

순산소 연소를 채택한 CO₂ 회수형 보일러의 성능특성: 50kW급 모형 실험 및 수치해석

안준[†] · 김혁주* · 최규성*

Oxy-fuel Combustion Boiler for CO₂ capturing: 50 kW Class Model Test and Numerical Simulation

Joon Ahn, Hyouck Ju Kim and Kyu Sung Choi

Key Words: Oxy-fuel Combustion (순산소 연소), Boiler (보일러), Burner (버너)

Abstract

A novel oxy-fuel burner for a boiler has been devised and composed into a 50 kW class boiler system. A series of test has been conducted to show the characteristics of combustion, exhaust gas and the boiler. Numerical simulations have been also performed and validated against the experimental data to discuss detailed physics. The oxy-fuel burner can effectively heat the combustion chamber with the significantly reduced combustion gas, which enables to realize the compactness of the system. The composition of exhaust gas reveals that the sealing of the system is crucial to achieve high CO₂ concentration and low NO_x emission.

1. 서 론

지난 세기 화석연료의 사용이 급증, 이산화탄소에 의한 지구온난화가 생태계에 큰 위협이 되고 있다. 그에 따른 국제적인 노력이 진행되어 1997년 교토의정서가 체결되었고 우리나라도 2002년 비준하여 이산화탄소 감축의무를 지게 되었다. 감축의무 이행에 따른 국가경제의 위축을 최소화하고자 순산소 연소기술, 분리공정 기술, 미활용 에너지 이용 기술, CO₂ 회수 처리 기술 등의 이산화탄소 저감기술에 대한 연구가 진행 중이다.⁽¹⁾ 이중 순산소 연소기술은 산화제로 공기 대신 산소를 사용하는 기술로서 배기가스가 대부분 이산화탄소와 수증기로만 구성되어 이산화탄소 회수비용을 크게 절감할 수 있으므로 최근 이산화탄소 저감기술로서 주목을 받게 되었다. 보

일러는 산업용 에너지의 54%를 소비하는 대표적인 에너지 다소비 설비로서 순산소 연소를 도입하였을 때 매우 큰 온실가스 저감 및 에너지 절약 효과를 기대할 수 있다.

산화제로 공기대신 산소를 사용할 경우 질소부분이 빠지면서 연소가스의 유량이 감소하여 화염의 체적이 작아지고 화염의 온도가 높아지게 된다. 체적이 큰 보일러에 순산소 연소를 적용하기 위해서는 화염을 신장하고 기기가 고온의 화염에 손상되지 않도록 하는 대책이 필요하다.⁽²⁾

이에 본 연구에서는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 동축 제트 연소기의 형태로 버너를 제작, 화염의 체적을 확보하여 보일러 내부에 고온 온도분포가 얻어질 수 있도록 하였다. Fig. 1과 같은 순산소 버너를 장착한 50 kW급의 보일러 시스템을 Fig. 2와 같이 구성하여 실험 및 수치해석을 수행하였으며 이를 통해 보일러 연소실에서의 순산소 연소 및 배가스 특성과 보일러의 운전 특성을 파악하는 것을 목표로 한다.

[†] 회원, 한국에너지기술연구원

E-mail : jahn@kier.re.kr

TEL : (042)860-3328 FAX : (042)860-3098

* 한국에너지기술연구원

2. 실험장치 및 수치해석 기법

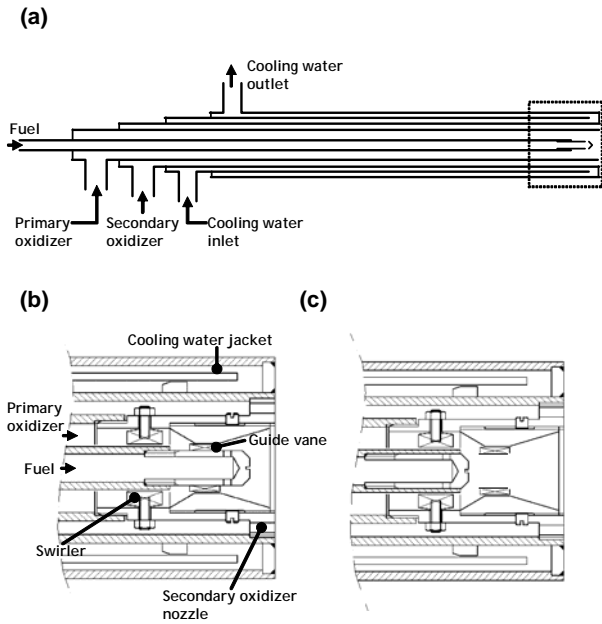


Fig. 1 Oxy-fuel/air combustion convertible burner; (a) oxy-fuel mode; (b) air combustion mode

2.1 실험장치

실험장치는 Fig. 2(a)에 제시한 바와 같이 순산소연소를 산업용 보일러에 적용하여 고농도의 이산화탄소를 얻을 수 있도록 Fig. 2(b)와 같이 제작하였다. 본 연구는 50 kW급 소규모의 모형실험으로서 Fig. 2(a)에 제시한 개념 중 배가스 재순환 및 응축형 열교환 기술은 포함하지 않는다. 이들 기술에 대해서는 다음 단계에서 0.5 MW급 설비를 제작하여 진행할 예정이다.

연료는 LNG로 Fig. 2(b)와 같이 필터를 거쳐 연소기로 공급된다. 연소기는 Fig. 1(a)에 제시한 것과 같은 동축 버너로 Fig. 1(b), (c)와 같이 노즐 위치를 바꿈으로써 순산소연소 및 공기연소에 겸용으로 사용⁽³⁾할 수 있도록 제작하였다. 산소는 증발기를 거쳐 공급하였다. 연소기 후단에 연소실을 포함한 보일러를 연결하였고 보일러에는 화염형상 관찰을 위한 관측창과 온도 측정을 위한 열전대를 설치하였다. 보일러 출구에서는 기체를 포집하여 기체분석기로 배가스의 성분을 분석하였다. 화염 및 보일러의 운전조건을 감시하여 연료공급을 차단할 수 있는 제어장치를 구성하여 시스템의 안전을 확보하였다.

2.2 수치해석 기법

계산영역은 Fig. 3(a)와 같이 연소기와 보일러

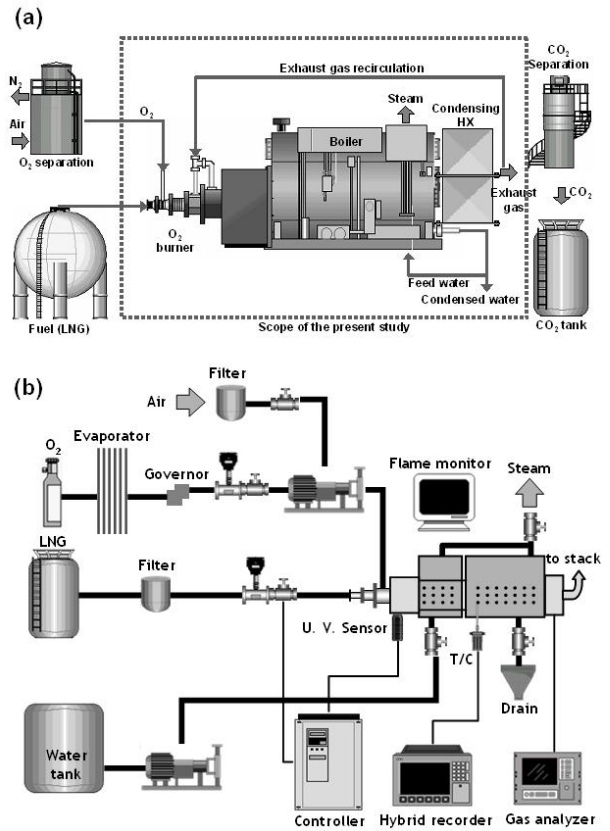


Fig. 2 (a) Concept of oxy-fuel boiler system for CO₂ capturing; (b) Schematic diagram of the experimental setup

를 모형화한 연소실을 포함하도록 구성하였다. 속도경계조건으로 모든 벽면에서 점착조건을 부과하였고 연소기의 입구에서는 연료 및 산화제의 유량이 실험과 같아지도록 유속을 설정하였다. 산화제의 경우 점선방향 속도를 부과하여 선회가 이루어지는 연소기를 모사하였다. 온도 경계조건으로는 공급되는 연료 및 산화제의 온도를 300K, 연소실 벽면의 온도를 500K로 설정하고 연소기 벽면에는 단열조건을 부과하였다. 격자계는 그림 Fig. 3(a)와 같이 7300개의 삼각뿔 격자로 구성하였다. 연소기 내부에서는 공기연소와 산소연소에 대해 Fig. 3(b)와 같이 노즐의 위치를 변화시켜 실험과 같은 조건이 되도록 격자를 구성하였다.

유동현상에 대한 지배방정식으로 연속방정식 및 운동량 방정식을 해석하였고 압력기반의 SIMPLE 알고리즘으로 연결하였고 난류모델로는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 에너지방정식에는 P-1 복사모형을 도입하여 복사열전달을 고려하였다. 연소현상은 화학종 방정식을 계산하여 해석

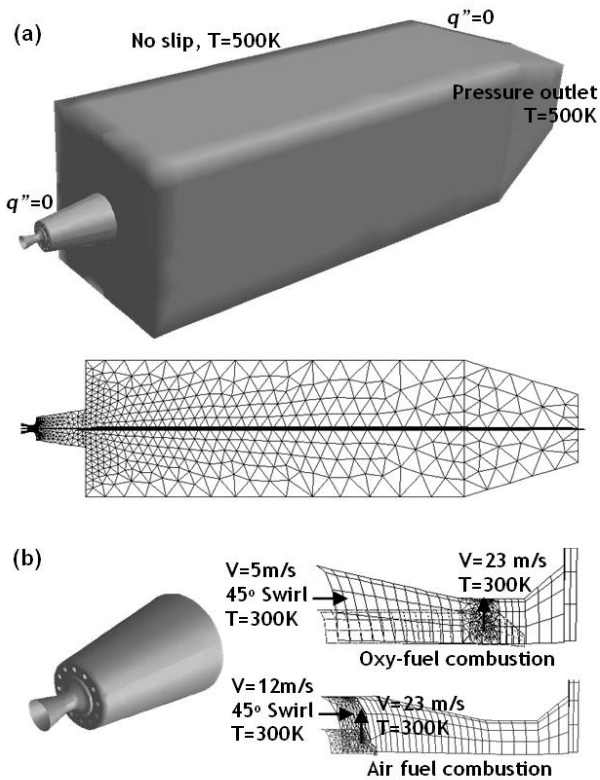


Fig. 3 Computational domain; (a) computational domain and grid system; (b) configuration of the burner for the simulation

하였고 난류와 화학반응의 상호작용은 EDC(Eddy Dissipation Concept) 모형을 사용하여 고려하였다.

3. 결과 및 토의

관측창을 통해서 관찰한 화염형상(Fig. 4)을 보면 공기연소의 경우와 순산소연소의 경우 모두 연소부하가 클수록 배가스 산소농도가 작을수록 화염의 휘도가 높다. 산소연소의 경우 공기연소에 비해 휘도가 높은 것으로 보고된 바 있고⁽⁴⁾ 본 연구에서 촬영한 영상에서는 높은 부하율(24 kW, 29 kW)에서 이러한 경향을 명확하게 관찰할 수 있다. 부하율이 높은 경우 산소연소의 화염전파속도가 공기연소에 비해 빨라 화염이 응집되는 경향을 볼 수 있다.

연소실 중심축을 따라 측정한 온도분포(Fig. 5)는 순산소연소와 공기연소 모두 화염에 가까운 상류에서 급격히 감소하고 하류에서는 서서히 감소하는 경향을 보인다. 본 실험을 수행한 보일러는 Fig. 2(b)와 같이 2개의 연소실이 직렬로 연결

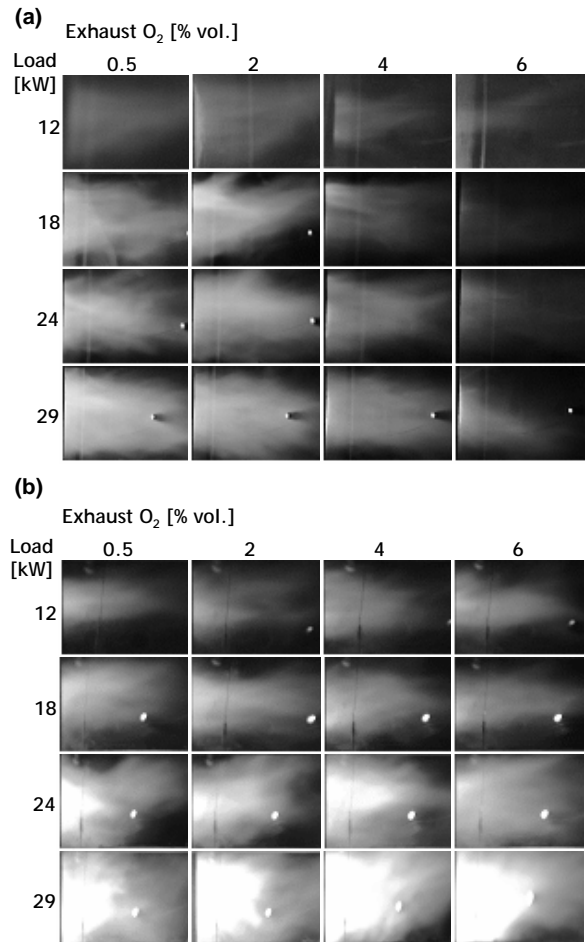


Fig. 4 Photographs of flame; (a) air combustion; (b) oxy-fuel combustion

이 되어 있고 수관이 하류연소실에만 장착이 되어 공기연소의 경우 축방향 온도분포에 변곡점이 생기는 것을 관찰할 수 있다. 화염에 가까운 상류에서는 단일화염온도가 높은 순산소연소의 경우가 공기연소보다 온도가 높지만 하류에서는 유사한 수준을 보인다. 과잉산소농도는 0.5~6% 범위에서 온도분포에 큰 영향을 주지 않는 것을 볼 수 있다 (Fig. 6).

수치해석에서 구한 연소실 중심축 온도분포를 실험과 비교해보면(Fig. 7) 공기연소와 산소연소 모두 선으로 표시한 수치해석 결과가 기호로 표시한 실험결과보다 온도를 높게 예측하고 있다. 이는 연소실 벽면의 온도경계조건과 복사모형의 영향으로 보인다. P-1복사모형은 국소열원이 있을 경우 실제보다 온도가 높게 예측되는 것으로 보고되고 있다.⁽⁵⁾

공기연소의 경우(Fig. 7(a)), 부하율이 12 kW인

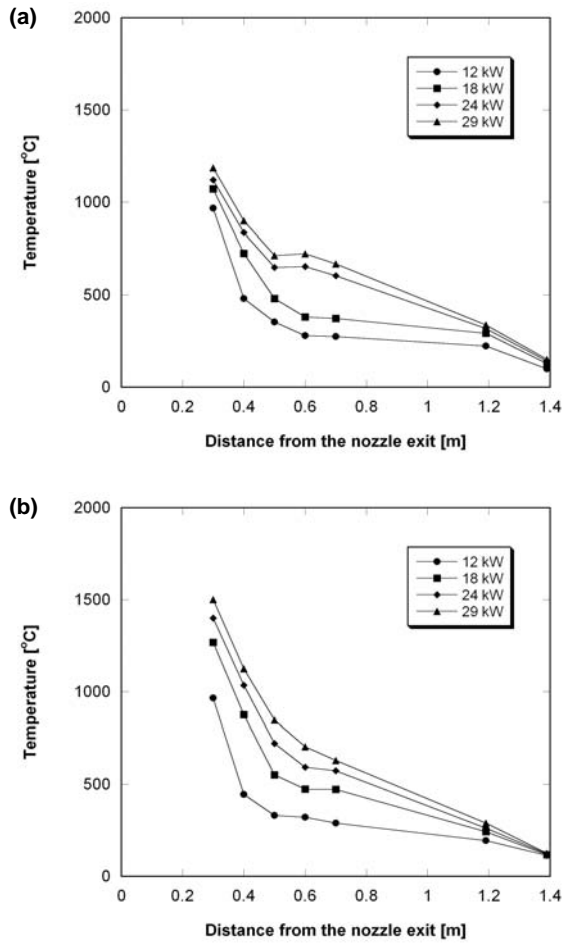


Fig. 5 Temperature along the streamwise centerline of the combustion chamber with the exhaust O_2 concentration of 2%; (a) air combustion; (b) oxy-fuel combustion

경우에 비해 24 kW일 때 수치해석과 실험의 차이가 작다. 산소연소의 경우(Fig. 7(b)), 공기연소에 비해 수치해석이 실험결과와 잘 일치하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 공기연소의 경우 부하율이 높을수록, 공기연소에 비해서는 산소연소의 경우가 연소가스 중에 이산화탄소나 수증기의 비율이 높아지면서 광학두께가 증가하여 P-1모형의 정확도가 높아졌기⁽⁵⁾ 때문인 것으로 보인다.

수치해석에서 구한 연소실 내부의 온도분포(Fig. 8)를 보면, 공기연소의 경우 어두운 색으로 표시된 고온영역이 연소기 출구로부터 떨어져 하류에 퍼져있고 산소연소의 경우에는 연소기 주변에 집중되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 이는 화염의 전파속도에 따라 형성된 화염형상(Fig. 4)의 경향과 일치한다. 배가스 산소농도 2%에서 부하

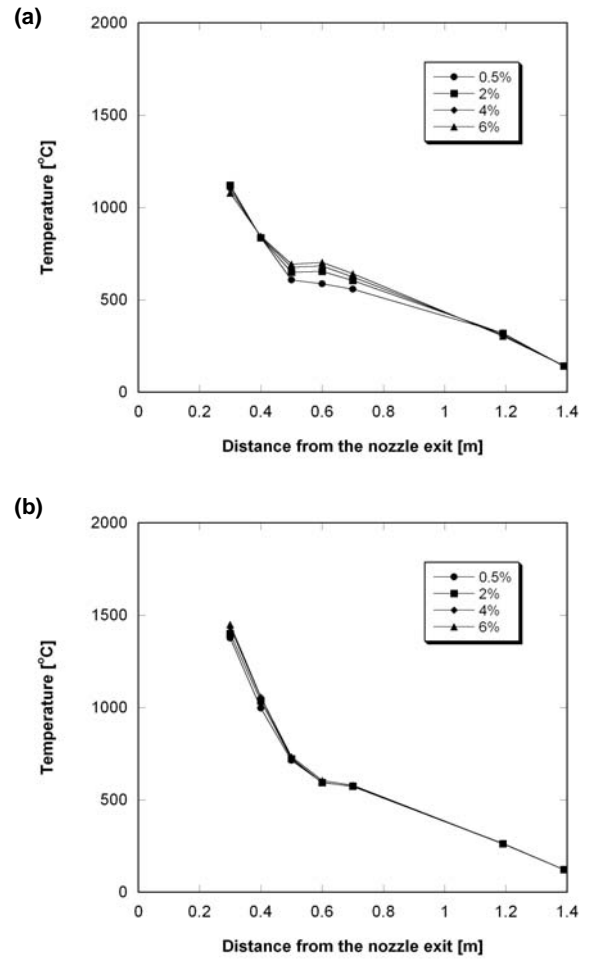


Fig. 6 Temperature along the streamwise centerline of the combustion chamber with the combustion load of 24 kW; (a) air combustion; (b) oxy-fuel combustion

율에 따른 온도분포를 비교한 공기연소의 경우 부하율 12 kW의 경우(Fig. 8(a))가 24 kW의 경우(Fig. 8(b))보다 하류를 중심으로 온도가 높은 것을 볼 수 있다. 24 kW 부하에서 과잉산소농도의 영향을 살펴본 순산소연소(Fig. 8(c), (d))의 경우 과잉산소농도 0.5%인 경우와 2%인 경우에 큰 차이가 없고 이는 실험결과(Fig. 6(d))와도 같은 경향이다. 온도변화가 큰 상류에서 등온선 간격이 좁고 하류에서 간격이 넓어지며 공기연소와 순산소연소가 하류영역에서 온도분포가 유사해지는 경향도 실험결과(Fig. 5)와 정성적으로 일치한다.

순산소연소에 따른 이산화탄소 고농도화 특성을 보면 공기연소에서 10% 수준인 건조 배가스 중 이산화탄소 농도가 순산소연소를 통해서 크게

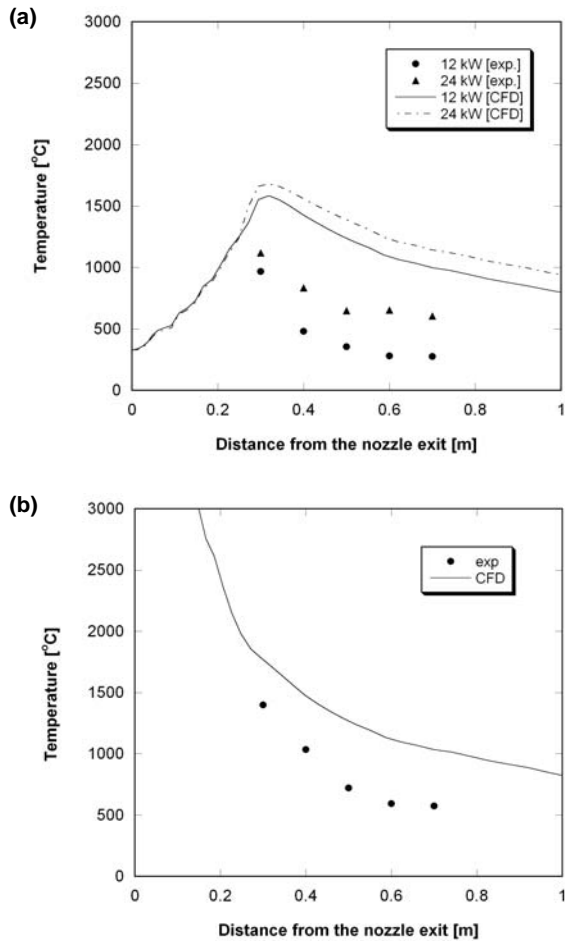


Fig. 7 Validation of computational results for the centerline temperature of the combustion chamber; (a) air combustion (2% O₂); (b) oxy-fuel combustion (24 kW, 2% O₂)

높아지게 된다(Fig. 9). 이상적인 경우인 수치해석 결과에서는 연소실 내 대부분의 영역에서 수증기를 제외한 연소가스의 이산화탄소 농도가 95% 이상이 되지만(Fig. 9(b)), 본 연구에서 제작한 모형 보일러에서는 80~90% 수준의 농도를 보인다. 이는 시스템의 기밀유지가 완벽하지 않아 공기가 유입된 영향으로 보이며 부하량 12 kW에 비해 29 kW에서는 다소 개선된 특성을 나타낸다.

배기가스중의 NO의 농도는(Fig. 10(a)) 순산소 연소의 경우가 공기연소에 비해 크게 증가한다. NO는 대기중의 공기가 유입되어 발생한 것으로 보이며 단위연료량당 발생량을 비교했을 때 50~70% 증가하였다. CO의 농도는(Fig. 10(b)) 순산소연소의 경우 공기연소에 비해 높은 값을 보이지만 단위연료량당 발생량은 감소하였다. 보일

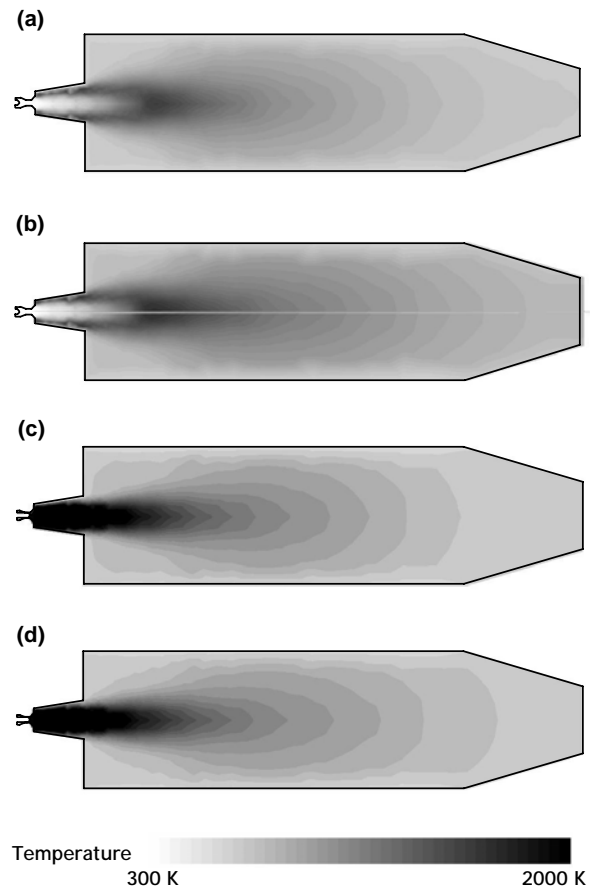


Fig. 8 Temperature distribution inside the combustion chamber; (a) air combustion, 12 kW, 2% O₂; (b) air combustion, 24 kW, 2% O₂; (c) oxy-fuel combustion, 24 kW, 0.5% O₂, (d) oxy-fuel combustion, 24 kW, 2% O₂

러 배가스가 갖는 열량을 계산하면 공기연소, 순산소연소 모두 발열량의 5% 이내였으며 순산소연소의 경우 배가스로 빠져나가는 열량이 공기연소의 30% 수준으로 크게 감소하였다.

4. 결론

본 연구에서는 순산소 버너를 50 kW급 보일러에 설치하여 실험을 수행하고 수치해석을 병행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 순산소연소의 경우 공기연소에 비해 화염이 버너 주위에 집중이 되며 기체복사의 영향으로

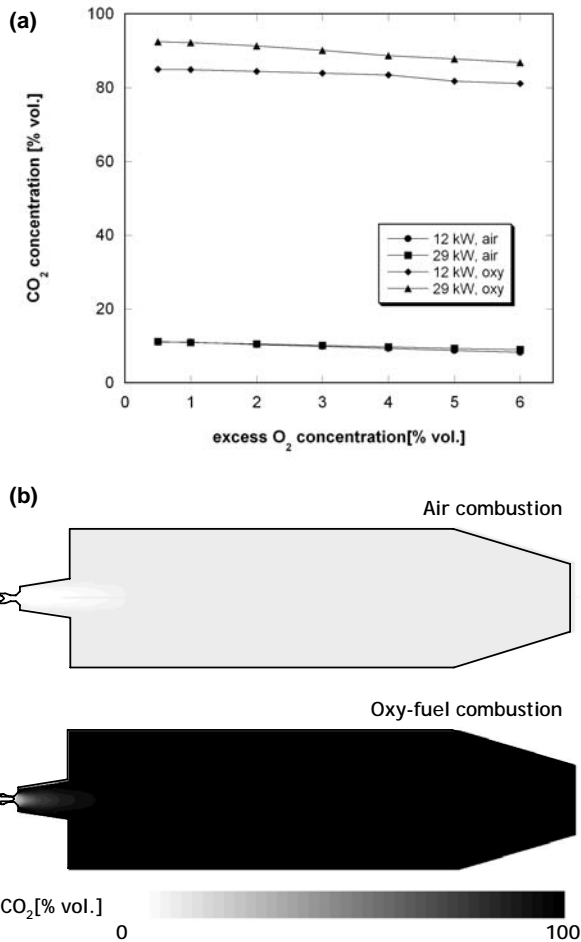


Fig. 9 CO₂ concentration; (a) of the exhaust gas (experiment); (b) in the combustion chamber (CFD, 24 kW, 2% O₂)

- 작은 유량으로도 보일러 내부를 가열할 수 있다.
- (2) 배기가스의 성분을 분석한 결과 CO₂의 고농도화나 저공해 성능을 달성하기 위해서는 시스템의 기밀유지가 매우 중요한 것으로 드러났다.
- (3) 수치해석 결과 연소실 내부의 온도가 실험보다 높게 예측되었고 이는 온도 경계조건과 복사모형의 영향으로 보인다.
- (4) 순산소연소를 도입할 경우 보일러 연소실에서 대부분의 열량을 흡수하여 공기연소에 비해 배가스 열손실이 크게 감소한다.

참고문헌

- (1) CDRS R&D Center, 2006, "R&D Program

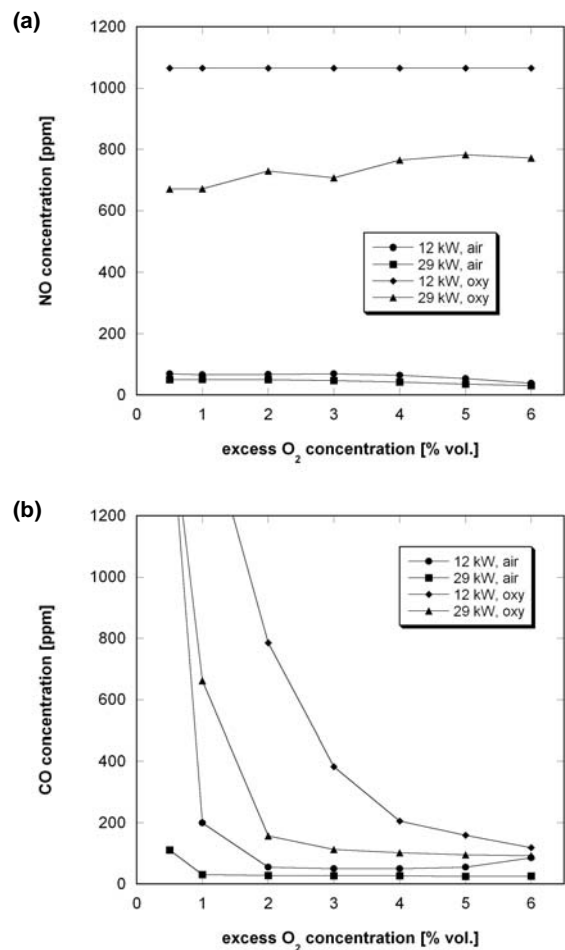


Fig. 10 (a) NO concentration of the exhaust gas; (b) CO concentration of the exhaust gas

- Introduction," pp. 1-31.
- (2) Tan, W., Douglas, M. A. and Thambimuthu, K. V., 2002, "CO₂ Capture Using Oxygen Enhanced Combustion Strategies for Natural Gas Power Plants," *Fuel*, Vol. 81., pp. 1007~1016.
- (3) Kim, H. J., Choi, K. S., Lee, S. S. and Noh, D. S., 2006, "Oxy-fuel/ Air Combustion Convertible Burner," Patent No. 10-0599381.
- (4) Kim, H.-K. and Kim, Y.-M., 2005, "Flame Length Characteristic for Varying Nozzle Diameter to Develop Oxy-fuel Combustor," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 7, pp. 861~867.
- (5) Siegel, R. and Howell, J. R., 1992, *Thermal Radiation Heat Transfer*, Hemisphere Publishing, pp. 771-785.