

# 100MWe급 석탄 순산소 연소 보일러의 탄종별 연소 특성에 대한 전산해석연구

김정은\* · 박상현\* · 김영주\*\* · 김혁필\*\*\* · 류창국\*†

## Numerical Simulation on Oxy-fuel Combustion of Different Coals in a 100MWe Boiler

Jungeun A. Kim\*, Sanghyun Park\*, Young Ju Kim\*\*, Hyeok-Pil Kim\*\*\*, Changkook Ryu\*†

### ABSTRACT

With numerical simulations, this study investigated the combustion and heat transfer of three different coals under air- and oxy-fuel combustion in a 100 MWe boiler. The boiler is retrofitted to an opposed-firing type while maintain the original furnace shape of downshot firing. The boiler achieved good combustion in both combustion modes for three coals tested. However, the contribution of gasification reactions by CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O significantly increased due to the lack of gaseous mixing. This was different from a typical front-wall firing boiler, which showed larger contribution of char oxidation during air-coal combustion. The wall heat flux was lower in oxy-coal mode at a O<sub>2</sub> level of 27%, which has to be considered in further development of the process.

**Key Words** : Carbon capture, Coal, CFD, Opposed-wall firing, Oxy-fuel combustion

순산소 연소는 온실가스 포집/저장 기술 중 하나로, 공기에서 분리된 O<sub>2</sub>와 재순환된 배가스를 산화제로 이용하여 배가스 내 CO<sub>2</sub>를 쉽게 포집하는 기술이다. 이 때 높은 CO<sub>2</sub> 농도로 인해 기존의 공기 연소와 다른 연소/열전달 특성을 보이므로 이에 대한 심도 있는 연구가 필요하다.[1] 국내에서는 남동발전의 영동 1호기(125MWe)를 대상으로 석탄 순산소 연소 실증 연구가 추진 중이다. 순산소 연소 방식의 운전은 실증 기간 동안에 이루어지고 상용 운전은 공기 연소 조건에서 이루어지기 때문에 두 연소조건에서 비슷한 보일러 성능을 보일 수 있는 설계가 필요하다. 본 연구에서는 설계탄과 두 종류의 실제 탄종(KCH과 Moolarben)을 대상으로 공기 및 순산소 연소시 특성을 비교 분석하고자 하였다.

Fig. 1은 영동 1호기의 Retrofit 안으로 연소실 형상을 유지하면서 Down shot-firing 방식이 16개의 버너를 이용한 Opposed wall-firing으로 변경된다. 100MWe 운전시에는 후벽 상단의 버너 4개는 예비로 두고 12개의 버너를 사용한다. 기존의 내화벽은 Fig. 1과 같이 U자 형태로 일부를

남겨두고 나머지는 제거될 예정이다.

Table 1은 설계탄, KCH탄, Moolarben탄의 특성분석 결과이다. 설계탄이 휘발분이 가장 많으며, Moolarben탄이 최 함량이 높고 발열량이 높다. Table 2는 산화제의 유량 및 조성을 타나낸 표이다. 공기 연소와 순산소 연소 조건 모두 과잉공기는 20%이며 공기 연소 조건은 버너영역의 당량비가 1.0, 순산소 조건은 산화제의 체적유량 감소에 따른 선회류 약화 방지를 위해 1.17로 설정되었다. 순산소 조건의 산소 농도는 27vol.%이다.

본 연구에서 사용한 상용 CFD코드는 Fluent ver.6.3이며 사용된 모델 구성은 Table 3와 같다.

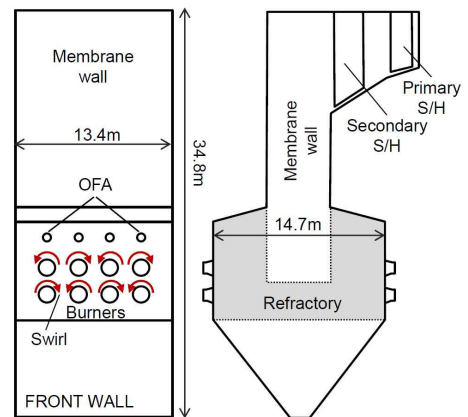


Fig. 1 Schematic of the 100MWe coal boiler.

\* 성균관대학교 기계공학과  
 \*\* 한국전력연구원 그린에너지연구소  
 \*\*\* 두산중공업  
 † 연락처, cryu@me.skku.ac.kr  
 TEL : (031)299-4841 FAX : (031)290-5889

**Table 1** Coal properties.

		Design coal	KCH	Moolarben
Proximate analysis (%air-dried)	IM	10.3	9.3	2.3
	VM	40.0	44.4	31.4
	FC	46.2	38.9	49.6
	Ash	3.5	7.5	16.7
Ultimate analysis (%daf)	C	76.1	73.5	81
	H	5.7	5.2	5.2
	O	16.6	19	11.3
	N	1.0	1.7	1.9
	S	0.5	0.7	0.6
HHV[MJ/kg]		26.56	24.73	26.71

**Table 2** Mass flow rate and component of oxidizer and coal flow rate.

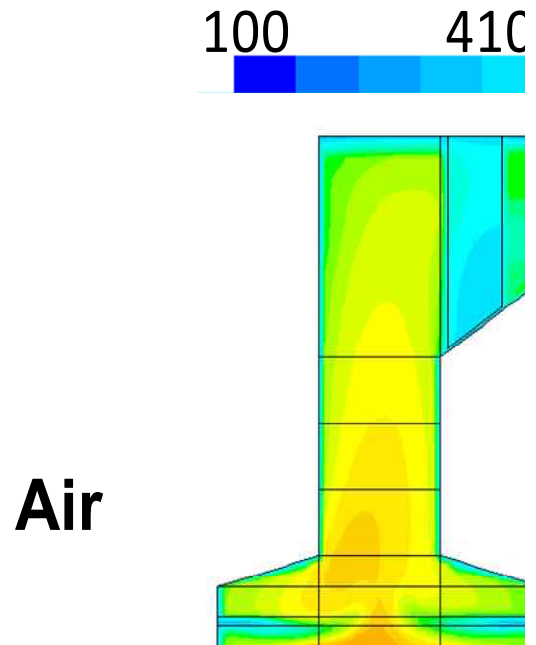
		Design coal		KCH		Moolarben	
		Air	Oxy27	Air	Oxy27	Air	Oxy27
Mass flow [kg/s]	1ry	13.4	20.0	12.9	21.7	12.4	22.1
	2ry	73.8	67.5	79.8	73.0	73.5	74.4
	OFA	17.2	2.1	18.5	2.3	18.9	2.3
	O <sub>2</sub> lancing	0	2.8	0	2.8	0	2.8
Composition [vol.%]	CO <sub>2</sub>	0	42.7	0	46.8	0	47.1
	H <sub>2</sub> O	3.1	22.4	2.9	21.0	1.6	21.0
	O <sub>2</sub>	20.3	26.5	20.3	27.0	20.6	27.0
	N <sub>2</sub>	76.6	8.4	76.8	5.2	77.8	4.9
Coal [kg/s]		10.7	10.5	11.5	11.2	10.6	10.4

**Table 3** Flow and reaction models applied.

Turbulence	Realizable k-ε model[2]
Gas reaction	Global reactions[3,4]
Devolatilization	Flashchain[5]
Char combustion	Shrinking core model[6]
Radiation	Discrete ordinate method with modified WSGGM[7]

Fig. 2는 버너 단면의 온도분포이다. 버너 수가 전벽에 8개, 후벽에 4개이기 때문에 전벽에 치우쳐 고온영역이 나타난다. 공기 연소시의 화염온도는 순산소 연소시보다 높는데, 이는 순산소 연소 조건에서 버너영역의 당량비가 1.17로 높은 반면 공기 연소 조건에서는 1.0으로 낮고 CO<sub>2</sub>의 열용량이 N<sub>2</sub>보다 크기 때문이다. 또한 공기 연소 조건의 경우 N<sub>2</sub>의 체적유량이 크고 OFA의 영향을 받아 화염이 수평방향으로 진행하지만 순산소 연소 조건의 경우 화염이 위쪽으로 급격히 꺾이는 것을 볼 수 있다.

Table 4는 좌의 전환 반응에서 O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O에 의한 각 반응의 기여도를 나타낸 표이다. 순산소



**Fig. 2** Gas temperature contours.

연소시 산화제 내 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O의 비율이 높기 때문에 공기 연소 조건에 비해 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O에 의한 가스화가 많이 일어나는 것을 알 수 있다.

Table 5는 Park 등[8]이 front-wall firing 방식의 100MWe 순산소 보일러를 대상으로 수행한 해석에서 각 산화제의 기여도를 나타낸 것이다. 전형적인 형태인 Park 등의 보일러와 달리 영동의 Retrofit 안은 연소실 하부 폭이 매우 넓기 때문에 버너의 2차 산화제를 통해 공급된 화염 바깥쪽의 잉여산소와 산소가 부족한 화염 내의 좌 입자가 잘 혼합되지 못한다. 이는 Fig. 3에서 O<sub>2</sub>가 버너 앞 부분에서만 많이 소비되고 버너 뒷부분에서부터 거의 일정한 양이 연소로 출구까지 유지되는 것을 통해 확인할 수 있다. 따라서 Park 등의 해석 대상에서는 O<sub>2</sub>에 의한 산화도가 높지

**Table 4** Proportion of char converted by O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O for Youngdong retrofit boiler

[wt.%]	Design coal		KCH		Moolarben	
	Air	Oxy27	Air	Oxy27	Air	Oxy27
by O <sub>2</sub>	57.7	52.7	60.3	61.3	68.2	65.1
by CO <sub>2</sub>	30.8	36.6	30.9	30.9	25.7	28.5
by H <sub>2</sub> O	10.1	10.2	8.2	7.4	5.4	5.8

**Table 5** Proportion of char converted by O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O for front-wall-firing boiler[8]

[wt.%]	Air	Oxy27
by O <sub>2</sub>	90.9	77.4
by CO <sub>2</sub>	5.3	16.9
by H <sub>2</sub> O	2.7	5.1

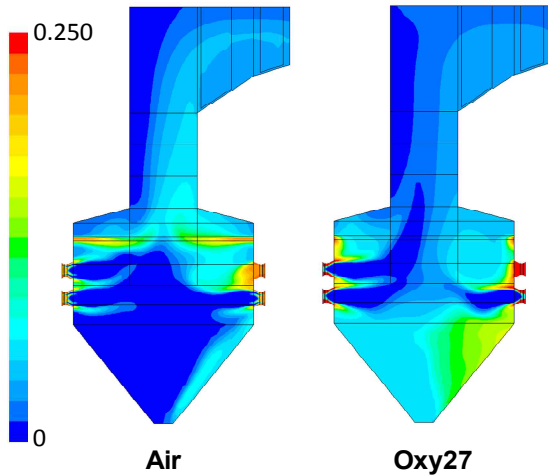


Fig. 3 Mass fraction of O<sub>2</sub> for design coal.

만 영동 1호기에서는 공기 연소 조건이더라도 O<sub>2</sub>에 의한 산화 비중이 크지 않다.

Fig. 4는 설계탄에 대해 벽면 열유속을 나타낸 그림이다. 전반적인 특징으로는, 로의 중앙 부분에 Refractory 벽이 없는 부분에서 열유속이 매우 크게 나타나고 있고 연소실이 좁아지는 부분에서 고온의 가스가 집중됨에 따라 열유속이 높게 나타난다. 또한 후벽 상단 버너들이 사용되지 않기 때문에 전벽 가까이에 화염이 크게 형성되고, 따라서 전벽 쪽에 치우쳐서 높은 열유속을 보이고 있다. 공기 연소 조건에서 화염 온도가 더 높기 때문에 열유속도 이에 따라 공기 연소 조건에서 더 높게 나타나고 있다. 이와 같은 경향은 다른 탄종에서도 유사하게 나타났다.

Fig. 5는 영동 1호기와 Park 등의 해석 대상 보일러에서 벽면 평균 열유속을 비교한 것이다. 영동 1호기의 벽면 열유속은 연소실의 체적이 약 30% 크고 내화벽이 존재하기 때문에 Park 등의

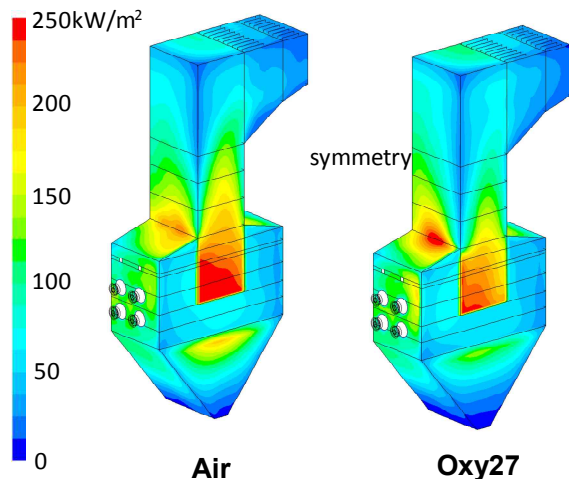


Fig. 4 Heat flux on the wall for design coal.

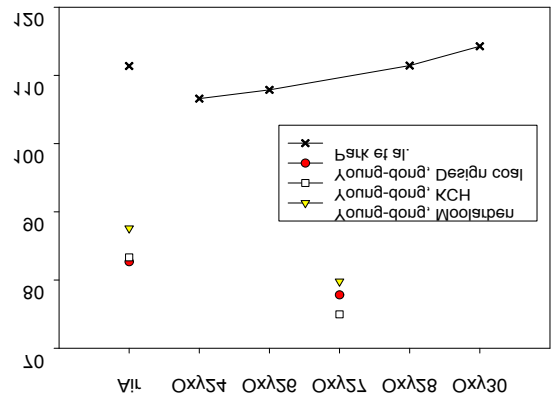


Fig. 5 Comparison of average wall heat flux.

front-wall firing 보일러에 비해 낮게 나타난다. 그러나 전체 열전달량의 차이는 크지 않았다. 또한 front wall-firing 보일러는 공기 연소와 순산소 연소(oxy28) 조건의 평균 벽면 열유속이 비슷한 것에 반해 영동 1호기의 경우 이 차이가 많이 나는 것을 볼 수 있다. 이는 영동 1호기 순산소 연소 조건의 경우 OFA를 공급하지 않고 모든 산화제가 버너를 통해 공급되어 연소실 하부의 열유속이 낮아진 결과로 판단된다. 탄종별로는 공기 연소 조건에서 Moolarben탄이 가장 크고 설계탄과 KCH탄이 비슷하게 나타나며 순산소 연소 조건에서는 Moolarben탄, 설계탄, KCH탄 순으로 나타났다.

## 후 기

이 연구는 지식경제부의 에너지기술개발사업의 일환으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행되었습니다(100MW Oxy-PC 보일러 화로 내 가스부 유동 및 연소 개념설계 기술개발, 과제번호: 2010201010108A).

## 참고 문헌

- [1] Buhre, B.J.P. et al., Prog. Energy Combust. Sci. 31, 2005, pp.283-307.
- [2] T.-H. Shih et al., Computers & Fluids 24(3), pp.227-238, 1995.
- [3] A. Gómez-Barea and B. Leckner, Prog. Energy Combust. Sci. 36, pp.444-509, 2010.
- [4] W. P. Jones and R. P. Lindstedt, Combust. Flame 73, pp.233-249, 1988.
- [5] M.D. Smooke, I.K. Puri, K. Seshadri, Combust. Inst., pp.1783-1792, 1986.
- [6] Wen C.Y., Chaung T.Z., Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev. 18, pp.684-695, 1979.
- [7] Yin C. et al., Energy Fuels, 24, pp.6275 - 6282, 2010.
- [8] S.H. Park et al., Fuel, in press, 2012.