

항공기 작동조건에 따른 압력식 스월 인젝터의 분무특성 연구

최 채 흥*, 최 성 만**, 이 동 호***

Spray Characteristics of the Pressure Swirl Injector at Airplane Operating Conditions

Cheahong Choi* , Seongman Choi** , Dongho Rhee***

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

Abstract

Spray characteristics of the APU simplex fuel nozzle are investigated. 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. Droplet size and velocity were measured by using PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) system. From the test result, SMD is $100 \mu m$ and velocity is 10 m/s at 20,000 ft idle condition. In this condition, flame instability could be occurred due to the higher drop diameter. Therefore it is necessary to decrease the droplet diameter in the high altitude condition.

1. 서론

가스터빈 엔진 중 100kW급 소형 엔진은 주로 항공기의 시동 및 전기발생, 추기공기(Bleed Air)공급 등 항공기의 생존에 중요한 역할을 담당하고 있다.[1]

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. 위의 엔진들은 모두 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 항공용으로 적용된 경우가 없어 항공용으로 적용하기 위해서는 다양한 비행 및 고도조건에서의 연구를 통해 안정성이 검증되어야 할 필요가 있다.

본 연구는 액체연료를 사용하는 항공기용 100kW급 소형 가스터빈의 연소안정성을 파악하기 위하여 다양한 고도조건에서의

연료량 변화에 따른 분무특성을 측정하고자 한다. 분무입자의 크기 및 속도는 PDPA를 이용하여 측정하고자 하며 분무가시화를 통해 전반적인 분무형상을 이해하려고 한다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 연료노즐

Figure 1에 본 연구에 사용된 노즐을 나타내었다. 압력 스월식 연료노즐로 연료노즐 오리피스 직경은 0.38 mm이며, 2개의 점선형 유입구를 가지는 와류실과 필터로 구성되어 있다.



Fig. 1 Simplex injector

2.2 PDPA

입자의 크기와 속도를 측정하기 위하여 PDPA를 이용하였으며 실험장치는 Fig. 2와 같이 구성하였다. 실험장치는 크게 모의 연료인 물을 공급하는 물 공급부와 PDPA 측정부, DATA 처리부 등 세부부분으로 나뉘어져 있으며 분무액적의 크기와 속도는 도플러 효과에 의한 신호의 상대적 위상차와 주파수 크기를 이용해 계산된다.

* 전북대학교 항공우주공학과, iri3540@chonbuk.ac.kr

** 전북대학교 항공우주공학과, csman@chonbuk.ac.kr

*** 한국항공우주연구원,

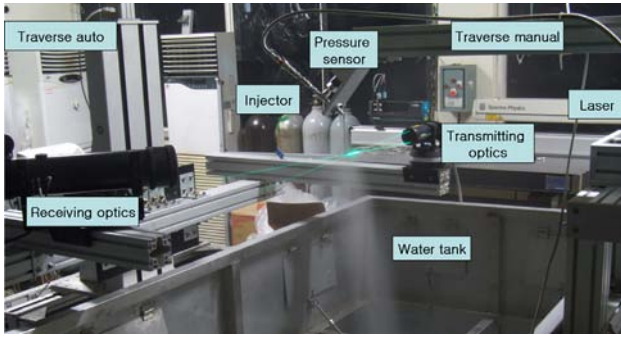


Fig. 2 PDPA system

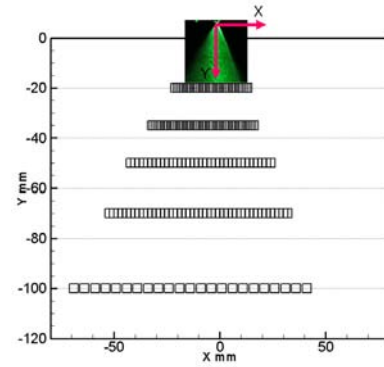


Fig 4. Measuring points of PDPA

2.3 가시화

연료노즐의 분무 가시화를 위하여 ND-YAG Laser를 광원으로 하였고 Focus Lens를 이용하여 Sheet beam을 형성하였다. 이때 노즐출구 중심을 지나는 레이저에 의해 분무단면을 관찰할 수 있으며 CCD카메라를 통해 이미지를 획득하였다.

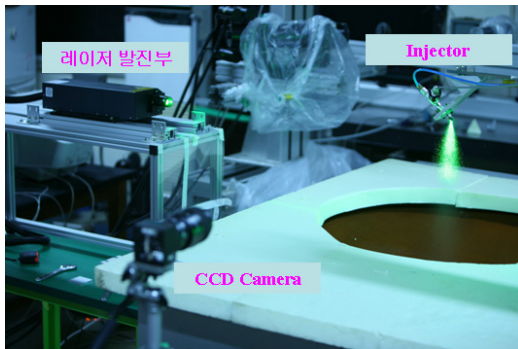


Fig 3. Spray Visualization

2.4 실험조건

분무실험을 수행하기 위하여 유체로 물을 사용하였으며 모든 실험은 상온, 대기압에서 이루어 졌다. 물 공급압력을 0.5 ~ 38 kg/cm²까지 변화해 가며 유량실험을 수행하였으며 분무 가시화는 공급압력을 0.5 kg/cm²에서 32 kg/cm²까지 변화시켜가며 수행하였다. PDPA 실험은 엔진운용조건에 따른 압력에서 실험 하였으며 설계점 해석을 통해 얻은 실험 조건은 Table 1에 나타나 있다. 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 30,000개로 제한하였고 최대 Sampling 시간은 20 초로 하여 데이터를 수집하였다.

Table 1. Test conditions

운용조건	연료유량(kg/h)	물유량(kg/h)
20,000feet, 무부하	2.98	3.33
SL, 무부하	5.53	6.18
20,000feet, 통합부하	7.42	8.29
SL, 통합부하	12.47	13.94

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유량

압력변화에 따른 유량은 Fig. 5에 나타나있다. 설계점 해석을 통해 구한 각 조건에서의 유량에 맞는 공급압력은 20,000 feet 무부하 조건에서는 1.5 kg/cm², SL 무부하 조건에서는 6.2 kg/cm², 20,000 feet 통합부하 조건에서는 11.5 kg/cm², SL 통합부하 조건에서는 32 kg/cm²로 나타났다.

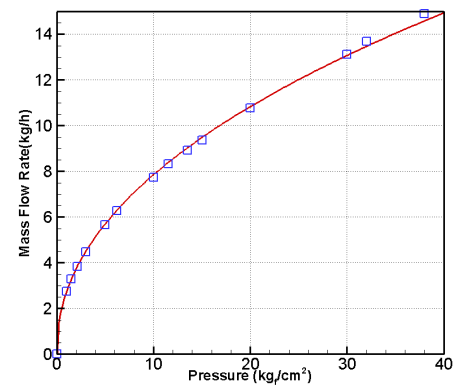


Fig. 5 Mass flow rate

3.2 가시화

공급압력을 0.5 kg/cm² 에서 32 kg/cm² 까지 변화시켜가며 가시화 실험을 한 결과가 Fig. 6에 나타나있다. 가시화 실험 결과를 살펴보면 2 kg/cm²이하의 공급압력에서는 분무가 발달되지 못하여 큰 형태의 분무가 형성되지 않으며 물방울 형태로 떨어지고 있음을 확인 할 수 있다. 하지만 압력이 증가함에 따라 3 ~ 6 kg/cm²에서는 점차 분무가 발달되어 콘형태의 분무가 나타나고 있으며 10 kg/cm²이상에서는 완전하게 발달된 분무를 보이고 있음을 확인 할 수 있다. 또한 20 kg/cm²이상에서는 안정된 형태의 분무를 형성하며 미립화가 잘 일어남을 알 수 있었다. 이러한 가시화를 통해 얻은 이미지를 토대로 분무각을 측정 하였으며 그 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 압력이 증가할수록 분무각은 계속 증가하다가 25 kg/cm²이상에서 이르러 증가폭이 둔화됨을 확인 할 수 있으며 이때의 분무각은 52°로 나타났다.

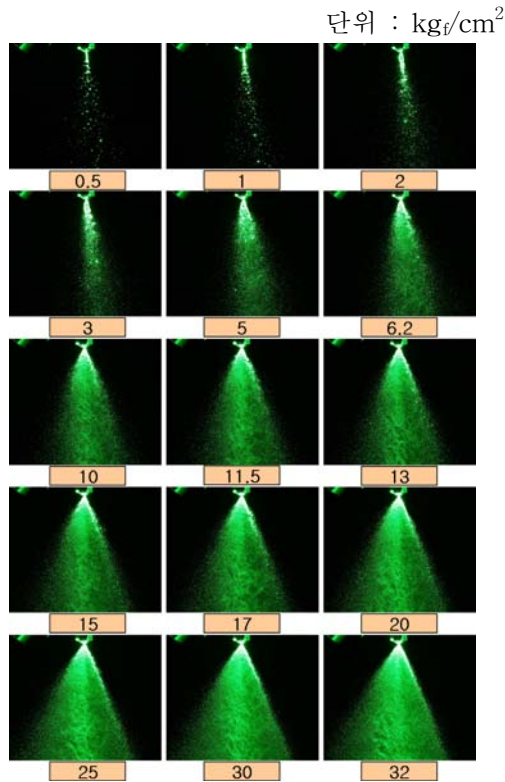


Fig. 6 Photographs of fuel spray

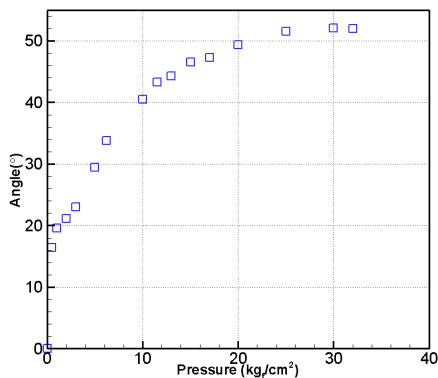


Fig. 7 Spray angle

3.3 PDPA 실험결과

화염이 주로 생성될 것으로 보이는 노즐 출구로부터 35 mm 떨어진 지점에서의 SMD 측정 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 결과를 살펴보면 20,000 feet 무부하 조건인 $1.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 에서의 SMD는 최대 $100 \mu\text{m}$ 정도로 나타났으며 노즐중심부에서 SMD가 크게 나타나고 있다. 이는 가시화에서도 나타났지만 매우 작은 분사압력에 의해 분무가 잘 발달되지 않아 미립화가 충분히 일어나지 않았기 때문이라고 생각된다. 반면에 나머지 조건 즉, 지상에서의 무부하, 20,000 feet 통합부하, 무부하 조건인 압력 $6.2 \text{ kg}/\text{cm}^2$, $11.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$, $32 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 에서는 압력이 증가함에 따라 SMD가 감소하고 있음을 확인 할 수 있고 SMD 분포 또한 중심부에서는 작아지는 형태를 나타내고 있다. 특히 최대압력인 $32 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 에서는 SMD가 $45 \mu\text{m}$ 이하로 작아져 미립화가 잘 되고 있음을 확인 할 수 있다.

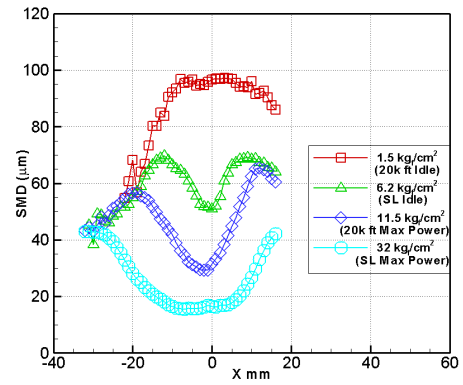


Fig. 8 SMD distribution at X = 35 mm

Figure 9에 35 mm 지점에서의 압력에 따른 Volume flux를 나타내었으며 Fig. 10에 Number concentration을 나타내었다. Volume flux는 단위 면적에서의 집중도를 나타내는 것으로써 압력이 작을수록 분무각 또한 작아 단위 면적에서 밀도가 높기 때문에 압력이 작을수록 Volume flux 또한 크게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 Number concentration은 단위체적당 액적의 개수를 나타내는 것으로써 미립화 정도를 확인할 수 있다. Fig. 9와 Fig. 10을 비교하여 보면 압력이 증가 할수록 Volume flux는 감소하는데 비해 Number concentration은 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 압력이 증가함에 따라 미립화가 잘 일어나게 되어 나타나는 현상이라 할 수 있다.

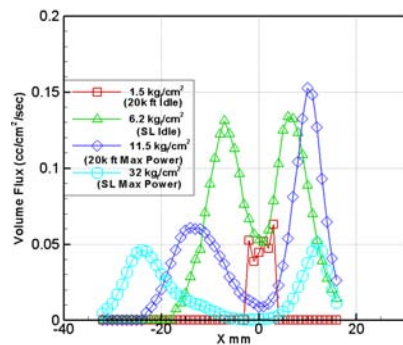


Fig. 9 Volume flux distribution under four fuel supply conditions at X = 35 mm

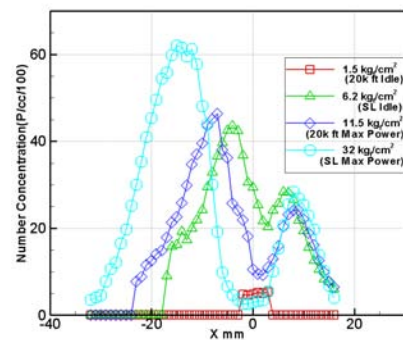


Fig. 10 Number concentration distribution under four fuel supply conditions at X = 35 mm

분사기의 길이 방향의 SMD를 알기위해 노즐출구에서 압력에 따른 최대 Volume flux에서의 SMD를 Fig. 11에 나타내었다. 노즐출구로부터 20 mm 떨어진 지점에서는 압력이 증가함에 따라서 SMD가 감소된 경향을 나타낸다. 하지만 노즐 출구로부터의 거리가 증가함에 따라서 이러한 경향은 사라지기 시작하여 노즐출구로부터의 거리가 100 mm 지점에 이르러서는 지상에서의 무부하 조건인 공급압력 6.2 kg/cm² 일때의 SMD가 가장 작게 나타나고 있다. 이는 20,000 feet 통합부하와 SL 통합부하 조건의 경우 충분히 미립화된 입자들이 주위기체와의 속도차이에 의해 합착이 일어났기 때문으로 판단된다.

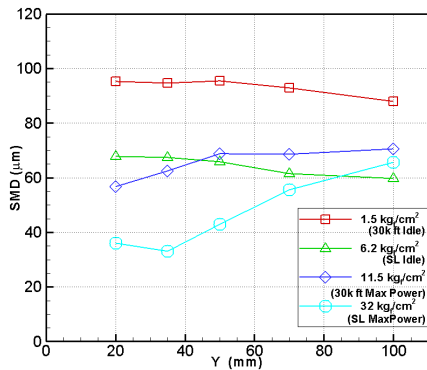


Fig. 11 SMD distribution at max volume flux

주분무영역에서의 속도분포를 Fig. 12에 나타내었다. 20,000 feet 무부하 조건에서의 공급압력 1.5 kg/cm²에서는 속도분포가 4~9 m/s 정도로 나타났고 지상에서의 통합부하 조건인 공급압력 32 kg/cm²에서는 노즐출구에서 거리에 따라서 15~24 m/s의 속도 분포를 나타냄을 알 수 있었다.

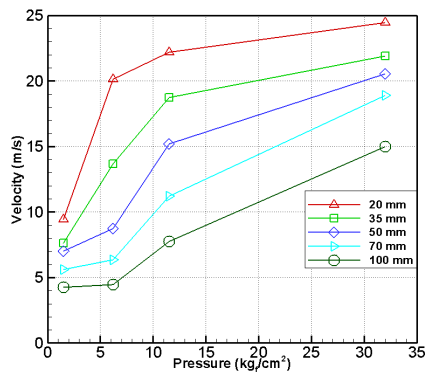


Fig. 12 Velocity distribution at max vol. flux

초기 속도 성분이 분무의 미립화에 미치는 영향에 대해 알아보기 위해 노즐 출구 20 mm에서 측정된 속도와 하류위치에서의 SMD와의 관계를 Fig. 13에 나타내었다. 결과를 보면 모든 위치에서 노즐 출구의 속도가 증가함에 따라, 즉 분무압력이 증가할수록 입자의 크기는 감소함을 알 수 있다. 노즐 출구에서의 입자 속도가 약 20 m/s 이상이 되면 노즐 끝단으로부터 50 mm 이상의 위치에서는 속도가 증가하여도 입자의 크기가 오히려 증가하는 경향이 일부 나타난다. 이것은 주위기체와의 상대속도 차이에 의한 합착이 일어난 결과로 판단된다.

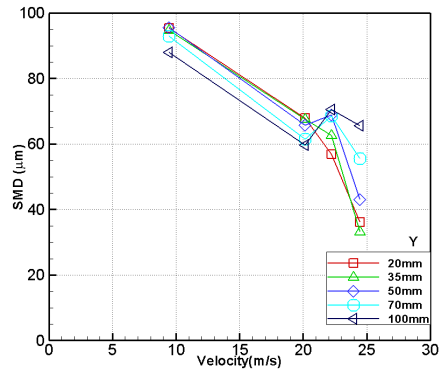


Fig. 13 SMD distribution for velocity at 20 mm from nozzle tip

4. 결론

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

- 1) 가시화를 통하여 압력이 증가함에 따라서 분무가 발달되어 분무각 또한 증가하며 최대 분무각은 32 kg/cm²에서 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 100μm 정도로 나타났고, 분무각은 20°로 매우 좁아 이 조건에서 분무특성을 개선하는 것이 필요하다고 판단된다.

후 기

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

참고문헌

- [1] 이동훈, 이강엽, 전승배, 양수석, 고영성, 최성만, "지상용 가스터빈 주동력장치(PPU) 연소기의 개발과 시험평가," 한국항공우주공학회지, 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.