

단열식 회전연료 노즐의 오리피스 직경에 따른 분무특성 연구

장성호* · 최성만**

A Study of Spray Characteristic with Orifice Diameter for Single Column Rotating Fuel Nozzle

Seongho Jang* · Seongman Choi**

ABSTRACT

In the micro turbojet engine less than 350kw power class, it is not easy to find out the good atomization fuel injector with good spray quality. However conceptually, rotating fuel injection system can give high atomization quality by only the centrifugal force of a high speed rotating shaft of the engine without high-pressure fuel pump. With this motivation, we manufactured very small rotating fuel injector of 40 mm diameter and performed under a variety of injection orifices. We measured droplet size, velocity and spray distribution by the PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) system. Also spray was visualized by using high speed camera. From the test results, we could understand that the length of liquid column from the injection orifice is mainly controlled by the rotational speeds. Furthermore, droplet size(SMD) is decreased with the rotational speeds and is influenced by the diameter of the injection orifice and liquid film thickness.

초 록

350Kw급 이하의 초소형 터보제트엔진에서 연료 미립화 특성을 만족하는 분사시스템을 개발하는 것은 매우 어려운 일이다. 그러나 회전 연료 분사시스템은 복잡한 고압연료펌프 시스템 없이도 엔진축의 원심력만을 이용함으로써 좋은 미립화를 할 수 있다. 이러한 이유로, 직경 40 mm의 매우 작은 회전식 연료 인젝터를 제작하였으며, 여러 가지 크기의 분사 오리피스에 대한 실험을 수행하였다. PDPA 측정 시스템을 사용하여 입자의 크기와 속도, 분무분포를 측정하였다. 실험 결과, 분사 오리피스로부터 분출된 단일 액주의 길이는 회전속도에 의해 제어되며, SMD는 회전수가 증가함에 따라 감소하고, 오리피스의 직경과 오리피스 내부에 생성되는 액막두께에 큰 영향을 받는다.

Key Words: Liquid Film Thickness(액막두께), SMD(Sauter Mean Diameter, 평균입자크기), Rotating Fuel Nozzle(회전연료노즐)

* 전북대학교 항공우주공학과

** 전북대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail: csman@chonbuk.ac.kr

회전연료 분사시스템을 채택한 환형연소기는 가스터빈 엔진에서 빈번하게 사용되어지고 있다. 이 시스템의 주요 장점은 엔진 회전축의 원심력을 이용하므로 고압 연료펌프 시스템이 필요 없고, 압력분무식이나 Air-Blast 분무장치에 비해 부품수가 매우 적어 간단한 구조로 되어있다는 것이며, 분무의 관점에서는 엔진의 부분 부하나 아이들 상태에서도 분무특성이 매우 좋다는 점이다[1].

이러한 분사시스템은 프랑스의 Turbomeca사에서 최초로 가스터빈 엔진에 적용한 이래 다양한 엔진에 적용되어 성공적으로 운용되고 있다. 이러한 회전연료 분사시스템은 분무입자의 크기가 점화와 연소특성, 연소기의 배기성능에 영향을 주기 때문에[2] Dahm 및 Morishita등에 의하여 분무입자의 크기 및 속도 특정 데이터로부터 분무특성이 연구되어졌다. Morishita는 분무입자의 크기(SMD)는 회전방향 속도성분(V_p)에 반비례하고, 연료유량(Q)에 비례한다고 보고하였으며, 또한 회전판의 Ejecting Orifice의 크기와 회전판의 직경에 따른 영향을 알아보기 위해 실험한 결과 회전판의 직경과 액막 두께의 관계식을 도출하였고, 액체의 분열과정 중 생성되는 액막 두께와 SMD와의 경험식을 얻었다[3].

또한 Dahm의 연구에서는 회전연료노즐의 분사 오리피스스의 형태와 크기에 따라 분사되는 액주 및 액적분열과정의 분무패턴을 가시화하여 분무특성을 설명하고자 하였으며, 액적분열과정을 3단계 과정으로 구분하였다[4]. 또한 고속으로 회전하는 노즐의 Orifice로부터 배출되는 액체들이 넓은 액막 형태로 퍼져서 분사되며, 이 액막의 두께는 분무액적의 크기(SMD)와 큰 관련이 있음을 밝힌 바 있다. 이에 따른 액막 두께(t)의 계산식(1)을 도출하였다[1].

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

이러한 연료입자의 분포, 액막의 두께 및 입자의 크기와 같은 분무입자 정보는 점화 및 화염 안정성과 같은 연료특성에 큰 영향을 미치는 매우 중요한 의미를 지닌다. 그러나 선행연구에서

는 측정 장비의 부족으로 인해 정량적인 데이터를 제시하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 PDPA 레이저 진단기술을 이용하여 분무입자의 크기 및 속도를 측정하여 정량적 데이터를 제시하고, 분무형상을 가시화하여 회전연료분사시스템에 대한 분무 특성을 이해하고 분석하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Figure 1은 실험장치에 대한 개요도를 보여주고 있다. 실험장치는 스피들 모터, 단열식 회전연료노즐, 가압식 물탱크, 연료공급노즐, 아크릴 케이스 및 PDPA 측정시스템으로 구성하였고, 작동유체는 물을 사용하였다.

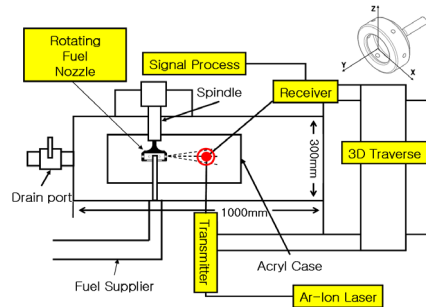


Fig. 1 Schematic diagram of Spray test rig with PDPA system

단열식 회전연료노즐은 고속 스피들과 직렬로 연결되어 있고, 좌표축 X, Y의 중심에 회전축을 두고 있으며, 반시계 방향으로 회전한다.

작동유체의 분사절차는 다음과 같다. 가압식 물탱크로부터 일정하게 가압된 물이 연료공급노즐의 미터링 오리피스에 의해 제어 되어 회전연료노즐의 내 벽면으로 공급된다. 회전연료노즐의 원심력에 의해 물은 분사 오리피스로부터 시험장치 내부로 분출되는데 이때 생성된 유체입자의 얇은 막 또는 액주는 점차 분열되어 미세한 분무 입자로 변화하게 된다. 측정 중 분사된 물은 드레인 포트를 통하여 배출되도록 구성하였다. 실험에 사용된 PDPA 측정시스템은 공랭식 Ar-Ion 레이저, 발신부, 수신부, 신호처리장치와 3-D 이송장치로 구성된다.

2.2 실험방법

실험에 사용된 단일식 회전연료노즐은 Fig. 2에 제시되어 있다. Fig. 2에서 분사 오리피스의 개수는 6개이며, 단일 형태를 이루고 있다. 분무 실험은 오리피스 직경에 따라 5가지 종류의 연료공급노즐을 사용하였고, Table 1에 제시되어 있다. 분무실험은 회전속도에 따른 영향을 알아보기 위해 5,000 rpm부터 5,000 rpm 간격으로 증가시켜가며 수행하였고, 이때 연료공급유량 또한 5 kg/h부터 증가시켜가며 수행하였다.

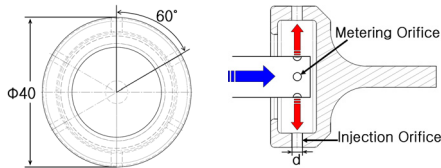


Fig. 2 Rotational Fuel Injection Nozzle

Table 1. Test Matrix for Rotating Fuel Nozzle

	Number of Orifice	Orifice Diameter, d(mm)	Orifice Total Area (mm ²)
Case1	6	1	4.71
Case2		2	18.84
Case3		3	42.39
Case4		4	75.36
Case5		5	117.75

Figure 3은 1-D PDPA를 이용한 분무입자의 크기 및 속도 측정 시 측정위치를 나타낸다. 측정 위치는 xy평면 215개이며, 각 측정 위치에서 20초 내에 10,000개의 데이터를 샘플링 하였다.

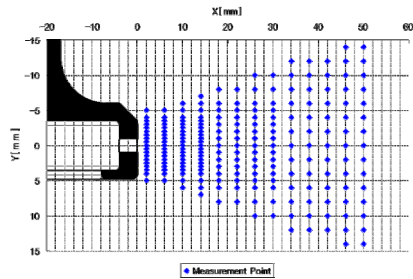


Fig. 3 PDPA Measurement Points

3. 실험결과 및 검토

3.1 가시화 결과

Figure 4는 회전연료노즐 Case 1~5 각각에 대

하여 고속카메라(FASTCAM SA1.1)를 사용하여 Backlight방식으로 유량 15 kg/h에서 각각의 회전수에 대한 분무현상을 가시화한 결과이다.

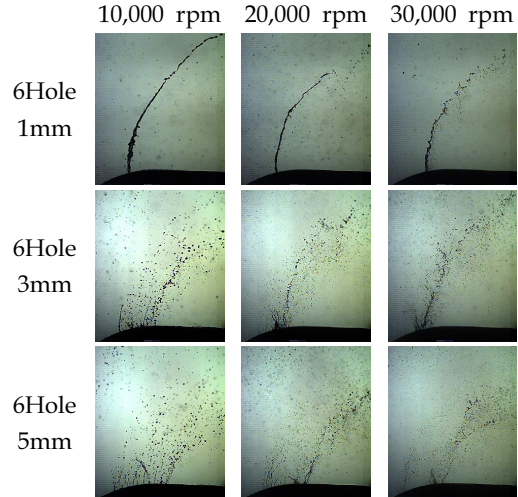


Fig. 4 Spray Visualization with Rotational Speed

Figure 4의 결과로부터 각각의 경우에 회전수가 증가함에 따라 분무액적의 분열위치가 회전연료 노즐의 오리피스 입구로부터 가까워지고, 오리피스의 직경이 커질수록 분무입자는 긴 단일 액주 형태에서 넓게 퍼진 액막의 형태로 분무됨을 확인할 수 있었다.

3.2 PDPA 측정결과

일반적인 가스터빈연소기내의 화염형성위치는 노즐로부터 반경방향(X) 30 mm이다. 따라서 Fig. 5와 6은 Case 3의 유량 15 kg/h에 대하여 X=30 mm인 지점에서의 회전수 증가에 따른 SMD와 속도분포를 나타낸 것이다.

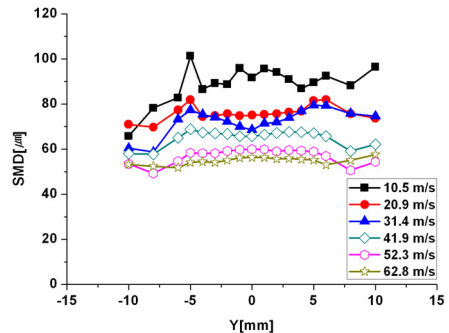


Fig. 5 SMD with Peripheral Velocity

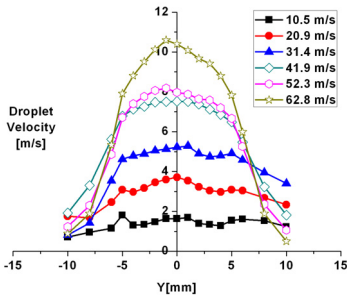


Fig. 6 Droplet Velocity with Peripheral Velocity

Fig. 5와 6으로부터 회전수가 증가함에 따라 SMD는 감소하고 분무입자의 속도는 증가함을 확인하였다. 이러한 결과는 회전수가 증가함에 따라 회전속도 증가하기 때문에 분무입자와 주위기체의 상대속도가 증가되어 오리피스를 통하여 분사된 액주 또는 액막이 작게 분열되고, 이것이 미세한 입자로 발전하기 때문이라 할 수 있다.

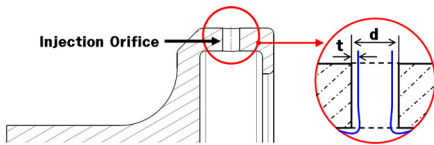


Fig. 7 Liquid Film Thickness of Rotating Fuel Nozzle

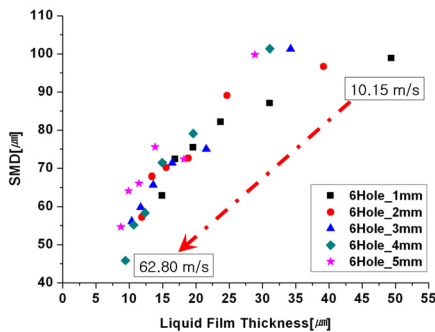


Fig. 8 SMD with Liquid Film Thickness

Figure 7은 연료가 분사 오리피스로부터 균일하게 분포되고 Coriolis Effects가 무시될 정도로 작다는 가정 하에 회전연료노즐의 이론적인 액막 두께(t)에 대해 정의하고 있다. 여기에서 t 는 액막의 두께이며, d 는 분사 오리피스의 직경이다. 액막두께(liquid film thickness, t)는 Dahm [1]으

로부터 유도된 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다.

Figure 8은 액막두께와 SMD의 관계를 나타낸 것이다. 이를 통해 액막두께가 작을수록 대체적으로 SMD는 작아짐을 알 수 있다.

4. 결 론

1. 회전속도가 증가함에 따라 분무되는 액주의 길이는 짧아지고, 액막 두께는 얇아지며, 평균 입자의 크기(SMD)는 감소한다.
2. 분사 오리피스의 직경이 클수록 분무입자의 분열위치는 분사 오리피스의 출구로부터 가까워지며, 작은 SMD를 생성하지만, 일정크기 이상의 오리피스에서는 오히려 더 큰 SMD를 생성한다.
3. 채널 내에 생성되는 액막의 두께는 분무입자의 SMD크기에 중요한 역할을 한다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. 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.
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, B. H. Lerg, "Experimental Visualization of Liquid Breakup Regimes in Fuel Slinger Atomization", *Atomization and Sprays*, vol. 16, pp.933-944, 2006