

## IEA-CFBC 모델을 이용한 저급탄의 순산소 연소 특성 분석

곽유라 · 김예빈 · 길상인\* · 윤진한\* · 이시훈†

전북대학교 자원에너지공학과  
54896 전라북도 전주시 덕진구 백제대로 567  
\*한국기계연구원 환경시스템연구본부  
34103 대전광역시 유성구 가정북로 156  
(2018년 7월 7일 접수, 2018년 7월 25일 수정본 접수, 2018년 8월 14일 채택)

## Analysis of Oxygen Combustion Characteristics of a Low Grade Coal Using IEA-CFBC Model

You Ra Gwak, Ye Bin Kim, Sang In Keel\*, Jin Han Yun\* and See Hoon Lee†

Department of Mineral resources energy engineering, Chonbuk national university, 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, jeollabuk-do, 54896, Korea

\*Environment System Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials, 156, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34103, Korea

(Received 7 July 2018; Received in revised form 25 July 2018; accepted 14 August 2018)

### 요 약

에너지 공급 안정과 온실가스 저감이라는 목표를 달성하기 위해 저등급 석탄의 순산소 순환유동층 보일러의 적용이 새롭게 모색되고 있다. 아직까지 실증 단계의 개발이 진행되고 있기에 순산소 순환유동층 보일러에서의 저급탄 이용을 위해 주입 공기량, 조업 온도, 연료 공급량 등의 변화에 따른 연소 특성이 고찰되어야 상용 모델을 위한 설계 기준을 설정할 수 있다. 이에 본 연구에서는 공기 연소로 개발된 IEA-CFBC 모델을 순산소 연소를 전산모사하도록 개조하였고 새로운 순산소 순환유동층 모델을 이용하여 온도(800 °C~900 °C), 산소 농도(21%~41%), 석탄 주입량, Ca/S 비율(1.5~4.0) 등의 다양한 조건에서 순산소 연소 특성을 고찰하였다. 공기 연소와 비교하여, 순산소 조건에서의 보일러 온도가 높았으나 산소 농도가 증가함에 따라 보일러의 온도구배는 감소하는 경향을 나타냈다. 더불어 Ca/S 비율, 산소 농도가 높을수록 탈황 효율이 증가하는 것으로 나타났다.

**Abstract** – The application of an oxy-combustion circulating fluidized bed combustor (Oxy-CFBC) for low grade coals has recently developed in the world to meet the continuous increase of energy demand and to achieve the reduction of greenhouse gases. Since demo plants for Oxy-CFBC have been developed, the combustion properties of Oxy-CFBC in various operation conditions, such as gas flow rates, combustion temperature, fuel, and so on, should be investigated to develop design criteria for a commercial Oxy-CFBC. In this study, a computational simulation tool for Oxy-CFBC was developed on the basis of the IEA-CFBC (International Energy Agency Circulating Fluidized Bed Combustor) model. Simulation was performed under various conditions such as reaction temperature (800 °C~900 °C), oxygen contents (21%~41%), coal feeding rate, Ca/S mole ratio (1.5~4.0), and so on. Simulation results show that the combustion furnace temperature is higher in oxy 1 than air fired. However, the temperature gradient tended to decrease with increasing oxy mixing percent. In case of SO<sub>x</sub>, the higher the Ca/S mole ratio and oxy mixing percent, the higher the desulfurization efficiency.

Key words: Circulating fluidized bed, Computational simulation, Oxy combustion, Air combustion, Low grade coal

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: donald@jbnu.ac.kr

\*이 논문은 충남대학교 강용 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. Introduction

산업구조의 고도화와 함께 세계 각국의 에너지 소비는 지속적으로 증가하고 있으며, 이러한 에너지 수요를 충족시키기 위해 다양한 연료들이 사용되고 있다. 최근, 전세계적으로 매장량이 풍부하고, 가격이 타 연료에 비해 저렴한 저급탄의 활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 저급탄은 수분 또는 회분이 많기 때문에 직접 화열을 형성해 연소시키는 PC 화력에서는 보조 연료 없이 연소가 불가능하여, 이용이 제한적이다[1]. 그러나 최근 연소로 내 층 물질의 혼합에 의한 입자 연소를 통해 연료를 전환하는 순환유동층 기술의 발전으로 인하여 저급탄의 전력 생산에 많은 기술적 선택이 가능하게 되었다.

순환유동층 보일러는 연소가 일어나는 연소로, 가스와 고체를 분리하여 고체를 loop seal로 보내는 사이클론, 포집된 고체를 연소로로 재주입시키는 loop seal, 과열기, 재열기, 절단기, 공기 예열기 등의 열 교환기로 구성된 backpass로 이루어져있다(Fig. 1 참조). 순환유동층 보일러는 저급연료들의 체류 시간을 높여 연소 효율을 높게 유지할 수 있으며 다양한 연료 적응성과 환경규제에 대한 대처능력, 운전 관리의 용이 등의 장점으로 인해서 기존의 미분탄 및 스토커 연소 등을 대체하여 점차 보급이 확대되고 있다. 이와 같은 순환유동층 보일러의 최근 개발 동향을 Table 1에 나타내었다.

1990년 이전에는 200 MW급 이하의 순환유동층 보일러가 주로 보급되었으나, 1990년 중반에는 250 MW급, 2000년 초반에는 300 MW급의 순환유동층 보일러가 보급되었다. 순환유동층 보일러에 사용되던 연료 또한, 초기에는 역청탄과 같은 고급탄을 사용하였으나, 점차 회재 함량이 높은 무연탄이나 수분 함량이 높은 아역청탄 및 갈탄 등의 저급탄으로 확대되었고 이를 기점으로 순환유동층 보

일러의 성장 속도가 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다[3]. 그러나 최근 온실가스에 대한 관심과 인식이 높아짐에 따라 저비용으로 온실가스 저감을 달성할 수 있는 순산소 순환유동층 보일러에 대한 관심도 증가하고 있다.

순산소 순환유동층 보일러는 기존의 순환유동층와 이산화탄소 포집 및 저장(CCS) 중 순산소 연소가 융합되어 있다. 순산소 순환유동층 보일러는 고농도의  $\text{CO}_2$ 가 배가스로 배출되고 일부를 재순환시켜 이용하고 최종적으로 90% 이상의 이산화탄소를 저비용으로 저장한다. 이와 같은 장점으로 인해 순산소 순환유동층 보일러는 청정화력 발전 기술로서 평가받고 있다. 최근 순산소 순환유동층 보일러 기술에 대한 lab scale 연구뿐만 아니라 점차 대형화 하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 그러나 순환유동층 보일러는 연료 공급량, 가스 주입량, 조업 온도 등과 같은 외적 요인에 의해 운전 성능 및 특성이 달라진다. 이러한 상황에서 보일러 운전 전에 있어서 성능 예측과 동적 거동을 파악하여, 운전 손실을 줄임과 동시에 최적의 성능을 내야 한다. 또한, 변화된 운전 조건에서 최적의 운전 환경을 유지해야 하며, 갑작스런 운전 변화 및 운전 중 문제점들에 대한 파악은 필수적이다. 따라서 순환유동층 보일러 운전 특성 예측이 가능하며, 운전 중 발생하는 다양한 문제점들에 대해 즉각적으로 대처 가능한 시뮬레이션 툴에 대한 연구가 필요하다. 현재 순환유동층 보일러에 대한 시뮬레이션 툴은 많은 연구가 진행되었으나, 순산소 순환유동층 보일러의 운전 특성 분석을 위한 시뮬레이션에 대한 연구는 부족한 상황이다.

이에 본 논문에서는 기존에 개발되어 공개되어 있는 공기 연소 기반의 IEA-CFBC 모델을 이용하여, 공기 연소 조건에서의 순환유동층 보일러에 대한 운전 특성을 분석하였다. 또한, 순산소 순환유동층 보일러의 운전 특성에 대해 분석하기 위해 IEA-CFBC 모델을

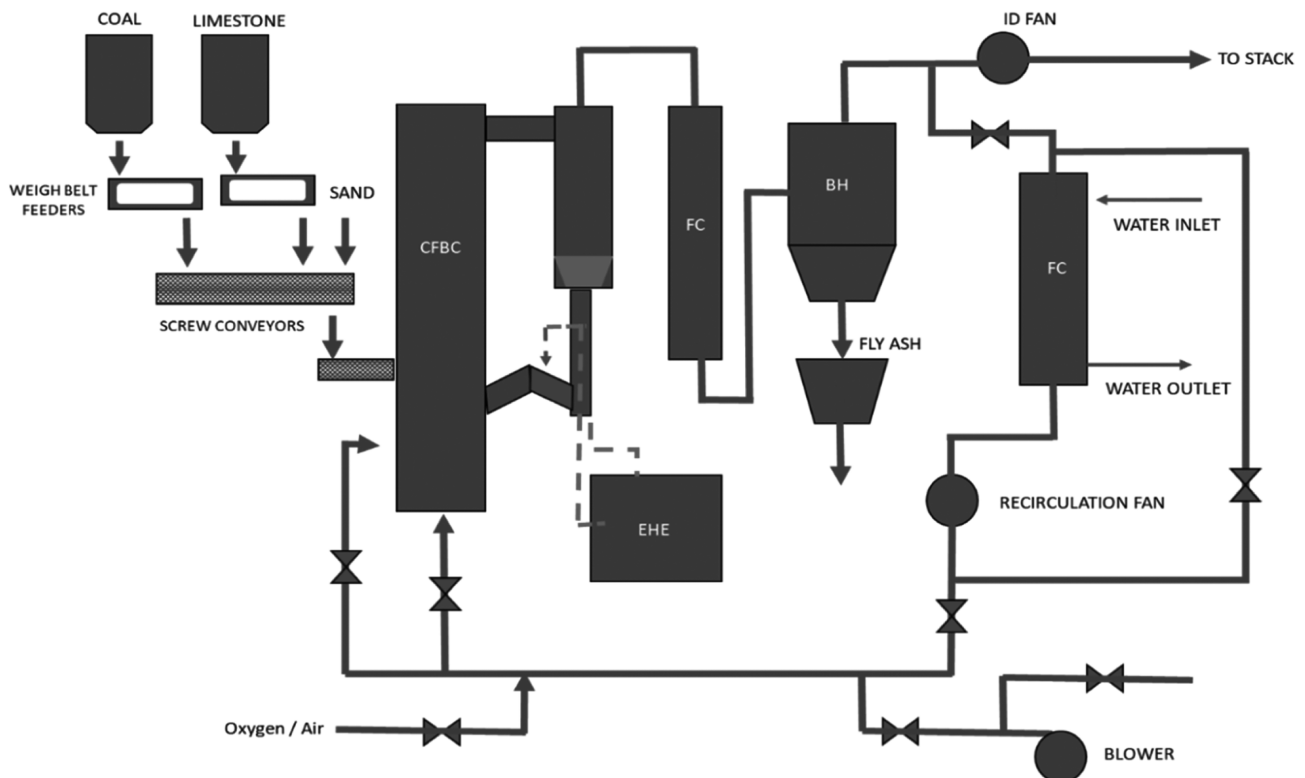


Fig. 1. Schematic diagram of Oxy-CFB.

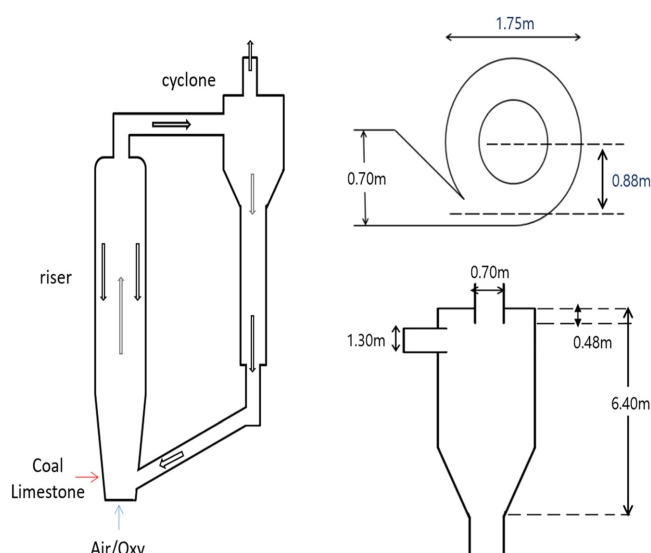
**Table 1. Circulating Fluidized Bed boiler installation status [4,5]**

Name of the plant	Country	Maker	Capacity	Coal type	Start-up
VAW	Germany	Lurgi	60MWth	Low-grade coal	1982
Mitsubishi Heavy Industry	Japan	Mitsubishi Lurgi	150t/h steam	Bitu. Coal Ind. Waste	1986
Scott Paper	USA	Lurgi	96MW	Anthracite culm	1986
Idemitsu Kosan	Japan	Battelle/Mitsui	300t/h steam	Bituminous coal	1986
Duisburg municipal Power Co.	Germany	Lurgi	96MW	Bituminous-coal waste	1986
Colorado-Ute	USA	Pyropower/Ahlstrom	110MW	Low-sulfur high-ash bituminous	1987
Kitakyushu	Japan	Battelle/Mitsui	50MW	Various coal	1987
Texas/New Mexico	USA	Lurgi/Comb.Engineering	150MW	Lignite	1990
ACE(Argus Cogeneration Expantion)	USA	Ahlstorm	90MW	Bituminous	1991
Stein Industry	France	Lurgi	125MW	Coal/water slurry	1991
Archbald Power	USA	Deutsche Babcock	20MW	Anthracite-culm	1991
Tallahassee	USA	Foster Wheeler	250MW	Bituminous	1995
EdF	France	Lurgi	250MW	High ash sum bitu.	1995
Turow	Poland	Foster Wheeler	260MW	Brown coal	2004
ENEL Produzione Sulcis	Italia	Alstom	340MW	High sulfur coal	2005
Baima	China	Alstom	300MW	Anthracite	2006
Kaiyuan	China	Alstom	300MW	Bituminous & Lignite	2007
Qinhuang-dao	China	Foster Wheeler	300MW	Bituminous & Lignite	2007
Sandow	USA	Foster Wheeler	315MW	Lignite	2008
CLECO	USA	Foster Wheeler	330MW	Coal/coal slurry	2009
Lagisza	Poland	Foster Wheeler	460MW	Coal/coal slurry	2009
Donghae	Korea	Andritz and Siemens	30MW	Bio-SRF	2013
Shanxi Guojin	China	Dongfang Boiler Co., Ltd	350MW	-	2015
Huadian Shuozhou	China	Shanghai Boiler co., Ltd	350MW	-	2015
Shendong Hequ	China	Dongfang Boiler Co., Ltd	350MW	-	2015
Shanxi Hepo	China	Dongfang Boiler Co., Ltd	350MW	-	2015
Xuzhou Huamei	China	Dongfang Boiler Co., Ltd	350MW	-	2015
Yeosu thermal power plant	Korea	-	350MW	Coal	2016
Samcheok green power plant	Korea	-	1022MW	coal	2017

기반으로 순산소 연소를 전산모사하도록 IEA-CFBC 모델을 수정하였다. 더불어 산소 함유량 변화에 따른 영향을 보기 위하여 석탄 투입량을 고정한 경우와 석탄 투입량이 증가한 경우에 대해 순환유동층의 운전 특성을 분석하였다. 본 연구는 공기 연소 조건과 순산소 연소 조건에서 순환유동층 보일러의 설계 및 운전 가이드 자료를 제시하는 것을 목적으로 하고 있다.

## 2. Numerical Simulation

본 연구가 대상으로 하는 2MWe 순환유동층 보일러는 석탄 및 석회석 주입 설비, 가스주입 설비( $O_2$  and  $CO_2$  or air), 상승관(riser), 싸이클론, 외부열교환기, 재순환 설비 등으로 구성되어 있다. 그러나 IEA-CFBC 모델에서는 상승관, 싸이클론, loop-seal, 주입설비(석탄, 석회석, 산소, 공기 등) 만을 고려하였으며, 이에 대한 모식도는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 보이는 것과 같이 riser로 유입된 물질들 중 무거운 입자들은 싸이클론을 통해 포집되며, 포집된 물질들은 loop-seal을 통해 재투입 되도록 설계되어 있다. 본 연구에서 사용된 해석 대상 연소로에 대한 크기는 Table 2에 표시하였다. Table 2에 표시한 것과 같이 해석 대상 연소로의 높이는 19 m이고, 폭은 약 2.4 m, 0.8 m이다. 순환유동층 반응기는 직육면체 구조로 분산판 위로부터 약 6m 부근에서 하단부로 좁아지는 형태를 갖고

**Fig. 2. Schematic diagram of 2 MWe CFBC.**

있다. 싸이클론의 경우 높이 6.4 m, 직경 1.75 m, 폭 0.7 m이며, 자세한 크기는 Table 2에 나타내었다.

**Table 2. Geometry of 2MW CFBC**

Section	Component	Size (m)
Combustor	Bed Area	0.8 × 2.4
	Freeboard	1.2 × 2.4
	Total Height	19.1
	Circulating Height	1.5
Cyclone	Total Height	6.40
	Diameter	1.75
	Tube diameter	0.70
	Tube length	0.48
	Inlet height	1.30
	Inlet distance	0.88
	Width	0.70

### 3. Method

본 연구에서는 순산소 순환유동층 보일러의 수력학적 특성 및 운전 특성을 전산모사하기 위해 국제 에너지기구(IEA: International Energy Agency) 산하 유동층 부문 위원회 모델링 그룹에서 개발한 1.5D 순환유동층 모델링 프로그램인 IEA-CFBC 모델을 이용하였다.

#### 3-1. IEA-CFBC code

순환유동층 연소로에 대한 모델링은 기존에 널리 알려진 기포유동층 모델을 기반으로 1990년 초부터 활발히 진행되어 왔다. 순환유동층 연소로의 모델링 방향은 축방향만을 고려하는 1차원 모델링부터 연소로를 축방향 및 횡방향 일부(core, annulus)를 고려하는 1.5차원 모델링, 그리고 축방향 및 횡방향을 모두 고려하는 3차원 모델링으로 구분되어 발전되었다. 특히, 최근 Barracuda와 Fluent와 같은 상용 CFD (Computational Fluid Dynamic) 모델 기법을 적용하여 순환유동층 유동 해석과 반응을 풀고자 많은 노력을 기울이고 있으나 3차원 모델링의 경우 유동 해석 및 반응 검증에 많은 어려움이 있는 상황이다. 뿐만 아니라 3차원 모델링의 경우 반응과 해석을 푸는데 많은 시간이 소요되기 때문에 현장에서 발생하는 문제들에 대해 즉각적으로 대응함에 있어서 CFD의 활용은 제한적이다. 이에 반해 1차원 및 1.5차원은 많은 연구가 진행되었으며, 이의 응용

및 적용도 상당히 이루어져 있다. 또한, 단시간에 계산이 이루어지기 때문에 현장 적용에 보다 유리하다. 본 모델링의 기본 구조는 수력학적 특성, 입자 분포, 연소 특성 및 배가스 특성, 열전달, 재순환 등으로 구성되어 있으며, 모델링 적용 사례는 Table 3와 같다.

본 연구에서 이용한 IEA-CFBC 모델은 1986년 Petro에 의해서 개발된 상압 기포유동층 모델링 프로그램인 CANMET 모델을 기초로 하고 있다. 이 CANMET 모델을 기반으로 1990년에 IEA-FBC그룹에서 IEA-AFBC 모델을 개발하였으며, 1990년대 중반에 IEA-AFBC 모델을 발전시켜 2000년 초반에 IEA-CFBC 모델을 개발하였다. 이모델은 기계, 화학, 열공정 모델로 구성되어 있으며, 고체 유동, 입자 크기 분포, 가스 흐름, 석탄 전환, 균질 및 이질 기체 반응, 열전달 등의 유동화 패턴으로 구성되어 있어 순환유동층 보일러를 잘 묘사하는 모델로 평가되고 있다[4,5].

#### 3-2. Oxy-CFBC code

IEA-CFBC 모델의 경우 공기 연소 조건의 순환유동층 보일러에 대한 시뮬레이션 코드이기 때문에 공기 조건에 맞춰져 있다. 따라서 순산소 연소 조건에서 순환유동층 보일러의 운전 특성을 분석하기 위해서는 질소가 아닌 이산화탄소를 고려해야 한다. 이는 공기 연소에서 순산소 연소로의 전환은 단순히 질소에서 이산화탄소로의 가스 전환에 그치지 않고 순환유동층 보일러의 수력학적 특성 및 연소 특성 전반에 큰 영향을 끼치게 된다. 따라서 순산소 연소를 전산모사하기 위하여, 본 연구에서는 기존의 IEA-CFBC의 가스 모델을 순산소 조건에 맞도록 혼합 가스의 밀도, 점도, 열전도도를 개조하였다. 밀도의 경우, 기존 연구 자료를 토대로  $\rho_{g,0}$  (1 atm, 273 K) 값을 구하는 공식은 아래와 같으며, 아래 식을 이용하여  $O_2$  mixing percent에 따른 값을 계산하여 적용하였다[27].

$$\rho_{g,0} = \frac{[P \times (O_{2,mole\ weight} \times O_{2,\%})] + [P \times (CO_{2,mole\ weight} \times CO_{2,\%})]}{R_g \times T(K)} \quad (1)$$

점도는 Crane company [6]와 Weast *et al.* [7]에서 제안한 식을 사용하였으며, 아래와 같다.

$$\mu_g = \mu_0 \times (a \div b) \times (T \div T_0)^{3/2} \quad (2)$$

**Table 3. Overall models for circulating fluidized bed combustion**

Model	Fluid dynamics	Size distrib.	Coal comb.	SO <sub>2</sub>	NOx	Heat trans.	Steam proc.	Recirc.	Condition	State
Siegen [16]	1-dim	+	+	+	+	+	+	+	Air	Std
Zhang [17]	1-dim	-	+	+	+	+	-	+	Air	Dyn
Mori [18]	Block	-	+	-	-	-	-	+	Air	Std
Basu [19]	1.5-dim	-	+	+	+	+	-	-	Air	Std
Xu [20]	1-dim	+	+	+	+	+	+	+	Air	Std
Lin [21]	1-dim	-	+	+	-	-	-	-	Air	Std
Halder [22]	1-dim	+	-	-	-	-	-	-	Air	Std
IST [23]	1-dim	-	+	+	+	+	-	-	Air	Std
Alstrom [24]	1-dim	-	+	-	+	+	-	-	Air	Dyn
Hiller [25]	1.5-dim	-	+	+	-	-	-	-	Air	Std
Werner [26]	1.5-dim	+	+	+	+	+	-	-	Air	Std
IEA [27]	1.5-dim	+	+	+	+	+	-	+	Air	Std
Barracuda [28]	3-dim	+	+	+	+	+	+	+	Air	Dyn
Fluent [29]	3-dim	+	+	+	+	+	+	+	Air	Std
Sedegh [30]	1-dim	-	+	-	-	+	-	+	Oxy	/

std = steady state, dyn = dynamical, + = consideration, - = no consideration, / = none

**Table 4. Experimental conditions**

Operating conditions	Coal type	Reaction Temperature	O <sub>2</sub> mixing ratio (%)	Coal feeding rate (kg/s)	Flow rate (Nm <sup>3</sup> /s)
Air fired (O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> )	KPU	T1 (800 °C)	21	0.24	2.071
Oxy 1 (O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> )		T2 (825 °C)	21	0.24	2.071
Oxy 2 (O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> )		T3 (850 °C)	31	0.24	1.380
Oxy 3 (O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> )		T4 (875 °C)	41	0.24	1.045
Oxy 4 (O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> )		T5 (900 °C)	31	0.35	2.071
Oxy 5 (O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> )			41	0.47	2.071

$$a = 0.555T_0 + C \quad (3)$$

$$b = 0.555T + C \quad (4)$$

$$\lambda_g = [(T - 86.25) \times \text{CO}_{2,\%} + (T + 32.5) \times \text{O}_{2,\%}] \quad (5)$$

Thermal output의 경우 Lemmon et al. [8], Faghri et al. [9], Incropera et al. [10] 등의 연구 결과를 수식화하여 시뮬레이션에 적용하였다. 본 시뮬레이션 툴의 sub-model 중 일부를 앞서 언급된 식들로 변경하였으며, 변경된 코드를 이용하여 순산소 연소 조건의 순환유동층 보일러 운전 특성을 분석하였다.

#### 4. Materials and Experimental Parameters

본 연구에서의 변수는 산소 농도, 온도, 석탄 투입량, 석회석 투입량 등이며, Table 4와 Table 5에 표시하였다. Table 4에 나타난 것과 같이 다양한 O<sub>2</sub> 농도(21%-41%)를 사용하였으며, 혼합 비율 변화량은 10%로 설정하였다. 이때, Ca/S 비율은 1.2-2.3사이의 값을 가진다. 운전 온도의 경우, 온도에 따른 SO<sub>x</sub>와 NO<sub>x</sub> 배출량의 영향을 조사하기 위해, 800 °C~900 °C로 설정하였다. 석탄 투입량은 동일한 조건에서 산소 혼합 비율에 따른 운전 조건 변화를 확인하기 위해 석탄 투입량을 0.24 kg/s로 설정하였다. 뿐만 아니라, O<sub>2</sub> 비율 증가에 따른 석탄 사용량 증가의 영향을 살펴보기 위해 Oxy 4, oxy 5와 같이 O<sub>2</sub> 증가 비율을 고려하여 석탄 투입량을 변경하였으며, 각 조건에서의 석탄 투입량은 각각 0.35 kg/s, 0.47 kg/s이다.

석탄의 경우 일반적으로 사용되는 아역청탄 중 KPU탄을 대상으로 하였으며, 공업 분석과 원소분석 결과는 Table 5에 표시하였다. 표에서 보면, dry basis 기준의 KPU탄의 휘발분은 55.62 wt%, 고정탄소는 38.58 wt%, 회재는 5.8 wt%이며 원소 분석을 통해 분석한 원소의 무게분율은 각각 탄소 71.73 wt%, 수소 4.98 wt%, 산소 15.83 wt%, 질소 1.2 wt%, 황 0.46 wt%이다. 석회석의 경우, CFB 보일러에서 Ca/S mole ratio에 따른 탈황 효과를 보기 위해, 1.5~4.0 범위로 설정하였으며, Table 6에 표시하였다. 앞서 언급된 석탄, 석

**Table 5. Proximate and Ultimate analysis of the coals**

		KPU
Ultimate Analysis (%, dry basis)	C	71.73
	H	4.98
	O	15.83
	N	1.2
	S	0.46
Proximate Analysis (%, dry basis)	Volatile Matter	55.62
	Fixed Carbon	38.58
	Ash	5.8

**Table 6. Limestones analysis**

Limestones	YS
Specific surface area (m <sup>2</sup> /g)	0.5095
CaCO <sub>3</sub> (%)	95.6
Conversion (-)	0.19
Ca/S mole ratio (-)	1.5~4.0

회석, 모래의 평균 입도는 각각 1,070 um, 280 um, 250 um이다.

### 5. Results and Discussion

#### 5-1. Temperature, Pressure and Solid fraction profiles

공기 연소 및 순산소 연소 조건에서 연소 온도를 850 °C로 유지한 운전 조건에서의 순환유동층 riser의 온도 변화를 고찰하여 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 온도 구배가 크게 나타나는 왼쪽은 annulus 구간이며 온도구배가 적은 오른쪽은 core 구간의 온도를 나타낸다. Table 4에서 보듯이 Oxy 1, 2, 3는 산소 혼합 비율의 변화에 따라 석탄 투입량을 변화시킨 것이며 Oxy 4와 Oxy 5의 조건은 산소 농도 증가에 따라 과잉공기비가 유지되도록 석탄 투입량을 변화시킨 운전이다. 그림을 보면, 모든 운전 조건에서 석탄 투입이 이루어지는 연소로 하부의 온도는 큰 차이가 없이 840 °C~850 °C 범위를 유지하고 있으나 riser의 높이가 증가함에 따라서 core와 annulus의 온도가 큰 차이를 나타내고 있다. 상부의 경우 annulus 구간에서 400 °C~650 °C 사이의 온도 구배를 나타내고 있다. Core 구간의 경우 820 °C~840 °C도 사이의 온도 구배를 나타내고 있으며, 높이가 증가할수록 온도 손실이 발생하였다. 연소로 하부와 상부의 온도차(core, annulus)는 대략 70 °C~450 °C 범위였으며, 각 조건에 따른 온도 구배는 비슷한 경향을 보이고 있다.

Fig. 3(a)는 공기 연소와 순산소 연소(oxy 1 조건)을 비교한 그래프이다. 그림에서 보면 순산소 연소 조건에서는 core와 annulus의 온도 구배가 상대적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 조건으로 변경시 온도구배가 전체적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 반응기에서 차지하는 비율이 가장 큰 기체가 질소에서 이산화탄소로 변경됨에 따라서 이들 기체의 특성이 영향을 끼치기 때문으로 생각된다. 특히 N<sub>2</sub>에 비해 CO<sub>2</sub>의 열용량이 크기 때문에 순산소 연소의 core와 annulus 온도구배는 감소하게 된다. 더불어 riser의 높이 증가에 따른 annulus의 온도 분포를 보면 감소폭이 확연하게 낮음을 확인할 수 있다. 더불어 이와 같은 결과를 통해 열전달률은 공기 연소보다 순산소 연소가 보다 유리할 것으로 예측된다.

석탄 투입량을 조절하여 산소 혼합 비율을 변화시킨 후의 riser 내의 온도 분포를 Fig. 3(b)에 나타내었다. 그림에서 보면, riser 하부에서는 석탄량이 동일하기 때문에 큰 차이가 나타나지 않았다.

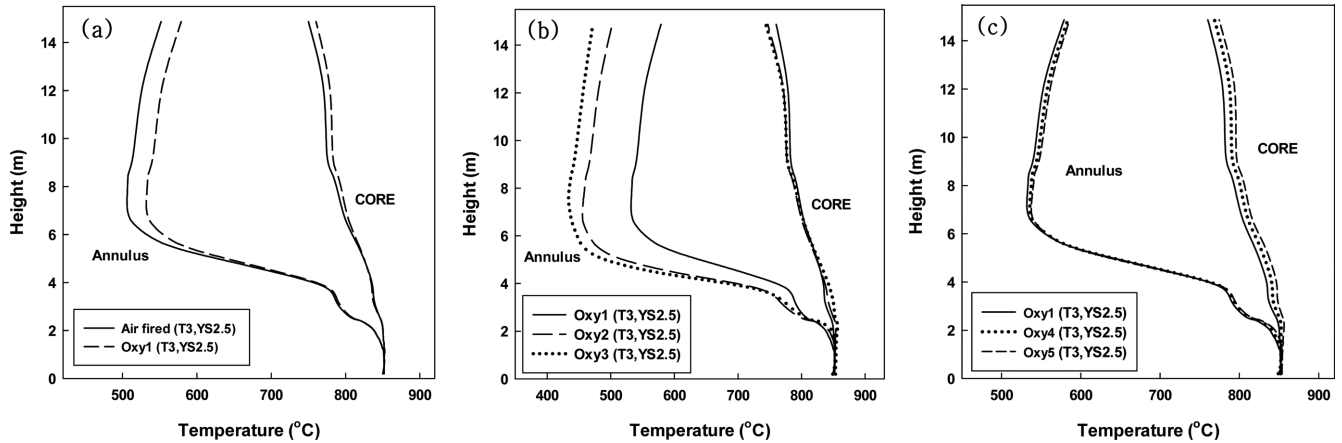


Fig. 3. Temperature profiles in air and oxy fired condition, (a) Compare with temperature profile of Air fired and Oxy 1, (b) Compare with temperature profile of Oxy 1, Oxy 2 and Oxy 3, (c) Compare with temperature profile of Oxy 1, Oxy 4 and Oxy 5.

그러나 산소 농도를 증가시키기 위하여 이산화탄소 주입량을 감소 시킴으로써 Table 4에서 보듯이 주입되는 총유량이 감소하게 된다. 이로 인해서 annulus의 온도는 높이가 증가할수록 큰 폭으로 감소하는 경향을 보인다. 이로 인하여 core와 annulus의 온도차가 확대됨을 확인할 수 있다. 이는 가스 주입량의 감소로 인하여 기체 유속이 낮아지고 고체의 순환량 및 높이에 따른 고체량이 감소하기 때문으로 생각된다.

산소의 농도가 증가하지만 과잉 공기비를 20%로 유지하기 위하여 석탄 투입량을 증가시키는 운전 조건에서의 온도 분포를 Fig. 3(c)에 나타내었다. 그림을 보면, 석탄 투입량의 증가로 인해서 core, annulus 모두 온도가 상승함을 볼 수 있다. 이는 동일한 유량에서 석탄 투입량이 증가함으로써 산소와 반응하는 탄소의 양이 증가하고 이로 인하여 많은 연소열이 배출되어 riser의 온도를 상승시키게 된다. 그러나 core와 annulus의 온도 구배는 유지 또는 소폭 감소함을 볼 수 있다.

산소 농도가 다른 연소 조건에서의 압력 구배는 Fig. 4에 표시하였다. Fig. 4(a)-(c)를 보면 상부로 이동함에 따라 압력은 감소하는 경향을 보이며, 2 m 부근까지 압력이 급격히 감소하는 것을 통해 2 m 부근이 dense bed임을 확인할 수 있다. Fig. 4(a)를 보면, 공기 조건에서 순산소 조건으로 변경 시 압력 구배의 변화가 거의 없음이 확

인되었다.

Fig. 4(b)를 보면, 1.5 m 이하의 높이에서의 압력은 oxy 1 조건보다 oxy 2, 3 조건이 높았다. 그러나 1.5 m 이상의 높이에서는 oxy 1 조건의 압력이 가장 높았으며, 산소 농도에 따른 압력 구배는 상부로 갈수록 거의 비슷한 경향을 보였다. 이러한 압력 구배의 차이는 산소 농도에 따라 주입되는 가스의 유량이 달라짐으로 인해 이러한 결과를 보이고 있다. 특히, oxy 1 조건에서의 유량이 크기 때문에 dense 층에 있던 입자들이 상부로 비산되는 양이 증가하게 되므로 이로 인해 oxy 2, oxy 3 조건보다 하부의 압력이 낮으나 상부에서는 압력이 높게 나타나는 경향을 나타내고 있다. 뿐만 아니라, Fig. 4(b)에 나타난 압력 구배가 전체적으로 비슷하게 유지됨을 확인하였으며, 이를 통해 oxy 조건에서 순환유동층 보일러의 운전이 가능함을 확인할 수 있다.

공기량을 유지시키고 석탄 투입량을 증가시킨 Fig. 4(c)를 보면 기체량을 변화시킨 Oxy 1-3보다는 차이가 발생하지 않고 거의 유사한 압력 분포를 가짐을 확인할 수 있다. 이는 고체의 순환에 영향을 끼치는 기체 유속이 동일하기 때문으로 생각된다. 그러나 석탄 투입량이 증가됨에 따라서 연소로 인하여 발생하는 가스가 소폭 증가하고 riser 내의 온도도 증가하고 있어 높이 증가에 따라 압력이 증가함을 확인할 수 있다. 이를 통해 산소 농도 증가와 석탄 투입량의

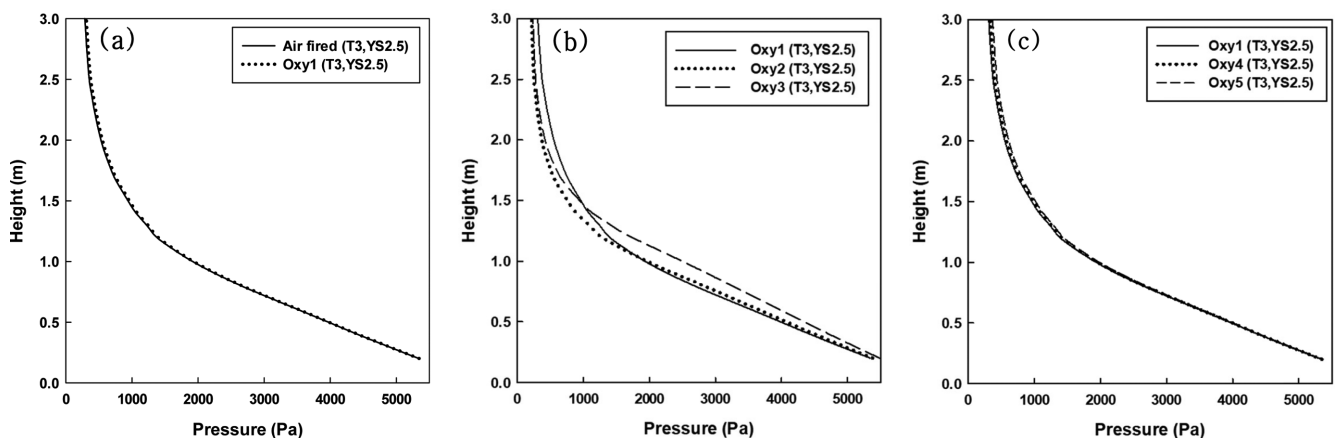


Fig. 4. Pressure profiles in air and oxy fired condition (a) Compare with pressure profile of Air fired and Oxy 1, (b) Compare with pressure profile of Oxy 1, Oxy 2 and Oxy 3, (c) Compare with pressure profile of Oxy 1, Oxy 4 and Oxy 5.

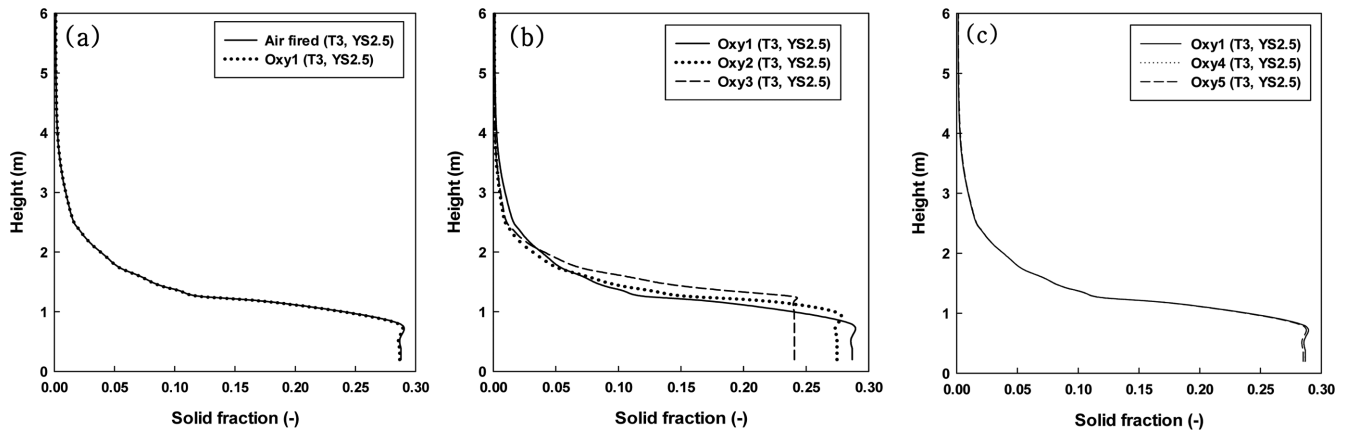


Fig. 5. Solid fraction profiles in air and oxy fired condition (a) Compare with Solid fraction profile of Air fired and Oxy 1, (b) Compare with Solid fraction profile of Oxy 1, Oxy 2 and Oxy 3, (c) Compare with Solid fraction profile of Oxy 1, Oxy 4 and Oxy 5.

동시 증가가 riser 상부에서의 고체량을 증가시킴을 확인할 수 있다.

각각의 운전 조건들에 따른 riser 내의 고체 분율을 Fig. 5에 나타 내었다. Table 4와 Fig. 5를 보면 주입되는 기체량의 변화가 riser 내의 고체 분율에 큰 영향을 끼치고 있음을 확인할 수 있다. 기체 유량이 동일한 Fig. 5(a)와 5(c)를 보면 고체 분율에 큰 차이가 나타나지 않고 있으나 기체 주입량이 변하는 Fig. 5(b)를 보면, dense 층에서의 고체 분율이 상대적으로 큰 차이를 나타내고 있다. 모든 순 산소 연소 조건에서 dense 층의 고체 분율은 riser 높이가 증가함에 따라서 공기 연소와 거의 비슷하게 감소함을 확인할 수 있으며 특히 riser 상부인 희박상 영역에서는 의미있는 차이를 얻기가 어렵다.

Fig. 6은 온도에 따른 연소 효율에 대한 그래프이다. 보이는 것과 같이 온도가 증가함에 따라 연소 효율 값이 약간 증가하는 경향을 보인다. Fig. 6(a)에 나타난 air fired와 oxy 1 결과를 보면 연소 효율이 약간 증가한 것을 볼 수 있다. 뿐만 아니라 Fig. 6(b)에 나타난 것과 같이 산소 농도가 증가함에 따라 연소 효율도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 산소 농도가 증가함에 따라 연소가 활발히 일어나고 이로 인해서 보일러 내의 연소 온도가 상승하는 것으로 예측된다. 이와 같은 경향으로 인해서 최종적인 탄소 전환율도 증가 하게 된다. Fig. 6(c)는 석탄량 증가에 따른 연소 효율에 대한 그래프이다. 그래프를 보면, 석탄량이 증가함에 따라서 연소 효율이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 주입되는 석탄량의 증가로 인

하여 연소가 완료되지 않고 보일러 밖으로 배출되는 미연탄소분이 oxy 1보다 많아 상대적으로 연소 효율이 낮아지는 것으로 예측된다. 앞서 확인된 oxy 5의 thermal output 값이 oxy 1보다 높은 것 또한 이를 뒷받침한다.

## 5-2. 배가스 조성

Fig. 7은 800 °C~900 °C의 연소 온도 조건에서  $SO_x$  배출량에 대한 그래프이다. 일반적으로 이산화황은 650 °C에서 생성되기 시작 하며, 950 °C까지 계속 증가한다. 본 연구에서는 연소 조건에 따라 이산화황의 발생량을 시뮬레이션 함으로써, 최적 연소 조건을 분석 하였다. 뿐만 아니라  $SO_x$  제어를 위한 방안으로서 석회석을 환원제로 투입한 경우에 대해 분석하였다. Fig. 7(a)-(c)를 보면 온도가 증가 함에 따라  $SO_x$  배출량은 증가하는 경향을 보인다. 이는 기존에 알려진 바와 같이 온도 증가에 따라  $SO_x$  배출량이 증가하는 경향을 나타내는 것과 같은 결과를 보인다.

Fig. 7(a)는 동일한  $O_2$  농도인 air fired 조건과 oxy 1 조건을 비교 한 결과 공기 연소 조건에서의  $SO_x$  배출량이 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 순산소 조건에서 연소 온도가 증가함으로 인해  $SO_x$  배출량이 증가할 뿐만 아니라  $O_2$ 가 많은 환경에서  $H_2S$ 가  $SO_2$ 로 산화 되는 속도가 빨라지게 되기 때문이다[11].

Fig. 7(b)는 산소 농도에 따른 온도별  $SO_x$  배출량에 대한 그래프

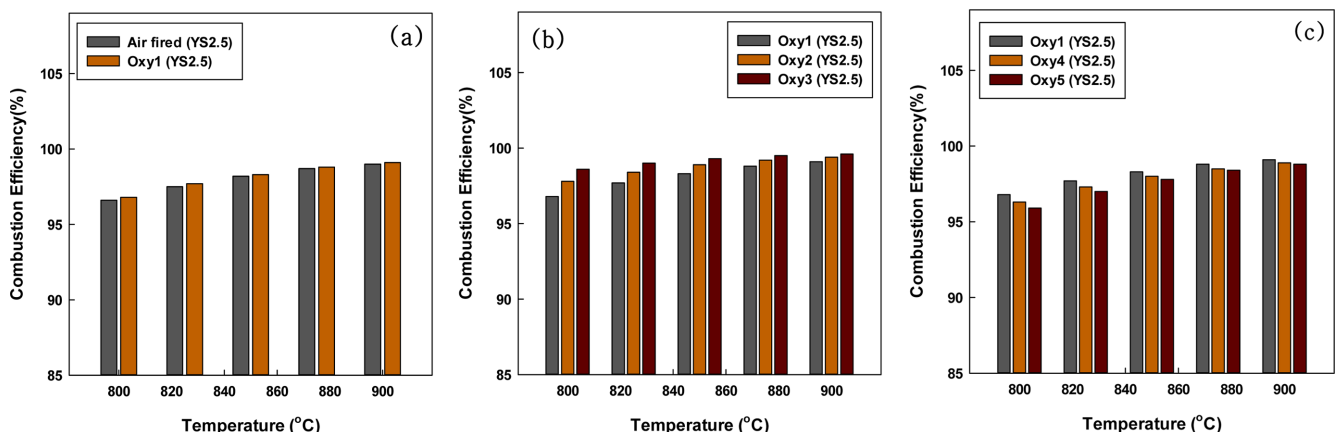


Fig. 6. Effect of temperature on Combustion efficiency (a) Combustion efficiency with air fired and Oxy 1 (b) Combustion efficiency with Oxy 1, Oxy 2 and Oxy 3 (c) Combustion efficiency with Oxy 1, Oxy 4 and Oxy 5.

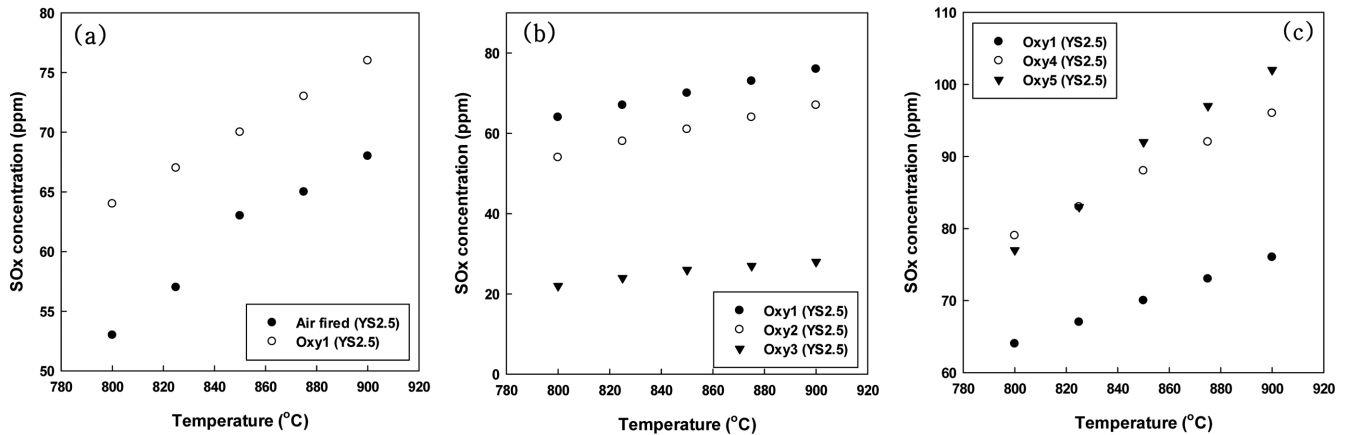


Fig. 7. Effect of temperature on SO<sub>x</sub> concentration (a) SO<sub>x</sub> concentration with air fired and Oxy 1 (b) SO<sub>x</sub> concentration with Oxy 1, Oxy 2 and Oxy 3 (c) SO<sub>x</sub> concentration with Oxy 1, Oxy 4 and Oxy 5.

이다. Fig. 7(b)를 보면 산소 농도가 증가할수록 SO<sub>x</sub> 배출량은 감소하는 경향을 보였다. 이는 흡착제와 SO<sub>2</sub> 사이의 접촉시간이 바닥에서부터 더 많은 O<sub>2</sub>가 유입될 때까지 연장될 뿐만 아니라 O<sub>2</sub>가 많을수록 밀도가 높은 층 상태가 환원에서 산화로 바뀌므로 탈황 효율이 증가된다[11].

Fig. 7(c)는 석탄량이 증가한 경우 배출되는 SO<sub>x</sub>에 대한 그래프이다. 그래프에 나타난 것과 같이 온도의 증가 및 Oxy mixing percent가 증가함에 따라 SO<sub>x</sub> 배출량은 증가하였다. 뿐만 아니라, oxy 1조건일 때 배출되는 SO<sub>x</sub> 량보다 Oxy 4,5 조건에서 더 많이 배출함을 확인하였다. 이는 주입되는 석탄량이 증가함에 따라 배출되는 S의 양 또한 증가하게 됨으로써, 이러한 결과가 나타났다. 더불어 825 °C를 기점으로 oxy 5의 SO<sub>x</sub> 배출량이 oxy 4보다 많은 양의 SO<sub>x</sub>를 배출함이 확인되었다. 이는 연소 온도 증가로 인해 배출되는 S가 산소 함량이 높은 Oxy 조건에서 R2 반응이 더 많이 일어나게 됨으로써 Oxy 4보다 적은 양의 SO<sub>x</sub>를 배출한 것으로 판단된다.

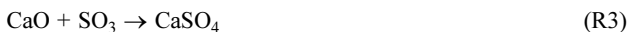


Fig. 8(a)-(c)은 산소 혼합 비율과 온도에 따른 NO<sub>x</sub> 배출량에 대

한 그래프이다. 본 연구에서는 NO와 N<sub>2</sub>O의 배출량만을 고려하고 있으며, NO<sub>x</sub> 배출량은 55~160 ppm의 범위에 존재하고 있다. 공기 연소 조건에서의 NO<sub>x</sub> 배출량이 가장 낮았으며, 온도가 증가할수록 NO<sub>x</sub> 배출량이 감소하는 경향이 나타났다.

Fig. 8(a)는 공기 연소 조건과 oxy 1 조건에서 온도에 따른 NO<sub>x</sub> 배출량에 대한 그래프이다. Fig. 8(a)에 나타난 것과 같이 820 °C의 결과를 제외하면 온도가 증가함에 따라 NO<sub>x</sub> 배출량이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 공기 연소 조건에서의 NO<sub>x</sub> 배출량의 경우 Oxy 1 조건보다 낮게 배출되었다. 이는 높은 O<sub>2</sub> 농도가 석탄 내 N의 NO<sub>x</sub>로의 전환을 촉진시키기 때문에 이러한 결과를 나타내었다. 뿐만 아니라 O<sub>2</sub> 농도 증가로 인해 로내 온도가 상승하게 되고, 이에 따라 R4, R5 반응이 촉진되어 NO가 더 많이 생성되는 것으로 판단된다. 즉, 높은 O<sub>2</sub> 농도가 석탄 내 N의 NO<sub>x</sub>로의 전환을 촉진시키기 때문이다. 더불어 이러한 시뮬레이션 결과는 Mathekgga et al. [12]의 논문 결과인 O<sub>2</sub> 농도의 증가에 따라 NO<sub>x</sub> 배출량이 증가하는 결과와 유사하였다. 또한, Jia et al. [13]의 연구 결과인 산소 연료 연소 조건에서 배가스 내 NO<sub>x</sub> 농도는 공기 연소 모드에 비해 2배 높다는 연구결과와 유사하였다.

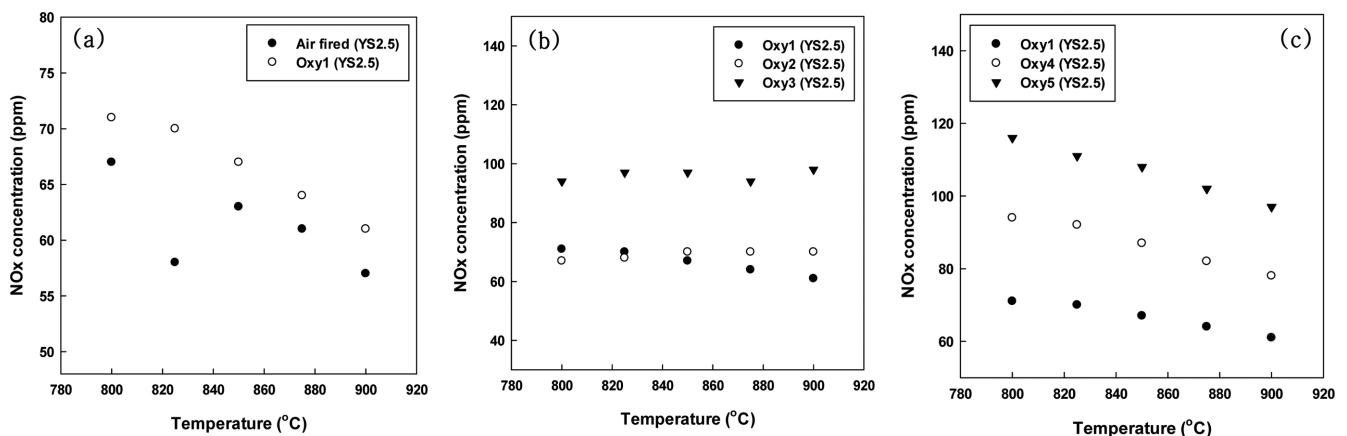
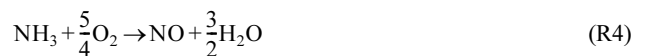


Fig. 8. Effect of temperature on NO<sub>x</sub> concentration (a) NO<sub>x</sub> concentration with air fired and Oxy 1 (b) NO<sub>x</sub> concentration with Oxy 1, Oxy 2 and Oxy 3 (c) NO<sub>x</sub> concentration with Oxy 1, Oxy 4 and Oxy 5.



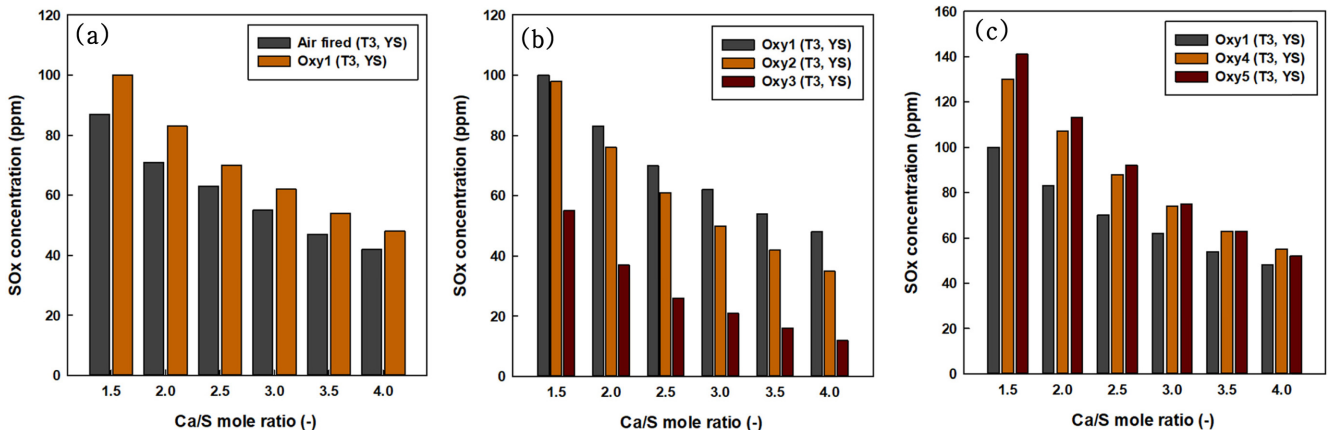


Fig. 9. Effect of Ca/S mole ratio on  $\text{SO}_x$  concentration (a)  $\text{SO}_x$  concentration with air fired and Oxy 1 (b)  $\text{SO}_x$  concentration with Oxy 1, Oxy 2 and Oxy 3 (c)  $\text{SO}_x$  concentration with Oxy 1, Oxy 4 and Oxy 5.

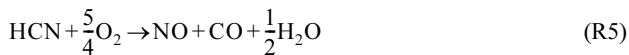


Fig. 8(b)는 산소 농도에 따른  $\text{NO}_x$  배출량에 대한 그래프이다. 그래프를 보면, Oxy 3 조건에서의  $\text{NO}_x$  배출량이 가장 많은 것을 확인할 수 있다. Oxy 3 조건의 경우, 연소로 하부에서 가장 높은 온도를 나타내고 있으며, 이로 인해 석탄 내 N이 배출됨으로써 이러한 결과를 나타낸다. 뿐만 아니라 로내 온도가 oxy 1 조건보다 낮을 뿐만 아니라, R4 반응을 통해  $\text{NH}_3$ 가 NO로 변환됨으로써 이러한 결과를 보이는 것으로 판단된다. 또한, Oxy 1과 Oxy 2 조건은  $825^\circ\text{C}$ 를 기점으로  $\text{NO}_x$  배출량이 Oxy 2가 더 많이 배출되는 것을 확인할 수 있다. 이는 산소가 많은 조건에서  $\text{NH}_3$ 가 NO가 되는 반응이 촉진됨으로써 인한 결과로 예상된다. Fig. 8(c)를 보면 Oxy 5 조건에서 가장 많은  $\text{NO}_x$ 가 배출됨을 확인할 수 있다. 이는 주입되는 석탄량이 가장 많기 때문에 배출되는 N 함량이 높아 이러한 결과를 나타낸다.

Fig. 9(a)-(c)은  $850^\circ\text{C}$  조건에서 Ca/S mole ratio에 따른 탈황 효과를 보여주는 그래프이다. Fig. 9(a)-(c)에 나온 것과 같이 Ca/S mole ratio가 증가함에 따라 탈황 전환율이 증가하는 경향을 보인다. Fig. 9(a)를 보면, oxy 1 조건에서  $\text{SO}_x$  양이 더 많이 배출됨을 확인할 하였으며, Ca/S mole ratio에 따라 탈황 효율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9(b)는 oxy 1-3 조건에서 Ca/S mole ratio에 따른 탈황 효율에 대한 그래프이다. 동일한 Ca/S mole 비에서 탈황 효율은 oxy 3이 가장 높았으며, oxy 1에서 가장 많이 발생함을 확인할 수 있다. Oxy 3의 경우, 주입되는  $\text{O}_2$  량이 많을수록 밀도가 높은 층의 상태를 환원에서 산화로 바꿈으로써 탈황 효율이 증가할 수 있다[14]. Fig. 9(c)는 oxy 1,4,5 조건에서 Ca/S mole ratio에 따른 탈황 효율에 대한 그래프이다. Fig. 9(c)를 보면, Oxy 5의 탈황 효율이 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 Oxy 5에 주입되는 석탄량이 많아 배출되는 S의 양도 증가하게 되어 이러한 결과를 나타낸다. 또한, Ca/S mole ratio 3.5에서 oxy 5의  $\text{SO}_x$  배출량이 oxy 4보다 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 oxy 5의  $\text{O}_2$  함량이 많아 로내 온도를 높게 유지함으로써 3.5의 Ca/S mole ratio를 기점으로  $\text{SO}_x$  배출량이 oxy 4보다 낮아지는 결과를 가져온 것으로 예상된다. 더불어 이러한 시뮬레이션 결과는 Sung et al. [15]의 연구 결과와 유사하였다.

## 6. Conclusion

본 연구에서는 2 MWe 순환유동층 보일러를 대상으로 공기 연소와 순산소 연소 결과를 개조한 IEA-CFBC 모델을 통해서 분석하였다. 순산소 연소 조건은 산소농도 21%를 기준으로 41%까지 증가시켰으며 석탄 투입량, 기체 주입량, 연소로 온도, Ca/S 몰비 등을 변경시켜 이에 따른 순환유동층 온도분포, 압력분포, 고체 분율, 연소 효율, 배가스 조성 등을 비교 및 분석하여 다음과 같은 결론들을 얻었다.

(1) 연소로 내 온도는 공기 연소보다 순산소 연소 조건에서 더 높았다. 그러나 산소 농도가 증가함에 따라 core와 annulus의 온도차는 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 산소 농도가 증가를 위해 이산화탄소 가스 유량을 감소시켰기 때문에 비산하는 입자량이 감소하기 때문이다.

(2) 순산소 연소 조건에서도 배가스를 통해 배출되는  $\text{SO}_x$  농도는 Ca/S 비율,  $\text{CaCO}_3$  함량이 높을수록 감소함으로써 탈황 효율이 증가함을 확인하였다. 그러나, 연소 효율의 향상으로 인해 보일러 내의 평균 온도가 증가하며  $\text{SO}_x$  배출량도 증가하는 경향을 나타내었다.

(3) 시뮬레이션 결과를 보면, 연소 효율과 열 출력은 공기 연소 조건보다 순산소 연소 조건에서 더 높았으나 상대적으로 높은 로내 온도로 인하여  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  배출량은 공기 연소 조건보다 순산소 연소 조건이 높았다. 따라서 순산소 연소의 경우, 보다 효율적인 배가스 정제 설비를 이용해야 할 것이다.

(4) 본 시뮬레이션 결과는 기존 연구 결과들과 유사한 경향성을 보이고 있음이 확인되었다. 따라서 본 시뮬레이션은 추후 보일러 설계 및 운전시 참고용으로 적합한 것으로 판단된다. 그러나 더욱 정확한 데이터로서 활용하기 위해서는 본 시뮬레이션과 동일한 조건에서의 실험이 진행되어야 한다.

## Nomenclature

$\rho_{g,0}$	: gas density [ $\text{kg/m}^3$ ]
P	: Pressure [Pa]
T	: Temperature [K]
$T_0$	: $527.67(\text{CO}_2)$ , $526.05(\text{O}_2)$ , $540.99(\text{N}_2)$ [ $^\circ\text{R}$ ]

$O_{2,mole\ weight}$	: Oxy mole weight [g/mol]
$CO_{2,mole\ weight}$	: Carbon mole weight [g/mol]
$O_{2,\%}$	: Oxy concentration [%]
$CO_{2,\%}$	: $CO_2$ concentration [%]
R	: Ideal gas constant [L·atm/K·mol]
$\mu_g$	: gas viscosity [cP]
$\mu_0$	: 0.0148( $CO_2$ ), 0.02018( $O_2$ ), 0.01781( $N_2$ ) [cP]
C	: Sutherland's constant [-]

### Acknowledgments

이 논문은 한국연구재단 기초연구과제의 지원(No. 2017R1D1A3B03033160)과 본 연구는 한국전력공사의 2018년 사외공모 기초연구(개별)에 의해 지원(과제번호: R18XA06-49)을 받아 수행된 연구입니다.

### Reference

- Lee, C. H., "A Study on the Operational Characteristics of the 500 MW Super Critical Circulating Fluidized Bed Boiler by Changes in Air Ratio," *Yonsei University Master Thesis*(2015).
- Kim, T. and Choi, S., "Comparative Evaluation of Thermal Design Parameters of Different Sizes of Circulating Fluidized Bed Boiler," *Journal of the Korean Society of Combustion*, **16**, 16-22 (2011).
- Kim, Y. K., "Mathematical Characteristics in a Circulating Fluidized Bed Combustor=hydrodynamics Characteristics in a Circulating Fluidized Bed," *Yonsei University Master Thesis*(2003).
- EBnews (EBN chemical), "Energy and Chemical Industry 3-1: Coal Energy," <http://chem.ebn.co.kr/news/view/53346>(2007).
- India Habitat Centre, "Principle of Fluidization, 2ND Conference on Building Partnership for Sustainable CSR", (2014).
- Crane Company, "Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe," *Technical Paper*, p. 410(1988).
- Weast, R. C., "CRC Handbook of Chemistry and Physics," *Chemical Rubber Company*, **65**, F42-F44(1984).
- Lemmon, E. W. and Jacobsen, R. T., "Viscosity and Thermal Conductivity Equations for Nitrogen, Oxygen, Argon and Air," *Int. J. Thermophys.*, **25**, 21-21(2004).
- Faghri, A. and Zhang, Y., "Transport Phenomena in Multiphase Systems," *Elsevier*, 957-957(2006).
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer," *John Wiley & Sons*, 6., (2007).
- Lunbo, D., Changsui, Z., Wu, Z., Chengrui Q. and Xiaoping, C., " $O_2/CO_2$  Coal Combustion Characteristics in a 50 kWth Circulating Fluidized Bed," *International Journal of Green house Gas control*, **5**, 770-776(2011).
- Mathekg, H. I., Oboiri, B. O. and North, B. C., "A Review of Oxy-fuel Combustion in Fluidized Bed Reactors," *Energy Research*, 878-902(2016).
- Jia, L., Tan, Y., McCalden, D., Wu, Y. and He, I., "Symonds R, Anthony EJ. Commissioning of a 0.8 MWth CFBC for Oxy-fuel Combustion," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **7**, 240-243(2012).
- Farooq, S., Miguel, A. P., Chenggong, S., Colin, S. and Hao, L., "Oxy-fuel Combustion Study of Biomass Fuels in a 20 kW the Fluidized Bed Combustor," *Fuel*, 778-786(2018).
- Sung, J. H., Seo, Y. C., Jang, H. N., Back, S. K., Jeong, B. M., Jeong, H. K., Jung, S. J., Cho, Y. T., "Oxy-fuel Combustion Characteristic of Dried Sewage Sludge Using Circulating Fluidized Bed," *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**, 846-853(2017).
- Heinbockel, Ph.D. Dissertation, Siegen University, Germany (1995).
- Zhang, L., Li, T. D., Zhen, Q. Y. and Lu, C. D., "A General Dynamic Model for Circulating Fluidized Bed Combustion Systems with Wide Particle Size Distributions," *11th Int. Conf. on fluid. Bed Comb.*, 1289(1991).
- Mori, S., Narukawa, K., Yamada, I., Takebayashi, T., Tanii, H., Tomoyasu, Y. and Mii, T., "Dynamic Model of a Circulating Fluidized Bed Coal Fired Boiler," *11th Int. Conf. on Fluid. Bed Comb.*, 1261-1265(1991).
- Sengupta, S. P. and Basu, P., "A Generalized Mathematical Model for Circulating Fluidized Bed Boiler Furnace," *11th Int. Conf. on Fluid. Bed Comb.*, p.1295-1301,(1991).
- Xu, X., Mao, J., "Mathematical Model and Simulation of CFBC boilers," *Proc. 4th Int. Conf. on Circ. Fluid. Beds*, 104-109(1993).
- Lin, X. and Li, Y., "A Two-Phase Model for Fast Fluidization Bed Combustion," *Proc. 4th Int. Conf. on Circ. Fluid. Beds, Somerset*, 547-552(1993).
- Halder, P. K. and Datta, A., "Modelling of Combustion of a Char in a Circulating Fluidized Bed," *Proc. 4th Int. Conf. on Circ. Fluid. Beds*, 92-97(1993).
- Saraiva, P. C., Azevedo, J. L. T. and Carvalho, M. G., "Modelling Combustion,  $NO_x$  Emissions and  $SO_2$  Retention in a Circulating Fluidized Bed," *12th Int. Conf. on Fluid Bed Comb.*, 375-380(1993).
- Hypannen, T., Lee, Y. Y., Ketunen, A. and Riiali, J., "Dynamic Simulation of a CFB Based Power Plant," *12th Int. Conf. on Fluid. Bed Comb.*, 1121-1127(1993).
- Haider, M., "Ein stationares Simulationsmodell fur Dampferzeuger mit Zirkulierender Wirbelschicht," *Vienna University*(1993).
- Prichett, J. W., Blake, T. R. and Garg, S. K., *AIChE Symp. Ser.*, 134(1978).
- Balzer, G. and Simonin, O., "On Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements," *Proc. 5th Int. Symp.*(1993).
- Jayarathna, C. K., Moldestad, B. E. and Tokheim, L. A., "Validation of Results from Barrcuda CFD Modelling to Predict Minimum Fluidization Velocity and Pressure Drop of Geldart A Particles," *Linkoping Electronic Conference Proceedings*, 76-82(2017).
- Kallio, S., Ariksinen, J., Gulden, M., Hermanson, A., Peltola, J., Ritvaanen, J., Seppala, M., Shah, S. and Taivassalo, V., "Experimental and Numerical Study of Hydrodynamics in a Circulating Fluidized Bed," (2009).
- Seddighi, S., Pallares, D. and Johnsson, F., "One-dimensional Modeling of Oxy Fule Fluidized Bed Combustion for  $CO_2$  Capture," *ECI Digital Archives*(2010).