

# 순산소 재순환 연소를 채택한 CO<sub>2</sub> 회수형 보일러 개발: 3 MW급 시스템 연소 특성

안 준<sup>†</sup>, 김 혁 주, 최 규 성  
한국에너지기술연구원

## Oxy-fuel FGR Combustion Boiler for CO<sub>2</sub> Capturing: 3 MW Class Combustion Experiment

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

**ABSTRACT:** A 3 MW class oxy-fuel boiler has been developed to capture CO<sub>2</sub> from the exhaust gas. The system is a scale-up of the previous 0.5 MW class system in general. A heat exchanger and a mixer are additionally installed to stabilize the flame for the FGR mode. The system yields the exhaust gas with CO<sub>2</sub> concentration over 90% and reduced NO emission to 1/10 of conventional air combustion system.

**Key words:** Oxy-fuel combustion(순산소 연소), Boiler(보일러), Burner(버너)

### 기 호 설 명

Air : 공기 연소  
FGR: 배가스 재순환 연소

### 1. 서 론

최근 우리나라를 포함하여 세계적으로 이어지는 기상이변의 원인으로 지구온난화가 지적되고 있다. 지구온난화는 대기 중에 존재하는 온실가스의 작용으로 밝혀지고 있으며 온실가스 중에서는 화석연료를 이용할 때 발생하는 이산화탄소가 가장 큰 부분을 차지하고 있다. 따라서 이산화탄소의 발생을 규제하는 움직임이 세계적으로 진행되는 가운데 우리나라는 2002년 교토의정서를 비

준하고 새로 출범하는 아시아 태평양 파트너십 프로그램에도 참가하고 있다. 국제적 합의에 의한 이산화탄소 감축 의무에 수반되는 국가경제 위축을 최소화하기 위하여 현재 다양한 기술이 개발되고 있다.<sup>(1,3)</sup> 이러한 기술 중에서 화석연료의 연소과정에서 발생하는 이산화탄소를 처리하는 대표적인 기술로는 분리막 등을 활용한 분리 기술, 아민법 등의 흡수기술 그리고 순산소 연소 기술 등이 있다.<sup>(4)</sup>

이들 중에 순산소 연소기술은 산화제로 공기대신 산소를 사용하는 기술로서 이 경우 연소가스가 주로 이산화탄소와 수증기로만 구성되어 수증기를 응축시키는 것만으로 이산화탄소를 분리할 수 있다.<sup>(5)</sup> 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.<sup>(1,3)</sup>

이에 본 연구에서는 Fig. 1(a)와 같이 순산소 연소를 산업용 보일러에 적용하여 고농도의 이산화탄소를 얻을 수 있는 시스템을 구성하였다. 선

<sup>†</sup> Corresponding author  
Tel.: +82-42-860-3328; fax: +82-42-860-3098  
E-mail address: jahn@kier.re.kr

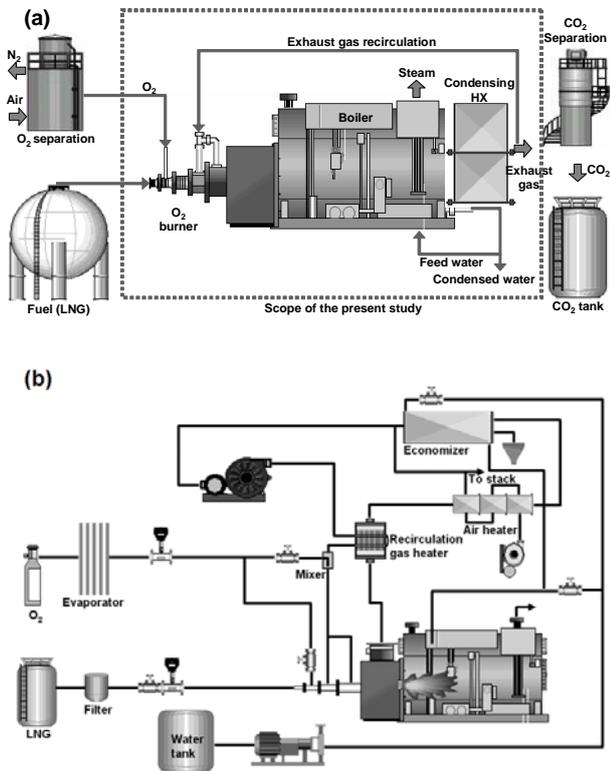


Fig. 1 Oxy-fuel combustion boiler; (a) System schematics; (b) Experimental setup

행연구로서 50 kW급 모형에 대하여 실험 및 수치해석을 수행하였고,<sup>(1)</sup> 0.5 MW급 보일러에서 연소 및 열전달 특성을 관찰하였다.<sup>(2,3)</sup> 본 논문에서는 선행 연구 결과를 반영하여 3 MW급으로 확대한 용량의 시스템을 구축하여 용량을 늘리면서 생기는 화염의 특성, 이산화탄소 고농도화 및 NO, CO 등의 유해 배가스의 발생 특성을 토의한다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험장치는 선행연구로 진행한 0.5 MW급 시스템과 유사하게 노통연관식 보일러를 기반으로 Fig. 1(b)와 같이 구성하였다. 연료는 LNG로 부하율 100%인 경우 240 Nm<sup>3</sup>/h의 유량으로 버너에 공급된다. 버너는 공기연소와 순산소연소에 모두 적용될 수 있도록 Fig. 2와 같이 설계하였다. 선행되었던 50 kW급 모형 실험에서는 화염의 안정성을 확보하기 위해 Fig. 2(a)와 같이 연료를 산화제에 수직으로 분사하였고 동축형 구조

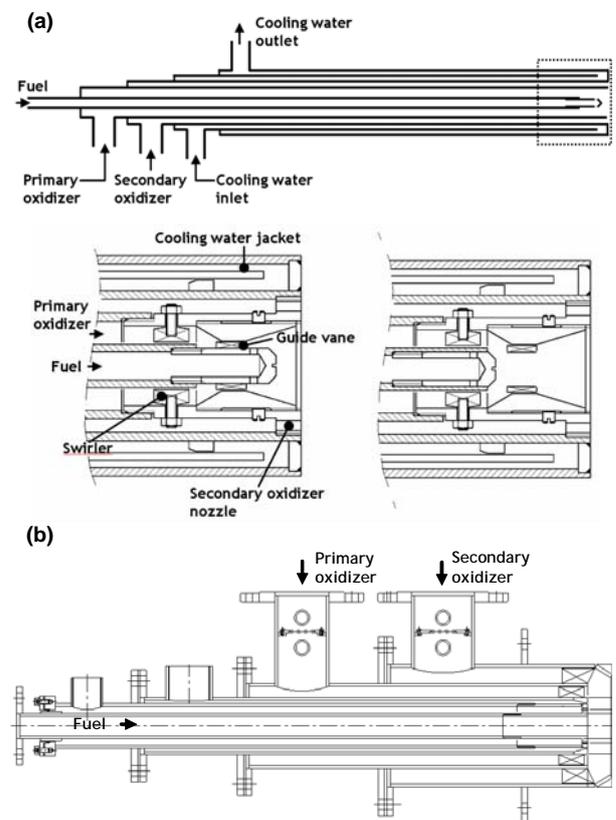


Fig. 2 Oxy-fuel/ FGR/ air combustion convertible burner; (a) 50 kW; (b) 0.5 or 3 MW

에서 연료관을 이동하여 유로를 바꾸어 연소 방식에 대응하도록 하였다. 반면 0.5 MW 및 3 MW급 보일러에 사용한 버너의 경우 (Fig. 2(b)), 순산소 연소의 경우 노즐을 통해 공기연소 및 재순환 연소의 경우 동축의 2중 선회기를 통해 산화제를 공급하였다.

산소는 증발기를 거쳐 공급하였고 재순환 연소의 경우 연소배가스와 열교환을 이루도록 하여 배관에서 수증기가 응축되면서 화염이 불안정해지는 현상을 예방하였다. 재순환 연소의 경우 산화제에서 수분을 제외한 산소 농도가 30%, 35% 두가지 조건이 되도록 하였고 0.5 MW급 시스템과 달리 3 MW급 시스템에서는 혼합기를 설치하여 산소와 배가스가 균일하게 혼합될 수 있도록 하였다. 연소실은 노통연관식 보일러이므로 물집 내에 위치하고 정면과 측면에 화염을 관찰할 수 있는 관측창을 설치하였다. 보일러 출구에서는 기체를 포집하여 기체분석기로 배가스의 성분을 분석하였다.

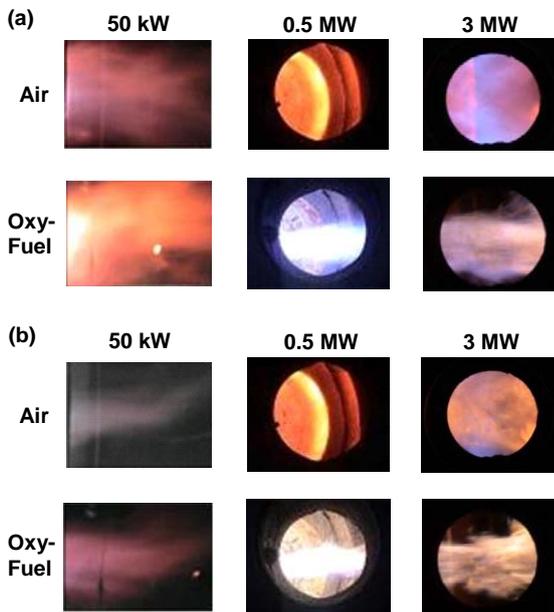


Fig. 3 Scale up characteristics of the flames;  
(a) Load 100%; (b) Load 50%

### 3. 결과 및 토의

순산소 연소와 공기연소의 화염 형태를 비교해 보면 (Fig. 3) 순산소 연소의 경우 공통적으로 공기연소에 비해 화염의 체적이 작아지고 휘도가 높아지는 특성을 보인다. 50 kW급 시스템의 경우 연료가 산화제에 수직하게 분사되어 화염이 버너 출구에 가깝게 형성된다. 큰 용량의 경우에는 산화제 공급 방식에 따라 순산소 연소의 경우 유동방향으로 신장된 형태의 화염이 공기연소의 경우에는 반경방향으로 퍼진 형태의 화염이 형성된다.

공기연소의 경우 3 MW급 시스템의 경우 0.5 MW급 시스템에 비해 버너출구에서 촬영 위치까지의 거리가 멀고 버너 타일이 약하게 적열되어 화염의 형태가 보다 명확하게 보이며 이러한 경향은 Fig. 4에 제시한 정면사진에서도 유지된다. 순산소연소, 공기연소에서 공통적으로 부하율 100%에서 측면사진을 보면 전체적으로 푸른색을 보이지만 50%에서는 상대적으로 화염이 불안정해지면서 국소적으로 밝은 노란색을 나타낸다. 배가스 산소농도의 영향을 보면 부하율 50%에서 배가스 산소농도가 증가할수록 화염이 푸른색에 가까워지고 이러한 경향은 공기연소의 경우에 보

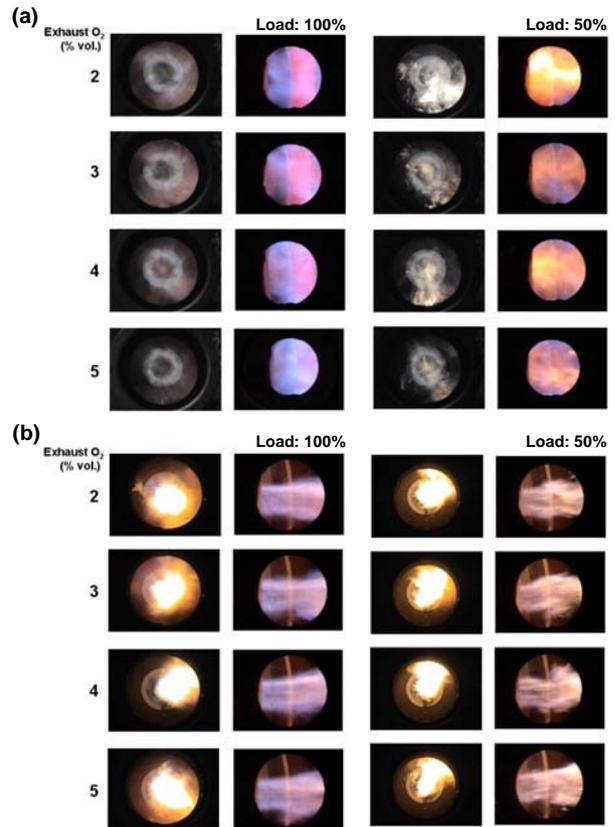


Fig. 4 Photographs of flame for 3 MW class system; (a) air combustion; (b) oxy-fuel combustion

다 명확하게 관찰할 수 있다.

배가스 재순환 연소는 0.5 MW급 시스템<sup>(2)</sup>보다 산화제에 포함된 산소농도가 낮은 30%에서 안정된 화염을 얻었고 화염은 전반적으로 푸른색을 나타낸다 (Fig. 5(a)). 재순환율을 줄여 산화제에 포함된 산소농도를 35%로 증가시킬 경우 (Fig. 5(b)) 화염이 불안정해지면서 전체적으로 노란색으로 변화한다. 측면사진에서 상류 측 화염 선단에 주름이 생기고 하류 쪽에는 화염 조각이 분포하는 모습을 보인다.

이산화탄소의 고농도화 특성을 보면 (Fig. 6), 3 MW급 시스템의 경우에도 0.5 MW급 시스템과 마찬가지로<sup>(2)</sup> 순산소 연소 및 배가스 재순환 연소에서 90%이상의 이산화탄소 농도를 얻었다. 전체적으로 배가스 산소농도가 증가함에 따라 산소의 비율만큼 선형적으로 이산화탄소의 농도가 감소하는 경향을 보인다.

배가스 중에 포함된 NO 농도의 경우, 공기연

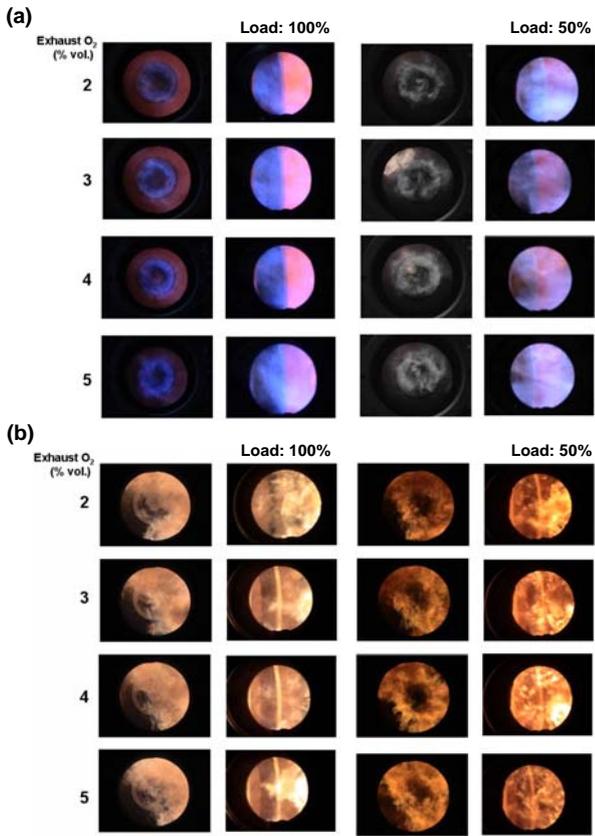


Fig. 5 Photographs of flame for FGR combustion; (a) 30% O<sub>2</sub> in oxidizer; (b) 35% O<sub>2</sub> in oxidizer

소의 경우 일반적인 LNG 버너의 발생 수준인 60-70 ppm 정도의 값을 나타낸다 (Fig. 7). 순산소 연소의 경우 배가스 산소농도가 낮은 경우 부하율 100%에서 50 ppm, 50%에서 30 ppm 수준으로 감소한다. 배가스 재순환 연소의 경우 NO가 크게 감소하여 20 ppm 이하의 저 NO<sub>x</sub> 특성을 보인다. NO농도는 순산소 연소를 채택한 부하율 50%의 경우를 제외하면 배가스 산소농도에 따라 민감하게 변화하지는 않는다.

일산화탄소(CO) 농도의 경우 (Fig. 8), NO에 비해 배가스 산소농도 및 부하율에 민감한 특성을 보인다. 부하율 100%인 경우 (Fig. 8(a)), 순산소 연소를 제외한 나머지 경우는 배가스 산소농도 3% 이상인 영역에서 CO가 거의 발생하지 않는다. 순산소 연소의 경우 노즐을 통해 산소를 분사하면서 화염이 상대적으로 불안해진 것으로 보인다. 부하율이 50%인 경우에는 공기연소를 제외한 나머지 연소방식은 배가스 산소농도가 3%

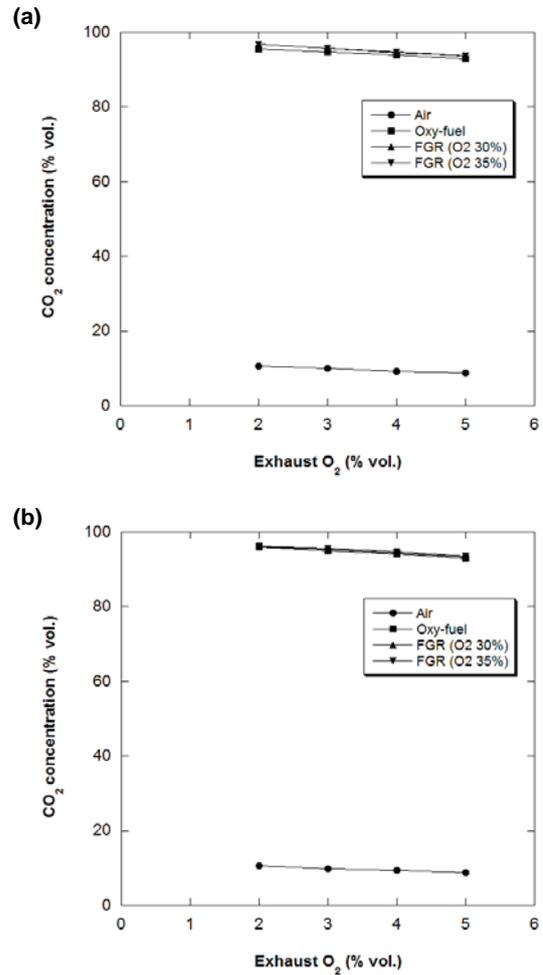


Fig. 6 CO<sub>2</sub> concentration of exhaust gas; (a) Load 100%; (b) Load 50%

이하일 때 CO가 100 ppm 이상 생성되는 것을 관찰할 수 있다.

순산소 및 배가스 재순환 연소의 경우 배가스량이 공기연소에 비해 크게 줄어드는 것을 반영하여 단위 연료량에 대한 NO 발생량을 계산하여 Fig. 9에 제시하였다. 순산소 및 배가스 재순환 연소의 경우 공기연소에 비해 NO 배출량을 1/10 이하로 크게 줄여준 것을 볼 수 있다.

단위 연료량에 대한 CO 발생량을 보면 (Fig. 10), 재순환 연소의 경우 선회기를 통해 안정된 화염을 얻었고 배가스 유량이 감소하여 CO 발생량이 공기연소에 비해 크게 감소한다. 순산소 연소의 경우 배가스 산소농도가 5%까지 높아진 경우에 부하율 100%에서 공기연소와 비슷한 수준의 CO 발생량을 구현할 수 있었으나 부하율 50%에서는 공기연소를 크게 상회하는 결과를 보

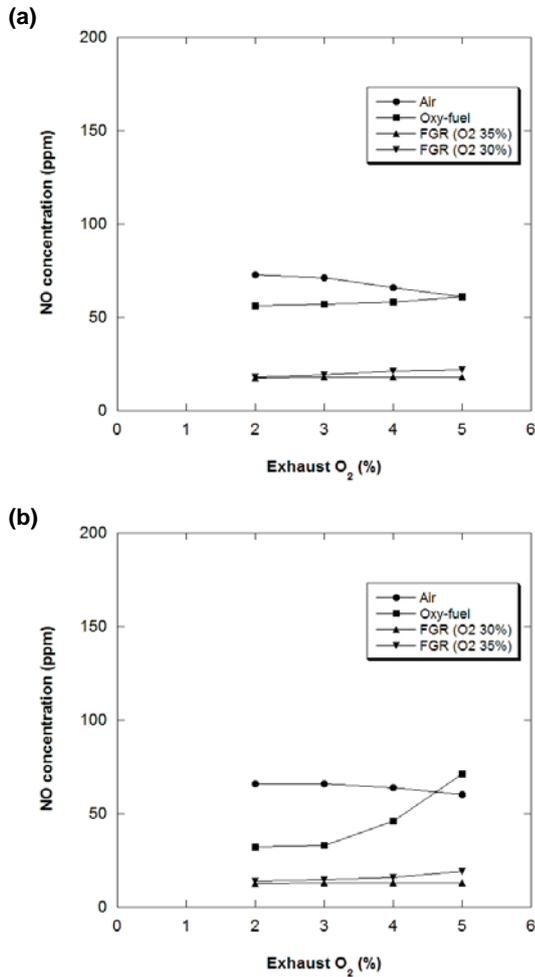


Fig. 7 NO concentration of the exhaust gas; (a) Load 100%; (b) Load 50%

었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 3 MW급으로 용량을 확대한 순산소 보일러에서 연소 특성을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 3 MW급 보일러 시스템에 순산소 연소를 적용하여 이산화탄소 농도를 90%이상 고농도화할 수 있고 질소 산화물의 발생량도 크게 줄었다.

(2) 0.5 MW급에서 3 MW급으로 용량을 확대할 때 순산소 FGR 방식의 경우에 산소와 배가스의 혼합이 중요하며 상대적으로 재순환율이 큰 조건에서 안정된 화염을 얻을 수 있다.

(3) 순산소 버너를 큰 용량에 적용할 경우 특

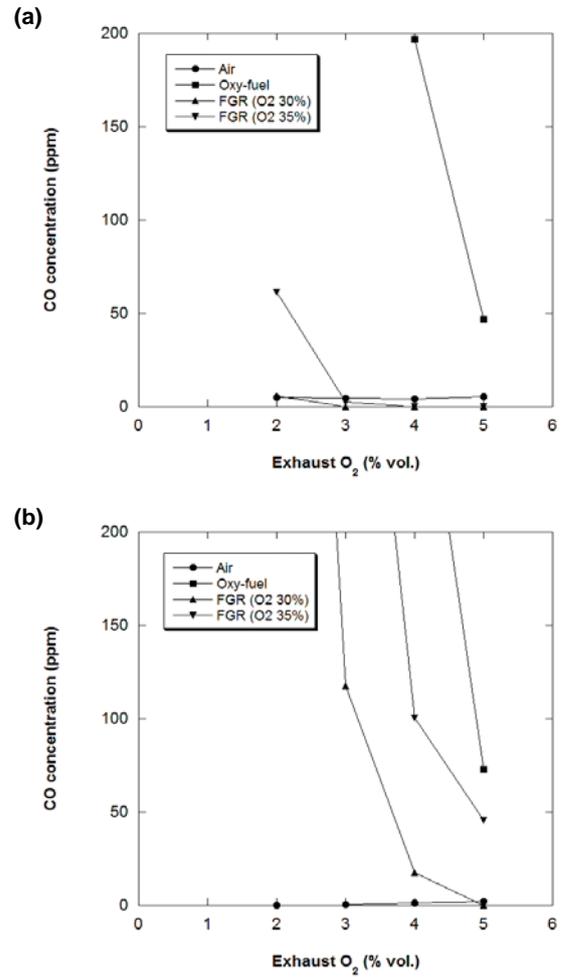


Fig. 8 CO concentration of the exhaust gas; (a) Load 100%; (b) Load 50%

히 재순환이 없는 순산소 연소의 경우 부분부하에서 화염의 안정성을 확보하는 것이 중요하다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

1. Ahn, J., Kim, H. J., and Choi, K. S., 2007, Oxy-fuel combustion boiler for CO<sub>2</sub> capturing: 50 kW class model test and numerical simulation, Proc. KSME Spring Annual Meeting, pp. 3276-3281.

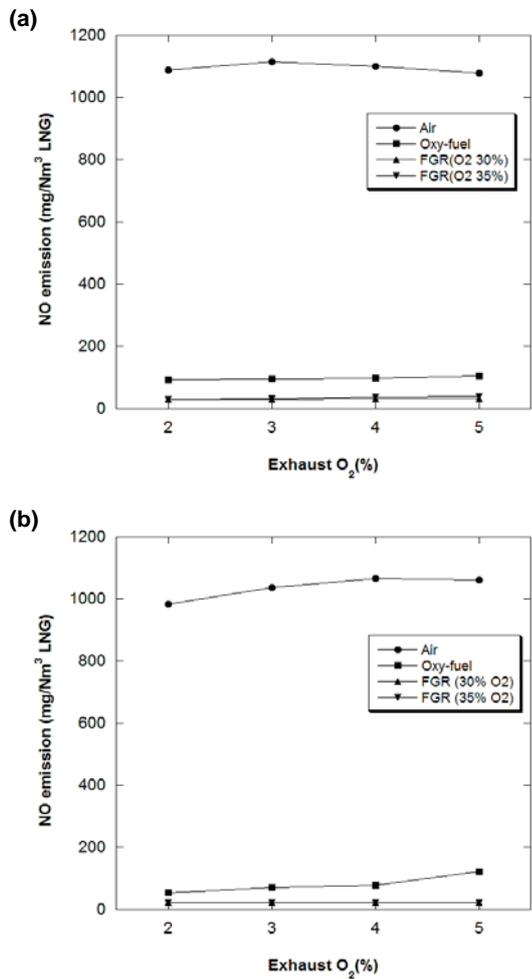


Fig. 9 NO emission per fuel consumption; (a) Load 100%; (b) Load 50%

- Ahn, J., Kim, H. J., and Choi, K. S., 2007, Oxy-fuel FGR combustion boiler for CO<sub>2</sub> capturing: 0.5 MW class combustion experiment, Proc. KSME Fall Annual Meeting, pp. 2249-2254.
- Ahn, J., Kim, H. J., and Choi, K. S., 2008, Oxy-fuel FGR combustion boiler for CO<sub>2</sub> capturing: 0.5 MW class system heat transfer characteristics, Proc. KSME Thermal/Fluid Engineering Division Spring

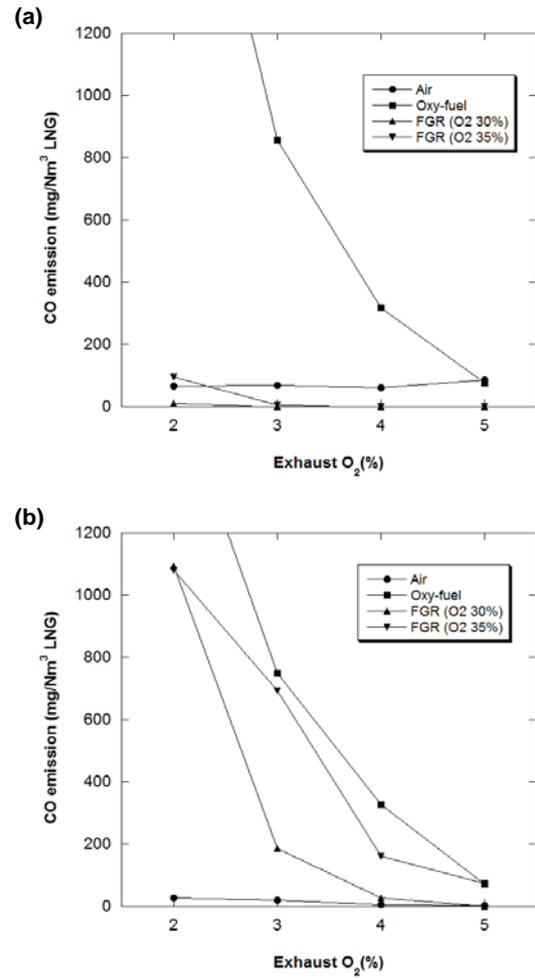


Fig. 10 CO emission per fuel consumption; (a) Load 100%; (b) Load 50%

- Meeting, pp. 224-227.
- MOST, 2007, R&D program for climate change in Korea, Proc. 1st Joint Workshop on R&D Program for Climate Change.
- Tan, W., Douglas, M. A. and Thambimuthu, K. V., 2002, CO<sub>2</sub> capture using oxygen enhanced combustion strategies for natural gas power plants, Fuel, vol. 81, pp. 1007-1016