

작동 유체에 따른 단순 압력식 연료노즐의 분무특성

최채홍* · 임병준* · 최성만**

Spray Characteristics of the Simplex Atomizer with Working Fluids

Cheahong Choi* · Byeongjun Lim* · Seongman Choi**

ABSTRACT

This paper presents the spray characteristics of the simplex fuel nozzle with different working fluids for the gas turbine engine. Spray characteristics can be changed with viscosity, surface tension and density. In this research, water and test fluid type 2 which has similar characteristics of the kerosene are used as a working fluid. Spray visualization was performed by using ND-Yag laser and droplet size was measured by using PDPA(Phase doppler particle analyzer) system. The test results show that spray shapes and SMD distributions of two working fluids are similar at main spray region.

초 록

작동 유체에 따른 APU 가스터빈에 적용되는 연료노즐의 분무특성을 확인하였다. 액체연료에 따라 점도, 표면장력 및 비중 등이 상이하어 분무특성이 변화될 수 있다. 본 연구에서는 연료 물성치 변화에 따른 분무특성을 이해하기 위하여 케로신과 유사한 특성을 갖는 보정 유체 2와 일반적으로 연료노즐의 분무특성을 시험하는데 사용하는 물을 이용하여 분무 시험을 수행하였다. 분무가시화와 분무입자 크기 및 분포를 ND-Yag 레이저 및 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 이용하여 측정하였다. 분무 시험 결과, 두 작동유체의 분무형태는 유사하게 나타났으며 주 분무영역에서의 SMD 또한 유사하게 분포됨을 확인할 수 있었다.

Key Words : Simplex Fuel Nozzle(심플렉스 연료노즐), Spray Characteristics(분무특성), Working Fluid(작동유체), PDPA(위상 도플러 액적 분석기), SMD(Sauter 평균 입경)

1. 서 론

일반적인 가스터빈 연소기는 액체연료 또는 가스연료로 작동되는데 가스연료의 경우 분자 수준에서 연료와 공기가 잘 혼합될 수 있는 상태인데 반해, 액체 연료는 먼저 혼합물 생성을 위해 증발이 이루어져야 한다. 따라서 액체 연료

† 2009년 8월 4일 접수 ~ 2009년 11월 20일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원

** 중신회원, 전북대학교 항공우주공학과
연락처, E-mail: csman@chonbuk.ac.kr

는 연소영역으로 분사될 때 많은 수의 작은 액적으로 미립화 되어야 하며, 연료입자의 증발과 주위공기의 가열에 의해 작은 액적에서 발생하는 연료증기들은 공기와 혼합하여 가연성의 혼합물을 생성하게 된다. 따라서 연료가 분사될 때 액적의 크기 및 액적의 분포, 속도 등은 연료분사기의 중요한 성능특성이 된다[1].

이러한 분사기의 성능특성은 다양한 변수에 의해 결정되어지는데 분무특성에 영향을 주는 변수로는 액주의 분출속도(혹은 분사 압력) 뿐만 아니라 밀도와 점도 등과 같은 작동유체의 물성치, 그리고 노즐 오리피스의 특성 등이 있다[2].

Simmons와 Harding의 연구[3]에서는 SMD가 표면장력의 0.19승에 비례한다는 연구 결과를 도출한 바 있으며 Kennedy[4]와 Jones[5]의 연구 결과에서도 정도의 차이는 있으나 표면장력이 클수록 SMD가 커지는 결과를 나타내고 있다. SMD크기에 영향을 미치는 인자 중 점성의 경우 Jasuja[6]의 연구 결과에 따르면 SMD는 점성의 0.16승에 비례하는 것으로 나타나 있으며 Dodge와 Biaglow[7]의 연구 결과와 Knight[8] 등의 연구 결과에도 점성이 증가 할수록 SMD가 증가하는 것으로 알려져 있다. 이러한 연구결과는 시험기법 및 연료노즐의 형태에 따라 경향은 같지만 그 정도에 있어서 차이를 보이고 있다.

분사기의 성능특성은 주로 실험을 통해 측정되는데 이때 가스터빈용 제트유를 사용하여 실험을 수행하는 경우 실험장치를 구성하기가 매우 어렵고 연료의 폭발 위험 등이 존재하기 때문에 주로 물 또는 물과 글리세린의 혼합물을 사용하여 실험을 수행한다. 하지만 이렇게 물이나 물과 글리세린 혼합물을 작동유체로 사용할 경우 분무특성에 영향을 주는 인자로 알려진 밀도나 점도 등과 같은 물성치가 다르기 때문에 분무특성 또한 다르게 나타날 가능성이 존재하며 따라서 물과 가스터빈용 제트유의 물성치 변화에 따른 분무특성 차이를 확인할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 작동유체 차이에 따른 분무특성 변화를 이해하고 물을 이용한 분무시험 결과와 실제 분무특성 차이를 이해하기 위한 것으

로 항공유와 유사한 특성을 가지는 보정유체 2(Calibration Fluid Type 2)와 물을 작동유체로 사용하여 분무가시화를 수행하고, PDDA(Phase Doppler Particle Analyzer) 시스템을 이용하여 분무액적의 크기 및 분포를 측정하고, 서로 다른 두 가지 작동유체에 대한 분무특성을 비교 분석하고자 한다.

2. 실험장치

2.1 연료노즐

본 연구에 사용된 연료노즐이 Fig. 1에 나타나 있다. 노즐은 크게 노즐 입구와 필터부, 스월러부, 노즐출구로 구분되어지며 전형적인 단순 압력식(simplex) 형태의 연료노즐이다. 이러한 연료노즐은 유체에 가하는 압력에너지를 통하여 미립화가 이루어지는 형태로써 디젤기관 및 가스터빈, 산업용·가정용 연소시스템 등 많은 연소시스템에 사용되어지고 있다. 특히 분무 특성 제어인자가 여러 연구를 통해 비교적 잘 알려져 있고 분무 성능이 우수하기 때문에 여러 가스터빈 연소기에 사용되어지고 있는 형태이다[9].

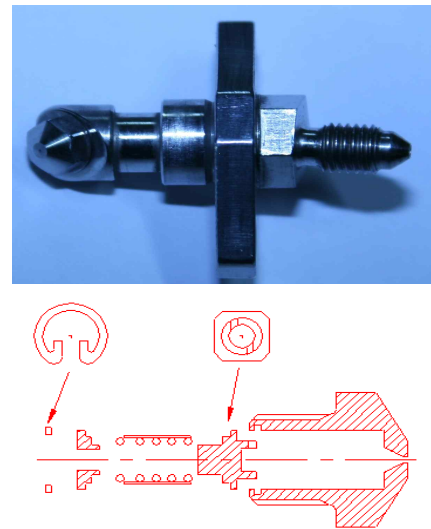


Fig. 1 Simplex injector

2.2 가시화

가시화 시험장치를 Fig. 2에 나타내었다. 가시화는 전체적인 분무 형상을 이해하기 위한 시험으로 Cannon 580EX 2개를 광원으로 사용하였으

며 Canon EOS 5D 카메라를 이용하여 이미지를 획득하였다. 카메라의 셔터스피드는 1/10 초, F수는 5.6으로 설정하였으며 Canon EF 70~200 mm 렌즈를 사용하였다.



Fig. 2 Spray visualization test rig

2.3 PDPA

입자의 크기와 속도를 측정하기 위하여 PDPA 시스템을 이용하였으며 실험장치는 Fig. 3과 같이 구성하였다. 실험장치는 크게 액체 연료를 공급하는 연료 공급부와 PDPA 측정부, DATA 처리부 등 세부분으로 구분되어진다. 연료 공급부는 가압식 50 L 탱크와 5 마력 압축기를 이용하여 작동유체를 연료노즐에 공급하고 공급압력은 압력센서(Sensys)를 이용해서 신호를 받아 컴퓨터 프로그램(Labview)을 이용한 처리를 통해 측정하였다. PDPA 측정부는 크게 레이저 발진부와 광학계로 구성되어 있다. 레이저 발진부는 공냉식 Ar-ion 레이저(300 mW, DANTEC)를 사용하였으며 녹색광(514.5 nm)영역에서 1차원 속도를 측정하였다. 광학부는 다시 송광부와 수광부로 구성되어 있는데, 송광부는 발진부에서 생성된 레이저 빔이 광섬유, 송광부를 거쳐 연료노즐에서 분무된 액적을 통과하게 된다. 이때 액적을 통과하게 된 레이저는 산란되어 수광부에 입력되고 데이터 처리부인 신호처리기와 컴퓨터 프로그램인 Sizeware를 통해 액적의 크기 및 속도를 1차원으로 측정하게 된다. 분무액적의 크기와 속도는 도플러 효과에 의한 신호의 상대적 위상차와 주파수 크기를 이용해 계산하였다. PDPA 시스템을 사용하는데 필요한 굴절률은 물

의 경우 1.332, 보정유체 2의 경우 1.4215로 설정하여 측정하였다.

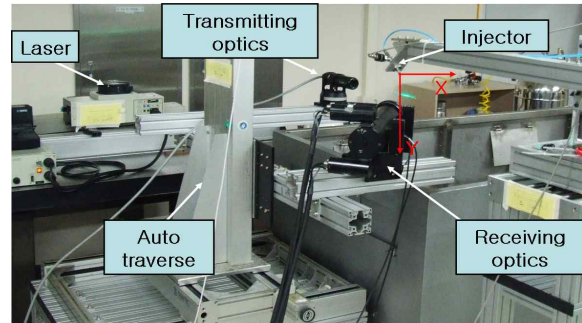


Fig. 3 PDPA system

2.4 실험조건

모든 분무시험은 상압, 대기조건에서 실시되었으며 모의 연료 공급압력을 0.5 bar에서 6 bar 까지 변화해 가며 분무가시화 시험을 수행하였다. PDPA를 이용한 측정은 연료 노즐이 사용되는 조건 중 지상 무부하 조건인 6 bar에서 실시하였으며 작동 유체의 물성치 외 분무 압력 및 분위기압, 온도 등은 동일하게 유지하여 측정하였고 물과 보정유체 2에 대해 각각 SMD 및 속도, 분무 분포 특성 등을 측정하였다[10]. 작동유체에 따른 유량은 분무압 6bar에서 물의 경우 1.79 g/s, 보정유체 2의 경우 1.57 g/s로 나타났다. 실험에 사용된 보정유체 2는 항공기 연료시스템의 구성품 시험 시 사용하는 유체로써 폭발의 위험성을 감소시키기 위해 JP-8 보다 발화점이 높은 특성이 있다. Table 1에 시험에 사용된 물과 보정유체 2 및 항공기용 연료인 JP-8의 물성치를 나타내었다. 보정유체 2는 항공기 연료시스템의 구성품 시험 시 사용하는 유체로써 폭발의 위험성을 감소시키기 위해 JP-8 보다 발화점이 높은 특성을 갖고 있으며, 구체적인 사양은 MIL-PRF-7024E 에 제시되어 있다. 물리적 특성은 제조사에서 공개한 밀도 및 점성계수 외에 추가적으로 시험결과 분석을 위하여 시험장치 및 니트산업연구원의 측정장치를 이용해 측정된 점성계수 및 굴절률 등을 측정하였으며 이를 바탕

으로 표를 구성하였다. Fig. 4에 PDPA 측정 포인트를 나타내었다. 노즐 출구에서 하류 축방향을 +Y 방향, 반경방향을 X 방향으로 하여 PDPA는 총 5 구간 145 포인트를 측정하였고 최대 샘플링 시간은 20 초, 최대 샘플링 개수는 10,000 개로 하였다.

Table 1. Physical properties of the working fluids

	물	Kerosene (JP-8)	Calibration Fluid Type 2
밀도 (kg/m ³)	999 (at 15°C)	812 (at 15°C)	770 (at 15°C)
점성계수 (kg/m·s)	0.894×10 ⁻³ (at 25°C)	1.102×10 ⁻³ (at 25°C)	0.9009×10 ⁻³ (at 25°C)
표면장력 (N/m)	7.134×10 ⁻² (at 26°C)	2.516×10 ⁻² (at 26°C)	2.345×10 ⁻² (at 26°C)

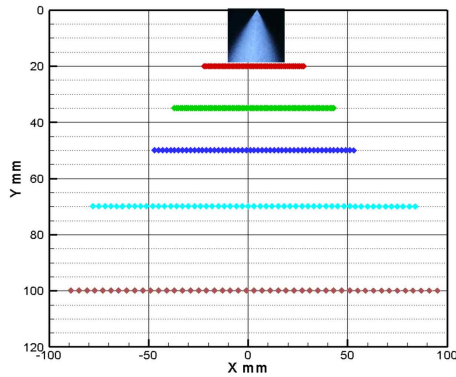


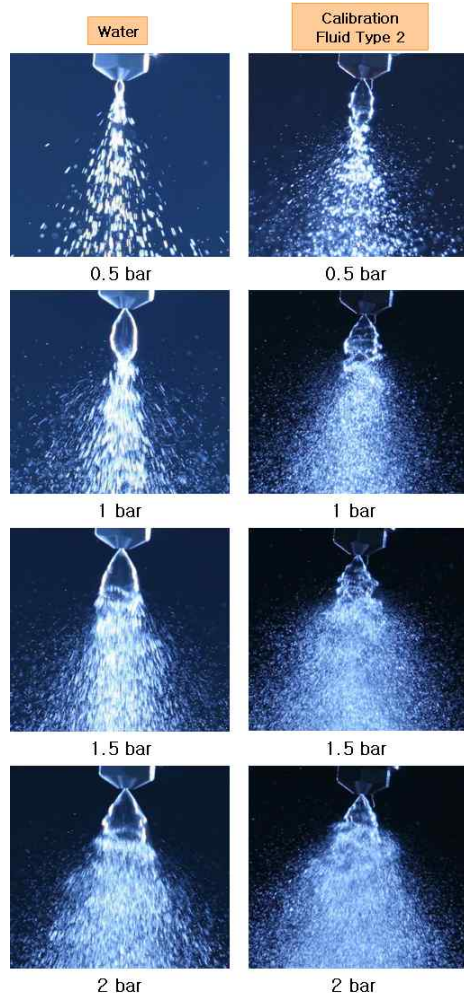
Fig. 4 Measurement points

3. 실험결과

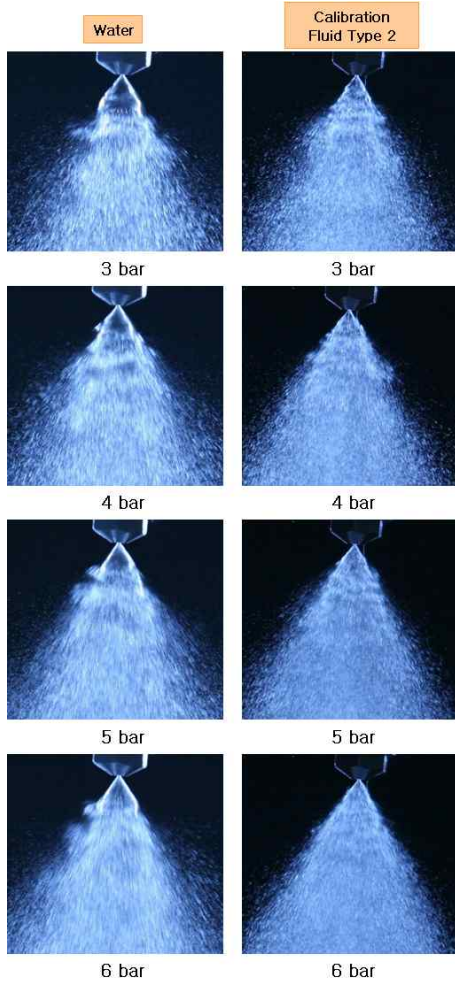
3.1. 가시화 실험결과

물과 보정유체 2의 가시화 실험결과를 Fig. 5에 나타내었다. 물의 경우 분사압이 0.5~1 bar에서 양파 형태의 분무 형상이 나타나고 분사압이 증가 할수록 튕립 형태로 발달하여 4 bar에서 부터는 완전히 발달된 분무형태를 보인다. 하지만 보정유체 2의 경우 0.5 bar에서만 양파 형태의 분무형상이 나타나고 이후 튕립 형태로 발달하게 되어 3 bar에서 완전히 발달된 분무형태를 보인다. 일반적인 단순 압력식 연료노즐의 압력 증가에 따른 분무형태가 액주, 양파모양의

액막, 튕립모양의 액막, 노즐출구에서 미립화 단계로 발달함을 고려해 볼 때 보정유체 2가 물에 비해 미립화 과정이 더 빨리 진행된다고 판단된다[4]. 이러한 차이는 보정유체 2에 비해 물의 표면장력이 약 3배 크기 때문에 나타나는 것으로 판단된다. 즉 표면장력은 새로운 분무면이 형성되는 것을 억제하는 역할을 하며, 미립화에 필요한 최소 에너지는 표면장력과 새로운 분무면적의 합으로 표시되기 때문이다. 하지만 4 bar 이상부터는 두 작동유체 모두 미립화가 충분히 발달되어 유사한 분무 형태를 보임을 알 수 있다. 따라서 낮은 압력에서의 분무형태는 표면장력 등 작동유체의 물성치의 영향을 크게 받지만 압력이 증가함에 따라 점차 영향력이 감소하는 것으로 판단된다.



(a) 0.5~2 bar



(b) 3~6 bar

Fig. 5 Spray photographs of water and calibration fluid type 2

3.2 PDPA 실험 결과

Figure 6~7에 물과 보정유체 2의 SMD 분포 결과를 나타내었다. 전체적으로 노즐 중심부에서는 SMD가 주변에 비해 작은 것을 확인할 수 있고 주 분무영역으로 갈수록 SMD 분포가 크게 나타나 전형적인 단순 압력식 연료노즐의 분무 형태를 보이고 있다. 작동유체에 따른 SMD 분포를 비교해 보면 물의 경우 SMD가 25~95 μm 사이에서 분포하는 반면 보정유체 2는 15~92 μm 사이에 분포하는 것을 알 수 있다. 각 위치에서의 최대 SMD는 물의 경우 67~92 μm , 보정유체 2는 65~92 μm 로 나타나 유사한 크기를

나타내었다.

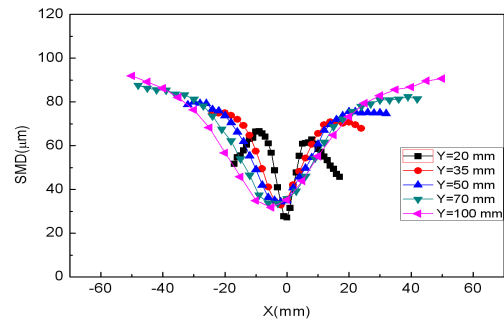


Fig. 6 SMD distribution of water

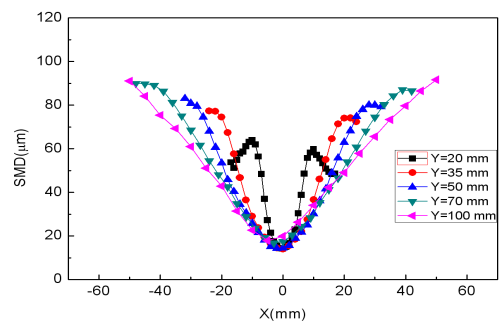


Fig. 7 SMD distribution of calibration fluid type 2

노즐 출구에서 Y 방향으로의 거리에 따른 SMD 분포를 알아보기 위해 Fig. 8~9에 노즐 출구에서 35 mm 떨어진 지점과 70 mm 떨어진 지점에서의 SMD를 나타내었다. 노즐 출구에서 35 mm 떨어진 지점에서의 SMD의 경우 X 방향으로 ± 15 mm 이내에서는 물의 SMD가 10~20 μm 크게 나타났으며 이러한 경향은 노즐 출구에서 70 mm 떨어진 지점에서도 나타나 X 방향으로 ± 25 mm 이내에서 물의 SMD가 크게 나타났다.

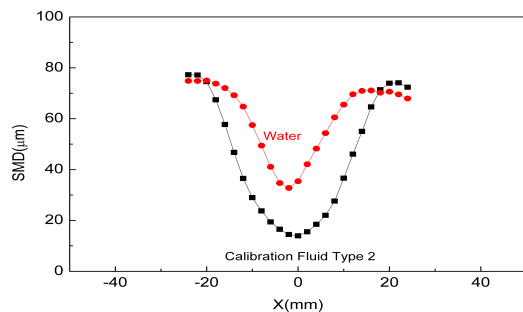


Fig. 8 SMD distribution at Y=35 mm

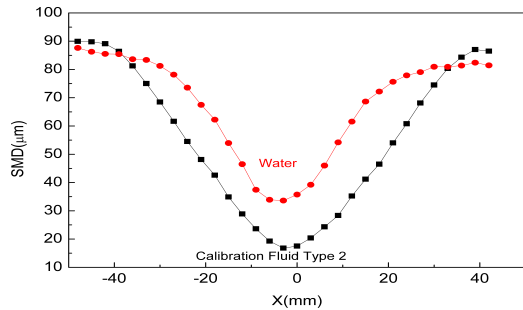


Fig. 9 SMD distribution at Y=70 mm

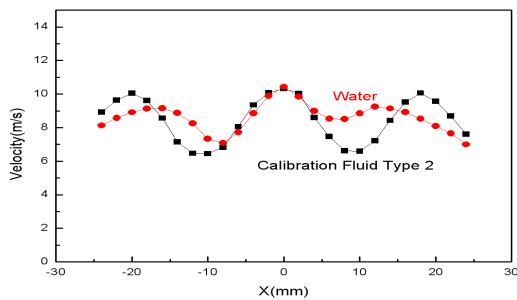


Fig. 10 Velocity distribution at Y=35 mm

Figure 10은 노즐 출구에서 35mm 떨어진 지점에서의 속도분포를 나타낸 그래프이다. 단순 압력식 연료노즐의 경우 분무압이 작동유체의 속도성분으로 변하여 미립화에 영향을 미치게 되므로 분무특성을 이해하는데 중요한 인자이다. 두 작동유체 모두 6~11 m/s 속도분포를 나타내며 중심부에서 가장 속도가 높고 중심부에서 멀어질수록 속도가 감소하다가 다시 증가하는 형태를 보이고 있음을 알 수 있다.

Figure 11은 노즐 출구에서 35 mm 떨어진 지점에서의 체적유속(Volume Flux)을 나타낸 것이다. 체적유속은 시간당 단위 면적을 통과하는 액적들의 부피를 나타낸 것으로 분무의 집중도를 확인할 수 있는 인자이다. 두 가지 유체의 경우 체적유속이 최대가 되는 위치가 상이한 것을 알 수 있으며, 물의 체적유속이 최대가 되는 지점이 보정유체 2에 비해 다소 노즐 중심부에 가깝게 나타나 속도의 경우와 유사하게 분포한다. 그러나 분무각은 Fig. 5의 분무압력 6 bar 에서의 가시화에서처럼 거의 유사함을 볼 수 있다. 따라서 물의 경우 표면장력이 보정유체 2에 비해 3배가

량 높아 분무액막의 두께가 보정유체 2에 비해 훨씬 두껍게 분포하고 있음을 알 수 있다.

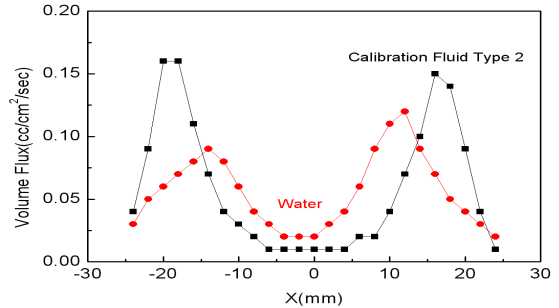


Fig. 11 Volume flux distribution at Y=35 mm

체적유속이 최대가 되는 위치를 기준으로 SMD 비교를 한 결과가 Fig. 12에 제시되어 있다. 결과에서 보정유체 2의 SMD는 60~70 μm 사이에서 분포하며, 물의 경우는 60~80 μm 사이에서 분포하고 있다. 노즐 출구에서 50 mm 이내에서는 약 5 μm 이내의 매우 근소한 차이를 보였다. 주 분무영역이라 할 수 있는 최대 체적유속이 나타나는 지점에서는 두 작동유체의 SMD 차이가 그리 크게 나타나지 않음을 알 수 있다. 하지만 주 분무영역에서 벗어난 지역인 X=±10 mm 이내에서는 작동유체의 물성치 영향에 따라 SMD 가 10~20 μm 차이가 나타남을 알 수 있다.

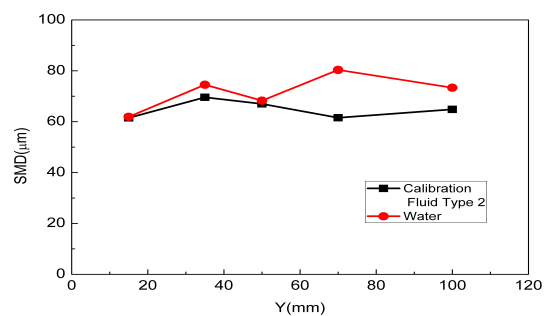


Fig. 12 SMD distribution at max volume flux

이러한 결과는 초기 분열 과정에서 동일한 압력에 의해 유사한 SMD 결과를 보이지만 이후 노즐 출구에서 거리가 멀어짐에 따라 분사압의 영향이 감소하고 속도가 감소되어 작동유체의 물성치 영향으로 SMD 차이가 발생하는 것으로 보인다.

4. 결론

가시화 및 PDPA 실험을 통해 작동유체에 따른 단순 압력식 연료노즐의 분무특성을 확인해 볼 수 있었으며 그 결과를 다음과 같다.

- 1) 가시화 및 Volume Flux 분포 등을 통하여 전체적인 분무 형상 및 특성을 확인할 수 있었으며 공급압력 6 bar에서는 분무 형상 및 특성, SMD 분포, Volume flux 등이 유사하게 나타났다.
- 2) PDPA 측정 결과 주 분무영역에서의 SMD는 유사한 분포를 보였다.
- 3) 주 분무영역 이외의 위치에서는 보정유체 2의 미립화 특성이 더 좋은 것으로 판단되며 분무형태 또한 4 bar 이하의 낮은 압력에서 보정유체 2의 분무발달이 빠르게 진행되었다. 이러한 결과는 물의 표면장력이 보정유체 2에 비하여 약 3 배 정도 크기 때문으로 판단된다.
- 4) 물을 이용한 분무시험의 경우 실제 항공유를 이용한 시험결과와 SMD, 분무각 등에서 유사한 특성을 보이므로 물을 이용한 분무시험 결과를 이용할 경우 실제 가스터빈 연료노즐의 성능을 파악하는데 도움이 될 것으로 판단된다. 하지만 최대 체적유속 및 속도가 나타나는 위치가 미세하게 상이하며, 분무 액막은 물의 경우 두껍게 나타나므로 이에 대한 고려가 필요하다. 특히 분무형태가 충분히 발달되지 못 하였을 경우 작동유체의 물성치에 대한 고려가 필요할 것으로 판단되며 특히 표면장력의 경우 물과 항공유 사이에 큰 차이를 보이기 때문에 주의가 필요하다.
- 5) 최대 체적유속이 나타나는 지점을 기준으로 하여 노즐 출구에서 거리에 따른 SMD 분포 결과를 비교해 보았을 때 초기 분열 과정에서는 작동유체의 물성치의 영향이 작지만 노즐 출구에서 멀어짐에 따라 작동유체의 영향이 증가되어 SMD 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 물을 이용한 연료노즐 분무시험시 노즐 출구에서 거리가 증가함에 따라 SMD가 실제 항공유의 시험결과와 차이가 발생하는 것을 고려해야 할 것으로 판단된다.

후기

동 연구는 지식경제부 한국형헬기 민군겸용구성품개발사업(KARI주관) 위탁연구결과 중 일부임.

참고문헌

1. A. M. Mellor, "Design of Modern Turbine Combustors", academic Press, 1990
2. A. H. Lefebvre, "Atomization and Sprays", Hemisphere Publishing Co., 1989.
3. H. C. Simmons, C. F. Harding, "Some Effects on Using Water as a Test Fluid in Fuel Nozzle Spray Analysis, ASME Paper 80-GT-90, 1980.
4. J. B. Kennedy, "High Weber Number SMD Correlations for Pressure Atomizers, ASME Paper 85-GT-37, 1985.
5. A. R. Jones, "Design Optimization of a Large Pressure-Jet Atomizer for Power Plant", Proceedings of the 2nd International Conference of liquid Atomization and Sprays, madison, wis., 1982, pp. 181~185.
6. A. K. Jasuja, "Atomization of Crude and Residual Fuel Oils", ASME J. ENG. Power, Vol. 101, No. 2, 1979
7. L. G. Dodge, J. A. Biaglow, "Effect of Elevated Temperature and Pressure on Sprays from Simplex Swirl Atomizers, ASME Paper 85-GT-58, 1985.
8. B. E. Knight "Communication on the Performance of a Type of Swirl Atomizer
9. 이동훈, 이강엽, 최성만, "쉬라우드 공기의 선회 유동 특성 변화에 따른 심플렉스 연료노즐의 분무 특성", 한국액체미립화학회지 제 9권 제 3호, 2004, pp. 35~41.
10. 최채홍, 임병준, 최성만, "항공기 작동조건에 따른 APU 가스터빈엔진 연료노즐의 분무 특성", 한국추진공학회지, 제 12권 제 1호, 2008, pp. 29~36.