

OH PLIF를 이용한 부분 예혼합 화염의 화염구조에 관한 실험적 연구

이승영* · 이종호* · 전충환** · 장영준**

An Experimental Study on the Flame Structure of Partially Premixed Flame using OH PLIF

Seungyoung Lee, Jongho Lee, Chunghwan Jeon and Youngjune Chang

Key Words: OH Radical(OH 라디칼), PLIF(평면 레이저유도형광법), Partially Premixed Flame(부분 예혼합 화염).

Abstract

OH radical concentration have been measured in a methane-air partially premixed flames using PLIF. Excitation lines were selected $Q_1(6)$ branch, (1,0) band. The system is consisted of Nd:YAG laser, dye laser and frequency doubler to make pump beam for OH radical. On the direct photographs, flame height increases as fuel flowrate and equivalence ratio increase. And on the PLIF images, OH radical is distributed from premixed flame front to nonpremixed flame front through the flame structure with all equivalence ratio. OH overall concentrations increase with equivalence ratio. At the stoichiometric equivalence ratio, the peak of OH radical concentration exists strongly near the inner cone. As equivalence ratio is changed to richer, OH radical distribution goes thinly and the peak is increased as longitudinal direction. As the flow goes to the downstream, OH radical concentration decreases and broadens, because OH radical reacts with another species after OH formation at the initial oxidization. This phenomenon resembles radial distribution. At the 100cc fuel flowrate, the radial peak of OH radical exists from $x/R=1.0$ to 1.5.

1. 서론

지금까지 생산활동이나 소비생활에서 필요한 에너지원의 획득을 대부분 연소에 의존하고 있다. 그러나 그로부터 발생하는 유해배기가스의 저감과 에너지 고효율화는 아직도 해결해야 할 과제로 남아있다. 또한 많은 연구에도 불구하고 연소장에서의 온도와 속도, 미세 화학종의 농도 등 화염내부에 대한 정확한 정보가 부족한 실정

이다. 특히 부분 예혼합 화염은 우리생활에서 응용하고 있는 연소 중에서 많은 부분을 차지하고 있지만, 화염구조와 연소반응에 대한 연구가 아직 부족한 상태이며 그것에 대한 연구의 필요성이 절실히 요구되고 있다.

화염 내부의 현상을 이해하기 위해 OH 라디칼이 많이 이용되고 있다. OH 라디칼은 거의 모든 종류의 화염에 존재하는 중간생성물로 화염 내부에서 다량 존재하고 서로 분리될 수 있는 많은 회전선을 가지고 있어 고온에서의 에너지 준위⁽¹⁾, 소광전이^(2,3), 복사전이에 대한 정량화된 정보가 많이 연구되어 있다. 또한 $H + O_2 \rightarrow OH + O$ 또는 $O + H_2 \rightarrow OH + H$ 의 반응으로 생성되는 OH

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

라디칼은 탄화수소 연료의 최초 산화에 관여하며^(4,5), 확장 Zeldovich 기구에 의한 NO 생성 ($N + OH \rightarrow NO + H$)에 중요한 역할을 하고, 일산화탄소 ($CO + OH \rightarrow CO_2 + H$)와 매연입자의 주된 산화제^(6,7)이다. 따라서 화염 내부에 존재하는 OH 라디칼을 계측하여 그것으로 화염의 구조를 해석하는 것은 상당히 가치가 있다고 할 수 있다.

기존의 화염 내부 농도 계측은 주로 가스분석기가 이용되었다. 이러한 방법은 열전대나 열선 유속계와 같이 유동장에 탐침을 삽입하는 방법으로 유동장의 교란을 야기하고, 연소장과 탐침의 열전달이 발생하며, 안정된 화합물이 아닌 라디칼은 계측하지 못한다. 또한 시료의 채취시간과 분석시간이 긴 단점이 있다. 따라서 유동장에 비접촉식이며 시간적, 공간적 분해능이 우수한 계측법인 레이저를 이용한 연소진단기법이 최근 각광을 받고 있다.

레이저를 이용한 연소진단법은 화염 내부에 존재하는 입자나 분자에 의한 광산란을 이용하는 방법으로 탄성산란법과 비탄성산란법, 비선형 광학과정으로 구분할 수 있다. 조사된 광과 동일한 파장의 광이 방출하는 탄성산란에는 입자에 의한 산란인 Mie 산란과 분자에 의한 산란인 Rayleigh 산란으로 구분하며, 조사된 광과 상이한 광이 방출되는 비탄성산란에는 라만산란과 레이저유도형 광법(Laser Induced Fluorescence, LIF)이 있다. 조사광과 비선형적으로 산란광이 방출하는 비선형 광학과정에는 CARS(Coherent Anti-stokes Raman Scattering)와 DFWM(Degenerate Four-Wave Mixing)이 대표적이다⁽⁸⁾.

OH 라디칼을 측정하기 위해 대부분의 연구에서 LIF가 이용되고 있다^(9,10). LIF는 원리와 측정이 간단하면서도 측정감도가 좋고, 화학종에 대한 선별도가 높은 특징이 있으며, 레이저를 이용한 다른 기법에 비하여 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)가 높은 장점이 있다.⁽⁸⁾ 또한 OH LIF를 이용하여 연소장에서의 농도 뿐 아니라 온도, 속도, 압력에 대해서도 추측할 수 있는 특징이 있다⁽¹¹⁾.

본 연구에서는 2차원 LIF기법을 이용하여 부분에 혼합 화염 내부에 존재하는 OH 라디칼을 유량과 당량비에 따라 계측하여 그에 따른 화염구조에 대하여 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig.1과 같이 광원부와 영상획득부, 버너로 구성되었다.

OH 라디칼을 바닥상태($X^2\Pi$)에서 첫 번째 들뜬 상태($A^2\Sigma$)로 여기시키기 위한 자외선을 생성하는 광원부는 Nd:YAG 레이저(Quentel, YG980), 색소레이저(Lambda physik, scanmate 3E)와 주파수 배가기로 구성되었다. Q-스위칭된 Nd:YAG 레이저는 6ns의 펄스 폭을 가지는 2차 고조파인 532nm를 10Hz로 생성하여 펄스당 100mJ로 색소레이저의 여기용 광원으로 공급되고, 색소레이저는 메탄올에 Rhodamin 590을 용해시킨 공진기에서 565~566nm의 광을 발생시켜 1, 2차 증폭기에서 증폭된 후, BBO 결정을 이용한 주파수 배가기를 거쳐 펄스당 3mJ, 282.94nm의 자외선을 생성한다. 평면광 생성기를 사용하여 2.5cm의 폭으로 생성된 평면광은 화염의 중심부를 통과하도록 하고 화염의 크기에 따라 여러번 나누어 실험하였다.

2차원 영상을 획득하기 위해 16bit, 1MHz의 A/D 변환기와 UV렌즈(Nikon, 105mm, F4.5)를 장착한 ICCD (Princeton Instrument, IMAX-512)를 사용하였다. ICCD의 Gate는 Nd:YAG 레이저 컨트롤러에서 출력되는 플래쉬램프(Flash-lamp) 신호를 받아 Gate 컨트롤러(DG-535)에서 제어하였고, 1μs의 펄스폭을 가지도록 하였다. 그리고 레이저에 의한 산란신호와 배경광을 제거하기 위해 UG11, WG305 필터를 렌즈 앞에 장착하고 50장의 영상을 평균하여 사용하였다.

실험에 사용한 버너는 동축분류형 버너로 직경 8mm인 노즐을 통해 메탄과 공기가 충분히 혼합되어 공급되고, 안정한 화염을 만들기 위해 노즐

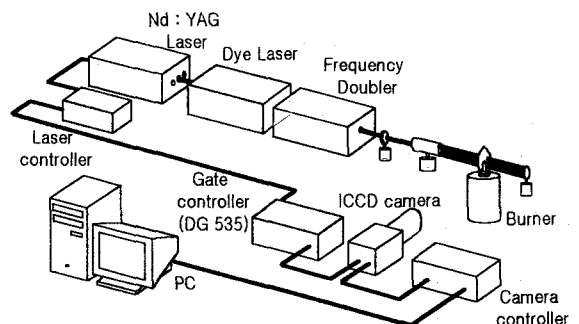


Fig.1 Schematic diagram of PLIF setup.

Table.1 Experiment conditions for flowrate

Equivalence ratio, Φ	Condition 1		Condition 2		Condition 3	
	Fuel Flow rate (cm ³ /min)	Air Flow rate (cm ³ /min)	Fuel Flow rate (cm ³ /min)	Air Flow rate (cm ³ /min)	Fuel Flow rate (cm ³ /min)	Air Flow rate (cm ³ /min)
5.00		190.40		380.80		571.20
2.50		380.80		761.60		1142.40
1.67	100	570.06	200	1140.12	300	1710.18
1.25		761.60		1523.20		2284.80
1.00		952.00		1904.00		2856.00

주위에 2차공기를 일정하게 공급하였다. 연료량과 당량비에 따른 화염의 형상과 OH 라디칼의 분포를 관찰하기 위해 연료량과 당량비 조건을 Table.1과 같이 결정하였고, 각각의 조건에서 50장을 평균하여 사용하였다.

발생된 레이저는 공간적으로 가우시안(Gaussian) 분포를 가지므로 이에 대한 보정은 측정위치에 색소가 든 셀(cell)을 설치하고, 레이저에 의해 감응하여 발생하는 형광신호를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig.2는 연료량 200cc 화염의 직접사진을 나타내었다. 당량비가 증가할수록 화염의 크기는 증가하고, 당량비 1.67부터 예혼합 화염면이 관찰되기 시작하여 1.0에서 가장 명확한 것을 확인할 수 있다. 이는 모든 연료유량에서 일치하였다. 휘염의 경우 연료량이 증가함에 따라 발생하는 영역이 넓어지는 것을 알 수 있었는데, 연료량 100cc의 경우 거의 확산화염에서만 관찰되던 휘염이 200cc에서는 당량비 1.0에서도 발생하였고,

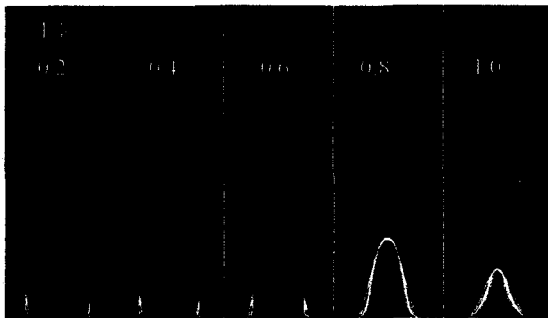


Fig.2 Direct Photographs of 200cc fuel flowrate

300cc의 경우 당량비 3.33에서 휘염이 없어지는 것을 알 수 있었다. 이는 연료량의 증가에 따라 화염면의 크기가 그에 상응하지 못하여 불완전 연소가 더욱 빨리 이루어지기 때문이다. Fig.3에서 유량과 당량비에 따른 화염의 크기를 노즐의 직경(D)과 화염높이(H)의 비로 표현하였다. ICCD 영상에서 일정한 광의 강도이상을 화염으로 간주하였기 때문에 실제 육안으로 관찰되는 화염보다 다소 크게 나타났다. 점선으로 표현한 그래프는 예혼합 화염면의 높이를 나타낸 것으로 화염높이와 비례하는 것을 알 수 있다. 예혼합 화염면은 당량비가 1.67이상으로 증가함에 따라 위에서부터 차례대로 깨지듯이 열려 당량비 2.5에서는 눈으로 그 존재를 확인하기 어려울 정도이다. 연료유량 300cc 1.0조건에서는 출구유속이 1m/s를 넘어 Blow-off되었다.

Fig.4는 연료량 200cc의 당량비에 따른 OH 라디칼의 분포를 나타낸 PLIF 영상이다. 그 구조는

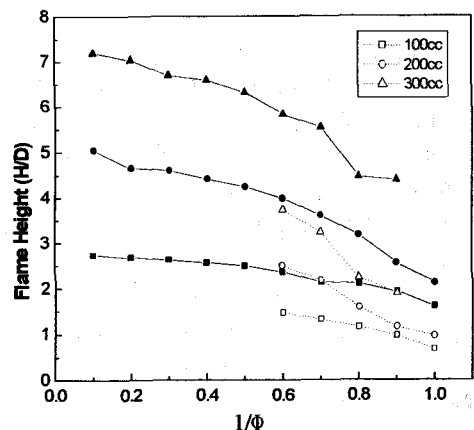


Fig.3 Flame height for various fuel flowrates

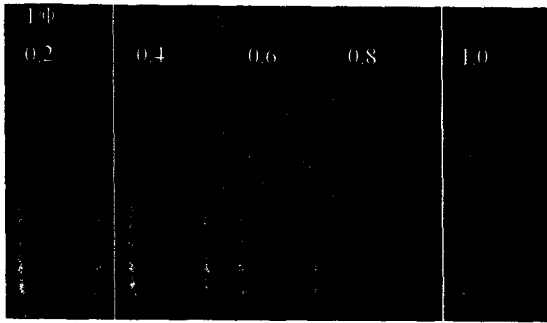


Fig.4 OH Radical distribution of 200cc fuel flowrate
 당량비에 크게 지배되고, 연료유량에 따라서는 변화하지 않았다. 그림에서 보듯이 당량비 1.67을 전후하여 OH 라디칼의 분포가 달라지는 것을 볼 수 있다. 당량비 1.0에서 OH 라디칼은 예혼합 화염면 부근에서 다량 존재하고, 1.25의 경우 예혼합 화염면과 확산화염면 사이에서 넓게 분포하지만 당량비 1.0과 달리 확산화염면 근처에서 가장 많이 존재하는 것을 볼 수 있다. 당량비가 증가할수록 OH 라디칼의 분포가 점점 좁아지는데 이것은 예혼합 화염면과 확산화염면이 서로 근접하는 것을 뜻한다.

Fig.5와 같이 연료량과 당량비가 증가할수록

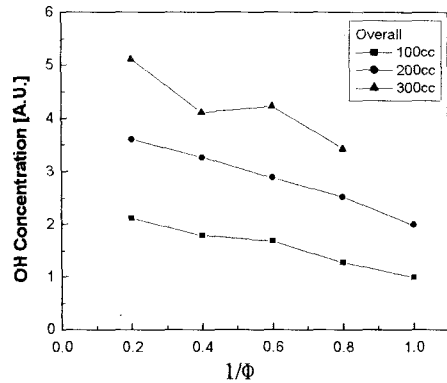
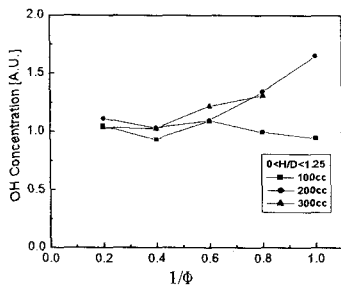
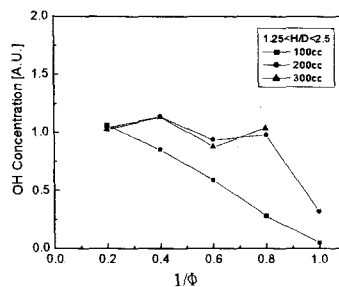


Fig.5 Overall concentration of OH radical.

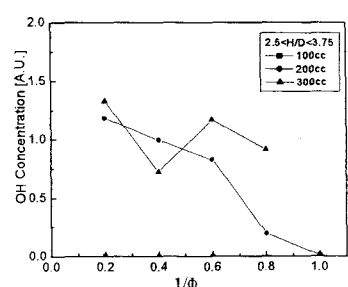
OH 라디칼의 전체농도는 증가한다. 연료량의 증가에 따라 선형적으로 증가하지 않는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 당량비가 증가할수록 불완전연소로 인한 온도감소로 OH 라디칼의 농도가 감소하지만 본 연구에 사용된 버너와 같이 연소장이 개방된 경우에는 농후하게 공급된 연료가 대기중의 산소와 충분히 접촉하여 산화되기 때문에 라디칼의 농도가 감소하는 효과는 아주 작으며 이와는 반대로 화염면적의 증가로 인해 당량비의 증가에 따라 전체농도가 증가하는 것을 알 수 있



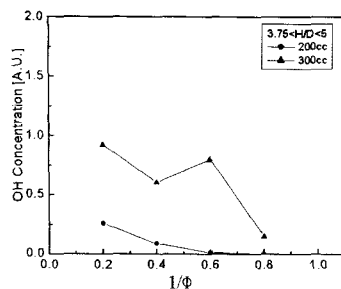
(a) $0 < H/D < 1.25$



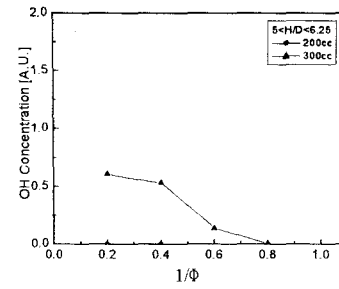
(b) $1.25 < H/D < 2.5$



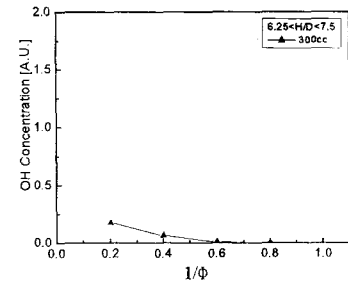
(c) $2.5 < H/D < 3.75$



(d) $3.75 < H/D < 5$



(e) $5 < H/D < 6.25$



(f) $6.25 < H/D < 7.5$

Fig.6 Local concentration of OH radicals for different flame heights.

다.

축방향에 따른 OH 라디칼의 농도분포를 Fig.6에 연료량과 당량비에 따라 나타내었다. 화염의 크기에 따라 그 분포가 다르겠지만, 모든 조건에서 축방향으로 갈수록 농도가 낮아진다. H/D가 1.25이하인 노즐부근 영역에서는 유량과 당량비에 상관없이 거의 일정한 값을 가지는 것을 알 수 있다.

Fig.7은 반경방향에 따른 OH 라디칼의 농도분포를 나타낸 것으로 R은 노즐의 반경을 x는 임의 지점에서의 거리를 나타낸다. 당량비가 증가할수록 더욱 좁은 영역에 집중되는 것을 알 수 있고, 연료량이 증가할수록 그 최대값이 나타나는 위치가 달라지지만 그 분포폭에는 크게 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 다시 말해서, 100cc의 경우 농

도의 최대값은 대부분의 당량비 조건에서 $x/R=1.0$ 에서 1.5 사이에 존재하며, 200cc와 300cc의 경우는 1.5 근처 또는 그 이후에서 최대값을 가지는 것을 관찰할 수 있다. 또한 축방향의 후류로 갈수록 Fig.6에서 보았듯이 그 농도는 감소하고, 반경방향의 분포는 넓어지는 것을 알 수 있다. 이것은 OH 라디칼이 최초산화에 의해 발생하여 예혼합 화염면 근처에서 최고값을 가지며, 후류로 갈수록 연속적인 화학반응으로 인해 소멸되어 점점 농도가 떨어지는 것을 의미한다.

4. 결론

화염내부에서만 존재하는 OH 라디칼을 메탄과 공기를 부분적으로 혼합한 동축 분류화염에서

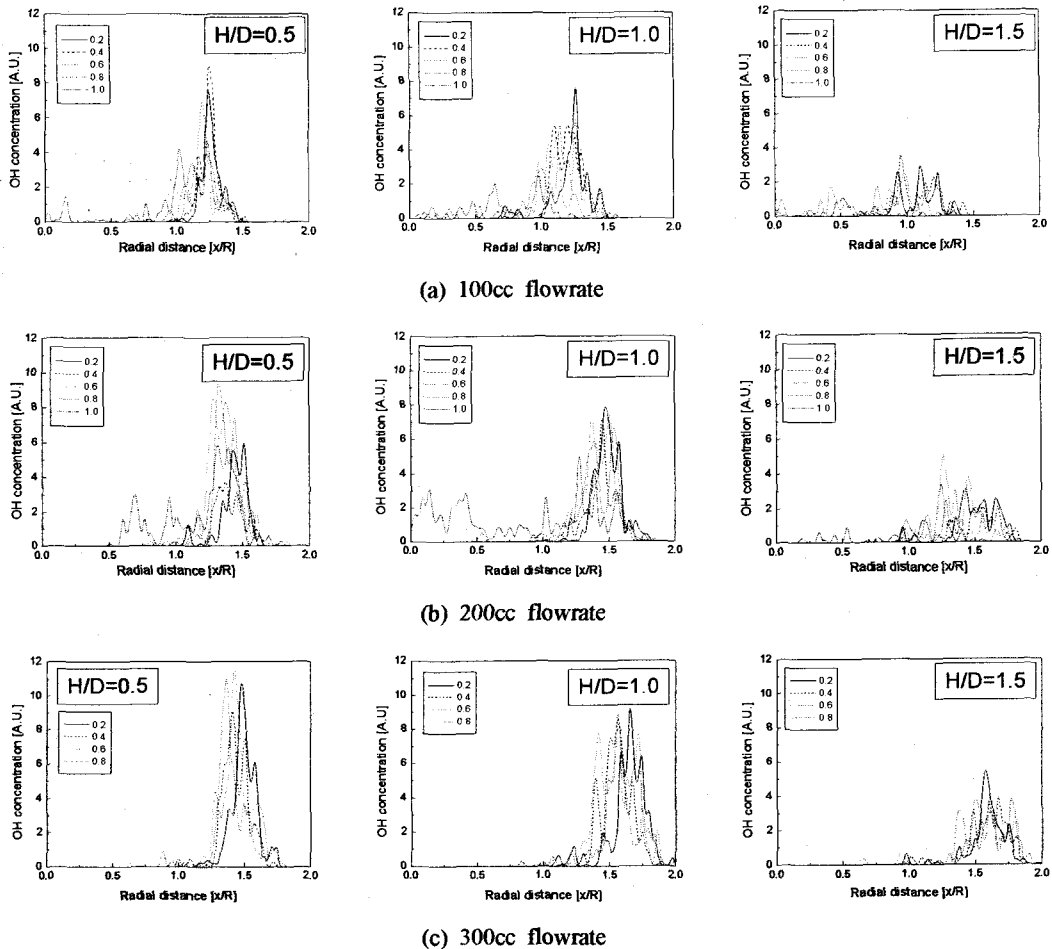


Fig.7 Local concentration of OH radical for radial distance.

PLIF기법을 이용하여 연료량과 당량비에 따라 측정하였고, 그 결과를 정성적으로 살펴보았다.

OH 라디칼은 화염의 2중구조 사이에 즉, 예혼합 화염면과 확산화염면 사이에 존재하는 것을 알 수 있었고, 그 구조는 당량비에 따라 달라지며, 당량비가 증가할수록 반경방향의 분포가 좁은 영역에 한정되는 것을 볼 수 있었다. 또한 직접사진과의 비교에서 OH라디칼이 육안으로 관찰되는 화염보다 더 넓은 영역까지 관찰되며, OH 라디칼의 전체농도는 연료량과 당량비가 증가할수록 증가하는 것을 알 수 있었다. 그리고 OH 라디칼의 생성 메카니즘에서 알 수 있듯이 최초 산화에 의해 발생하여 예혼합 화염면 근처에서 최고값을 가지며 축방향과 반경방향으로 갈수록 OH라디칼의 농도는 화학반응으로 소멸되어 감소하는 것을 볼 수 있었다.

참고문헌

- (1) Dieke, G. H. and crosswhite, H. M., 1962, "The Ultraviolet Band of OH Fundamental Data," J. Quant. Spectrosc. Radia. Transfer, Vol.2, pp.97~199.
- (2) Tamura, M., Berg, P. A., Harrington, J. E., Luque, J., Jeffries, J. B., Smith, G. P., and Crosley, D. R., 1998, "Collisional Quenching of CH(A), OH(A), and NO(A) in Low Pressure Hydrocarbon Flames," Combustion and Flame, Vol.114, pp.502~514.
- (3) Garland, N. L. and Crosley, D. R., 1986, "On the collisional quenching of electronically excited OH, NH and CH in flame," 21th Symposium (International) on combustion, pp.1693~1702.
- (4) Gaydon, A. G., 1974, "The Spectroscopy of flames." 2nd ed., Chapman and Hall, London, pp.99~126.
- (5) Tsatsaronis, G., 1978, "Prediction of Propagating Laminar Flames in Methane, Oxygen, Nitrogen Mixtures," Combustion and Flame, Vol.33, pp.217~239.
- (6) Smyth, K. C., Tjossem, J. H., Hamins, A., and Miller, J. H., 1990, "Concentration Measurement of OH and Equilibrium Analysis in a Laminar Methane-Air Diffusion Flame", Combustion and Flame, Vol.79, pp.366~380.
- (7) Puri, R., Moser, M., Santoro, R. J. and Smyth, K. C., 1992, "Laser-Induced fluorescence Measurements of OH Concentrations in the Oxydation Region of Laminar, Hydrocarbon Diffusion Flames", 24th Symposium (International) on combustion, pp.1015~1022.
- (8) 정석호, 한재원, 정중수, 이원남, 고동섭, 김경수, 이기형, 강경태, 2001, "레이저응용연소계측," 문운당, pp.1~27.
- (9) Eckbreth, A. C., 1996, "Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species," 2nd ed., Gordon and Breach Publishers, pp.381~465.
- (10) Kohse-Hoinghaus, K., 1994, "Laser Techniques for the Quantitative Detection of Reactive Intermediates in Combustion systems," Prog. Energy Combust. Sci., Vol.20, pp.203~279.
- (11) Daily, J. W., 1997, "Laser induced fluorescence spectroscopy in flame," Prog. Energy Combust. Sci., Vol.23, pp.133~199.