

관류보일러에서 화염분할 VISTa 버너의 연소특성

안 준*† · 김혁주** · 최규성**

* 국민대학교 기계시스템공학부, ** 한국에너지기술연구원

Combustion Characteristics of a VISTa Burner Dividing Flame in a 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 September 5, 2011 ; Revised January 26, 2012 ; Accepted January 26, 2012)

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

초록: 본 연구에서는 VISTa (Vortex Inertial Staged Air) 버너를 개조하여 관류보일러에 적용하였다. 2차 공기를 노즐을 통해 공급하던 원형과 달리 선회기를 통해 공급함으로써 화염을 안정화하고 일산화탄소(CO)의 발생량을 저감하였다. 그러나, 이러한 개조과정에서 질소산화물(NOx)의 발생이 증가하는 문제가 발생하였다. CO와 NOx 발생량을 함께 제어하기 위하여 본 연구에서는 화염분할을 적용하였다. VISTa 버너는 2개의 연소실이 있고 각각의 연소실에 공급되는 공기량을 댐퍼로 조절하며 3가지 종류의 화염분할 장치를 설계, 장착하여 공기비, 연소부하에 따른 연소 특성을 파악하였다. 화염분할을 통하여 CO 농도 증가는 10 ppm 이내로 유지하면서 NOx의 발생량은 25%까지 저감하는 결과를 얻었다.

Abstract: A modified VISTa (Vortex Inertial Staged Air) burner has been developed and applied to a once-through type boiler. The secondary air is supplied through a swirler instead of nozzles, which stabilizes the flame and reduces carbon monoxide (CO) emissions. However, the modification increases the emission of nitrogen oxides (NOx). To balance emissions of the two pollutants, a divided flame was adopted. An air damper was installed to control the distribution of air to each combustion chamber, and three types of flame dividers were studied. The effects of the air-fuel ratio and combustion load on the NOx formation were investigated. The divided flame was found to reduce the NOx emission up to 25%, while keeping the CO to less than 10 ppm.

1. 서론

최근 연소 과정에서 생성되는 질소산화물(NOx)의 유해성이 심각하게 인식되면서 연소 설비에서 배출량에 대한 규제가 강화되고 있다. 우리나라는 최근 수도권 대기환경 개선사업의 일환으로 NOx의 농도를 60 ppm 이하로 제한하면서 저 NOx 버너의 기술 자립이 시급해지고 있다. 연소 설비에서 발생하는 질소산화물은 연소 과정에서 발생을 억제하거나 후처리를 통해 제거하게 된다. 연소 과정에서 발생하는 NOx를 억제하는 방

법으로는 다단(Staged) 연소, 배가스 재순환 등이 있다.⁽¹⁾ 이러한 기술들은 배가스를 후처리하여 NOx를 제거하는 방식에 비하여 추가 비용은 적지만 NOx 발생량을 20~50%정도만 저감할 수 있고 경우에 따라서는 시스템의 열효율을 저해하는 문제점을 안고 있다.^(1~4)

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.⁽²⁾ 하나의 유동 방향 단면에서 과농 영역과 희박 영역을 형성하게 하는 기존의 다단 연소^(1,2)와 달리 VISTa 버너는 2개의 연소실을 직렬로 연결하여 각각 과농

† Corresponding Author, jahn@kookmin.ac.kr

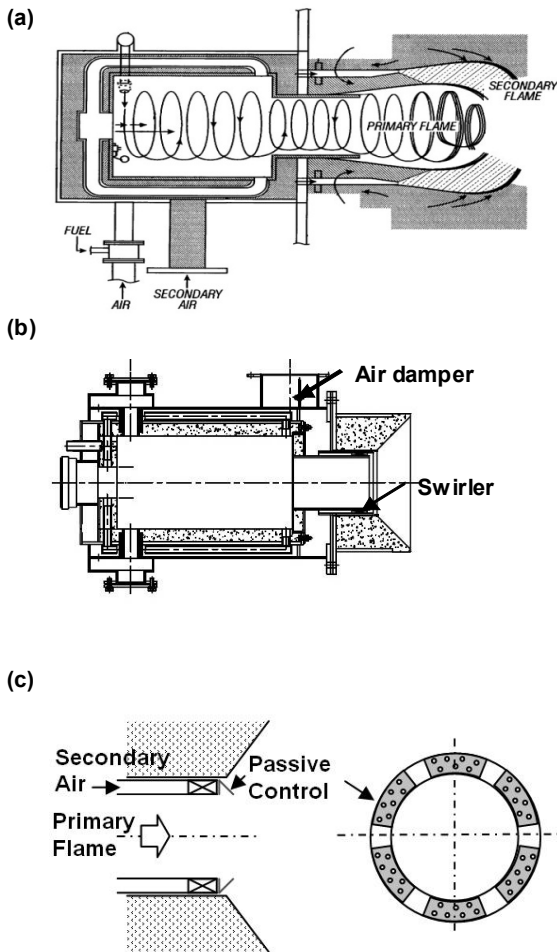


Fig. 1 VISTa Burner, (a) original concept⁽³⁾, (b) streamwise cross section of the present burner, (c) flame divider

및 희박 연소가 이루어지도록 고안되었다(Fig. 1(a)). 상류 측에 위치한 1단 연소실에서는 접선 방향으로 설치된 포트를 통해 예혼합 가스를 공급하여 선회류를 발생시킴으로써 혼합을 촉진함과 동시에 반경방향으로 발생하는 압력구배를 이용하여 연소가스 재순환이 이루어지도록 하고 있다.

본 과제는 2년에 걸쳐 VISTa 버너를 보일러 연소실에 적용하여 전체적인 시스템의 열효율을 확보하면서 보일러 연소실의 연소 조건에서 NOx 및 CO의 배출을 최소화하는 것을 목표로 하였고 제작 및 사용 편의성도 함께 고려하여 연구를 진행하였다. 버너 단독 실험을 수행한 선행 연구를 통해 2차공기를 노즐을 통해 공급할 경우 연소 안정성을 확보하기 어려운 문제점이 제시되었고 이를 선회기를 통해 공급하여 해결한 바 있다.⁽⁵⁾

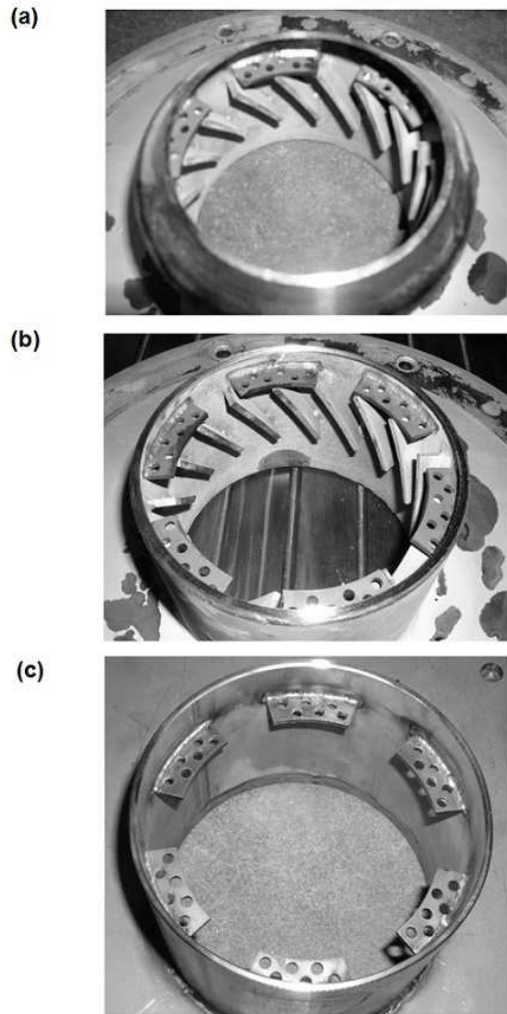


Fig. 2 Flame dividers, (a) long guide vane with swirler (control 1), (b) short guide vane with swirler (control 2), (c) without guide vane and swirler (control 3)

보일러에 적용할 때는 이러한 선행 연구결과를 반영하고 안전성 및 사용편의성을 위해 비예혼합 연소를 도입하여 첫 번째 시제품을 제작하였다.⁽⁶⁾ 성능 평가 결과 NOx 저감량이 기대에 미치지 못하였고 예혼합 방식으로 환원하여 추가적인 NOx 저감을 달성한 바 있다.⁽⁷⁾

연구에서는 예혼합 방식을 도입하여 CO 발생을 억제한 점을 최대한 활용하여 화염 분할을 기본 개념으로 한 연소 제어를 통해 추가적인 NOx 저감을 시도하였다. 연소 제어를 위하여 2차 공기 공급 출구에 부분 차폐판을 설치하였다. 부분 차폐판은 Fig. 2와 같이 3가지 형상을 시도하였고 각각의 차폐판에 대하여 연소 특성을 파악하였다.

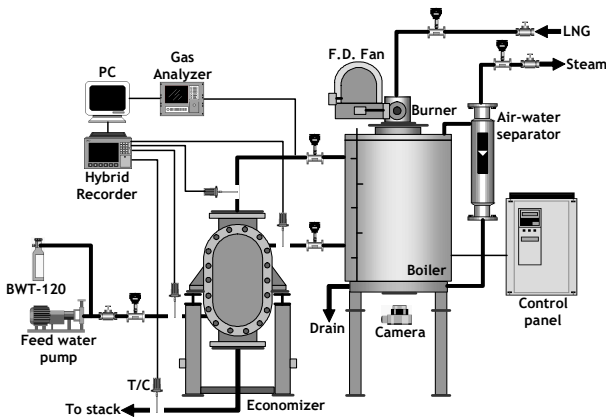


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 VISTa 버너의 설계 인자에 따른 연소 특성 결과를 바탕으로 설계한^(4,5) 버너를 기반으로 실험장치를 구성하였다. 기존의 VISTa 버너(Fig. 1(a))에 대하여 모형 버너에 대한 예비 실험 결과와 사용 편의성을 고려하여 2차 공기 공급 부분을 주로 수정하였다. 즉, Fig. 1(b)의 도면과 같이 1, 2차 공기는 댐퍼(Air damper)에 의해 분배하고 2차 공기는 선회기(Swirlor)를 통해 연소실로 공급한다.

2차 공기 공급 출구에는 Fig. 2와 같이 화염 분할을 위한 부분 차폐판(Flame divider)을 설치한다. 부분 차폐판의 1/3은 개방되어 있고 2/3는 다공판이 설치된 구조로 차폐판의 하류 방향으로 45° 각도의 원주 방향 가이드 베인을 설치하였다. 원주 방향 가이드 베인은 세 가지 형상을 시도하였다. 가이드 베인의 그림자가 2차 공기 공급부를 모두 덮는 경우(Control 1), Control 1의 1/2 길이인 경우(Control 2) 그리고 가이드 베인 및 선회기를 제거한 경우(Control 3)에 대하여 연소 특성을 파악하였다.

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 LNG 20 Nm³/h로 설계되었으며 2단 연소실이 이어지는 보일러는 연소용량에 적합한 관류방식의 보일러를 선택하였다

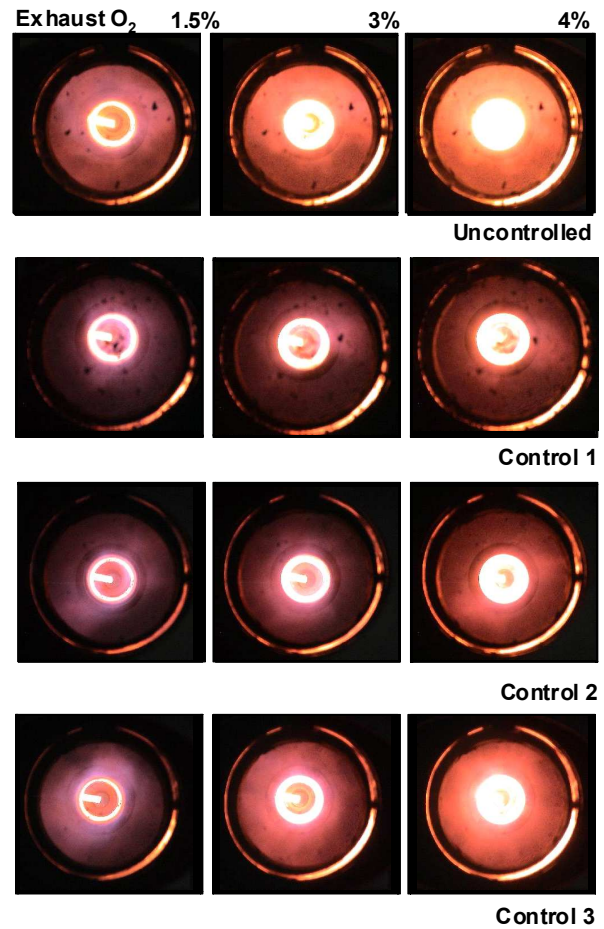


Fig. 4 Change of the flame image according to the flame dividers

(Fig. 3).

관류 보일러는 증발관이 수직으로 설치되고 버너가 보일러 상단에 장착되므로 반대편에 석영소재의 관측창을 설치하고 바닥에서 높여 설치하여 화염형상을 촬영할 수 있도록 하였다. 급수량, 보일러 출구 및 절탄기 출구 온도를 측정하여 보일러의 효율을 구할 수 있도록 하였다. 1단 연소실과 2단 연소실에서 연소 가스를 실시간으로 성분을 분석하면서 운전 조건을 조절할 수 있도록 실험장치를 구성하였다.

3. 결과 및 분석

부분 차폐판 설치에 따른 화염 형상을 비교해보면(Fig. 4), 1차 연소실이 위치한 중심부에 공통적으로 고리 형태의 백색광에 가까운 화염이 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 이는 VISTa 버너에 예혼합 연소를 채택했을 때의 특징으로서⁽⁷⁾

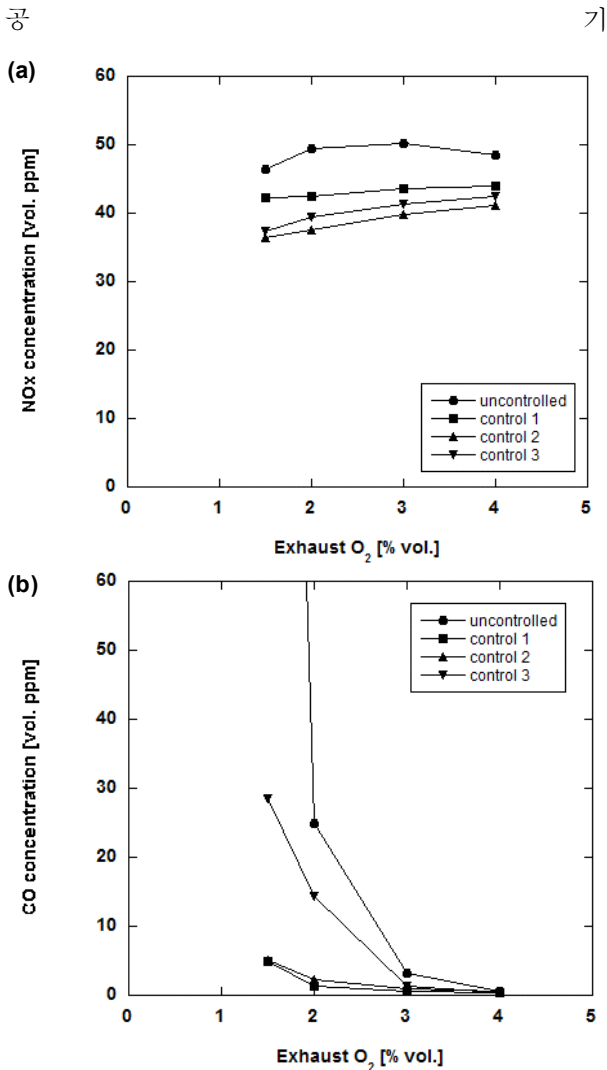


Fig. 5 Effects of flame dividers on the NOx and CO emissions

비가 증가할수록 휘도가 증가하면서 1차 연소실 벽면에서 중심부로 화염 영역이 확대되는 경향을 보인다.

바깥쪽으로 보이는 2차 연소실에는 청염(靑炎)이 형성되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 2차 연소실 측의 경우 공기비가 증가할수록 버너 타일이 적열되는 현상을 볼 수 있다. 화염 분할을 위한 부분 차폐판을 설치한 경우에는 정확하게 화염이 분할되는 형상은 관찰하기 어렵지만 2차 연소실의 휘도가 낮은 배가스 산소농도 1.5%나 2%의 경우 원주 방향으로 휘도의 차이가 생기는 것을 볼 수 있다. 특히 선회기를 제거한 Control 3의 경우 휘도 차이가 상대적으로 잘 나타난다.

배가스에 포함된 NOx의 농도를 보면(Fig. 5(a)), 부분 차폐판을 설치한 경우 전체적으로 NOx의

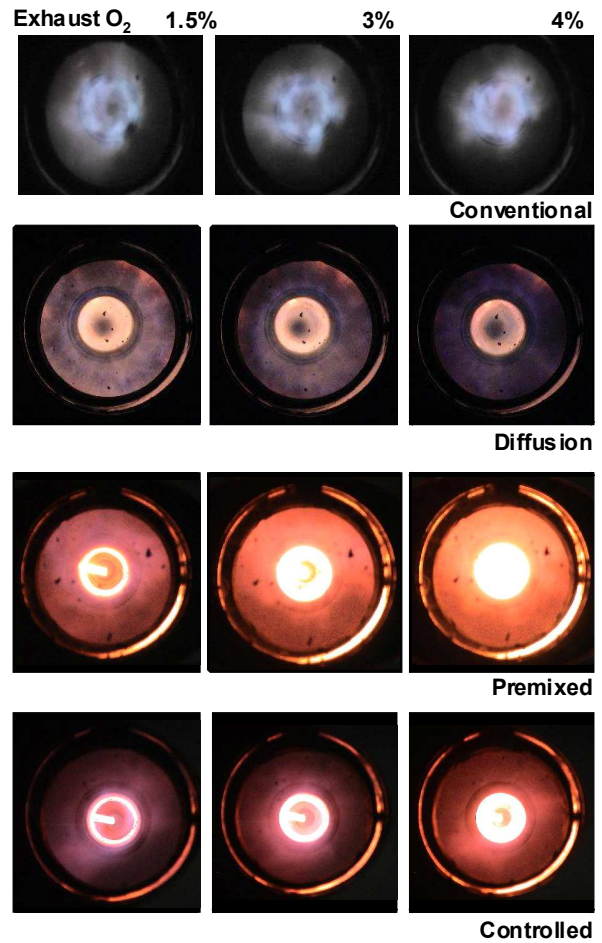


Fig. 6 Change of the flame image according to the revision of the burner

없는 경우에 비해 공기비에 따라 최대 25%까지 NOx 발생량을 저감하였고 세 가지 차폐판 형상 중에서 짧은 가이드 베인을 채택한 Control 2의 경우 NOx 저감 효과가 가장 크게 나타났다.

부분 차폐판을 이용하여 화염을 분할할 경우 연소가 불안정해지면서 CO가 증가할 우려가 있었으나 전체적으로 공기비가 낮은 경우를 중심으로 차폐판이 없는 경우에 비해 CO도 저감한 결과를 얻었다. 선회기가 있는 경우에는(Control 1, 2) CO를 크게 절감하였고 선회기가 없는 경우에도(Control 3) CO는 절감되었다. 이는 차폐판이 화염을 잡아주는 역할을 하여 화염의 안정성이 향상된 결과로 보인다.

본 과제를 통해 관류 보일러의 연소실 조건에서 VISTA 버너의 개선 과정을 Fig. 6 및 Fig. 7에 제시하였다. 버너의 개선 과정은 세 단계로 진행되었다. 기존 관류 보일러에는 외산(日, 코로나

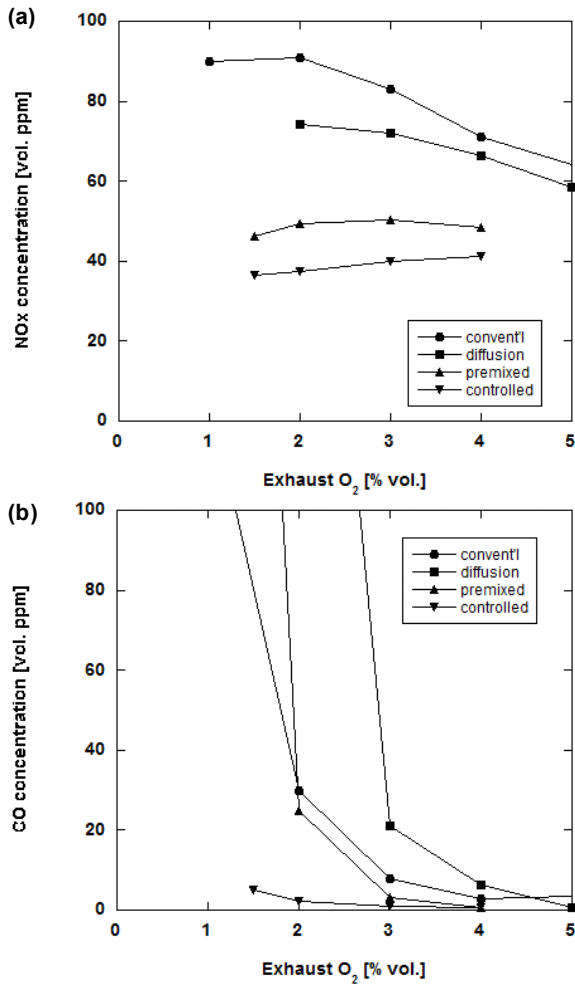


Fig. 7 Effects of the revision of the burner on the NOx and CO emission

社) 버너가 장착되어 공급되었고(Conventional), 먼저 사용 편의와 안전을 위해 비예혼합 연소를 적용한 VISTa 버너 (Diffusion)가 시도되었다.⁽⁶⁾ 비예혼합 방식의 NOx 저감량이 기대에 미치지 못하여 예혼합 연소방식(Premixed)으로 복원하여 NOx 배출을 줄였고,⁽⁷⁾ 마지막으로 본 연구에서는 화염분할(Controlled)을 통해 추가적인 NOx 저감을 이루었다.

화염 형상의 경우(Fig. 6), 기존의 버너는 하나의 화염면에 푸른색 분할화염을 이루는 모습을 보인다. VISTa 버너의 경우 1단 연소실에 백색광에 가까운 화염이 2단 연소실에 푸른색 화염이 형성되고 예혼합의 경우 1단 연소실 화염이 연소실 벽면에 보다 집중되는 형태를 보인다. 부분차폐판을 설치한 경우(Controlled)에 화염 형태는 뚜렷한 변화를 찾아보기는 어렵다.

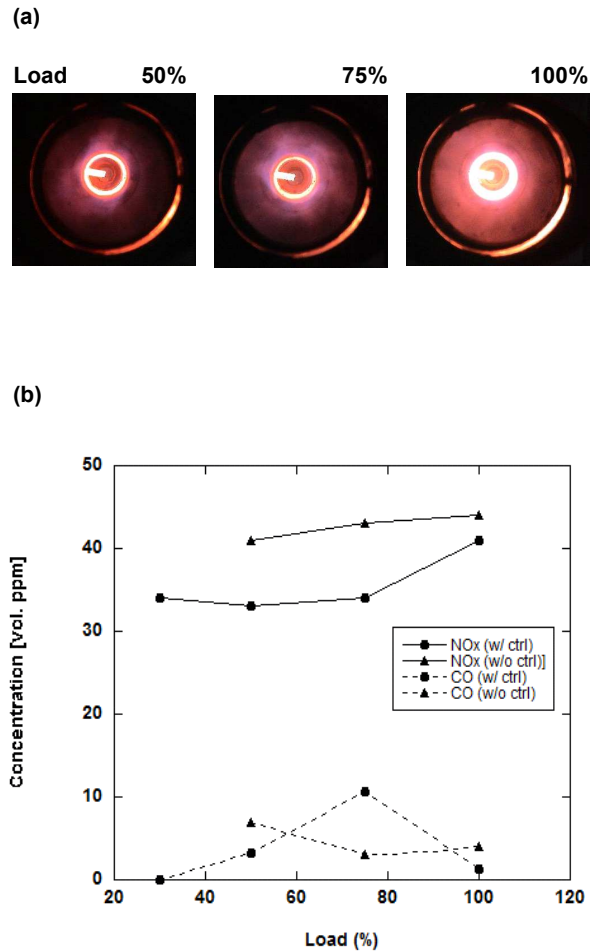


Fig. 8 Effects of the combustion load at the exhaust O₂ of 3%, (a) flame images, (b) NOx and CO emissions

버너의 개선 과정을 통한 NOx 저감 성능을 보면(Fig. 7(a)), VISTa 버너에 비예혼합 방식을 적용할 경우 NOx 저감 효과는 20% 수준에 머물지만 예혼합 연소를 적용하고 부분차폐판을 도입함에 따라 NOx 발생량을 60% 가까이 저감하는 결과를 얻었다. CO의 경우(Fig. 7(b)), 2차 공기를 선회기를 통해 공급하면서 크게 증가하는 것을 막을 수 있었고 예혼합 방식의 경우 특히 부분차폐판을 도입한 경우에 기존 버너에 비해 CO의 양이 크게 줄어드는 성능을 보인다.

선회기를 제거한 Control 3에 대하여 부분부하 실험을 수행한 결과를 Fig. 8에 제시하였다. 화염 형상의 경우(Fig. 8(a)), 전체적인 형상은 유사하지만 부하율이 증가함에 따라 휘도가 증가하는 특성을 보인다. NOx 농도를 보면 부분부하 조건에서도 설계 조건 이상의 NOx 저감 성능을 보이는 것을

관찰할 수 있다(Fig. 8(b)). CO 배출 농도의 경우 전체적으로 10 ppm 이내의 낮은 수준을 나타낸다.

4. 결 론

선회기를 통해 2차 공기를 공급한 VISTa 버너에 추가적인 NO_x 저감을 위해 부분 차폐판을 도입하고 관류보일러에 적용, 연소 특성을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) VISTa 버너에 2차공기를 선회기가 설치된 슬롯(slot)을 통해 공급할 때 부분 차폐판을 설치하여 NO_x 발생량을 25%까지 저감할 수 있다.

(2) VISTa 버너의 2차공기 출구에 부분 차폐판을 설치할 경우 CO 발생량은 크게 증가하지 않았고 공기비가 낮은 경우를 중심으로 감소하는 결과를 얻었다.

(3) VISTa 버너에 설치한 부분 차폐판의 기하형상에 따라 NO_x 저감 성능은 약 10% 정도의 차이를 보여 형상 최적화의 가능성을 보여 주었다.

(4) 부분 차폐판을 설치한 VISTa 버너의 경우 부분 부하에서도 설계 조건 이상의 NO_x 저감 효과를 나타내었다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 에너지·자원기술개발 사업에 의해 수행되었고 교육과학기술부 신진연구지원사업에 의해 일부를 지원받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Ahn, J., Kim, J. J. and Kang, S. B., 2009, "Combustion Characteristics of a Staged Burner for a Boiler," *Trans. KSME B* 33(10), pp. 767~772.
- (2) Kim, H. S., Ahn, K. Y., Baek, S. W. and Yu, M. J., 2001, "Investigation of NO Formation Characteristics in Multi Staged Air Combustor," *Trans. KSME B* 25(11), pp. 1594~1605.
- (3) McClaine A. W., 2000, "Low NO_x Burner Development Program," *U.S. DOE Report, DOE/ID/13470-16*.
- (4) Kim, H. J., 2008, "High Efficiency VISTa /Catalytic Burner Development," *KEMCO Final Report*.
- (5) 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. KOSCO* 13(2), pp. 7~13.
- (6) Ahn, J., Kim, H. J. and Choi, K. S., 2010, "Combustion Characteristics of a VISTa Burner in an Once-Through Type Boiler," *Trans. of the KSME B* 34(5), pp. 547~552.
- (7) Ahn, J., Kim, H. J. and Choi, K. S., 2008, "Premixed VISTa Burner for an Once-Through Type Boiler," *Proc. SAREK 2008 Winter Annual Meeting*, pp. 1013~1018.