

## 회전연료 분사시스템의 분무특성

최성만<sup>†</sup> · 이동훈\* · 박정배\*\*

## Spray Characteristics of the Rotating Fuel Injection System

S. M. Choi, D. H. Lee and J. B. Park

Key Words: Rotating Fuel Injection System(회전연료분사장치), Spray Characteristics(분무특성)

## Abstract

The spray characteristics of the rotating fuel injection system were investigated. The special test rig was devised to get the spatial and momentary droplet information. This experimental apparatus consists of a high-speed motor, a shaft, a rotating fuel nozzle and an acrylic case. Spray droplet size and velocity were measured by PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) and instantaneous velocity field was measured by PIV (Particle Image Velocimetry) system. At the same time, spray visualization was performed by using ND-YAG laser-based flash photography. From these two different laser diagnostic techniques, we could get spatial and instantaneous spray information for rotating fuel injection system. The results presented in this paper indicate that spray characteristics such as droplet size, velocity and spray pattern were strongly influenced by rotational speed.

## 기호설명

PDPA	: Phase Doppler Particle Analyzer	
PIV	: Particle Image Velocimetry	
RPM	: Revolutions per Minute	
SMD	: Sauter Mean Diameter	[ $\mu\text{m}$ ]
U	: Peripheral Velocity	[m/s]
Q	: Liquid Flow Rate	[ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
D	: Outer Diameter of Rotating Disc	[mm]
d	: Injection Orifice Diameter	[mm]
$\sigma$	: Surface Tension of liquid	[N/m]

## 1. 서 론

가스터빈 엔진에서 회전연료 분사시스템을 채택한 환형연소기를 빈번하게 사용하고 있으며, 이러한 연소시스템은 터보메카 등의 엔진 제작사에서 성공적으로 활용하고 있다. 이 시스템의 주요한 장점은 간단하고 가격이 저렴하다는 것이다. 분무의 관점에서 회전연료 분사시스템은 엔진의 부분부하나 아이들 조건에서도 분무특성이 매우 좋다는 것이다. Norster<sup>(1)</sup>는 아이들 운전조건에서 50  $\mu\text{m}$  정도의 SMD를 얻을 수 있으며 최대부하에서 약 30  $\mu\text{m}$ 의 SMD를 얻을 수 있다고 보고한 바 있다.

가스터빈 엔진에서 연료분사 시스템의 역할은 연소영역에 연료입자를 공급하는 것이다. 연소기내의 연료입자의 분포는 주 연소영역으로의 연료입자 관통력에 의존하며, 이것은 공기의 유동흐름과 밀접한 관계가 있다. 압력 분무식 또는 에어-블래스터(air-blast) 연료분사 방식의 경우 가스터빈 엔진에서 요구하는 분무특성을 잘 만족시키거나 매우 정밀한 부품들을 요구한다. 본 연구에서 적용된 회전연료 분사시스템의 경우 매우 경제적으로 가스터빈

(2006년 4월 10일 접수 ~ 2006년 5월 18일 심사완료)

\*삼성테크윈, 파워시스템 연구소

\*\*국방과학연구소

<sup>†</sup>책임저자, 회원, 전북대학교 항공우주공학과

E-mail : csman@chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-3996 FAX : (063)270-2472

에 적용 가능한 장점이 있다. 실질적으로 회전연료 분사 시스템의 경우 10개 미만의 부품으로 전체 시스템을 구성할 수 있다.

이러한 회전연료 분사시스템은 Norster<sup>(1)</sup>, Morishita<sup>(2)</sup> 및 Dahm 등<sup>(3)</sup>에 의하여 연구되어져 왔으나, 측정시스템의 한계로 인하여 제한된 분무입자의 크기 및 속도 측정 데이터로부터 분무특성을 설명하고자 하는 공통점이 있었다. Norster의 경우 회전방향 속도성분  $U$  에 따른 입자의 SMD 크기의 관계식을 (1)과 같이 도출하였다.

$$SMD = \frac{3,962}{U} \quad (1)$$

Morishita는 유리평판위의 실리콘 오일필름에 수집된 분무입자를 사진 측정법을 이용하여 분무입자의 크기를 측정하였다. 그는 회전디스크에서 100 mm 떨어진 점에서 분무입자의 크기를 측정하였다. 측정결과로부터 경험식 (2)를 얻었으며 이 식은 회전연료 분사시스템의 개념을 이해하는데 도움을 주고 있다. 즉 분무입자의 크기는 회전 속도성분  $U$ 와 연료유량  $Q$ 에 비례하고 있음을 보여준다.

$$SMD = 3,300 \frac{Q^{0.2} \cdot d^{0.3}}{U} \quad (2)$$

Dahm의 경우 엔진 작동조건에서 다양한 회전연료노즐 형상에 대하여 가시화촬영을 통하여 연구를 수행하였으며, Morishita의 실험결과와 상관관계를 도출하기 위하여 노력하였다. 가스터빈 엔진에서 연료분사 프로세서를 조절할 수 있는 기능은 필수적이라 할 수 있다. 따라서 가스터빈 연소기를 설계하고 개발할 때 연소기내의 모든 영역에서 연료입자의 분포, 입자의 크기 및 속도분포를 이해하는 것은 매우 중요한 의미를 지닌다. 특히 회전방식을 이용한 연료분사시스템을 채용한 가스터빈 슬링거 연소기의 경우, 연료 분무특성이 점화 및 화염안정성에 가장 중요한 역할을 하는 것으로 연구된 바 있다.<sup>(4,5)</sup> 그러나 이전의 연구자들의 경우 레이저 진단기술을 이용할 수 없어, 제한된 측정데이터를 얻을 수밖에 없었고, 이것은 전 유동장 영역에 대한 분무입자의 정보를 정확하게 알 수 없는 결과를 초래 하였다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해, 회전연료분사 시스템을 이용하여 PDPA 또는 PIV 측정을 할 수 있는 시스템을 고안하여 제작하였으며, 삼성테크윈(주)의 분무 실험실에서 성공적으로 운용하였다. 본 연구에서는 입자의 크기, Volume Flux 및 속도분포를 두 가지 레이저 진단기술인 PDPA 및 PIV 장치를 이용하여 분무특성을 측정하고 분석하였다. PDPA 시스템의 경우 유동장 영역을 일점 측정 방식으로 스캔하여 분무입자의 특성을 측정

하였으며, 이 결과로부터 유동장 공간내의 입자 분포특성을 알 수 있었다. PIV 시스템을 이용한 측정에서는 순간적인 유동장에 대한 속도정보를 얻고자 노력하였다. 이러한 두 가지 레이저 진단계측기법으로부터 회전연료 분사 시스템의 분무입자의 공간에 대한 분포 및 순간 속도 분포를 얻을 수 있었다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

시험장치에 대한 개념도가 Fig. 1과 Fig. 2에 제시되어 있다. 시험장치는 고속모터, 회전축, 회전연료노즐, 아크릴 케이스 및 PDPA 측정 시스템으로 구성하였다. 고속전기모터와 회전축은 회전연료노즐과 직렬로 연결되어 있다. 회전연료노즐은 좌표축 X, Y의 중심에 회전축을 두고 있으며, 반시계 방향으로 회전한다. 아크릴 케이스의 경우 1,000 mm(L), 1,000 mm(H), 131 mm(W)의 직사각형 박스 형태로 구성된다. 측정부의 경우 레이저 광원을 간섭하지 않도록 아크릴을 제거하였으며 Fig. 2의 사진에서 확인 할 수 있다. 측정유체로는 물을 이용하였으며, 측정 중 분사된 물은 드레인 포트를 통해 지속적으로 배출

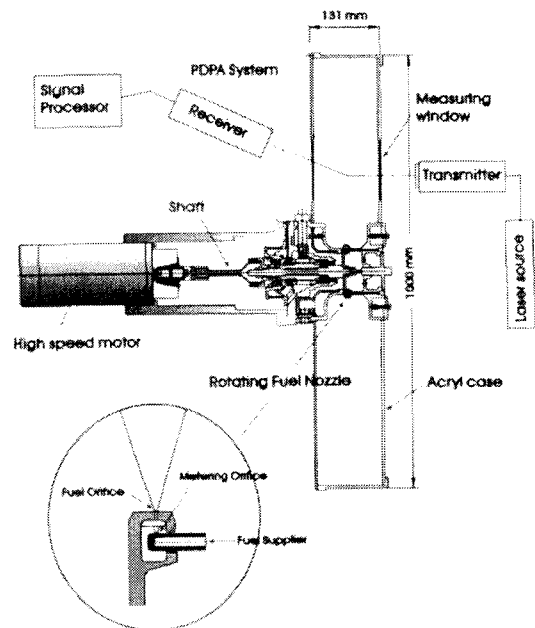


Fig. 1 Schematic diagram of spray test rig with PDPA system

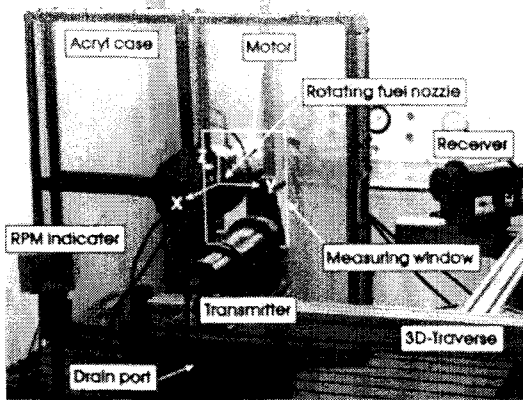


Fig. 2 Picture of spray test rig and PDPA system

되도록 하였다. 연료분사 절차는 다음과 같다. 물은 설비에서 공급되어 미터링 오리피스로 흘러가며, 이것은 연료노즐의 원심력에 의해 연료노즐 안쪽 면으로 퍼지게 된다. 그 후 회전연료노즐에 있는 몇 개의 연료 분사 오리피스를 통과하게 되며, 이때 유체입자는 회전하는 연료노즐의 속도성분에 의하여 대기 중으로 분출하게 된다. 이때 생성된 유체입자의 얇은 막 또는 액주는 점차 분열되어 미세한 분무 입자로 변화하게 된다.

실험에 이용된 PDPA 측정시스템은 레이저 광원, Transmitter, Receiver, 신호처리장치와 3차원 이송 시스템으로 구성되어진다. 5W Ar-Ion(Innova 70, Coherent Co.) 레이저가 이용되었고, 녹색과 청색 빔(Wave Length 514.5 nm and 488 nm)을 이용하여 2차원 속도성분을 측정하였고, 입자의 크기를 측정하였다.

Fig. 3 과 Fig. 4에 PIV 시스템의 개략도 및 사진을 제시하였다. PIV 시스템은 Nd-YAG Laser, 고성능 CCD 카메라, 싱크로나이저와 이미지 프로세싱 시스템으로 구성되어 있다. Nd-YAG Laser에서 방출된 빛은 광학장치에

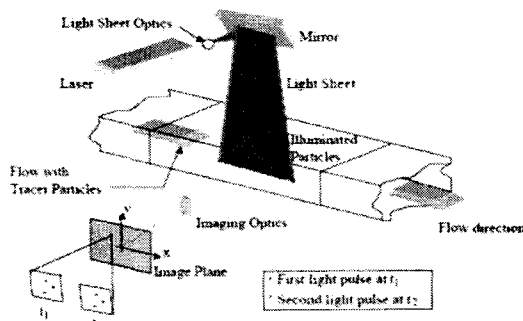


Fig. 3 Schematic diagram of PIV system

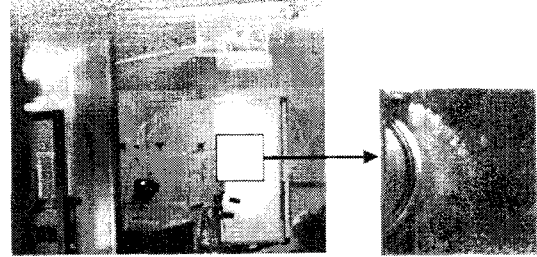


Fig. 4 Picture of PIV system

Table 1 Types of rotating fuel nozzle

	Orifice Diameter (mm)	Number of Orifice
Type 1	0.8	24
Type 2	1.5	12
Type 3	3.0	3

의해 얇은 시트 형태로 시험리그의 측정부로 전송되며, 산란된 빛은 CCD 카메라에 의해 촬영되어 컴퓨터에 의해 저장된 후 프로세싱 단계를 거치게 된다. CCD 카메라는 Powerview Cam 카메라(2K×2K resolution)가 이용되었고, Two Frame Cross-Correlation 방식으로 속도벡터를 얻을 수 있었다. Interrogation Window는 32×32 픽셀을 사용하였고, 50% Overlapping 방식을 이용하였다.

### 2.2 실험방법

분무실험은 실험실 환경에서 물을 이용하여 수행되었으며 이때 공급되는 물의 유량은 120 kg/h 이다. 실험에는 3가지 종류의 연료노즐을 이용하였으며, 오리피스의 직경은 0.8, 1.5, 3.0 mm가 이용되었다. 자세한 사항은 Table 1에 제시되어 있다.

## 3. 실험결과 및 검토

### 3.1 가시화결과

Fig. 5에 회전 수 2,500, 5,000, 7,500, 10,000, 15,000, 20,000 rpm에서의 분열과정이 나타나 있다. Dahm은 액적의 분열과정을 subcritical, transition, supercritical breakup으로 구분하였다. subcritical liquid breakup은 표면장력이 충분히 커서 오리피스에서 분출하는 여러 액막들이 단일 액주로 발전되며, 이 액주가 Rayleigh breakup 과정에 의해 액적으로 발전하는 것을 말한다. supercritical liquid

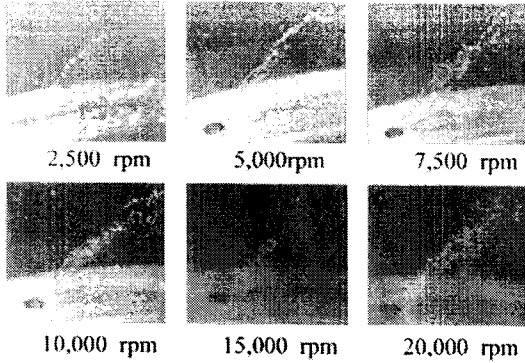


Fig. 5 Spray visualization with rotational speed (Type 2)

breakup은 액막이 액주로 되지 않고 바로 분열과정을 거치는 것을 말하는 것이다<sup>(6)</sup>.

2,500 rpm에서 5,000 rpm 까지의 경우 오리피스에서 분출된 액적필름은 단일액주형태를 나타내며 액주의 끝단에서 점차 분열과정을 거침을 볼 수 있다. 이 경우는 “Subcritical Liquid Breakup”에 해당되며, 표면장력이 필름의 관성력보다 충분히 큰 경우이다. 이것은 관성력과 표면장력의 비인 웨버수로서 표현이 가능하며, Table 2에 각 회전수에 대한 웨버수가 표시되어 있다. 15,000에서 20,000 rpm의 경우 액주의 개수는 증가하고 액주의 직경이 작아짐을 볼 수 있으며, 결국 이 액주는 미세한 액적으로 분열됨을 볼 수 있다. 이 경우는 “Supercritical Liquid Breakup”에 해당되는 경우로서 관성력이 충분히 커서 필름을 작게 분열시키게 되며 이것이 미세한 입자로 발전하게 된다. Subcritical 과 Supercritical 의 중간단계는 7,500에서 10,000 rpm 사이에서 관측된다. 이 가시화 결과로부터 연료노즐의 회전속도에 따른 분열과정과 입자의 크기의 전반적인 형태를 이해 할 수 있다.

### 3.2 PDPA 측정결과

Fig. 6는 PDPA 를 이용한 측정시 측정격자를 나타낸다. 측정위치는 3차원 이송시스템에 의하여 자동적으로 이송되도록 프로그램 하였다. 각각의 측정위치에서 입자크기, Volume Flux 및 속도성분을 측정하였으며, 이때 회전연료노즐의 속도는 5,000에서 20,000 rpm 까지 변화 시켰으며 연료노즐은 3가지 형태를 모두 이용하였다.

Fig. 7에 3가지 연료노즐에 대한 Volume Flux 와 속도 벡터를 각각 나타내었다. 5,000 rpm의 경우 분무입자의 분포는 연료분사 오리피스 주위에 매우 좁은 영역에 집중되어 있음을 볼 수 있다. 연료노즐의 회전속도를 20,000

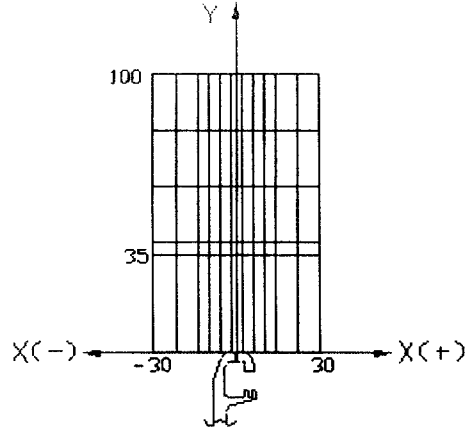


Fig. 6 PDPA measurement points

rpm 으로 증가시킬 경우 연료분무는 넓은 지역으로 확대된다. 이것은 3가지 연료노즐에서 공통적으로 관찰된다.

이러한 이유는 연료노즐의 회전속도가 증가할수록 분무입자의 크기가 줄어들어 입자의 단면적이 점차 증가하게 되며, 공기와의 접촉 면적이 보다 커지게 된다. 따라서 공기와의 상호작용에 의해 입자의 속도는 점차 감소하며 분무입자는 보다 넓은 지역으로 확대된다고 판단된다.

Dahm은 회전연료 분사시스템의 경우 분무특성은 연료분사 오리피스의 직경  $d$  와 웨버수와의 상관관계로 표시

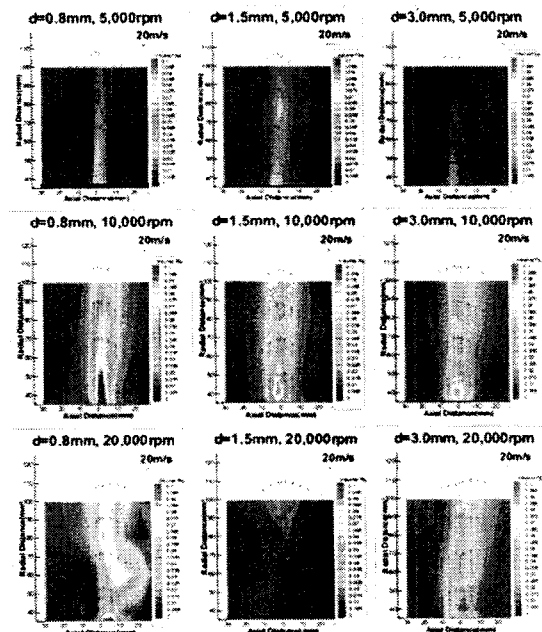


Fig. 7 Volume flux and velocity vector

Table 2 Weber number of rotating fuel nozzle

	Type 1	Type 2	Type 3
5,000 rpm	0.37	0.55	1.65
10,000 rpm	0.74	1.10	3.30
20,000 rpm	1.48	2.20	6.60

하였다. 이때 웨버수는 회전연료노즐의 속도로 정의된 변형된 식 (3)을 이용하였다.

$$We_d = \frac{\rho_g \cdot U \cdot d}{\sigma} \quad (3)$$

Dahm은 가시화 연구결과를 통해 회전연료노즐에서 분

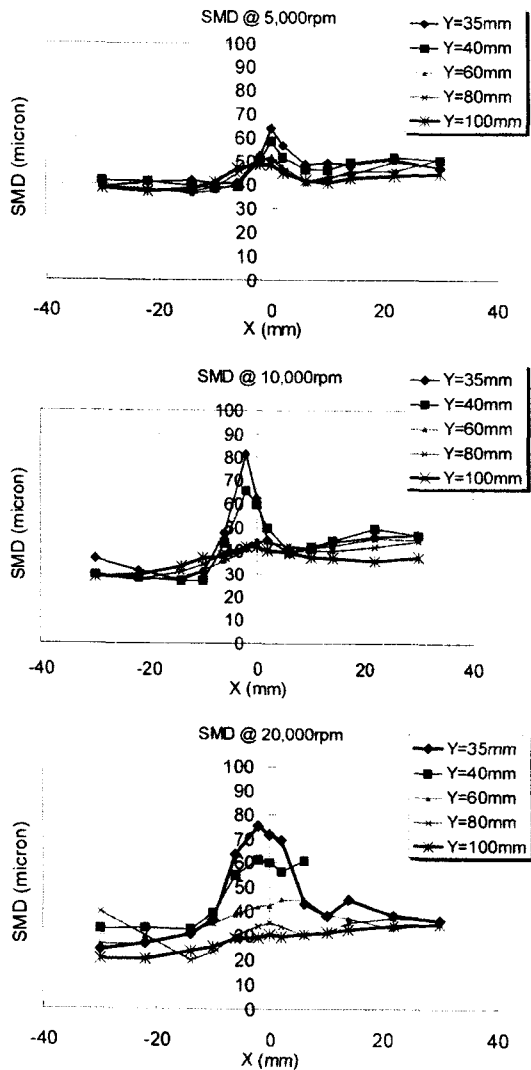


Fig. 8 SMD distribution (Type 1)

사되는 액적의 분열과정을 “Liquid Column Breakup”, “Bag Breakup”, “Bag-Shear Breakup”과 “Shear Breakup” 으로 웨버 수에 따라 구분하였으며 그 범위는 다음과 같다.

- $We \leq 5$  Liquid Column Breakup
- $5 \leq We \leq 60$  Bag Breakup
- $60 \leq We \leq 100$  Bag/Shear breakup
- $We \geq 100$  Shear Breakup

본 실험에서  $\rho_g=1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $\sigma=0.072 \text{ N/m}$  이므로, 각 연료노즐의 회전수에 따른 웨버수는 Table 2와 같다. Table 2에서 웨버 수는 Type 3의 20,000 rpm을 제외하면 5 이하의 값을 가지며 이것은 본 실험의 경우 주요한 분열과정이 Liquid Column Mode에서 대부분 일어남을 알 수 있다. 이 경우 Dahm은 입자의 크기분포를 오리피스 직경으로 무차원화 하여 표시할 수 있음을 제시하였다. 따라서 오리피스 크기가 같을 경우 웨버 수의 정의로부터, 변화하는 회전수에 의하여 입자의 크기분포가 다르게 나타나게 됨을 이해 할 수 있다.

Fig. 8은 오리피스의 직경이 0.8 mm 인 경우로서 회전수에 따른 SMD 분포가 나타나 있다.  $X = \pm 10 \text{ mm}$  내에서 SMD는 다른 지역에 비해 큰 값을 가지고 분무각은 매우 작은 값을 가지고 있음을 볼 수 있다. 그리고 연료노즐에서 거리가 멀리 떨어질수록 입자크기는 점차 작은 값을 가지고 있음을 볼 수 있다. 즉 오리피스에서 분출된 액주가 점차 발달하여 분열하는 과정에서 액적의 크기가 점차 작은 값으로 변화됨을 알 수 있다.

Fig. 9은  $x = -10 \text{ mm}$ 에서  $x = +10 \text{ mm}$  까지의 입자 평균크기에 대한 구간그림이다.  $y = 100 \text{ mm}$  위치에서 평균 입자의 크기는 회전수가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내며, 5,000 rpm에서  $45 \mu\text{m}$ , 10,000 rpm에서  $39 \mu\text{m}$ , 20,000 rpm에서  $29 \mu\text{m}$  를 나타낸다. 그러나 연료노즐 근

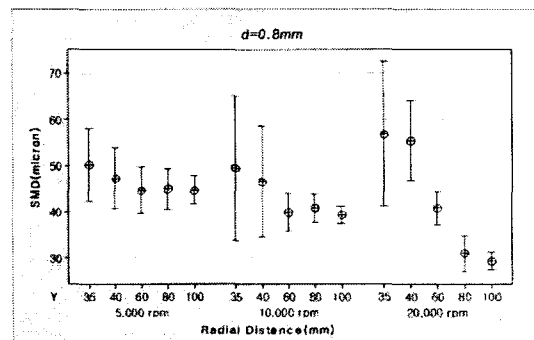


Fig. 9 SMD interval plot with radial(Y) distance(d=0.8 mm)

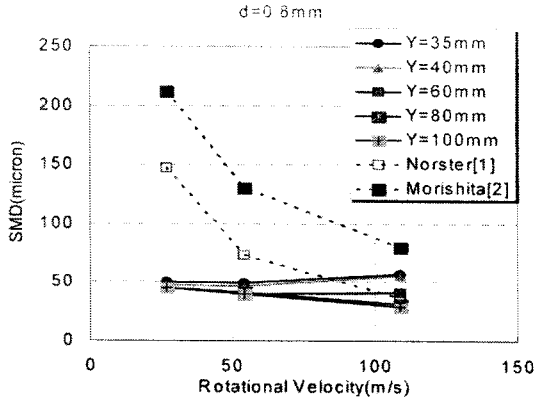


Fig. 10 Average SMD with rotational velocity (d=0.8 mm)

처에서는 입자의 크기의 변동 폭이 매우 크고 회전수가 증가함에 따라 오히려 입자가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이것은 액주의 분열이 연료노즐 오리피스 근방에서 발생하는 것으로 이해할 수 있으며, 이때 액적은 불안정한 상태로 있음을 알 수 있다.

Fig. 10는 회전수에 따른 평균입자의 크기를 반경방향 35 mm에서 100 mm까지 나타내었으며, 이전 연구자인 Norster와 Morishita의 연구결과와 비교하였다. Fig. 10에서 Norster와 Morishita의 실험결과와 본 연구결과는 잘 일치하지 않음을 볼 수 있다. 이것은 연료노즐의 형상과 측정방법상의 차이로 인한 것으로 판단된다. 즉 이전 연구의 경우 유리평판위의 오일필름에 수집된 분무입자를 사진측정법으로 분석하여 입자의 크기를 측정하였으며, 이 방법을 이용할 경우 분무형태에 왜곡을 줄 수 있고, 또한 정확한 거리에서 측정 할 수 없는 문제가 있다. Morishita가 실험에 이용한 회전연료노즐은 본 연구에서 이용된 분사장치와 크기와 형태면에서 다소 상이하다.

그러나 Y=100 mm 경우 회전속도 증가에 따라 입자의 크기가 작아지는 경향을 보여주고 있다. 즉 입자크기는 반경방향의 거리가 100 mm 이상 되어야 회전속도에 의한 입자크기감소경향이 나타남을 알 수 있다.

3차원 속도벡터와 volume flux가 Fig. 11에 제시되어 있다. 연료노즐 근방에서 접선방향의 속도성분은 큰 값을 가지나 반경방향 거리가 증가할수록 점차 감소함을 볼 수 있다. 회전속도를 증가시킬 경우 접선방향 속도성분은 초기의 속도크기를 보다 멀리 유지하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 12는 반경방향 거리에 따른 접선방향의 속도성분과 반경방향 속도성분을 나타낸다. 오리피스 크기에 관계없이

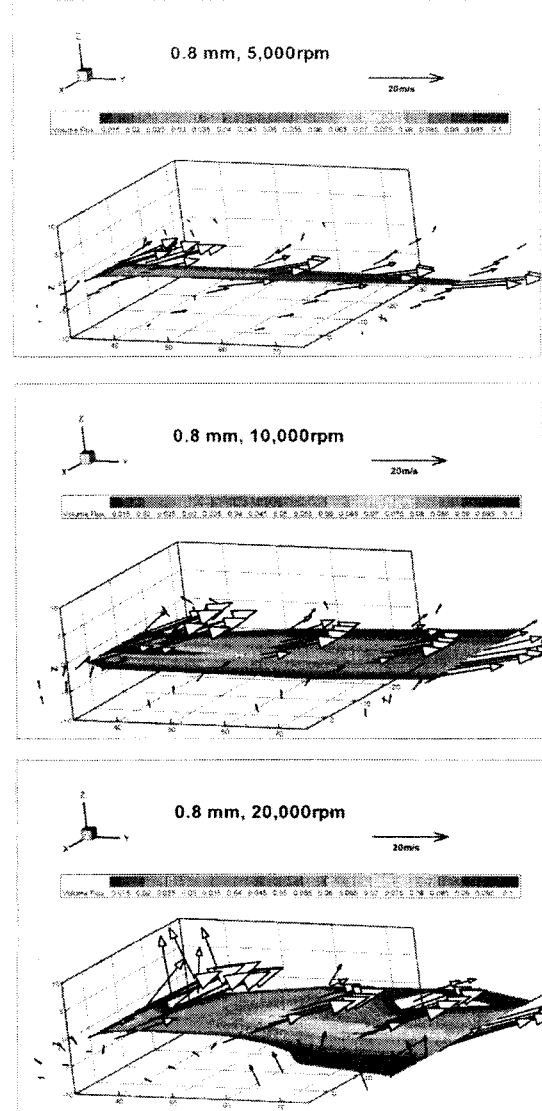


Fig. 11 3-d velocity profile (d=0.8 mm)

반경방향 과 접선방향 속도성분은 거리에 따라 감소함을 볼 수 있다. 또한 접선방향의 속도성분의 경우 반경방향 속도성분과 비교할 때 급격하게 감소함을 볼 수 있다.

Fig. 13는 Y=100 mm에서 입자의 크기와 Y=35 mm에서의 입자의 속도성분과의 상관관계를 나타낸다. 이 그림에서 속도변화에 따른 입자의 크기의 변화 기울기가 가장 큰 접선방향 속도성분(W)이 가장 상관관계가 강함을 볼 수 있다. 즉 이것은 접선방향 속도성분을 크게 할 수 있는 방향으로 연료노즐 설계를 할 경우 더욱 미세한 입자를 얻을 수 있음을 의미한다.

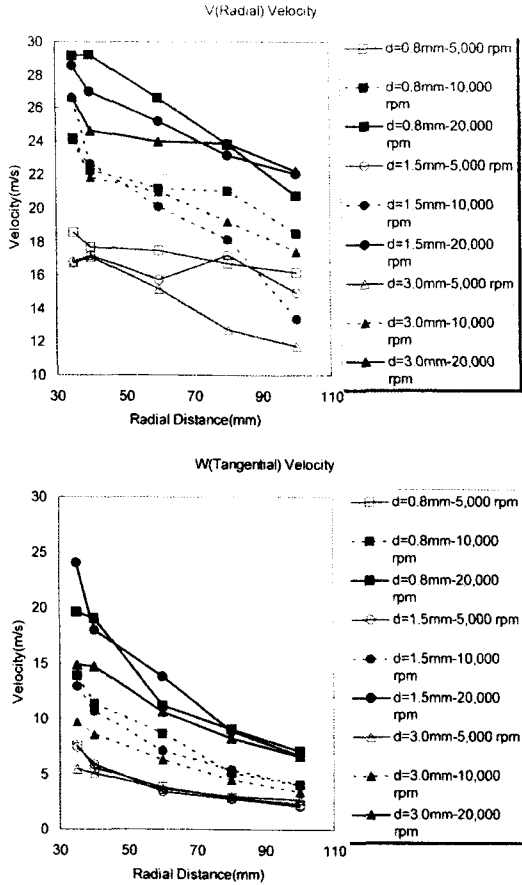


Fig. 12 Droplet velocity with radial distance

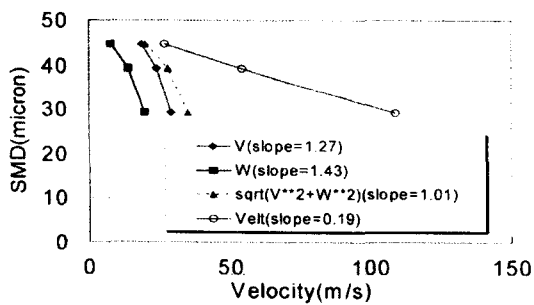


Fig. 13 Droplet size with velocity (velocity measurement position : Y=35 mm, drop size measurement position: Y=100 mm)

### 3.3 PIV 측정결과

Fig. 14은 PIV 측정시의 분무입자 사진을 보여주고 있다. 사진에서 액주와, 이전의 액주에서 분열된 입자의 흔적을 볼 수 있다.

분무입자의 사진으로부터 얻은 속도벡터가 Fig. 15에

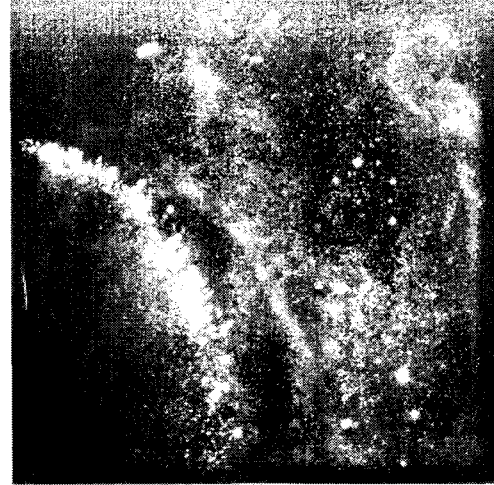


Fig. 14 The instantaneous spray image at 10,000 rpm (d=3.0 mm)

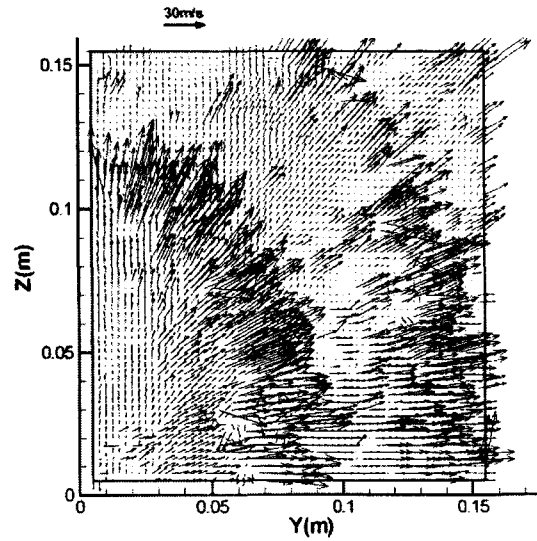


Fig. 15 Instantaneous velocity vector at 10,000 rpm (d=3.0 mm)

제시되어 있다. 액주를 따라 강한 속도성분이 있음을 알 수 있다. 그러나 액주를 제외한 나머지 부분의 경우 순간 속도는 매우 작은 값을 가지고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 16는 1,000장의 PIV 사진에서 앙상블 평균 속도분포를 구하여 나타낸 것이다. 최대속도는 대략 10 m/s 정도이며, 이 값은 순간속도에서 얻은 최대속도(40 m/s)보다 작은 값이다. 이것의 주요한 이유는 회전연료노즐에서 분사된 입자의 경우 분무특성이 시간에 따라 변화하게 되기

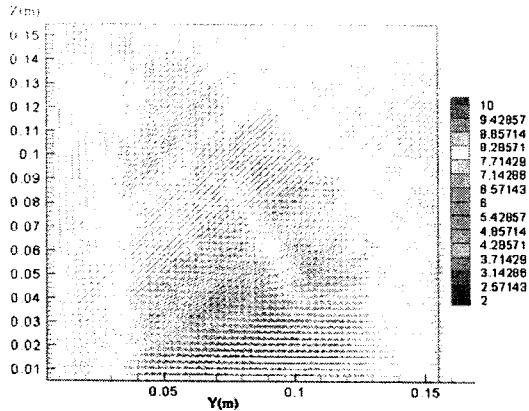


Fig. 16 Ensemble average velocity vector at 10,000 rpm (d=3.0 mm)

때문으로 판단된다. 즉 앙상블 평균속도는 액주의 속도성분과 주위의 정지된 유체 속도의 성분에 대한 크기를 포함하고 있게 된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 회전연료 분사시스템의 분무특성을 이해하기 위한 것이다. 분무입자의 크기 및 Volume Flux, 속도분포를 PDP와 PIV를 이용하여 측정하였고 가시화 하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 회전연료분사시스템의 경우 분무각도는 매우 작고 그 두께는 얇은 층이와 같이 매우 가늘다.
- 2) 같은 연료노즐 회전수에서 분무입자의 크기는 위치에 따라 변화한다. 분무 오리피스 근처에서 SMD는 회전수 증가에 따라 큰 폭으로 변화되며 증가하는 추세이다. 반면 연료분사 오리피스에서 멀리 떨어진 경우 SMD는 회전수의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타낸다.
- 3) 분무입자의 반경방향 및 접선방향 속도는 반경방향 거리에 따라 감소한다. 접선방향 속도성분(W)는 분무입자

의 크기와 강한 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

- 4) PIV 측정을 통하여 순간 속도장과 앙상블 속도장을 얻을 수 있었다. 이 결과 회전연료 분사시스템의 경우 시간에 따라 입자의 속도가 변화됨을 알 수 있었다.

#### 후 기

이 논문은 2005년도 전북대학교 지원 연구비에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

- (1) Norster, E. R., CoA-Memo-51, 1964, "Cranfield College of Aeronautics", Bedford, England.
- (2) Morishita, T., "A Development of the Fuel Atomizing Device Utilizing High Rotational Speed", ASME Paper No. 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. M Mellor, "Design of Modern Turbine Combustors", Academic Press, London, 1990, pp. 306-314.
- (5) K. Y. Lee, S. M. Choi, Y. M. Han, J. B. Park, "Ignition Characteristics on the Annular Combustor with Rotating Fuel Injection System", Proceedings of ASME Turbo Expo 2004, ASME Paper No. GT2004-53233.
- (6) W. J. A. Dahm, P. R. Patel, B. H. Lerg, "Visualizations of Liquid Breakup by Fuel Slings", Proceedings of the 9th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS 2003, 13-18 July, 2003, Sorrento, Italy.