

부분 예혼합 화염의 예열공기 연소특성

이승영* · 이종호* · 전충환** · 장영준**

Preheated Air Combustion Characteristics of Partially Premixed Flame

Seung-Young Lee, Jong-Ho Lee, Chung-Hwan Jeon and Young-June Chang

Key Words: Preheated Air Combustion(고온공기연소), Partially Premixed Flame(부분 예혼합 화염), PLIF(평면레이저유도형광법), OH Radical(OH 라디칼)

Abstract

OH radical and NOx have been measured in a methane-air partially premixed flame using PLIF technique to define preheated air combustion characteristics. The temperature of mixture is determined by 300K, 400K, 600K and 800K below the auto-ignition temperature respectively. Flame height increases as equivalence ratio increased. As initial enthalpy is supplied, the radius of flame was increased and much amount of yellow flame in rich equivalence ratio was observed. This is due to the faster burning velocity. Also initial oxidization begins earlier as the initial temperature of mixture increased. It means that height of premixed flame front decreased. This phenomenon can be observed OH PLIF image. The qualitative analysis of OH concentration in the PLIF image shows that overall OH concentration increases with equivalence ratio and the initial temperature of mixture increased. At the preheating temperature goes up, axial gradient of OH concentration is less steep than that of lower temperature condition. This may identify that combustion reacts continuously, so preheated air combustion can evade the local heating and make high temperature indiscriminately in the overall reaction zone.

1. 서론

산업용 연소기의 경우 폐열을 이용하여 흡입공기를 가열하고, 이로써 가능해진 희박조건에서의 연소안정성으로 연료소비량의 감소와 열효율 증가, 고온과 희석에 의한 NOx와 CO의 감소를 모색하는 연구가 최근 활발하게 진행되고 있다. 또한 운전특성상 다단계 압축이 이루어지는 가스터빈 엔진의 경우에도 압축으로 인한 공기의 온도 상승은 필수적이며, 내연기관에서도 기관의 가열과 밸브 오버랩시 발생하는 연소가스와의 열전달

로 흡입공기의 가열이 이루어지고 있다. 2001년 Yang 등⁽¹⁾은 고온공기, 희박 산소농도 연소의 가능성을 타진함과 동시에 NOx와 CO의 양을 감소시킬 수 있음을 설명하였고, Choi⁽²⁾ 또한 예열공기와 혼합기의 희석에 따라 NOx의 양을 줄일 수 있음을 보였다. 따라서 예열공기 연소의 적용에 앞서 정확한 연소현상의 분석이 필요하며, 이를 위해서 초기 엔탈피를 고려한 연소반응영역의 정의가 요구된다.

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⁽³⁾, 소광전이^(4,5), 복사전이에 대한 정량화된 정보가

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

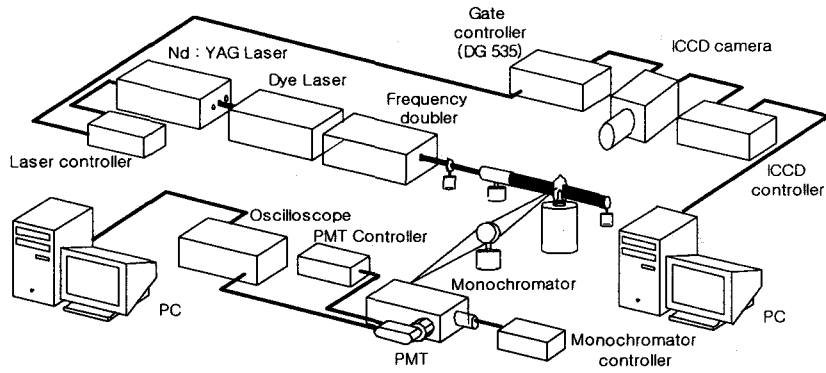


Fig.1 Schematic diagram of LIF system setup.

많이 연구되어 있다. 또한 $H + O_2 \rightarrow OH + O$ 또는 $O + H_2 \rightarrow OH + H$ 의 반응으로 생성되는 OH 라디칼은 탄화수소 연료의 최초 산화에 관여하며^(6,7), 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 산화제이다^(8,9). 따라서 화염 내부에 존재하는 OH 라디칼을 측정하여 그것으로 화염의 구조를 해석하는 것은 충분히 타당하다고 할 수 있다.

OH 라디칼을 측정하기 위해 대부분의 연구에서 LIF가 이용되고 있다. 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. 또한 OH LIF를 이용하여 연소장에서의 농도 뿐 아니라 온도, 속도, 압력에 대해서도 추측할 수 있는 특징이 있다⁽¹⁰⁾.

본 연구에서는 혼합기의 초기온도에 따른 화염의 반응대를 관찰하기 위해 PLIF기법을 이용하여 화염내부에 존재하는 OH 라디칼의 분포를 측정

하였고, 각각의 당량비에서 예열공기에 의한 연소특성을 검토하였다. 또한 이론당량비 조건에서 예열과 회석에 의한 화염구조와 NOx배출특성을 고찰해 보았다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig.1과 같이 광원부와 버너, 신호 및 영상획득부로 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 구성되어 있다. Q-스위치된 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 배가

Table.1 Experiment conditions for flowrate.

Equivalence ratio, Φ	Fuel Flow rate (cm ³ /min)	Air Flow rate (cm ³ /min)	Mole Fraction (CH ₄ , O ₂ , N ₂)
5.00		380.8	0.34, 0.14, 0.52
2.50		761.6	0.21, 0.17, 0.62
1.67	200	1140.1	0.15, 0.18, 0.67
1.25		1523.2	0.11, 0.19, 0.70
1.00		1904.0	0.10, 0.19, 0.71

Table.2 Diluent flowrate for initial temperature

Initial Temperature (K)	Diluent flowrate for Flammable limit (cm ³ /min)		
	lower limit	middle	upper limit
300	0	0	0
400	0	100	200
600	0	305	610
800	150	450	1050

기를 거쳐 펄스당 4mJ, 282.94nm의 자외선을 생성한다. 평면광 생성기를 사용하여 생성된 평면광은 화염의 중심부를 통과하도록 하고 화염의 크기에 따라 여러번 나누어 실험하였다.

실험에 사용한 버너는 동축분류형 버너로 직경 8mm인 노즐을 통해 메탄과 공기가 충분히 혼합되어 공급되고, 안전한 화염을 만들기 위해 노즐 주위에 2차공기를 50000cm³/min으로 일정하게 공급하였다. 초기온도와 당량비에 따른 화염의 형상과 OH 라디칼의 분포를 관찰하기 위해, 공급유량과 당량비 조건을 Table.1과 같이 결정하였고, Table.2와 같이 300K, 400K, 600K, 800K의 온도조건에 대하여 이론당량비 조건에서 질소를 이용한 희석영향과 NO_x 배출특성을 살펴보았다. 질소의 공급량은 blow-off와 back flash이전 안정연소영역을 Fig.2와 같이 실험적으로 결정하였다.

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 플래시램프 신호를 받아 Gate 컨트롤러(DG-535)에서 제어하였고, 레이저에 의한 산란신호와 배경광을 제거하기 위해 UG11, WG305 필터를 렌즈 앞에 장착하였다.

여기과정과 LIF신호의 선형영역에서 레이저 빔의 강도를 선택하기 위해 특정 위치에서 집광렌즈를 통해 단색분광기로 보내고 PMT를 통해 파장별 신호를 취득하였다. LIFBASE 결과와 비교하여 Fig.3(a)와 같이 Q_i(6)라인, (1,0)밴드를 선택하고 레이저의 파워를 Fig.3(b)와 같이 선형영역에서 선택하였다. 그리고 Fig.3(c)와 같이 LIF 신

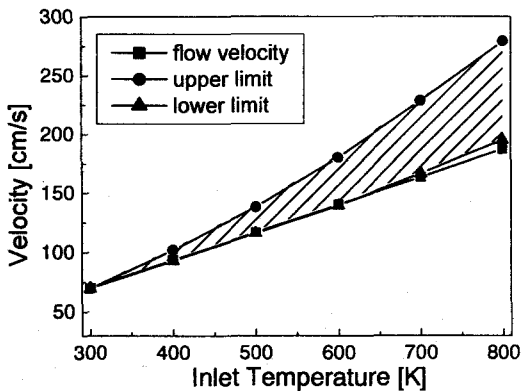


Fig.2 Flammable limit for initial temperature at $1/\Phi=1.0$

호가 발생하는 약 0.25ms의 시간영역에서 S/N비가 높은 1 μ s를 신호취득영역으로 선택하였다.

발생된 레이저는 공간적으로 가우시안분포를 가지므로 이에 대한 보정은 측정위치에 색소가 든 셀을 설치하고, 레이저에 의해 감응하여 발생하는 형광신호를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig.4은 당량비와 혼합기의 초기 온도에 따른 직접사진을 나타낸다. 당량비가 증가할수록 화염의 크기가 증가하고, 초기온도가 증가할수록 반경방향으로의 외형적 크기와 발광강도가 증가하

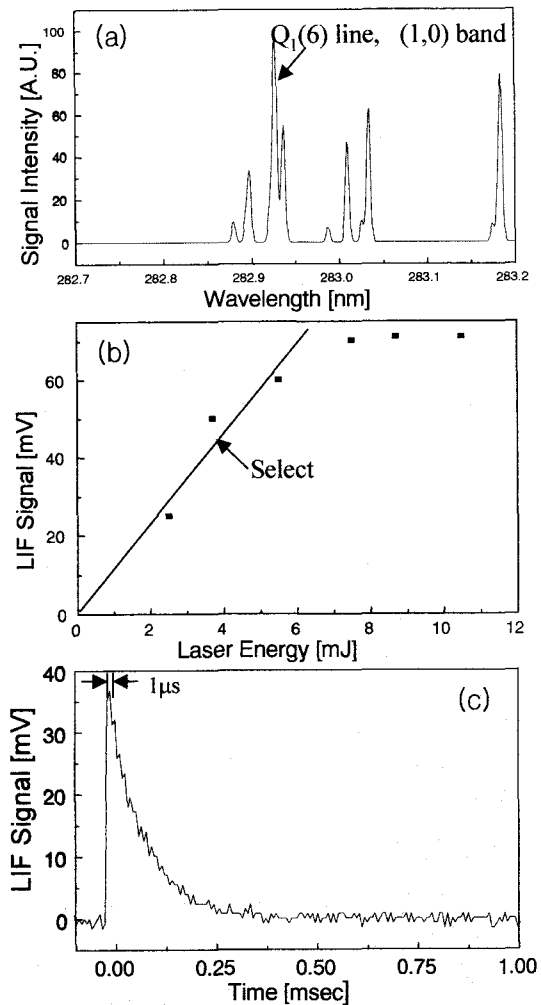


Fig.3 Experimental condition of excitation beam. (a)Spectrum of excitation scan, (b)Linear region of LIF signal, (c)LIF signal decay time

며, 이론당량비 근처에서 축방향으로의 크기가 작아지는 것을 볼 수 있다. 비체적의 증가에 의한 출구속도 증가를 감안할 때, Fig.3과 같이 초기온도 400K에서부터 급속연소($V_L > 60\text{cm/s}$)가 이루어져 연소가 빨리 종결되는 것을 알 수 있다. 그리고 당량비 5.0에서 예열공기 온도가 높을수록 휘염이 더욱 많이 발생하는 것이 관찰되는데, 이 현상 또한 농후한 혼합기가 산화제의 충분한 공급이전에 연소가 급속히 이루어짐으로써 발생하는 것으로 급속연소가 발생함을 설명하고 있다.

Fig.5는 각각의 초기온도에서 PLIF 기법을 이용하여 측정한 노즐근처에서 축방향 2cm까지의 OH 라디칼의 분포이다. 최대, 최소 5%를 제외하

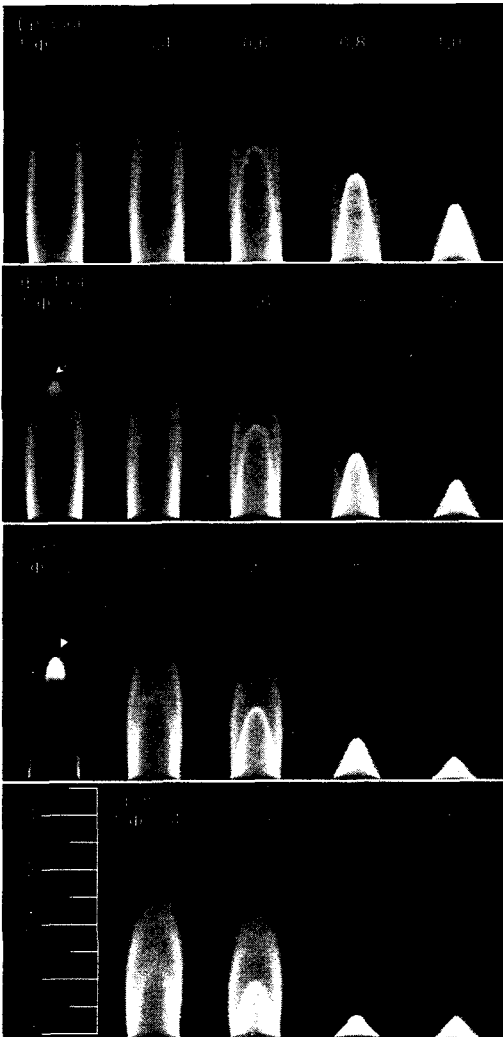


Fig.4 Direct photo for each inlet temperature.

고 값에 따라 10등분하여 표현하였다. 화염면에 대한 indicator⁽¹¹⁾로서 OH 라디칼을 관찰해 보면, 공기를 가열함에 따라 예혼합 화염면이 낮아지고 버너 벽면근처 출구 이전부터 연소가 발생했음을 알 수 있다. 또한 OH 라디칼이 연소반응영역을 나타내는 중간생성물인 것을 고려할 때, Fig.5의 면적분포에서 예열공기 연소가 급속연소에 의해 좁은 영역을 차지할 것으로 생각되지만, 이와는 반대로 분포영역의 차이가 거의 없는 것을 볼 수 있다. 이것은 일찍 연소반응이 시작되었다 하더라도 그 반응이 더욱 많은 상세화학반응 메커니즘을 가지고 후류에서도 여전히 지속되는 것으로 설명할 수 있다.

예열공기의 온도가 높을수록 전체적인 OH 라디칼은 반경방향으로 넓게 분포하고, 그 집적도는 낮다. 즉, 연소가 진행되면서 초기 온도가 높을수록 연소반응은 복잡하게 계속될 것이고, 국부 고온영역이 다소 억제될 것으로 추측할 수 있다. 이에 Fig.6에서 OH 라디칼의 전체농도를 비교해 보았다.

모든 온도조건에서 당량비가 증가할수록 OH 라디칼의 전체농도는 증가한다. 당량비가 증가할수록 불완전연소로 인한 온도감소에 의해 OH 라디칼의 농도가 감소하는 것이 일반적이다. 하지만 본 연구에 사용된 버너와 같이 연소장이 개방된 경우에는 농후하게 공급된 연료가 대기중의 산화제와 충분히 접촉하여 산화되기 때문에, OH

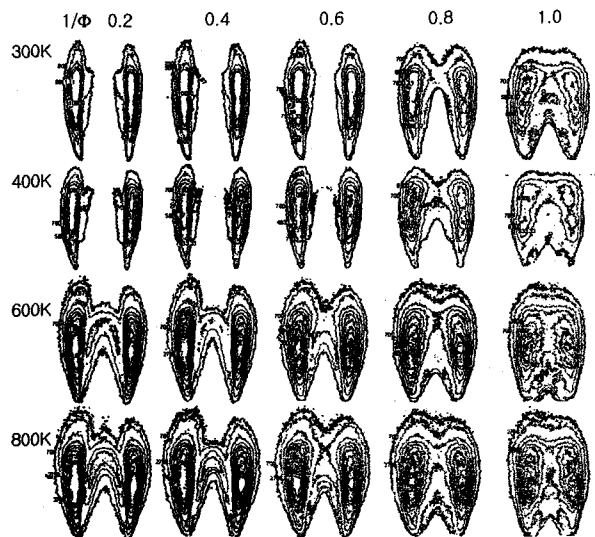


Fig.5 Isoleths of OH distribution for various temperatures and equivalence ratio.

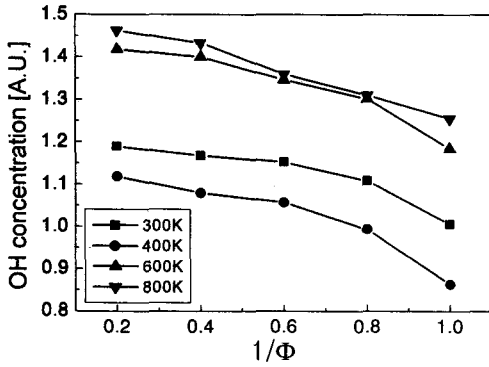


Fig.6 Comparison of OH overall concentration.

의 농도가 감소하는 효과는 아주 작으며 이와 반대로 낮은 온도구배에 의해 반응이 다소 지연되면서 OH 라디칼이 더욱 오랜 시간 잔류하게 된다. 따라서 당량비의 증가에 따라 화염면적과 OH 라디칼의 전체농도가 증가한다. 초기 온도가 높을수록 OH 라디칼의 상대농도는 400K을 제외하고 높게 나타났다. 이 결과 또한 Fig.5의 고찰과 비슷한 경향으로 OH 라디칼이 고온영역에 다량 존재한다는 것에 기초한다.

Fig.7과 Fig.8은 질소를 사용하여 희석한 OH PLIF 이미지와 분포도를 나타낸 것이다. 유량의 증가로 예혼합화염면이 커지는 것을 볼 수 있다. 실제 가연한계에 따라 그 범위를 정했기 때문에,

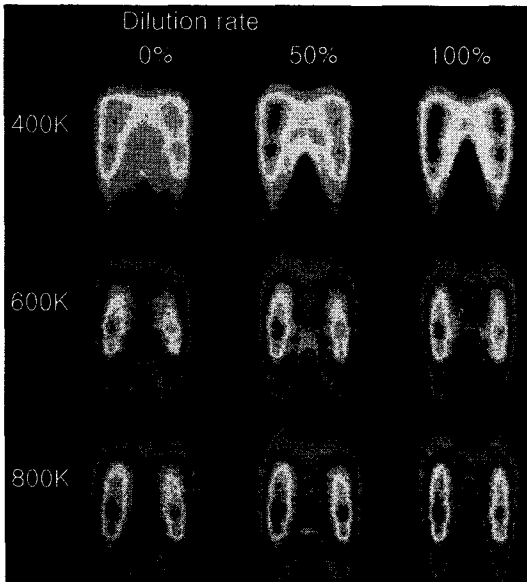


Fig.7 OH PLIF images for initial temperatures and dilutions.

예혼합화염면의 높이가 100%에서 모두 비슷한 것은 초기 온도가 증가하면서 그 연소안정성이 증가하는 것과 일치한다.

희석에 따른 OH 라디칼의 농도에는 큰 차이가 없음을 Fig.9에서 확인할 수 있다. Fig.8의 결과와 비교할 경우, 희석에 따라 반경방향분포가 좁은 것으로 미루어 볼 때, 더욱 급격한 농도구배를 관찰할 수 있다. 이는 국부고온영역으로 확대해석할 수 있고, 이에 예열공기의 NOx 배출특성을 더욱 명백히 할 필요가 있다.

Fig.10은 예열공기와 희석에 따른 NOx 배출특성을 나타낸다. 초기온도의 증가로 NOx의 양은 급격히 증가하며, 희석량이 증가함에 따라 감소하는 것을 볼 수 있다. 온도의 상승효과가 NOx 생성에 지배적이기는 하지만, 희석에 의해 충분히 저감시킬 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

화염내부에서만 존재하여 반응영역에 대한 정보를 가지는 OH 라디칼을 LIF 기법을 이용하여 메탄-공기 증류 부분예혼합 화염에서 혼합기의 온도를 300K, 400K, 600K, 800K으로 증가시켜 측정하였고, 그 결과를 정성적으로 살펴보았다.

초기온도의 증가에 따라 화염은 반경방향으로

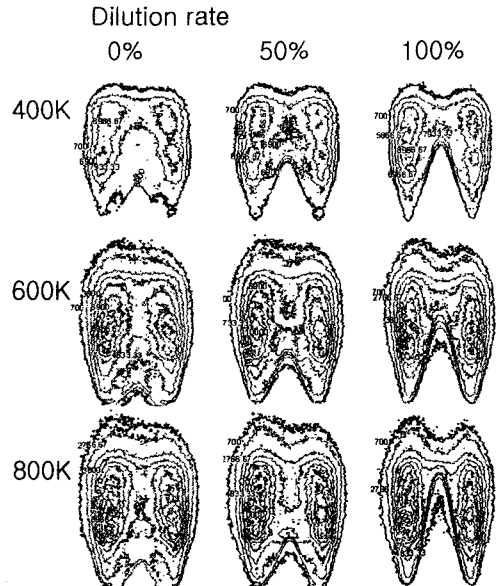


Fig.8 Isopleths of OH distribution for initial temperatures and dilutions.

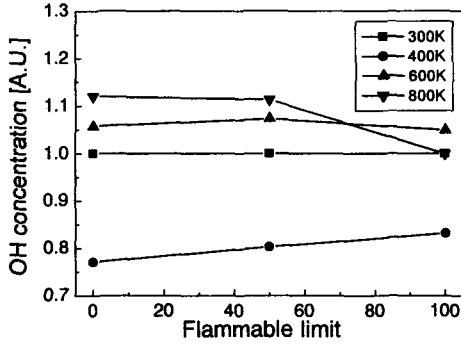


Fig.9 OH overall concentration for initial temperatures and dilutions.

더욱 커지고 발광강도 또한 증가하였다. 또한 육안으로 관찰되는 예혼합화염면의 높이는 급속연소에 의해 감소하는 경향을 보였고, 농후한 조건에서 휘염은 초기온도에 비례하여 증가하였다.

예열공기 연소일 때, OH 라디칼의 농도가 증가하였고 반경방향으로 더욱 넓은 분포를 가졌다. OH 라디칼이 고온영역에 많이 존재하는 사실을 고려하면, 연소온도의 증가와 반응대의 전체영역에 대해 고른 온도분포를 가지는 것을 알 수 있었고, 이 현상은 온도에 비례하였다.

회석을 포함하는 경우, OH 라디칼의 농도에는 큰 차이가 없고, 구배가 조금 변화하였고, NOx 저감측면에서 충분한 가능성을 볼 수 있었다.

참고문헌

- (1) 양제복, 김원배, 노동순, 동상근, 2001, "고온 공기 이용 오일연소 특성에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 2001년도 열공학부문 춘계 학술대회 논문집, pp.74~85.
- (2) Choi, G. M. and Katsuki, M., 2001, "Advanced low NOx combustion using highly preheated air," Energy Conversion and Management, Vol.42, pp.639~652.
- (3) 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.
- (4) 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

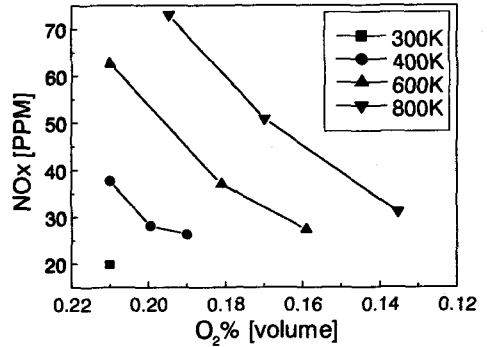


Fig.10 Comparison of NOx for initial temperatures and oxygen volume fractions.

Pressure Hydrocarbon Flames," Combustion and Flame, Vol.114, pp.502~514.

- (5) 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.
- (6) Gaydon, A. G., 1974, "The Spectroscopy of flames," 2nd ed., Chapman and Hall, London, pp.99~126.
- (7) Tsatsaronis, G., 1978, "Prediction of Propagating Laminar Flames in Methane, Oxygen, Nitrogen Mixtures," Combustion and Flame, Vol.33, pp.217~239.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Daily, J. W., 1997, "Laser induced fluorescence spectroscopy in flame," Prog. Energy Combust. Sci., Vol.23, pp.133~199.
- (11) 이승영, 이종호, 전충환, 장영준, 2001, "OH PLIF를 이용한 부분 예혼합 화염의 화염구조에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 D, pp.54~59.