

# 고온의 예열공기를 이용한 액체연료 분무특성에 관한 실험적 연구

박민철\* , 오상헌\*\*

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

Min Chul Park, Sang hun Oh

**Key Words:** high-preheated air combustion, NOx, flammability

### Abstract

An experimental study has been carried on high-preheated temperature air combustion. Because the flames with high-preheated temperature air combustion were much more stable and homogeneous(both temporally and spatially) as compared to the room-temperature combustion air. The global flame feature showed range of flame colors (yellow, blue, bluish-green) over the range of conditions. Low level of NOx along with low level of CO have been obtained under high-preheated air combustion conditions. The thermal and chemical behavior of high-preheated air combustion flames depends on preheated temperature and oxygen concentration air.

기호설명

Con. : concentration

### 1. 서 론

최근 석유자원의 한계성에 따른 세계적인 에너지 위기는 합리적인 이용기술 개발에 대한 연구의 개발 필요성을 높이

고 있어 새로운 에너지의 개발 및 이용 개선 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 발전해왔다. 산

\* 부산대학교 기계공학부 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학부 대학원

소농도 21%이하에 기초한 HiTAC (High Temperature Air Combustion) 기술이 개발되어 환경 친화적이며 고효율의 연소기를 개발할 수 있게 되었다. 그러나 국내에선 고온공기를 이용한 연소개념에 대해선 거의 알려지지 않았다.

본 연구에서는 산소농도 21%이하 조건과 고온의 예열공기를 사용했을 경우의 연소특성과 연소현상을 규명하고자 한다.

## 2. 기초이론

### 2.1. 고온공기연소 이론

연소효율에 영향을 고려할 때 중요한 자 중 하나는 화염온도이다. Weinberg<sup>(1)</sup>는 1971년 초과엔탈피연소(Excess Enthalpy Combustion)의 초기 개념을 제공하였고, 연소온도에 관계된 긍정적, 부정적 요소들을 포함한 여러 요소들을 설명하였으며 그 제한선 또한 논의되었다. 고효율의 열교환기를 이용한 열의 재순환, 배기가스의 재순환은 연소온도의 증가와 연료저감을 가능케 하였다. 그러나 그로 인한 오염물질 형성은 간과하지 않을 수 없다. 엔탈피 증가를 위한 여러 가능성과 그에 따른 오염물질 생성은 Hasegawa<sup>(2)</sup>가 연구하였다.

열에너지 재순환을 통한 연소과정은 다음과 같다.

$$\int_{T_0}^{T_1} C_p dT = Q_c + Q_a = H_1 + H_0$$

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( N<sub>2</sub> , CO<sub>2</sub> , Ar 등)를 혼합시켜 질소산화물의 생성도 억제 할 수 있었다. 본 연구에서는 장치의 복잡성 때문에 상용히터를 사용하였고, 질소(N<sub>2</sub>)를 사용하여 산소농도를 조절하였다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1. 실험장치

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

압축기에서 공급된 공기는 surge tank 를 통해 믹서로 들어가 N<sub>2</sub>와 혼합되어 가열기로 공급된다. 각 장치사이에는 밸브와 유량 보정된 오리피스를 사용하여 정확한 유량을 공급하였다. 실험에 사용된 가열기(heater)는 상용히터(AGC air heater 2 kw, nissi, Japan)로서 노즐팁 20mm 밑에 장착되어 있고 3개를 사용하였다. 1100K의 예열공기를 최대 250l/min 까지 가열할 수 있었으며 PIDS 제어를 통해 컨트롤되었다. 노즐과 같은 높이에 미세 열전대(Pt-30%Pt/Ph)를 사용하여 예열기가 일정 온도로 유지되도록 제어하였다. 연료는 발열량 9200kcal/l 인 경유를 사용하였고, 압력용기에서 나와 경유용 유량계를 통해 연소기 내로 들어간다. Fig. 2는 실험에 사용된 노즐로서 연소기 내부는 고온의 예

열공기로 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  $5.0 \text{ kgf/cm}^2$ 의 압력에서부터 양호한 미립화가 이루어졌고, 분무각은  $80^\circ$  내외이다.

Chamber의 크기는  $226\text{mm} \times 226\text{mm} \times 1000\text{mm}$ 이며 앞뒷면에  $125\text{mm} \times 455\text{mm}$ 의 가시화 창을 만들고 경화유리를 달아 연소 형상을 관찰하였고 화염 가시화를 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  $\text{NO}_x$ , CO 배출량을 측정하였고 NO는 화학발광법(chemiluminescence method)으로 분석하는 Nova model 312B를 사용하였다.

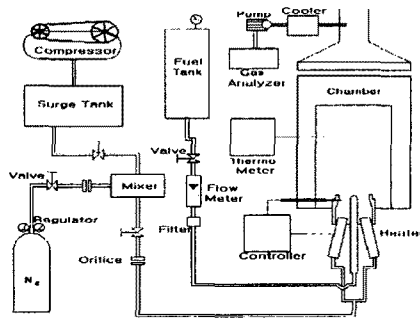


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

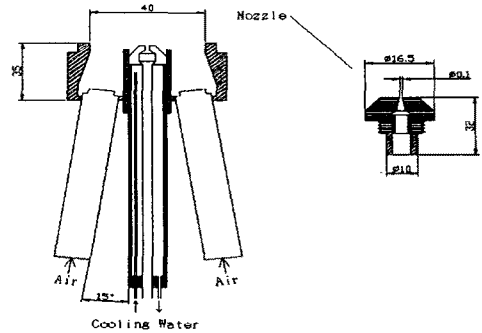


Fig. 2 Detail diagram of combustor and nozzle

Table 1 Test conditions

Fuel	Light oil	
Preheated air temp.	300K ~ 1100K	
Change of $\text{O}_2$ concentration	21% ~ 9%	
Flow rate (l/min)	Fuel (l/min)	0.025
	Air (l/min)	200

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

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 가연한계 측정

Fig. 3 은 가열공기 온도와 연소기내로 유입되는 공기 중 산소농도와 상관관계를 나타낸 것으로 연소안정화 지역과 비연소 지역으로 구분된다. 가열공기는 상온에서부터 최고 1200K까지 가능하였으며 산소농도를 조절하여 산소희박조건이 되어 화염소실이 발생하는 블로

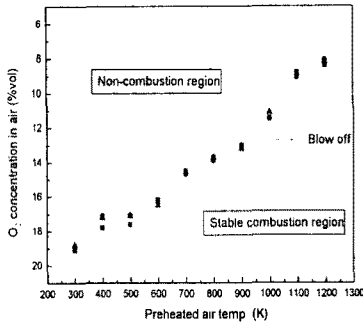


Fig. 3 Distribution of lean flammability limits

우오프(blow off)현상을 관찰하였다. 가열공기의 온도가 점차 증가함에 따라 연소 안정화 지역도 넓어짐을 확인할 수 있었으며 산소농도 9%인 희박조건에서도 안정된 연소가 가능함을 확인할 수 있었다. 이는 예열공기가 연료(경유)의 자기발화온도(715K)보다 높기 때문에 희박조건에서도 연소가 가능하기 때문이다.

#### 4.2 화염 가시화

Fig. 4 는 상온과 예열공기 1100K, 산소농도를 21% ~ 9%로 변화시켰을 때에 나타나는 화염형상 및 색상을 Nikon 카메라와 고감도 Super HG 400 필름을 이용하여 촬영한 것이다. 상온에서는 불규칙한 화염형상과 짙은 황색의 난류화산화염 특징이 나타난다. 그러나 예열공기를 1100K로 가열하였을 때 나타나는 화염형상 및 색상은 확연한 차이를 나타낸다. 산소농도를 일반대기중과 같은 21%를 유지하고 예열공기를 1100K로 가열할 경우, 화염은 매우 밝은 황색의 화염색상과 안정된 화염형상을 유지하게 된다. 이는 고온의 예열공기로 인해

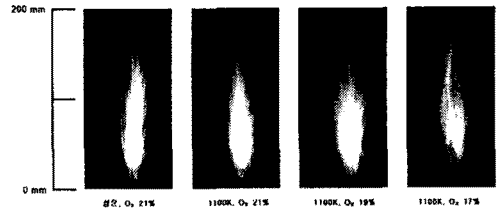


Fig. 4 Direct photographs of flame

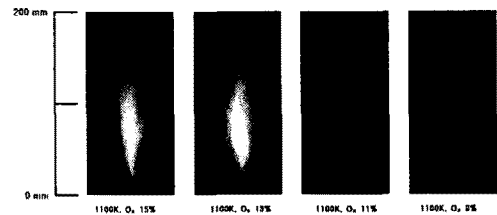


Fig. 5 Direct photographs of flame

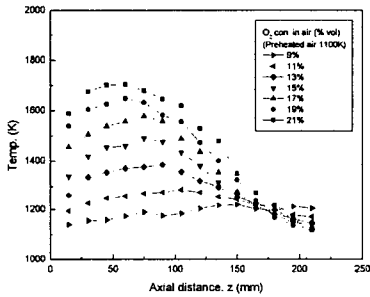
연소반응이 촉진되어 발생하는 현상이며 결과적으로 상온에 비해 화염길이 또한 다소 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 예열공기를 1100K로 유지하고 산소농도(%vol)를 희박연소조건(9%)으로 변화시켰을 경우 화염은 점차 발광강도가 낮은 청색의 색깔을 띠며 층류화염의 형상에 가깝게 변화되었다. 이는 고온의 가열공기로 희박연소를 수행했을 때 발생하는 특징이다.

화염길이는 예열공기온도가 증가함에 따라 약간 줄어들었고 산소농도를 줄일수록 가시적인 화염체적이 전체적으로 증대되고 길이도 현저히 늘어났다. Fig. 5의 경우 화염은 층류화염의 형상을 보이고 현저한 화염체적 증가 및 화염길이 증가를 보인다. 희박조건으로 진행할수록 화염길이가 증가하고 청색을 나타내다가 산소농도 9%에서는 거의 가시화가 불가능 할 정도의 연한 청색을 나타내었다.

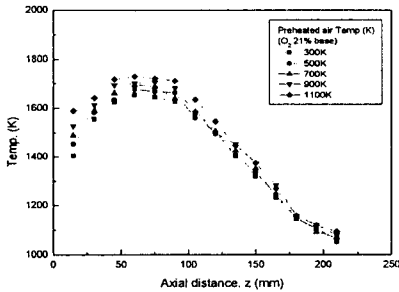
### 4.3 화염의 평균온도

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

Fig. 6 은 화염의 중심에서 축방향온도분포를 나타낸 결과이다. (a)는 1100K의 고온공기 조건에서 산소농도를 21%~9%까지 변화시켰을 때의 축방향 평균온도를 나타낸 그래프이다. 연소기 내로 유입되는 공기중 산소량이 감소함에 따라, 상류측에서는 화염이 국부가열되는게 사라지고 화염내 최고온

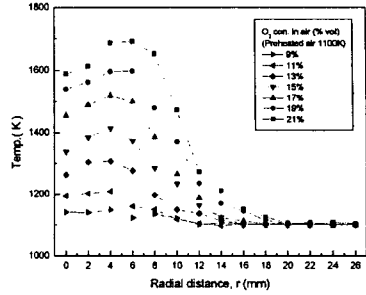


(a)

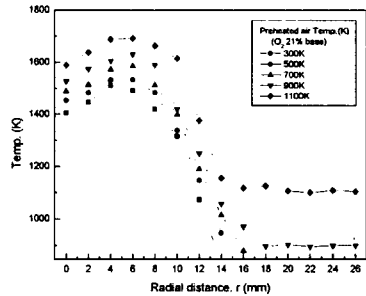


(b)

Fig. 6 Axial distributions of mean flame temperature. (a) O<sub>2</sub> Con. change, (b) temp. change.



(a)



(b)

Fig. 7 Radial distribution of mean flame temperature ( $z=15\text{mm}$ ) (a) O<sub>2</sub> Con. change, (b) temp. change.

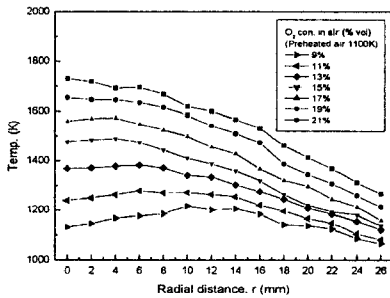
도가 상류측에서 하류측으로 이동하며 산소농도 9%에선 화염온도가 일정한 영역이 형성됨을 볼 수 있다. 이는 질소의 추가로 산소량이 감소되어서 연소반응이 느리게 진행되기 때문이다. 또한 산소량이 감소될수록 화염길이가 늘어남을 온도분포를 통해 확인할 수 있다. 그래프 (b)는 산소농도를 21%로 유지하고 예열 공기 온도를 변화시켰을 때의 축방향 평균온도 그래프이다. 상온 300K에서는 화염최고 온도 지점이 상류측에 존재하는

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.

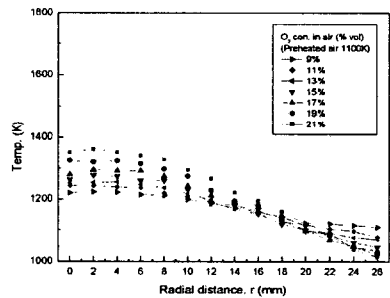
Fig. 7 은 축방향 15mm 단면에서의 온도 그래프이다. (a)의 경우 예열공기를 1100K로 유지하고 산소농도를 변화시킨 것으로써 희박연소조건으로 진행됨에 따라 화염중심부 온도는 현저히

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.

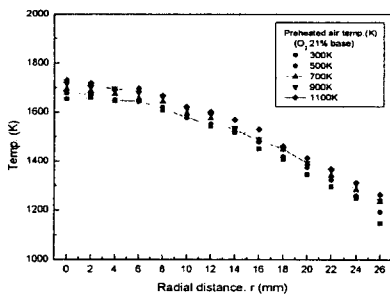
Fig. 8은 축방향 높이 60mm 단면에서 측정한 온도 그래프로서 (a)의 경우 예열공기 온도를 1100K로 유지하고 산소농도를 조절했을 경우이다. 고온의 예열



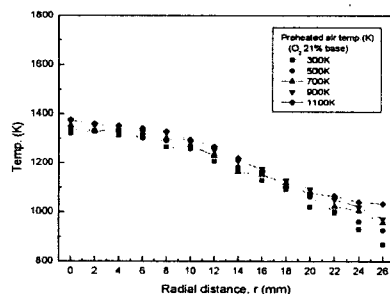
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 8 Radial distribution of mean temperature( $z=60\text{mm}$ ) (a)  $\text{O}_2$  Con. change, (b) temp. change.

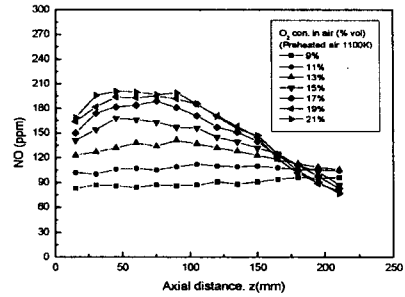
Fig. 9 Radial distribution of mean temperature( $z=150\text{mm}$ ) (a)  $\text{O}_2$  Con. change, (b) temp. change.

공기로 인해 산소농도 21%에서는 1700K의 고온이 형성되었으나 희박연소 조건으로 진행되며 화염온도는 현저한 감소를 보인다. 이 또한 공기중의 산소농도 감소로 인해 중심축으로 확산되고 연료와 혼합되는 산화제의 반응물이 줄어들기 때문이다. (b)의 경우는 산소농도를 21%로 유지하고 예열공기온도를 변화시킨 것으로서 산소농도가 희박조건에 비해 상대적으로 풍부하기 때문에 중심축으로 갈수록 화염온도가 높아지는 것을 확인할 수 있고 예열공기의 영향으로 예열공기 온도가 증가할수록 화염온도 또한 증가함을 확인할 수 있다.

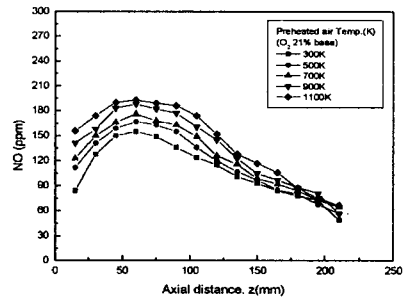
Fig. 9는 축방향 높이  $z=150$  단면에서의 반경방향 온도 그래프이다. (a)의 경우 산소농도의 감소로 인해 중심부의 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있으며 또한 전체적으로 일정한 온도의 화염형상이 나타남을 확인할 수 있다. 이때 반경 20mm 이상에서 산소농도 21% 보다 9%의 온도가 더 높게 나오는 것은 희박연소 조건에 의해 화염길이가 늘어났기 때문이다. 측정지역이 하류에 속하기 때문에 (b)의 경우 산소농도를 일정하게 유지하고 예열공기 온도를 증가시키면 화염온도는 저온일 때 보다 야간 높게 나타남을 확인했다. 1100K의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

#### 4.4 화염내의 NO 농도 분포

NOx 생성물중 95%를 차지하고 있는 NO는 화학발광법(chemiluminescence method)으로 분석하는 Nova model



(a)



(b)

Fig. 10 Axial Distribution of NO concentration (a) O<sub>2</sub> Con. change, (b) temp. change.

312B를 사용하였다.

Fig. 10은 화염면내의 NO 농도를 축 방향을 따라 측정된 것으로 (a)는 예열공기온도를 1100K로 유지하고 산소농도를 변화시켰을 때에 나타나는 NO량이다. 대체적으로 축방향 평균온도분포와 유사한 형태로 증가 및 감소를 보인다. 또한 (b)의 경우도 동일한 형태를 유지한다. 이는 실험에서 생성된 NOx의 대부분이 열적생성기구(thermal NOx)임을 증명해준다.

가 증가하는 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

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

1. 고온의 예열공기 사용으로 산소희박 조건에서도 가연한계영역이 증대되었다.
2. 예열공기의 온도가 증가할수록 화염 내부 온도 또한 증가하였다. 화염 상류측에서는 고온의 예열공기로 인해 상온에 비해 현저한 온도 증가를 보인다. 그러나 산소농도가 줄어들수록 국부 가열 현상이 사라지고 연소반응지역에선 일정한 thermal field가 형성된다. 또한 화염온도는 예열공기온도 보다 산소농도의 영향을 더 많이 받는다.
3. 화염 내부에서의 국소 NO의 분포는 축방향 온도 분포와 거의 유사한 경향으로 생성되었다. 이는 본 실험에서 나타나는 질소산화물은 thermal NOx에 의한 것으로 보인다.
4. 고온의 예열공기 사용시 산소농도를 10%이하로 줄이면 NOx 및 CO의 생성이 현저히 감소한다.

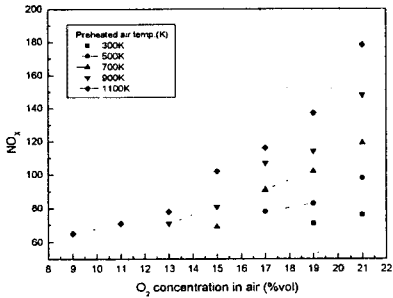


Fig. 11 Distribution of NOx Con.(ppm)

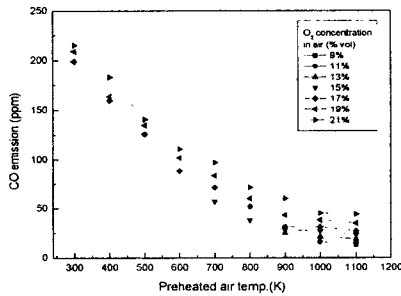


Fig. 12 Distribution of CO Con.(ppm)

#### 4.5 연소 가스 분석

Fig. 4.5.1과 Fig. 4.5.2에 예열공기 온도와 유입산소농도에 따른 NOx와 CO의 특성을 도시화 하였다. NOx는 예열공기 온도 증가에 따라 최대 180ppm 까지 증가하는 경향을 보이는데 이는 온도증가에 따른 Thermal NOx의 증가에 기인하며 산소농도가 많아지면 물분율이 높아져 증가하는 것으로 풀이 할 수 있다. CO의 경우는 예열공기의 온도는 증가할수록 그리고 유입되는 산소의 농도가 낮을수록 감소하는 경향을 보였다. 이는 온도증가에 따라 CO의 산화반응이 촉진되어 CO가 감소하지만 산소농도가 높으면 이에 따른 반응시간이 감소하여 CO



## 참고문헌

- (1) Weinberg, P.J.: Nature, vol.233, Sep. 24, 1971, pp. 239-241.
- (2) Hasegawa, T., Tanaka, R. and Kishimoto, K.: High-Temperature Excess Enthalpy Combustion for Efficiency Improvement and NOx Abatement, Paper No. 9E, Paper presented at the 1995 AFRC Japan-USA Meeting, Hawaii, October, 1995.
- (3) Boltz, S. and Gupta, A. K.: Proc. Intl. Joint Power Generation Conference, Volume 1, ASME FACT Vol.22, 1998, pp. 193-205. See also ASME J. Energy Resources and Technology, Vol. 121, September 1999, pp. 209-216.
- (4) Ahadi-Osuki, T.: Heat Flux from Highly Preheated Air Combustion and Swirl Combustion, MS Thesis, The Combustion Laboratory, University of Maryland, February, 2000.
- (5) Haagen-Smit, A.J., 1952, "Chemistry and Physiology of Los Angeles Smog", Industrial and Engineering Chemistry, 44(6), June.
- (6) U.S.EPA. National Air Pollution Emission Estimate, 1970~1981, EPA 450/4-82-012. U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
- (7) Joint Army, Navy, Air Force Thermochemical Tables, Dow Chemical Company, PB-168370
- (8) Flagan, R.C and Seinfeld, J.H., 1988, Fundamentals of Air Pollution Engineering. Englewood Cliffs, NJ.:Prentice Hall.
- (9) Fenimore, C.P. 1971, "Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames".13th Symposium (International) on Combustion. Pittsburg, PA: The Combustion Institute, pp. 373.
- (10) Duterque, J., Avegard, N., and Borghi, R., 1981, "Further Results on Nitrogen Oxides Production in Combustions", Combustion Science and Technology, 25, pp.85.