

비전도성 액체의 전기수력학적 분무에 관한 실험적 연구

이기준* · 박종승† · 이상용**

An Experimental Study on Electrohydrodynamic Atomization of Non-Conducting Liquid

Ki Joon Lee, Jong Seung Park and Sang Yong Lee

Key Words : Electrohydrodynamic atomization(전기수력학적 분무), Non-conducting liquid(비전도성 액체), Charge injection(전하주입), Electric field strength(전기장강도)

Abstract

In the present work, a series of experiments have been performed on electro-hydrodynamic atomization of non-conducting liquid using a charge injection type nozzle. Effects of liquid flow rate, input voltage, and distance between the needle and the ground electrode (nozzle-embedded metal plate) have been examined. For fixed electrode distances, total and spray currents increase with increase of liquid flow rate and input voltage. When the distance between the needle and the ground electrode becomes closer, total, leakage and spray current increase, but the onset voltage for dielectric breakdown decreases. When the electric field strength of the liquid jet exceeds that for the air breakdown, a portion of the electric charges in the liquid jet is dissipated into the ambient air, and the charge density shows a limiting value. Atomization quality can be improved by increasing the flow rate because the higher charge density is achieved with the larger liquid velocity in addition to the enhanced aerodynamic effect.

기호설명

d	: 노즐 직경	[m]	ϵ_0	: 진공 유전율	[C ² /Nm ²]
E	: 전기장	[V/m]	ϵ_r	: 비유전율	[-]
g	: 전기 전도도	[S/m]	ϕ	: 전위	[V]
h	: 전극간격	[m]	μ	: 점도	[N s/m ²]
I	: 전류	[A]	ρ	: 밀도	[kg/m ³]
r	: 노즐 반경방향	[m]	ρ_c	: 비전하량	[C/m ³]
z	: 노즐 축방향	[m]	σ	: 표면 장력	[N/m]
U	: 공급 전압	[V]	σ_Ω	: 전기 저항	[Ω m]
SMD	: Sauter 평균 직경	[m]			
Re	: Reynolds 수	[-]			
Z	: Ohnesorge 수	[-]			

1. 서론

환경오염이 사회적 문제로 부각되고 있는 요즘, 특히 연소 시스템에 대한 개선이 크게 요구되고 있다. 이는 연소 시스템의 주요 구성 요소인 노즐을 개선함으로써 이루어 질 수 있으며, 이러한 방법의 한 가지로 전기수력학적 분무가 고려되고 있다. 그러나, 전기수력학적 분무에 관한 기존 연구

† 한국과학기술원 기계공학과

* 현대자동차

** 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : sangyonglee@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3026 FAX : (042)869-8207

는 대부분 전도성 액체에 한정되었다. 이는 비전도성 액체에 전하의 운반 매체 역할을 하는 이온(ion)이 희박하고, 전기 저항이 커서 쉽게 전하를 공급할 수 없기 때문이다. 이러한 이유로 대전된 연료 액적(비전도성)의 연소 시 질소산화물이나 미연탄화 물질의 저감 가능성에도 불구하고^(1, 2), 이의 전기수력학적 분무에 관한 연구는 미미한 실정이다.

Kim 과 Turnbull⁽³⁾은 유리 재질의 모세관에 삽입된 끝이 뾰족한 텅스텐 전극에 고전압을 가하여 강한 전기장을 형성하고, 유체에 전하를 공급하는 전하 주입법(charge injection)을 사용하여 R-113 을 미립화하였다. Kelly^(4, 5)와 Shrimpton 등⁽⁶⁻⁸⁾은 전하 주입 방식을 확장한 spray triode nozzle 로 기존 연구의 유량 한계 문제점을 개선하였다. 그러나, 액주로부터 접지 전극 역할을 하는 금속 노즐 몸체로 방전이 일어나 액주에 실을 수 있는 전하량 값에 한계가 있었다. 즉, 모세관을 사용하는 비전도성 액체의 정전분무는 유량이 적기 때문에 실제 응용에 부적합한 측면이 있고, 유량을 늘린 금속 노즐에서는 구조상의 특징으로 액주와 금속 사이에서 노즐 내부 및 외부의 절연 붕괴(channel and partial breakdown)가 일어나 액주에 전하를 공급하는데 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 실제 응용 가능한 유량 범위에서 금속 노즐의 방전 문제점을 해결하고자 개량된 비금속 노즐을 제작하였다. 이를 이용하여 액주가 가질 수 있는 최대 비전하량 값의 변화를 알아보고, 노즐로부터 분사되는 비전도성 액체의 전기수력학적 분무 특성을 살펴보고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1 은 실험 장치 구성도이다. 실험 장치는 크게 전원 공급부, 유체 공급부, 입경 및 전류 측정 부분으로 이루어져 있다. 전원 공급부(power supply)는 노즐에 삽입된 전극 침과 접지 전극 사이에 최대 직류(DC) 50kV 까지 전압차를 줄 수 있고, 허용되는 최대 전류는 5mA 이다. 유체는 공기압으로 연료 저장조(fuel reservoir)에서 6 기압까지 가압 되고, 유량 조절을 위해서 미터링 밸브(metering valve)를 설치하였다. 유량은 면적식 유량계(rotameter, 0.12 l/min)를 사용하여 측정하였고, 실험 전에 보정(calibration) 작업을 시행하였다. 유체에 실려 나오는 분무 전류(spray current)는 Faraday cage 를 통해 직접 미소전류계(HP 3458A)로 측정하였다. 고전압 시 발생할 수 있는 스파크

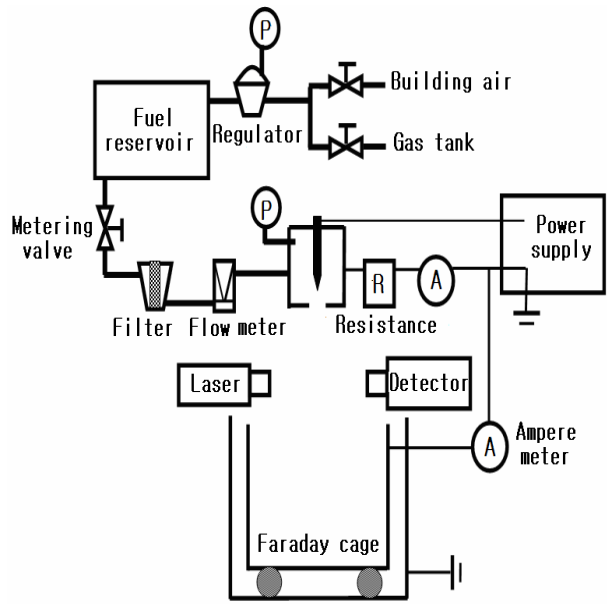


Fig. 1 Experimental setup

Table 1 Properties of diesel oil at 20°C

Property	Value
Density	$8.4 \times 10^2 \pm 1\% [\text{kg/m}^3]$
Absolute viscosity	$3.8 \pm 3\% [\text{mPa s}]$
Surface tension	$2.4 \times 10^{-2} \pm 5\% [\text{N/m}]$
Electric conductivity	$1.6 \times 10^{-10} \pm 10\% [\text{S/m}]$

(spark)로부터 전류계를 보호하기 위하여 $1\text{M}\Omega$ 크기의 저항을 설치해 노즐 내부에서 접지 전극으로 빠져 나가는 손실 전류(leakage current)를 측정하였다. 입경(drop size)은 레이저 회절 이론을 이용한 입경 측정 장치(HELOS VARIO, Sympatec)로 측정하였다. 입경은 액주로부터 떨어져 나온 액사가 완전히 액적으로 분열된(first breakup) 이후인 노즐 하단 100mm 위치에서 레이저 광이 분무 중심을 통과하도록 하여 측정하였다.

실험 유체는 비전도성 액체인 경유를 사용하였고, 경유의 물성치는 Table 1 과 같다.

Fig. 2 는 실험에 사용한 노즐의 개략도이다. 노즐은 기존 금속 노즐이 가지는 문제점인 노즐 내부 및 외부의 절연 붕괴를 막을 수 있도록 절연 물질인 엔지니어링 플라스틱으로 제작하였고, 노즐 상부에서 전극 침을 결합하는 구조이다. 노즐 하단부에는 금속판(copper plate)을 삽입하여 접지 전극으로 이용하였다. 노즐 출구 직경은 $450\mu\text{m}$ 이다. 실험에 사용한 전극 침의 재료는 스테인레스 스틸(stainless steel)이고, 강한 전기장을 걸어주기 위해서 침 끝 곡률 반경이 $35\mu\text{m}$ 인 바늘을 사용하였다.

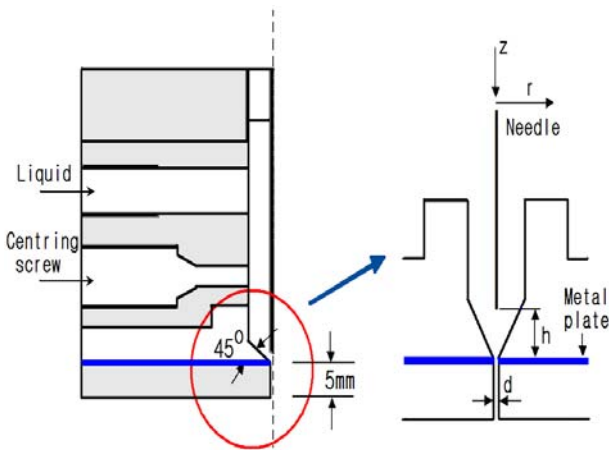


Fig. 2 View of nozzle

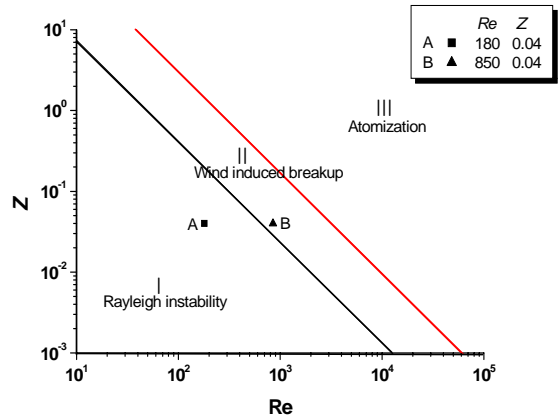


Fig. 3 Mode map of liquid-column disintegration (Ohnesorge(1936))⁽¹⁰⁾

3. 실험 결과 및 해석

3.1 분열 가시화

비전도성 액체(경유)의 전기수력학적 분무 특성을 살펴보기 위해서 공급 유량과 공급 전압에 따른 액주의 분열 특성을 가시화를 통해 살펴보았다. 전기장을 가하지 않은 경우 액주가 분열될 때 분사 액체의 물성치와 유속, 그리고 노즐 직경으로부터 Z (Ohnesorge 수)와 Re (Reynolds 수)를 알면 액주의 분열 현상을 예측할 수 있다.⁽⁹⁾ Ohnesorge 는 액주의 분열 현상을 Fig. 3에 나타낸 영역 I, II, III의 세 개의 형태로 구분하였다.

영역 I 는 액주에 축대칭 형태의 정맥류형 파동(varicose wave)이 성장하여 액적이 생성되는 Rayleigh 불안정 현상이 미립화를 지배하는 영역이다. 영역 II 는 액주의 축을 중심으로 비대칭 형태의 사인곡선형 파동(sinuous wave)이나 꼬이는 형태의 파동(twisting wave)이 발생하여 액주가 액적으로 분열되는 기체 유동에 의한 분열 영역(wind induced breakup)이다. 영역 III 에서는 액체 분사 속도가 아주 커지게 되어 노즐 출구 가까운 곳에서부터 액주가 미세 분열 된다.⁽¹⁰⁾

Fig. 4 는 유량 0.29ml/s 일 때 액주 분열의 가시화 사진이다. Re 가 180, Z 가 0.04 로(Fig. 3에서 A 점) Rayleigh 불안정 현상이 미립화를 지배하는 영역이다. 수력학적으로만 분열이 일어날 때 (Fig. 4(a))의 분열 길이는 약 61mm 이다. Fig. 4의 (b), (c)를 보면 공급 전압이 증가함에 따라 정맥류형 파동(varicose wave)이 일찍 성장하면서 분열 길이가 줄어들음을 알 수 있다. 이는 공급 전압이 증가함에 따라 액주에 실리는 전하들이 액주의 안정을 유지하려는 표면장력에 반대하여 액주에 초기 교란을 가중시키기 때문이다.

Fig. 5 는 유량 1.36ml/s 일 때 액주 분열의 가시

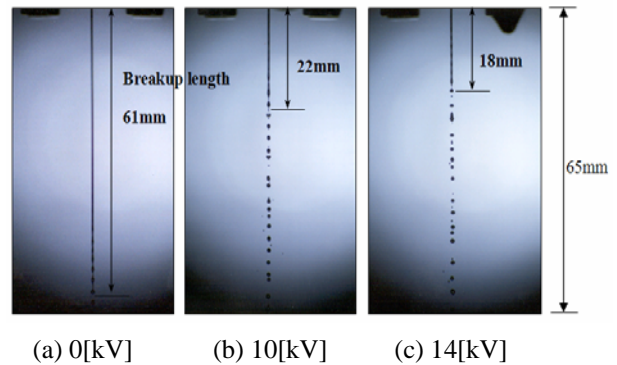


Fig. 4 Breakup of liquid column ($Q=0.29\text{ml/s}$)

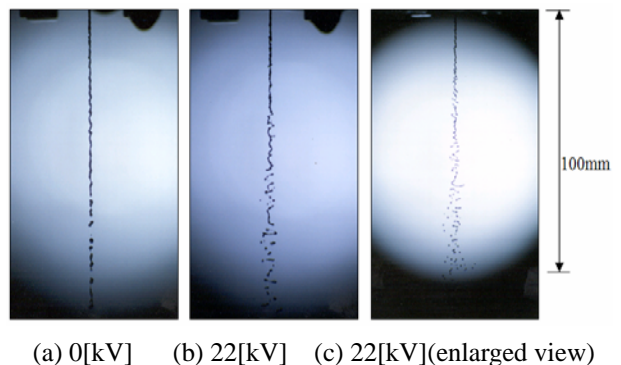


Fig. 5 Breakup of liquid column ($Q=1.36\text{ml/s}$)

화 사진으로 Re 가 850, Z 가 0.04 로(Fig. 3에서 B 점) 분열 영역 구분상 기체 유동에 의한 분열 영역에 해당한다. 공급 전압이 증가함에 따라 사인파형의 불안정성이 성장하여 액주로부터 액사가 떨어져 나오고, 액사로부터 액적들이 재 분열되는 모습을 볼 수 있다. 크기가 작은 액적들은 큰 액적들에 비해 질량이 작은 반면, 비전하량(charge density)이 크기 때문에 분무 외곽으로 쉽게 밀려나 분무각이 증가한다. 노즐 축 중심에는 노즐 직경 크기에 해당하는 액적들이 존재한다.

3.2 전류 측정

노즐에서 분사되는 액주가 갖는 최대 비전하량 값을 알아보기 위해서 공급 유량과 공급 전압이 전하 생성과 분무 전류에 미치는 영향을 살펴보았다. 전극 침에서 생성된 전하 중 액체에 실려 노즐 출구 밖으로 빠져 나오는 단위 시간 당 전하량이 분무 전류(spray current)이고, 노즐 내부에 삽입되어 있는 접지 전극으로 직접 빠져나가는 전류가 손실 전류(leakage current)이다. 분무 전류와 손실 전류의 합이 전체 전류(total current)이고, 분무 전류를 공급 유량으로 나눈 값이 비전하량이 된다.

Fig. 6 에 나타난 전체 전류의 경우에는 유량을 일정하게 유지하면서 공급 전압을 증가시키면 전극 침 끝의 전기장 강도가 증가하여 전극 침 부근에서 전계 방출(field emission)에 의해 생성되는 전하가 많아지기에 때문에 전체 전류가 증가한다. 또한, 일정 공급 전압 조건 하에서도 유량이 증가함에 따라 생성된 전하가 빠르게 전극 침에서 멀어져 전극 침 끝에서 강한 전기장을 유지할 수 있기 때문에 유량이 적을 때 보다 생성되는 전류가 증가한다.

Fig. 7 에서 분무 전류를 살펴보면 유량이 적을 때($Q=0.29, 0.61\text{ml/s}$)는 전극 침에서 생성되는 전체 전류가 작고 노즐 축 방향 속도 성분도 작아서 생성된 전하의 대부분이 접지 전극을 통해 빠져나가기 때문에 분무 전류도 작다. 유량이 많을 때($Q=1.36\text{ml/s}$)는 전극 침 끝에서 생성되는 전체 전류가 많고, 축 방향 속도 성분도 커서 접지 전극 하류로 이동하는 생성 전하의 비율이 증가하기 때문에 분무 전류가 크다.

전극 침과 접지 전극 사이의 거리에 따른 하전 양상과 최적의 전극 간격을 알아보기 위해 전극 간격을 노즐 직경의 두 배($2d$), 한배 반($1.5d$), 한배($1d$) 등 세 가지 경우로 실험하였다. Fig. 8 은 유

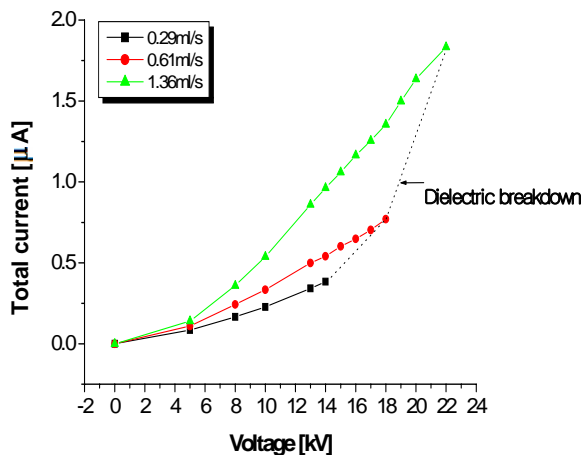


Fig. 6 Variation of total current with voltage and liquid flow rate (Electrode distance: $2d$)

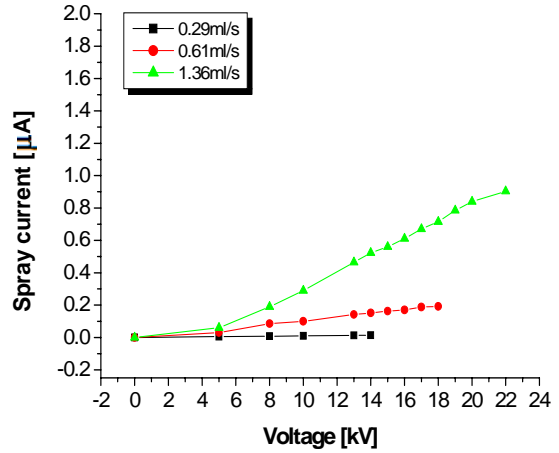


Fig. 7 Variation of spray current with voltage and liquid flow rate (Electrode distance: $2d$)

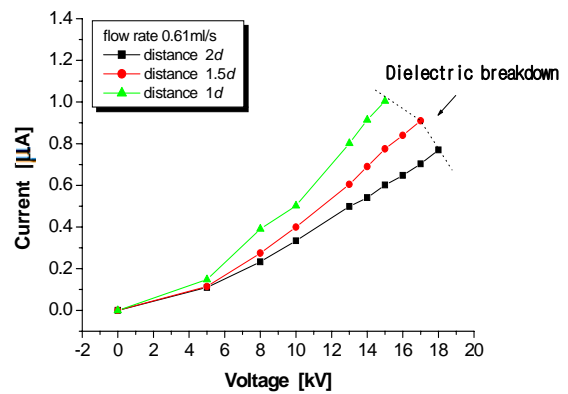


Fig. 8 Effect of electrode distance on total current ($Q=0.61\text{ml/s}$)

량이 0.61ml/s 일 때 전극 간격에 따른 전체 전류의 변화를 보여 준다. 전극 간격이 줄어들면, 공급 전압이 동일하더라도 전극 침과 접지 전극 사이의 거리가 가까워지기 때문에 전극 침 근처의 전기장이 강해진다. 또한 전극 간격이 가까워짐에 따라 전극 침 끝에서의 액체의 유속도 빨라진다. 따라서, 전극 간격이 줄어들면 유속이 증가하여 생성 전하가 빨리 하류로 이동하는 효과에 전기장이 강해지는 효과가 더해져서, 전극 침에서 전체 전류가 증가하게 된다. Fig. 9 를 보면, 전극 간격이 짧을수록 전체 전류는 증가하지만 손실 전류가 함께 증가하기 때문에 분무 전류는 크게 증가하지 않는다.

전극 간격이 노즐 직경과 같은 조건에서 유량을 증가시켜 가면서 액주에 공급할 수 있는 최대 비전하량 값을 살펴보았다. Fig. 10 을 보면, 유량에 따라 최대 비전하량 값에 약간 차이는 있지만 비전하량 값이 약 $0.7\text{-}0.75\text{[C/m}^3\text{]}$ 정도 값에 도달하면

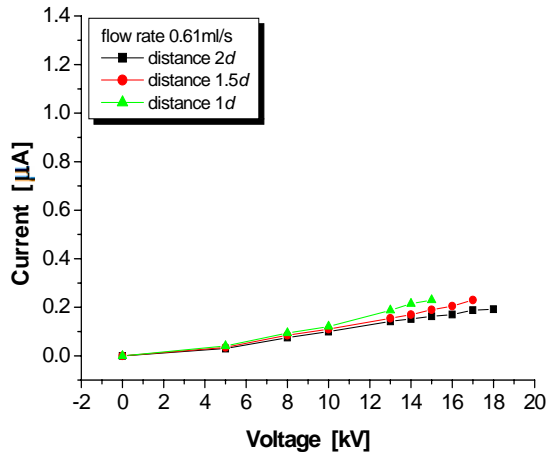


Fig. 9 Effect of electrode distance on spray current ($Q=0.61\text{ml/s}$)

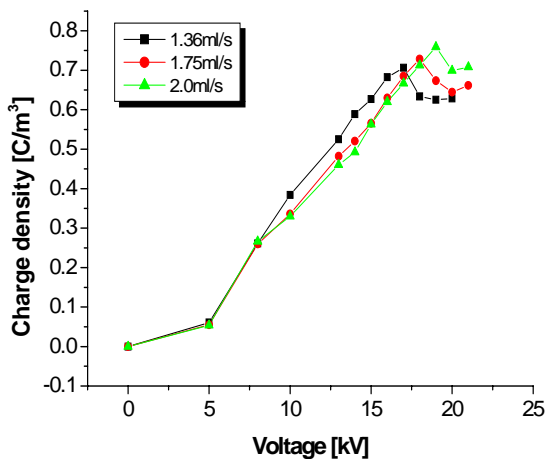


Fig. 10 Limitation of charge density

더 이상의 증가가 없음을 알 수 있다. 액주에 전하가 균일하게 분포 한다고 가정할 때 액주 표면에서의 전기장 강도는 다음과 같이 구할 수 있다. 즉, 매질에 전하가 분포할 때 전압(potential)과 전기장(electric field)은 Poisson's equation 식(1)로 구한다.

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho_c}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (1)$$

액주 내의 전하 분포를 z 방향과 θ 방향으로 변화가 없는 1 차원 문제로 가정할 때 양변을 적분하면,

$$-E_r = \frac{\partial \phi}{\partial r} = -\frac{\rho_c r}{2\epsilon_0 \epsilon_r} + \frac{C_1}{r} \quad (2)$$

이 되고, $r=0$ 에서 $E_r=0$ 경계조건을 적용하면 $C_1=0$ 이므로

$$\therefore E_r = \frac{\rho_c r}{2\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (3)$$

이 된다.

최대 비전하량 값($0.7\text{-}0.75[\text{C}/\text{m}^3]$)에 해당하는 조건에서 액주 표면에서의 전기장 강도를 구하면 약 $4[\text{MV}/\text{m}]$ 로 공기의 절연 강도인 $3[\text{MV}/\text{m}]$ (for parallel plate⁽¹¹⁾)보다 크다. 따라서 액주에 실린 전하량 값이 일정치 이상($0.7\text{C}/\text{m}^3$)이 되면, 즉 액주 표면의 전기장 강도가 주위 공기의 절연 강도를 초과하면 대기로 일부분의 전하가 빠져나가기 때문에 분무 전류 값이 떨어지면서 비전하량 값이 한정되는 것이다. 이렇게 전하가 액주로 공급되지 않고 빠져나가는 현상 즉 절연 붕괴 현상에는 크게 세 가지 경우가 있다. 과도한 전기장으로 인해 전극 침에서 노즐 내부 벽면으로 방전이 일어나는 경우(channel breakdown)와 노즐 출구에서 액주 표면의 전하가 노즐 표면으로 방전이 일어나는 경우(partial breakdown), 그리고 또 노즐 외부에서 절연 붕괴로 인해 주위의 공기로 전하가 모두 빠져나가는 경우가 있다. 여기서 노즐 내 외부는 플라스틱 재질이므로 절연 붕괴가 일어나지 않는다. 이로부터 노즐에서 주변 공기만으로 절연 붕괴가 일어남을 알 수 있다.

3.3 입경 측정

비전도성 액체의 전기수력학적 분무 특성을 살펴보기 위해서 공급 유량과 공급 전압에 따른 평균입경의 변화를 살펴보았다. Fig. 11 은 유량이 0.29ml/s , 0.61ml/s 및 1.36ml/s 일 때 공급 전압 조건에 따른 평균입경(SMD)의 변화를 보여주는 선도이다. 유량 $Q=0.29\text{ml/s}$ 일 때는 공급 전압이 증가함에 따라 액적들끼리 반발해서 서로 멀어지는 현상은 활발하게 일어나지만 평균 입경(약 $800\mu\text{m}$)

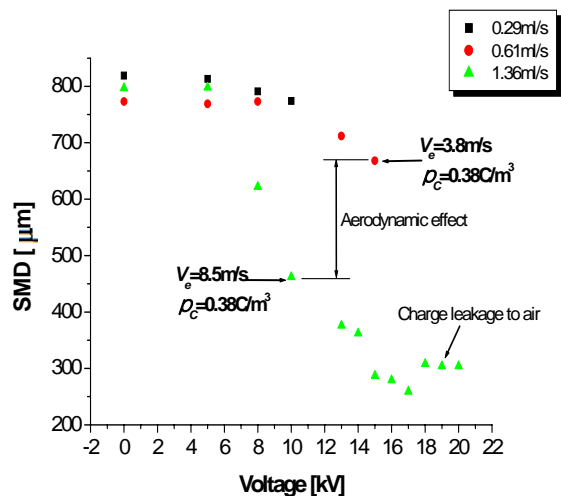


Fig. 11 SMD variation with voltage and liquid flow rate

은 크게 줄어들지 않는다. 이는 전극 침에서의 유속이 느릴 때는 공급 전압이 증가해도 액주에 실리는 전류 값이 작기 때문이다. 유량 $Q=0.61\text{ml/s}$ 일 때에는 평균입경은 공급 전압이 없을 때의 값인 $770\mu\text{m}$ 에서 공급 전압이 15kV 이면 $670\mu\text{m}$ 으로 줄어든다. 이 때의 비전하량 값은 0.38C/m^3 이다. 유량 $Q=1.36\text{ml/s}$ 일 때는 공급 전압이 증가함에 (17kV 까지) 따라 비전하량 값도 같이 증가하면서 평균입경이 $260\mu\text{m}$ 으로 크게 줄어든다. 그러나, 공급 전압이 18kV 이상이 되면 전하가 주위 대기로 빠져나가는 현상에 의해 분무 전류가 줄어들고 이에 따라 액적 크기(약 $300\mu\text{m}$)도 약간 증가한다.

유량 $Q=0.61\text{ml/s}$ ($Ve=3.8\text{m/s}$)일 때에는 평균입경은 공급전압이 없을 때의 값인 $770\mu\text{m}$ 에서 공급 전압이 15kV 이면 $670\mu\text{m}$ 으로 줄어든다. 이 때의 비전하량 값은 0.38C/m^3 이다. 동일 비전하량 값에 해당하는 조건으로 유량이 $Q=1.36\text{ml/s}$ ($Ve=8.5\text{m/s}$) 이고, 공급전압이 10kV 일 때의 평균입경을 비교해 보면, $460\mu\text{m}$ 으로 작게 나타난다. 이는 결국 평균입경은 비전하량 값 뿐만 아니라 액주 유속에 비례하는 공기역학적 효과(aerodynamic effect)의 영향도 받고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

기존 금속 노즐이 가지는 문제점인 노즐 내부 및 외부의 절연 붕괴(channel and partial breakdown)를 막을 수 있도록 절연 물질인 엔지니어링 플라스틱으로 노즐을 설계, 제작하였다. 이 노즐을 이용하여 비전도성 액체인 경유에 전하를 공급할 수 있는 전기수력학적 분무 실험 장치를 구성하여 공급 유량, 공급 전압, 전극간 거리를 변수로 하여 실험한 결과 다음의 결과들을 얻을 수 있었다.

(1) 고정된 전극 간격에서는 공급 전압과 공급 유량이 증가할수록 전극 침 끝에서 방출되는 전체 전류량과 액체에 실리는 분무 전류량이 이전의 금속 노즐보다 증가하였다.

(2) 전극 침과 접지 전극 사이의 거리가 가까워질수록 전체 전류, 손실 전류, 그리고, 분무 전류가 증가하지만, 액주 표면의 전기장 강도가 주위 매질의 절연 강도 이상이 되면 일정 부분의 전하가 대기로 빠져나가서, 액주에 실을 수 있는 비전하량 값에 한계가 있었다. 이것은 이전 금속 노즐의 비전하량 값과 거의 같은 값으로 한계 비전하량이 주위 매질의 영향을 많이 받는다고 할 수 있다.

(3) 평균 입경은 비전하량과 공기역학적 효과의 함수이며, 액체 유속이 증가할수록 액주에 실리는 전하량 값이 증가하고, 공기역학적 효과가 증대되

기 때문에 미립화 성능이 좋아진다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실 사업(2000-N-NL-01-022, KISTEP), 연소기술연구센터 사업(R11-2000-018303-02), 그리고 BK-21 의 일부 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Bellan, J. and Harstad, K., 1997, "Mechanical and Electrostatic Dispersion of a Polydisperse Cluster of Drops for Soot Control", Proceedings of ICLASS-97, pp. 617-624.
- (2) Ohkubo, T. and Kanazawa, S., 1994, "NO_x Removal by a Pipe with Nozzle-Plate Electrode Corona Discharge System", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 30, No. 4, pp. 856-861.
- (3) Kim, K. and Turnbull, R. J., 1976, "Generation of Charged Drops of Insulating Liquids by Electrostatic Spraying", J. Applied Physics, Vol. 47, No. 5, pp. 1964-1969.
- (4) Kelly, A. J., 1988, "Charge Injection Electrostatic Atomizer Performance Modeling", Proceedings of ICLASS-88, pp. 139-144.
- (5) Kelly, A. J., 1990, "Charge Injection Electrostatic Atomizer Modeling", Aerosol Science and Technology 12, pp. 526-537, Elsevier Science Publishing Co. Inc..
- (6) Shrimpton, J. S., Yule, A. J., Watkins, A. P., Balachandran, W. and Hu, D., 1995, "Electrostatically Atomized Hydrocarbon Sprays", J. Fuel, Vol. 74, No. 7, pp. 1094-1103.
- (7) Shrimpton, J. S., Yule, A. J. and Watkins A. P., 1997, "Performance Data of an Electrostatic Atomizer for Highly Resistive Liquids", Proceedings of ICLASS-97, pp. 625-632.
- (8) Shrimpton, J. S., Yule, A. J., 2001, "Atomization, Combustion, and Control of Charged Hydrocarbon Sprays", Atomization and Sprays, Vol. 11, pp. 365-396.
- (9) Bayvel, L. and Orzechowski, Z., 1993, Liquid Atomization, Taylor & Francis, pp. 67-68.
- (10) 이상용, 1996, 액체의 미립화, 대우학술총서 자연과학 107, 민음사.
- (11) Berger, L. I., 1999, "Dielectric Strength of Insulating Materials", Handbook of Chemistry and Physics 79th, 15-30.