

직렬식 분무오리피스를 적용한 회전 연료분사노즐의 분무특성연구

장성호* · 최성만**

An Experimental Study of the High-Speed Rotating Fuel Injection System with In-line Injection Orifice

Seongho Jang* · Seongman Choi**

ABSTRACT

We studied the spray characteristics of the high-speed rotating fuel injection system. The diameter of in-line injection orifices are varied from 1mm to 5mm and the number of in-line injection orifices are varied from 3 to 12. Droplet size, velocity and spray distribution were measured by the PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) system and spray was visualized. From the test results, the liquid column generated from the injection orifice is mainly controlled by the rotational speeds. Also diameter of injection orifices and number of injection orifices have influence on the diameters of droplet. Consequently, we find out that the basic mechanism of controlling the droplet size is the liquid film thickness in the injection orifice.

초 록

고속회전 연료분사시스템의 분무특성을 연구하였다. 분무특성에 영향을 주는 직렬식 분무오리피스의 직경을 각각 1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm와 분무오리피스 수를 3개, 6개, 12개로 변화시켜가며 분무특성 연구를 수행하였다. PDPA 측정 시스템을 이용하여 분무입자의 크기와 속도, 분무분포 등을 측정하였고, 고속카메라를 이용하여 분무가시화를 수행하였다. 실험결과, 분무오리피스로부터 분출된 단일 액주의 길이는 회전속도에 의해 제어되며, 분무입자의 크기(SMD)는 분무오리피스의 직경과 수가 증가함에 따라 작아지는 경향을 보였다. 결국 분무입자의 크기를 제어하는 기본 메커니즘은 분무 오리피스내의 액막의 두께에 의해 결정됨을 알 수 있었다.

Key Words: SMD(평균입자크기), In-line Injection Orifice(직렬식 분무오리피스), High-Speed Rotating Fuel Injection System(고속회전 연료분사시스템)

* 전북대학교 항공우주공학과

** 전북대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail: csman@chonbuk.ac.kr

NOMENCLATURE

t : liquid film thickness, [μm]

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

- q :volume flow rate on a per-channel,[m^3/sec]
- ρ_L :liquid density [kg/m^3]
- R :outer radius of rotating nozzle,[cm]
- Ω :angular velocity,[rad/sec]
- d_0 :orifice diameter,[μm]
- d' :equivalent orifice diameter($d' \equiv d_0 - t$),[μm]

1. 서 론

회전 연료분사시스템은 엔진 회전축을 따라 연료가 주입되고, 이 회전축의 원심력을 이용하여 연료를 분사하므로 연료분사를 위한 고압의 연료펌프 시스템이 필요 없으며, 압력 분사시스템이나 공기-충돌형 분사시스템에 비해 부품수가 매우 적고 간단한 구조로 되어있다는 장점을 가진다. 또한 분무의 관점에서는 엔진의 부분 부하나 아이들 상태에서도 분무 특성이 매우 좋다는 장점이 있다.[1]

이러한 회전 연료분사시스템은 분무입자의 크기와 분포형태와 같은 분무입자의 정보는 점화와 연소특성, 연소기의 배기성능에 영향을 미치는 매우 중요한 의미를 지니기 때문에[2] Dahm 및 Morishita 등에 의하여 분무입자의 크기 및 속도 특정 데이터로부터 분무특성이 연구되어졌다. 먼저 Morishita [3]는 분무입자의 크기(SMD)가 회전방향 속도성분(V_p)에 반비례하고, 연료유량(Q)에 비례한다고 보고하였다.

또한 Dahm의 연구에서는 회전 연료분사노즐의 분무오리피스 크기와 형태에 따라 분사되는 액주 및 액적분열과정의 분무패턴을 가시화를 통하여 분무특성을 설명하고자 하였으며, 분무액적의 분열과정을 3단계 과정으로 구분하여 설명하였다[4]. 또한 고속으로 회전하는 연료분사노즐의 분무오리피스로부터 배출되는 액체들이 넓은 액막(liquid film) 형태로 퍼져서 분사됨을 보였으며, 이 액막의 두께는 분무입자의 크기(SMD)와 큰 관련이 있다는 연구결과를 발표하였다. 또한 오리피스 내부에 생성되는 액막의 두께(t)를 구하는 계산식 (1)을 도출하였다.

$$t = \left(\frac{3}{\pi} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_L q}{\rho_L R \Omega^2 d_0} \right)^{1/3} \quad (1)$$

최근 이[5] 등은 슬링거 연소기의 연소특성 연구를 수행 하였으며 연소효율은 연료분사노즐의 회전수와 상관관계가 있음을 발표하였고, 최[6] 등은 오리피스 수에 따른 회전분사노즐의 분무특성을 연구한 바 있다. 그러나 선행연구에서는 측정 장비의 부족으로 인해 정량적인 데이터를 제시하지 못하였거나, 또는 체계적인 연구가 이루어지지 않아 입자의 분열과정에 대한 해석이 다소 미흡한 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 여러 형상의 노즐에 대해 고속카메라를 이용하여 분무형상을 가시화하고, PDPA 레이저 진단기술을 이용하여 분무입자의 크기 및 속도를 측정하여 정량적 데이터를 제시함으로써 회전 연료분사시스템에 대한 분무특성을 체계적으로 이해하고 분석하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치는 스피들 모터, 직렬식 회전연료분사노즐, 가압식 물탱크, 연료공급노즐, 아크릴케이스 및 PDPA 측정시스템 등으로 구성하였다. PDPA 측정시스템은 공랭식 Ar-Ion 레이저, 발신부, 수신부, 신호처리장치와 3-D 이송장치로 구성된다. 이때 작동유체는 물을 사용하였다.

회전 연료분사노즐은 고속스핀들과 직렬로 연결되어 있고, X,Y좌표축의 중심에 회전축을 두고 있으며, 반시계 방향으로 회전한다.

작동유체의 분사절차는 다음과 같다. 가압식 물탱크로부터 일정하게 공급된 물이 연료공급노즐 끝단의 미터링 오리피스에 의해 제어되어 회전 연료분사노즐의 내 벽면으로 공급된다. 회전 연료분사노즐의 원심력에 의해 물은 분무오리피스로부터 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.

2.2 실험방법

Figure 1은 본 실험에 사용된 직렬식 회전연료

분사노즐이다. 회전연료분사노즐의 분무오리피스
는 일정한 간격을 유지하며 직렬 형태를 이루고
있다. 분무실험은 분무오리피스 크기와 개수에
따라 7가지 Type의 노즐이 사용되었고, 세부사
향은 Table 1.에 제시되어 있다.

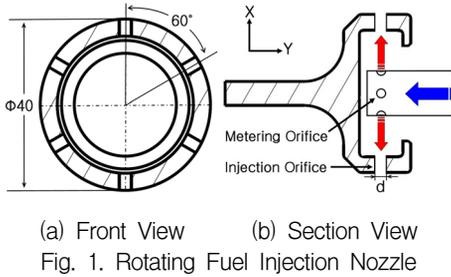


Table 1. Specifications of the Rotating Fuel Nozzle

	Injection Orifice		
	Number	Diameter, d (mm)	Total Area, $A(mm^2)$
Type1	6	1	4.71
Type2		2	18.84
Type3		3	42.39
Type4		4	75.36
Type5		5	117.75
Type6	3	3	21.20
Type7	12	3	84.78

1-D PDPA를 이용한 분무입자의 크기 및 속도
측정 시 측정위치는 xy평면(Fig. 1) 215개이며,
각 측정 위치에서 20초 내에 10,000개의 데이터
를 받아 평균화 하였다. 또한 분무실험은 회전속
도에 따른 영향을 알아보기 위해 5,000 rpm부터
30,000 rpm 까지 증가시켜가며 수행하였고, 이때
공급유량은 15 kg/h이다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 가시화 결과

Figure 2는 EOS 5D카메라를 사용하여 7가지
Type의 회전연료분사노즐에 대한 분무가시화 결
과이다. 이때 광원으로는 Nd:Yag Laser를 이용
하였다.

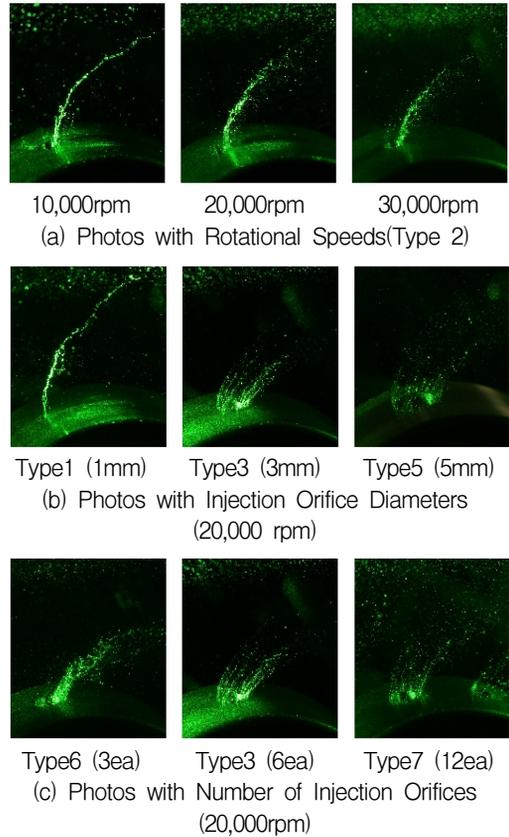


Fig. 2. Spray Visualization

Figure 2 (a)는 회전속도에 따른 가시화결과를
보여주고 있으며, (b)는 분무오리피스 크기에 따
른 가시화 결과이고, (c)는 분무오리피스 수에 따
른 가시화 결과를 보이고 있다. 이러한 가시화
결과로부터 회전속도, 분무오리피스 크기 및 수
가 증가함에 따라 분무액적의 분열위치는 회전
연료분사노즐의 오리피스 출구로부터 가까워짐
을 알 수 있으며, 분무오리피스를 통해 분사되는
분무입자는 출구전체에 고르게 퍼지는 액막의
형태로 분무됨을 알 수 있다. 특히 (c)와 같은 결
과를 나타내는 이유는 분무오리피스 수가 많을
수록 오리피스 한 개당 분사되는 유량이 적어지
기 때문으로 판단된다.

3.2 PDPA 측정결과

Figure 3은 Type 3 노즐 경우에 대하여, 15
kg/h의 유량을 공급할 때 분무오리피스 출구로

부터 X축으로 30 mm인 지점에서 노즐회전속도를 5,000 rpm(10.5 m/s)에서 30,000 rpm(62.8 m/s)까지 변화시킬 때의 SMD를 나타낸 것이다. Fig. 5로 부터 회전연료분사노즐의 회전속도가 증가함에 따라 SMD는 점차 작아짐을 확인하였다. 이러한 결과는 회전속도가 증가함에 따라 분무액적의 분출속도도 증가하기 때문에 분무액적과 주위기체의 상대속도가 증가되어 분무오리피스로부터 분무된 액주 또는 액막이 작게 분열되고, 이것이 미세한 입자로 발전하기 때문으로 판단된다.

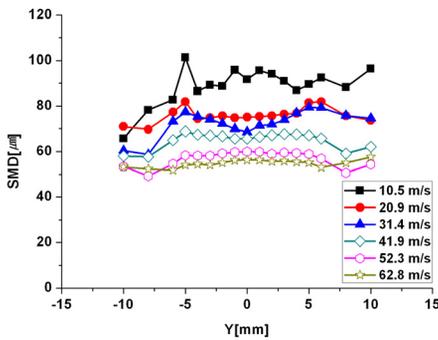


Fig. 3. SMD with Rotational Speeds

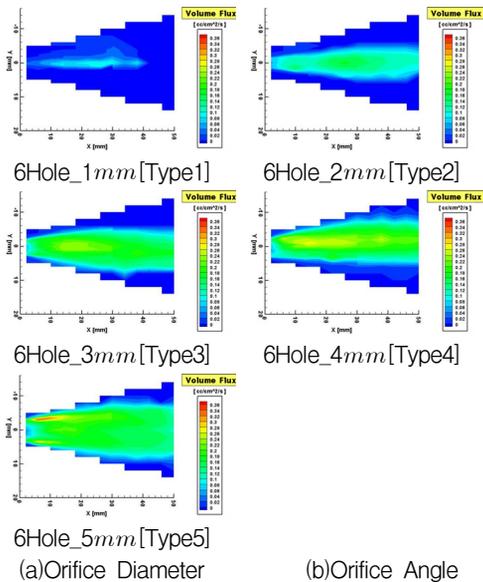


Fig. 4. Volume Flux Contour

Figure 4는 유량 15 kg/h와 회전속도 15,000 rpm(31.40 m/s)의 조건에서 분무오리피스의 직

경이 1 mm부터 5 mm에 대한 volume flux를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 분무오리피스의 직경이 1 mm인 Type 1은 분무입자들이 좁은 영역에 집중되어 분사되며, 오리피스의 직경이 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 더욱 작아져 입자의 단면적이 커지므로 주위기체와의 접촉면이 넓어져서 보다 넓은 영역으로 고르게 분무되는 것으로 판단된다. 이는 앞서 Fig. 2에서도 확인할 수 있다.

Figure 5는 회전속도가 증가함에 따라 분무오리피스의 수가 많을수록 SMD는 작아짐을 나타낸다. 이는 Fig. 2(c)에서도 보였듯이 분무오리피스 수가 많을수록 분무오리피스 한 개당 분사되는 유량이 적어지므로 분무입자들이 더 얇은 액막의 형태로 분무되기 때문으로 판단된다.

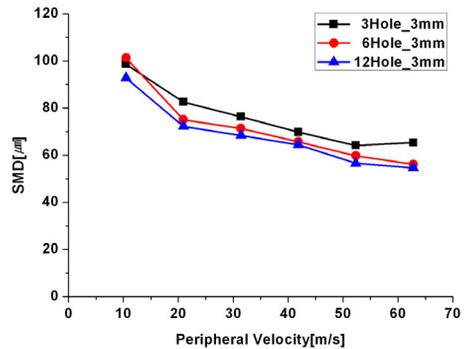


Fig. 5. SMD with Number of Injection Orifices

Figure 6은 연료가 분무오리피스로부터 균일하게 분포되고 Coriolis Effects가 무시될 정도로 작다는 가정 하에 회전 연료분사노즐의 이론적인 액막두께에 대해 정의하고 있다. 여기에서 t 는 액막의 두께(liquid film thickness)를 나타내며, d_0 는 분무오리피스의 직경이다. 여기에서, 액막두께(t)는 Dahm[1]으로 부터 유도된 (1)식을 이용하여 구할 수 있다.

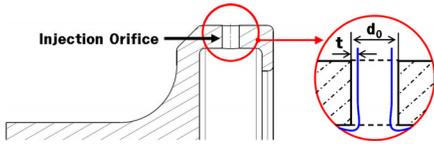


Fig. 6. Schematics of Liquid Film Thickness of Rotating Fuel Nozzle

Figure 7은 분무오리피스스의 출구로부터 X축으로 30 mm 위치에서 유량 15 kg/h일 때, 계산된 액막두께와 분무입자의 최대속도에서의 SMD 관계를 무차원화 하여 나타낸 것이다.

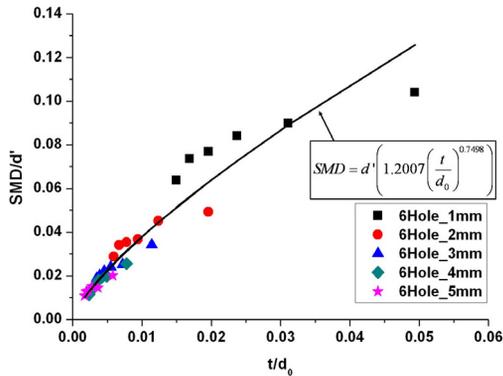


Fig. 7. SMD/d' with t/d_0

이 결과로부터 분무오리피스스의 직경이 크거나, 액막의 두께가 작아질수록 작은 SMD(평균분무입자크기)를 나타냄을 알 수 있으며, 이러한 결과를 (2)식과 같이 나타낼 수 있을 것이다.

$$SMD(\mu m) = (d_0 - t) \left(1.2007 \left(\frac{t}{d_0} \right)^{0.7498} \right) \quad (2)$$

따라서 이러한 40 mm의 직렬형 회전연료분사노즐의 경우 (1)식과 (2)식을 통해 분무오리피스 크기와 회전속도만으로도 대략적인 SMD 표시가 가능함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 고속회전 연료분사노즐의 분무특성을 이해하기 위해 수행하였으며, 연구결과는 다음과 같다.

1. 40 mm 직렬형 회전연료노즐의 경우, 분무오리피스 크기와 회전속도만으로도 대략적인 SMD 표시가 가능함을 알았다.
2. 회전속도가 증가함에 따라 분무되는 액주의 길이는 짧아지며, 액막의 두께는 얇아진다. 평균입자의 크기(SMD)는 작아진다.
3. 분무오리피스의 크기와 수가 증가할수록 분무입자의 분열위치는 분무오리피스의 출구로부터 가까워지며, 작은 SMD를 보인다.

후 기

본 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단에서 지원하여 연구하였음.(KRF-2008-331-D00102)

본 논문은 국토해양부의 하늘프로젝트로 지원받아 연구되었음.

참 고 문 헌

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, "초소형 터보제트 엔진의 고속회전 연료분사장치의 분무특성 연구", 碩士學會論文, 2008.