

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.5.547

관류보일러 연소실에서 비예혼합 VISTa 버너의 연소 특성

안 준* · 김혁주** · 최규성**

* 국민대학교 기계시스템공학부, ** 한국에너지기술연구원

Combustion Characteristics of Non-premixed VISTa Burner in Once-Through-Type Boiler

Joon Ahn*, Hyouck Ju Kim** and Kyu Sung Choi**

* School of Mechanical Engineering, Kookmin Univ.,

** Korea Institute of Energy Research

(Received August 26, 2009 ; Revised February 8, 2010 ; Accepted February 22, 2010)

Key Words: Low NOx Combustion(저 NOx 연소), Boiler(보일러), Burner(버너)

초록: 본 연구에서는 VISTa(Vortex Inertial Staged Air) 버너를 개조하여 관류보일러에 적용하였다. 개조는 크게 2 가지 부분에서 이루어 졌는데, 먼저 원형에서 채택한 예혼합 연소 방식을 사용상 편의와 안전을 위해 비예혼합 방식으로 변경하였다. 연소 방식의 변경에 따라 공기 1차, 2차에 별도의 송풍기를 사용하던 공급 방식도 변경하여 본 연구에서는 하나의 송풍기로부터 공기를 공급받아 댐퍼를 통하여 1, 2차 연소실에 분할하여 공기를 공급 하도록 하였다. 본 연구에서는 질소 산화물(NOx)의 생성을 억제하는 최적의 운전 조건을 찾기 위하여 전체 공기 비 및 1, 2차 연소실로의 공기 분배 비율에 따른 NOx 생성 특성을 관찰하였다. 본 연구에서 산업용 보일러에 적용하기 위해 개조한 비예혼합 방식의 VISTa 버너를 설치한 결과, 기존의 일반 버너에 비해 균일한 화염을 얻었고 질소 산화물을 최대 20%까지 줄일 수 있는 것을 확인하였다.

Abstract: A modified VISTa (vortex inertial staged air) burner was developed and used in a once-through-type boiler. For safety, the combustion in this burner is of the non-premixed type. An air damper is installed to control the distribution of air to each combustion chamber. The effects of the air-fuel ratio and air distribution on NOx formation were investigated. The newly modified VISTa burner gives NOx reduction effect by maximum 20% in the combustion chamber of a boiler, while it yields more uniform flame than the conventional burner.

- 기호설명 -

- D : 1차 연소실 직경 (m)
- T : 온도 (K)
- T_{ad} : 단열 화염 온도 (K)
- x : 버너 출구로부터의 거리 (m)

1. 서 론

최근 연소 과정에서 생성되는 질소산화물(NOx)의 유해성이 심각하게 인식되면서 연소 설비에 대한 배출량 규제가 강화되고 있다. 우리나라는 최근 수도권 대기환경 개선사업의 일환으로 NOx의 배출 농도를 60 ppm 이하로 제한하고 있어 이를 달성하

기 위한 저 NOx 버너의 기술 자립이 시급해지고 있다. 연소 과정에서 발생한 질소산화물은 연소과정에서 발생을 억제하거나 후처리를 통해서 제거한다. 연소 과정에서 발생하는 NOx를 억제하는 방법으로는 다단(Staged) 연소, 배가스 재순환(EGR: exhaust gas recirculation) 등의 방법이 개발되어 왔다.^(1,2) 이러한 기술들은 배가스를 후처리하여 NOx를 제거하는 방식에 비하여 추가 비용은 적지만 NOx 발생량의 20~50%정도만 저감할 수 있고 경우에 따라서는 시스템의 열효율을 저해하는 문제점을 안고 있다.⁽³⁾

1996년에서 2000년까지 4년에 걸쳐 미국 DOE (Department of Energy)의 지원으로 진행된 저 NOx 개발 프로그램의 보고서에는 두 방식을 조합하여 구성한 VISTa (Vortex Inertial Staged Air) 버너를 결과물로서 제안하고 있다.⁽³⁾ 하나의 유동방향 단면에서 과농 영역과 희박 영역을 형성하게 하는 일반적

† Corresponding Author, jahn@kookmin.ac.kr

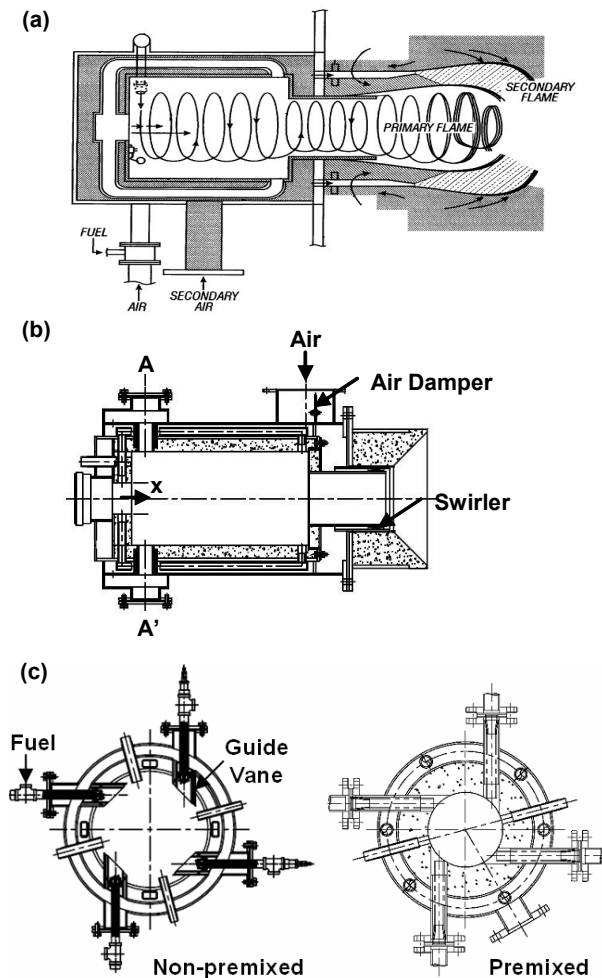


Fig. 1 VISTa (Vortex Inertial Staged Air) Burner; (a) original schematic⁽³⁾; (b) streamwise cross-section of the present burner; (c) air-fuel supply port

인 다단 연소^(1,2)와 달리 VISTa 버너는 2개의 연소실을 직렬로 연결하여 각각 과농 및 희박 연소가 이루어지도록^(3,4) 고안되었다(Fig. 1(a)). 과농 조건이 형성된 상류 측에 위치한 1단 연소실에서는 접선방향으로 설치된 포트를 통해 예혼합 가스를 공급하여 선회류를 발생시킴으로써 혼합을 촉진^(3,4)과 동시에 반경방향으로 발생하는 압력구배를 이용하여 추가적인 동력장치 없이 연소가스 재순환이 이루어지도록 하고 있다.⁽³⁾

미국 DOE의 보고서에서는 VISTa 버너의 주요 적용처로 산업용 보일러 및 공업로를 제시하고 있으며⁽³⁾ 본 연구에서는 이를 산업용 보일러에 적용하였다. 이를 위해 본 연구에서는 먼저 안전 및 특히 문제를 해결하고, 실제 운전에 있어서 제어의 편의성을 높이기 위하여 VISTa 버너를 개

조, 설계를 수행하였다.

다단 연소를 도입한 새로운 버너를 기존의 보일러에 도입할 경우 연소실 벽면과의 상호 작용으로 화염이 불안정해지거나 연소실 벽면이 국소적으로 가열되면서 열전달 및 배기 성능에 이상이 발생할 수 있다.⁽⁵⁾ 특히 1단 연소실에서 선회류를 이용하는 VISTa 버너의 경우 1, 2단의 공기 분배에 따라 각각의 연소실에서의 당량비, 재순환율, 체류시간 등 연소 특성을 지배하는 변수들이 영향을 받게 된다.^(3,6) 본 연구에서는 상용화 목적에 맞게 개조한 VISTa 버너를 관류보일러에 장착하여 1단, 2단 연소실로 공급되는 공기 배분을 조절하면서 화염형상을 촬영하고 배가스의 성분을 분석하여 연소 특성을 파악하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 비예혼합 VISTa 버너 설계

본 연구에서는 실제 산업용 보일러에 적용하기 위하여 크게 세 부분에 걸쳐 기존에 발표된 VISTa 버너(Fig. 1(a))를 개조, 설계하였다.

첫 번째로 연소 방식에 있어 원형에서는 예혼합 방식을 채택하고 있으나 실제 산업용 보일러에 활용할 경우 역화 방지 등 안전성의 측면에서 비예혼합 방식이 유리하여 비예혼합 방식으로 변경하였다. VISTa 버너를 비예혼합 연소 방식으로 구현하기 위하여 연료와 공기는 Fig. 1(c)와 같이 동축의 포트를 통해 공급되고 출구에서 중심축의 연료가 샤워 헤드와 같이 분사되어 바깥 공간에서 공급되는 공기와 혼합되면서 화염을 형성하도록 하였다. 1단연소실에서 연료와 공기가 선회류를 형성할 수 있도록 원형과 유사하게 배치하고 포트 출구를 가이드 베인 역할을 할 수 있도록 축상 형태로 설계하였다.

두 번째로 2단 연소실에 공급하는 공기 공급 방식을 본 연구와 함께 수행한 버너에 관한 기초 연구 결과⁽⁷⁾를 바탕으로 변경하였다. 즉, 보일러 연소실에 해당하는 2단 연소실에서는 관 형태의 노즐을 통해 공기를 공급하던 기존 설계와 달리 선회기를 통해 공기를 공급하여 연소의 안정성을 높였다.

마지막으로 1단과 2단의 공기를 별도의 송풍기로 공급하던 원형의 설계를 1개의 송풍기로 공급하도록 변경하였다. 원형의 경우(Fig. 1(a)), 2단 연소실

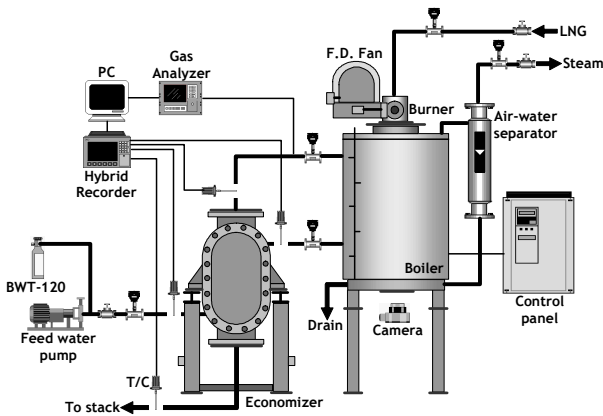


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

공기만 1단 연소실 바깥쪽 셀을 거쳐 공급하도록 하고 있다. 개조 과정에서 1개의 송풍기를 활용하기 위하여 1단 연소실 바깥쪽 셀에 분리판을 설치하고 1개의 송풍기로 1단 연소실의 바깥쪽 셀에 공기를 공급하여 각각의 연소실로 공기가 공급될 수 있도록 하였다 (Fig. 1(b)). 각각 연소실로의 분배 비율은 공기 공급 라인과 셀의 연결 부분에 댐퍼를 설치하여 조절할 수 있도록 하였다.

2.2 실험장치 및 방법

연료는 LNG를 사용하였고 공기는 Fig. 1(b) 우측 상단에 위치한 공기 댐퍼를 통해 1단 연소실과 2단 연소실로 공급된다. 댐퍼 개도가 0%인 경우 전량 1단 연소실로 100%인 경우 약 1:1의 비율로 1단과 2단 연소실로 나누어 공급되도록 설계하였다. 1단 연소실로 공급되는 공기는 1단 연소실 바깥쪽 셀에서 예열되어 포트를 통해 버너로 공급된다. 연소용량은 20 Nm³/h로 설계되었으며 2단 연소실이 이어지는 보일러는 연소용량에 적합한 관류방식의 보일러를 선택하였다(Fig. 2).

관류 보일러는 버너가 보일러 상단에 장착되므로 반대편에 석영 소재의 관측창을 설치하고 바닥에서 높여 설치하여 화염형상을 촬영할 수 있도록 하였다. 급수량, 보일러 출구 및 절탄기 출구 온도를 측정하여 보일러의 효율을 구할 수 있도록 하였고 배가스를 포집하여 실시간으로 성분을 분석하며 운전 조건을 조절할 수 있도록 실험장치를 구성하였다.

새로 개발한 버너의 성능을 기존의 버너와 비교하고 새로 개발한 버너의 운전 조건에 따른 연소 특성을 파악하기 위하여 먼저 상용화 되어 있는 30 Nm³/h 용량의 기존 버너(日, Corona 社)를 장착하여 연소 특성을 파악하였다. 다음으로 새

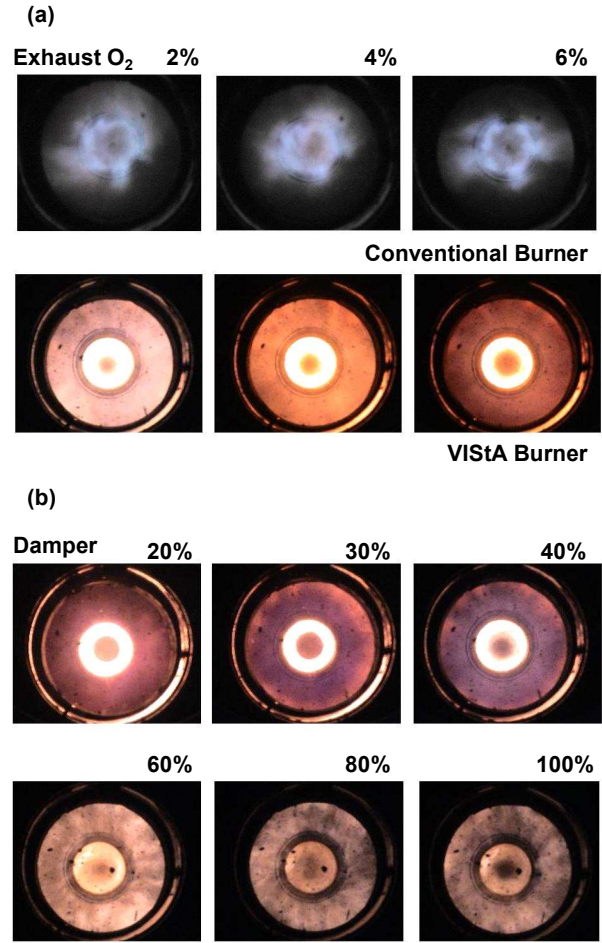


Fig. 3 Flame images; (a) comparison with the flame of conventional burner; (b) effects of damper opening

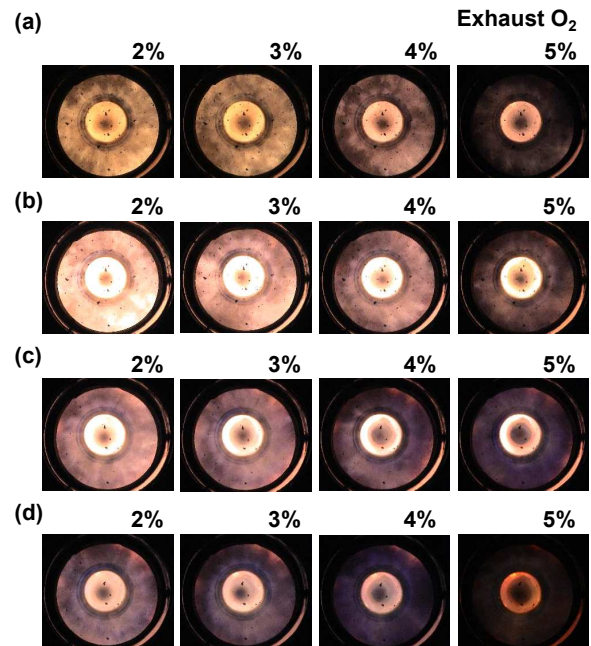


Fig. 4 Flame images with the damper opening of 50%; (a) Load 12 Nm³/h; (b) 15 Nm³/h; (c) 18 Nm³/h; (d) 21 Nm³/h

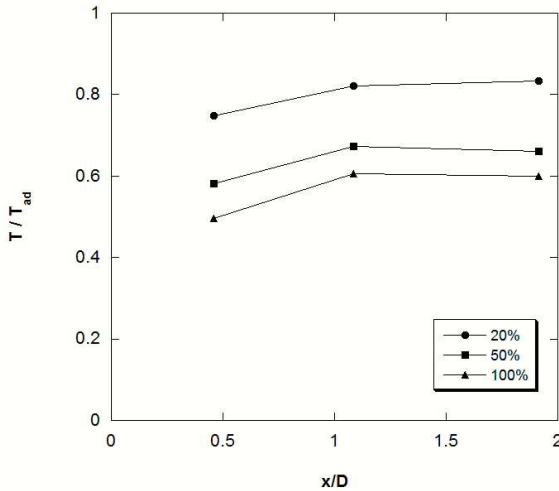


Fig. 5 Temperature at the axial center of the 1st combustion chamber according to the damper opening(%)

로 개발한 VISTa 버너를 장착한 후 1, 2단 연소실로의 공기 분배를 고정한 조건에서 총괄 당량비의 영향을 보고 반대로 총괄 당량비를 고정한 상태에서 공기 분배의 영향을 관찰하였다. 마지막으로 부분부하 운전 조건에서 연소 성능 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 화염 형상

화염 형상을 기존의 버너(日, Corona 社)와 비교해 보면(Fig. 3(a)), 본 연구에서 개발한 VISTa 버너가 화염면은 안정적으로 형성되지만 총괄 당량비에 따른 변화가 상대적으로 큰 특성을 보인다. Fig. 3(b)에는 총괄 당량비를 배가스 산소농도가 3%가 되도록 일정하게 유지한 상태에서 1단 연소실에서의 당량비에 따른 화염형태를 제시하였다. 이론당량비에 가까운 경우(담퍼 개도 20%) 사진의 가운데에 보이는 1단 연소실에 밝게 화염이 형성되고 담퍼 개도가 50%이상이 되어 1단 연소실의 과농조건으로 갈수록 연소실 전체에서 화염의 휘도가 균일해지는 경향을 보인다.

부분부하 운전 조건에서 부하율에 따른 화염 형상의 변화를 보면 부하율이 증가할수록 2단 연소실의 화염이 청색에 가까워지는 것을 볼 수 있다(Fig. 4). 부하율이 일정할 경우에는 공기비가 증가할수록 2단 연소실의 화염이 청염(靑炎)으로 변해간다.

연료를 18 Nm³/h 공급한 조건에서 1단 연소실의 당량비를 바꾸면서 중심축의 위치에서 온도를 측정하여 Fig. 5에 제시하였다. 접선방향의 포트

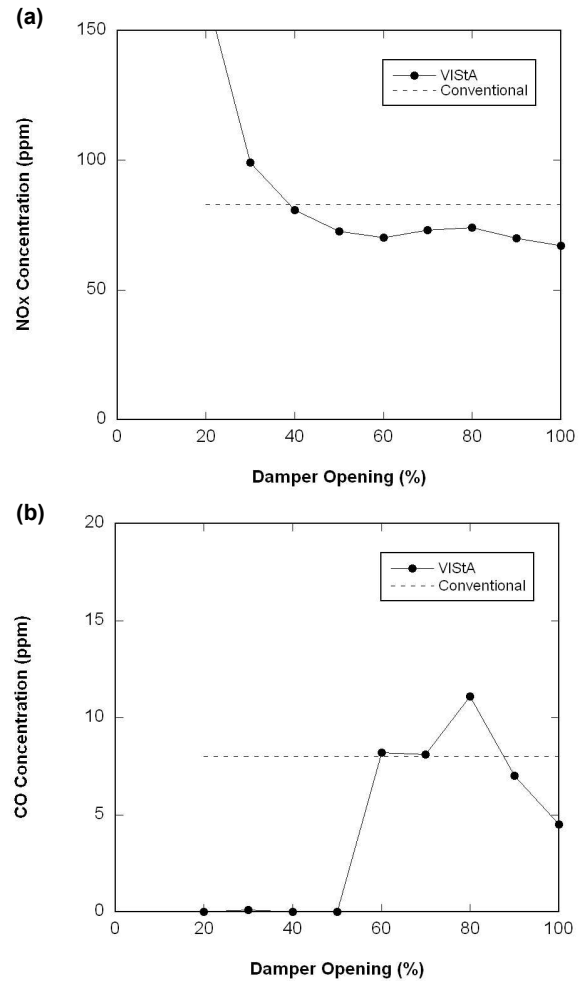


Fig. 6 Effects of damper opening on the emission characteristics at the exhaust O₂ of 4%; (a) NO_x concentration; (b) CO concentration

를 통해 연료 및 산화제를 공급하여 선화류를 형성하므로 1단 연소실의 중심축에서의 온도는 상류보다 하류가 높게 나타난다. 1, 2단 연소실로의 공기 배분의 영향을 살펴보면, 담퍼의 개도가 증가하여 1단 연소실에서의 당량비가 이론 당량비에서 벗어나 과농 조건으로 갈수록 온도가 낮게 형성된다.

3.2 배가스 성분 분석

보일러 출구에서 배가스를 포집하여 성분을 분석한 결과를 Fig. 6, Fig. 7에 제시하였다. 배가스 산소농도가 4%가 되도록 총괄 당량비를 고정한 조건에서 1, 2단 연소실로의 공기 분배의 영향을 보면(Fig. 6), 부하율 18 Nm³/h일 때 1단 연소실에 과농조건이 형성된 담퍼 개도 50% 이상에서 CO가 10 ppm수준으로 발생하지만 전체적으로 안정

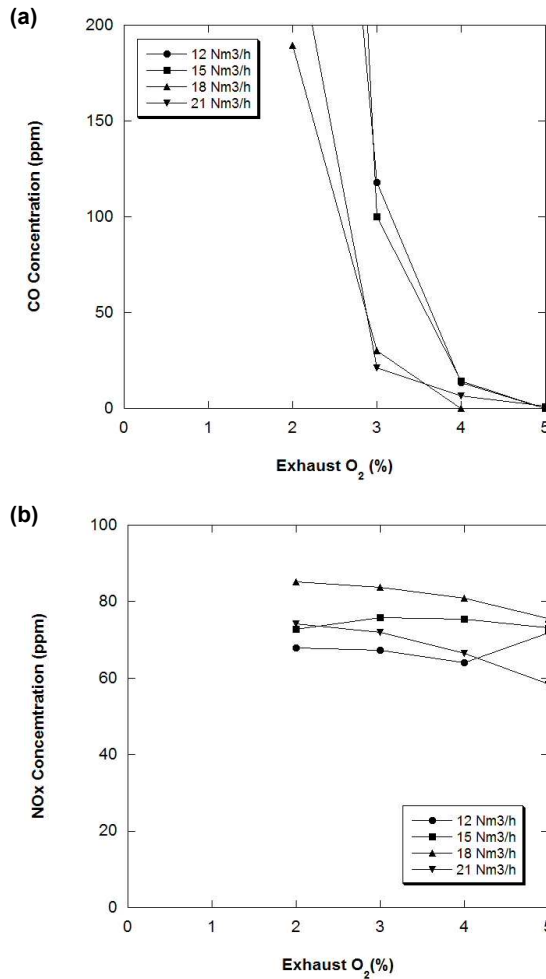


Fig. 7 Emission characteristics for the damper opening of 50%; (a) CO concentration; (b) NOx concentration

된 연소 상태를 유지하는 것을 관찰할 수 있다 (Fig. 6(b)). NOx의 경우 (Fig. 6(a)) 댐퍼의 개도가 40% 이하에서는 일반 버너보다도 높게 나타나지만 개도가 50% 이상이 되면 70 ppm 수준으로 수렴하는 특성을 보인다.

댐퍼의 위치를 고정한 조건에서 부하율 및 공기비에 따른 배가스 특성을 보면 배가스 산소농도가 작을 때 부분부하 조건에서 연소가 불안정해 지면서 CO가 다소 발생하는 것을 관찰할 수 있으나 배가스 산소농도가 4% 이상이 될 경우 정격 용량의 50% 부분부하 조건에서도 CO의 발생이 15 ppm 이내로 억제되고 있는 것을 볼 수 있다. 한편 NOx의 경우 비예혼합 방식을 채택하면서 DOE의 보고서⁽³⁾에 나타난 30 ppm보다는 높은 60~80 ppm 수준의 NOx가 발생하는 결과를 얻었다.

4. 결론

비예혼합 방식을 채택한 VISTa 버너를 관류보일러에 적용, 연소 특성을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) VISTa 버너의 1단 연소실에 일정 수준 이상의 과농 조건을 형성함으로써 10 ppm 수준의 CO가 발생하지만 NOx 생성을 억제할 수 있다.

(2) 관류보일러 연소실에 해당하는 VISTa 버너의 2단 연소실에 선회기를 통해 2차공기를 공급함으로써 화염을 안정화시켜 CO의 생성은 억제할 수 있었으나 NOx 저감효과가 감소하는 결과를 얻었다.

(3) 실용적인 목적으로 비예혼합 화염을 채택하였으나 NOx 저감효과가 발표된 수준에 미치지 못하여 안전과 사용자 편의를 위한 대책이 마련된 예혼합 방식의 연소기를 현재 개발 중이다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 에너지·자원기술개발 사업에 의해 수행되었고 2010년도 국민대학교 신진교수 연구지원금으로부터 일부를 지원받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Cho, E. S., Sung, Y. J. and Chung, S. H., 2003, "An Experiment on Low NOx Combustion Characteristics in a Multi-Staged Burner," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 27, No. 1, pp. 32~38.
- (2) Chung, J. D., Han, J. W. and Ahn, K. Y., 2004, "An Experimental Study on the NOx Formation of LNG Flame in Fuel Staged Combustor," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 28 No. 4, pp.389~394.
- (3) McClaine A. W., 2000, "Low NOx Burner Development Program," *U.S. DOE Report, DOE/ID/13470-16*.
- (4) Jung, W. S., Hwang, C. H., Lee, G. Y and Lee, C. E., 2004, "The Combustion Characteristics of a New Cyclone Jet Hybrid Combustor for Low Pollutant Emission and High Flame Stability," *Trans. of KSME (B)*, Vol. 28, No. 2, pp. 146~153.
- (5) Ahn, J., Kim, J. J. and Kang, S. B., 2009, "Combustion Characteristics of a Staged Burner for

- a Boiler," *Trans. of KSME (B)*, Vol. 33, No. 10, to appear.
- (6) Park, S. W., Jeon, B. I., Yu, T. U. and Hwang, J. H., 2006, "Effect of Swirling Flow by Normal Injection of Secondary Air on the Gas Residence Time and Mixing Characteristics in a Combustor," *Trans. of KSME (B)*, Vol. 30, No. 1, pp. 48~56.
- (7) Kim, J. H., Lee, H. Y., Hwang, C. H. and Lee, C. E., 2008, "NO_x and CO Emission Characteristics of Premixed Oxidizer-staging Combustor Using a Cyclone Flow," *Trans. of KOSCO*, Vol. 13, No.2, pp. 7~13.