

## 가스터빈 연소기내 CARS 온도측정을 통한 연소해석

이종호\*, 박철웅\*\*, 한영민\*\*\*, 고영성\*\*\*, 이수용\*\*\*, 양수석\*\*\*  
이대성\*\*\*, 전충환\*, 장영준\*, 신현동\*\*\*\*, 한재원†

(2003년 1월 25일 접수, 2003년 6월 18일 심사완료)

### Combustion Analysis with CARS Temperature Measurement in a Gas Turbine Combustor

Jong Ho Lee, Chul Woong Park, Yeoung Min Han, Young Sung Ko,  
Su Yong Lee, Soo Seok Yang, Dae Sung Lee, Chung Hwan Jeon,  
Young June Chang, Hyun Dong Shin and Jae Won Hahn

**Key Words:** CARS(반 스톡스 라만 분광법), Gas Turbine Combustor(가스 터빈 연소기), Recirculation Zone(재순환 영역), Swirl Direction(스월 방향), Prefilmer

#### Abstract

Performance of a gas turbine combustor installed in a test facility has been studied by measuring spatially- and temporally-resolved temperature distributions using multiplex CARS technique. 500 CARS temperatures were determined at each measuring point to obtain a histogram of temperature distribution. Experiments were carried out in the aero-engine combustor sector rig burning standard kerosene fuel. The histograms were obtained around a triple-sector double annular rig running in ground idle conditions, showing features of flow mixing within the rig. The temperature histograms that prove the existence of high temperatures above 1900 K provide us valuable information to improve the design of the combustor structure suppressing NOx generation in turbulent combustion processes. The effects of swirl direction and pre-filmer on gas turbine combustion were investigated. When we installed radial swirls, a large recirculation zone was formed by the fuel module regardless of swirl directions and the pre-filmer installation. It is found that the swirl direction affects the shape of the reverse flow zone, however. Also, an attempt to estimate the flow field and flame structure is made using the histogram of temperature determined with the CARS technique.

#### 1. 서론

가스터빈에서 효율향상, 배출물 저감, 운전성 향상을 위해서는 연소와 관련된 복합현상들을 이해함이 필수적이다. 현재 가스터빈 연소는 동력

발생 뿐만 아니라 항공기 엔진의 추진방식으로 널리 이용되고 있다. McDonell<sup>(1)</sup>은 가스터빈 연소기에서 성능을 결정하는 주요인자로는 주연소영역의 온도, 당량비, 연료의 균일성, 체류시간 등이라 하였다. Lefebvre<sup>(2)</sup>는 이에 관한 최근 연구방법으로 예증발/예혼합/회박연소, 과농/급속냉각/회박연소, 촉매연소 등을 소개하고 있다. 한편, 유동을 최적 제어함으로써 연료-공기의 혼합을 촉진시켜 상기 목적을 달성하려는 연구도 많이 이루어지고 있다. CARS(Coherent anti-Stokes Raman Spectroscopy) 기법을 이용한 가스터빈 내 온도측정에 관한 선행연구를 살펴보면, Eckbreth<sup>(3,4)</sup>가 액체연료를 사용한 스월 화염, JT-12 연소기, P&W F100 제트엔진 등에 처음 시도하였다. 이후

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : jaewhahn@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-5811 FAX : (02)312-2159

\* 회원, 부산대학교 기계공학과

\*\* 한국 표준과학연구원 레이저계측그룹

\*\*\* 한국 항공우주연구원 추진기관연구부

\*\*\*\* 회원, 한국 과학기술원 기계공학과

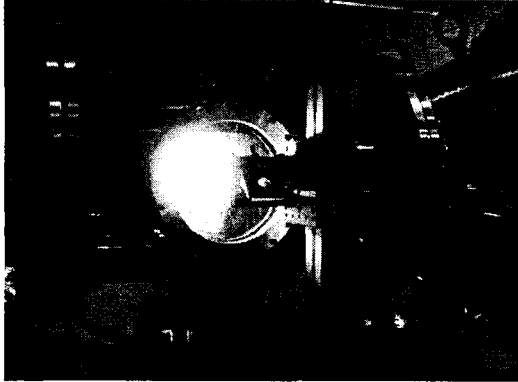


Fig. 1 Photograph of combustion test rig

Bedue<sup>(5)</sup>와 Hedman<sup>(6)</sup>의 모델 가스터빈 연소기의 주연소 영역에서의 온도측정, Richard<sup>(7)</sup>의 일차 제트 분사가 연료/공기 혼합에 미치는 영향에 대한 조사, Rolls Royce사의 Black<sup>(8)</sup>에 의한 상용가스터빈 엔진 내에서의 온도측정과 CFD(Computational Fluid Dynamics) 코드와의 비교, 분석 등 활발한 연구가 진행되고 있다. 화염안정성을 연구함에 있어 CARS기법이 적용된 예로써는 Sturgess<sup>(9)</sup>, Chen<sup>(10)</sup>, Gutmark<sup>(11)</sup> 등이 있으며, 그 외 선행연구에 관해서는 Stricker<sup>(12)</sup>에 의해 잘 정리되어 있다.

본 실험에 사용된 Air-blast 노즐의 분무 특성에 관해서는 Han<sup>(13)</sup>과 Seol<sup>(14)</sup>에 의해 수행되었다.

본 연구에서는 비접촉식 온도측정방법인 CARS를 이용함으로써 상용가스터빈 내 온도측정의 타당성을 검증함과 동시에 연소기에 공급되는 스윙 방향과 연료의 무화를 돕기 위해 일반적으로 채택되는 prefilmer의 유무에 따른 온도장을 측정하고자 하였다. 또한, 이들 파라미터들이 연소기내 온도장, 화염구조, 재순환 영역의 크기 및 발생위치, 배기배출물 발생특성 등에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 스윙에 의한 재순환 영역은 미연의 혼합기를 연소시킴과 동시에 착화 안정성에 도움을 주지만, 자발화에 따른 NOx 발생을 급격히 증가시킬 수 있다. 그러므로 연소장내 유동구조를 밝혀내는 것은 아주 중요한 일이라 하겠다.

## 2. 실험장치

### 2.1 연소기

전체 시스템은 공기고압압축기, 유량 측정부, 온도가열기, 유질 조절부, 시험부와 배기가스 냉

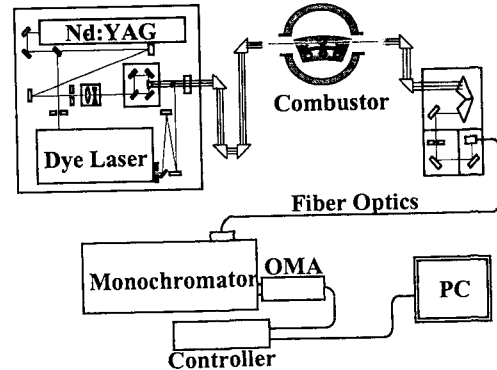


Fig. 2 Schematic of mobile CARS system

각부로 구성되어 있다. Fig. 1에 연소시험기 부분의 사진을 나타내었다. 본 연소기 개발의 기본개념은 NOx가 많이 발생하는 이른 공연비에서의 연소를 방지하고, 보통의 연소기가 택하고 있는 공연비 4~6에서 많이 생성되는 매연양을 줄이기 위해 모듈의 공연비를 8로 선택한 것이다. 모듈은 3개의 반경방향 선회기와 하나의 pre-filmer를 가지고 있어 공기의 공급조건을 다양하게 변화시킬 수 있으며, 각각의 선회기는 최대한 강한 선회성분을 갖도록 설계되어져 있다.

### 2.2 연소진단장치-CARS

실험에 사용된 CARS 장치 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 광대역 이동형 CARS 장치에 사용되는 Nd:YAG 레이저의 이차 고조파는 펄스당 에너지가 최대 200mJ, 펄스폭은 7~8ns, 반복도는 10Hz이며, 에너지의 대부분은(<80%) 무모드 색소레이저의 펌핑에 사용되어진다. 블록렌즈를 거친 펌프광과 스톱스광은 폭 100 $\mu$ m, 길이 2mm에 집속된다. 상자형위상접합조건에 의해 발생된 CARS 신호는 광파이버를 거쳐서 단색기에 입사되며, 다채널 광분석기에서 스펙트럼이 구해진다. 이렇게 구해진 스펙트럼을 Sandia Code와 비교하여 온도를 얻을 수 있다.

## 3. 실험조건 및 방법

Fig. 3에 실험에 사용된 이중 환형 연소기의 개략도를 나타내었다. 이는 전체 환형 연소기의

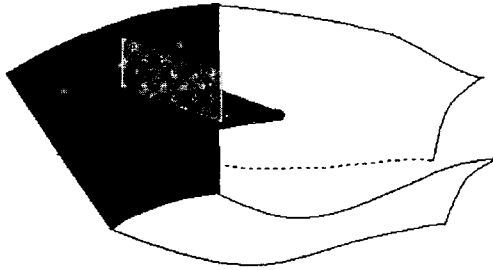


Fig. 3 Schematic of double annular sector rig

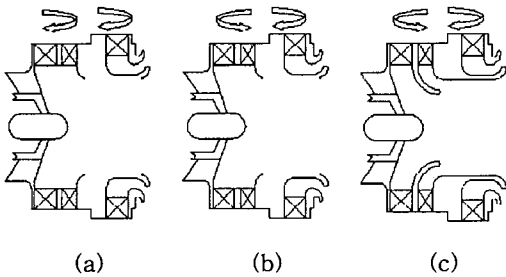


Fig. 4 Experimental conditions

- (a) Co swirl, Without prefilmer (Condition "A")
- (b) Counter swirl, Without prefilmer (Condition "B")
- (c) Counter swirl, With prefilmer (Condition "C")

1/10(36°)에 해당되는 것이다. 6개의 노즐 중 파이릿 뱅크의 가운데 노즐에서만 연료를 분사하여 연소를 시킨 후 중앙단면에서 실험을 행하였으며, 실제 유동장을 구현하기 위해 나머지 5개 노즐에서도 실제와 동일한 조건으로 공기를 공급해주었다. 유입되는 공기의 입구온도는 530K, 압력은 3.2 bar로써, 전체 질량유량 중 일부는 창을 냉각하는데 사용되어지고, 나머지만이 연소에 사용되어졌다. 연료의 질량유량은 12.2 g/s로서 전체 공연비(AFR)는 90 이다. 실험변수로는 prefilmer의 유무와 스윙유동의 방향을 선정하였다. 왜냐하면 전자는 두 선회기사이의 유동분리에 가담하여 연료와 공기의 접촉시간을 바꿔 액적의 무화에 큰 영향을 미치는 동시에 스윙유동의 각을 변화시킬 것으로 예상되었기 때문이며, 후자는 관성 모멘텀의 차이로 인한 완전히 상이한 유동구조를 가져올 것이라 예상되었기 때문이다. 실험조건을 Fig. 4에 나타내었다.

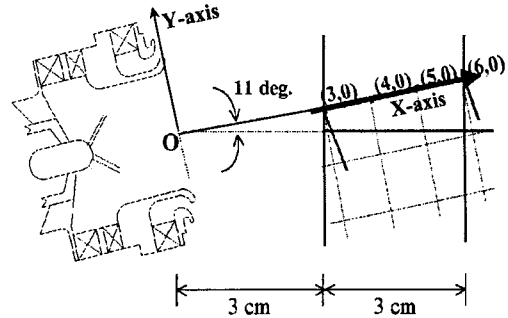


Fig. 5 Details of measurement locations

각 조건(A, B, C)에서의 CARS 온도 측정위치를 Fig. 5에 나타내었다. 연소시험기에서 연료노즐은 위쪽 방향으로 11도 기울어져 설치되어있는데, 광 정렬상의 어려움으로 인한 실험시간의 지연으로 인해 온도측정은 노즐팁을 기준으로 지면과 수평방향(X방향)과 수직방향(Y방향)에 대하여 행해졌다. X방향으로는 x=35mm지점부터 5mm 간격으로 7지점에 대하여 측정하였으며, Y방향으로는 노즐 팁에서 30mm, 60mm 떨어진 지점에서 각각 4mm, 5mm 간격으로 11, 9 지점씩 측정하였다. 이렇게 측정한 결과들은 축 대칭을 가정하여, 연소기의 반 평면에 대해 나타내었다. 연소기가 고온공기 공급장치에 고정되어 위치를 이동할 수 없으므로 3개의 레이저 빔을 직각프리즘을 이용하여 측정위치를 변경하였다. 터빈장치 앞의 최종 광학부품은 집속렌즈로, 창사이의 거리가 480mm이므로 초점거리가 300mm인 렌즈를 사용하였다. 한 지점에서의 온도를 측정함에 있어 500회 단일 펄스에 대하여 온도를 구함으로써 측정온도의 히스토그램을 구하였다. 한 지점에서의 평균측정시간은 대략 5~6분 정도 소요되었다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 CARS 온도 계측

"A" 조건에서의 온도 히스토그램 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 노즐 팁으로부터 30mm 떨어진 지점에서의 y축 방향으로의 결과를 살펴보면, y=0(x축)근처에서는 평균 900K정도의 차가운 공기와 2000K 정도의 뜨거운 공기가 공존하는 전형적인 쌍봉 형태의 스펙트럼을 보여주고 있다.

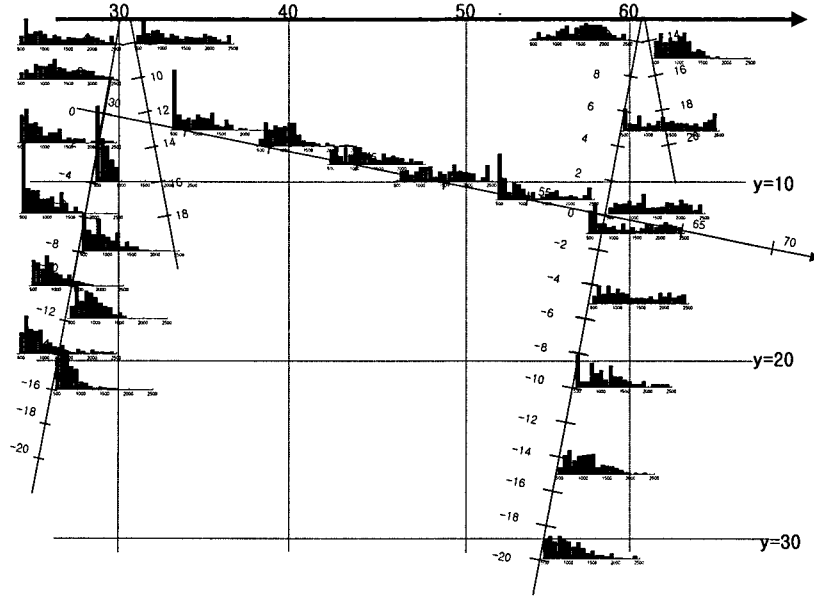


Fig. 6 Histogram of Temperature at the condition of "A"

그리고 y축 방향으로 내려갈수록 뜨거운 공기는 점차 줄어드는 형태의 스펙트럼을 보여준다. 이는 노즐 쪽으로 재 순환되어 들어갔던 뜨거운 공기가 차가운 신기와 만나 돌아 나오기 때문이다. 하지만 그림에서 보듯 y=19mm 까지도 1500K 정도의 뜨거운 공기가 약간 존재하는 아주 두꺼운 폭을 가지는 재 순환 영역을 형성하고 있음을 짐작할 수 있다. 노즐 팁으로부터 60mm 떨어진 지점에서의 결과를 살펴보면, y=0~21mm에 걸친 넓은 영역에서 쌍봉 형태의 스펙트럼을 보여주고 있으며, 특히 y=7~16mm 근처에서 아주 넓은 범위의 온도가 공존하는 것을 볼 수 있는데, 이는 차가운 공기와 뜨거운 공기가 혼합되고 들어오는 재 순환의 주 유동으로 사료되어진다. 또한 y=26mm, 31mm 지점에서의 스펙트럼은 뜨거운 부분이 약간은 존재하면서 차가운 부분이 지배적인 모습을 보이는 것과 이 지역에서의 온도가 다른 조건의 결과에 비해 평균온도가 높은 것으로 미루어 재 순환 영역의 크기를 짐작할 수 있다. 즉, 반경방향의 폭은 좁지만 축 방향으로의 길이가 긴 형태의 와 구조가 예상되어 진다. 수평방향으로의 온도 스펙트럼 결과는 이러한 예측을 다시금 확인시켜주고 있다. 이처럼 좁고 긴 모양의

재 순환 영역을 가지는 이유로는 같은 스윙 방향에 의한 관성 모멘텀으로, 속도가 아주 빠른 것과 이에 따른 내부와의 압력차이가 크기 때문에 급격한 수축이 일어나면서 많은 양의 공기가 재 순환되어 들어온 것으로 사료된다.

"B" 조건에서의 온도 히스토그램 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이는 앞에서 살펴본 "A" 조건과는 스윙 방향이 반대인 대향류 스윙 조건으로, 스윙 방향이 연소에 미치는 영향을 알아보기 위해 행해졌다. 노즐 팁으로부터 30mm 떨어진 지점에서의 y축 방향으로의 온도 히스토그램 결과를 살펴보면, y=0 근처에서는 앞의 조건과 유사하게 900K와 1800K 정도의 온도를 가지는 공기가 공존하는 것을 보여주지만, 전반적으로 차가운 공기의 스펙트럼이 지배적인 것을 알 수 있다. 또한, 쌍봉 형태의 스펙트럼은 y=10mm 근처까지만 존재하는, 앞 조건과는 상이한 결과를 보여주고 있다. 노즐 팁으로부터 60mm 떨어진 지점에서의 결과를 살펴보면 재 순환되어 들어오는 공기의 양이 확실히 줄어들었음을 확인할 수 있다. 결과에서 보듯, y=16mm 지점까지만 고온의 스펙트럼을 관찰할 수 있으며, 아래 지역에서는 절대적으로 차가운 공기가 지배적임을 알 수 있

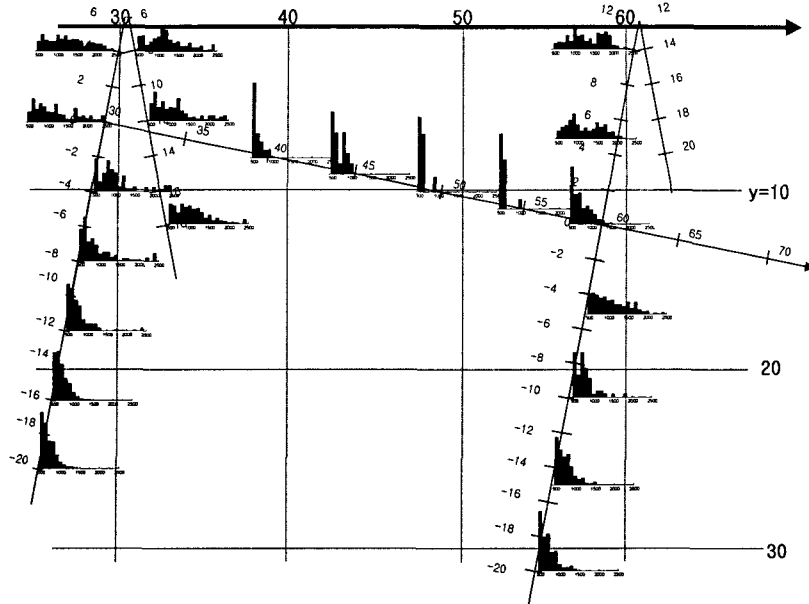


Fig. 7 Temperature PDF at the condition of "B"

다. 그리고 축 방향 결과를 살펴보면, 공급되는 공기보다 약간 높은 700K 정도의 온도 값을 보여주고 있다. 이로부터 재 순환 유동에서 고온부의 폭은 얇지만 전체 폭은 넓고, 축 방향으로의 길이는 짧은 형태의 재 순환 영역이 존재하는 것을 예측할 수 있다. 이는 대향류 스월에 의해 공기 유동이 깨어짐에 따른 관성 모멘텀의 감소, 즉 스월 속도 분포가 급격히 감소한 것에 기인한 것으로 사료된다. 또한, 전체 공연비가 90으로 아주 희박한 조건이라는 것과 전술한 바와 같이 관성 모멘텀이 줄어들었다는 것을 고려해 볼 때, 제트관통의 정도가 달라져 재 순환 영역으로의 신기 유입 양이 많아진 것에 기인한 것으로 사료된다.

끝으로, "C" 조건에서의 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Prefilmer는 두 선회기사이의 유동분리에 가담하여 연료와 공기의 접촉시간을 바꿈으로써 액적의 무화에 큰 영향을 미치는 동시에 스월 유동의 각을 변화시킬 것으로 예상되어진다. 노즐 팁으로부터 30mm 떨어진 지점에서의 결과를 살펴보면,  $y=0$  근처에서조차도 고온의 공기가 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 그러나 60mm 지점에서는  $y=0\sim 16\text{mm}$  범위에서 prefilmer가 없는

경우보다 더욱 더 확연한 뜨거운 공기의 스펙트럼을 관찰할 수 있다. 또한 수평방향의 온도스펙트럼도 쌍봉 형태를 보여주고 있다. 이는 예상했던 것처럼 prefilmer를 채택함으로써 균일한 무화가 이루어짐과 동시에 스월 속도성분의 감소는 앞의 조건에 비해 줄어들었음을 보여주는 결과라고 하겠다. 하지만 prefilmer를 부착함으로써 재 순환영역의 위치가 하류방향으로 밀려났음을 발견할 수 있다. 이는 prefilmer가 공기의 가이드 역할을 하여 연료와 만나는 시간을 지연시킨 결과라고 하겠다.

각 조건에서의 평균온도를 Table 1에 나타내었다. 이렇게 구해진 평균온도와 온도 히스토그램 결과를 바탕으로 연소장내 등온선(isotherm)과 재 순환 와 구조(vortex structure)를 예측한 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

모든 조건에서의 결과는 축 대칭을 가정하여 연소기 반 평면에 대해 나타내었다.

조건 "A"와 "B"를 비교함으로써, 공급되는 공기의 스월 방향이 평균온도와 재 순환 구조에 미치는 영향을 알 수 있다. 즉, 평균온도는 대체로 동축 스월의 경우가 높았고, 재 순환 와의 형태도 동축 스월인 경우는 길고 가느다란 모양인 반

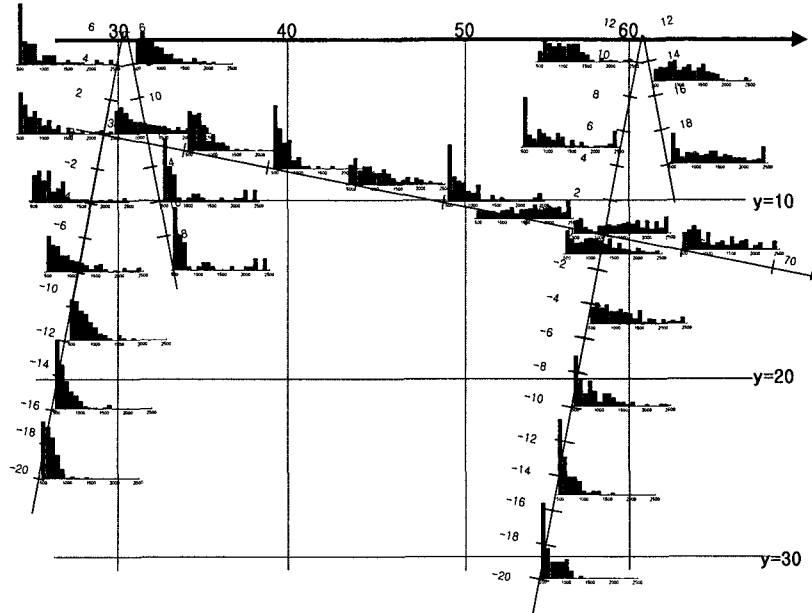


Fig. 8 Temperature PDF at the condition of "C"

Table 1 Mean temperatures at each measurement point

(온도단위 : K, 길이단위: mm)

x=30mm			x=60mm			center line					
(x,y)	"A"	"B"	"C"	(x,y)	"A"	"B"	"C"	(x,y)	"A"	"B"	"C"
(30,2)	1446	1312	918	(61,2)	1567	1371	1100	(35,0)	946		825
(29,6)	1344	1236	950	(60,7)	1284	1227	1134	(40,0)	1068	601	742
(29,10)	1009	1075	964	(59,11)	1327	1107	1182	(45,0)	1251	606	1103
(28,14)	924	953	984	(58,16)	1391	1101	1173	(50,0)	1498	582	944
(27,18)	949	803	807	(57,21)	1146	798	924	(55,0)	1144	777	1615
(26,21)	801	728	722	(56,26)	1106	780	706	(60,0)	1476	891	1548
				(55,31)	1053	748	726	(65,0)	925		1226

면에 대향류 스월의 경우는 재 순환되어 들어오는 양도 적으면서 짧고 두꺼운 모양을 나타내고 있다.

조건 "B"와 "C"로부터 prefilmer가 연소에 미치는 영향을 볼 수 있다. 평균온도는 거의 비슷한 경향을 보였으며, 대체로 동측 스월의 경우에 비해 낮은 값을 나타내었다. 또한, prefilmer가 있는 경우는 고온의 지역이 연소기 하류 쪽에서 발생하였는데, 이는 노즐근처까지 재 순환되어 들어오는 양이 많지 않은 것으로 사료된다. 즉, prefilmer를 부착함으로써 재 순환 와의 발생위치

는 뒤로 밀려나지만, 전체적인 재 순환 와의 형태에는 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 사료된다.

#### 4.2 고온 영역

실험을 통해 얻은 스펙트럼 결과 중에서 고온 부분(>1900K)에 대해 좀 더 살펴보기로 한다. 이는 국소 고온 영역이 발생하는 위치를 조사함으로써 NOx 배출특성을 예측해 보기 위함이다.

조건 "A"에서 노즐 팁으로부터 30mm 떨어진 지점에서의 전체 데이터 개수의 8.86%, 60mm 떨어진 지점에서는 15.63%, 축 방향 결과에서는

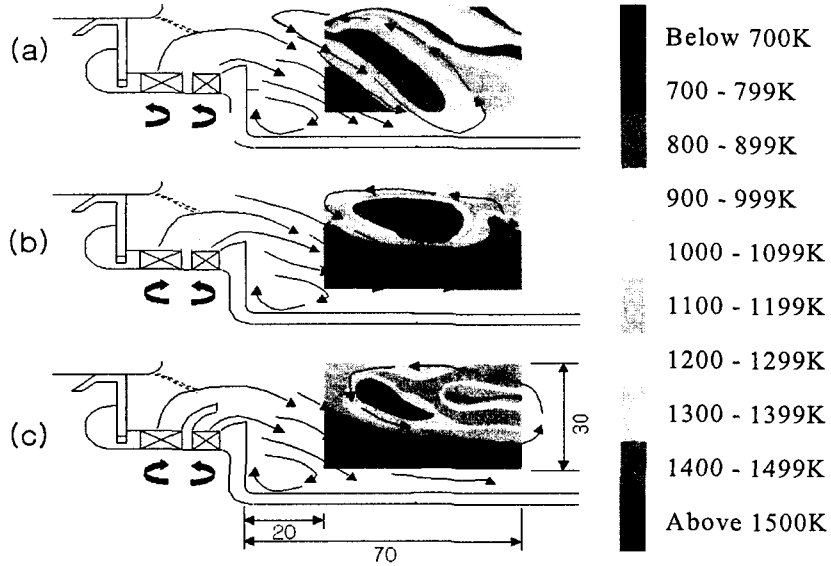


Fig. 9 Estimation of flow structure and mean temperature

(a) Condition "A" (b) Condition "B" (c) Condition "C"

17.19%의 값이 1900K 이상의 온도를 나타내었다. 이는 재 순환 유동이 노즐에 가까워지면서 고온발생 빈도는 떨어지지만 여전히 노즐 근처에 고온의 기체가 많이 존재함을 보여주는 것이다.

"B" 조건에서는 각각 8.40%, 6.06%, 0 %의 값을 나타내었는데, 노즐근처에서 고온 발생빈도가 더 높게 나오는 것을 볼 수 있다. 이는 유동장과 균일한 무화에 기인한 것으로 사료된다.

"C" 조건에서는 4.93%, 7.94%, 19.22 %의 값을 나타내었으며, 전술한 바와 같이 연소기 하류에서의 고온 영역이 노즐근처로 재 순환되지만, 고온발생빈도는 가장 낮은 결과를 보여 주고 있다. 이는 전체적인 화염이 밀려났음을 보여주는 결과라 사료된다.

## 5. 결론

본 연구는 상용 가스터빈 엔진내의 온도측정을 통하여 운전조건 중 스윙 방향과 prefilmer가 화염 구조 및 연소특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 행하여 졌다. 이상의 실험에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 관성 모멘텀에 의한 압력 차에서 생기는 재 순환 와의 강도는 스윙 방향에 크게 영향을 받았

으며 prefilmer의 영향은 크게 나타나지 않았다. 하지만 prefilmer가 있는 경우 유동의 깨어짐이 작아 재 순환되어 들어오는 양은 많은 것으로 나타났다.

(2) 재순환 와(vortex)의 형태에 미치는 영향을 살펴보면, 스윙 방향에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 동축 스윙의 경우에는 폭은 좁고 길쭉한 형태를 보였으며, 대향류 스윙의 경우는 폭이 넓으면서 짧은 모습을 나타내었다. Prefilmer는 재 순환 와의 발생을 연소기 하류 방향으로 밀치는 영향을 나타내었다.

(3) 평균온도와 고온발생빈도에 있어서도 스윙 방향의 영향이 지배적인 것으로 나타났으며, prefilmer가 있는 경우 균일한 무화에 따른 온도 구배가 적은 연소장 형태를 나타내었다.

## 감사의 글

저자 중 한재원은 한국학술진흥재단 연구비(KRF-2002-003-C00063) 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) McDonell, V. G., Samuelsen, G. S., 2000,

- "Measurement of Fuel Mixing and Transport Processes in Gas Turbine Combustion," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 11, pp. 870~886.
- (2) Lefebvre, A. H., 1998, "Gas Turbine Combustion"
- (3) Eckbreth, A. C., 1980, "CARS Thermometry in Practical Combustors," *Comb. and Flame*, Vol. 39, pp. 133~147.
- (4) Eckbreth, A. C., 1984, *Applied Optics*, Vol. 23, pp. 1328~1334.
- (5) Bedue, R., Gastebois, P., 1984, "CARS Temperature in a Simulated Turbo-Machine Combustor," *Comb. and Flame*, Vol. 57, pp. 141~153.
- (6) Hedman, P. O., Warren, D. L., 1995, "Turbulent Velocity and Temperature Measurements From a Gas-Fueled Technology Combustor with a Practical Fuel Injector," *Comb. and Flame*, Vol. 100, pp. 185~192.
- (7) Richards, C. D., Samuelson, G. S., 1990, "The Role of Primary Jet Injection on Mixing in Gas Turbine Combustion," *23rd Symposium on Combustion*, pp. 1071~1077.
- (8) Black, J. D., Brocklehurst, H. T., Priddin, C. H., 1995, "Non-Intrusive Thermometry in Liquid Kerosene Fueled Combustor Sector Rigs Using CARS and Comparison with CFD Temperature Predictions," *ASME 96-GT-185*.
- (9) Sturgess, G. J., Hedman, P. O., 1994, "Aspects of Flame Stability in a Research Dump Combustor," *ASME 94-GT-496*.
- (10) Chen, R. H., Driscoll, J. F., 1988, "The Role of the Recirculation Vortex in Improving Fuel-Air Mixing within Swirling Flames," *22th Symposium on Combustion*, pp. 531~540.
- (11) Gutmark, E., Schadow, K. C., 1988, "Evolution of Vortical Structures in Flames," *22th Symposium on Combustion*, pp. 523~529.
- (12) Stricker, W., Meier, W., 1993, "The use of CARS for Temperature Measurements in Practical Flames," *Trends in Appl. Spectroscopy*, Vol. 1, pp. 231~260.
- (13) Han Y. M., 2001, "Effects of Fuel Nozzle Displacement on Pre-Filming Airblast Atomization," *Engineering for Gas turbines and Power*, Vol. 123, pp. 33~40.
- (14) Seol, W.S., 2000, "Flow and Spray Characteristics of a Lean Fuel Injection Module with Radial Swirlers," *ASME 2000-GT-118*.
- (15) Halpin, J. L., 1993, "Swirl Generation and Recirculation Using Radial Swirl Vanes," *ASME 93-GT-169*.
- (16) Schmidt, S. E., Hedman, P. O., 1995, "CARS Temperature and LDA Velocity Measurements in a Turbulent, Swirling, Premixed Propane/Air Fueled Model Gas Turbine Combustor," *ASME 95-GT-64*.
- (17) Bradley, D., Gaskell, P. H., Gu, X. J., Lawes, M. and Scott, M. J., 1998, "Premixed Turbulent Flame Instability and NO Formation in a Lean-Burn Swirl Burner," *Comb. and Flame*, Vol. 105, pp. 515~538.
- (18) Ministry of Science & Technology, 2000, "'Joint Research for Engine Design Technology Through Korea-U.K. Research Center" KARI, UCN00020.