

## 고온 예열 공기에 의한 난류 비예혼합 화염의 연소 특성

곽지현\* · 전충환\*\* · 장영준\*  
(2002년 5월 17일 접수, 2003년 3월 5일 심사완료)

### Combustion Characteristics of a Turbulent Non-premixed Flame Using High Preheated Air

Ji-hyun Kwark, Chung-hwan Jeon and Young-june Chang

**Key Words:** Turbulent Non-premixed Flame(난류 비예혼합 화염), High Preheated Air(고온예열 공기), O<sub>2</sub> Concentration(산소 농도), Dilution Level(희석률)

#### Abstract

An experiment using high preheated air in a turbulent non-premixed flame was performed to investigate the effects of high preheated air on the combustion characteristics. Combustion using high preheated and diluted air with flue gas is a new technology which enables NO emission to be reduced. In this study, N<sub>2</sub> was used as diluent and propane as fuel. Combustion characteristics, especially the distributions of the flame temperature, NO concentration and OH radical intensity were examined under the condition of 300 K, 600 K, 1000 K in terms of the combustion air temperature, and also under the condition of the dilution level from 21% to 13% in terms of oxygen concentration. As the preheated air temperature increased, it appeared that the flame length became shorter, maximum flame temperature increased, the reaction region moved to upstream, and NO concentration increased, but the flame temperature's fluctuation was reduced. In opposite, it was shown with decrement of oxygen concentration at the maximum temperature that both maximum value and the gradient of the flame temperature decreased, and NO emission also decreased considerably, but its fluctuation became larger, being inclined to be unstable.

#### 기호설명

T	: 화염의 순간온도(K)
$\bar{T}$	: 화염의 평균온도(K)
T'	: 화염의 변동온도(K)
T' <sub>rms</sub>	: 화염온도의 제곱평균제곱근(K)
R	: 화염의 반경방향 거리(mm)
X	: 화염의 축방향 거리(mm)

#### 1. 서론

오늘날 많은 대기오염 물질 중에서 관심의 주 대상중 하나인 NO<sub>x</sub>는 산업용 연소로에서 우선

제어해야 할 대상으로 검토되고 있으며, 특히 이 중 95% 이상을 차지하는 NO는 대기중에서 NO<sub>2</sub>로 산화하여 산성비 및 광화학 스모그의 원인이 되는 유해 물질로서 이의 저감을 위해 많은 연구자들이 새로운 연소 기술을 개발해 오고 있다. 최근에 이러한 NO를 저감하기 위해 개발된 새로운 연소 기술 중의 하나로 고온 예열 공기연소(high preheated air combustion) 방식이 있다. 이는 대기로 버려지는 연소가스의 폐열을 이용하여 버너로 들어가는 연소공기를 예열하고, 희석시켜 시스템의 열효율을 높임과 동시에 NO 농도의 배출을 저감시키는 것이다. 이 고온공기 연소 방식에서 NO가 저감되는 이유는 고온의 연소용 공기를 이용함으로써 연소 안정성을 증가시켜 저산소 농도에서도 안정된 연소가 가능하게 되고, 화염 내에 균일한 온도 분포가 이루어져 국소 고온 영역의 생성을 막아주고 열적 NO 생성 기구를 억제하기 때문이다.<sup>(1)</sup>

주요 선행 연구로서 Suzukawa 등<sup>(2)</sup>은 예열공기를 이용한 연소에서 NO 배출물과 열전달에 대한

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

E-mail : changyj@pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-2332 FAX : (051)582-9818

\* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

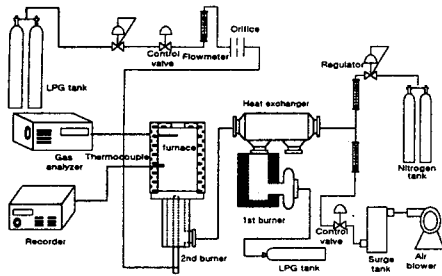


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

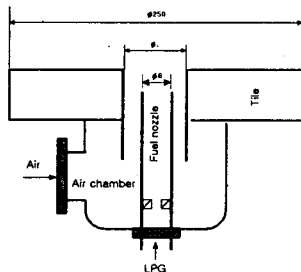


Fig. 2 Specification of the burner

실험을 하였고, Nishimura 등<sup>(3)</sup>은 공업로에서 고온공기를 이용한 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 연구하였으며, Yuan 등<sup>(4)</sup>은 공기 희석제로서 N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Ar, He, 연소가스 등을 적용하여 연소 특성을 조사하였다. 이에 반해 국내에서의 고온공기를 이용한 연소 특성에 관한 연구는 별로 알려진 바가 없는 실정이다. 그러므로 고온공기 연소 시의 기본적인 연소 특성의 조사가 선행되어야 하는 시점이다.

본 연구에서는 고온으로 예열된 공기의 온도와 산소 농도가 연소 특성에 미치는 영향을 살펴보고자 하며, 특히 공업로의 대부분을 차지하는 동축 난류 비예혼합 화염을 대상으로 화염의 구조와 NO의 배출 특성을 조사하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

본 연구에서 사용한 실험장치는 Fig. 1처럼 크게 대상 버너와 연료 공급장치, 공기 및 희석제 공급장치, 공기가열장치, 온도취득장치, 배가스분석장치로 구성되어 있다. 고온의 공기를 얻기 위한 공기 가열장치는 가스버너(1차버너)와 열교환기로 구성되어 있으며, 공기와 희석제는 열교환

기를 통과하여 고온으로 가열되어 대상버너(2차버너)에 들어가게 된다. 열교환기는 판형으로 1차버너의 연소가스와 2차버너의 연소공기가 서로 혼합 없이 열교환만 하게 설계되어 있는데 이는 연소공기의 유량과 희석에 따른 산소농도를 정확히 제어해 줄 수 있도록 하기 위함이다. 연료는 프로판을 사용하고 공기는 출력 0.75 kW의 송풍기로 공급되며 희석제는 질소를 사용하여 공기라인과 연결시켜 5미터 이상을 진행하여 충분히 혼합되도록 하였다. 화염온도는 R형(Pt/Pt-Rh 13%) 열전대와 저장 가능한 디지털 기록장치로 측정하며, 배가스 분석장치는 전기화학센서가 장착된 가스분석기로 냉각장치를 갖춘 프로브를 가지고 있다. Fig. 2에 동축 비예혼합 버너의 상세도를 나타낸다. 연료 노즐의 직경은 6 mm이고, 공기 노즐의 직경은 어댑터를 이용하여 20 mm에서 28 mm까지 가변할 수 있게 하였다. 이는 연소공기가 가열됨에 따라 비체적 증가에 따른 유출 속도를 일정하게 해주기 위해서이다.

### 2.2 실험 방법

본 연구에서 동축 확산 버너를 대상으로 연소공기의 온도와 희석에 따른 산소농도를 변화시켜가며 화염의 특성과 NO의 배출 특성을 살펴보았다. 연료의 유량을 1 lpm으로 고정하고 이론당량비에 해당하는 공기를 공급하면서 연소공기의 온도를 300 K, 600 K, 1000 K로 바꾸어가며 연소 특성을 조사하였다. 자세한 실험 조건을 Table 1에 제시한다. 또한 본 실험에 적용한 최대온도인 1000 K에서 연소공기를 각각 산소농도 21%, 17%, 13%(Vol.) 까지 희석하여 고온공기 연소의 본래 목적에 부합하는 저산소 농도에서의 연소 특성을 살펴보았다. Table 2에 각 산소농도에 따른 공기와 질소의 유량을 나타낸다. 이 때 공기와 질소의 총합은 항상 일정한 양이 되도록 하여 연소공기의 유속이 일정하도록 하였고, 가열로 인한 연소공기의 비체적 증가에 따른 유속증가를 고려하여 공기 노즐의 직경을 달리하여 유속을 일정하게 하였다. 화염의 온도분포는 노즐 림에서 측방향으로 10 mm 간격, 각 높이에서 반경방향으로 3 mm 간격으로 같은 연소 조건에서 위치를 바꾸어가며 측정하였다. 각 지점에서 화염의 온도는 10초 간격으로 30회 측정된 뒤 평균값으로 나타내었으며, 또한 온도 변동을 살펴보기 위해서 RMS를 구하여 난류화염의 특성을 살펴보았다. 화염내의 연소 반응 영역과 그 정도를

Table 1 Experimental condition

Item	Condition
Fuel flow rate(l/min)	1
Air flow rate(l/min)	23.8
O <sub>2</sub> concentration(%)	21, 17, 13
Air Temp.(K)	300, 600, 1000

Table 2 Air/N<sub>2</sub> flow rate according to O<sub>2</sub> concentration

O <sub>2</sub> concentration(%)	Air (l/min)	N <sub>2</sub> (l/min)
21	23.8	0
17	19.3	4.5
13	14.7	9.1

가능할 수 있는 주요 중간생성물인 OH 라디칼을 취득하기 위해 ICCD 카메라에 파장 282.94 nm의 빛을 통과시킬 수 있는 필터를 부착하여 OH 라디칼의 자발광 사진을 찍었다. 화염 내 국소 NO의 측정은 냉각장치가 달린 직경 1.5 mm의 프로브를 삽입하여 온도분포와 같은 간격으로 실시하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 연소공기 온도에 따른 연소특성

연소공기의 온도가 연소특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 연소공기의 온도만 각각 300 K, 600 K, 1000 K로 바꾸어가며 화염의 외관적 형상, 온도분포, 난류화염의 변동특성, 라디칼 분포, 국소 NO 분포를 관찰해보았다.

##### 3.1.1 화염의 형상

연소공기의 온도에 따른 화염의 외관적 형상은 연소공기의 온도 상승으로 연소속도가 향상됨으로써 화염의 체적이 줄어들며, 길이가 짧아지고, 휘도가 급격히 증가하였다.

##### 3.1.2 화염의 온도분포

난류화염의 순간온도는 난류화염의 온도 특성을 나타내는데 유용한 방법인 Reynolds 분해를 이용하여 다음과 같이 평균성분과 변동성분으로 나누어 나타낼 수 있다.<sup>(7)</sup>

$$T(t) = \bar{T} + T'(t) \quad (1)$$

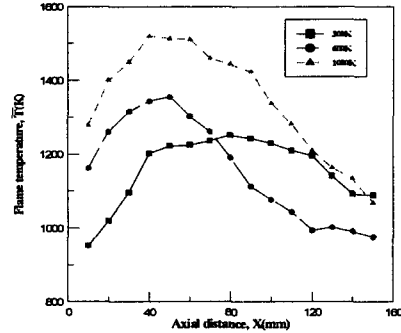


Fig. 3 Axial flame temperature according to air temperature (R=0)

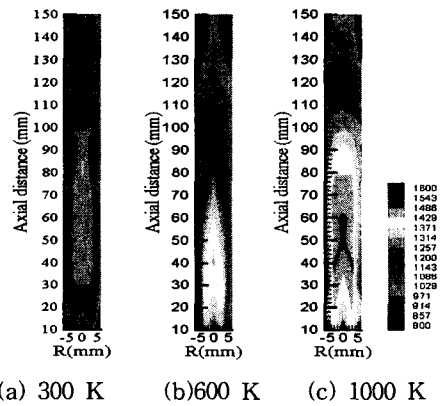
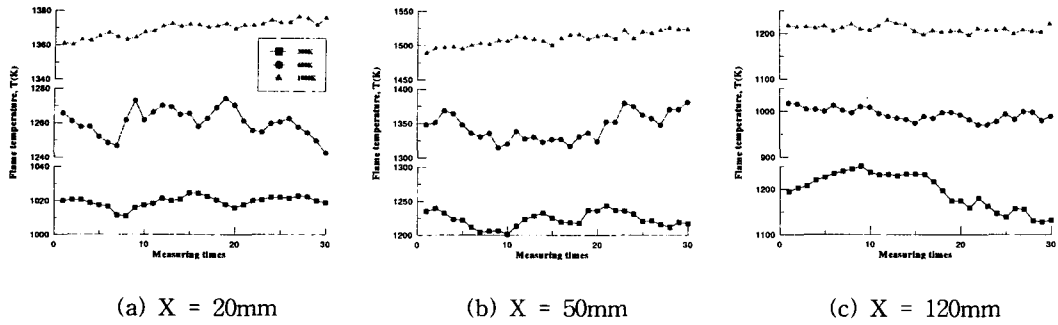


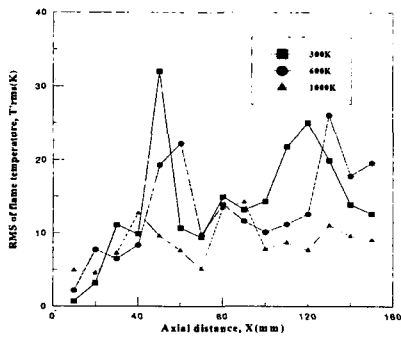
Fig. 4 2D flame temperature distributions [K]

화염의 전체적인 온도분포를 알아보기 위해서 축방향에 따른 각 지점의 평균온도( $\bar{T}$ )를 계산하여 Fig. 3에 나타내었다. 연소공기의 온도 상승에 따라 화염의 최고온도도 높아지는데, 특히 그 위치가 화염의 상류 쪽으로 이동하고 있다. 연소공기의 높은 엔탈피로 인한 연료로의 열전달이 증대되고 연료와의 혼합이 촉진되며, 연료가 화학적으로 보다 활성화되어 화학반응속도가 증가됨으로 화염 상류에서 급격한 연소가 이루어지는 것으로 생각된다. 동시에 축방향 거리에 따른 온도구배도 더 커진다. Fig. 4는 화염의 온도 분포를 2차원적으로 나타낸 그림으로 등온선을 캐적 처리하여 색깔띠로 나타내었다. 연소공기 온도가 높을수록 최고 화염온도 지역이 상류 쪽으로 옮겨가고 있고 보다 넓은 범위까지 고온의 연소영역이 형성되고 있음을 보여주고 있다.

난류화염의 온도변화를 좀 더 자세히 살펴보기 위해 Fig. 5에 축방향 세 지점의 순간온도를 나타내었다. 각각 (a)는 화염상류인 X = 20 mm,



(a) X = 20mm (b) X = 50mm (c) X = 120mm  
**Fig. 5** Distributions of the instant flame temperature at each axial distance (R=0)

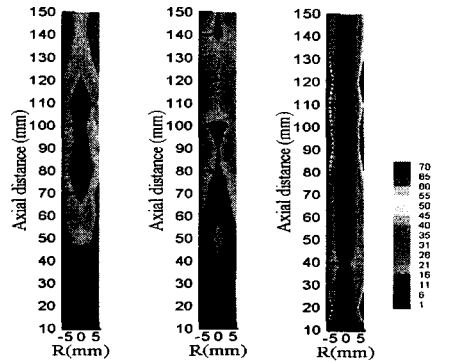


**Fig. 6** RMS of flame temperature (R=0)

(b)는 주 연소반응 지점인 X = 50 mm, (c)는 화염하류인 X = 120 mm 지점이다. 같은 지점에서 온도의 변동은 예열공기의 온도가 1000 K 일 때 특히 작게 나타나, 고온 공기 연소시 화염이 더욱 안정화됨을 알 수 있다. 이러한 변동성분을 정량적으로 나타내기 위해 아래와 같이 제곱평균 제곱근(RMS)을 계산하여 Fig. 6에 나타낸다.

$$T'_{rms} = \sqrt{T'^2} \quad (2)$$

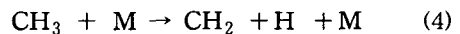
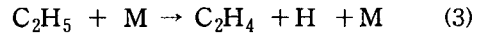
화염 중심을 따라 전체적인 온도의 편차는 연소공기 온도가 높을수록 작아서 화염이 안정되어 있음을 알 수가 있다. 그러나 Fig. 7의 2차원 분포 그림에서는 화염 하류 쪽의 가장자리에서 연소공기 온도가 높을수록 온도의 편차가 더 크다. 연소 시 화염의 주위에 있는 공기가 화염 내로 유입되는 혼합작용이 생기는데, 이 때 유입된 공기는 연소반응 시 미처 연소하지 못한 연료와 함께 뒤섞이게 되고, 이들 사이에 분자확산이 이루어지게 되어 연소 반응을 한다. 연소공기의 온도가 높을수록 연료와 공기가 보다 활성화되어 이러한 혼합작용과 분자확산이 촉진되므로 온도 편차도 상대적으로 크게 나타나는 것으로 생각된다.



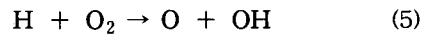
(a) 300 K (b) 600 K (c) 1000 K  
**Fig. 7** 2D RMS of flame temperature [K]

3.1.3 라디칼 분포 특성

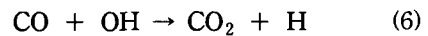
Fig. 8은 연소반응 시 화염 내부의 OH 라디칼의 상대적인 자발광 강도를 나타낸 사진이다. 탄화수소 연료의 산화과정에서 연료분자의 탄소-탄소 결합이 쪼개어지고, 이 때 생긴 탄화수소 활성기는 더 쪼개져서 올레핀족과 수소원자를 생성하는데 이를 수소 원자 추출이라 한다.<sup>(9)</sup>



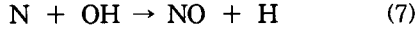
여기서 생긴 많은 수소원자가 산소와 반응하여 OH 라디칼을 만들어 낸다.



특히 Arrhenius의 경험식에서 알 수 있듯이 온도가 증가할수록 반응속도상수가 커져 정반응이 촉진되어 OH 생성이 더욱 활발해진다. OH 라디칼은 프로판 연료의 핵심 산화반응 과정인<sup>(9)</sup>



의 반응물로서 연소반응 영역을 나타내주는 지표이다. 또한 확장 Zeldovich 기구인



반응에서 NO를 생성시키는 반응물로 NO 배출물의 생성을 짐작케 해주는 지표이기도 하다. Fig. 8에서 보듯이 연소공기 온도의 상승에 따라 OH 라디칼의 상대강도가 커지고 있다. 따라서 고온 공기 연소 시 화염의 온도 상승 결과를 뒷받침해 주며, 국소 NO의 발생도 증가할 것임을 예측하게 해준다.

3.1.4 NO 농도 분포

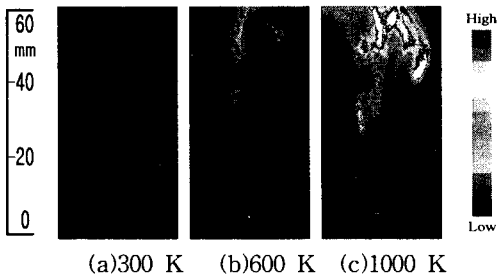


Fig. 8 OH radical intensity [Arbitrary unit]

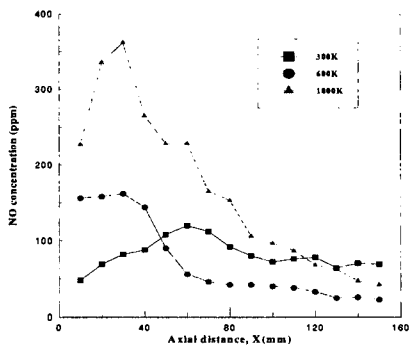


Fig. 9 Local NO concentration (R=0)

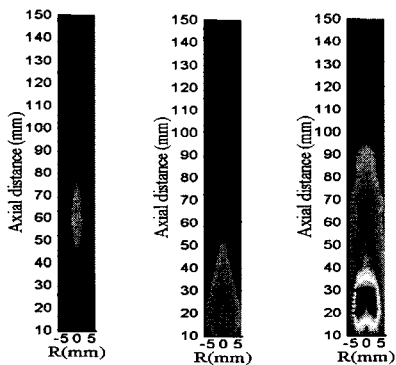


Fig. 10 2D NO concentration distributions [ppm]

Fig. 9는 축방향 거리에 따른 화염 중심의 국소 NO 발생농도를 연소공기 온도를 파라미터로 하여 나타낸 그림이다. 높은 연소공기 온도에서 화염온도 및 OH 라디칼강도가 모두 높게 나온 결과에서 예측했듯이 NO의 발생농도 또한 높게 나타났다. 특히 이러한 경향은 화염 상류에서 뚜렷이 나타나며, 고온공기 연소시 온도구배가 크듯이 NO의 발생 농도구배 또한 크다. 즉 상온의 공기 연소에서는 주 연소영역 이후 하류까지 국소 NO의 발생농도가 꾸준히 유지되고 있으나 고온공기 연소시에는 주 연소반응 지역과 하류와의 농도차이가 크다. Fig. 10의 2차원 분포 그림도 온도분포 그림과 유사한 결과를 보여주고 있다. 연소공기온도가 1000 K로 상승 시 300 K에 비해 국소 NO의 최고 농도가 3배정도 증가하고 있다.

3.2 연소공기의 산소농도에 따른 연소특성

열효율을 높이고 NO를 저감시키기 위한 고온 공기의 연소 목적에 부합하고자 연소공기의 온도를 본 실험의 최고온도인 1000 K로 유지하며 산소농도를 각각 21%, 17%, 13%로 희석시켜 3.1절 같이 조사해 보았다.

3.2.1 화염의 형상

연소공기의 산소농도에 따른 화염의 형태는 크게 차이가 없었다. 그러나 산소농도가 낮아질수록 휘도가 감소하고 청염이나 청록염으로 화염색이 변했다.

3.2.2 화염의 온도 분포

Fig. 11은 화염 중심(R=0)의 축방향 거리에 따

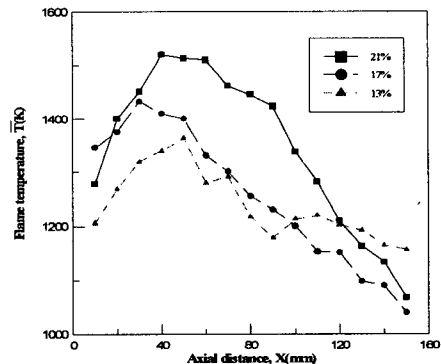
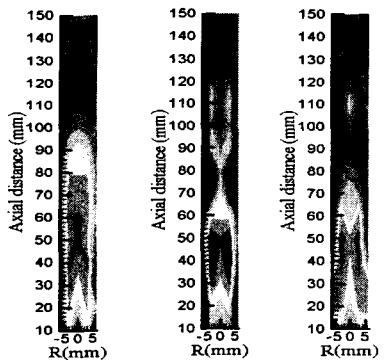


Fig. 11 Flame temperature with O<sub>2</sub> concentration of the combustion air (R=0)

큰 평균온도 분포를 연소공기의 산소농도별로 나타낸 그림이다. 산소농도가 낮아짐에 따라 화염상류의 온도분포도 전반적으로 낮아진다. 산소농도 저하에 따라 식 (3), (4)에서 생성된 수소원자가 산소와 반응하는 식 (5)의 반응과정이 약화되므로 OH 라디칼의 생성이 억제되고, 아울러 핵심 발열반응인 식 (6)의 반응이 약해지기 때문에 화염의 온도는 낮아진다. 본 실험에서 최저 가연한계인 산소농도 13%에서 축방향 거리에 따른 최고, 최저 온도차는 더 작아지지만 온도분포가 들쭉날쭉하여 화염이 불안정한 특징을 보인다. Fig. 12의 이차원 온도분포에서도 이러한 특징이 잘 나타난다.

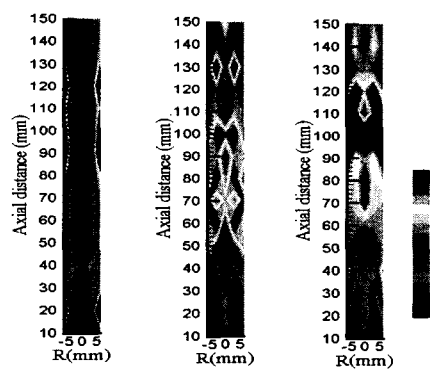
Fig. 13~15는 산소농도에 따른 축방향 순간온도와 이의 RMS를 나타낸 그림이다. 낮은 산소농도에서 온도편차가 크게 나타나고 있다. 연소공기가 희석됨에 따라 연소반응이 점점 불안정해지고 이에 따른 온도변동이 커지고 있다. 특히 화염의 중, 하류 지점에서 온도편차가 크게 나타나는

데, 이는 화염상류의 연소반응으로 산소가 소비되어 화염의 중, 하류로 갈수록 연소에 필요한 산소가 더욱 부족해지기 때문에 화염이 불안정해지고 온도변동이 커지는 것으로 생각된다. 위 결과에서 저산소 농도에서의 연소는 화염 전체의 온도 구배는 작아지지만, 각 지점에서의 온도 변동은 더 커지는 특성을 나타내었다.



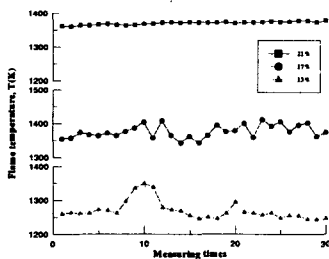
(a) 21% (b) 17% (c) 13%

Fig. 12 2D flame temperature distributions [K]

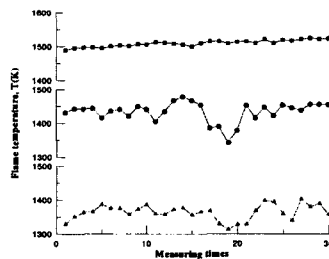


(a)21% (b) 17% (c) 13%

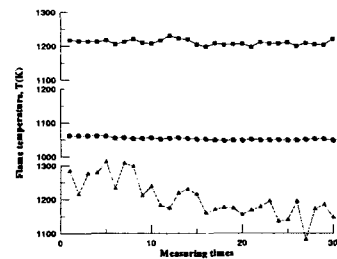
Fig. 15 2D RMS of flame temperature [K]



(a) X= 20mm



(b) X=50mm



(c) X=120mm

Fig. 13 Distributions of the instant flame temperature at each axial distance

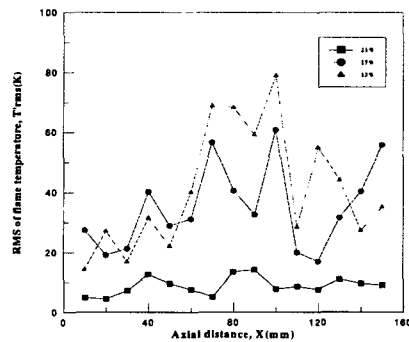


Fig. 14 RMS of flame temperature (R=0)

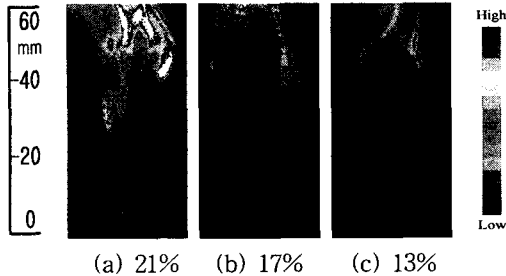


Fig. 16 OH radical intensity [Arbitrary unit]

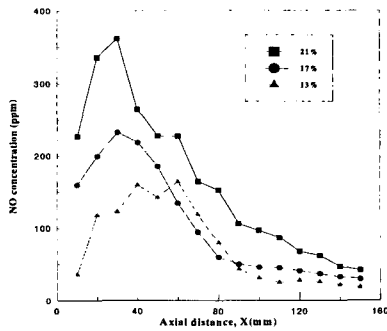


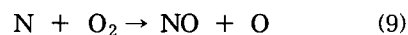
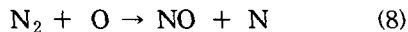
Fig. 17 Local NO distance distributions (R=0)

3.2.3 라디칼 분포 특성

Fig. 16은 산소농도를 파라미터로 한 화염의 OH 라디칼 자발광 사진이다. 산소농도가 낮아질수록 자발광 강도도 낮아지고 있음을 알 수 있다. 이것은 OH 라디칼 생성반응인 식 (5)에서 O<sub>2</sub>의 공격 경로가 위축되어 산소의 몰분율이 낮아짐에 따라 OH의 생성이 위축되기 때문이다. OH 라디칼의 감소로 연료의 주 산화반응인 식 (6)의 반응이 약화되어 화염온도가 낮아지고 휘도도 약해진다.

3.2.4 NO 농도 분포

Fig. 17에서 볼 수 있는 것처럼 산소농도의 감소에 따라 NO 배출 농도 저감은 뚜렷이 나타난다. 산소 농도의 저하로 최고화염온도가 1500 K 이하로 낮아지면서 열적 NO 기구인



이 억제되고, 또한 OH 라디칼 감소로 인한 확장 젤도비치기구(식 (7))도 억제되기 때문이다. Fig. 18의 2차원 분포에서도 화염상류에서의 국소 NO 농도가 산소농도의 감소에 따라 현저히 낮아지고 있음을 알 수 있다.

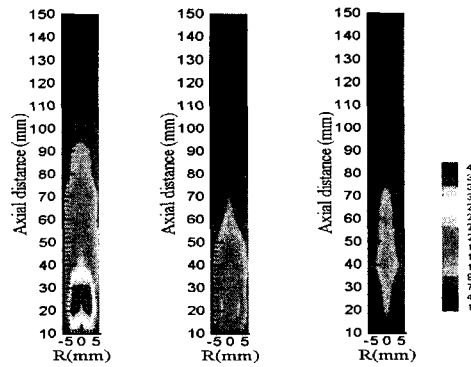


Fig. 18 2D local NO concentrations [ppm]

4. 결론

(1) 연소공기의 온도가 높아질수록 화염의 체적은 줄어들고 최고온도는 높아지며, 주 연소반응 지역이 화염 상류로 이동하고, 온도의 변동성분은 작아진다. 또한 NO의 농도 또한 급격히 높아진다.

(2) 고온의 연소공기를 이용한 연소에서 산소농도가 낮아짐에 따라 화염의 최고 온도는 전반적으로 낮아지고, 온도 구배도 작아지지만, 각 지점의 온도 변동은 더 커지고 화염이 불안정해지는 경향이 있다. 또한 국소 NO의 발생 농도가 상당히 줄어든다.

(3) 고온공기 연소에 있어서 산소농도를 낮추는 연소는 상온의 공기를 사용한 연소에 비해 보다 높은 화염의 온도분포를 얻을 수 있을뿐만 아니라, NO 배출농도도 저감시킬 수 있다.

참고문헌

(1) Choi, Gyung-Min and Masashi, Katsuki, 2001, "Advanced Low NOx Combustion Using Highly Preheated Air," *Energy Conversion and Management*, Vol. 42, pp. 639~652.

(2) Yutaka, S., Shunichi, S. and Yoshimichi, H., 1997, "Heat Transfer Improvement and NOx Reduction by Highly Preheated Air Combustion," *Energy Conversion and Management*, Vol. 38, No. 10-13, pp. 1061~1071.

(3) Nishimura, M, Suzuki, T, Nakanishi, R. and Kitamura, R., 1997, "Low-NOx Combustion under

- High Preheated Air Temperature Condition in An Industrial Furnace," *Energy Conversion and Management*, Vol. 38, No. 10-13, pp. 1353~1363.
- (4) Yuan, Jianwei, and Naruse, Ichiro, 1999, "Effects of Air Dilution on Highly Preheated Air Combustion in a Regenerative Furnace," *Energy & Fuels*, Vol. 13, pp. 99~104.
- (5) Toshiaki, Hasegawa, and Ryoichi, Tanaka, 1994, "High Temperature Excess-enthalpy Combustion for Efficiency Improvement and NOx Abatement," AFRC & JFRC, Section 9, No. 9E.
- (6) Gabriel, Raymond, Navedo, Hose E. and Chen, Ruey-Hung, 2000, "Effects of Fuel Lewis Number on Nitric Oxide Emission of Diluted H<sub>2</sub> Turbulent Jet Diffusion Flames," *Combust. and Flame* Vol. 121, pp. 525~534.
- (7) Reynolds, O., 1883, "An Experimental Investigation of the Circumstances which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinuous, and of the Law of Resistance in Parallel Channels," *Phil. Trans. Royal Society of London*, VI/ 174, pp. 935~982.
- (8) Osuki, Ahadi, 2000, "Heat Flux from Highly Preheated Air Combustion and Swirl Combustion," MS Thesis, The Combustion Laboratory, University of Maryland.
- (9) Glassman, I., 1987, *Combustion*, 2nd Ed., Academic Press, Orlando.
- (10) Flagan, R. C, and Seinfeld, J. H., 1988, *Fundamentals of Air Pollution Engineering*, Englewood Cliffs, NJ., Prentice Hall.
- (11) Fenimore, C. P. 1971, "Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames," 13th Symposium (International) on Combustion. Pittsburg, The Combustion Institute, p. 373.
- (12) Duterque, J., Avegard, N., and Borghi, R., 1981, "Further Results on Nitrogen Oxides Production in Combustions," *Combustion Science and Technology*, 25, p. 85.
- (13) MacKinnon, D. J., 1974, "Nitric Oxide Formation at High Temperatures," *Journal of the Air Pollution Control Association*, 24(3), March.
- (14) Parkinson, G., 1981, "NOx Controls : Many New System Undergo Trials," *Chemical Engineering*, March 9, pp. 39~43.
- (15) U.S. EPA. 1983, "Control Techniques for Nitrogen Oxide Emission from Stationary Source" (revised 2nd Ed.).
- (16) Kokkinos, A. Cichanowioz, J. E., Eskinazi, D., Stallings, J., and Offen, G., 1992, "NOx Control for Utility Boiler : Highlight of the EPRI July 1992 Workshop," *Journal of the air Pollution Control Association*, 42(11), November, p. 1498.
- (17) Crawford A.R., Manny E.H., and Bartok W. "Field Testing : Application of Combustion Modifications to Power Generation Sources," in *Processing of the 2nd Stationary Sources Combustion Symposium* Vol. 2.
- (18) Choi, B. R., Chang, I. G. and Choi, G. M., 1996, "An Experimental Study on Flame Structure and Combustion Characteristics of Turbulent Diffusion Flame(I)," *Transactions of KSME(B)*, Vol. 20, No. 3, pp. 1028~1039.
- (19) You, H. S. and Oh, S. K., 1995, "An Experimental Study on Flame Stability and Combustion Characteristics of Coaxial Diffusion Flame," *Transactions of KSME(B)*, Vol. 19, No. 2, pp. 509~518.