

## 관류보일러를 위한 예혼합 VISTa 버너 개발

안 준<sup>†</sup>, 김 혁 주, 최 규 성

한국에너지기술연구원

### Premixed VISTa Burner for an Once-Through Type Boiler

Joon Ahn<sup>†</sup>, Hyouck Ju Kim, Kyu Sung Choi

**ABSTRACT:** Vortex Inertial Staged Air (VISTa) burner for an once-through type boiler has been restored to the original premixed type to reduce nitrogen oxide (NOx) emission. The premixed version yields additional de-NOx effect by 20 ppm. The flame is formed closer to the wall at the 1st stage combustion chamber compared with the non-premixed one. The combustion characteristics are more sensitive to the air distribution for the premixed type, which necessitates proper optimization.

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

#### 1. 서 론

연소 과정에서 발생하는 질소산화물(NOx)은 인체와 대기환경에 주는 유해성이 알려지면서 배출이 규제되고 있다. 우리나라는 최근 수도권 대기환경 개선사업의 일환으로 NOx의 농도를 60 ppm 이내로 제한하면서 저 NOx 버너의 기술자립이 시급해지고 있다. 산업용 버너에서 NOx 생성을 억제하는 대표적인 방법은 다단(Staged) 연소, 배가스 재순환 (EGR: exhaust gas recirculation) 연소 등이 있다. 이러한 기술 들은 배가스를 후처리하여 NOx를 제거하는 방식에 비해 추가 비용은 적지만 NOx 발생량의 20~50%정도만 저감할 수 있고 경우에 따라 시스템의 열효율을 저해하는 문제점을 안고 있다.<sup>(1,2)</sup>

1996년에서 2000년까지 4년에 걸쳐 미국 DOE (Department of Energy)의 지원으로 진행된 저 NOx 버너 개발 프로그램의 보고서<sup>(3)</sup>에는

다단연소와 EGR 기법을 조합한 VISTa (Vortex Inertial Staged Air) 버너를 결과물로서 제안하고 있다. 유동방향으로 하나의 단면에서 과농 영역과 희박 영역을 형성하게 하는 기존의 다단 연소<sup>(1,2)</sup>와 달리 VISTa 버너에서는 2개의 연소실을 직렬로 연결하였고 각각 과농 및 희박 연소가 이루어지도록 하였다 (Fig. 1(a)). 상류 측에 위치한 1단 연소실에서는 접선방향으로 설치된 포트를 통해 예혼합 가스를 공급하여 선회류를 발생시킴으로써 혼합을 촉진하여 과농 조건에서 발생한 질소산화물이 환원될 수 있는 환경을 형성한다. 또한 선회류는 반경방향으로 압력구배를 형성하여 연소가스 재순환의 구동력 역할을 하게 된다.

기존에 발표된 VISTa 버너의 특성을 분석한 결과 예혼합 방식을 채택하여 안전에 우려가 있고 제어해야하는 변수가 많아 실제 활용에 불편함이 따르는 단점을 파악하였다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 비예혼합 방식을 도입하고 1차 연소실 바깥쪽 셀에 설치한 하나의 댐퍼로 연소를 제어하도록 설계를 변경하여 관류보일러에 적용하는 선행 연구를 수행하였다.<sup>(4)</sup> 결과적으로 NOx 저감효과가 DOE의 보고서에 발표된 수준

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-42-860-3328; fax: +82-42-860-3098

E-mail address: jahn@kier.re.kr

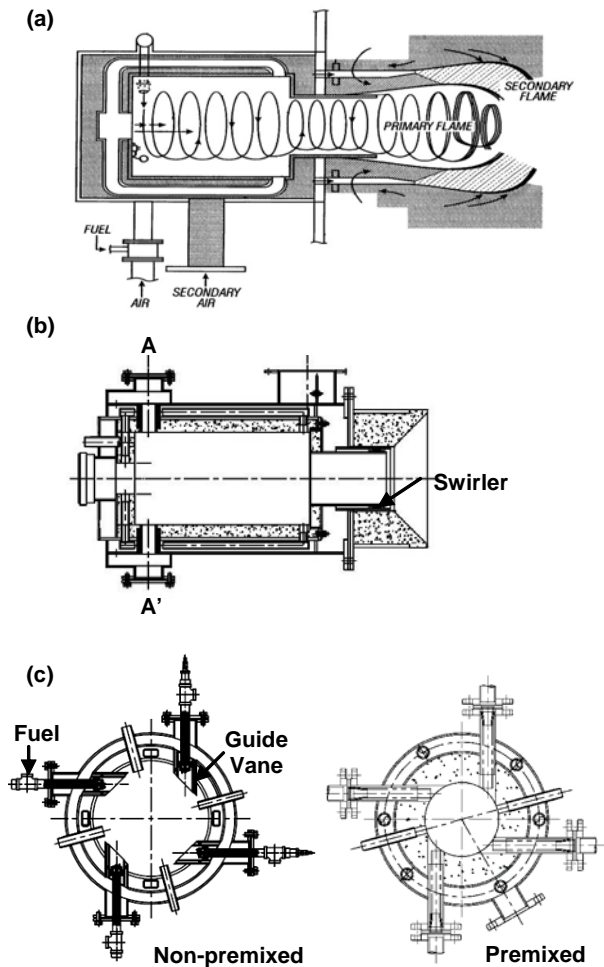


Fig. 1 VISTa (Vortex Inertial Staged Air) Burner; (a) schematic; (b) streamwise cross-section of the burner; (c) air-fuel supply ports

에 미치지 못하여 본 연구에서는 연소 방식을 예혼합 방식으로 복원하여 버너를 새로 제작하여 실험을 수행하였다.

버너를 설계함에 있어서 중횡비를 포함한 연소실의 기하형상, 재순환 유로 형상 등은 비예혼합 실험<sup>(4)</sup>과 마찬가지로 선행 연구<sup>(1)</sup>를 통해 얻은 최적값을 활용하였다. 비예혼합을 예혼합 방식으로 복원하는 과정에서 1단 연소실의 포트 형상은 선행 연구<sup>(1)</sup>의 결과를 따랐다. 이와 같이 예혼합을 복원한 VISTa 버너를 관류 보일러 연소실에 설치하여 상용화를 위한 설계 자료를 확보하기 위하여 배가스 재순환, 총괄 당량비, 1단, 2단으로의 공기 분배, 부분 부하 운전에 따른 특성을 파악하였다.

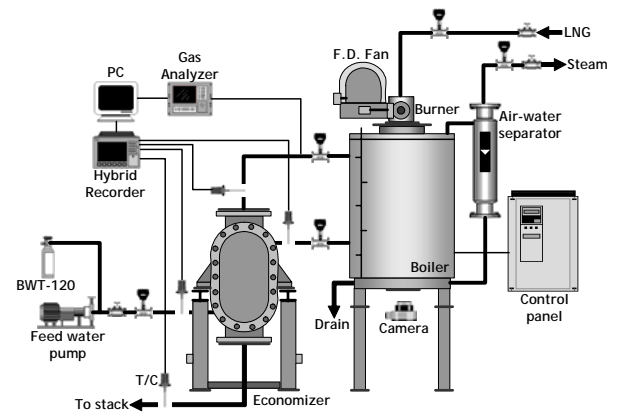


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 함께 수행한 모형실험을 통한 VISTa 버너의 설계 인자에 따른 연소 특성 결과<sup>(1)</sup>를 바탕으로 버너의 크기, 노즐의 직경, EGR 유로 등을 결정하였다. 본 연구에 앞서 Fig. 3(c)의 왼쪽에 제시한 것과 같은 비예혼합 방식을 채택한 버너를 설계, 제작하여 선행 실험을 실시한 바 있다. 본 논문에서는 Fig. 3(c)의 오른쪽과 같이 예혼합 방식으로 복원한 버너를 새로이 설계, 제작하여 관류 보일러의 연소실에서 연소 특성을 파악하였다.

연료는 LNG를 사용하였고 1단 연소실에 공기와 예혼합된 상태로 공급된다. 공기는 1단와 2단 연소실로 분할되어 공급되고 각각의 유량을 밸브로 제어할 수 있도록 설계하였다. 1단 연소실로 공급되는 공기는 바깥쪽 셀에서 열교환을 거친 후 혼합기로 공급되어 연료와 혼합된다. 연소용량은  $20 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 로 설계되었으며 2단 연소실이 이어지는 보일러는 연소용량에 적합한 관류방식의 보일러를 선택하였다 (Fig. 2).

관류보일러는 증발관이 수직으로 설치되고 버너가 보일러의 상단에 설치되므로 화염을 관찰하기 위하여 버너출구 맞은편에 석영 소재의 관측창을 설치하였다. 관측창에서 화염 형상을 촬영하기 위하여 지지대를 설치하여 보일러를 바닥면으로부터 높이고 카메라를 설치하였다. 급수량, 보일러 출구 및 절탄기 출구의 온도를 측정하여 보일러의 효율을 구할 수 있도록 하였고 1단 연

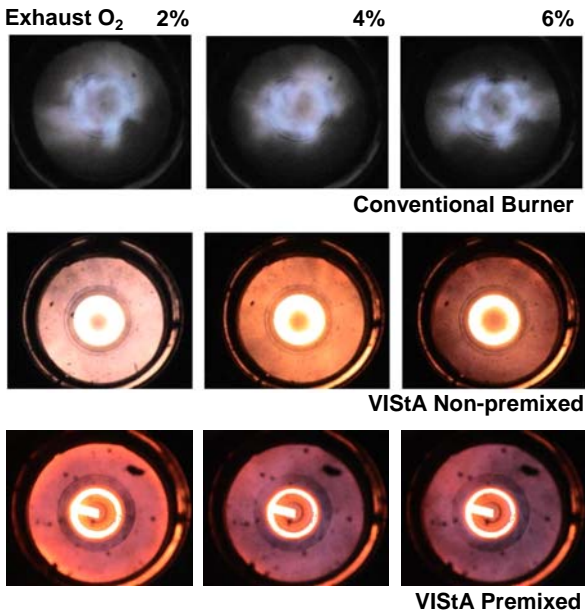


Fig. 3 Change in flame image according to the revision of the burner

소실과 2단 연소실에서 연소 가스를 실시간으로 분석하여 결과를 보면서 운전 조건을 제어하였다.

### 3. 실험결과 및 토의

기존의 버너(日, Corona 社)는 유동방향으로 하나의 화염면에 분할화염을 형성하고 있고 매탄이 주를 이루는 LNG 연료의 특성상 전체적으로 푸른빛을 나타낸다. 본 연구에서 개발한 VISTa 버너의 경우 사진 중심부에 보이는 1단 연소실에서 백색광에 가까운 밝은 화염이 형성되고 사진 바깥쪽의 2단 연소실에서 푸른빛을 띠는 화염이 형성된다. 배가스 산소농도가 증가할수록 1단 연소실의 휘도가 감소하고 2단 연소실의 화염이 푸른색에 가까워진다. 예혼합 화염의 경우 비예혼합이 비해 1단 연소실에서는 화염이 연소실 벽면에 집중되고 2단 연소실에서는 푸른색에 가까워지는 특징을 나타낸다.

VISTa 버너를 채택하면서 얻는 NOx 저감효과 (Fig. 4(a))를 보면 비예혼합 방식의 경우 기존 버너에 비해 공기 덤퍼를 50% 위치에 두었을 때<sup>(4)</sup> NOx를 약 10 ppm 저감하는 결과를 보이고 있다. 예혼합 방식으로 전환한 경우 비예혼합 방

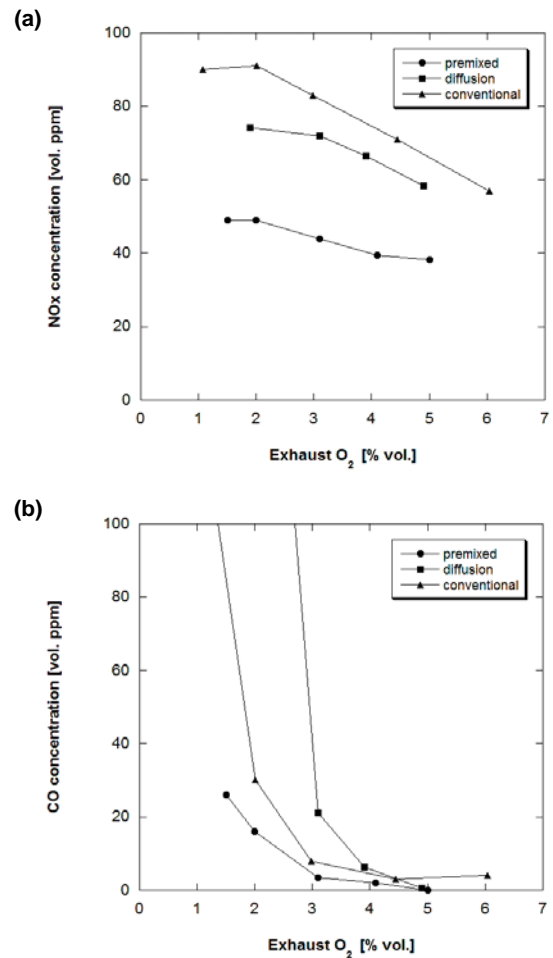


Fig. 4 Effects of the revision of the burner on the NOx and CO emissions

에 비해 추가적으로 약 20 ppm의 NOx를 저감하는 효과를 보여 전체적으로 기존 버너에 비해 약 1/2의 NOx를 저감하는 효과를 얻었다. 일산화탄소 (CO)의 경우 (Fig. 4(b)), 2단 연소실로 공급되는 공기를 선회기를 통해 공급하면서 크게 줄일 수 있었으나 비예혼합 방식에서는 배가스 산소농도가 3%보다 작을 때 다소 발생하는 결과를 보였다. 예혼합으로 전환한 경우에는 공기비가 작은 경우에도 화염이 안정되어 배가스 산소농도가 1.5%인 경우에 CO 발생량이 26 ppm 수준으로 제어되는 특징을 보인다.

1단 연소실에서 배가스를 재순환하는 경우와 그렇지 않은 경우를 비교한 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 화염 형상을 보면 (Fig. 5(a)) 재순환 유로를 차단한 경우 비예혼합 조건과 유사하게 1단 연소실에 휘도가 높은 화염이 형성되는 특성

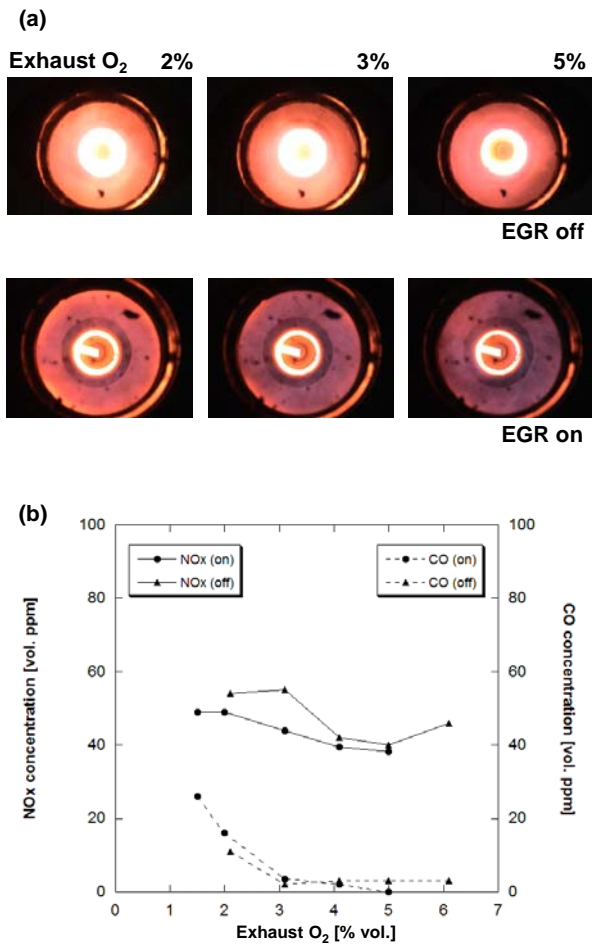


Fig. 5 Effects of EGR (Exhaust Gas Recirculation); (a) Flame images; (b) NOx and CO emission

을 보인다. 재순환 유로를 개방하면 1단 연소실에서 화염이 연소실 벽면 가까이 집중적으로 형성된다. 배가스를 재순환할 경우 최종 배가스 산소농도가 3%가 되는 조건에서 NOx는 최대 10 ppm까지 저감되었고 CO 배출량은 큰 차이를 보이지 않는다.

Figure 6에는 1단 연소실의 조건 (연소 가스 성분 및 온도)가 일정하게 유지되도록 1단으로 공급되는 공기 유로를 조절하면서 공기비를 변화시켰을 때의 연소 특성을 제시하였다. 최종 배가스 산소농도가 증가할수록 2단 측에 형성된 화염이 청염(靑炎)에 가까워지는 특성을 보인다. 배가스에 포함된 NOx 및 CO의 농도는 모두 배가스 산소농도가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. NOx의 경우 배가스 산소농도가 1.5%에서 5%까

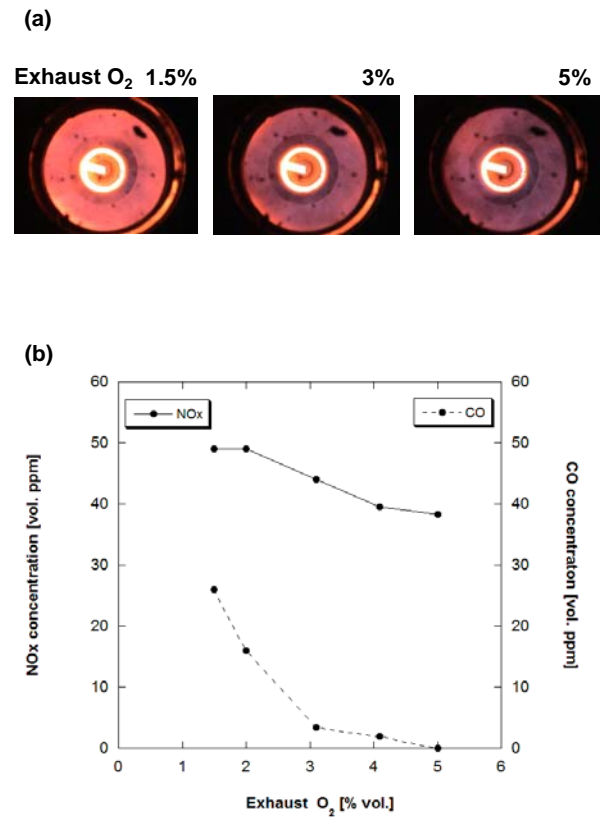


Fig. 6 Effects of the air/fuel ratio while keeping the conditions at the first combustion chamber (a) Flame images; (b) NOx and CO emission

지 증가하는 과정에서 약 15 ppm 감소하고 CO의 경우 배가스 산소농도 1.5% 조건에서 26 ppm의 낮은 수준을 나타낸다.

실제 보일러를 운전할 때 부하율 및 배가스 산소농도가 바뀔 때마다 공기를 공급하는 유로를 조정하는 것은 어려우므로 최적의 운전 조건을 찾아내는 것이 중요하다. Fig. 7에는 배가스 산소농도가 5%인 조건에서 NOx의 발생이 최소화되도록 유로를 조절하고 공기공급량을 조절한 결과를 나타내었다. Fig 7(b)에 보인 바와 같이 배가스 산소농도가 5%일 때 유로 조절을 통해 NOx 발생량을 30 ppm 수준까지 낮출 수 있는 것을 확인하였으나 같은 조건에서 공기 공급량을 배가스 산소농도 3% 이내로 줄일 경우 CO의 발생이 크게 증가하면서 화염이 불안정해지는 현상을 관찰하였다.

공기비 및 유로 조건을 일정하게 유지한 상태에서 부분부하 특성을 보면 (Fig. 8) 비예혼합 방

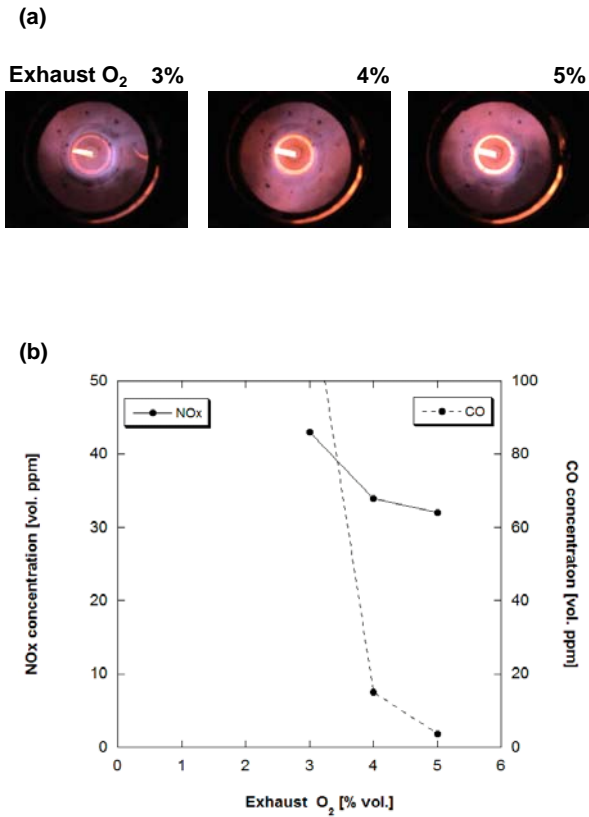


Fig. 7 Effects of the air supply rate while keeping the flow passages; (a) Flame images; (b) NOx and CO emission

식이 2단 연소실에서 화염이 변했던 것<sup>(4)</sup>과 달리 예혼합 방식을 채택한 경우 부하율 50 ~ 100% 범위에서 화염형상은 부하율에 따라 큰 차이를 보이지 않는다. 비예혼합 방식의 경우 부분부하에서 기존 버너에 비해 NOx 저감효과가 뚜렷하지 않았지만 예혼합 방식의 경우 부분부하 조건에서도 20 ppm 이상의 NOx 저감효과를 나타낸다. CO의 경우 비예혼합 방식은 배가스 산소농도 4% 조건에서도 10 ppm 수준의 CO가 검출되었으나 예혼합 방식의 경우 거의 검출되지 않는다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 관류 보일러에 적용한 VISTa 버너의 연소방식을 예혼합 방식으로 복원하여 연소 특성을 관찰하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) VISTa 버너에 예혼합 방식을 사용할 경우

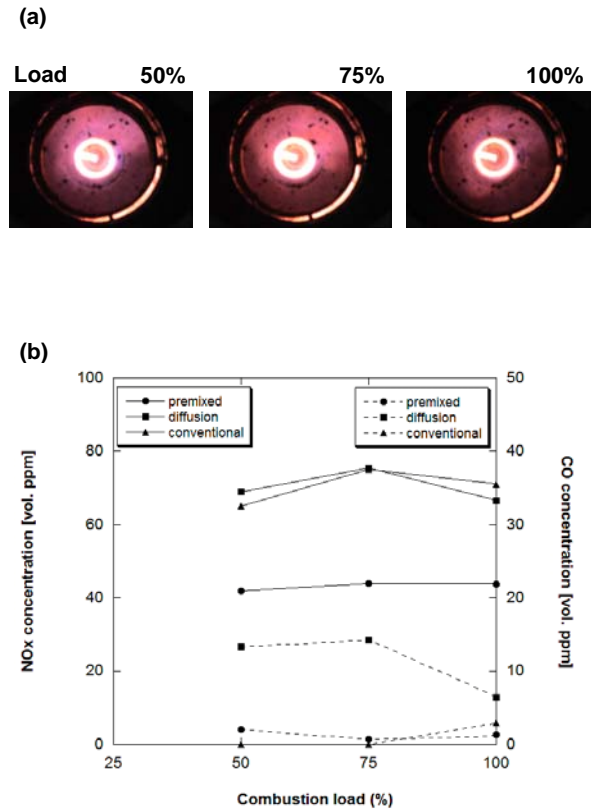


Fig. 8 Effects of the combustion load at the exhaust O<sub>2</sub> of 4%; (a) Flame images; (b) NOx and CO emission

비예혼합 방식을 사용한 경우에 비해 관류 보일러 연소실 조건에서 약 20 ppm 정도 NOx의 발생을 줄일 수 있다.

(2) 예혼합 방식을 채택한 경우 비예혼합 방식에 비해 VISTa 버너의 1단 연소실에서 화염이 연소실 벽면 가까이에 형성되고 2단 연소실의 화염이 푸른색을 띠는 특성을 보인다.

(3) 예혼합 방식의 경우 비예혼합 방식에 비해 VISTa 버너의 1단, 2단 연소실로의 공기 분배가 연소안정성에 민감한 영향을 준다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 에너지·자원 기술개발 사업에 의해 진행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Kim, H. J., 2007, High efficiency VISTa /catalytic burner development, KEMCO Progress Report.
2. Ahn, J., Kim, J. J. and Kang, S. B., 2008, Combustion characteristics of a staged burner for a boiler, Proc. 5th NCFE.
3. McClaine, A. W., 2000, Low NOx burner development program, U.S. DOE report, DOE/ID/13470-16.
4. Ahn, J., Kim, H. J. and Choi, K. S., 2008, Combustion characteristics of a VISTa boiler in an once-through type boiler, Proc. KSME TFE Spring Annual Meeting.