

〈技術論文〉

모형 가스터빈 연소기의 연소특성

— 라디칼 자발광강도와 국소당량비계측에 대하여 —

최병륜* · 김태한**

(1993년 9월 22일 접수)

Combustion Characteristics of Model Gas Turbine Combustor — Radical Luminous Intensity and Local Equivalence Ratio Measurement —

Byeong Ryun Choi and Tae Han Kim

Key Words : Measurement(측정), Combustion(연소), Radical(활성종), Equivalence Ratio(당량비), Primary Zone(1차 연소영역)

Abstract

There are three active radicals which become to the scale of flame diagnostics at the flame front. They are OH, CH and C₂ radical. For this, optical measurement system which could monitor simultaneously the luminous waves of three radicals, was constructed. These were analyzed statistically into the cross correlation, coherence and phase. Through such an statistical treatment, combustion characteristics was investigated at the primary zone of gas turbine combustor. The local equivalence ratio was predicted with the ratio of luminous intensity between CH and C₂ radical. This result was matched up to the equivalence ratio calculated from gas composition within 5% error. In general, equivalence ratio was said to be 1.0 at flame front, but it could be increased up to about 1.2 depending on the degree of swirl intensity in case of changing properly the air amount of primary zone.

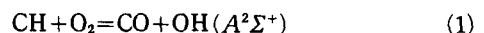
1. 서 론

화염 내의 반응과정에서 생기는 각종 라디칼의 농도나 온도의 국소치를 알 수 있으면 화염의 반응 영역에 대한 고찰, 비평형성의 검토 등 화염의 내부구조에 관한 유용한 정보를 얻을 수 있다.

하나의 연소과정에는 대단히 많은 소반응을 포함하기 때문에 이들 소반응을 전체반응물의 척도로 선택하는 것은 어려운 일이다. 활성종 O, H, OH 등과, 중간생성물인 CO, H₂농도는 전체반응물의 척도로 이용가능한 인자들이다. 그러나, 이들은 열

해리에 의해 생기기 때문에 낮은 온도의 화염을 제외하고는 적당하지 않다. 탄화수소계 연료의 화염 반응대에서 평형상태보다 훨씬 높은 CO농도가 존재하는 것으로 알려져 있고, CO농도 형태는 PLIF(planar beam laser-induced fluorescence)기술로 가시화하여 반응형태의 척도로써 사용되어 왔다.

전체반응물의 척도가 되는 또 하나의 인자는 화학반응 후 즉시, 여기종(excited species)에 의해 발광되는 화학발광이다. 예를 들면, 화학반응에 의해 생긴 OH 라디칼이 A²Σ⁺ 상태에서 X²Π 상태로 천이하면서

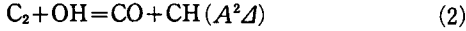


310 nm(OH luminescence)부근의 파장에서 UV

* 정회원, 부산대학교 기계공학과

** 정회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

Luminescence을 방출한다. 더우기, 반응에 의해 생긴 $A^2\Delta$ 상태의 CH 라디칼이 $X^2\Pi$ 상태로 천이 하면서



430 nm(CH luminescence)부근의 파장에서 청색 발광을 낸다.⁽¹⁾ 또한, 탄화수소계 연료의 산화 초기 상태에서 생긴 C_2 라디칼은 $A^3\Pi_g$ 상태에서 $X^3\Pi_u$ 상태로 천이하면서 CH발광과 거의 같은 영역에서 파장 517 nm부근의 초록색발광을 방출한다.

CH라디칼은 주로 반응영역에서 존재하는 반면, OH라디칼은 반응영역에서 기연가스의 하류역까지 고루 분포하고 있다.⁽²⁾ 화염에서의 OH 라디칼과 비휘염에서의 C_2 , CH 라디칼은 배경광의 영향을 거의 받지 않기 때문에 간섭필터를 사용하여 얻을 수 있다. CH라디칼은 주로 반응대에서만 나타나므로 그 농도는 전체반응물의 척도로 사용가능하다. 이러한 반응들이 연소반응의 주된 특징은 아닐지라도 연소반응대에서 활발히 나타나고, 또한, CH와 C_2 발광강도비는 당량비에 따라 변한다는 것도 알려져 있다.⁽³⁾ 그러므로 반응물과 당량비는 절대값과 강도비로부터 계산할 수 있다. 식(1)의 첫 번째 반응에서 O_2 가 주된 종(species)이므로 반응물은 CH농도에 비례한다. 두 번째 반응에서는 OH가 주된 종이므로 반응물은 C_2 농도에 비례한다. 따라서, 종의 발광강도는 자신의 농도에 비례하는 것이 아니라 다른 종의 농도와 관련이 있다. 그러나, OH는 고온에서의 주된 종의 하나^(4,5)이고 여기된 OH라디칼은 식(1)의 반응뿐 아니라 평형상태로의 많은 가역반응에 의해서도 생긴다. 그러므로, OH라디칼 발광강도는 온도가 높을수록 자신의 농도에 좌우된다.

라디칼에 관한 연구는 최근 레이저응용계측의 발달과 함께 활발하게 연구되고 있다. 水谷 등^(4,6)은 화염내의 3가지 라디칼분포를 화상처리로 가시화하였고, 高城 등⁽⁵⁾은 OH와 온도와의 상관관계에 대해 보고하고 있다. 본 실험은 모형가스터빈 연소기를 대상으로 OH, CH, C_2 라디칼의 자발광강도를 동시 측정할 수 있는 광전측광장치를 구성하여, 연소반응이 활발한 1차연소영역과 선회강도의 정도에 따라 냉각이 행하여지는 2차연소영역에서의 3가지 라디칼의 파형과 CH, C_2 발광강도비를 이용한 국소당량비를 구하여 가스분석을 통해 구한 값과 비교하여 가스터빈연소기의 1차연소영역의 특성을 규

명하는 데 주안점을 두었다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1에 연소기와 채광부광학계 및 광전측정장치의 배치도를 나타내었다. 연소기 길이는 345 mm, 반경 40 mm이며, 1차연소공기는 축방향으로 0°, 30° 및 45°선회익(swirler)을 거쳐 유입된다. 각각의 선회강도는 Lilley⁽⁷⁾가 제안한 식을 이용하여 0.0, 0.38, 0.62로 규정하였다. 그리고, 2, 3차연소공기는 라이너 홀을 통하여 유입된다. 연료는 상용 프로판가스(C_3H_8)를 사용하고, 분사각(θ) 90°로 연료노즐(4-d=1 mm)에서 분사된다. 상세한 계산 및 실험조건은 Table 1에, 실험에 사용한 연소기 라이너 홀의 위치와 크기는 Table 2에 나타내었다. 여기서, X_n 는 연료노즐 선단으로부터의 거리, D_n 는 공기구멍의 직경, N_n 는 一列의 공기구멍의 갯수를 나타낸다. 좌표계는 축방향을 X, 반경방향을 r로 하였다.

광학계는 세 종류의 라디칼 발광신호를 동시에 채취할 수 있도록 구성하였다. 화학발광은 화염으로부터 400mm위치에 설치한 석영렌즈(초점거리 $f=200$ mm)로 집광되어 Dichroic Mirror(DM)에 의해 OH밴드를 포함하는 근자의역의 광은 반사되고, CH와 C_2 밴드를 포함하는 가시역에서 근적외역까지의 광

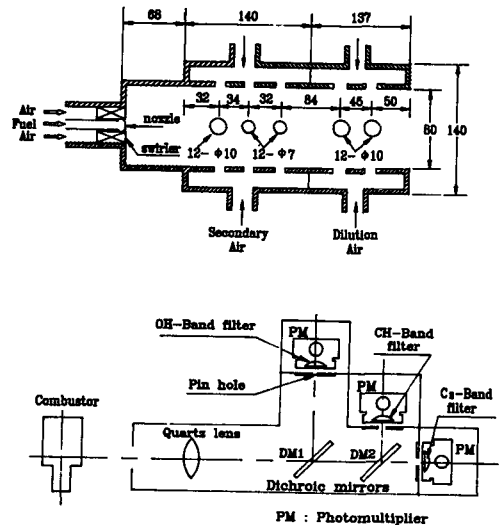


Fig. 1 Combustor and measuring system of radical luminous

Table 1 Experimental Conditions

unit:10⁻³ m³/sec

Swirl intensity	Q _{fuel} (nozzel)	Q _{pri} (Primary zone)	Q _{secon} (Secondary zone)	Q _{dilu} (Dilution zone)
0.0	0.17	4.7(2.9*, 4.0*, 4.9*, 5.7*)	4.1	4.8
0.38	0.17	4.7(2.9*, 4.0*, 4.9*, 5.7*)	4.1	4.8
0.62	0.17	4.7(2.9*, 4.0*, 4.9*, 5.7*)	4.1	4.8

Note: * mark means the experimental conditions of Fig. 12

Table 2 Details of linear air hole

No	Location (X _h mm)	Diameter D _h mm)	Number (N _h)
1	100	10	12
2	134	7	12
3	166	7	12
4	250	10	12
5	295	10	12

Table 3 Band filter characteristics

unit : nm

Observed species	Observed spectrum	Band filter		
		λ max	Half width	Trans. of λ
OH	310	310.2	14.9	18.8%
CH	431	432.3	1.2	49.2%
C ₂	517	516.5	1.6	65.0%

은 투과된다. 분리된 근자외역 및 가시역의 화염발광은 각각 광전자증배관 PM(HAMAMATSU, R106UH(OH용), IP28A(CH, C₂용)에서 검출된다. PM과 핀홀 P(직경2mm)의 사이에는 각각 광간섭필터 F_{OH}(OH발광밴드), F_{CH}(CH발광밴드) 및 F_{C₂}(C₂발광밴드)가 설치되어 있다. 그리고, 광학계의 광축 및 각 렌즈의 초점은 He-Ne Laser를 이용하여 맞추었다. 이에 대한 자세한 사양을 Table 3에 나타내었다.

2.2 실험방법

가스터빈 연소기의 가시화를 위하여 1차 연소영역인 X=50mm위치에 직경 7mm 홀과 2, 3차 연소영역의 공기유입부에 한정된 창을 내어 바이콜유

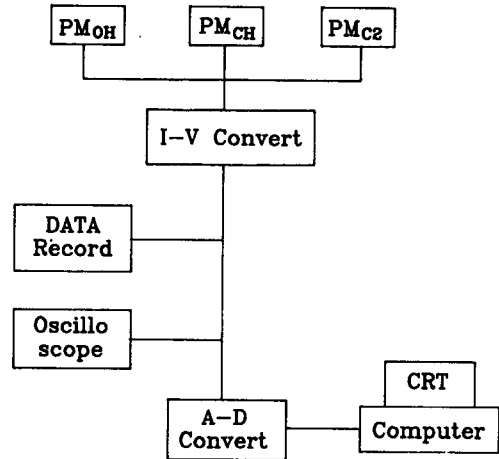


Fig. 2 Flow-chart of signal treatment system

리를 부착하여 부분적인 가시화를 하였다. 3차원 이송장치에 연소기를 장착하고, 반경방향으로 이동시켜 이온전류파형을 관찰하면서 연소반응이 제일 활발한 위치에서의 각종 라디칼파형을 취하였다.

신호처리계의 Flow-Chart를 Fig. 2에 나타내었다. 앞에서 기술한 3가지 신호, 즉, OH, CH 및 C₂라디칼의 발광신호는 PM을 거쳐 전압신호로 변환시킨 후, 동시 샘플링기능을 갖는 A-D변환기에 의해 퍼스날 컴퓨터로 받아 신호분석을 하였다. 이에 대한 데이터용량은 4K bite, Sampling time은 40 μs이다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 각종 신호파형의 비교

Fig. 3~5는 선회강도에 따른 X=50mm 단면, 이온전류가 많이 발생하는 각각 r=25,30,35mm에서의 OH, CH 및 C₂라디칼의 발광신호파형을 나타낸다.

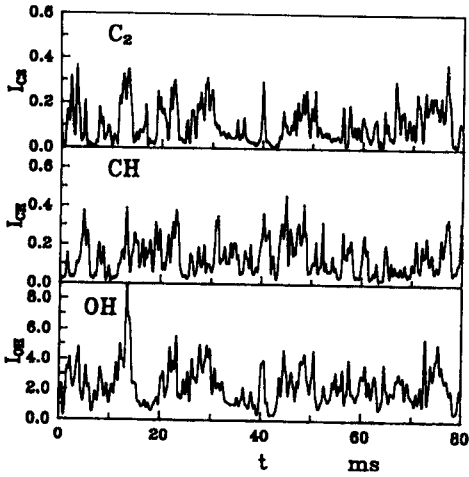


Fig. 3 Luminous waves of each radical ($S=0.0$, $X=50$ mm, $r=25$ mm)

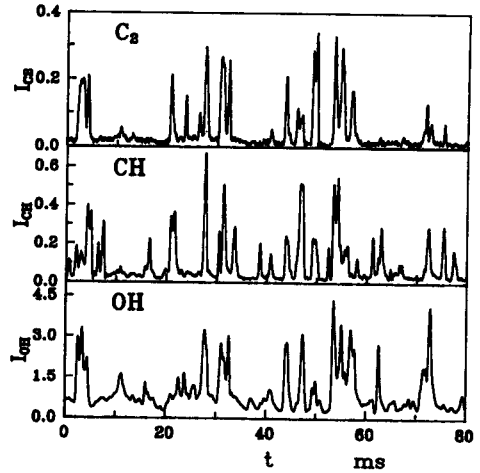


Fig. 4 Luminous waves of each radical ($S=0.38$, $X=50$ mm, $r=30$ mm)

Fig. 3의 선회강도가 $S=0.0$ 인 경우, 전반적으로 발광강도가 높게 나타나고 있다. 이 화염에서는 휘염이 많이 발생하는 관계로 그을음 등의 고체발광이 자체발광보다 우세한 것에 기인한다고 생각된다. CH, C_2 발광은 거의 동시피크가 발생하는 경향을 보이는 반면, OH발광은 일치하지 않는 것이 많다. Fig. 4~5의 선회가 있을 경우, 비교적 청염의 화염을 관찰할 수 있었는데 $S=0.62$ 인 경우가 $S=0.38$ 보다 OH발광분포는 낮으나 CH, C_2 발광분포는 높게 나타나고 있어 연소반응이 좀더 활발함을 알 수 있다. $S=0.0$ 의 경우와 유사하게 CH와 C_2 발광은 거의 동시피크를 나타내는 반면, OH발광은 다른 두 피크와 일치하기도 하고 그렇지 않을 경우가 많은데, 이는 CH, C_2 발광은 화염반응대에 주로 분포하는 반면, OH는 화염대뿐만 아니라 비화염대에서도 폭 넓게 분포하여 피크발생에 시간차가 생기는 것으로 생각된다. 세 조건의 신호파형에서 특히, OH발광의 기준선이 선회강도가 커짐에 따라 기준선이 뜨는 정도가 크게 나타나는 것은 연료와 공기의 혼합과정과 평형상태로의 가역과정의 정도차이에도 기인한다고 생각된다.

Fig. 6은 세가지 화염에 대한 OH, CH발광과 가스분석기로 측정된 O_2 , CO농도분포를 나타낸 것으로 마크된 값들은 각 단면에서 반경방향의 평균값이다. 라디칼강도의 평균측정치는 선회강도 $S=0.0$ 인 경우를 제외하고는 평균값에 비해 $\pm 10\%$ 의 오차가 나는 것을 데이터 처리과정에서 알 수 있었

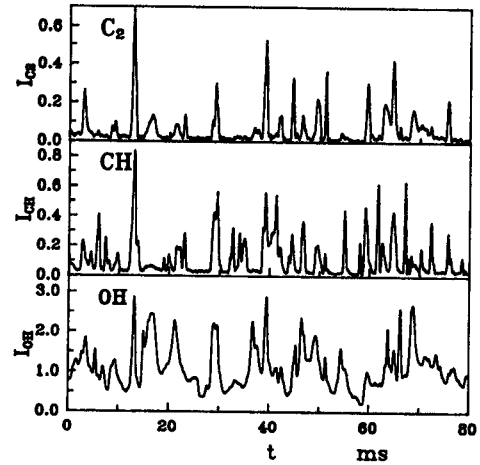


Fig. 5 Luminous waves of each radical ($S=0.62$, $X=50$ mm, $r=35$ mm)

는데, 이는 광로적분에 의해 측정위치 전후의 화염발광이 혼입하는 것에 기인한다고 생각된다. 이들 강도는 O_2 농도에 비례하여 나타나고, 선회의 유무에 따라 많은 차이를 보이고 있다.

OH, CH발광강도는 선회가 없는 $S=0.0$ 인 경우가 제일 높게 나타나고 있고, 선회강도가 $S=0.62$ 인 경우가 $S=0.38$ 인 경우보다 약간 높게 나타난다. $X=100$ mm단면 이후부터 O_2 농도는 높으나, 라디칼강도가 낮은 것은 2차 연소영역에서는 잔존 미연가스가 상대적으로 적어 미소한 연소반응이 일어나고 있기 때문이다. 따라서, 이 지역에서는 2차

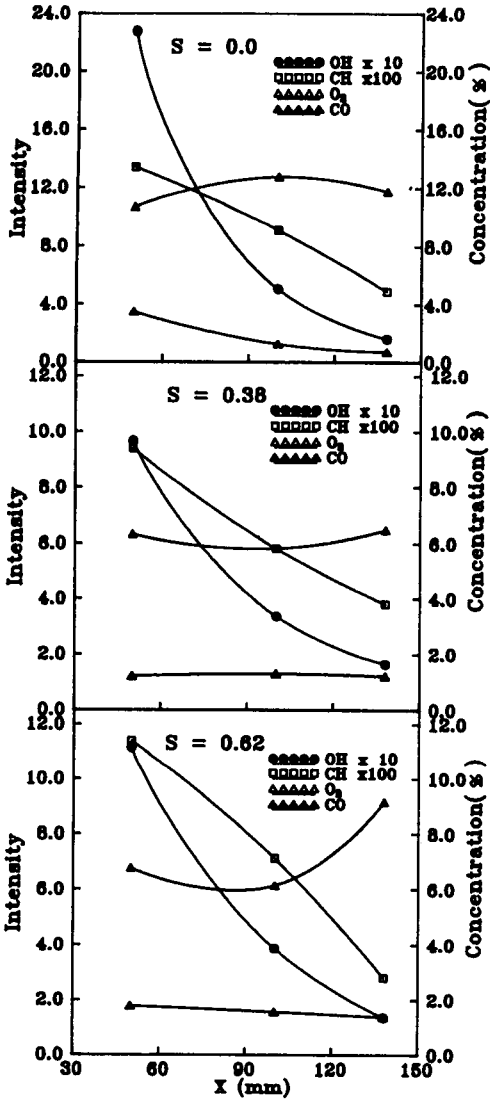
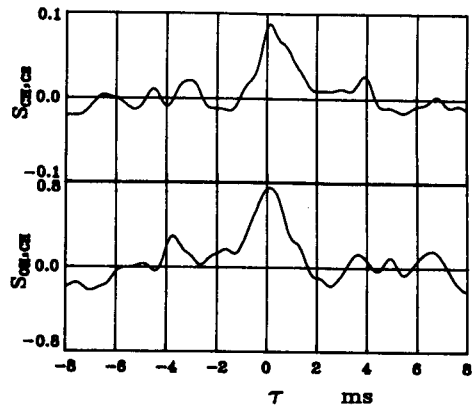


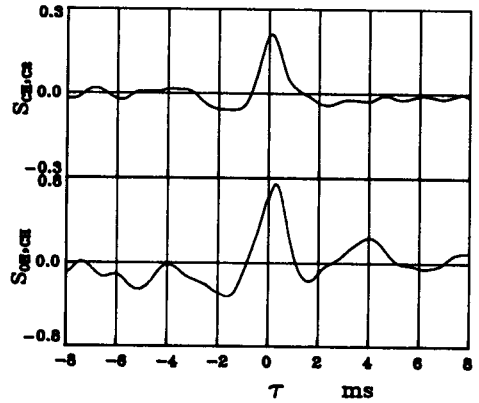
Fig. 6 Comparison of radical intensity & gas composition

공기유입으로 냉각작용이 일어나고 있다.

Fig. 7은 Fig. 4, 5의 라디칼과형에서 관찰한 선회강도가 $S=0.38$, 0.62 인 두 화염에서의 CH, C_2 와 OH, CH발광신호의 상호상관을 취한 것으로 $S_{CH,C_2}(\tau)$ 는 CH라디칼과형 $I_{CH}(t)$ 와 C_2 라디칼과형 $I_{C_2}(t+\tau)$ 와의 상호상관계수이고, $S_{OH,CH}(\tau)$ 는 OH라디칼과형 $I_{OH}(t)$ 와 CH라디칼과형 $I_{CH}(t+\tau)$ 와의 상호상관계수이다. 횡축 τ 의 정방향은 CH발광신호에 비해 C_2 발광신호, OH발광신호에 비해 CH발광신호가 지연된 것을 나타내고 있다. $S=0.62$ 인 경



(a) $S=0.38$



(b) $S=0.62$

Fig. 7 Corss-correlation coefficient of OH and CH Radical ($X=50$ mm)

우 C_2 발광은 CH발광보다 약 0.1 ms, CH발광은 OH발광보다 약 0.35 ms 지연되고 있음을 알 수 있고, $S=0.38$ 인 화염보다 $\tau=0$ 에서의 상관계수가 증축과 처음 교차하는 시간(τ)이 짧아 선회강도가 클수록 에디 스케일(eddy scale)이 작아졌음을 알 수 있다. 한편, 선회강도가 $S=0.0$ 인 경우에는 앞서 언급한 화염이 많이 발생하여 상관관계를 밝히는 데 어려움이 있어 생략하였다.

Fig. 8, 9에 두 종류의 화염에 대한 OH, CH라디칼발광의 위상각(Phase) $P_{CH,C_2}(f)$ 와 코히어런스(doherence) $Ch_{CH,C_2}(f)$ 를 나타낸다. 횡축은 퓨리어(fourier) 주파수 f (kHz)이다. $S=0.38$ 인 경우, 전반적으로 위상각과 코히어런스는 저주파영역에서부터 변화가 심하고 그 값도 낮아서 OH와 CH, CH와 C_2 의 발광시간과 공간상으로 서로 어긋난반응영역이 랜덤하게 분포하고 있음을 알 수

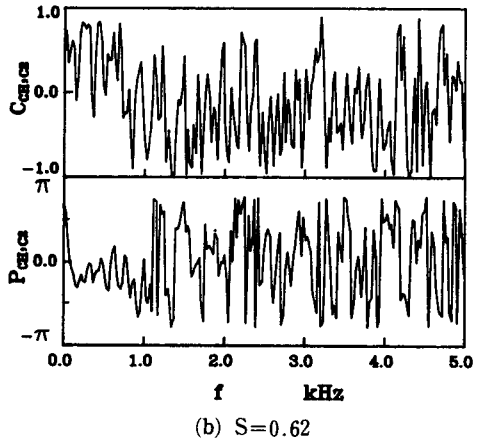
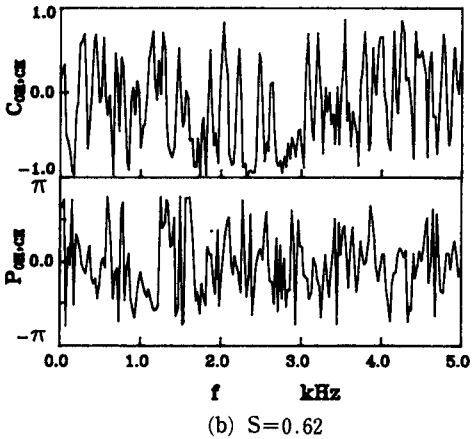
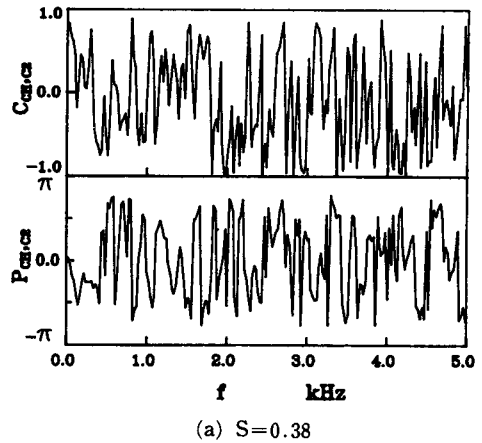
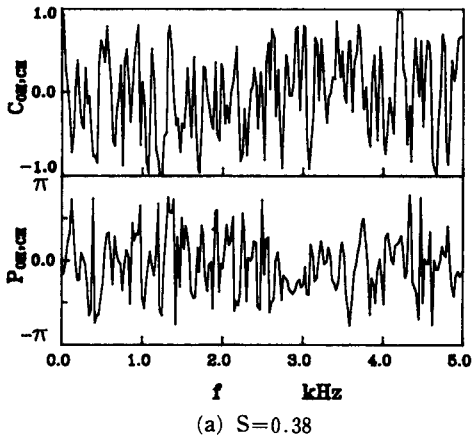


Fig. 8 Coherence and Phase of OH and CH Radical (X=50 mm)

Fig. 9 Coherence and Phase of CH and C₂ Radical (X=50 mm)

있다. $S=0.62$ 의 CH, C₂라디칼의 경우, 저주파영역인 1 kHz부근까지는 코히어런스값은 1.0에 가깝고, 위상각도 0 rad을 중심으로 변화하고 있으나, 그 이후 주파수부터는 $S=0.38$ 과 유사한 경향을 나타내고 있다.

3.2 라디칼강도비에 의한 국소당량비계측

OH, CH 및 C₂라디칼 발광강도는 당량비와 밀접한 연관을 갖고, 이들의 강도비를 이용하여 화염의 국소당량비를 구할 수 있다. 본 연구에서는 伊藤 등⁽³⁾이 Burke-Schuman 버너모델을 대상으로 실험한 라디칼상수(k)를 적용하였고, 구해진 당량비식은 식(4)과 같다.

$$R = \log_{10}(C_2/CH) \quad (3)$$

$$\Phi_s = 1.7R^3 + 0.3R^2 + 0.58R + 1.2 \quad (4)$$

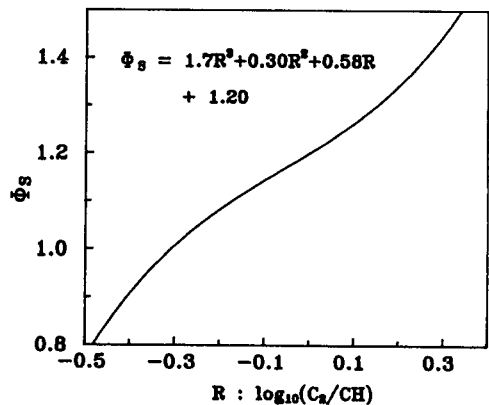


Fig. 10 Equivalence ratio according to intensity ratio

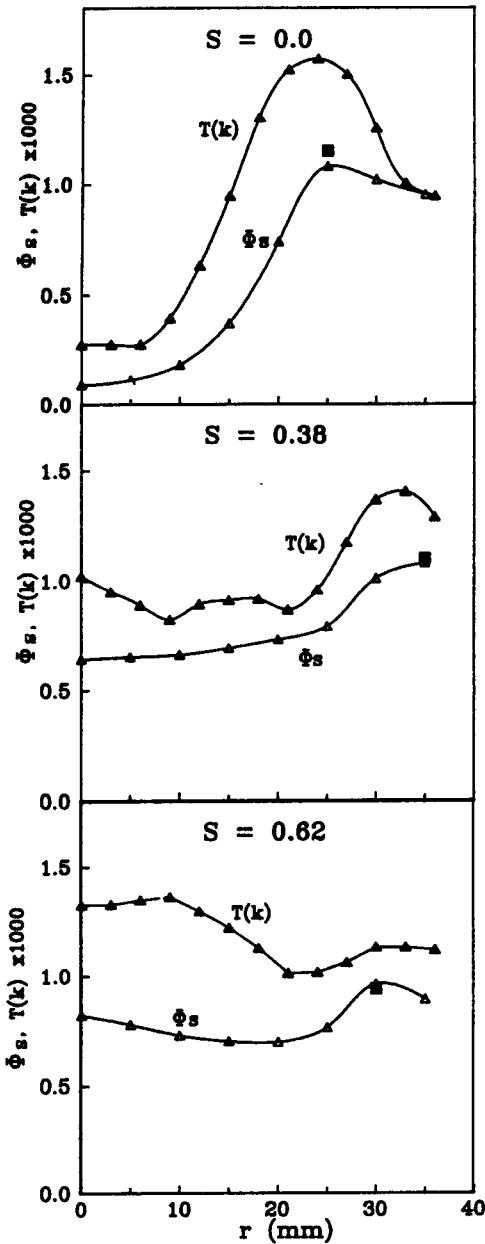


Fig. 11 Comparison of equivalence ratio based on radical intensity ratio and gas composition ($X=50$ mm)

위 식(4)은 Fig. 10과 같이 나타난다.

여기서, ϕ_s 는 식(4)에서 구한 값이다. Fig. 11은 $X=50$ mm 단면에서의 온도분포와 가스분석을 통해 구한 당량비와, 위의 식(4)에서 라디칼강도비에서 구한 당량비(■)를 나타낸 것이다. 식(4)에서

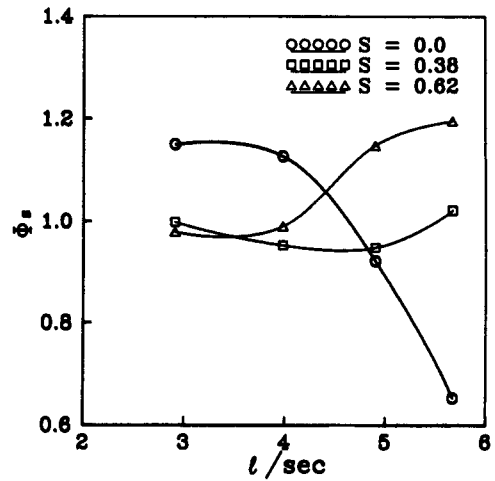


Fig. 12 Variation of equivalence ratio with primary air flow rate ($X=50$ mm)

구한 당량비는 가스분석에서 구한 반경방향의 최대 당량비와 비교하였다. CH, C₂라디칼 강도비에서 구한 당량비는 가스분석에서 구한 값과 오차 5%범위에서 일치하는 것을 알 수 있다. 하지만, 2차연소영역에서의 당량비계산은 경우에 따라 큰 오차를 보여 반응이 활발한 1차 연소영역외에는 적용하기에 무리가 따른다. 차후, Gas-chromatography로 더 정확한 보정이 이루어진다면 이러한 진단법이 널리 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 11의 결과를 토대로 $X=50$ mm단면에서 연료와 2,3차 연소공기량은 일정하게 유지하고 1차연소공기량만을 변화시켜 C₂와 CH라디칼강도비로 구한 당량비를 Fig. 12에 나타내었다. 반경방향의 측정점은 이온전류가 많이 발생하는 지점을 대상으로 하였다. 선회가 없는 $S=0.0$ 의 경우 1차공기유량에 따른 큰 변화를 보이고 있으나, 선회가 있는 경우는 $\phi_s=0.9\sim 1.2$ 의 높은 분포를 나타내고 있다. 보통 화염반응대에서 당량비가 1.0으로 알려져 있으나, 선회강도를 높임으로써 1.2까지 가능함을 알 수 있다. 특히, 선회강도가 $S=0.38$ 의 경우에는 거의 일정한 분포를 하고 있어 1차연소공기의 증감에 상관치 않고 안정된 연소를 하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 OH, CH 및 C₂라디칼의 자발광강도를

동시 측정할 수 있는 광전측광장치를 구성하여 각 라디칼신호파형의 분석을 통한 고찰과 CH, C₂라디칼의 강도비에서 구한 당량비와 실제 가스분석에서 구한 값과의 비교, 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 각 라디칼의 자발광강도는 반응대부근에서 O₂농도에 비례하여 나타나고, CH라디칼은 화염반응대에 활발하며, OH라디칼은 연소기 전반에 걸쳐 고루 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한, 선회강도가 커짐에 따라 CH, C₂라디칼은 저주파영역에서 비교적 양호한 상관관계를 유지하고 있다.

(2) CH, C₂ 라디칼 강도비에서 구한 당량비는 가스분석에서 구한 것과 오차 5%범위에서 일치하는 것을 알 수 있었다. 한편, 반응대에서 보통 당량비가 1.0임을 감안할때 선회강도를 높이고, 1차 연소공기량을 조절함으로써 당량비를 1.2부근까지 증가하는 것을 알 수 있다.

(3) 이전까지 라디칼강도비에 의해 구해진 당량비가 주로 층류화염을 대상으로 한데 비하여 난류 연소에서도 이를 통해 당량비를 구할수 있다는 확신을 얻었다.

후 기

이 논문은 1991년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 대학부설연구소지원 학술연구조성비에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- (1) Crosley, D. R. and Dyer, W. J. "Two-Dimensional Imaging of Laser-Induced Fluorescence in OH in a Flame," *Int. Conf. Laser '82*, (1983), STS Press, pp. 752~760.
- (2) Dyer, W. J. and Crosley, D. R., "Fluorescence Imaging for Flame Chemistry," *Proc. Int. Conf. of Lasers '84*(1985), STS Press, p. 211.
- (3) 伊藤 廣一, 本望 行雄, 宋 載翼, 五味 努, 1985, "ラジカルの發光強度による瞬時空燃比の計測(實用バーナ火炎へ適用)," *JSME Paper*, 52卷, 481號, pp. 3362~3371.
- (4) Y. Mizutani, 1989, "Visualization and Image Analyses of Combustion Fields," *JSME Int., J.*, Series II, Vol. 32, No. 1, pp. 1~10.
- (5) 小宮山 正治, 毛馬 大成, 高城 敏美, 1990, "エキシマレーザ誘起螢光とレーリ散亂による火炎内のOH濃度と溫度の測定," *JSME Paper*, 56卷, 523號, pp. 256~262.
- (6) 中割 主敬, 水谷 幸夫, 平尾 知之, 1989, "火炎發光と油滴ミ-散亂による噴霧火炎と氣液混燒火炎の構造觀察," *JSME Paper*, 55卷, 516號, pp. 2517~2525.
- (7) Lilley, D. G., 1977, "Swirl Flows in Combustion: A Review," *AIAA Journal*, Vol. 15, No. 8, pp. 1063~1078.