

가스터빈 연소기의 스월컵 형상이 분무특성에 미치는 영향

김동준* · 박종훈* · 고현석* · 윤영빈**

Effect of Swirl Cup Geometry on Spray Characteristics in Gas Turbine Engine

Dongjun Kim* · Jonghoon Park* · Hyeonseok Koh* · Youngbin Yoon**

ABSTRACT

Experiments have been performed to investigate the effect of secondary venturi tip angle on flow and spray characteristics in gas turbine combustor with a swirl cup assembly. Three variations of secondary venturi tip angle are made: converging, straight and diverging angles. It is found that the variation of venturi tip angle results in the significant changes of flow and spray characteristics in gas turbine combustors, such as the size and location of recirculation zones, drop size and mass distribution affecting combustion efficiency and NOx emissions. In diverge case, central toroidal recirculation zone(CTRZ) exists near the exit, which is known to be beneficial for flame stability. But in converge case, the finest SMD distribution and uniform mass distribution are found and CTRZ is longer than other cases. Consequently, high combustion efficiency and low pollutant emission are expected in converge case.

초 록

두 번째 벤츄리 끝단 각도가 가스터빈 연소기의 유동 및 분무 특성에 미치는 영향을 이해하기 위해 스월 vane 형태의 2중 스월컵을 장착한 산업용 가스터빈 엔진에 대해 두 번째 벤츄리 끝단 각이 수렴형, 직선형, 발산형의 세 경우에 대해 실험을 수행하였다. 두 번째 벤츄리 끝단 각도의 변화가 가스터빈 연소기의 재순환 영역의 위치, 크기 및 형상 등의 유동 특성과 연료 액적 분무 형태를 크게 변화시킴을 확인 할 수 있었다. 발산형 벤츄리에서는 내부 재순환 영역이 점화가 일어나는 지점에서 가까운 곳에서 형성되므로 화염의 안정화에는 탁월할 것으로 판단되지만, 수렴형 벤츄리에서 가장 작고 균일한 크기의 액적들이 측정되었고, 내부 재순환 영역이 연소기 내에 길게 형성된 점으로 고효율, 저공해 연소기로는 수렴형 벤츄리의 경우가 적합하리라 판단된다.

● 2002년 2월 5일 접수 ~ 2002년 5월 24일 심사 완료

* 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부 (Seoul National University, Graduate School of Mechanical and Aerospace Eng.) 주연락저자 E-mail=kan31@snu.ac.kr 서울시 관악구 신림동 산 56-1

** 종신회원, 서울대학교 기계항공공학부(Seoul National University, School of Mechanical Aerospace Eng.)

1. 서 론

스윙의 주된 효과는 재순환 영역을 형성시켜 연속적인 열전달을 일으키고 유동 속도를 화염 속도보다 작게하여 화염을 안정시키며, 출구 근처에서 주위 공기의 활발한 침입으로 인한 연료-공기 혼합물의 증대로 화염 길이를 짧게 만드는 것이다[1]. 특히 재순환 영역의 경계 부근에서 활발한 혼합이 이루어지기 때문에 공해 물질 배출량을 감소시키는 역할도 하게 된다[2]. 이러한 효과들 때문에 스윙은 산업용 보일러, 가스 터빈 엔진, 램젯 엔진과 같은 실제 엔진에 많이 이용되고 있다.

실제 엔진 특히 가스 터빈 엔진에서 연료-공기의 혼합 증대를 위해 여러개의 노즐과 선회 유동을 만드는 스윙러를 조합시킨 ‘스윙컵’이 제안되었다. 이러한 스윙컵을 장착한 GECFM56 엔진 연소기의 스윙컵이 엔진 성능에 미치는 영향을 이해하기 위한 많은 연구가 진행되었다 [3-5]. Takashi 등[4]은 2중 스윙러가 기존의 단일 스윙러에 비해 공기와 연료의 활발한 혼합으로 NOx 배출량이 현저히 작아지며, 연소 효율도 높아짐을 실험을 통하여 관찰하였다. 또한 최근에는 스윙컵 형상이 연소기 성능에 미치는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. McDonell 등[6]은 스윙컵 형상의 비대칭이 연소 특성에 미치는 효과를 연구하여 비대칭이 연료의 불균일성을 증가시켜 공해 물질 배출량을 증가시킴을 밝혀냈다. Wang 등[7]은 출구 형상을 달리하였을 때, 좁은 출구 형상에서 중심부에 가까운 재순환 영역이 형성되며 액적의 속도 감쇠가 느리며 액적의 크기가 작아진다는 것을 보였다.

스윙 유동에서 가장 중요한 특징 중 하나인 재순환 영역의 크기 및 위치를 변화시킬 수 있는 요인에는 스윙 강도, 스윙 생성기, 스윙 vane 각도, 출구 면적, 벤츄리 형상 등 여러 가지가 있다. 그러나 스윙컵 형상이 유동 및 분무 특성과 NOx 배출량에 미치는 영향에 대해서는 아직까지 확실하게 이해되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 스윙컵 형상, 특히 두 번째 벤츄리

끝단 각도가 유동 및 분무 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 연구하였다.

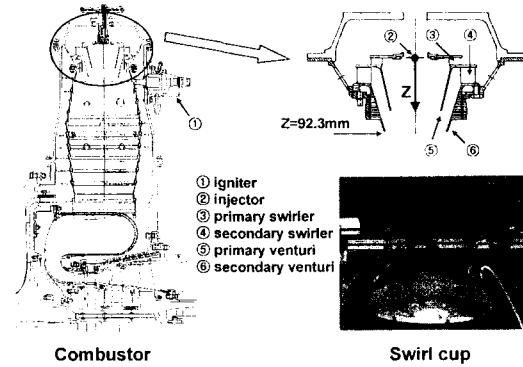


Fig. 1 Schematic of gas turbine combustor and swirl cup assembly

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험에 사용된 모델 가스터빈 엔진은 발전용으로 사용되는 최대 용량 4.7 MW의 산업용 가스터빈 엔진으로 스윙컵 형상과 같이 Fig. 1에 보여지고 있다. 실험에 사용된 스윙컵 형상은 2개의 스윙러와 2개의 벤츄리로 이루어진 2중 스윙컵 형상이다. 첫 번째 스윙러는 높이 12mm이며, 보다 많은 공기가 유입되는 두 번째 스윙러는 높이 16mm로 각각 20개의 vane으로 이루어져 있다. 실험은 두 개의 스윙러 선회 방향이 서로 다른 counter-swirl 형태에 대해서 수행하였다. 본 연구의 목적인 두 번째 벤츄리 끝단의 각도가 분무 및 유동 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 Fig. 2에서 보여지는 바와 같이 출구 단면적이 일정하도록 노즐로부터 69.2mm 지점에서 두 번째 벤츄리의 끝단 각이 수렴형, 직선형, 발산형으로 변하는 세 경우에 대해 실험을 수행하였다. 세 경우 모두에 대해 유입되는 공기는 스윙컵을 통해서만 들어온다. 즉 라이너 홀은 없다고 가정하였다. 그리고 실제 가스터빈 연소기의 공기 공급 유량 중 13%만이 스윙컵으로 공급되므로 이 조건을 맞추어 주었다. 링형 송풍기에 의해서 공급되는 공기 유량

은 317.75g/s 이고 분무 압력 15 bar 에서 연료 유량은 9.464g/s 이다.

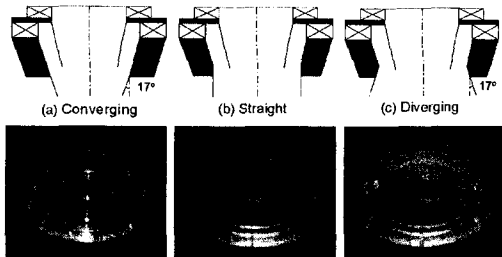


Fig. 2 Three cases of secondary venturies with different tip angles

2.2 평면 이미지 기법

본 실험에서 사용한 평면 이미지 기법을 이용한 “광학적 patternator”는 레이저에 의한 형광과 산란광을 이용, 유동을 교란시키지 않으면서 고해상도로 액체 연료 분포의 균일성과 대칭성을 2차원적으로 파악할 수 있다. 특히 형광 신호가 물질의 체적에 비례함을 이용하는 평면 액체 레이저 유도 형광법(Planar Liquid Laser Induced Fluorescence)은 분무의 2차원 질량 분포를 정량적으로 측정하는데 있어 매우 유용한 방법이다. 또한 액적의 지름에 비례하는 것으로 알려지는 Mie 산란광과의 비를 이용, SMD(Sauter Mean Diameter)의 단면 분포도 신속하게 구할 수 있다.

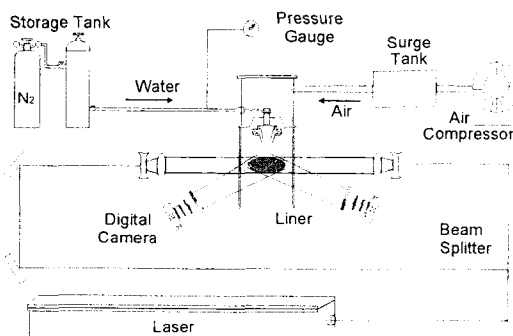


Fig. 3 Schematic of experimental apparatus using planar image technique

Fig. 3은 평면 이미지 기법의 실험 장치도를 보여주고 있다. 시험 유체로는 물과 메탄올을 4 : 1로 혼합한 용액에 레이저에 의한 형광이 일어나도록 fluorescein(Aldrich F245-6, $C_{20}H_{12}O_5$)을 30mg/l의 비율로 용해시켰다. 광원으로 532nm의 Nd:YAG 펄스 레이저를 사용했으며, cylindrical lens를 이용하여 평면광을 만들어 주었다. 본 실험 조건과 같이 밀한 분무에서는 분무에 의한 입사광의 감쇠가 분무 특성에 미치는 영향이 크기 때문에 Talley 등[8]이 제안한 바와 같이 시험부 양쪽에서 똑같은 강도의 레이저광이 입사할 수 있도록 beam splitter를 사용하여 빔을 분리하였다. 신호의 검출을 위해 두 대의 디지털 카메라(Canon, EOS D30)를 이용하였는데, 산란과 형광 신호가 카메라까지 도달하는 경로에서 분무에 의한 감쇠 영향을 보정하기 위해서 두 대의 카메라를 사용하였다. 그리고 형광과 산란신호를 동시에 획득하기 위해 이중 프리즘(doubling prism)을 사용하였으며, 각각의 신호를 550nm high-pass 필터와 532±5nm의 band-pass 필터를 사용하여 분리하였다.

2.3 PIV (Particle Image Velocimetry) 기법

Fig. 4는 유동장을 조사하기 위한 PIV 시스템의 장치도를 나타낸 그림이다. 본 실험에서는 Spectra Physics의 GCR-170과 Continuum Surelite I의 Nd:YAG 레이저 2대를 사용하였다. 두 평면광이 시험부에서 정확히 일치해야 하므로 두 레이저의 편광 방향을 달리하고, polarizing beamsplitter를 사용하여 두 빔이 같은 경로를 통하게 하였다. 기록매체는 2048×2048의 높은 공간해상도를 가지는 이중 노출 CCD 카메라(Kodak ES4.0)를 사용하였고, 2대의 레이저와 카메라를 동기화시키기 위하여 2대의 delay generator를 사용하였다. 조사 영역은 128×128 픽셀이고, 50% overlapping을 취하여 벡터 포인트당 공간해상도는 2.5mm로 하였다. 속도 측정을 위한 입자 주입은 식물성 기름을 이용하여 1 μ m의 작은 입자를 만들어내는 pivtec사의 particle generator를 사용하였다.

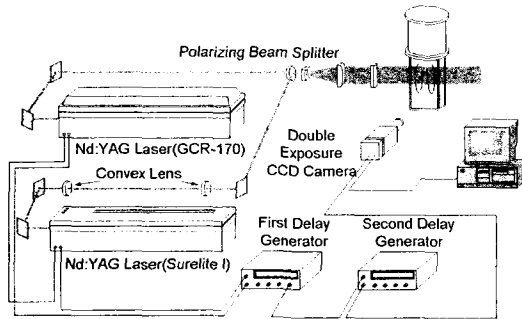


Fig. 4 Schematic of PIV system

3. 실험 결과

3.1 유동 특성

Fig. 5(a), Fig. 5(b), Fig. 5(c)는 PIV 기법으로 측정된 스윙캡의 두 번째 벤츄리 끝단 각도의 변화에 따른 유동장, 속도장, 난류 강도 등을 보여주고 있다. 세 경우 모두에서 2개의 재순환 영역의 존재가 관찰된다[9]. 먼저 Fig. 5(a)는 수렴형 벤츄리의 경우로 벤츄리 끝단에서부터 약 11cm 지점에 재순환 영역의 순환 중심이 존재하고 있다. 연소기 중심부에 길게 내부 재순환 영역(CTRZ)이 형성된 것을 볼 수 있으며, 벤츄리 끝단과 라이너 벽면 사이에 비교적 폭넓은 외부 재순환 영역(ERZ : External Recirculation Zone)이 존재하고 있음을 알 수 있었다. Fig. 5(b)와 Fig. 5(c)는 직선형 벤츄리와 발산형 벤츄리의 결과를 보여주고 있다. 내부 재순환 영역의 순환 중심은 직선형 벤츄리의 경우가 10cm, 발산형 벤츄리의 경우가 8cm에 존재하고 있음을 알 수 있었다. 즉, 수렴형 벤츄리의 경우보다 직선형, 발산형 벤츄리의 경우에서 내부 재순환 영역(CTRZ)은 출구 가까이에 형성됨을 알 수 있다. 그리고 외부 재순환 영역(ERZ)은 벤츄리 끝단과 라이너 벽면 사이 공간이 넓을수록 폭넓게 형성되며, 발산형 벤츄리의 경우는 스윙 유동이 두 번째 벤츄리를 거치면서 반경 방향으로 팽창하므로 외부 재순환 영역의 크기가 아주 작음을 볼 수 있다.

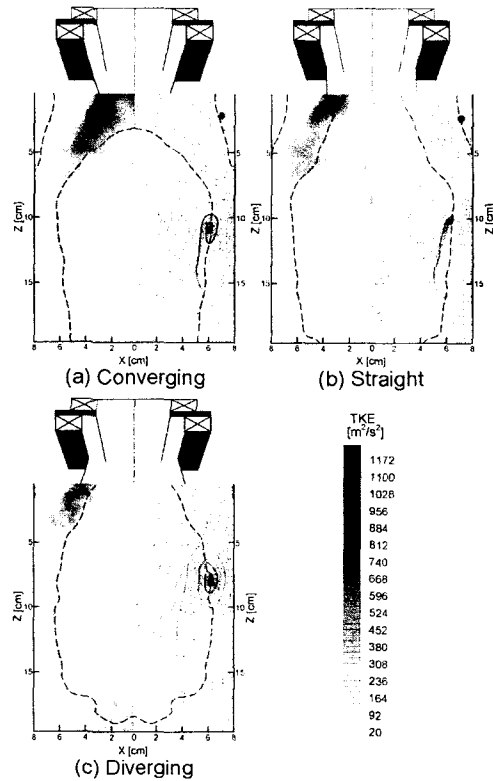


Fig. 5 Flow characteristics with velocity, streamline, turbulent kinetic energy

Fig. 5(a), Fig. 5(b), Fig. 5(c)에서 굵은 점선으로 표시한 부분은 축방향 속도가 0인 지점을 연결한 선으로 축방향 유동과 재순환 유동의 경계를 나타낸다. 이 점선은 재순환 영역의 순환 중심을 지나며 재순환 영역의 크기를 짐작할 수 있다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 수렴형 벤츄리의 경우 벤츄리 끝단에서 3.2cm 부근부터 재순환 유동 영역이 길게 형성됨을 볼 수 있다. 직선형 벤츄리의 경우 출구 안쪽에서부터 재순환 유동 영역이 존재하고 있으며, 수렴형 벤츄리의 경우보다 더 빨리 재순환 유동 영역이 끝나고 있음을 짐작할 수 있다. 발산형 벤츄리의 경우, 직선형 벤츄리의 경우보다 출구 안쪽에서 재순환 영역이 더 폭넓게 존재하고 있으며, 19cm에서 축방향 유동과 재순환 유동의 경계가

발견되는 점으로 미루어보아 벤츄리 끝단 각도가 커짐에 따라 재순환 영역이 출구에 가깝고 길이가 짧은 것을 알 수 있다. 그리고 직선형 벤츄리의 경우 내부 재순환 영역이 출구 면적의 약 58.6%를 차지하고 있으며, 발산형 벤츄리의 경우는 62.8%를 차지하고 있다.

Fig. 5(a), Fig. 5(b), Fig. 5(c)의 왼쪽은 난류 운동 에너지의 강도를 나타내는데, 벤츄리 끝단 각도가 작아짐에 따라 난류강도가 커지고, 수렴형 벤츄리의 경우에서 가장 강한 것을 볼 수 있다. 수렴형 벤츄리의 경우 지속적으로 수축되는 출구 형상으로 인하여 스윙컵 내부에서부터 첫 번째 스윙러와 대부분의 공기가 유입되는 두 번째 스윙러 간의 강한 전단층이 형성되므로 난류 운동 에너지가 가장 큰 분포를 보이고 있으며, 특히 벤츄리 끝단에서 큰 값을 나타내고 있다. 그리고 가장 빠른 출구 속도로 인하여 재순환 유동이 출구에서 가장 멀리 형성되고, 두 유동 간의 전단층으로 실질적으로 점화가 일어나는 출구 근처에서 가장 강한 난류강도를 보이고 있으므로 점화 성능이 가장 뛰어나리라 생각된다. 또한 축방향 유동과 재순환 되는 유동의 경계에서 어느 정도 난류 강도가 분포하고 있음을 알 수 있다. 난류 강도가 큰 지점에서는 연료와 공기의 혼합을 증대시켜 활발한 연소를 일으키고 유동장을 균일하게 하여 연소 효율을 높일 수 있으리라 판단된다.

Fig. 6은 재순환 강도의 차이를 정량화하기 위해서 축방향에 따라 각 경우에 대하여 유입되는 공기 유량과 재순환되는 유량의 비율 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 두 번째 벤츄리의 끝단 각도가 커질수록 출구 근처에서 재순환되는 유량이 훨씬 많으며, 수렴형 벤츄리의 경우 12.5cm 이후 다른 경우들보다 재순환되는 유량이 많음을 알 수 있었다. 그리고 세 경우 모두 재순환 유동의 순환 중심인 10cm 부근에서 최대값을 나타내고 있다. 또한 직선형 벤츄리의 경우가 수렴형 벤츄리의 경우보다 외부에서 재순환되는 유량이 많음을 알 수 있었다.

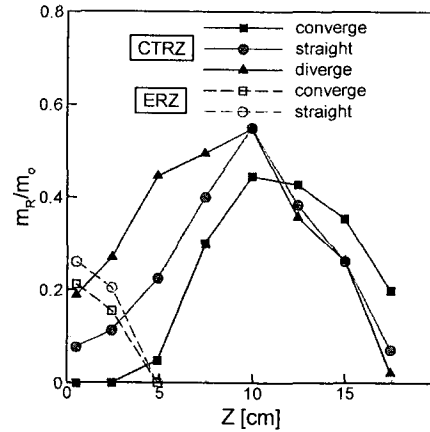


Fig. 6 Recirculation strength m_R/m_0

3.2 분무 특성

Fig. 7은 스윙컵 형상의 영향과 관계없이 일반적인 스윙에 의한 미립화 특성을 보여주기 위해서 출구로부터 같은 위치에서 pressure swirl type 노즐만 분사하였을 때와 똑같은 노즐에 대해서 스윙컵이 있을 때의 SMD 분포를 나타내고 있다. 스윙이 있을 경우, $Z=5\text{cm}$ 에서 중심부에서의 SMD는 Hollow cone 노즐의 특성상 노즐만 분사한 경우보다 크지만 반경 방향으로 큰 차이가 없이 일정함을 알 수 있다. 또한 Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 좀더 하류로 내려갈수록 스윙이 있는 경우의 SMD가 점점 작아져서 중심부에서도 노즐만 분사한 경우와 거의 비슷해짐을 알 수 있었다. 이와같은 현상은 스윙이 있을 경우, 노즐로부터 분사된 연료 액적들이 우선 벤츄리 벽면에 충돌하여 따라 흘러내리면서 서로 다른 방향으로 선회하는 스윙러로 유입된 공기들의 공기역학적 힘에 의해 분열되므로 pressure swirl type 노즐의 특성이 나타나지 않으며, 강한 난류 현상에 의해서 스윙이 없는 경우보다 액적의 크기가 균일해지며 강한 원심력에 의해 분무 단면에서 액적의 분포 또한 균일해진다.

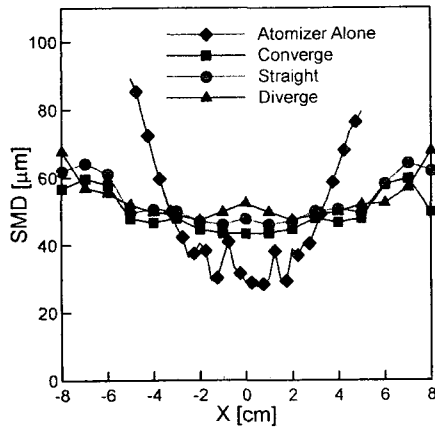
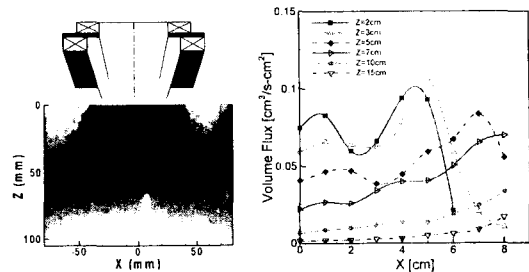
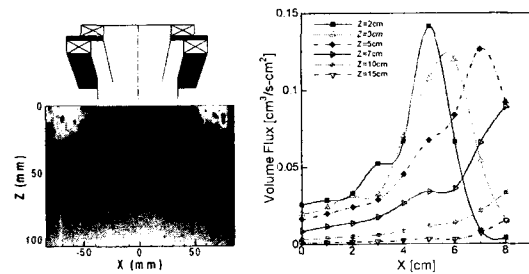


Fig. 7 Swirl effect on SMD compared with atomizer alone (Z=5cm)

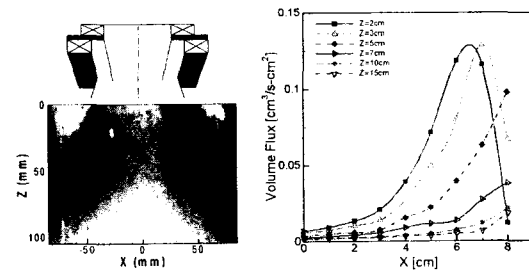
Fig. 8은 평면 이미지 기법과 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 이용하여 두 번째 벤츄리 끝단 각에 따른 질량 분포와 질량 플럭스의 변화를 보여준다. 분무된 액적들은 곧바로 라이너로 유입될 수도 있지만, 본 실험에 사용된 pressure swirl type 노즐은 약 80°의 분무각을 갖도록 분사되므로 대부분의 액적들은 우선 첫 번째 벤츄리 벽면에 충돌하여 얇은 막을 형성하게 된다. 그리고 첫 번째 벤츄리 벽면을 따라 흘러내리는 연료들은 대부분의 공기가 유입되는 두 번째 스윌러와의 전단 응력으로 인한 공기 역학적 2차 미립화에 의해서 분열되는 메카니즘을 가진다[10]. 수렴형 벤츄리의 경우, 두 번째 벤츄리 형상에 의한 중심 방향으로의 강한 운동량과 스윌 유동의 원심력 때문에 분무가 위치한 단면에서 비교적 균일한 분포를 보여주고 있다. 반대로 발산형 벤츄리의 경우, 중심 방향의 운동량 영향보다 상대적으로 큰 액적들이 출구 형상의 팽창과 스윌에 의한 원심력의 영향으로 가장자리로 퍼져나가고 있다. 두 측정기법으로 얻어진 각 축방향 위치의 질량 플럭스 총합이 분무 유량에 크게 미치지 못하는데, 이것은 연소 현상이 없는 cold test이므로 분무된 연료들이 연소기 벽면을 따라 흘러내리기 때문으로 판단된다.



(a) Converging



(b) Straight



(c) Diverging

Fig. 8 Axial mass distributions using planar image technique and PDPA

Fig. 9는 PDPA를 이용하여 측정된 축방향 Z=2cm, 4cm, 7cm, 15cm지점의 반경 방향 SMD 분포를 나타낸 그림이다. 출구에 해당하는 Z=2cm에서는 중심 부근의 SMD는 세 경우 모두 약 45~55μm 정도로 큰 차이가 없지만 큰 액적들의 원심방향 관성력으로 인하여 반경 방향으로 갈수록 수렴형이나 발산형 벤츄리의 경우에서 액적의 크기가 증가되고 있음을 볼 수 있다.

Z=4cm에서는 세 경우에 대한 SMD 분포 차이가 드러나고 있다. 수렴형 벤츄리의 경우에서 약 45 μm 의 가장 작은 SMD 분포를 보이고 있고, 발산형 벤츄리의 경우에서 약 56 μm 의 가장 큰 SMD 분포를 보이고 있다. Z=7cm에서는 수렴형과 직선형 벤츄리 경우에서 중심부근에서 SMD가 오히려 증가하는 현상이 발견되는데, 이는 크기가 아주 큰 액적들은 관성력이 충분히 크기 때문에 재순환되는 유동의 흐름을 따르지 않고 Fig. 8에서 보는 바와 같이 Z=5~6cm 부근에서 라이너 벽면에 부딪혀 흘러내리고 상대적으로 중심부근에서는 Z=4cm에 비해 강한 재순환 유동의 영향으로 큰 액적들의 검출 빈도가 높아졌기 때문이라고 짐작된다. Z=15cm에서는 세 경우 모두 SMD가 점차 작아짐을 볼 수 있다.

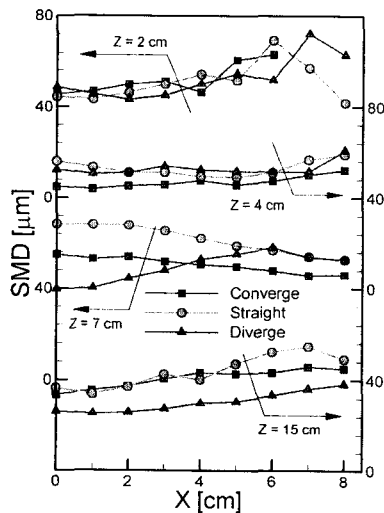


Fig. 9 SMD distributions along axial direction in three cases

4. 결 론

평면 이미지 기법과 PDPA, PIV 기법을 이용하여 가스터빈 연소기의 스월컵 형상, 특히 두 번째 벤츄리의 끝단 각이 바뀔 때 유동 및 분무 특성에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 스월이 있는 경우, 스월이 없는 경우에 비하여 분무 단면에서 액적의 크기 및 분포가 균일하였다. 그리고 분무 단면의 평균 SMD는 감소하는 경향을 보였다.
- 2) 두 번째 벤츄리의 끝단 각이 다른 세 경우 모두에서 내부 재순환 영역과 외부 재순환 영역의 2개의 재순환 영역이 존재하였다. 직선형, 발산형 벤츄리의 경우, 내부 재순환 영역이 출구 안쪽까지 존재하였지만 수렴형 벤츄리의 경우, 출구 3cm 부근부터 내부 재순환 영역이 존재하였다. 그리고 내부 재순환 영역의 크기는 발산형 벤츄리의 경우에서 가장 작았으며, 수렴형 벤츄리의 경우에서 가장 크게 형성되었다.
- 3) 수렴형 벤츄리의 경우, 분무 단면에서 연료 질량이 비교적 고르게 분포하였으나 발산형 벤츄리의 경우, 연소기 벽면 근처에 연료 질량이 집중된 결과를 보였다. 그리고 분무 액적의 크기는 큰 차이는 없었으나 스월리간의 강한 전단층에 의하여 수렴형 벤츄리의 경우에서 가장 작았다.
- 4) 재순환 영역의 위치 및 크기로 판단할 수 있는 화염의 안정화 면에서는 발산형 벤츄리의 경우가 가장 우수할 것으로 판단되지만, 수렴형 벤츄리의 경우에서 가장 작고 균일한 크기의 액적들이 측정되었고, 내부 재순환 영역이 연소기 내에 길게 형성된 점으로 고효율, 저공해 연소기로는 수렴형 벤츄리의 경우가 적합하리라 판단된다.

참 고 문 헌

1. Syred, N., and Beer, J. M., *J. Combust. Flame*, Vol. 23 pp.143~201, 1974.
2. Arthur H. Lefebvre, "Gas Turbine Combustion", Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
3. Wang, H. Y., McDonell, V. G., Sowa, W. a., and Samuelsen, G. S., *ASME J. Eng. For Gas Turbines and Power*, 115:453-460

- (1993).
4. Takashi Terasaki, and Shigeru Hayashi, *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1996, pp. 2733-2739.
 5. Ateshkadi, A., McDonell, V. G., and Samuelsen, G. S., *Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1998, pp. 1985-1992.
 6. McDonell, V. G., Arellano, L., Lee, S. W., and Samuelsen, G. G., *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1996, pp. 2725-2732.
 7. Wang, H. Y., McDonell, V. G., Samuelsen, S., "Influence of Hardware Design on the Flow Field Structures and the Patterns of Droplet Dispersion : Part 1 - Mean Quantities", *Transaction of the ASME*, Vol. 117, 1995.
 8. Talley, D. G., Verdick, J. F., Lee, S. W., McDonell, V. G., and Samuelsen, G. S., "Accounting for laser Sheet Extinction in applying PLLIF to Sprays," *AIAA-96-0469*, 1996.
 9. Gupta, A. K., Lilley, D. G., and Syred, N., *Swirl Flows* (1st ed), *Abacus Press*, Ohio, 1984.
 10. Jong-Hoon Park, Sang-Soon Hwang, Youngbin Yoon and In-Seuck Jeung, "Effect of Swirl Cup on Characteristics of Fuel Spray in Gas Turbine Combustors", *36th AIAA Joint Propulsion Conference*, Jun 2000.