



다중 버너를 채택한 수관식 산업용 보일러 연소실의 열전달 특성

안 준,^{*1} 황 상 순,² 김 종 진,³ 강 새 별³

HEAT TRANSFER ON THE COMBUSTION CHAMBER OF A WATER TUBE TYPE BOILER WITH MULTIPLE BURNERS

J. Ahn,^{*1} S. Hwang,² J.J. Kim³ and S.B. Kang³

Operating medium or large scale industrial boilers in partial load condition, the burner should undergo the off-design points resulting in poor exhaust gas characteristics. To obtain the stable turn down performance, two or more burners can be used for the industrial boiler. In case multiple burners are adopted, the heat transfer can be enhanced by arranging the burners properly. In the present study, numerical simulations have been conducted for the combustion chamber of a 2 t/h class industrial boiler in order to clarify the heat transfer characteristics at the combustion chamber.

Key Words : 관군 (Tube bank), 수관식 보일러 (Water tube boiler), 열전달 (Heat transfer)

1. 서 론

산업용 보일러에는 노통연관식, 관류식, 수관식이 일반적으로 널리 활용되고 있다. 이중 Fig. 1에 형태를 제시한 수관식 보일러는 중대형 보일러에 주로 사용된다. 중대형 보일러는 용량이 증가하는 것과 더불어 버너도 대형화되어 부하 변동에 따른 연소제어가 어려워진다. 즉, 증기수요에 따라 연소 부하를 바꿀 경우 유해 배출물인 CO나 NOx의 발생을 억제하는 데 어려움이 따르게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 1차적으로는 다단연소 등을 채택한 저 NOx 버너를 사용하고 더 나아가 복수의 버너를 도입하여 NOx나 CO의 발생을 엄격하게 제어하며 중대형 보일러 시스템을 구축하는 개념이 제안되었다[1].

다중(Multi) 버너를 도입할 경우 단일 버너에 비해 화염의 길이가 짧아지게 되어 작은 공간에서 효율적으로 증기를 발생시켜야 한다. 따라서 수관의 열전달을 촉진시킬 대책이 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 1(b)와 같이 버너를 상하로 배치

하여 중횡비를 높여 Fin을 설치하기 유리한 형태의 수관식 보일러를 제안하였다.

다단연소 저 NOx 버너를 다중으로 설치한 수관식 보일러를 설계하기 위해서는 연소실 및 수관부의 설계기술을 보완해야 했다. Fin이 설치된 수관부의 경우 열전달을 극대화하고 효과적인 수순환을 구현하기 위하여 유동방향으로 Fin의 높이와 밀도를 변화시킨 모듈을 제안하였다. 유동방향으로 변화하는 Fin의 특성을 고려하기 위하여 기존의 벌크 해석에 의한 열설계 프로그램을 관군에서 열을 따라서 열전달을 계산하도록 보완하고 실험[2,3] 및 수치해석[1]을 통하여 3차원 효과를 파악하였다. 연소실에 대해서는 다단연소 버너를 장착했을 때의 열전달 특성 변화를 수치해석을 통해 예측하고 연소실 설계에 핵심인자가 되는 연소실 출구온도 및 화염층만도를 실험결과와 비교하였다[4].

본 연구에서는 연소실에 대한 선형연구[4]에서 고려하지 못한 다중 버너의 상호작용, 다중 버너를 위한 연소실에서 부분부하 운전할 때의 열전달 특성을 수치해석적으로 파악한다. Fig. 1에 제시한 것과 같이 상하로 설치된 보일러 연소실에 대하여 설계 조건에 대하여 수치해석을 수행하여 실험과 비교한다. 또한 두 버너 모두 50% 부분부하 조건에서 운전할 경우와 위 또는 아래에 설치된 버너 하나만 100% 운전하여 부분부하를 구현할 경우의 열전달 특성을 비교한다.

1 정회원, 한국에너지기술연구원

2 인천대학교

3 한국에너지기술연구원

* Corresponding author, E-mail: jahn@kier.re.kr

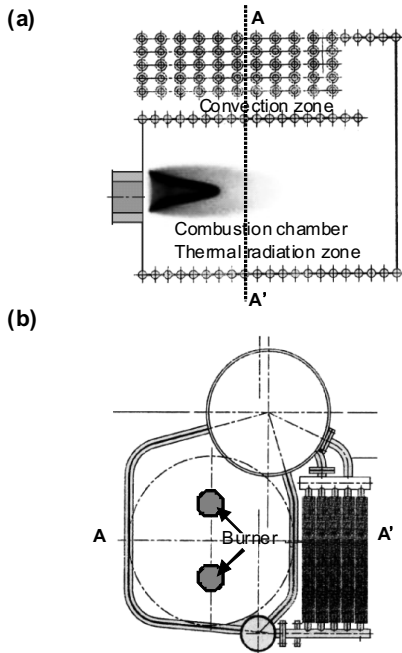


Fig. 1 Water tube type boiler with multiple burners; (a) Streamwise cross-section; (b) Streamwise normal cross-section

2. 수치해석 및 열설계 기법

2.1 시스템 모형화 및 수치해석 기법

본 연구에서 채택한 버너는 NOx 저감을 위해 특별하게 설계된 부분 예혼합 다단 연소 버너로서 Fig. 2(a)와 같은 형상을 갖는다. 중심부로 연료가 공급되고 최외곽 쉘에서 공급된 공기가 중간 쉘에서 혼합되어 연소실로 공급된다. 이와 같은 버너는 Fig. 2(b)와 같이 상하로 연소실에 배치되며 계산영역은 개발 중인 보일러의 설계 도면을 기준으로 연소실 전체로 설정하였다. 격자계는 Fig. 2(b)와 같이 2,500,000개의 사면체로 구성하여 복잡한 기하형상에서의 물리현상을 파악할 수 있도록 하였다.

실험에는 천연가스를 사용하였으나 수치해석에서는 천연가스의 주성분(물분율 약 0.885)을 이루는 메탄(CH₄)을 연료로 설정하였다. 화학종은 메탄-공기 2단계 반응을 해석하였고 난류-화학종간의 상호작용은 EDC 모형으로 고려하였다. 난류모형으로는 표준 k-ε모형을 채택하였다. 사용된 연료량은 부하율 100%의 경우 130 Nm³/h이고 공기비 1.17이 되도록 입구에서 연료와 산화제 유량을 경계조건으로 부과하였다. 복사열전달은 DO(Discrete Ordinate) 복사 모형으로 해석하였다. 벽면의 온도 경계조건은 버너부분은 단열, 연소실 벽면은 보일러의 작동압력인 7기압의 포화온도인 458 K를 부여하였다.

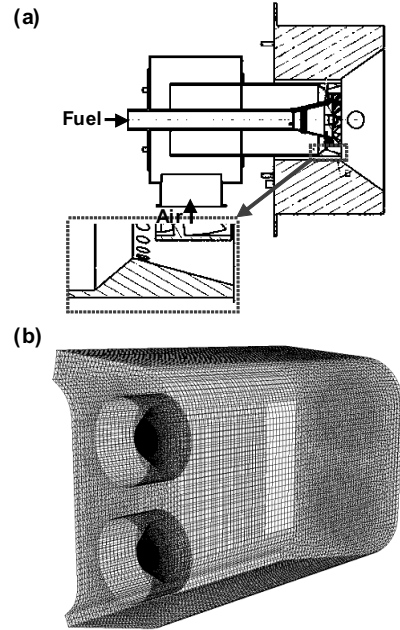


Fig. 2 Modeling of the combustion chamber of the boiler ; (a) Burner for the present study; (b) Computational domain

2.2 보일러 연소실의 열설계

보일러 설계 과정에서 연소실은 연소실 벽면을 회체로 가정하고 화염면과 연소실 벽면 사이에 표면복사가 이루어지고 있는 것으로 식 (1)과 같이 모형화하여 설계한다[2].

$$Q_F = \phi_F \sigma A_F \left[\left(\frac{T_F}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_W}{100} \right)^4 \right] \quad (1)$$

식 (1)에서 ϕ_F 는 화염 및 연소실 벽면의 방사율, 화염층만도로부터 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\phi_F = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_F} + \frac{A_F}{A_W} \left(\frac{1}{\epsilon_W \phi_W} - 1 \right)} \quad (2)$$

위 식에서 화염의 층만도는 식 (3)과 같이 연소실에서 단위 부피당 흡수되는 열량 q (kcal/h · m³)로부터 구해진다.

$$\frac{A_F}{A_W} = 0.1325 \ln \frac{q}{10^4} - 0.117 \quad (3)$$

식 (1)의 화염온도와 식 (3)의 흡수 열량을 맞추는 반복계산을 통해 연소실 출구온도 및 화염층만도가 얻어진다.

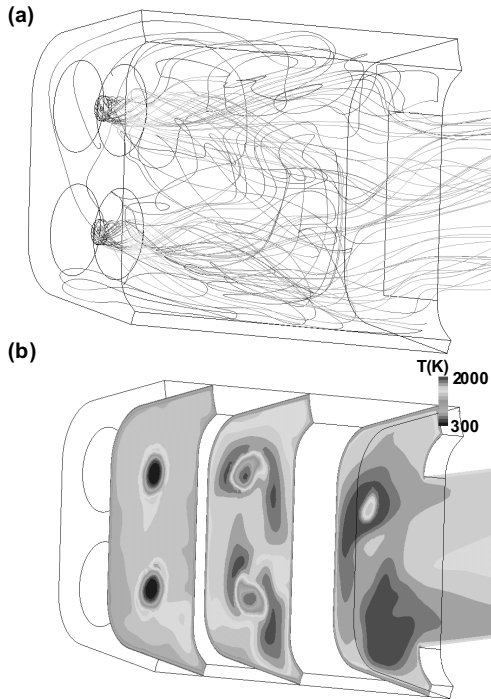


Fig. 3 Flow and thermal fields inside the combustion chamber at the design condition; (a) Path line; (b) Temperature field

3. 결과 및 토의

3.1 설계조건에서의 유동 및 열전달 특성

수치해석을 통해 구한 연소실 내부의 유적선(Path line)분포를 보면 버너 출구 부근에서는 버너로부터 선회류를 포함한 제트 유동을 확인할 수 있다. 하류로 진행하면서 화학반응이 진행되어 부피가 증가하고 전단층에서의 확산이 동반되어 상하 버너로부터의 유동의 상호작용이 나타난다. 이와같은 상호작용으로 연소실 출구에서는 거의 합쳐진 유동형태로 증발관이 설치된 대류부에 공급되게 된다.

유동방향에 수직인 평면에서 구한 온도장을 보면 (Fig. 3(b)), 두 버너에서 발생한 유동의 상호작용이 약한 상류에서는 반응이 일어나지 않은 CH_4 를 중심으로 2개의 저온영역이 뚜렷이 나타나 있다. 연소실 중심부에서는 연료 주위에 화염으로 형성된 고온영역이 보인다. 선회류와 벽면의 상호작용 및 두 화염간의 상호작용으로 위 아래에 형성된 온도분포가 차이를 보이고 있다. 연소실 출구 부근의 하류에서는 고온 영역이 병합된 형태를 관찰할 수 있다.

Fig. 4에는 연료인 CH_4 와 연소 생성물인 CO의 화학종 분포를 제시하였다. 연료의 경우 상하의 버너 출구로부터 각각 제트의 형태로 분포한다. 하류로 진행하면 연소가 이루어지면

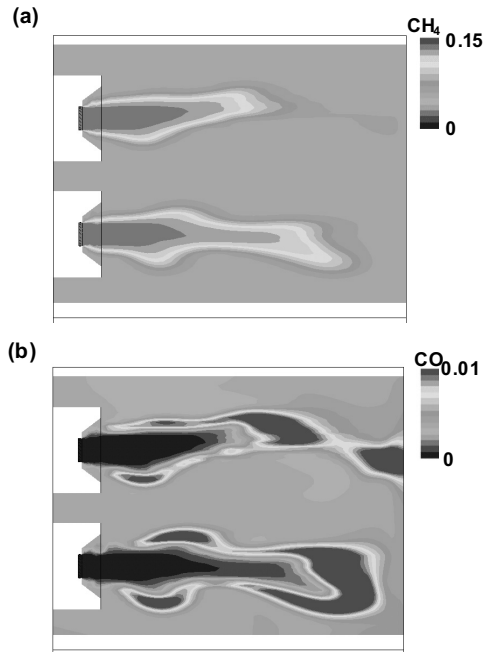


Fig. 4 Species distribution inside the combustion chamber; (a) molar concentration of CH_4 ; (b) molar concentration of CO

서 농도가 감소하고 벽면 및 두 화염의 상호작용으로 상하의 농도 분포 형태에 차이가 생긴다. CO의 경우 화염면 부근에 집중적으로 분포하며 하류로 갈수록 생성영역이 넓게 분포한다.

3.2 부분부하 운전에 따른 유동 및 열전달 특성

보일러의 부분부하 운전 조건에서 일부 버너만을 활용함으로써 연소 안정성을 확보하는 것이 다중 버너를 도입한 중요한 목적 중 하나이다. 2개의 버너 중 하나의 버너만을 이용하여 50%이하의 부분부하 운전을 구현할 경우 버너를 설계 조건에 가깝게 운전함으로써 연소 안정성을 확보하기 용이할 것으로 예상되나 열원이 연소실의 일부분에 집중되어 효과적인 열전달이 이루어질 수 있는지에 대해서는 검증이 필요하다. 이에 본 연구에서는 부분부하 운전의 경우 부하율 50%에 대하여 대표적인 3가지 운전방식을 관찰하였다. 즉, 상단에 설치한 버너만을 운전하는 경우 (Case A), 하단에 설치한 버너만을 운전하는 경우 (Case B) 그리고 상하에 설치된 각각의 버너를 50%로 운전하는 경우 (Case C)에 대하여 수치해석을 수행하였다.

부분부하 운전 조건에서의 유동장을 설계조건에서 운전할 때와 비교하여 Fig. 5 및 Fig. 6에 제시하였다. 설계조건의 경

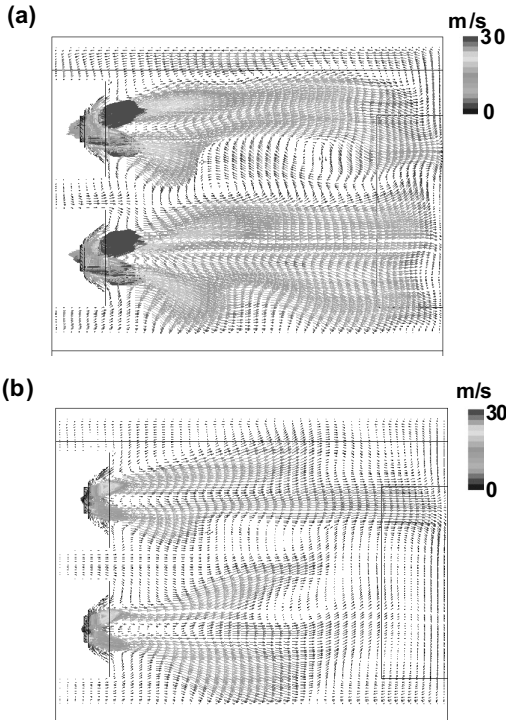


Fig. 5 Velocity vectors inside the combustion chamber; (a) Design operation; (b) 50% partial load operation

우 (Fig. 5(a)), 각각의 버너에서 출발한 선회류를 동반한 제트가 연소실 대부분의 영역에서 유동 구조를 유지하며 두 제트 유동 사이에 한 쌍의 반대방향으로 회전하는 재순환 영역을 관찰할 수 있다. 각각의 버너의 운전 부하를 50%로 줄이면 (Fig. 5(b)), 화염사이의 상호작용은 상대적으로 약해지고 유동 방향으로 연소실 중간 부분을 지나면서 제트의 형태를 잃어 가는 현상을 관찰할 수 있다.

두 버너 중에 하나의 버너만을 가동함으로써 50% 부분부하를 구현한 경우에는 (Fig. 6), 작동하지 않은 버너 출구 뒤 쪽으로 재순환 영역이 형성된다. 선회류의 방향에 따라 벽면과의 상호작용이 달라지면서 상단의 버너를 작동한 경우와 하단의 버너를 작동한 경우에 다른 형태의 재순환 유동 구조가 나타난다. 상단의 버너만을 작동시킨 경우 제트 유동 아래 쪽으로 하나의 큰 재순환 영역이 발생하여 제트의 궤적을 아래쪽으로 이동시키고 있다. 하단의 버너를 작동한 경우에는 상단에 여러 개의 재순환 와류가 발생하고 제트는 하류로 진행하면서 반경방향으로 확산되는 형태를 보인다.

설계 조건에서 연소실 내부에서의 온도분포를 보면 (Fig. 7(a)) 고온 영역이 연소실 하류에 넓게 분포하는 것을 볼 수 있다. 연소실의 설계 화염충만도는 약 0.3으로 수치해석 결과

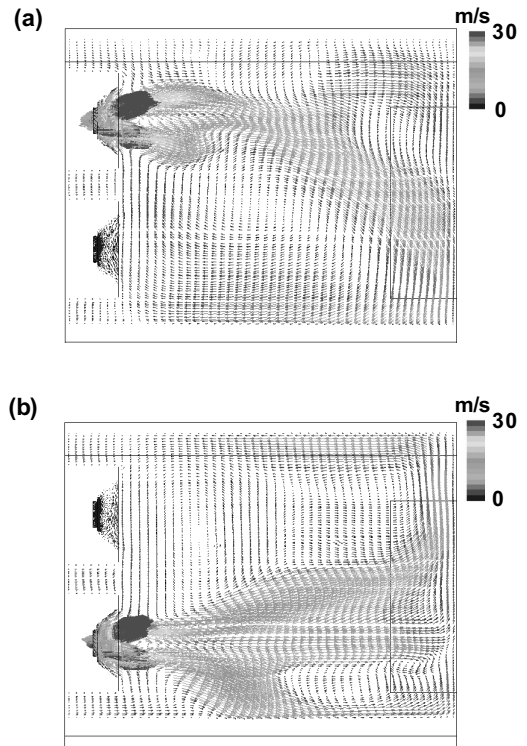


Fig. 6 Velocity vectors for the partial load condition by operating one of two burners; (a) Upper burner on; (b) Lower burner on

가 설계보다 화염충만도를 높게 예측하고 있다. 이는 표준 $k-\epsilon$ 모형을 채택한 RANS 기반의 수치해석이 제트를 기준으로 반경방향의 혼합 및 확산을 작게 예측했기 때문인 것으로 보인다. 두 대의 버너를 모두 부하율 50%로 가동한 경우 (Fig. 7(b))에도 상류에 형성되는 저온영역의 면적은 운전 조건에 비해 크게 줄어들지 않은 결과를 보인다. 고온 영역의 면적이 감소하기는 했지만 최고 화염온도도 부하율 100%인 경우에 근접한 값을 나타낸다.

상단 또는 하단 하나의 버너만을 작동한 경우에는 두 버너를 모두 사용한 경우에 비해 화염 온도가 낮아진 것을 관찰할 수 있다 (Fig. 8). 또한 두 버너를 모두 사용한 경우에 비해 고온 영역이 하류 쪽에 집중되는 경향도 보인다. 버너가 상단에 위치한 경우 재순환 영역으로 일부 고온의 연소 가스가 유입되면서 상대적으로 연소실 체적을 효과적으로 활용하고 있는 것을 볼 수 있다.

3.3 부분부하 조건에서의 열설계 및 화염 안정성

연소실을 설계할 때는 2.2에 제시한 것과 같이 화염의 안

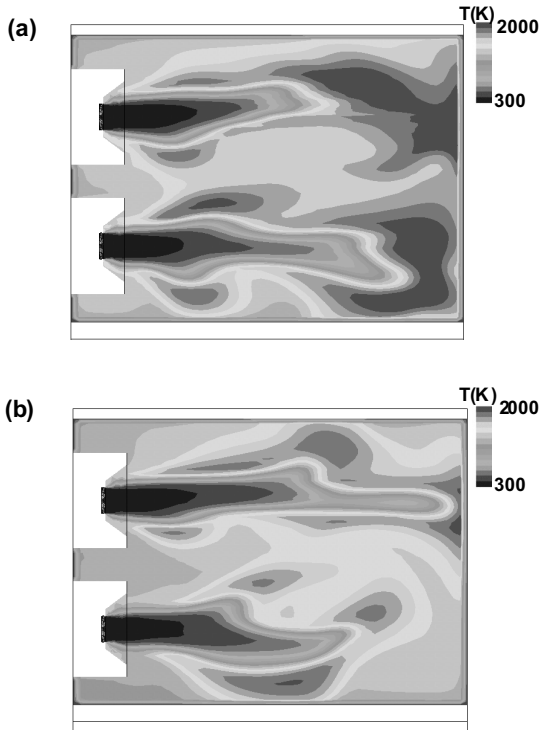


Fig. 7 Temperature distribution inside the combustion chamber; (a) Design operation; (b) 50% partial load operation

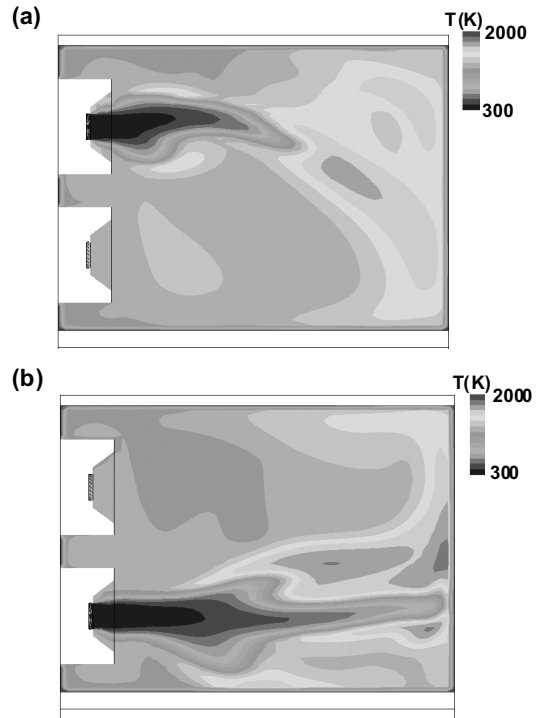


Fig. 8 Temperature fields for the partial load condition by operating one of two burners; (a) Upper burner on; (b) Lower burner on

정성을 확보하면서 적정 열량이 흡수되도록 체적을 산정한다. 앞서 제시한 열설계 과정에서 예측한 연소실 흡수 열량과 수치해석을 통해 계산한 흡수 열량을 Fig. 9에 비교하였다. 설계 값에 비교해서 수치해석 결과가 설계 조건에서는 더 높게 부분부하 조건에서는 더 낮은 것을 볼 수 있다 (Fig. 9(a)). 이와 같은 차이는 LNG와 CH₄의 발열량 차이, 연소실의 기하형상 수치해석 모형의 오차 등이 복합적으로 작용한 결과이다 설계 과정에서 반영하지 못한 연소실의 기하형상은 수치해석에 반영되었다. 수치해석 결과 부분부하 해석을 수행한 3가지 경우 연소실 흡수열량은 큰 차이를 보이지 않는다.

발열량 차이의 영향을 배제하기 위해 연소실 흡수 열량을 발열량으로 무차원화하여 Fig. 9(b)에 제시하였다. 설계조건과 부분부하 조건에서 열설계와 수치해석이 보이는 차이는 무차원화 후에도 같은 경향을 보인다. 열설계 결과는 부분부하 조건에서 발열량 중에 연소실에서 흡수되는 열량의 비율이 증가하지만 수치해석 결과는 감소하는 것을 관찰할 수 있다.

연소 성능을 특징짓는 중요한 요소인 배가스 중에 포함된 일산화탄소 및 질소산화물의 농도 중, 질소산화물의 경우 화학종 방정식을 해석하지 않고 수치해석 결과를 후처리하여

예측하지만[5] 정확한 예측이 어려워 화학종 방정식에서 해석을 수행하는 일산화탄소 농도 분포를 바탕으로 화염 안정성을 평가하였다. 일산화탄소는 화염 경계면에서 하류방향으로 생성되는 것을 볼 수 있다 (Fig. 10). 상단의 버너만을 작동한 Case A의 경우 나머지 운전 방식에 비해 일산화탄소의 발생량이 크게 감소한 경향을 보이며 다만 연소를 도입함으로써 부분부하 운전 조건에서 연소 안정성 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

- (1) 본 연구를 통해 다단 버너를 채택한 보일러의 설계조건 및 부분부하 운전 조건에 대하여 수치해석을 수행한 결과 연소실에서의 흡수 열량이 설계조건에서는 열설계 결과보다 높게 부분부하 조건에서는 낮게 예측되었다.
- (2) 다단 버너를 활용한 3가지 부분부하 운전 조건에 대하여 수치해석을 수행한 결과 연소실 흡수열량은 각각의 경우 거의 동일한 결과를 얻었다.
- (3) 연소실 내부의 일산화탄소 분포로부터 다단 버너를 채택

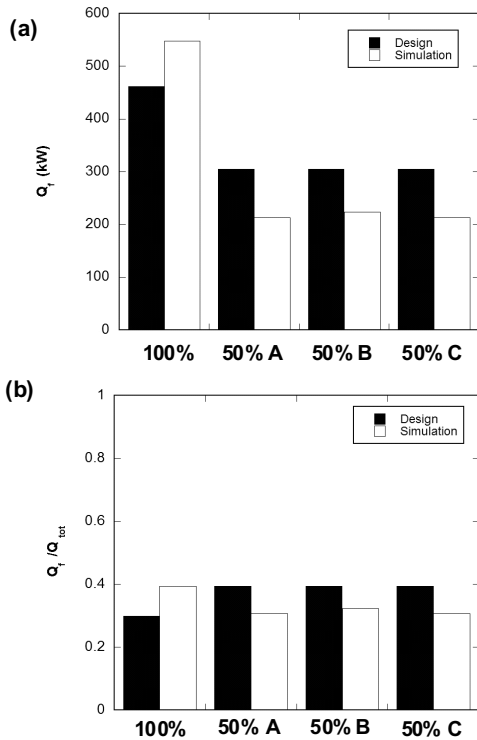


Fig. 9 Heat absorbed at the furnace; (a) Heat in kW; (b) Normalized by heating value of the fuel; A: Upper side burner on; B: Lower side burner on; C: Two burners on

함으로써 보일러의 부분부하 운전 조건에서 연소 안정성을 향상시킬 수 있는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 에너지자원 기술개발사업에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 2007, Ahn, J., Kim, J.J. and Kang, S.B., "Heat Transfer Module for Multi-Burner Water Tubel Boiler: 0.5 t/h Class Model Simulation," *Proc. SAREK 2007 Winter Annual Meeting*, pp.528-533.

[2] 2008, Kim, J.J., Choi, K.S., Ki, H.C. and Kang, S.B., "Experimental Study on Thermal Characteristics of Heat Exchanger Modules for Multi Burner Boiler - Part Load Test Results," *Proc. SAREK 2008 Summer Annual Meeting*, pp.1025-1030.

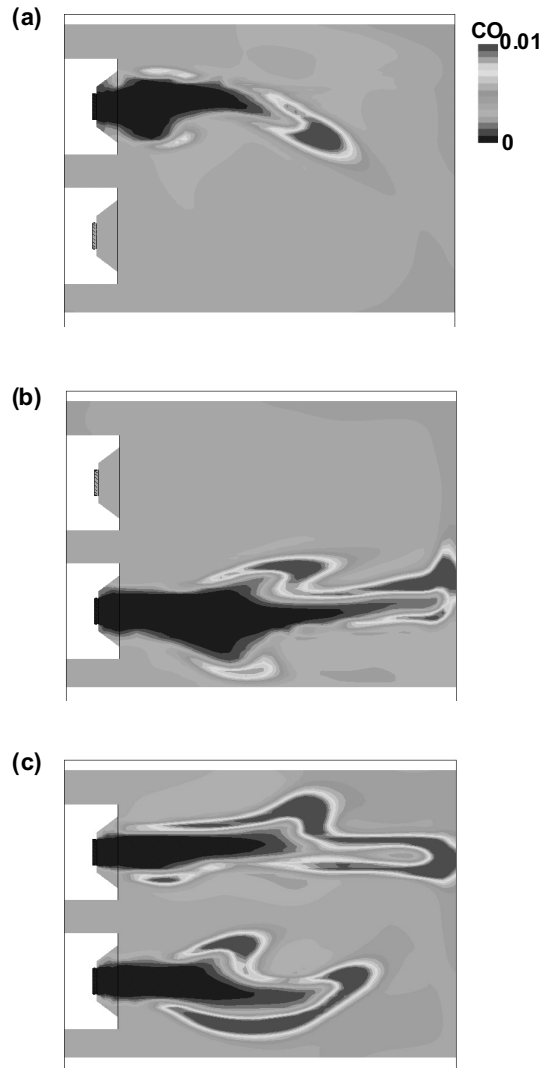


Fig. 10 Molar concentration of CO for partial load operation; (a) Upper side burner on; (b) Lower side burner on; (c) Two burners on

[3] 2008, Kang, S.B., Kim, J.J. and Ahn, J., "Experimental Study on Thermal Characteristics of Heat Exchanger Modules for Multi Burner Boiler," *Proc. KSME 2008 Fall Annual Meeting*, pp.3053-3058.

[4] 2008, Ahn, J., Kim, J.J. and Kang, S.B., "Combustion Characteristics of a Staged Burner for a Boiler," *Proc. 5th NCFE*

[5] 2001, FLUENT, *FLUENT 6 User's Guide Volume 3*, pp.17-1-17-13.