

## 항공기 작동조건에 따른 APU 가스터빈엔진 연료노즐의 분무특성

최채홍\* · 최성만\*\* · 임병준\*\*\*

### Spray Characteristics of the Injector for the APU Gas Turbine Engine at Airplane Operating Conditions

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

#### ABSTRACT

Spray characteristics for APU gas turbine engine are investigated. In the test, four flight conditions such as sea level idle, sea level max power, 20,000 feet idle, 20,000 feet max power are used as spray experimental conditions. Spray visualization was performed by using ND-YAG laser beam. PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) was used for measuring the particle diameter and velocity from 20 mm to 100 mm from discharge orifice. From the test result, SMD is 90~95  $\mu\text{m}$  at 20,000 ft idle condition and SMD is 60~75  $\mu\text{m}$  at sea level idle condition. Also SMD is 55~65  $\mu\text{m}$  at 20,000 ft max power condition and SMD is 30~70  $\mu\text{m}$  at sea level max power condition. In the case of 20,000 ft idle condition, combustion instability could be occurred due to the higher drop diameter. Therefore it is necessary to decrease the droplet diameter in the high altitude condition.

#### 초 록

APU 가스터빈에 적용되는 연료노즐의 분무특성을 확인하였다. 분무시험은 항공기의 비행조건에 따라 4개의 작동조건에 대하여 수행하였으며 각 분무조건은 지상에서의 무부하 및 통합부하 조건과 고도 20,000 feet에서의 무부하 및 통합부하에 대해서 실험을 수행하였다. 분무특성은 레이저 빔을 이용한 가시화와 PDPA 시스템을 이용하여 SMD 및 속도측정을 수행하였으며 노즐출구에서 20~100 mm지점에서 측정하였다. 연구결과 20,000 feet 무부하 조건의 경우 90~95  $\mu\text{m}$  정도의 SMD를 나타내었고 지상 무부하의 경우 약 60~75  $\mu\text{m}$ 로 측정되었으며 20,000 feet 통합부하의 경우 약 55~65  $\mu\text{m}$ , 지상 통합부하의 경우 30~70  $\mu\text{m}$ 의 값을 나타내었다. 20,000 feet 무부하의 경우 화염 불안정이 발생할 가능성이 있으므로 연료분무입자의 크기를 감소하는 다양한 노력이 요구된다.

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

† 2007년 12월 5일 접수 ~ 2008년 2월 5일 심사완료

\* 학생회원, 전북대학교 항공우주공학과 대학원

\*\* 중신회원, 전북대학교 항공우주공학과

\*\*\* 정회원, 한국항공우주연구원 엔진팀(KHP)

연락처, E-mail: csman@chonbuk.ac.kr

가스터빈엔진 중 100kW급 소형 엔진은 주로 항공기의 시동 및 전기발생, 추기 공기(Bleed Air)공급 등 항공기의 생존에 중요한 역할을 담당 하고 있을 뿐만 아니라[1] 전자장비의 중요성이 매우 커지고 있는 현대의 항공기에서 APU의 중요성이 더욱 더 커지고 있다고 할 수 있다.

이러한 APU 엔진은 현재 미국의 UH60 헬기에 이용되는 Sundstrand 사의 T-62T-40 엔진과 Honeywell사의 Garret GTCP36-150, 프랑스 Microturbo 사의 Gevaudan 9 엔진 등이 상용으로 널리 사용되고 있으며[2] 국내에는 삼성테크윈의 지상용 가스터빈 주동력장치(PPU)가 개발된 바 있다[1]. 위에서 언급한 대부분 엔진연소기의 경우 6개의 연료노즐을 이용하여 연료를 연소기내에 분사하는 특징을 가지고 있으며, 이러한 적은 수의 연료노즐을 가진 시스템에서는 연료량의 변화에 대해 연소안정성이 근본적으로 취약한 약점을 가지고 있다. 이는 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, 삼성테크윈에서 개발한 지상용주동력장치(PPU)는 지상용 응용분야에 적용된 바는 있으나[3,4], 아직 항공기용으로 적용된 경우가 없어 항공기에 적용하기 위해서는 다양한 비행 및 고도조건에서의 연구를 통해 안정성이 검증되어야 할 필요가 있다.

APU엔진은 등유 또는 경유를 연료로 사용하는데 이러한 액체 연료는 연소영역으로 분사될 때 많은 수의 작은 액적으로 미립화 되어야 하며, 연료입자의 증발과 가열된 주위기체에 의해 발생된 연료증기는 공기와 혼합되어 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 확

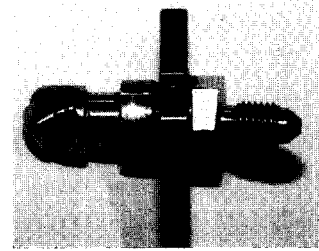


Fig 1. Simplex injector

보하기 위해 다양한 작동조건에서의 연료량 변화에 따른 분무 특성을 측정하는 것이다. 분무입자의 크기 및 속도는 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 이용하여 측정하였고 분무가시화를 통해 전반적인 분무형상을 파악하였다.

## 2. 실험장치

### 2.1 연료노즐

본 연구에 사용된 연료노즐이 Fig. 1에 나타나 있다. 특징으로는 압력 스웰식 연료노즐로 연료노즐의 오리피스 직경은 0.38 mm이며, 2개의 접선형 유입구를 가지는 와류실과 필터로 구성되어 있다.

### 2.2 PDPA 분무입자 측정 장치

입자의 크기와 속도를 측정하기 위하여 PDPA를 이용하였으며 실험장치는 Fig. 2와 같이 구성하였다. 실험장치는 모의 연료인 물을 공급하는 물 공급부와 PDPA 측정부, DATA 처리부 등 세부부분으로 나뉘어져 있다. 물 공급부는 두 종류의 시스템을 사용하였는데 물공급압력이 6.5 kgf/cm<sup>2</sup>이하에서는 가압식 50 L 물탱크와 5 마력 압축기를 이용하여 연료노즐에 공급하였고, 공급압력이 6.5 kgf/cm<sup>2</sup>이상에서는 물 저장탱크에서 정화필터를 통과한 물을 연료노즐로 공급하는 20 마력 diaphragm 펌프를 이용하였다. 이때 공급압력은 압력센서(Sensys)를 이용해서 신

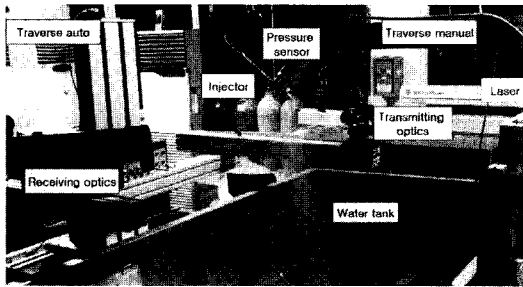


Fig 2. PDPA system

호를 받아 컴퓨터 프로그램(Labview)을 이용한 처리를 통해 측정하였다. PDPA 측정시스템은 레이저 발진부와 광학계로 구성되어 있다. 레이저 발진부는 수냉식 Ar-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 속도를 측정하게 된다. 신호처리기(DANTEC, 58N10)는 버스트(Burst) 검출방식을 통해 이루어지며 분무액적의 크기와 속도는 도플러 효과에 의한 신호의 상대적 위상차와 주파수 크기를 이용해 계산된다.

### 23 분무 가시화 장치

연료노즐의 분무 가시화를 위하여 ND-YAG Laser를 광원으로 하였고 Focus Lens를 이용한 Sheet beam을 형성하였다. 이때 노즐출구 중심을 지나는 레이저에 의해 분무단면을 관찰할 수 있고 CCD카메라를 통해 이미지를 획득하였다. CCD카메라의 셔터스피드는 1/10 초, F수는 5로 설정하였으며 canon EF 70~200 mm 렌즈를 사용하였다. 가시화 실험장치는 Fig. 3에 나타나 있다.

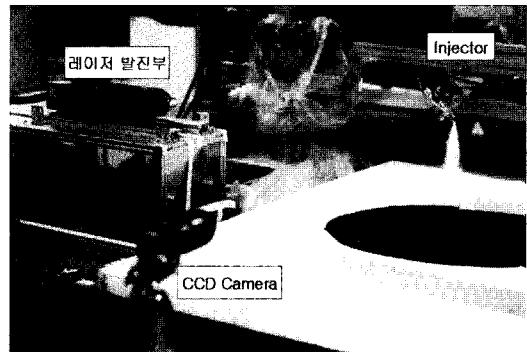


Fig 3. Spray Visualization

### 24 실험조건

분무실험을 수행하기 위한 유체로 물을 사용하였으며 모든 실험은 상온, 대기압에서 이루어졌다. 물 공급 압력을 변화해 가며 유량실험을 수행하였으며 분무 가시화는 공급압력을 0.5 kgf/cm<sup>2</sup>에서 32 kgf/cm<sup>2</sup>까지 변화시켜가며 수행하였다. PDPA 실험은 엔진운용조건을 20,000 ft 무부하 및 통합부하, 지상에서 무부하 및 통합부하로 나누고 각 조건에 따른 연료 유량이 공급되는 분무압력에서 실험 하였다. 실험에서 유체로 물을 사용하였으므로 두 유체간의 밀도 등을 고려하여 물분사량을 구하였고 각 조건에서의 실험 조건 및 분사압력을 Table 1에 나타내었다. 무부하조건은 APU 엔진이 아무런 부하도 받지 않은 상태 즉 idle 조건이며, 통합부하조건이란 APU 엔진의 출력이 발전기 작동을 하면서 추기 공기를 뽑아내는 두 가지 기능을 동시에 수행하는 경우를 말한다. 이때 PDPA의 측정 위치는 Fig. 4에 제시되어있으며 노즐 끝단으로부터 20, 35, 50, 70, 100 mm 떨어진 지점에서 측정하였고 총 270 point에서 실험을 수행하였다. 각 point에서의 최대 Sampling 개수는 30,000개, 최대 Sampling 시간은 20 초로 하여 수행하였다.

Table 1. Test conditions

운용조건	연료유량 (kg/h)	물유량 (kg/h)	분사압 (kgf/cm <sup>2</sup> )
20,000feet, 무부하	2.98	3.33	1.5
SL, 무부하	5.53	6.18	6.2
20,000feet, 통합부하	7.42	8.29	11.5
SL, 통합부하	12.47	13.94	32

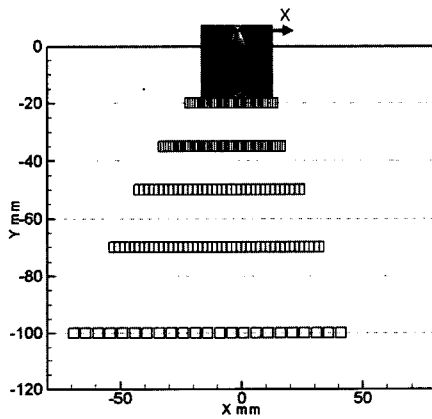


Fig 4. Measuring points of PDPA

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유량계수

압력변화에 따른 유량은 Fig. 5에 나타나있다. 결과를 살펴보면 실험 조건을 만족하는 연료분사압력은 20,000 feet 무부하 조건에서는 1.5 kgf/cm<sup>2</sup>, SL 무부하 조건에서는 6.2 kgf/cm<sup>2</sup>, 20,000 feet 통합부하 조건에서는 11.5 kgf/cm<sup>2</sup>, SL 통합부하 조건에서는 32 kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났다.

3.2 분무 가시화

공급압력을 0.5 kgf/cm<sup>2</sup> 에서 32 kgf/cm<sup>2</sup> 까지 변화시켜가며 가시화 실험을 한 결과가 Fig.

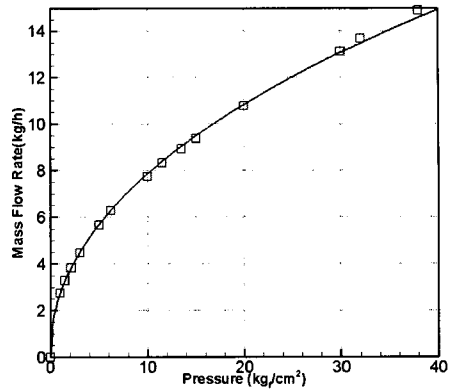
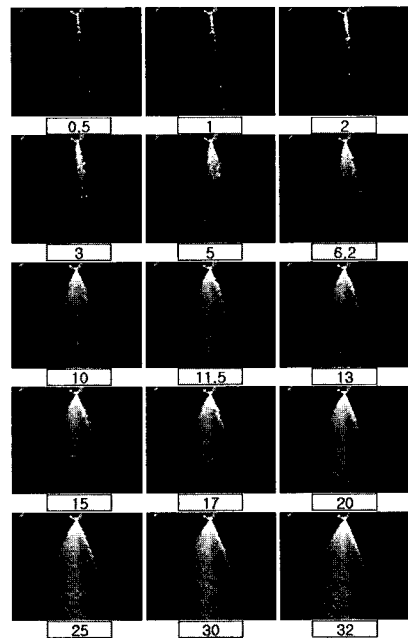


Fig. 5 Mass flow rate



Unit : kgf/cm<sup>2</sup>

Fig. 6 Photographs of fuel spray

6에 나타나있다. 가시화 실험 결과를 살펴보면 2 kgf/cm<sup>2</sup>이하의 공급압력에서는 분무가 발달되지 못하여 원추(cone) 형태의 분무가 형성되지 않고 있다. 하지만 압력이 증가함에 따라 3~6 kgf/cm<sup>2</sup>에서는 점차 분무가 발달되어 원추(cone) 형태의 분무가 나타나고 있으며 10 kgf/cm<sup>2</sup>이상

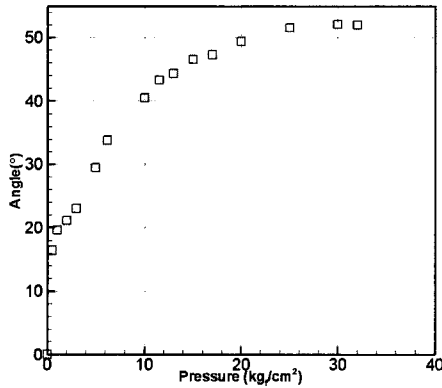


Fig. 7 Spray angle

에서는 완전하게 발달된 분무를 보이고 있음을 확인 할 수 있다. 또한 20 kg/cm<sup>2</sup> 이상에서는 거의 비슷한 분무형태가 나타남을 확인 할 수 있었다. 이러한 가시화를 통해 얻은 이미지를 토대로 분무각을 측정 하였으며 그 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 결과에서 압력이 증가할수록 분무각은 계속 증가하다가 25 kg/cm<sup>2</sup> 이상에 이르러 증가폭이 둔화됨을 확인 할 수 있고 이때의 분무각은 52°로 나타났다.

3.3 PDPA 실험결과

Figure 8에 노즐출구로부터 35 mm 떨어진 지점에서 압력에 따른 Sampling 개수인 Count를 나타내었다. 결과를 살펴보면 20,000 feet 무부하 조건인 1.5 kg/cm<sup>2</sup>에서는 최대 데이터 획득개수가 5,000 개 이하임을 확인 할 수 있다. 이는 미립화가 거의 진행되지 않아 액적으로 발달이 일어나지 않고 액주 형태로 분사되어 PDPA 프로세서에서 측정할 수 있는 액적의 개수가 적었기 때문에 나타난 결과라 할 수 있다. 반면에 지상에서 무부하 조건인 6.2 kg/cm<sup>2</sup>에서는 최대 30,000 개까지 측정 되고 있음을 확인 할 수 있다. 이는 PDPA에서 측정할 수 없던 액주형태에서 측정이 가능한 액적형태로 발달되어 획득된 데이터가 많아졌다는 것을 의미한다. 또한 20,000 feet에서 통합부하인 11.5 kg/cm<sup>2</sup>에서는 분무노즐 중심부에서 획득 데이터의 개수가 적

어지기 시작하여 32 kg/cm<sup>2</sup>에서는 확연하게 줄어든 것을 나타낸다. 이는 압력식 스웰인젝터의 큰 특징 중 하나인 중공(Hollow cone) 형태의 분무가 나타남을 보여주는 결과이다.

20,000 feet 무부하 조건인 공급압력 1.5 kg/cm<sup>2</sup>에서의 SMD 분포를 Fig. 9에 나타내었다. SMD는 최대 110 μm 정도 까지 나타나며 노즐 중심부에서 SMD가 크게 나타난 결과를 보인다. 일반적으로 안정한 화염이 유지되기 위해서는 SMD가 가급적 작은 것이 유리하게 작용하는데 20,000 feet 무부하 조건에서는 SMD가 100 μm 이상의 큰 입자가 측정되어 이 조건에서 화염이 불안정하게 나타날 가능성이 있다.

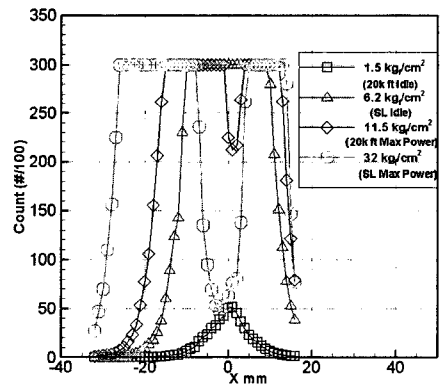


Fig. 8 PDPA Data Count at X = 35 mm

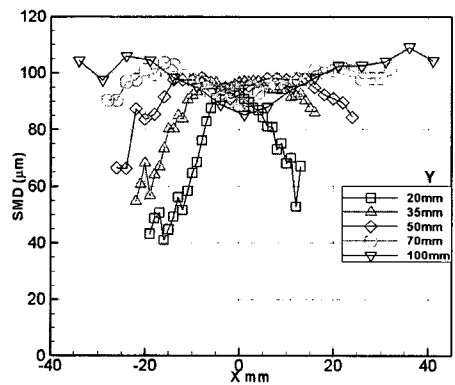


Fig. 9 SMD distribution at ΔP=1.5 kg/cm<sup>2</sup>

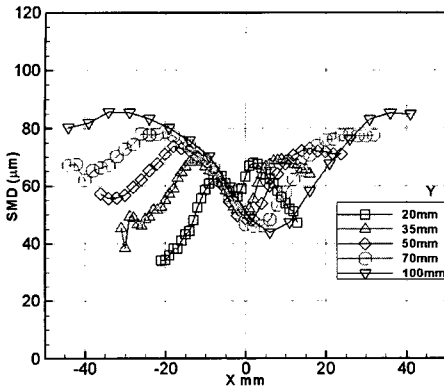


Fig. 10 SMD distribution at  $\Delta P=6.2 \text{ kg/cm}^2$

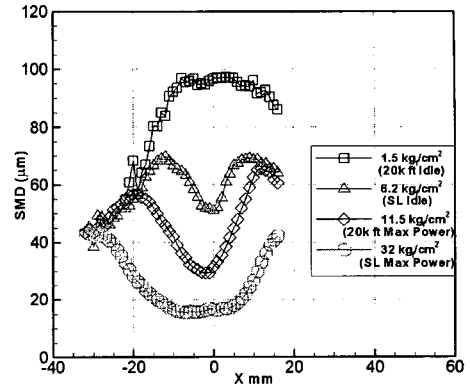


Fig. 11 SMD distribution at  $X = 35 \text{ mm}$

지상에서 무부하 조건인 공급압력  $6.2 \text{ kg/cm}^2$ 에서의 SMD 분포를 Fig. 10에 나타내었다. 노즐 출구에서 멀어질수록 주 분무 영역에서의 SMD가 커지는 경향을 나타내며 최대 SMD는 노즐 출구에서 100 mm 떨어진 지점에서  $85 \mu\text{m}$ 로 나타나고 있음을 확인 할 수 있다.

화염이 주로 생성될 것으로 보이는 노즐 출구로부터 35 mm 떨어진 지점에서의 SMD 측정 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 결과를 살펴보면 20,000 feet 무부하 조건인  $1.5 \text{ kg/cm}^2$ 에서의 SMD는 최대  $100 \mu\text{m}$  정도로 나타났으며 노즐 중심부에서 SMD가 크게 나타나고 있다. 이는 가시화에서도 나타났지만 분사압력이 너무 작아 분무가 잘 발달되지 않아 미립화가 충분히 일어나지 않았기 때문이라고 생각된다. 반면에 나머지 조건 즉, 지상에서의 무부하, 20,000 feet 통합부하, 무부하 조건인 압력  $6.2 \text{ kg/cm}^2$ ,  $11.5 \text{ kg/cm}^2$ ,  $32 \text{ kg/cm}^2$ 에서는 압력이 증가함에 따라 SMD가 감소하고 있음을 확인 할 수 있고 SMD 분포 또한 중심부에서는 작아지는 형태를 나타내고 있다. 특히 최대압력인  $32 \text{ kg/cm}^2$ 에서는 SMD가  $45 \mu\text{m}$  이하로 작아져 미립화가 잘 되고 있음을 확인 할 수 있다.

분사기의 길이 방향의 SMD를 알기 위해 노즐 출구에서 압력에 따른 최대 Volume flux에서의 SMD를 Fig. 12에 나타내었다. 노즐 출구로부터 20 mm 떨어진 지점에서는 압력이 증가함에 따라 SMD가 감소된 경향을 나타낸다. 또한 노즐 출구로부터 거리가 멀어질수록 SMD는 감소되는데 이는 미립화가 계속적으로 진행되었기 때문이다. 하지만 지상에서 통합부하 조건인 공급압력 32에서는 노즐 끝단으로부터 35 mm 떨어진 지점까지 SMD가 감소되다가 거리가 멀어짐에 따라 증가하는 경향을 나타내는데 이는 충분히 미립화된 액적들이 주위기체와의 상대속도 차이에 의한 합착이 일어나 나타난 결과라 생각된다.

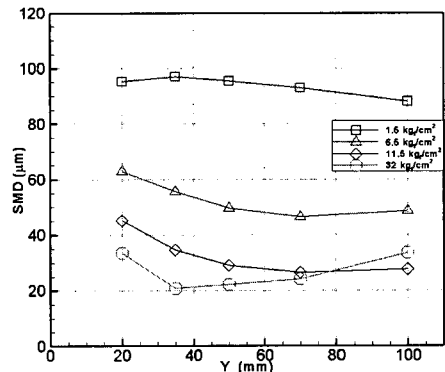


Fig. 12 SMD distribution at max volume flux

PDPA시스템으로 측정된 속도 분포를 Fig. 13~14에 나타내었다. Fig. 15는 20,000 feet에서의 무부하 조건인 공급압력 1.5 kg/cm<sup>2</sup>에서의 속도 분포로 노즐출구로부터 거리가 멀어질수록 속도는 감소하며 최대속도는 10 m/s 이내로 속도가 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 하지만 Fig. 16에 나타난 지상에서 무부하 조건인 공급압력 6.2 kg/cm<sup>2</sup>에서의 속도분포는 최대속도가 20 m/s까지 증가하고 있음을 알 수 있고 전체적으로 공급압력 1.5 kg/cm<sup>2</sup>에서보다 속도가 증가하였음을 알 수 있다.

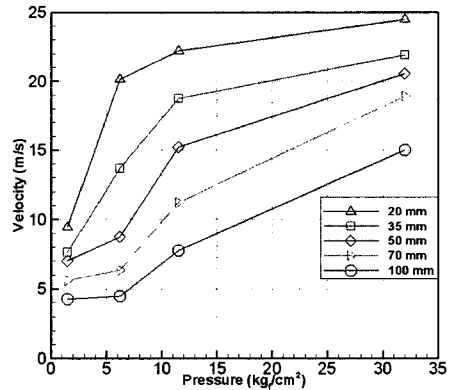


Fig. 15 Velocity distribution at max vol. flux

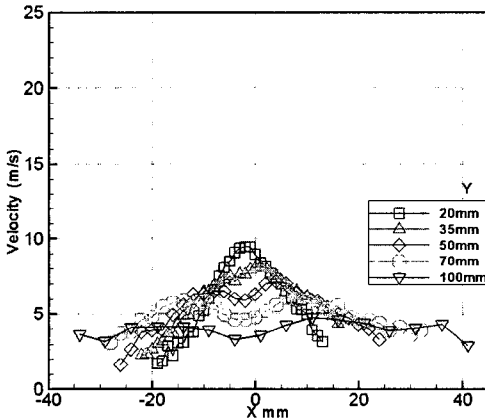


Fig. 13 Velocity distribution at ΔP=1.5 kg/cm<sup>2</sup>

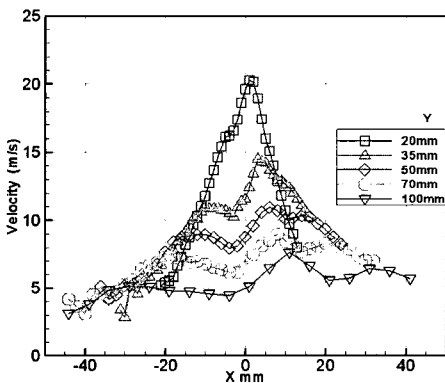


Fig. 14 Velocity distribution at ΔP=6.2 kg/cm<sup>2</sup>

주분무영역에서의 속도분포를 Fig. 15에 나타내었다. 20,000 feet 무부하 조건에서의 공급압력 1.5 kg/cm<sup>2</sup>에서는 속도분포가 4~9 m/s 정도로 나타났고 지상에서의 통합부하 조건인 공급압력 32 kg/cm<sup>2</sup>에서는 노즐출구에서 거리에 따라 15~24 m/s의 속도분포를 나타냄을 알 수 있었다.

액체의 분열 현상에 영향을 주는 변수로는 액주의 분출속도 뿐만 아니라 물성치(밀도와 점도, 표면장력) 및 노즐오리피스의 직경 등이 있다. 이러한 변수들에 대한 연구는 차원 해석적 관점에서 많이 다루어 졌는데 주로 사용된 무차원 수로는 웨버 수(Weber number)와 레이놀즈 수(Reynolds number)가 있다. 특히 웨버 수와 레이놀즈 수가 조합된 Ohnesorge 수가 액주의 미립화 해석에 많이 사용된다.[6] 실험결과를 통해 도출해낸 Ohnesorge 수는 0.006 정도로 나타났으며 Re 수는 20,000 ft 무부하 조건은 3500, 지상에서 무부하 조건은 7600, 20,000 ft 통합부하 조건은 8400, 지상 통합부하 조건은 9300 정도로 나타난다. 결과를 Ohnesorge 도표에 대입해 보면 크게 비대칭 형태의 파동이 분열되는 2 영역과 노즐출구에서 미립화가 진행되는 3영역 조건으로 나타나는데 20,000 ft 무부하 조건은 2 영역 내에 있어 사인곡선형 파동이나 꼬이는 형태의 비대칭 파동이 나타나게 되며 크고 작은 액적들이 공존하게 된다. 지상 및 20,000 ft 통합부

하, 지상에서 무부하 조건은 3 영역에 포함되어 있으며 노즐 출구 가까운 곳에서부터 미세한 액적으로 미립화되는 것으로 나타났다. 따라서 분사기는 두 가지 형태의 분무특성이 나타나는 것으로 보이며 Re 수가 낮은 20,000 ft 무부하 조건의 분무특성이 엔진의 연소불안정을 유발할 가능성이 있다고 판단된다.

#### 4. 결 론

가시화 및 PDPA실험을 통해 APU에 사용되는 압력 스웰식 연료노즐의 분무특성을 확인할 수 있었으며 그 결론은 다음과 같다.

- 1) 가시화를 통하여 압력이 증가함에 따라서 분무각 또한 증가하며 최대 분무각은 52°로 나타났다.
- 2) 분무입자의 크기는 분사기의 공급압력이 높을수록 작아지며, 입자의 크기는 노즐 출구속도에 직접적인 상관관계가 있음을 알 수 있었다.
- 3) 20,000 ft 무부하 조건에서 SMD는 최대 110 $\mu$ m 정도로 나타났고, 분무각은 20°로 매우 좁아 이 조건에서 분무특성을 개선하는 것이 필요하다고 판단된다.
- 4) 분사기의 분무특성은 Re 수가 4000 이하인 비대칭 형태의 파동이 분열되는 영역과 Re 수가 7600~9300 인 노즐 출구에서 미립화가 진행되는 두 가지 분무형태를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 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", 한국항공우주학회지, 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
6. 이상용, "액체의 미립화", 민음사, 1996, pp.51-53