

접선연소식 보일러내의 미분탄 연소특성 전산해석 연구

박호영* · 김영주 · 김태형 · 서상일 · 김성철

한전전력연구원 신발전연구소그룹

E-mail : hypark@kepri.re.kr

The numerical studies on the characteristics of pulverized coal combustion in a tangentially fired boiler

H.Y. Park*, Y.J. Kim, T.H. Kim, S.I. Seo, S.C. Kim

Advanced power generation & Combustion Group,
Korea Electric Power Research Institute, KEPCO

I. 서론

최근 컴퓨터의 계산속도와 계산 메모리 용량이 급속히 향상됨에 따라 대형 미분탄 보일러의 실제 형상을 고려한 전산해석 연구가 활발히 수행되고 있으며, 이로부터 미분탄 보일러의 연소특성 분석, 안정적인 운전과 효율향상에 필요한 여러 가지 유용한 정보를 얻고 있다. 본 연구에서는 대형 발전용 보일러에서 가장 많이 채택되고 있는 접선연소식 미분탄 보일러를 대상으로 실제 운전 조건하에서의 보일러 내부의 열유동 및 미분탄 연소과정을 삼차원으로 전산해석하고 그 결과를 실제 운전 데이터 및 설계 데이터와 비교하고자 한다.

II. 해석 대상 보일러의 개요

본 연구 대상인 A화력발전소 보일러의 전체 구조를 Fig. 1에 보여주고 있다. 보일러는 초임계압, 관류형 보일러로서 화로(Furnace)의 6개의 버너에서 연소된 미분탄 연소 가스는 화로 상부의 각종 전열 관군, 즉 복사 과열기(Division & Platen Superheater), 최종재열기(Final Reheater), 최종 과열기 (Final Superheater), 재열기(Reheater), 절탄기(Economizer)를 거치며 열교환이 이루어 진다. (Fig. 1 참조)⁽¹⁾. 보일러내 미분탄 버너의 배열과 화로내 미분탄 화염의 형상을 개략적으로 보여준다. 보일러내 미분탄 버너들은 보일러의 4개 코너에 6개씩 총 24개가 설치되어 있으며 미분탄 버너 상하로 각종 연소용 2차 공기 노즐이 설치되어 있다. 미분탄 버너는 아래부터 위쪽으로 A, B, C, D, E, F로 호칭되며 미분탄과 연소용 2차 공기의 공급시 수직방향 분사각(tilt angle)을 -30° 에서 $+30^{\circ}$ 까지 조절할 수 있다. 각 코너에서 분사된 석탄-공기 혼합물은 화로 중앙부에 구형의 화염(Fire ball)을 형성하며 보일러 상부에서 볼 때 시계방향으로 선회를 하며 화로 출구로 연소가스가 이동하게 된다. 이때 미분탄-공기 혼합물의 분사방향과 22° 차이를 가지고 연소용 공기(CFS : Concentric firing system)가 공급되어지고 있다. 화염이 형성된 평면의 상부에는 화로 하단부의 연료과잉조건에서 발생된 미연성분의 연소를 위한 6개의 공기 노즐(SOFA : Separated Over Fire Air)이 설치되어 있다⁽¹⁾.

III. 수치해석

1. 계산 격자

Fig. 2는 전산해석을 위하여 보일러의 외부 형상에 대한 계산 격자와 보일러 화로 코너에서의 버너와 각종 연소용 공기 노즐에서의 계산 격자 형상을 보여주고 있다. 각종 전열관군을 다공체(Porous media)의 체적(Volume)으로 처리하여 연소가스가 가진 열을 흡수하는 heat sink와 가스상의 momentum sink가 발생하는 것으로 모사하였다. 해석 대상 보일러의 계산격자는 CFX mesh Generation code를 사용하였으며, 약 150만개의 node를 가진 600만 요소의 사면체 (tetrahedral element)의 격자가 사용되었다. 해석에는 상업용 전산유체해석 코드인 CFX 11.0 프로그램⁽²⁾을 이용하였으며 기존의 수립된 해를 초기조건으로 하여 대략 60시간의 시간이 소요되었다.

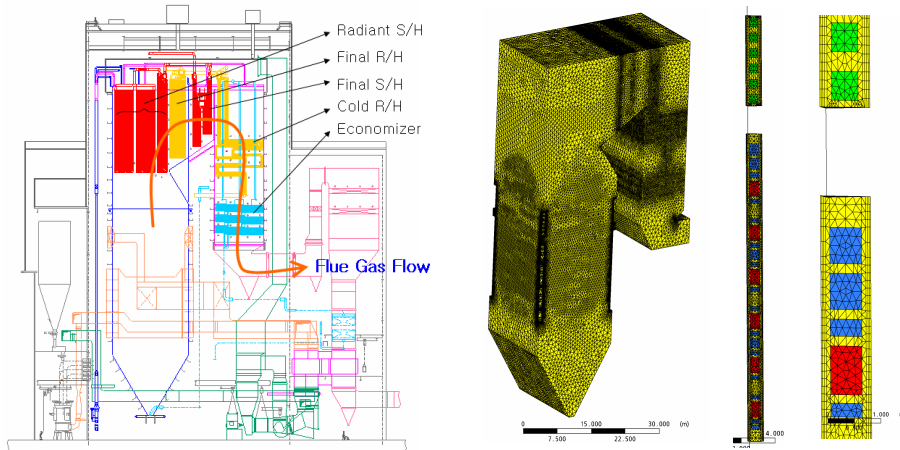


Fig. 1 Front view of the boiler Fig. 2 Grid Generation

2. 모델링 및 해석 조건

운동량 해석에 있어서는 3차원 Navier-Stokes 방정식을 해석하였으며, 복사 열전달 및 화학반응을 위한 방정식들을 포함하여야 한다. 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델을, 복사모델은 Discrete 모델⁽³⁾을 사용하였으며, 가스상의 반응에 대해서는 Eddy dissipation⁽⁴⁾ 모델을 사용하였다. 미분탄의 열분해 반응은 일차 열분해모델인 Badzioch와 Hawksley (1970)⁽⁵⁾의 속도 상수를 사용하였으며 촉 반응은 Field (1969)의 모델⁽⁶⁾을 사용하였다. A화력 보일러의 실제 운전 조건을 기준으로 해석을 수행하였으며 사용된 석탄의 성상과 각종 운전조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Coal analysis and operating condition

analysis coal	total moisture (wt.%)	HHV ¹⁾ (kcal/kg)	Proximate analysis(wt.%)				Ultimate analysis (wt. %)				
			IM ²⁾	FC ³⁾	VM ⁴⁾	Ash	C	H	O	N	S
	12.68	6,045	5.81	48.37	33.67	12.16	84.19	5.34	8.38	1.29	0.8
Operating condition	Primary air flow (t/h)	Secondary air flow (t/h)	coal flow (t/h)	BNR ⁵⁾ tilt (°)	BNR yaw (°)	SOFA tilt (°)	SOFA yaw (°)	stm temp (°C)	stm Pr. (bar)	stm flow (t/h)	mill No.
	736	1992	282	-13.8	0	-22.8	0	566	249	2,257	5

IV. 해석 결과

1. 실제 발전소 운전 데이터와의 비교

보일러 출구, 즉 절탄기 후단부에서 측정된 가스온도, NO, O₂, CO와 화로출구 가스온도 (FEGT : Furnace Exit Gas Temperature) 설계값을 해석 결과와 비교하여 Table 2에 나타 내었다. 가스온도의 경우 그 오차가 약 23℃로서 비교적 정확한 예측을 하고 있으며 O₂의 경우도 실측치와 거의 동일한 값을 보여주고 있다. NO_x의 경우도 그 편차가 대략 130-160 ppm이며 CO의 경우도 합당한 해석 결과를 보여주고 있어 임을 고려할 때 어느 정도 합당한 결과를 보여준다. 보일러 화로 출구온도 (FEGT)의 해석 결과는 1,175℃로서 설계값인 1,034℃와 약 140℃의 차이를 보여주고 있다.

Table 2 Comparison of the predicted values with the measured ones

	At Economizer Outlet				Designed Data
	Gas temp.(℃)	O ₂ (%)	NO(ppm)	CO(ppm)	FEGT(℃)
Predicted	412	3.37	285	5	1175
Measured	391	2.82 ~ 3.45	122 ~ 152	10 ~ 25	1034

2. 속도 분포

Fig. 3에서 보는 바와 같이 보일러 화로내에서 시계 방향의 강력한 선회유동을 보여주며 화로의 노즈(nose)부에서 연소가스의 선회유동이 적어진 것을 볼 수 있으며 그 이후 대류 전열부로 흐르게 되면서 보일러 왼쪽 벽쪽으로 치우쳐져서 보일러 출구로 빠져나가는 것을 볼 수 있다. 이는 보일러 화로에서의 시계방향 선회 유동이 노즈 부분을 지나고 대류 전열부의 연결되는 단면에서의 잔류 선회유동(Residual Swirl Flow)의 영향으로 주유동 방향이 왼쪽 벽면쪽으로 편향되기 때문이다.

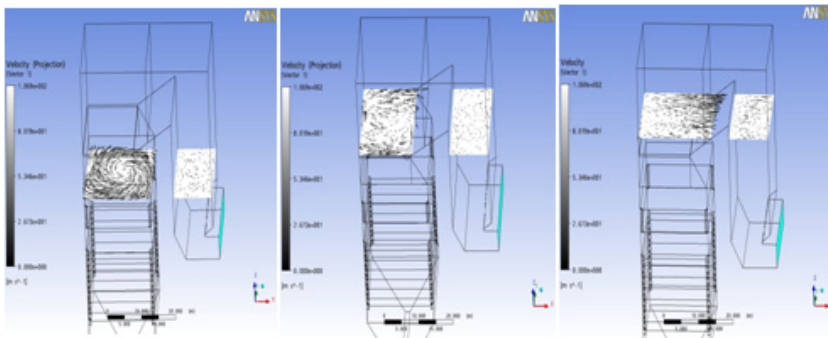


Fig. 3 Velocity distribution

3. 가스 온도 분포

Fig. 4에서 보는 바와 같이 화로내에서 미분탄의 연소가 진행됨에 따라 Fire ball이 형성됨을 볼 수 있으며 SOFA 부분에서는 단면의 중심부 온도가 아직 높은 것을 볼 수 있다. Nose부를 지난 후 대류 전열부로 연결되는 부분의 연소가스는 보일러 앞면에서 바라보았을 때 왼쪽 부분의 온도가 오른쪽보다 높은 것을 볼 수 있다. 이는 상부의 단면에서도 동일하게 나타나고 있다. 이는 화로에서의 선회유동이 화로 상부에서 약해지고 잔류 선회유동으로 인하여 왼쪽 벽면으로 치우쳐서 흐르기 때문으로 보인다. yz 단면에서의 온도 분포에서도

Fig. 4은 연소가스의 온도가 왼쪽이 더 높은 것을 확연히 볼 수 있다.

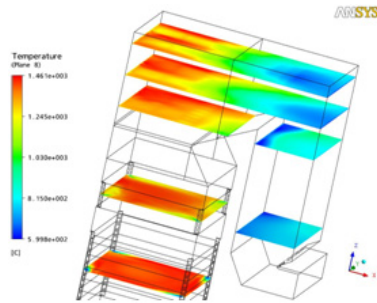


Fig. 4 Gas temperature distribution

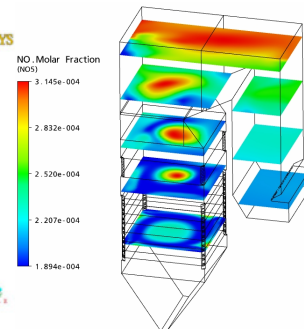
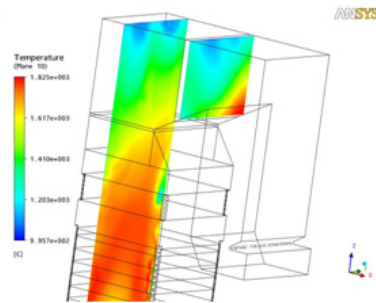


Fig. 5 NO distribution

4. NO 분포

미분탄의 연소구역인 화로에서의 NO 분포는 미분탄화염을 연료과잉 상태에서 연소되고 있어 NOx 농도가 상대적으로 적은 것을 볼 수 있으며 fire ball과 같은 형상을 보여준다 (Fig. 5 참조). 연소구역을 지난 버너 상부인 단면에서의 fire ball 중앙부에서 NOx가 최대 920ppm 까지 보여주고 있다. 연료과잉 조건에서 생성된 CO나 미연 화의 연소를 위한 SOFA에서의 공기가 공급된 후 세 번째 단면에서는 가스온도가 상승하게 되어 NO가 좀더 넓게 분포하고 농도가 증가된 것을 볼 수 있다.

V. 결론

국내 A화력발전소의 보일러를 대상으로 모델링을 하고 실제 운용중인 탄종과 운전조건을 기준으로 보일러 내부의 연소 및 열유동과정을 전산해석하였다. 해석 결과를 실측 및 설계 데이터와의 비교를 통하여 모델의 건전성을 확인하였다. 본 연구 결과 화로내의 연소가스는 선회하면서 노즈(nose) 부분을 통과한 후 대류 전열부로의 이동시에 잔류 선회유동이 발생되었다. 이러한 잔류 선회유동으로 인하여 최종과열기 전단의 연소가스 온도가 좌측벽면쪽 하단부에서 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

[참고문헌]

1. 한국전력공사, 현대엔지니어링주식회사, 2004, 화력발전소 보일러 운전지침서.
2. ANSYS, 2005, CFX 11.0 User's Guide.
3. R. Siegel and J.R. Howell, 1992, Thermal radiation Heat Transfer, Hemisphere Publishing Corporation, Washington D. C.
4. Spalding, D.B., 1970, Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flames, 13th Symp. (Int'l). on Combustion, The Combustion Inst., Salt Lake City, UT, Aug. pp. 23-29.
5. Badzioch, S., Hawksley, P.G.W., 1970, Kinetics of thermal decomposition of pulverized coal particles, Ind. Eng. Chem. Proc. design Dev., vol. 9, pp 521.
6. Field, M.A., 1969, Rate of Combustion of Size-Graded Fractions of Char from a Low Rank Coal between 1200 K-2000 K, Combustion & Flame, Vol. 13, pp. 237-252.