전기수력학적 미립화에서 교류 주파수가 액적 분열에 미치는 영향

Influence of AC Frequency on the Liquid Breakup in Electrohydrodynamic Atomization

성기안*, 이창식**
K. A. Sung, C. S. Lee

Abstract

Liquid breakup under the variation of AC frequency has been studied experimentally in the electrohydrodynamic atomization. The effect of parameters such as charging voltage, flow rate, nozzle tip inner diameter and power frequency have been considered. This work was performed to investigate the experimental analysis for the effect of AC frequency on breakup process, the mapping of occurrence of disintegration region, and the relationship between the applied power and the droplet radius. The experimental results show that the increase of applied voltage in a certain frequency band leads to a reduction in the droplet size within the limits from 50Hz to 400Hz. The transition phenomena from dripping mode to spindle mode were observed under the band of sudden fall of droplet radius changing ratio, and the synchronous region were produced within the range of applied voltage from 5kV to 6kV.

주요기술용어(Key Words): Electrohydrodynamic(전기수력학적), Dispersion(분산), Breakup(분열), Varicose wave(정맥류형 파동), Kink wave(꼬이는 형태의 파동)

1. 서 론

전기수력학적 미립화 (electrohydrodynamic atomization)는 노즐 팁과 접지 전극(ground electrode) 사이에 인가된 포텔셜 전기장과 유체의 상호 작용에 의한 액체의 분산 현상이며, 노즐 특성, 유체의 물성 (표면장력, 전기전도율, 점도, 밀도 등), 작업 유체의 유량, 인가 전압 및 주파수 등이 액체분류의 분열에 영향을 크게 미치는 것으로 연구되었다.[1~4]

전기수력학적 미립화 기술은 스프레이 페인팅, 농약살포, 액체금속 분무, 연료 분무, 잉크젯 프린팅, 공해 제어, 분말형성 및 필림 생성 등 다양한 분야에 응용되고 있다.[5,6]

윤활, 약제 살포, 열기관, 연소기, 도장 등 다양한 분야에 응용되는 30㎛~450㎛의 범위를 갖는 액적은 dripping, spindle 및 cone-jet 모드에서 발생된다.[2]

이러한 경우에서 액적 크기를 결정하는 중요

* 도립강원전문대학 기계·자동차과
** 한양대학교 기계공학부

한 인자들은 분류의 형성과 뒤이어 발생하는 분열 메커니즘이다. 표면 장력이 존재할 때 하나의 자유 액주는 동시에 여러 개의 액적들로 분열한다. 노즐 끝단에서 발생된 액체의 비난류성 분류 형상의 액주는 액적들의 방출을 발생시킨다. 이러한 액적들은 모두 분류 직경이 약 2배의 직경을 갖는 동일한 크기이다. 이러한 종류의 분류 분열과정은 불안정한 sausage 또는 varicose(정맥류형) 모드로 불린다. 또한 이것은 mono-sized spray를 발생하는 가장 좋은 방법중의 하나이다.

미립화의 dripping(적하) 모드에서 균일한 액적을 발생시킬 수 있어도, 액체 유량이 극히 적고 액적 발생율도 제한적이다. 분류의 분열은 교란 파장의 범위에 의해 결정되기 때문에 분류의 자연적 분열에 의해 생성된 균일한 액적의 직경범위는 한정적이다.

미립화의 smooth jet 모드는 dripping 모드보다 대용량의 액체와 높은 동기 주파수를 갖는 장점이 있다. mono-sized 액적은 해당 주파수와 진폭의 인가된 교란의 방법에 의한 일정한 시간간격에서 액체 분류의 분열에 의해 얻어질 수 있다. 이러한 교란은 두가지 방법으로 발생시킬 수 있는데, 그 중 하나는 피에조 전기 소자에 의해 발생된 기계적 진동으로 액체를 방출하는 방법이며, 두 번째 방법은 노즐에 고전압 전기적 에너지를 인가하는 방법이다.[1]

기계적 진동 주파수는 단지 고유 분류의 분열 주파수 대역에 존재하기 때문에 기계적으로 유도된 미립화는 좁은 주파수 범위에 제한적이다. 전기수력학적 미립화 기구를 사용한 미립화 방법은 이러한 기술로 제공된 환경적이며 실용적인 장점들에 기인하여 많은 산업에 응용되어 보편화되고 있다. 단일 분산 미립화 액적(mono-dispersed spray droplets)들을 발생하는데 사용된 전기적 분산 기술들은 폭넓은 주파수 대역에서 적용 가능하다.

Tang과 Gomez는 유량이 아주 낮은 5.8~42.4㎕/min 영역 조건으로 cone-jet 모드에서 단일 분산 액적들을 발생시켰으며 액적의 크기는 수 미크론으로 매우 작게 형성됐음을 보고했다. 그러나, 이 모드는 고전압 전기력은 작업유체의 높은 표면 장력을 극복해야 하기 때문에 물같이 높은 표면 장력의 고 전도성 유체에 대해 세밀하게 형성되어 지는 것은 매우 어렵다고 설명했다.[7]

분산 기구 장치로 대부분의 연구들이 직류 전기장을 이용하여 수행되었으나, 일반적으로 전기수력학적 미립화에서 직류의 사용은 액적의 크기 또는 미립화 액적들의 방출 주파수를 제어하는데 어려움이 있다. mono-sized 액적 생성과 제어 가능한 상태로 전도성 액체를 정전기적으로 미립화 하기 위하여 직류 전기장에 교류 전기장을 중첩하는 방법들에 관심을 갖게 되었다.[8] 또한 교류 전기장 단독 상태에서도 미립화 과정이 교류 전기장 주파수와 연동된다면 미립화 방출 주파수로 제한적 조건 하에서 제어 될 수 있음이 연구되었다.

액적 생성의 주파수와 균일 액적을 얻기위해 교류 전기장의 주파수를 사용한 연구가 Vonnegut와 Neubauer에 의해 처음 제안되었다.[9] 간단한 기구 장치로 0.1㎜ 직경 범위를 갖는 균일한 액적을 발생시켰다. Sample과 Bollini는 교류 전기장과 직류 전기장을 가변하여 교류 전기장의 주파수가 고유 미립화 주파수에 근접하는 것을 보고하였고, 직류 전기장의 20% 수준의 교류 전기장을 조합하여 60~600㎛ 액적들을 발생하였다.[10]

Sato는 교류 전기장만으로 넓은 영역에서 균일한 액적들을 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 조사하였다.[11]

그러므로, 본 연구에서는 전기수력학적 미립화의 여러 가지 액체 분산 현상을 가시화 하기 위하여 노즐 내경, 작업 유체의 유량, 외부 전원의 전압 및 주파수 등의 실험 인자를 변환하여 실험을 수행하였다. 교류 전기장의 주파수 변환에 따른 액적 분산의 가시화 및 수치적 해석 결과와 실험적 결과를 상호 비교하였으며, 전압과 주파수 관계에서 형성되는 액적의 모드 맵 등을 분석하여 액체 분산의 특성을 규명하였다.

2. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치의 개략도는 Fig. 1 과 같이 구성하였다. 이 장치는 기본적으로 주사기식 액체 펌프, 고전압 발생기, 주파수 변환기, 노즐, 줌렌즈 부착 CCD 카메라 및 영상분석용 PC로 되어있다.

주사기식 액체 펌프는 작업 유체의 시료를 0.7~60㎖/min 범위에서 정밀하고 일정한 유량을 공급할 수 있으며, 노즐 끝과 접지전극 사이에 고전압을 인가하기 위해 교류용 주파수 변환기 및 고전압 발생기(최대전압 8kV, 최대전류 10㎃)를 사용하였다. 노즐의 재료는 스테인레스 강이며 끝 부분이 연마된 내경 0.34㎜, 0.60㎜ 및 0.84㎜의 크기를 각각 사용하였다. 노즐 끝과 접지전극 사이의 corona 방전 동안에 과전류 방지를 위해 접지전극과 접지(ground) 사이에 10㏁의 저항을 삽입하였다. CCD 카메라는 10배 마이크로 줌 렌즈를 장착했으며 발광 단속 주기(2~20㎐)를 갖는 스트로브와 함께 액주 분열의 가시화 영상을 얻었다. 영상획득 장비는 PC 내부에 장착된 프레임 그래버(National Instruments, PCI-1411)를 사용하였으며, 획득된 영상의 분해능은 640×480 이다. 디지털 영상은 영상해석 소프트웨어 (IMAQ vision builder)를 사용하여 획득된 영상으로부터 액적의 크기 등의 자료를 산출하는데 사용되었다.[12]

동일한 공급 전압 조건에서 노즐 끝과 접지전극 사이의 거리는 형성된 전기장의 크기와 관련된다. 거리가 짧을수록 높은 전기장이 형성되어 액체 시료에 더 크게 작용하여 액적 형성에 영향을 끼친다. 또한, 노즐 끝과 접지전극 사이의 거리가 가까우면 분열된 액적이 접지전극에 충돌 할 수 있으며, 또한 분열된 액적을 응용 분야에 적용하는데 어려워질 수 있다. 따라서, 적정한 전기장을 형성하고 액적과 접지전극 사이의 충돌을 방지하며 알맞은 미립화를 얻기 위해 링형 접지전극 도입 및 적절한 거리가 필요하다.

본 실험장치에 적용된 노즐 끝은 접지 전극을 기준으로 수직하게 8㎜ 위에 놓여있다. 접지전극의 재료는 구리이고 내경이 10㎜인 반지형이며, 중심위치에서 액주 및 액적 등이 통과한다. 전기수력학적 미립화의 액주 분열 과정은 유량범위 1.0~4.0㎖/min의 유속에서 관찰되었다. 사용된 액체 시료는 증류수이며, 노즐 끝과 접지전극 사이에 인가된 전압은 액체의 분류가 비규칙적으로 흩어질 때까지 점진적으로 공급하였다.

Fig. 2는 노즐 끝과 링형 접지전극 사이의 구성도를 나타낸 것이다.

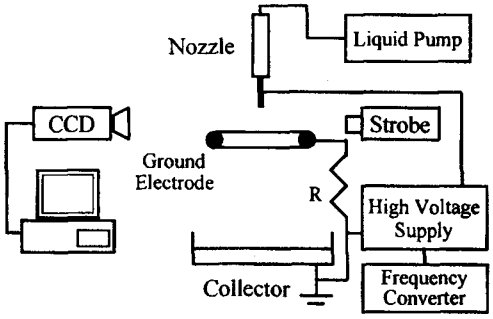

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

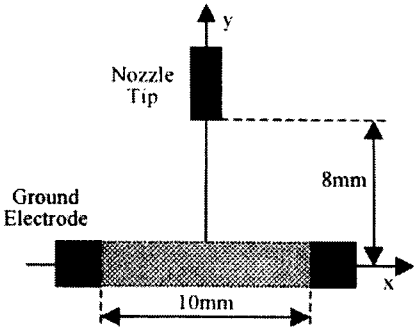

Fig. 2 Configuration of nozzle and ring ground electrode

전기수력학적 미립화 분무의 해석은 입자 이미지를 이용한 영상획득기법이 분무 패턴의 가시화 및 장비 구성을 위한 비용 측면에서 다른 기법들 보다 장점이 있다. 적절한 스트로브 발광 및 CCD 카메라의 선택은 영상 처리 로직에

크게 영향을 끼친다. 저주파 스트로브 발광은 분무의 특정영역을 맞추는데 사용되고, 액적의 그림자는 마이크로 줌 렌즈로 확대되어 영상화된다.

Table 1 Liquid properties and experimental parameters

Parameter	Range
Fluid conductivity σ[Ωm]$^{-1}$	$2\sim4\times10^{-4}$
Surface tension γ[N/m]	0.073
Density ρ[kg/m^3]	1000
Viscosity η[Ns/m^2]	0.0013
Inner / outer diameter of nozzle [㎜]	0.84 / 1.27 0.60 / 0.91 0.34 / 0.64
Flow rate [㎖/min]	1.0~4.0
Inner diameter of ground electrode [㎜]	10
Electrode distance [㎜]	8
Power AC voltage [kV]	0~8
Power AC frequency [Hz]	50~850

Table 2 Test conditions

Nozzle inner diameter	Fixed values	Variable values
0.34㎜ 0.60㎜ 0.84㎜	1㎖/min@50Hz 2㎖/min@50Hz 3㎖/min@50Hz 4㎖/min@50Hz	1~7kV, 1kV step
0.34㎜	1.8㎖/min	1~7kV@50~800 Hz, 50Hz step
0.34㎜	2.5㎖/min	2,3,4kV@100~600Hz, 100Hz step
0.60㎜	3.4㎖/min, 4kV V_{AC}	50~850Hz, 50Hz step

선택된 프레임은 프레임 그레버에 의해 디지털화되고, 이러한 디지털 영상은 입자의 크기, 거동 및 분무 패턴 등을 산출하기 위해 영상처리 소프트웨어로 해석된다. 이러한 관찰의 주된 목적은 정전기적 전도성 액체의 전기수력학적 미립화 과정을 고찰하는 것이다.

본 연구에 적용된 시료의 물성치가 Table 1에 주어졌으며, 시험 횟수에 따른 고정 인자 및 가변 인자 조건은 Table 2에 게재되었다.

3. 실험 결과

전기수력학적 표면 안정성은 액체의 정전 미립화에 관한 연구에 가장 중요한 특성의 하나이다. 전기장이 다른 전기적 요소 및 물리적 요소를 갖는 두 개의 액체 사이에 작용할 때, 거시적 운동이 유도되고 관측된다.

Fig. 3은 전기수력학적 미립화에서 일반적인 액주의 분열 과정을 보여준다. 제 1영역에서는 노즐 끝 근처에서 전기장이 매우 강하고 전도가 우세한 영역이다. 제 2영역에서는 제 1영역에서 제 3영역으로 전이되는 영역으로 대류와 전도의 영향이 동일하다. 제 3영역에서는 대류가 우세하고, 제 4영역에서 액체 분열이 일어난다.[1,4]

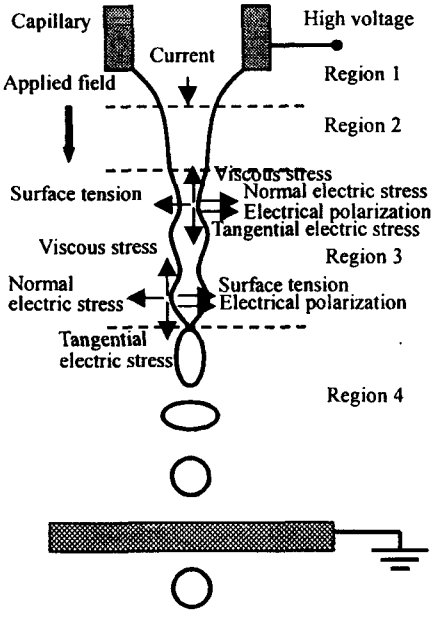

Fig. 3 Electric filed directions and dominant regions

인가된 전기력의 종류 및 세기에 따라, 전기장 유도 운동은 접촉면의 변형을 불러일으킨다. 실험에 사용된 전기력의 종류는 교류 전기장이며 외부적으로 작업 유체 시료에 인가된다. 작업 유체에 인가된 교류 전기장에 의해 발생된 일반적 동적 효과는 여러 종류가 있다. 액체 분산과 액적 형성에서 특정한 동적 거동을 일으키는 인자들의 효과 및 교류 전기장의 영향들이 여러 가지 시험 조건에서 고찰되었다.

전기수력학적 미립화의 액체 분산 모드들은 액막의 표면에서 전기력 작용과 노즐을 통과하는 액체 분류의 운동에너지에 관련되어 있다. 공급 전원의 전기력의 세기 및 액체 유량에 따라 microdripping 모드, dripping 모드, spindle 모드, varicose 모드, kink 모드, 및 simple jet 모드 등 여러 가지 개괄적 분무 모드가 발생된다[5].

Fig. 4는 노즐 내경 0.34㎜, 유량 2.5㎖/min에 대해, 인가 전압이 2kV, 3kV, 4kV 조건에서 각각 100Hz부터 600Hz까지 인가 전원의 주파수 변화에 따른 액주 분열 현상의 가시화를 보여준다.

인가 전압 2kV 조건의 경우, 200Hz까지 노즐 외경 보다 상대적으로 큰 액적이 중력과 표면장력에 의해 노즐 끝에 매달리거나 떨어지며 300Hz 영역에서 spindle 모드가 나타나고 400Hz 영역에서는 varicose 모드가 발생하며 간헐적으로 microdripping 모드가 생성되었다. 500Hz 영역에서는 분류의 미세 분열이 발생되었으며 불규칙적으로 kink 모드가 나타났다. 600Hz 이상에서는 다시 dripping 모드가 형성되었음을 보였다.

인가 전압 3kV 조건의 경우, varicose 모드가 2kV 경우 때 보다 낮은 주파수 영역(300Hz 대역)에서 형성되었으며 500Hz 영역에서 spindle 모드가 발생되었다.

인가 전압 4kV 조건의 경우, 초기 100Hz 영역에서 전형적인 spindle 모드가 형성되었고 300Hz 영역에서도 일반적인 varicose 모드가 발생되었다.

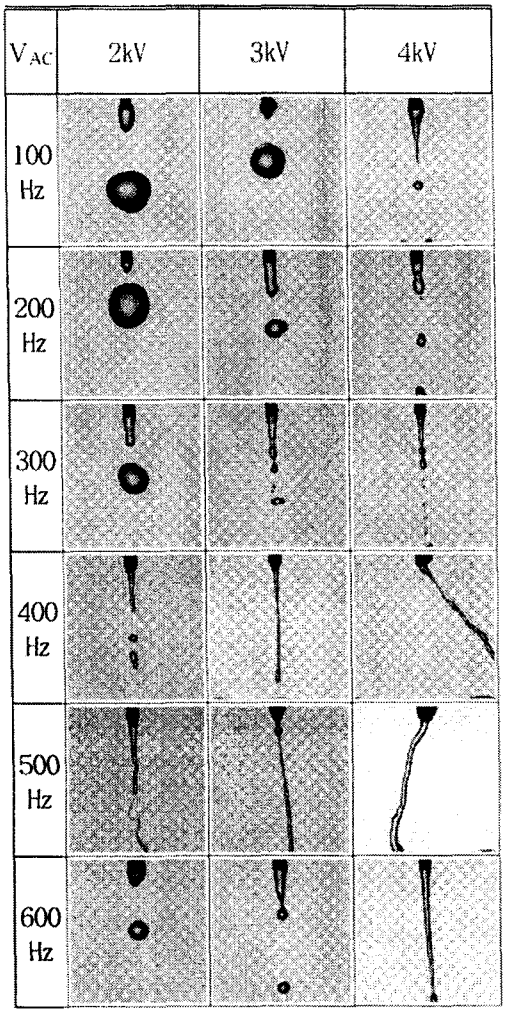

Fig. 4 Effect of AC frequency on breakup process (2.5㎖/min flow rate, 0.34㎜ nozzle)

400Hz 영역에서는 corona 방전 현상이 발생하여 액주가 큰 폭의 각도를 가지고 임의 방향으로 방출되었으며 500Hz까지 corona 방전 현상이 유지되다가 600Hz 이상에서는 corona 방전 현상은 없어지고 varicose 모드가 다시 나타났다. corona 방전 현상 동안에는 방전음이 발생되고 백열광이 관측되었다.

Fig. 5는 노즐 내경 0.34㎜와 유량 1.8㎖/min 조건에서, 공급 교류 고전압과 주파수의 변화에 따른 액주의 분열 영역을 보여준다.

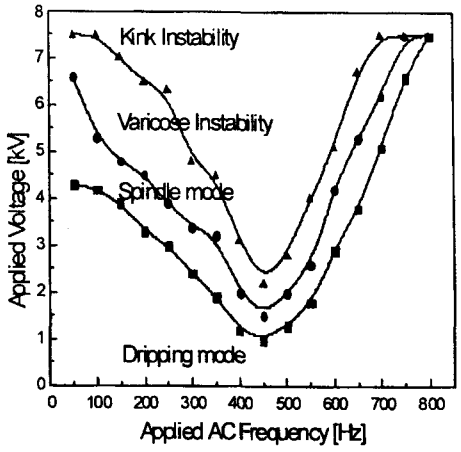

Fig. 5 Map of occurrence of disintegration region (1.8㎖/min flow rate, 0.34㎜ nozzle)

작업 유체로 물을 사용한 경우, Spindle 모드 영역은 노즐 외경에 비해 상대적으로 작고 균일한 액적을 얻을 수 있는 영역으로 공급 전원 주파수가 약 450Hz 대역에서 낮은 전압에서도 빨리 도달한다.

공급 전원 주파수가 약 450Hz 근처에서 dripping 모드에서 spindle 모드로 변환되는 시점이 다른 주파수에 비해 공급 전원의 전압이 낮다. 50Hz 경우와 비교하면 약 23%의 공급 전압으로 동일한 액주 분열의 미립화 효과를 얻을 수 있다.

Varicose wave (정맥류형 파동) 모드와 kink wave (꼬이는 형태의 파동) 모드도 주파수가 450Hz까지 증가하면서 발생 시점이 저전압으로 이동하는데 이러한 현상은 유속의 증가에 따라 액주의 길이도 따라서 증가하게 된다. 이러한 시점에서 교란이 주어지면 하류로 진행하면서 축대칭 형태의 varicose wave가 발생하고, 이 파동의 성장으로 인하여 액주가 끊어지게 되고 그 끝 부분에서 액적이 형성된다. 유속이 더욱 상승하면 액주는 kink wave가 발생하여 이 파동의 진폭이 커짐에 따라 액주는 액적으로 분열된다. 공급된 전원의 주파수가 450 Hz를 정점으로 주파수 상승에 따른 모드 변환 시점이 점차적으로 고전압으로 이동하는데, 이러한 이유는 명확하지 않으며 향후 조사 해볼 만한 흥미로운 연구분야이다.

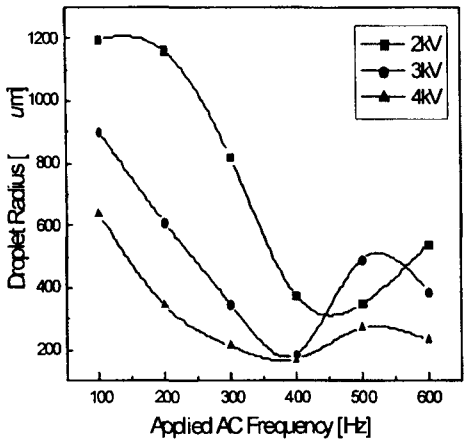

Fig. 6 Mean droplet radius as a function of applied AC frequency for different voltages

Fig. 6은 노즐 내경 0.34㎜, 유량 2.5㎖/min, 및 공급 전압 2kV, 3kV, 4kV 조건에서, 주파수와 액적 반경과의 관계를 보여준다.

주파수 350Hz~450Hz 영역에서 액적의 크기가 가장 작아지는 현상을 보인다. 50Hz~400Hz까지는, 동일한 주파수 영역에서 전압이 높을수록 액적의 크기가 작아지는 경향을 보인다. 400Hz 이상부터는 전압의 세기와 액적의 크기 관계가 일정한 패턴을 갖지 않는 경향을 보였다. 이러한 결과는 공급 전원의 주파수와 전압과의 관계를 보여준 Fig. 4 및 Fig. 5의 결과와 밀접한 관련이 있다.

교류 전기장의 주파수가 액적 크기에 미치는 영향은, 액주의 분열과정 동안 질량 보전의 법칙 및 운동량 보전에 기초를 두어 다음과 같은 방정식을 유도할 수 있다.[1]

액적이 떨어지는 순간, 표면 파장의 진폭은 분류의 반경과 같다라고 가정하고, 또한 원주방향 분류의 단면적은 동일 체적의 하나의 구형 액적으로 표현할 수 있다고 가정하면, 질량 보전의 법칙을 사용하여

$$\pi r_j^2 v_j \rho = \frac{4}{3s} \pi v_d r^3 \rho \qquad (1)$$

여기서 r_j는 분류 반경, v_j는 분류 속도, ρ는 액체 밀도, s는 이탈, v_d는 액적 속도, r는 액적 반경이다.

$$r=\left(\frac{3r_j^2 v_j s}{4 v_d}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

식(2)는 발생된 액적의 반경은 분류 속도와 액적 속도의 함수로 표현된다. 매초 분류의 분열에 의해 액적들이 형성된다고 가정하면, 이탈 $s=v_d/f_{AC}$로 대체 할 수 있다. 여기서 f_{AC}는 공급된 전원의 주파수이다. 따라서

$$r=\left(\frac{3r_j^2 v_j}{4 f_{AC}}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

식(3)은 액적 반경과 표면 파장의 진동을 유발하는 주파수와의 관계를 표시한다.

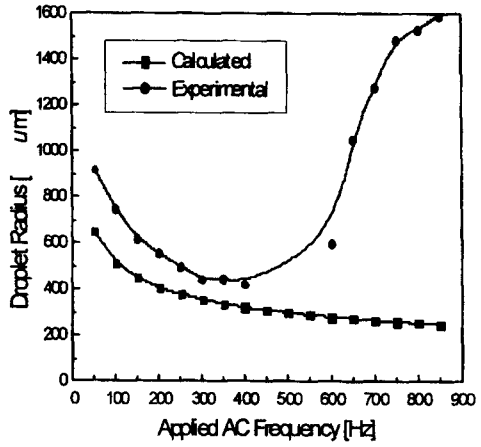

Fig. 7 Relationship between AC frequency and droplet radius (3.4㎖/min flow rate, 0.60㎜ nozzle, 4kV applied voltage)

Fig. 7은 노즐 내경 0.60㎜, 교류 전원 4kV, 유량 3.4㎖/min 조건에서, 공급 전원의 주파수가 50Hz부터 850Hz까지 50Hz 단위로 변화할 때 발생된 액적의 크기를 실험과 계산을 통하여 구한 결과를 비교하였다.

50Hz~400Hz 구간에서 실험 결과와 계산 결과를 정량적 평가 관점에서 살펴보면 일정한 오차를 보이나, 정성적 측면에서는 주파수 증가에 따른 액적 크기가 감소하는 경향은 일치한다.

200Hz부터 액주의 분열 현상은 dripping에서 spindle 모드로 변환되고, 250Hz부터 varicose 모드를 보이며 300Hz 영역에서는 cone-jet 모드로 분열하였다. 400Hz 이상 영역에서는 corona 방전 현상이 발생되어 액주의 분출 방향이 불규칙하게 크게 변화되지만, 550Hz부터는 corona 방전 현상이 사라지고 varicose 모드로 분열되는 현상을 보였다.

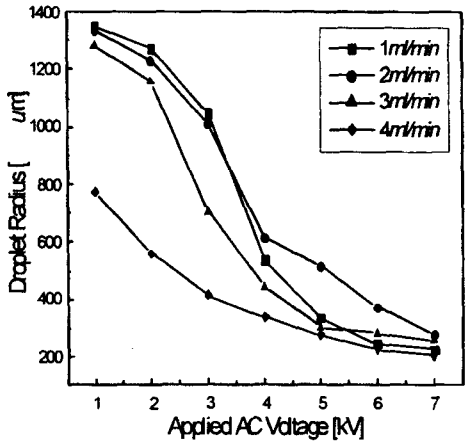

Fig. 8 Droplet radius in relation to applied AC voltage (0.34㎜ nozzle, 50Hz frequency)

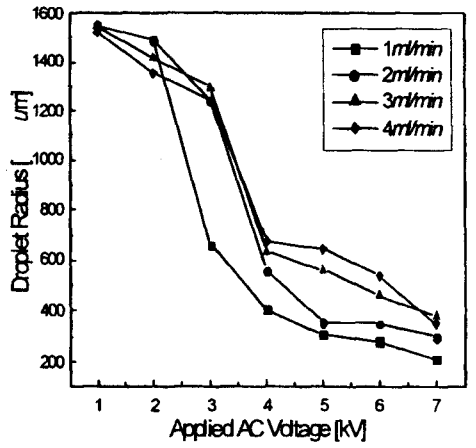

Fig. 9 Droplet radius in relation to applied AC voltage (0.60㎜ nozzle, 50Hz frequency)

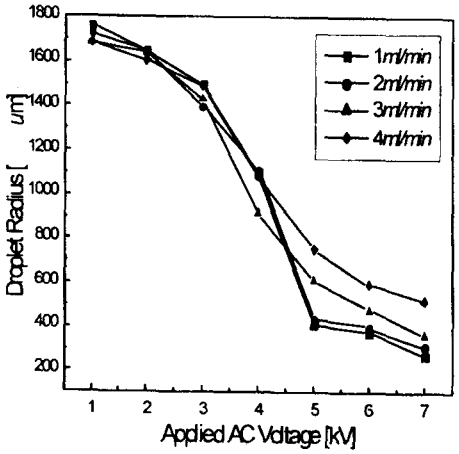

Fig. 10 Droplet radius in relation to applied AC voltage (0.84㎜ nozzle, 50Hz frequency)

Fig. 8, Fig. 9, 및 Fig. 10은 각각 노즐 내경 0.34㎜, 0.60㎜, 및 0.84㎜에 대해 유량 1㎖/min, 2㎖/min, 3㎖/min, 및 4㎖/min 조건에서, 공급 전압의 변화에 따른 액적 평균 반경의 실험적 분포를 보여준다. 일반적인 경향은 인가 전압이 증가할수록 액주의 길이는 증가되지만 액적의 평균 반경은 감소한다.

액적 크기 변화율이 급감하는 영역은 dripping 모드에서 spindle 모드로 액주 분열 현상이 발생하는 시점으로, 인가 전원의 전압 범위가 0.34㎜ 노즐 내경에서는 2kV~4kV 영역에서, 0.60㎜ 노즐 내경에서는 3kV~4kV 영역으로, 0.84㎜ 노즐 내경에서는 4kV~5kV 영역으로 천이 됨을 보여준다.

인가 전압 5kV~6kV 영역에서는 공급 전원의 매 사이클 변화에 동기해서 액적의 크기가 어느정도 균일한 직경으로 발생되는데 이러한 영역을 synchronous region(동기 영역)이라 불린다.[11] synchronous region을 넘어서면 (6kV 이상), 액주의 분열은 매우 불규칙하고 큰 폭의 각도로 액적이 불규칙하게 방출되며, 미세 분열의 횟수가 증가되는 것이 관찰된다.

0.60㎜, 0.84㎜ 노즐 내경의 실험에 대해, synchronous region 영역에서 동작중일 때 작업 유체의 유량 증가는 액적 크기를 증가시키는 결과를 명확하게 보여준다.

4. 결론

노즐 내경, 액체유량 및 공급 전원의 전압 및 주파수와 같은 실험적 인자가 전기수력학적 미립화 기구 장치의 액체 분산 현상에 미치는 영향을 살펴보았으며 작업 유체 시료로써 증류수가 사용되었다. 전기수력학적 미립화 시험 기구 장치를 제작하여 액주 분열 현상의 가시화를 획득하였으며, 영상 처리를 통한 실험적 해석 기법으로 액적에 관련된 자료를 산출하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 노즐 내경 0.34㎜, 유량 2.5㎖/min, 및 공급 교류 전압 2kV, 3kV, 4kV 조건에서, 주파수 가변에 따른 액적 크기의 변화된 결과로부터, 주파수 350Hz~450Hz 영역에서 액적의 크기가 공급 전압 각각에서 가장 작아지는 현상을 보였다. 50Hz~400Hz까지는, 동일한 주파수 영역에서 전압이 높을수록 액적의 크기가 작아지는 경향을 보였고, 400Hz 이상부터는 전압의 세기와 액적의 크기 관계가 일정한 패턴을 갖지 않는 경향을 보였다.

(2) 노즐 내경 0.34㎜와 유량 1.8㎖/min 조건에서, 공급 교류 전압과 주파수의 변화에 따른 액주의 분열 영역 맵으로부터, 약 450Hz 주파수 대역 근처에서 dripping 모드에서 spindle 모드로 변환되는 시점이 다른 주파수에 비해 공급 전원의 전압이 낮게 나타났다. Varicose wave (정맥류형 파동) 모드와 kink wave (꼬이는 형태의 파동) 모드도 주파수가 450Hz까지 증가하면서 발생 시점이 저전압으로 이동하지만, 이 주파수 대역을 정점으로 주파수 상승에 따른 모드 변환시점이 점차적으로 고전압으로 이동하는 경향을 보였다.

(3) 노즐 내경 0.34㎜, 0.60㎜, 및 0.84㎜에 대해 유량 1㎖/min~4㎖/min 조건에서, 공급 전압의 변화에 따른 액적 평균 반경의 실험적 분포 결과로부터, 액적 크기 변화율이 급감하는 영역에서 dripping 모드에서 spindle 모드로 천이 되는 현상을 보였고, 인가 전압 5kV~6kV 영역에서는 synchronous region(동기 영역)이

발생되었다. 인가 전압 6kV 이상에서는 액주의 분열은 매우 불규칙하고 큰 폭의 각도로 액적이 불규칙하게 방출되며, 미세 분열의 횟수가 증가되는 것이 관찰되었다.

후기

이 논문은 2003년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며, 연구를 지원해주신 관계기관에 감사 드립니다(KRF-2003-042-D20025).

참고문헌

1. Z. A. Huneiti, "Electrohydrodynamic atomisation of conducting liquid using an AC field superimposed on a DC field", Thesis of Doctor of Philosophy, Brunnel University, London, 2000.
2. 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.
3. A. Jaworek, and A. Krupa, "Classification of the modes of EHD spraying", J. Aerosol Sci., Vol. 30, No. 7, pp 873-893, 1999.
4. W. Balachandran, and P. Miao, "Electrohydrodynamic atomisation: questions and challenges", Conf. of ILASS-Asia 99, pp. 183-198, 1999.
5. 김명찬, 이상용, "전기수력학적 미립화에서 접지전극의 형상이 액적 형성에 미치는 영향", 한국액체미립화학회 2000년도 학술강연회 논문집, pp. 121-127, 2000.
6. G. N. Laryen, T. G. Kang and S. Y. No, "Spray characteristics of electrostatic pressure-swirl nozzle", Proc. of ILASS-Asia 2001, pp. 223-228, 2001.
7. K. Tang, and A. Gomez, "Generation by electrospray of monodisperse water droplets for targeted drug delivery by inhalation", J. Aerosol Sci., Vol. 25, pp. 1237-1250, 1994.
8. W. Balachandran, W. Machowski, and C. N. Ahmad, "Electrostatic atomisation of conducting liquids using AC superimposed on DC fields", IEEE Trans, Ind. Apps., Vol. 30, No. 4, pp. 850-855, 1994.
9. B, Vonnegut, and R. Neubauer, "Production of monodisperse liquid particles by electrostatic atomisation", J. Colloid Sci., Vol. 7, pp. 616-622, 1952.
10. 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.
11. 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.
12. 성기안, 이창식, "전기수력학적 미립화에서 액적 형성에 영향을 미치는 인자에 관한 실험적 연구", 한국액체미립화학회지, 제8권, 제2호, pp.24-30, 2003.