

전기수력학적 미립화에서 액적 형성에 영향을 미치는 인자에 관한 실험적 연구

A Study on Influence Factors on Drop Formation in Electrohydrodynamic Atomization

성기안*, 이창식**

K. A. Sung, C. S. Lee

Abstract

An experimental study was performed to investigate the influence factors of drop formation in electrohydrodynamic atomization. The mode of electrohydrodynamic atomization depended on the various factors such as the flow rate of the liquid, the inner diameter of the nozzle, the distance between the nozzle tip and the ground electrode, the shape of the ground electrode, and the applied high voltage. This work was performed to investigate the experimental analysis for the flow pattern visualization of droplets, and the relationship between voltage application and the behavior of liquid atomization. Uniform drops of different sizes can be obtained at the inception of the spindle mode by changing the flow rate and the electric field. The drop size also decreased when the flow rate was raised for the spindle mode. The whipping motion occurred beyond 7kV and before the corona started to take effect.

주요기술용어(Key Words): Electrohydrodynamic(전기수력학적), Ground electrode(접지전극), Drop formation(액적형성)

1. 서론

전기 수력학적 미립화 (electrohydrodynamic atomization)는 일반적으로 외부로부터 인가된 전기력에 의한 전기장(electric field)과 유체의 상호작용에 의한 액체의 분산(dispersion of liquid)이 나타나는 현상이며, 유체의 대전 및 분열현상은 전기장과 액적의 운동량이 관련된

유체역학의 한 부분으로써 매우 흥미 있는 연구분야이다.

전기수력학적 미립화의 과정은 노즐특성, 유체의 물성 및 여러 가지 조건에 영향을 받으며, 특히 미립화의 동작모드는 국소적 전기장, 유체유량 및 유체 특성 (표면장력, 전기전도율, 점도, 밀도 등)에 크게 영향을 받는 것으로 연구되었다.^(1~4)

포텐셜 전압은 접지전극(ground electrode)과 액체가 흐르는 노즐 팁 사이에 형성되고, 노즐로부터 빠져나온 액체는 전기장에 노출되어 액

* 도립강원전문대학 기계과

** 한양대학교 기계공학부

체 표면에 전하를 유도한다. 인가전압의 증가에 따라 점진적으로 작은 액적이 발생될 수 있도록 정전기(electrostatic)와 중력은 동일방향으로 액적에 작용한다. 전기력의 합력은 액체의 적하률(dripping rate)을 증가시키며, 전기력이 충분히 높으면 액적은 분류내 표면으로부터 끌어 떨어져는 것으로 보고되었다.^(1,2)

Djurice 등⁽⁵⁾은 노즐내의 점성유동 유체에 대한 전기장 분무 및 전하 모델링을 수행하여 전기장 내의 점성 유체의 무화 특성에 대하여 연구하였고, Gabriel 등⁽⁶⁾은 정전 가압 스프 노즐의 분무 특성을 여러 가지 분무조건에 대하여 스프 노즐 분무에 미치는 정전장의 영향을 여러 가지 조건에 대하여 규명하였다.

전기수력학적 미립화 기술은 스프레이 패인팅, 농약살포, 액체급속 분무, 연료 분무, 잉크젯 프린팅, 공해 제어, 분말형성 및 필립 생성 등 다양한 분야에 응용되고 있다.

Kim 등⁽²⁾은 전기장에서 노즐 재료, 유량 조건의 변화가 액적 지름, 액적 형성 과정 등에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하여 액적 모드 및 액적 형성에 미치는 노즐 재료와 인가전압, 유량변화 등의 영향을 구하였다.

30 μ m ~ 450 μ m의 범위를 갖는 액적은 dripping, spindle 및 simple jet 모드에서 발생된다. 이들 모드는 윤활, 약제 살포, 열기관, 연소기, 도장 등 다양한 분야에 응용되고 있다. 그러나 정전 미립화 특성은 노즐 형상, 노즐 재료, 유체의 점성, 노즐의 설계 인가 전압 등 여러 가지 인자의 영향을 받으므로 이들 인자의 영향에 대한 더욱 체계적인 연구가 요망된다.

그러므로, 본 연구에서는 전기수력학적 미립화의 여러 가지 액적 형성 모드를 분석하기 위해 노즐 내경, 액체유량 및 인가 전압 등의 여러 가지 인자의 영향을 실험적으로 구하였다. 그리고 액적 형성 모드의 형성 과정에 미치는 인가 전압과 유량과의 관계, 액주 길이, 유량과 휘핑모션 등을 실험적으로 구하여 전기장에서 액적 형성 모드 특성을 규명하였다.

2. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치의 개략도는 Fig. 1 과 같이 구성하였다. 이 장치는 기본적으로 액체 공급 펌프, 고전압 인가 장치, 노즐, 증렌즈 부착 CCD 카메라 및 영상분석용 PC로 되어 있다.

액체 공급 펌프는 액체 시료를 0.7 ~ 58 ml/min 범위에서 정밀하고 일정한 유량을 공급하며, 노즐 끝과 접지전극 사이에 고전압을 인가하기 위해 교류 고전압 공급기 (최대전압 7.6 kV, 최대전류 10mA)를 사용하였다. 노즐의 재료는 스테인레스 강이며 끝 부분이 연마된 내경 0.20mm, 0.25mm 및 내경 0.33mm의 크기를 각각 사용하였다. CCD 카메라는 10배 마이크로 증렌즈를 장착했으며 발광 단속 주기 (2~20Hz)를 갖는 스트로브와 함께 액적 분열의 가시화 영상을 얻었다. 영상획득 장비는 PC 내부에 장착된 프레임 그래버(National Instruments, PCI-1411)를 사용하였으며, 획득된 영상의 분해능은 768×493이다. 디지털 영상은 영상해석 소프트웨어(IMAQ vision builder)를 사용하여 획득된 영상으로부터 액적 분열 과정의 자료를 산출하는데 사용되었다.

동일한 인가 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 충돌할 수 있으며, 또한 분열된 액적을 응용 분야에 적용하는데 어려워질 수 있다. 따라서, 적절한 전기장을 형성하고 액적과 접지전극 사이의 충돌을 방지하며 알맞은 미립화를 얻기 위해 링형 접지전극 도입 및 적절한 거리가 필요하다.

본 실험장치에 적용된 노즐 끝은 접지전극을 기준으로 수직하게 8mm 위에 놓여 있다. 접지전극의 재료는 구리이고 내경이 11mm인 반지형이며, 중심위치에서 액체 분류 및 액적 동이 통과한다. 전기수력학적 미립화 액적 분열 과정은 유량범위 0.7 ~ 5.0ml/min의 유속에서 관찰되었으며, 사용된 액체 시료는 증류수이며,

노즐 끝과 접지전극 사이에 인가된 전압은 액체의 분류가 비정규적으로 흩어질 때까지 점진적으로 공급하였다.

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

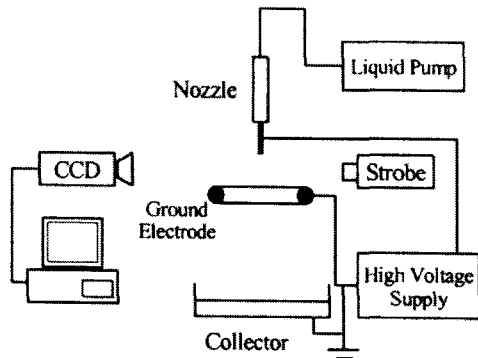


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

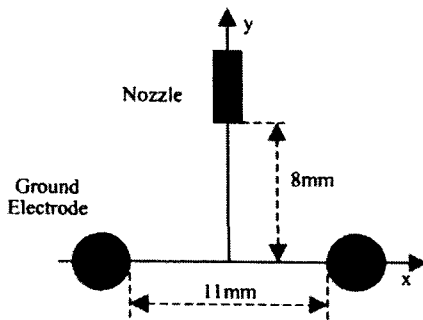


Fig. 2 Configuration of nozzle and ring ground electrode

전기수력학적 미립화의 분무의 해석은 입자 이미지를 이용한 영상획득기법이 분무 패턴의 가시화 및 장비구성 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. 선택된 프레임은 프레임그래버에 의해

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

본 연구에 적용된 액체 시료의 물성 및 시험 인자들이 Table 1에 게재하였다. 적용 액체 시료는 증류수를 사용하였다.

Table 1 Liquid properties and experimental parameters

Parameter	Range
Fluid conductivity σ [Ωm] ⁻¹	$2\sim 4 \times 10^{-4}$
Surface tension γ [N/m]	0.073
Density ρ [kg/m^3]	1000
Viscosity η [Ns/m^2]	0.0013
Inner diameter of nozzle [mm]	0.33@23gage 0.25@25gage 0.20@27gage
Flow rate [ml/min]	0.7~5.0
Inner diameter of ground electrode [mm]	11
Electrode distance [mm]	8
Power supply [kV]	0~7

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 액적 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)

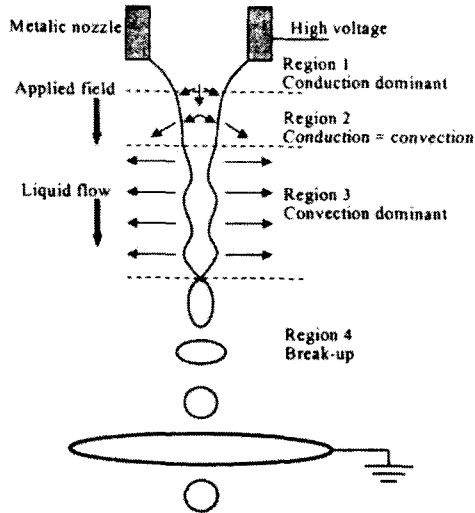
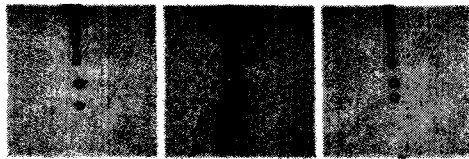


Fig. 3 Electric field directions and dominant current regions

이러한 결과는 Fig. 4에 보여주며 Fig. 4(a), Fig. 4(b) 및 Fig. 4(c)는 2.0ml/min (5kV), 2.7ml/min (3kV) 및 2.7ml/min (4kV)일 경우 각각의 결과를 보여준다.



(a)2.0ml/min(5kV) (b)2.7ml/min(3kV) (c)2.7ml/min(4kV)

Fig. 4 Flow pattern results for jet dominant

인가된 전기력의 종류 및 세기에 따라, 전기장 유도 운동은 접촉면의 변형을 불러일으킨다. 실험에 사용된 전기력의 종류는 교류 전기장이며 외부적으로 액체 시료에 인가된다. 액체에 인가된 교류 전기장에 의해 발생된 일반적인 동적 효과는 여러 종류가 있다. 분류와 액

적 형성에서 특정한 동적 거동을 일으키는 인자들의 효과 및 교류 전기장의 효과들이 여러 가지 시험 조건에서 고찰되었다.

전기수력학적 마립화의 분무 모드들은 액막의 표면에서 전기력 작용의 크기와 노즐을 통과하는 액체 분류의 운동에너지에 관련되어 있으며, 전기력이 액체 분열의 동일 방향에 작용할 때 적하 현상은 가속된다.⁽⁴⁾ 전기력의 세기 및 액체 유량에 따라 dripping, spindle, simple jet 및 ramified jets 등 여러 가지 개괄적 분무 모드가 발생된다⁽⁵⁾.

Fig. 5는 Cloupeau와 Prunet-Forch⁽⁷⁾의 연구 결과와 본 실험 결과의 비교를 나타낸 것이다.

Mode	Cloupeau and Prunet-Foch[5]	Current experiments
Dripping		
Spindle		
Simple jet		
Ramified jet		

Fig. 5. Comparison of Cloupeau and Prunet - Forch with current experiments

Fig. 6은 지름 0.25mm인 노즐에 대한, 인가 전압 및 액체 유량에 따른 액주(liquid column)의 길이 변화를 나타낸 것이다. 1.2ml/min의 유량 조건에 경우, dripping 모드에서 액적은 상대적으로 노즐의 외경보다 크고 중력에 의해 노즐 끝에 매달리거나 떨어지며, spindle 모드에서 노즐의 외경에 비해 작은 액주가 형성되

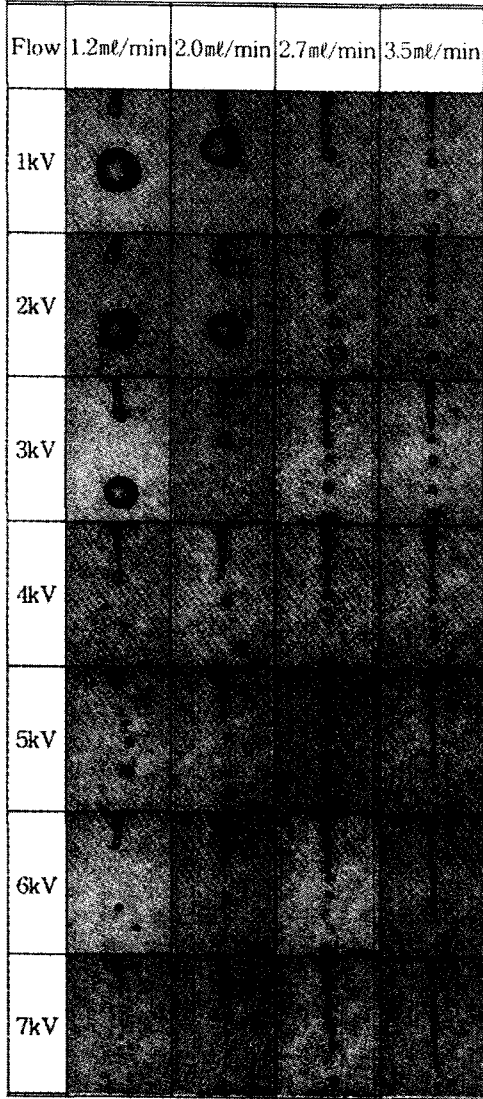


Fig. 6 Variation of length of liquid column with flow rate and applied voltage (d=0.25mm)

어 끊어지는 현상이 나타난다. 7kV 이상에서는 whipping 운동이 일어나며, 액주는 노즐 끝에서 끊어지고 액주의 길이가 길어지는 현상을 보였다. 2.0ml/min, 2.7ml/min 과 3.5ml/min의 유량 조건에 대해, 액주의 길이는 인가 전압이 증가함에 비례하여 증가하고, 전기수력학적 미립화는 4kV부터 발생함을 보이고 있다. 다른 크기의 균질한 액적은 유도된 유량 및 전기장에 의해 spindle 모드의 시초에서 발생하며⁽¹⁾,

spindle 모드에서 유량이 증가되면 액적의 크기는 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 7은 지름 0.33mm인 노즐의 경우 유량 1.2ml/min, 인가전압 7kV 조건에서 코로나 방전 현상을 나타낸 것이다. 코로나 방전은 노즐 내경 및 공급 유량에 무관하게 대략 7kV 인가 전압 이상에서 가끔씩 발생되었으며, 방전 과정에서 방전음이 발생되고 백열광이 관측되었다.

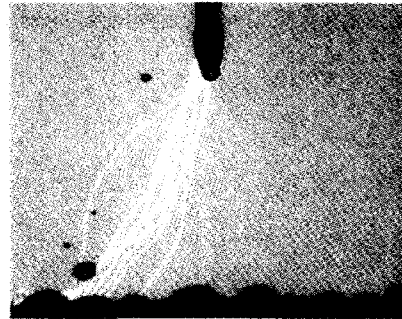


Fig. 7 Corona phenomenon (1.2ml/min, d=0.33mm, 7kV)

Fig. 8은 유량과 인가 전압의 변화에 따른 분무 모드의 변화 영역을 보여준다. simple jet 모드는 대략 5kV부터 발생하고, spindle 모드 영역은 dripping 모드와 simple jet 모드 사이에 존재하는 경향을 보였다.

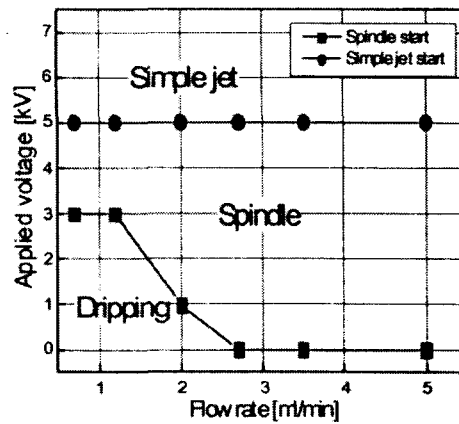


Fig. 8 Classification of disintegration mode

Fig. 9와 Fig. 10은 지름 0.20mm, 0.25mm, 0.33mm인 노즐에 대해 액주의 길이와 액적의 평균 반지름의 실험적 분포를 나타낸다. 일반적인 경향은 인가 전압이 증가할수록 액주의 길이는 증가되지만 액적의 평균 반지름은 감소한다.⁽¹⁾ 그렇지만, 액주의 길이는 인가 전압 6kV에서 최대가 된 후 약간 감소함을 보였다.

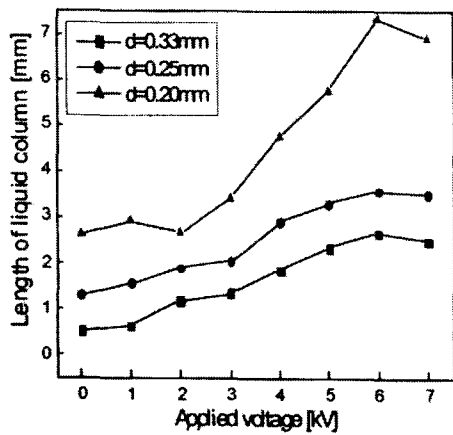


Fig. 9 Effect of liquid flow rate on the length of liquid column

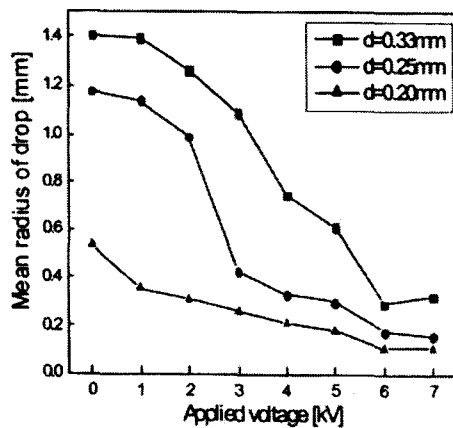
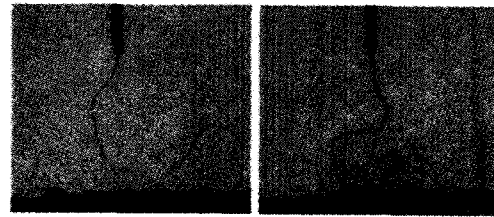


Fig. 10 Effect of liquid flow rate on the mean radius of a drop

Fig. 11은 노즐지름 0.25mm이고, 7kV 인가 전압 및 유량 1.2ml/min, 2.0ml/min인 각각의 조건에서 whipping 운동을 보여준다.



(a)1.2ml/min,7kV,d=25mm (b)2.0ml/min,7kV,d=25mm

Fig. 11 Whipping motion phenomenon

Whipping 운동의 정도는 인가 전압의 세기와 사용된 작업 유체의 물성에 따라 영향을 받는다고 알려져 있다.^(1,8) 증류수의 whipping 운동은 인가 전압이 증가할 때 발생되었으며 비연속적 지그재그 형태를 보였다.

전기수력학적 미립화에서 전반적인 경향은 유량의 증가는 액적의 크기가 감소됨을 보였고,^(1,6,9) 인가 전압 7kV에서 whipping 운동이 더 활발해지는 경향을 보였다.

4. 결론

노즐 내경, 액체유량 및 인가 전압 같은 실험적 인자가 전기수력학적 미립화의 액적 분열에 미치는 영향을 살펴보았으며 액체 시료로써 증류수가 사용되었다. 전기수력학적 미립화 시험장치를 제작하여 액적 분열 거동을 가시화 및 영상을 획득하였으며 영상 처리를 통한 실험적 해석 기법으로 액적에 관련된 자료를 산출하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) dripping 모드에서 액적은 상대적으로 노즐의 외경 보다 크고 중력에 의해 노즐 끝에 매달리거나 떨어지며, spindle 모드에서 노즐의 외경에 비해 작은 액주가 형성되어 끊어지는 현상이 나타난다. 7kV 이상에서는 whipping 운동이 일어나며, 액주는 노즐 끝에서 끊어지고 액주의 길이가 길어지는 현상을 보였다.

(2) 액주의 길이는 인가 전압이 증가함에 비례하여 증가하고, 전기수력학적 미립화는 4kV 부터 발생함을 보이고 있다. 다른 크기의 균질한 액적은 유도된 유량 및 전기장에 의해

spindle 모드의 시초에서 발생하며, spindle 모드에서 유량이 증가되면 액적의 크기는 감소하는 경향을 보였다.

(3) 인가 전압이 증가할수록 액주의 길이는 증가되지만 액적의 평균 반지름은 감소한다. 그러나 액주의 길이는 인가 전압 6kV에서 최대가 된 후 약간 감소함을 보였다.

후기

이 논문은 2002년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2002-042-D00025)

참고문헌

1. Zayed 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. Myoung C. Kim, and Sang 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. Z. Djuric, W. Balachandran, and C. Wilson, "Electrical field and space charge modeling in a viscous fluid flow in a nozzle", J. Phys. D, Vol. 31, pp. 2132-2144, 1998.
6. Gabriel Nii Laryen, Tae-Gyoung Kang and Soo-young No, "Spray characteristics of electrostatic pressure-swirl nozzle", Proc. of ILASS-Asia 2001, pp. 223-228, 2001.
7. M. Cloupeau, and B. Prunet-Foch, "Electrostatic spraying of liquids: main functioning modes", J. Electrostatics, Vol. 25, pp. 165-184, 1990.
8. H. Magarvey, and E. Outhous, "Note on the breakup of a charged liquid jet", J. Fluid Mech., Vol. 13, pp 151-157, 1962.
9. C. S. Lee, K. H. Lee, M. S. Chon, and D. S. Kim, "Spray structure and characteristics of high-pressure gasoline injectors for direct-injection engine applications", Atomization and Sprays, vol. 11, pp. 35-48, 2001.