

이중동축 메탄/공기 층류 부분 예혼합화염에서의 화염구조와 자발광 배출 특성: 안쪽관 연료주입의 영향

오정석[†] · 정용기* · 전충환** · 장영준**

Flame Structure and Light Emission Characteristics in Coaxial Laminar Partially Premixed CH₄/Air Flames: Effect of Central Fuel Injection

Jeong Seog Oh, Yong Ki Jeong, Chung Hwan Jeon and Young June Chang

Key Words: Partially premixed flame(부분예혼합화염), Chemiluminescence(자발광), Flame structure(화염구조)

Abstract

In this study, the effect of central fuel injection on a coaxial laminar CH₄/air flame was experimented at the defined premixing condition($\phi=1.90$, $\sigma=50/75/100\%$, $x/D=10$). The partial premixing parameter are the equivalence ratio that total fuel is fixed at 200cc/min, the fuel split degree which means the percentage of fuel entering the outer tube to the total amount, and the mixing distance indicating the nonreactant mixture's homogeneity between inner tube top and burner exit. The object is to investigate the flame structure and chemiluminescence characteristics of laminar partial premixed flame as changing mixing parameters. The radical signal was acquired from ICCD camera and PMT. Each intensity was compared with Abel inverted value for measuring the effect of background light on the peak signal location and the intensity at central preheat zone. The results show that the peak location of each radical was broaden as the fuel split degree increasing because the mixing quality was enhanced. and OH* is a good indicator for flame front between reaction and preheat zone. At last C₂* has the same tendency with CH* but a thinner reaction zone than CH* due to a rapid decay on the burned gas side.

기호설명

- ϕ : 당량비 (equivalence ratio)
 σ : 연료분배율 (fuel split degree)
 x : 버너출구에서 안쪽관까지의 수직거리
 (distance between inner and out tube exit)
 D : 안쪽관의 직경 (inner tube diameter)
 x/D : 혼합거리 (mixing distance)
 I_f : 자발광 강도 (chemiluminescence intensity)

1. 서 론

부분 예혼합화염은 연소이전에 연료와 산화제가 부분적으로 예혼합되어 있는 화염이며, 당량비의 관점에서는 $\phi=1$ 에서 확산화염 이전까지이고, 혼합기내의 연료분포 관점에서 보면 완전 균일한 예혼합화염이 아닌 국소적으로 불균일하게 분포되어있는 상태를 나타낸다.⁽¹⁾ 이러한 연소현상은 희박화염에 비하여 안정되고, 확산화염보다 배기배출수준이 낮은 장점이 있다.⁽²⁾

연소현상을 규명함에 있어서 화염구조는 반응 영역의 연소상태를 이해할 수 있는 하나의 방법으로, 연소시 발생하는 빛인 자발광의 특성으로서 화염내의 연소를 진단하는 연구가 많이 이루어지고 있다.

[†] 책임저자, 학생회원, 부산대학교 기계공학부
 E-mail : remifa@pusan.ac.kr
 TEL : (051)510-3035 FAX : (051)582-9818

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

Table 1 Parameters and Experimental conditions

Parameter		Range		
ϕ		1.90		
$Q_{\text{fuel}} = 200$ [cc/min], $Q_{\text{pri.air}} = 1000$ [cc/min], $Q_{\text{sec.air}} = 55$ [slpm]				
σ (%)		50	75	100
Inner tube	ϕ_{in}	∞	∞	∞
	V_{in} [cm/sec]	53.052	26.526	0
	Re_{in}	65.903	32.951	0
	Fr_{in}	14.360	3.590	0
Out tube	ϕ_{out}	0.95	1.43	1.90
	V_{out} [cm/sec]	42.441	44.371	46.300
	Re_{out}	132.629	137.797	143.788
	Fr_{out}	3.676	4.018	4.375

Kojima 등⁽³⁾은 층류 부분 예혼합화염의 한 지점에서의 OH*, CH*, C₂* 자발광의 당량비($\phi = 0.9 \sim 1.5$)에 따른 배출특성과 자발광의 비인 C₂*/OH*, C₂*/CH*, OH*/CH*가 당량비에 따라 선형적인 관계를 가짐을 밝혀내었다.

Ikeda 등^(4, 5)은 층류와 난류 예혼합화염의 국소 지점에서 취득한 자발광과 자발광비로 화염구조를 파악하였고, 압력변화(0.5~1.5MPa)에 따른 자발광 신호강도에 대해 연구하여 압력이 증가에 따른 자발광 강도의 크기와 자발광비의 경향을 파악하였다.

Aleiferis 등⁽⁶⁾은 회박연소 불꽃점화기관의 실린더내에서 점화원 주변의 자발광을 취득하여 OH*/CH*와 혼합기 분율(mixture fraction)과의 상관관계 구하였으며, 화염성장속도와 주기적 왕복 운동이 연소에 미치는 영향에 대해 실험하였다.

Muruganandam 등⁽⁷⁾은 메탄과 천연가스를 사용한 스윙/덤프 연소기에서 회박연소영역($\phi = 0.65 \sim 1$)의 연소장내 국소지점에서 OH*와 CH*의 자발광을 측정하여 당량비와 CH*/OH*가 선형적인 관계가 있음을 밝혀내었고, 이를 저 NO_x 터빈 엔진 연소기에서의 액티브 컨트롤(active control)에 적용되는 센서에 이용을 모색하였다.

기존의 연구들은 주로 특정 당량비 영역($\phi = 0.5 \sim 1.5$)과 압력(0.5~1.5MPa)에서 자발광 신호강도와 자발광 비의 경향에 대하여 수행되었다. 그러나 이중동축연소기와 예혼합화염의 영역에서는 아직 연구가 전무한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 메탄/공기 이중동축 층류 부분 예혼합화염을 대상으로, 안쪽관에서의 연료주입 양을 변화하였을 때, 국소적인 연료입자의 확산정도를 OH*, CH*, C₂*의 자발광 측정을 통하여 살펴보고, 화염구조의 변화와 자발광 배출특성 실험적으로 알아보는 것이다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

이중동축관 연소기에서 층류 부분 예혼합화염을 구현하였으며 전체 당량비를 고정해 놓은 상태에서 안쪽관으로 메탄(CH₄, 99.95%) 주입량을 조절하였을 때 일어나는 화염구조의 변화와 자발광 배출 특성을 파악하기 위해 Fig. 1과 같이 실험 장치를 구성하였다. 실험장치는 크게 세부분으로 나뉘어 진다.

먼저 부분 예혼합 연소가 이루어지는 분젠버너(Bunsen burner)는 안쪽관의 내경이 2mm 두께 0.5mm, 바깥쪽관의 내경이 8mm인 이중 동축관으로 이루어져 있으며 이 주위를 지름 96mm인 세라믹 허니컴으로 둘러싸고 있다. 허니컴으로는 화염의 떨림을 방지하기 위하여 55slpm의 건공기를 주입하였다. 또한 자발광 측정시 주위의 반사광으로 부터 간섭을 줄이기 위해 버너출구의 높이를 허니컴으로부터 100mm로 차이를 두었고 외부 공기 침입으로 인한 유동장 방해를 막기 위해

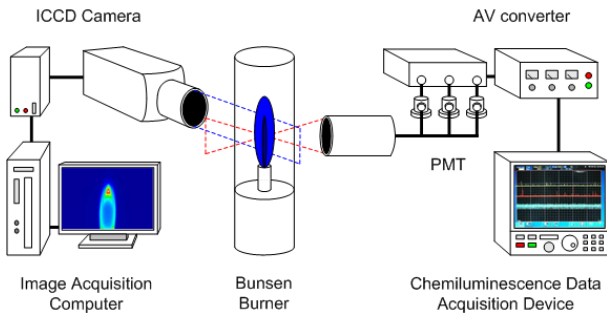


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

내경 96mm, 두께 4mm, 높이 500mm 투과율 90% ($\lambda=200\sim 2000\text{nm}$)인 석영원통을 씌웠다. 쉴드 (shield)를 씌운 경우(confined)와 안씌운 경우(unconfined) 화상의 외곽은 거의 없었으며, 전체적으로 약 10%의 강도차가 발생하였으나 화염구조의 정성적인 변화를 관찰하는 데는 영향이 없었다.

ICCD 카메라(Princeton Instruments, PI MAX)와 간섭필터(OH^* : $307.1\pm 1.5\text{nm}$, CH^* : $430.2\pm 2\text{nm}$, C_2^* : $514.6\pm 2\text{nm}$)를 이용하여 이차원 화염의 영상과 경로 적분된(line of sight) 자발광 정보를 획득하였으며(exposure time: 200msec, gain: 225, accumulation: 50), 점측정(point measurement)인 PMT의 측정값과 비교 하였다. 집광을 위해 초점거리 400mm인 경통을 사용하였으며, 구면수차를 줄이고 집광효율을 높이기 위해 2매의 비구면평요렌즈(aspherical plano convex lens)를 사용하였다. 색수차를 줄이기 위해서 라디칼별 파장에 따른 초점거리를 달리 하였고, 지름이 1.2mm인 집광 광파이버(optic fiber)를 사용하였다.

2.2 실험조건

부분 예혼합 조건을 만들기 위하여 당량비(ϕ), 혼합거리(x/D), 연료분배율(σ)이라는 예혼합 인자를 정의하였으며, 실험조건은 Table 1과 같다.

당량비(ϕ)는 예비실험을 통하여 EINO_x 가 최소가 되고, 부분 예혼합화염의 한 특성이자 할 수 있는 이중화염구조(double flame structure)가 두드러지는 영역인 $\phi=1.90$ 으로 선택하였다. 당량비 증가($\phi=1\sim\infty$)에 따른 화염의 거시적인 변화는 화염의 폭과 길이가 증가하였으며 이는 Fr수의 증가와 관련이 있다.⁽⁸⁾ 본 실험에서 당량비의 물리적 의미는 혼합기 전체의 연료 농도의 길고 열음을 나타내며, 이로 인하여 반응영역과 온도분

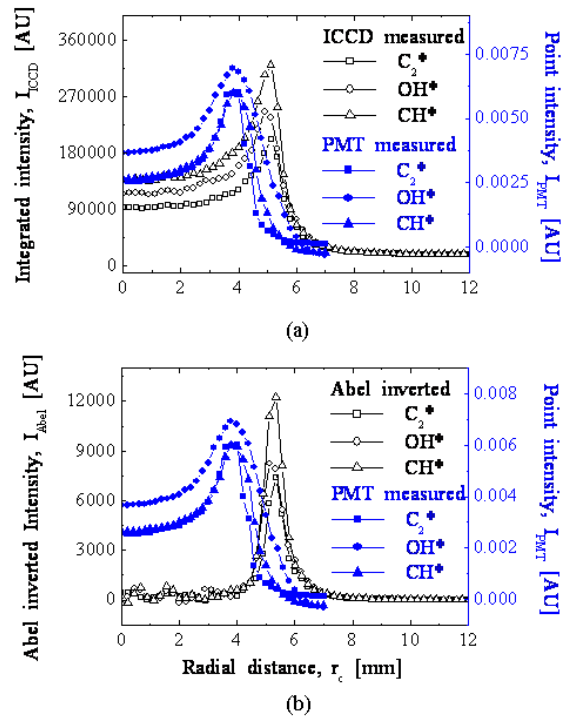


Fig. 2 Chemiluminescence emission configuration comparison among ICCD, PMT used and Abel inverted intensity of OH^* , CH^* and C_2^* at $\phi=1.90$, $\sigma=75\%$, $x/D=10$ and $H=3\text{mm}$.

포, 배기배출물 등과 직접적인 관련이 있다.^(1, 10)

이중 동축연소기에서의 혼합거리(x/D)는 안쪽관과 바깥쪽관 사이의 거리를 안쪽관의 내경으로 나누어 무차원화 한 것으로, 각 관에서 나오는 국소적으로 불균일하게 혼합되어 있는 혼합기가 혼합거리의 증가에 따라 균일하게 확산하게 되고 이로서 버너출구에서 부분 예혼합화염으로 연소하게 된다. 혼합거리의 변화는 연료입자의 국소적 불균일 분포에 따른 연소장에서의 온도변화로 생각되며, 본 연구에서는 특성이 비교적 잘 나타나는 $x/D=10$ 으로 고정하였다.

연료분배율(σ)은 전체 연료의 양을 고정한 상태에서 안쪽관과 바깥쪽관으로 나오는 연료의 비를 변화시킨 것으로, 국소적인 연료입자의 불균일한 분포를 나타낸다. 정의는 식 (1)과 같다.⁽¹¹⁾

$$\sigma = \left(1 - \frac{Q_{f, \text{innettube}}}{Q_{\text{fuel, total}}} \right) \times 100 \% \quad (1)$$

위의 세가지 예혼합인자로서 화염구조와 자발광 특성에 대하여 연구를 수행하였으며, Table 1에서 나타나는 안쪽관과 바깥쪽관의 속도차

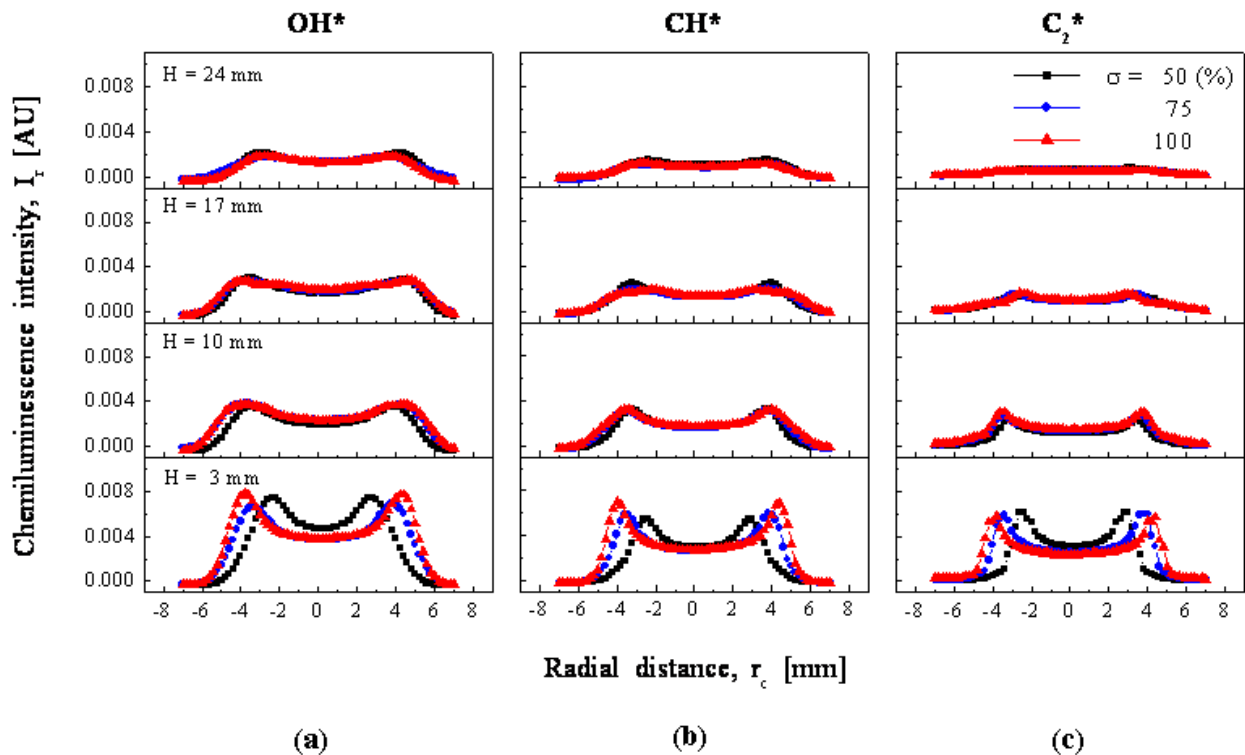


Fig. 3 Flame structure through the point measured chemiluminescence using PMT of (a) OH*, (b) CH* and (c) C₂* at the height of 3, 10, 17, 24 mm above the burner exit (influence of fuel split degree at $\phi=1.90$ and $x/D=10$)

(V_i/V_o) 또는 이차공기에 의한 영향은 나타나지 않았다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 ICCD와 PMT의 자발광 신호특성

Fig. 2 (a)는 당량비(ϕ) 1.90, 연료분배율(σ) 75% 혼합거리(x/D) 10일 때, ICCD, PMT로 얻은 자발광 신호를 나타내었다. ICCD 카메라 측정에 비하여 PMT로 측정된 신호가 중심축 가까이 형성되었다. PMT의 측정간격은 0.2mm였고 점측정이기 때문에 ICCD 카메라로 얻은 경로적분된(line-of-sight) 화상에 비하여 단면정보를 잘 나타낸다고 할 수 있다. 그러나 화염 밑단의 중심축 부근 예열대에서 강도가 측정되는 것으로 볼 때, 배경광이 취득신호에 영향을 미침을 알 수 있다.

Fig. 2 (b)는 경로적분된 ICCD의 신호를 아벨변환(Abel inversion)하여 단면 정보를 나타낸 값과 PMT 신호와 비교하였다. 아벨 변환된 신호는 ICCD로 측정된 신호의 값과 비교하였을 때, 최고

강도점이 중심축으로 이동하였고 예열대에서의 강도값은 줄어들었다. PMT 신호와 비교해 볼 때, 자발광 배출경향은 일치하였으며 PMT 신호의 값이 보다 중심축 가까이에서 형성되었으나 중심부근에서 배경광의 영향이 나타났다.

최근 주변광의 영향을 줄이기 위해 카세그레인 광학장치(Cassegraine optic system)가 사용되기도 한다.⁽¹²⁾ 본 실험에서는 PMT 신호로도 화염구조와 자발광 특성에 대한 정성적인 경향은 바뀌지 않을 것으로 생각된다.

3.2 화염구조

PMT를 사용하여 연료분배율을 50, 75, 100%로 변화하였을 때, 버너출구에서의 높이($H=3, 10, 17, 24\text{mm}$)에 따라 반경방향으로 취득한 OH*, CH*, C₂* 자발광 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

전체적으로 높이 증가에 따라 강도는 낮아지고 최고 강도점의 위치변화는 화염의 아래쪽(upstream)에서 두드러짐을 볼 수 있다. 이는 버너출구에서 예혼합기의 연소반응이 활발히 일어남

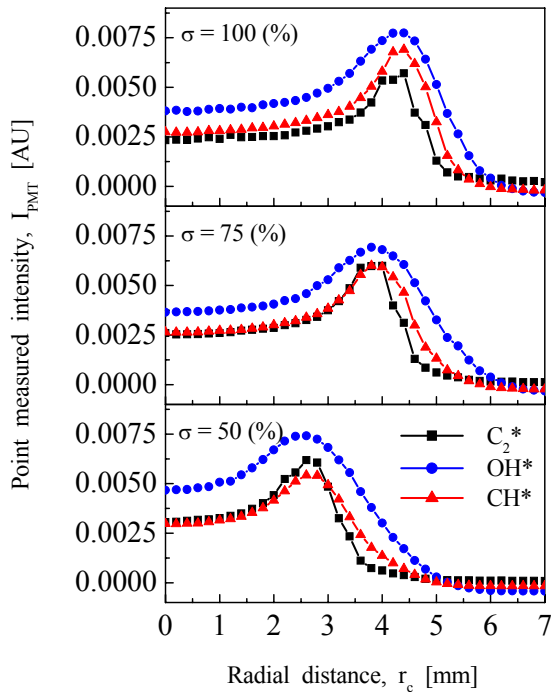


Fig. 4 PMT measured C_2^* , OH^* , and CH^* intensity as a function of fuel split degree ($\sigma=50, 75, 100\%$) at $\phi=1.90$ and $x/D=10$

을 의미하며, 연료분배율이 증가함에 따라 예혼합 정도도 증가하여 화염 밀단에서의 반응 영역이 넓어진 것으로 볼 수 있다. 반면 연료분배율이 낮아질수록 예혼합 정도가 좋지 않아서 화염 밀단에서의 반응영역은 좁아지고 완전히 연소되지 못한 연료입자들이 시간이 지남에 따라 확산하면서 더 넓은 반응영역을 가지는 것으로 생각된다. 또한 높이 3mm에서 예혼합인자에 따른 자발광 강도의 변화는 국소당량비에 따른 자발광 배출특성에 기인한다.⁽⁹⁾

Fig 3 (a)는 반응영역을 나타내는 지표인 OH^* 자발광의 변화를 나타내었다. 높이 3mm에서 강도가 가장 크게 나타났으며, 화염폭은 높이에 따라 증가하다가 17mm에서 가장 넓어졌고 24mm에서 다시 좁아졌다. 특히 연료분배율 100%일 때 높이 17mm에서 이중화염 구조를 나타내었다. Fig. 3 (b), (c)에서도 CH^* 와 C_2^* 자발광으로 화염 구조의 변화를 볼 수 있는데, 화염의 밀단에서 연료분배율의 증가에 따라 CH^* 는 강도가 증가하고 C_2^* 는 강도가 감소하는 반비례관계를 보였으며, 최고 강도점의 위치도 거의 유사함을 볼 때,

CH^* 가 C_2^* 생성에 밀접한 관계를 가짐을 알 수 있다.

3.3 자발광 특성

이론공연비 부근에서의 최고 강도를 나타내는 자발광의 특성을 이용하여 국소적으로 불균일하게 분포되어 있는 연료입자의 확산과정을 설명할 수 있다.^(9, 12) 선행연구에 의하면 메탄을 연료로 한 예혼합화염에서 OH^* 와 CH^* 자발광은 온도와 압력의 함수로 설명할 수 있으므로 대기압조건에서 이들 자발광의 최고 강도 지점 부근에 온도의 최고점이 위치한다.⁽¹⁰⁾ 또한 두 라디칼이 반응이 일어나는 지점을 나타내는 지표로서 사용이 되고 있으므로 최고 강도점을 경계로 예열대와 반응대를 구분하는 기준으로 볼 수 있다.⁽³⁾

Fig. 4은 당량비(ϕ) 1.90 버너출구에서의 높이 3mm일 때, PMT로 측정된 자발광의 반경방향으로 강도변화를 나타내고 있다. 안쪽관으로 연료 주입의 경우, 즉 연료분배율이 낮아진 경우 안쪽관의 농후한 혼합기와 바깥쪽관의 상대적으로 희박한 혼합기에 의해 경계면에서의 급격한 연소로 자발광의 최고점이 중심축 가까이 형성되었다.

예혼합정도가 증가할수록 OH^* 자발광의 최고 강도점 위치의 변화가 가장 크므로 본 실험조건에서 연료분배율의 영향을 대표하는 지표로서 사용할 수 있었다.

안쪽관의 혼합기가 농후한 50%의 경우 중심축으로부터의 최고 강도 지점은 OH^* , C_2^* , CH^* 순이었으나, 75%의 경우 OH^* 는 중심축 가까이에서 CH^* 와 C_2^* 는 같은 지점에서 최고점을 가졌고, 100%의 경우 모두 같은 지점에서 최고 강도가 발생하였다.

CH^* 와 C_2^* 는 거의 비슷한 경향을 보였으나 C_2^* 의 반응영역이 보다 좁았으며, 반응대에서 CH^* 에 비해 빨리 소멸되었기 때문이다.⁽³⁾

4. 결 론

메탄/공기 이중동축 층류 부분 예혼합화염에서 안쪽관 연료 주입에 따른 화염구조의 영향과 자발광 배출 특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

[1] 연료분배율 증가에 따라 자발광의 최고 강도 지점의 폭은 넓어졌고 강도는 증가하였다.

[2] 안쪽관이 농후한 경우 OH* 자발광의 최고 점은 CH*, C₂*에 비하여 중심축 가까이에 형성되었다.

[3] 본 실험조건에서 OH*가 예혼합인자의 변화에 따라 가장 민감하게 변화하였으며 화염면을 나타내는 지표로 사용할 수 있었다.

[4] CH*와 C₂*는 거의 비슷한 배출 특성을 가졌으며 C₂*가 보다 얇은 반응영역을 가졌고 화염의 연소영역에서 CH*에 비해 빨리 소멸되었다.

후 기

본 연구는 “지역특화기술개발사업(산업자원부)”의 지원 아래 수행되었으며, 이에 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Gore, J. P., and Zhan, N. J., 1996, "NO_x Emission and Major Species Concentrations in Partially Premixed Laminar Methane/Air Co-flow Jet Flames," *Comb. and Flame*, Vol. 105, pp. 414~427.
- (2) Kim, T. K., Alder, B. J., Laurendeau, N. M., and Gore, J. P., 1995, "Exhaust and In-Situ Measurements of Nitric Oxide for Laminar Partially Premixed C₂H₆-Air Flames: Effect of Premixing Level at Constant Fuel Flowrate," *Combust. Sci. and Tech.*, Vols. 110-111, pp. 361~378.
- (3) Kojima, J., Ikeda, Y., and Nakajima, T., 2000, "SPATIALLY RESOLVED MEASUREMENT OF OH*, CH*, AND C₂* CHEMILUMINESCENCE IN THE REACTION ZONE OF LAMINAR METHANE/AIR PREMIXED FLAMES," *Prog. Combust. Inst.* 28, pp. 1757~1764.
- (4) Ikeda, Y., Kojima, J., and Hashimoto, H., 2002, "LOCAL CHEMILUMINESCENCE SPECTRA MEASUREMENTS IN A HIGH-PRESSURE LAMINAR METHANE/AIR PREMIXED FLAME," *Prog. Combust. Inst.* 29, pp. 1495~1501.
- (5) Ikeda, Y., Kojima, J., Nakajima, T., Akamatsu, F., and Katsuki, M., 2000, "MEASUREMENT OF THE LOCAL FLAMEFRONT STRUCTURE OF TURBULENT PREMIXED FLAMES BY LOCAL CHEMILUMINESCENCE," *Prog. Combust. Inst.* 28, pp. 343~350.
- (6) Aleiferis, P. G., Hardalupas, Y., Taylor, A. M. K. P., Ishii, K., and Urata, Y., 2004, "Flame chemiluminescence studies of cyclic combustion variations and air-to-fuel ratio of the reacting mixture in a lean-burn stratified-charge spark-ignition engine," *Comb. and Flame*, Vol. 136, pp. 72~90.
- (7) Muruganaadam, T. M., Kim, B., Olsen, R., Patel, M., Romig, B., and Seitzman, J. M., 2003, "Chemiluminescence Based Sensors for turbine Engines," *39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2003-4490.
- (8) Røkke, N. A., Hustad, J. E., and Sønju, O. K., "A Study Partially Premixed Unconfined Propane Flames," *Comb. and Flame*, Vol. 97, pp. 88~106.
- (9) Docquier, N., Belhafaoui, S., Lacas, F., Darabia, N., and Rolon, C., 2000, "EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF CHEMILUMINESCENCE IN METHAN/AIR HIGH-PRESSURE FLAMES FOR ACTIVE CONTROL APPLICATIONS," *Prog. Combust. Inst.* 28, pp. 343~350.
- (10) Blevins, L. G., Renfro, M. W., Lyle, K. H., Laurendeau, N. M., and Gore, J. P., 1999, "Experimental study of Temperature and CH Radical Location in Partially Premixed CH₄/Air Coflow Flames," *Comb. and Flame*, Vol. 118, pp. 684~696.
- (11) Shin, W. P., Lee, J. G. and Santavicca, D. A., 1996, "STABILITY AND EMISSIONS CHARACTERISTICS OF A LEAN PREMIXED GAS TURBINE COMBUSTOR," *26th Sym.(Int.) on Combustion*, pp. 2771~2778.
- (12) Kojima, J., Ikeda, Y., and Nakajima, T., 2000, "Detail Distributions of OH*, CH* and C₂* Chemiluminescence in the Reaction Zone of Laminar Premixed Methane/Air Flames," *35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2000-3394.