

APU 가스터빈엔진 압력식 스월인젝터의 분무특성

최채홍* · 최성만** · 임병준***

Spray Characteristics of the Pressure Swirl Injector for the APU Gas Turbine Engine

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

ABSTRACT

Spray characteristics of the APU gas turbine engine were investigated. In order to understand blow out phenomena of the APU engine, we performed fuel spray test. In the test, four operating conditions such as sea level idle, sea level max power, 20,000 feet idle, 20,000 feet max power were used as spray experimental conditions. PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) was used for measuring the particle diameter and velocity. Also spray visualization was performed by using ND-YAG sheet laser beam. From the test result, in the case of 20,000 feet idle condition, SMD is about 100 μm and maximum particle velocity is about 10 m/s. For the flame stability, spray quality should be improved at 20,000 feet idle condition.

초 록

APU 가스터빈엔진의 연료분무특성을 연구하였다. 지상 및 고도 작동조건에 대한 연료분무특성 실험을 수행하여 APU 엔진의 실화 가능성을 검토하였다. 분무실험은 4개의 작동조건에 대하여 수행되었으며 각 조건은 지상 무부하 및 통합부하 조건과 고도 20,000 feet 무부하 및 통합부하에 대한 실험을 수행하였다. 분무특성은 PDPA를 이용한 입자의 크기 및 속도 측정과 레이저 빔을 이용한 가시화를 수행하였다. 연구결과 20,000 feet 무부하의 경우 입자의 크기가 100 μm 정도이며 분무속도가 최대 10 m/s로 낮아 화염안정성을 위한 개선이 필요할 것으로 판단된다.

Key Words: APU(보조동력장치), PDPA(위상 도플러 액적 분석기), SMD(Sauter 평균 입경)

1. 서 론

가스터빈엔진 중 100kW급 소형 엔진은 주로 항공기의 시동 및 전기발생, 추기 공기(Beeld Air)발생 등 항공기의 생존에 중요한 역할을 담당하고 있을 뿐만 아니라 분산 발전/비상 전원 용으로도 적용 가능하므로 그 중요성이 점차 증

* 전북대학교

** 전북대학교 항공우주공학과

책임저자, E-mail: csm@chonbuk.ac.kr

*** 한국항공우주연구원

대되고 있는 실정이다.[1]

현재 세계에서 상용으로 사용하고 있는 APU 엔진은 미국의 UH60 헬기에 이용되는 Sundstrand 사의 T-62T-40 엔진과 Honeywell사의 Garret GTCP36-150, 프랑스 Microturbo 사의 Gevaudan 9 엔진이 있으며[2] 국내에는 삼성테크윈의 지상용 가스터빈 주동력장치(PPU)가 있다. 위의 엔진들은 모두 6개의 연료노즐을 이용하여 연료를 연소기내에 분사하는 특징을 가지고 있으며, 이것은 연료량의 변화에 대해 연소안정성이 근본적으로 취약한 약점을 가지고 있다. 연소 안정성이 취약하다는 것은 엔진이 극한 작동 상황에서 실화가 발생하여 작동중단이 일어날 수 있는 가능성이 있다는 것이다. 이러한 APU의 작동중단은 헬기의 운용에 심각한 위협이 될 수 있으므로 이를 사전에 검증하여 연소기의 실화를 능동적으로 회피하거나 또는 시스템을 개선하여 그 가능성을 억제하여야 한다.

한편, 삼성에서 개발한 지상용주동력장치(PPU)는 지상용 응용분야에 적용된 바는 있으나 [3,4], 아직 항공용으로 적용한 경우가 없어 다양한 비행 및 고도조건에서의 연구가 필요한 상황이다.

APU엔진은 등유 또는 경유를 연료로 사용하는데 이러한 액체 연료는 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 분포는 연료분사기의 중요한 성능특성이 된다.[5]

본 연구는 액체 연료를 사용하는 항공기용 100kW급 소형 가스터빈엔진의 연소안정성을 확보하기 위해 다양한 고도조건에서의 연료량 변화에 따른 분무 특성을 측정하는 것이다. 분무입자의 크기 및 속도는 PDPA를 이용하여 측정하고자 하며 분무가시화를 통해 전반적인 분무형상을 이해하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험용 연료노즐

본 연구에 사용한 연료노즐은 압력식 연료노즐로 Fig. 1에 전체적인 모습을 나타내었다. 연료노즐의 오리피스 직경은 0.38 mm이며, 2개의 접선형 유입구를 가지는 와류실과 필터로 구성되어 있다.

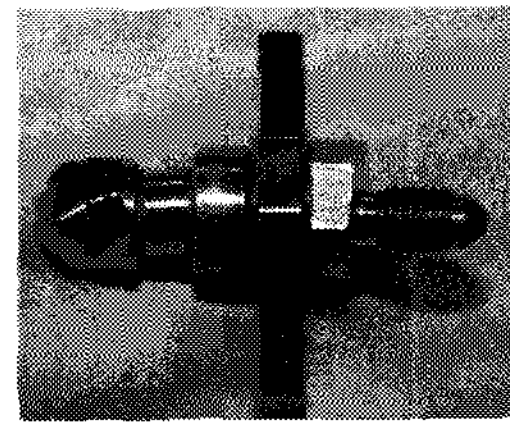


Fig 1. Simplex injector

2.2 PDPA

입자의 크기와 속도를 측정하기 위하여 PDPA를 이용하였으며 실험장치는 Fig. 1과 같이 구성하였다. 실험장치는 크게 모의 연료인 물을 공급하는 물 공급부와 PDPA 측정부, DATA 처리부 등 세부분으로 나뉘어져 있다. 물 공급부는 크게 두 종류의 시스템을 사용하였는데 6.5 kgf/cm^2 이하에서 가압식 50 L 물탱크와 5 마력 압축기를 이용하여 연료노즐에 공급하였고, 6.5 kgf/cm^2 이상에서는 물 저장탱크에서 정화필터를 통과한 물을 연료노즐로 공급하는 20 마력 Diaphragm 펌프를 이용하였다. 이때 공급압력은 압력센서(Sensys, PTCE0030KCBA)를 이용해서 신호를 받아 컴퓨터 프로그램(Labview)을 이용한 처리를 통해 측정하였다. PDPA 측정시스템은 크게 레이저 발진부와 광학계로 구성되어 있다. 레이저 발진부는 수냉식 Art-ion 레이저(6W, DANTEC)를 사용하였다. 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 속

도를 측정하게 된다. 신호처리기(DANTEC, 58N10)는 버스트(Burst) 검출방식을 통해 이루어지며 분무액적의 크기와 속도는 도플러 효과에 의한 신호의 상대적 위상차와 주파수 크기를 이용해 계산된다.

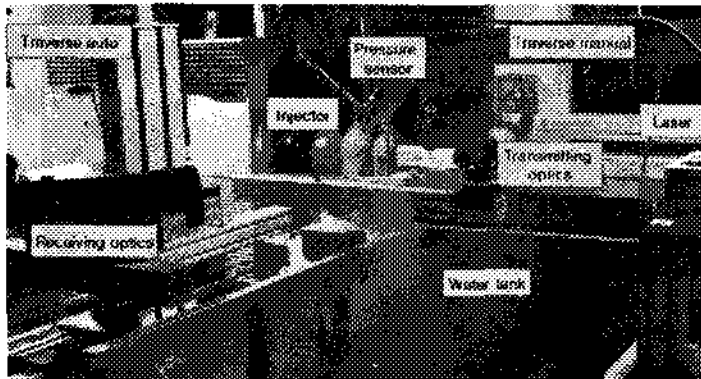


Fig 2. PDPA system

23 가시화

연료노즐의 분무 가시화를 위하여 ND-YAG Laser를 광원으로 Sheet beam을 형성하고 노즐 출구 중심을 지나게 하여 CCD카메라를 통해 이미지를 획득하였다. 이때 CCD카메라의 셔터스피드는 1/10초, F수는 5에서 수행 하였으며 가시화 실험장치는 Fig. 3에 나타내었다.



Fig 3. Spray Visualization

24 실험조건

분무실험을 수행하기 위한 유체로 물을 사용하였으며 모든 실험은 상온, 대기압에서 이루어졌다. 물 공급 압력을 변화해 가며 유량을 실험하였으며 가시화는 0.5 kgf/cm²에서 32 kgf/cm²까지 수행하였다. PDPA 실험은 엔진운용조건에 따른 압력에서 실험 하였으며 설계점 해석을 통해 구한 실험 조건은 Table. 1 에 나타나 있다. 이때 PDPA의 측정 위치는 Fig. 4와 같으며 크게 5구간 270 point에서 수행하였다.

Table 1. Test conditions

운용조건	연료유량 (kg/h)	물유량 (kg/h)
20kfeet, 무부하	2.98	3.73
SL, 무부하	5.53	6.91
20kfeet, 통합부하	7.42	9.28
SL, 통합부하	12.47	15.59

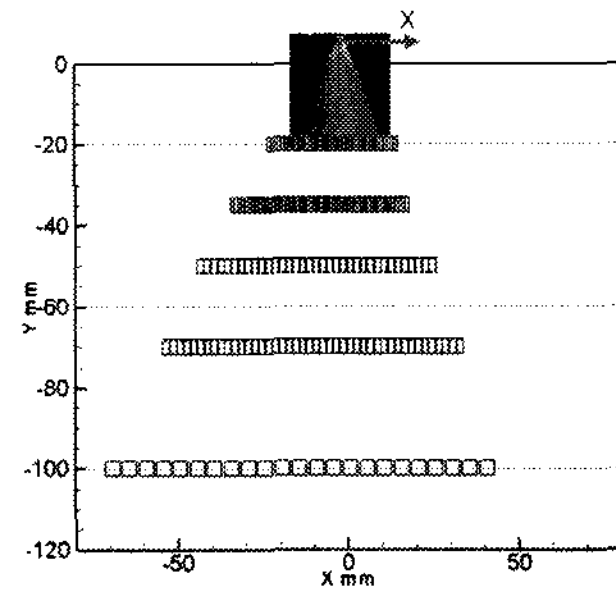


Fig 4. Measuring points of PDPA

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 유량

각 압력에 따른 유량 변화를 Fig. 3 에 나타내었다. 결과를 살펴보면 실험 조건을 만족하는 압력은 20,000 feet 무부하 조건에서는 1.5 kgf/cm², SL 무부하 조건에서는 6.2 kgf/cm², 20,000 feet 통합부하 조건에서는 11.5 kgf/cm², SL 통합부하 조건에서는 32 kgf/cm²로 나타났다.

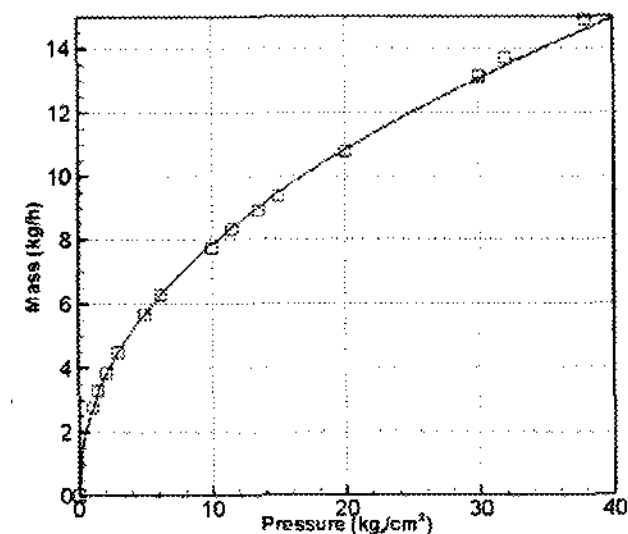


Fig. 5 Mass flow rate

3.2 가시화

분무압력을 0.5 kgf/cm^2 에서 38 kgf/cm^2 까지 가시화한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 가시화 결과를 살펴보면 2 kgf/cm^2 이하 압력에서는 거의 분무가 형성되지 않으며 $3 \sim 6 \text{ kgf/cm}^2$ 에서는 점차 분무가 발달되며 10 kgf/cm^2 이상에서는 완전히 발달된 분무를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 가시화를 통해 얻은 이미지를 토대로 분무각을 측정 하였으며 그 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 결과에서 압력이 증가할수록 분무각은 계속 증가하다가 25 kgf/cm^2 이상에 이르러 증가폭이 둔화됨을 확인할 수 있고 이때의 분무각은 52° 로 나타났다.

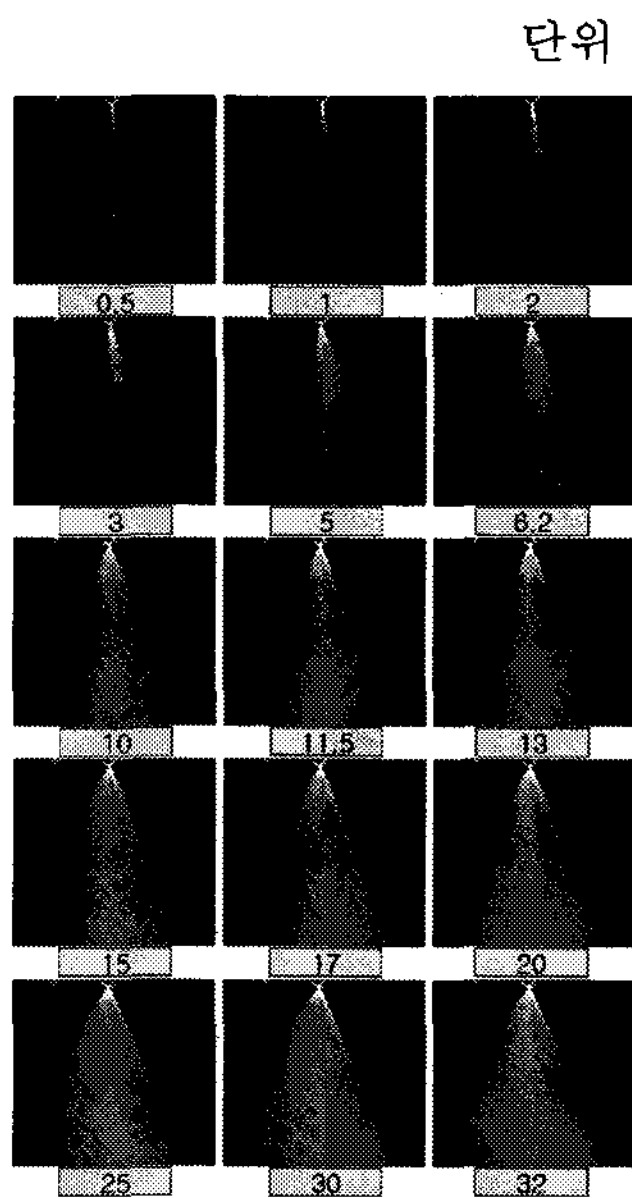


Fig. 6 Photographs of fuel spray

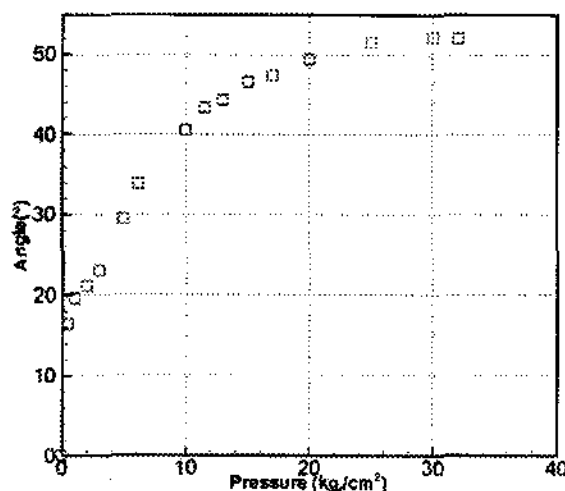


Fig. 7 Spray angle

3.3 PDPA 측정 결과

각 압력에서 연료노즐 출구로부터의 거리에 따른 SMD 측정 결과를 Fig. 8~11에 나타내었다. Fig. 8은 20,000 feet 무부하 조건에서 분무입자의 크기를 측정된 것이다. 이때 분무 압력은 1.5 kgf/cm^2 이다. 분무입자의 크기는 대략 $100 \mu\text{m}$ 정도이고, 노즐 출구에서 멀어짐에 따라 입자의 크기는 점차 증가하고 있다. 입자크기의 분포는 중심에서 가장 크고 주위로 감에 따라 작아져서 분무가 노즐의 중심부를 따라 집중되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 SL 무부하 조건으로 이때 분무 압력은 6.2 kgf/cm^2 이다. 분무 형태는 중심에서 입자의 크기가 작고 주 분무 영역에서 입자의 크기가 가장 큰 중공형태의 모습을 보인다. 각 위치에서 최대 분무입자의 크기는 $60 \sim 85 \mu\text{m}$ 의 분포를 가진다.

Fig. 10은 20,000 feet 통합부하에 대한 시험 조건으로 분무압력은 11.5 kgf/cm^2 이다. 분무는 완전한 중공 형태를 가지며 각 위치에서의 최대 SMD는 $50 \sim 70 \mu\text{m}$ 정도이다.

Fig. 11은 SL 통합부하 조건이다. 이때 분무 압력은 32 kgf/cm^2 이다. 이 경우 거의 모든 위치에서 유사한 분무형태를 가지며 완전히 분무가 발달하였음을 볼 수 있다. 이때 SMD는 $20 \sim 60 \mu\text{m}$ 정도에 분포하고 있다.

위 결과에서 20,000 feet 무부하조건과 SL 무부하 조건의 경우 분무 형태가 불안정하여 화염이 소실될 가능성이 있으며, 20,000 feet와 SL에서의 통합부하의 경우 매우 안정된 화염을 생성함을 알 수 있다.

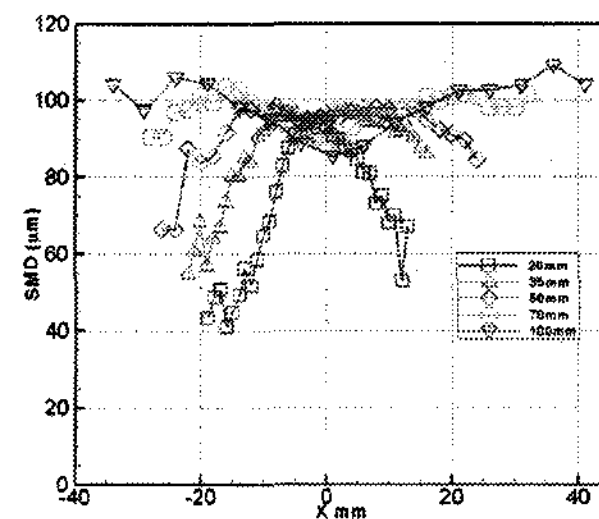


Fig. 8 SMD distribution at $\Delta P = 1.5 \text{ kgf/cm}^2$

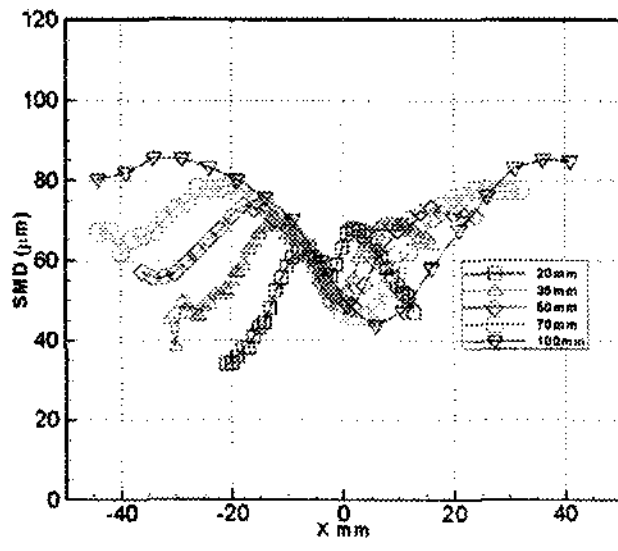


Fig. 9 SMD distribution at $\Delta P = 6.2 \text{ kgf/cm}^2$

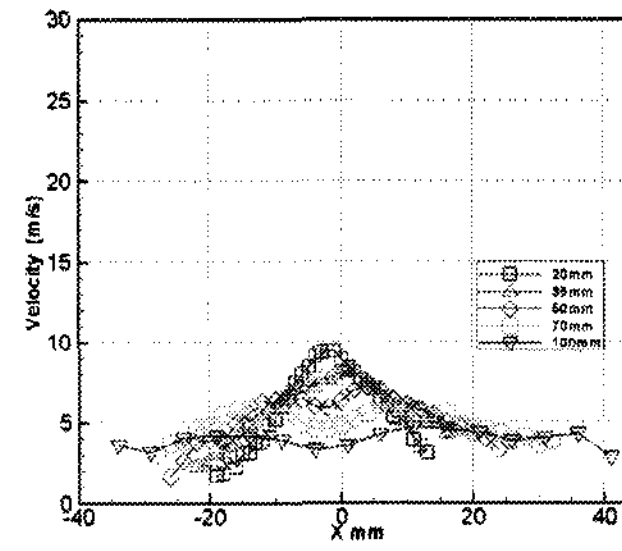


Fig. 12 Velocity distribution at $\Delta P = 1.5 \text{ kgf/cm}^2$

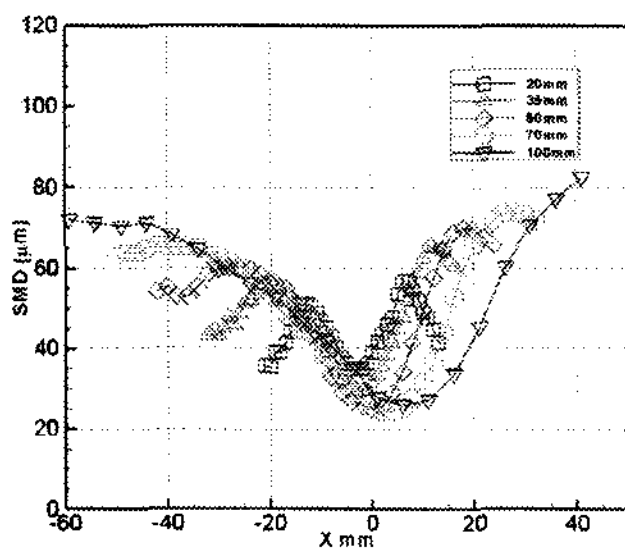


Fig. 10 SMD distribution at $\Delta P = 11.5 \text{ kgf/cm}^2$

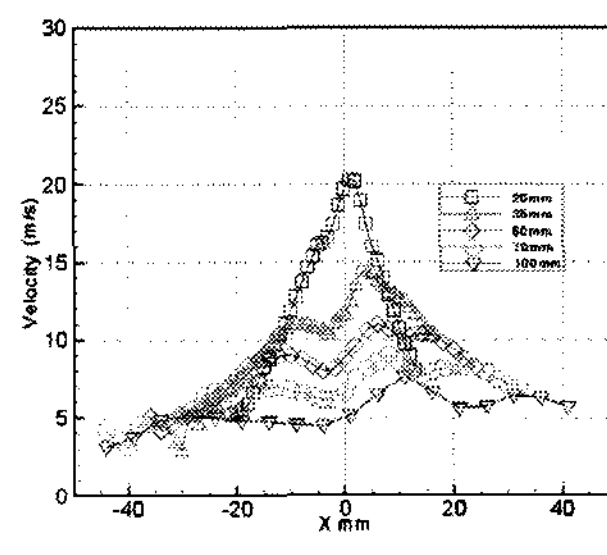


Fig. 13 Velocity distribution at $\Delta P = 6.2 \text{ kgf/cm}^2$

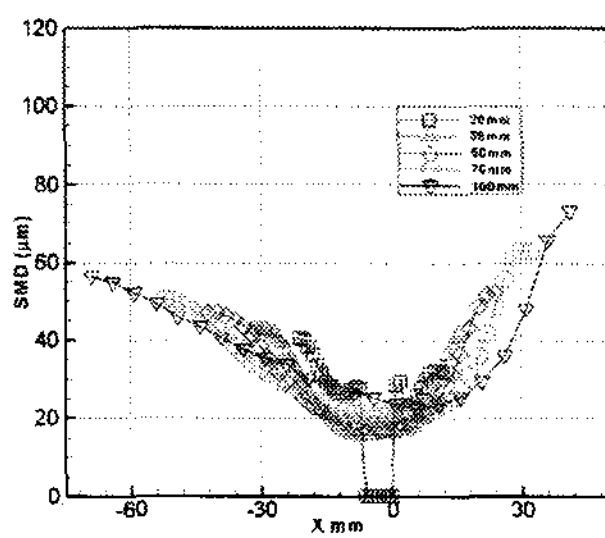


Fig. 11 SMD distribution at $\Delta P = 32 \text{ kgf/cm}^2$

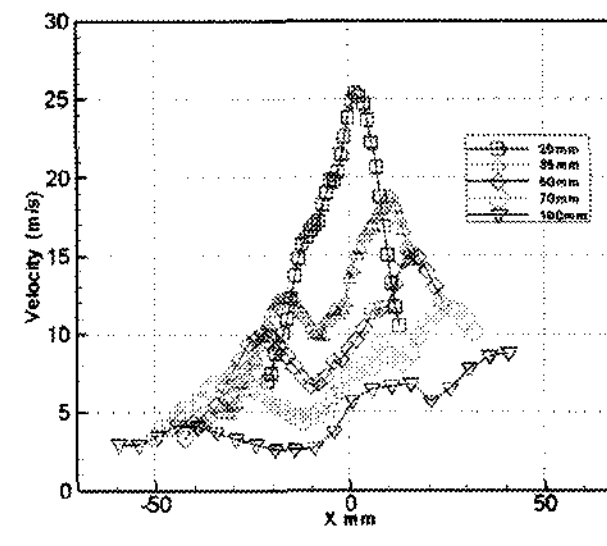


Fig. 14 Velocity distribution at $\Delta P = 11.5 \text{ kgf/cm}^2$

속도 측정 결과를 Fig. 12~15에 나타내었다. 속도는 1.5 kgf/cm^2 에서 10 m/s 의 매우 약한 분무 속도를 나타내며 분무압력 32 kgf/cm^2 에서는 28 m/s 까지 속도가 증가함을 보였다. 분무압력이 6.2 kgf/cm^2 의 경우 노즐 출구에서 20 mm 떨어진 지점에서의 최대 속도가 20 m/s 이며 노즐 출구에서 거리가 멀어질수록 속도는 감소하여 100 mm 위치에서는 약 7 m/s 의 속도로 감소한다.

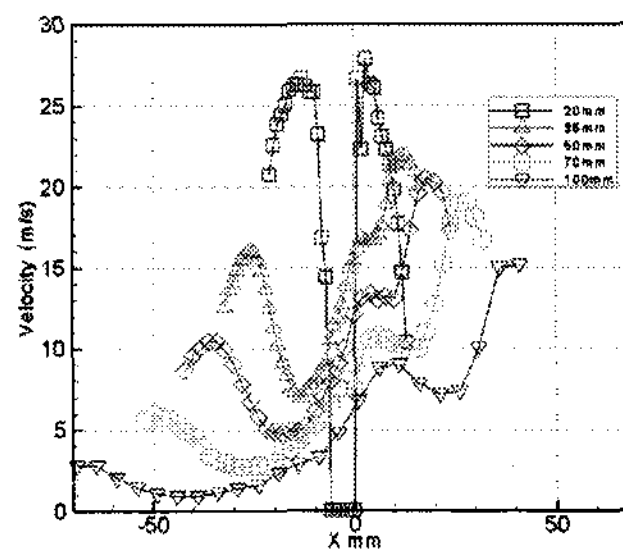


Fig. 15 Velocity distribution at $\Delta P = 32 \text{ kgf/cm}^2$

연소기 내의 화염이 위치할 수 있는 노즐로부터 거리 35 mm와 70 mm 에 대해 각 운용 조건 별 분무상태를 비교한 그림이 Fig. 16, Fig. 17에 제시되어 있다.

Fig. 16의 경우 1.5 kg_f/cm²에서는 중심에서 최대 100 μm 정도이며 6.2 kg_f/cm²에서는 70 μm, 11.5 kg_f/cm²에서는 65 μm 정도, 32 kg_f/cm²에서는 45 μm로 압력이 증가함에 따라 분무 입자의 크기는 감소하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 17의 경우 1.5 kg_f/cm²에서는 105 μm 정도이며, 6.2 kg_f/cm²에서는 80 μm, 11.5 kg_f/cm²에서는 75 μm, 32 kg_f/cm²에서는 65 μm 정도로 나타난다. 일반적으로 안정된 화염을 유지하기 위해서는 SMD가 대략 80 μm 이하의 크기가 요구되므로 20,000 feet 무부하 조건인 1.5 kg_f/cm²의 경우 매우 불안정한 상태가 될 것임을 예상할 수 있다.

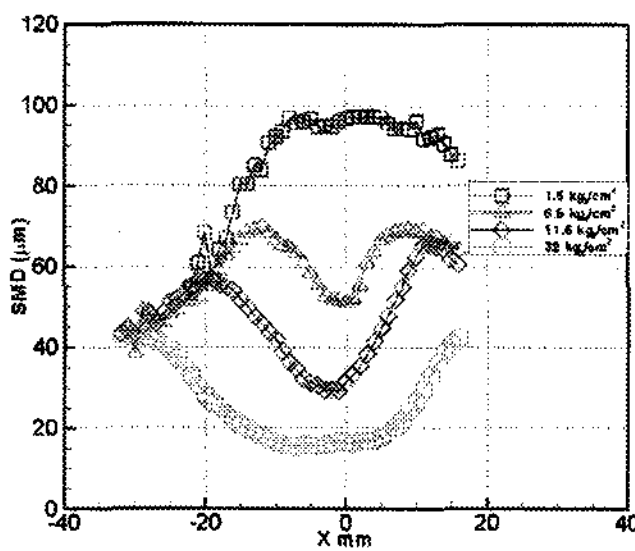


Fig. 16 SMD distribution at X = 70mm

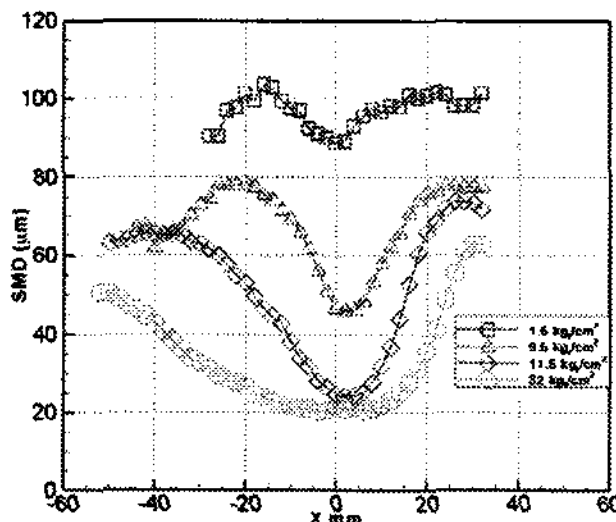


Fig. 17 SMD distribution at X = 70mm

4. 결 론

이상의 실험 결과들에서 APU의 운용조건이 지상, 20,000 feet에서 무부하일 때와 통합부하일 때의 분무특성을 다음과 같다.

- 1) 가시화를 통하여 압력이 증가 할수록 분무각이 커짐을 확인 할 수 있었고, 25 kg_f/cm² 이상에서는 증가폭이 둔화됨을 확인 할 수 있었다.
- 2) PDPA를 통하여 각 운용조건에서의 SMD와 속도분포를 확인 할 수 있었으며, SMD는 압력이 증가할수록 감소되고 속도는 증가하였다.
- 3) 20,000 feet 무부하 조건에서 SMD는 100 μm 정도로 나타났고 분무각은 20°로 나타나 이 조건에서의 분무 특성을 개선하는 것이 필요하다고 판단된다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. 이동훈, 이강엽, 전승배, 양수석, 고영성, 최성만, "지상용 가스터빈 주동력장치(PPU) 연소기의 개발과 시험평가," 한국항공우주공학 회지, 제33권, 제8호, 2005, pp.111-112
2. Forecast International, "Gas Turbine Forecast; Small Engine/APUs," DMS Market Intelligence Report, 1995.
3. 고영성, 한영민, 권범철, 양수석, 이대성, 김명환, 최성만, 보조동력장치용 환형 역류형 연소기 시험, Proceeding of the KSAS Spring Annual Meeting, 2000.
4. 이강엽, 최성만, 한영민, Ignition Characteristics on the Annular Combustor with Rotating Fuel Injection System, Proceedings of ASME Turbo Expo, 2004.
5. A. M. Mellor, "Design of Modern Turbine Combustors, academic Press, 1990.