

## 제트확산화염의 고온공기연소특성에 관한 실험적 연구

조은성<sup>†</sup> · 大野健<sup>\*</sup> · 小林秀昭<sup>\*</sup> · 정석호<sup>\*\*</sup>

### An Experimental Study of the Characteristics with High Temperature Air Combustion in Jet Diffusion Flames

Eun-Seong Cho, Ken Ohno, Hideaki Kobayashi, and Suk Ho Chung

#### ABSTRACT

For the development of high efficiency and low emission combustion systems, high temperature air combustion technology has been tested by utilizing preheated air over 1100 K and exhaust gas recirculation. In this system, combustion air is diluted with large amount of exhaust gases ( $N_2$ ,  $CO_2$ ), such that the oxygen concentration is relatively low in the reaction zone, leading to low flame temperature. Since, the temperature fluctuations and sound emissions from the flame are small and flame luminosity is low, the combustion mode is expected to be flameless or mild combustion. Experiment was performed to investigate the turbulent flame structure and  $NO_x$  emission characteristics in the high temperature air combustion focused on coflowing jet diffusion flames which has a fundamental structure of many practical combustion systems. The effect of turbulence has also been evaluated by installing perforated plate in the oxidizer inlet nozzle. LPG was used as a fuel. Results showed that even though  $NO_x$  emission is sensitive to the combustion air temperature, the present high temperature air combustion system produce low  $NO_x$  emission because it is operated in low oxygen concentration condition in excess of dilution.

**Key Words** : High Temperature Air Combustion(고온공기연소),  $NO_x$  Emission(질소산화물), Flue Gas Recirculation (배기가스재순환), LDV (레이저유속계)

#### 1. 서 론

산업의 발전에 따라 과도한 에너지소비에 따른 연료 고갈 및 이에 따른 공해물질 배출의 증가를 초래하게 되었고, 이로 인해 연소효율 향상과 저공해 연소를 실현하기 위한 신 연소기술 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 1997년 교토협약 이후 이산화탄소( $CO_2$ ) 발생의 규제 및 국가간 거래가 도입되어 유해 공해물질 배출뿐만 아니라 에너지 소비량 자체를 규제하려는 추세가 진행되고 있다. 이에 대응하여, 국내에는 순산소 연소를

이용한 연소효율 향상 및  $CO_2$  재순환 방법을 이용한 연소기술에 관한 연구가 수행되고 있는데, 이 기술은 순산소를 경제적으로 얻을 수 있는가에 관건이 있다. 또한 순산소를 이용할 경우 이론적으로는 질소산화물( $NO_x$ )이 발생하지 않지만 질소성분의 미소한 유입으로도 다량의  $NO_x$  발생을 보일 수 있는 문제점이 있다.

연소효율을 증대시키기 위한 축열식 연소방법은 배기가스를 열교환 하여 연소용 공기 온도를 1500K 이상까지 올려서 사용되어왔다. 그러나, 배기 배출물 중  $NO_x$ 의 생성은 온도에 크게 의존하기 때문에 공기온도가 높아짐에 따라 다량의  $NO_x$ 가 발생하는 문제점이 나타나고 있고, 이에 따라  $NO_x$  저감을 위하여 배기가스 재순환법을 이용한 저감을 고려하였으나 여전히  $NO_x$  발생을 줄이는데 어려움을 겪어왔다.

<sup>†</sup> 서울대학교 기계항공공학부 대학원

E-mail : teodoro7@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7120 FAX : (02)889-1842

<sup>\*</sup> 일본 동북대학교 유체과학연구소

<sup>\*\*</sup> 서울대학교 기계항공공학부

이와 관련하여 독일[1~3] 및 일본[4~6] 등에서 고온공기를 이용한 연소방법에 배기가스재순환법을 적용하여 효율향상, CO<sub>2</sub> 저감 및 공해물질 저감을 동시에 실현할 수 있는 연구결과가 보고되고 있다. 이 방법은 기존에 20~30% 정도로 사용되었던 배기가스 재순환량을 300% 이상의 과다 희석시킴으로써 화염의 최고온도를 줄이고 연소영역에서 산소농도가 매우 희박해져 NO<sub>x</sub> 발생을 현저히 줄일 수 있다. 고온공기를 이용함에 따라 연소영역이 확대되어 낮은 산소조건에서도 연소가 가능하다. 고온공기연소의 특징은 자발화 온도 이상의 산화제 공급에 의한 안정되고 소음이 적은 화염이 형성되고, 연소효율향상에 따라 연료 소비를 저감시킬 수 있으며, 로내 전체로 반응영역을 확장시켜 균일한 온도분포로 열전달 효율을 향상시켜 로의 소형화가 가능하다.

고온공기연소와 관련한 연구로는 연소장내의 속도분포 및 OH 라디칼 측정 연구[7]가 있으며, 희석기체에 따른 화염 발광 특성 및 스펙트럼 측정연구[8]가 있다. 또한, NO<sub>x</sub> 발생특성에 관해서는 대항류 화염에서의 연구 [9] 및 동축류 버너에서 화염의 부상에 따른 연구 [10]가 있다. 본 연구에서는 동축류 버너를 이용하여 가능한 한 화염부상이 일어나지 않는 조건에서 고온공기연소의 특징을 살펴보기 위하여 실험을 수행하였다. NO<sub>x</sub> 발생특성은 산화제의 O<sub>2</sub> 농도 및 CO<sub>2</sub> 첨가, 난류강도 변화 등의 방법으로 확인하여 보았다.

## 2. 실험장치

Figure 1에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험장치는 크게 두 부분으로 나눌 수 있는데 고온공기를 공급하기 위한 하부의 고온공기발생장치와 고온공기를 이용한 상부의 실험장치이다.

고온공기 발생장치로는 높이 150cm, 폭 80cm, 내부유로 약 60cm의 소형 실험로(일본퍼니스공업, AI-010-EX)를 사용하였다. 로 내부는 단열재로 보온되어 있으며 하부 좌우와 상부 실험용 버너 하단에 세라믹 허니컴 축열체 (ceramic honeycomb regenerator)가 배치되어 있고 좌우 한대씩 가열용버너가 설치되어 있다. 가열용 연료로는 LPG를 사용하였다. 가열용 A, B 버너를 상호 30초 간격으로 번갈아 연소시키면서 상부 축열체를 가열하였다. 일정 온도이상 되었을 때 예열 버너를 중지시키고 실험용 산화제를 공급하면 축열체를 통과하면서 가열되어 고온공기 실험을 수행하게 된다. 예열 시간은 10분 정도이며 실험용 산화제를 공급하는 경우 약간의 변동은 있지만 최고 온도가 약 1400K 까지 상승하였

다가 온도가 감소되는데 실제 실험대상인 1100K 이상의 실험가능 시간은 2~3분 정도이다.

실험용 연소실은 6 cm x 6 cm의 사각형 연소실로 총 길이는 60 cm이다. 하부 30 cm 지역에는 화염형상 관찰 및 레이저 계측을 위하여 석영창을 설치하였다. 연료노즐은 D<sub>i</sub> = 1.5 mm를 사용하고 화염부상 방지를 위하여 보염기를 설치하였다. 산화제 입구에서의 난류강도를 변화시키기 위하여 가로 세로 각 7 cm의 사각형 판에 직경 D = 6.8 mm와 9.0 mm의 다수의 홀을 낸 두 종류의 다공판을 사용하여 난류발생판이 없는 층류조건과 비교하였다.

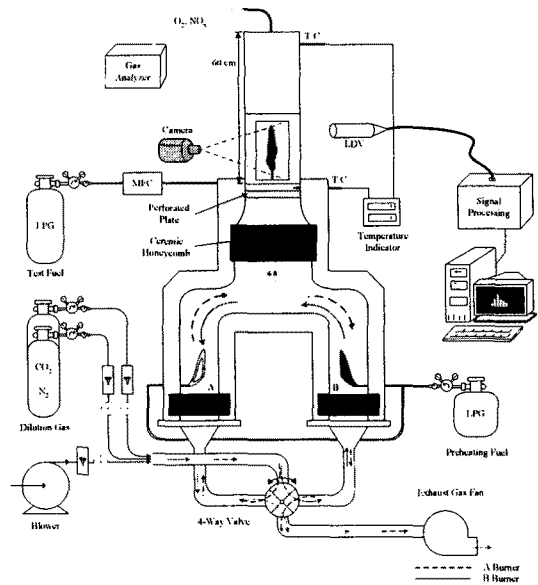


Fig. 1 Experimental apparatus for high temperature air combustion.

실험조건은 아래 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental conditions.

Oxidizer	O <sub>2</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]
	4, 8, 12, 15, 21	20
Flowrate	LPG : 0.5 lpm	Oxidizer : 333 lpm
Perforated Plate	none, D = 6.8 mm, 9.0 mm	

주요 실험 조건은 산화제의 O<sub>2</sub> 농도변화에 따른 특성과 CO<sub>2</sub> 첨가, 난류강도의 영향을 살펴보았다. 난류특성은 비연소장에서 각 다공판 조건에서의 유속 및 난류강도를 파장 632.8 nm의 헬

륨-네온(He-Ne) 레이저를 사용한 LDV 장치(Lase Doppler Velocimetry, DANTAC)를 이용하여 측정하였으며, 연소장에서 각 조건에 대하여 화학발광법에 의한 가스분석기를 이용하여 O<sub>2</sub> 및 NO<sub>x</sub>를 측정하였다. 또한, 각 조건에서의 화상촬영을 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 검토

#### 3.1 비연소장 유동특성

연소실 유동특성을 확인하기 위하여 비연소장에서 LDV를 이용하여 속도를 측정하였다. Figure 2는 상온(T<sub>a</sub> = 300K)의 경우 연소실 평균속도 및 난류 속도를 연료노즐부터 높이방향으로 5 cm 간격으로 측정한 결과를 나타낸 것이다. 평균유속은 1.8 m/s 정도이고 연소실 전체에 걸쳐 큰 변동은 없었다. 난류 변동속도는 노즐부터 5 cm 위치에서 가장 큰 속도를 나타냈으며, 높이방향으로 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 홀 직경 9.0 mm의 경우가 6.8 mm 보다 큰 난류 변동속도를 보이고 있다. 노즐출구 5 cm 위치에서의 각각의 난류강도는 20%와 14%이다.

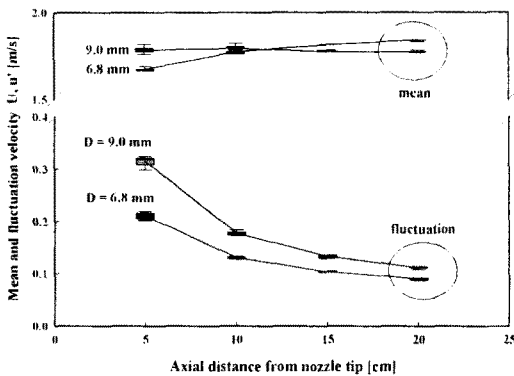


Fig. 2 Mean and fluctuation velocity for axial distance from nozzle tip (T<sub>a</sub>=300K).

Figure 3은 상온에서 두 가지 종류의 난류발생 다공판과 고온의 경우에 D = 6.8 mm 다공판에 대하여 측정한 평균유속과 난류변동속도의 제곱의 비, 즉 난류에너지 감쇠를 나타낸 것이다. 노즐출구로부터 5 cm 위치를 기준으로 난류에너지 감쇠를 비교 나타내었는데 기울기의 차이로 난류에너지의 감쇠정도를 알 수 있다. 기울기가 가장 큰 9.0 mm 경우가 연소실 높이에 따라 난류에너지 손실이 가장 크며 6.8 mm의 고온의 경우가 난류에너지 감쇠가 가장 작은 특징은 나타내었다. 고온의 경우 유동속도가 빠르기 때문에 연소

실을 통과하는 시간이 짧아 상대적으로 적은 난류에너지 손실을 가지는 것을 알 수 있다.

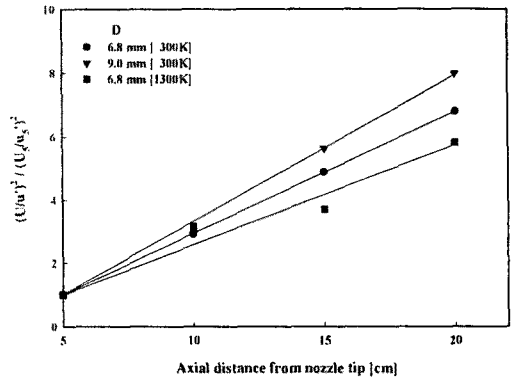


Fig. 3 Turbulent energy degeneracy for axial distance from nozzle tip.

#### 3.2 화염구조 및 연소특성

각 조건에서 입·출구온도, 배출물 측정 및 화염사진 촬영을 수행하였다. Figure 4는 다공판 홀 직경 D = 6.8 mm 조건에서 O<sub>2</sub> 농도에 따른 화염모양을 나타낸 것이다. O<sub>2</sub> 21% 조건은 일반 공기를 사용하였고 다른 O<sub>2</sub> 조건의 나머지 조성은 공기에 N<sub>2</sub> 가스를 첨가하여 조정하였다. 화상촬영은 입구온도 1300 K 이상의 고온에서 측정하였으며 고온공기로 인하여 휘염이 매우 강하였다.

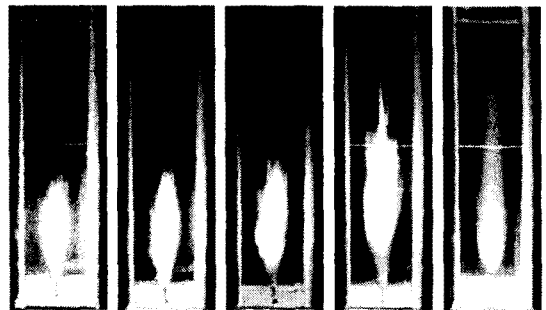
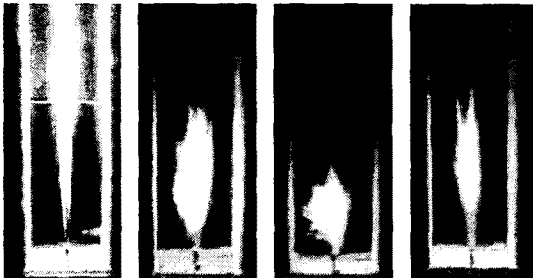


Fig. 4 Flame shape with oxidizer oxygen concentration (D = 6.8mm).

O<sub>2</sub> 농도가 감소함에 따라 화염길이가 점차 증가하는 것을 볼 수 있는데 O<sub>2</sub> 12% 이후에는 연료노즐 출구 부분부터 다소 청염이 나타나고 휘염 영역이 감소하는 것을 알 수 있다. 화염의 스펙트럼연구에 의하면 낮은 O<sub>2</sub> 조건에서 희석가스가 N<sub>2</sub> 뿐인 경우 C<sub>2</sub> 라디칼의 활성이 커져 녹

색의 화염이 관찰되며 CO<sub>2</sub> 희석의 경우 넓은 파장 영역의 발광이 나타나 보라색화염이 관찰된다고 보고하였다[8]. 본 연구에서는 희석가스가 N<sub>2</sub>만의 화염에서 O<sub>2</sub> 4%의 경우 노즐선단부에서 청염이 나타나고 하단부에서는 검붉은 보라색 화염이 보이고 있으며, 온도가 낮아짐에 따라 휘염 부분이 사라지면서 녹색화염이 관찰되었다.

산화제 입구 유동의 난류강도에 따른 화염구조를 살펴보면 Fig. 5에서 보는 것과 같이 O<sub>2</sub> 12% 조건에서 초기 난류강도에 따라, 또한 동일 난류강도의 CO<sub>2</sub> 20% 조건에서 화염형태가 크게 변하는 것을 볼 수 있다. 난류발생판이 없는 층류연소의 경우 화염이 좁고 길게 형성되며 난류의 경우 화염이 넓게 분포하는 것을 볼 수 있다. 난류강도가 가장 큰 D = 9.0 mm의 경우 화염길이 매우 짧아졌다. 이는 난류강도 증가에 따른 연료와 산화제의 혼합증가에 기인한다. CO<sub>2</sub> 첨가 조건의 경우 화염이 다소 좁게 보이며 노즐 선단부의 청염 구역이 더 넓어진 것을 볼 수 있다.



No plate D=6.8mm 9.0mm 6.8mm CO<sub>2</sub> 20%  
Fig. 5 Flame shape for inlet condition.

Figure 6은 O<sub>2</sub> 농도에 따른 소염온도를 나타내고 있다. 각각의 조건에서 O<sub>2</sub> 농도가 클수록 소염되는 온도는 낮아지고 있으며, 난류강도가 클수록 또한, D = 6.8 mm의 동일 난류조건에서 N<sub>2</sub> 대신 CO<sub>2</sub>를 20% 첨가함에 따라 동일 O<sub>2</sub> 조건에서 소염온도가 높은 것을 알 수 있다. 층류연소의 경우 1100K 까지는 소염특성이 나타나지 않았다.

화염이 소염되는 특징은 두 가지로 나타나는데, 상대적으로 O<sub>2</sub> 농도가 높은 12%, 15%의 경우는 일정온도 이하로 공급온도가 낮아지면 갑자기 화염이 부상되면서 소염이 일어나고 O<sub>2</sub> 농도가 낮은 4%, 8%의 경우는 일정온도 이상이면 화염이 천천히 부상하면서 소염되기 시작한다. 여기서 소염판단의 기준은 휘염이 사라지면서 화염이 부상되는 시기를 소염으로 간주하였다.

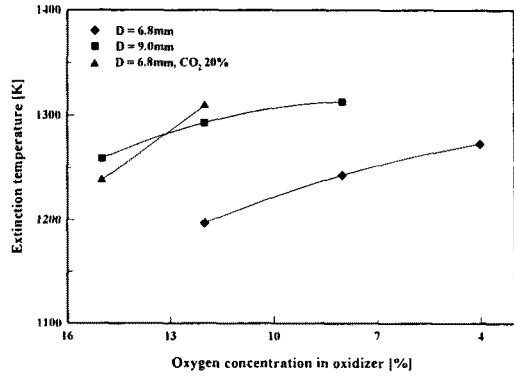


Fig. 6 Extinction temperature for oxygen concentration.

### 3.3 NO 발생특성

실험과정 중에 고온공기를 만들기 위해 축열체를 가열하는 동안 로 내부에 연소가스가 남아있기 때문에 실제 시험조건에서 산화제의 변화특성을 파악하기 위하여 비연소 조건에서 실험로 입·출구온도 및 O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>의 농도를 측정하여 보았다. Figure 7은 O<sub>2</sub> 5%의 산화제를 공급한 경우의 비연소 실험의 결과를 시간에 따라 나타낸 것이다. 입구 및 출구온도는 시간에 따라 증가하였다가 서서히 감소하는 것을 알 수 있다. O<sub>2</sub> 분포를 살펴보면, 고온공기 발생을 위한 예열이 끝난 후 실험용 산화제를 공급하고 나서 약 30s 후 실제 공급된 O<sub>2</sub> 조건을 나타내고 있으며, NO<sub>x</sub>의 경우 초기 예열과정에 의해 발생된 로 내부의 NO<sub>x</sub>가 실험용 산화제와 함께 배출되는 것을 볼 수 있다. 그러나 최고온도를 나타내는 시간인 90s 이상의 조건에서는 O<sub>2</sub> 농도도 안정적인 값을 나타내고 NO<sub>x</sub> 농도도 크게 나타나지 않으므로 최고온도 시간 이후부터를 실험조건으로 삼았다.

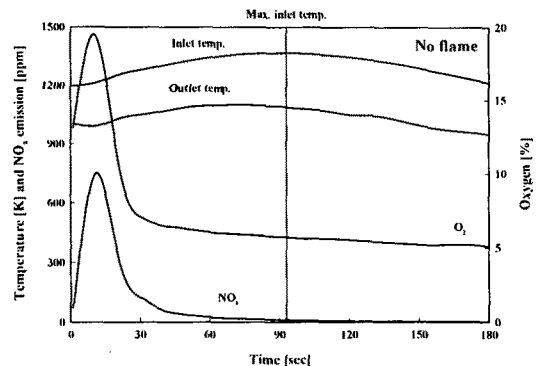


Fig. 7 Time dependence for experimental conditions in no flame high temperature flow.

Figure 8은  $D = 6.8$  mm 조건에서의  $O_2$  농도에 따른  $NO_x$  발생특성을 산화제 입구온도에 따라 나타낸 것이다. 입구온도가 낮을수록 발생하는  $NO_x$ 의 농도는 점점 낮아지고 있으며,  $O_2$  농도가 낮을수록 낮은  $NO_x$  분포를 나타내고 있다. 4%와 8%의 경우 큰 차이를 보이고 있지 않는데 이는 발생량이 크지 않음에 기인하는 것으로 사료된다.

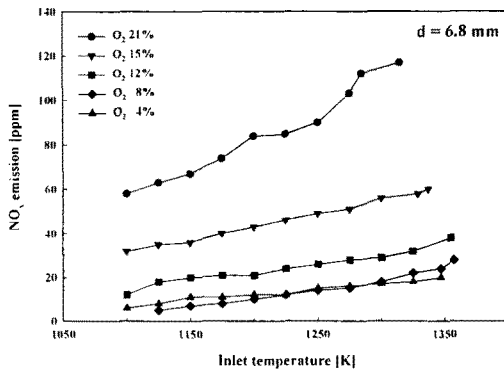


Fig. 8  $NO_x$  emission for oxygen concentration.

Figure 9는  $O_2$  12% 조건에서의 난류강도 및 동일 난류강도에서  $CO_2$  첨가에 의한  $NO_x$  발생특성을 나타내고 있다. 난류강도가 클수록  $NO_x$  발생이 적게 나타나고 있는데 본 실험조건 같은 다량의 과잉공기비 조건에서는 난류강도가 클수록 연료와 산화제의 혼합이 촉진되어 낮은  $O_2$  조건에서의 연소를 촉진하여 온도저하로  $NO_x$  발생감소를 가져오는 것으로 사료된다.  $D = 6.8$  mm의  $CO_2$  20%의 경우 희석가스  $N_2$  조성 중 20%를  $CO_2$ 로 바꾼 것으로 희석가스가  $N_2$  뿐인 경우에 비하여 50% 정도의  $NO_x$  저감특성을 보이고 있다.

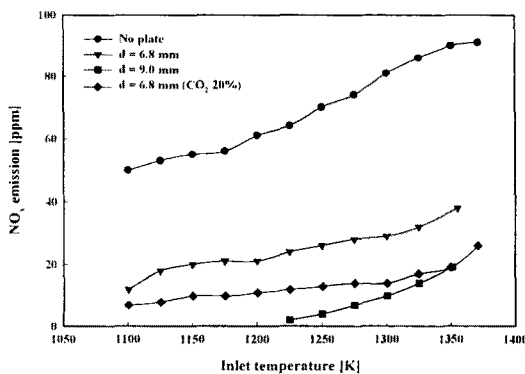


Fig. 9  $NO_x$  emission for inlet conditions.

## 4. 결론

고온공기연소기술을 적용한 제트확산화염의 연소특성 및  $NO_x$  발생특성을 살펴보았다.

(1) 산화제의  $O_2$  농도가 낮을수록 화염길이가 증가하며 휘염 영역이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 난류강도가 증가함에 따라 화염길이가 감소하며 화염폭이 넓게 분포하였다.

(2) 상대적으로  $O_2$  농도가 높은 12%, 15% 조건에서는 일정온도 이하에서 갑자기 화염이 부상되면서 소멸되며, 농도가 낮은 4%, 8% 조건에서는 화염이 점차 부상되면서 소멸되는 현상을 보이고 있다.

(3)  $O_2$  농도가 낮아짐에 따라  $NO_x$  발생은 감소하는 경향을 보이고 있는데 이것은 희석량의 증가에 따라 화염온도의 저감에 의한 영향으로 사료된다.

(4) 난류강도가 증가함에 따라  $NO_x$  발생의 감소가 보이고 있다. 이것은 난류강도가 커짐에 따라 산화제와의 혼합특성 향상에 따라 희석율이 증가하여 상대적으로 낮은  $O_2$  농도에서 연소되어 화염온도가 낮아지고 화염길이가 짧아짐에 따라 고온에서의 체류시간 감소로  $NO_x$ 가 감소하는 것으로 사료된다.  $CO_2$  첨가에 의하여  $NO_x$ 가 감소하는 것을 알 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2003년도 두뇌한국21사업과 CERC에 의하여 지원되었음.

## 참고문헌

- [1] J. A. Wunning and J. G. Wunning, "Flameless Oxidation to Reduce Thermal  $NO$ -Formation," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 23, 1997, pp. 81~94.
- [2] T. Plessing, N. Peters, and J. G. Wunning, "Laseroptical Investigation of Highly Preheated Combustion with Strong Exhaust Gas Recirculation," *Twenty-Seventh Symposium (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, 1998, pp. 3197~3204.
- [3] P. J. Coelho and N. Peters, "Numerical Simulation of a Mild Combustion Burner," *Combust. Flame*, Vol. 124, 2001, pp. 503~518.
- [4] M. Katsuki and T. Hasegawa, "The Science and Technology of Combustion in Highly Preheated Air," *Twenty-Seventh*

- Symposium (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, 1998, pp. 3135~3146.
- [5] T. Niioka, "Fundamentals and Applications of High-Temperature Air Combustion," *Proceedings of the 5th ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference*, 1999, pp. 1~6.
- [6] K. Maruta, K. Muso, K. Takeda, and T. Niioka, "Reaction Zone Structure in Flameless Combustion," *Twenty-Eighth Symposium (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, 2000, pp. 2117~2123.
- [7] I. B. Ozdemir and N. Peters, "Characteristics of the Reaction Zone in a Combustor Operating at Mild Combustion," *Experiments in Fluids*, Vol 30, 2001, pp. 683~695.
- [8] Y. Ito, K. Yoshikawa, and N. Shimo, "Effect of Different Kinds of Dilution Gases on the Combustion with Highly Preheated, Oxygen-Deficient Air," *JSME (B)*, Vol. 69, No. 677, 2003, pp. 107~114.
- [9] R. Fuse, H. Kobayashi, Y. Ju, K. Maruta, and T. Niioka, "NO<sub>x</sub> Emission from High-Temperature Air/Methane Counterflow Diffusion Flame," *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 41, 2002, pp. 693~698.
- [10] T. Fujimori, D. Riechelmann, and J. Sato, "Effect of Liftoff on NO<sub>x</sub> Emission of Turbulent Jet Flame in High-Temperature Coflowing Air," *Twenty-Seventh Symposium (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, 1998, pp. 1149~1155.