100MW$_e$급 석탄 순산소 연소 실증 보일러의 연소 특성에 대한 전산유동해석 연구

김정은* · 박상현* · 김영주** · 김혁필*** · 류창국*†

Numerical Simulations of a 100MWe Boiler Retrofitted for Demonstration of Oxy-coal Combustion

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

ABSTRACT

This study investigates the combustion and heat transfer characteristics of a 100MWe pulverized coal boiler retrofitted for demonstration of oxy-coal combustion. By computational fluid dynamics (CFD), the flame temperature and wall heat flux were compared for air-fuel and oxy-fuel combustion with different O_2 concentration in the oxidizers. It was found that the oxy-fuel combustion requires an O_2 concentration higher than 27 vol.% for the boiler to achieve the similar value of wall heat flux with air-fuel combustion.

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

순산소 연소는 화력발전에서 적용가능한 CO_2 포집 기술 중 하나로서, 산소와 CO_2를 산화제로 사용하여 배가스의 대부분이 이산화탄소로 이루어지기 때문에 쉽게 이산화탄소를 포집할 수 있는 장점이 있다. 순산소 연소는 높은 CO_2 농도로 인해 기존의 연소와는 다른 연소 및 열전달 특성을 보이므로 연소로 설계시 고려사항에 대한 심도 있는 연구가 필요하다[1].

국내에서는 남동발전의 영동화력 1호기를 대상으로 Retrofit을 통해 순산소 연소 기술을 실증하는 연구가 추진 중이다. 이 때 순산소 연소는 실증기간에 이루어지고 상용 운전은 일반 공기연소 조건에서 이루어질 예정이다. 따라서 두 연소조건에서 유사한 보일러 성능을 확보하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 영동 1호기의 Retrofit 설계안을 대상으로 공기 및 순산소 연소조건에서의 연소 및 열전달 특성을 분석하고자 하였다.

Fig.1은 Retrofit 안으로서 원래 무연탄 대상의 Downshot 방식이 아역청탄을 대상으로 한 대향류(Opposed wall-firing) 방식으로 개조되나 설비 변경을 줄이기 위하여 원래의 연소실 형상을 유지할 예정이다. 운전시 100MWe 규모 (23.68 MWth)의 부하에서 총 16기의 버너 중 12개(전벽 8기, 후벽 하단 4기)가 운전된다. 보일러는 형상이 대칭이기 때문에 symmetry 조건을 이용하여 형상의 반에 대하여 약 62만개의 육면체 격자로 구성하였다. 이 때 각 버너별 유동 및 선회특성은 별도의 해석을 통해 도출하여 경계조건으로 입력하였다.

Table 1은 설계 기준 석탄의 특성분석 결과이며, Table 2는 공기 및 순산소 연소조건에 대한 석탄(미분기 내 건조 후)과 각 산화제의 유량, 온도, 조성을 요약한 것이다. 순산소 조건은 산화제 내 총 산소농도가 25.46%인 Oxy25와 27.0%인 Oxy27의 두 경우를 비교하였다. 세 경우 모두 과잉공기는 총 20%로서 버너영역 당량비는 공기

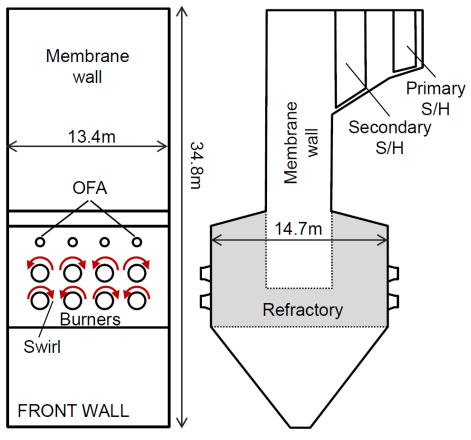

Fig. 1 Schematic of the 100MWe coal boiler.

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

연소조건에서 1.0, 순산소 조건에서는 산화제의 체적유량 감소에 따라 버너의 선회류를 강화하기 위하여 1.17로 설정하였다. OFA의 조성 및 온도는 버너 2차 산화제의 온도와 같다.

본 연구에서 사용한 CFD코드는 Fluent ver6.3이며 해석에 사용된 모델 구성은 Table 3과 같다. 휘발분의 조성 (Tar, CO, CO_2, H_2O, H_2, CH_4, C_xH_y) 및 탈휘발 속도는 Flashchain[2]을 이용하여 예측한 결과를 user-defined function(UDF)를 통해 적용하였다. O_2, CO_2, H_2O에 의한 촤 연소는 회분 형성에 따른 입자 내 가스 확산 속도 저하를 고려하는 Wen과 Chaung[3]의 shrinking core model을 UDF를 통해 적용하였다.

Table 1 Properties of design coal.

Proximate analysis (%air-dried)					
Moisture	VM		FC		Ash
10.3	40		46.2		3.5
Ultimate analysis (%daf)					HHV
C	H	O	N	S	(MJ/kg)
75.5	5.7	17.3	1.0	0.5	26.56

Table 2 Flow rates of coal and oxidizers.

Case		Air	Oxy25	Oxy27
Coal flow rate (kg/s)		10.7	10.5	10.5
Oxidizer O_2 (vol.%)		20.9	25.46	27.0
Primary Oxidizer	Flow (kg/s)	13.4	19.5	20.0
	Temp. (°C)	70	85	85
	CO_2 (wt.%)	0	75.5	75.3
	H_2O (wt.%)	8.4	8.4	8.2
	O_2 (wt.%)	21.2	7.6	7.6
Second-ary Oxidizer	Flow (kg/s)	73.8	71.5	71.1
	Temp. (°C)	348	277	277
	CO_2 (wt.%)	0	52.5	52.5
	H_2O (wt.%)	1.0	14.5	13.5
	O_2 (wt.%)	23.0	25.6	27.5
OFA	Flow (kg/s)	17.2	2.3	2.1
O_2 lancing	Flow (kg/s)	-	2.79	2.79
	O_2 (wt.%)	-	94.4	94.4

Table 3 Flow and reaction models applied.

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

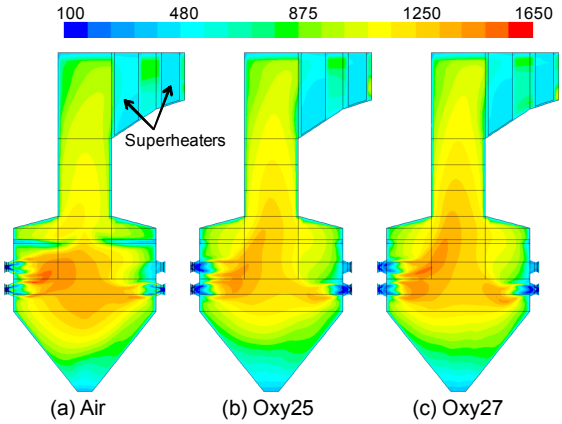

Fig. 2 Comparison of temperature contours.

가스 반응은 Tar, CxHy, CH_4의 O_2, H_2O에 의한 분해와 Water-gas shift reaction, H_2의 산화로 구성된 총 8개 반응[4,5]을 Finite-rate/Eddy dissipation model[6]을 이용하여 고려하였다. 난류모델은 Realizable k-ε 모델[7], 복사는 구분종좌법, 가스의 흡수계수는 Yin 등의 개선된 WSGGM[8]을 UDF를 이용하여 적용하였다.

Fig. 2는 세 연소조건에서 버너가 위치한 단면의 온도분포를 비교한 것이다. 미분탄이 공급되는 버너가 전벽에 8개, 후벽에 4개이기 때문에 세 경우 모두 전벽 쪽으로 치우쳐서 고온이 나타난다. 화염온도를 비교하면 공기연소시 버너 영역에서 당량비가 1.0으로 낮기 때문에 가장 온도가 높으며(최대 1585°C), 순산소 조건에서는 당량비도 1.17로 높고 CO_2의 열용량이 N_2에 비해 크기 때문에 화염의 온도가 낮다. 특히 O_2 농도가 낮은 Oxy25 조건에서 화염 온도가 더 낮게 나타난다(최대 1505°C). 화염 제트의 형태를 보면 공기연소 조건에서 N_2의 비체적이 커서 체적유량이 많고 OFA 제트의 영향도 받기 때문에 화염이 수평 방향으로 더 진행한다. 반면 순산소 조건에서는 화염이 상부 쪽으로 급격히 꺾여 상승한다.

Fig. 3은 공기 연소 조건에서의 벽면 열유속을 나타낸 것이다. 버너영역의 측벽에 부분적으로 내화벽이 설치되어 있기 때문에 벽면열유속이 50kW/m^2 이하로 낮은 영역과 수냉벽이 직접 노출되어 100 kW/m^2 이상인 영역이 뚜렷이 구별된다. 전벽과 후벽을 비교할 때 화염 온도가 더 높은 전벽에서 벽면 열유속이 크다. 또한 연소실 중앙부에서 단면이 급격히 좁아지는데 이 영역은 고온 화염에 직접 노출되어 열유속이 150 kW/m^2 이상으로 상승한다. 이와 같은 경향성은 세 연소 조건 모두에서 동일하게 나타난다.

Fig. 4는 세 경우의 벽면열유속을 높이별로 평균하여 비교한 것이다. 온도가 낮은 연소실 하부와 측벽에 내화벽이 설치된 영역까지는 벽면

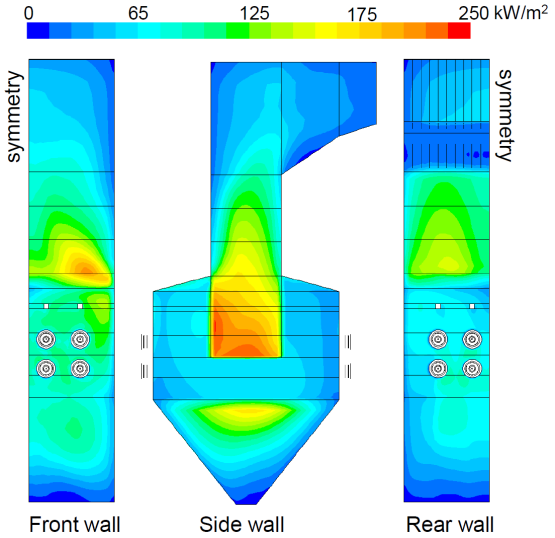

Fig. 3 Total heat flux on the wall for Case Air.

열유속이 낮지만, 내화벽이 제거된 y=12m 이상에서 급격히 증가한다. 공기연소 조건은 화염온도가 두 순산소연소 조건에 비해 높아 연소실 중앙부(y=12~17m)에서 열유속이 약 20 kW/m^2 정도 높게 나타난다. 반면 Oxy27 조건이 Oxy25 조건에 비해 화염 온도가 높기 때문에 y=11~15.2m에서 최대 10 kW/m^2 정도 크다. 하지만, 질량 유량과 이에 따른 열용량이 낮아 온도가 빠르게 하락하며 y=15m 이상에서는 Oxy25 조건과 유사하게 나타난다.

Table 4는 연소계산에 의한 단열화염온도와 해석에서 도출된 최고 온도, 벽면 총열전달량을 비교한 것이다. 화염의 최고온도와 벽면열전달량은 단열화염온도와 유사한 경향을 나타낸다. 순산소조건에서 높은 CO_2와 H_2O 농도로 인해 가스의 복사 흡수계수가 공기연소조건보다 크지만 석탄 및 회분입자의 흡수계수가 훨씬 크기 때문에, 가스 조성의 차이보다 화염온도의 차이가 복사열전달에 직접적인 영향을 주는 것으로 판단된다. 이는 단순화된 연소로에 대한 저자의 기존 연구[9]와 일치한다. 한편 공기연소조건과 동일한 전열량을 확보하기 위해서는 순산소연소 시 산화제 내 산소 농도가 27% 이상으로 높이거나, 투입 열량을 10%정도 증가시키는 것이 요구된다.

Table 4. Comparison of key temperature data and total heat transfer on the furnace wall.

Case	Air	Oxy25	Oxy27
Adiabatic flame temp.(°C)	1729	1641	1713
Max. gas temp. (°C)	1585	1505	1570
Total heat transfer (MW)	135.4	124.0	127.2
Radiation (MW)	125.8	112.6	116.4

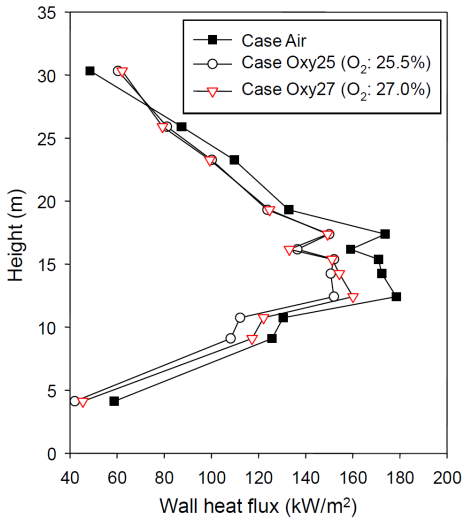

Fig. 4 Comparison of total heat flux on the wall.

후 기

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

참고 문헌

[1] Buhre, B.J.P. et al., Prog. Energy Combust. Sci. 31, pp.283-307, 2005.
[2] M.D. Smooke, I.K. Puri, K. Seshadri, Combust. Inst., pp.1783-1792, 1986.
[3 S. Niksa, Energy Fuels 5, pp.647-665, 1991.
[4 Wen C.Y., Chaung T.Z., Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev. 18, pp.684-695, 1979.
[5 A. Gòmez-Barea and B. Leckner, Prog. Energy Combust. Sci. 36, pp.444-509, 2010.
[6 W. P. Jones and R. P. Lindstedt, Combust. Flame 73, pp.233-249, 1988.
[7 B. F. Magnussen and B.H. Hjertager, 1976, In 16th Symp. (Int'l.) on Combustion. The Combustion Institute.
[8 T.-H. Shih et al., Computers & Fluids 24(3), pp.227-238, 1995.
[9 Yin C. et al., Energy Fuels, 24, pp.6275-6282, 2010.
[10] S. Park et al., "Effects of gas and particle emissions on wall radiative heat flux in oxy-fuel combustion", J. Mech. Sci. Technol. in press, 2012.