



# 순산소 재순환 연소를 채택한 CO<sub>2</sub> 회수형 보일러 연소실에 대한 수치해석

안 준,<sup>\*1</sup> 김 혁 주<sup>2</sup>

## CFD STUDY ON THE COMBUSTION CHAMBER OF AN OXY-FUEL FGR BOILER FOR CO<sub>2</sub> CAPTURING

J. Ahn<sup>\*1</sup> and H.J. Kim<sup>2</sup>

*An oxy-fuel boiler has been developed to capture CO<sub>2</sub> from the exhaust gas. FGR (flue gas recirculation) is adopted to be compliant with the retrofit scenario. Numerical simulations have been performed to study the detailed physics inside the combustion chamber of the boiler. The temperature field obtained from the simulation agrees with the flame image from the experiment. The FGR combustion yields similar heat transfer characteristics with the conventional air combustion while the flame is formed further downstream in case of the FGR combustion.*

**Key Words :** 순산소 연소(Oxy-Fuel Combustion), 배가스 재순환(FGR: Flue Gas Recirculation), 버너(Burner), 보일러(Boiler), 탄소 분리 고정화(CCS: Carbon Capturing and Sequestration)

### 1. 서 론

최근 우리나라를 포함하여 세계적으로 기상이변이 속출하는 가운데 그 원인으로 대기 중에 존재하는 온실 가스에 의한 지구온난화가 지적되고 있다. 온실효과를 일으키는 온실 가스 중에서는 화석연료를 이용할 때 발생하는 이산화탄소가 가장 큰 부분을 차지하고 있으며 지난 세기 급격한 산업화와 함께 대기 중에 포함된 농도가 크게 증가한 것으로 보고되고 있다. 따라서 이산화탄소의 발생을 규제하는 움직임이 세계적으로 진행되고 있으며 우리나라는 2002년 교토의정서를 비준하고 새로 출범하는 아시아 태평양 파트너십 프로그램에도 참가하고 있다.

이와 같은 국제적 합의에 의한 이산화탄소 감축 의무를 수행할 경우 우려되는 국가경제 위축을 최소화하기 위하여 현재 다양한 기술이 개발되고 있다. 이러한 기술 중에서 화석연료의 연소과정에서 발생하는 이산화탄소를 처리하는 대표적인 기술로는 분리막 등을 활용한 분리기술, 아민법 등의 흡수 기술 그리고 순산소 연소기술 등이 있다[1-3]. 이들 중에 순산

소 연소기술은 산화제로 공기대신 산소를 사용하는 기술로서 연소가스가 주로 이산화탄소와 수증기로만 구성되어 수증기를 응축시키는 것만으로 이산화탄소를 분리할 수 있다.[4] 화석연료가 사용되는 설비 중 보일러는 산업용 에너지의 54%를 소비하는 대표적인 에너지 다소비 설비로서 순산소 연소를 도입했을 때 매우 큰 온실가스 저감효과를 기대할 수 있다 [1-3].

산업용 보일러에는 노통연관식, 수관식, 관류식 보일러가 주로 사용되는데 본 과제에서는 Fig. 1에 제시한 것과 같이 순산소 연소를 0.5 MW급 노통연관식 보일러에 적용하였다. 산업용 보일러에 순산소 연소를 적용할 경우 연소가스가 주로 수증기와 이산화탄소로 구성되어 일반적인 공기연소에 비해 연소실에서 기체 복사가 중요해진다. 특히, 노통연관식 보일러의 경우 상대적으로 연관의 역할이 약해지고 배가스에서 응축영역까지 열을 회수하여야 높은 열효율을 얻을 수 있는 등 기존의 보일러 열설계 과정에 보완이 필요함을 확인하였다[2,3].

일반적인 공기연소를 기준으로 수립된 보일러의 열설계 기술을 순산소 보일러에 적용하기 위해서는 열설계를 적용하는 연소실, 연관부, Economizer의 열전달 특성에 대한 이해가 필요하다. 특히 연소실의 경우 새로운 연소 방식을 적용한 효과가 가장 크게 작용하는 부분이며 연관부나 Economizer에 비해

1 정회원, 한국에너지기술연구원

2 한국에너지기술연구원

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

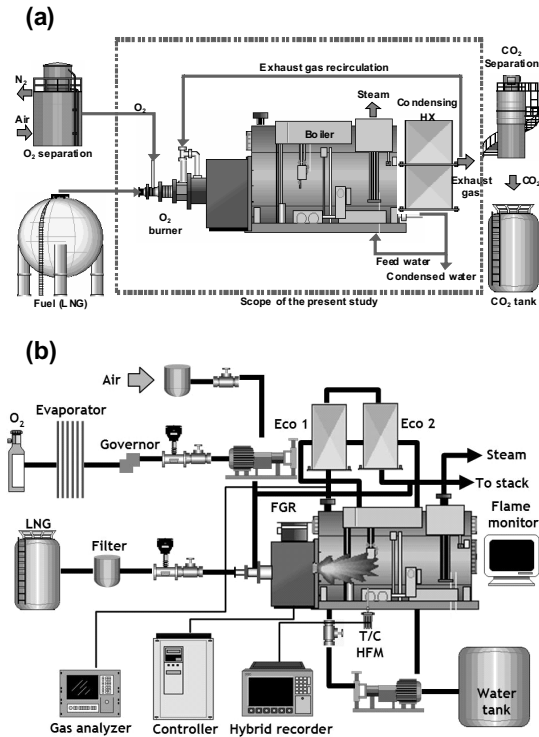


Fig. 1 Oxy-fuel FGR boiler for CO<sub>2</sub> capturing; (a) Concept of the system; (b) Experimental setup

훨씬 복잡한 물리적 현상이 발생하게 된다. 이와 같은 물리적 현상을 자세히 파악하고 순산소 연소를 채택한 보일러의 열설계 기법을 체계적으로 정립하기 위하여 본 연구에서는 순산소 연소를 채택한 보일러의 연소실에 대하여 수치해석을 수행하였다. 본 논문에서는 수치해석 결과로부터 연소실 내의 유동 및 열전달 특성을 파악하고 보일러의 열설계에 필요한 자료를 추출하여 실험과 비교한다. 또한 연소실 내부의 화학종 분포 결과로부터 이산화탄소의 고농도화 및 연소의 안정성도 함께 고찰한다.

## 2. 시스템 모형화 및 수치해석 기법

### 2.1 시스템 모형화

본 과제에서 채택한 보일러는 노통 연관식으로서 연소실은 내화처리가 되어 있는 원추형 버너 취부 하류에 원통형태의 연소실이 연결된 구조로 되어 있다. 연소실 출구에는 연관관이 연결되어 외부의 물을 끓이도록 한다. 수치해석을 위한 계산 영역은 Fig. 2(a)와 같이 버너를 포함한 연소실 내부로서 모형화하였다.

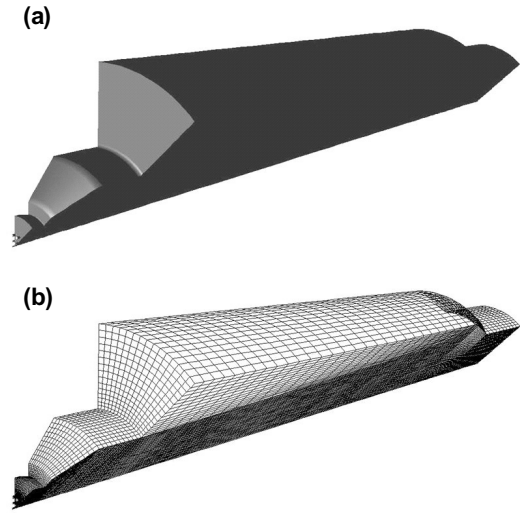


Fig. 2 Combustion chamber modeling; (a) Computational domain; (b) Grid system

본 연구에서는 버너와 연소실에 대해서만 수치해석을 수행하였고 연관부는 계산영역에 포함하지 않았다. 이에 따라 계산이 원활하게 이루어지도록 모형화 과정에서 출구 형상을 변경하였다. 연소실 출구위치에서 하류 방향으로 경사를 주고 하류로 계산 영역을 확보하여 출구의 조건이 연소실 내부로 설정된 영역에 영향을 주지 않도록 하였다. 한편, 버너의 기하형상은 본 과제를 통해 개발한 0.5 MW급 버너[2,3]와 일치하도록 하였다.

연소실의 기하형상은 전체적으로 축대칭 원통 형태이며 버너의 형태로부터 계산영역을 설정하였다. 버너는 순산소 연소의 고온 화염 특성에 맞게 동축형으로 설계하였으며[3,5] 산소 공급 노즐이 원주방향으로 8개 설치되어 있다. 따라서 계산영역은 Fig. 2와 같이 전체의 1/8로 설정하여 경제적이고 정확한 계산이 되도록 하였다. 계산을 위해 설정한 절단면에는 순산소 연소의 경우 대칭 조건을 공기연소 및 재순환 연소의 경우 산화제에 적용한 선회 유동을 고려하여 주기조건을 부과하였다.

속도 경계조건으로는 모든 벽면에서 점착조건을 부과하였다. 버너의 경우 연료 노즐 출구에서 부하율에 맞도록 연료의 속도를 부과하였다. 산화제 공급부의 경우에 Stoichiometry에 맞도록 속도를 설정하였다. 공기연소 및 배가스 재순환 연소의 경우 산화제가 선회기를 거쳐 공급되므로 접선방향의 속도를 부과하여 선회기가 구동되는 버너를 모사할 수 있도록 하였다. 출구에는 압력 출구 경계조건을 부과하여 연소 가스가 연소실을 자연스럽게 빠져나갈 수 있도록 하였다.

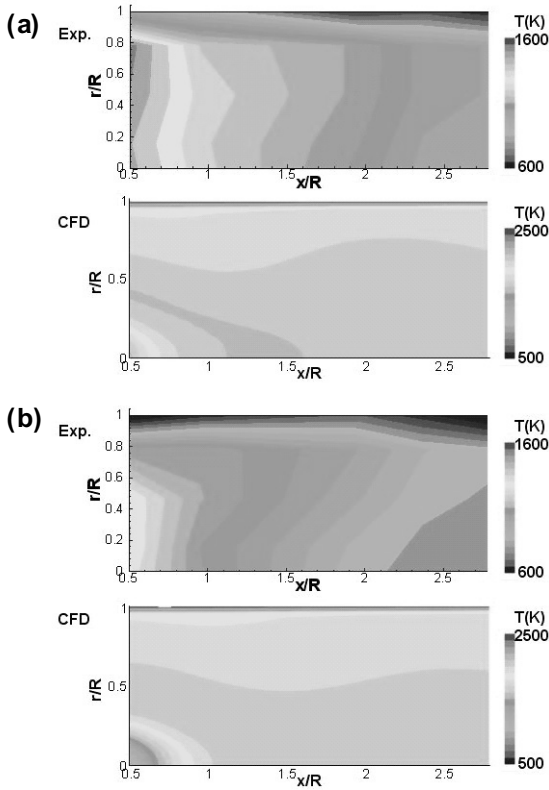


Fig. 3 Temperature distribution inside the combustion chamber for the air combustion; (a) Load 100%; (b) Load 50%

온도 경계조건으로서 공급되는 연료와 산화제는 상온 조건인 300K로 부과하였다. 연소실 벽면의 온도는 보일러 작동압력에서의 포화온도를 고려하여 480K의 등온조건을 부과하였다. 버너 타일 부분과 연소실 출구에 테이퍼 이후 출구 부분 벽면에는 단열조건을 부과하였다. 화학종의 경우 천연가스인 연료를 대부분의 조성을 차지하는 CH<sub>4</sub>(메탄)으로 가정하여 노즐 출구에 경계조건을 부과하였다. 버너의 산화제측 노즐 출구의 경우에는 부하율에 따라 O<sub>2</sub> 유량을 결정하고 나머지 기체는 연소 모드에 따라 해당 유량을 부과하였다. 즉 산소연소의 경우 추가로 투입되는 유량이 없고 공기연소의 경우 나머지 유량을 N<sub>2</sub>로 맞추었다. 배가스 재순환 연소의 경우 건가스에서 O<sub>2</sub>의 농도가 40%가 되도록 CO<sub>2</sub>를 부과하고 나머지 부분은 공기 연소와 같은 유량이 되도록 H<sub>2</sub>O를 부과하였다.

## 2.2 수치해석 기법

수치해석에는 상용 소프트웨어인 FLUENT를 이용하였다. 지배방정식은 연속 방정식, Navier-Stokes 방정식, 에너지 방정식 및 화학종 방정식을 해석하였다. 난류 모형으로는 표준 k-ε 모형을 사용하였다. 복사 열전달은 계산량이 크지 않고

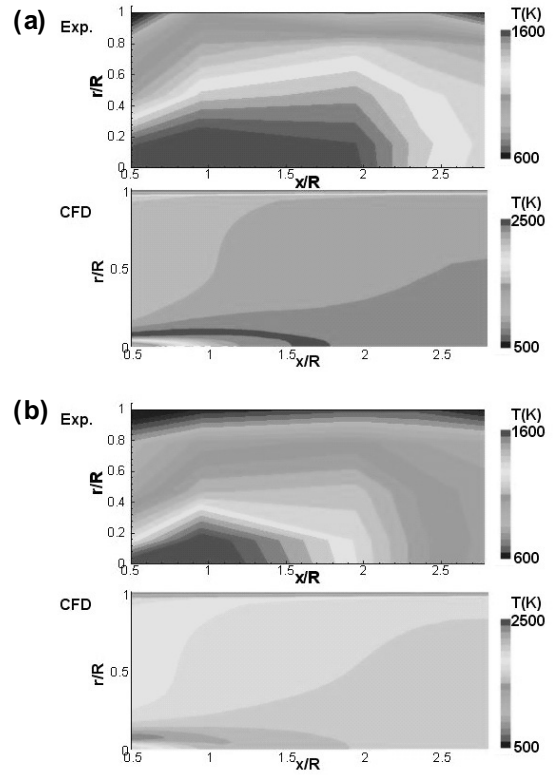


Fig. 4 Temperature distribution inside the combustion chamber for the oxy-fuel combustion; (a) Load 100%; (b) Load 50%

순산소 연소의 기체 복사 특성을 적절히 반영할 수 있는 P1 모형[1]을 적용하여 계산에 반영하였다. 화학종 방정식은 연료를 CH<sub>4</sub>로 단순화하였으며 난류-화학반응 관계는 EDC 모형으로 고려하여 계산을 수행하였다.

격자계는 Fig. 2(b)와 같이 120,000개의 육면체로 구성하여 사면체 격자에 비해 정확도를 높였다. 격자 크기 분포는 물리적 현상이 중요하고 온도, 속도 및 화학종 농도 구배가 큰 연소기 주변에 격자를 집중시켜 정확한 계산이 이루어지도록 하였다. 순산소 연소의 경우 유동방향으로 화염이 신장되도록 버너가 설계된 점을 고려하여[3,5] 하류까지 중심축을 중심으로 충분한 격자수를 확보하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 연소실 내부의 온도 분포

수치해석을 통해 구한 연소실 내부의 온도분포를 보면 공기연소(Fig. 3) 및 재순환 연소(Fig. 5)의 경우 반경방향으로 퍼진 형태로, 순산소 연소(Fig. 4)의 경우 축방향으로 신장된 형태로 고온 영역이 나타난다. 이는 선행연구[3]에서 관찰한

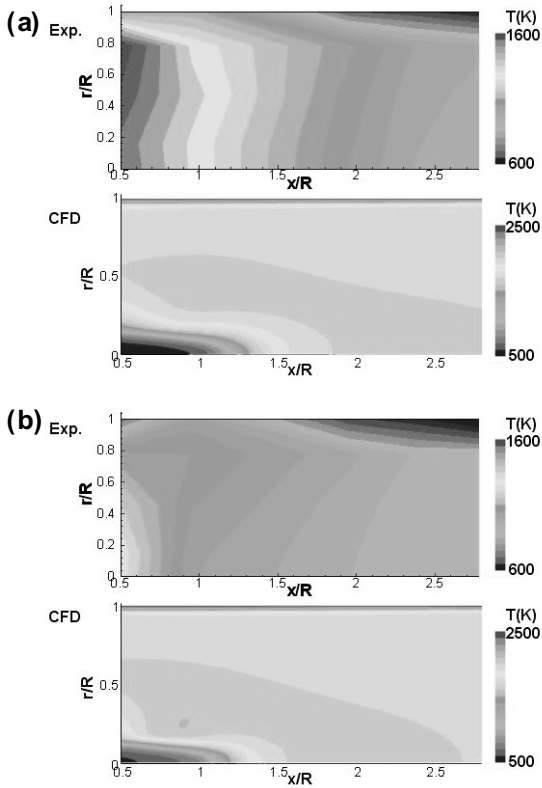


Fig. 5 Temperature distribution inside the combustion chamber for the oxy-fuel FGR combustion; (a) Load 100%; (b) Load 50%

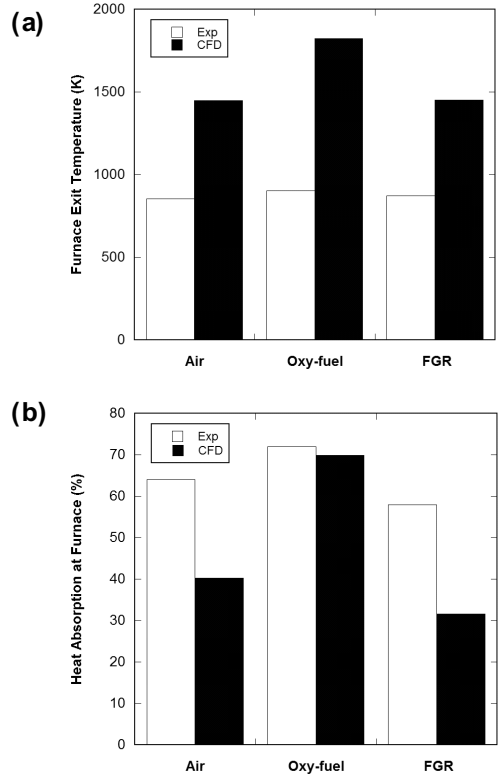


Fig. 6 Heat balance at the combustion chamber; (a) Furnace exit temperature; (b) Heat absorbed at the furnace

화염 형상과 정성적으로 일치한다. 실험과 비교했을 때 수치 해석 결과가 화염이 하류에 형성되고 반경 방향으로 좁게 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 이는 난류 모형이 큰 스케일의 유동에서 생기는 영향을 반영하지 못하여 혼합 수준을 실제보다 낮게 예측했기 때문인 것으로 보인다. 전반적으로 수치 해석 결과가 연소에 필요한 공간을 실제보다 크게 예측하므로 수치해석을 통해 연소실을 설계할 경우 실제로 충분한 연소공간이 확보될 것을 예상할 수 있다.

정량적으로 순산소 연소(Fig. 4)의 경우 다른 연소 방식에 비해 단열화염온도가 높고 화염의 전파속도가 빠르므로[5,6] 높은 온도를 보인다. 수치해석으로부터 얻은 온도가 실험보다 전체적으로 높은 경향을 볼 수 있다. 이와 같은 차이는 1차적으로는 연료인 천연가스를 수치해석 과정에서 CH<sub>4</sub>로 단순화 하면서 단열화염온도가 상승[7]했기 때문으로 보인다. 이는 확률밀도함수(PDF) 모형을 이용한 수치해석을 수행하여 추후 검증할 예정이다. 연소 모형과 함께 복사 모형 및 온도 경계 조건 또한 계산 결과에 영향을 줄 것으로 예상[1]되며 이에 대한 연구도 추후 진행할 예정이다.

### 3.2 연소실에서의 열전달 특성

보일러의 연소실은 화염과 연소실의 표면 복사를 고려하여 화염의 안정성을 확보하고 적정열량이 연소실에서 흡수되도록 설계[7]한다. 즉, 주어진 버너의 형상 및 유속에 대하여 화염의 안정성을 확보할 수 있는 연소실 체적 범위에서 적절한 열전달이 이루어지도록 연소실 체적을 결정한다. 연소실에서 흡수되는 열량은 연료의 발열량, 공기비, 연소실 출구온도로부터 구할 수 있다.

본 과제에서 개발한 보일러의 경우 연료량이 동일할 때 연소방식을 공기연소에서 순산소 연소로 바꾸어도 연소실 출구온도가 크게 변하지 않는 결과를 얻은 바 있다[3]. 수치해석을 수행한 결과에서도 연소방식에 따라 연소실 출구온도의 차이는 크지 않으나 전반적으로 실험에 비해 크게 높은 것을 볼 수 있다(Fig. 6(a)). 3.1에서 관찰한 온도장 결과로부터 이는 단열화염 온도의 차이와 수치해석이 혼합수준을 낮게 예측한 것 등이 복합적으로 작용한 결과임을 예상할 수 있다.

전체 발열량 중에 연소실에서 흡수되는 열량을 계산하면 연소실 출구에서 배가스의 엔탈피를 발열량으로 정규화하는 과정에서 단열화염온도에 의한 수치해석과 실험 결과의 차이

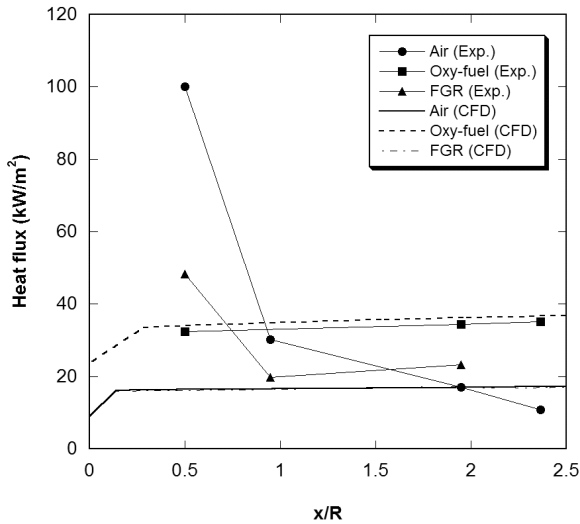


Fig. 7 Heat flux at the combustion chamber wall

를 일부 배제할 수 있다. 실험을 통하여 순산소 연소를 채택할 경우 연소실에서 흡수되는 열량비가 증가하는 결과를 얻은 바 있고[3] 이 경향은 수치해석에서도 재현되는 것을 볼 수 있다(Fig. 6(b)). 순산소 연소의 경우 연소실의 흡수 열량이 수치해석으로 비교적 정확하게 예측되지만 공기 연소나 재순환 연소의 경우 훨씬 낮게 예측된다. 이는 수치해석이 실험에 비해 반경방향의 혼합수준을 낮게 그리고 화염이 하류로 지연되는 것으로 예측한 결과로 보인다.

연소실 벽면으로의 열유속을 보면(Fig. 7) 순산소 연소의 경우 수치해석 결과가 실험결과와 비교적 잘 일치하지만 공기 연소나 재순환 연소의 경우 상류를 중심으로 실험결과보다 낮게 예측하는 것을 볼 수 있다. 이는 공기연소나 재순환 연소에서 화염이 버너타일 부근에 형성되는 것이 정확하게 예측되지 않으면서 나타난 경향으로 파악된다. 순산소 연소의 경우 화염이 축방향으로 신장된 형태를 갖고 본 계산에서 채택한 P1 모형이 광학두께가 두꺼운 경우 정확성이 높아 정확하게 예측된 것으로 보인다.

### 3.3 연소실 내부의 화학종 분포

이산화탄소의 고농도화 특성을 나타내는 연소실 내부의 이산화탄소 농도를 보면(Fig. 8), 연소실 출구 위치에서 이산화탄소 농도가 공기연소의 경우 10% 수준인 것에 비해(Fig. 8(a)) 순산소 연소나 배기가스 재순환 연소의 경우 90%를 상회하는 것을 볼 수 있다. 순산소 연소의 경우(Fig. 8(b)), 재순환 연소(Fig. 8(c))에 비해 고농도의 이산화탄소를 얻기 위해서는 유동방향으로 길이가 긴 연소공간이 필요한 것을 관찰할 수 있다. 실제 실험결과는 수치해석 보다 화염이 짧게 형성되

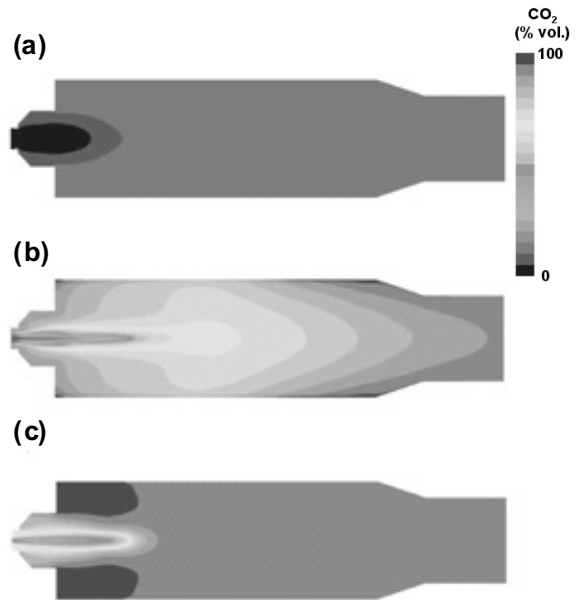


Fig. 8 CO<sub>2</sub> concentration inside the combustion chamber

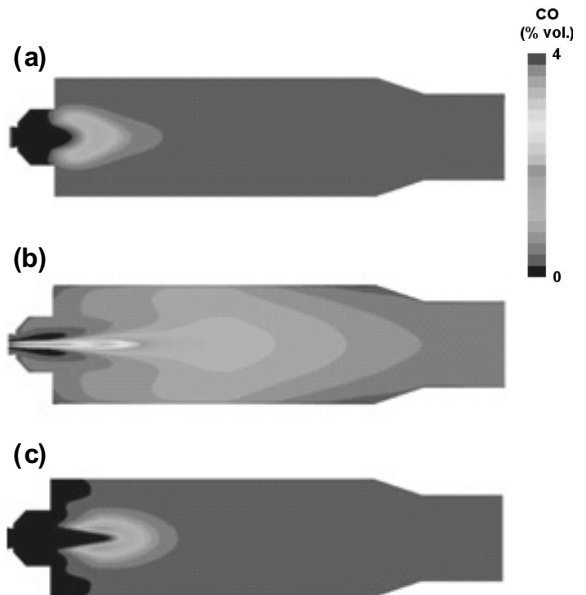


Fig. 9 CO concentration inside the combustion chamber

어 순산소 연소의 경우에도 연소실 출구에서 90%이상의 이산화탄소 농도를 얻었다[2].

연소 성능을 특징짓는 중요한 요소인 배기가스 중에 포함된 일산화탄소 및 질소산화물의 농도 중, 질소산화물의 경우 순산소 연소 및 배기가스 재순환 연소에서는 계산상에서 발



생할 수 없어 일산화탄소 농도의 경우만 Fig. 9에 결과를 제시하였다. 공기연소의 경우 (Fig. 9(a)) 일산화탄소가 화염 경계면을 중심으로 생성되는 분포를 보인다. 순산소 연소의 경우 (Fig. 9(b)) 공기연소에 비해 일산화탄소 농도가 증가하고 화염면을 따라 유동방향으로 긴 영역에 걸쳐 생성된다. 순산소 연소의 경우 화염의 안정성 및 유동 방향으로 연소 공간을 확보하는 것이 중요할 것으로 보인다. 배기가스 재순환 (Fig. 9(c))의 경우에는 공기연소와 비슷한 경향을 보이고 공기연소에 비해 하류에서 일산화탄소가 발생하는 분포를 나타낸다.

#### 4. 결 론

- (1) 본 연구를 통해 수치해석을 통하여 보일러 연소실에서 순산소 버너의 연소 특성은 잡아낼 수 있었으나 화학종, 복사열전달의 모형화 과정에서 생긴 오차 등으로 인해 실험과는 정량적 차이가 나타났다.
- (2) 연소실에서 흡수되는 열량이나 연소실 벽면으로의 열유속은 본 연구에서 적용한 수치해석 기법의 경우 공기연소나 재순환 연소에 비해 순산소 연소에서 실험과 잘 일치하였다.
- (3) 연소실 내부의 화학종 분포를 관찰한 결과 재순환 없이 순산소 연소를 이용해 이산화탄소의 고농도화를 위해서는 동축 버너에서 안정된 화염을 확보하기 위한 축방향 연소 공간이 필요함을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부의 에너지자원 기술개발사업에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] 2007, Kim, H.J., Ahn, J. and Choi, K.S., "Numerical Simulation of a 50 kW Class Oxy-Fuel Boiler," *Proc. ASCHT07*.
- [2] 2008, Ahn, J., Kim, H.J. and Choi, K.S., "Heat Transfer Characteristics of Oxy-fuel FGR Combustion Boiler for CO<sub>2</sub> Capturing," *Proc. 2nd Int. Forum on Heat Transfer*.
- [3] 2008, Ahn, J., Kim, H.J. and Choi, K.S., "Combustion Characteristics of Oxy-fuel Burners for CO<sub>2</sub> Capturing Boilers," *Proc. 7th KSME-JSME Thermal & Fluids Eng. Conference*.
- [4] 2002, Tan, W., Douglas, M.A. and Thambimuthu, K.V., "CO<sub>2</sub> Capture Using Oxygen Enhanced Combustion Strategies for Natural Gas Power Plants," *Fuel*, Vol.81, pp.1007-1016.
- [5] 2005, Seo, J.I., Guahk, Y.T., Bae, S.H., Hong, J.G., Lee, U.D. and Shin, H.D., "Experimental Study on the Oxygen Combustion Characteristics with CO<sub>2</sub> Feeding," *J. Korea Society of Combustion*, Vol.10, pp.26-34.
- [6] 2008, Kim, H.J., Choi, W., Bae, S.H., Hong, J.G. and Shin, H.D., "A Study on Oxy-Fuel Combustion System with Multi-Jet Burner - Numerical Simulation with PDF Combustion Model," *Trans. KSME Series B*, Vol.32(7), pp.504-512.
- [7] 2008, Ahn, J., Kim, J.J. and Kang, S.B., "Combustion Characteristics of a Staged Burner for a Boiler," *Proc. 5th NCFE*, pp.555-558.