

## 단열식 오리피스를 적용한 고속회전 분무노즐의 미립화 특성

장성호\* · 최성만†

### Atomization Characteristics of the High Speed Rotating Injection System with Single Column Orifice

Seong Ho Jang and Seong Man Choi

**Key Words:** Single Column Injection Orifice(단열식 분무오리피스), High Speed Rotating System(고속회전시스템), Liquid Film Thickness(액막두께)

#### Abstract

The spray characteristics of the high speed rotating fuel injection system were studied. The five variants of rotating fuel nozzle were used by spray test. The diameter of single column injection orifices are varied from 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm and 5 mm. We constructed high speed rotating test rig and measured droplet size by PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer) system. Also spray was visualized by using high speed camera. In the test results, we could understand that length of liquid column from the injection orifice is mainly controlled by the rotational speeds. SMD is decreased with increasing injection orifice diameter and rotational speeds. Furthermore, from the comparison to the theoretical calculation, we confirmed that SMD is influenced by the liquid film thickness which is formed inner surface of injection orifice.

#### NOMENCLATURE

PDPA : Phase Doppler Particle Analysis  
 SMD : Sauter Mean Diameter, [ $\mu\text{m}$ ]  
 $\mu_L$  : Absolute viscosity of liquid, [ $\text{N} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$ ]  
 $\Omega$  : Angular velocity, [ $\text{rad}/\text{sec}$ ]  
 $t$  : Liquid film thickness, [ $\mu\text{m}$ ]  
 $d$  : Orifice diameter, [ $\text{mm}$ ]  
 $q$  : Volume flow rate on a per-channel, [ $\text{m}^3/\text{sec}$ ]  
 $R$  : Outer radius of rotating nozzle, [ $\text{cm}$ ]  
 $\rho_L$  : Liquid density, [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

#### 1. 서 론

회전 연료분사 시스템은 엔진 회전축의 원심력을 이용하여 연료를 분사하므로 연료분사를 위한 고압의 연료펌프 시스템이 필요 없으며, 압력 분사 시스템이나 공기-충돌형 분사 시스템에 비해 부품수가 매우 적고 간단한 구조로 되어있다는 장점을 가진다. 또한 분무의 관점에서는 엔진의 부분 부하나 아이들 상태에서도 분무 특성이 매우 좋다는 장점이 있다<sup>(1)</sup>. 이러한 이유로 이 분사 시스템은 프랑스의 Turbomeca사에서 최초로 가스터빈 엔진에 적용한 이래 다양한 엔진에 적용되어 성공적으로 운용되고 있다.

이러한 회전 연료분사 시스템은 분무입자의 크기가 점화와 연소특성, 연소기의 배기성능에 영향을 주기 때문에<sup>(2)</sup> Dahm 및 Morishita 등에 의하여 분무입자의 크기 및 속도 특정 테이터로부터 분무특성이 연구되어졌다. 먼저 Morishita<sup>(3)</sup>는 분무입자의 크기(SMD)가 회전

(2009년 7월 8일 접수 ~ 2009년 8월 3일 심사완료)

\* 전북대학교 항공우주공학과

† 책임저자, 회원, 전북대학교 항공우주공학과

E-mail : csman@chonbuk.ac.kr

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

방향 속도성분( $V_r$ )에 반비례하고, 연료유량( $Q$ )에 비례한다고 보고하였으며, 또한 회전판의 Ejecting Orifice의 크기와 회전판의 직경에 따른 영향을 알아보기 위한 실험을 한 결과로서 회전판의 직경과 액막두께의 관계식을 도출하였다.

또한 Dahm<sup>(4)</sup>의 연구에서는 회전 연료분사노즐의 분사 오리피스의 크기와 형태에 따라 분사되는 액주 및 액적분열과정의 분무패턴을 가시화를 통하여 분무특성을 설명하고자 하였으며, 분무액적의 분열과정을 3단계 과정으로 구분하여 설명하였다<sup>(4)</sup>. 또한 고속으로 회전하는 연료분사노즐의 오리피스로부터 배출되는 액체들이 넓은 액막(liquid film) 형태로 퍼져서 분사되며, 이 액막의 두께는 분무입자의 크기(SMD)와 큰 관련이 있다는 연구결과를 발표한 바 있다. 또한 오리피스 내부에 생성되는 액막의 두께( $t$ )를 구하는 계산식(1)을 도출하였다.

$$t = \left(\frac{3}{\pi}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu_L q}{\rho_L R \Omega^2 d}\right)^{1/3} \quad (1)$$

이강엽<sup>(5)</sup> 등은 슬링거 연소기의 연소특성 연구를 수행 하였으며 연소효율은 연료분사노즐의 회전수와 상관관계가 있음을 발표한 바 있다. 그리고 최현경<sup>(6)</sup> 등은 오리피스 수에 따른 회전분사노즐의 분무특성을 연구한 바 있다.

따라서 분무입자의 크기와 분포형태, 액막의 두께와 같은 분무입자의 정보는 점화 및 화염안정성과 같은 연소특성에 큰 영향을 미치는 매우 중요한 의미를 지닌다. 그러나 선행연구에서는 측정 장비 부족으로 인정 보정량적인 데이터를 제시하지 못하였거나, 또는 체계적인 연구가 이루어지지 않아 입자의 분열과정에 대한 해석이 다소 미흡한 것으로 생각된다.

그러나 본 연구에서는 PDPA 레이저 진단기술을 이용하여 분무입자의 크기 및 속도를 측정하여 정량적 데이터를 제시하고, 고속카메라를 이용하여 분무형상을 가시화함으로써 회전 연료분사시스템에 대한 분무 특성을 이해하고 분석하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Figure 1은 실험장치에 대한 개요도를 보여주고 있다. 실험장치는 스피들 모터, 단열식 회전연료분사노즐, 가압식 물탱크, 연료공급노즐, 아크릴 케이스 및 PDPA

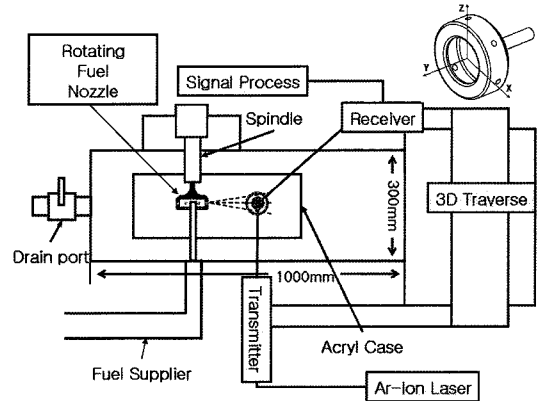


Fig 1 Schematic Diagram of Spray Test Rig with PDPA System

측정시스템으로 구성하였고, 작동유체는 물을 사용하였다.

단열식 회전 연료분사노즐은 고속 스피들과 직렬로 연결되어 있고, X-Y 좌표축의 중심에 회전축을 두고 있으며, 반시계 방향으로 회전한다.

작동유체의 분사절차는 다음과 같다. 가압식 물탱크로부터 일정하게 가압된 물이 연료공급노즐의 미터링 오리피스에 의해 제어되어 회전 연료분사노즐의 내벽면으로 공급된다. 공급된 물은 회전 연료분사노즐의 회전에 따른 원심력에 의해 분사오리피스로부터 시험장치 내부로 분출되는데, 이 때 생성된 유체입자의 얇은 막 또는 액주는 점차 분열되어 미세한 분무입자로 변화하게 된다. 이렇게 분사된 물은 측정된 후 드레인 포트를 통하여 외부로 배출되도록 구성하였다.

실험에 사용된 PDPA 측정시스템은 공랭식 Ar-Ion 레이저, 발신부, 수신부, 신호처리장치와 3-D 이송장치로 구성된다.

### 2.2 실험방법

실험에 사용된 단열식 회전 연료분사노즐은 Fig. 2에 제시되어 있다. Fig. 2에서 분사 오리피스의 개수는 6개이며, 단열 형태를 이루고 있다. 분무실험은 분사오리피스 직경에 따라 5종류의 연료분사노즐에 대한 실험을 수행하였고, 자세한 사항은 Table 1에 나타내었다. 분무실험은 회전속도와 유량에 따른 영향을 알아보기 위해 각각 10.47 m/s(5,000 rpm)와 0.001389 kg/sec(5 kg/h)를 기준으로 회전속도는 10.47 m/s, 유량은 0.001389 kg/sec씩 증가시켜가며 실험을 수행하였다.

Figure 3은 1-D PDPA를 이용한 분무입자의 크기 및

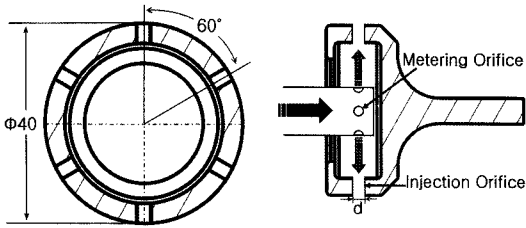


Fig. 2 Rotating Fuel Injection Nozzle

Table 1. Test Matrix for Rotating Fuel Nozzle

	Injection Orifice		
	Number	Diameter, d(mm)	A(mm <sup>2</sup> )
Case1	6	1	4.71
Case2		2	18.84
Case3		3	42.39
Case4		4	75.36
Case5		5	117.75

※ A : Injection Orifice Total Area

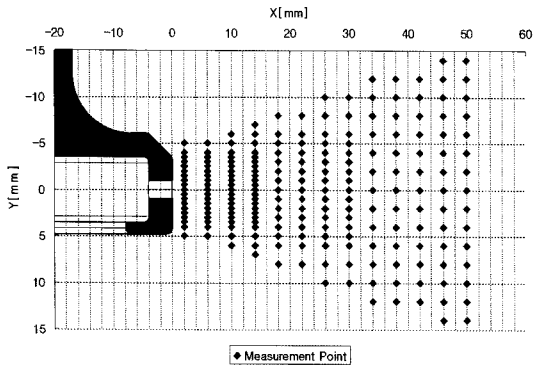


Fig. 3 PDPA Measurement Points

속도 측정시의 측정위치를 나타낸다. 측정 위치는 x-y 평면 215개이며, 각 측정 위치에서 20초 내에 10,000개의 데이터를 추출하였다.

### 3. 실험결과 및 검토

#### 3.1 가시화 결과

Figure 4는 고속카메라(FASTCAM SA1.1)를 사용하여 Backlight 방식으로 유량 0.004167 kg/sec(15 kg/h)에서 회전 연료분사노즐 Case 1, 2, 3, 4, 5 각각에 대

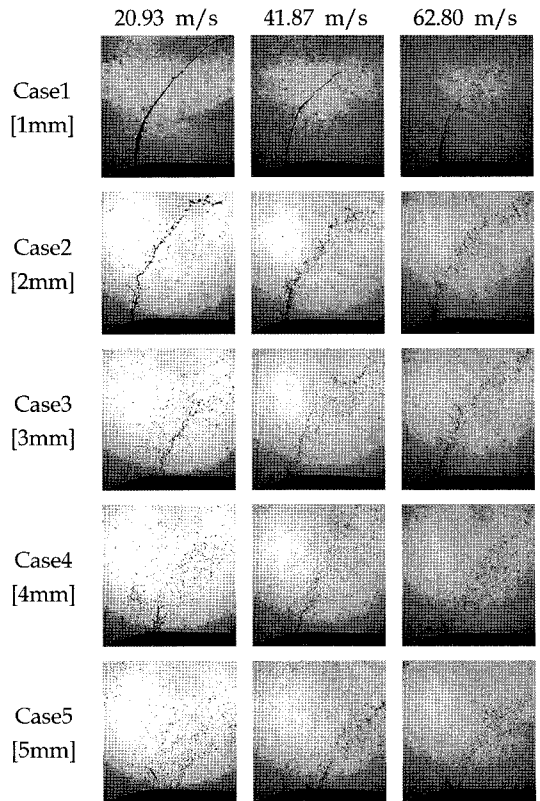
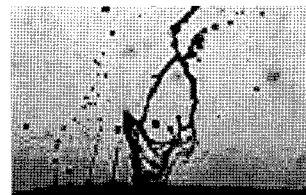


Fig. 4 Spray Visualization with Rotational Speed



Case2 [6Hole 2mm]

Fig. 5 Liquid Film Disintegration

한 분무현상을 가시화한 결과이다.

Figure 4는 가시화 결과를 나타내며, Fig. 5는 Case 2의 20.93 m/s(10,000 rpm)의 경우에 대한 오리피스 출구에서의 액막의 분열가시화 결과이다. Fig. 4로부터 회전속도가 증가함에 따라 분무액적의 분열위치는 회전 연료분사노즐의 오리피스 출구로부터 가까워짐을 알 수 있다. Fig. 5에서는 오리피스 출구에서의 액막이 형성되어 분열되는 과정을 확인할 수 있다.

#### 3.2 PDPA 측정결과

Figure 6과 7은 Case 3을 유량 0.004167 kg/sec에 대

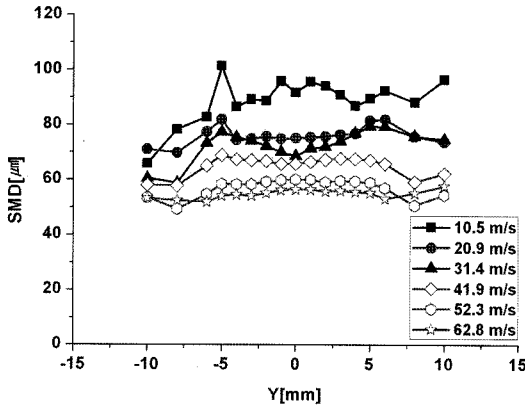


Fig. 6 SMD with Peripheral Velocity

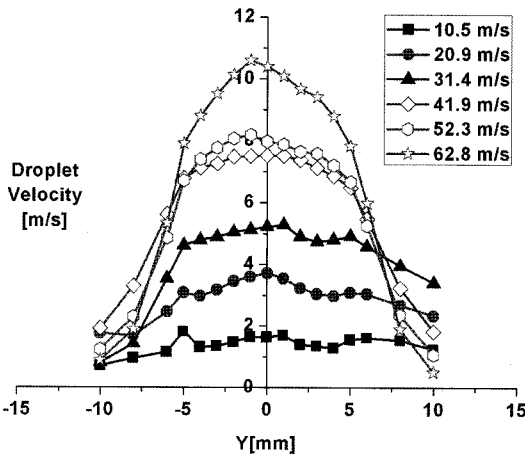


Fig. 7 Droplet Velocity with Peripheral Velocity

하여 회전분사노즐의 분무오리피스 출구로부터 X축으로 30 mm인 지점에서의 노즐회전속도를 10.5 m/s(5,000 rpm)에서 62.8 m/s(35,000 rpm)로 변화시킬 때의 SMD와 속도를 나타낸 것이다.

Figure 6과 7로부터 회전분사노즐의 회전속도가 10.5 m/s에서 62.8 m/s로 증가함에 따라 SMD는 작아지고 분무입자의 속도는 증가함을 확인하였다. 이러한 결과는 회전속도가 증가함에 따라 액적의 분출속도도 증가하기 때문에 분무입자와 주위기체의 상대속도가 증가되어 분무오리피스로부터 분무된 액주 또는 액막이 작게 분열되고, 이것이 미세한 입자로 발전하기 때문으로 판단된다.

Figure 8은 하나의 회전 연료분사노즐로 같은 조건에서 3번의 실험을 하여 신뢰도를 분석해 본 결과를 나타낸 것이다. 그 결과 PDDA의 측정결과 값들은 평균표준편차 1.97 μm, 최대오차 3.98 μm, 최소오차 0.06 μm

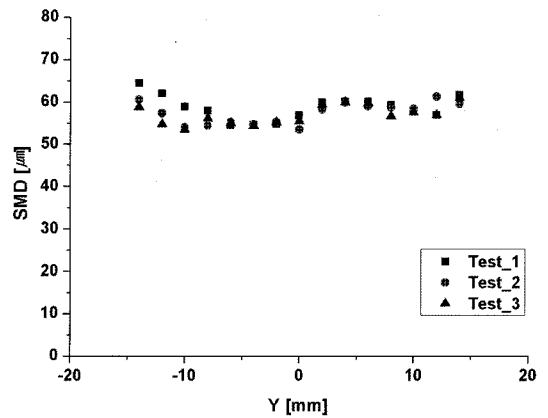


Fig. 8 SMD Measurement for Uncertainty Analysis

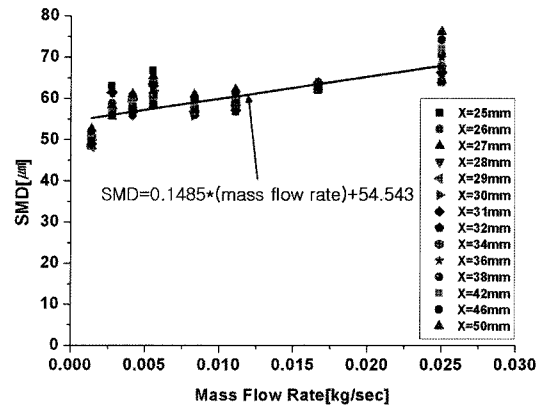


Fig. 9 SMD with Mass Flow Rate

임을 알 수 있으며, t 검정에 의한 95% 신뢰수준을 분석한 결과 모든 데이터가 신뢰구간 내에 있어 시험의 신뢰성이 있다고 판단된다.

Figure 9는 회전속도가 83.73 m/s(40,000 rpm)일 때, 분무입자의 분열이 충분히 이루어진 위치에서의 유량에 따른 SMD 경향성을 보여주고 있으며, 추세선을 표시하였다. 여기에서 x는 분무오리피스의 출구로부터의 거리를 나타낸다. 이 결과로써 유량이 증가함에 따라 SMD는 점차 증가하는 경향성을 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 이유는 유량이 증가함에 따라 분사오리피스 내에 생성되는 액막의 두께가 점차 두꺼워져 액막의 분열이 늦어지는 점 때문으로 판단된다. 이것을 Fig. 14의 결과에서 확인할 수 있다.

Figure 10은 유량 0.004167 kg/sec(15 kg/h), 회전속도 31.40 m/s(15,000 rpm)의 조건에서 Case 1, 2, 3, 4, 5 각각에 대한 Volume Flux를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 분무오리피스의 크기가 1 mm 인 Case 1은 분무

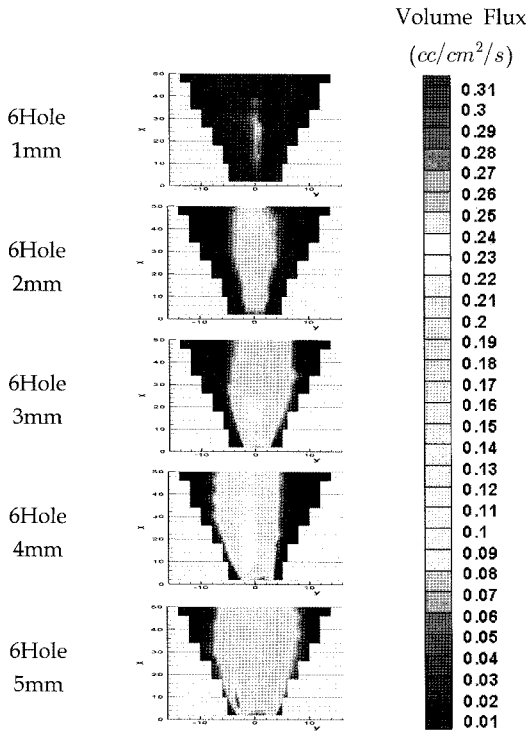


Fig. 10 Volume Flux Contour

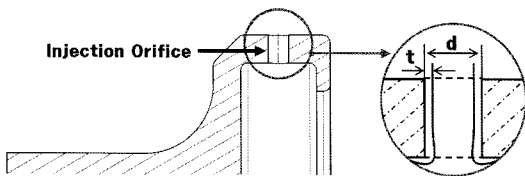


Fig. 11 Schematics of Liquid Film Thickness of Rotating Fuel Nozzle

입자들이 좁은 영역에 집중되어 분사되며, 오리피스의 크기가 커짐에 따라 넓은 영역에 걸쳐 분사됨을 확인할 수 있다. 이러한 형태를 보이는 이유는 일정한 유량이 작은 분무오리피스를 통하여 분무될 때 분무입자들은 단일의 액주형태로 분무되고, 오리피스의 직경이 커짐에 따라 분무입자들은 얇은 액막의 형태로 분무가 더욱 발달하게 되며 분무된 입자의 크기는 작아져 입자의 단면적이 커지므로 주위기체와의 접촉면이 커지게 되어 보다 넓은 영역으로 액막의 형태로 고르게 분무되는 것으로 판단된다.

Figure 11은 연료가 분사 오리피스로부터 균일하게 분포되고 Coriolis Effects가 무시될 정도로 작다는 가정 하에 회전 연료분사노즐의 이론적인 액막 두께에

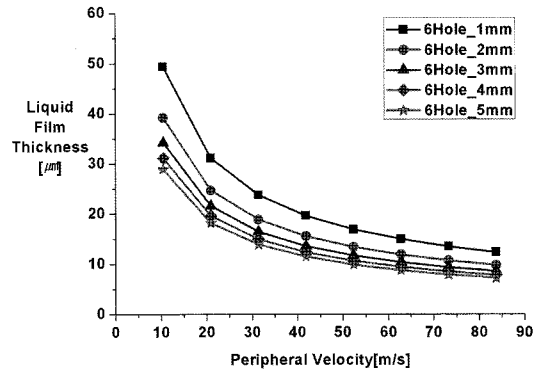


Fig. 12 Liquid Film Thickness with Peripheral Velocity

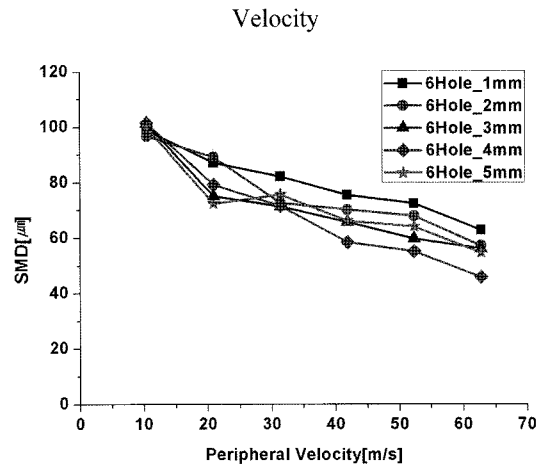


Fig. 13 SMD with Peripheral Velocity

대해 정의하고 있다. 여기에서  $t$ 는 액막의 두께이며,  $d$ 는 분사오리피스의 직경이다. 액막두께(liquid film thickness,  $t$ )는 Dahm<sup>(1)</sup>으로부터 유도된 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다.

Figure 12와 13은 회전 연료분사노즐의 분무오리피스 출구로부터 X축으로 30 mm인 위치에서, 0.004167 kg/sec(15 kg/h)의 유량의 경우에 회전속도에 따른 계산된 액막두께와 최대속도에서의 SMD를 나타낸 것이다. Fig. 11을 통해 회전속도가 증가함에 따라 액막두께는 점차 얇아지고, 분사오리피스의 크기가 클수록 더 얇은 액막두께를 나타냄을 알 수 있다.

또한 Fig. 13을 통해 SMD는 회전속도가 증가함에 따라 작아지고, 30 m/s 이상의 회전속도에서는 분무오리피스의 크기가 커질수록 작은 SMD를 나타낸다. 그러나 오리피스의 직경이 4 mm 이상인 경우는 경향성을 보이고 있지는 않다. 그 이유는 Fig. 10에서 1~4 mm가

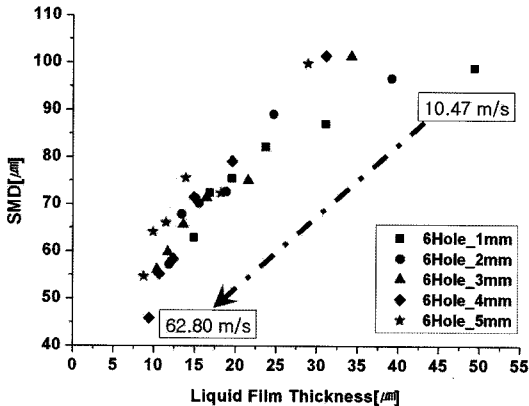


Fig. 14 SMD with Liquid Film Thickness

지는 분무오리피스로부터 분무된 분무입자가 오리피스 내측면에 균일하게 퍼지나, 5 mm인 경우는 분무오리피스의 한쪽으로 액막이 치우쳐서 상대적으로 두꺼운 액주로 분무되기 때문인 것으로 판단된다.

Figure 14는 SMD와 계산된 액막두께와의 관계를 나타낸 것이다. 이를 통해 회전속도가 10.47 m/s에서 62.80 m/s로 증가함에 따라 분사오리피스 내벽 면에 생성되는 액막의 두께가 49.4  $\mu\text{m}$ 에서 9.4  $\mu\text{m}$ 로 감소할 때 SMD는 98.9  $\mu\text{m}$ 에서 45.9  $\mu\text{m}$ 로 감소함을 확인하였다. 따라서 액막의 두께가 얇아질수록 SMD는 대체적으로 작아짐을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 고속 회전 연료분사노즐의 분무특성을 이해하기 위해 수행하였다. 고속카메라를 이용하여 여러 가지 분사오리피스에 따른 분무현상을 가시화 하였고, PDPA 측정 시스템을 이용하여 분무입자의 속도와 SMD를 측정하였다. 연구결과는 다음과 같다.

1. 회전속도가 증가함에 따라 분무되는 액주의 길이는 짧아지며, 액막두께는 얇아지고, 평균입자의 크기(SMD)는 작아진다. 또한, 공급유량이 증가함에 따라 SMD는 커진다.

2. 분사오리피스의 직경이 클수록 분무입자의 분열위치는 분사오리피스의 출구로부터 가까워지며, 작은 SMD를 생성하지만, 일정크기 이상의 오리피스에서는 오히려 더 큰 SMD를 생성한다.

3. 분사오리피스 내벽 면에 생성되는 액막의 두께가 49.4에서 9.4로 감소할 때 SMD는 98.9에서 45.9로 감소함을 확인하였다. 따라서 액막의 두께는 SMD에 직접적인 영향을 줄을 알 수 있다.

#### 후 기

이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-331-D00102).

#### 참고문헌

- (1) W. J. A. Dahm, P. R. Patel, and B. H. Lerg, "Analysis of Liquid Breakup Regimes in Fuel Slinger Atomization", *Atomization and sprays*, Vol. 16, 2006, pp.945-962.
- (2) A. M Mellor, "Design of Modern Turbine Combustors", Academic Press, London, 1990, pp. 306~314.
- (3) 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
- (4) W. J. A. Dahm, P. R. Patel, and B. H. Lerg, "Experimental Visualization of Liquid Breakup Regimes in Fuel Slinger Atomization", *Atomization and Sprays*, Vol. 16, 2006, pp. 933-944.
- (5) 이강엽, 이동훈, 최성만, 박정배, 박영일, 김형모, 한영민, "슬링거 연소기의 연소특성", *한국추진공학회지*, 제8권, 1호, 2004, pp. 38-43.
- (6) 최현경, 이동훈, 유경원, 최성만, "슬링거 연소기의 회전형 분사장치의 분무특성 연구", *한국액체미립화학회지*, 제13권, 3호, 2008, pp. 149~155.