

회전연료 분사시스템의 분열과정

장성호* · 이동훈** · 유경원*** · 최성만****

Disintegration Process of the Rotating Fuel Injector

Seongho Jang* · Donghun Lee** · Gyungwon You*** · Seongman Choi****

ABSTRACT

This paper presents disintegration process of the small rotational fuel injector. In order to understand disintegration process, we measured droplet diameter, velocity and spray distribution by the PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) system. Also spray was visualized by using Nd-Yag flash photography. From the test results, the liquid column emerging from the injection orifice is mainly controlled by the rotational speeds. Furthermore, droplet diameter(SMD) and spray distribution were strongly influenced by the diameter of the injection orifice.

초 록

소형 회전연료 분사장치의 분열과정 특성을 연구하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 이러한 분열과정의 특성을 이해하기 위해 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)시스템을 사용하여 분무입자의 크기와 속도를 측정하였다. 또한 Nd-Yag Laser를 광원으로 사용하여 분무를 가시화하였다. 실험 결과 Injection Orifice로부터 생성된 액주는 회전수에 의해 지배되고, SMD(Sauter Mean Diameter)와 분무특성은 Injection Orifice의 직경에 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

Key Words: Rotating Fuel Injector(회전연료분사장치), Disintegration Process(분열과정)

용 어 설 명

δ : liquid film thickness at outer diameter of rotating disc, m

σ : surface tension of liquid, N/m

μ_L : absolute viscosity of liquid, $N \cdot \text{sec}/m^2$

Ω : angular velocity, kg/m^3

t : liquid film thickness, μm

d : Orifice diameter, mm

q : volume flow rate on a per-channel, m^3/sec

R : outer radius of rotating nozzle, cm

ρ_L : liquid density, kg/m^3

* 학생회원, 전북대학교 항공우주공학과

** 정회원, 삼성테크윈 파워시스템 연구소

*** 정회원, 국방과학연구소

****정회원, 전북대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail: csman@chonbuk.ac.kr

1. 서 론

회전연료 분사시스템을 채택한 환형연소기는

가스터빈 엔진에서 빈번하게 사용되어지고 있다. 이러한 회전연료 분사시스템은 분무입자의 크기가 점화와 연소 특성, 연소기의 배기성능에 영향을 주기 때문에 Morishita[1] 및 Dahm[2]등에 의하여 분무입자의 크기 및 속도 특정 데이터로부터 분무특성이 연구되어졌다. Morishita는 분무입자의 크기(SMD)는 회전방향 속도성분(V_p)에 반비례하고, 연료유량(Q)에 비례한다고 보고하였다. 또한 액체의 분열과정 중 생성되는 액막두께와 SMD와의 관련된 경험식(1)을 얻었다.

$$SMD \propto \left(\frac{\sigma}{\rho} \delta \right)^{0.5} \quad (1)$$

또한 Dahm[2,3]의 연구에서는 회전연료노즐의 Injection Orifice의 형태와 크기에 따라 분사되는 액주 및 액적분열과정의 분무패턴을 가시화하여 분무특성을 설명하고자 하였으며, 액적분열과정을 Subcritical breakup, transition, supercritical breakup과정으로 구분하였다. 또한 고속으로 회전하는 노즐의 Injection Orifice로부터 배출되는 액체들이 넓은 액막 형태로 분사되며, 이 액막의 두께는 분무액적의 크기(SMD)와 큰 관련이 있음을 밝힌바 있다. 그러나 이러한 선행연구에서는 측정 장비의 부족으로 인해 정량적인 데이터를 제시하지 못하였다.

따라서 본 논문에서는 PDPA 레이저 진단기술을 이용하여 분무입자의 크기 및 속도를 측정하고 분무형상을 가시화하여 회전연료분사시스템에 대한 분열과정의 특성을 정량적으로 이해하고 분석하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Figure 1.은 시험장치에 대한 개요도를 보여주고 있다. 시험장치는 Spindle Motor, 회전연료노즐, 가압식 물탱크, 연료공급노즐, Acrylic Case 및 PDPA 측정시스템으로 구성하였고, 작동유체는 물을 사용하였다. 회전연료노즐은 시험장치 내부에 장착된 고속 spindle과 직렬로 연결되어 있고, 좌표축 X, Y의 중심에 회전축을 두고 있으

며, 반시계 방향으로 회전한다.

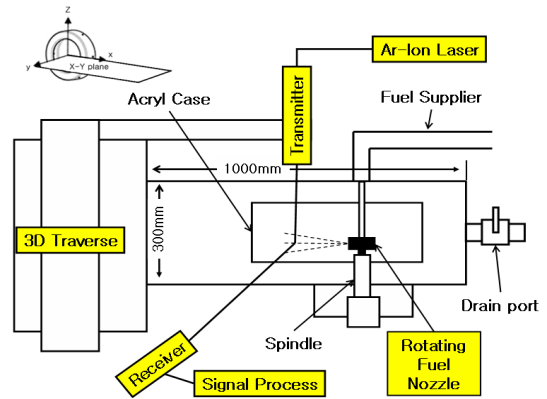
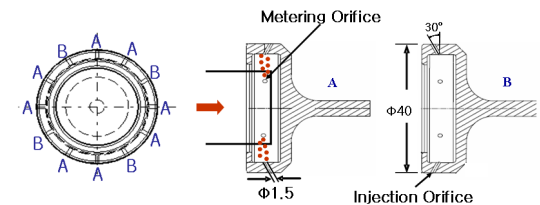


Fig. 1 Schematic diagram of Spray test rig with PDPA system

2.2 실험방법

실험에 사용된 회전연료노즐은 Fig.2에 제시되어 있다. Fig. 2에서 Injection Orifice 개수는 A 단면(2개)과 B단면(1개)의 위치에 따라 다르며, 각각 30°로 V자 형태를 이루고 있다. 분무실험은 Orifice직경에 따라 3종류의 연료노즐을 사용하였고 Table 1.에 제시되어 있다. 분무실험은 회전속도에 대한 영향을 평가하기 위해 15,000 rpm부터 5,000 rpm간격으로 증가시켜가며 수행하였고, 이때 연료공급유량은 15 kg/h로 유지하였다.



(a) 12 Injection Orifice (b) A Section (c) B Section

Fig. 2 Rotational Fuel Injection Nozzle

Table 1. Test Matrix for Rotating Fuel Nozzle

	Number of Orifice	Orifice Diameter (mm)	Orifice total Area (mm^2)
Type1	12	0.5	2.36
Type2	12	1.5	21.20
Type3	12	2.2	45.59

3. 실험결과 및 검토

3.1 가시화 결과

Dahm은 액적의 분열과정 가시화를 통해 subcritical, transition, supercritical breakup으로 구분하였다. Subcritical liquid breakup은 표면장력이 충분히 커서 오리피스에서 분출하는 여러 액막들이 단일 액주로 발전되며, 이 액주가 Rayleigh breakup과정에 의해 액적으로 발전하는 것을 말한다. Supercritical liquid breakup은 액막이 액주로 되지 않고 Injection Orifice 출구에서 바로 분열과정을 거치는 것을 말한다.

Fig. 3은 회전연료노즐 Type 1, 2, 3 각각에 대하여 Nd:Yag Laser와 고속카메라를 사용하여 회전수가 각각 15,000, 25,000, 35,000 rpm 일 때의 분열현상을 가시화한 결과이다.

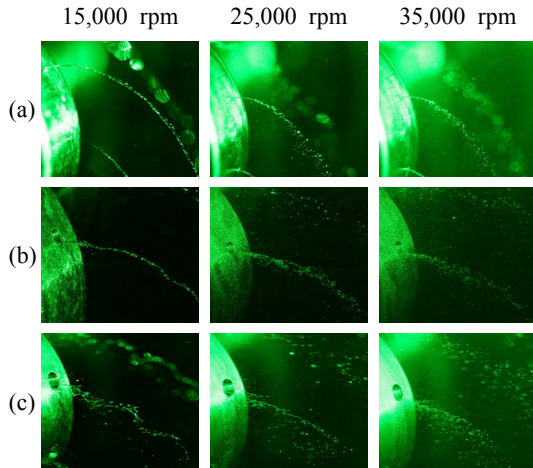


Fig. 3 Spray visualization with rotational speed

Fig. 3에서 15,000 rpm일 때 subcritical liquid breakup과정을 확인할 수 있다. 또한 Type모두 회전수가 증가함에 따라 액주의 길이가 점차 짧아지는 transition과정을 확인할 수 있는데 이는 회전수가 증가함에 따라 분사액체와 주위기체의 상대속도가 증가되어 액막을 작게 분열시키게 되고, 이것이 미세한 입자로 발전함을 알 수 있다. (c)의 35,000 rpm인 경우에는 supercritical liquid breakup과정을 확인할 수 있다.

Fig. 3을 통해 Injection Orifice의 직경이 커질

수록 분열위치가 Injection Orifice출구로부터 가까워짐을 확인할 수 있었고, 이는 회전연료노즐의 원심력에 의해 액체가 분사되면서 Injection Orifice 내벽 면을 따라 넓게 퍼진 액막 형태로 분사되기 때문으로 판단된다.

3.2 PDPA 측정결과

일반적인 가스터빈연소기내의 화염형성위치는 반경방향(X) 50 mm이다. 따라서 Fig. 4는 X=50mm인 지점에서의 회전수 증가에 따른 SMD분포를 나타내었다. Fig. 4로부터 SMD는 회전수가 증가함에 따라 감소함을 볼 수 있고, 이 결과는 회전수가 증가함에 따라 peripheral velocity도 증가하기 때문에 분사액체와 주위기체의 상대속도가 증가되어 액막을 작게 분열시키게 되고, 이것이 미세한 입자로 발전하게 되는 것이라 볼 수 있다.

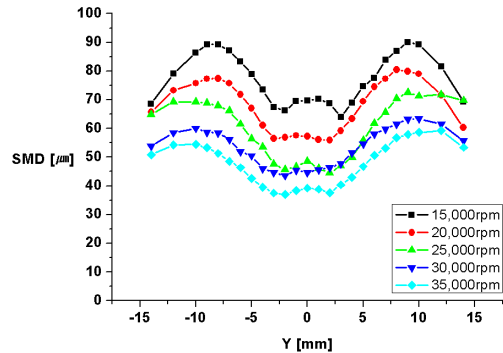


Fig. 4 SMD with Rotational Speed at X=50mm

Fig. 5는 연료가 Injection Orifice로부터 균일하게 분포되고 Coriolis effects가 무시될 정도로 작다는 가정 하에 회전연료노즐의 이론적인 액막두께(t)에 대해 정의하고 있다. 여기에서 t는 액막의 두께이며, d_0 는 Injection Orifice직경이다.

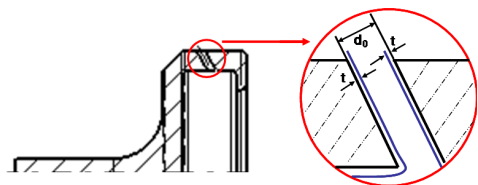


Fig. 5 Liquid Film Thickness of Rotating Fuel Injection Nozzle

액막의 두께(liquid film thickness, t)는 Dahm[3]으로 부터 유도된 식(2)를 이용하여 구할 수 있다.

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

Fig. 6은 $X=50$ mm인 위치에서, 15 kg/h의 유량의 경우에 회전수 증가에 따른 액막두께와 최대속도에서의 SMD크기를 나타낸 것이다. Fig. 6을 통해 회전수가 증가함에 따라 액막두께는 얇아지고, Injection Orifice의 크기가 클수록 더 얇은 액막두께를 생성함을 확인할 수 있다.

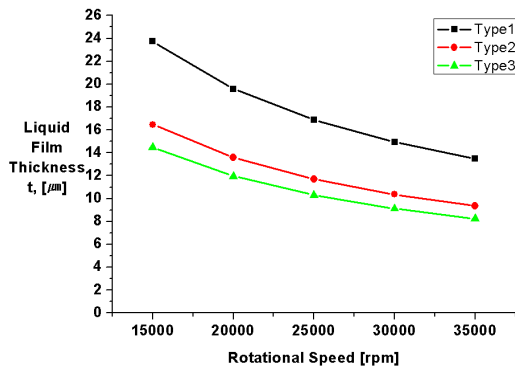


Fig. 6 Liquid Film Thickness with Rotational Speed

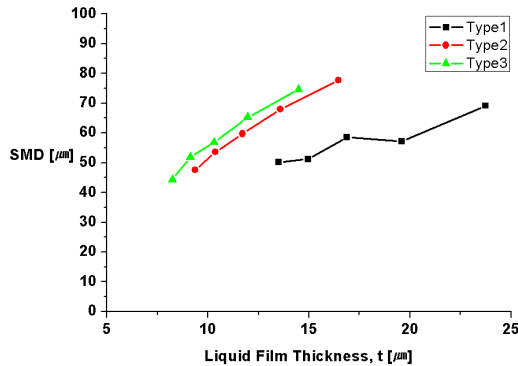


Fig. 7 SMD with Liquid Film Thickness

Fig. 7은 액막두께와 SMD의 관계를 나타낸 것이다. 이를 통해 액막두께가 작을수록 SMD는

작아짐을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 소형 회전연료 분사시스템의 분열 과정 특성을 이해하기 위해 수행하였다. 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 회전수가 증가함에 따라 액주의 길이는 짧아지고, 액막 두께는 얇아지며, 입자의 크기(SMD)는 감소한다.
- 2) Injection Orifice의 직경이 클수록 분무입자의 분열위치는 Injection Orifice의 출구로부터 가까워지고, 분열되는 액적의 크기는 작아진다.
- 3) 채널내의 액막두께는 회전연료노즐의 분열과정에서 액적의 크기를 결정하는 주요한 변수임을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 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
2. W. J. A. Dahm, P. R. Patel, B. H. Lerg, "Experimental Visualization of Liquid Breakup Regimes in Fuel Slinger Atomization", Atomization and Sprays, vol. 16, pp.933-944, 2006
3. W. J. A. Dahm, P. R. Patel, B. H. Lerg, "Analysis of Liquid Breakup Regimes in Fuel Slinger Atomization", Atomization and Sprays, vol. 16, pp.945-962, 2006.
4. J. Mazallon, Z. Dai, and G. M. Faeth, Primary Breakup of Nonturbulent Round Liquid Jets in Gas Crossflows, Atomization and Sprays, vol.9, pp. 291-311, 1999.