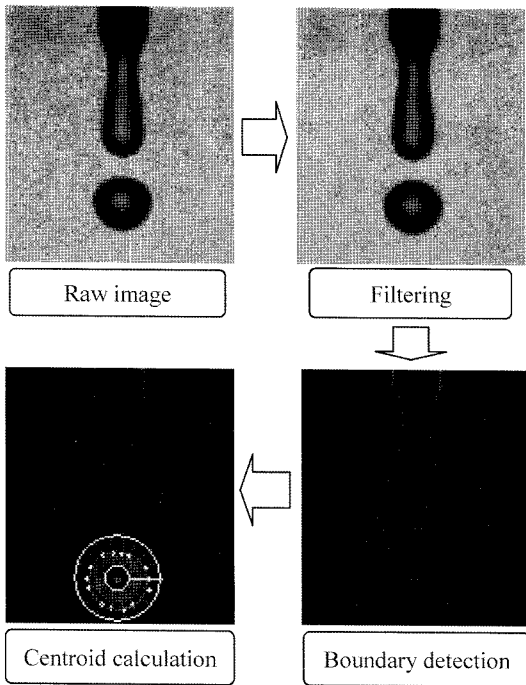


Fig. 4 Image processing example

Table 2 Liquid properties used in this work

Parameters	Values
Working liquid	Ethanol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)
Content [V/V%]	95.1~95.6
Molar mass [g/mol]	46.07
Conductivity <i>K</i> [S/m]	1×10 <sup>-6</sup>
Surface tension $\sigma$ [N/m]	22.27×10 <sup>-3</sup>
Density $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	789
Relative permittivity $\epsilon_r$	24
Viscosity $\eta$ [mPa · s]	1.20

프레임 그래버(NI, PCI-1411)를 사용하고, 입경분포 등의 자료산출을 위해 디지털 영상처리프로그램(NI, IMAQ vision)을 사용하였다.

본 실험에 사용된 노즐의 재질은 스테인레스강(STS)이며, 액체가 일정하고 깨끗하게 배출되도록 끝 부분이 둥글고 매끈하게 연타되었다. Fig. 3은 실험에 사용된 노즐의 형상을 나타낸 것이고, Table 1은 노즐의 규격을 표시한 것이다. Fig. 4는 영상처리기법<sup>(7)</sup>을 활용하여 액적의 반경을 계측하는 예를 보여준다.

Table 3 Experimental conditions

Parameters	Ranges
Flow rate [ml/min]	1~3
Voltage input [V]	450~4200
Frequency input [Hz]	200, 250, 300, 400

### 2.3 실험 조건

실험에 사용된 작업 액체는 반전도성 전기 전도도를 가지는 에탄올(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH)이며, 참고 문헌<sup>(10)</sup>으로부터 수집된 물성치는 Table 2에 나열되었다.

주파수 변조가 가능한 교류 고전압을 이용하여 노즐과 접지전극 사이에 국소적인 전기장을 형성하였고, Table 3과 같이 실험조건 변화에 따른 액적 분열 등을 고찰하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

액체의 체적내에 충분한 자유전하 이송체가 없는 에탄올 같은 반전도성 액체를 국소 전기력으로 대전 이완시켜 다수의 작은 액적들로 분산시키는 것은 매우 어려운 일이다.

반전도성 액체의 대전 이완시간(4  $\mu$ s)은 전도성 액체의 대전 이완시간(21 ns)에 비해 약 200배 정도 상대적으로 길어, 이러한 이유 때문에 전기수력학적 힘을 이용한 액체의 분산이 매우 어렵다. 따라서, 액주의 성장 또는 액주의 분열 시간 보다 이완시간이 길면 액주는 전기적으로 비평형 상태에 놓이게 되고,<sup>(11)</sup> 액체 표면을 등가 전위 상태로 만들기 쉬어 지배적인 전기력의 방사성분에 의해 분무 발달 과정에서 액주의 측면 불안정을 유발시킨다.<sup>(12)</sup> 대전 이완시간은 액체의 전기 전도도에 의해 크게 좌우되므로, 유전율에 의한 분극 효과를 예방하기 위해 적절한 세기와 주파수를 갖는 교류 전기장을 도입하여 실험을 수행하였다.

Figure 5는 에탄올을 2 ml/min 공급 유량 조건에 대하여 주파수 변화(200~400 Hz) 및 인가전압 변화 (0.45~4.05 kV)에 따른 액적 분열의 가시화 정지 화상을 보여 주며, Fig. 6은 공급유량 1, 2, 및 3 ml/min 조건에 따른 분산된 액적들의 평균 반지름의 변동을 보여준다.

공급유량 2 ml/min 조건의 Fig. 5 가시화 영상에서 보듯, 초기 낮은 전압에서는 노즐 직경과 비슷한 크기의 단순액적(Dripping mode)을 등간격으로 생성시키며, 공

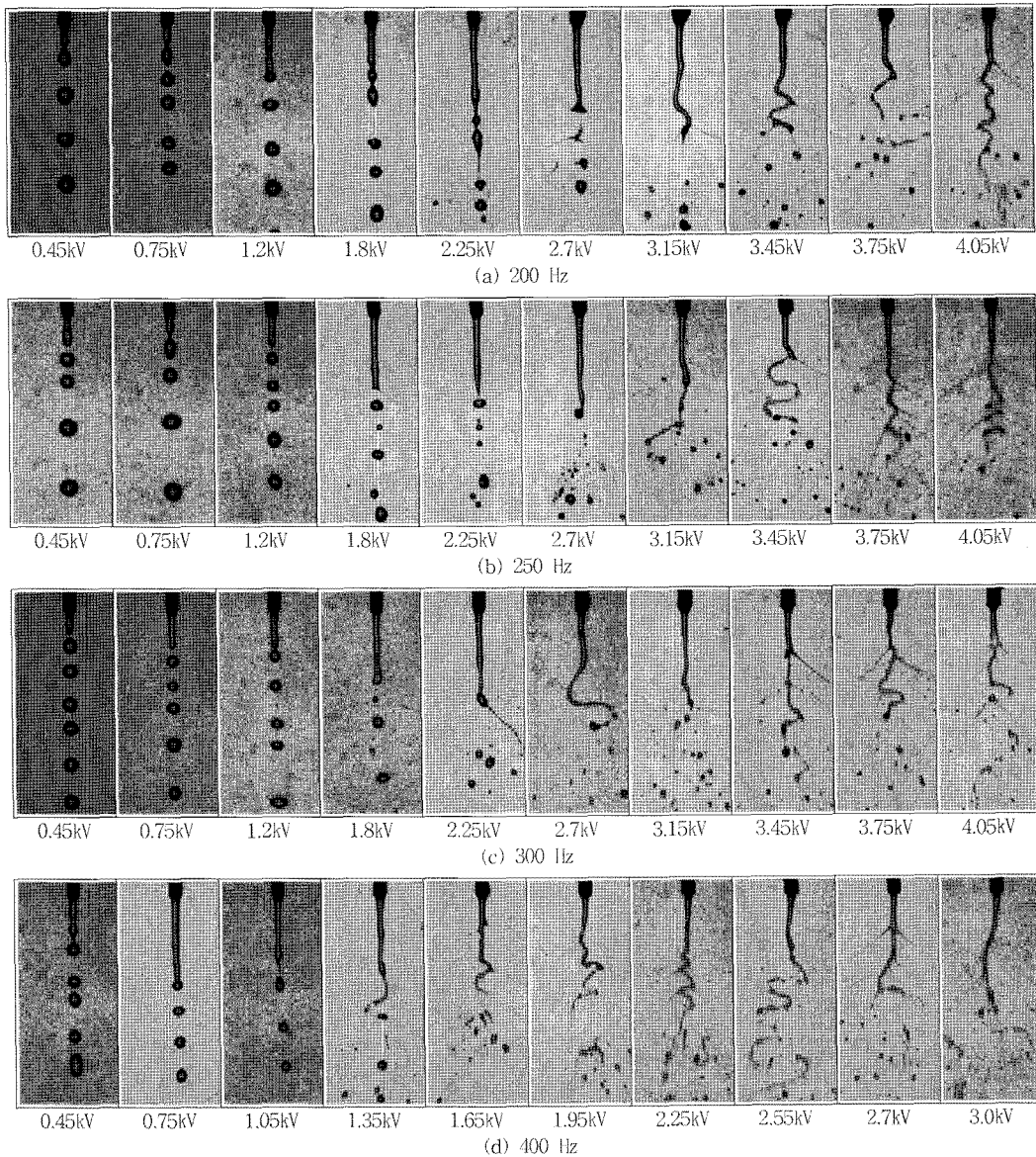


Fig. 5 Spray visualization of ethanol in 2 ml/min flow rate

급전압이 높아질수록 액주길이는 길어지다가 특정전압 (3 kV@200 Hz, 2.85 kV@250 Hz, 2.4 kV@300 Hz 및 1.35 kV@400 Hz)부터는 분류의 끝이 좌우로 움직이는 휘핑운동(whipping motion)이 관찰되었다.

이러한 휘핑운동 현상은 분류과 유전율이 관련된 전하이완시간의 지배적 영향을 받아서 발생된다. 전하이완시간은 전기적으로 액주 및 액적이 평형 상태로 돌아갈 수 있는 시간을 의미하며, 액주의 성장 또는 액주의 분열 시간보다 이완 시간이 길면 액주는 전기적으로

비평형 상태에 놓이게 된다.<sup>(1, 11)</sup>

휘핑운동은 공급 주파수가 높아질수록 액주 길이가 증대되어 노즐 끝단과 집진전극 사이의 간격이 짧아지고 극소 전기장의 세기가 강하게 성장하여 액주를 비평형 상태로 만들어 낮은 공급전압에서 자주 발생되지만, 공급유량의 변화에 대해서는 큰 변화가 없었다. 이러한 현상은 정기적이고 정형화된 패턴으로는 관찰하기가 어렵고 임의의 형태와 비정기적으로 관찰되었다.

액주 분류의 하류측 방향 좌우로 순간적으로 형성되

는 환선 필라멘트는 공급 주파수 200 Hz 영역일 때 인가전압 3 kV 근처부터 발생되었고, 주파수가 높아질수록 점점 낮은 전압에서 발생되었다. 이는 주로 분류 끝단이 끊어지면서 길이가 늘어나고, 늘어난 필라멘트는

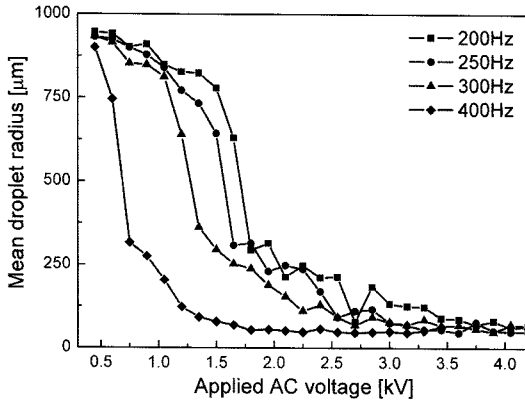
끝단으로 갈수록 점점 줄어들어 최대가 된 후 미세액적으로 분산된다.

최소 표면 에너지 특성<sup>(7)</sup>에 의하여 표면장력은 표면적과 분자들 사이의 거리를 단축하고 액체의 평형 상태를 유지하려는 경향을 가지지만, 전기력은 표면적을 확장시키려는 성질을 갖고 표면 전하에 의한 에너지 성분이 최소화 되도록 작용한다. 표면 에너지를 최소화하려는 서로의 경쟁 효과는 표면적의 갑작스런 증가를 불러일으키고, 이러한 표면적 증가는 일부 액체 분류의 격렬한 측면 변위의 형태로 나타난다.

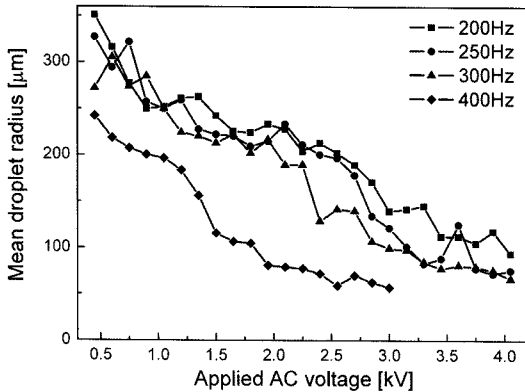
Figure 6(a)에서 보듯, 3.5 kV 이하의 동일한 인가 전압하에서 공급 주파수가 높을수록 분산된 액적의 평균 크기는 크게 감소됨을 보이며, 그 이상의 전압에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 특히 400 Hz 1.5 kV 이상에서는 액적의 평균직경이 100  $\mu\text{m}$  정도의 균일한 스핀들 모드(spindle mode)의 액적이 형성되었다.

공급 유량별 3가지 실험 조건 모두에서, 인가 전압이 클수록 또는 공급 주파수가 높을수록 액적 평균 반경은 뚜렷하게 작아지는 경향을 보였고 400 Hz 영역에서 액적 평균 반경이 최소가 됨을 보였다. 상기 3가지 조건에 대한 액적 평균 반경의 변화는 비슷한 양상을 가지며, 액적의 크기는 인가 전기장의 세기뿐만 아니라 공급 주파수와도 밀접한 관계가 있음이 관측되었다.

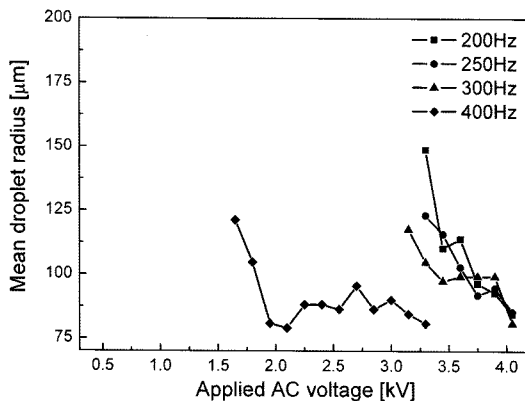
공급 유량이 3 ml/min인 Fig. 6(c)의 경우, 낮은 인가 전압에서는 상대적으로 다유량 공급으로 인하여 액적은 발생되지 않고 액주만 성장하였다. 액적의 생성 시점은 낮은 주파수 영역에서는 약 3 kV 이상부터 시작되었고 높은 주파수(400 Hz)의 경우 약 1.6 kV부터 시작되었다.



(a) flow rate : 1 ml/min



(b) flow rate : 2 ml/min



(c) flow rate : 3 ml/min

Fig. 6 Mean droplet radius due to frequency change

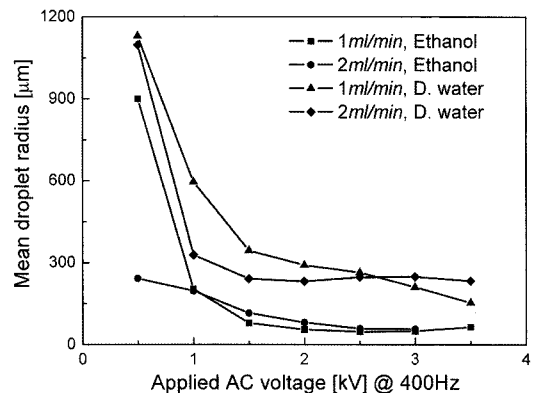


Fig. 7 Variation of mean droplet radius due to different working liquids

## 참고문헌

증류수(distilled water)를 작업액체로 400 Hz 고전압 전기수력학적 미립화기를 사용하여 액적의 특성을 실험적으로 관찰한 Sung 및 Lee<sup>(7)</sup>의 결과와 본 에탄올을 이용한 실험 결과를 비교하여 보면, 에탄올을 적용하였을 경우에는, 인가전압 1, 2, 3 kV 및 공급 유량 1 ml/min 일 때 액적의 크기가 각각 65.7, 81.0 및 76.5% 감소되었고, 공급 유량 2 ml/min 경우에는 각각 40.2, 65.1 및 77.2% 감소되었으며 Fig. 7에 도시되었다. 이러한 결과는 에탄올은 증류수에 비하여 큰 전기 저항율과 긴 대전 이완시간으로 표면장력의 변화에 의한 효과<sup>(1, 12)</sup>라고 추론된다.

## 4. 결 론

에탄올(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) 연료의 전기수력학적 미립화 특성을 관찰하기 위해 기존 미립화 장치를 개량하여, 여러 가지 실험 조건들(전기장의 세기, 주파수 및 액체 유량)을 통하여 반전도성 액체의 다양한 크기의 액적 생성을 실험적으로 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 증류수와 비교하여 큰 전기저항율과 긴 대전이완 시간을 갖는 에탄올은 인가전압 2 kV 조건에서 공급 유량 1 및 2 ml/min 경우, 액적의 크기가 각각 81.0 및 65.1% 감소되었다.

2. 공급 유량별 3가지 실험 조건 모두에서, 인가전압이 클수록 또는 공급 주파수가 높을수록 액적 평균 반경은 뚜렷하게 작아지는 경향을 보였고 400 Hz 영역에서 액적 평균 반경이 최소가 됨을 보였다.

## 후 기

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2008-521-D00072)입니다.

- (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) 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.
- (5) N. A. Efimov, V. A. Zvonov, and L. Y. Efimova, "Investigation of the effect of the nature of an applied voltage on the flow of benzine", Electron. Obrab. Math. USSR, Vol. 1, 1979, pp.45~47.
- (6) M. Sato, M. Kiato, and T. Sakai, "Surface tension reduction under high potential by vibrating jet method", Kagaku Kogaku Ronbunshu, Vol. 3, 1977, pp.504~507.
- (7) 성기안, "고전압 직류전기장에서 전기수력학적 분무 유동 가시화에 고나한 연구", 한국액체미립화학회지, 제11권, 제3호, 2006, pp.131~139.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Wikipedia Encyclopedia, "Ethanol physical properties", <http://en.wikipedia.org/>.
- (11) 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.
- (12) 성기안, "교류 고전압을 이용한 대전액체의 전기수력학적 미립화에 관한 실험적 연구", 한국액체미립화학회지, 제13권, 제2호, 2008, pp.73~78.