

CARS 장치를 이용한 가스 터빈 연소기의 연료노즐 근처 화염 온도 분포 변화측정

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

Measurement of Temperature Probability Density Functions Variation in a Flame Near Fuel Nozzle of Gas Turbine Combustor Sector Rigs by CARS Thermometry

Chul Woung Park*, Jong Ho Lee**, Yeoung Min Han***,
 Young Sung Ko***, Kang Yeop Lee***, Hyung Mo Kim***,
 Soo Yong Lee***, Soo Seok Yang***, Dae Sung Lee***,
 Chung Hwan Jeon**, Young June Chang**,
 Hyun Dong Shin***, and Jae Won Hahn*

Abstract

The probability density functions (PDF) of temperature were measured by coherent anti-Stokes Raman Spectroscopy (CARS) in flames of gas turbine combustor sector rig of an aero-engine. The combustor was operated at simulated ground idle conditions with standard kerosene fuel. Temperature PDFs had been measured near fuel nozzle with change of rotation of a swirler and existence of a prefilmer. The characteristic features of temperature PDFs showed the variation of combustion configurations at four experimental conditions. Without a prefilmer, large recirculation of high temperature gas was expected in the co-flow condition and unvaporized fuel fragments were detected in the counter-flow condition. With a prefilmer, the enhanced mixing increased combustion intensity near fuel nozzle in the counter-flow condition and the flame was attached far from the fuel nozzle in the co-flow condition.

Key Words: CARS, Gas turbine combustor, Probability density function.

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

1. 서론

가스터빈 연소기는 증가하는 에너지 수요와 환경에 대한 관심이 고조됨에 따라, 오염물이

적게 배출되면서 여러 가지 에너지 수요에 맞출 수 있는 효율적인 동력 제공 장치로 개발되고 있다[1]. 최근 가스 터빈 연소에 관한 연구에 있어 가장 중요한 목표는 배기 오염물을 저감시키고, 연소효율 및 안정성을 잃지 않으면서 넓은 범위의 운전조건을 만족시키는 것이다[2]. 보통 가스터빈 연소기에서 연소를 안정시키고 화염 길이를 짧게 하기 위하여 스윙유동을 이용한다. 연소기에서 스윙 유동이 생기면 차가운 공기는 반경방향으로 바깥쪽으로 나가고 화염 후류의 뜨거운 공기가 안쪽으로 흘러 들어와 재순환 영역을 만든다. 재순환 영역은 화염 후류의 고온 공기를 노즐 근처로 공급하여 혼합기를 예열하고, 안정적으로 착화 시키는 역할을 한다. 따라서 가스터빈 연소기의 연소 효율의 최적화와 화염안정성을 위하여 가스터빈 연소기의 노즐근처에서의 화염형태의 예측은 매우 중요하다. 최근에는 연소 후 오염물 배출을 감소시키고 연소 효율을 향상시키기 위하여 여러 가지 형상의 연소실[3]과 재순환 영역의 형태[4]가 시도되고 있다.

가스터빈 연소 시험기의 노즐 근처 화염온도 측정연구의 이전 결과를 살펴보면, Schmidt[5]는 가스터빈 엔진의 연소기의 특성을 지닌 모델 연소기에서 난류예혼합 프로판 공기 화염의 특성을 LDV 와 CARS로 측정하여 당량비와 유동의 스윙수가 화염구조에 미치는 영향을 측정하였다. 특히 그는 재순환 영역의 변화에 의하여 고온의 가스를 노즐쪽으로 이동시킬 수 있음을 보였다. Hedman[4]은 실용 스윙 연소기에서 CH₄와 공기 화염의 특성을 LDV/ OH LIF /CARS기술로 측정하였는데, 그는 재순환 영역의 변화에 따른 온도장과 속도장을 측정하여 당량비와 스윙수를 변화시켜 고온영역을 노즐쪽과 벽쪽으로 이동시킬 수 있음을 보였다. Bradley[6]는 스윙 연소기에서 예혼합 CH₄ 공기 화염을 당량비와 스윙수의 변화에 따른 화염 특성의 변화를 수치해석과 CARS 측정으로 분

석하여 화염구조의 변화, NO 발생량 등을 예측하였다. Black[7] 등은 가스터빈용 연소 시험기에서 CARS를 이용하여 화염온도를 측정하고 CFD 예측결과와 비교하였다.

위의 연구결과들에 의하면 보통 노즐 근처의 화염구조는 유동의 스윙수에 따라 변하는 재순환 영역의 크기, 위치에 따라 변하게 된다. 실제 연소기에서는 여러 개의 스윙러를 동시에 사용하거나 스윙의 방향을 바꿔 공급되는 공기의 난류강도를 조정함으로써 혼합기의 공연비를 조절하려고 시도하고 있기 때문에 위의 연구결과와 같이 연료노즐 근처에서 화염구조를 쉽게 예측할 수는 없다[4]. 또한 연료노즐과 스윙러 사이에 설치되는 prefilmer는 분사되는 연료와 공기의 혼합시간을 조정하고, 연료노즐주위의 공연비에 큰 영향을 주게 된다. 따라서 가스터빈용 실용 연소기에서 스윙의 방향과 스윙러의 형상변화에 따른 노즐근처에서의 화염구조를 측정하여 고온 가스의 분포를 알아보는 것이 화염구조나 연료 노즐 근처의 공연비, 재순환 영역의 크기 등을 예측하는데 필요하다. 특히 실제 연소가 존재하는 경우에는 노즐 근처의 화염 온도분포의 정보는 화염의 안정적인 점화와 연소 후 배출가스의 온도 분포의 균일화에 필요하다. 또한 thermal NO_x의 경우 온도에 지수 함수적으로 증가하는 경향을 나타내므로 측정된 화염 온도의 최대값에 관한 정보는 연소기의 설계에 있어 유용한 기초자료로 이용될 수 있다.

본 연구에서는 가스터빈 연소기의 화염구조를 측정하기 위하여 화염온도를 정확하게 측정할 수 있는 CARS 기술을 이용하여 노즐근처 영역에서 화염온도 분포를 측정하였다. 실험에서는 실제 연소기에 사용되는 선회기에 선회방향을 변경하고, prefilmer를 설치하여 선회방향과 prefilmer의 존재에 따른 화염온도 확률밀도함수의 변화를 측정하여 연소실 노즐근처에 형성된 화염구조의 변화를 분석하였다.

2. 실험 장치 및 측정 장치

2.1. 연소시험기와 측정조건

Fig. 1은 본 실험에 사용된 가스터빈 연소기 장치의 연료노즐에 설치된 스윙 발생기의 개략도이다. 이 장치에는 3개의 반경방향 선회기와 1개의 prefilmer를 설치할 수 있다. 여기에 사용된 prefilmer는 노즐 근처에서 연료와 선회기로 공급되는 공기의 혼합되는 위치를 조정할 수 있다. 선회기의 스윙 형태는 여러 가지로 바꿀 수 있으나 본 실험에서는 Fig. 1과 같이 prefilmer가 설치된 것과 되지 않은 2가지 형태로 변경하여 실험하였다. Fig. 2는 실제로 실험에 사용된 연소기 장치를 보여 주고 있다. 연소 시험기는 가스터빈에 사용되는 전체 환형 연소기의 1/10 (36°)에 해당되는 것이다. 연소시험기에는 모두 6개의 연료노즐이 설치되어 있다. 측정 시 연소시험기의 6개 노즐 중에 위에 pilot 노즐 중 가운데 노즐에서만 연료(standard kerosene fuel)를 주입하여 연소시켰으며 유동 모양을 유지하기 위하여 다른 연료 노즐에는 동일조건외의 공기만을 공급하였다.

연소기에 유입되는 공기의 입구온도는 $T_i = 530K$, 압력은 3.2bar이다. 공기의 전체 질량유량 \dot{m}_T 는 1.57kg/s로서 이 중 0.47kg/s는 창을 냉각시키는데 사용되며, 나머지 1.3kg/s만이 연소에 사용된다. 연료의 질량유량은 12.2g/s로서 전체 공연비(AFR)는 대략 90이다. 실험에 사용된 노즐은 flow number(FN)가 2.7이고, 노즐의 분사각도 θ 는 55도이다.

실험은 스윙 유동의 방향과 prefilmer의 형상을 실험변수로 하여 각각의 경우에 대하여 연소기내부의 온도장을 계측하였다. 스윙유동은 세 개의 스윙러중에서 연소기쪽에 3번 스윙러의 방향을 1, 2번과 같게 한 경우(동축스윙)와 반대 방향으로 한 경우(대향류스윙)로 나뉘어 지는데, 이들 각각은 재순환영역의 위치와 크기 등

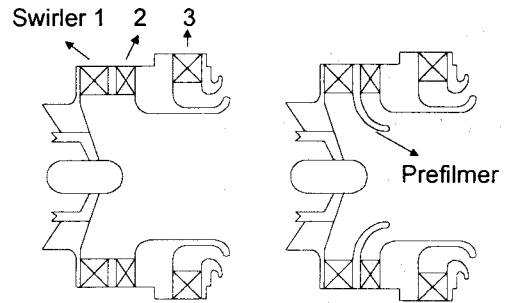


Fig. 1 Schematic diagram of the fuel nozzle swirler

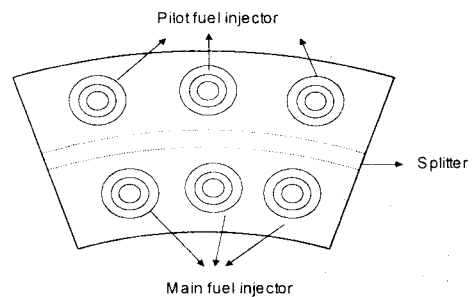


Fig. 2 Front view of the test rig of gas turbine combustor

연소기내의 유동패턴이 많이 다를 것으로 예상된다. 또한 액적의 미립화 및 분무에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 prefilmer를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우를 비교하였다. prefilmer가 설치되면 주위 공기와 분사되는 연료가 만나는 시간과 연료의 분사각도가 바뀌면서 액적의 공간분포가 크게 변할 것으로 예상된다. 실험조건을 정리하면 Table 1과 같다.

측정위치는 Fig. 3의 연소시험기의 측면 개략도에 나타내었다. 연소시험기의 연료노즐은 지면과 수직 방향으로부터 11도 기울어져 설치되어 있다. 측정위치는 이 연료 노즐의 중심을 기준으로 바깥쪽을 X1-scan, 위/아래쪽 Y1-scan, Y2-scan으로 정하였다. X1-scan으로는 5mm 간격으로 12지점에 대하여 측정하였으며, Y1-scan, Y2-scan으로는 노즐팁에서 각각 30mm, 60mm 떨어진 지점에서 상하로 4, 5mm 간격으로 11,

9 지점에서 화염온도를 측정하여 노즐부근에서의 연료-공기 혼합과의 관계를 관찰하였다.

Table 1. Experimental condition

	스윙 형태	prefilmer
test 1	동축 스윙	없음
test 2		있음
test 3	대향류 스윙	없음
test 4		있음

2. 2. CARS 측정장치

CARS 기술은 매우 정확한 화염온도 측정기술 중 하나로서[8] 가스터빈 연소 장치에서 장치의 안정성 및 정확성이 검증되었다[9-12]. 실험에 사용된 장치는 다른 논문[13] 상세하게 기술되어 있어 여기에서는 간략히 언급한다. 실험에 사용한 광대역 이동형 CARS 장치의 개략도가 Fig. 4에 있다. 광대역 이동형 CARS 장치에 사용되는 Nd : YAG 레이저의 이차 고조파는 펄스당 에너지가 최대 200mJ이고, 펄스폭은 7~8ns이며, 반복도는 10Hz이다. Nd : YAG 레이저의 이차 고조파의 에너지의 대부분은 (<80%) 무모드 색소레이저의 펌핑에 사용된다. 나머지는 광 분할기와 반사 거울을 거쳐 두 개의 펌프 광으로 나뉘어서, 무모드 스톡스광과 함께 상자형 위상정합을 하게 된다. 상자형 위상 접합으로 발생된 CARS 신호는 200 μm 직경의 광파이버를 거쳐서 단색기에 입사된다. 단색기에서 CARS신호는 다채널 광분석기에서 스펙트럼을 측정한다. 측정된 CARS신호의 스펙트럼은 Sandia code로 계산된 온도 스펙트럼과 비교하여 측정결과를 알아낸다. 측정시 연소시험기 부분은 고온공기 공급장치에 고정되어 위치를 이동할 수 없으므로 레이저 빔을 직각프리즘으로 측정위치를 변경하였다. 직각프리즘과 집속렌즈는 2축 이송대에 동시에 고정되어 측정 위치를 스캔하였다. 터빈장치 앞의 최종 광학 부품인 집속 렌즈는 창 사이의 거리가 480mm 이므로 초점거리가 300mm인 렌즈를 사용하였

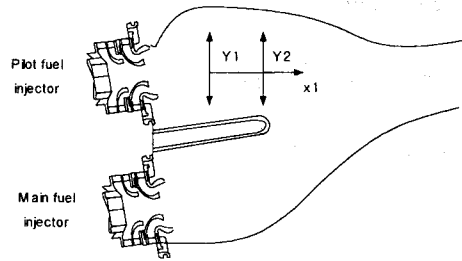


Fig. 3 Side view of the test rig of gas turbine combustor and measuring position of CARS

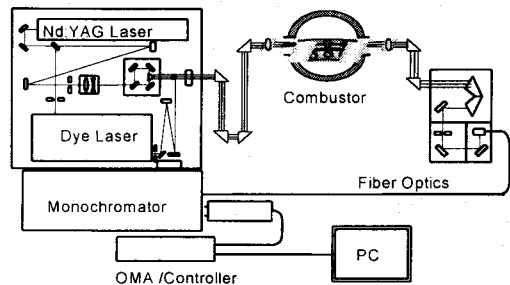


Fig. 4 Schematic diagram of the broadband CARS system

다. 신호가 발생하는 영역의 길이는 약 3mm 이다. 측정시 500번 단일 펄스신호를 측정하여 각 신호에서 측정온도의 확률밀도함수를 구하였다.

3. 실험결과

실험조건 중 test 1 조건에서 측정한 결과가 Fig. 5에 있다. 노즐의 중심을 원점으로 하여 X 방향으로 30mm, 60mm 떨어진 Y1, Y2 위치에서 측정한 결과와 X1 위치에서 측정한 결과이다. PDF 결과의 최대값은 200 이고, 온도 축은 200K- 2800K 이다. Y1 위치에서의 측정결과와 Y2 위치에서의 측정 결과를 보면 Y= -4mm 근처에서 온도가 낮고, 윗 부분과 아래부분에서 고온이 측정되었다. Y1 위치에서는 아래쪽보다는 위쪽에서 고온이 관찰되고, Y2 영역에서는 양쪽 모두에서 고온이 비슷하게 관찰된다. X1

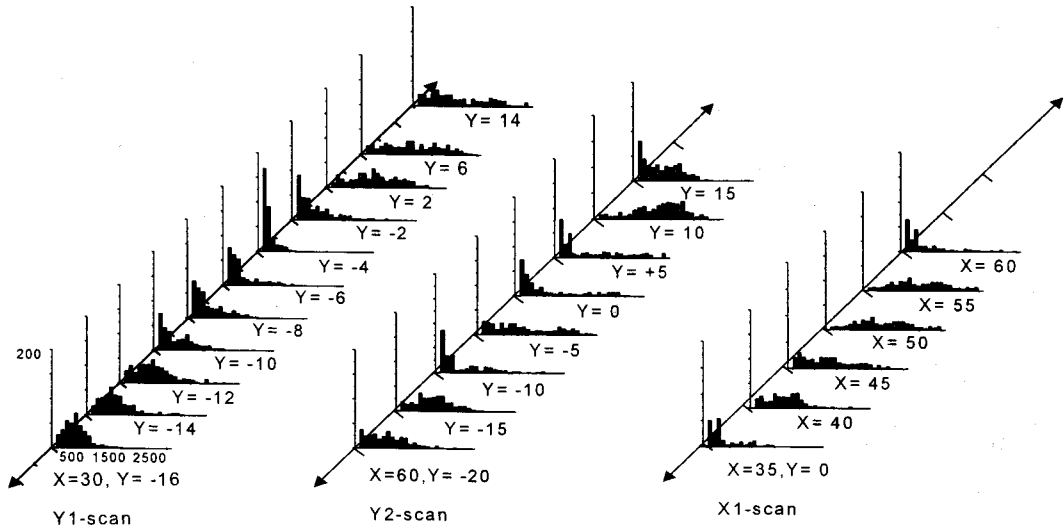


Fig. 5 CARS temperature PDFs of the co-flow without prefilmer condition

위치에서의 결과를 보면 $X=55\text{mm}$, 60mm 에서 고온가스가 측정되었고, 그 안쪽에서도 부분적으로 고온가스가 측정되었다. 따라서 이 경우에는 연료노즐에서 분사된 연료가 전형적인 콘형태의 스웰 유동에 의한 화염 형태를 보이고 있고, 재순환에 의해 고온가스가 노즐쪽으로 공급되고 있음을 알 수 있다. 이 경우 연료노즐에 설치된 스왈러에 스왈의 방향이 모두 같기 때문에 노즐근처에서는 연료와 공기의 혼합도가 낮아서 연소강도가 떨어지거나 재순환의 세기는 강하기 때문에 재순환으로 공급되는 고온공기가 뚜렷하게 측정되고 있다.

Fig. 6에 test 2의 결과가 있다. 이 경우 PDF 결과의 최대값은 300이고, 온도축은 200K - 2800K 이다. 이 경우에는 전반적으로 측정 영역 내에서 고온이 거의 관찰되지 않는데, 이는 스왈의 방향이 모두 같아서 연료와 공기의 혼합이 낮은 상태이고, prefilmer가 설치되어 연료의 분사 각도가 감소하여 노즐주위에서는 거의 연료의 액적만 존재하고 있기 때문에 연소강도가 매우 낮고 고온 공기의 재순환도 노즐 근처까지 영향을 미치지 못하여 주로 저온만 측정되는 것으로 판단된다. Y1과 Y2의 측정결과를 보면 이 경우

도 test 1 경우와 마찬가지로 연료노즐의 중심에서 멀리 떨어진 곳에서 고온이 조금 관찰되고 있다. X1의 결과로 보면 노즐에서 떨어질수록 고온부분이 증가하고 있고, 위의 test 1의 경우와 마찬가지로 $X=55\text{mm}$, 60mm 에 고온영역이 조금씩 측정되는 것으로 보아 재순환이 발생하고 있음을 알 수 있는데, 연소 강도가 낮고, 재순환에 의해 공급되는 가스의 온도도 낮기 때문에 화염이 연료노즐에서 멀리 떨어져서 형성되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7의 test 3의 결과이다. 이 경우 PDF 결과의 최대값은 200이고, 온도 축은 200K - 2800K 이다. 이 결과를 보면 Y1 Y2 위치에서 아래쪽에서는 조금 낮은 온도값을 가지나 위쪽에서는 고온과 저온이 공존하는 결과(bi-modal)를 보이며, 상당히 넓은 영역에서 고온영역이 존재하고 있음을 알 수 있다. 이 경우에는 Y1지역에서도 상당히 넓은 영역에서 고온이 측정되는 것으로 보아 3번 스왈러의 방향이 반대로 설치되어 스왈러를 통과한 유동이 서로 부딪혀서 깨어지면서 난류강도가 증가하여 연료와 공기가 노즐근처에서도 잘 섞여서 연소하여 고온이 노즐근처에서도 상당히 넓게 존재하고 있다. X1

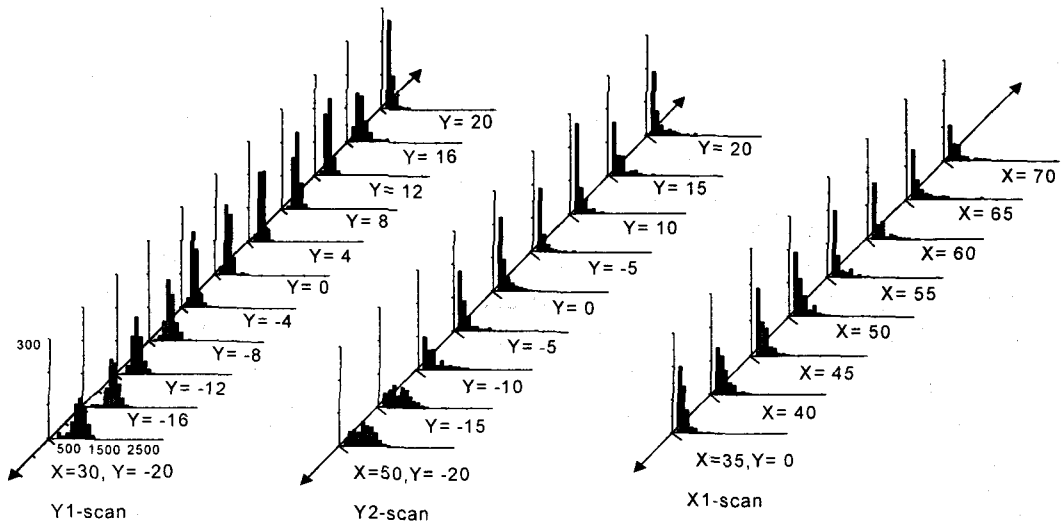


Fig. 6 CARS temperature PDFs of the co-flow with prefilmer condition

의 측정결과를 보면 X=35mm - 55mm 지역에 부분적으로 온도가 아주 낮은 부분이 측정되었는데, 이것은 노즐에서 분사되는 연료 액적의 크기를 감소시켜 무화를 돕는 prefilmer가 설치되지 않아서 노즐에서 분사한 연료 액적이 무화되지 않고 측정된 것으로 판단된다. CARS 측정결과를 보면 이부근의 비공명 상수(질소분자 이외의 분자 농도에 비선형적으로 비례하는 값)가 매우 크게 측정되는 것으로 보아 분사된 연료의 액적이 측정된 것으로 판단된다. 또한 이 경우는 counter-flow의 경우이기 때문에 스윙 유동의 세기가 co-flow의 경우보다 작아서 재순환의 세기도 작음이 X1 위치의 측정결과로 알 수 있다.

test 4의 결과가 Fig. 8에 있다. 이 경우 PDF 결과의 최대값은 200 이고, 온도 축은 200K-2800K 이다. 이 경우 Y1에서는 아래에서는 저온이 측정되나 위쪽에서는 고온이 측정되고, 노즐의 중심에서는 저온이 측정된다. 그러나 Y2에서는 전체적으로 고온이 측정되고 있다. X1의 결과를 보면 X=55mm, 60mm, 65mm에서 고온과 저온이 동시에 측정된다. 이 경우의 측정 결과를 보면 전반적으로 고온부분의 위치 등

이 test 1의 결과와 비슷한데, 스윙 방향의 변화에 의한 난류강도의 증가에 의한 온도 상승 효과가 prefilmer에 의한 노즐 근처의 연료 액적의 농도 증가에 따른 온도 감소 효과와 상쇄되어 고온영역이 노즐 근처에는 접근하지 못하고 있다.

위의 결과를 살펴보면 스윙 방향에 의한 난류강도의 조정과 prefilmer에 의한 노즐근처의 연료농도의 조정을 통하여 노즐근처의 고온가스의 분포가 크게 달라짐을 알 수 있다. prefilmer가 없는 경우 분사되는 연료의 분사각이 넓어지고, 노즐근처에서 연료와 공급공기의 혼합이 증대되어 노즐근처에서 고온이 측정된다. co-flow의 경우에는 재순환에 의한 고온공기의 유입이 활발하고, counter-flow의 경우에는 난류강도의 증가에 의한 효과에 의해 노즐 근처에서 상당히 균일한 연소가 가능하였으나 연료의 무화를 돕는 prefilmer가 설치되지 않았기 때문에 무화하지 않은 연료액적 부분도 측정되었다. prefilmer가 있는 경우 co-flow의 경우에는 전반적으로 낮은 온도만 측정되었으며, counter-flow의 경우는 난류강도의 증가에 의한 노즐근처 온도 상승효과가 노즐근처 연료농도 증가 온도 감소 효과에 의해 상쇄된 결과를 보였다.

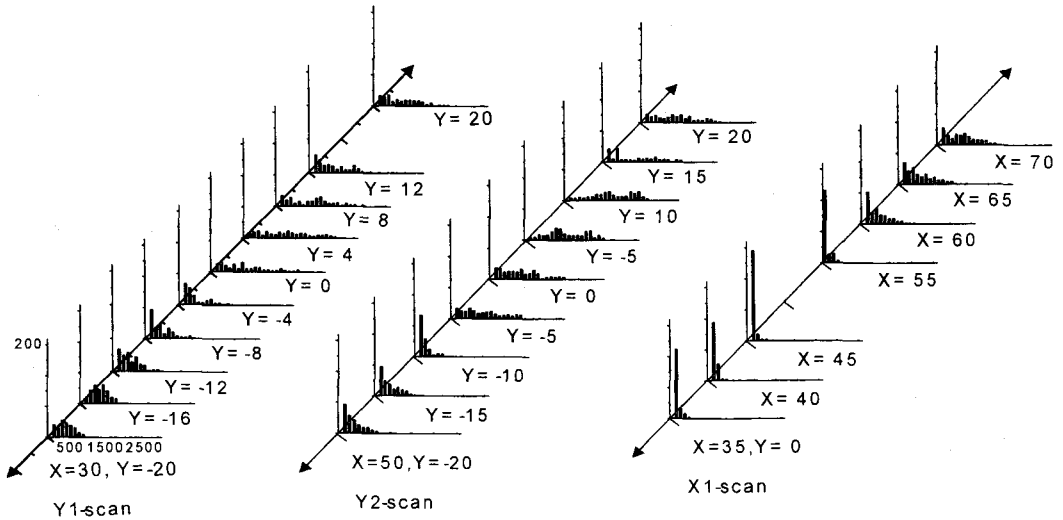


Fig. 7 CARS temperature PDFs of the co-flow with prefilmer condition

4. 결론

가스터빈 연소기의 화염구조를 측정하기 위하여 CARS기술을 이용하여 노즐근처 영역에서 화염온도 분포를 측정하였다. 연소기에 사용되는 선회기의 선회방향을 변경하고, prefilmer를 설치하여 선회방향과 prefilmer의 존재에 따른 화염온도를 측정하여 연소실 노즐근처에 형성된 화염의 변화를 측정할 수 있었다. 측정결과 prefilmer가 없고 co-flow인 경우에는 전형적인 콘 형태의 화염이 발생하였으며, 재순환에 의한 고온공기의 유입이 활발하였다. Prefilmer가 없고 counter-flow인 경우에는 노즐근처에서 난류강도가 증가함에 따라 상당히 균일한 연소가 가능하였으나 무화하지 않은 연료액적 부분도 존재하였다. Prefilmer가 있고 co-flow인 경우에는 전반적으로 저온 부분만 측정되었으며, counter-flow의 경우에는 난류강도의 증가에 의한 효과가 prefilmer에 의한 노즐근처 연료농도 증가 효과에 의해 상쇄되어 고온부분이 노즐근처에 접근하지 못하고 있다.

연소기 온도의 비균일도를 나타내는 파라미터로 pattern factor는 $PF = \frac{T_{peak}}{T_{average}} - 1$ [1]으로 정의되는데 이 값이 너무 커지면 압축기 쪽으로 배출되는 고온가스의 온도를 제한하여 연소기의 효율을 감소시킨다. 따라서 연소기 노즐근처에서 온도 분포를 측정하면 연소기 출구부분에서 PF를 줄일 수 있는, 연소기 설계에 유용한 정보를 제공 할 수 있을 것으로 판단된다. 상기 결과로부터, CARS 기술을 이용한 측정은 실제 가스 터빈연소기내의 노즐근처에서 연소와 내부 혼합 특성을 해석할 수 있는 유용한 도구는 것을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

1. Lefebvre, A. H., "Gas Turbine Combustion," 2nd ed., 1998.
2. McDonell, V. G., and Samuelsen, G. S., "Measurement of Fuel Mixing and Transport Processes in Gas Turbine Combustion," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 11, 2000, pp. 870-886.

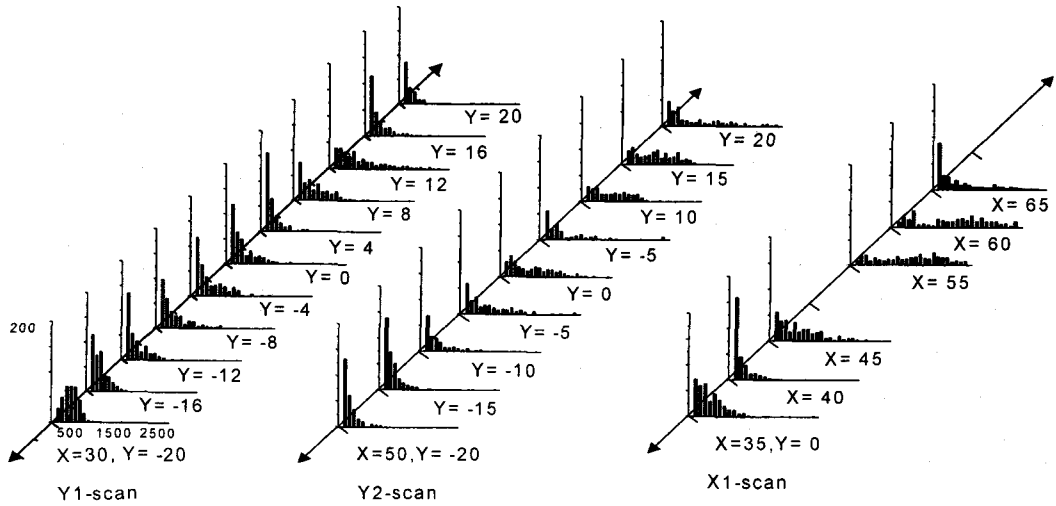


Fig. 8 CARS temperature PDFs of the counter-flow with prefilmer condition

3. Halpin, J. L., "Swirl Generation and Recirculation Using Radial Swirl Vanes," *ASME 93-GT-169*, 1993.
4. Gupta, A. K., Ramavajjala, M. S., Chomiak, J., and Marchionna, N., "Burner Geometry Effects on Combustion and NO_x Emission Characteristics Using a Variable Geometry Swirl Combustor," *J. Propulsion*, Vol. 7, 1991, pp. 473-480.
5. Hedman, P. O., and Warren, D. L., "Turbulent Velocity and Temperature Measurements from a Gasfueled Technology Combustor with a Practical Fuel Injector," *Combustion and Flame*, Vol. 100, 1995, pp. 185-192.
6. Schmidt, S. E., and Hedman, P. O., "CARS Temperature and LDA Velocity Measurements in a Turbulent, Swirling, Premixed Propane/ Air Fueled Model Gas Turbine Combustor," *ASME 95-GT-64*, 1995.
7. Bradley, D., Gaskell, P. H., Gu, X. J., Lawes, M., and Scott, M. J., "Premixed Turbulent Flame Instability and NO Formation in a Lean-burn Swirl Burner" *Combustion and Flame*, Vol. 105, 1998, pp. 515-538.
8. Black, J. D., Brocklehurst, H. T., and Priddin, C. H., "Non-intrusive Thermometry in Liquid Kerosene Fueled Combustor Sector Rigs Using CARS and Comparison with CFD Temperature Predictions," *ASME 96-GT-185*, 1995.
9. Eckbreth, A. C., "Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species", 1988.
10. Eckbreth, A. C., "CARS Thermometry in Practical Combustors," *Combustion and Flame*, Vol. 39, 1980, pp. 133-147.
11. Bedue, R., Gastebois, P. et al., "CARS Temperature in a Simulated Turbomachine Combustor," *Combustion and Flame*, Vol. 57, 1984, pp. 141-153.
12. Stricker, W., and Meier, W., "The Use of CARS for Temperature Measurements in Practical Flames," *Trends in Appl. Spectroscopy*, Vol.1, 1993, pp. 231-260.
13. 박철웅, 박승남, 한재원, 이종웅, "연소진단용 이동형 광대역 코헤런트반 스톱스라만 분광기에 관한 연구," *한국연소 학회지*, 제1권 제2호, 1996. pp. 9-20.