

고속회전 연료분무장치의 분무특성연구

최현경* · 최채홍* · 최성만* · 이동훈**

The Study of Spray Characteristics for the High Speed Rotating Fuel Injection System

Hungkyung Choi* · Cheahong Choi* · Seongman Choi* · Donghun Lee****

초 록

고속회전의 원심력으로 연료를 공급하고 액체연료의 미립화를 초래하는 회전연료분무장치에 대한 분무특성 시험연구를 수행하였다. 특정한 공간상에 존재하는 액적의 특성을 이해하고자 고속회전 연료분사시스템을 설계·제작하였다. 시험장치는 고속으로 회전하는 Spindle, 회전연료노즐, 가압식 물탱크, 아크릴 케이스로 구성하였다. 액적의 크기와 속도를 측정하기위해 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)시스템을 사용하였고, ND-Yag Laser를 사용하여 분무를 가시화하였다. 시험결과 고속회전 연료분사시스템의 분무특성을 확인할 수 있었고, 회전속도는 액적 크기, 속도, 분무각 및 분무패턴 등의 분무특성에 주요한 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

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

기호설명

1. 서 론

PDPA	: Phase Doppler Particle Analyzer	
RPM	: Revolutions per Minute	
SMD	: Sauter Mean Diameter	(μm)
V_P	: Peripheral Velocity	(m/s)
V_R	: Radial Velocity	(m/s)
α	: Spray Angle	
($^\circ$)		
D	: Injection Orifice Diameter	(mm)
Q	: Liquid Flow Rate	(m^3/s)

가스터빈 연소기의 주요 구성품은 연료 분사부(Fuel Injector), 점화장치(Igniter), 연소기 라이너(Liner)로 구성된다. 연료분사 방법에는 압력분무식, 에어-블래스터(Air-Blast)와 회전연료분무시스템 등이 사용된다. 기존의 압력분무식과 에어-블래스터 연료분사 방식은 가스터빈 엔진에서 요구하는 분무특성을 잘 만족 시키지만 매우 정밀하고 복잡한 부품들이 필요하며 제작이 어렵고 비용과 시간이 많이 소요된다. 반면 본 연구에 적용된 회전연료분무시스템은 엔진 회전축 원심력을 이용하므로 고압 연료펌프 시스템이 필요가 없고, 다른 연료노즐에 비해 부품 수가 매우 적고 간단한 구조로 되어있다[1]. 이러한 이유로 프랑스 Turbomecha사에서 엔진에 적용

* 전북대학교 항공우주공학과

** 삼성테크윈, 파워시스템 연구소

연락처, E-mail: csman@chonbuk.ac.kr

한 이래 미국 Teledyne 사의 J402, Williams International 사의 F107 엔진에 적용되어 성공적으로 운용되고 있다.

이러한 회전연료 분사시스템은 Norster, Dahm 및 Morishita 등에 의하여 연구되어졌고, 분무입자의 크기 및 속도 측정 데이터로부터 분무 특성을 설명하고자 하였다. Norster[2]의 연구에서 아이들 작동 시 약 50 μm 정도의 SMD를 얻을 수 있으며 최대 부하에서 약 30 μm 의 SMD를 얻을 수 있다고 보고하였다. 또한 입자의 SMD 크기와 회전방향 속도의 관계식 (1)을 도출하였다.

$$SMD = \frac{3962}{V_P} \quad (1)$$

Morishita[3]의 연구에서 회전속도 성분 V_P 와 연료유량에 관계된 SMD 경험식 (2)를 얻었다. 이 식은 회전체에서 100 mm 떨어진 유리평판위의 실리콘 오일 필름에 수집된 분무입자의 크기를 측정할 결과이다.

$$SMD = 0.033 \frac{Q^{0.2} \cdot D^{0.3}}{V_P^{0.7}} \quad (2)$$

Dahm[4]은 여러 형상의 회전연료노즐에 대하여 가시화실험을 수행하였고, Morishita의 연구와 상관관계를 도출하기 위해 노력하였다. 가스터빈 연소기를 설계하고 개발할 때 연소기내의 연료 입자의 분포, 입자의 크기 및 속도분포는 점화 및 화염안정성에 매우 중요한 의미를 지니게 된다. 특히 엔진 시동조건에서 분무특성은 연소기내의 점화성능에 큰 영향을 끼친다.

본 연구는 회전연료분무시스템에 대한 분무특성을 이해하기 위해 PDPA 레이저 진단기술을 이용하여 측정할 수 있도록 시스템을 고안하였고 입자의 SMD 크기, 속도분포 및 분무패턴을 측정하고 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Figure 1은 실험장치에 대한 개요도를 보여준

다. 시험장치는 고속회전이 가능한 Spindle, 회전연료노즐, 가압식 물탱크, 연료공급노즐, 아크릴 케이스 및 PDPA 측정시스템으로 구성하였고, 작동유체는 물을 사용하였다. 회전연료노즐은 Spindle 축과 직접 연결하여 구동하도록 하였다. 연료공급은 가압식 물탱크를 이용하여 일정한 압력으로 공급할 수 있도록 하였고, 연료공급노즐의 Metering Orifice와 회전연료노즐의 Injection Orifice 중심이 일치하도록 설치하였다. 아크릴 케이스는 레이저 광원이 간섭되지 않도록 구성하였고, 측정 중 분사된 물은 드레인 포트를 통하여 배출되도록 하였다. 가압식 물탱크에서 공급된 물은 연료공급노즐의 Metering Orifice로 공급되고, 회전연료노즐의 원심력에 의해 Injection Orifice를 통과하여 대기로 분출되는데 이때 액막과 액주를 형성하고 점차 미세 분무 입자로 분열된다. 실험에 사용된 PDPA 레이저 측정시스템은 Ar-Ion Laser, Transmitter, Receiver, Signal Processor와 3-D Traverse로 구성된다.

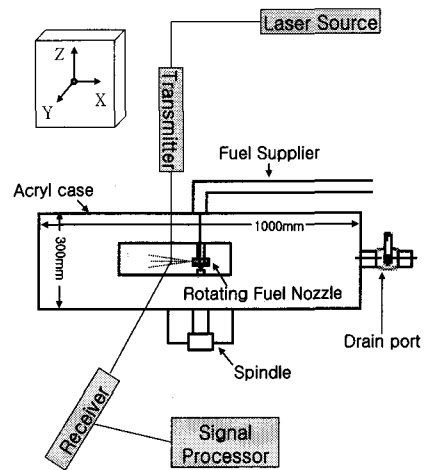


Fig. 1 Schematic diagram of Spray test rig with PDPA system

2.2 실험방법

분무실험은 실제 엔진의 시동조건과 비슷한 조건에서 이루어 졌으며, 작동유체는 물을 사용하였고, 유량은 15 kg/h에서 회전수 15,000,

20,000, 25,000, 30,000, 40,000 rpm에 대하여 수행되었다. 실험에 사용된 회전연료 노즐은 Fig. 2와 같다. 노즐의 Injection Orifice는 직경이 1.5 mm이며, 모터에 연결되는 방향(b)에 4개, 반대 방향(c)에 2개를 위치하도록 하였다.

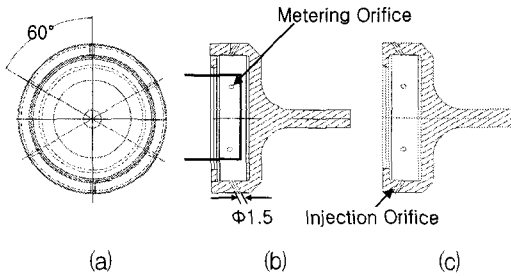


Fig. 2 Rotating Fuel Nozzle

Figure 3은 1-D PDPA를 이용한 입자의 크기 및 속도 측정 시 측정위치를 나타낸다. 측정위치는 xy평면, yz평면 각각 351 개이며, 3축 Traverse에 의하여 자동이송 되도록 하였다. 각 측정 위치에서 30,000 개의 데이터를 샘플링 하였고, 소요시간은 30 초 이하로 측정하였다. 여기서 분무각은 속도 최대치를 기준으로 하였고 α 로 정의하였다.

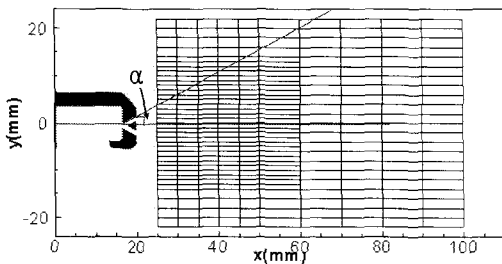


Fig. 3 PDPA Measurement Point

3. 실험결과 및 검토

21 가시화 결과

Marshall[5]은 분열과정을 Subcritical Breakup, Transition Breakup, Supercritical Breakup으로 구분하였다. 레이놀즈 수가 작은 Subcritical

Breakup은 오리피스에서 분출되는 여러 액막들이 단일액주로 발전하고 Rayleigh 불안정 현상이 미립화를 지배하여 액주가 액적으로 발전한다. 분무액체는 액주가 점점 짧아지는 Transition Breakup 과정을 거쳐 Supercritical Breakup 과정으로 도달하며 분사액체는 오리피스 출구부분 근처에서부터 미세한 액적으로 미립화 된다.

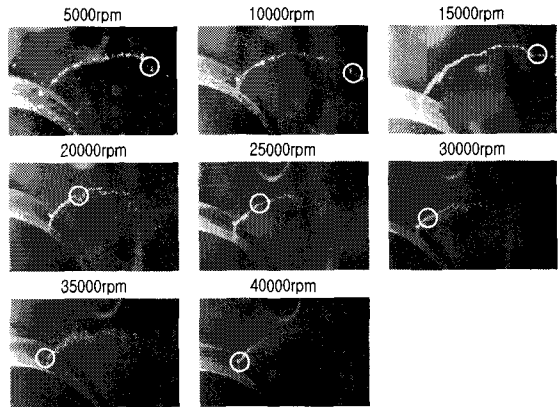


Fig. 4 Spray Visualization with Rotational Speed

Figure 4는 유량 15 kg/h에서 회전속도 5,000, 10,000, 15,000, 20,000, 25,000, 30,000, 35,000, 40,000 rpm에서의 분열과정을 나타낸다. Nd-Yag Laser와 Canon EOS 5-D(1/8000 sec)를 사용하여 가시화하였다. 5,000~15,000 rpm은 Subcritical 분열과정을 보인다. 오리피스에서 분출된 액막들은 단일액주형태를 나타내고, 액주 끝단에서 점차 분열하기 시작한다. 액주의 길이는 20,000 rpm 이상에서 급격히 감소하여, 30,000 rpm 이상에서는 오리피스 출구에서부터 액적으로 분열하고 있어 Supercritical 분열에 도달해 있음을 알 수 있다. 이러한 가시화 결과로부터 회전연료 노즐의 회전속도에 따라 미립화과정과 입자의 크기 및 형태를 전반적으로 이해할 수 있다.

22 PDPA 측정결과

Figure 5는 15,000, 25,000, 30,000, 40,000 rpm에 따른 반경방향속도(V_r)와 접선방향속도(V_p)에 대한 관계를 보여준다. 15,000~30,000 rpm에서 회전수가 증가함에 따라 접선방향속도(V_p)는 거

의 변화가 없고 반경방향속도(V_R)이 크게 증가하며, 회전수가 30,000 rpm에서 40,000 rpm으로 증가될 때 접선방향속도(V_P)가 급격히 증가한다. 이것은 Fig. 6에서 회전수가 30,000 rpm에서 40,000 rpm으로 증가될 때 SMD가 크게 감소하는 것과 관련이 있다고 볼 수 있다. 또한 노즐 중심에서부터의 거리(radial distance)가 50 mm 이상에서는 분무의 발달이 진행되고 초기의 속도성분이 감쇄되어 일정한 경향을 보여주지 않는다.

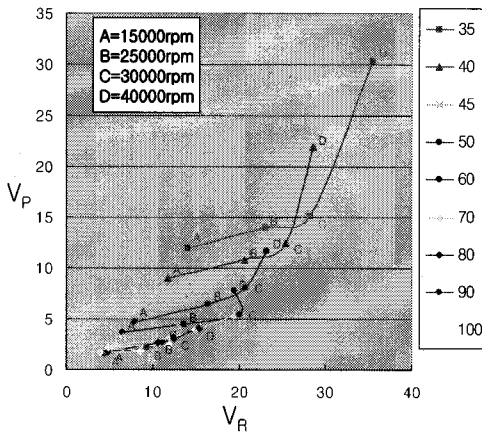
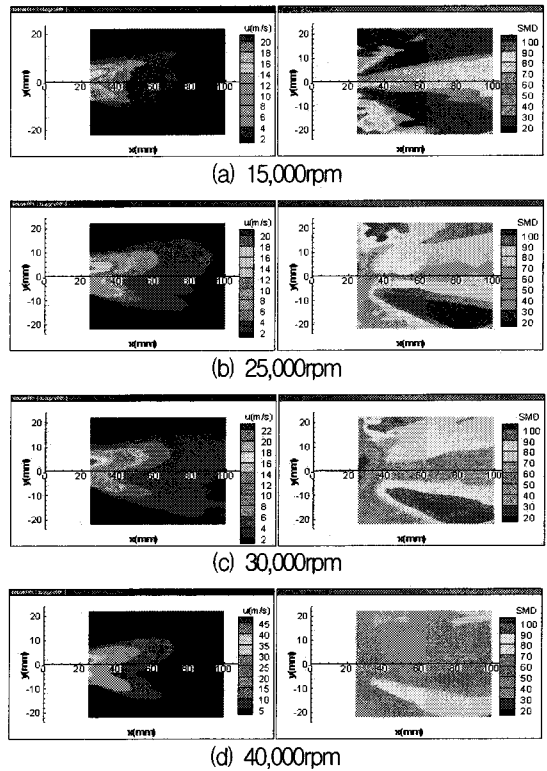


Fig. 5 Droplet Velocity with RPM and Radial Distance

Figure 6은 회전수 15,000, 25,000, 30,000, 40,000 rpm에 대하여 유동장에 대한 접선방향속도(V_P)와 SMD를 나타내고 있다. 분무입자의 주요 흐름은 속도가 크게 나타나는 부분에 존재하게 되며 측정점 x 위치(radial distance)에 대하여 속도가 큰 부분에서 SMD 역시 크게 나타나고, 중심부의 낮은 속도에서는 SMD가 가장 작게 나타난다. 회전수가 증가함에 따라 유속이 증가하고, SMD는 감소를 보인다. 15,000 rpm에서 분사액체의 속도는 $x=70$ mm 지점까지 영향을 주고, 평균 SMD가 약 $100 \mu\text{m}$ 로 분무의 발달이 저조한 것으로 알 수 있다. 25,000, 30,000 rpm에서 최대속도는 약 20 m/s 이고, $x=100$ mm 지점까지 속도구배가 존재하는 것으로 보아 미세한 분열이 이루어지지 않았음을 의미한다. 이는 SMD를 통해서도 확인되는데, 측정범위 유동장

에서 다양한 입자의 크기가 존재한다. 이 결과는 앞에서 언급한 Fig. 4의 가시화 결과에서 Transition 분열이라 간주한 결과와 일치한다. 40,000 rpm에서는 최대속도가 약 45 m/s 이며, $x=60$ mm 지점까지 속도구배가 생기고, 60 mm 이상에서 액적으로 분열되어 속도가 거의 일정하다. 유동장의 SMD는 전체적으로 거의 일정하며 이때 평균 SMD는 약 $60 \mu\text{m}$ 이고 최소 SMD는 $30 \mu\text{m}$ 이다. 또한 각각의 경우에 대하여 오리피스가 4개인 y축 (+)부분에서 오리피스가 2개인 y축 (-)부분에 비해 속도가 크게 나타나고, SMD는 더 작게 나타난다.



(1) Velocity (2) SMD

Fig. 6 Contour of Velocity(V_R) and SMD

Figure 7은 측정된 속도 결과에서 반경방향속도(V_R)를 이용하여 분무각을 측정된 결과를 나타낸다. 분무각은 회전수가 증가함에 따라 오리피스 2개인 영역에서 약 $13.6^\circ \sim 12.75^\circ$, 오

리피스가 4개인 영역에서 약 $9.51^\circ \sim 4.98^\circ$ 정도로 감소함을 볼 수 있었다.

크게 감소함을 알 수 있다.

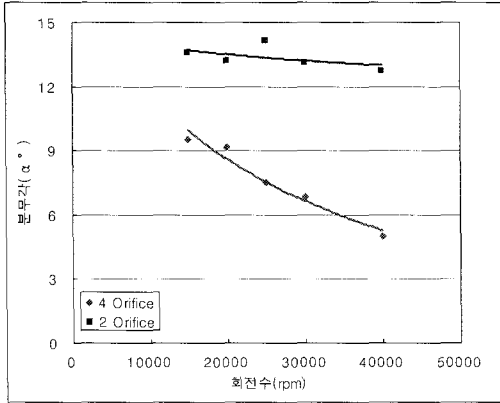


Fig.7 Spray Angle Defined by Maximum Velocity

4. 결 론

본 연구는 고속회전 연료분무장치의 분무특성을 이해하기 위한 것이다. Nd-Yag Laser를 사용하여 가시화를 하였고, PDPA를 이용하여 분무입자의 크기, 속도분포, 분무각을 측정하였다. 연구결과는 다음과 같이 요약된다.

1. 분무입자의 크기는 회전수가 증가함에 따라 감소하고, 일정한 회전수에서는 2개의 오리피스 영역, 4개의 오리피스 영역, 회전노즐 중심부 순으로 감소하는 경향을 나타낸다. 40,000 rpm에서 평균 SMD는 약 $60 \mu\text{m}$ 를 나타낸다.
2. 회전수가 증가함에 따라 접선방향속도(V_t)와 반경방향(V_r)속도는 증가하는데, 접선방향속도성분이 크게 증가될 때 입자의 크기 역시 크게 감소한다. 따라서 접선방향속도(V_t)는 입자의 크기와 큰 상관관계가 있음을 알 수 있다.
3. 분무각(α)은 회전수 증가에 따라 감소를 나타낸다. 2개의 오리피스 영역에서는 약 13° 정도로 거의 변화가 없으나, 4개의 오리피스 영역의 분무각은 약 9.5° 에서 5° 정도로

참 고 문 헌

1. A. M Mellor, Design of Modern Turbine Combustors, Academic Press, London, 1990, pp.306~314
2. Norster, E. R., CoA-Memo-51, 1964 Cranfield College of Aeronautics, Bedford, England
3. Morishita, T., A Development of the Fuel Atomizing Device Utilizing High Rotational Speed, ASME PaperNo. 81-GT-180, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY
4. 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
5. A. H. Lefebvre, Atomization and Sprays, Purdue University, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1989, pp.27~78
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 System, ICLASS 2003, 13-18 July, 2003, Sorrento, Italy.
7. 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 System, ICLASS 2003, 13-18 July, 2003, Sorrento, Italy.
8. 최성만, 이동훈, 박정배, "Spray Characteristics of the Rotating Fuel Injection System", 한국액체미립화학회지, 제11권, 제2호, 2006, pp.81~88