제22회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집 pp. 180~186

CARS 장치를 이용한 터빈 연소 시험기의 화염 온도 측정

박철웅**· 이종호*· 한영민***· 고영성***· 이강엽***· 김형모***
이수용***· 양수석***· 이대성***· 장영준*· 신현동****· 한재원**

CARS thermometry in flame zone of turbine combustor sector rigs.

C.W.Park, J.H.Lee, Y.M.Hahn, Y.S.Ko, K.Y.Lee, H.M.Kim, S.Y.Lee
S.S.Yang, D.S.Lee, Y.J.Chang, H.D.Shin and J.W.Hahn

Key Words: CARS, Turbine combustor, Pattern factor, Recirculation zone etc.

Abstract

Spatially and temporally resolved gas temperature measurements have been made in aeroengine combustor sector rig burning standard kerosene fuel. Temperature PDFs have been obtained from a triple-sector double annular combustor rig running at simulated ground idle conditions, showing features of flow mixing within the burning rig. Mean temperature and temperature PDFs were measured by CARS to investigate flow characteristics of the recirculation zones.

기호설명

Ti , Pi : 입구공기 온도, 압력

$\dot{m}_T$: 입구공기 전체유량

FN : 노즐 flow number

θ : 노즐 cone angle

m_f : 노즐 연료유량

* 부산대학교 기계공학과
** 한국 표준과학연구원
*** 한국 항공우주연구원
**** 한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

가스터빈 연소기는 증가하는 에너지 수요와 환경에 대한 관심이 고조됨에 따라, 많은 기업과 정부에서는 오염물이 적게 배출되면서 여러 가지 에너지 수요에 맞출 수 있는 저렴하고 깨끗한 동력 제공 장치로 개발되고 있다.[1] 미래의 가스 터빈 시스템에서 요구되는 대표적인 사항으로는, 높은 효율, 적은 배기 배출

물, 저 비용, 석탄과 바이오매스 시스템에의 적용성 등을 들 수 있다. 이들 중 앞으로 가장 우선적으로 연구되고 개발되어야 할 부분으로 첫째, 배기 특성을 포함하는 연소 최적화와 둘째, 연소특성과 칭정기술을 포함하는 터빈 시스템의 개발을 들 수 있다.[2]

가스 터빈 연소에 관한 연구에 있어 가장 중요한 목표중의 하나는 배기물 저감시키고, 연소효율 및 안정성을 향상 시키는 것이다. 특히 가스터빈 연소기의 재순환 영역에서의 온도와 온도 균일도는 연소의 착화와 화염 안정성에 큰 영향을 준다. 최근에는 연소후 오염물 배출을 감소시키고 연소 효율을 향상시키기 위하여 여러 가지 형태의 재순환 영역이 여러 가지 당량비에서 시도되고 있다. 특히 연소의 안정정 및 연소기의 길이를 짧게 하고, 분사되는 연료의 기화를 좋게 하기 위하여 재순환영역을 연료노즐 가까이 설치하였다.[3] 보통 재순환 영역은 유동을 LDV로 측정의 방법으로 크기 등을 정의하나, 실제 연소가 존재하는 경우에는 유동장의 형태가 연소후 고온가스에 의한 부력등에 의해 크게 달라지므로 직접 화염온도를 측정하여 온도 분포를 알아보는 것이 매우 중요하다. 또한, 난류연소 중에서 온도의 피크값에 관한 정보는 연소과정의 설계향상에 있어 아주 유용한 정보로 이용될 수 있다. 예를 들어, thermal NOx의 경우 온도에 지수 함수적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 요구에 부응하기 위해서는 실용 화염에서 화염온도를 정확하게 측정할 수 있는 기술이 절실히 요구되어 지는데, 본 연구에서는 CARS 기술을 이용하여 실제 항공용 엔진을 모사한 연소기내의 온도를 측정해 보았다. CARS 기술은 매우 정확한 화염온도 측정기술중 하나[4]로 가스터빈 연소 장치에서 여러번의 측정[5][6][7][8][9]으로 장치의 안정성 및 정확성이 검증되었다.

2. 실험 장치

2.1 터빈연소 장치

그림.1에 본 실험에 사용된 triple sector 장치의 선회기의 개략도가 나타나

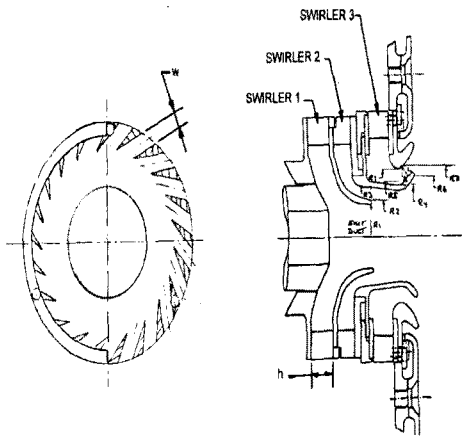


그림1. 8AFR 모듈의 선회기 개략도

있다. 그림의 AFR의 공연비를 나타낸다. 연소기는 전체 환형 연소기의 1/10(36°)에 해당되는 것으로, 3개의 반경방향 선회기와 1개의 prefilmer를 가지고 있다. 여기에서 사용한 prefilmer의 형상조건은 그림2 에서 보는 바와 같이 4가지 형태로 변경할 수 있다. 그림.3은 실제로 설치된 연소기의 장치의 모습을 보여 주고 있다.

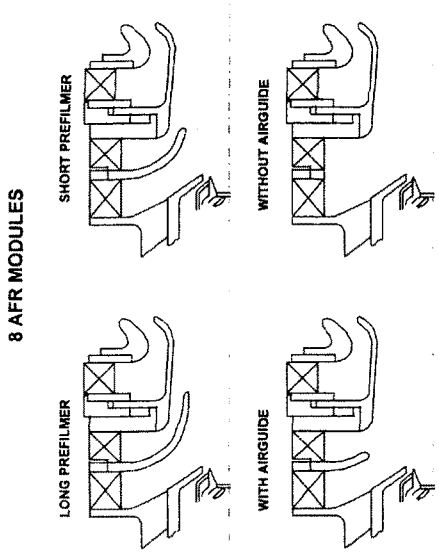


그림2. 8AFR 모듈의 기하학적인 형상

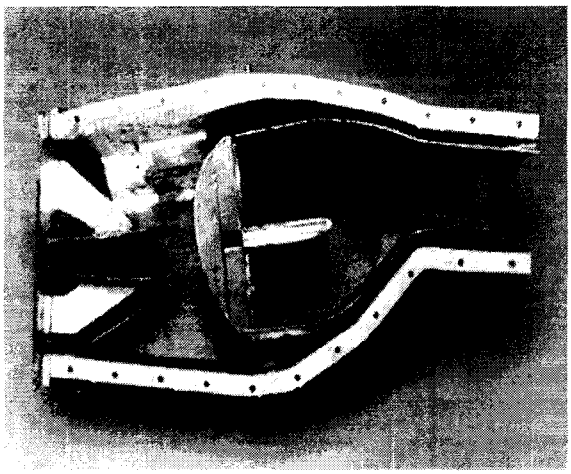


그림 3. 8AFR의 Triple Sector 연소기의 구성요소 사진

2.2 CARS 장치

본 실험에 사용된 이동형 CARS 시스템의 개략도를 그림4에 나타내었다. 광대역 이동형 CARS 장치에 사용되는 Nd: YAG 레이저의 이차 고조파는 펄스당 에너지가 최대 200mJ이고, 펄스폭은 7~8 ns이며, 반복도는 10Hz이다. Nd: YAG 레이저의 이차 고조파의 에너지의 대부분은(<80%) 무모드 색소레이저의 펌핑에 사용된다. 나머지는 광 분할기와 반사거울을 거쳐 두 개의 펌프 광으로 나뉘어서, 무모드 스톡스광과 함께 folded boxcar 위상정합을 하게 된다.

터빈장치 앞의 최종 광학부품은 집속렌즈로, 창사이의 거리가 480mm이므로 초점거리가 300 mm 인 렌즈를 사용하였다. 신호가 발생하는 영역의 길이는 2 mm 이다.

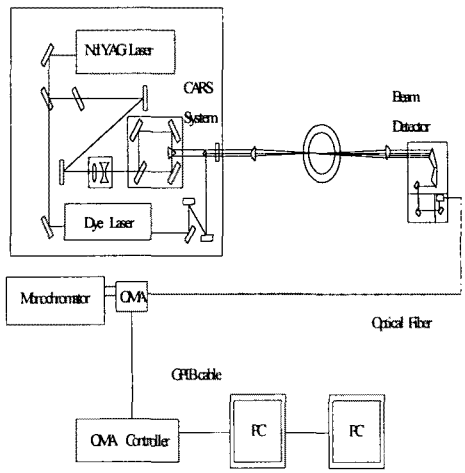


그림 4. 광대역 CARS 장치

3. 실험 조건 및 결과

3.1. 실험 조건

연소기의 입구조건에 대해 먼저 살펴보면, 유입되는 공기의 입구온도 $T_i = 530\,K$, 압력은 3.2 bar이다. 공기의 전체 질량유량 $\dot{m}_T$는 1.77 kg/s로서 이중 0.47 kg/s는 창을 냉각시키는데 사용되어 지며, 나머지 1.3 kg/s만이 연소에 사용되어진다. 연료의 질량유량은 12.2

g/s 로서 전체 공연비(AFR)는 228이다. 실험에 사용된 노즐은 flow number(FN)가 2.7이고, cone angle θ는 55도이다.

실험은 스월유동의 방향과 prefilmer의 형상을 실험변수로 하여 각각에 대하여 연소기내부의 온도장을 계측하였다. 스월유동은 세 개의 스월러중에서 3번 스월러의 방향을 1,2번과 같게 한 경우(동축스월)와 반대방향으로 한 경우(대향류 스월)로 나뉘어 지는데, 이들 각각은 재순환영역의 위치와 크기등 연소기내의 유동패턴이 많이 다를 것으로 예상되어 실험변수로 채택하였다.

또한 액적의 break-up mechanism에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 prefilmer의 형상을 달리하여 주위 공기와 분사되는 연료가 만나는 시간을 달리함으로써 액적의 공간분포가 가장 다를 것으로 예상되는 prefilmer의 형상에 대하여 실험을 행하였다.

이를 정리하면 아래 표.1과 같다.

표 1 실험조건

	스월 형태	Prefilmer 형상
Test 1	동축 스월	without airguide
2		short
3	대향류 스월	without airguide
4		short

또한 각각의 경우에 대한 측정점의 위치를 설명하면 다음과 같다.

연료 인젝터를 기준으로 축방향으로는 center line에 대하여 5mm 간격으로 12 지점에 대하여 측정하였으며, 반경방향으로는 노즐 팁에서 각각 3cm, 6cm 떨어진 지점에서 5mm 간격으로 9 지점씩 측정함으로써 재순환 영역에서의 온도측정의 타당성을 검증하고자 하였으며 출구단에 가까운 지점에서의 온도분포를 파악함으로써 연료-공기 혼합과의 관계를 관찰해 보았다.

3.2. 실험 결과

실험조건의 test 1번 조건에서 측정한 위치와 결과가 그림5, 6에 있다. 측정위치는 그림.5에 노즐 팁으로부터 3cm 떨어진 측정라인에서의 온도 확률분포함수(PDF)를 측정하였다. 측정된 PDF 결과중 모양이 상이한 대표적인 7개의 결과가 그림 6에 있다. 연소기 하단부분에서는 벽에서 나온 냉각 공기 때문에 낮은 온도 분포가 측정되다가 연료노즐과 가까워지면 온도가 증가하는 분포를 보인다. 노즐근처에서는 공기와 혼합되지 않고 액체 상태의 연료의 존재 때문에 온도가 급격하게 감소하는 분포를 보이는데, 그림 6의 R=-6 mm 처럼 공급해주는 공기온도보다도 낮은 결과를 보이고 있다. 노즐근처를 지나면 센터라인에서 위로 멀어질수록 공기의 주유동방향과 노즐이 약간의 기울기를 가지고 위방향으로 향하고 분사하고 있기 때문에 연료와 공기의 혼합이 증대되어 높은 온도의 화염이 형성되고 있음을 알 수 있다.

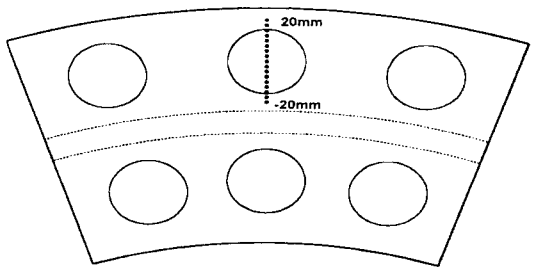
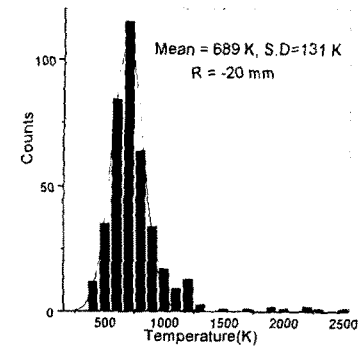
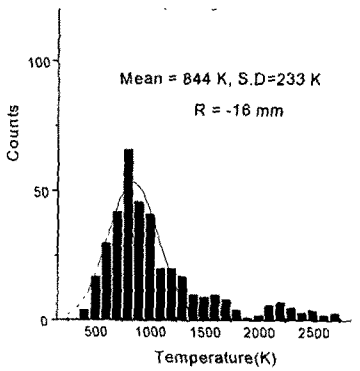
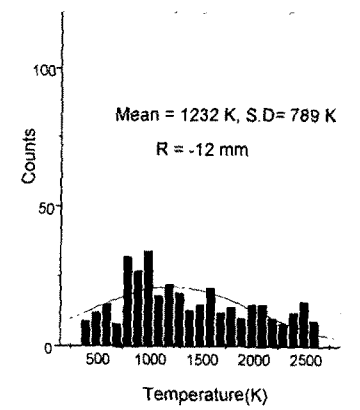
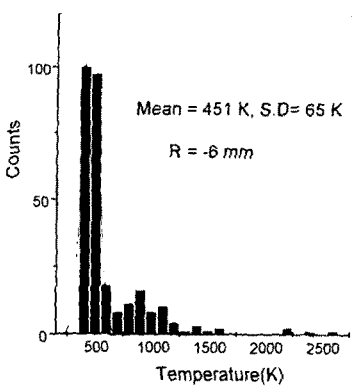


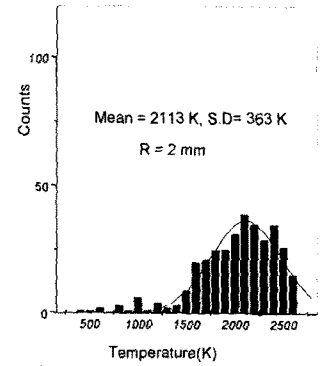
그림 5. 측정 위치와 온도 분포 함수 측정 결과

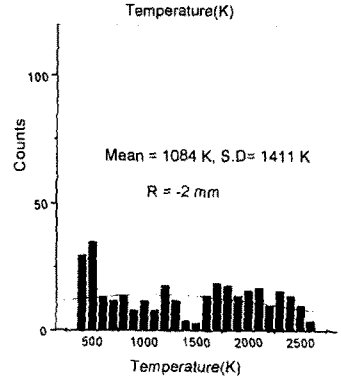












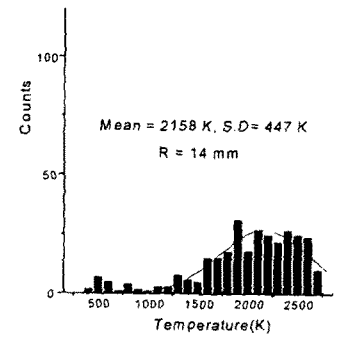


그림 6. 온도 분포함수 측정결과

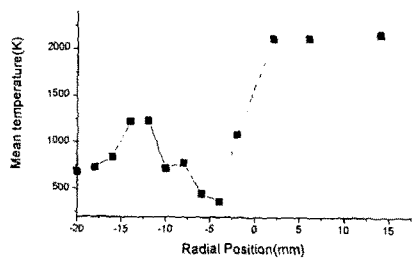


그림 7. 평균온도 측정결과

그림 7. 에 각 측정점에서의 가우스 분포를 가정하고 구한 평균온도를 나타내었다. 센터라인을 기준으로 아래지역에서는 687 ~ 844 K 범위의 낮은 온도를 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 벽에서 공급되는 공기의 냉각효과에 의해 온도가 비교적 낮다. 노즐근방에서는 근방에서는 평균온도가 451 ~ 370 K근처로 떨어지는데, 이것은 분무되는 연료에 의한 냉각효과가 측정된 것이며, 특히 이 지역은 온도맞춤결과 오차가 너무 커서 온도를 구할 수 없는 결과가 많아지는데, 이것은 액적 상태로 존재하는 연료에 의하여 입사하는 레이저의 간섭이 증가했기 때문이다. 노즐 중심에서 위 방향으로 15 mm정도 떨어진 부근 영역에서는 2100K이상의 아주 고온을 나타내는데 이는 국소적으로 공기-연료의 혼합정도(mixing degree)가 아주 높을 것으로 예상된다.

측정결과로 보면 노즐양쪽으로 재순환영역이 존재하고 있음이 예상되고, 재순환영역의 크기 등은 보다 자세한 측정을 통하여 알아 낼 수 있을 것이다.

4. 결론

상기 결과로부터, CARS 기술은 실제 가스 터빈연소기내의 연소와 내부혼합특성을 이어주는 유용한 도구라는 것을 다시한번 확인할 수 있었다. 측정결과 가스터빈 연소기의내부에서 화염온도 분포를 측정할 수 있었으며, 재순환 영역에서의 온도와 온도 균일도를 CARS 기술을 이용하여 측정할 수 있음을 알았다. 아울러, 연소기 출구에서의 온도를 측정하면 출구에서의 온도 비균일도를 나타내는 파라미터로 pattern factor를 알 수 있는데, 이는

$$PF = \frac{T_{peak}}{T_{ave}} - 1$$ 로 정의된다.

연소기 출구에서의 온도를 측정함으로써 PF를 줄일 수 있는 연소기 설계에 유용한 정보를 제공해 줌으로써 궁극적으로 터빈의 수명을 연장시키며 배기배출물을 줄일 수 있는 동시에 엔진의 효율을 향상시킬 수 있다. 이와같이 CARS기술로 측정된 가스터빈 연소기의 화염온도는 연소기의 성능을 평가하고 해석하는데 유용하게 사용될 수 있다.

참고문헌

(1) Arthur H.Lefebvre, "Gas turbine combustion" 2nd ed. (1998)

(2) V.G. McDonell, G.S. Samuelsen, "Measurement of fuel mixing and transport processes in gas turbine combustion" Meas.Sci.Technol. vol.11 pp.870-886 (2000)

(3) P.O.Hedman, D.L.Warren, "Turbulent velocity and temperature measurements from a gas-fueled technology combustor with a practical fuel injector", Comb. and Flame vol.100 pp.185-192 (1995)

(4) Alan C.Eckbreth, "Laser diagnostics for combustion temperature and species" (1988)

(5) A.C.Eckbreth, "CARS thermometry in practical combustors" Comb.and Flame, vol.39 pp.133-147 (1980)

(6) R.Bedue, P.Gastebois et al. "CARS temperature in a simulated turbo-

machine combustor" Comb.and Flame, vol.57 pp.141-153 (1984)
(7) W.Stricker, W.Meier, "The use of CARS for temperature measurements in practical flames" Trends in Appl. Spectroscopy vol.1 pp231-260, (1993)
(8) S.E.Schmidt, P.O.Hedman, "CARS temperature and LDA velocity measurements in a turbulent, swirling, premixed propane/air fueled model Gas turbine combustor", ASME 95-GT-64 (1995)
(9) J.D.Black, H.T.Brocklehurst, C.H. Prid -din, "Non-intrusive thermometry in liquid kerosene fueled combustor sector rigs using CARS and comparison with CFD temperature predictions" ASME 96-GT-185 (1995)