

고온공기를 이용한 제트확산화염의 연소특성에 관한 실험

조은성[†] · 大野健^{*} · 小林秀昭^{*} · 정석호^{**}

Experiment on the Characteristics of Jet Diffusion Flames with High Temperature Air Combustion

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

Key Words: High Temperature Air Combustion(고온공기연소), NO_x Emission(질소산화물), Flue Gas Recirculation (배기가스재순환), Laser Doppler Velocimeter(레이저유속계)

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 recirculated exhaust gases, 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 by the high exhaust gas recirculation.

1. 서 론

산업의 발전에 따라 과다한 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(CO₂) 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 CO₂ 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_x의 생성은 온도에 크게 의존하기 때문에 공기온도가 높아짐에 따라 다량의 NO_x가 발생하는 문제점이 나타나고 있고, 이에 따라 NO_x 저감을 위하여 배기가스 재순환법을

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : teodoro7@snu.ac.kr

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

* 일본 동북대학교 유체과학연구소

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

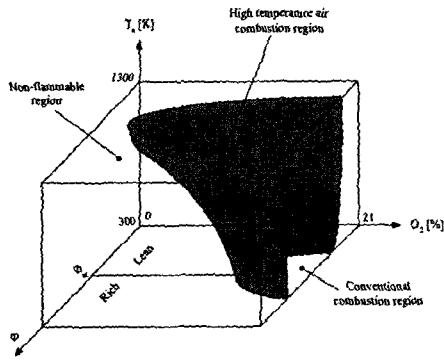


Fig. 1 Flammable region for various conditions[4]

이용한 저감을 고려하였으나 여전히 NO_x 발생을 줄이는데 어려움을 겪어왔다.

이와 관련하여 독일[1~2] 및 일본[3~5] 등에서 고온공기를 이용한 연소방법에 배기가스재순환법을 적용하여 효율향상, CO₂ 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_x 발생을 현저히 줄일 수 있다.

Figure 1은 예열 온도 및 당량비, 산소농도에 따른 화염영역을 나타내고 있다[4]. 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, 로 내 전체로 반응영역을 확장시켜 균일한 온도분포로 열전달 효율을 향상시켜 로의 소형화가 가능하다.

고온공기연소와 관련한 연구로는 연소장내의 속도분포 및 OH 라디칼 측정 연구[6]가 있으며, 희석기체에 따른 화염 발광 특성 및 스펙트럼 측정연구[7]가 있다. 또한, NO_x 발생특성에 관해서는 대항류 화염에서의 연구 [8] 및 동축류 버너에서 화염의 부상에 따른 연구 [9]가 있다. 본 연구에서는 동축류 연소에서 가능한 한 화염부상이 일어나지 않는 조건에서 고온공기연소의 특징을 살펴보기 위하여 실험을 수행하였다. NO_x

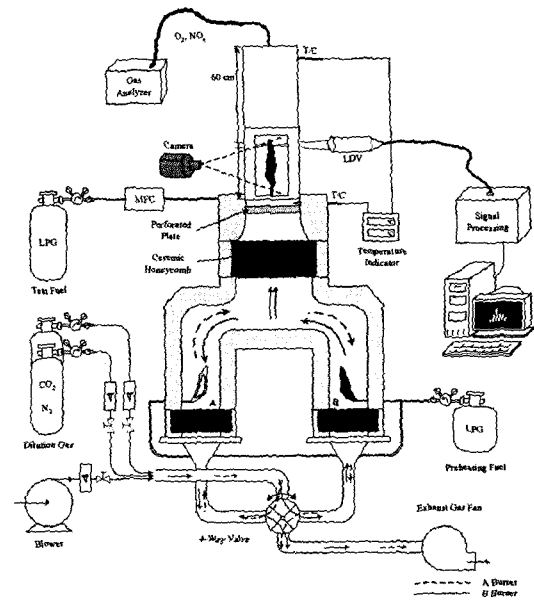


Fig. 2 Experimental apparatus for high temperature combustion

발생특성은 산화제의 O₂ 농도 및 CO₂ 첨가, 난류 강도 변화 등의 방법으로 확인하여 보았다.

2. 실험장치

Figure 2에는 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 온도 이상이 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

Table 1 Experimental conditions

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

있지만 최고 온도가 약 1400K 까지 상승하였다가 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 $D_i = 1.5$ 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.

실험조건은 아래 Table 1과 같다. 주요 실험 조건은 산화제의 O₂ 농도변화에 따른 특성과 CO₂ 첨가, 난류강도의 영향을 살펴보았다. 난류특성은 비연소장에서 각 다공판 조건에서의 유속 및 난류강도를 파장 632.8 nm의 헬륨-네온 (He-Ne) 레이저를 사용한 LDV 장치(Lase Doppler Velocimetry, DANTAC 사)를 이용하여 측정하였으며, 연소장에서 각 조건에 대하여 화학발광법에 의한 가스분석기를 이용하여 O₂ 및 NO_x를 측정하였다. 또한, 각 조건에서의 화상촬영을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 비연소장 유동특성

연소실 유동특성을 확인하기 위하여 비연소장에서 LDV를 이용하여 속도를 측정하였다. Figure 3은 상온($T_a = 300$ K)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 변동

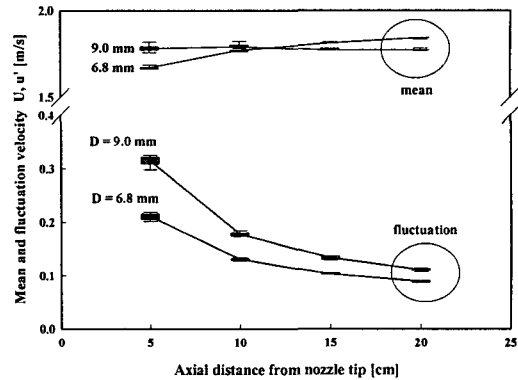


Fig. 3 Mean and fluctuation velocity for axial distance from nozzle tip ($T_a=300$ K)

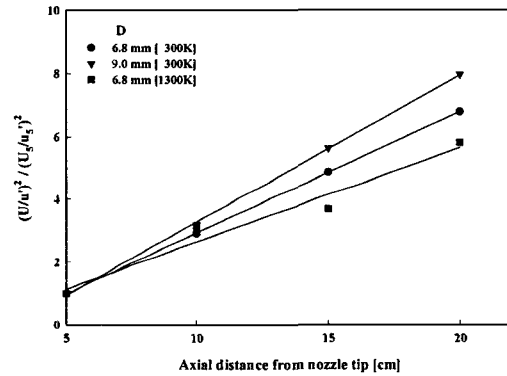


Fig. 4 Turbulent energy degeneracy for axial distance from nozzle tip

속도를 보이고 있다. 노즐출구 5 cm 위치에서의 각각의 난류강도는 20%와 14%이다.

Figure 4는 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 비로 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 연소실을 통과하는 시간이 짧아 상대적으로 적은 난류에너지 손실을 가지는 것을 알 수 있다.

3.2 화염구조 및 연소특성

각 조건에서 입·출구 온도, 배출물 측정 및 화염사진 촬영을 수행하였다. Figure 5는 다공판 홀 직경 $D = 6.8 \text{ mm}$ 조건에서 O_2 농도에 따른 화염 모양을 나타낸 것이다. O_2 21% 조건은 일반 공기를 사용하였고 다른 O_2 조건의 나머지 조성은 공기에 N_2 가스를 첨가하여 조정하였다. 화상 촬영은 입구 온도 1300 K 이상의 고온에서 측정하였으며 고온공기로 인해 휘염이 매우 강하였다. O_2 농도가 감소함에 따라 화염길이도 점차 증가하는 것을 볼 수 있는데 O_2 21%의 경우 10 cm 정도의 화염이 4%의 경우 30 cm 가까이 증가하였다. 또한, O_2 12% 이후에는 연료노즐 출구 부분부터 다소 청염이 나타나고 휘염 영역이 감소하는 것을 알 수 있다. 화염의 스펙트럼연구[7]에 의하면 낮은 O_2 조건에서 회색가스가 N_2 뿐인 경우 C_2 라디칼의 활성이 커져 녹색의 화염이 관찰되며 CO_2 회색의 경우 넓은 파장 영역의 발광이 나타나 보라색화염이 관찰된다고 보고되었다. 본 실험에서는 회색가스가 N_2 만의 화염에서 O_2 4%의 경우 노즐선단부에서 청염이 나타나고 하단부에서는 검붉은 보라색 화염이 보이고 있으며, 온도가 낮아짐에 따라 휘염 부분이 사라지면서 녹색 화염이 관찰되었다.

산화제 입구 유동의 난류강도에 따른 화염구조를 살펴보면 Fig. 6에서 보는 것과 같이 난류강도에 따라, 또한 동일 난류강도의 CO_2 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 $D = 9.0 \text{ mm}$ 의 경우 화염길이도 매우 짧아지는데, 이는 난류강도 증가에 따른 연료와 산화제의 혼합 특성 증가에 기인한다. CO_2 20% 조건의 경우 화염길이는 크게 변하지 않으나 화염 폭이 다소 좁게 보이며 노즐 선단부의 청염 구역이 더 길어지는 것을 알 수 있다.

Figure 7은 O_2 농도에 따른 소염이 시작되는 산화제 입구 공급 온도를 나타내고 있다. 각각의 조건에서 O_2 농도가 클수록 소염 온도는 낮아지고 있으며, 난류강도가 클수록 또한, $D = 6.8 \text{ mm}$ 의 동일 난류조건에서 N_2 대신 CO_2 를 20% 첨가함에 따라 동일 O_2 조건에서 소염 온도가 높은 것을 알 수 있다. 모든 경우 산화제 공급 온도가 1100K

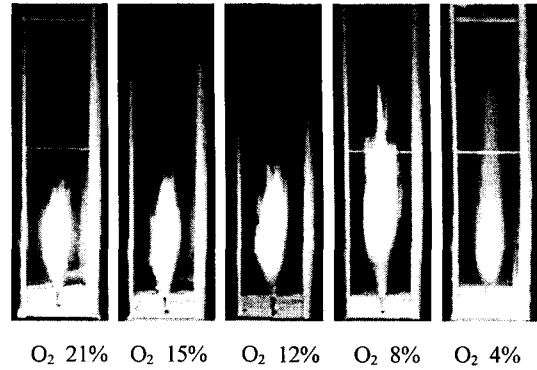


Fig. 5 Flame shape with oxidizer oxygen concentration ($D = 6.8 \text{ mm}$)

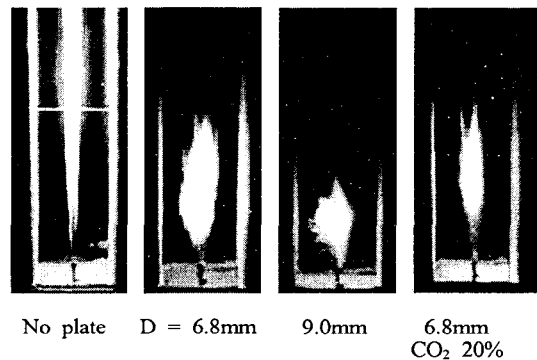


Fig. 6 Flame shape for inlet condition (O_2 12%)

까지 낮아지는 동안 소염 특성을 확인하였으며, 층류 연소의 경우 1100K 이상의 온도에서는 소염 현상이 나타나지 않았다.

화염이 소염되는 특징은 두 가지로 나타나는데, 상대적으로 O_2 농도가 높은 12%, 15%의 경우는 일정 온도 이하로 공급 온도가 낮아지면 갑자기 휘염이 사라지며 화염이 부상되면서 소염이 일어나고, O_2 농도가 낮은 4%, 8%의 경우는 일정 온도 이하가 되면 화염이 천천히 부상하면서 소염되기 시작한다. 여기서 소염판단의 기준은 휘염이 사라지면서 화염이 부상되는 시기를 소염 온도로 간주하였다.

3.3 NO_x 발생특성

실험과정 중에 고온공기를 만들기 위해 축열체를 가열하는 동안 로 내부에 연소가스가 남아있기 때문에 실제 시험조건에서 산화제의 변화특성을 파악하기 위하여 비연소 조건에서 실험로 입.

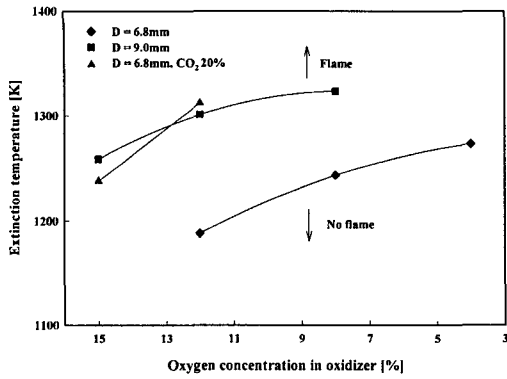


Fig. 7 Extinction temperature for oxygen concentration

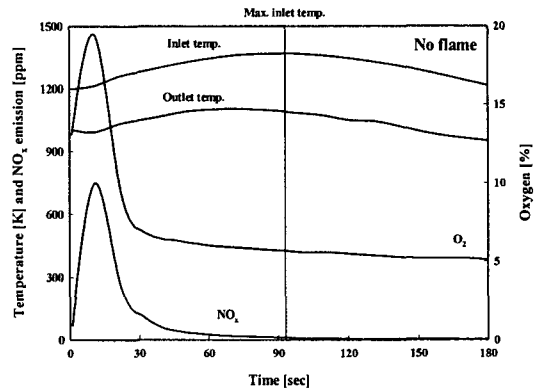


Fig. 8 Time dependence for experimental conditions in no flame high temperature flow

출구온도 및 O₂, NO_x의 농도를 측정하여 보았다. Figure 8은 O₂ 5%의 산화제를 공급한 경우의 비연소 실험의 결과를 시간에 따라 나타낸 것이다. 입구 및 출구온도는 시간에 따라 증가하였다가 서서히 감소하는 것을 알 수 있다. O₂ 분포를 살펴보면, 고온공기 발생을 위한 예열이 끝난 후 실험용 산화제를 공급하고 나서 약 30s 후 실제 공급된 O₂ 조건을 나타내고 있으며, NO_x의 경우 초기 예열과정에 의해 발생된 내부의 NO_x가 실험용 산화제와 함께 배출되는 것을 볼 수 있다. 그러나 최고온도를 나타내는 시간인 90s 이상의 조건에서는 O₂ 농도도 안정적인 값을 나타내고 NO_x 농도도 크게 나타나지 않으므로 최고온도 시간 이후부터를 실험조건으로 삼았다.

Figure 9는 D = 6.8 mm 조건에서의 O₂ 농도에 따른 NO_x 발생특성을 산화제 입구온도에 따라 나타낸 것이다. 입구온도가 낮을수록 발생하는 NO_x의 농도는 점점 낮아지고 있으며, O₂ 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. 입구온도 1100K 이상에서 화염의 부상이 나타나는 O₂ 4, 8, 12% 조건에서는 Fig. 7에서 정의한 소멸온도를 각각 표시하였다.

Figure 10은 O₂ 12% 조건에서의 난류강도 및 동일 난류강도에서 CO₂ 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 혼

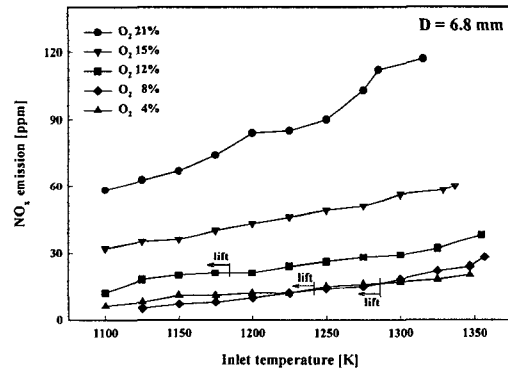


Fig. 9 NO_x emission for oxygen concentration

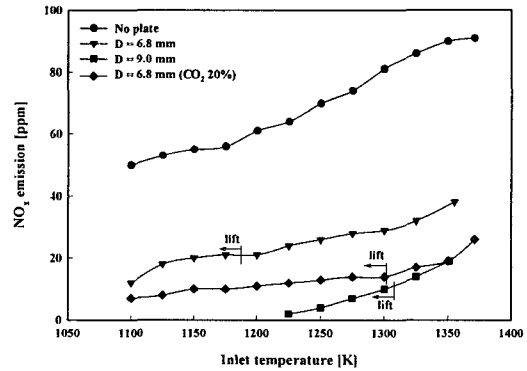


Fig. 10 NO_x emission for inlet conditions (O₂ 12%)

합이 촉진되어 낮은 O₂ 조건에서의 연소를 촉진하여 온도저하로 NO_x 발생감소를 가져오는 것으로 사료된다. D = 6.8 mm의 CO₂ 20%의 경우

회석가스 N_2 조성 중 20%를 CO_2 로 바꾼 것으로 회석가스가 N_2 뿐인 경우에 비하여 50% 정도의 NO_x 저감특성을 보이고 있다. 각 조건에서 부상 위치를 표시하였다.

4. 결 론

고온공기연소기술을 적용한 제트화산화염의 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 화염 폭이 넓게 분포하였다.

(2) 상대적으로 O_2 농도가 높은 12%, 15% 조건에서는 일정온도 이하에서 갑자기 휘염이 사라지며 화염이 부상되면서 소멸되고, 농도가 낮은 4%, 8% 조건에서는 화염이 서서히 부상되면서 소멸되는 현상을 보이고 있다.

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

(4) 난류강도가 증가함에 따라 NO_x 발생의 감소를 보이고 있다. 이것은 난류강도가 커짐에 따라 연료와 산화제와의 혼합특성 향상에 따라 회석율이 증가하여 상대적으로 낮은 O_2 농도에서 연소되어 화염온도가 낮아지고, 화염길이가 짧아짐에 따라 고온에서의 체류시간 감소로 NO_x 가 감소하는 것으로 사료된다. CO_2 를 회석하는 경우 NO_x 감소율이 증가하는 것을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2003년도 두뇌한국21사업과 CERC에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Wunning, J. A. and Wunning, J. G., 1997, "Flamless Oxidation to Reduce Thermal NO-Formation," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 23, pp. 81~94.
- (2) Plessing, T., Peters, N. and Wunning, J. G., 1998, "Laseroptical Investigation of Highly Preheated Combustion with Strong Exhaust Gas Recirculation," *Twenty-Seventh Symposium (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 3197~3204.
- (3) Katsuki, M. and Hasegawa, T., 1998, "The Science and Technology of Combustion in Highly Preheated Air," *Twenty-Seventh Symposium (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 3135~3146.
- (4) Niioka, T., 1999, "Fundamentals and Applications of High-Temperature Air Combustion," *Proceedings of the 5th ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference*, pp. 1~6.
- (5) Maruta, K., Muso, K., Takeda, K. and Niioka, T., 2000, "Reaction Zone Structure in Flameless Combustion," *Twenty-Eighth Symposium (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 2117~2123.
- (6) Ozdemir, I. B. and Peters, N., 2001, "Characteristics of the Reaction Zone in a Combustor Operating at Mild Combustion," *Experiments in Fluids*, Vol 30, pp. 683~695.
- (7) Ito, Y., Yoshikawa, K. and Shimo, N., 2003, "Effect of Different Kinds of Dilution Gases on the Combustion with Highly Preheated Oxygen-Deficient Air," *JSME (B)*, Vol. 69, No. 677, pp. 107~114.
- (8) Fuse, R., Kobayashi, H., Ju, Y., Maruta, K. and Niioka, T., 2002, " NO_x Emission from High-Temperature Air/Methane Counterflow Diffusion Flame," *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 41, pp. 693~698.
- (9) Fujimori, T., Riechelmann, D. and Sato, J., 1998, "Effect of Liftoff on NO_x Emission of Turbulent Jet Flame in High-Temperature Coflowing Air," *Twenty-Seventh Symposium (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1149~1155.