

## 다단 연소 버너의 보일러 연소실에서의 연소 특성

안 준\*·김종진\*\*·강새별\*\*\*

### Combustion Characteristics of a Staged Burner for a Boiler

Joon Ahn\*, Jong Jin Kim\*\* and Sae Byul Kang\*\*\*

**Key Words :** Staged combustion(다단연소), Boiler(보일러), Burner(버너)

#### Abstract

The demand for a boiler with low NOx burner is increasing with the recent strict NOx regulation. Staged burner is a common low NOx burner to suppress the formation of thermal NOx by yielding local fuel rich and fuel lean condition. The staged burner gives fire with bigger frontal area and length compared with a conventional burner, which changes heat transfer characteristics in the combustion chamber. The heat transfer and exhaust gas characteristics has been studied in the present study for a 0.5 t/h class furnace type boiler adopting the staged burner. A numerical simulation has been conducted to clarify the detailed physics inside the combustion chamber.

#### 1. 서론

최근 대기 환경에 대한 인식이 높아지면서 연소과정에서 발생하는 오염물질에 대한 규제가 강화되고 있다. 규제 대상인 물질 중 질소산화물(NOx)은 산성비의 원인이 될 뿐 아니라 인체에 대한 유해성이 알려지면서 최근 많은 주목을 받고 있다. 연소 과정에서 질소 산화물은 크게 열적 NOx, 연료 NOx, Prompt NOx의 세 가지 메커니즘에 의해 생성되는 데 대부분은 고온영역에서 질소가 산화되면서 생성되는 열적 NOx에 해당한다.[1-4]

연소과정에서 발생하는 열적 NOx를 억제하는 방법으로는 다단연소, 연소가스 재순환, 물 분사 등이 있는 데 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 다단 연소 방식의 버너를 채택, 보일러에 적용하였다. 연료를 중심축의 노즐 및 반경방향으로 설치된 9개의 분지관을 통해서 공급하고 공기는 다공관의 구멍 및 바깥 쪽의 환상 공간으로 공급하여 다단연소를 형성하도록 하였다.

다단연소버너를 보일러의 연소실에 도입할 경우 일반 버너에 비해 단면적이 넓은 화염이 형성되면서 연소실 벽면과의 상호작용으로 화염이 불안정해지거나 연소실 벽면이 국소적으로 과열되는 문제가 생길 수 있다. 또한 일반버너를 기준으로 수립된 표면복사를 이용한 연소실 열설계의 타당성에 대한 검증이 필요하다. 이에 본 연구에서는 수치해석을 수행하여 연소실 내부의 자세한 유동 및 열전달 특성을 파악하고 열설계 자료와 실험을 비교하여 타당성을 검증하였다.

#### 2. 수치해석 및 보일러 연소실 열설계 기법

본 연구에서 다단연소 버너를 장착한 시스템은 Fig. 2(a)와 같은 보일러로 0.5 t/h급으로 설계되었다 [5,6]. 연소실은 시스템 앞

쪽에 위치한 노통 보일러에 위치한다. 다단연소 버너는 Fig. 1과 같이 9개의 분지관을 통해 연료를 공급하는 구조로 되어 있어 계산영역은 Fig. 2(b)와 같이 전체 연소실의 1/9로 설정하였다. 수치해석은 상용 프로그램인 FLUENT를 사용하였고 격자는 복잡한 버너 형상을 해석하기 위해 사면체와 육면체를 혼합하여 약 12만개를 사용하였다.

실험에는 천연가스를 사용하였으나 수치해석에서는 천연가스의 주성분(물분율 약 0.885)을 이루는 메탄(CH<sub>4</sub>)을 연료로 설정하였다. 화학종은 메탄-공기 2단계 반응을 해석하였고 난류-화학종간의 상호작용은 에디 소산법으로 고려하였다. 난류모형으로는 표준 k-ε모형을 채택하였다. 사용된 연료량은 부하율 100%의 경우 40 Nm<sup>3</sup>/h이고 공기비 1.2가 되도록 입구에서 연료와 산화제 유량을 경계조건으로 부과하였다. 복사열전달은 DO(Discrete Ordinate) 복사 모형으로 해석하였다. 벽면의 온도 경계조건은 버너부분은 단열, 연소실 벽면은 보일러의 작동압력에서의 포화온도보다 약 20°C높은 450 K를 부여하였다.

보일러 설계 과정에서 연소실은 연소실 벽면을 회체로 가정하고 화염면과 연소실 벽면 사이에 표면복사가 이루어지고 있는 것으로 식(1)과 같이 모형화하여 설계한다.[7]

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

식(1)에서  $\phi_F$ 는 화염 및 연소실 벽면의 방사율, 화염층만으로부터 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·m<sup>3</sup>)로부터 구해진다.

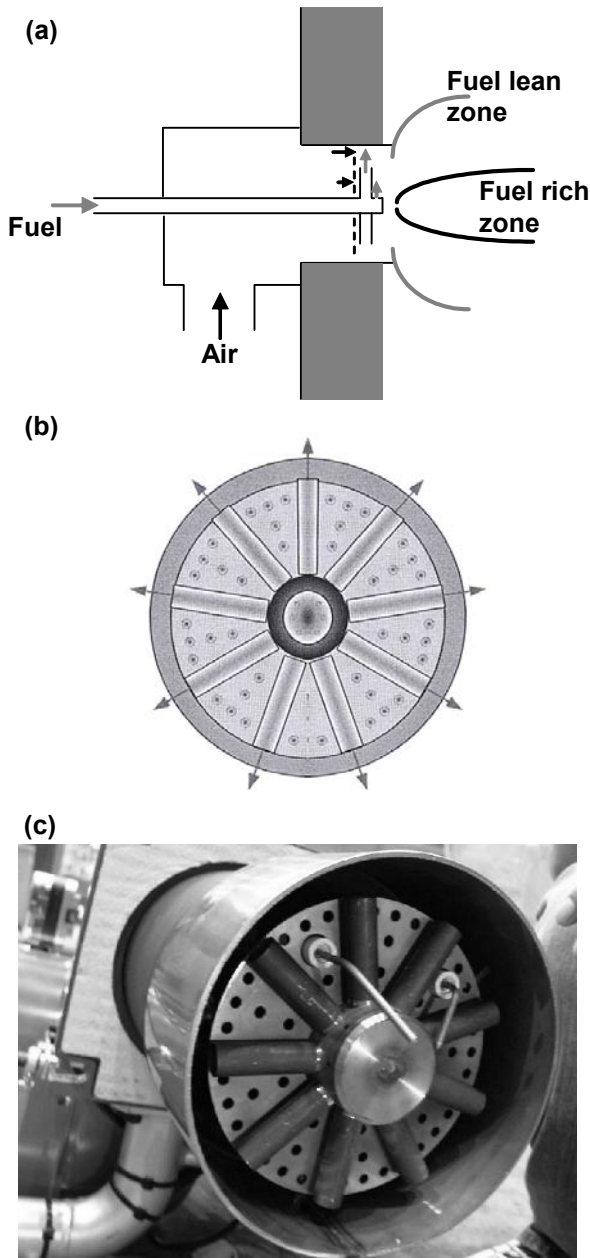
$$\frac{A_F}{A_W} = 0.1325 \ln \frac{q}{10^4} - 0.117 \quad (3)$$

식(1)의 화염온도와 식(3)의 흡수 열량을 맞추는 반복계산을 통

\* 한국에너지기술연구원, jahn@kier.re.kr

\*\* 한국에너지기술연구원, jjkim@kier.re.kr

\*\*\* 한국에너지기술연구원, byulkang@kier.re.kr



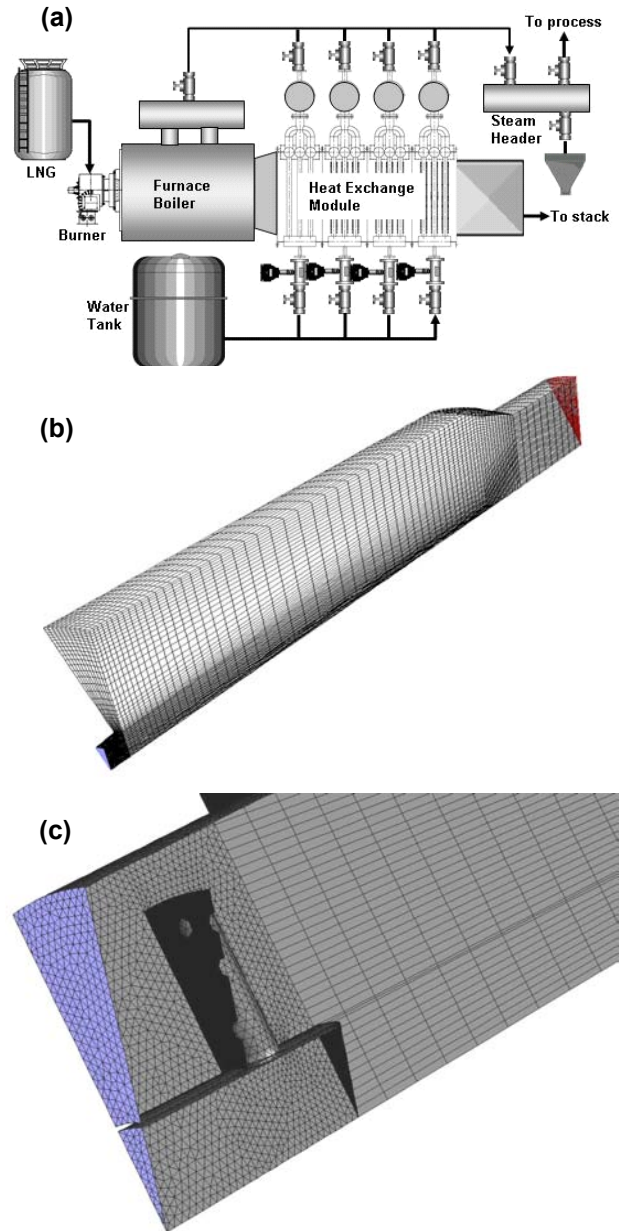
**Fig. 1** Staged low NOx burner; (a) Side cross section; (b) Front view; (c) photograph

해 연소실 출구온도 및 화염층만도가 얻어진다.

### 3. 결과 및 토의

수치해석을 통해 구한 유동장(Fig. 3)을 보면 연료공급관이 끝나는 부분에 정체점이 형성되면서 연료공급관에 설치된 노즐과 분지관을 통해 연료가 공급되고 분지관 하류에 재순환 영역이 형성되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 공급관 끝 부분에 위치한 노즐에서 분사되는 연료는 재순환 유동에 의해 분사되면서 상류로 밀리고 분지관을 통해 나오는 연료는 공기 흐름과 관성에 의해 하류로 흐르게 된다. 공기층의 유동을 보면 (Fig. 3(b)), 다공판으로 공급된 공기는 재순환 영역으로 편입되고 다공판 바깥쪽의 환상공간으로 공급된 공기는 전단층을 형성하며 하류로 진행한다.

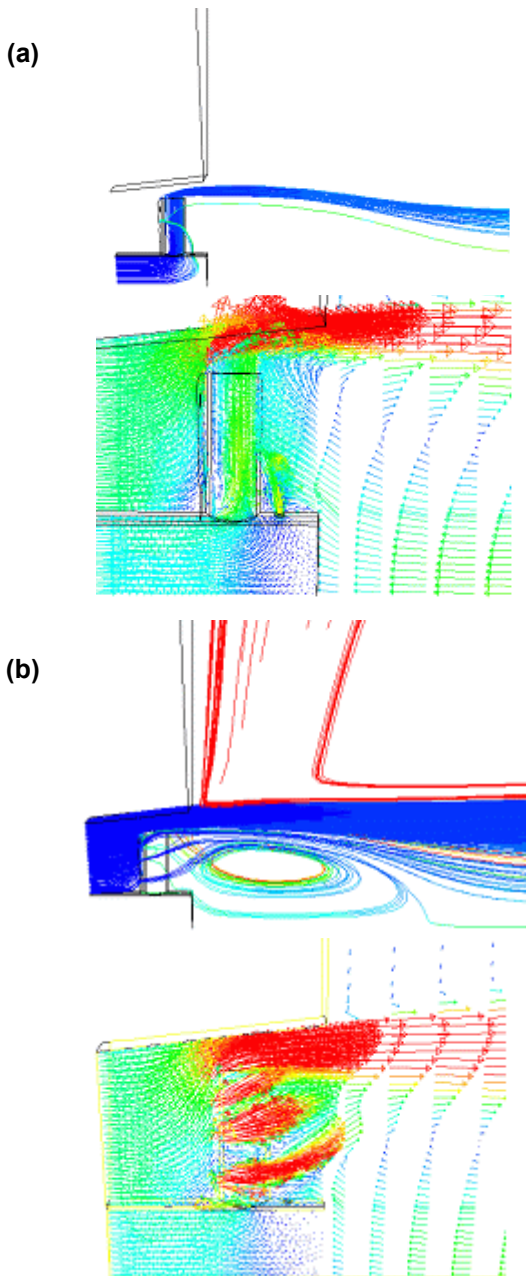
연소기 주변의 온도장을 보면 (Fig. 4(a)), 재순환 영역이 형성된 위치에 온도가 높게 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 국소적



**Fig. 2** System and modeling; (a) Boiler system with the staged low NOx burner; (b) Computational domain; (c) Grid system near the burner

인 연소특성을 보기위해 산소와 CO의 농도장을 살펴보면(Fig. 4(b), (c)), 재순환 영역에는 산소가 거의 없고 전단층 위쪽으로 분포되는 것을 보아 Fig. 1(a)와 같이 화염의 중심에서는 과농, 주변에서는 희박연소 조건으로 연소가 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있다. CO의 경우에도 과농연소가 이루어지는 전단층 아래쪽을 중심으로 집중적으로 분포한다.

부하율에 따른 연소실 내부의 온도장을 보면 (Fig. 5), 다공판 바깥쪽 환상공간을 통해 공급된 공기가 길게 전단층을 형성하면서 화염이 유동방향으로 길게 형성되어 있는 분포를 보인다. 부하율이 감소할수록 전단층이 짧아지면서 화염이 작아지는 것을 볼 수 있다. 수치해석 결과로는 연소실의 직경이 충분하여 저 NOx 버너를 채택하면서 공기연소에 비해 화염의 직경이 증가했음에도 불구하고 연소실 벽면이 국소적으로 과열되는 영역은 발견되지 않았다.

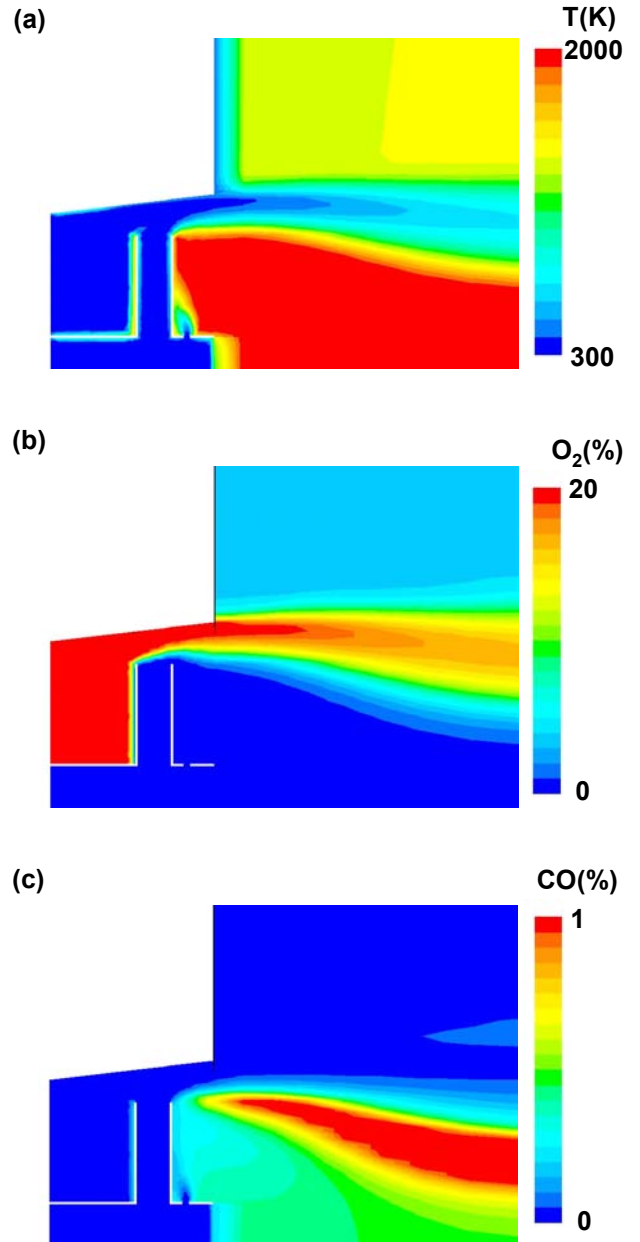


**Fig. 3** Velocity fields near the burner; (a) At the fuel hole; (b) Between the fuel holes

수치해석 및 복사모형으로 얻은 연소실 설계자료를 실험결과와 비교하여 Fig. 6에 제시하였다. 연소실 출구온도(Fig. 6(a))의 경우 수치해석결과가 실험결과나 복사모형에 의한 예측값보다 높은 값을 나타낸다. 이는 수치해석의 경우 난류모형이 큰 스케일의 유동에 의해 생기는 혼합의 효과를 낮게 예측하고 천연가스를 메탄으로 모형화하면서 발생한 차이로 생각된다.

연소실 출구온도의 경우 복사열전달 해석에 의한 예측값도 실험결과보다 높은 값을 나타낸다. 식(1)~(3)에 제시한 예측 기법은 화염을 고온의 표면으로 모형화하여 표면 복사열전달을 해석한 것이지만 본 연구에서는 연소실의 크기가 충분하여 기체복사 효과가 중요해지면서 차이가 발생한 것으로 보인다. 낮은 부하율에서 예측값과 실험결과의 차이가 큰 것이 이를 뒷받침한다.

연소실에서 흡수되는 열량으로부터 화염의 충만도를 계산해보면(Fig. 6(b)), 실험결과에 비해 수치해석 결과는 부하율 100%일 때 약 30%, 부하율 25%일 때는 약 50% 화염의 충만도가 작게

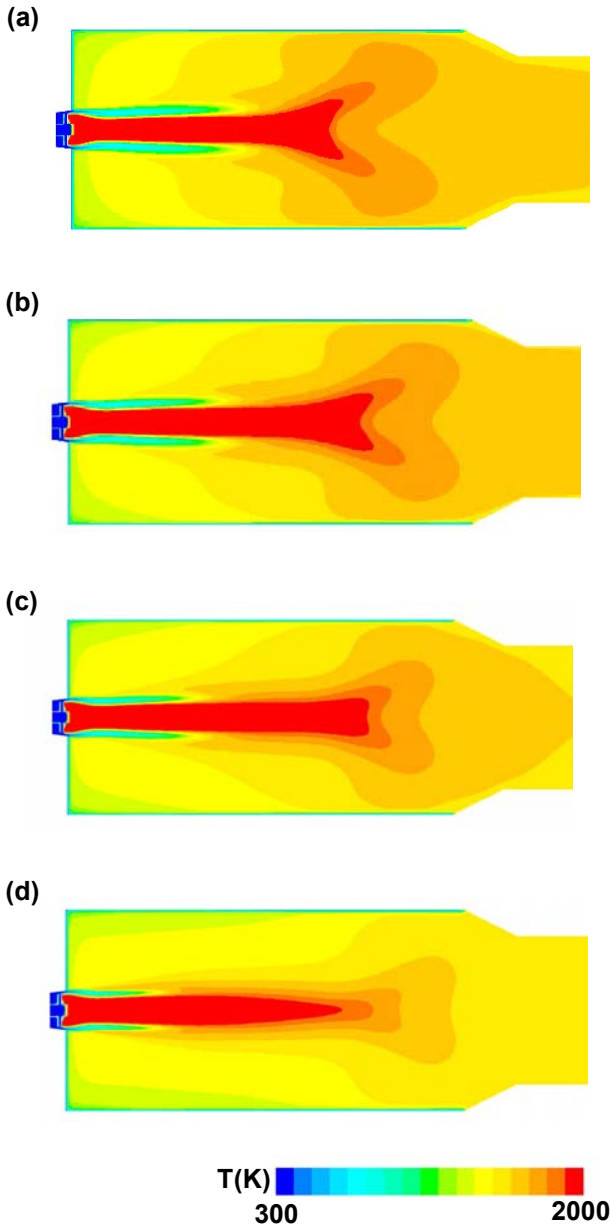


**Fig. 4** Temperature and chemical species near the burner; (a) temperature; (b)  $O_2$  concentration; (c) CO concentration

예측되는 것을 볼 수 있다. 천연가스에 비해 순수한 메탄의 경우 배가스의 질량유량이 약 20% 감소하고 단열화염온도가 약  $350^{\circ}C$  정도 높게 형성되는 것에 근본적인 이유가 있겠지만 정확한 분석을 위해서는 벽면의 열경계조건 및 복사모형의 영향에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 식(3)으로 예측한 결과의 경우, 화염의 충만도가 단위체적당 흡수열량의 로그값에 비례하므로 부하율이 낮을수록 실험에 가까운 값을 나타낸다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 저  $NO_x$  버너를 설치한 보일러 연소실에 대한 수치해석을 수행하고 실험결과 및 열설계 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

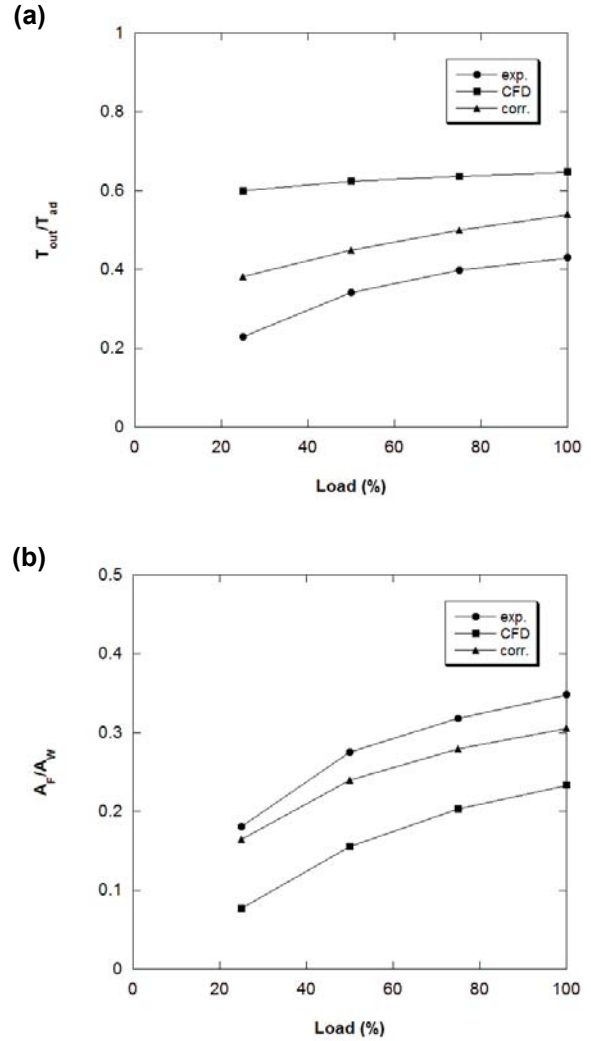


**Fig. 5** Temperature inside the combustion chamber; (a) Load 100%; (b) Load 75%; (c) Load 50%; (d) Load 25%

1. 가스연소의 경우 저 NO<sub>x</sub> 버너가 보일러 연소실 조건에서 안정된 연소성능을 갖고 연소실 벽면에 국소적으로 과도한 열 부하를 발생시키지 않는다.
2. 천연가스를 메탄으로 모형화하여 수치해석을 수행할 경우 낮은 부하율을 중심으로 큰 차이를 보인다.
3. 저 NO<sub>x</sub> 버너를 위해 큰 연소실을 도입할 경우 기체복사를 고려한 설계가 필요하다.

### 후기

본 연구는 산업자원부의 에너지·자원기술개발 사업에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다.



**Fig. 6** Design parameters of the combustion chamber; (a) Combustion chamber exit temperature; (b) Flame fullness

### 참고문헌

- [1] 조은성, 성용진, 정석호, 다단연소기를 이용한 저 NO<sub>x</sub> 연소 특성 연구, 대한기계학회논문집 B권 (2003), pp. 32~38.
- [2] 김한석, 안국영, 백승욱, 유명중, 공기 다단 연소기 화염의 NO 발생특성에 관한 연구, 대한기계학회논문집 B권 (2001), pp. 1594~1605.
- [3] 정진도, 한지웅, 안국영, 다단 연소기를 이용한 LNG 화염의 NO<sub>x</sub> 발생에 관한 실험적 연구, 대한기계학회논문집 B권 (2004), pp. 389~394.
- [4] 西教安, 水野裕之, ボイラ用低NO<sub>x</sub>バーナ'LGX'の開発, 工業加熱 (1990), pp. 12~18
- [5] 안준, 김종진, 강세별, 다중버너 수관식 보일러를 위한 전열 모듈의 열전달 특성: 0.5 t/h급 모형 수치해석, 대한설비공학회 동계학술발표회 (2007).
- [6] 김종진, 기호충, 강세별, 멀티버너 보일러용 열교환기 모듈 특성 시험 I. 100% 부하 특성 결과, 대한기계학회 추계학술대회 (2007), pp.2302~2307.
- [7] 한국동력자원연구소, 보일러 열설계 매뉴얼 (1984).