

연료 종류에 따른 이중 오리피스 노즐의 분무 특성 연구 A Spray Characteristics of Dual Orifice Injector with Different Fuel Properties

이 동 훈*, 최 성 만*, 박 정 배**
D. H. Lee, S. M. Choi, J. B. Park

ABSTRACT

The effects of fuel density and fuel viscosity on spray characteristics were investigated under two different gas turbine fuels and various fuel supply pressure conditions through measurement of SMD, number density and volume flux by using PDPA system in dual orifice injector for gas turbine engines. In this study, we found out that the droplet size and spray structure are strongly depend on fuel density for dual orifice injector. The spray characteristics of high density fuel in dual orifice injector are similar with the characteristics of low density fuel in single orifice injector. The shear region between primary main fuel stream and secondary main fuel stream is examined in low density fuel condition but not exist in high density fuel condition, then this shear region is very important in quality of gas turbine spray. There are worth consideration for the effect of fuel density on spray characteristics in frontal device design to improve combustion efficiency.

주요기술용어 : Dual orifice injector(이중 오리피스 인젝터), PDPA(위상 도플러 입자 분석기), SMD(평균입경), Number density(수밀도), Volume flux(체적유)

1. 서론

가스터빈 엔진에 사용되는 연료 인젝터의 요구 조건은 첫째, 넓은 범위에서 좋은 미립화 성능을 보여야 하고, 둘째, 빠른 응답성과 분무에 필요한 에너지를 적게 소모하여야 하며, 셋째, 스케일링 및 재설계에 유연하여야 한다. 이에 부가적으로 저가격, 손쉬운 유지 보수 등이 요구된다⁽¹⁾.

이러한 가스터빈용 연료 인젝터의 성능 인자에는 분무 액적의 크기, 액적의 분포, 분무각 등이 있는데, 특히 분무 액적의 크기는 가스터빈용 연료 인젝터의 가장 중요한 분무 성능 인자 중의 하나이다. 따라서, 많은 연구자들이 분무에 미치는 여러 내, 외부 조건들 - 노즐의 종류 및 형태, 작동 유체의 압력 및 물성치, 주위기체의 압력 및 온도 등 - 이 분무 액적 크기에 미치는 영향을 연구해 왔다.

그 중에서도 작동 유체의 물성치 변화는 다양한 연료를 사용해야 하는 가스터빈용 연료

* 삼성테크윈 파워시스템연구소

** 국방과학연구소

인젝터에 미치는 영향이 다른 내연기관에 비해 매우 크다고 할 수 있는데, 사용 연료가 서로 다른 물성치를 가질 경우, 분무 액적 크기에 큰 영향을 미친다는 것이 여러 연구자들에 의해 연구되어져 왔다. 또한 사용되는 액체 연료의 물성치중에서도 연료의 점도가 표면장력이나 기타 다른 물성치보다 분무 액적 크기에 미치는 영향이 더 크다.⁽²⁷⁾⁽⁵⁾

액체 연료의 점도가 분무 액적 크기에 미치는 영향을 연구한 결과, pressure atomizer 타입의 연료노즐에서는 일반적으로 다음과 같은 관계가 성립한다고 알려져 있다⁽⁶⁾.

$$SMD \propto \mu_L^b \quad (1)$$

where, μ_L = fuel viscosity

상수 b의 값으로는 연구자들에 의해 차이가 있으나, 보통 0.06 ~ 0.21 사이의 값을 보이지만, 대체적으로 액체의 점도가 클수록 분무 액적의 크기는 커진다고 보고되고 있다.

그러나, 기존 연구들은 대부분 작동 유체의 점도 변화를 위해 물 또는 물과 글리세린의 혼합물을 주로 사용하여 엔진의 실제 작동 환경을 정확히 모사하지 못한 측면이 있었고, 측정 위치 또한 액적의 균일도를 고려한 특정 위치에서 측정하여 연료 점도 변화로 인한 전체 분무의 구조를 살펴보기에는 미흡하였다.

따라서, 본 연구에서는 실제 가스터빈 엔진에 사용되는 두 연료를 선정하여 서로 다른 물성치의 연료가 분무될 때의 분무 구조의 변화물 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)로 분무 전체 영역에서 측정하였다. 또한 두 연료간의 유동수(Flow Number)를 일치시키고, 연료노즐이 적용되는 엔진의 실제 운용 조건에 가까운 연료 공급 압력을 모사하였다. 이를 통해 실제 가스터빈 엔진에 사용되는 연료노즐에서의 사용 연료 변화로 인한 분무 특성의 차이를 비교해 보고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 연료 노즐

실험에 사용된 연료 노즐은 pressure-swirl

타입의 이중 오리피스 연료 노즐이다. Fig.1에 사용된 이중 오리피스 연료 노즐의 구조를 보였다. 연료 노즐은 파일럿과 메인 노즐로 이루어져 있으며, 파일럿 노즐의 오리피스 직경은 0.4mm, 메인 노즐의 오리피스 직경은 1.9mm이다. 초기 시동 시에는 파일럿 노즐만 작동하며, 연료공급압력이 8kg/cm²이상일 때 Flow Divider가 작동해 메인 노즐로 연료를 공급하는 구조로 이루어져 있다.

파일럿 노즐의 최대유량은 20kg/cm²에서 12 l/hr, 메인 노즐의 최대유량은 12kg/cm²에서 24 l/hr의 성능을 보인다.

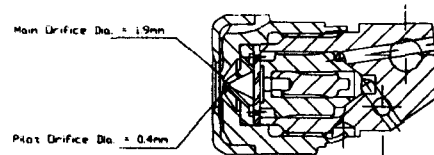


Fig. 1 Dual orifice injector

2.1.2 가시화 장치 및 PDPA

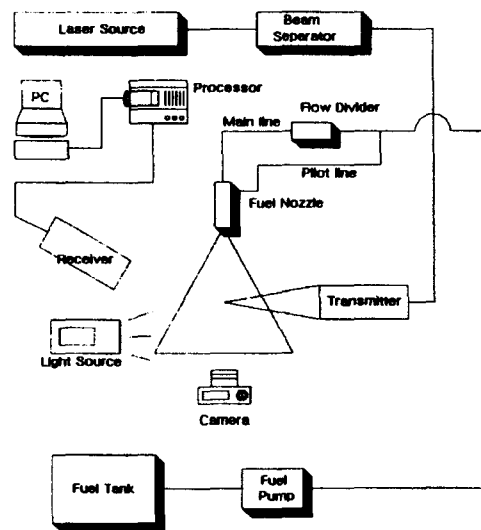


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

서로 상이한 연료 사용 조건에서의 분무 특성 차이를 살펴보기 위하여 분무를 가시화 하

는 방법과 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 사용하여 분무액적의 크기(SMD), 수밀도, 체적률을 측정하는 방법을 이용하여 전체 분무의 구조를 파악하였다.

가시화 장치로는 FUJIFILM S1 Pro 디지털 카메라를 사용하였으며, 광원으로는 8Hz의 백색 펄스광을 사용하였다.

분무특성을 정량화 하기 위하여 Aerometrics 사의 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 사용하였다. 레이저 광원으로 최대 출력 5W의 Ar-Ion레이저(Innova 70, Coherent)를 사용하여, 녹색광(514.5nm) 영역에서 1차원 측정이 이루어졌다. Fig.2에 실험에 사용된 장치들의 구성을 보였다.

2.2 실험조건

연료 분무는 스윌러를 통한 공기 공급이 없는 상태에서 연료 노즐에서 나온 연료분무로만 측정되었다. 연료는 JP계열의 두 연료를 사용하였다. 본 연구에서는 실험에 사용된 두 연료를 편의상 Fuel A, Fuel B라 명명하고, Table. 1에 두 연료의 물성치를 비교하였다. 연료가 분무되는 분위기는 10°C, 대기압 상태이다.

Table. 1 Properties of test fuels

properties	fuel A	fuel B
density(kg/m ³)@10°C	820	>>820
viscosity(10 ⁻⁴ m ² /sec)@10°C	1.975	4.1
freezing point(°C)	-46	-79
sulfur total mass(%)	max. 0.4	max. 0.4
heating value(MJ/kg)	42.6	42.1
flash point(°C)	min. 60	min. 54.4

가스터빈용 연료 노즐의 성능을 파악하기 위해서는 먼저 연료 노즐의 설계점에 부합되는 연료 공급 압력을 결정하여야 한다. 이를 위해 실험에 사용된 연료 노즐의 실제 운용 조건을 Table. 2와 같은 3단계로 설정하였다. 또한 실제 엔진에서의 필요 연료량과 일치하고, 연료 노즐의 유동수(Flow Number)를 고려하여 두

연료에 대한 연료 공급 압력을 결정하였다. Table. 2에 연료 종류와 운용 조건에 따른 연료공급 압력을 보였다. 밀도의 차이에 따른 연료공급 압력의 변화는 다음의 유동수(Flow Number)계산에 따른다.

$$FN = \frac{m_f}{\Delta P^{0.5} \rho^{0.5}} \quad (2)$$

Table. 2 Fuel supply pressure condition

Design point	fuel	pilot nozzle	main nozzle
		pressure (kg/cm ²)	pressure (kg/cm ²)
stage 1 (maneuver)	A	15.8	7.8
	B	13.5	5.5
stage 2 (max)	A	17.0	9.0
	B	14.5	6.5
stage 3 (design)	A	20.0	12.0
	B	17.0	9.0

2.3 실험방법

2.3.1 분무 가시화

분무 가시화를 통해 정성적인 분무의 질과 분무각을 파악하고자 하였다. 이를 위해 백색 펄스광원(DB plus 230 stroboscope)을 8Hz의 주파수로 분무장에 조사한 후, 디지털 카메라를 이용하여 가시화 하였다. 이 때 사용 렌즈는 Nikon AF nikkor 50mm, 셔터 스피드 1/90 초, 자동 노출의 조건이었다. 분무각은 노즐 출구에서 하류 방향으로 약 100mm지점까지의 전체 분무형상을 하나의 원추형으로 가정하여 꼭지각을 측정하는 방법으로 구하였다.

2.3.2 분무 특성 측정

연료 분무장의 구조를 파악하기 위하여 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 이용하여 분무입자의 크기, 수밀도, 체적율을 구하였다. PDPA 측정점은 전체 분무의 크기를 고려하여 노즐 출구에서 측방향으로 10, 20, 30, 40mm 지점에서 측정하였으며, 주로 30, 40mm 지점을 비교하였다. 이는 분무 초기에는 액막의 붕괴 및 액적으로의 발달이 덜 이루어진 상

때어서 정확한 분무 특성을 파악하기 어렵고, 40mm 이하의 하류영역에서는 분무액적끼리의 결합 및 액적의 증발, 외부 유동의 영향 등으로 분무 구조 파악에 오차를 가져올 수 있기 때문이다.

분무유동장의 반경방향 측정은 노즐 출구를 기준으로 2mm 간격으로 측정하였으며, 전체 분무 유동장이 축대칭이라는 가정에서 반대방향의 측정 간격은 4mm 이상으로 하였다.

3. 실험결과

3.1 분무 가시화 결과

가시화를 통한 분무 측정 결과, 압력과 연료 종류에 따른 분무의 질을 정성적으로 파악할 수 있었으며, 분무각 측정 등을 통해 전체 분무의 개략적인 구조를 파악하였다.

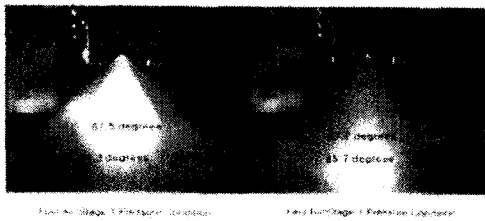


Fig. 3 Spray visualization at stage 1 pressure

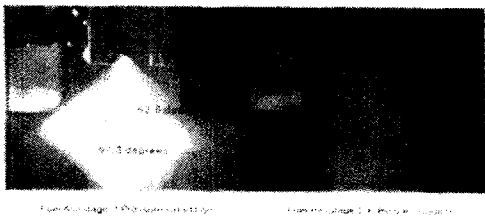


Fig. 4 Spray visualization at stage 2 pressure



Fig. 5 Spray visualization at stage 3 pressure

두 가지 연료조건에 대한 분무 가시화를 수

행하여 분무각을 이미지 내에 표시한 결과를 Fig. 3 ~ Fig. 5에 나타내었다.

가시화를 통해 정성적으로 분무 형태를 관찰한 결과, fuel A 조건이 pressure swirl injector의 특성을 보다 더 충실히 보여주고 있다. fuel B 조건보다 분무 전 영역에서 산란광이 고르게 나타나고 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 중공 원형 분무의 특성으로 인해 분무 바깥 표면에서 산란광이 많이 발생되었기 때문으로 보이며, fuel B의 조건은 분무 중심부의 산란광이 상대적으로 많아 분무 외곽에는 상대적으로 크고 적은 수의 액적이 존재하는 것으로 예측된다.

Table. 3 Spray angle comparison of different fuel type and pressure conditions

pressure condition	fuel type	pilot angle (deg.)	main angle (deg.)
stage 1 (maneuver)	A	61.5	94.3
	B	57.2	85.7
stage 2 (max)	A	63.6	97.3
	B	58.3	85.9
stage 3 (design)	A	65.0	98.0
	B	59.0	88.3

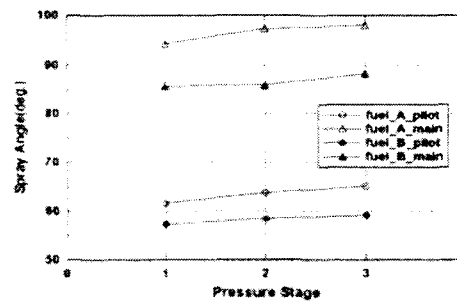


Fig. 6 Spray angle comparison of different fuel type and pressure conditions

Table. 3에 각 압력조건에 대한 두 연료조건에 대한 분무각을 표시하였다. 압력증가에 따라 분무각이 두 연료 모두 증가하는 경향을 보였으며, fuel A가 fuel B보다 분무각이 더 큼을 알 수 있다.

Fig. 6에 두 연료로 인한 파일럿 노즐과 메인 노즐의 분무각 차이를 도시하였다.

3.2 분무구조 측정 결과

분무 특성을 구체적이고 정량적으로 파악하기 위해서 PDPA를 사용하여 평균 입경(Sauter Mean Diameter, μm), 수밀도(number density, #/cc), 체적률(volume flux, $cc/cm^2/sec$)을 측정하였다.

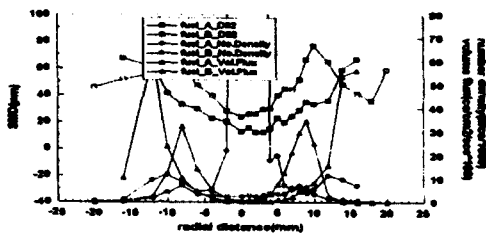


Fig. 7 Spray characteristics of fuel A/fuel B with stage 1 pressure at X=10mm

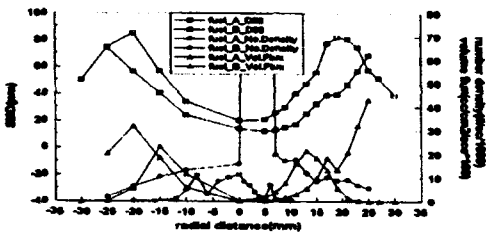


Fig. 8 Spray characteristics of fuel A/fuel B with stage 1 pressure at X=20mm

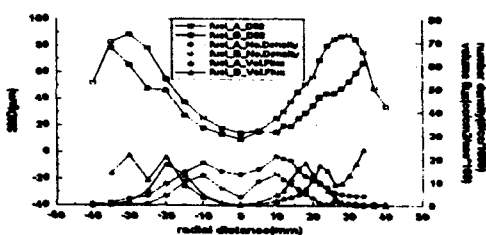


Fig. 9 Spray characteristics of fuel A/fuel B with stage 1 pressure at X=30mm

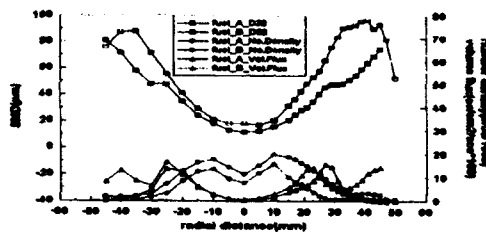


Fig. 10 Spray characteristics of fuel A/fuel B with stage 1 pressure at X=40mm

Fig. 7 ~ Fig. 10에 stage 1 압력 조건에 대한 측정결과를 측방향 거리에 따라 나타내었다.

stage 1 조건의 압력하에서의 두 연료의 분무특성을 살펴보면, 전 측정위치에서 fuel A가 fuel B보다 액적의 크기가 작음을 알 수 있다. 이러한 경향은 분무 중앙부보다 주 유동 영역과 분무 외곽영역에서 SMD 감소가 더 크게 일어나고 있음이 관찰된다. 이런 SMD 감소는 근본적으로 크게 두 가지의 원인에서 기인하는 것으로 볼 수 있다.

첫째, 밀도 차이로 인한 연료 공급 압력의 변화이다. fuel A 밀도는 fuel B 밀도의 87%에 불과해 두 연료가 연소기내에서 동일한 열에너지를 발생하기 위해서는 fuel A의 공급압력이 fuel B에 비해 약 17%이상 높아야 한다. 본 연구에서 사용한 pressure-swirl 타입의 연료 노즐에서는 연료의 공급압력이 분무의 질에 가장 큰 영향을 미친다고 알려져 있다. 따라서 실제 가스터빈 운용에서 밀도가 높은 연료의 사용은 연료노즐을 포함한 frontal device의 설계에 매우 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다.

둘째, 연료의 점성 차이가 SMD의 감소를 가져온 것으로 이해된다. Table. 2에서 볼 수 있듯이 fuel B는 fuel A에 비해 동일온도에서의 점성이 약 2배 이상인데, 이러한 높은 점성 때문에 분무 액막의 break up에 소요되는 에너지 또한 fuel A보다 클 것으로 판단된다. 점성이 큰 연료를 효과적으로 분무하기 위해서는 높은 aerodynamic force와 높은 연료공급압력이 필요한데, 오히려 fuel B의 연료공급압력이 더 낮음으로 인해 분무의 질이 악화된 것으로 평가할 수 있다.

PDPA측정을 함으로써 두 연료조건의 차이로 인한 분무구조의 변화를 명확히 살펴볼 수 있는데, 우선 가시화 결과에서와 마찬가지로 분무각의 차이가 뚜렷히 나타나고 있음을 알 수 있다. PDPA측정에서, 분무각은 연료분무가 가장 많이 지나가는 영역으로 간주될 수 있다. 연료가 가장 많이 지나가는, 즉 체적률이 가장 높게 나오는 영역을 비교해 보면, 전 측정위치에서 fuel A의 체적률의 최대값이 fuel B보다

축 중심에서 먼 곳에서 나오고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 fuel B보다 fuel A의 분무각이 크다는 결론을 내릴 수 있으며, 이는 가시화 결과에서도 확인할 수 있다.

위 결과에서 또 하나 주목할 만한 점은, SMD와 체적률의 관계에서 나타난 분무구조의 차이점이다.

fuel B 연료조건의 경우 분무 중앙부에서는 낮은 SMD와 높은 수밀도, 그리고 낮은 체적률이 나타나는데, 이는 fuel A와 크게 다르지 않다. 즉, 이러한 결과는 두 연료조건 모두 분무 중앙부에서는 많은 수의 작은 액적들이 정체되어 있다는 것을 의미한다. 이러한 분무의 거동은 반경방향으로 나갈 수록 액적 크기가 커지고 체적률은 높아지며, 수밀도는 작아지는데, 이는 주 유동영역에서는 비교적 큰 액적들이 높은 운동에너지와 함께, 빠르게 지나감을 의미한다. 이런 외곽 영역에서는 두 연료조건의 차이가 보다 분명히 나타나고 있다.

Fig. 9와 10을 보면, fuel A의 경우, 중앙의 낮은 체적률이 외곽으로 갈수록 증가하다가 최대값을 이룬 후, 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 또 일차 최대값을 이룬 직후, 다시 감소하여 최저값을 이룬 구간내의 SMD를 보면 증가하던 입경이 정체구간을 형성하고 다시 증가하는 패턴이 관찰되는데, 이는 노즐 팁에서 20mm 지점부터 명확히 나타나서 하류에 이르기까지 동일하게 나타나고 있다.

이러한 현상은 파일럿 노즐에서 분무된 주 유동이 일차 체적률 최대값을 기록하고, 메인 노즐에서 분무된 주 유동이 이차 체적률 최대값을 유발하는 것으로 판단된다. 또한 이러한 두개의 주 유동이 존재함으로써 인해 이 두 주 유동의 속도차이와 주위 정체영역으로 인해 전단영역(shear region)이 형성되어 이 구간에서의 체적률 감소와 SMD감소에 기여하는 것으로 파악된다. Fig. 9에서는 반경방향 22mm ~ 26mm사이, Fig. 10에서는 27mm ~ 34mm 영역에서 관찰된다. 이 구간에서의 SMD 분포를 보면 분무 중심부에서 증가하던 SMD가 정

체영역(stagnation region)을 이루는 구간이 이 체적률 감소 구간과 거의 완전히 일치하는 것을 알 수 있는데, 이러한 정체영역의 존재는 반경방향으로의 SMD증가를 상당부분 지연시키고 있음을 알 수 있다. 만약 이러한 정체 구간이 없다면, fuel B 연료 조건에서 나타난 것처럼 급격한 SMD 증가를 가져와 분무의 질을 악화시켰을 것이다.

이러한 이중 체적률 최대값과 정체영역의 존재는 이중 오리피스 연료노즐의 주된 특성으로 볼 수 있으며, 이러한 분무의 구조가 연료의 미립화 및 효과적인 연소에 기여한다고 볼 수 있다.

그러나, fuel B 연료 조건의 경우, 이러한 이중 오리피스 연료노즐의 특성을 살펴볼 수 없는데, 체적률의 경우, 하나의 최대값만 가지며 그 위치 또한 fuel A의 경우보다 중심부 쪽으로 치우쳐져 있다. 체적률이 최대값을 가지는 위치에서의 SMD 분포 또한 이중 오리피스 노즐의 특성을 보여주지 못한 채, SMD의 급격한 증가를 보이고 있다. 이러한 분무구조는 결국 분무외곽에서의 높은 SMD를 가져오게 되는데, Fig. 10을 보면, 반경방향 20mm 이후부터 급격한 SMD 증가와 체적률 및 수밀도의 감소를 보이고 있다. 이는 결국 적은 수의 큰 액적들이 큰 모멘텀을 가진 채로 분무 외곽으로 튀어나감을 의미한다. 따라서 이러한 분무 구조는 중심부를 제외하면 실제 연소에는 매우 불리한 분무 조건의 형성을 의미한다고 볼 수 있다.

fuel B 연료 조건의 이러한 분무 구조는 fuel A 연료 조건과는 매우 상이한 것으로 분무의 거동이 이중 오리피스 연료노즐의 특성을 보여주지 못하는 단일 오리피스 pressure swirl 연료노즐처럼 거동한다고 볼 수 있다. pressure swirl 노즐의 분무기구가 초기 액막의 형성, ligament로의 발달, 미세 액적으로의 균열 과정을 거친다는 것을 전제로 할 때 fuel A 연료조건의 경우, 이중 오리피스로 인해 분무 초기 액막 형성이 이중으로 형성되고 있음을 액적 크기, 수밀도, 체적률의 관계로 알 수 있지만, fuel B 연료조건의 경우, 이중의 액막 형성이 아닌 단일 액막으로 인한 분무 거동을 보여주

고 있다는 점이다.

이러한 분무 구조의 차이를 보이는 수 원인은, 연료의 점도 차이로 인한 연료노즐의 swirl chamber 내부에서 시작하는 초기 break up model이 서로 상이하기 때문이라고 추측된다.

또한 이런 분무 구조를 극복하기 위해서는 fuel B 연료조건에서 더 높은 연료공급압력이 요구되는데, 설계점에서 요구하는 연료의 질량 유량과 일치시키기 위해 연료공급압력을 오히려 낮춤으로 인해 분무구조를 더욱 더 악화시킨 것으로 생각된다.

연료공급압력을 높이면, 연료 조건에 따른 분무 구조에 또 다른 변화가 생기는데, stage 2와 stage 3 조건에 대한 두 연료의 비교결과를 살펴보자.

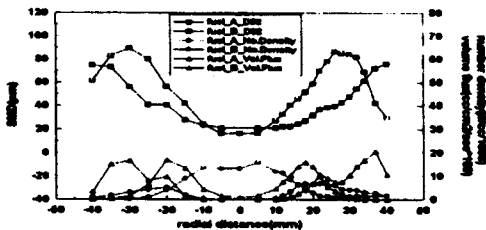


Fig. 11 Spray characteristics of fuel A/fuel B with stage 2 pressure at X=30mm

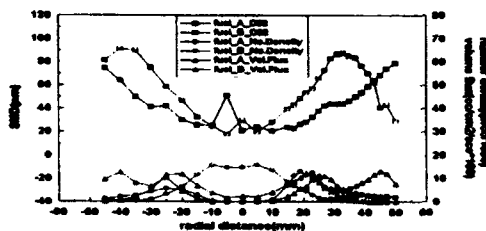


Fig. 12 Spray characteristics of fuel A/fuel B with stage 2 pressure at X=40mm

Fig. 11 ~ 12에 stage 2 조건일 때 X=30, 40mm의 결과를, Fig. 13 ~ 14에 stage 3 조건일 때 X=30, 40mm의 결과를 보였다.

Fig. 11 ~ 12는 stage 2 조건일 때의 두 연료에 대한 분무 특성을 비교한 것이다. 위 결과를 보면, stage 1조건에서 나온 두 연료간의 분무 특성이 그대로 나타나고 있음을 볼 수 있는데, 특히 분무 외곽에서 체적률과 SMD간의 관계는 압력을 높여도 그대로 재현되고 있음을

알 수 있다.

그러나, 분무 중앙부를 보면 압력이 낮을 경우와 비교해서 다른 결과를 보이는데, 중심부에서는 국부적으로 fuel B의 SMD가 fuel A의 경우보다 더 낮게 나오고 있다. 또한 중심부에서 수밀도의 분포를 살펴보면, 두 연료조건이 완전히 다른 경향을 보이고 있다.

fuel B의 경우, 분무 중심부에서 상대적으로 매우 높은 수밀도를 보이다가 분무 외곽으로 갈수록 급격히 감소하는 것에 비해 fuel A의 경우, 분무 중심부에는 거의 0에 가까운 수밀도를 보이다가 분무외곽으로 갈수록 수밀도가 비교적 고르게 분포하는 것이 관찰된다. 이러한 수밀도 분포의 차이를 보이는 것은, 압력이 높은 경우 분무의 중심부에서의 분무 구조가 연료조건에 따라 서로 바뀌었음을 나타내는 것이다.

즉, fuel B 연료 조건에서 중심부에서 반경방향 10mm 안의 좁은 영역에서 매우 작은 SMD 분포를 보이면서 동시에 높은 수밀도를 보이며 체적률이 낮다는 것은 작은 액적들이 좁은 영역 내에 정채되어 있다는 것을 의미한다. fuel A 연료 조건에서는 매우 작은 SMD 분포를 보이면서 수밀도와 체적률이 거의 0에 가까운데, 이는 분무 중심부에는 액적 자체가 거의 없는 분무 구조를 나타내는 것이다.

따라서, fuel A의 경우처럼, 분무 중심부에서 작은 액적들이 매우 적은 수로 존재하는 것은 pressure swirl 타입의 연료노즐의 특성 상, 분무가 중공원형으로 분사되기 때문이며, 중공원형 분무에서 흔히 나타나는 미세 액적의 중심부 정채 현상으로 풀이될 수 있다. 그러나 fuel B 연료조건에서의 중심부 분무 구조는 분무가 확산되지 못하고 미세 액적들이 매우 많이 나타나고 있는데, 이에 대한 원인으로는 주 유동 영역의 좁음, 즉, 분무각이 좁음으로 인해 작은 액적들이 분무 외곽으로 나가지 못하고 좁은 분무각 안에 갇혀있는 것으로 추정할 수 있고, 또 하나의 원인으로는 노즐 내부의 swirl chamber내에서 충분한 스월을 형성하여 액막이 넓게 형성이 되어야 하는데, 연료의 점성으로 인해 노즐 내부에서 액막 형성에 필요한 층

분한 스월이 형성되지 않았기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 13 ~ 14에서 보인 stage 3 조건에서의 측정 결과도 동일한 현상에서 기인한 것으로 보인다.

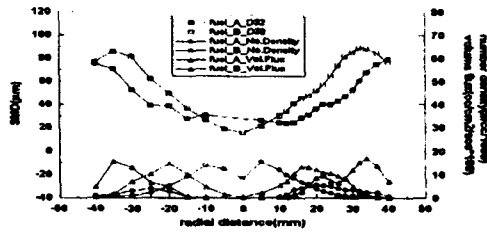


Fig. 13 Spray characteristics of fuel A/fuel B with stage 3 pressure at X=30mm

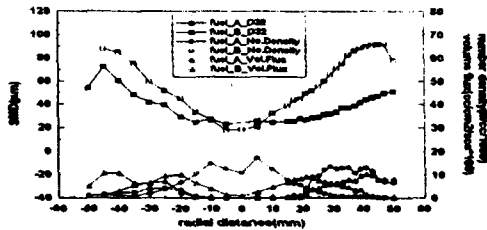


Fig. 14 Spray characteristics of fuel A/fuel B with stage 3 pressure at X=40mm

분무 가시화 결과에서 fuel B 연료 조건일 경우, fuel A 보다 중심부의 산란광이 상대적으로 밝은 것을 알 수 있는데, 이는 중심부에 많은 수의 액적이 정제되어 있는 PDPA 측정결과와 무관하지 않은 것으로 보인다. fuel A 연료 조건일 경우, 상대적으로 산란광이 고르게 분포되어 있는데, 이는 중공원형 분무의 특성으로 인해 분무의 바깥 표면에서 산란광이 많이 발생되었기 때문으로 보이며, fuel B는 분무의 좌에는 상대적으로 크고 적은 수의 액적이 존재해 분무 중심부의 산란광이 두드러져 보임을 알 수 있다.

4. 결론

서로 다른 연료조건에서의 분무 특성을 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 연료의 물성치가 틀릴 경우, 동일 조건에서 서로 다른 분무 특성을 보였으며, 특히 사용 연료의 점도가 분무 구조에 매우 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.
- 2) 이중 오리피스 연료 노즐의 연료 분무에서 점도가 높은 연료의 사용으로 인해, 액적으로 분열기구가 이중 오리피스 연료 노즐의 분무 특성과는 달리 단일 오리피스 연료 노즐의 분무 거동에 더 가까운 현상을 보였으며, 액적 크기에서 최대 100%의 차이를 보였다. 이러한 과도한 액적크기의 차이는 연소성능에 영향을 미칠 수 있다고 판단된다.
- 3) 이중 오리피스 연료 노즐에서 액막의 이중 형성으로 인한 전단영역(shear region)이 발생하고 이 영역이 반경방향에 따른 액적 크기의 상승을 방지하여 전체적으로 분무의 질을 향상시키고 있음을 알 수 있었다. 그러나 점도가 높은 연료의 경우 이러한 전단영역의 발생이 관찰되지 않았다.
- 4) 점도가 높은 fuel B를 사용했을 경우, 분무 중심부에서 연료공급압력이 증가함에 따라 수밀도가 증가하여 분무중심부의 구조를 변화시켰다. fuel A의 경우, 연료공급압력 증가에 따른 분무 특성의 큰 차이를 보이지 않으나, fuel B와 같은 고점도의 연료는 분무 구조 변화에 대한 연료 공급 압력의 임계점(critical pressure)이 존재한다고 추정할 수 있다.
- 5) 동일 형상의 이중 오리피스 연료노즐에서는 밀도 및 점도가 낮은 연료의 분무가 그렇지 않은 연료에 비해 가스터빈 연소에 더 효과적인 분무가 생성됨을 알 수 있었다. 또한 사용 연료가 다양한 가스터빈 엔진에서의 frontal device 설계에서 연료 운용 조건에 대한 고려가 충분히 반영되어야 함을 알 수 있다.

참고문헌

1. A. H. Lefebvre, "Gas Turbine Combustion", McGraw-Hill, 1983

2. Jasuja. A. K., "Atomization of Crude and Residual Fuel Oils", *ASME J. Eng. Power*, Vol. 101, No.2, 1979, pp 250-258
3. Radcliffe. A., "Fuel Injection", *High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion*, Vol. XI, Sect. D, Princeton University Press, Princeton, N.J., 1960
4. Dodge. L. G. and Biaglow, J. A., "Effect of Elevated Temperature and Pressure on Sprays from Simplex Swirl Atomizer", ASME paper 85-GT-58, 1985
5. 조한권, "액체의 점도와 분사압력이 액적크기 분포의 균일도에 미치는 영향", 석사학위 논문, 한국과학기술원, 1989
6. A. H. Lefebvre, "Atomization and Sprays", Hemisphere Publishing, 1989