

산업 보일러용 오일버너에서의 저 NOx 연소 연구

신명철* · 김세원* · 박주원* · 방병열* · 양원*† · 고영건**

A Study on Low-NOx Combustion in an Oil Burner for an Industrial Boiler

Myung-Chul Shin, Se-Won Kim, Ju-Won Park, Byeong Ryeol Bang, Won Yang and Young-Gun Go**

ABSTRACT

A novel low NOx oil burner of 0.7 MW (for a 1 ton steam/hr industrial boiler) was designed and tested to investigate the combustion characteristics through in-flame measurement and flue gas analysis. Flame shape was observed by CCD camera and CH^*/C_2^* radical distribution in the flame were observed, along with measurement of flue gas composition such as NOx and CO, for various heat inputs, excess airs and pressure of the fuel spary nozzles. The flame showed the two-zone structure: fuel-rich and fuel-lean zone, which was very favorable for the low-NOx combustion, and the NOx emission for haevy oil combustion was significantly reduced to < 150 ppm at 4 % O₂, compared with the NOx level of a conventional heavy oil burner.

Key Words : Low NOx burner, Staged combustion, Kerosene, Heavy-oil

1. 서 론

버너는 보일러, 가열로 등의 산업로에 있어서 가장 기반이 되는 설비 중 하나이다. 버너의 설계와 운전에 있어서 기존의 연소 효율 측면 외에도 대기오염물질을 최소화하는 것이 해당 산업계에 있어 가장 중요한 문제로 등장하고 있다. 특히 화석 연료의 연소시 발생하는 NOx 는 갈수록 배출 규제가 엄격해지고 있어서 고효율 저 NOx 연소 기술 개발의 필요성이 갈수록 높아지고 있는 추세이다.

저 NOx 버너의 구성을 위한 원리를 기술적으로 분류하면 첫째 연소로 내에서 연소시 NOx 생성을 억제하는 NOx 억제 메커니즘, 둘째 생성된 NOx를 연료의 환원성을 이용하여 노 내에서 N₂로 환원시키는 탈질 메커니즘 그리고 셋째 NOx 억제와 탈질이 조합된 형태의 메커니즘으로 나눌 수 있는데 이러한 메커니즘이 조합된

방법으로는 현재 까지 주로 다단 연료/공기 공급 연소기술이 적용되어 왔다. 이 중에서도 가장 중요한 것은 버너 자체에서 NOx 발생을 제어하는 기술로서, 이의 대표적인 방법 중 하나인 다단 연료/공기 공급에 의한 연소기술[1-5]에서는 화염의 유동을 유체역학적으로 제어하여 연료 농후와 연료 희박영역을 형성시켜 화염 내 최대온도 영역을 최소화 하여 열적(thermal) NOx의 발생을 억제하게 된다. 또한 화염 내 스월을 형성시켜 연료 과농영역에서의 체류시간을 늘려 연료 (Fuel) NOx 의 생성도 함께 제어하게 된다. Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 화염 영역을 연료 농후 (Fuel-rich) 및 연료 희박(Fuel-lean) 영역으로 분할시키면 NOx 생성량을 현저하게 줄일 수 있다[6].

그러나, 이러한 다단 연소기술은 단별 공기 유량, 속도, 스월러를 통과하는 공기비율 등이 매우 주의깊게 설정되어야 하므로 실제 저 NOx 달성을 위해서 많은 연구가 필요하며, 이를 실제 산업 보일러에 활용하기 위해서는 이러한 설계 인자들을 적용한 버너의 대용량화가 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 상용 크기인 1톤 스팀/시간 보일러 용량에 활용 가능한 0.7 MW(600,000

* 한국생산기술연구원 고온생산기술연구부

† 연락처, yangwon@kitech.re.kr

** 한국과학기술원 기계공학과

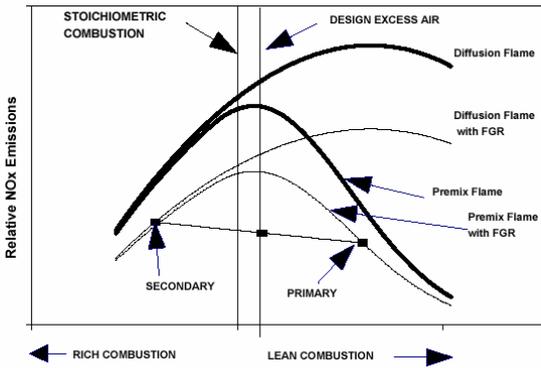


Fig. 2. Fuel-lean/rich combustion and its relationship with NOx emissions[6]

kcal/hr) 용량의 버너를 개발하고 이의 성능을 확인하였으며, 여러 운전 인자에 따른 배가스 배출 특성을 측정하였다. 그리고 개발 버너의 연소 특성을 파악하기 위하여 화염 계속 기법을 이용한 실험을 수행하였다.

2. 저 NOx 오일버너

중유, 석탄, 천연가스 등 각종 연료를 사용하는 보일러에서 저 NOx를 위한 요구는 계속해서 강해지고 있으며, 효율적인 NOx 제어를 위해 다양한 방법들이 사용되고 있다. 가장 광범위하게 사용되는 NOx 저감 방법으로 다단연소 방법이 널리 사용되고 있다. 다단 연소는 Fig. 2 와 같이 연소흐름을 따라서 축 방향으로 선택된 위치에 공기나 연료를 다단으로 분사하면서 연료 농후 및 연료 희박 영역을 만들어 원천적으로 저감하는 것이다. 중유와 같은 액체 연료의 경우 열적(thermal) NOx 생성과 동시에 연료 중 약 0.2-0.3 %(wt) 정도 포함되어 있는 질소(N)성분의 산화 과정을 통한 연료(fuel) NOx 생성을 함께 고려하여야 한다. 연료(fuel) NOx 를 줄이기 위해서는 연료 중 질소 성분이 NOx 로 변환되는 비율을 줄이고 연소장 중 연료 농후 및 연료 희박 영역의 적절한 분할 및 선회류에 의한 연료/공기 혼합장을 형성하여 NOx 의 N₂로의 환원에 필요한 체류시간 등을 확보하여 초 저 NOx 를 실현시키는 연소기술이 필요하다. 이를 위해서는 공기 다단 연소를 통해 내부 재순환영역에서 연소가스의 체류시간을 충분히 확보할 수 있는 선회 유동의 최적화가 필수적이며 화염 내 연료 농후 영역과 연료 희박 영역의 구성이 최적화되었을 경우 저 NOx 성능을 나타낼 수 있다.

Fig. 2 에서 보는 바와 같이 공기 다단 연소의 최적화에 있어 1차 공기는 적절한 축방향 운동량

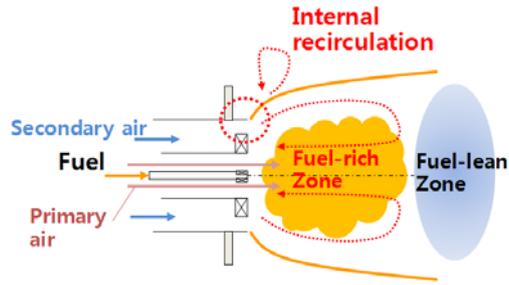


Fig. 3. Methodology for low-NOx emission applied to the low-NOx burner in this study

을 형성하여 화염 초기 연료 노즐 부근에서의 화염 안정화를 통해 1차 화염을 형성하고, 2차 공기의 선회에 의해 화염 초기 일부 미연소 된 연료가 노즐에 부착되는 것을 방지하는 역할을 하게 된다. 또한 2차 공기 공급부에 선회기를 설치하여 2차 공기의 일부는 선회 운동량(Tangential momentum)을 가지고 공급되고 선회기를 통과하지 않는 2차 공기는 축방향 운동량(Axial momentum)을 가지고 화염의 후류에 공기를 공급하는 구조가 되도록 하였다. 따라서 1차 공기는 2차 공기의 선회에 의한 내부 재순환 영역의 형성을 방해하지 않으면서 화염 초기 연료 노즐 부근에서의 화염 안정화를 이룰 수 있는 최적의 축방향 운동량을 확보하는 유량이 공급되어야 하며 2차 공기의 강선회에 의해 내부 재순환영역에서 연소가스의 체류시간을 충분히 확보할 경우 Fuel NOx 및 Thermal NOx 발생을 효과적으로 억제할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에 사용된 버너는 이러한 다단연소기의 일종으로 연소실을 구분하여 보다 효율적인 다단연소를 구현하고자 하였다.

본 연구를 위하여 0.7 MW급 용량의 연소기를 설계하였다(Fig. 3). 공기 공급부는 연소기의 2단 공기 출구보다 작은 선회기를 설치하여 면적비를 이용 2단 공기의 일부가 선회기를 통해 공급되도록 하였고, 나머지 2단 공기는 선회기를 통하지 않고 공급되는 구조로 설계하였다.

소용량 액체연료 공기 다단 연소기는 크게 연료노즐부와 1차공기공급부, 2차공기공급부로 나누어진다. 1차공기공급부는 과잉공기비 1.2를 기준으로 하여 노즐 출구에서의 적정 속도를 유지하고 적절한 연료 과농지역 생성을 위해 전체 공기량의 10 %의 공기를 기준으로 설계하였으며 2차 공기 공급부는 선회기를 통과하는 공기와 선회기를 통과하지 않는 공기의 비를 면적비를 통해 계산하고 그 출구 유속이 같도록 설계하였다. 또한 2차공기공급부는 윈드박스를 설치하여 2차 공기가 균일하게 공급되어 선회기를 통과하는 공기와 선회기를 통과하지 않는 공기의 유속이 같



Fig. 3 Photograph of the burner used in this study

도록 설계하였다.

앞 절의 연소기 개념 설계에서 언급했듯이 연료의 초기 혼합을 위해 1차 공기를 공급하고 화염 안정화 및 다단 구조의 형성을 위해 2단 공기 공급부에 선회기를 설치하여 2단 공기의 일부는 선회 운동량을 가지고 공급되고 선회기를 통과하지 않는 2단 공기는 축방향 운동량을 가지고 화염의 후류에 공기를 공급하는 구조를 가지도록

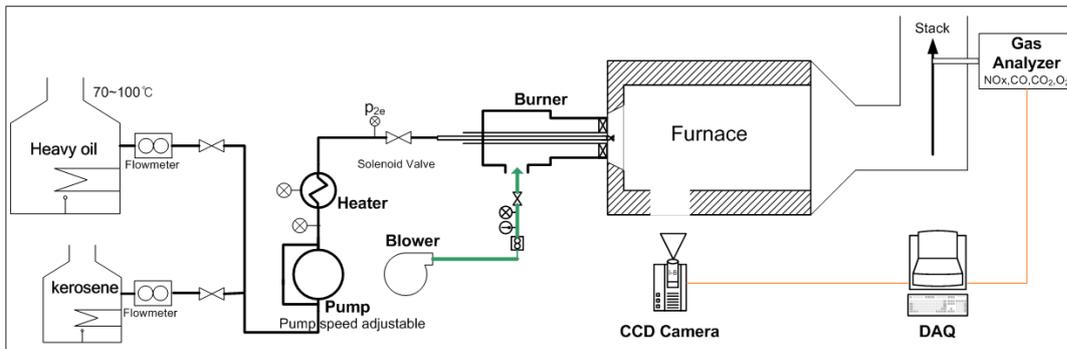
하였다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

Fig. 4 에는 본 실험에 사용된 저 NOx 버너 연소 시스템의 개략도와 사진을 나타내었다. 연소로는 내부 직경 1 m, 길이 3 m의 0.7 MW급 원형 연소로로서 내부는 20 cm 두께의 내화재로 단열되어 있고, 측면에 화염 관측을 위한 강화유리 관측창이 확보되어 있다. 또한 배기가스 계측을 위해 굴뚝부에 배기가스 계측부가 설치되어 있으며, 배가스 농도 계측은 샘플링 프로브 (sampling probe)를 통해 Testo 350-XL 가스 분석기에서 NOx, CO, CO₂, O₂, SO₂ 농도와 배가스 온도가 동시에 계측된다.

연료로 사용된 중유는 1 톤급 서비스 탱크에서 밴드 히터에 의해 탱크 외부면을 통해 약 90°C로 가열된 후 공급 펌프에 의해 밴드 히터로 보온된



(a) Schematic diagram



(b) Photograph

Fig. 4 Experimental system: (a) Schematic diagram, (b) Photograph

배관을 통해 이송되며, 펌프에서 일정한 유량과 압력으로 공급된 증유는 원하는 공급 온도를 일정하게 유지하기 위해 온도 조절이 가능한 전기 히터를 지나 버너로 공급되며, 버너로 공급되기 직전 연료의 온도 계측 및 제어가 가능하도록 온도 센서와 컨트롤러가 설치되어 있어 PID 제어에 의해 설정된 온도를 비교적 작은 편차 내에서 유지하도록 설계되었다.

연소 공기는 블로워(Blower)를 사용하여 버너의 윈드박스 공기 공급부로 공급되며, 공기 유량은 와류형 유량계에 의해 계측된다. 연소로 내부의 화염 계측을 위해 연소로에 설치된 관측창을 통해 CCD 카메라 및 C_2 , CH 필터를 사용하여 화염을 촬영하였다.

3.2 실험 방법

액체 연료용 저 NO_x 연소기 성능 테스트를 위해 증유 및 증유를 사용하여 연소로에서의 배출가스 특성 및 화염 계측을 수행하였다. 실험에 사용된 압력식 노즐의 용량별 분무 특성에 따른 연소특성을 알아보기 위해 연료 노즐을 변화시켰으며, 연료 펌프의 압력 변화와 이에 따른 배출가스 특성 및 화염 촬영을 통해 연소 특성을 파악하였다.

Table 1은 각 연료를 사용한 실험에서 실험 조건을 나타낸다. 먼저 다양한 노즐을 사용하여, 열부하 0.7 MW 용량에서의 최적의 노즐을 찾기 위한 실험을 하였으며, 이에 따라 연료 펌프에 걸리는 압력을 확인하여, 노즐 용량별 연료 펌프 압력별 연소 특성을 확인하였다. 또한 연료 펌프의 압력은 연료를 분사함에 있어 분무되는 연료의 미립화와 관련이 있으므로 이에 대한 분석을 함으로써 최적의 노즐 선정을 위한 실험을 수행하였다. 각 열부하에서 공기비별 배출가스 데이터를 측정함으로써 과잉 공기비에 따른 연소특성을 파악하고, 배출가스 O_2 농도 별 NO_x 및 CO 배출 특성을 고찰하였다.

Table 1 Experimental Conditions

| Heat input [kcal/hr] | 450,000 ~ 600,000 | | | |
|--|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| Excess air (%) (O_2 concentration at the exit (%)) | 10 (1.89) | 20 (3.47) | 30 (4.81) | 40 (5.96) |
| Pressure of the nozzle [kgf/cm^2] | 9 | 11 | 13 | 15 |
| Nozzle [gallon/hr] | 15 | 14 | 13 | 12 |

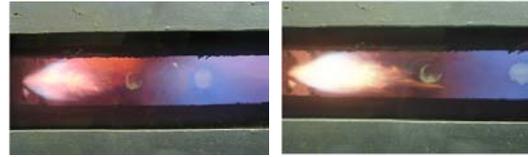


Fig. 5 Photographs of the kerosene flame for various pressures of the fuel spray (a) 15 kgf/cm^2 , (b) 9 kgf/cm^2

4. 실험 결과

Fig. 5는 보일러 증유 사용시 연료 분사 압력에 따른 화염 형상을 나타낸다. 연료 분사 압력에 따른 배출가스 특성은 거의 차이가 나지 않는 것을 확인하였으나, 화염 형상은 분사 압력별로 조금 다른 양상을 나타냈다. 분사압 9 kgf/cm^2 로 했을 경우 15 kgf/cm^2 의 경우보다 버너 출구에 형성된 연료 농후 영역에서 적염이 뚜렷하게 관찰되는 것을 볼 수 있는데, 이는 연료 분사압에 따른 연료의 미립화와 관련된 것으로, 상대적으로 저압분사압에 따라 굵은 연료 입자가 화염 영역에 존재하므로 공기와 연료의 혼합이 원활하지 못해 매연이 많이 발생하기 때문이다.

계측 시스템은 화염의 라디칼 분포 특성을 분석하기 위한 CCD카메라 시스템 및 CH^* , C_2^* 의 파장만 통과시키는 광 필터를 설치하여 그 광 강도를 측정하였다. Fig. 6 및 7은 대표적으로 열부하 600,000 kcal/hr에서 과잉 공기비 1.2에서의 화염 사진 및 화염 내 CH^* 와 C_2^* 의 분포특성을 나타낸 그래프이다. 그래프는 각각의 라디칼계측의 경우에서 정규화(Normalize)를 수행하여 표현하였다. 그래프를 양분하여 좌측부는 화염 선단을 나타내고, 우측부는 화염 중심부를 나타낸다. 그림에서 나타나듯이 버너 출구에서 형성되는 화염 농후 영역에서 라디칼이 주로 존재한다. 이 영역은 CH^* 와 C_2^* 가 동시에 존재함을 알 수 있고, 이는 화염의 주된 반응이 이 영역에서 일어난다는 것을 나타낸다.

또한 압력식 노즐의 공동원뿔(hollow cone)형태의 분무방식에 의해 라디칼의 주된 존재 영역이 환형(Ring)으로 분포되었음을 알 수 있다. 화염 사진 및 라디칼 분포도를 통해 화염 형상이 완벽한 상하 대칭이 아님을 확인할 수 있는데, 이는 2단 공기 공급부 내에 파일렛 버너 및 점화장치로 인해 공급 공기의 유동이 균일하지 못하는데 그 원인이 있는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 열부하 0.7 MW에서 연료 펌프 압력별 과잉 공기비에 따른 NO_x 및 CO농도를 나타낸다. 연료 노즐은 45.4, 49.2 및 56.8 L/hr 용량

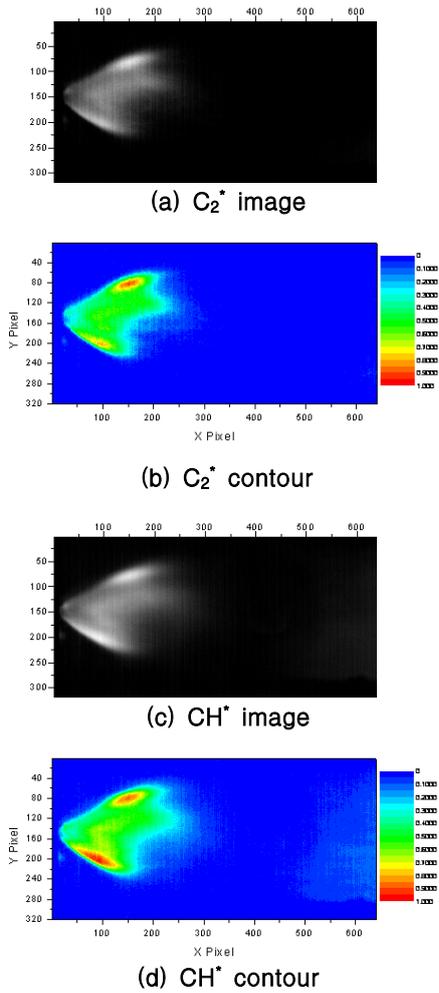


Fig. 6 Radical distributions in the flame: (a) C₂* image, (b) C₂* contour, (c) CH* image (d) CH* contour

의 압력식 노즐을 사용하였으며, 등유를 사용하여 0.7 MW 용량을 내기 위한 연료유량 조절 시 펌프 압력은 각각 15, 11 및 9 kgf/cm² 을 나타낸다. 연료 펌프 압력에 의한 배출가스 농도는 과잉 공기비 1.1~1.3에서 뚜렷한 차이를 보이고 있지 않으며, NOx의 경우 약 20 ppm, CO의 경우 거의 발생하지 않는 것으로 나타나 등유를 사용한 실험에서 만족할 만한 결과를 보여준다. 다만, 공기비 증가에 따른 NOx 발생율이 거의 차이를 보이지 않고 있는데, 일반적으로 공기비가 증가할수록 증가된 공기량에 의해 화염온도 저하와 이로 인한 열적(thermal) NOx의 저감을 예상할 수 있는데, 본 실험 결과에서는 공기비 증가에 따른 NOx 저감 효과는 거의 없는 것으로 나

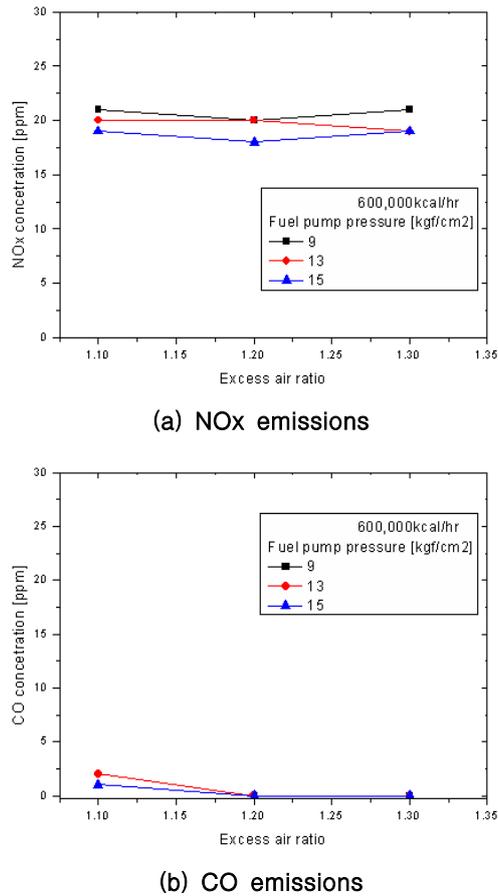


Fig. 7 NO_x(a) & CO(b) emission of the kerosene flame for various excess air ratios

타났다.

Fig 8 은 중유 사용시 열부하 0.7 MW 에서 과잉 공기비에 따른 NOx 농도 및 CO 농도를 나타낸다. 전체 운전 영역에서 NOx 농도는 150ppm (O₂ 4 %)이하의 결과를 나타내고 있어 저 NOx 버너 인증치인 (180 ppm)를 만족하는 결과를 나타낸다.

등유를 사용한 실험과 비교하여 상대적으로 많은 양의 NOx 및 CO 배출특성을 보이고 있다. 이는 중유 중에 포함된 질소 성분의 영향으로 Fuel NOx의 생성이 부가됨과 동시에 등유에 비해 상대적으로 높은 점도를 나타내는 중유가 연료 노즐을 통해 분무될 때 같은 연료 분사 압력에서 연료 입자 크기가 더 클 것으로 예상됨에 따라 이에 따른 화염 형성 영역에서의 당량비 증가가 NOx 발생량 증가의 원인이 된 것으로 생각된다.

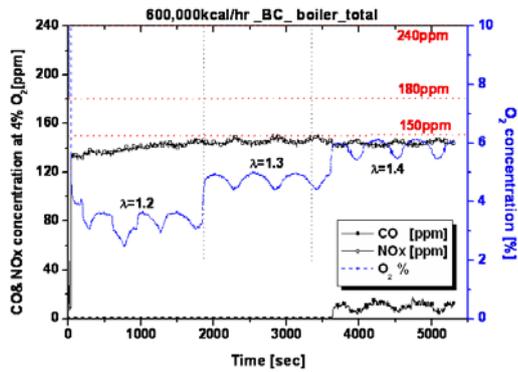


Fig. 8 CO & NO_x emission of the Heavy oil flame for various excess air ratios

5. 결 론

0.7 MW (600,000 kcal/hr) 급 오일 버너에서의 저 NO_x 화를 달성하기 위한 다단 연소 개념의 버너를 설계·제작하여 연소로에서의 실험을 수행하였고, 배출가스 계측 및 화염 계측을 통한 연소 특성을 확인하였다.

연소기 설계에 있어 NO_x 저감을 위한 공기 다단 공급 및 스윌러를 통한 Tangential momentum과 Axial momentum의 적절한 조합을 통해 화염대 내부 재순환 영역을 확보하고, 2차공기에 의한 강한 스윌을 형성함으로써 연소가스의 충분한 체류시간 확보 및 화염대 내 연료 농후 부분과 연료 희박 부분을 적절히 형성시킴으로써 NO_x 저감의 효과를 얻었다.

액체 연료로써 등유 및 중유를 사용하여 버너 성능 실험을 한 결과 배출가스 특성에서 우수한 성능을 보였다. 등유를 사용한 실험에서 열부하, 공기비 및 연료 분사노즐 용량과 이에 따른 연료 분사압력에 대한 배출가스 특성을 계측한 결과 NO_x 30 ppm이하, CO 5 ppm 이하의 결과를 얻었고, 중유 실험에서 NO_x 150 ppm 이하, CO 5 ppm 이하의 만족할만한 결과를 얻었다. 또한 CCD 카메라를 통한 화염 계측을 통해 화염대 내부의 C₂^{*} 및 CH^{*}의 분포를 확인함으로써 연료 농후 영역 분포 확장을 위한 설계 기초 자료로써 활용이 가능할 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] W. F. Farmayan, "The Control of Nitrogen Oxides Emission by Staged Combustion", Doctoral Thesis, 1980
- [2] J. T. Kelly and M. Namazian, "Ultra Reduced NO_x Burner System and Process", US6485289, 2002
- [3] Frederick E. Becker, Ronald W. Breault, Anthony F. Litka, Andrew W. McClaine, Kailash Shukla, Low NO_x Multistage Combustor, US6089855, 2000
- [4] 강경태, 임기석, 고동완, 김용모, 최윤기, "시험용 연소로에서의 다단 저 NO_x 버너의 실험 및 수치적 연구", 대한기계학회논문집 B, Vol. 28 No. 11, pp. 1339-1347, 2004
- [5] 조은성, 성용진, 정석호, "다단 연소기를 이용한 저 NO_x 연소특성 연구", 대한기계학회논문집 B, Vol. 27, No. 1, pp. 32-38, 2003
- [6] 류태우 외, "저공해 버너 부품 설계 생산 기술지원", 산업자원부 보고서, 2005.