쉬라우드 공기의 선회 유동 특성 변화에 따른 심플렉스 연료 노즐의 분무 특성

The Spray Characteristics of Simplex Atomizer under Various Shroud Air Conditions with Swirl Flow

이 동 훈*, 이 강 엽*, 최 성 만*
D. H. Lee, K. Y. Lee, S. M. Choi

ABSTRACT

The spray characteristics were investigated to study the effect of shroud air with swirl flow on simplex type fuel injector for gas turbine combustor. The spray tests using PDA(Phase Doppler Anemometry) technique were conducted to compare the performance of simplex atomizer with 0°, 40°, 50° swirled-shroud air conditions. In this study, we found that the injector with strong swirled-shroud air has the better atomization performance compared with weaker swirled and non-swirled conditions.

주요기술용어 : Shroud Air, Swirl, PDA(위상 도플러 유속계), SMD(Sauter 평균입경), Number Density(수밀도), Volume Flux(체적률)

1. 서론

가스터빈 연소기에 사용되는 연료노즐의 종류는 여러 가지가 있으나, 실제 적용되는 형태를 기준으로 압력식(pressure atomizer), 2-유체 분무식(twin-fluid atomizer), 회전식(rotary atomizer) 등으로 분류하는 것이 일반적이다.[1]

이 중 압력식 연료노즐은 유체에 가하는 압력 에너지를 미립화에너지로 변환하는 개념으로 디젤기관뿐만 아니라, 가스터빈, 산업용, 가정용 연소시스템에 이르기까지 매우 폭넓게 사용되고 있다. 특히 분무각, 분무 액적 크기 및 액적 분포의 조절을 위한 분무 특성 제어 인자가 비교적 잘 알려져 있고, 분무 성능이 상대적으로 우수해 가스터빈 연소기에 다양하게 적용되고 있다. 또한 미립화를 위해 별도의 공기 유동을 사용하지 않기 때문에 압축기 출구 공기의 압력, 유량 등과 같은 유동 특성 변화와 관계없이 균일한 분무 성능을 유지할 수 있다는 장점이 있으므로 Tangential Swirl 방식의 연소기나 Single Vortex 방식의 연소기는 대부분 압력분무식 연료노즐을 채용하고 있다.[2]

한편, 가스터빈 Frontal Device의 선회유동을 이용하지 않는 압력식 연료노즐의 경우, 연료노즐이 연소실 내부의 고온 환경에 그대로 노출되고, 이로 인한 연료노즐의 손상은 압력식 연료노즐의 주요한 단점이자, 설계 시 특별히 더

* 삼성테크윈 파워시스템연구소

고려해야 하는 인자가 되고 있다. 즉, 연료노즐이 연소실 내부의 고온에 노출될 때, 연료노즐의 손상 및 그을음의 퇴적으로 인한 연료노즐의 막힘 현상 등을 가져와, 결과적으로 분무 성능에 영향을 미쳐 연소기 전체의 효율 및 연소안정성을 떨어뜨리는 것으로 알려져 있다. 따라서 안정적인 분무성능과 낮은 유지보수 비용이 가스터빈 연소기 연료노즐 설계의 주요 설계인자임을 고려할 때, 연소기 및 엔진 전체 성능과 효율에 미치는 영향은 매우 크다고 볼 수 있다.

막힘 현상 등과 같은 압력식 연료노즐의 단점을 보완하기 위하여 연료노즐 주위로 소량의 공기 유동(Shroud Air, Anti-Carbon Air)을 형성시켜 주는 방법이 이용되고 있는데, 이 공기유동은 연료노즐의 냉각, 연소생성물 중 탄소성분의 퇴적 방지뿐만 아니라, SMD 감소와 같은 분무 성능 개선의 효과도 있다고 알려져 있다.[3] Clare 등[1]은 가스터빈용 압력식 연료노즐에 선회 성분을 가지는 쉬라우드 공기를 공급하여 선회 유동의 변화에 따라 10~30%의 액적크기 감소를 보였다고 보고한 바 있다. Clare는 이 연구에서 선회유동을 가지는 쉬라우드 공기와 선회유동을 가지지 않는 쉬라우드 공기를 다양하게 변경시키면서 실험을 수행한 결과, 선회유동이 있는 쉬라우드 공기가 보다 낮은 압력에서도 압력식 연료분무의 튤립단계(Tulip Stage)를 유지시킨다는 것을 보였으며, 완전히 발달된 분무에서는 분무각에 영향을 미치지 않는다고 밝혔다. 또한 선회유동이 없는 쉬라우드 공기는 연료분무의 분무각을 좁히는 결과를 가져오며, 궁극적으로 쉬라우드 공기를 이용하여 분무각을 조절할 수 있음을 밝혔다. 그러나 한정된 쉬라우드 공기 환경에서 측정되어 분무유동장 전체의 변화를 고찰하지는 못하였으며, 특히 최근 소형 가스터빈의 연소기로 많이 적용되는 Tangential Swirl 형태로의 적용은 그동안 전무했다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 이러한 기존 연구의 한계를 극복하기 위하여 100 kW급의 실제 가스터빈 엔진에 사용되는 압력식 연료노즐을 개조하여 쉬라우드 공기의 선회 유동특성을 변화시켰을 때의 분무특성에 대해 연구하였다. 분무특성을 비교하기 위하여 PDA(Phase Doppler Anemometry) 측정 기법을 이용하여 액적 크기 및 분포를 정량화하여 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 연료노즐

본 연구에 사용한 연료노즐은 압력식 연료노즐로 Fig. 1에 전체의 단면 구조를 보였으며, Fig. 2에 오리피스와 와류실로 이루어진 코어 부분의 분해도를 나타내었다. 연료노즐의 오리피스 직경은 0.38mm이며, 2개의 접선형 유입구를 가지는 와류실과 필터로 구성되어 있다.

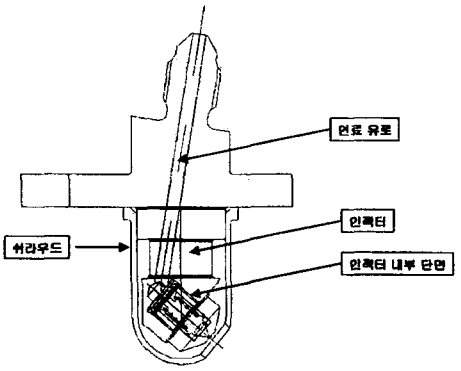

Fig. 1 Simplex injector

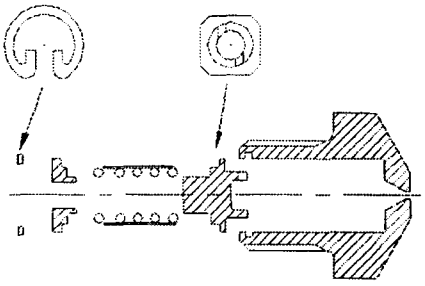

Fig. 2 Disassembly drawing of simplex injector

연료노즐의 최대 사용 압력은 20 bar이며, 이 때의 최대 유량은 10.11 kg/hr이다. 분무시험 조건인 5 bar의 연료공급압력에서 방출계수는 0.45를 보였다.

2.1.2 스월러

쉬라우드 공기의 분무 성능 향상을 위해 연료노즐을 감싸고 있는 쉬라우드와 연료노즐 본체 사이의 공간에 축방향 스월러를 장착하여 유동이 연료노즐 주위를 선회하며 연료노즐 출구의 연료 분무와 만나게 하였다. 이를 위하여 기존의 스월러가 없는 연료노즐을 변형하여 선회각 40°와 50°의 선회유동을 줄 수 있는 스월러를 부착하였다. 두 스월러의 선회강도(Swirl Number)는 각각 0.71과 1.01이며 선회 베인의 개수는 20개, 선회 베인의 두께는 0.5 mm이다. 선회강도는 Beer와 Chigier[5]가 제시한 다음의 계산식을 사용하였다.

$$SN = \frac{2}{3}\,\frac{1-(D_{hub}/D_{sw})^3}{1-(D_{hub}/D_{sw})^2}\,tan\theta \qquad (1)$$

여기서 θ = 선회각

D_{hub} = 스월러 내경

D_{sw} = 스월러 외경

Fig. 3에 스월러의 위치 및 연료노즐과 쉬라우드 사이의 선회 유동 경로를 보였다.

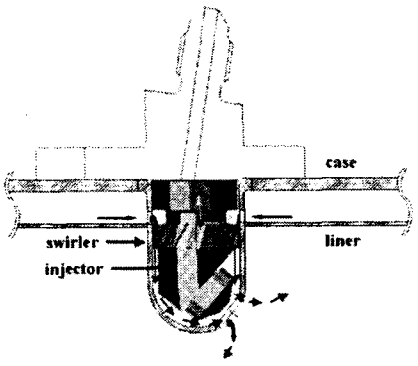

Fig. 3 Flow path of shroud air

2.1.3 분무 특성 측정 장치

선회성분이 있는 쉬라우드 공기의 속도 성분을 측정하고, 분무된 연료 액적들의 크기를 측정하기 위하여 PDA(Phase Doppler Anemometry) 측정 기법을 사용하였다. 이를 위하여 최대 출력 5 W의 Ar-ion 레이저를 사용하는 APV(Adaptive Phase/Doppler Velocimetry, TSI) 장치를 이용하였다. 녹색광(514.5 nm)과 청색광(488 nm)의 영역에서 속도의 2차원 측정을 수행하였으며, 동시에 액적의 크기(SMD) 및 체적률(Volume Flux)과 수밀도(Number Density)를 측정하였다.

Fig. 4에 실험에 사용한 APV 장치 및 분무 시험 리그의 구성을 보였다.

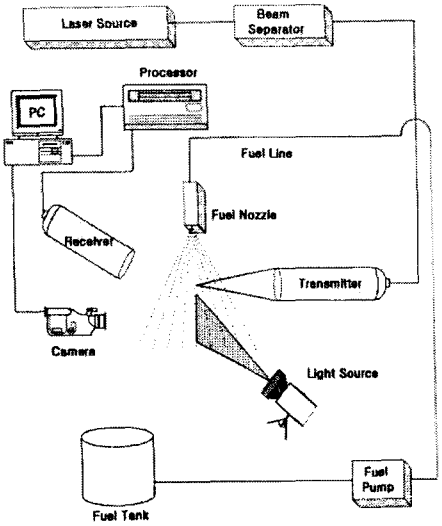

Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 실험 조건

분무 실험을 위한 유체로써 등유를 사용하였으며, 모든 실험은 상온, 대기압 환경 하에서 이루어졌다. 두 가지 경우의 공기 공급압력 조건과 5 bar의 연료공급압력 조건하에서 공기공급 및 선회유동 변화에 따른 분무 유동장의 특성을 살펴보았다. 또한 공기공급이 전혀 없는 상태에서의 분무 특성을 측정하여 공기공급 여부에 따른 분무 특성 변화를 고찰하기 위한 기준 분무로서 활용하고자 하였다. 연료압 5 bar에서의 연료유량은 5.05 kg/hr이며, 자세한 실험조건을 Table 1에 정리하였다.

PDA 측정 지점은 연료노즐 쉬라우드 출구에서 하류 방향으로 5, 10, 20, 35, 50, 70 mm 지점을 측정하였으며, 반경방향으로는 축 방향 5 mm지점에서는 1 mm 간격으로, 축 방향 10, 20 mm지점에서는 2 mm간격으로, 그 이하 지점에서는 5mm간격으로 측정하였다. 본 연구에

서 고찰하고자 하는 연료 분무 형상이 축대칭임을 가정하여, 분무 형상의 축 중심을 기준으로 한 방향의 반경 영역에서의 분무 특성 측정만 이루어졌다. 그러나 속도장 측정을 위해서는 축대칭 전 영역에서 측정하여 유동장의 전체 구조를 살펴보고자 하였다.

Table 1 Test conditions

No.	ΔP_fuel (bar)	ΔP_air (kPa)	swirl angle (deg.)	remarks
1	5	0	N/A	
2	5	2	0	
3	5	2	40	
4	5	2	50	
5	5	5	0	LDV point
6	5	5	40	LDV point
7	5	5	50	LDV point

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 선회유동 측정결과

가스터빈 Frontal Device의 성능을 평가하기 위해서 선회유동의 속도 성분을 측정하여 스월러의 유동 특성을 우선 파악하는 것이 중요하다. 가스터빈 연료 분무는 스월러의 선회 공기 유동과 연료분무가 복잡하게 상호 작용하는 이상(2 phase) 유동의 특성을 가지므로 공기 및 연료의 거동을 독립적으로 미리 파악하는 절차가 선행되어야 한다. 이를 위해 선회유동이 없는 경우와 선회각이 각각 40°와 50°인 경우의 2차원 속도 벡터를 측정하여 그 결과를 Fig. 5~7에 보였다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 선회유동이 존재하지 않는 경우, 유동장의 분포는 선회유동이 있는 Fig. 6~7의 경우에 비해 상당히 좁은 유동 영역을 이루고 있다는 것을 알 수 있다. 연료노즐 출구 초기에서의 축 방향 속도 성분이 반경방향으로 많이 확산되지 못하고 축 중심 부근에서 높은 속도를 보이고 있으며, 50 mm 이하의 하류에서도 상당히 높은 속도를 보이고 있다. 그러나 선회유동이 있는 경우에는 연료노즐 출구의 공기 유동이 반경방향으로 확산되는 정도가 매우 커짐을 관찰할 수 있으며, 특히 출구초기에서의 반경방향 속도벡터의 확산 정도가 크게 증가되었음을 확인할 수 있다. 이는 공기 유동장 내에 연료분무가 존재할 경우, 연료분무의 분무각을 상당히 개선시킬 수 있음을 보여주고 있다. 심플렉스 연료노즐에서 분무각이 클수록 미립화 성능이 좋아지며 결과적으로 연소성능 및 연소안정성 증가를 가져온다는 점을 고려할 때, 이러한 출구초기의 유동장 개선은 가스터빈 연소기의 연소성능을 향상시킬 수 있을 것으로 예측된다.

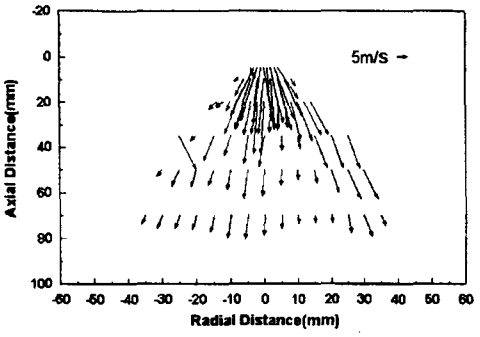

Fig. 5 Velocity vector with no swirl condition (test condition No. 5)

또한 유동의 균일성 측면에서도 선회유동이 존재하지 않는 경우에는 비대칭성이 큰 반면, 선회유동이 형성된 Fig. 6~7의 결과에서는 전체 유동의 대칭성이 상당히 개선된 것을 알 수 있다.

선회성분이 없는 경우, 유동의 중심축 부근에서 가장 높은 속도를 보이는 반면, 선회유동이 있는 경우에는 출구 초기를 제외하고는 유동의 중심축 부근 영역에서 속도가 정체되는 현상을 보였다. 특히 하류 방향 50, 70 mm 지점의 속도 성분을 비교해 보면, 선회 유동이 존재할 경우, 유동장 중심부에서는 속도성분이 거의 0에 가깝게 나타나고 있으며 이 영역에서 상대적으로 작은 크기의 액적들이 정체되는 것을 예상할 수 있다. 또한 선회각이 각각 40°와 50°인 경우, 선회강도 차이에 따른 속도분포의 차이는 크게 나타나지 않는 것으로 관찰되었다. 선회강도가 각각 0.71과 1.01 조건임에도 불구하고 출구 속도 분포에서 큰 차이를 보이지 않는 것은 선회강도 증가에 따른 반경방향 속도 확산의 한계점이 존재한다고 말할 수 있다.

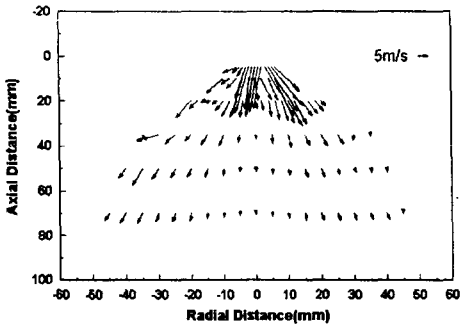

Fig. 6 Velocity vector with 40° swirl condition (test condition No. 6)

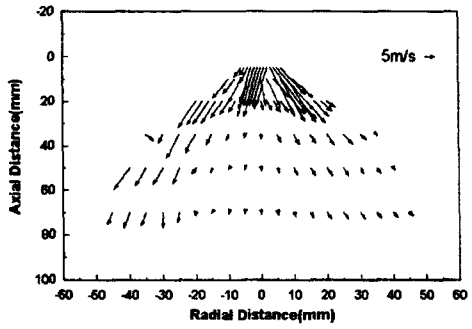

Fig. 7 Velocity vector with 50° swirl condition (test condition No. 7)

이와 같이 선회유동의 유무, 그리고 선회강도 정도에 따른 속도장을 측정한 결과, 일반적인 가스터빈 Frontal Device에 나타나는 재순환영역은 나타나지 않으나, 선회유동이 없는 경우와 비교하면 보염 성능 및 온도분포의 균일성 측면에서는 선회유동이 없는 경우에 비해 우수할 것으로 판단된다.

3.2 분무특성 측정 결과

연료공급압력 및 공기공급 조건에 따른 연료노즐의 분무 특성을 측정하여 속도장과 액적의 크기 및 분포와의 상호관계를 조사하였다. 분무특성을 표현하는 주요 인자로 액적크기(SMD, ㎛), 수밀도(Number Density, #/cc), 체적률(Volume Flux, cc/sec/cm^2) 등 세 가지의 분무성능 측정값을 사용하였으며, Table 1에 보인 4가지의 공기 공급조건(ΔP_{air} = 2 kPa)에 대해 분무 하류 방향(X) 35 mm, 70 mm 두 지점에서 각각 액적크기, 수밀도, 체적률을 비교하였다.

Fig. 8~9에 선회유동 유무 및 선회각 변화에 따른 반경방향의 액적크기 분포를 나타내었다. 전체적으로 중심부에는 작은 크기의 액적들이 분포하고, 분무 주 영역으로 갈수록 액적크기가 커지는 형태를 가지는 압력식 연료노즐의 전형적인 분무구조를 보이고 있다.

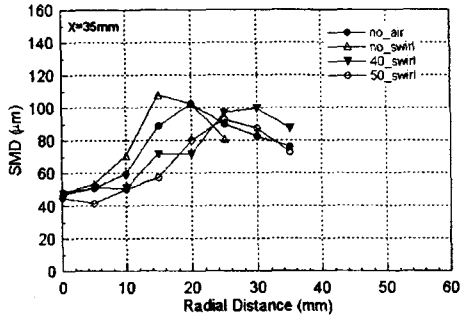

Fig. 8 SMD distribution under four air supply conditions at X=35 mm (ΔP_{air} = 2 kPa, ΔP_{fuel} = 5 bar)

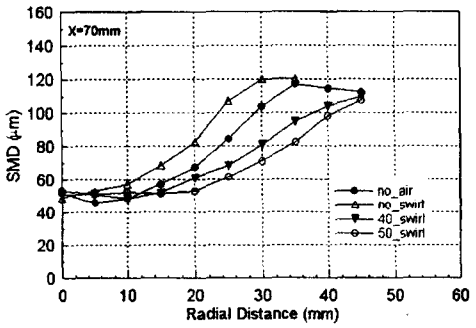

Fig. 9 SMD distribution under four air supply conditions at X=70 mm (ΔP_{air} = 2 kPa, ΔP_{fuel} = 5 bar)

선회유동의 공급으로 인해 두 영역 모두 액적 크기가 감소됨과 함께 최대 액적 크기가 나타나는 지점이 분무 외곽 영역으로 더 치우쳐 나타나고 있다. 중공 원형의 분무구조를 가지는 압력식 연료노즐의 분무에서 최대 액적크기는 분무 주 영역에서 근접한 외곽 영역에 나타나는 점을 고려할 때, 최대 액적크기 출현 위치의 변화는 분무각이 증가했기 때문인 것으로 판단된다. 선회유동이 분무각을 증가시키는 원인을

살펴보면, 스월러에서 생성된 선회유동이 연료 노즐 출구의 반경방향(Radial Direction) 및 접선방향(Tangential Direction) 속도성분을 증가시키고 이러한 반경/접선방향 속도성분을 연료 분무가 추종하기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 따라서 선회성분을 가지는 쉬라우드 공기는 압력식 연료노즐의 주요 성능 인자인 분무각 조절에 유용한 제어요소가 될 수 있을 것이다.

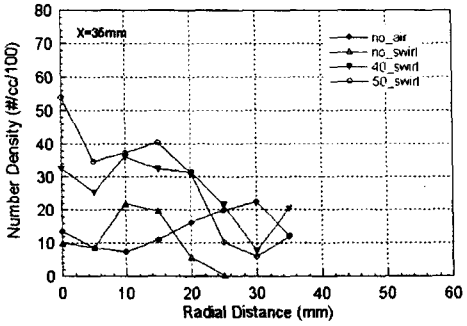

Fig. 10 Number density distribution under four air supply conditions at X=35 mm (ΔP_{air} = 2 kPa, ΔP_{fuel} = 5 bar)

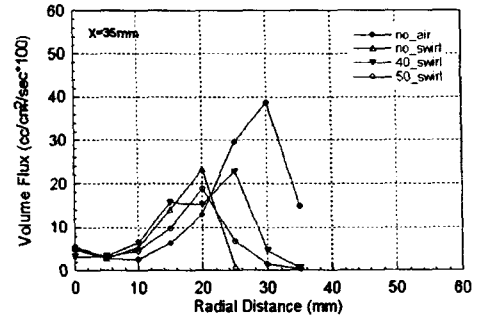

Fig. 11 Volume flux distribution under four air supply conditions at X=35 mm (ΔP_{air} = 2 kPa, ΔP_{fuel} = 5 bar)

한편, Fig. 8~9의 결과에서 공기공급이 없는 기준분무에 비해 선회성분이 없는 쉬라우드 공기를 공급했을 때 오히려 분무성능이 악화되는 것이 관찰되었다. 최대 SMD 출현 지점도 분무 영역 안쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있고, SMD 또한 10~20% 증가되는 현상이 나타나고 있는데, 이는 선회성분이 없는 공기유동이 공급됨으로 인해 유동의 축 방향 모멘텀이 상대적으로 증가하고, 이것이 연료 분무의 반경방향으로의 확산을 막았기 때문으로 생각할 수 있다. 그러나 이러한 현상은 쉬라우드 공기가 선회성분을 가지지 않더라도 어느 정도의 SMD 감소 효과를 가진다는 Clare 등의 기존 연구와 상반된 결과를 보이고 있는데, 이는 사용한 연료노즐의 형상, 쉬라우드 공기의 유입량 등과 연료 분무와의 상호작용 정도가 상이하게 때문인 것으로 추측된다. 따라서 본 연구에서 도출한 속도장과 액적크기 분포와의 상호작용을 놓고 본다면, 선회성분이 없는 쉬라우드 공기의 미립화 효과는 없는 것으로 판단된다.

Fig. 10~11에 X=35 mm지점의 동일 조건에 대한 연료 분무의 수밀도와 체적률을 보였다. 선회성분이 강할수록, 분무 중심부의 수밀도가 높게 나타나고 있는데, 이는 상대적으로 작은 액적들이 선회성분으로 인해 분무 중심부에서 정체되기 때문인 것으로 보인다. 전체적으로 수밀도와 체적률 분포는 SMD 분포에서 나타나는 선회성분에 따른 분무구조 변화를 잘 추종하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 12~13은 공기 공급압력을 5 kPa로 증가시켰을 때의 액적크기를 35, 70 mm 두 지점에서 측정한 결과이다. 공기 공급압력이 2 kPa인 경우와 비교해 액적 크기 및 분포 차이가 유사한 경향을 보이고 있는데, 선회각이 50°일 때 상당한 액적크기의 감소를 보인 것과 동시에 분무가 반경방향으로 확산되는 것이 관찰되었다. 선회각 50°일 때 공기 공급압력이 2 kPa(Fig. 8)일 때 반경방향 20~30 mm 사이에 약 90 ㎛ 이상의 비교적 높은 크기를 보였으나, 공기 공급압력이 5 kPa인 경우, 동일 지점에서의 70 ㎛이하의 액적크기를 보이고 있고, 분무 확산폭도 매우 증가했음을 알 수 있다. 이러한 분무 구조의 변화는 공기 공급압력 증가에 따른 Weber Number의 증가로 인한 효과로 파악할 수 있다.

선회성분이 없는 쉬라우드 공기가 공급될 때의 액적크기나 액적분포 또한 공기 공급압력 2kPa인 경우와 비교해 크게 다르지 않게 나타난다. 그러나 선회성분이 있는 경우의 액적크기 및 분포가 선회성분이 없는 경우보다 더 개선된 결과를 보이고 있어, 동일한 We수 증가의 조건에서도 선회성분이 있는 경우가 더 미립화

에 효과적이라고 판단된다. 또한 선회각 40°보다 선회각 50°인 경우가 공기 공급압력 증가에 따른 액적크기 개선에 더 효과적인 것으로 관찰되었다.

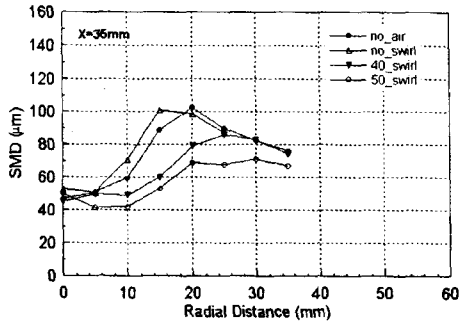

Fig. 12 SMD distribution under four air supply conditions at X=35 mm (ΔP_{air} = 5 kPa, ΔP_{fuel} = 5 bar)

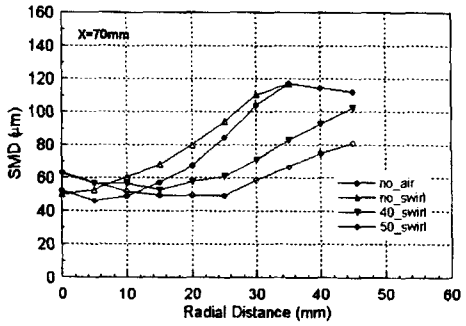

Fig. 13 SMD distribution under four air supply conditions at X=70 mm (ΔP_{air} = 5 kPa, ΔP_{fuel} = 5 bar)

4. 결론

이상의 실험 결과들에서 Tangential Swirl 가스터빈 연소기에서의 쉬라우드 공기의 선회강도 정도 및 공기 공급압력 변화에 따른 가스터빈 심플렉스 연료노즐의 분무 특성에 대해 다음의 결론을 도출하였다.

1) Tangential Swirl 형 연소기에 적용하는 심플렉스 연료노즐의 쉬라우드 공기에 선회성분을 공급함으로써 연료노즐 냉각 등의 효과뿐만 아니라, 액적 크기 감소, 액적분포의 개선 등에 큰 효과가 있음을 밝혔다.

2) 쉬라우드 공기의 선회성분은 출구 속도장의 반경방향 및 선회방향 속도성분을 증가시키고, 이 속도성분은 연료분무의 반경방향 확산을 도와 최종적으로 연료분무장의 분무각을 증가시키는 효과를 가짐을 알 수 있었다.

3) 선회성분이 있는 쉬라우드 공기를 사용하여 분무 액적의 크기를 대폭 감소시킬 수 있음을 보였다. 선회각을 달리해 실험한 결과, 선회각이 증가할수록 액적 크기 감소 및 액적 분포 개선 효과가 뛰어났으며, 공기 공급압력 증가로 인한 We수의 영향보다는 선회성분의 공급 여부가 연료 미립화에 더 효과적임을 알 수 있었다.

4) 선회성분이 없는 쉬라우드 공기의 공급은 연료노즐의 미립화 향상에 큰 영향을 주지 못함을 알 수 있었다. 즉, 쉬라우드 공기 자체는 연료노즐의 냉각 및 그을음의 퇴적 방지를 위해서 효과적이나, 추가적인 미립화 효과를 위해서는 선회성분이 공급되어야 함을 도출하였다.

5) 위의 실험결과와 같이 선회성분을 이용한 쉬라우드 공기의 효과는 실제 가스터빈 연소기의 연소성능을 향상시킬 수 있는 제어 요소가 될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. A. H. Lefebvre, *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Co., 1989.

2. 이동훈, 최성만, 한영민, 고영성, "환형역류형 APU연소기의 성능특성 연구", 제 22회 한국연소학회 춘계학술대회 논문집, pp67-74, 2001.

3. A. H. Lefebvre, *Gas Turbine Combustion*, McGraw-Hill, 1983.

4. H. Clare, J. A. Gardiner and M. C. Neale, "Study of fuel injection in air breathing combustion chambers", Experimental methods in combustion research, Pergamon, London, pp5-20, 1964

5. J. M. Beer, N. A. Chigier, "Combustion Aerodynamics", Applied Science, London, 1972.