

연료온도변화가 분무특성에 미치는 영향

박병성* · 김호영** · 정진택**

The Influence of Fuel Temperature on the Spray Characteristics

Park Byung Sung, Kim Ho Young and Chung Jin Taek

ABSTRACT

An experimental study is conducted to investigate the effects of fuel temperature on the spray characteristics of a dual-orifice type swirl injector which is used in gas turbines. The major parameters affecting spray characteristics are fuel temperature and injection pressure entering into the injector. Fuel temperature is shown to have strong influence on the spray characteristics especially at a lower temperature. In this study, fuel temperature is varied from 30°C to 120°C and injection pressure is altered from 3 to 7 kg_f/cm². Two kinds of fuel, which have different surface tension and viscosity, are chosen as an atomizing fluid. As a result, injection instability occurs in the low temperature range due to icing phenomenon and the change of fuel properties. As the injection pressure increases, the kinematic viscosity range for stable atomization becomes wider. The factor controlling the SMD of spray is substantially different depending on the fuel temperature range.

Key Words : Spray, Fuel temperature, Equivalent spray angle, SMD

기 호 설 명

Φ Equivalent spray angle

θ angle from center of nozzle to hole
in patternator

R right-side

L left-side

y each volume in mass cylinder

1. 서 론

대다수의 동력기관, 특히 항공기의 가스터빈, 로켓 엔진들은 그것들이 사용되는 장소나 기후조건에 의해 연소실로 주입되는 연료의 온도가 광범위하게 변하게 된다. 특히, 혹한지에서 사용되는 경우 연료의 분무특성은 상온에서와는 매우 다르게 되고, 이로 인하여 연소효율의 변화가 심하게 나타난다. [1]

분무액적의 크기분포, 체적분포, 분무각 등 인젝터의 분무특성은 가스터빈의 연소성능에 중요

한 영향을 미치게 된다. 특히, 액적의 크기는 액적의 증발과 연료의 혼합, 연소로 이어지는 과정에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 연소성능을 결정하는 중요한 인자중의 하나이다. [1,2,3]

Datta et al.[2]은 가스터빈 연소기에서 연소효율은 초기 액적의 크기(SMD)와 분산각에 의해 크게 영향을 받았고, 이것들은 출구 온도분포에도 크게 영향을 미친다고 보고하였다.

Jasuja[3]는 kerosene, gas oil, heavy residual oil의 조합을 이용한 연료 물성치 변화가 분무특성에 미치는 영향을 알아보았다. 기존의 SMD 실험식은 연료의 점도가 큰 경우 상당한 오차를 보이며, 연료의 점도에 따라서 SMD에 미치는 점도의 영향이 달라진다고 보고하였다.

* 고려대학교 대학원 기계공학과

† poet0921@korea.ac.kr, 02-3290-3752

** 고려대학교 기계공학과

Simmons et al.[4]은 물과 kerosene을 이용하여 실험한 결과, SMD 차이는 밀도보다는 표면장력의 영향으로 기인하다고 보고하였다.

Dodge et al.[5]은 SMD에 미치는 점도의 영향이 표면장력의 영향보다 지배적이라고 보고하였다.

그러나, Kennedy[6]는 SMD 측정결과에서 표면장력의 영향은 선형적으로 나타나는 반면 점도의 영향은 나타나지 않는다고 보고하였다.

대부분의 기존 연구결과를 보면, 액체의 물성치 중 점도의 영향이 가장 크고, 표면장력의 영향을 그 다음으로 언급하는 경우가 많다. [1,3,4,5] 그리고, 밀도의 영향은 일반적으로 영향이 적다고 보고된다. [1,4]

저온 영역에서는 연료의 온도변화로 인한 물성치 변화가 분무특성에 중대한 영향을 미치기 때문에 안정된 점화 및 연소를 위하여 액적의 크기, 질량분포 및 분산각의 정확한 이해를 필요로 한다. [1] 그러나 기존의 연구는 대부분이 서로 다른 연료를 사용하거나 두가지 연료를 혼합하여 물성치 변화에 대한 연구를 하였고, 온도변화로 인한 물성치 변화에 대한 연구는 미미하다. [1,3,4,6] 따라서 본 실험에서는 연료의 온도를 변화시켰을 때, 연료 물성치 변화와 분사압력 변화로 인하여 나타나는 분무특성의 변화를 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구의 실험장치 개략도이다. 질소 가스로 가압된 연료는 탱크로부터 온도조절기에 장착된 열교환기로 공급되고, 실험온도로 변환된 연료는 인젝터로 공급되어 대기압 하에서 분무된다. 인젝터는 가스터빈에 사용되는 이중 오리피스 와류형 인젝터를 사용하였다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 인젝터의 형상을 나타낸다. 연료는 kerosene 계열의 Fuel A와 Fuel B를 사용하였다. 연료 온도 범위는 $-30^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ 이고, 분사압력 범위는 $3\text{kg}/\text{cm}^2 \sim 7\text{kg}/\text{cm}^2$ 이다. Fig. 3은 온도변화에 따른 연료의 물성치를 나타낸다. 온도가 증가함에 따라 Fuel A와 Fuel B의 표면장력은 선형적으로 감소하는 반면에 이들의 동점도는 저온영역에서는 급격히 감소하다가 상온 이후로부터는 서서히 감소한다. Fuel B의 동점도와 표면장력이 Fuel A보다 매우 크다.

Malvern Particle Analyzer를 이용하여 SMD를 측정하였고, CCD 카메라를 이용하여 분무 영

상을 측정하여 분산각을 측정하였다. 체적분포는 1-D patternator를 이용하여 측정하였다.

각 운용변수의 변화가 체적분포에 미치는 영향을 보다 효과적으로 나타내기 위해 등가분무각을 도입하였다. [1] 등가분무각은 반경방향 체적분포를 단일 숫자로 나타낸다. 등가분무각은 좌우측 등가분무각의 합으로 정의되며, 아래의 식(1)로써 표현된다.

$$\phi_L(\text{or } \phi_R) = \frac{\sum y\theta\Delta\theta\sin\theta}{\sum y\Delta\theta\sin\theta} \quad (1)$$

여기서 $\Delta\theta$ 는 포집셀간의 각을 나타낸다. y 는 각 셀에서의 체적을 나타낸다. 등가분무각의 물리적인 의미는 체적분포의 좌측(또는 우측)의 질량중심의 위치를 각도로 표현하는 것이다.

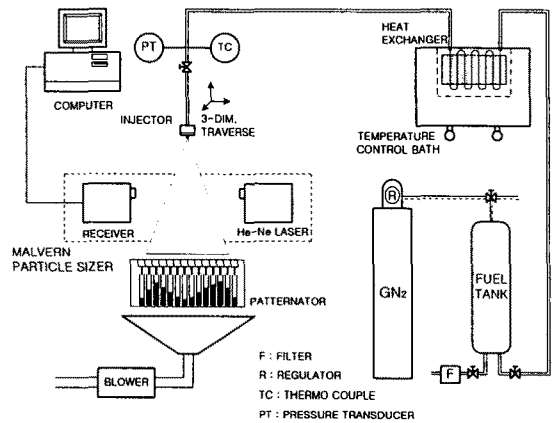
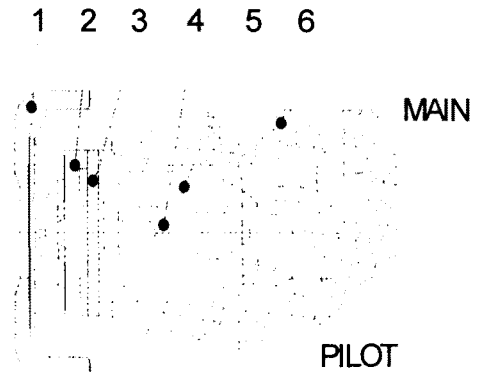


Fig. 1 Schematics of test setup.



- ① main nozzle ② pilot nozzle ③ pilot swirler
- ④ pilot filter ⑤ main filter ⑥ case and tube

Fig. 2 Schematics of injector

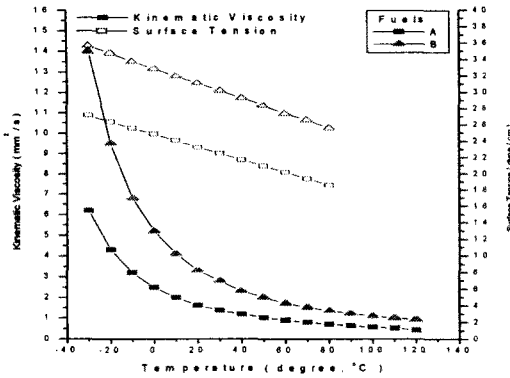


Fig. 3 Properties of Fuel A and B versus temperature.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 본 연구에 사용된 인젝터의 연료 온도변화에 따른 유량계수의 영향을 나타낸 그래프이다. 일반적으로 와류형 인젝터의 유량계수는 air-core 가 존재함으로 인하여 매우 작다. [1] Main nozzle의 유량계수는 0.06으로 거의 일정하며, Pilot nozzle의 유량계수는 저온영역에서 연료 온도가 증가함에 따라 감소하다가 0.37로 수렴한다. 이는 Pilot nozzle의 오리피스 면적이 Main nozzle의 오리피스 면적보다 매우 작기 때문에 Pilot nozzle의 유량계수가 Main nozzle의 유량계수보다 점성의 영향을 크게 받는 것으로 생각된다.

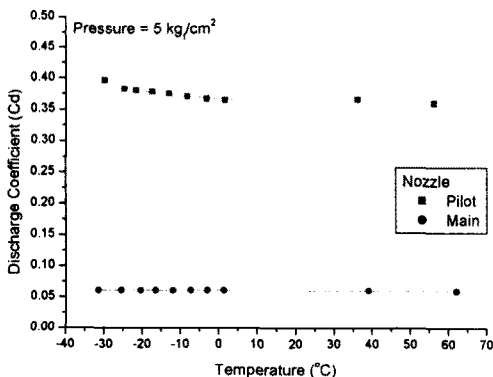


Fig. 4 Effect of Fuel temperature on discharge coefficient for Pilot and Main nozzles.

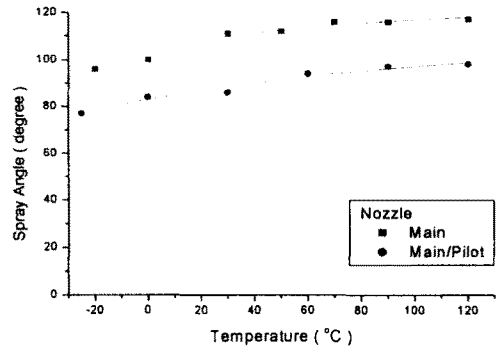


Fig. 5 Effect of Fuel temperature on spray angle for Main and Main/Pilot nozzles. (Fuel A, P=5kg/cm²)

Fig. 5는 연료 온도변화에 따른 Main nozzle과 Main/Pilot nozzles의 분산각에 미치는 영향을 나타낸 그래프이다. 연료온도가 증가함에 따라 점도가 감소하기 때문에 Main nozzle과 Main/Pilot nozzles 각각의 분산각이 서서히 증가한다. 속도구배에 의한 마찰력은 접선방향 속도성분을 감소시키는 경향이 있기 때문에 점도감소로 인한 마찰손실의 감소는 분산각의 증가를 야기시킨다. [1] Main/Pilot nozzles 동시분무의 경우, Pilot nozzle로부터 분출된 유동이 Main nozzle로부터 분출된 유동과 충돌을 일으키며 원뿔형 분무를 형성한다. Pilot nozzle로부터 분사된 유동의 회전 모멘텀(rotational momentum)이 Main nozzle의 것보다 작기 때문에 Main/Pilot nozzles 동시분무의 분산각이 Main nozzle의 분산각보다 작다.

Figs. 6은 Fuel A 연료 온도변화에 따른 Main/Pilot nozzles 분무의 체적분포와 SMD 분포를 나타낸다. Fig. 6 (a)에서 연료 온도가 증가함에 따라 최대 채집셀의 위치가 중앙에서 바깥 방향으로 이동하고, 최대 채집량은 서서히 감소한다. Fig. 6 (b)에서 연료 온도가 증가함에 따라 SMD는 감소한다. SMD 최대값의 위치와 Fig. 6 (a)의 최대 채집셀의 위치가 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 연료의 온도변화에 따른 Main/Pilot nozzles 분무의 등가분무각의 변화를 나타낸다. 연료 온도가 증가함에 따라 저온영역에서 등가분무각은 증가하다가 거의 일정한 값을 나타낸다. 고온영역에서는 액적의 증발률이 증가하여 액적의 침투깊이가 작아지기 때문에 고온영역에서 등가분무각은 일정한 값을 갖는 것으로 생각된다.

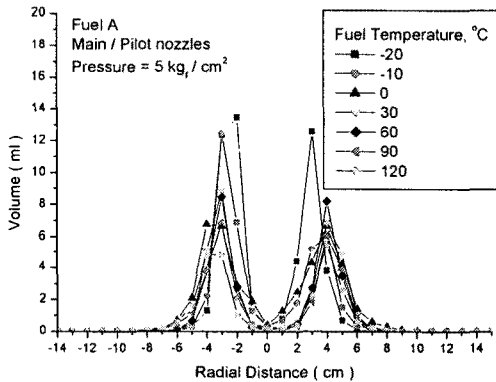
Fig. 8은 연료 온도변화에 따른 Main nozzle의 SMD 분포를 나타낸다. 연료 온도에 의해 확연

하계 두개의 SMD 그룹으로 나뉠을 알 수 있다. 고온영역과 비교하면, 저온영역에서는 SMD 값이 비교적 크며, 분포의 변화가 심하다. Fig. 3에서 동점도는 저온영역에서 급격하게 감소하며, 고온영역으로 갈수록 서서히 감소하는 반면에 표면장력은 전 온도범위 내에서 선형적으로 감소한다. 그러므로 분무특성, 특히 SMD는 저온영역에서는 표면장력보다는 동점성에 의해 크게 영향을 받으며, 고온 영역에서는 표면장력의 영향이 크게 나타나는 것으로 생각된다. 이는 Jasuja[3]의 결과와도 잘 일치한다.

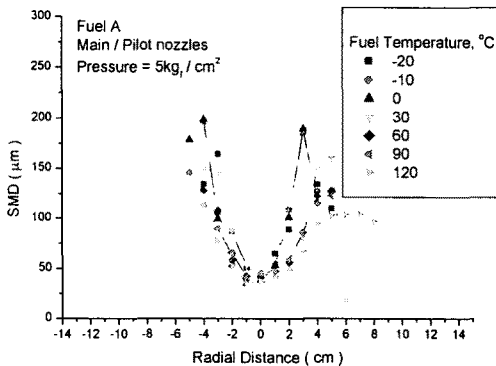
실험결과를 바탕으로 주 유동영역에서의 SMD 관계식을 얻었으며, 다음과 같다.

$$SMD = 111.2745\sigma^{0.2125} \nu^{0.3313} \Delta P^{-0.4203} \quad (2)$$

본 식은 연료 온도변화로 인한 연료 물성치 변화를 고려한 결과임을 밝혀둔다.



(a) volume distribution



(b) SMD distribution

Fig. 6 Radial distributions of volume distribution and SMD at various Fuel temperatures.

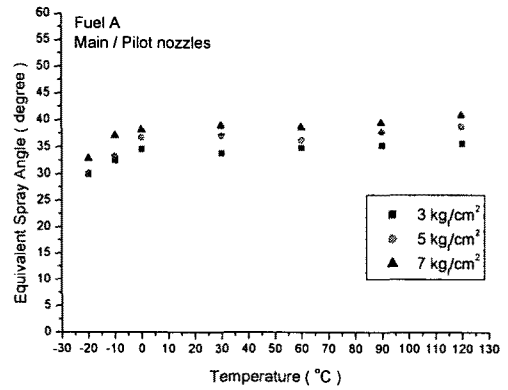


Fig. 7 Effect of Fuel temperature on equivalent spray angle.

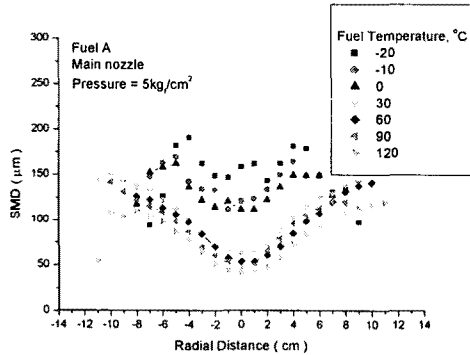


Fig. 8 Radial distributions of SMD at various Fuel temperatures.

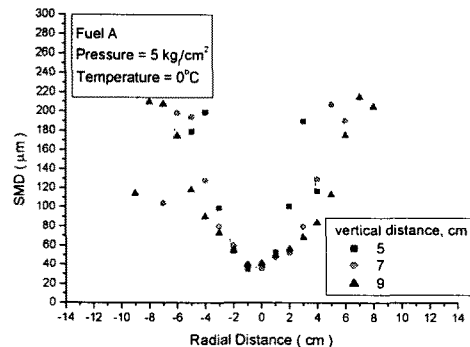


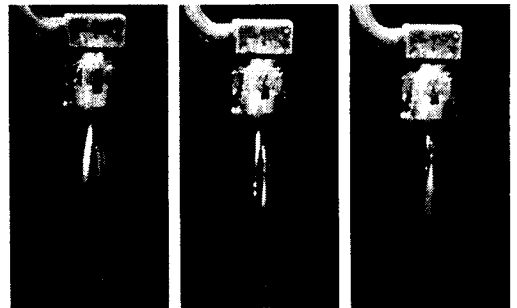
Fig. 9 Radial distributions of SMD at various vertical distance from injector tip.

Fig. 9는 측정 위치변화에 따른 Main/Pilot nozzle의 SMD 분포를 나타낸다. 분무가 인젝터로부터 하류방향으로 진행함에 따라 분무영역이 넓게 증가하며, SMD 최대값의 위치가 중심에서 바깥방향으로 이동한다. 또한 SMD 최대값이 점차 증가한다. 분류가 하류방향으로 내려감에 따라 증발이 이루어져 액적의 크기가 작아지지만 주 유동영역에는 큰 액적들이 주로 존재하기 때문에 SMD가 큰 쪽으로 가중된 값을 나타낸다.[5] 작은 액적은 큰 액적보다 빨리 증발한다.

Fig. 10은 -10°C Fuel B를 Main 노즐을 통하여 분무할 때, 시간에 따른 분무영상을 나타낸다. 분무 초기에는 tulip stage의 분무전개(spray development)를 보이며, 시간이 경과함에 따라 onion stage를 거쳐 결국 분무는 매우 불안정하게 된다.

Fig. 11은 -10°C Fuel B를 Main 노즐을 통하여 분무할 때, 분사압력에 따른 분무영상을 나타낸다. 전 분사압력 범위에서 onion stage의 분무전개를 보인다. 그러나 이것 역시 시간이 지남에 따라 점차 분무가 불안정하게 되며, 결국 분사가 되지 않는 단계에 이르게 된다. 압력이 증가함에 따라 분사가 정지되는데 소요되는 시간이 길어진다. 인젝터의 오리피스 부근의 표면에서 얼음결정을 발견할 수 있었다. Kim et al.[8]은 액체 LPG 인젝터 시스템의 실험에서 얼음결정으로 노즐 출구의 막힘현상은 발견되지 않았으나 노즐 출구의 일부가 얼음결정으로 덮였다고 보고하였다.

Fuel B의 분무가 저온에서는 매우 불안정한 반면에 Fuel A의 경우, 전 온도범위($-30^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$) 내에서 안정된 분무를 얻을 수 있었다. Figs. 12는 Fuel A와 Fuel B에 대한 분사 불안정성 지도(Injection Instability Maps)를 나타낸다. 빗금 친 영역은 Fuel B의 분사가 안정된 영역과 불안정한 영역 사이의 과도영역(transient region)이다. 분사압력이 낮은 경우, 낮은 점도에서만 안정된 분사가 이루어진다. 분사압력이 증가함에 따라 안정된 분무가 이루어지는 점도 영역은 점차 넓어진다. Fig. 12 (b)는 표면장력이 일정할 때 분사압력이 증가함에 따라 안정된 분무 영역이 증가함을 나타낸다. 또한, 표면장력이 매우 큰 경우, 분무는 불안정 하거나 분사가 정지되는 경우도 있다. Fig. 2에서 보는바와 같이 Fuel A의 표면장력과 동점도는 Fuel B에 비하여 매우 작기 때문에 Fuel A는 저온영역에서도 안정된 분무가 이루어지는 것으로 생각된다.



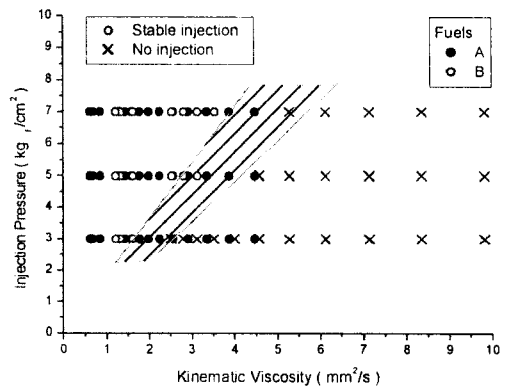
(a) $t=1 \text{ sec}$ (b) $t=5 \text{ sec}$ (c) $t=15 \text{ sec}$

Fig. 10 Direct spray images of Fuel B injecting from Main nozzle at $P=7\text{kg}/\text{cm}^2$ and $T=-10^{\circ}\text{C}$.



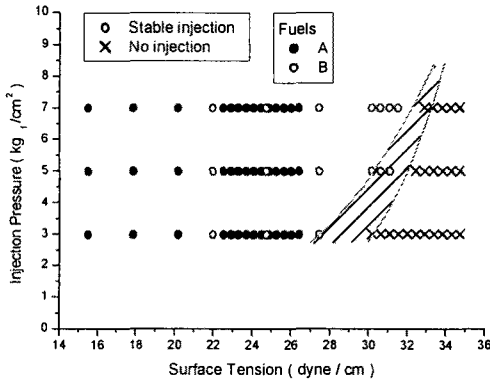
(a) $P=3\text{kg}/\text{cm}^2$ (b) $P=5\text{kg}/\text{cm}^2$ (c) $P=7\text{kg}/\text{cm}^2$

Fig. 11 Direct spray images of Fuel B injecting from Main nozzle at various injection pressures with $T=-10^{\circ}\text{C}$.



(a) kinematic viscosity-injection pressure

Fig. 12 Injection instability maps for Fuel A and Fuel B



(b) surface tension-injection pressure

Fig. 12 Injection instability maps for Fuel A and Fuel B (continued)

4. 결론

본 연구는 가스터빈 엔진에 사용되는 이중 오리피스 와류형 인젝터를 사용하여 연료 온도변화와 분사압력변화가 분무특성에 미치는 영향을 실험적으로 알아보았다. 표면장력과 동점도가 확연히 차이를 보이는 두 가지의 연료를 이용하였다. Fuel A와 Fuel B의 영상촬영을 통하여 분사 불안정성을 가시화하였다. 여러 가지 조건하에서 유량계수, 분산각, 체적분포, SMD를 측정하였다. 결과로서, Fuel B Main nozzle의 분사는 저온영역에서 불안정하다. 이는 얼음결정(icing phenomenon), 표면장력과 점도의 증가로 인한 것이다. 추가적으로 분사압력이 증가함에 따라 안정된 분무를 얻을 수 있는 영역이 증가한다. SMD는 저온영역에서 표면장력의 영향보다 동점도의 영향이 크며, 고온영역에서는 표면장력의 영향이 컸다. 추가적으로 연료 온도변화로 인한 물성치 변화의 영향을 고려한 SMD 관계식을 도출했다.

$$SMD = 111.2745 \sigma^{0.2125} \nu^{0.3313} \Delta P^{-0.4203}$$

참고문헌

[1] A. H. Lefebvre, "Atomization and sprays", Taylor & Francis, 1989.
 [2] A. Datta, S. K. Som, "Effects of spray

characteristics on combustion performance of a liquid fuel spray in a gas turbine combustor", Int. J. Energy Res., 23, pp.217-228, 1999.
 [3] A. K. Jasuja, "Atomization of crude and residual fuel oils", J. Eng. Power vol. 101, pp.250-258, 1979.
 [4] H. C. Simmons, C. F. Harding, "Some effects of using water as a test fluid in fuel nozzle spray analysis", J. Eng. Power vol. 103, pp.118-123, 1981.
 [5] L. G. Dodge, J. A. Biaglow, "Effect of elevated temperature and pressure on sprays from simplex swirl atomizers", J. Eng. Gas Turbines Power vol. 108, pp.209-215, 1986.
 [6] J. B. Kennedy, "High Weber Number SMD correlation for pressure atomizers", J. Eng. Gas Turbines Power vol. 108, pp.191-195, 1986.
 [7] A. A. Rizkalla, A. H. Lefebvre, "The influence of air and liquid properties on airblast atomization", J. Fluid Engineering Sept., pp.316-320, 1975.
 [8] C. U. Kim, D. Y. Lee, S. M. Oh, K. Y. Kang, "Investigation of icing phenomenon in liquid phase LPG injection system for heavy duty engine", Proc. ILASS-Asia 2001, pp.327-331, 2001.