

# Simplex Swirl Injector의 Injection Instability에 관한 연구

박병성\*\* · 김호영\*\* · 진철균\*\*\*

## The Phenomena of Injection Instability for Simplex Swirl Injector

Byung Sung Park, Ho Young Kim and Chul Kyeun Chun

### ABSTRACT

Most of all combustion system has combustion instability. It is a serious problem in combustion system. Unstable injection is one of the source of combustion instability.

The experimental investigation of spray characteristics for simplex swirl injector were conducted experimentally. Two kerosene based fuels were chosen as the atomizing fluid. As the major operating parameters, fuel temperature and injection pressure were chosen, and varied in the range from 253 K to 293 K and from 0.2 MPa to 1.0 MPa, respectively. Direct spray images and mean diameter were measured for the various combination of operating parameters in the flow field.

The results of present study show that the injection pressure and spray cone angle are fluctuated at specific conditions while it is continuous steady injection. As the fuel temperature changes continuously, spray cone angle varies discontinuously through the region of injection instability.

**Key Words** : injection instability, simplex swirl injector, SMD, spray cone angle, atomization

### 기 호 설 명

$\sigma$  : Standard deviation

### 1. 서 론

현재 사용되고 있는 대다수의 엔진에서 연소과정은 매우 중요한 부분을 차지한다. 디젤엔진, 가스터빈, 여러 종류의 제트 엔진, 그리고 로켓 엔진과 산업용 버너에 이르는 대다수의 엔진들은 연료로써 주로 고체연료나 액체연료를 사용한다. 그리고, 이들 엔진들은 대부분이 분무연소방식을 취하고 있다. 분무연소는 미립화로부터 증발, 혼합, 연소에 이르는 과정이 복잡한 화학반응과 동

시에 이루어지기 때문에 매우 복잡한 현상이다. 또한, 분무기의 특성은 연소기의 연소 효율 및 특성에 중대한 영향을 미친다. [1]

항공기용 엔진, 산업용 엔진 그리고 로켓엔진 등의 모든 덕트 타입의 연소기기는 연소기 설계 및 제작 시에 연소 불안정 현상을 고려해야만 한다. 연소 불안정 현상은 연소기 내의 불균일한 연료분포와 그로 인한 연소 시 열 방출량과 연소기 내의 압력변동 간의 상호작용을 통하여 큰 진폭의 압력파를 계속적으로 형성하는 것으로 연소실 압력을 과도하게 상승시키고, 벽면으로의 열 전달 및 과도한 진동, 소음을 유발시켜 엔진과 그 주변장치를 파괴시킬 수도 있다. [2-4]

연소 불안정성은 크게 두가지로 분류된다. 첫째, 저 주파수(초당 100 싸이클 이하)의 진동은

\* 고려대학교 대학원 기계공학과

† poet0921@korea.ac.kr

\*\* 고려대학교 기계공학과

\*\*\* 목포대학교 기계시스템 전공

Chugging이라 하며, 주로 연료 공급장치와 연소 과정 간의 상호작용에 의해서 나타나는 현상이다. 둘째, 고 주파수(초당 수천 사이클 이상)의 진동은 Screaming이라 일컬으며, 그 원인은 아직 명확하게 규명되지 않고 있다. 이들은 대개 여러 가지 음향학적 진동모드 - longitudinal, radial, transverse, or tangential - 가 연소기 내에서 복합적으로 결합되어 나타난다.

저 주파수와 고 주파수 중간 영역의 주파수를 갖는 진동은 분무기의 연료 공급장치와 관련이 없이 분무 패턴과 연소기의 상호작용에 의해서 나타난다. [2]

Haile et al.[5] 등은 펄스 연료 분사기를 이용하여 연소 불안정성을 능동 제어할 수 있는 시스템을 소개하였다.

Kelsall et al[6] 등은 연소 불안정성을 제어하기 위하여 수동제어와 능동제어 두가지 방법을 모두 사용하였다. 특히, 연소기 내에 댐퍼와 구멍을 뚫은 라이너를 이용한 수동제어를 통하여 83%의 댐핑 효율을 얻었다.

연소 불안정성 분야의 기존 연구들을 보면 베플(Baffle)이나 댐퍼를 이용한 수동 제어나 추가적인 소스를 이용한 능동제어 등 대부분이 연소 불안정성의 제어 분야에 집중되어 왔다. 그러나 연소 불안정성에 직접적인 원인이 될 수 있는 분사 불안정성(Injection instability)에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

또한, 분무의 불안정성에 관한 연구는 주로 액주나 액막의 분열과 관련된 불안정성에 관하여 중점적으로 연구가 이루어지고 있다.

Chauhan et al.[7] 등은 노즐 끝단에 일정한 주기의 교란을 주어서 그 교란의 진폭이 성장하는 것과 결과적으로 액적으로 분열되는데 미치는 영향을 알아보았다. 또한, Majumdar et al.[8] 등은 응축환경 내에서 매우 얇은 수막을 형성하여 수면의 불안정성으로부터 액적이 생성되는 이론을 제안하였다.

안정한 연소 시스템은 연소기의 설계 및 운용하는데 꼭 필요한 항목이며, 따라서 연소 불안정성의 원인의 제공할 수 있는 분사 불안정성에 대한 이해가 절실히 요구된다.

본 논문은 현재 광범위하게 사용되고 있는 Simplex 와류형 분무기에서 나타나는 분무 불안정 현상을 소개하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험장치 구성

Figure 1은 본 실험의 장치도를 나타낸다.

필터를 거친 연료는 연료탱크로 충전되며, 질

소가스를 이용하여 가압된 연료는 연료 온도 조절기로 보내진다. 연료 온도 조절기 입구에 체적유량계와 T형 열전대를 이용하여 체적유량과 연료의 온도를 측정하여 분무기로 공급되는 질량유량을 측정할 수 있다. 연료 온도 조절기(228 K - 523 K)에 장착된 열교환기를 통하여 연료는 설정 온도로 변환된 연료는 분무기로 보내져 대기중으로 분사된다. 이 때, 분무기 입구에 열전대와 압력변환기를 이용하여 분사 온도와 압력을 측정한다. 분사된 연료는 연료 포집기를 이용하여 수집되고, 분사된 액적들이 재순환되는 것을 방지하기 위하여 분사에 영향을 주지 않도록 송풍기를 설치하였다.

시스템에 장착된 열전대와 유량계, 압력변환기의 신호는 A/D 보드가 장착된 신호 처리용 컴퓨터를 통하여 실시간으로 자료가 수집된다.

1초당 10000 프레임까지 측정가능한 ICCD 카메라를 이용하여 분무기로부터 분사되는 분무 영상을 측정하였다. 본 실험에서는 실험의 특성을 고려하여 초당 500 프레임의 영상을 측정하였고, 105mm 니콘 렌즈와 1 kW 나트륨 조명을 이용하였다.

분무각은 분무기로부터 5 mm 하류에서 측정하였다.

Malvern particle sizer는 He-Ne 레이저를 사용하며, 빔의 회절원리를 이용하여 입자의 평균 입径을 측정하는 장치이다. 입경 크기 범위  $5.8 \mu\text{m} \sim 564 \mu\text{m}$ 까지 측정 가능한 300 mm 렌즈를 사용하였다. Malvern particle sizer는 분무기로부터 10 cm 하류에 설치하여 반경방향으로 1 cm 간격으로 측정하였으며, Rosin-Rammler 분포를 이용하여 분무 액적의 평균입경과 체적농도를 측정하였다.[9-11]

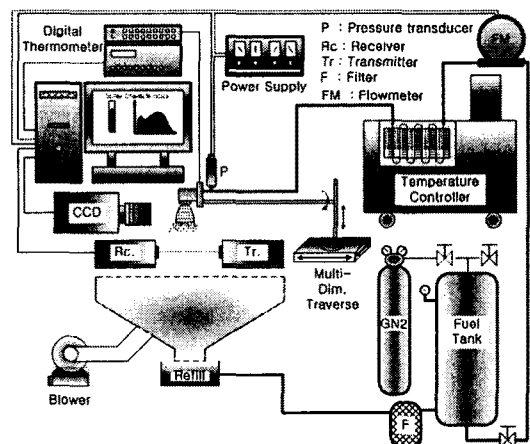


Fig. 1 Schematic diagram of spray system.

2.2 분무기와 실험 연료

Figure 2는 본 실험에 사용된 simplex 와류형 분무기의 개략도를 나타낸다. 와류실에 접선방향으로 유입된 연료는 와류실과 오리피스를 거치면서 축방향 속도성분과 접선방향 속도성분을 얻게

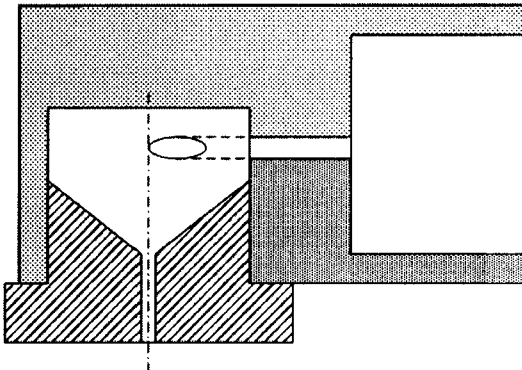


Fig. 2 Drawing of injector for experiments.

Table 1. Dimensions of injector

Hole	Diameter (mm)
Inlet Port	1.5
Swirl Chamber	15
Orifice	1

되어 대기 중으로 분사되면 원뿔형 액막의 분무를 이루게 된다.

Table 1은 상세한 분무기의 직경들을 나타낸다.

연료의 물성치를 변화시켰을 때, 분무 특성변화를 연구한 기존 연구자들은 대부분 서로 다른 연료를 이용하여 특정한 물성치의 변화를 연구하거나 몇몇 물질을 혼합하여 그 혼합비에 따른 분무특성을 보고하고 있다. 또한, 실험의 편의성을 위하여 물을 이용한 경우가 많다. [12, 13] 그러나, 항공기용 가스터빈 엔진의 경우, 광범위한 온도 변화 범위에서 적절한 성능을 요구한다.

따라서 본 연구에서는 실제 가스터빈 엔진에 사용하는 연료를 이용하여 연료온도를 243 K에서 293 K까지 변화시켜가면서 연료 온도변화에 따른 분무특성의 변화를 연구하였다. Fig. 3은 본 실험에 사용된 연료의 물성치를 나타낸다. 연료 A와 연료 B는 kerosene 계열의 연료로서 온도가 증가함에 따라 표면장력은 선형적으로 감소하는 반면에 점도는 저온영역에서는 급격하게 감소하고, 상온에서는 비교적 서서히 감소하는 특성을 나타낸다. 전체 온도 범위에서 연료 B가 연료 A보다 표면장력과 점성이 모두 큰 성질을 갖는다.

2.3 분사 불안정성 판정

질소 가스를 이용하여 연료탱크 내의 압력을 일정하게 설정한다. 그러나 분무기의 주된 역할이 기계적 에너지를 이용하여 연료 덩어리를 분열시켜 작은 액적 분무로 변환시키는 것이기 때문에 일정한 압력을 적용한다고 해도 분무기를 통해 분사되는 액적들은 어느 정도의 불안정성을 포함하고 있다. 따라서 연료 공급관 내의 압력은 미세하게 변화하며, 또한 분무기에서 분출되는 연료의 형상만으로는 안정 분사와 불안정 분사를 명확히 구분할 수 없다.

본 실험과정을 통하여 분사 불안정 현상이 나타나는 경우, 연료 공급관 내의 압력이 안정 분사에 비하여 비교적 크게 변화하며, 체적 유량 역시 크게 변화하기 때문에 안정 분사와 불안정 분사를 구분하는 기준으로 연료 공급관 내의 분사 압력과 체적 유량 변화에 대한 표준편차를 선정하였다.

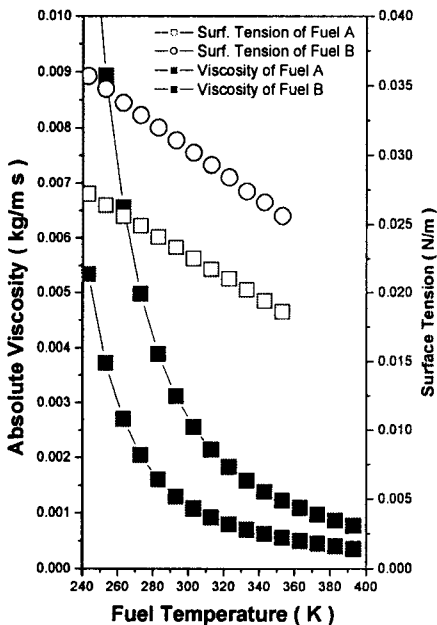


Fig. 3 Properties of the atomized fuels.

$$\sigma = \left[ \frac{\sum_{j=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n} \right]^{1/2} \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

Figs. 4의 (a)와 (b)는 각 각 연료온도 251.4 K와 289.6 K 일 때, 분무 영상을 나타낸다. 두 조건 모두 안정 분무 영역으로 fig. 4 (a)는 분무각이 거의 일정한 가운데 분무가 가끔씩 좌우로 흔들린다. fig. 4 (b)의 경우, 분무각은 변하지 않고 좌우로 흔들림도 거의 없다.

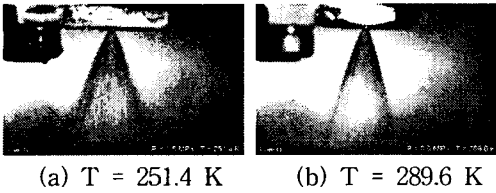


Fig. 4 The direct images of sprays in stable injection region.(Fuel B, P=0.5MPa)

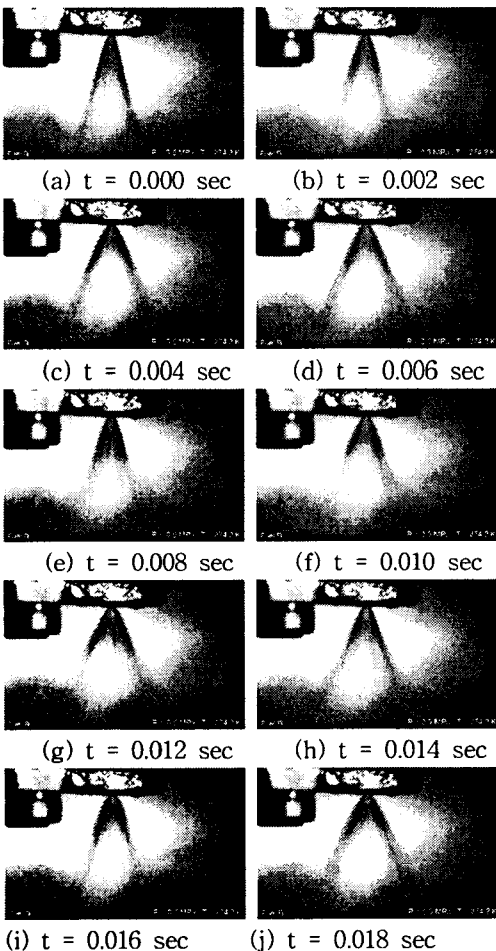


Fig. 5 The direct images of sprays in unstable injection region. (Fuel B, P=0.5MPa, T=274.2K)

Figures 5는 불안정 분무 영역인 분사 압력 0.5 MPa, 연료 온도 274.2 K 일 때, 시간에 따른 분무영상을 나타낸다. 분무가 시간에 따라서 심하게 맥동을 보인다. 분무각이 시간에 따라 심하게 변화한다. 이 때, 연료 공급관 내의 분사 압력과 체적 유량의 변화가 Fig. 6에 나타나있다.

Figure 7은 분사압력 0.5 MPa 하에서 온도에 따른 분무각의 변화를 나타낸다. 연료 온도 281 K 이상의 안정 분사 영역에서는 기존의 연구와 같이 온도가 감소함에 따라 분무각이 감소한다. [9] 그러나 분사 불안정 영역(261 K - 279 K)에서는 분무각이 매우 심하게 진동하며, 분무각 차이가 30도 가까이 큰 차이를 보인다. 또한, 분무각 변화는 매우 불규칙적으로 변화된다.

연료온도 257 K 이하의 안정 분무영역에서는 분무각이 약간 변화하며, 좌우로 흔들린다. 그리

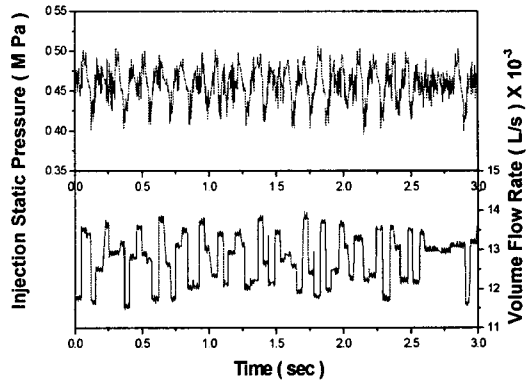


Fig. 6 The variations of injection pressure and volume flowrate in unstable injection region. (Fuel B, P=0.5MPa, T=274.2K)

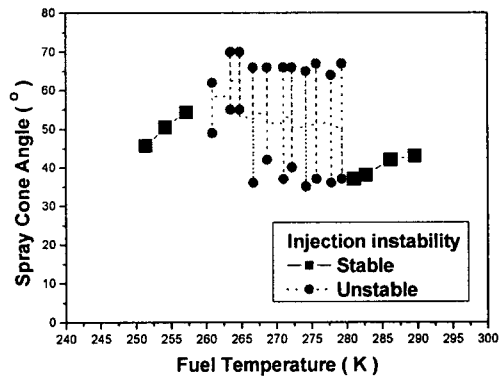


Fig. 7 The distributions of spray cone angle with fuel temperature variation.(Fuel B, P=0.5MPa)

고 온도가 감소함에 따라 분무각이 확연하게 감소한다.

일반적으로 온도가 증가함에 따라 연료의 점도와 표면장력이 감소하기 때문에 분무각은 증가한다. 그러나 본 실험에서는 매우 이례적으로 연료 온도 257 K 이하일 때의 분무각이 연료 온도 280 K 이상일 때의 분무각보다 크게 나타났다. 이는 분무기 내부의 유동이 연료 온도 281 K 미만에서 심각하게 변화하기 시작하여 연료 온도 257 K까지 천이 영역을 거쳐 연료 온도 257 K에 이르러 새로운 유동구조로 확립되는 것으로 생각된다.

Figure 8은 분사압력 0.5 MPa 일 때, 연료 온도 변화에 따른 분사 압력 변화와 체적 유량 변화의 표준편차를 나타낸다. 연료 온도 281 K 이상의 안정 분사 영역에서는 분사 압력 변화에 대한 표준편차가 0.002 이하로 매우 작은 값을 나타낸다. 그러나, 연료 온도 261 K에서 279 K에 이르는 불안정 분사 영역의 경우, 분사 압력 변화의 최대 표준편차는 0.033으로 안정 분사 영역의 표준편차보다 15배 이상 차이를 보였다. 연료 온도 257 K 이하의 저온 안정 분사 영역의 경우, 연료 온도 281 K 이상의 안정 분사 영역과 동일하게 낮은 표준편차를 나타낸다. 분사 압력이 변화함에 따라 체적 유량도 함께 변화하기 때문에 분사 압력 변화의 표준편차와 체적 유량 변화의 표준편차는 동일한 경향을 나타낸다.

Figure 4 (a)와 Fig. 8을 비교해보면, 앞에서 언급했던 바와 같이 저온 안정 분사 영역에서 분무각이 약간 변하며, 좌우로 흔들리는 것은 연료가 분무기를 통해 분무된 후 외부 요인에 의해 분열되는 과정에서 나타나는 불안정성으로 인한 것임을 알 수 있다.

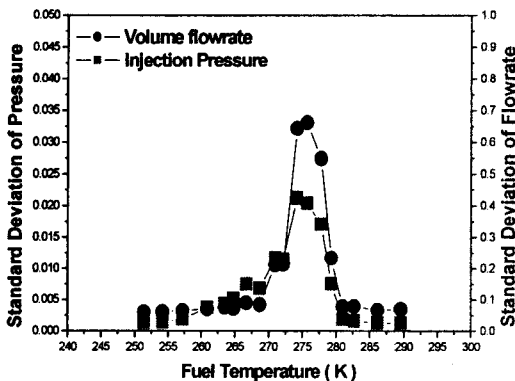
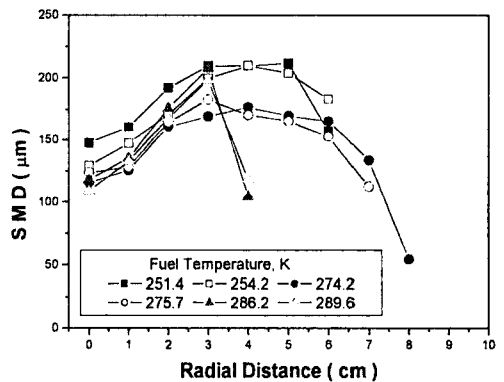
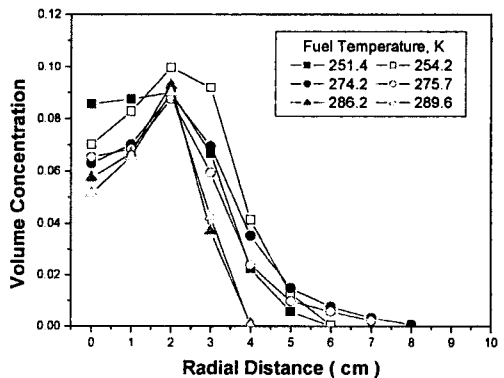


Fig. 8 The standard deviations of injection pressure and volume flowrate with fuel temperature variation. (Fuel B, P=0.5MPa)

Figures 9 (a)와 (b)는 각 온도별 반경방향 거리 변화에 따른 평균직경 분포와 체적농도 분포를 나타낸다. 연료 온도 281 K 이상의 안정 분사 영역은 Fig. 4와 Fig. 7에서 보았던 바와 같이 분무각이 작고 안정되기 때문에 분무기 중심으로부터 반경방향 3 cm 위치에서 최고값의 SMD를 나타냈고, 반경방향 2 cm 위치에서 가장 많은 체적농도를 나타내며, 반경방향 4 cm 이내에서 모든 분무가 이루어진다. 반면에 불안정 분사 영역의 경우, 반경방향 2 cm에서 6 cm까지 비교적 넓은 영역에 걸쳐 비슷한 SMD 값을 나타낸다. 또한 가장 넓은 영역에 걸쳐 체적 농도값이 분포한다. 이는 분사 불안정 영역에서는 분무각이 확대와 축소를 반복하며 맥동치기 때문에 비교적 큰 액적들이 반경방향으로 멀리까지 분포할 수 있고, 또한 이들의 SMD가 넓은 영역에 걸쳐 유



(a) SMD



(b) Volume concentration

Fig. 9 The distributions of SMD and volume concentration with fuel temperature variation. (Fuel B, P=0.5MPa)

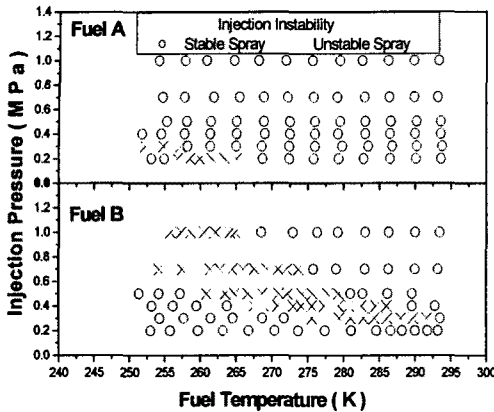


Fig. 10 The injection instability maps of fuel A and B for the variations of injection pressure and fuel temperature.

사하게 측정된다. 257 K 이하의 저온 안정 분사 영역의 경우, Fig. 4 (a)와 Fig. 7에서 보았던 바와 같이 분무각이 크기 때문에 액적이 넓은 영역에 존재한다.

분사 불안정 영역의 SMD가 다른 안정 분사 영역의 SMD에 비해 현저히 작다. 이는 분사압력의 맥동으로 인하여 액적의 미립화가 촉진되기 때문이다.

Figure 10은 연료 A와 연료 B의 연료 온도와 분사압력을 변화시켰을 때, 분사 불안정성이 나타나는 영역을 도시한 분포도이다. 분사압력이 증가함에 따라 불안정 분사 영역은 낮은 온도쪽으로 이동함을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 각종 연소기에서 광범위하게 사용되고 있는 simplex 와류형 분무기를 사용하여 연료 온도 변화와 분사 압력 변화에 따른 분사 불안정성 현상을 실험적으로 알아보았다. Kerosene 계열의 연료A와 연료B를 사용하여 분사 압력 0.2 MPa에서 1.0 MPa, 연료 온도 243 K에서 293 K 범위 내에서 실험이 수행되었다. 본 실험의 조건과 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 적절한 온도와 압력 범위에서 분사 불안정성 현상이 나타났다.
2. 분사 불안정 영역에서는 연료 공급관 내의 압력 맥동이 커지며, 분무각이 크게 변한다.

#### 후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] F. Akdogan, N. Hay, "Air-fuel ratio contours within a spray", Energy Convers. Mgmt Vol. 38, No. 8, pp. 771-778, 1997.
- [2] Philip Hill, Carl Peterson, "Mechanics and Thermodynamics of Propulsion 2nd edition", Addison-Wesley Publishing Company, pp. 606-607, 1992.
- [3] G. A. Richards, M. C. Janus, "Characterization of Oscillations During Premix Gas Turbine Combustion", ASME J. Eng. Gas Turbines and Power 120, pp. 294-302, 1998.
- [4] J. H. Uhm, S. Acharya, "Control of Combustion Instability with a High-Momentum Air-Jet", Combustion and Flame 139, pp. 106-125, 2004.
- [5] E. Haile, F. Lacas, C. Desrayaud, D. Veynante, D. Durox, "Characterization of a Liquid Fuel Injector under Continuous and Modulated Flow Conditions", Part. Part. Syst. Charact. 15, pp. 136-144, 1998.
- [6] G. Kelsall, C. Troger, "Prediction and Control of Combustion Instabilities in Industrial Gas Turbines", Applied Thermal Engineering 24, pp. 1571-1582, 2004.
- [7] A. Chauhan, C. Maldarelli, D. S. Rumschitzki, D. T. Papageorgiou, "An Experimental Investigation of the Convective Instability of a Jet", Chemical Engineering Science 58, pp. 2421-2432, 2003.
- [8] A. Majumdar, I. Mezić, "Instability of Ultra-Thin Water Films and the Mechanism of Droplet Formation on Hydrophilic Surfaces", Trans. of the ASME Vol. 121, Nov., pp. 964-971. 1999.
- [9] B. S. Park, H. Y. Kim, Y. C. Kim, J. T. Chung, "An Experimental Study on the Spray Characteristics of a Dual-Orifice Type Swirl Injector at Low Fuel Temperatures", KSME Int. J. Vol. 18, No. 7, pp. 1187-1195, 2004.

- [10] Arthur H. Lefebvre, "Atomization and Sprays", Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- [11] "Malvern Particle Sizer Instruction Manual", Malvern Instrument Ltd, 1988.
- [12] A. K. Jasuja, "Atomization of Crude and Residual Fuel Oils", Trans. of the ASME Vol. 101, April, pp.250-258, 1979.
- [13] J. B. Kennedy, "High Weber Number SMD Correlation for Pressure Atomizers", J. of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 108, pp. 191-195, 1986.