

## 층류 예혼합 화염의 예열공기 연소특성

이종호\* · 이승영\* · 한재원\*\* · 전충환<sup>†</sup> · 장영준\*\*\*  
(2002년 2월 20일 접수, 2002년 5월 13일 심사완료)

### Characteristics of Preheated Air Combustion in a Laminar Premixed Flame

Jong Ho Lee, Seung Young Lee, Jae Won Hahn,  
Chung Hwan Jeon and Young June Chang

**Key Words:** Preheated Air Combustion(예열공기연소), OH Radical(OH 라디칼), Dilution(희석), NOx(질소산화물), PLIF(평면 레이저유도형광법), CARS(반스톡스 라만 분광법)

#### Abstract

Co-flow axisymmetric laminar premixed flame of methane was used to study the influence of air temperature and N<sub>2</sub> addition on the flame structure, temperature field and emission characteristics. OH 2-D images and temperatures along the centerline were measured experimentally by PLIF and CARS techniques respectively to observe the influences of dilution and thermal effects of N<sub>2</sub> in the gas mixture. Also, the concentration of NOx was measured at each condition by gas analyser to see the suppression effect of N<sub>2</sub> addition on NOx emissions. It was found that OH concentrations distribute widely as air temperature goes higher, while the effect of N<sub>2</sub> addition is not significant. But N<sub>2</sub> addition highly contributes to the flame front and NOx emissions which was argued to be due to the reduction of flame temperature. In accordance with experimental study, numerical simulation using CHEMKIN code was carried out to compare the temperature results with those acquired by CARS measurement, and we could find that there is good agreement between those results.

#### 기호설명

- Q<sub>fuel</sub> : 연료가스 유량 (l/min)
- Q<sub>air</sub> : 동축류 공기 공급 유량 (l/min)
- T<sub>inlet</sub> : 공급 혼합기의 온도 (K)
- y : 연료 노즐로부터의 축방향 높이 (mm)

#### 1. 서 론

본 연구의 궁극적인 목적은 고온공기연소의 메커니즘을 규명하기 위한 선행연구로서, 공급공기의 온도와 N<sub>2</sub>의 첨가로 인한 희석효과가 동축류로 공급되는 예혼합화염에서 화염구조, 화염온도, NOx 배출에 미치는 영향을 살펴보고 분석하고자 하는 것이다.

최근 일본을 중심으로 널리 연구되어지고 있는 고온공기연소의 기본원리는 배기가스 재순환 연소와 유사하다. 하지만 재순환 되는 공기의 온도를 일정이상 유지시켜 줌으로써 산소농도가 아주 낮은 영역에서도 안정된 연소를 할 수 있다는 점이 차이점이라 하겠다. 실험적·계산적 선행연구들<sup>(1-3)</sup>이 밝히는 이 연소방식의 가장 큰 장점은 균일한 온도장 획득과 이로 인한 NOx 배출의 현저한 저감효과라 하겠다. 하지만 G.M.Choi 등<sup>(4)</sup>이 밝히듯, NOx의 생성, 소멸에 관한 기존지식에 근거해서는 고온공기연소에서 NOx 발생량이 급감하는 이유를 설명하

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소  
E-mail : chjeon@pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-3051 FAX : (051)582-9818  
<sup>\*</sup> 부산대학교 대학원 기계공학과  
<sup>\*\*</sup> 한국표준과학연구원, 레이저계측그룹  
<sup>\*\*\*</sup> 부산대학교 기계공학부

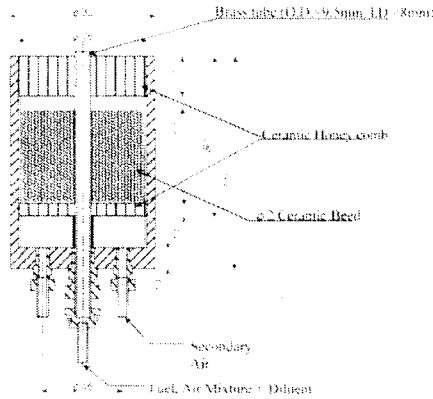


Fig. 1 Schematic of co-flow burner

기 어렵다고 한다. 즉, 고온공기연소 특성을 이해하기 위해서는 미시적 화염구조 관찰이 절실하다고 하겠다. 예를 들어, 열방출의 지표로 자주 인용되는 OH 라디칼의 분포라던가, 화염내의 온도 분포, 공기온도가 높아지고 산소농도가 낮아질에 따라 생성이 급격히 빨라지는 soot의 생성·소멸에 관한 정보 등은 고온공기 연소의 메커니즘을 규명하는데 있어 아주 중요한 정보를 제공해 줄 것이라 예상된다. 따라서 광학적 접근이 용이한 모델 연소기에서 레이저 연소 진단 기법과 수치해석을 통한 고온공기연소의 메커니즘을 규명하기 위한 노력은 아주 중요한 일이라 하겠다. 대부분의 선행연구는 광학적 접근이 쉽지 않은 로(furnace)와 같은 밀폐된 연소장에서 이루어진 것들으로써 버너에서의 실험과 예측결과는 찾아보기 힘들다. 따라서 본 논문에서는 보다 정확한 연소현상의 규명을 위해 동축 분류형 버너에서 PLIF(Planar laser-induced fluorescence) 기법을 이용하여 화염내부에 존재하는 OH 라디칼의 분포를 측정하고, CARS(Coherent Anti-stokes Raman Spectroscopy) 기법과 수치해석을 이용하여 온도 분포를 비교·분석하였다. 그리고 각 조건에서의 NOx 배출량을 측정하여 흡입공기의 예열 온도와 N<sub>2</sub>의 첨가에 따른 연소반응영역과 온도분포, NOx 배출특성에 관해 고찰해 보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 동축류 버너

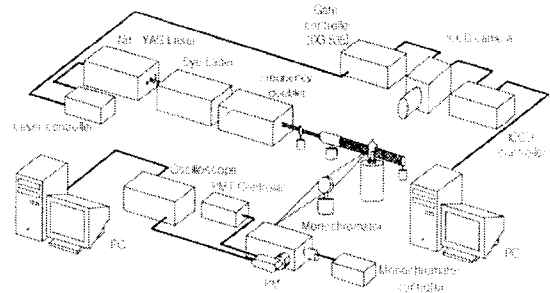


Fig. 2 Schematic of PLIF system

실험에 사용된 버너의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 하부에 유동의 층류화를 위해 설치된 세라믹 허니컴의 중앙에 연료노즐이 있고, 그 주위에 동축류로 화염의 안정화를 위해 공기를 공급할 수 있도록 되어 있다. 공급되는 공기와 연료는 하류의 압력변화에도 설정유량을 유지할 수 있는 MFC(Mass Flow Controller)를 이용하여 공급하였다.

2.1.2 PLIF 실험장치

PLIF 실험을 위한 장치는 다음의 Fig. 2에 나타내었으며, 크게 세 부분으로 구성되어 있다. 즉, Nd:YAG 레이저(Quentel, YG980)와 색소레이저(Lambda physik, Scanmate 3E), 주파수 배가기로 구성되어 있는 광원부와 2차원 영상을 획득하기 위한 A/D 변환기와 UV렌즈(Nikon, 105mm, F4.5)를 장착한 ICCD(Intensified Charge Coupled Device : PLIMAX-512), 질 측정을 위한 단색기(Monochromator)를 포함하는 영상 및 신호 취득부, 그리고 이렇게 받아들여진 신호와 이미지를 처리하는 데이터 처리부로 구성되어 있다.

2.1.3 CARS 실험장치

CARS 기술은 매우 정확한 화염온도 측정기술 중 하나로 여러 논문<sup>(5,10,11)</sup>에서 장치의 안정성 및 정확성이 검증되었다. 실험에 사용한 CARS 장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 광대역 이동형 CARS 장치에 사용되는 Nd: YAG 레이저의 이차 고조파는 펄스 당 에너지가 최대 200mJ, 펄스 폭은 7~8ns, 반복도는 10Hz이며, 에너지의 대부분은(<80%) 두모드 색소레이저의 펌핑에 사용되

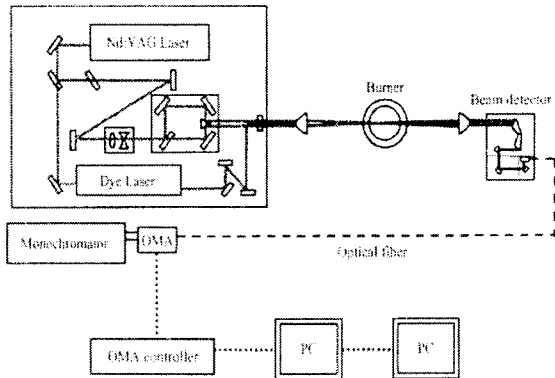


Fig. 3 Schematic of CARS measurement system

어진다. 상자형 위상집합조건에 의해 발생한 CARS 신호는 광파이버를 거쳐서 단색기에 입사되며, 다채널 광분석기에서 스펙트럼이 구해진다. 이렇게 구해진 스펙트럼을 Sandia Code와 비교하여 온도를 얻을 수 있다.

2.2 실험방법

2.2.1 실험조건

5:중을 통해  $Q_{fuel}=0.2 \text{ l/min}$  과  $Q_{air}=1.904 \text{ l/min}$  을 충분히 혼합하여 공급함으로써 당량비가 항상 1이 되도록 하였으며, 화염의 안정화를 위하여 이차공기(Shield air)로써  $50 \text{ l/min}$  을 공급하였다.

$T_{inlet}$ 을 300~800K로 바꾸어 가며 각각의 온도 조건에 대해  $N_2$ 를 첨가함으로써,  $O_2$  Volume %에 따른 가연한계 실험을 진행하였다. 결과를 Fig. 4에 나타내었으며, 이를 근거로 연장연소영역을 실험조건으로 선정하였다.

실험조건을 정리하면 아래의 Table 1과 같다.

2.2.2 PLIF를 이용한 OH농도 분포 측정과 NOx 측정

6ns 정도의 펄스 폭을 가지는 Nd:YAG 레이저의 2차 고조파인 532nm를 10Hz, 100mJ/pulse로 펌프레이저에 공급하였다.

공급된 에너지는 Rhodamin 590 색소를 이용하여 공진기에서 565~566nm의 광을 발생시킨 후, 1, 2차 증폭기를 통해 증폭되어 진다. 증폭된 빛은 BBO 결정을 이용한 주파수 배가기를 거쳐 282.94nm의 파장을 가지는 펄스 당 4mJ의 빛을

Table 1 Experimental conditions

$Q_{fuel}$	$Q_{air}$	$Q_{shield \text{ air}}$	$T_{inlet}$	$N_2$ addition
			300	
0.2	1.904	50	400	lower(0%)
(l/min)	(l/min)	(l/min)	600	middle(50%)
			800	upper(100%)
			(K)	

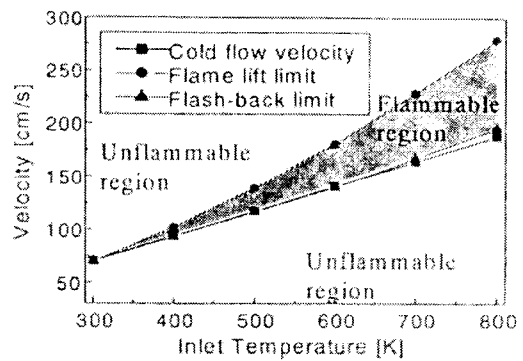


Fig. 4 Limits of flammability in  $N_2$  diluted air

만들어내게 된다. 이렇게 발생한 UV빔을 평면광 생성기를 사용하여 평면광을 만든 후, 화염의 중심부를 통과시킴으로써 관찰하고자 하는 OH의 공간분포를 획득할 수 있었다. 여기와상과 LIF신호의 선형영역에서 레이저 빔의 강도를 선택하기 위해 특정 위치에서 집광렌즈를 통해 단색분광기로 보내고 PMT(Photo Multiplier Tube)를 통해 파장별 신호를 취득하였다. LIFBASE 결과와 비교하여 Fig. 5(a)와 같이 Q1(6)라인, (1,0)밴드를 선택하였고, 레이저 빔의 세기를 Fig. 5(b)와 같이 LIF 신호가 포화되지 않는 선형영역에서 선택하였다. 그리고 Fig. 5(c)와 같이 LIF 신호가 발생하는 약 0.25ms의 시간영역에서 S/N비가 높은 신호발생 초기의 1μs를 신호취득영역으로 선택하였다. ICCD의 Gate는 Nd:YAG 레이저 컨트롤러에서 출력되는 flashlamp 신호를 받아 Gate 컨트롤러(DG-535)에서 제어하였고, 레이저에 의한 산란신호와 배경광을 제거하기 위해 UG11, WG305 필터를 렌즈 앞에 장착하였다. LIF 신호의 레이저 세기에 대한 영향을 보정하기 위하여 색소가 담긴 셀을 이용하여 레이저 빔의 공간적 세기 분포를 측정함으로써 측정신호를 보정하였다.

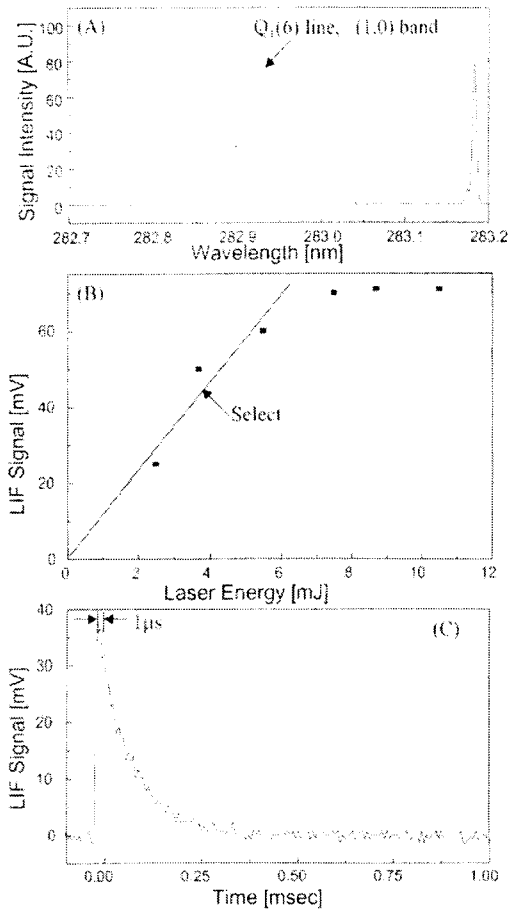


Fig. 5 Selection of excitation beam : (a) Wavelength, (b) Beam power, (c) Decay time of LIF signal

NOx 농도 측정에 있어서는 전체 NOx 양을 2차 공기의 영향을 고려하여 중심축 60mm의 높이에서 가스분석기를 사용하여 측정하였다.

2.2.3 CARS를 이용한 축방향 온도측정

N<sub>2</sub> 첨가와 T<sub>inlet</sub>의 변화가 화염온도에 미치는 영향을 알아보기 위해 동일 유선을 가정할 수 있는 화염의 중심축(Centerline)에 대해 온도를 측정하였다. 1mm 간격으로 높이가 50mm 되는 지점까지 측정하였으며, 한 점에 대해서 100회 평균 값을 취득하였다.

2.2.4 수치해석

화염구조를 파악하기 위하여 수치 해석적으로 온도분포를 구해보았다. 동축 분류형 화염을 경

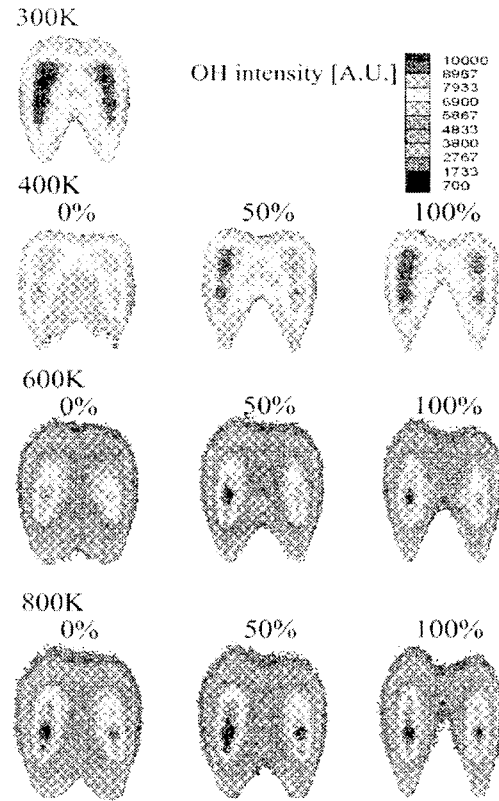


Fig. 6 Comparison of OH PLIF images at all experimental conditions

계층근사 2차원 포물선형 변미분 방정식으로 근사화하였으며, 격자는 반경방향으로 300개를 부등간격으로, 축방향 1mm간격으로 배열하였다. 계산은 초기조건에서 시작하여 전진법으로 하류 방향으로 수행하였으며, 실제 화염은 노즐에 거의 부착되므로 이것을 좌화점으로 설정하였다. T<sub>inlet</sub> = 300K, 800K 조건에서 가연 한계의 끝질(N<sub>2</sub> 첨가가 0%, 100%)에 대해 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염 구조

T<sub>inlet</sub>과 N<sub>2</sub> 첨가에 따른 OH PLIF 이미지를 Fig. 6에 나타내었다.

노즐출구에서 상단 20mm까지의 OH 라디칼 분포를 보여주고 있다. 전체적으로 T<sub>inlet</sub>이 높아짐에 따라 OH의 분포가 보다 넓은 영역에서 큰 농도구배 없이 존재하는 경향을 나타내고 있다. 또

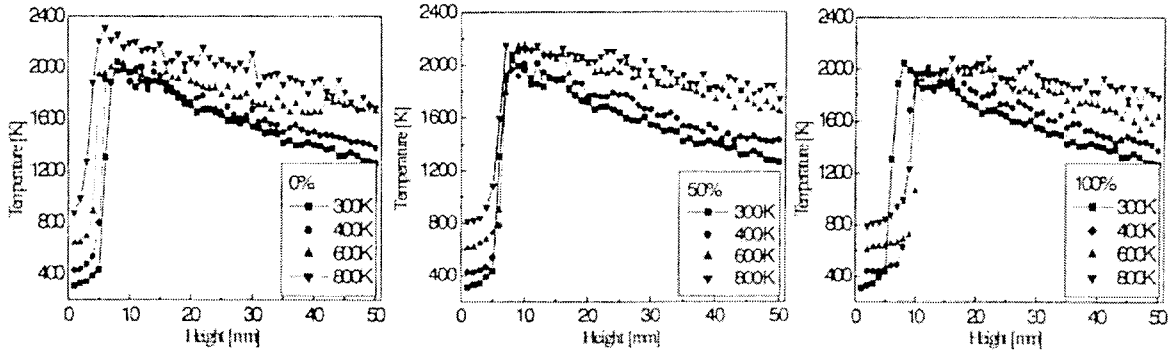


Fig. 7 Temperature distributions along the flame centerline for each N2 addition percentage

한 OH 라디칼이 화염면에 대한 척도<sup>[10]</sup>라는 관점에서 살펴보면,  $T_{max}$ 이 높아질수록 화염면은 수축하는 반면에,  $N_2$ 의 첨가가 많아질수록 팽창하는 경향을 보여준다. 전자는  $T_{max}$ 이 증가한 열적 효과(thermal effect)에 의한 연소 속도의 증가, 즉 급속한 연소에 기인한 결과로 사료되어지며, 후자의 경우는  $N_2$ 를 첨가함에 따른 희석효과(dilution effect)에 의해 비체적이 증가하고 아울러 출구속도가 증가함에 따른 결과로 사료되어진다.<sup>[11]</sup> 한편 OH 라디칼이 연소반응영역을 나타내는 중간생성물<sup>[12,13]</sup>이라는 관점에서 살펴보면, Fig. 6의 면적분포에서  $T_{max}$ 이 높고  $N_2$  첨가가 많은 경우 급속연소에 의해 좁은 영역에 분포할 것으로 예측되지만, 실제로는 예상과는 달리 분포영역에 있어 큰 차이가 없거나 오히려 조금 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 연소반응이 빨리 시작되었다 하더라도, 그 반응이 더욱 많은 상세 화학 반응기구를 가지며 축 방향 후류에서도 여전히 지속되는 것으로 설명할 수 있다. 따라서  $T_{max}$ 이 높아질수록 더욱 넓은 영역에 걸쳐 연소반응이 발생하는 것으로 사료된다. 반면에, 전체 반응영역에서  $N_2$  첨가에 따른 유동속도의 증가로 인한 예혼합 화염면의 위치변화를 고려하면,  $N_2$ 의 첨가는  $T_{max}$ 의 증가와는 상반된 효과를 가지는 것으로 판단된다. OH 라디칼의 농도가 최고인 영역은 전체적으로  $N_2$  첨가에 따라서는 큰 변화가 없고,  $T_{max}$ 에 따라서는 400K과 600K을 전후하여 그 특성이 조금 다른 경향을 보여주고 있다.

3.2 온도 분포

$T_{max}$ 의 변화와  $N_2$  첨가에 따른 화염 중심축에

서의 온도측정 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 전 조건에 걸쳐 급격한 온도 구배를 나타내는 연소반응대가 2~3mm 두께를 가지며 존재하는 것을 확인할 수 있다. 화염온도가 단일화염온도에 비례한다라고 가정할 때,<sup>[14, 15]</sup>  $T_{max}$ 을 높이거나  $N_2$ 를 적게 첨가할수록 화염의 온도는 높을 것으로 예상되는 바, Fig. 7은 이러한 예상을 잘 나타내어주고 있다. 또한, Fig. 7은 고온공기연소의 메커니즘을 밝히는 데 도움이 될 만한, 몇 가지 중요한 결과를 말해주고 있다. 첫째로는,  $N_2$  첨가를 하지 않은 경우(0%),  $T_{max}$ 이 높을수록 노즐팁으로부터 반응대까지의 높이가 낮음을 발견할 수 있다. 이는 앞서 OH PLIF 이미지에서 보았듯,  $T_{max}$ 이 높을수록 급속한 연소가 일어난다는 것과 일치하는 결과라 하겠다. 그러나  $N_2$ 를 점점 첨가해감에 따라 100% 조건에서는 완전히 역전되어  $T_{max}$ 이 높을수록 노즐팁으로부터 축 방향 높이가 높아지는 경향을 나타내고 있다. 이는  $N_2$ 를 첨가함에 따라 혼합기의 단위 질량 당 탄소량의 변화, 즉 희석효과로 인한 반응의 지연 때문인 것으로 사료된다.<sup>[16]</sup>

둘째로 주목할 만한 사실은,  $N_2$ 를 첨가해감에 따라 연소에 의한 엔탈피의 상승이 줄어든다는 점이다. 0%의 경우를 살펴보면, 각 온도조건에서 연소에 의한 온도상승폭이 대략 1600K임에 반해, 100%의 경우는 각 온도조건에서의 최고온도가 거의 일정함을 볼 수 있다. 다시 말하면,  $T_{max}$ 이 높을수록 연소에 의한 온도상승폭이 줄어들었음을 의미한다. 또한,  $N_2$ 를 첨가함에 따라 연소최고온도가 낮아짐과 동시에 축 방향으로 온도가 변이되는 기류기가 완만해 진다는 점이다. 즉,  $T_{max}$

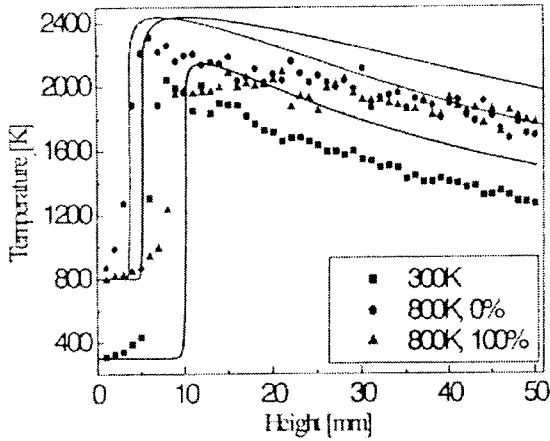


Fig. 8 Comparison of CARS measurement data with simulation results

이 높고 N<sub>2</sub>의 첨가가 많을 경우, 연소최고온도는 낮아지고 축 방향으로의 온도감소 기울기가 완만해져서 균일한 온도장을 얻을 수 있음을 짐작할 수 있다. 이렇게 함으로써 전체 NO<sub>x</sub> 배출량도 현저히 감소시킬 수 있을 것으로 기대되어진다.

이러한 현상들을 포함하는 고온공기연소의 메커니즘 규명을 위해, CARS 측정결과를 CHEMKIN Code를 이용한 수치해석결과와 함께 Fig. 8에 비교해 보았다. 수치해석에서는 복사열전달, Soret 효과, Dufour효과 등을 무시하였고, 확산현상은 전적으로 Fick의 법칙에 의존한다는 가정에서 출발하였기에 CARS 실험결과와 정량적으로 약간의 차이가 발생하였다. 그러나 전체적으로 경향이 잘 일치한다는 것을 알 수 있다. 즉, T<sub>index</sub>이 증가함에 따라 반응속도는 급격히 빨라졌음을 알 수 있고, 아울러 N<sub>2</sub> 첨가에도 불구하고 연소 최고온도는 거의 일정함을 보여주고 있다. 또한 전술한 바와 같이 N<sub>2</sub>를 혼합기에 첨가함으로써 축 방향으로의 온도 감소 기울기가 완만한, 균일한 온도장을 발견할 수 있다.

CARS 측정상의 시간상, 경계적 손실을 덜기 위해 버너 출구에서 50mm까지의 온도분포를 수치 해석적으로 계산한 이미지를 Fig. 9에 나타내었다.

CARS 실험결과와 비교한 배경을 가지고 2차원 온도분포를 살펴보면, T<sub>index</sub>의 증가에 따른 연소

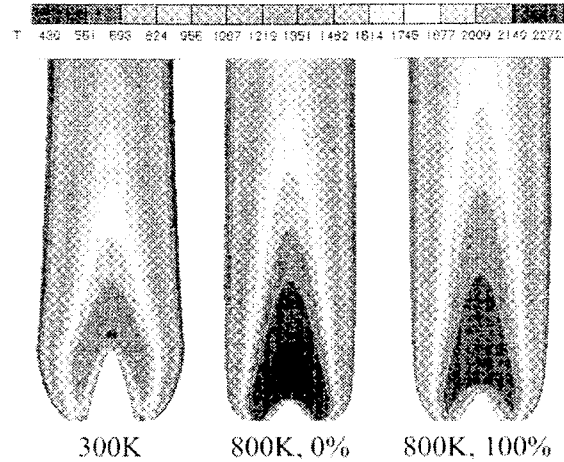


Fig. 9 Computational temperature distribution for 300K and 800K

온도의 상승과 축 방향뿐만 아니라 반경방향까지 더욱 넓은 범위에 걸쳐 고온영역이 분포하는 것이 관찰된다. 또한, N<sub>2</sub> 첨가에 의해 연소최고온도가 감소하는 효과는 거의 없으며, 오히려 고온영역을 더욱 넓게 만드는 효과가 있다는 것을 발견할 수 있다.

### 3.3 NO<sub>x</sub> 배출특성

전체적인 NO<sub>x</sub> 배출특성을 N<sub>2</sub> 첨가에 의한 산소농도의 감소 관점에서 O<sub>2</sub> vol%의 함수로 Fig. 10에 나타내었다. 전술한 바와 같이, 전체 NO<sub>x</sub>량은 화염의 안정화를 위한 이차공기의 영향을 고려하여 중심 축 방향 60mm 위치에서 가스분석기를 사용하여 측정하였다. 결과적으로 T<sub>index</sub>이 높아질수록 많은 양의 NO<sub>x</sub>가 발생하며, O<sub>2</sub> vol%에 대해서는 거의 전형적인 반비례 관계가 성립하는 것으로 관찰된다. 각각의 T<sub>index</sub>에서의 O<sub>2</sub> vol%가 낮은 가연 한계에서의 NO<sub>x</sub> 배출량이 서로 거의 비슷함을 발견할 수 있다. 이는 공급공기의 온도와 N<sub>2</sub> 첨가를 조절함으로써 배기배출물 특성을 저하시키지 않은 채 운전영역을 확대할 수 있다는 것을 의미한다고 하겠다. 연소온도 결과에 근거하여 NO<sub>x</sub> 배출결과를 고찰해 보면, 온도에 절대적으로 비례하여 NO<sub>x</sub>가 발생하는 것뿐만 아니라 NO<sub>x</sub>가 발생할 수 있는 영역이 얼마나 넓은가와 체류시간 등에도 많은 영향을 받는 것으로 사료된다.

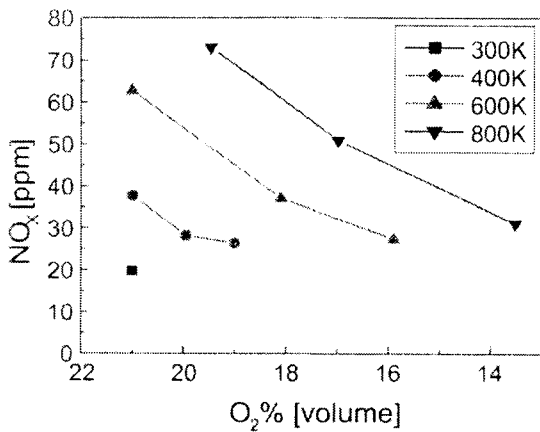


Fig. 10 Characteristics of NO<sub>x</sub> emission at each condition

4. 결론

메탄-공기 충류 예혼합 화염에서 T<sub>inlet</sub>와 N<sub>2</sub> 첨가량을 실험변수로 PLIF 기법을 이용한 OH의 2차원농도분포, CARS 측정 기법과 CHEMKIN Code를 이용한 온도분포 파악과 아울러 각 조건에서의 NO<sub>x</sub> 배출특성에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) PLIF 기법을 이용한 2차원 OH 농도측정 결과로부터 T<sub>inlet</sub>과 N<sub>2</sub> 첨가에 따른 화염면의 거동, 연소 반응속도와 면적분포 등을 관찰함으로써 고온공기연소 메커니즘 규명과 연소 제어를 위한 기초적인 자료를 획득할 수 있었다.

(2) CARS 기법을 이용한 화염내 축방향 온도 측정결과로부터 T<sub>inlet</sub>과 N<sub>2</sub> 첨가에 따른 온도장의 변화에 대한 통찰력을 얻을 수 있었다. 즉, N<sub>2</sub> 첨가 정도에 따라 T<sub>inlet</sub>의 변화가 반응대 높이에 미치는 영향이 상반되게 나타난다는 것과 N<sub>2</sub>를 첨가함에 따라 순수한 연소에 의한 엔탈피 상승폭이 줄어든다 것. 또한 연소최고온도가 낮아짐과 동시에 축 방향으로의 온도감소 기울기가 완만해 진다는 것을 발견할 수 있었다.

(3) CHEMKIN Code를 이용한 수치해석 결과로부터 화염내 2차원 온도분포 등을 포함하는 연소해석에 적합한 도구로서의 타당성을 검토하였다. 비록 CARS 측정결과와 정량적으로는 약간의 차이가 발생하였지만 전체적으로 잘 일치하는 경향을 보여 주었다.

(4) 가스분석기를 이용한 NO<sub>x</sub> 배출특성 결과로부터 T<sub>inlet</sub>과 공기의 O<sub>2</sub> vol%가 NO<sub>x</sub> 배출에 미치는 영향을 파악하였으며, 이들을 적절히 조절함으로써 배기배출물 특성을 저하시키지 않은 채 운전영역을 확대할 수 있는 방법에 대한 기초 자료를 획득할 수 있었다. 즉, T<sub>inlet</sub>이 높아질수록 NO<sub>x</sub> 발생이 증가하는 반면에, O<sub>2</sub> vol%에 대해서는 선형적인 반비례관계가 성립하는 것에 근거하여 운전영역의 확대를 꾀할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Yuan, J. and Naruse, I., 1998, "Modeling of Combustion Characteristics and NO<sub>x</sub> emission in Highly Preheated and Diluted Air Combustion," *Int. J. Energy Res.*, Vol. 22, pp. 1217~1234.
- (2) Wunning, J. A. and Wunning, J. G., 1997, "Flameless Oxidation to Reduce Thermal NO-formation," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 23, pp. 81~94.
- (3) Masashi katsuki and Toshiaki hasegawa, 1998, "The Science and Technology of Combustion in Highly Preheated Air," *27th Symposium on Combustion*, pp. 3135~3146.
- (4) Gyung-Min Choi, Masashi Katsuki, 2001, "Advanced Low NO<sub>x</sub> Combustion Using Highly Preheated Air," *Energy Conversion and Management*, Vol. 42 pp. 639~652.
- (5) Black, J.D., Brocklehurst, H.T. and Priddin, C.H., 1996, "Non-intrusive Thermometry in Liquid Kerosene fueled Combustor Sector rigs Using CARS and Comparison with CFD Temperature Predictions," ASME 96-GT-185.
- (6) Eckbreth, Alan C., 1998, "Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species."
- (7) Eckbreth, A.C., 1980, "CARS Thermometry in Practical Combustors," *Combustion and Flame*, Vol. 39 pp. 133~147.
- (8) Bedue, R., Gastebois, P., et al. 1984, "CARS Temperature in a Simulated Turbo-Machine Combustor," *Combustion and Flame*, Vol. 57 pp. 141~153.

- (9) Stricker, W. and Meier, W., 1993, "The Use of CARS for Temperature Measurements in Practical Flames," *Trends in Appl. Spectroscopy*, Vol. 1 pp. 231~260.
- (10) Bennett, B. A. V., Mcenally, C. S., Pfeifferle, L. D. and Smooke, M. D., 2000, "Computational and Experimental Study of Axisymmetric Co-Flow Partially Premixed Methane/Air Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 123, pp. 522~546.
- (11) Gulder, Omer L., 1995, "Effects of Oxygen on Soot Formation in Methane, Propane, and n-Butane Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 123, pp. 522~546.
- (12) Gaydon, A. G., 1974, *The Spectroscopy of Flames*, 2nd ed., Chapman and Hall, London, pp. 99~126.
- (13) Tsatsaronis, G., 1978, "Prediction of Propagating Laminar Flames in Methane, Oxygen, Nitrogen Mixtures," *Combustion and Flame*, Vol. 33, pp. 217~239.
- (14) Gomez, A. and Glassman, I., 1986, "Quantitative Comparison of Fuel Soot Formation Rates in Laminar Diffusion Flames," *21st Symposium on Combustion*, pp. 1087~1095.
- (15) Axelbaum, R. L. and Law, C. K., 1990 "Soot Formation and Inert Addition in Diffusion Flames," *23rd Symposium on Combustion*, pp. 1517~1523.
- (16) Glassman, I., 1998, "Sooting Laminar Diffusion Flames: Effect of Dilution, Additives, Pressure, and Microgravity," *27th Symposium on Combustion*, pp. 1589~1596.
- (17) Seung-Young Lee, Jong-Ho Lee, Chung-Hwan Jeon and Young-June Chang, 2001, "An Experimental Study on the Flame Structure of Partially Premixed Flame using OH PLIF," *Proceedings of the KSME Spring annual Meeting B* pp. 54~59.
- (18) Seung-Young Lee, Jong-Ho Lee, Chung-Hwan Jeon and Young-June Chang, 2001, "Preheated Air Combustion Characteristics of Partially Premixed Flame," *Proceedings of the KSME Fall annual Meeting B*, pp. 65~70.
- (19) Byeong-Jun Lee, Yong Suhk Gil, Jae Won Hahn and Suk Ho Chung, 1996, "Hydroxyl Radical Measurements in the Flame Using LIF," *Trans. of the KSME* Vol. 20, No. 2, pp. 710~719.