

# 고온의 예열공기를 이용한 액체연료의 분무 연소특성에 관한 실험적 연구

박민철\* · 김동일\*\* · 오상현\*\*\*

## Experimental Study on Light Oil Combustion Characteristics With High-Preheated Air

Min Chul Park, Dong Il Kim and Sang Hun Oh

### ABSTRACT

An experimental study has been carried on high-preheated temperature air combustion. The flames with high-preheated temperature air combustion turned out to be both temporally and spatially much more stable and homogeneous than these with room-temperature combustion air. The global flame feature showed a range of flame colors (yellow, blue, bluish-green) according to the flame conditions. A low level of NO<sub>x</sub> along with low level of CO has been obtained under high-preheated air combustion conditions. The thermal and chemical behavior of high-preheated air combustion flames depends on the preheated temperature and the oxygen concentration of air.

**Key Words:** High-preheated air combustion, NO<sub>x</sub>, Flammability

### 기 호 설 명

con. : Concentration

### 1. 서 론

최근 석유자원의 한계성에 따른 세계적인 에너지 위기는 합리적인 이용기술 개발에 대한 연구의 개발 필요성을 높이고 있어 새로운 에너지의 개발 및 이용개선 연구가 전 세계적으로 수행되고 있으며, 특히 에너지원의 대부분을 수입하고 있는 우리나라 실정으로는 에너지 절약차원에서, 연소 시 고효율을 이루며 환경 친화적인 기술에 대한 연구가 급선무라 할 수 있다. 현재 사용되고 있는 연료 중 액체연료가 차지하는 비중이 대단히 크므로 액체 연료의 효율적 이용을 위해서는 휘발성이 낮고 고 비등점 액체 연료인 중유와 같은 저질유의 상용이 점점 요구된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 여러 연소기술이 발전해

왔다. 저산소농도(21%이하)의 희박 연소공기를 이용함으로써 화염의 반응대에서 최고온도를 일정하게 유지하는 HiTAC (High Temperature Air Combustion, 혹은 Highly Preheated Air Combustion) 기술이 80년대에 개발·발전되어 현재 부분적으로 실용화되고 있다. 이러한 HiTAC 기술은 주로 재생버너(regenerative burner)에서 고온의 연소생성물을 순환시켜 유입되는 연소용 공기를 예열함으로써 에너지 절감과 NO<sub>x</sub>의 배출감소에 효과적이다. 또한, Flameless combustion(혹은 Invisible Flame)이나 Flameless Oxidation으로도 불리우고 있다.

Suzukawa et al[1]은 새로운 저 NO<sub>x</sub> 연소기 개발에 있어서 고온 예열공기를 이용하여 허니컴 재생기와 불 재생기를 비교하고, NO<sub>x</sub> 농도를 50 ppm이하로 낮추는 새로운 연소기를 개발하였다. 예열공기는 연소가스보다 50 K정도 낮게 유지하였고, 저 산소 농도는 11%를 유지했다.

Nishimura et al[2]은 역시 저 NO<sub>x</sub> 연소기 개

\* 부산대학교 기계공학부 대학원

\*\* 부산대학교 기계기술연구소

\*\*\* 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

발에 있어서 연료의 분사각을 달리하여 공기와의 혼합과 연소과정이 부드럽게 진행되도록 하여 대단히 일정한 연소과정에 의해  $\text{NO}_x$ 를 감소시켰다. 예열공기는 Suzukawa et al[1]과 비슷한 조건이다. 그리고 Choi et al[3]도 비슷한 실험을 행했는데, 예열공기의 온도에 있어서 연료인 천연가스의 자기점화온도 이상인 1273 K까지 올려서 사용했다.

Wunning[4]과 Gupta[5]는 현재까지의 HiTAC 기술을 정리하고 새로운 방향을 제시하였다.

그런데 대부분의 HiTAC 연구는 기체연료에 국한되고 있으며, 액체연료에 대한 연구는 아주 부분적으로 이루어지고 있다[6]. 따라서 본 연구에서는 산소농도 21%이하 조건과 고온의 예열공기를 사용했을 경우 경유를 이용한 분무연소의 특성과 연소현상을 규명하고자 한다.

## 2. 기초이론

연소효율에 영향을 고려할 때 중요인자 중 하나는 화염온도이다. 초과엔탈피연소(Excess Enthalpy Combustion)의 개념은 연소온도에 관계된 긍정적, 부정적 요소들을 포함한 여러 요소들을 설명하며, 이 이론에 의한 고효율의 열교환기를 이용한 열의 재순환, 배기가스의 재순환은 연소온도의 증가와 연료저감을 가능케 하였다. 그러나 그로 인한 오염물질 형성은 간과하지 않을 수 없다[5].

열에너지 재순환을 통한 연소과정은 다음과 같다.

$$\int_{T_0}^{T_1} C_p dT = Q_c + Q_a = H_t + H_0$$

재순환을 통해 생성된 열에너지는 유입되는 공기를 가열시켜 상온에서의 연소보다 더 높은 연소과정을 이룬다. 따라서 화염온도는 증가하게 된다. 열효율 면에선 유용성이 있으나 질소산화물의 증가, 연료의 점도변화, 장치의 복잡성 등 여러 해결해야 할 문제가 많다. 그럼에도 불구하고 열에너지의 재순환을 통한 연소방법은 고효율의 연소기를 제작할 수 있게 하였으며, 고온의 유입공기로 화염안정화가 이루어지기 때문에 희석가스( $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , Ar 등)를 혼합시켜 질소산화물의 생성도 억제할 수 있었다. 본 연구에서는 장치의 복잡성 때문에 상용히터를 사용하였고, 질소( $\text{N}_2$ )를 사용하여 산소농도를 조절하였다.

## 3. 실험장치 및 방법

고온의 예열공기를 만들어내기 위해 Fig. 1과 같은 연소장치를 설계, 제작하였다. 장치는 연소기에 희석된 공기를 공급해주는 공기공급부, 연소기부, 배기가스 분석과 온도조절 컨트롤부, 3개로 되어있다.

압축기에서 공급된 공기는 surge tank를 통해 믹서로 들어가  $\text{N}_2$ 와 혼합되어 가열기로 공급된다. 각 장치사이에 밸브와 유량 보정된 오리피스를 사용하여 정확한 유량을 공급하였다. 실험에 사용된 가열기(heater)는 상용히터(AGC air heater 2 kw, nissi, Japan)로서 노출팁 20mm 밑에 장착되어 있고 3개를 사용하였다. 1100K의 예열공기를 최대 250 l/min 까지 가열할 수 있었으며 PIDS 제어를 통해 컨트롤되었다. 노출과

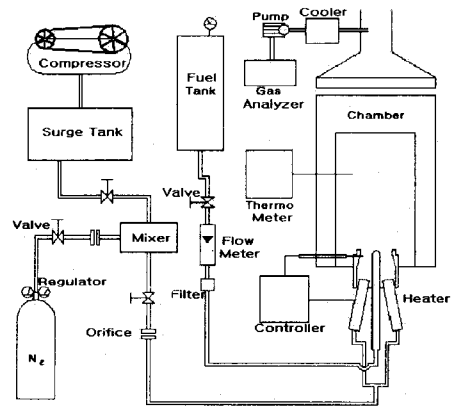


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

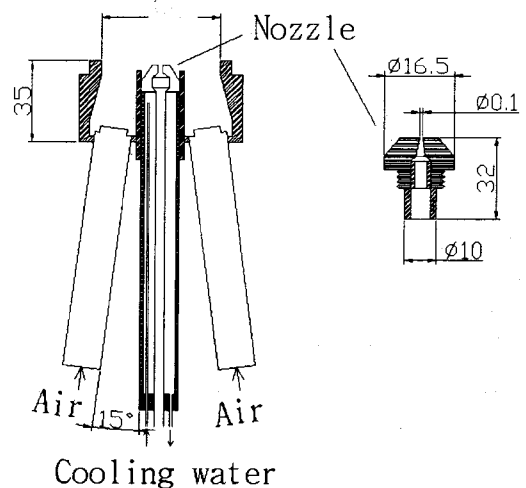


Fig. 2 A detailed diagram of the combustor and nozzle

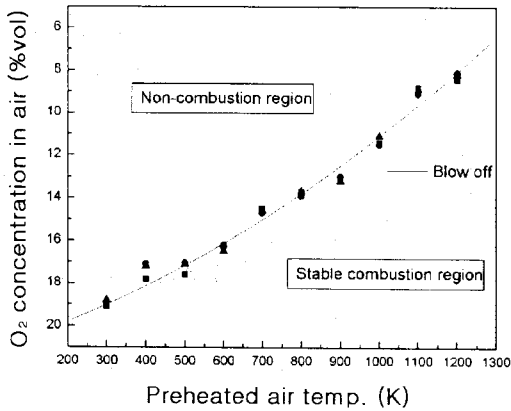


Fig. 3 Distribution of lean flammability limits

같은 높이에 미세 열전대(Pt-30%Pt/Ph)를 사용하여 예열기가 일정 온도로 유지되도록 제어하였다. 연료는 발열량 9200 kcal/l 인 경유를 사용하였고, 압력용기에서 나와 경유용 유량계를 통해 연소기 내로 들어간다. Fig. 2는 실험에 사용된 노즐로서 연소기 내부는 고온의 예열공기로 인해 노즐이 국부 가열되고, 연료가 비등되는 것을 막기 위해 이중관으로 설계하였고 냉각수로 냉각시켰다.

노즐은 일반적으로 보일러 및 가스터빈에서 범용되고 있는 Dantoss사의 상용 압력선회용 노즐을 사용하였다. 미립화 성능실험을 하여 압력을 조절했을 때 5.0 kgf/cm<sup>2</sup>의 압력에서부터 양호한 미립화가 이루어졌고, 분무각은 80° 내외이다.

Chamber의 크기는 226mm × 226mm ×

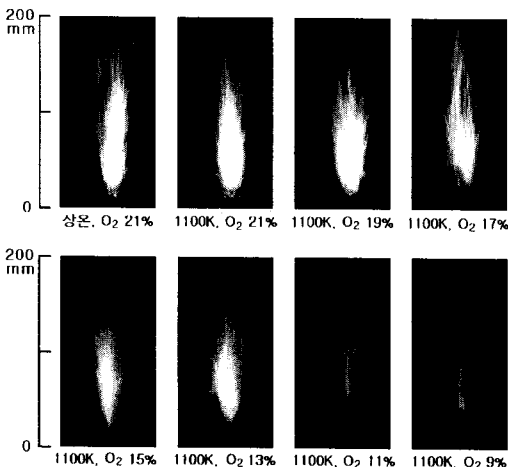


Fig. 4 Direct photographs of flame

1000mm이며 앞뒷면에 125mm×455mm의 가시화 창을 만들고 경화유리를 달아 연소 형상을 관찰하였고 화염가시화를 하였다. 또한 옆면에는 열전대를 삽입할 수 있는 구멍을 15mm 간격으로 뚫고, 다른 면에는 배기가스 측정을 위한 프로브 삽입 구멍을 뚫었다. 모두 볼트로 체결하여 공기 유입을 막았다.

배기가스의 분석기는 Cosa-6000을 사용하여 가열공기 온도 변화에 따른 배기가스의 NO<sub>x</sub>, CO 배출량을 측정하였고 NO는 화학발광법(chemiluminescence method)으로 분석하는 Nova model 312B를 사용하였다.

Table 1 Test conditions

Fuel	Light oil	
Preheated air temp.	300K ~ 1100K	
O <sub>2</sub> concentration	21% ~ 9%	
Flow rate (l/min)	Fuel	0.025
	Air	200

Table 1 과 같은 조건에서의 연소특성을 알아보기 위해 다음과 같은 실험을 수행하였다.

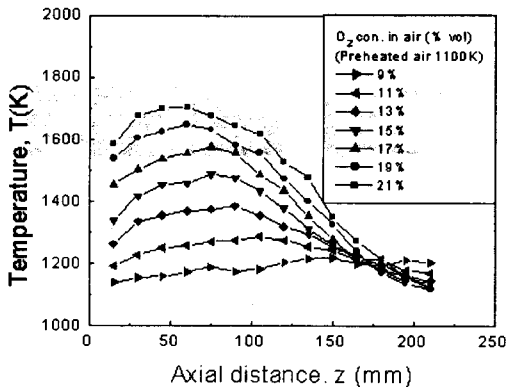
### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 가연한계 측정

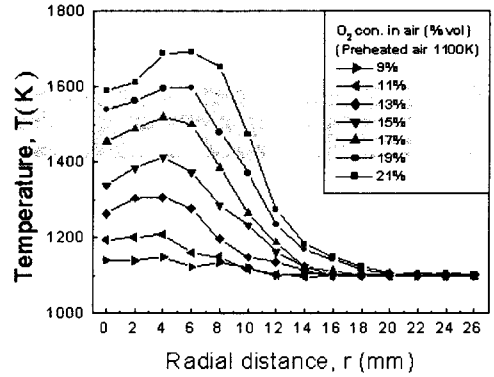
Fig. 3은 가열공기 온도와 연소기내로 유입되는 공기 중 산소농도와와의 상관관계를 나타낸 것으로 연소안정화 지역과 비연소 지역으로 구분된다. 가열공기는 상온에서부터 최고 1200K까지 가능하였으며 산소농도를 조절하여 저산소 조건이 되어 화염소실이 발생하는 블로우 오프(blow off)현상을 관찰하였다. 가열공기의 온도가 점차 증가함에 따라 연소 안정화 지역도 넓어짐을 확인할 수 있었으며 산소농도 9%인 조건에서도 안정된 연소가 가능함을 확인할 수 있었다. 이는 예열공기가 연료(경유)의 자기발화온도(715K)보다 높기 때문에 저산소 조건에서도 연소가 가능하기 때문이다.

#### 4.2 화염 가시화

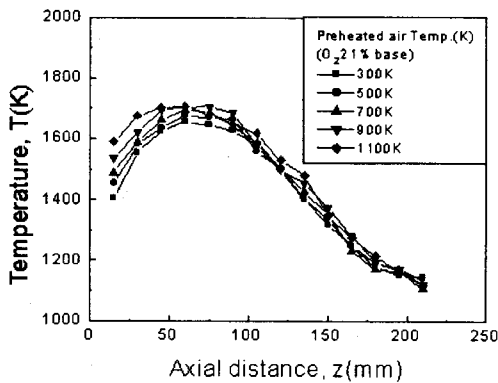
Fig. 4는 상온과 예열공기 1100K, 산소농도(%vol)를 21% ~ 9%로 변화시켰을 때 나타나는 화염형상 및 색상을 Nikon 카메라와 고감도



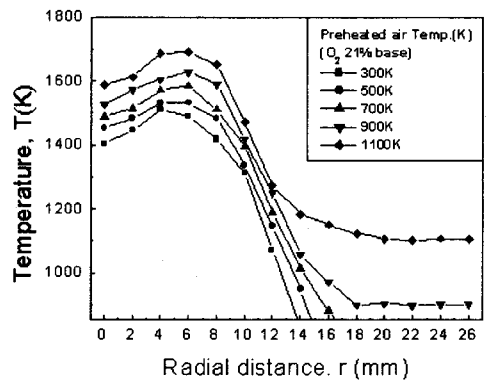
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 5 Axial distributions of mean flame temperature. (a)  $O_2$  con. change, (b) temp. change.

Fig. 6 Radial distribution of mean flame temperature at  $z=15\text{mm}$ . (a)  $O_2$  con. change, (b) temp. change.

Super HG 400 필름을 이용하여 촬영한 것이다. 상온에서는 불규칙한 화염형상과 짙은 황색의 난류확산화염 특징이 나타난다. 그러나 예열공기를 1100K로 가열하였을 때 나타나는 화염형상 및 색상은 확연한 차이를 나타낸다. 산소농도를 일 반대기중과 같은 21%를 유지하고 예열공기를 1100K로 가열할 경우, 화염은 매우 밝은 황색의 화염색상과 안정된 화염형상을 유지하게 된다. 이는 고온의 예열공기로 인해 연소반응이 촉진되어 발생하는 현상이며 결과적으로 상온에 비해 화염길이 또한 다소 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

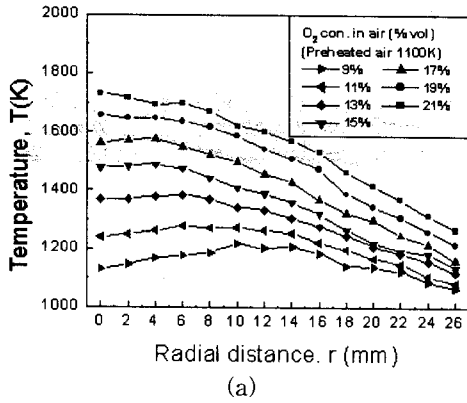
예열공기를 1100K로 유지하고 산소농도를 조건 (9%)으로 변화시켰을 경우 화염은 점차 발광강도가 낮은 청록색의 색깔을 띠며 층류화염의 형상에 가까게 변화되었다. 이는 고온의 가열공기로 저산소 연소를 수행했을 때 발생하는 특징이다. 화염길이는 산소농도를 줄일수록 가시적인

화염체적이 전체적으로 증대되고 길이도 현저히 늘어났다. 산소농도 15%이하의 경우 화염은 층류화염의 형상을 보이고 현저한 화염체적 증가 및 화염길이 증가를 보인다. 저 산소 조건으로 진행할수록 화염길이가 증가하고 청록색을 나타내다가 산소농도 9%에서는 거의 가시화가 불가능 정도의 연한 청색을 나타내었다. 따라서 연소용 공기를 예열하면 화염의 길이가 다소 줄어들고, 산소농도를 감소시킬수록 화염길이는 증가하였다.

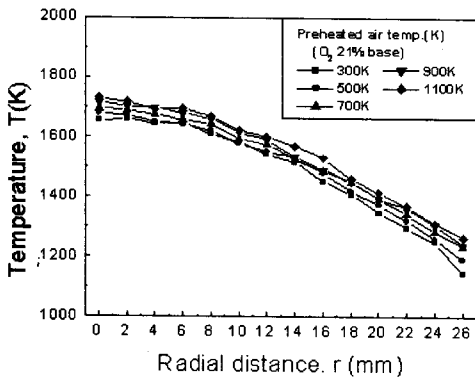
### 4.3 화염의 평균온도

화염내의 온도 측정은 R형(0.5mm, Pt/Pt-Ph 13% R-type) 열전대를 사용하였으며 평균 온도를 측정하였고 축방향으로 15mm, 반경방향으로 2mm 간격으로 측정하였다.

Fig. 5은 화염의 중심에서 축방향온도분포를 나타낸 결과이다. (a)는 1100K의 고온공기 조건



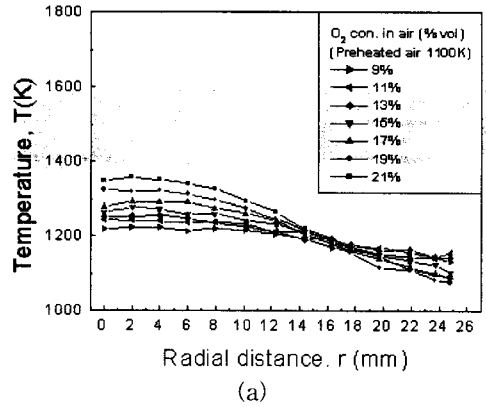
(a)



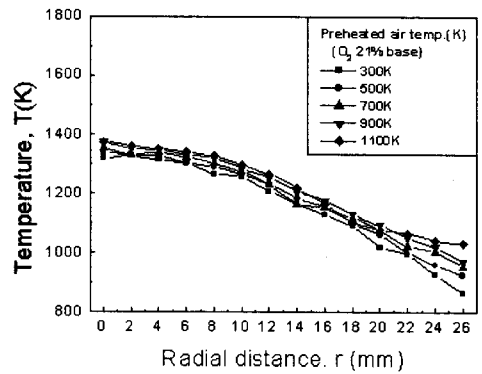
(b)

Fig. 7 Radial distribution of mean temperature at  $z=60\text{mm}$  (a)  $\text{O}_2$  con. change, (b) temp. change.

에서 산소농도를 21%~9%까지 변화시켰을 때의 축방향 평균온도를 나타낸 그래프이다. 연소기 내로 유입되는 공기중 산소량이 감소함에 따라, 상류측에서는 화염이 국부가열 되는게 사라지고 화염내 최고온도가 상류측에서 하류측으로 이동하며 산소농도 9%에선 화염온도가 일정한 영역이 형성됨을 볼 수 있다. 이는 질소의 추가로 산소량이 감소되어서 연소반응이 느리게 진행되기 때문이다. 그래프 (b)는 산소농도를 21%로 유지하고 예열공기 온도를 변화시켰을 때의 축방향 평균온도 그래프이다. 상온 300K에서는 화염최고 온도 지점이 상류측에 존재하는 것을 볼 수 있다. 그러나 예열공기 온도가 증가함에 따라 화염최고온도는 상류 전체로 퍼지는 것을 확인할 수 있다. 이는 고온의 예열공기로 인해 노즐에서 분무된 액적들이 빠른 시간 내에 증발하며 화염형성을 이루기 때문이다. 그러나 화염온도는 하류로 갈수록 상온과 비슷한 형태로 감소되었다.



(a)

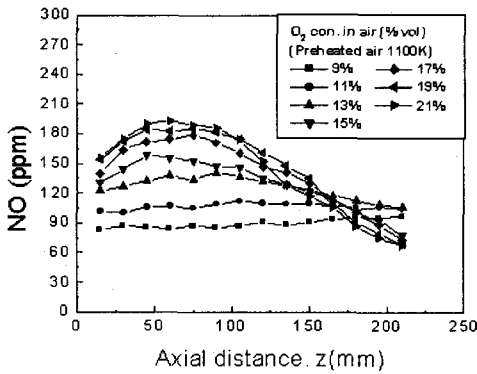


(b)

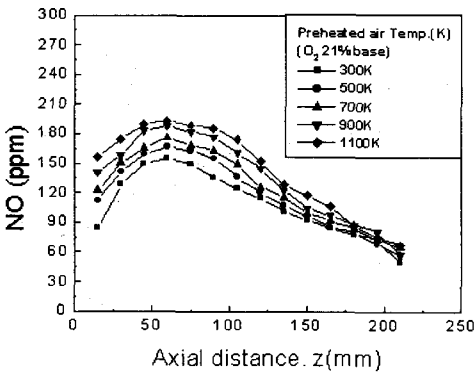
Fig. 8 Radial distribution of mean temperature at  $z=150\text{mm}$ . (a)  $\text{O}_2$  con. change, (b) temp. change.

Fig. 6은 축방향 15mm 단면에서의 온도 그래프이다. (a)의 경우 예열공기를 1100K로 유지하고 산소농도를 변화시킨 것으로써 저산소 연소조건으로 진행됨에 따라 화염중심부 온도는 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히 9%의 조건에서는 거의 일정한 수준의 화염온도가 확인되었다. (b)의 경우는 산소농도를 일정하게 유지하고 예열공기 온도를 변화시켰을 때 얻은 결과 그래프이다. 예열공기 온도가 상온일 때에는 확산화염의 형태를 나타내었으나 고온의 예열공기의 영향으로 화염온도는 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 7은 축방향 높이 60mm 단면에서 측정된 온도 그래프로서 (a)의 경우 예열공기 온도를 1100K로 유지하고 산소농도를 조절했을 경우이다. 고온의 예열공기로 인해 산소농도 21%에서는 1700K의 고온이 형성되었으나 저산소 연소조건으로 진행되며 화염온도는 현저한 감소를 보인다. 이 또한 공기중의 산소농도 감소로 인해 중



(a)



(b)

Fig. 9 Axial Distribution of NO concentration (a) O<sub>2</sub> con. change, (b) temp. change.

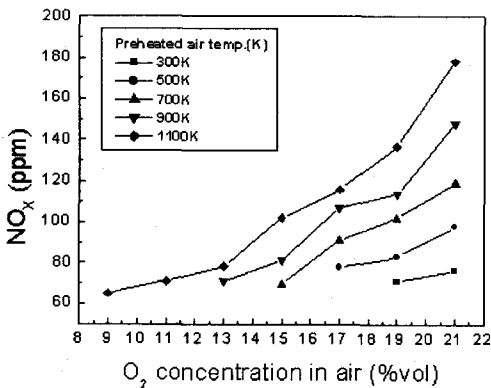


Fig. 10 Variation of the NO<sub>x</sub> concentration(ppm) with respect to O<sub>2</sub> concentration

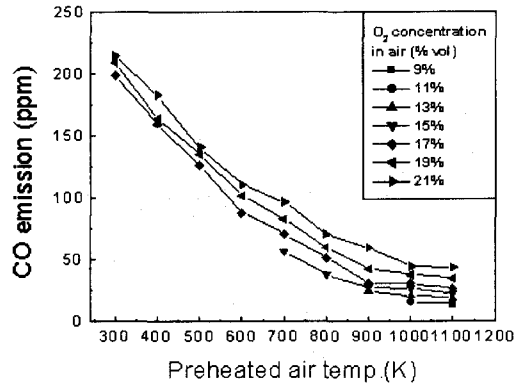


Fig. 11 Variation of the CO concentration(ppm) with respect to pre-heated air temperature.

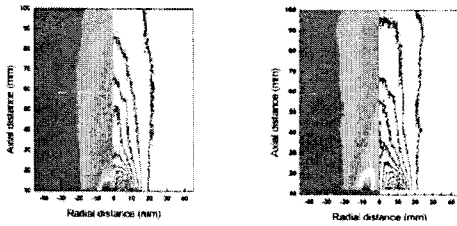
심축으로 확산되고 연료와 혼합되는 산화제의 반응율이 줄어들기 때문이다. (b)의 경우는 산소농도를 21%로 유지하고 예열공기온도를 변화시킨 것으로서 산소농도가 저산소 조건에 비해 상대적으로 풍부하기 때문에 중심축으로 갈수록 화염온도가 높아지는 것을 확인할 수 있고 예열공기의 영향으로 예열공기 온도가 증가할수록 화염온도 또한 증가함을 확인할 수 있다.

Fig. 8는 축방향 높이 z=150mm 단면에서의 반경방향 온도 그래프이다. (a)의 경우 산소농도의 감소로 인해 중심부의 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있으며 또한 전체적으로 일정한 온도의 화염형상이 나타남을 확인할 수 있다. 이때 반경 20mm 이상에서 산소농도 21% 보다 9%의 온도가 더 높게 나오는 것은 저산소 연소 조건에 의해 화염길이가 늘어났기 때문이다. 측정지역이 하류에 속하기 때문에 (b)의 경우 산소농도를 일정하게 유지하고 예열공기 온도를 증가시키면 화염온도는 저온일 때 보다 약간 높게 나타남을 확인했다. 1100K의 경우 반경 20mm 지점에서부터 1100K이 나타나는데, 이는 화염 외 지역이고 가열공기의 영향으로 고온영역이 존재하는 것으로 생각되어진다.

#### 4.4 화염내의 NO 농도 분포

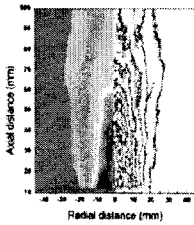
NO<sub>x</sub> 생성물중 95%를 차지하고 있는 NO는 화학발광법(chemiluminescence method)으로 분석하는 Nova model 312B를 사용하였다.

Fig. 9은 화염면내의 NO 농도를 축방향을 따라 측정된 것으로 (a)는 예열공기온도를 1100K로 유지하고 산소농도를 변화시켰을 때 나타나는 NO량이다. 대체적으로 축방향 평균온도분포와 유사한 형태로 증가 및 감소를 보인다. 또한 (b)의 경우도 동일한 형태를 유지한다. 이는 실

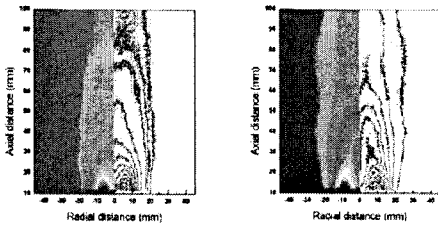


(a)

(b)

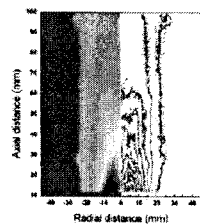


(c)



(a)

(b)



(c)

Fig. 13 CH radical images & contours (1100K base) (a) O<sub>2</sub> 17% (b) O<sub>2</sub> 13% (c) O<sub>2</sub> 9%

험에서 생성된 NO<sub>x</sub>의 대부분이 열적생성기구 (thermal NO<sub>x</sub>)임을 증명해준다.

#### 4.5 연소 가스 분석

Fig. 10과 Fig. 11에 예열공기 온도와 유입산소 농도에 따른 NO<sub>x</sub>와 CO의 특성을 도시화 하였다. NO<sub>x</sub>는 예열공기온도 증가에 따라 최대

180ppm 까지 증가하는 경향을 보이는데 이는 온도증가에 따른 Thermal NO<sub>x</sub>의 증가에 기인하며 산소농도가 많아지면 물분율이 높아져 증가하는 것으로 생각 할 수 있다. CO의 경우는 예열공기의 온도는 증가할수록 그리고 유입되는 산소의 농도가 낮을수록 감소하는 경향을 보였다. 이는 온도증가에 따라 연료와 산화제의 혼합이 잘 이루어졌기 때문이다.

#### 4.6 라디칼 자발광 특성

고온(1100K)의 예열공기중 산소농도를 감소시킴에 따라 화염은 청녹색의 층류화염으로 변화하였다. 이는 고온공기 저 산소 연소의 특징으로 정의 할 수 있으며 이때의 화염구조를 관찰하기 위해 ICCD 촬영을 통한 C<sub>2</sub> 및 CH의 자발광 특성을 가시화 하였다. Fig. 12과 Fig. 13는 예열공기온도를 1100K로 유지하고 산소농도를 17%, 13%, 9%로 감소시켰을 경우의 C<sub>2</sub>, CH의 자발광 강도이다. 산소농도가 감소할수록 C<sub>2</sub>, CH 모두 강도가 증가함을 볼 수 있으며 노즐선단부에서 발생하던 것이 점점 하류로 이동함을 볼 수 있다. 이로 인해 화염은 점차 C<sub>2</sub>, CH의 특징인 청록색으로 변한다. 또한 산소농도가 감소함에 따라 C<sub>2</sub> 라디칼이 CH보다 상대적으로 크게 증가하여 O<sub>2</sub> 농도 9%에서는 C<sub>2</sub> 라디칼의 특징인 green flame이 형성된다.

#### 5. 결론

산소농도의 희석과 연소용 공기의 고온화를 통해 수행된 액체 연료의 분무연소 특성은 일반 대기중의 분무 특성과는 많은 차이를 보여주었다. 분무연소의 단점인 미립화 및 화염의 안정성 면에서 고온공기연소는 월등한 화염안정성을 확보할 수 있었으며, 희석가스의 작용으로 전체적인 화염의 온도 또한 조절 가능하였고, 이로 인해 질소산화물의 생성 또한 조절할 수 있었다. 본 실험에서는 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 고온의 예열공기 사용으로 저 산소 조건에서도 가연한계 영역이 증대되었다.
- 2) 예열공기의 온도가 증가할수록 화염내부 온도 또한 증가하였다. 화염 상류측에서 고온의 예열공기로 인해 상온에 비해 현저한 온도 증가를 보인다. 그러나 산소농도가 줄어들수록 국부 가열 현상이 사라지고 연소반응지역에선 일정한 thermal field가 형성된다. 또한 화염온도는 예열공기 온도보다 산소농도의 영향을 더 많이 받는다.
- 3) 화염 내부 국소 NO의 분포는 축방향 온도 분포와 거의 유사한 경향으로 생성되었다. 이는

본 실험에서 나타나는 질소산화물이 thermal  $\text{NO}_x$ 에 의한 것이기 때문이다.

4) 고온의 예열공기 사용시 산소농도를 10%이하로 줄이면  $\text{NO}_x$ 는 15-20%  $\text{CO}$ 는 85-90%정도 감소한다.

5) 라디칼 자발광 특성은 고온의 예열공기중에 산소량을 감소시켰을 경우  $\text{C}_2$ ,  $\text{CH}$  모두 증가하나,  $\text{C}_2$ 가  $\text{CH}$ 에 비해 상대적으로 크게 증가하여  $\text{O}_2$ 농도 9%에서는  $\text{C}_2$ 의 특징인 green flame이 발생하였다.

### 참고문헌

- [1] Suzukawa, Y., Shunichi, S., Hino, Y. and Mori, I., "Heat Transfer Improvement and  $\text{NO}_x$  Reduction by Highly Preheated Air Combustion," *Energy Convers. Mgmt*, Vol. 38, No. 10-13, 1997, pp. 1061-1071.
- [2] Nishimura, M., Suzuki, R., and Nakanishi, R., "Low- $\text{NO}_x$  Combustion under High Preheated Air Temperature Condition in an Industrial Furnace," *Energy Convers. Mgmt*, Vol. 38, No. 10-13, 1997, pp. 1353-1363.
- [3] Gyung-Min, C. and Katsuki, M., "Advanced Low  $\text{NO}_x$  Combustion using Highly Preheated Air," *Energy Convers. Mgmt*, Vol. 42, 2001, pp. 639-652.
- [4] Wunning, J. G., "Flameless Combustion in the Thermal Process Technology," *2nd Int. Sem. on High Temp. Comb.*, Stockholm, 2000.
- [5] Gupta, A. K., "Flame Characteristics and Challenges with High Temperature Air Combustion," *Proc. of Int. Joint Power Generation Conf.*, 2000, pp. 1-18.
- [6] Shimo, N., Koyama, Y. and Yoshikawa, K., "Low  $\text{NO}_x$  Combustion of Petroleum with Highly Preheated Air," *Proc. of Int. Joint Power Generation Conf.*, 2000, pp. 1-6.
- [7] Ahadi-Osuki, T., "Heat Flux from Highly Preheated Air Combustion and Swirl Combustion," MS Thesis, The Combustion Lab., Univ. of Maryland, February, 2000.