

비전도성 액체의 전기수력학적 미립화를 위한 전하 주입 특성에 관한 실험적 연구

이기준* · 박종승** · 이상용†

(2004년 5월 7일 접수, 2004년 8월 25일 심사완료)

An Experimental Study on Charge Injection to Non-Conducting Liquid for Electrohydrodynamic Atomization

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 the increase of liquid flow rate and input voltage. When the distance between the needle tip and the ground electrode becomes closer, the total, leakage and spray currents increase, while the onset voltage for the 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 liquid flow rate due to the higher charge density and the enhanced aerodynamic effect.

기호설명

E	: 전기장	[V/m]	ϵ_0	: 진공 유전율	[C ² /Nm ²]
ϕ	: 전위	[V]	ϵ_r	: 비유전율	[-]
d	: 노즐 직경	[m]	ρ_c	: 비전하량	[C/m ³]
h	: 전극간격	[m]	V_e	: 노즐 출구 속도	[m/s]
r	: 노즐 반경방향	[m]	Q	: 체적 유량	[m ³ /s]
z	: 노즐 축방향	[m]			
SMD	: Sauter 평균 직경	[m]			
Re	: Reynolds 수 ($=\rho \cdot V_e \cdot d / \mu$)	[-]			
Z	: Ohnesorge 수 ($=\mu / \sqrt{\rho \cdot \sigma \cdot d}$)	[-]			
μ	: 점도	[N s/m ²]			
ρ	: 밀도	[kg/m ³]			

1. 서론

환경오염이 사회적 문제로 부각되고 있는 요즘, 특히 연소 시스템에 대한 개선이 크게 요구되고 있다. 이는 연소 시스템의 주요 구성 요소인 노즐을 개량함으로써 이루어 질 수 있으며, 그 방법의 한 가지로 전기수력학적 분무가 고려되고 있다. 그러나, 전기수력학적 분무에 관한 기존 연구는 대부분 전도성 액체에 한정되었다. 이는 비전도성 액체에 전하의 운반 매체 역할을 하는 이온(ion)이 희박하고, 전기 저항이 커서 쉽게 전하를 공급할

* 현대자동차 파워트레인 연구실

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : sangyonglee@kaist.ac.kr

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

수 없기 때문이다. 따라서 대전된 비전도성 연료 액적의 연소 시 질소산화물이나 미연탄화 물질의 저감 가능성에도 불구하고,^(1,2) 이의 전기수력학적 분무에 관한 연구는 미미한 실정이다.

Kim과 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-113을 미립화하였다. Kelly^(4,5)와 Shrimpton 등⁽⁶⁻⁸⁾은 전하 주입 방식을 확장한 트라이오드 정전기 대전 노즐(spray triode nozzle)로 기존 정전 분무 노즐의 유량 한계 문제점을 개선하였다. 그러나, 이 경우에도 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 노즐 내 액체와 노즐 내부 사이의 절연 붕괴(channel breakdown), 또는 액주와 노즐 외부 사이에서 절연 붕괴(partial breakdown)가 일어나 액주에 전하를 공급하는데 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 실제 응용 가능한 유량 범위에서 방전을 감소시키고자 비금속 노즐을 제작하였다. 이를 이용하여 액주에 실리는 최대 비전하량 값의 변화를 알아보고, 비전도성 액체의 전기수력학적 분무 특성도 살펴보고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1에 나타난 실험 장치는 크게 전원 공급부, 유체 공급부와 전류 및 입경 측정부분으로 이루어져 있다. 전원 공급부(power supply)는 노즐에 삽입된 전극 침과 접지 전극(metal plate) 사이에 최대 직류(DC) 50 kV까지 전압차를 줄 수 있고, 허용 최대 전류는 5 mA이다. 유체는 압축 공기로 연료 저장조(fuel reservoir)에서 6기압까지 가압되고, 유량 조절을 위해서 미터링 밸브(metering valve)를 설치하였다. 유량은 면적식 유량계(rotameter, 0.12 l/min)로 측정하였고, 실험 전에 보정(calibration) 작업을 시행하였다. 유체에 실려 나오는 분무 전류(spray current)는 페러데이 케이지(Faraday cage)를 통해서, 노즐 내부에서 접지 전극으로 빠져 나가는 손실 전류(leakage current)는 노즐 내부에 삽입된 접지 전극을 통해 직접 미소전류계(HP 3458A)로 측정하였다. 이 경우에는 고전압 시 발생할 수 있는 과전류로부터 전류계를 보호하기 위하여 1 MΩ 크기의 저항을 설치하였다. 입경(drop size)은 레이저 회절 이론에 근거한 입경 측정 장치(HELOS VARIO, Sympatec)로 측정하였다. 입경은 액주로부터

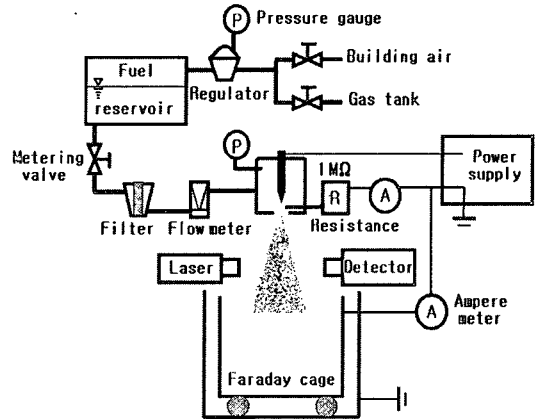


Fig. 1 Experimental setup

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	$3.8 \pm 3\% [\text{mPa} \cdot \text{s}]$
Surface tension	$2.4 \times 10^{-2} \pm 5\% [\text{N/m}]$
Electric conductivity	$1.6 \times 10^{-10} \pm 10\% [\text{S/m}]$

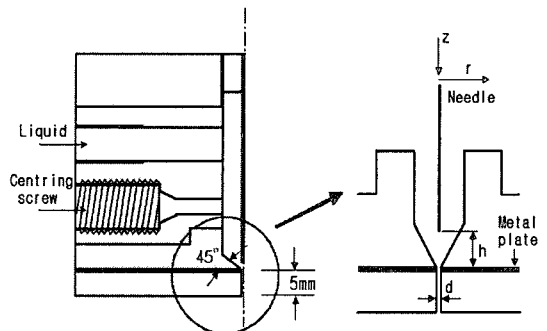


Fig. 2 View of nozzle ($d = 450 \mu\text{m}$)

터 떨어져 나온 액사가 완전히 액적으로 분열된 이후인 노즐 하단 100mm 위치에서 레이저 광이 분무 중심을 통과하도록 하여 측정하였다. 실험 유체는 비전도성 액체인 디젤을 사용하였고, 디젤의 물성치는 Table 1과 같다.

Fig. 2는 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 금속판을 삽입하여 접지 전극으로 이용하였다. 노즐 출구 직경(d)은 $450 \mu\text{m}$ 이고 이후의 연구를 위해 노즐 팁을 교체할 수 있는 형태로 제작하였다. 전극 침의 재료는 스테인레스 스틸(stainless steel)이고, 강한 전기장을 걸어주기 위해 침 끝 곡률 반경이 $35 \mu\text{m}$ 인 바늘을 사용하였다.

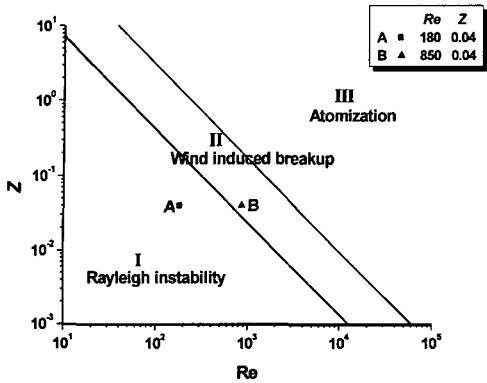


Fig. 3 Mode map of liquid-column disintegration [Ohnesorge(1936)]⁽¹⁰⁾

3. 실험 결과 및 해석

3.1 분열 가시화

비전도성 액체(디젤)의 전기수력학적 분무 특성을 파악하기 위해서 공급 유량과 전압에 따른 액주의 분열 특성을 가시화를 통해 살펴보았다. 전기장을 가하지 않은 경우 분사 액체의 물성치와 유속, 그리고 노즐 직경으로부터 Z(Ohnesorge수)와 Re(Reynolds수)를 알면 액주의 분열 현상을 예측할 수 있다.^(9,10) Ohnesorge는 액주의 분열 현상을 Fig. 3에 나타난 영역 I, II, III의 세 개의 형태로 구분하였다.

영역 I은 레이놀즈 수의 영역에서 액주에 축대칭 형태의 정맥류형 파동(varicose wave)이 성장하여 액적이 생성되는 Rayleigh 불안정 현상이 미립화를 지배하는 영역이다. 영역 II는 기체 유동에 의한 분열 영역으로, 분사 속도가 증가함에 따라 액주의 축을 중심으로 비대칭 형태의 사인곡선형 파동(sinuous wave)이나 꼬이는 형태의 파동(twisting wave)이 발생하여 액주가 액적으로 분열된다. 영역 III은 분사 속도가 아주 커지게 되면 나타나는 영역으로 노즐 출구 가까운 곳에서부터 액주는 미세한 분열과정을 거친다.⁽¹⁰⁾

Fig. 4는 유량이 $Q = 0.29 \text{ ml/s}$ 일 때 액주 분열의 모습이다. Re가 180, Z가 0.04로(Fig. 3, 점 A) Rayleigh 불안정 현상이 미립화를 지배하는 영역이며, 수력학적으로만 분열이 일어날 때[Fig. 4(a)]의 분열 길이는 약 61 mm이다. Fig. 4의 (b), (c)에서 공급 전압이 증가함에 따라 정맥류형 파동(varicose wave)이 일찍 성장하여 분열 길이가 줄어들음을 알 수 있다. 이는 액주에 실리는 전하들이 액주의 안정을 유지하려는 표면장력에 반대하여 액주에 초기 교란을 가중시키기 때문이다. Fig. 5는

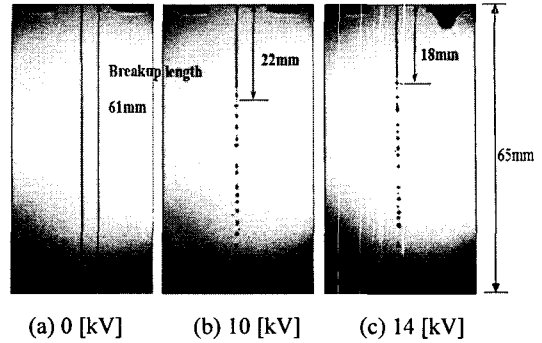


Fig. 4 Breakup of liquid column ($Q = 0.29 \text{ ml/s}$)

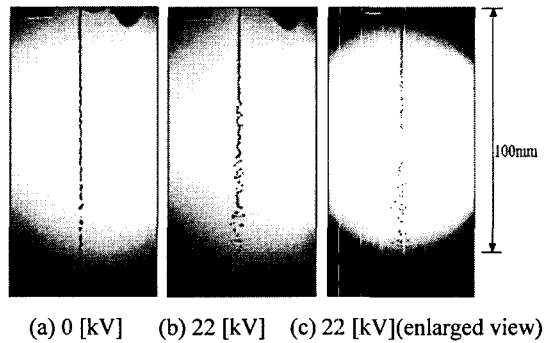


Fig. 5 Breakup of liquid column ($Q = 1.36 \text{ ml/s}$)

유량이 $Q = 1.36 \text{ ml/s}$ 일 때 액주 분열의 가시화 사진으로 Re가 850, Z가 0.04이며(Fig. 3, 점 B), 기체 유동에 의한 분열 영역에 해당한다. 공급 전압이 증가함에 따라 사인파형의 불안정성이 성장하여 액주로부터 액사가 떨어져 나오고, 액사로부터 액적들이 재분열되는 모습을 볼 수 있다. 크기가 작은 액적들은 큰 액적들에 비해 질량은 작지만, 비전하량(charge density)이 크기 때문에 분무 외곽으로 쉽게 밀려나 분무각이 증가한다. 노즐 축 부근에는 노즐 직경 크기에 해당하는 큰 액적들이 존재한다.

3.2 전류 측정

본 절에서는 공급 유량과 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 본체에 삽입되어 있는 접지 전극(Fig. 2의 metal plate)으로 직접 빠져나가는 전류가 손실 전류(leakage current)이다. 분무 전류와 손실 전류의 합이 전체 전류(total current)이고, 분무 전류를 유량으로 나눈 값이 비전하량이 된다.

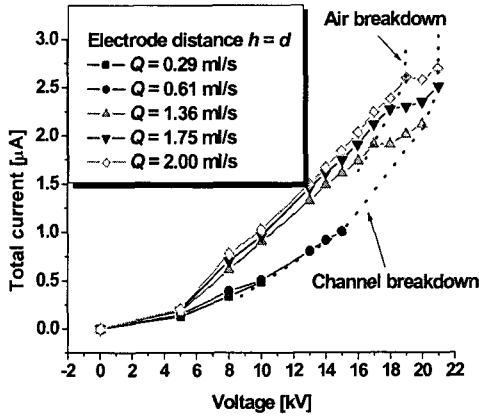


Fig. 6 Variation of total current with voltage and liquid flow rate

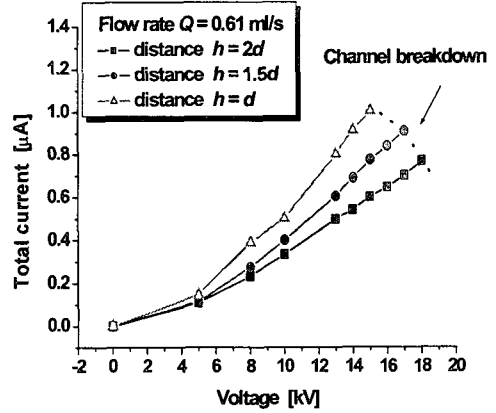


Fig. 8 Effect of electrode distance(h) on total current

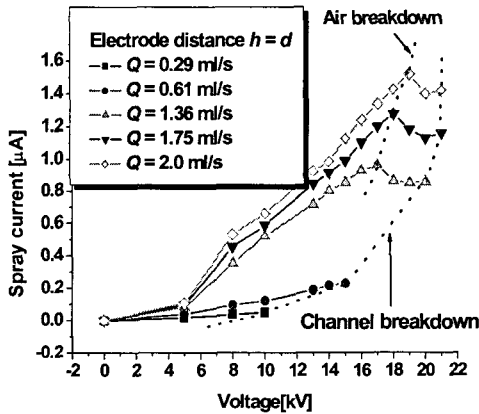


Fig. 7 Variation of spray current with voltage and liquid flow rate

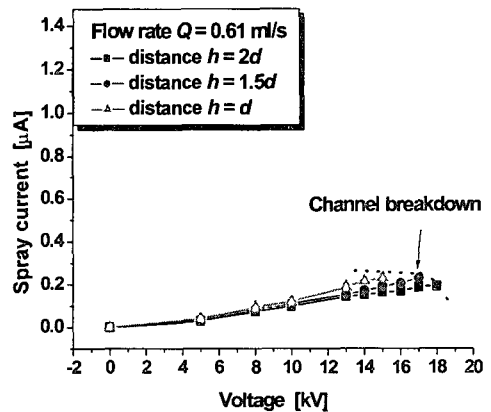


Fig. 9 Effect of electrode distance(h) on spray current

Fig. 6에 나타난 바와 같이 일정 전극 간격 하에서 유량을 일정하게 유지하면서 전압을 증가시키면 전극 침 부근의 전기장 강도가 증가하여 전계 방출(field emission)에 의한 생성 전하가 많아지기 때문에 전체 전류가 증가한다. 또한, 일정 공급 전압 조건 하에서도 유량이 증가할 경우에는 생성된 전하가 동일 극성의 전극 침으로부터 유체와 함께 하류로 신속히 이동한다. 따라서 전극 침 끝 부근에 강한 전기장을 유지할 수 있고 생성 전하량도 증가한다.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 조건하에서의 분무 전류를 나타낸다. 유량이 적을 때($Q = 0.29, 0.61$ ml/s)는 전극 침에서 생성되는 전체 전하량이 작고 노즐 축 방향 속도 성분도 작아서 생성된 전하의 대부분이 접지 전극을 통해 빠져나가기 때문에 분무 전류도 작다. 반면에 유량이 많을 때($Q =$

1.36 ml/s 이상)는 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(d)로 변화시켰다. Fig. 8은 유량이 $Q = 0.61$ ml/s일 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 강해지고, 또한 유로가 실질적으로 좁아지므로 전극 침 부근에서의 액체의 유속도 빨라진다. 따라서, 생성 전하가 빨리 하류로 이동하는 효과에 전기장이 강해지는 효과가 더해져서, 전체 전류가 증가하게 된다. 그러나 Fig. 9를 보면, 전극 간격이 작을수록 전체 전류는 증가하여도 손실 전류가 함께 증가하

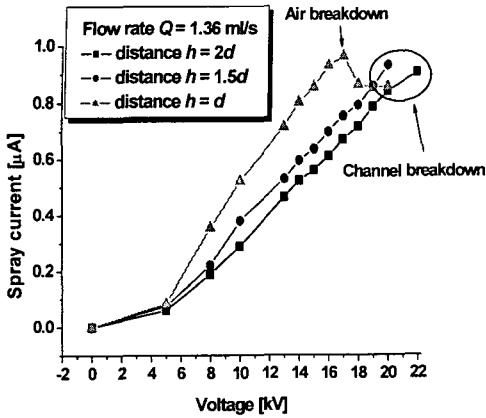


Fig. 10 Effect of electrode distance(h) on spray current

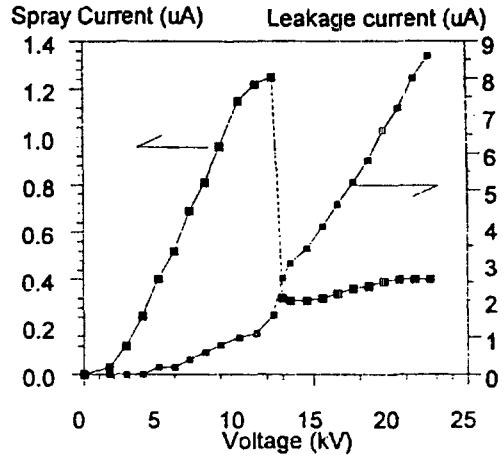


Fig. 12 Spray and leakage current in metal nozzle ($d = 500 \mu\text{m}$, $h = d$, $Q = 2 \text{ ml/s}$)⁽⁷⁾

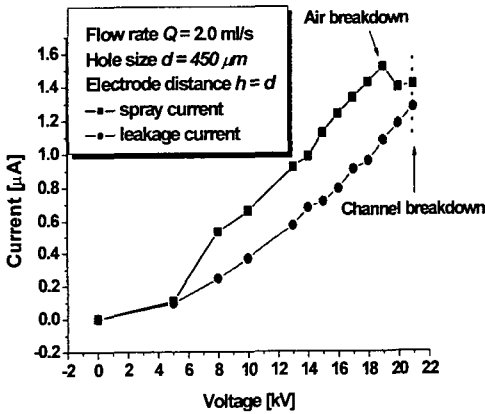


Fig. 11 Spray and leakage current in metal nozzle

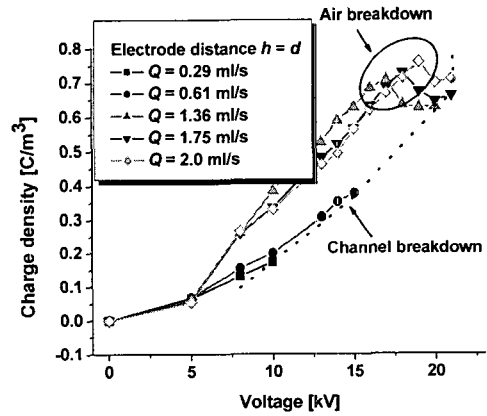


Fig. 13 Limitation of charge density

기 때문에 결과적으로 분무 전류는 크게 증가하지 않는다. 반면에 유량이 클 경우($Q = 1.36 \text{ ml/s}$)에는 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 분무 전류의 증가 폭은 커진다.

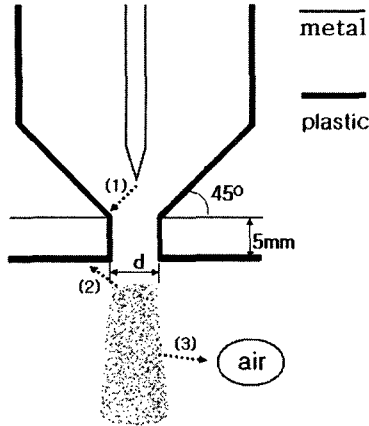
Fig. 8, 9로부터 전극 간격이 줄어들면 유로 내 절연 붕괴가 나타나는 인가 전압이 감소함을 알 수 있다. 이는 전극 간격이 줄어들에 따라 전기장 강도의 증가가 유속의 증가에 따른 효과보다 더 큼을 의미한다.

Fig. 11은 Fig. 6, 7로부터 유량이 $Q = 2.0 \text{ ml/s}$, 전극 간격이 $h = d$ 인 경우의 분무 전류 및 손실 전류를 표시한 것이다. 위의 비금속 노즐의 경우 분무전류 값은 최대값에 도달한 후 10%정도 만이 떨어지고, 손실전류 값의 증가율은 크게 변하지 않는다. 그에 비해 이와 비슷한 실험 조건을 가지

는 금속 노즐에 대한 기존 연구 결과의 경우 액주와 노즐 본체 사이의 방전 현상으로 인하여 Fig. 12에서와 같이 분무 전류 값이 급속히 떨어지고, 손실전류가 크게 증가한다.

Fig. 13에는 전극 간격과 노즐 직경을 동일하게 유지시킨 조건에서 유량의 증가에 따른 최대 비전하량의 변화를 보여주고 있다. 유량에 따라 최대 비전하량 값에 약간 차이는 있지만 대체로 0.7-0.75[C/m³]정도에 도달하면 더 이상의 증가가 없음을 알 수 있다.

최대 분무 전류(또는 최대 비전하량)가 나타나는 현상을 살펴보기 위하여 액주 표면의 전기장 강도를 계산하여 보았다. 전기장(electric field)은 Poisson 방정식 (1)과 함께 식 (2)를 이용하여 구한다.



(1) Channel breakdown (2) Partial breakdown
(3) Air breakdown

Fig. 14 Mechanism of dielectric breakdown

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

$$E = -\nabla \phi \quad (2)$$

계산 과정에서 전하는 액주의 체적에 균일하게 (homogeneous) 분포하고, 전기장은 반경 방향만의 1차원 문제로 가정한다. 식 (1)의 양변을 적분하면 식 (3)이 얻어지며, $r=0$ 에서 대칭 조건(symmetry)인 $\nabla \phi = 0 (E = 0)$ 경계조건을 적용하면 $C_1=0$ 이므로 결국 전기장 강도는 식 (4)로 표현된다.

$$-E = \frac{\partial \phi}{\partial r} = -\frac{\rho_c r}{2\epsilon_0 \epsilon_r} + \frac{C_1}{r} \quad (3)$$

$$E = \frac{\rho_c r}{2\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (4)$$

이를 이용하여 최대 비전하량 값(0.7-0.75[C/m³])에 해당하는 조건에서 액주 표면에서의 전기장 강도를 구해보면 약 4[MV/m]로 공기의 절연 강도인 3[MV/m](parallel plate⁽¹¹⁾)의 경우)보다 크게 나타난다. 따라서 액주에 실린 전하량 값이 일정치 (0.7C/m³)이상이 되면, 즉 액주 표면의 전기장 강도가 주위 공기의 절연 강도를 초과하면 대기로 일부분의 전하가 빠져나가기 때문에 분무 전류 값이 떨어지면서 비전하량 값이 한정되는 것이다. Shrimpton⁽⁶⁾이 실험했던 금속 노즐에서 액주로부터 노즐로의 방전현상(partial breakdown)이 발생할

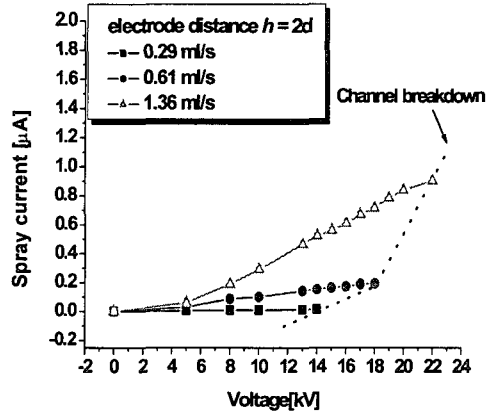


Fig. 15 Variation of spray current with voltage and liquid flow rate

때 액주의 전기장 강도를 계산해보면 3.85[MV/m] (비전하량 값 0.6C/m³)이다. 각각의 노즐에서 최대 비전하량을 얻을 수 있을 때의 전기장 강도를 비교해 보면 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 노즐 재질이 최대 비전하량에 미치는 영향은 크지 않고, 오히려 최대 비전하량은 주위 공기의 절연 정도에 의존도가 더 큼을 의미한다.

전하가 액주에 실리지 않고 빠져나가는 절연 붕괴 현상(dielectric breakdown)에는 Fig. 14에서 보여 주는 것과 같이 크게 세 가지 경우가 있다. 노즐 내부에서 방전이 일어나는 유로 내 절연 붕괴(channel breakdown)와 노즐 출구에서 액주 표면의 전하가 노즐 외부 표면으로 방전이 일어나는 부분 절연 붕괴(partial breakdown), 그리고 또 노즐 외부에서 액주 표면의 전기장 강도가 주위 공기의 절연 강도를 초과하여 주위의 공기로 전하가 일부 빠져나가는 공기 절연 붕괴(air breakdown)가 있다. 본 연구에서는 노즐 본체가 절연 물질인 플라스틱 재질로 되어 있으므로 공급 유량과 전압에 따라 유로 내 절연 붕괴와 노즐 외부에서의 공기 절연 붕괴 등 두 가지 모드만 나타난다. Fig. 6~10, 13, 15에는 두 가지 모드가 나타나는 인가 전압 조건을 표시하여 주고 있다. 여기서 인가 전압의 최대 값에서는 유로 내 절연 붕괴가 나타나는데, 이 경우는 전극 침과 노즐 내부 접지 전극에서의 방전이 나타나게 된다.

방전 모드의 변화는 전류 측정 결과로부터 알 수 있다. Fig. 10을 보면 유량이 $Q = 1.36$ ml/s인 경우에 공급 전압의 증가에 대해 전극 간격이 좁을수록, 즉 전기장 강도가 클수록 공기 절연 붕괴가 먼저 일어나고 공급 전압을 더 높여야만 유로

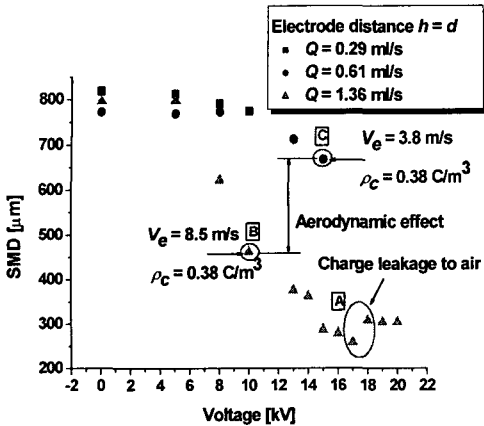


Fig. 16 SMD variation with voltage and flow rate

내 절연 붕괴가 일어남을 알 수 있다. 이에 반해 $Q = 0.29$ ml/s와 $Q = 0.61$ ml/s의 경우(Fig. 7, 15)는 전극 간격이 좁아져도 공기 절연 붕괴가 일어나기 이전에 유로 내 절연 붕괴가 먼저 일어나는 경우를 나타낸다. 식 (1)~(4)을 이용한 절연 강도 계산 과정에서 유체의 물성치의 영향까지를 고려하면 공기 절연 붕괴는 공급 유량, 전기장 강도, 유체 물성치의 함수임을 예측할 수 있다. 위의 변수들 중 공급 유량과 유체 물성치는 Ohnesorge 수 및 Reynolds수로 표현이 가능하고, 이는 Ohnesorge의 분무 모드(Fig. 3)와 연계하여 생각할 수 있다. 여기에 전기장 강도가 모드의 경계를 변화시키는 변수임을 예측할 수 있다.

3.3 입경 측정

비전도성 액체의 전기 수력학적 분무 특성을 살펴보기 위해서 유량과 공급 전압에 따른 평균입경의 변화를 살펴보았다. Fig. 16은 유량이 $Q = 0.29$ ml/s, $Q = 0.61$ ml/s 및 $Q = 1.36$ ml/s일 때 공급 전압에 따른 평균입경(SMD)의 변화를 보여주는 선도이다. 유량이 $Q = 0.29$ ml/s일 때는 공급 전압이 증가함에 따라 액적들끼리 반발해서 서로 멀어지는 현상은 활발하게 일어나지만 평균 입경(약 800 μ m)은 크게 줄어들지 않는다. 이는 전극 침에서의 유속이 느릴 때는 공급 전압이 증가해도 액주에 실리는 전류 값이 작기 때문이다. 유량이 $Q = 0.61$ ml/s일 때에는 평균입경은 전압이 가하여 지지 않았을 때의 770 μ m에서 전압이 15 kV이면 670 μ m로 줄어든다. 위의 두 경우와는 달리, 유량이 $Q = 1.36$ ml/s일 때는 전압이 증가함에 따라 17 kV까지 비전하량 값도 같이 증가하면서 평균입경이 260 μ m로 크게 줄어든다. 그러나, 공급 전압이 그 이

상으로 증가하면 전하가 주위 대기로 빠져나가는 현상에 의해 분무 전류가 줄어들어 평균입경도 약간 증가(약 300 μ m)한다(Fig. 16의 A).

비전하량 값이 0.38 C/m³에 해당하는 조건으로 유량이 $Q = 1.36$ ml/s ($V_e = 8.5$ m/s), 공급전압이 10 kV일 때(Fig. 16의 B)의 평균입경은 460 μ m으로, 동일 비전하량을 가지는 $Q = 0.61$ ml/s($V_e = 3.8$ m/s), 공급 전압 15 kV 인 경우(Fig. 16의 C)와 비교하여 작게 나타난다. 이는 결국 평균입경은 비전하량 값 뿐만 아니라 액주 유속에 비례하는 공기역학적 효과(aerodynamic effect)의 영향도 받고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

기존 금속 노즐이 가지는 문제점인 노즐 내부 및 외부의 절연 붕괴(channel breakdown 및 partial breakdown)를 막을 수 있도록 절연 물질인 엔지니어링 플라스틱으로 노즐을 설계, 제작하였다. 이 노즐을 이용하여 비전도성 액체인 디젤에 전하를 공급할 수 있는 전기수력학적 분무 장치를 구성하여 유량, 공급 전압, 전극 간 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 기존의 금속 노즐의 경우보다 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 값보다 조금 큰 값으로 한계 비전하량이 주위 매질의 영향을 많이 받음을 알 수 있다. 하지만 손실 전류는 비금속 노즐에서 훨씬 작은 값을 가짐을 알 수 있다.

(3) 평균 입경은 비전하량과 공기역학적 효과의 함수이며, 액체 유속이 증가할수록 액주에 실리는 전하량 값이 증가하고, 공기역학적 효과가 증대되기 때문에 미립화 성능이 좋아진다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실사업(2000-N-NL-01-022, KISTEP), 연소기술연구센터사업(R11-2000-018303-02), 그리고 BK-21의 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* Vol. 12, pp. 526~537.
- (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. and 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) Sang Yong Lee, 1996, "Liquid Atomization," *Mineum-Sa*, Korean.
- (11) Berger, L. I., 1999, "Dielectric Strength of Insulating Materials," *Handbook of Chemistry and Physics* 79th Edition, pp. 15~30.