

연료의 물성치 변화가 이중 오리피스 연료 노즐의 분무 구조에 미치는 영향에 관한 연구

이동훈* · 최성만* · 박정배**

A Effect of Fuel Properties on Spray Structure for Dual Orifice Fuel Injector

Dong-Hun Lee, Seong-Man Choi, Jeong-Bae Park

ABSTRACT

The spray characteristics of dual orifice injector were investigated under two different fuels through measurement of SMD, number density and volume flux by using PDPA system. In this experiment, we found out that the droplet size and spray structure are strongly depend on fuel density and viscosity.

Key Words : Dual Orifice Injector(이중 오리피스 인젝터), PDPA(위상 도플러 입자 분석기), SMD(Sauter 평균 입경), Number Density(수밀도), Volume Flux(체적률)

기 호 설 명

μ L dynamic viscosity of fuel
 m_f flow rate of fuel

ΔP fuel pressure differential
 ρ density of fuel

1. 서 론

가스터빈 엔진에 사용되는 연료 노즐의 요구 조건을 살펴보면, 첫째, 넓은 범위에서 좋은 미립화 성능을 보여야 하고, 둘째, 빠른 응답성과 분무에 필요한 에너지를 적게 소비하여야 하며, 셋째, 스케일링 및 재설계에 유연하여야 하는 점을 들 수 있다⁽¹⁾. 이런 가스터빈용 연료 노즐의 요구 조건 관점에서 볼 때, 이중 오리피스 연료 노

즐은 사용 유량 범위가 매우 넓고, 다른 형태의 연료노즐에 비해서도 미립화 성능이 우수하기 때문에 가스터빈 엔진에 폭넓게 사용되는 노즐 중의 하나이다.

이중 오리피스 노즐은 듀플렉스(duplex)형 노즐과 유사하나, 두 개의 연료유로에 하나의 스윙 챔버(swirl chamber)를 가지고 있는 듀플렉스 노즐과는 달리 두 개의 연료유로에 두 개의 스윙 챔버를 가지고 있다. 이러한 “nozzle within a nozzle” 구조는 두 개의 연료유로를 각각 독립적으로 운용할 수 있게 해 주며, 그 결과 넓은 유량범위에 대처할 수 있고, 분무각 등의 조절이 비교적 자유롭다. 또한 일차 분무와 이차 분무와의 충돌 효과로 인한 액적크기 감소 및 액적 분

* 삼성테크윈 파워시스템연구소

** 국방과학연구소

포 개선을 꾀하기도 한다⁽²⁾. 이와 같은 이중 오리피스 연료 노즐의 장점들은 가스터빈 엔진에서 요구하는 연료 운용 조건에 매우 적합하다고 할 수 있다.

그리고 가스터빈의 연료 운용 환경을 타 동력 기관과 비교해 볼 때, 연료의 변경이 매우 유연하다는 점, 즉, 다양한 연료를 사용할 수 있다는 것이 가스터빈의 장점 중의 하나인데, 이러한 사용 연료의 유연성이 가스터빈 연료 노즐에 미치는 영향은 다른 내연기관에 비해 매우 크다고 할 수 있다.

따라서, 연료의 물성치가 변할 경우, 연료를 무화시키기 위한 연료 노즐의 분무 특성에 대한 고찰이 반드시 뒤따라야 한다. 연료 노즐의 분무 특성은 연소기의 성능과 직결되며, 이는 곧 엔진 전체의 효율 및 추력, 배기가스 문제 등과 밀접한 관련이 있기 때문이다.

기존 연구 결과들에 의하면, 연료의 물성치중에서도 연료의 점도가 표면장력이나 기타 다른 물성치보다 분무 액적 크기 및 분포에 미치는 영향이 더 크다고 보고되고 있다⁽³⁾⁽⁵⁾.

따라서, 많은 연구자들이 연료의 점도 변화가 분무특성 변화에 미치는 영향에 대해 연구해 왔으며, 특히 분무 액적 크기에 미치는 영향을 중점적으로 고찰하였다. 그 결과, 압력 선회식 노즐에 대해서는 다음과 같은 관계가 성립한다고 알려져 있다⁽²⁾.

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

상수 b의 값으로는 연구자들에 따라 차이가 있으나 보통 0.06 ~ 0.3 사이의 값을 보이는데, 대체로 연료의 점도가 증가할수록 분무액적의 크기는 커진다고 보고하고 있다. 그러나, 기존의 연료 물성치 변화에 따른 분무 특성 변화는 주로 단일 압력 선회식 연료 노즐(simplex atomizer)에서 주로 이루어졌으며, 연료 물성치 변화에 대한 모사도 주로 물 또는 물과 글리세린의 혼합물을 주로 사용하여 엔진의 실제 작동환경을 정확히 재현하지 못한 단점이 있었다. 측정 방법 또한 액적 분포의 균일도를 고려한 연료 분무장의 특정 위치에서의 액적 크기 등을 비교하여 전체 분무의 구조를 살펴보기에는 미흡하였다.

최⁽⁶⁾ 등은 이중 오리피스 연료노즐과 선회 유동과의 상호작용으로 인한 분무 특성을 연구하였고, 배⁽⁷⁾ 등은 가스터빈용 이중 오리피스 연료노즐의 분무 특성을 자세히 고찰하였으나, 연료 분사 압력, 공연비 변화 등 기본 성능 인자의 연구에 중점을 두었다. 이⁽⁸⁾ 등은 연료의 점도와 분사압력이 액적 크기에 미치는 영향을 연구하였으나, 실제 엔진에 적용되는 연료를 정확히 모사하지는 못하였으며, 단일 압력 선회식 노즐의 분무 특성만을 고찰하였다.

압력 선회식 노즐의 분무 성능에 관한 연구도 지속적으로 이루어졌으나, 대부분 단일 압력 선회식 노즐(simplex atomizer)의 분무가 대부분이며 이중 오리피스 노즐의 분무 특성에 대한 연구는 그다지 많지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 실제 가스터빈 엔진에 사용되는 두 연료를 선정하여 서로 다른 물성치의 연료가 분무될 때의 분무 구조를 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 이용하여 파악하였다. 특히 두 연료의 물성치 중 연료의 점도가 분무 구조 및 분무 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 이를 위해 두 연료를 사용할 때의 유동수(flow number)를 일치시키고, 연료노즐이 적용되는 엔진의 실 운용 조건에 해당하는 연료 공급 압력을 설정하여 실제 엔진 운용 환경에서의 분무 특성 변화를 살펴보고자 하였다.

2. 실험장치

2.1 연료 노즐

실험에 사용된 연료 노즐은 pressure atomizer 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/cm² 이상일 때 Flow Divider가 작동해 메인 노즐로 연료를 공급하는 구조로 이루어져 있다.

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

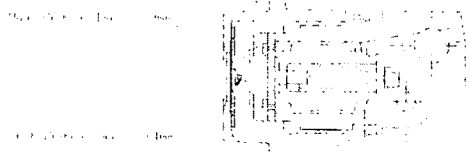


Fig. 1 Dual orifice injector

2.2 가시화 장치

분무 가시화는 분무각의 측정, 전체 분무의 정성적인 특성 파악을 위해 연료 노즐의 분무 연구

에서는 필수적인 방법이다. 레이저 평면광(sheet beam)을 이용하여 분무 단면을 촬영하거나, 형광 물질을 이용하여 가시화뿐만 아니라 액적분포 및 액막구조 등을 살펴보는 것이 일반적이거나, 본 연구에서는 펄스 백색광을 사용한 직접가시화를 시도하였다. 레이저를 사용하지 않은 직접사진법은 장치가 간단하고 적은 비용으로 단시간내에 분무 각 및 분무의 정성적인 질을 평가하기에 적합한 방법으로 최근 디지털카메라의 발전으로 인해 매우 효율적인 가시화 방법이 되고 있다.

가시화 장치로는 FUJIFILM S1 Pro 디지털 카메라(최대 610만 화소, Nikon AF nikkor 50mm 렌즈)를 사용하였으며, 광원으로는 스트로보 방식의 백색 펄스광(DB plus 230 stroboscope)을 사용하였다.

2.3 분무 액적 측정 장치

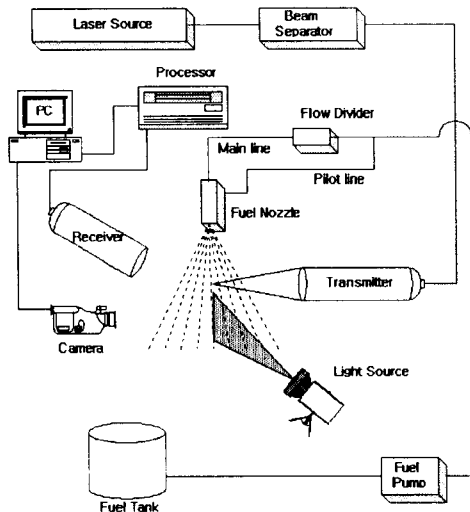


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

분무특성을 정확히 파악하고 분무특성에 따른 분무 액적의 크기 및 수밀도, 체적률과 같은 성능 인자들을 정량화 하기 위해서는 PDA(Phase Doppler Anemometry) 측정법이 필수적이다. PDA 측정법은 LDV 측정뿐만 아니라, 액적 크기를 측정할 수 있는 위상차 도플러 입자 측정기로 입사광선이 측정하고자 하는 입자를 통과하여 발생하는 도플러 산란광이 서로 다른 위치에서 보이는 위상차에서 입자크기에 관한 정보를 얻어 속도와 액적크기를 동시에 측정하는 장치이다.

이러한 위상차 도플러 측정을 위해 본 연구에서는 Aerometrics사의 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 사용하였다. 레이저 광원의

로 최대 출력 5W의 Ar-Ion레이저(Innova 70, Coherent)를 사용하여, 녹색광(514.5nm) 영역에서 1차원 측정이 이루어졌다.

3차원 이송장치(Unidex-11 traverse)를 사용하여 광학부를 이송하였으며, 이송장치의 공간적 해상도는 0.01mm이다.

Fig.2에 실험에 사용된 PDPA와 가시화 장치들의 구성을 보였다.

3. 실험 조건 및 실험 방법

3.1 실험 조건

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

Table. 2 Fuel supply pressure condition

Design point	fuel	pilot nozzle pressure (kg/cm ²)	main nozzle 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

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, 연료노즐의 유동

수(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.

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

3.2 실험 방법

3.2.1 분무 가시화 및 분무각 측정

직접 사진법을 이용한 분무의 가시화는 측정 장치의 단순함에도 불구하고 쉽고 빠른 결과를 얻는다는 장점이 있다. 본 연구에서는 분무유동장의 전면 1m 위치에 카메라를 위치시키고, 분무 유동상을 축으로 카메라와 90도 위치에 광원을 위치시켰다. 이러한 광원과 카메라의 90도 배치는 광원에 가까운 분무유동장의 산란광과 광원의 반대편 분무유동장의 산란광의 강도가 정확히 일치하지 않는 단점이 있으나, 광원이 충분히 밝을 경우, 가시화 이미지에서 나타나는 차이가 거의 없고, 외부 벽면에 나타나는 반사광, 카메라에 들어오는 교란광 등이 없기 때문에 직접 사진법에서는 매우 효율적인 배치가 된다. 백색 펄스광의 수파수는 8Hz로 설정하였다.

분무각을 얻어진 가시화 이미지를 바탕으로 노즐 출구에서 하류방향 약 100mm지점까지의 전체 분무형상을 하나의 원추형으로 가정하여 이 원추형을 도식한 다음, 꼭지각을 측정하는 방법을 사용하였다.

3.2.2 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 축방향으로 10, 20, 30, 40mm 지점에서 측정하였으며, 주로 30, 40mm 지점을 비교하였다. 이는 분무 초기에는 액막의 붕괴 및 액적으로서의 발달이 덜 이루어진 상태여서 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.

4. 실험 결과 및 토의

4.1 분무 가시화 및 분무각 측정 결과

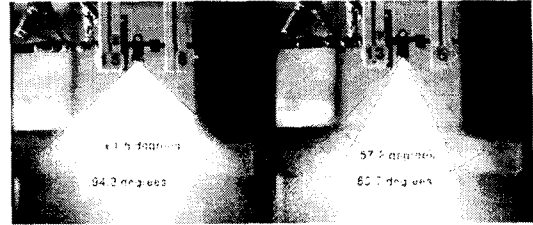


Fig. 3-A Spray visualization at stage 1 pressure

Fig. 3-B Spray visualization at stage 1 pressure

Fig. 3 Spray visualization at stage 1 pressure

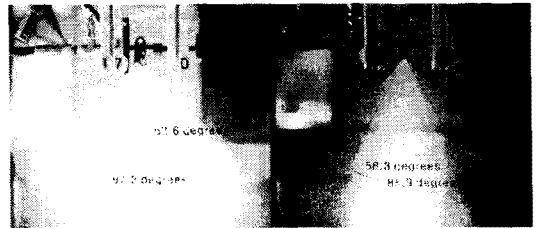


Fig. 4-A Spray visualization at stage 2 pressure

Fig. 4-B Spray visualization at stage 2 pressure

Fig. 4 Spray visualization at stage 2 pressure

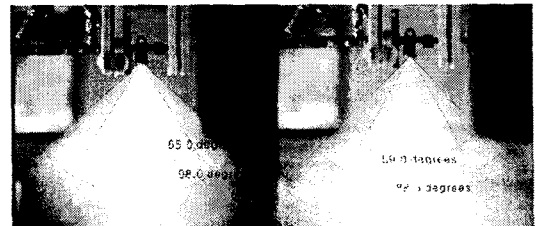


Fig. 5-A Spray visualization at stage 3 pressure

Fig. 5-B Spray visualization at stage 3 pressure

Fig. 5 Spray visualization at stage 3 pressure

가시화를 통한 분무 측정 결과, 압력과 연료 종류에 따른 분무 상태를 정성적으로 파악할 수 있었다. 또한 가시화 이미지를 통해 분무각을 비교함으로써 연료의 공급압력과 종류에 따른 전체 분무의 개략적인 구조를 파악하였다.

fuel A와 fuel B에 대한 분무가시화를 3가지 압력 조건에서 수행하여 Fig. 3~5에 보였다. 가시화를 통해 정성적으로 전체 분무 형상을 관찰한 결과, fuel A 조건이 이중 오리피스 노즐의 분무 특성을 보다 더 충실히 보여주고 있다.

fuel A조건이 fuel B조건보다 전 압력 조건에서 분무 전 영역의 산란광이 고르게 나타나고 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 중공원형 형태로 분사되는 압력 선회식 노즐의 분무 특성으로 인해 분

무 바깥 표면에서 산란광이 더 많이 발생하기 때문으로 보인다. 반면, fuel B의 경우, 분무 중심부의 산란광이 비교적 많아 분무 외곽에는 상대적으로 적은 수의 액적이 존재할 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

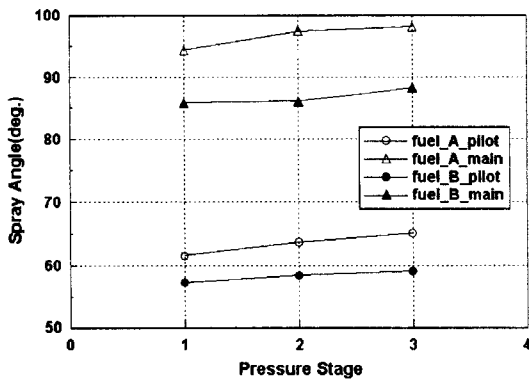


Fig. 6 Spray angle comparison of different fuel type and pressure conditions

Table. 3, Fig. 6에 두 연료종류, 세 압력 조건에 대한 가시화 결과에서 얻어진 분무각을 각각 표와 그래프로 표시하였다. 압력증가에 따라 분무각이 두 연료 모두 증가하는 경향을 보였으며, fuel A가 fuel B보다 분무각이 더 크음을 알 수 있었다.

또한, 연료 변경에 따른 분무각 변화가 파일릿 노즐보다는 메인 노즐의 분무각 변화에 더 큰 영향을 미치고 있음이 관찰되었다. 이는 flow divider로 인해 메인 노즐의 분무가 파일릿 노즐의 분무에 비해 상대적으로 분무 초기에 가깝고, 압력 선회식 노즐의 특성상, 분무 초기 단계에서는 연료공급압력 및 연료의 물성치가 분무각 및 분무의 질에 큰 영향을 미친다는 점을 고려할 때 타당한 현상으로 이해된다.

4.2 분무 특성 측정 결과

4.2.1 연료물성치 변화에 따른 분무 구조의 변화

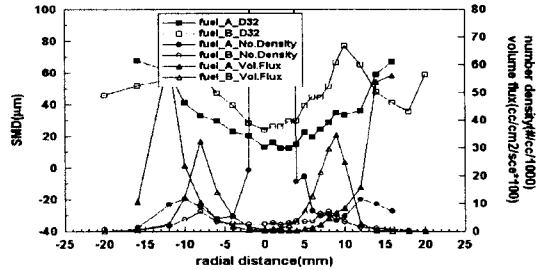


Fig. 7 Spray characteristics of fuel A/fuel B with stage 1 pressure at X=10mm

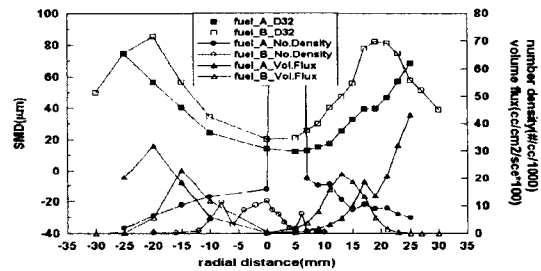


Fig. 8 Spray characteristics of fuel A/fuel B with stage 1 pressure at X=20mm

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. 7~10에 stage 1 압력 조건에 대한 측정결과를 측정방향 거리(X)에 따라 나타내었다.

stage 1 조건의 압력하에서의 두 연료의 분무 특성을 살펴보면, 전 측정위치에서 fuel A가 fuel B보다 액적의 크기가 작음을 알 수 있다. 이러한 경향은 분무 중앙부보다 주 유동 영역과 분무 외곽영역에서 SMD감소가 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 압력 선회식 타입의 연료 노즐에서는 연료의 공급압력이 분무의 질에 가장 큰 영향을 미친다고 알려져 있다. 따라서 실제 가스터빈 운용

에서 밀도가 높은 연료의 사용은 연료노즐을 포함한 frontal device의 설계에 매우 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다.

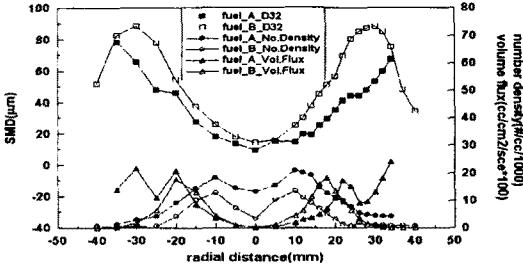


Fig. 9 Spray characteristics of fuel A/fuel B with stage 1 pressure at X=30mm

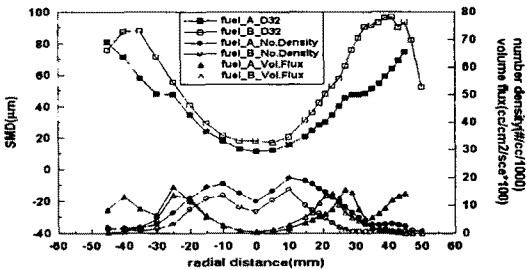


Fig. 10 Spray characteristics of fuel A/fuel B with stage 1 pressure at X=40mm

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 연료조건에 의한 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 연료조건에 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 반경 방향으로 나갈 수록 액적 크기가 커지고 체적률은 높아지며, 수밀도는 작아지는데, 이는 주 유동 영역에서는 비교적 큰 액적들이 높은 운동에너지를 가지고, 빠르게 지나감을 의미한다. 이런 외곽 영역에서는 두 연료조건에 차이가 보다 분명히 나타나고 있다.

Fig. 9와 10를 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 정체영역(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 조건에 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 튀어 나감을 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 압력 선회식 연료노즐처럼 거동한다고 볼 수 있다. 압력 선회식 연료노즐의 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 보여주고 있다는 점이다.

이러한 분무 구조의 차이를 보이는 주 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 질량유량과 일치시키기 위해 연료공급압력을 오히려 낮춤으로 인해 분무구조를 더욱 더 악화시킨 것으로 생각된다.

4.2.2 연료 공급 압력 변화에 따른 분무 구조의 변화

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

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

Fig. 11~12의 stage 2 조건일 때의 두 연료에 대한 분무 특성을 비교한 결과를 보면, stage 1 조건에서 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.

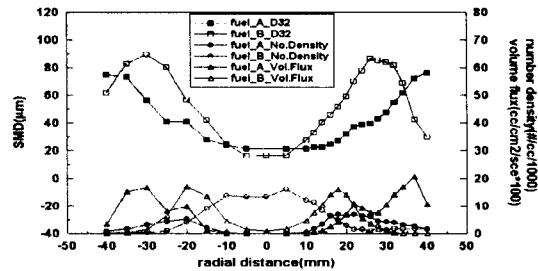


Fig. 11 Spray characteristics of fuel A/fuel B with stage 2 pressure at X=30mm

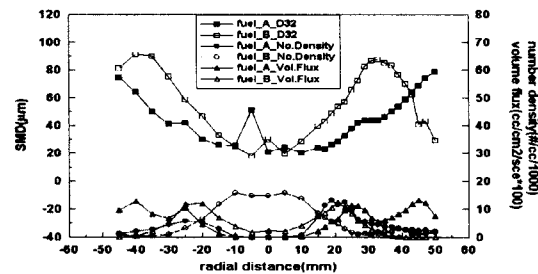


Fig. 12 Spray characteristics of fuel A/fuel B with stage 2 pressure at X=40mm

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 높을 경우 분무의 중심부에서의 분무 구조가 연료조건에 따라서 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 많이 정체되어 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 압력

선회식 타입의 연료노즐 특성 상, 분무가 중공원형으로 분사되기 때문이며, 중공원형 분무에서 흔히 나타나는 미세 액적의 중심부 정체 현상으로 풀이될 수 있다. 그러나 fuel B 연료조건의 중심부 분무 구조는 분무가 확산되지 못하고 미세 액적들이 매우 많이 나타나고 있는데, 이에 대한 원인으로서는, 이중 오리피스 노즐의 특성을 충실히 따르기 위해서는 내부의 swirl chamber 내에서 충분한 선회류를 형성하여 액막이 넓게 형성 되고, 분무 유동장의 선회방향 속도 성분이 강하여 분무장 전체가 중공원형 형태를 보여야 하나, 연료의 점성으로 인해 노즐 내부에서 액막 형성에 필요한 충분한 스웰이 형성되지 않았기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 선회류 형성의 부족으로 인해 상대적으로 작은 액적들이 유동의 축방향 모멘텀을 추종하기 때문인 것으로 생각된다.

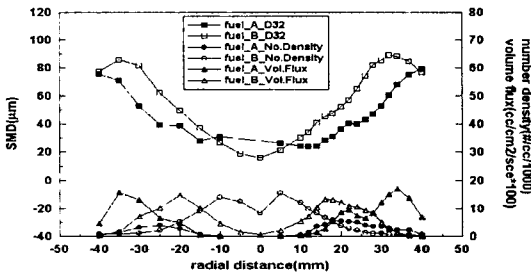


Fig. 13 Spray characteristics of fuel A/fuel B with stage 3 pressure at X=30mm

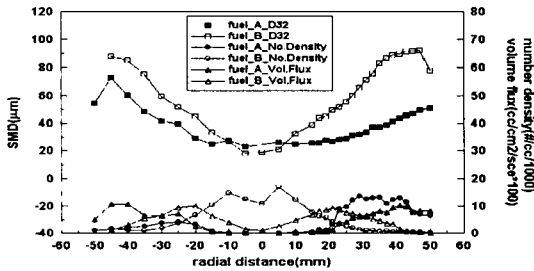


Fig. 14 Spray characteristics of fuel A/fuel B with stage 3 pressure at X=40mm

Fig. 13~14에서 보인 stage 3 조건에서의 측정 결과도 동일한 현상에서 기인한 것으로 보인다. 그러나, Fig. 14에서는 지금까지 고찰한 fuel A 조건의 체적률 및 액적 크기의 이중 형성이 미약하게 나타나고 있는데, 이는 높은 연료공급압력 조건일 때의 하류 영역에서는 파일릿 노즐의 주 유동과 메인 노즐의 주유동의 혼합의 증대되고, 전체 분무 유동장이 확산되어, 액적크기 및 체적률의 이중 형성이 어렵기 때문인 것으로 생각된다.

4.2.3 동일 연료 공급 압력에서의 분무 구조 비교

연료유량 설정에서 밀도 및 점도의 차이를 고려하지 않은, 동일 연료공급 압력하에서의 분무 구조의 비교를 Fig. 15~16에 보였다.

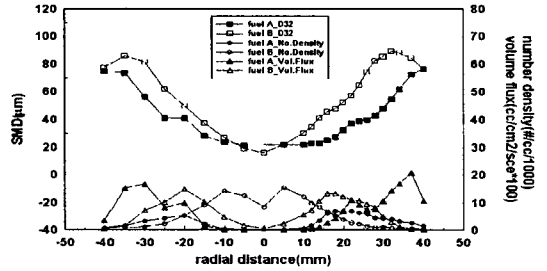


Fig. 15 Spray characteristics of fuel A/fuel B with fuel pressure 17kg/cm² at X=30mm

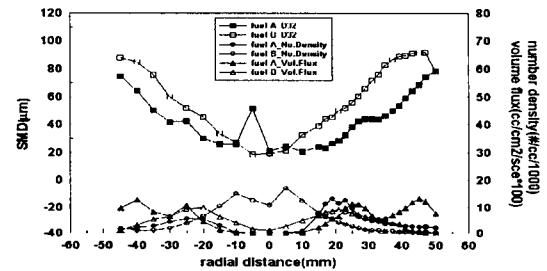


Fig. 16 Spray characteristics of fuel A/fuel B with fuel pressure 17kg/cm² at X=40mm

동일 연료공급 압력하에서의 밀도 및 점도만의 차이로 인한 액적 크기 변화 및 액적 분포의 차이가 나타난다. 전체적인 분무의 구조는 유동수(Flow Number)를 일치시킨 경우와 크게 다르지 않음을 알 수 있다.

Fig. 15의 fuel B의 액적크기 분포 및 체적률을 살펴보면, 반경방향 15mm 부근에서 fuel A의 액적 크기 및 체적률 분포를 미약하나마 추종하려고 하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과로 미루어 볼 때, 연료 공급 압력을 높이면, fuel A의 분무 특성에 근접할 것으로 예상되며, fuel B의 분무의 질을 향상시키기 위해서는 상당한 연료공급 압력의 증가가 있어야 할 것으로 생각된다.

4.2.4 연료 물성치와 SMD와의 관계

분무 유동장의 내, 외적 환경 변화 요인과 분무 액적 크기와의 관계는 많은 연구자들의 주요 연구 목표였을 뿐만 아니라, 분무 연소가 응용되는 시스템에서도 매우 중요한 역할을 하고 있다. 기

존 연구자들의 결과들은 서론에서 언급한 바와 같이, 액적의 크기는 밀도의 0.06~0.3승에 비례하고 있다. 그러나, 이러한 결과들은 대부분 단순 압력 선회식 분무에서의 결과들이며, 실제 가스 터빈 연소에서 중요하게 취급되는 이중 오리피스 노즐의 분무 연소 영역과는 다소 거리가 있다.

본 연구에서는 실제 적용될 수 있는 분무 유동장 및 연소장을 고려해 연료의 물성치와 SMD와의 관계를 도출하고자 하였다.

먼저, 본 연구에 사용한 연료의 물성치 변화는 점도 변화로 대표할 수 있다. 두 연료간의 밀도, 표면장력, 기타 물성치 등의 변화도 수반되나, 가스 터빈 연료의 미립화 현상에서는 점도 변화가 가장 큰 영향을 미치고, 점도를 제외한 다른 물성치들의 영향은 매우 미미하기 때문이다.

점도 변화에 의한 액적 크기 변화를 대표할 수 있는 분무 영역의 선정 또한 매우 중요하다. 분무 유동장의 축 방향, 반경 방향에 따라 액적 크기 및 분포가 매우 틀려지고, 실제 연소에 기여하는 정도가 틀리기 때문이다. 이중 오리피스 연료 노즐의 분무 특성상, 분무 중앙에서의 특성 비교는 사실상 무의미하다고 볼 수 있는데, 이는 중공 원형 분무의 특성으로 인해 분무 중앙은 분무 외곽에서 더 큰 액적이 낮은 수밀도, 낮은 체적률을 보이며 지나가기 때문에 실제 연소에 기여하는 부분은 크지 않다.

이러한 공간적인 분무 특성을 고려해 볼 때, 실제 연소현상에서도 관찰할 수 있는 화염면에 해당하는 분무 영역을 선정하는 것이 바람직한데, 압력 선회식 분무 유동장에서는 체적률 최대값의 전후 위치가 화염면 형성에 중요한 역할을 한다.

따라서, 본 연구에서는 연료의 점도 변화로 인한 액적 크기 변화를 체적률 최대값 위치를 기준으로 고찰하였다.

Fig. 15와 16의 결과에서, 동일 압력에서 점도 변화로 인한 액적 크기 변화를 살펴보면, fuel A의 일차 체적률 최대값 위치에서 fuel B는 동일 압력에서 약 20 μ m의 액적 크기 차이를 보이고 있으며, fuel B의 일차 체적률 최대값 위치에서도 마찬가지로 액적 크기 차이를 보이고 있다. 이러한 액적 크기의 차이는 Fig. 16에서도 동일하게 나타나고 있는데, 두 연료간의 점도차이는 Table. 1에서 살펴본 바와 같이 약 2배 차이이며, 분무 유동장의 대표 영역에서의 액적 크기는 약 150~180%의 차이를 보이고 있다.

이러한 점도 차이로 인한 액적 크기의 차이는 이중 오리피스 연료 노즐의 주 분무 영역에서 대체적으로 다음의 관계를 갖는다고 볼 수 있다.

$$SMD \propto \mu_L^{0.6-0.8} \quad (2)$$

이런 결과는 기존의 단순 압력 선회식 분무의

결과에 비해 액적 크기의 차가 비교적 큰 것이라고 볼 수 있다. Fig. 9~14의 결과에서 압력이 증가한 경우도 액적크기의 차는 일정하거나 조금 증가한 결과를 보이고 있고, 전단영역(shear region)에서는 더 큰 액적크기 차이를 보이고 있는데, 분무 중앙부를 제외하면 액적 크기의 차는 최소한 밀도의 제곱근에 비례할 것으로 예상된다.

위의 결과로 보아, 이중 오리피스 연료 노즐의 분무 유동장에서의 액적 크기는 단순 압력 선회식 분무 유동장에 비해 연료의 밀도 변화로 인한 영향을 더 크게 받는다고 볼 수 있다.

4. 결론

두 연료의 물성치가 서로 다를 경우, 세가지 압력 조건하에서 분무 구조의 변화를 분석한 결과, 다음의 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 연료의 물성치, 특히 밀도와 점도가 틀릴 경우, 동일 연료유량 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 사용할 때, 액적으로서의 분열기구가 이중 오리피스 연료 노즐의 분무 특성과는 달리 단일 오리피스 연료 노즐의 분무 거동에 더 가까운 현상을 보였으며, 분무 유동장의 영역에 따라 액적 크기에서 최대 100%의 차이를 보였다. 이러한 파대한 액적 크기의 차이는 연소성능에 영향을 미칠 수 있다고 판단된다.
- 3) 이중 오리피스 연료 노즐에서 저점도의 연료를 사용할 경우, 액막의 이중 형성으로 인한 전단영역(shear region)이 발생하고 이 영역이 전경방향에 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, 연료공급압력증가에 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) 분무 성능 평가의 중요한 인자인 액적 크기면에서 연료의 점도가 2배로 증가하면, 액적 크기는 약 1.5배에서 1.8배의 증가를 보였다. 이러한 결과에서 단순 압력 선회식 분무보다 이중 오리피스 연료노즐에서의 분무는 연료의 점도 변화에

더 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

6) 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.

7) 분무 유동장의 결과에서 분무 구조의 변화가 매우 뚜렷하게 나타난 점으로 미루어 보아, 연료노즐 주위에 선회기 유동이 존재할 경우, 또는 연소기 내에서 연소 현상이 일어날 경우, 두 연료간의 분무 및 연소 특성의 차이는 더 명확하게 나타날 것으로 예상된다. 따라서, frontal device 및 연소기 설계에서 연료 변경에 대비한 설계 접근이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- [1] A. H. Lefebvre, "Gas Turbine Combustion, 2/E", Taylor & Francis, 1999
- [2] A. H. Lefebvre, "Atomization and Sprays", Hemisphere Publishing, 1989
- [3] Jasuja. A. K., "Atomization of Crude and Residual Fuel Oils", ASME J. Eng. Power, Vol. 101, No.2, pp 250-258, 1979.
- [4] Radcliffe. A., "Fuel Injection", High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion, Vol. XI, Sect. D, Princeton University Press, Princeton, N.J., 1960.
- [5] 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.
- [6] 최성만, 전승배, 민성기, "HSNS(High Shear Nozzle and Swirler) 연료노즐 및 스윌러 실험연구", 한국항공우주학회지 제 26권 제 8호, 1998.
- [7] 배충식, V. Warnke, 한영민, 설우석, 이대성, "공기공급압력에 따른 이중선회기 유동 및 이중 오리피스 연료노즐의 분무 특성", 한국항공우주학회 추계학술대회 논문집, pp.227-233, 1997.
- [8] 이상용, 김인구, 조한권, "와류 분무 노즐에 의해 형성되는 액적들의 균일도에 액체의 점도가 미치는 영향", 대한기계학회논문집, 제 13권 제 3호, pp.538-546, 1989