

## 초소형 터보제트엔진 슬링거 인젝터의 분무특성

최현경\* · 최성만\* · 이동훈\*\*

### A Study of Spray Characteristics for the Slinger Injector System of Micro Turbo Jet Engine

HyunKyung Choi\* · Seongman Choi\* · Donghun Lee\*\*

#### ABSTRACT

An experimental study was performed to understand spray characteristics of the slinger injector system for the micro turbojet engine. In this fuel injection system, fuel is sprayed and atomized in the combustor by centrifugal forces of engine shaft. This experimental apparatus consist of a high speed rotating Spindle, slinger injector, pressure tank and acrylic case. The droplet size and velocity were measured by PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) and spray was visualized by using Nd-Yag laser-based flash photography. From the test results, the droplet size(SMD) is largely affected to rotational speed, mass flow rate and the number of injection orifice. From the this experimental study, we could understand the spray characteristics of the slinger injection system and obtain the optimum shape of the slinger injector nozzle which is suitable for the micro turbojet engine.

#### 초 록

초소형 터보제트엔진에 적용되는 슬링거 인젝터 시스템의 분무특성을 파악하기 위한 연구를 수행하였다. 이 연료 분사시스템은 엔진의 회전축으로부터 발생된 원심력에 의하여 연료가 연소기 내부로 공급되고, 액체연료의 미립화를 초래한다. 시험장치는 고속으로 회전하는 Spindle, 슬링거 인젝터, 가압식 물탱크, 아크릴 케이스로 구성하였다. 분무입자의 크기 및 속도를 측정하기 위해 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) 시스템을 사용하였고, Nd-Yag Laser를 광원으로 사용하여 분무를 가시화하였다. 시험결과 SMD(Sauter Mean Diameter)는 회전수, 유량, Injection Orifice 수에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 이러한 실험적 연구로부터 이 시스템의 분무특성을 이해할 수 있었고, 초소형 터보제트 엔진에 적합한 슬링거 인젝터의 형상을 도출할 수 있었다.

Key Words: Micro Turbo Jet Engine(초소형 터보제트 엔진), Slinger Injector(슬링거 인젝터), Spray Characteristics(분무특성)

\* 전북대학교 항공우주공학과

\*\* 삼성테크윈, 파워시스템 연구소

연락처, E-mail: csman@chonbuk.ac.kr

가스터빈 연소기의 연료분사 방법에는 압력분무식, 에어-블래스터(Air-Blast)와 회전연료분무시스템(Rotary Atomizer) 등이 사용되고 있다. 기존의 압력분무식과 에어-블래스터 연료분사 방식은 가스터빈 엔진에서 요구하는 분무특성을 잘 만족하여 가장 널리 사용되고 있다. 하지만 이러한 연료분사 시스템은 매우 정밀하고 복잡한 부품들로 구성되어 노즐 제작이 어렵고 비용과 시간이 많이 소요된다. 또한, 연료를 공급할 보조 장치들이 필요하기 때문에 소형 가스터빈 엔진에 적용하는데 어려움이 있다. 반면 본 연구에 적용된 연료분사 시스템은 "Rotary Atomizer" 또는 "Slinger System"이라 불리는데, 이 시스템은 엔진 회전축의 원심력에 의해 연료가 분사되므로 고압 연료펌프 시스템이 필요가 없으며, 부품 수가 매우 적고, 시스템의 구조가 극히 간단하여 연료시스템의 부하가 압력분무식에 비해 매우 작아질 수 있다. 따라서 소형 가스터빈 엔진에 적용하는데 용이하다[1]. 이러한 이유로 프랑스 Turbomecha 사에서 최초로 엔진에 적용한 이래 미국 Teledyne 사의 J402, Williams International 사의 F107 엔진에 적용되어 성공적으로 운용되고 있다.

이러한 슬링거 인젝터 시스템의 분무특성은 Norster, Dahm 및 Morishita 등에 의하여 연구되어졌고, 회전체의 회전속도에 따른 분무입자의 크기 및 속도 측정 데이터를 보고하였으며[2], 회전체의 Injection Orifice 형상에 따른 분무패턴을 가시화하여 분무특성을 설명하고자 하였다[3]. 하지만 슬링거 시스템을 적용한 가스터빈 연소기의 상세한 연소특성은 아직까지 완전히 이해되고 있지는 않다. 따라서 점화 및 화염안정성과 같은 연소특성에 큰 영향을 미치는 연료입자의 분포, 입자의 크기 및 속도 분포와 같은 분무입자 정보는 매우 중요한 의미를 지니므로, 슬링거 시스템의 분무특성을 파악하는 것이 우선으로 수행되어야 한다.

본 연구는 슬링거 인젝터 시스템에 대한 분무특성을 이해하기 위해 PDPA 레이저 진단기술을 이용하여 측정할 수 있도록 시스템을 고안하였고 입자의 SMD 크기, 속도분포 및 분무패턴을

측정하고 분석하였다. 본 연구결과는 슬링거 인젝터 시스템을 이용한 가스터빈 설계 및 개발 시 유용한 설계기반 데이터로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Figure 1은 시험장치에 대한 개요도를 보여준다. 시험장치는 고속회전이 가능한 Spindle, 회전하는 슬링거 인젝터, 가압식 물탱크, 연료공급노즐, 아크릴 케이스 및 PDPA 측정시스템으로 구성하였고, 시험유체는 물을 사용하였다. 슬링거 인젝터는 Spindle 축과 직접 연결하여 구동하도록 하였다. 연료공급은 가압식 물탱크를 이용하여 일정한 압력으로 일정 유량을 공급할 수 있도록 하였고, 연료공급노즐의 Metering Orifice와 슬링거 인젝터의 Injection Orifice 중심이 일치하도록 설치하였다. 아크릴 케이스는 레이저 광원이 간섭되지 않도록 구성하였고, 측정 중 분사된 물은 드레인 포트를 통하여 배출되도록 하였다.

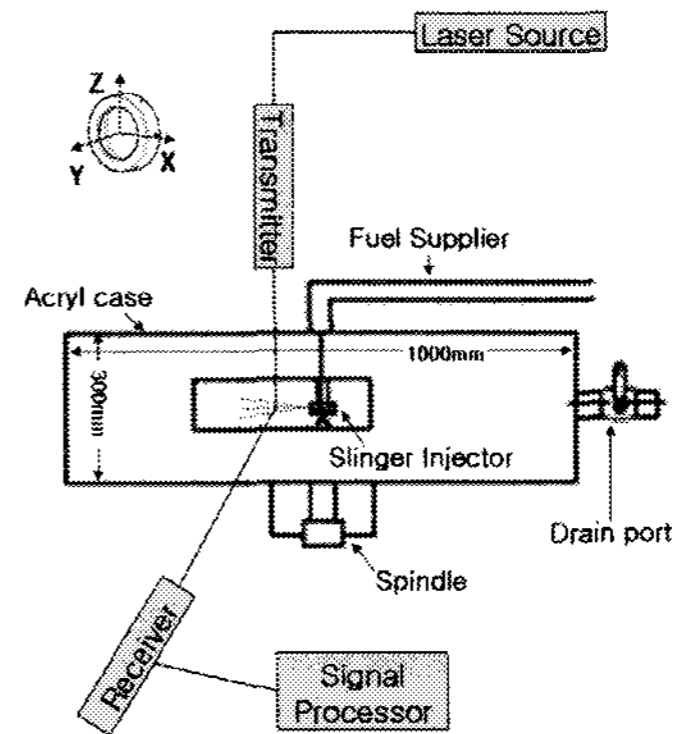


Fig. 1 Schematic Diagram of Spray Test Rig with PDPA System

가압식 물탱크에서 공급된 물은 연료공급노즐의 Metering Orifice로 공급되고, 슬링거 인젝터의 원심력에 의해 Injection Orifice를 통과하여 대기로 분출되는데 이때 액막과 액주를 형성하고 점차 미세 분무 입자로 분열된다. 실험에 사

용된 PDPA 레이저 측정시스템은 Ar-Ion Laser, Transmitter, Receiver, Signal Processor와 3-D Traverse로 구성된다.

### 22 실험방법

분무실험은 실제 엔진의 작동조건과 비슷한 조건에서 이루어 졌으며, 작동유체는 물을 사용하였고, 회전수 15,000, 20,000, 25,000, 30,000, 40,000 rpm에서 유량 15 ~ 90kg/h에 대하여 수행되었다. 실험에 사용된 슬링거 인젝터는 두 종류로 Fig. 2에 제시하였다. Fig. 2에서 Injection Orifice의 직경은 1.5 mm 이며, A와 B 단면의 위치에 따라 Injection Orifice의 수가 다르다. (a)에 제시된 인젝터는 A 단면에 해당된 Injection Orifice 수가 4개, B 단면에 해당된 수가 2개로, 총 6개 이며, (b)에 제시된 인젝터는 A 단면 8개, B 단면 4개로, 총 12개의 Injection Orifice가 위치하도록 하였다.

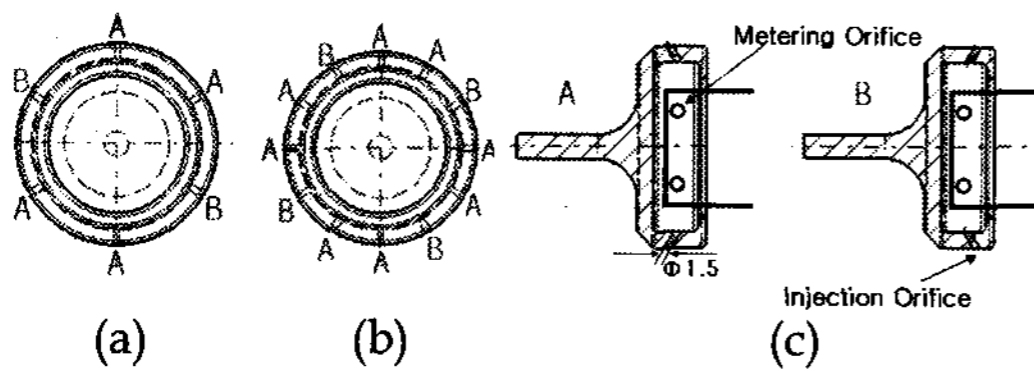


Fig. 2 Slinger Injector

Figure 3은 1-D PDPA를 이용한 입자의 크기 및 속도 측정 시 측정위치를 나타낸다. 측정위치는 xy평면, yz평면 각각 360 개이며, 3축 Traverse에 의하여 자동이송 되도록 하였다. 각 측정 위치에서 30,000 개의 데이터를 샘플링 하였고, 소요시간은 20 초 이하로 측정하였다. Fig. 3의 y(-) 영역은 Fig. 2의 A 단면에 해당하며, y(+) 영역은 B 단면에 해당한다.

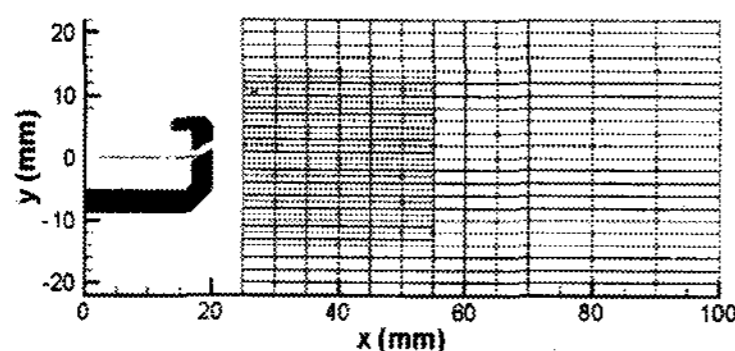


Fig. 3 PDPA Measurement Point

### 3. 실험결과 및 검토

#### 21 가시화 결과

Marshall[4]은 분열과정을 Subcritical Breakup, Transition Breakup, Supercritical Breakup으로 구분하였다. 레이놀즈 수가 작은 Subcritical Breakup은 오리피스에서 분출되는 여러 액막들이 단일액주로 발전하고 Rayleigh 불안정 현상이 미립화를 지배하여 액주가 액적으로 발전한다. 분무액체는 액주가 점점 짧아지는 Transition Breakup 과정을 거쳐 Supercritical Breakup 과정으로 도달하며 분사액체는 오리피스 출구부분 근처에서부터 미세한 액적으로 미립화 된다.

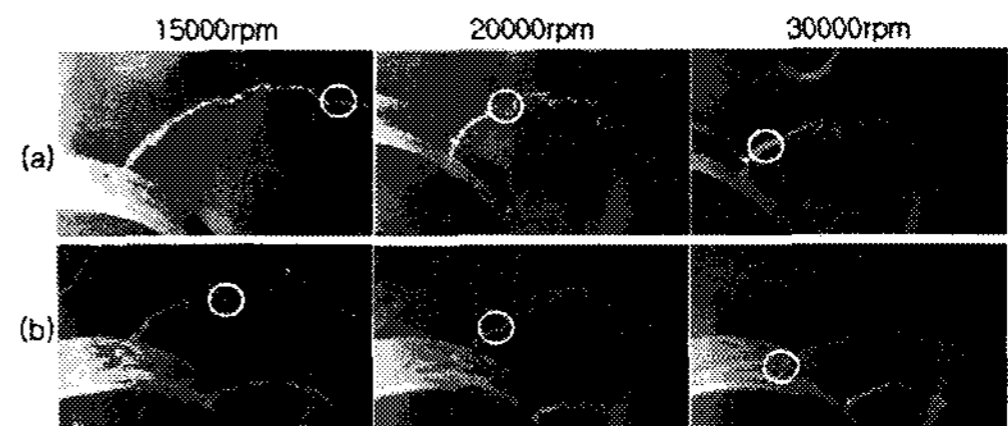


Fig. 4 Spray Visualization with Rotational Speed

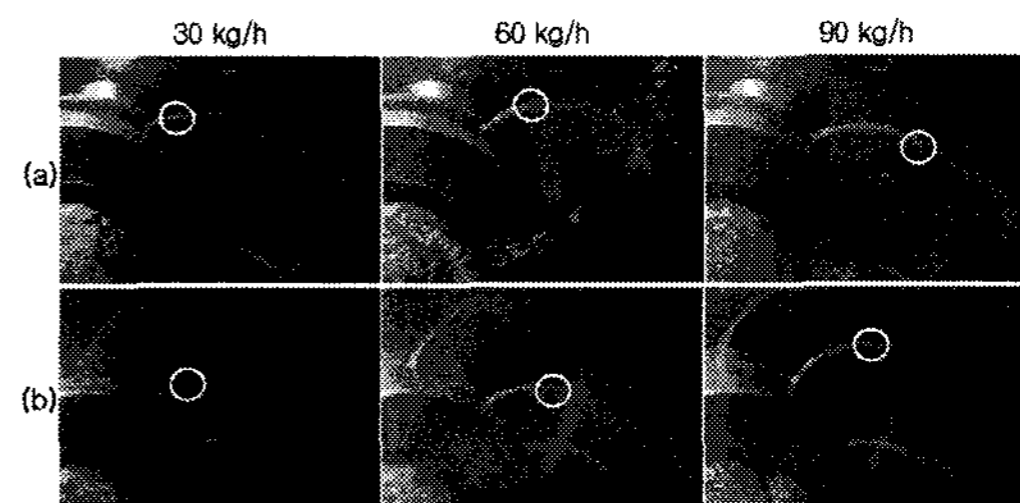


Fig. 5 Spray Visualization with Mass Flow Rate

Figure 4와 5에서 (a)는 Injection Orifice 수가 6개인 인젝터에 해당하는 가시화 결과이고, (b)는 12개인 인젝터에 해당되는 것이다. 또한 이 결과는 Nd-Yag Laser와 Canon EOS 5-D(1/8000 sec)를 사용하여 가시화한 것이다. Fig. 4는 유량 15 kg/h에서 회전속도 15,000, 20,000, 30,000 rpm서의 분열과정을 나타낸다. 회전수 15,000 rpm은 Subcritical 분열과정을 보인다. 오리피스에서 분출된 액막들은 단일액주형태를 나타내고, 액주 끝단에서 점차 분열하기 시작한다. 액주의 길이는 20,000 rpm 이상에서 급격히 감소하여,

30,000 rpm 이상에서는 오리피스 출구에서부터 액적으로 분열하고 있어 Supercritical 분열에 도달해 있음을 알 수 있다.

Figure 5는 회전수 30,000 rpm에서 유량 30, 60, 90 kg/h에 대한 분열과정을 나타낸다. 유량이 증가할수록 액주의 길이는 길어져 분열위치가 Injection Orifice로부터 멀어진다. 이는 유량이 증가함에 따라 액체내부의 관성력과 표면장력의 증가로 Rayleigh 불안정 현상이 둔화되어 액주의 길이가 증가되는 것이다.

또한 Fig. 4와 5에서 Injection Orifice의 수가 증가할 때 액주의 길이가 짧아짐을 볼 수 있다. 이것은 Injection Orifice의 수가 증가되면 개개의 Injection Orifice로부터 분사되는 유량이 적어지므로 이 같은 결과를 나타낸다.

이러한 가시화 결과로부터 슬링거 인젝터의 회전속도, 공급유량, Injection Orifice의 수에 따른 미립화 과정과 입자의 크기 및 형태를 전반적으로 이해할 수 있다.

## 2.2 PDPA 측정결과

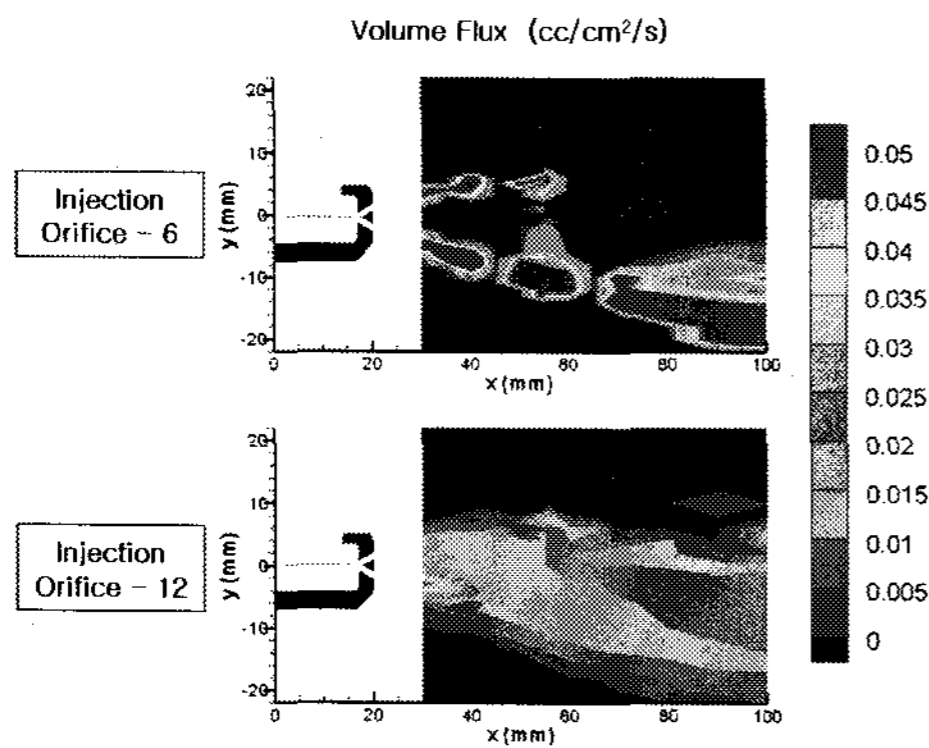
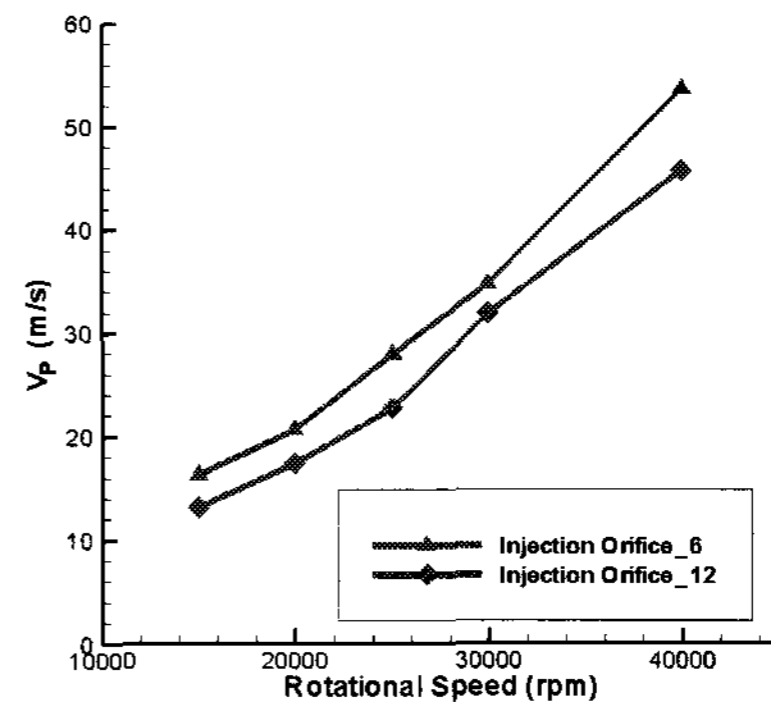


Fig. 6 Contour of Volume Flux

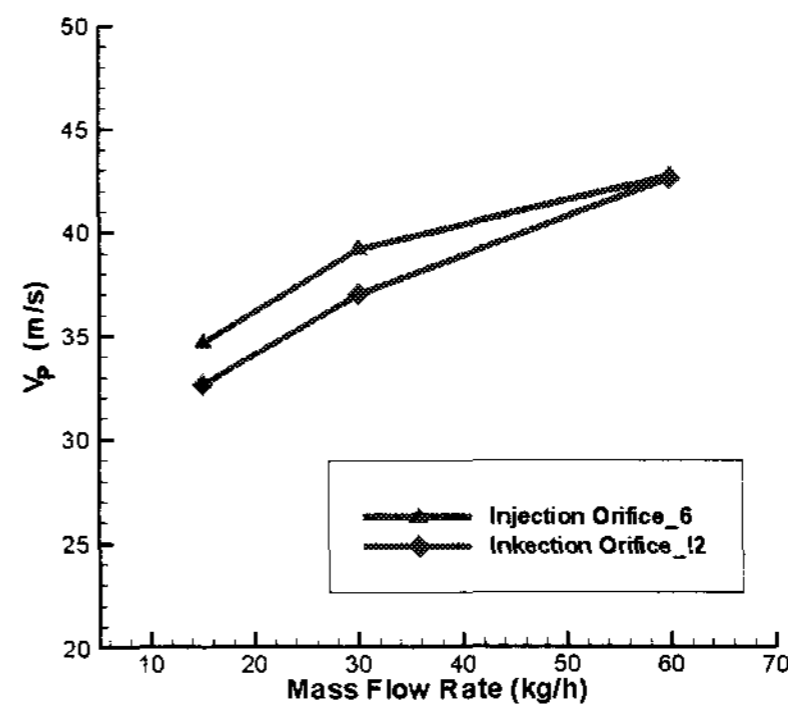
Figure 6은 유량 15 kg/h에서 회전수 20,000 rpm에 대한 Volume Flux를 나타낸 것이다. 그림에서 y(-) 영역이 Fig. 2의 A 단면에 해당하는 것으로 Injection Orifice의 수가 더 많은 영역이다. Volume Flux는 y(-) 영역이 y(+) 영역보다 더 넓게 나타난다. 또한 Injection Orifice의 수가 6개인 인젝터에서는 Injection Orifice를 따라 좁은 영역에 집중되고 있음을 알 수 있다. 반면 12

개의 Injection Orifice의 인젝터에서는 넓은 영역으로 확대되었다. 이러한 이유는 Injection Orifice의 수가 많을수록 Injection Orifice로부터 분사되는 유량이 적어지므로 분무가 더욱 발달하게 되고, 분무입자의 크기가 줄어들어 입자의 단면적이 보다 커지게 된다.

Figure 7은 인젝터의 회전수와 유량에 따른 회전속도의 최대속도를 나타낸 것이다. Fig. 7의 (a)와 (b)에서 인젝터의 회전수와 유량이 증가함에 따라 회전속도가 증가함을 볼 수 있으며, Injection Orifice 수가 더 많을 경우 회전속도가 작게 나타난다. 또한 회전수가 증가할 경우에는 회전속도가 크게 증가하지만 유량이 증가할 경우에는 회전속도가 조금씩 증가한다.



(a) Rotational Speed

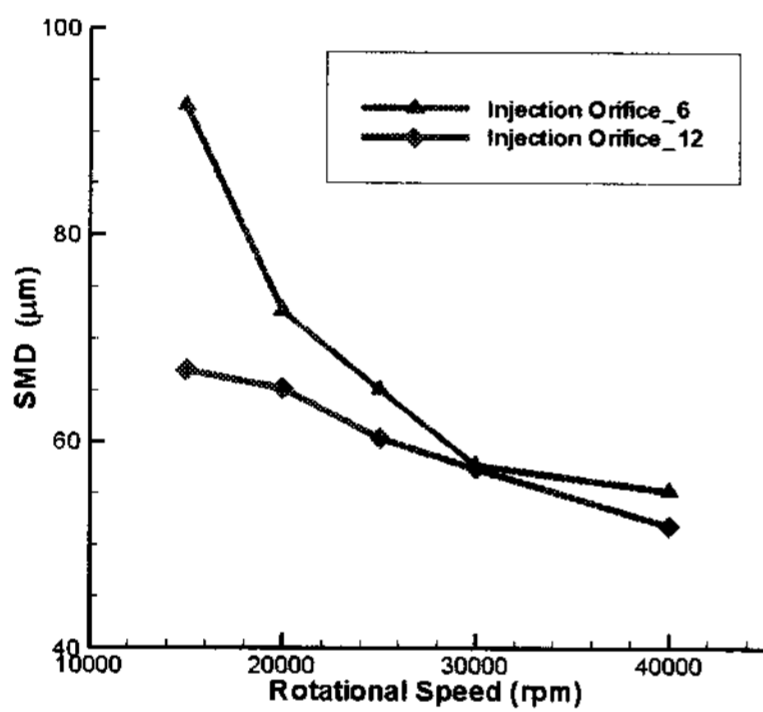


(b) Mass Flow Rate

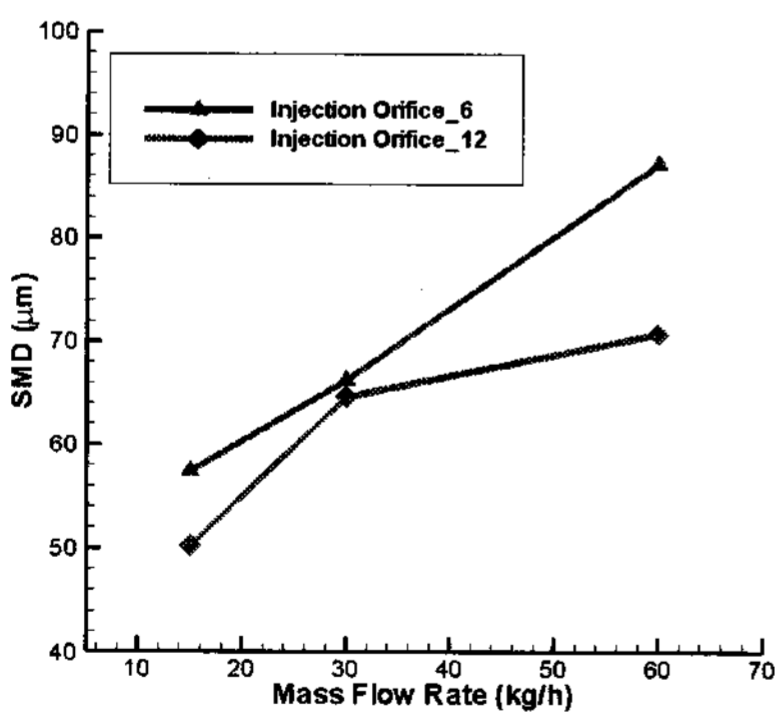
Fig. 7 Peripheral velocity

Figure 8은 SMD를 회전수와 유량에 따라서 나타낸다. Fig. (a)와 (b)에서 Injection Orifice의 수가 12개인 경우가 6개인 경우보다 SMD가 더 작게 나타난다. Fig. 8의 (a)에서 회전수가 증가

함에 따라 SMD는 감소한다. Injection Orifice의 수가 12개인 경우 회전수가 증가함에 따라 점차적으로 감소하였지만, 6개인 인젝터인 경우 회전수가 15,000 rpm에서 30,000 rpm으로 증가될 때 SMD는 급격히 감소되었고, 30,000 rpm 이상의 회전수에서는 12개인 경우와 비슷한 SMD를 나타낸다. Fig. 8의 (b)에서 유량이 증가함에 따라 SMD는 증가하였다. 회전속도가 증가하면 분사 액체와 주위기체와의 상대속도가 증가하여 분무가 더 발달하게 되어 SMD가 작아진다. 하지만 유량이 증가할 경우 회전속도가 증가하는 것보다 액체 내부의 표면장력과 관성력이 더 크게 작용하여 SMD가 커지는 것이다. 이 결과는 Fig. 5에서도 볼 수 있듯이 유량이 증가할 경우 액주의 길이가 증가하는 것과 관계가 있다.



(a) Rotational Speed



(b) Mass Flow Rate

Fig. 8 SMD

#### 4. 결 론

본 연구는 고속회전 연료분무장치의 분무특

성을 이해하기 위한 것이다. Nd-Yag Laser를 사용하여 가시화를 하였고, PDPA를 이용하여 분무입자의 분포, 속도 및 입자의 크기를 측정하였다. 연구결과는 다음과 같이 요약된다.

1. 분사된 액체의 액주는 회전수와 Injection Orifice의 수가 증가함에 따라 감소하고, 유량이 증가함에 따라 증가한다.
2. Injection Orifice의 수가 많을수록 분사액체 분포는 넓은 영역으로 확대된다.
3. 회전수와 유량이 증가함에 따라 회전속도는 증가하고, Injection Orifice의 수가 많을수록 회전속도는 감소한다.
4. 회전수가 증가함에 따라 입자의 크기(SMD)는 작아지며, 유량이 증가함에 따라 SMD는 커진다. 또한 Injection Orifice의 수가 많을수록 SMD는 작아진다.

#### 참 고 문 헌

1. A. M Mellor, Design of Modern Turbine Combustors, Academic Press, London, 1990, pp.306~314
2. Morishita, T., A Development of the Fuel Atomizing Device Utilizing High Rotational Speed, ASME PaperNo. 81-GT-180, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY
3. W. J. A. Dahm, P. R. Patel, B. H. Lerg, Visualization and Fundamental Analysis of Liquid Atomization by Fuel Slings in Small Gas Turbine Engines, 32nd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2002, AIAA Paper No. 2002-3183
4. A. H. Lefebvre, Atomization and Sprays, Purdue University, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1989, pp.27~78
5. 최성만, 이동훈, 박정배, "Spray Characteristics of the Rotating Fuel Injection System", 한국액체미립화학회지, 제11권, 제2호, 2006, pp.81~88