

2유체 정전분무의 액체 미립화 및 분무 특성

김 정 현[†] · 배 충 식^{*}

(2001년 2월 27일 접수, 2001년 9월 17일 심사완료)

Liquid Atomization and Spray Characteristics in Electrostatic Spray of Twin Fluids

Jeong Heon Kim and Choongsik Bae

Key Words : Electrostatic Spray(정전분무), Twin Fluid Spray(2유체분무), Liquid Atomization(액체 미립화), Jet Break-up(액주 분열), Phase Doppler Measurement(위상도플러 계측)

Abstract

This paper presents the experimental results of a study undertaken to develop an electrostatic spray system for a combustion application. The characteristics of the liquid atomization and the droplet dispersion in the electrostatic spray of twin fluids were investigated by the optical measurement techniques. The processes associated with the break-up of charged jets were also observed using the laser sheet visualization. The diameter and velocity of droplets were simultaneously measured using the phase Doppler measurement technique. The electrostatic atomization of the liquid fuel depended primarily on the charging voltage and the flow rate, but the dispersion of droplets depended significantly on the aerodynamic flow. Aerodynamic influences on the liquid atomization decreased with an increase of the charging voltage. Consequently, the liquid atomization and the droplet dispersion could be independently controlled using the electrostatic and aerodynamic mechanisms.

1. 서론

액체의 미립화 및 분무는 산업의 많은 분야에서 이용되는 핵심기술로서, 최근의 산업기술 발전과 더불어 미립화 성능의 고도화 및 다양성이 요구되고 있다. 기존에 응용되고 있는 대부분의 분무방식은 액체 또는 공기를 고압으로 분사함으로써 액체를 미립화하는 기술을 이용하고 있지만, 미립화의 고성능화 및 응용의 다양성 측면에서 해결해야 할 점이 아직도 많으며 특히 분무제어에 한계가 있는 것이 사실이다.

분무도장, 인쇄, 코팅, 초미립자 제조 및 우주공간에서의 추진 등의 분야에서 중요한 역할을 하고 있는 정전분무는 액체의 정전 에너지를 증가시켜

액체의 분열을 촉진하는 정전미립화 원리를 이용한다.⁽¹⁾ 표면장력으로 결합되어 있는 액적이 대전되면 결합력이 약화되며, 만약 정전기력이 표면장력보다 크게 되면 분열된다. 액적이 분열되는 조건은 원리적으로 표면장력에 의한 에너지와 정전 에너지의 평형식으로부터 다음의 식 (1)과 같이 나타내어진다.^(2,3)

$$q_{\infty}^2 = 288 \epsilon_0 \gamma / d^3 \quad (1)$$

여기서 q_{∞} 는 액적의 한계 비대전량이며, ϵ_0 는 주위 기체의 유전율, γ 는 액체의 표면장력, d 는 액적의 지름이다. 이 식으로부터 액적의 대전량은 한계값(Rayleigh's limit)을 가지며, 한계 비대전량은 액적이 작을수록 증가하기 때문에 대전에 의해 불안정하게 된 액적은 더 작은 액적으로 분열됨으로써 안정한 상태가 됨을 알 수 있다.

정전미립화 기술을 액체연료의 분무에 이용하는 경우에는 기본적인 원리상 다음과 같은 장점이 기대된다. 첫째, 액적의 크기와 운동을 전기적으로 제

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail: jhknet@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3063 FAX : (042)869-5023
^{*} 회원, 한국과학기술원 기계공학과

어할 수 있다. 둘째, 대전액적들 상호간에 쿨롱척력(Coulombic repulsion)이 작용하여 수밀도가 매우 높은 경우에도 액적 사이의 합체가 없으며 연료의 벽면부착 방지에도 효과적이어서 연소효율을 높일 수 있다. 셋째, μA 수준의 전류가 흐르는 정전기력을 이용하기 때문에 미립화에 소요되는 에너지가 매우 적고 미립화 효율이 매우 높다.

이와 같은 많은 장점과 더불어 액체연료의 연소에 있어서 연소효율 및 성능의 향상에 대한 요구가 커지면서 정전분무의 기술을 연소 시스템에 적용하려는 연구가 최근에 주목을 받고 있다.⁽⁴⁻⁷⁾ Balachandran 등⁽⁶⁾은 정전분무를 가스터빈용 연료분무시스템에 응용하여 미립화 성능의 향상을 확인하였다. 또한 Nhumai 등⁽⁷⁾은 정전분무의 GDI엔진 적용에 관한 연구를 통하여 혼합의 촉진과 연료의 벽면부착 방지 등의 효과로 엔진의 성능이 향상된다고 예측하였다. 그러나 이와 같은 최근의 연구에도 불구하고 액체연료의 정전분무는 아직은 연구단계에 머물고 있으며, 실제의 연소 시스템에 적용되기 위해서는 액체연료의 정전미립화 기구에 대한 기초연구와 더불어 응용기술에 대한 적극적인 연구가 요구되고 있는 실정이다.

연소시스템의 연료분사 기술로서 많이 이용되는 2유체분무는 공기량의 조절로 액체 미립화를 제어하며 공기유동의 변화로 다양한 분무의 형상을 얻을 수 있다.⁽⁸⁾ 또한 연료와 공기의 초기 혼합이 우수하므로 연소성능의 향상을 기대할 수 있다. 그러나 다른 미립화 방법에 비하여 미립화 효율이 낮고 미립화 에너지가 많이 소요되는 단점을 가지고 있다.⁽⁹⁾ 또한 공기를 고속으로 공급하기 위한 압축기를 필요로 하며 액체의 미립화와 액적 분산운동의 독립적 제어가 불가능하다.

본 연구는 액체연료의 2유체 정전분무에 관한 것으로서, 2유체분무의 공기유동이 갖는 장점과 정전분무에 의한 액체 미립화의 장점을 조합하여 설계한 2유체 정전분무 시스템에서의 액체 미립화 및 분무 특성을 파악하기 위한 실험적 연구이다. 액적의 생성과정을 파악하기 위하여 연료노즐로부터 분출되는 액적의 선단이 액적으로 분열되는 과정을 가시화하였으며, 위상도플러 계측법(phase Doppler measurement technique)을 이용하여 액적의 입경과 속도를 동시에 계측하여 생성 액적의 특성을 정량적으로 규명하였다. 또한 액적의 수밀도와 평균입경의 공간적 분포를 구하여 분무 구조의 특성을 파악하였다. 특히 연료유량, 인가전압 및 공기유동을 변수로 하여 이들이 미립화 및 분무의 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 2유체 정전분무 시스템 및 실험장치

2유체 정전분무 시스템은 Fig. 1과 같이 연료 분사노즐부, 공기 유동부 및 전기 회로부로 구성되어 있다. 연료 분사노즐은 내경이 0.2 mm인 스테인레스 세경관(stainless capillary)으로서 노즐 선단이 내각 60°로 가공되었다. 6.5 mm의 내경과 10 mm의 길이를 갖는 링전극(ring electrode)은 연료 분사노즐의 6 mm 하단에 설치되었다. 연료 분사노즐과 링전극 사이에 전장이 형성되도록 하기 위하여, 연료 분사노즐에 수 kV 전압의 직류전원이 인가되었고 링전극은 접지되었다. 연료는 질소용기의 압력으로 연료탱크를 가압함으로써 노즐에서 분사되도록 하였으며, 공기의 유동은 링전극을 통해 균일하게 분출되도록 하였다. 실험은 대기중에서 실행되었으며, 본 연구의 실험장치와 계측시스템의 구성도를 Fig. 2와 같이 나타내었다.

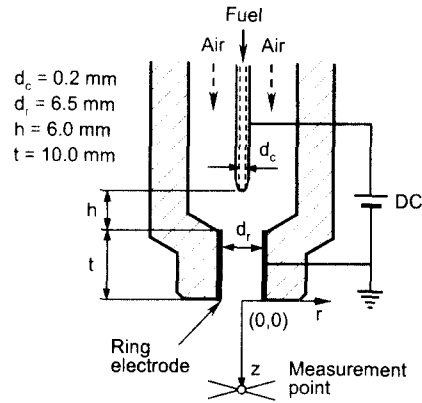


Fig. 1 Electrostatic spray system for twin fluids

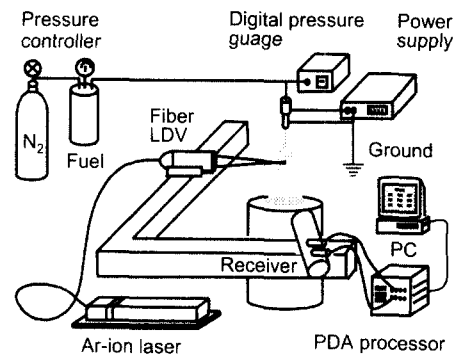


Fig. 2 Experimental system for electrostatic spray

액체연료는 물성치가 잘 알려진 헵탄(C_7H_{16})을 사용하였으며 정전미립화의 촉진을 위해 연료용 정전방지제(Stadis 450, Du Pont)를 0.5 w% 첨가하여 전기전도도를 향상시켰다.^(10, 11) 고저항측정기로 측정된 전기전도도는 반도체 수준인 1.55×10^{-5} S/m이었으며 표면장력의 변화는 극히 미소한 것으로 알려져 있다.⁽¹¹⁾

본 연구에서는 공기유동의 유무에 따라 정전분무와 2유체 정전분무로 구분하였다. 공기유동이 없는 정전분무의 실험에서는 연료유량(Q_f)과 인가전압(V_c)을 변수로 설정하여 정전분무의 특성을 관찰하였다. 2유체 정전분무의 실험은 연료유량이 일정한 조건에서 공기유동의 유동조건과 인가전압을 변수로 하여 정전분무에 미치는 공기유동의 영향을 파악하였다.

연료유량 조건은 $Q_f = 1.5$ cm³/min, $Q_f = 2.0$ cm³/min, $Q_f = 2.5$ cm³/min 등의 세 가지로 하였으며, 인가전압은 $V_c = 3$ kV로부터 $V_c = 5$ kV까지 0.5 kV 단위로 증가시키면서 실험하였다. 또한 공기유동의 효과를 관찰하기 위하여 공기유동의 레이놀즈 수(Re_a)를 약 $Re_a = 1 \times 10^4$ 까지 변화시켰다.

공기유동의 레이놀즈 수(Re_a)는 링전극의 내경과 이를 통과하는 공기의 평균유속으로부터 다음의 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$Re_a = 4 Q_a / \pi v_a d_r \quad (2)$$

여기서 Q_a 는 공기의 유량이며, v_a 와 d_r 는 각각 공기의 동점성 계수와 링전극의 지름이다.

2.2 계측 시스템 및 방법

노즐 선단부에서 빠르게 변화하는 액주분열(jet break-up)의 거동을 파악하기 위해서 평면광(light sheet)을 이용한 가시화 기법이 이용되었다. 파장과 광출력이 각각 532 nm와 130 mJ인 Nd:YAG 레이저가 광원으로 사용되었으며, 실린더형 렌즈(cylindrical lens)로 두께 1 mm의 평면광을 만들어 8 ns의 주기로 분무의 중심에 조사하였으며 확대 렌즈와 고밀도 필름을 장착한 스틸 카메라로 분무 단면을 촬영하였다.

분무유동에서 액적의 속도와 입경의 상호상관성은 액적의 운동과 미립화 과정에 대한 중요한 정보를 제공하기 때문에 속도와 입경의 동시계측은 매우 중요하다. 위상도플러 계측법은 액적의 속도분포와 입경분포를 동시에 계측할 수 있는 매우 유용한 수단이다.^(12,13) 두 개의 레이저광선이 교차되어 만들어지는 측정체적에는 명암의 간섭호가 형성된다. 입자가 간섭호를 통과할 때, 산란광의 도플러 주파수는 입자의 속도에 비례하며, 서로 다른 각도에 설치된 두개의 수광소자에서 측정

된 도플러 신호의 위상차는 입자의 크기에 비례한다. 따라서 도플러 신호의 주파수와 위상차를 측정하면 입자의 속도와 크기가 동시에 측정된다. 단, 이때의 입자들은 일정한 굴절율을 갖는 구형체로 가정된다. 또한 위상도플러 계측에 있어서의 측정값은 광학계의 특성과 기하학적 배열구조에 의존하므로 오차를 최소화하기 위해서는 위하여는 광학적 변수들의 최적화가 요구된다.

본 실험에는 이차원 위상도플러 계측시스템(2D-PDA, Dantec Electronics)이 사용되었으며, 광원은 아르곤 레이저(Ar-ion laser)가 이용되었다. 광학파이버(optical fiber)를 통하여 전송된 네 개의 레이저 광선은 각각의 강도가 70 mW로 동일하게 조정되었다. 입경의 측정범위와 측정체적을 고려하여 송광렌즈의 초점거리는 600 mm로 설정하였으며, 수광렌즈는 입경 분해능을 고려하여 310 mm로 설정하였다. 산란측정각(scattering angle)은 S/N비를 크게 하기 위하여 헵탄의 브루스터 각도(Brewster's angle)인 72°로 하였다. 위상도플러 계측의 자세한 광학적 설정치는 Table 1과 같다.

서로 다른 각도에 설치된 세 개의 수광소자(photomultiplier)로부터 측정된 두 개의 입경 d_1 과 d_2 를 이용하여 식 (3)과 같이 정의되는 구형도(sphericity)를 구하였으며, 설정값 이상의 구형도를 갖는 액적만이 유효샘플로 인정되었다.

$$S(\text{구형도}) = 1 - |d_1 - d_2| / d_1 \quad (3)$$

본 실험에서의 위상도플러 계측은 링전극 하단의 분무장에서 이루어졌으며, 각각의 위치에서 1×10^4 개 이상의 액적들이 측정되고 분석되었다. 미립화 과정이 거의 종료된 상태인 이 영역에서는 95% 구형도 조건의 유효샘플이 86% 이상으로써 위상도플러 계측이 유효한 것으로 평가되었다.

Table 1 Optical configuration of phase Doppler measurement

Parameter	Axial	Radial
Transmitting optics		
Wavelength (nm)	514.5	488.0
Focal length (mm)	600	600
Fringe spacing (μ m)	8.13	7.71
Fringe number	36	36
Spot diameter (μ m)	291.2	276.2
Receiving optics		
Focal length (mm)	310	310
Frequency shift (MHz)	40	40

3. 결과 및 고찰

3.1 정전미립화의 인가전압 의존성

공기유동이 없는 정전분무에서의 액적 생성과정을 파악하기 위하여 연료노즐과 링전극 사이에서 분열되는 액주의 선단을 가시화하여 Fig. 3 및 4와 같이 나타내었다. Fig. 3의 (a)와 (b)는 연료유량이 $Q_f = 1.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ 로 동일한 경우로서, 인가전압은 각각 $V_c = 4 \text{ kV}$ 와 $V_c = 5 \text{ kV}$ 이었다. Fig. 3(a)에서는 노즐로부터 분출되는 액주의 직경이 점차로 가늘어지고 불안정하게 되면서 액주 선단이 분열되기 시작하였다. 인가전압이 증가되면 Fig. 3(b)와 같이 액주 선단의 굽기가 더욱 가늘어지고 선단부가 더욱 불안정하게 선회하면서 더 작은 액적이 생성되었다. 또한 노즐로부터 액주의 분열 개시점까지의 거리로 정의되는 액주분열거리(L_b)가 인가전압의 증가에 따라 감소되었다. 연료유량이 $Q_f = 2.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ 으로 증가된 Fig. 4의 (a)와 (b)의 경우에

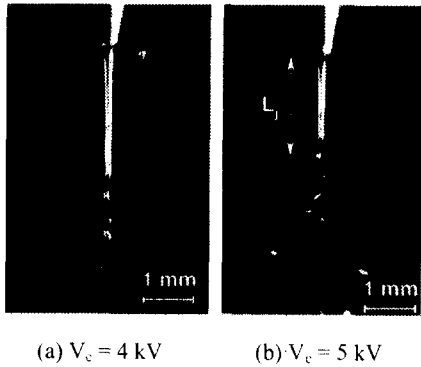


Fig. 3 Jet break-up with each charging voltage at flow rate of $Q_f = 1.5 \text{ cm}^3/\text{min}$

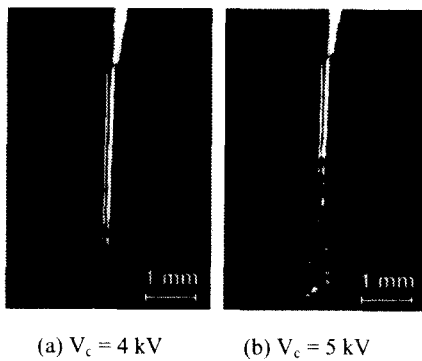


Fig. 4 Jet break-up with each charging at flow rate of $Q_f = 2.5 \text{ cm}^3/\text{min}$

도 비슷한 과정에 의해서 액주가 분열되었지만, 연료유량이 증가됨에 따라 액주 선단의 직경이 증가하고 액주분열거리가 길어졌으며 액주 선단부의 불안정성이 감소되어 선회 각도가 감소하였다.

Hayati 등⁽¹⁴⁾은 전장에 놓인 액주 내부의 유속분포를 가시화함으로써 액주 표면의 유속이 중심부의 유속보다 크다는 사실을 알았다. 이는 통상의 유동과는 다른 현상으로서, 대전밀도가 높은 액체의 표면에 전장에 의한 전단력이 작용하여 표면부가 가속됨을 증명하는 것이며 액주 선단이 가늘어지면서 불안정성이 증가하는 이유를 설명하는 것이다. 이와 같이 인가전압이 높아지면 액주 표면의 전단력이 증가되고 액주는 더욱 가늘어지면서 불안정성이 증가하게 된다. 하지만, 유량의 증가는 액주 중심부의 유속을 크게 하므로 액주가 굽어지고 액체의 대전밀도가 낮아지므로 불안정성이 감소하게 된다고 사료된다.

정전미립화에 의해 생성된 액적의 평균입경과 평균속도를 위상도플러 계측법으로 측정하여 Fig. 5와 6에 나타내었다. 측정은 정전분무 시스템의 링전극으로부터 5 mm 하단의 분무 중심축에서 이루어졌다.

Fig. 5는 연료유량이 각각 $Q_f = 1.5 \text{ cm}^3/\text{min}$, $Q_f = 2.0 \text{ cm}^3/\text{min}$ 및 $Q_f = 2.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ 등의 세가지 조건에서 인가전압에 따른 생성 액적의 SMD(Sauter mean diameter) 변화를 나타낸다. 세가지 연료유량 조건에서 모두 인가전압의 증가에 따라 액적의 SMD가 감소하였다. $Q_f = 1.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ 의 연료유량 조건에서 인가전압이 $V_c = 3.0 \text{ kV}$ 에서 $V_c = 5.0 \text{ kV}$ 로 증가함에 따라서 생성 액적의 SMD는 $114 \mu\text{m}$ 에서 $34 \mu\text{m}$ 로 약 70%가 감소하였다. 연료유량이 $2.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ 인 경우에는 인가전압이 3.0 kV 에서 5.0 kV 로 증가함에 따라 액적의 SMD는 $136 \mu\text{m}$ 에서 $68 \mu\text{m}$ 로 약 50%가 감소하였다. 또한 인가전압이 동일한 경우를 비교하면 연료유량이 작을수록 생성 액적의 SMD가 감소되었다.

이와 같은 결과는 인가전압이 클수록 전장이 증가하고 연료유량이 작을수록 액체연료의 대전밀도가 증가하기 때문으로 사료된다. 특히 인가전압의 증가에 따라 감소되는 SMD의 기울기는 점차로 완만해졌으며 인가전압이 $V_c = 5.0 \text{ kV}$ 에 근접함에 따라 SMD의 감소율은 급격히 줄어들었다. 이는 인가전압의 증가를 통한 액체 미립화에는 한계가 있음을 나타내는 것이다.

각각의 연료유량에서 인가전압에 따른 액적의 축방향 평균속도를 Fig. 6에 나타내었다. 이 지점은 분무 중심축으로서 반경방향의 평균속도가 0 m/s임을 확인하였다. 각각의 연료유량조건에서 인가전압의 증가에 따라 액적의 평균속도가 비례적으로 증가하였다. $Q_f = 1.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ 의 연료유량 조건

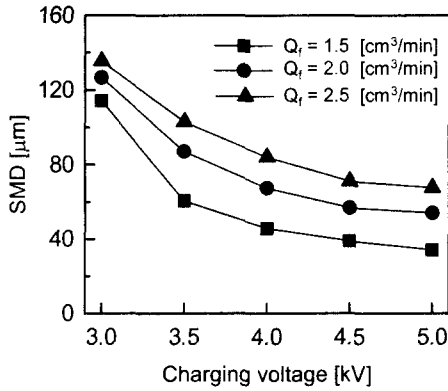


Fig. 5 Sauter mean diameter of droplets with charging voltage at each flow rate

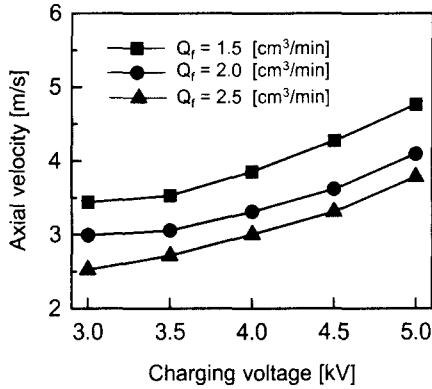


Fig. 6 Mean velocity of droplets with charging voltage at each flow rate

에서 인가전압이 $V_c = 3.0$ kV에서 $V_c = 5.0$ kV로 증가함에 따라서 액적의 평균속도는 약 36%가 증가하였다. 그러나 연료유량이 증가함에 따라서는 속도가 오히려 감소되었다. 이는 정전분무의 특성으로서 동일한 노즐에서 연료유량이 증가할수록 속도가 증가하는 일반적인 현상과는 다른 것이다.

정전분무에서는 연료노즐과 링전극 사이에 인가되는 전압이 증가되면 전장의 세기가 증가하여 이 영역에서 대전액적이 가속된다. 따라서 인가전압이 증가할수록 액적의 평균속도는 비례적으로 증가하게 된다. 그러나 동일한 인가전압의 조건에서 연료유량이 증가하면 액적의 대전밀도가 감소하여 연료노즐과 링전극 사이에서의 가속력이 감소하며, 결국 액적의 속도가 연료유량의 증가에 따라 감소되는 것으로 사료된다.

3.2 정전미립화에 미치는 공기유동의 영향

Fig. 7, 8 및 9는 2유체 정전분무에서 공기유동과 인가전압의 변화에 따른 액적 특성을 위상도플러 계측으로 측정하여 나타낸 것이다. 연료유량은 $Q_f = 2.5$ cm³/min으로 일정한 조건이었으며, 인가전압이 $V_c = 3$ kV, $V_c = 4$ kV 및 $V_c = 5$ kV인 경우에 대해서 공기의 레이놀즈 수(Re_a)를 약 $Re_a = 1 \times 10^4$ 까지 변화시키면서 생성 액적의 입경 특성을 분석하였다. 측정은 링전극으로부터 5 mm 하단의 분무 중심축에서 이루어졌다.

Fig. 7은 인가전압과 공기의 레이놀즈 수(Re_a)에 따른 생성 액적의 SMD변화를 나타낸 것이다. 인가전압이 $V_c = 3$ kV인 경우에는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 액적의 SMD가 비례적으로 감소되었다. 공기의 레이놀즈 수가 $Re_a = 0$ 에서 $Re_a = 9130$ 까지 변화됨에 따라 액적의 SMD는 136 μm으로부터 99 μm까지 약 27%가 감소하였다. 그러나 인가전압이 $V_c = 4$ kV와 $V_c = 5$ kV인 경우에는 공기의 레이놀즈 수에 따른 SMD의 변화는 미소하였다.

Fig. 8의 (a)와 (b)는 인가전압 $V_c = 3$ kV의 조건에서 공기의 레이놀즈 수가 각각 $Re_a = 0$ 과 $Re_a = 9130$ 인 경우의 입경분포를 나타낸 것이다. 공기유동이 없는 Fig. 8(a)의 경우에는 140 μm 부근에서의 최고치를 비롯하여 다수의 피크(peak)를 갖는 넓은 범위의 분포를 나타내어 충분한 미립화가 이루어지지 않았음을 나타내었다. 공기의 레이놀즈 수가 $Re_a = 9130$ 으로 크게 증가함에 따라 Fig. 8(b)와 같이 작은 입경의 액적이 다수 생성되어 전체적인 분포가 입경이 작은 영역으로 이동하였으며, 이로부터 공기의 레이놀즈 수의 증가에 따라 추가적인 미립화가 이루어졌음을 알 수 있었다.

Fig. 9의 (a)와 (b)는 인가전압 $V_c = 5$ kV에서 공기의 레이놀즈 수가 각각 $Re_a = 0$ 과 $Re_a = 9130$ 인 경우의 입경분포를 나타낸 것이다. Fig. 9(a)의 경우에는 10 μm 이하에 분포된 약간의 액적들을 제외하면 55 μm에서 최고치를 갖는 정규분포를 이루었다. 또한 Fig. 8(a)와 비교할 때, 표준편차가 24 μm로 비교적 산포범위가 좁고 평균입경이 작은 분포를 보이고 있어 인가전압의 증가에 따라 미립화가 크게 진전되었음을 알 수 있다. 공기의 레이놀즈 수가 $Re_a = 9130$ 으로 크게 증가한 Fig. 9(b)의 경우에는 공기유동이 없는 Fig. 9(a)와 비교할 때 입경이 더 작은 40 μm 부근에서 입경분포의 최고치가 나타났지만 더 완만한 분포를 보였으며, 입경의 산술평균(D_{10})은 감소하였으나 액적의 D_{32} (SMD)는 대동소이한 경향을 보였다. 따라서 인가전압이 큰 $V_c = 5$ kV의 경우에는 공기의 레이놀즈 수가 증가됨에 따른 추가적인 미립화 효과는

그다지 크지 않았음을 확인할 수 있었다.

정전미립화와 공기역학적 미립화의 과정은 서로 다르다. 정전미립화의 분열기구는 크게 일차분열(primary break-up)과 이차분열(secondary break-up) 등의 두 가지로 나누어 설명할 수 있다. 일차분열은 Fig. 3과 Fig. 4에서 설명된 바와 같이 연료노즐

에서 분출되는 대전액체의 액주로부터 직접 분열되는 현상으로 생성 액적의 대부분을 이룬다. 이차분열은 일차분열에 의해 생성된 대전액적으로부터 2차적으로 분열되는 현상이다. 액적의 비대전량이 식 (1)과 같이 표현되는 한계치에 도달하면 더 작은 액적으로 분열됨으로써 안정된 상태가 된다. 실제로 대전액적은 증발에 의하여 비대전량이 증가할 수 있으며 또한 대전액적의 표면에 정전기적인 불균일이 존재하여 국부적으로 한계 비대전량에 도달할 수 있다.⁽²⁾ Gomez 등⁽¹¹⁾은 현미경을 이용한 확대촬영으로 비교적 큰 모액적(mother droplet)으로부터 10 μm 이하의 매우 작은 자액적(daughter droplet)이 분열되는 이차분열의 현상을 관찰하였다. 10 μm 이하의 매우 작은 액적들의 분포를 보이는 Fig. 8 및 9의 입경분포는 정전미립화의 이차분열과 관련된 것으로 사료된다.

공기역학적 미립화는 다음과 같이 정의되는 웨버 수(We)로써 정량적으로 평가된다.⁽¹⁵⁾

$$We = \rho_a U_r^2 d_1 / \sigma_1 \quad (4)$$

여기서 ρ_a 는 공기의 밀도, U_r 는 액체에 대한 기류의 상대속도, d_1 는 액체의 특성지름 그리고 σ_1 는 액체의 표면장력이다.

이 식으로부터 알 수 있듯이 공기역학적 미립화에서는 공기와 액체 간의 상대속도와 액적의 크기에 의존한다. 상용의 2유체 분무노즐은 웨버 수는 적어도 $We = 40$ 이상이 되도록 하며, 공기유동에 대한 액체의 상대속도를 가능한 크게 설계한다⁽⁹⁾. 본 실험의 2유체 정전분무에서 기류만의 영향을 파악하기 위하여 액체의 특성지름을 연료노즐의 내경(d_c)으로 하고 액주의 분출속도는 공기의 속도에 비하여 매우 작다고 가정하면 웨버 수는 약 $We = 50$ 까지 변화되었다고 할 수 있다.

그러나 실제의 2유체 정전분무에서 충분히 작은 액적이 생성될 정도로 인가전압이 높아지면, 액적의 수력직경이 작아지고 공기 유동에 대한 추종성이 커지게 되므로 공기의 유동속도와 액적의 상대속도가 급격히 감소하게 되므로 공기역학적 미립화 효과가 충분히 발휘되지 못하게 된다.

Fig. 8(a)와 같이 인가전압이 $V_c = 3$ kV로 낮은 경우에는 정전분무만으로는 충분한 미립화가 달성되지 않았다. 따라서 공기의 레이놀즈 수가 증가됨에 따라 공기역학적 미립화가 유효하게 작용되어 Fig. 8(b)와 같이 생성 액적의 SMD는 더욱 감소되었다. 또한 공기역학적 미립화의 효과에 의하여 평균입경의 상당한 감소가 있었음에도 불구하고 Fig. 8(b)의 입경분포가 일반적인 2유체 분무의 입경분포와는 다른 특성을 보였으며, 이는 정전미립

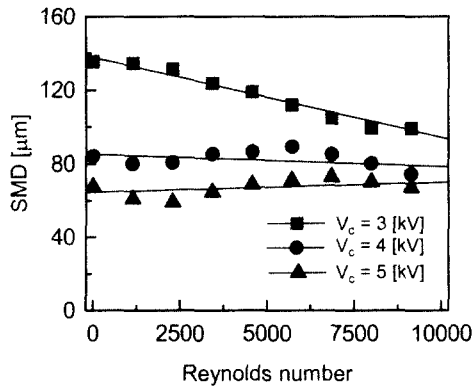


Fig. 7 Sauter mean diameter of droplets with Reynolds number at each charging voltage

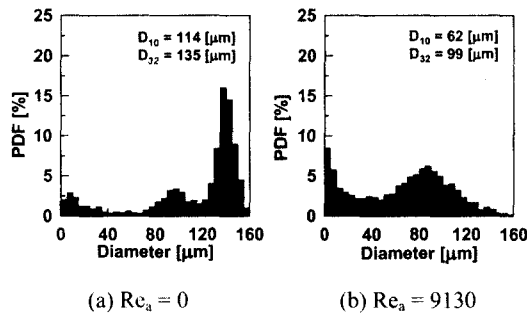


Fig. 8 Droplet size distribution at charging voltage of $V_c = 3$ kV

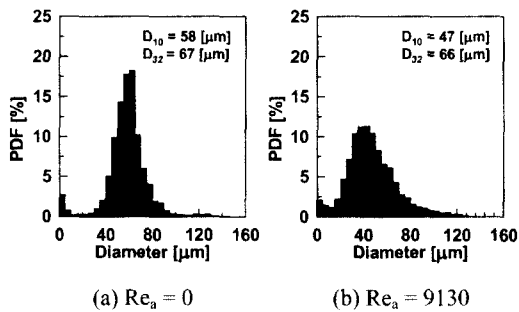


Fig. 9 Droplet size distribution at charging voltage of $V_c = 5$ kV

화를 기초로 하여 미립화가 이루어진 후에 공기역학적 미립화가 추가적으로 작용되었기 때문이라고 고찰된다.

인가전압이 $V_c = 5$ kV인 경우에는 정전미립화에 의해 생성되는 액적은 Fig. 9(a)에서와 같이 충분히 작기 때문에 공기의 레이놀즈 수가 증가되더라도 공기역학적 미립화가 유효하게 작용되지 못하여 Fig. 9(b)에서와 액적의 SMD변화는 미소하였다고 사료된다.

3.3 액적의 속도와 입경의 상호상관 특성

2유체 정전분무에서 생성 액적의 축방향 속도와 입경의 상호상관성을 Fig. 10 및 11과 같이 나타내었다. 연료유량과 인가전압은 $Q_f = 2.5$ cm³/min과 $V_c = 5$ kV로 일정한 조건이었으며, 측정위치는 링전극으로부터 5 mm 떨어진 하류의 분무 중심축이었다.

공기유동이 없는 정전분무에서의 속도와 입경의 상호상관성을 나타내는 Fig. 11에서는 두 개의 액적군 즉, 약 10 μm 이하의 소액적군(small droplet group)과 약 30 μm 이상의 대액적군(large droplet group)이 독립적으로 존재하는 이분적 분포(two-istand distribution)의 특성을 보였다. 대액적군에서는 입경에 따라 속도가 증가하는 특성을 나타내었다. 이는 대전액적에 링전극의 인력이 작용하여 속도가 감소되며 입경이 작은 액적일수록 비대전량이 크기 때문에 단위 체적당의 인력이 크게 작용하였기 때문으로 사료된다.

소액적군의 거동은 이러한 경향을 따르지 않고 대액적군의 전체 속도범위에 넓게 산포되어 있다. 액적이 분열된 직후에는 모액적과 자액적이 크기에 관계없이 속도가 일정하다. 따라서 Fig. 10의 소액적군에 속하는 10 μm 이하의 작은 액적들은 정전미립화의 이차분열에 의해 큰 액적들로부터 분열된 것임을 제시하는 것이라고 사료된다.

Fig. 11은 공기의 레이놀즈 수의 변화에 따른 액적들의 크기와 평균속도의 상호상관성을 속도 변동의 RMS(root mean square)값과 함께 나타낸 것이다. 액적의 속도와 입경의 상호상관성은 액적을 입경에 따라 30 μm 단위의 입경군(size classified group)으로 분류하여 각 입경군의 액적 속도를 분석한 것이다.

인가전압이 5 kV인 조건에서 공기의 유동이 없는 조건 즉, 공기의 레이놀즈 수가 $Re_a = 0$ 에서는 전체적으로 입경이 커질수록 평균속도 증가하였지만, 레이놀즈 수가 증가하면서 액적의 크기가 작을수록 평균속도가 크게 증가하였으며 속도의 RMS값 또한 크게 증가하였다. 공기의 레이놀즈

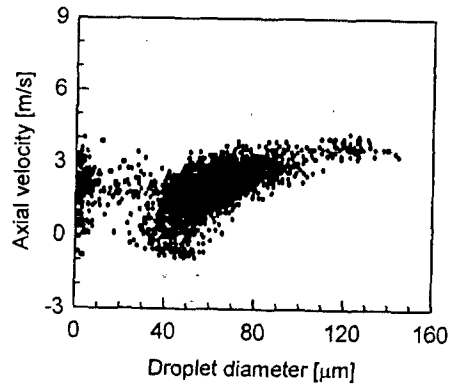


Fig. 10 Velocity-size correlation of droplets at charging voltage of $V_c = 5$ kV

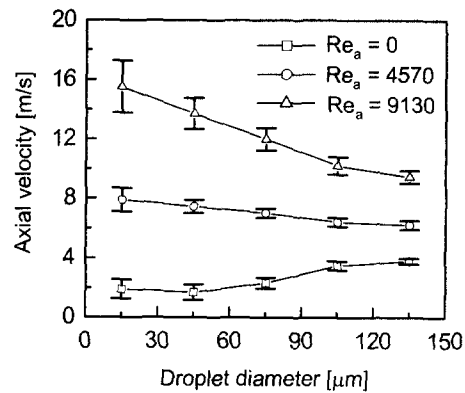


Fig. 11 Velocity-size correlations of droplets at each Reynolds number

수가 $Re_a = 9130$ 인 경우에, 입경이 30 μm 이하인 액적들의 평균속도는 15.5 m/s로서 120 μm과 150 μm 사이의 입경을 갖는 액적들의 평균속도 9.46 m/s에 비하여 약 64%가 크게 나타났다.

이와 같이 액적의 속도 특성은 액적의 크기에 따라 다른 특성을 나타내었으며, 액적의 크기가 작을수록 전장 또는 공기유동 등의 외력에 민감하게 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

3.4 2유체 정전분무의 구조

2유체 정전분무에 있어서 공기유동의 유무에 따른 분무구조의 특성을 파악하기 위하여 액적의 수밀도(N_d) 및 산술평균입경(D_{10})의 공간적 분포를 위상도플러 계측으로 구하여 Fig. 12 및 13과 같이 나타내었다. 이때에 인가전압과 연료유량은 각각 $V_c = 5$ kV와 $Q_f = 2.5$ cm³/min으로 모두 동일하였다.

수밀도(N_d)는 위상도플러 계측에서의 측정체적과 이를 지나가는 액적의 통과시간으로부터 다음

의 식 (5)와 같이 구하였다.^(16, 17)

$$N_d = \frac{1}{T} \sum_i \left[\frac{\sum_j t(i, j)}{PV_i} \right] \quad (5)$$

여기서 i 및 j 는 각각 입경의 분류단계와 액적의 개수를 나타내며, T 는 측정시간, t 는 액적의 측정체적 통과시간, PV 는 입경의 분류단계에 따라 보정된 측정체적이다.

공기유동이 없는 정전분무만의 수밀도와 평균 입경의 공간적 분포를 Fig. 12에 나타내었다. 수밀도와 평균입경이 링전극($d_r = 6.5 \text{ mm}$) 주위를 중심으로 분포되었으며, 축방향으로 가면서 수밀도가

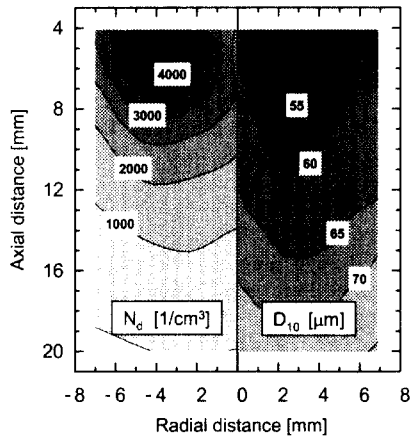


Fig. 12 Structure in electrostatic spray without airflow

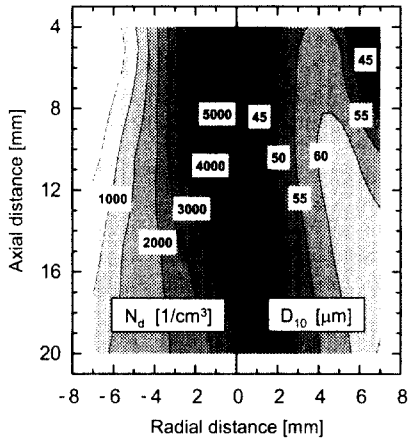


Fig. 13 Structure in electrostatic spray with airflow of $Re_a = 6240$

급격하게 감소하고 평균입경은 증가하는 분포를 나타내었다. 이는 대전된 액적들이 링전극의 인력을 받아 반경방향으로 넓게 분산되었기 때문이며, 특히 링전극 주위에 작은 액적들이 집중되어 이 부근에서 수밀도가 크고 평균입경이 작은 분포를 나타내었다고 사료된다.

Fig. 13은 공기의 레이놀즈 수가 $Re_a = 6240$ 인 조건의 2유체 정전분무의 구조를 나타내는 것으로서 이때의 공기유량은 연소시에 과잉공기비 약 1.5에 해당된다. 수밀도와 평균입경의 분포는 모두 공기유동의 영향을 받아 분무축을 중심으로 한 분포를 이루었다. 분무축에서는 수밀도가 크고 평균입경이 작았으며, 축방향으로는 완만하게 변화되었지만 반경방향으로는 크게 변화되었다. 공기유동의 영향으로 분무각이 감소되었으며 분무 도달거리는 증가되었음을 수밀도의 분포로부터 알 수 있다. 특히 Fig. 12 및 13에서 수밀도가 높은 지역에서 평균입경이 작은 경향을 나타내었다. 이는 수밀도는 작은 액적들의 공간적 분포에 크게 영향을 받았기 때문으로 사료된다.

이와 같이 본 연구의 2유체 정전분무에서는 공기유동의 유무에 따라 분무구조가 크게 변화되었다. 이는 2유체 정전분무에 있어서 공기유동이 분무구조 및 액적의 분산운동 제어에 유효한 수단이 될 수 있음을 제시하여 주었다. 분무연소의 구조와 성능은 분무각과 도달거리 등의 거시적 구조 및 수밀도 분포와 평균입경 분포 등의 미시적 구조에 의존하기 때문에 분무구조의 제어는 매우 중요한 의미를 가진다.

4. 결론

이상에서와 같이 액체연료의 2유체 정전분무에 있어서 위상 도플러 측정법을 이용하여 액체 미립화 및 분무의 특성을 실험적으로 연구하였다. 본 실험에서 연료유량의 범위는 $1.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ 에서 $2.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ 까지 이었으며, 공기의 레이놀즈 수는 최고 약 1×10^4 까지의 범위로 한정되었다. 또한 인가전압은 3 kV에서 5 kV의 범위에서 0.5 kV 단위로 증가시키면서 실험하였다.

(1) 공기의 유동이 없는 정전분무에 있어서, 생성 액적의 평균입경은 인가전압이 증가함에 따라서 크게 감소하였다. $1.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ 의 연료유량에서 인가전압이 3.0 kV에서 5.0 kV로 증가할 때 생성 액적의 SMD는 $114 \mu\text{m}$ 에서 $34 \mu\text{m}$ 로 약 70%가 작아졌다. 그러나 인가전압이 5.0 kV에 근접함에 따라 인가전압의 증가에 따른 액적의 SMD 감소율은 점차로 줄어들었으며, 연료유량이 증가함에 따

라 액적의 평균입경은 비례적으로 커지는 경향을 나타내었다.

(2) 공기의 유동이 부가된 2유체 정전분무에 있어서, 인가전압이 낮은 경우에는 공기의 레이놀즈 수가 증가됨에 따라 액적의 평균입경이 크게 작아졌다. 하지만 인가전압이 증가됨에 따라 액적의 평균입경에 미치는 공기유동의 영향은 급격히 감소되었다.

(3) 액적의 속도 특성은 액적의 크기에 따라 다르게 나타났으며, 액적의 크기가 작을수록 전장 또는 공기유동 등의 외력에 민감하게 영향을 받았다. 공기의 유동이 없는 조건에서는 전체적으로 입경이 클수록 평균속도가 증가하였지만, 공기의 레이놀즈 수가 증가함에 따라 액적의 크기가 작을수록 평균속도와 속도의 RMS값이 크게 증가하였다.

(4) 공기의 레이놀즈 수가 증가함에 따라 액적의 수밀도 분포 및 평균입경 분포 등의 분무구조가 크게 변화되었으며, 분무각은 작아졌고 분무도달거리는 증가하는 경향을 보였다.

(5) 2유체 정전분무 시스템의 액체 미립화 및 분무특성에 관한 본 연구를 통하여 정전미립화 방법으로 액체연료를 미립화하고 공기의 유동을 이용하여 액적의 분산운동을 제어할 수 있는 가능성을 보였다.

후 기

본 연구의 일부는 과학기술부 국가지정연구실 사업(NRL)의 지원을 받았으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Bailey, A. G., 1986, "The Theory and Practice of Electrostatic Spraying," *Atomization and Spray Technology*, Vol. 2, pp. 95~134.
- (2) Doyle, A., Moffett, D. R., and Vonnegut, B., 1964, "Behavior of Evaporating Electrically Charged Droplets," *J. Colloid Sci.*, Vol. 19, pp. 136~143.
- (3) Kelly, A. J., 1978, "Electrostatic Spray Theory," *J. Appl. Phys.*, Vol. 40, No. 5, pp. 2621~2628.
- (4) Kim, J. H., and Nakajima, T., 1999, "Aerodynamic Influences on Droplet Atomization in an Electrostatic Spray," *JSME Int. J., Ser. B*, Vol. 42, No. 2, pp. 224~229.
- (5) Shrimpton, J. S., 2000, "Characteristics of Unsteady Charged Sprays," *Proc. 8th Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems*, pp. 641~648.
- (6) Balachandran, W., and Kulon, J., and Wilson, C. W., 2000, "Electrostatic Fuel Nozzle for Gas Turbine Applications," *Proc. 5th Conf. of ILASS-Asia*, pp. 299~309.
- (7) Nhumaio, G. C. S., Watkins A. P., and Shrimpton, J. S., 2000, "Application of Electrostatically Charged Sprays in Gasoline Direct Injection Engines Using Plain Orifice Atomizers," *Proc. 8th Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems*, pp. 728~735.
- (8) 김혁주, 이충원, 1997, "2유체 분무노즐의 분무 특성," *대한기계학회 논문집(B)*, 제21권, 제8호, pp. 1009~1023.
- (9) Bayvel, L., and Orzechowski, Z., 1993, *Liquid Atomization*, Taylor & Francis, Ltd., London.
- (10) Mutoh, M., Kaieda, S., and Kamimura, K., 1979, "Convergence and Disintegration of Liquid Jets Induced by an Electrostatic Field," *J. Appl. Phys.*, Vol. 50, No. 5, pp. 3174~3179.
- (11) Gomez, A., and Tang, K., 1994, "Charge and Fission of Droplets in Electrostatic Sprays," *Phys. Fluids*, Vol. 6, No. 1, pp. 404~414.
- (12) Bachalo, W. D., and Houser, M.J., 1984, "Phase Doppler Spray Analyzer for Simultaneous Measurements of Drop Size and Velocity Distributions," *Opt. Eng.*, 23, pp. 583~590.
- (13) Naqwi, A.A. and Durst, F., 1991, "Light Scattering Applied to LDA and PDA Measurements", *Part. Part. Syst. Charact.*, Vol. 8, pp. 245~258.
- (14) Hayati, I., Bailey, A., and Tadros, Th. F., 1986, "Mechanism of Stable Jet Formation in Electrohydrodynamic Atomization," *Nature*, Vol. 319, No. 2, pp. 41~43.
- (15) Shraiber, A. A., Podvysotsky, A. M., and Debrovsky, V. V., 1996, "Deformation and Breakup of Droplets by Aerodynamic Forces," *Atomization and Sprays*, Vol. 6, pp. 667~692.
- (16) Domnick, J., Drust, F., Melling, A., Qiu, H.-H., Sommerfeld, M., and Zieme, M., 1993, "A New Generation of Phase Doppler Instruments for Particle Velocity, Size and Concentration Measurements," *Proc. 23rd Int. Cong. on Optical Particle Sizing*, pp. 407~414.
- (17) Kim, J. H., Ikeda, Y., and Nakajima, T., 1998, "Characteristic Measurements of Electrostatic Fuel Spray," *Proc. 9th Int. Symp. of Laser Tech. to Fluid Mech.*, pp. 21.5.1~21.5.6.