

비전도성 액체의 전하주입형 2-유체 노즐에 대한 분무 특성

박민규* · 최영주* · 김상수†

Spray Characteristics of Charge Injected 2-fluid Nozzle for Non-conducting Liquid

Min Gyu Park, Young Joo Choi and Sang Soo Kim

Key Words: Charge injection(전하주입), 2-Fluid nozzle(2-유체노즐), Spray current(분무전류), SMD(평균 체적-면적입경)

Abstract

Spray characteristics of charge injected 2-fluid nozzle for non-conducting liquid have been studied. Spray current, specific charge and SMD of diesel have been measured. Spray current and specific charge are proportional to applied voltage. Air flow did not effect on spray current and specific charge. SMD decreases as air flow rate increases and decreases as applied voltage increases additionally. Spray angle increases as applied voltage increases. Fine droplets are obtained by charge injected 2-fluid nozzle without charge loss.

1. 서 론

미립화(atomization)란 일정한 부피의 액체를 많은 수의 작은 액적들로 분산시키는 과정을 의미하며, 분산되어 있는 상태를 분무(spray)라고 한다. 액체가 미립화 되면 액체의 단위 체적 당 표면적의 비가 증가하여 분산된 액적과 주위 기체 사이의 열 및 물질 전달(증발과 응축), 그리고 화학반응(연소)이 촉진된다. 액체 분무는 실생활 주변에서 많이 찾아 볼 수 있으며, 내연기관의 연료 분사 시스템이나 코팅 등 많은 산업 분야에서 응용되고 있다. 액체를 미립화시키기 위하여는 적절한 방법이 필요하고, 이의 근본적인 개념은 액체의 표면을 증가시키기 위한 에너지를 공급하는 것으로 미립화 에너지를 공급하는 방법에 따라서 크게 압력형 분무장치, 회전형 분무장치, 2-유체 분무장치, 정전기 대전 노즐 그리

고 기타 특수한 형태의 분무 장치로 구분할 수 있다.

이 중 정전기 대전 노즐(electrostatic nozzle)이란 같은 극의 대전입자들끼리 배척하려는 전기적 특성을 이용한 것이다. 즉, 액체의 표면에 전하 입자들을 대전시키면 이에 의해 액체 내부 압력이 상승하게 되는데, 이때 이 전기적 압력은 표면장력과 평형을 이루게 된다. 만일 대전에 의한 액체 내부 압력이 표면장력보다 커지게 되면 액체는 액적으로 분열하여 미립화가 진행된다⁽¹⁾. 이러한 정전기 대전 노즐은 좁은 입경 분포를 갖는 액적들을 생성할 수 있으며, 같은 극성을 갖는 액적들은 합착이 일어나지 않고 액적들끼리 스스로 분산되는 장점을 갖고 있다. 또한 외부 전기장에 의해 액적들의 경로가 조절될 수 있는 특징을 갖기에 도장(painting), 잉크젯 프린팅(inkjet printing), 공기정화(air cleaner) 등의 산업적 응용에 사용된다. 정전기 대전 노즐에 관한 연구는 대부분 전도성 액체에 한정되어 왔다. 에탄올과 같은 전도성 액체와는 달리 경유(diesel)나 등유(kerosene)같은 비전도성 액체에는 전하 역할을 할 수 있는 이온(ion)들이 거의 없고, 액체 전기 저항이 커서 전도성 액체와 같이 전하유도(charge induction)에 의한 방법으로는 액체를

(2006년 8월 30일 접수 ~ 2006년 9월 22일 심사완료)

*한국과학기술원

†책임저자, 한국과학기술원

E-mail: sskim@kaist.ac.kr

TEL: (042)869-3061 FAX: (042)869-3095

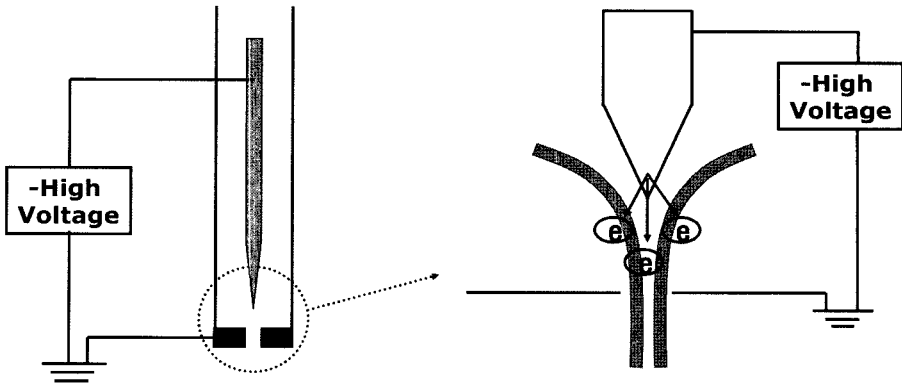


Fig. 1 Charge injection method

효과적으로 하전시킬 수 없었기 때문이다⁽²⁾. 따라서 비전도성 액체를 하전시키기 위하여 전극 침을 삽입하여 전극 침으로부터 액체로의 전하를 방전시키는 전하주입(charge injection) 방법을 이용한 연구들이 진행되어 왔다⁽³⁻⁶⁾.

전하주입 방법은 Fig. 1에서와 같이 노즐 내부에 끝이 뾰족한 전극 침을 삽입하여 전극 침과 노즐 출구 사이에 고전압을 인가시켜 전극 침과 노즐 출구 사이에 강한 전기장이 형성되도록 한다. 전극 침 끝에서 방출된 전자는 전극 침 주변을 흐르는 액체에 달라붙게 되어 액체를 하전시키게 된다. 그러나 전하주입 방법만을 이용한 분무 시스템으로는 압력형 노즐에 비해서 비교적 큰(>100 μm) 평균 분무 입경을 가진다는 한계가 있다.

연소시스템에 응용하기 위하여 미세한 액적을 생성 시키고 동시에 액적을 하전시키기 위한 분무시스템으로서, 상용되고 있는 압력형 스웰노즐(Danfoss)에 전극 침을 삽입한 형태의 하이브리드 노즐을 이용한 연구가 있었지만, 액체가 접지 극과 연결된 금속 노즐의 몸체의 작은 유로를 따라 흘러야 하기 때문에 매우 낮은 비전하량을 보여주었다(55 C/m^3)⁽⁷⁾.

2-유체 미립화 장치는 액체의 흐름에 기체를 충돌시키거나 빠른 기체의 흐름에 액체를 분사하여 액체를 미립화 시키는 장치이다. 액체와 기체가 충돌하는 위치에 따라 내부혼합형과 외부혼합형, 미립화 기체의 속도와 유량범위 등을 기준으로 공기보조(air-assist) 방식과 공기충돌(airblast)방식으로 구분한다. 또한 분무 형상에 따라 액주형성형(Plain-jet)과 액막형성형(prefilming)으로 구분할 수 있으며, 미립화 성능은 액막형성형이 뛰어나지만, 액주형성형이 구조가 간단하기 때문에 때때로 선호되기도 하고 연구가 지속되어 왔다⁽⁸⁻¹⁰⁾.

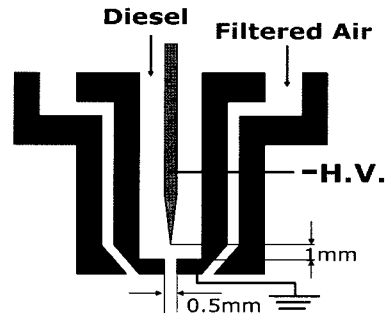


Fig. 2 Charge-injected 2-fluid nozzle

본 연구에서는 향후 연소용 노즐로 응용될 수 있도록 미세한 분무 액적을 생성하며 노즐의 구조상 전하의 손실없이 액적을 효과적으로 하전시켜 액적간의 공간분산성을 향상시킬 수 있을 것으로 예상되는 외부혼합·액주 형성형, 2-유체 미립화기에 전극 침을 삽입한 형태의 노즐(Fig. 2)을 고안하였다.

Figure 2에서와 같이 빠른 속도를 가지며 환형(Ring-shaped)의 형태로 분출되는 공기는 전극 침 주변을 지나면서 하전된 후 액주 형태로 분출되는 액체를 노즐 외부에서 충돌시켜 미립화 시킨다. 이때 전극 침에 인가한 전압과 노즐로 유입되는 공기의 유량을 변화시켜 가며 그때의 분무전류와 비전하량 그리고 SMD(평균 체적·면적입경)를 조사하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서의 실험 개략도는 Fig. 3와 같고, Fig. 4와 Fig. 5는 노즐의 실제 사진이다. 전하를 주입하기 위하

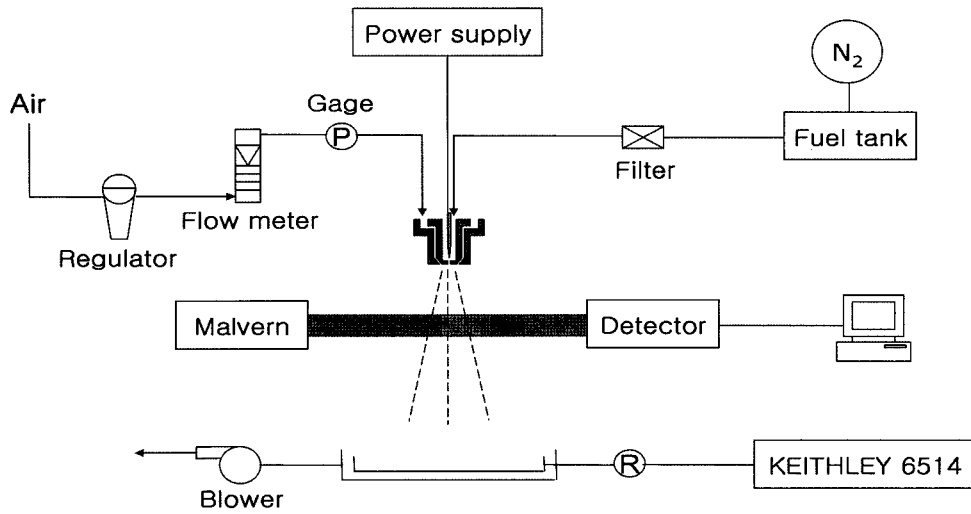


Fig. 3 Schematics of the experimental Setup

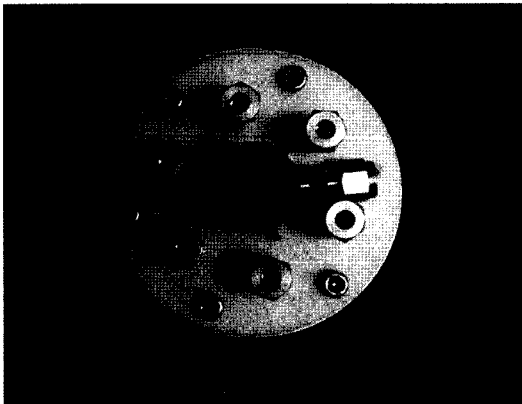


Fig. 4 The top view of nozzle

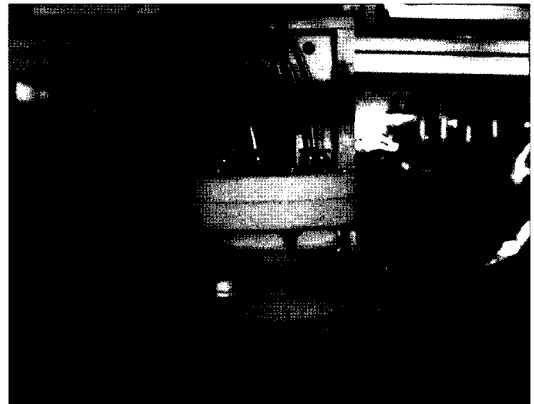


Fig. 5 The front view of nozzle

여 노즐 내부에 삽입한 전극 침으로는 텅스텐(Tungsten)을 사용하였고, 노즐의 몸체는 절연을 위하여 테플론(Teflon)을 사용하였다. 노즐 출구의 오리피스(Orifice) 직경은 0.5 mm로 하였고, 전극 침과 출구 접지 극 사이의 간격은 1 mm로 하였다. 고전압 발생장치(KSC High power supply)를 이용하여 전극 침에 음의 고전압을 인가하고, 노즐 출구의 오리피스를 접지 극으로 연결하였다. 실험용 액체로는 현재 시중에서 상용되는 디젤(SK)을 사용하였고, 연료는 연료탱크에서 질소가스의 압력에 의해 필터를 지나 노즐 내부로 유입되도록 하였다. 미립화용 공기는 레귤레이터(Regulator)와 면적식 유량계(Flow meter: Dwyer VFC132)를 지난 후 노즐로 유입되도록 하였다. 이때 노즐 내부로 유입되는 공기의 유량을 보정해주기 위하여 유량계 후단에 압력계(Pressure

gauge)를 설치 하였다.

입경 측정용 기기로는 광산란의 원리를 이용한 Malvern Particle Sizer(Model 2640LC)를 사용하였고, 레이저가 노즐 출구로부터 10 cm떨에서 분무의 중심을 지나도록 하였다. 맬번(Malvern)에 의해 측정된 데이터는 실시간으로 수광부(Detector)에 연결된 PC를 통해 확인할 수 있도록 하였다. 분무 전류를 측정하기 위하여 분무 액적이 전류계(Keithley 6514 system electrometer)와 연결된 알루미늄 허니콤(Honey Comb)과 스틸메쉬(Steel mesh)를 지나도록 하였다. 또한 분무된 액적이 역류되는 것을 방지하기 위하여 송풍기(Blower)를 설치하여 공기를 외부로 환기시켜주었다. 노즐 내부로 유입되는 연료의 유량은 0.83 ml/s로 고정시킨 상태에서 공기의 유량을 0 lpm, 122.5 lpm, 145.5 lpm 그리고 165.0

lpm으로 변화시켜 가며 분무 입경을 측정하였다. 또한 인가전압을 0 kV에서 14 kV까지 변화시켜가며, 분무 입경과 분무전류를 측정하였고, 측정된 분무전류와 연료의 공급유량을 가지고 비전하량을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

연료의 유량을 0.83 ml/s로 고정시킨 상태에서 공기의 유량을 122.5 lpm으로 조절로 유입시켰을 때와 공기를 유입시키지 않았을 때 인가전압에 따른 분무전류를 측정하여 보았다. Fig. 6의 그래프에서 보는 바와 같이 인가하는 전압이 증가할수록 분무 전류도 이에 비례하여 증가하는 것을 확인하였다. 이는 전극 칩에 인가하는 전압의 세기를 증가시키면 전극 칩에서의 전기장(electric field)의 강도가 증가하고 전기장의 강도가 커지면 전극 칩 부근에서 방출되는 전하의 양도 증가하기 때문이다. 인가전압이 5 kV미만일 경우는 전극 칩 끝에서 전자를 방출시킬 수 있을 만큼의 충분한 전기장의 세기를 형성하지 못하므로 분무 전류가 거의 측정되지 않았다. 또한 공기의 유입이 있을 때 와 없을 때의 분무전류가 거의 차이가 없음을 확인함으로써 공기의 유입에 따른 전하의 손실이 없음을 확인하였다. 공기의 유입이 없을 때 인가하는 전압이 12 kV를 넘어서면 하전된 액적이 접지 극으로 달라붙어 방울이 맺혀 떨어져서 더 이상의 분무를 할 수 없었다. 공기의 유입이 있을 경우에는 인가하는 전압이 14 kV를 넘어서면 노즐 내부에서 전극 칩과 접지 극 사이에서 스파크(Spark)가 생겨서 더 이상 전압을 올릴 수 없었다.

측정한 분무전류를 연료의 공급유량으로 나누어 줌으

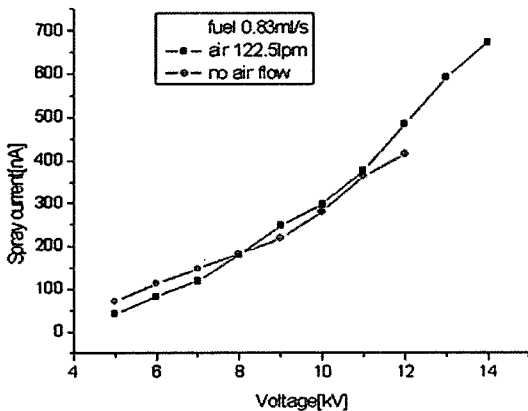


Fig. 6 Spray current

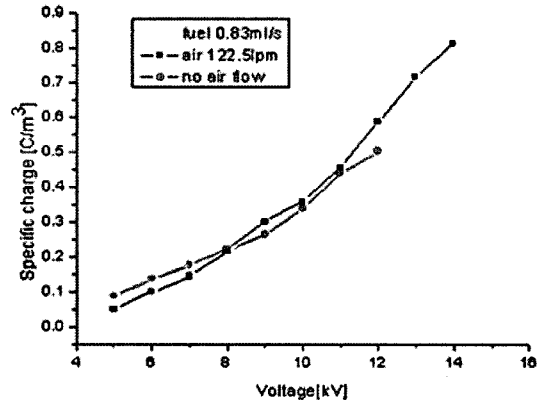


Fig. 7 Specific charge density

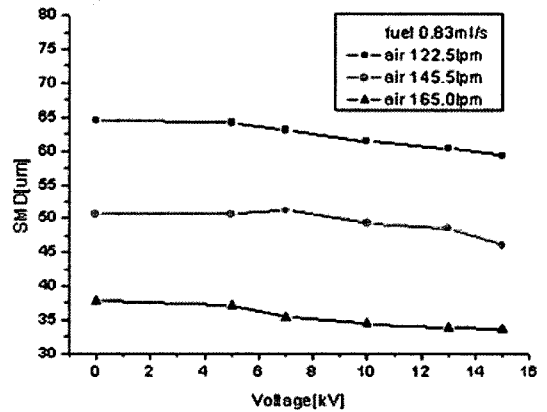


Fig. 8 SMD

로써 비전하량을 계산하여 Fig. 7에 나타내었다. 연료의 유량이 고정되어 있으므로 비전하량도 분무 전류와 마찬가지로 인가하는 전압이 증가할수록 비례하여 증가함을 확인하였다. 본 연구에서 인가 전압이 14 kV일 때 최대 0.8 C/m³의 비전하량 값을 얻었다.

마찬가지로 공급되는 연료의 유량이 0.83 ml/s일 때 조절로 유입되는 공기의 유량 변화에 따라 인가전압을 변화시켜 가며 입경을 측정하여 Fig. 8에 나타내었다. 조절로 유입되는 공기의 양이 증가할수록 미립화 에너지가 증가하기 때문에 분무 입경이 감소함을 확인하였다. 인가전압을 가하지 않았을 때, 공기의 유량이 122.5 lpm일 경우에는 SMD가 65 µm, 공기의 유량을 165.0 lpm으로 증가시켰을 경우에는 약 42% 감소한 38 µm로 감소하였음을 확인하였다. 또한 각각의 공기유량에 대하여 인가전압을 0 kV에서 15 kV로 증가시켰을 때 5~10%의 추가적인 입경의 감소가 있음을 확인 하였다.

Figure 9와 10에 공기의 유입이 없을 경우 인가전압을

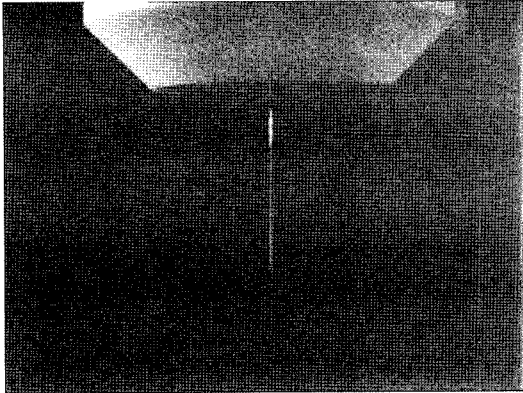


Fig. 9 0 kV with no air flow

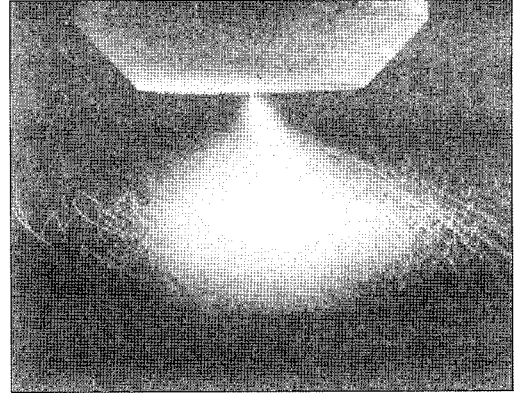


Fig. 11 5 kV with air 122.5 lpm

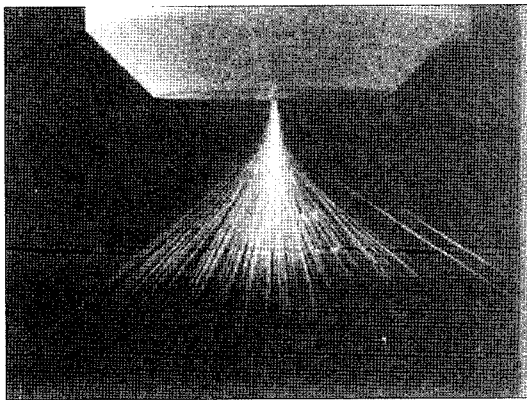


Fig. 10 10 kV with no air flow

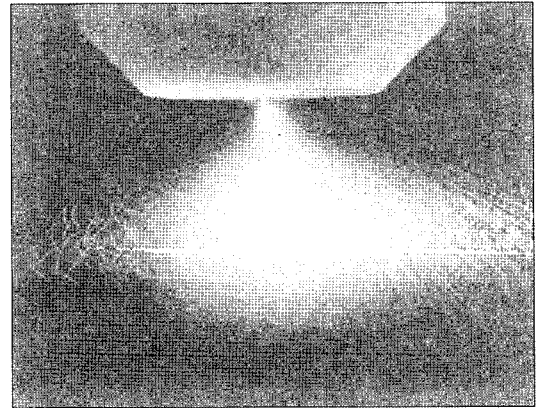


Fig. 12 10 kV with air 122.5 lpm

가지지 않았을 때와 10 kV를 가했을 때의 He-Ne레이저 시트(sheet)를 이용한 분무 가시화 사진을 각각 나타내었다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 인가전압을 가하지 않았을 때는 단순한 액주 형태로 분무가 되지만, 10 kV의 인가전압을 가하였을 때는 Fig. 10에서 보는 바와 같이 액주에서 액적으로 분열이 일어남과 동시에 전기적인 반발력에 의해 액적들이 퍼짐을 확인할 수 있었다. 디지털 카메라의 노출시간을 1 s로 하였기 때문에 액적의 궤적이 선으로 표시되었다.

Figure 11과 Fig. 12에 공기를 122.5 lpm으로 일정하게 유입시켰을 경우에 인가전압을 5 kV와 10 kV 가하였을 때의 분무 가시화 사진을 각각 나타내었다. 사진 가운데 뿌옇게 보이는 부분이 생기는 이유는 분무의 중심에 많은 수의 작은 액적들이 존재하기 때문에 레이저 시트가 지나갈 때 산란을 일으켰기 때문이다. 쓰레쉬홀드(threshold)기능을 사용한 영상 처리기법을 이용하여 분무 각을 측정하여 보았을 때 인가전압이 5 kV일 때는

분무 각이 88° 였고, 인가전압을 10 kV로 증가시켰을 때는 분무 각이 101°로 증가하였음을 확인하였다. 따라서 유입되는 공기의 유량을 고정시켰을 때 인가전압을 증가시키면 액적들 간의 전기적인 반발력이 커지기 때문에 분무 각이 증가함을 확인하였다.

4. 결 론

전하주입형 2-유체 노즐을 이용하였을 때 공기의 유입에 따른 전하의 손실이 없음을 확인하였고, 인가전압이 14 kV일 때 최대 0.8 C/m³의 비전하량 값을 얻었다.

분무입경은 인가하는 전압의 증가보다도 노즐 내부로 유입되는 공기 양의 증가에 대하여 민감하게 감소함을 확인할 수 있었다.

인가하는 전압이 증가할수록 액적들 간의 전기적인 반발력이 증가하여 분무 각이 증가하였음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 환경부 지원의 일부로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) 이상용, "액체의 미립화," 민음사, 1996, 대우학술총서 자연과학 107.
- (2) Ki Joon Lee, "An experimental study on electrohydrodynamic atomization of non-conducting liquid," 한국과학기술원 석사학위논문, 2003.
- (3) A. J. Kelly, "The electrostatic atomization of hydrocarbons," J. Inst. Energy, 1984, pp.312~320.
- (4) J. S. Shrimpton and A. J. Yule, "Atomization, combustion, and control of charged hydrocarbon sprays," Atomization and Sprays, Vol. 11, 2001, pp. 365~396.
- (5) J. S. Shrimpton and A. J. Yule, "Electrohydrodynamics of charge injection atomization: Regimes and fundamental limits," Atomization and Sprays, Vol. 13, 2003, pp. 173~190.
- (6) J. S. Shrimpton A. J. Yule, "Characterisation of charged hydrocarbon sprays for application in combustion systems," Experiments in Fluids, Vol. 26, 1999, pp. 460~469.
- (7) G. N. Laryea and S. Y. No, "Spray angle and breakup length of charge-injected electrostatic pressure-swirl nozzle," Journal of Electrostatics, Vol. 60, 2004, pp. 37~47.
- (8) N. K. Rizk and A. H. Lefebvre, "Spray characteristics of plain-jet airblast atomizers," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 106, 1984, pp. 634~638.
- (9) Ronen Harari and Eran Sher, "Optimization of a plain-jet airblast atomizer," Atomization and Sprays, Vol. 7, 1997, pp. 97~113.
- (10) R. Hadeif, K. Merkle, B. Lenze and W. Leuckel, "An experimental study of airblast atomizer spray flames," Journal of the Institute of Energy, Vol. 73, 2000, pp. 50~55.