

<논 문>

난류확산화염의 화염구조와 연소특성에 관한 실험적 연구(2) — 라디칼 자발광특성과 화염구조에 관하여 —

최병륜* · 장인갑** · 최경민**

(1995년 5월 29일 접수)

An Experimental Study on Flame Structure and Combustion Characteristics of Turbulent Diffusion Flame(II)

— For Characteristics of Radical Luminous Intensity and Flame Structure —

B. R. Choi, I. G. Chang and G. M. Choi

Key Words : Luminous Intensity of Radicals(라디칼 자발광강도), Flame Diagonosis(화염 진단), Correlation(상관관계), Double-Coaxial Diffusion Combustor(동축 이중확산 연소기)

Abstract

Recently, attention has been paid to the flame diagnostic by noncontact methods which dose not deform the flame shape. One of them is a method which is using the radical luminous intensity. Generally, this diagnostic method using radical luminous has been investigated its reliability by applying to laminar flame. This study, however, investigated each radical luminous signals through stocastical analysis like auto-correlation, cross-correlation, phase and coherence which were acquired from measuring radical luminous intensity of OH, CH, O₂ radicals in turbulent diffusion flame. To compare radical luminous intensity in flame with temperature, ion current and concentration, radious distribution of each properties was investigated and considered. In radical luminous intensity, correlation in the reaction zone of flame was higher than in correlation in combusted gas zone. And radious distribution of radical luminous intensity was corresponded with radious distribution of temperature, ion current and concentration. The result of the study confirms that a radical luminous flame diagnosis is possible in the turbulent diffusion flame.

기 호 설 명

$C_{XX}(t)$: 자기상관계수(auto-correlation)
 $C_{XY}(t)$: 상호상관계수(cross-correlation)
 $CH_{XY}(f)$: 코히어런스(Coherence)
 f : 주파수(Hz)
 I : 라디칼 자발광강도(mV)

I' : 이온전류의 R.M.S.(nA)
 $P_{XY}(f)$: 위상각
 R : 노즐 중심축에서 반경방향좌표(mm)
 T : 시간평균 온도(K)
 t : 시간(sec)
 t' : 온도변동치의 R.M.S.(K)
 U_s, U_c, U_f : 노즐출구에서의 축방향 평균유속(m/s)
 Z : 노즐출구에서 축방향 좌표(mm)

*회원, 부산대학교 기계공학과, 기계기술연구소

**회원, 부산대학교 대학원

λ : 주위공기류 유속과 중심공기류 유속과의 비(= U_c/U_s)

하첨자

c : 중심공기류
 f : 연료
 R : 라디칼(OH, CH, C_2 radical)
 s : 주위공기류

1. 서 론

연소반응은 수 많은 소반응(elementary reaction)으로 이루어지는 연쇄반응이다. 소반응에서 나타나는 중간생성물중에는 화염진단에 중요한 역할을 하는 화학종이 많다. 그 중 활성화학종(active species)인 라디칼은 전자적으로 여기된 상태로 있는 것이 많고 여기된 라디칼은 근자의영역에서 가시영역에 걸쳐서 밴드스펙트럼을 낸다.

Gaydon⁽¹⁾은 OH, CH, C_2 라디칼의 발광강도에 따른 화염색에 대해 언급하였고, 그 이후 세 가지 발광강도는 화염원형을 손상시키지 않는 화염진단 기술로 많이 이용되어 왔다. Crosley와 Dyer^(2,3)와 Mizutani⁽⁴⁾는 이들 세 라디칼들에 대한 화염중에서의 특성을 규명하였다. 즉, CH 라디칼은 연소반응대에서 두들어지게 나타나고, OH 라디칼은 기연가스층에 많이 나타나고 있다. Ito^(5,6) 등은 가솔린 등의 탄화수소-공기 예혼합화염이 공급당량비에 의해 화염색이 변화는 것에 착안하여 화염색을 정하는 세 가지 라디칼의 화학발광 강도비에서 당량비를 측정하는 방법에 대해 자세히 보고하고 있다.

위 연구들은 주로 층류화염에 대한 라디칼 자발광강도 분포를 해석하였지만, 난류화염에 대해 적용한 예는 많지 않다. Nakabe^(7,8) 등은 비교적 화염대가 두꺼운 2차원 층류화산화염을 대상으로 라디칼 측정방법의 검토와 결과의 타당성을 검증하였고, 이것을 시간적으로 변하는 난류화염과 분무화염 등의 실용화염에 적용하여 세 가지 라디칼 자발광신호의 비교 및 각 신호간의 상관관계를 규명하고, 또 라디칼 신호와 라만산란광 신호를 동시 측정하여 역시 각 신호간의 상관관계를 비교하였다. 高橋^(9,10)는 진단층에 형성되는 난류예혼합화염을 대상으로 화염의 거동과 구조를 조사하는 방법 중의 하나로 세 가지 라디칼 자발광을 이용하여 연소반응영역을 추정하고, 상호상관을 구하여 반응의 진행과 화염구조를 추정하였다.

그러나 난류화염에 대한 연구 중에는 라디칼 자발광강도분포와 온도, 이온전류 및 농도분포를 상호 비교하여 해석한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 화염내의 중간생성물인 OH, CH, C_2 라디칼의 자발광을 간섭필터를 사용하여 동시에 측정하여 신호의 특성을 파악하고, 이러한 세 종류의 라디칼 자발광신호를 통계처리하여, 각 라디칼의 자기상관관계(auto-correlation), 상호상관관계(cross-correlation), 위상각(phase) 및 코히어런스(coherence)와 같은 상관관계를 분석하였다. 그리고 라디칼 자발광강도의 분포를 온도, 이온전류 및 농도분포와 비교하기 위하여 각 물리량들의 반경방향 분포를 조사하여 고찰하였고, 이것을 기초로 속도차가 있는 두 공기류의 진단층에 저속의 기체연료를 주입하여 연료와 산화제의 접촉면적을 증대시킨 동축 이중화산화염의 구조를 조사·연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 동축 이중화산화염소기

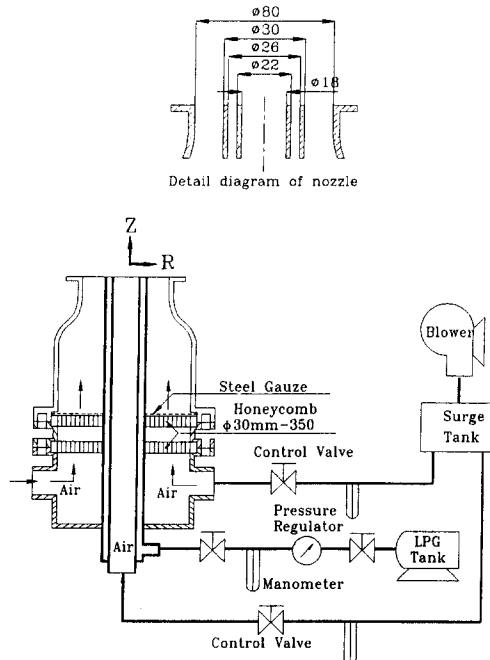


Fig. 1 Schematics of experimental apparatus

Table 1 Experimental condition

| | Fuel | | | Central Air | | | Surrounding Air | | |
|----|---------|-------|--------|-------------|-------|--------|-----------------|-------|--------|
| | Deq,f | U_f | Re_f | Deq,c | U_c | Re_c | Deq,s | U_s | Re_s |
| S1 | 13.86 | 0.67 | 255 | 18 | 1.5 | 1687 | 74.96 | 9 | 28120 |
| C1 | | | | | 9 | 10120 | | 1.5 | 4686 |

(double-coaxial diffusion combustor)와 연소용 연료 및 공기의 공급계를 나타낸 것이다. 연료노즐은 내경 18 mm, 두께 2 mm의 원관과 내경 26 mm, 두께 2 mm의 원관이 동축으로 설치되어 두개의 동심원 사이(간격 2 mm)에서 연료가 공급되고, 이 연료노즐은 출구직경 80 mm의 공기노즐에 동축으로 설치되어 있다.

연소용 공기는 송풍기에서 공급되며 압력맥동을 최소화하기 위해서 서지 탱크를 거친 다음 중심기류와 주위기류로 나누어져 연소기로 공급된다. 기체연료는 압력용기에서 공급되며, 압력조정기를 거쳐 가스유량 조절밸브에 의해 유량이 조절되어 연소기에 공급된다.

내측원관으로 분출되는 공기류를 중심공기류, 외측원관의 주위에서 분출되는 공기류를 주위공기류라 칭하고 각각의 축방향 출구 평균유속을 U_c , U_s 로 표시한다. 중심공기류 및 주위공기류를 적절히 조절하면 여러 종류의 화염의 형태를 얻을 수 있으며, 본 연구에서는 고속측 공기류의 유속은 9 m/s로, 저속측 공기류는 1.5 m/s로 일정하게 유지하였다. S1 화염은 유속비 $\lambda (= U_c / U_s)$ 가 1/6로 주위공기류가 고속인 경우의 화염이고, C1 화염은 $\lambda = 6$ 인 조건으로 중심공기류가 고속인 경우의 화염이다. 사용된 연료는 상용 프로판가스(LPG)이며, 연료량은 프로판가스용 적산유량계로써 측정하고 연료량을 노즐 출구단면적으로 나눈 출구 평균유속은 U_f 로 표시하였다. 연료의 출구 평균유속은 고속측공기류와 저속측유속에 비해 상대적으로 낮은 $U_f = 0.67$ m/s로 두 조건 모두 일정하게 하였으며, 자세한 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험방법

가스분석은 가스크로마토그래프(HP-5890 series II)의 TCD에 의해 O_2 , N_2 , CO , CH_4 , CO_2 성분을 측정하였으며, 샘플링 프루브는 흡입구경이 0.4 mm에서 2 mm로 확대하여 반응을 동결시켜 사용

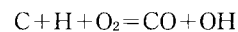
하였다. 분석을 위한 컬럼은 Cabosieve S를 사용하였다.

이온전류측정은 고온의 화염중에서 내산성이 좋고, 전도성이 우수한 소선경 0.1 mm의 Pt-Rh 13% 합금을 테프론관에 넣고, 석영유리관 속에 삽입한 후 수냉식 프로브에 넣어 사용하였다. 정전탐침은 석영유리관 보다 0.5 mm 돌출시켜 감응부로부터, -18 volt를 가해서 화염대의 양이온을 검출하였다.

변동온도의 프로브는 세선의 직경이 50 μ m인 Pt/Pt-Rh 13% 열전대를 세선과 같은 재질의 직경 0.5 mm의 지주에 용접하여, 비수냉식의 석영 자기관(외경 3.9 mm)에 넣어 사용하였다. 이때 변동온도 프로브는 이온전류와 동시측정을 위해 수냉식의 이온프로브에 고정시켜 사용하였으며, 이온전류 측정의 정전탐침과 변동온도의 열전대 접점과의 거리는 1 mm로 하였다. 열전대에 의해서 화염내의 온도 변동을 검출하는 경우, 주위의 가스온도가 고주파로 변동함에 따라 발생하는 진폭의 감쇄나 위상 지연을 전기적으로 보상하여 열전대의 주파수에 대한 응답성을 높였다.⁽¹¹⁻¹³⁾

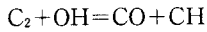
2.3 라디칼 계측법

먼저 라디칼의 생성기구에 관해서 Dyer와 Crosley의 연구^(2,3)에 의하면, OH 라디칼은 수명시간이 길기 때문에 기연가스의 하류영역까지 고루 분포하고 있으며,



의 대표적인 반응에서 발생한 OH 라디칼이 $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ 로 천이할 때에 발하는 (0, 0), (1, 0), (1, 1) 밴드의 발광이 대부분이며, 파장은 310 nm 부근이다. 또한 OH 라디칼의 발광강도는 CH 라디칼의 농도에 대응되며 연소반응영역을 중심으로 출현한다.

또, CH 라디칼의 자발광은



의 대표적인 반응에서 생긴 CH 라디칼이 $A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$ 로 천이할 때에 발하는 (0, 0) 밴드의 발광이 대부분이며, 431 nm 부근의 파장을 가지며, 청색 발광을 낸다. CH 라디칼의 발광강도는 C_2 라디칼 농도에 비례하고, 주로 탄화수소의 초기반응 영역에서 관찰된다.

C_2 라디칼의 자발광은 C_2 라디칼이 $A^3\Pi_g \rightarrow X^3\Pi_u$ 로 천이할 때 발하는 (0, 0) 밴드의 발광이 대부분이고, 516 nm 부근의 파장을 가지며, 초록색 발광을 낸다. 또한 CH와 C_2 라디칼 자발광강도비는 당량비와 강한 상관관을 갖고 있다고 보고되고 있다.^(5,6)

Fig. 2는 라디칼 자발광강도를 측정하기 위한 채

광부 광학계와 광전측정장치의 계통도를 나타낸 것이다. 광학계는 세 종류의 라디칼 자발광신호를 동시에 채취할 수 있도록 구성하였다. 화학발광은 화염으로부터 400 mm 위치에 설치한 석영렌즈(초점거리 $f=200$ mm)로 집광되어 다이크로익미러(dichroic mirror)에 의해 OH밴드를 포함하는 근자외역의 광은 반사되고, CH와 C_2 밴드를 포함하는 가시역에서 근적외역까지의 광은 투과된다. 분리된 근자외역 및 가시역의 화학발광은 각각 광전자증배관(HAMAMATSU, R106UH (OH용), IP28A (CH, C_2 용))에서 검출된다. PM과 핀홀 P(직경 2 mm)의 사이에는 각각 광간섭필터(IF1(C_2 발광밴드), IF2(CH 발광밴드) 및 IF3(OH 발광밴드))가 설치되어 있다. 그리고 광학계의 광축 및 각 렌즈

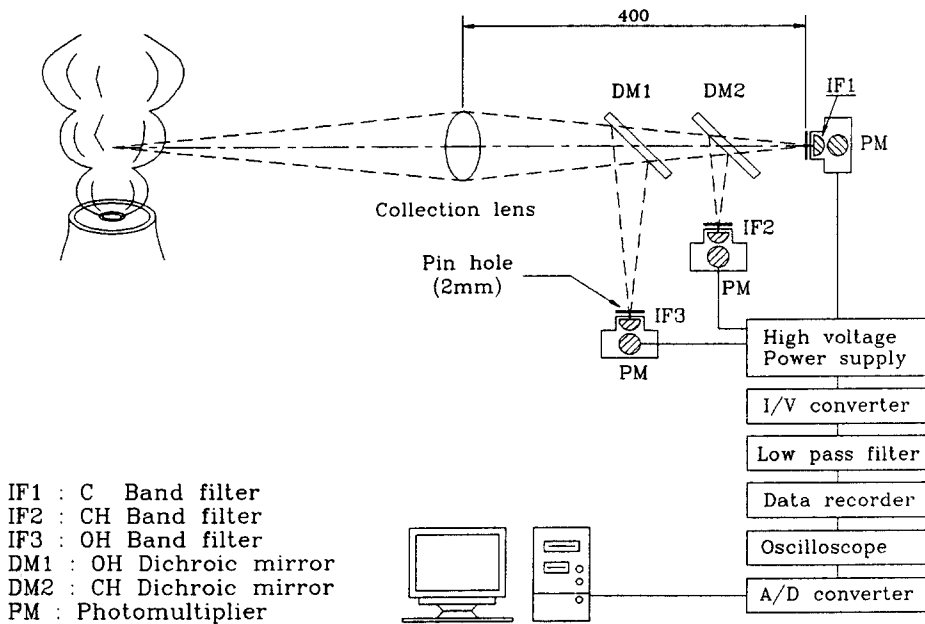


Fig. 2 Block diagram for simultaneous measuring of radical luminous intensity of radicals

Table 2 Band filter characteristics

| Observed Species | Observed Spectrum (nm) | Band Filter | | |
|------------------|------------------------|----------------------|-----------------|------------------------|
| | | λ_{max} (nm) | Half Width (nm) | 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 |

의 초점은 He-Ne laser를 이용하여 맞추었다. 이에 대한 자세한 사양을 Table 2에 나타내었다. 광학계의 출력은 I-V converter를 통해 전압으로 변환시키고 증폭시킨 후, low-pass filter를 거쳐 데이터 레코드에 기록되고, 기록된 신호는 A/D 변환기를 거쳐 퍼스널컴퓨터에서 해석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 라디칼 자발광의 특성

연소과정에 있어서 연소반응영역을 규명하고, 반응의 진행양상 및 라디칼 자발광으로 화염구조를 추정하기 위해서는 우선, 세 가지 라디칼 자발광의 특성을 파악해야 한다. 따라서 화염중 변동온도의 파형에 따른 대표적인 2조건에 대해 세 가지의 라디칼 자발광강도를 동시에 측정하여, 각 라디칼의 자기상관관계, OH 라디칼과 CH 라디칼의 상호상관관계, CH 라디칼과 C₂ 라디칼의 상호상관관계를 고찰하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 중심공기류가 빠른 조건인 C1

화염의 Z=50 mm단면에서 R=12.5 mm와 R=20 mm 위치에 대한 OH, CH, C₂ 라디칼 자발광의 신호와 변동온도 신호를 나타낸 것이다.

R=12.5 mm 위치에서의 변동온도 파형은 저온의 미연혼합기중에 고온의 연소가스가 혼합되는 것을 나타내며, 반응이 중심공기류에 의해 시작되는 영역인 것으로 생각된다. 또한 이 영역은 중심공기류에 의해 강한 포텐셜 코어(Potential core)가 형성되어 외관상의 화염도 강한 발광을 하고 있는 영역에 해당되고, 화염색 역시 전체적으로 청염의 화염중에서 청녹색을 띄고 있는 영역에 해당된다.

R=20 mm 위치는 변동온도 파형이 하방피크의 형상이고, R=12.5 mm 위치에 비해 그 신호의 주기가 긴 것으로 보아 중심공기류에 의해 시작된 반응이 거의 종결되는 영역으로 고온의 연소가스속에 저온의 미연가스가 혼합되어 연소하는 영역으로 사료된다. 이 영역의 라디칼 자발광신호의 파형도 역시 R=12.5 mm 위치에 비해 상대적으로 낮은 발광강도를 나타내고 있어, 주로 활발한 반응보다는 고온의 연소가스가 많이 존재하는 영역임을 알 수 있다.

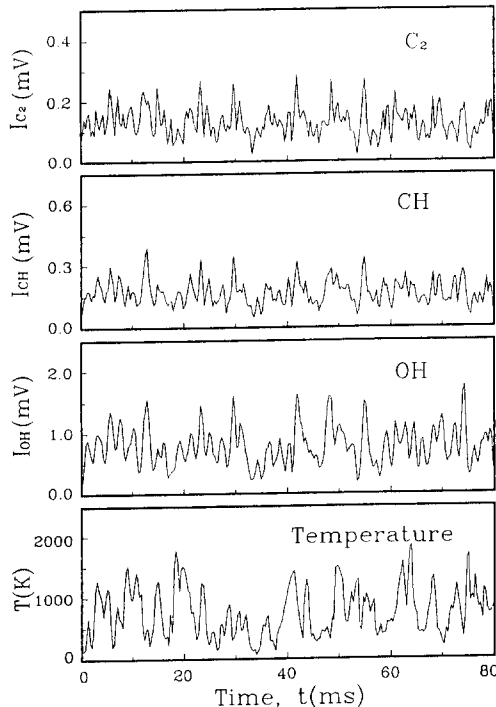


Fig. 3 Waves of radical luminous intensity and fluctuating temperature (C1 flame, at Z=50 mm, R=12.5 mm)

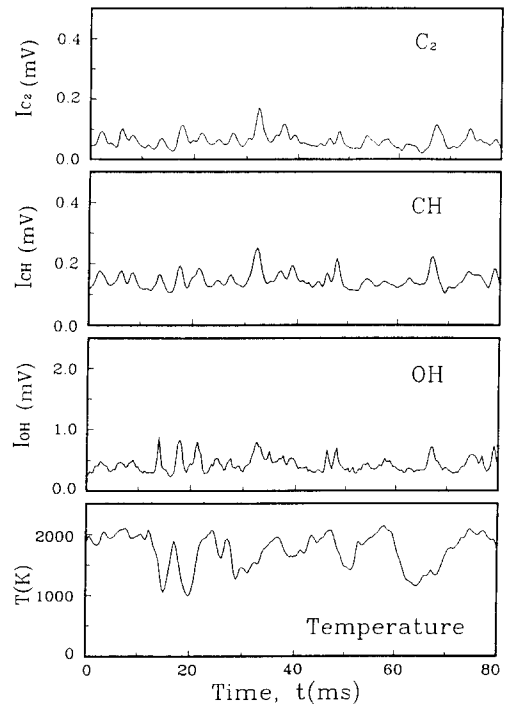


Fig. 4 Waves of radical luminous intensity and fluctuating temperature (C1 flame, at Z=50 mm, R=20 mm)

Fig. 5는 Fig. 3과 Fig. 4의 OH, CH, C₂ 라디칼 자발광의 신호에 대한 자기상관계수 C_{xx}(t)를 나타낸 것이다. 상관계수가 반응이 거의 종결된 R=20 mm 위치에서는 완만하게 변하지만, 화염중 반응이 비교적 활발한 영역인 R=12.5 mm 위치에서의 상관계수는 급격히 떨어져 시간 스케일이 매우 짧아짐을 알 수 있다. 따라서 R=12.5 mm 영역은 난류에 의해 스케일이 감소하게 되어, 주로 작은 스케일의 와에 지배되는 반응영역으로 추정할 수 있으며, 각 라디칼 모두 비슷한 시간 스케일을 가지고 있다. 그러나 R=20 mm 영역에서는 고온의 연소가스에 의해 생성되는 비교적 큰 스케일의 와에 대응하는 영역으로 추정될 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 3과 Fig. 4의 라디칼의 자발광신호에 대한 상호상관계수 C_{xy}(t)를 나타낸 것이다. C_{OH, CH}(t)는 OH 라디칼 자발광강도 I_{OH}(t)와 CH

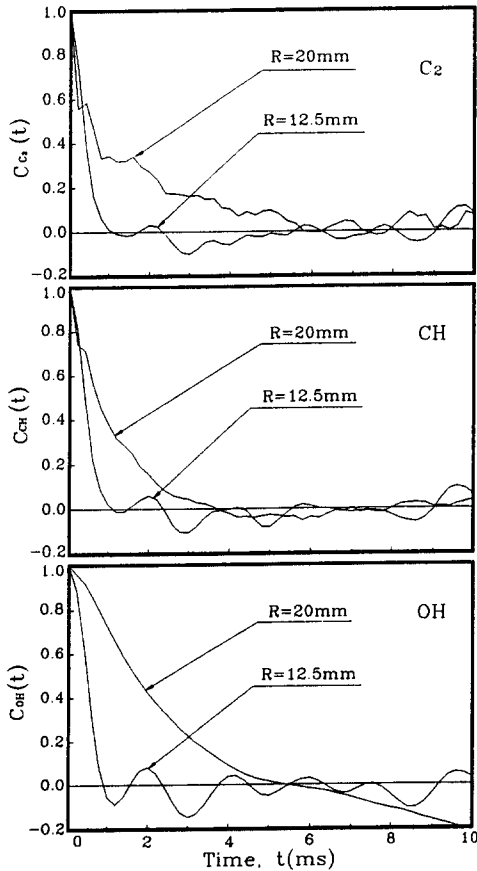


Fig. 5 Auto-correlation coefficient of radicals (C1 flame, Z=50 mm)

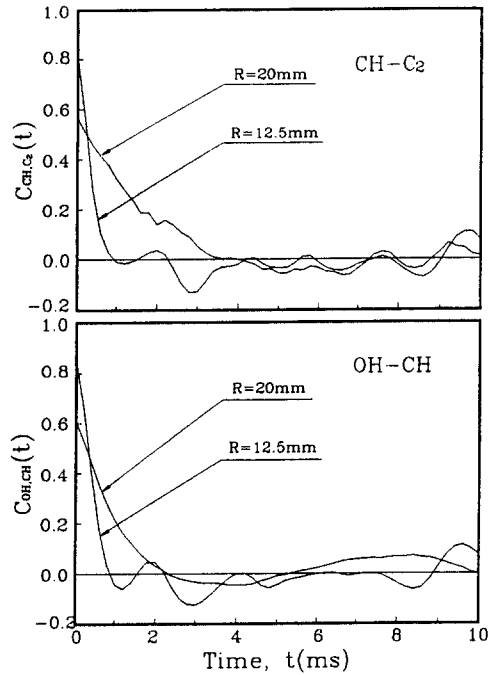


Fig. 6 Cross-correlation coefficient of radicals (C1 flame, Z=50 mm)

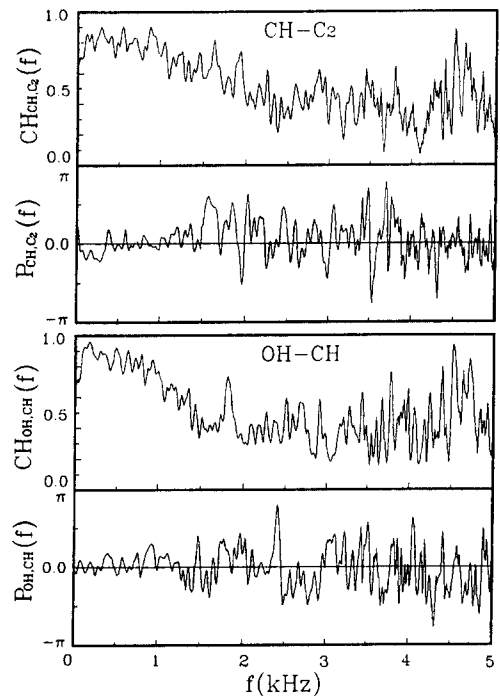


Fig. 7 Coherence and phase of radicals (C1 flame, at Z=50 mm, R=12.5 mm)

라디칼 자발광강도 $I_{CH}(t+\tau)$ 와 상호상관계수를 나타내고, $C_{CH, c2}(f)$ 는 CH 라디칼 자발광강도 $I_{CH}(t)$ 와 C_2 라디칼 자발광강도 $I_{c2}(t+\tau)$ 와의 상호상관계수를 나타낸다. $t=0$ 에서 $R=12.5$ mm 위치와 $R=20$ mm 위치에 대한 상호상관계수는 각 위치 모두 $C_{OH, CH}(0)$ 값이 $C_{CH, c2}(0)$ 값보다 높게 나타나는 것으로 보아 세 가지 라디칼 중 OH와 CH 라디칼의 상호상관관계가 CH와 C_2 라디칼의 상호상관관계보다 더 높은 상관성을 나타낸다. 또한 $R=12.5$ mm 위치의 상호상관계수는 0.8 부근의 값을 가지는데 비해, $R=20$ mm 위치의 상호상관계수는 0.6 부근의 값을 가지고 있다. OH와 CH 라디칼의 상호상관관계 및 CH와 C_2 라디칼의 상호상관관계 모두 $R=12.5$ mm 위치의 상호상관이 $R=20$ mm 위치의 상호상관보다 더 높은 상관관계를 나타낸다.

Fig. 7과 Fig. 8은 Fig. 3과 Fig. 4에 나타낸 각 라디칼의 자발광신호에 대한 위상각(phase) $P_{XY}(f)$ 와 코히어런스(coherence) $CH_{XY}(f)$ 를 나타낸 것이다.

$P_{OH, CH}(f)$ 와 $CH_{OH, CH}(f)$ 는 OH 라디칼 자발광과

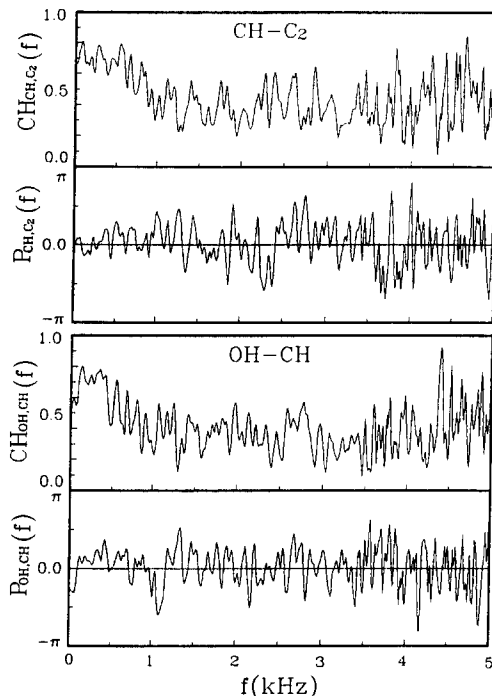


Fig. 8 Coherence and phase of radicals.
(C1 flame, at $Z=50$ mm, $R=20$ mm)

CH 라디칼 자발광신호의 위상각과 코히어런스를 나타낸 것이고, $P_{CH, c2}(f)$ 와 $CH_{CH, c2}(f)$ 는 CH 라디칼 자발광과 C_2 라디칼 자발광의 위상각과 코히어런스를 나타낸 것이다. 코히어런스는 $CH^2(f) = |C_{xy}(f)|^2 / (C_{xx}(f) \cdot C_{yy}(f))$ 로 구했고, 위상각은 주파수 응답함수에서 $H(f) = |H(f)|e^{-jP(f)}$ 가 되고, 여기에서 $|H(f)|$ 는 게인(gain)에 해당하며 $P(f)$ 를 위상각으로 나타내었다. 여기서 f 는 푸리에(fourier) 주파수를 나타내고 있고, 각 값은 라디칼 자발광신호의 동일 푸리에 주파수 성분간의 위상각과 상호상관을 의미한다.

$R=12.5$ mm 위치에서는 1 kHz 이내의 저주파 영역에서는 위상각이 주로 0 rad을 중심으로 분포하고 있고, 코히어런스 역시 0.9 부근의 값을 가지면서 분포하고 있어 비교적 양호한 상관성을 가지지만, 1 kHz이상의 고주파 영역에서는 상관성이 미흡하여 시간상과 공간상으로 서로 어긋난 상태로 분포하고 있다. $R=20$ mm 위치에서는 1 kHz 이내의 저주파영역에서는 위상각이 주로 0 rad을 중심으로 분포하고 있고, 코히어런스 역시 0.8 부근의 값을 가지면서 분포하고 있어, $R=12.5$ mm 위치에 비해 다소 상관성이 낮은 분포를 가진다. $R=12.5$ mm와 $R=20$ mm 위치 모두 코히어런스 값에 따르면, OH와 CH 라디칼의 상관성이 CH와 C_2 라디칼의 상관성보다 우수함을 알 수 있다.

이상의 결과로 상호상관관계 $C_{xy}(t)$, 위상각 $P_{xy}(f)$ 와 코히어런스 $CH_{xy}(f)$ 의 분포에 따르면 OH와 CH 라디칼의 상관성이 CH와 C_2 라디칼의 상관성보다 높았고, 반응영역의 상관성이 기연가스영역의 상관성보다 더 높은 것으로 생각된다.

3.2 라디칼 자발광강도와 화염구조

Fig. 9와 Fig. 10은 시간평균 라디칼 자발광의 강도와 O_2 , CO, CO_2 농도분포, 시간평균 온도와 변동 온도의 RMS치 및 이온전류의 RMS치 분포와의 관계를 나타낸 것이다.

Fig. 9는 주위공기류가 빠른 S1 화염의 $Z=50$ mm 단면에 대한 라디칼 자발광의 강도와 농도분포, 온도 및 이온전류치의 반경방향 분포를 나타낸 것이다. 이온전류의 RMS치와 CO_2 농도가 $R=12.5$ mm 부근에서 극대값을 가지고, O_2 농도분포는 $R=12.5$ mm 부근에서 극소치를 나타내고 있으며, CO 농도는 $R=15$ mm 위치에서 극대치를 나타낸다. 따라서 이온전류의 RMS치와 농도분포를

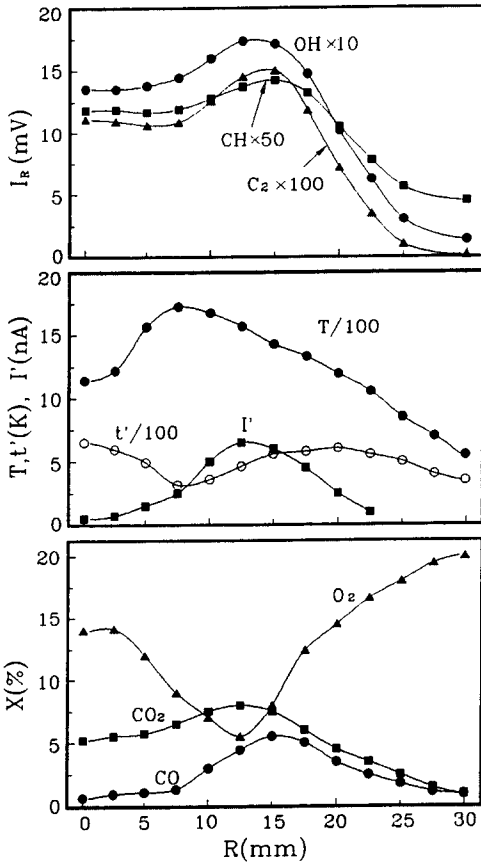


Fig. 9 Comparison of radical luminous intensity, temperature, ion current and concentration (S1 flame, $Z=50$ mm)

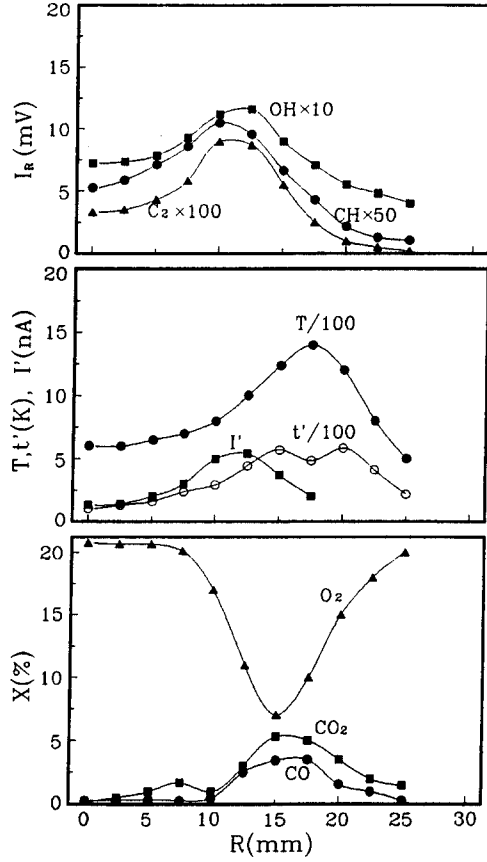


Fig. 10 Comparison of radical luminous intensity, temperature, ion current and concentration (C1 flame, $Z=50$ mm)

통해 추정되는 S1 화염의 주반응영역은 $R=12.5$ mm와 $R=15$ mm영역 부근에서 형성되는 것으로 판단된다. OH, CH, C_2 라디칼의 자발광강도의 반경방향 분포 역시 비슷한 분포를 나타내고 있다. $R=12.5$ mm 위치에서 OH 라디칼의 자발광강도가 극대값을 가지고, $R=15$ mm 위치에서 CH와 C_2 라디칼의 자발광강도가 극대값을 가진다. 이것은 농도분포와 이온전류치에 의해 추정되는 주반응영역과 유사한 분포를 나타낸다. 온도분포는 시간평균 온도분포가 $R=7.5$ mm 부근에서 극대값을 가지는데, 이러한 분포는 주위공기류에 의해 반응이 시작되고, 생성된 고온의 연소가스는 중심축 방향으로 밀리는 현상을 나타낸다. 변동온도의 RMS치는 $R=20$ mm부근에서 극대값을 가지는데, 이 영역에서는 OH, CH, C_2 라디칼 자발광강도의 구배도 최대가 된다.

따라서 주위공기류가 강한 조건의 화염에서는 라디칼 자발광강도를 통해 추정되는 반응영역이 이온전류와 농도분포를 통한 반응영역과 일치하는 분포를 보이지만, 온도분포는 조금 어긋난 분포를 나타낸다.

Fig. 10은 중심공기류가 빠른 C1 화염의 $Z=50$ mm 단면에서의 반경방향 분포를 나타낸 것이다. 이온전류의 RMS치는 $R=12.5$ mm 부근에서 극대값을 가지고, O_2 농도분포는 $R=15$ mm 부근에서 극소치를 나타내고 있으며, CO , CO_2 농도는 각각 $R=17.5$ mm와 $R=15$ mm에서 극대치를 가진다. 따라서 C1 화염의 반응영역은 이온전류 분포에서 12.5 mm, 농도분포에서 12.5~17.5 mm로 추정된다. OH, CH, C_2 라디칼의 자발광강도의 반경방향 분포는 $R=12.5$ mm에서 OH 라디칼의 자발광강도가 극대값을 가지고, $R=10$ mm에서 CH와 C_2 라

라디칼의 자발광강도가 극대값을 가진다. 즉, 라디칼 자발광강도에 의해 추정되는 반응영역은 $R=10\text{ mm}\sim 12.5\text{ mm}$ 부근에서 형성되고, 이것은 이온전류의 극대값과는 동일한 분포를 보이지만, 농도의 극대, 극소값에 비하여 중심축 방향으로 약간 이동된 분포를 보인다. 온도분포는 시간평균 온도분포가 $R=17.5\text{ mm}$ 부근에서 극대값을 가지고, 변동 온도의 RMS치는 $R=15\text{ mm}$ 와 $R=20\text{ mm}$ 부근에서 각각 극대값을 가지므로 시간평균 온도의 구배는 $R=15\text{ mm}$ 와 $R=20\text{ mm}$ 부근에서 최대가 된다. 이러한 분포는 라디칼 자발광강도, 이온전류 및 농도 분포에 비해 중심축에서 더욱 더 벗어난 경향을 보인다. 변동온도의 RMS치가 최대로 되는 영역은 $R=15\text{ mm}$ 부근으로 이 영역에서는 OH, CH, C_2 라디칼 자발광강도의 구배도 최대가 된다. 따라서 중심공기류가 빠른 C1 화염에서는 중심공기류의 원활한 혼합작용으로 중심축에 가까운 영역에 강한 발광대가 형성되어 라디칼의 자발광강도가 최대인 영역이 농도분포와 온도에 의해 추정되는 반응영역보다 다소 중심축으로 당겨져 형성되어 있으나 이온전류의 RMS치가 극대값을 가지는 영역과는 일치하는 분포를 가진다.

이상과 같이 OH, CH, C_2 라디칼의 자발광강도의 분포에 대응하는 반응영역은 이온전류의 RMS치가 최대인 영역과 일치한 분포를 보이고 있으며, 농도 분포와는 거의 유사한 분포를 가진다. 또한 온도분포의 극대값은 저속축영역으로 다소 벗어나 OH, CH, C_2 라디칼의 자발광강도의 분포에 대응한다.

Fig. 11과 Fig. 12는 S1 화염과 C1 화염에 대한 OH 라디칼 자발광강도 분포, O_2 , CO, CO_2 농도분포 및 시간평균 온도분포를 나타낸 것이다. Nakabe 등⁽⁷⁾은 라디칼 계측을 시간적으로 변하는

난류화염과 분무화염 등의 실용화염에 적용한 결과, 화염의 선단부는 자발광의 강도가 낮고, 또 C_2 라디칼 자발광은 당량비 변화에 매우 민감하다고 보고하고 있다. 따라서 측정한계는 시간평균적인 화염의 변화가 상대적으로 적은 $Z=100\text{ mm}$ 단면까지로 하였다. 그리고 CH와 C_2 라디칼 자발광강도의 분포는 OH 라디칼 자발광강도의 분포와 동일한 분포를 가지고 있으므로, 발광강도가 가장 두드러진 OH 라디칼의 분포만 나타내었다.

S1 화염의 OH 라디칼 자발광은 비교적 높은 자발광강도가 전화염에 걸쳐 넓게 고루 분포하고 있으며, 특히 최대 자발광강도를 나타내는 영역은 비교적 상류영역인 $Z=50\text{ mm}$ 단면 이전 영역에 분포하는 것으로 보아 주반응영역이 C1 화염보다 상류에 형성되는 것으로 생각된다. 온도분포에서 1500 K 이상의 고온영역이 전화염에 걸쳐 아주 넓게 분포하고 있는 것과 유사한 분포를 보이고 있다. 이것은 식 (1)과 같이 반응대에서 생성되는 OH 라디칼 자발광과 그리고 아주 고온의 영역에서 발생하는 열해리에 의해 발생하는 OH 라디칼 자발광에 의한 것으로 사료된다. 따라서 주위공기류가 빠른 조건에서 화염중의 OH 라디칼은 반응장과 온도장의 복합효과를 나타내는 것을 의미하고 있는 것으로 생각되며, 또한 O_2 , CO, CO_2 농도분포 역시 전화염에 걸쳐 넓은 분포를 보이고 있다.

C1 화염은 각 분포들이 S1 화염에 비해 상대적으로 좁게 분포하고 있다. $R=10\sim 15\text{ mm}$ 영역에서 약 900 K~1200 K 사이의 온도분포가 형성되어 있고, O_2 농도가 최소값을 가지고, CO, CO_2 농도는 최대값을 가지는 영역이 형성되어 있는 것으로 보아 이 영역에서 반응대가 형성되어 있는 것으로 판단된다. 또한 OH 라디칼 자발광강도가 높게 나

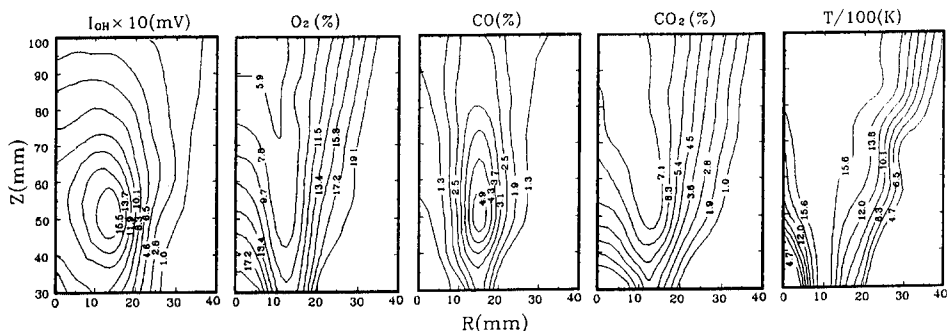


Fig. 11 Distribution of luminous intensity, temperature and concentration for S1 flame

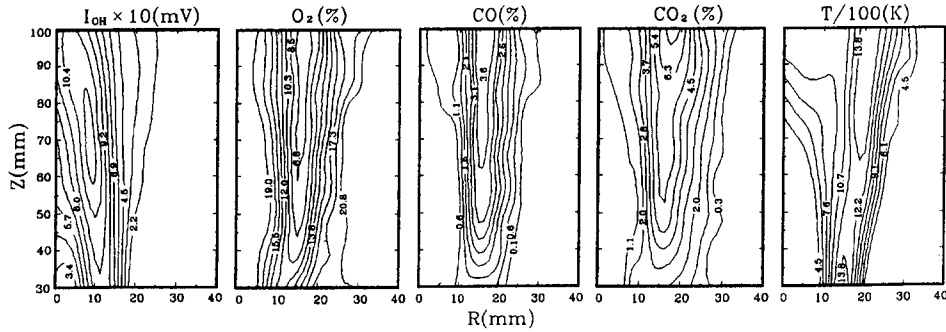


Fig. 12 Distribution of luminous intensity, temperature and concentration for C1 flame

타내고 있는 영역과 유사한 분포를 보이고 있고, 이 영역에서의 온도가 약 1000 K 부근의 값을 가지는 것으로 보아 식 (1)의 반응대에서 생성되는 OH 라디칼 자발광에 의한 분포를 나타내고 있는 것으로 생각된다.

주위공기류가 빠른 조건의 화염에서는 하류로 가면서 라디칼 자발광, 농도분포 및 온도분포의 최대치가 중심축으로 당겨져 분포하고 있으나 중심공기류가 빠른 조건의 화염에서는 각 분포의 최대치가 중심축에서 벗어난 분포를 보인다.

4. 결 론

OH, CH, C₂ 라디칼 자발광신호를 동시에 분석하여, 각 라디칼의 자기상관관계, OH 라디칼과 CH 라디칼의 상호상관관계, CH 라디칼과 C₂ 라디칼의 상호상관관계를 고찰하고, 라디칼 자발광강도의 분포를 온도, 이온전류치 및 농도분포와 비교하여 화염의 구조를 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) OH, CH, C₂ 라디칼 자발광신호는 반응대 영역의 신호가 상관관계가 높았고, 기연가스영역에서는 상관관계가 낮았다. OH와 CH 라디칼의 상호상관관계가 CH와 C₂ 라디칼의 상호상관관계보다 높았다.

(2) OH, CH, C₂ 라디칼의 분포는 반응대의 반응강도에 비례하는 이온전류분포와 동일한 경향을 보이며, O₂, CO 및 CO₂ 농도분포와는 유사한 경향을 보이지만, 온도분포는 주공기류 방향에 대해 조금 어긋난 분포를 가진다.

(3) 주위공기류가 빠른 조건의 화염에서는 OH 라디칼이 전화염장에 대해 넓게 분포하고 있고, 중

심공기류가 빠른조건의 화염에서는 중심축에서 벗어난 전단층영역에 분포하고 있다.

(4) 종래의 비교적 화염대가 두꺼운 2차원 층류화산화염을 대상으로 한 라디칼 계측방법의 타당성과 마찬가지로 시간적으로 변하는 난류화염에 대한 OH, CH, C₂ 라디칼 자발광에 의한 화염전단의 타당성도 인정됨을 확인하였다.

후 기

본 연구는 1995년도 한국과학재단의 핵심전문연구비(과제번호 : 951-1007-022-1)의 지원에 의해 수행된 연구결과이며, 이에 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Gaydon, A., G., 1957, *Spectroscopy of Flame*, Wiley Press.
- (2) Crosley, D. R. and Dyer, W. J., 1983, "Two-Dimensional Imaging of Laser-Induced Fluorescence in OH in a Flame," *Int. Conf. Laser '82, STS Press*, pp. 752~760.
- (3) Dyer, W. J. and Crosley, D. R., 1985, "Fluorescence Imaging for Flame Chemistry," *Proc. Int. Conf. of Lasers '84, STS Press*, p. 211.
- (4) Miztani, Y., 1989, "Visualization and Image Analyses of Combustion Fields," *JSME Int. J (II)*, Vol. 32, No. 1.
- (5) Ito, H., Hommo, Y., Song, J. I. and Gomi, T., 1986, "An Instantaneous Measuring Method of Air-Fuel Ratio by Luminous Intensity of Radi-

- cals (Application to Practical Burner Flames)," *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., (in Japanese)*, Vol. 52, No. 481, B, pp. 3362~3370.
- (6) Ito, H., 1992, "Quantative Characterization of Flame Color and its Application," *JSME (B) Int. J (II)*, Vol. 35, No. 2.
- (7) Nakabe, K., Mizutani, Y. and Hirao, T., 1989, "A Study on the Structure of Spray Flames and Gas-Liquid Coburning Flames in Terms of Their Light Emission and Mie-Scattering of Droplets," *JSME.*, Vol. 55, No. 516B, pp. 2517~2525.
- (8) Nakabe, K., Mizutani, Y., Fujioka, H. and Akamatsu, F., 1992, "Structure Observation of Spray Flames by Spectral Visualization and Mie-Scattering Techniques." *JSME.*, Vol. 58, No. 546B, pp. 339~345.
- (9) 高橋丈雄, 1991, "亂流豫混合火炎の挙動と構造に関する研究," 博士學位論文, 大阪大學.
- (10) Takahashi, T., Katuski, M. and Mizutani, Y., 1992, "Fine Flame Structure and Combustion Mechanism of Lean Turbulent Premixed Flames," *JSME (B)*, Vol. 58, No. 547, p. 929.
- (11) Kunugi, M. and Jinno, H., 1959, "Measurement of Fluctuating Flame Temperature," *7th symp. (Int.) on Combustion*, pp. 942~948.
- (12) Lockwood, F. C. and Odidi, A. O., 1975, "Measurement of Mean and Fluctuating Temperature and of Ion Concentration in Round Free-Jet Turbulent Diffusion and Primixed Flames," *15th Symposium (International) on Combustion*, pp. 561~571.
- (13) Takagi, T., Shin, H. D. and Ishio, A., 1981, "A Study on the Structure of Turbulent Diffusion Flame: Properties of Fluctuations of Velocity, Temperature and Ion Concentration," *Combustion and Flame*, Vol. 41, pp. 261~271.
- (14) 장인갑, 최경민, 김태환, 최병륜, 1995, "난류확산화염에서 라디칼 자발광특성과 화염구조에 관한 연구," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 523~528.