

대용량 미분탄 보일러의 연소특성 및 NO 분포 특성 연구

박호영[†] · 김영주

한전전력연구원 신발전연구소그룹

(2008년 3월 19일 접수, 2008년 4월 30일 채택)

Studies on the Combustion Characteristics and NO Distribution in the Pulverized Coal Fired Boiler

Ho Young Park[†] · Young Joo Kim

Advanced Power Generation & Combustion Group, Korea Electric Power Research Institute, KEPCO

ABSTRACT : Three dimensional numerical analysis were performed to investigate the combustion characteristics in a tangentially fired pulverized coal boiler. The predicted values at the outlet of economizer for the gas temperature, O₂, NO, CO were been compared with the measured data. By using the actual operating conditions of the power plant, the distribution of velocity, gas temperature, O₂, CO, CO₂ and NO as well as the particle tracking in the boiler were investigated. Throughout the present study, the non-uniform distribution of flue gas temperature in front of the final superheater might be resulted from the residual swirl flow in the upper furnace of the boiler. The present analysis on non-uniform distribution of the gas temperature could provide the useful information to prevent the frequent tube failure from happening in the final superheater of the tangentially coal-fired boiler.

Key Words : Combustion, Swirl Flow, NOx Emission, Furnace, Superheater

요약 : 접선 연소식 미분탄 보일러의 연소특성 분석을 위한 3차원 전산해석 연구를 수행하였다. 해석 결과의 건전성 검증을 위하여 보일러 출구, 즉 절탄기 후단에서의 가스 온도, O₂, NO, CO 농도를 발전소의 실제 측정 결과와 비교하였다. 실제 발전소의 운전조건을 기준으로 보일러내의 가스온도, 속도 분포를 해석하였으며 주요 가스농도인 O₂, CO, CO₂, NO의 분포와 char 입자 궤적을 구하였다. 본 연구를 통하여 최종과열기 전단에서의 가스 온도가 불균일하게 분포함을 알 수 있었으며, 이는 보일러 상부 연소로에서의 잔류 선회유동의 결과인 것으로 파악되었다. 불균일한 가스온도 분포에 대한 해석결과는 접선연소식 미분탄 보일러에서 자주 발생하는 튜브 파손을 방지하는데 있어 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

주제어 : 연소, 선회유동, 질소산화물 배출, 연소로, 과열기

1. 서론

미분탄을 사용하는 대형 보일러는 유류나 천연가스를 사용하는 발전설비에 비하여 발전원가가 저렴하여 국내 발전산업에서 주로 기저부하를 담당한다. 그러나 발전용 미분탄은 그 종류가 다양하고 보일러 연소로내에서 미분탄과 공기의 공급 조건, 운전 조건에 따라 연소 상태가 달라지며, 이는 열효율이나 연소의 안정성, 오염물질 배출특성 등에 민감한 영향을 미친다. 특히, 연속 운전 중인 대용량 미분탄 보일러는 연소 혹은 운전상의 문제점이 발생할 경우 원인 분석을 위한 실험적 접근 방법에는 한계가 있다. 이러한 경우에 전산해석을 적용하여 보일러 내부에서의 유동 및 연소특성을 파악함으로써 운전조건 개선이나 문제점 해결에 필요한 유용한 정보를 얻을 수 있다.

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. 가장 일반적인 미분탄 연소방식인 접선 연소식(Tangential Firing) 보일러에 관한 여러 가지 전산해석 연구결과가 발표되고 있다.^{1~3)} 특히, Yin 등^{4,5)}은 609 MW급 접선연소식 보일러의 후단부 형상을 실제 보일러 형상과 근접하게 모사하고 해석 결과를 설계 데이터와 비교하였다. 또한 연소로 출구 부분에서의 반시계방향의 잔류 선회 유동을 확인하였으며 보일러의 여러 단면에서 속도 및 가스온도 분포를 서로 비교, 분석한 바 있다.

본 연구에서는 대용량 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 비교하고 모델의 건전성을 검증하였다. 본 해석에서는 보일러 연소로, 버너 및 각종 연소

[†] Corresponding author

E-mail: hypark@kepri.re.kr

Tel: 042-865-5342

Fax: 042-865-5364

용 공기공급 노즐을 실제와 동일하게 모사하였으며 과열기, 재열기, 절탄기 등의 여러 전열관군들을 모두 고려하였다. 본 연구에서는 보일러 내부의 속도, 가스 온도, 주요 농도, 미분탄 char의 입자 궤적 및 NO 분포, 그리고 최종 과열기 전단에서의 가스온도 분포를 살펴보고자 한다. 본 해석에서 얻어진 잔류 선회유동과 연소가스의 불균일한 온도 분포에 대한 정보는 최종 과열기 튜브의 파열에 대한 원인을 분석할 수 있는 기본 자료로 쓰여 질 것이다. 또한, 본 연구 결과는 향후 보일러의 안정적인 운전과 설비의 안정성 증대를 위한 기본 자료를 활용되어질 것으로 기대된다.

2. 해석 방법 및 해석조건

2.1. 대상 보일러

본 연구 대상인 A화력발전소 보일러는 높이가 약 71 m, 가로, 세로가 각각 19.5 m로 개략적인 보일러의 전체 구조를 Fig. 1에 보여주고 있다. 보일러는 초입계압, 관류형 보일러로서 연소로(Furnace) 내의 6개 버너에서 연소된 미분탄 연소 가스는 연소로 상부의 각종 전열 관군, 즉 복사 과열기(Division & Platen Superheater), 최종재열기(Final Reheater), 최종 과열기(Final Superheater), 재열기(Reheater), 절탄기(Economizer)와 열교환을 하면서 연돌로 흐르게 된다.^{6,7)} Fig. 2는 보일러내 미분탄 버너의 배열과 연소로내 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 불리며 미분탄과 연소용 2차 공기의 공급시 수직방향 분사각(Tilt Angle)을 -30° 에서 $+30^{\circ}$ 까지 조절할 수 있다. Fig. 2의 우측 그림은 미분탄-공기 혼

합물이 코너의 버너로부터 연소로 중심부로 분사될때의 수평 분사각을 보여주는 그림이다. 수평 분사각도는 보일러의 중심에 대해서 편심되어 있으며 시계방향의 선회 유동을 생성시킨다. 각 코너에서 분사된 석탄-공기 혼합물은 연소로 중앙부에 구형의 화염(Fire Ball)을 형성하고 보일러 상부에서 볼 때 시계방향으로 선회를 하며 연소로 출구로 연소가스가 이동하게 된다. 이때 미분탄-공기 혼합물의 분사방향과 22° 차이를 가지고 연소용 공기(CFS : Concentric Firing System)가 공급되고 있다. 이는 NOx의 발생이 적은 연료과잉의 미분탄 화염을 형성시키는 저 NOx 버너인 LNCFS(Low NOx Concentric Firing System)의 원리를 보여주는 것이다. 화염이 형성된 평면의 상부에는 연소로 하단부의 연료과잉조건에서 발생된 미연성분의 연소를 위한 6개의 공기 노즐(SOFA : Separated Over Fire Air)이 설치되어 있다.^{6,7)}

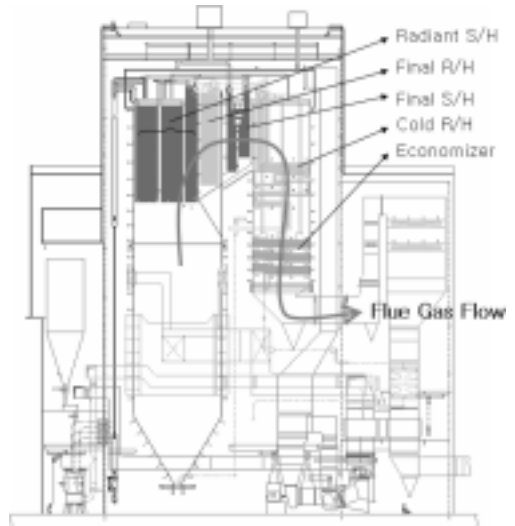


Fig. 1. Front view of the coal-fired boiler.

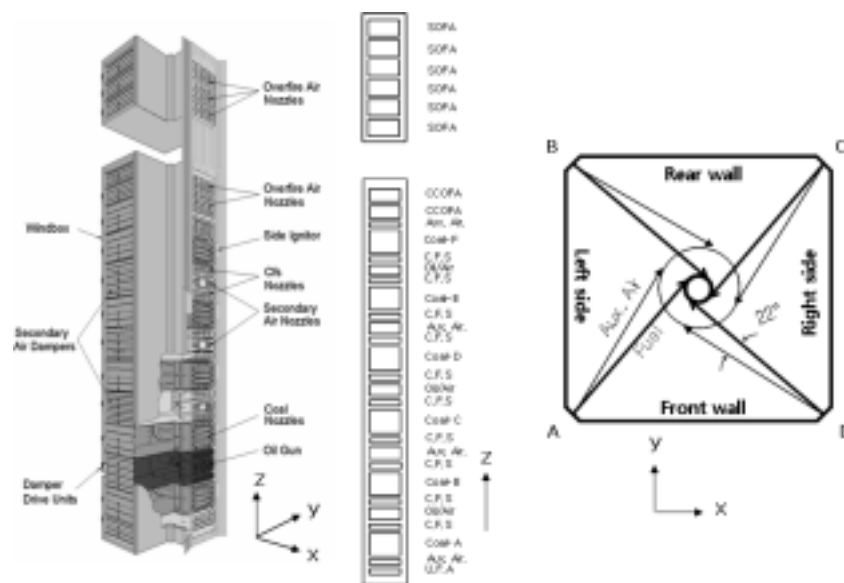


Fig. 2. Burner arrangement and concentric firing system.

2.2. 계산 격자 및 경계조건

Fig. 3은 전산해석을 위하여 보일러의 외부 형상에 대한 계산 격자와 보일러 연소로 코너에서의 버너와 각종 연소용 공기 노즐에서의 계산 격자 형상을 보여주어주고 있다. 각종 전열관군, 즉 과열기, 재열기 및 절탄기 등은 수많은 튜브로 이루어진 관군으로서 이를 실제와 동일하게 모사하기는 불가능하다. 본 연구에서는 Fig. 4에서와 같이 각종 전열관군을 다공체(Porous Media)의 체적(Volume)으로 처리하여 연소가스가 가진 열을 흡수하는 Heat Sink와 가스상의 Momentum Sink가 발생하는 것으로 모사하였다. 각 전열관군에서의 열흡수량과 압력강하는 실측 운전데이터와 열성능 계산에 의하여 얻어진 값을 사용하였다.

보일러 연소로내의 수냉벽(Water Wall)의 경계조건은 수관내의 유체가 작동압력에 해당되는 포화온도로 일정하게 유지되므로, 수치해석의 경계가 되는 연소로 내벽에서는 일반적으로 작동압력에서의 포화온도보다 약 50℃ 높게 설정하였으며 대류 전열부 외벽은 실제 발전소와 동일하게 단열로 처리하였다.

해석 대상 보일러의 계산격자는 CFX Mesh Generation Code를 사용하였으며, 약 150만개의 노드(Node)를 가진 600만 요소의 사면체(Tetrahedral Element)의 격자가 사용되었다. 해석에는 상업용 전산유체해석 코드인 CFX 11.0 프로그램⁸⁾을 이용하였다. 수렴조건은 질량, 속도 및 난류장의 Residual 값이 1.0^{-4} , 온도장과 농도장의 Imbalance 값이 2%

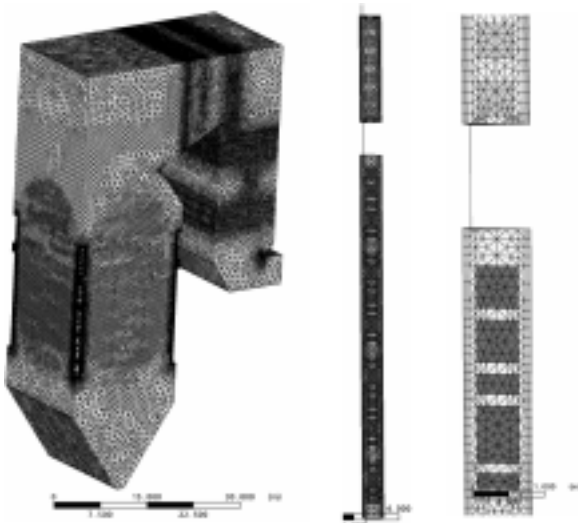


Fig. 3. Grid for the boiler and burner.

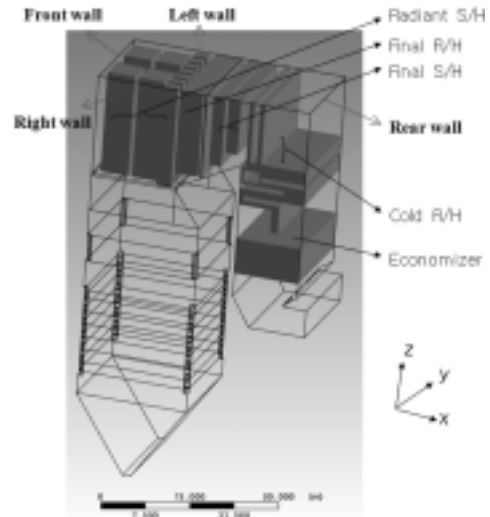


Fig. 4. Heat exchangers in the boiler.

이하일 경우 수렴한 것으로 판정하였으며 기존에 수렴된 해를 초기조건으로 하여 대략 60시간 소요되었다.

2.3. 모델링

본 전산해석에 사용한 지배방정식은 먼저 미분탄으로부터 생성되는 탈휘발화(Devolatilization) 가스의 혼합 및 난류반응을 다루는 기상상태와 석탄입자의 거동을 나타내는 입자상 지배방정식으로 구분된다. 기상상태의 지배방정식은 공간에 고정된 검사체적 내에서의 열 및 물질전달을 고려하는 Eulerian 법을 사용하였으며, 미분탄 입자의 거동해석을 위해서는 입자의 궤적을 추적하는 Lagrangian 법을 사용하였다.

유체 및 에너지의 이동현상의 해석에 필요한 방정식은 질량, 운동량, 에너지 보존법칙을 미소의 체적에 적용하여 얻어진 비선형 연립 편미분방정식이다. 운동량 해석에 있어서는 3차원 Navier-Stokes 방정식을 해석하였으며, 복사열전달 및 화학반응을 위한 방정식들을 포함하여야 한다. 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델을, 복사모델은 Discrete Transfer 모델⁹⁾을 사용하였으며, 가스상의 반응에 대해서는 Eddy Dissipation^{10,11)} 모델을 사용하였다. 난류 유동장내에 존재하는 입자상 물질, 즉 미분탄이 보일러 내부에서 연소반응이 진행되어 주변의 기체와 물질 및 열전달이 일어나게 되므로 유동장에 커다란 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 미분탄의 연소반응을 탈휘발화 반응과 탈휘발화 잔류물인 char

Table 1. Coal analysis and operating conditions

Coal Analysis	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 ⁶⁾ 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

¹⁾ HHV : High Heating Value, ²⁾ IM : Inherent Moisture, ³⁾ FC : Fixed Carbon, ⁴⁾ VM : Volatile Matter, ⁵⁾ BNR : Burner, ⁶⁾ Stm : Steam

의 산화반응으로 구분하였다. 탈휘발화 반응은 일차 탈휘발화모델인 Badzioch와 Hawksley¹²⁾의 속도상수를 사용하였으며 char 반응은 Field의 모델¹³⁾을 사용하였다.

2.4. 해석조건

A화력 보일러의 실제 운전 조건을 기준으로 전산해석을 수행하였다. 사용된 석탄은 호주에서 수입한 역청탄으로서 그 성상은 Table 1과 같으며 보일러에 공급된 공기량 및 미분탄 공급량, 미분탄 노즐 및 SOFA의 수직 분사각(Tilt Angle)과 수평 분사각(Yaw), 그리고 고압터빈으로 들어가는 주증기(Main Steam)의 온도, 압력, 유량, 그리고 미분탄 분쇄기(Mill)의 운전넷수도 함께 주어졌다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 모델링 검증

해석 모델의 건전성 검증을 위하여 A화력의 2007년 10월 11일 운전조건과 동일한 조건에 대하여 해석하였으며 그 계산 결과를 발전소의 운전데이터 및 설계 데이터와 서로 비교하였다. 보일러 연소로내의 온도는 고온이며 그 체적이 매우 크므로 연소로내의 온도, 속도, 화학종에 대한 분포를 정확히 측정하지 못한다. 단지 육안으로 연소로내의 화염이나 연소상태, 각종 전열관군에서의 입자 퇴적 등을 관찰창과 감시 카메라를 통하여 일부 관찰할 수 있다. 또한 각 전열관군에서의 증기 온도나 전열관내의 일부 튜브의 금속온도 측정치로부터 연소로내 온도 분포 등을 유추하고 있다. 오랜 운전 경험과 운전 패턴 변화에 따른 보일러 상태 변화 등에 대한 축적 데이터로부터 이러한 유추 해석은 상당히 정확한 편이다.

A화력의 경우 보일러 출구, 즉 절탄기 후단부에는 6개소의 가스온도 측정용 열전대, NO, O₂, CO 온라인 측정설비를 갖추고 있어 이를 검증용 데이터로 사용할 수 있다. Platen Superheater와 최종 재열기 사이의 가스온도로 정의되는 연소로출구 가스온도(FEGT : Furnace Exit Gas Temperature)는 보일러의 설계시, 혹은 운전시의 중요한 파라미터로서 현재 이를 실측하지는 못하고 있다. 본 연구의 해석 결과와 FEGT 설계 데이터와 비교함으로써 어느 정도 모델의 건전성을 평가할 수 있을 것이다.

Table 2는 계산 결과를 실측치, 또는 설계 데이터와 비교한 것이다. 가스온도의 경우 그 오차가 약 23℃로서 비교적 정확한 예측을 하고 있으며 O₂의 경우도 실측치와 거의 동일한 값을 보여주고 있다. NO의 경우도 그 편차가 대략 130~160 ppm이며 CO의 경우도 어느 정도 일치하는 결과를 보여주고 있다. 보일러 연소로출구 가스온도의 해석 결과는 1,206℃로서 설계값인 1,034℃와 약 170℃의 차이를 보여주고 있다. 현재 A 화력의 보일러에서 사용중인 미분탄량과 공기량은 설계치보다 초과하여 사용하고 있어 실제로는 보일러의 설계 열부하보다 더 높게 운전되고 있음을 의미하며 실제 가스온도는 설계치보다 높을

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	3	1,206
Measured	391	2.82~3.45	122~152	10~25	1,034

것으로 보인다. 이는 이미 발전소 현장에서 인지하고 있는 사안이며, 본 해석 모델은 합당한 계산 결과를 보여주고 있다.

3.2. 속도분포

Fig. 5는 보일러의 xy, yz 단면에서 속도, 온도 및 주요 가스농도(O₂, CO, CO₂, NO)의 분포를 보기위한 각 단면의 위치를 나타낸 것으로, 보일러의 노즈 부분의 위치와 연소로출구 가스온도 측정 위치도 함께 보여준다. Fig. 6은 xy 좌표 평면상의 P1, P2, P3, P4, P5에서 얻어진 속도 분포를 보여준다. 연소로내의 미분탄 연소구역인 P1에서는 시계 방향의 강력한 선회유동을 보여주며 버너 연소구역의 위쪽인 P2 단면, 그리고 SOFA를 지난 P3 단면에서도 강한 선회 유동을 볼 수 있다.

연소로의 단면이 좁아지는 보일러의 노즈 부분을 지난 연소 가스는 대류 전열부로 흐르게 되며 이때 보일러 왼쪽 벽쪽으로 치우쳐서 보일러 출구로 빠져나가는 것을 P4 단면에서 볼 수 있다. 이는 보일러 연소로에서 대류 전열부로 연결되는 통로에서 존재하는 잔류 선회유동(Residual Swirl Flow) 때문인 것으로 생각된다. 보일러 연소로 상부인 P5 단면에서의 속도는 비교적 고르게 분포하는 것을 볼 수 있다.

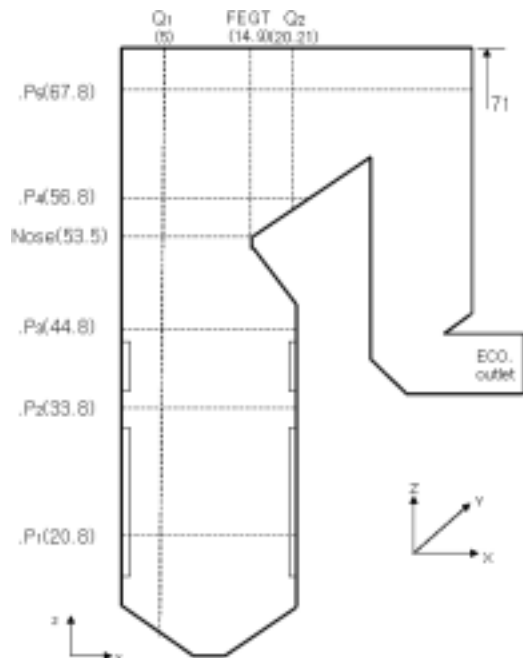


Fig. 5. Simplified volume of the boiler.

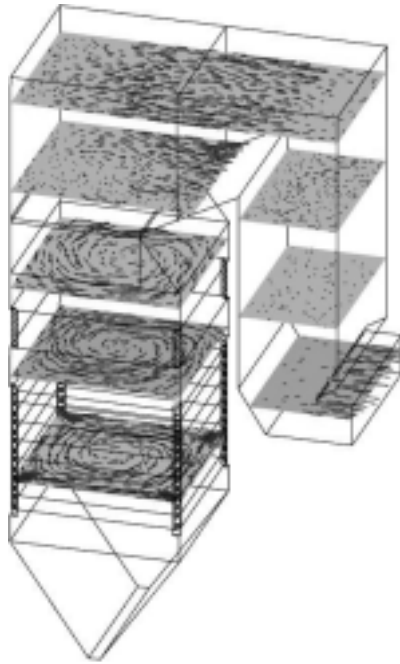


Fig. 6. velocity vectors at each planes.

이와 같이 연소가스가 보일러의 대류 전열부 통과시 왼쪽(혹은 오른쪽)으로 치우쳐서 흐르는 편류현상은 접선 연소방식을 채용한 대부분의 보일러에서 발생하고 있다. 잔류 선회 유동에 의한 대류 전열부 통과 부분(Cross Over)에서 속도를 실측하여 이러한 편류현상을 확인하는 것은 불가능하지만 전열관군의 입, 출구 온도 편차로부터 이러한 편류 현상을 확인 할 수 있다.

3.3. 온도 분포

Fig. 7은 P1, P2, P3, P4, P5 단면에서의 온도 분포를 보여주고 있으며, Fig. 8은 yz 평면인 Q1, Q2 단면에서의 온도분포를 보여준다. 각 단면에서의 온도 차이를 명확히 구분하기 위하여 각 단면에서의 최고, 최저 온도를 기준으로 온도분포를 나타내었다. P1 단면에서는 미분탄-공기 혼합물의 연소가 진행됨에 따라 연소로 중심부에 Fire Ball이 형성됨을 볼 수 있으며 연소구역을 지난 P2에서도 이러한 Fire Ball의 영향이 아직까지 남아 있음을 볼 수 있다. SOFA를 지난 P3 단면에서는 단면의 중심부 온도가 아직도 높은 것을 볼 수 있다. 노즈 부분을 지난 P4 단면에서의 연소 가스는 왼쪽 부분의 온도가 오른쪽보다 높은 것을 볼 수 있으며 P5 단면에서도 동일하게 나타나고 있다. 이는 연소로에서의 선회유동이 연소로 상부에서 약해지고 잔류 선회유동으로 인하여 왼쪽 벽면으로 치우쳐서 흐르기 때문으로 보인다.

yz 단면에서의 온도 분포인 Fig. 8은 연소가스의 온도가 왼쪽 벽면측이 더 높은 것을 확연히 볼 수 있다. Q1 단면에서 보일러 연소로 상부의 왼쪽 벽면쪽이 더 높게 나타나고 있으며 Q2 단면에서는 왼쪽 하단부의 온도가 매우 높은 것을 볼 수 있다. 최종과열기 전단인 Q2 단면에서

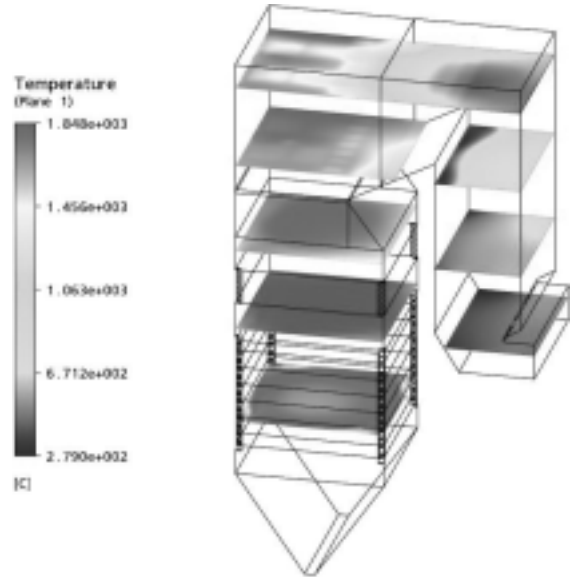


Fig. 7. Gas temperatures at xy plane.

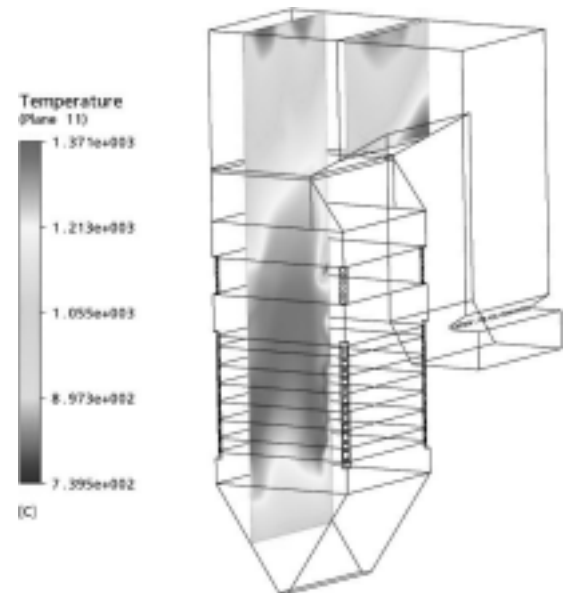


Fig. 8. Gas temperatures at yz plane.

는 왼쪽 벽면측의 하단부 연소가스 온도가 같은 평면에서의 최소 온도보다 대략 300℃까지 높은 것을 볼 수 있다. 이는 최종과열기 출구의 좌측 증기 온도가 우측의 그것보다 약 20℃까지 높게 나타나고 있는 현상의 운전상황과 일치하는 결과이다.

이러한 연소가스의 좌측으로의 편류는 최종 과열기 및 재열기 튜브에서의 열흡수가 불균일하게 되어 튜브 금속온도의 편차를 유발하게 되며, 튜브의 온도가 그 금속의 허용 온도보다 높을 경우 튜브의 파열을 가져 올 수 있다.

3.4. 주요 가스 농도 분포

Fig. 9부터 11은 보일러내의 각 단면에서의 O₂, CO, CO₂ 몰분율을 나타낸다. P1 단면에서 산소농도로부터 Fire Ball

이 형성되는 것을 알 수 있다. 버너 연소구역의 상부인 P2 단면에서는 산소 농도가 전 단면에 걸쳐 Zero에 가까우며 이는 연료 과잉 상태를 보여준다. P3 단면에서는 SOFA 공기의 공급으로 인하여 산소농도가 증가하며 P4, P5 단면을 거치면서 산소가 골고루 분포되는 것을 볼 수 있다.

연료 과잉인 P1 단면에서 CO의 농도는 버너 출구부분에서 최고 11.9%까지 증가된 것을 볼 수 있으며 Fire Ball을 따라 CO가 분포함을 알 수 있다. SOFA에서의 다단 연소용 공기의 공급으로 P3 단면에서 CO는 거의 사라지며 단면 P4와 P5의 경우 ppm 수준의 농도를 보여주고 있다. CO₂ 농도의 경우 P1 단면에서 보는 바와 같이 미분탄이 연소되는 Fire Ball을 따라 CO₂의 농도가 높은 것을 볼 수 있으며 이후 SOFA 등을 거치며 균일한 분포를 보여준다.

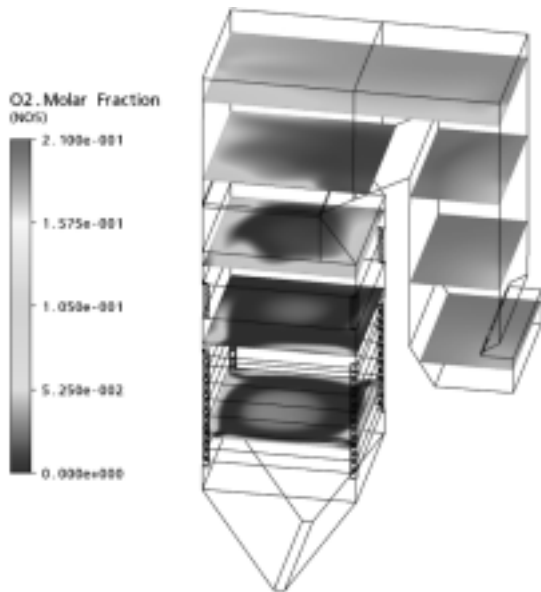


Fig. 9. O₂ distribution.

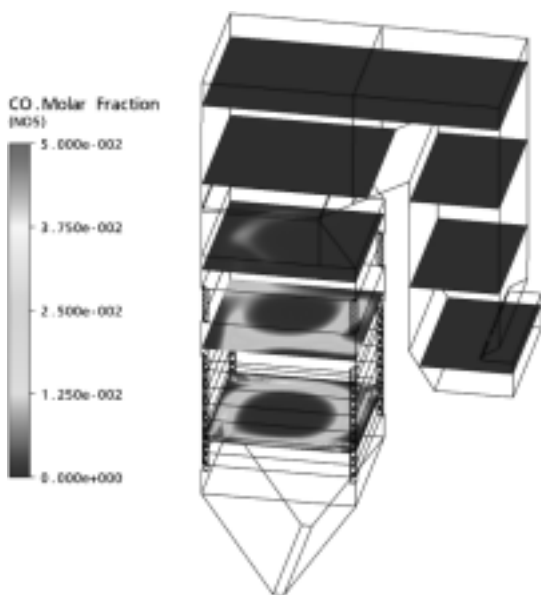


Fig. 10. CO distribution.

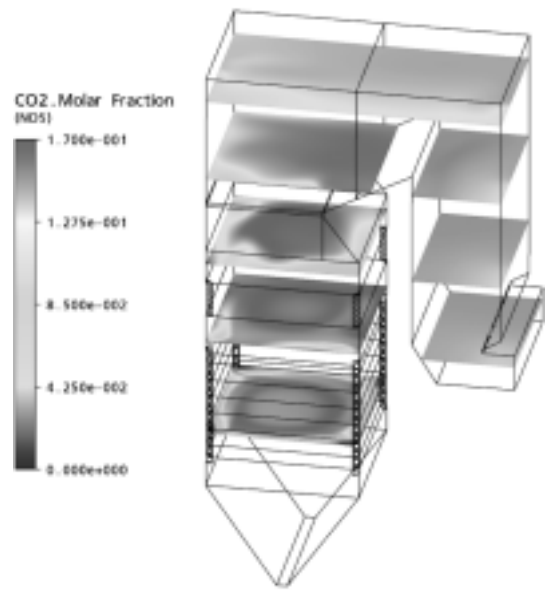


Fig. 11. CO₂ distribution.

P1, P2, P3, P4, P5 단면에서의 O₂ 농도는 각각 3.20, 1.97, 3.52, 2.89, 4.42%를 나타내며, CO 농도는 P1, P2, P3 단면에서 각각 11.91, 5.41, 5.31%, P4와 P5 단면에서 각각 9 ppm과 1 ppm의 값을 보여준다. CO₂의 경우 각 단면에서 13.5, 14.9, 14.1, 14.6, 13.5%의 농도를 나타내고 있다.

3.5. 입자 궤적

Fig. 12는 미분탄 char 입자의 질량 분율(Mass Fraction)을 보여준다. 8개의 입자에 대한 궤적을 나타내고 있으며 미분탄 버너 A, B, C, D, E에서 나온 미분탄 입자는 연소로 내를 이동하면서 탈휘발화를 거치고 다시 char의 연소반응이 진행된다. Fig. 12의 궤적은 입자중 char의 질량

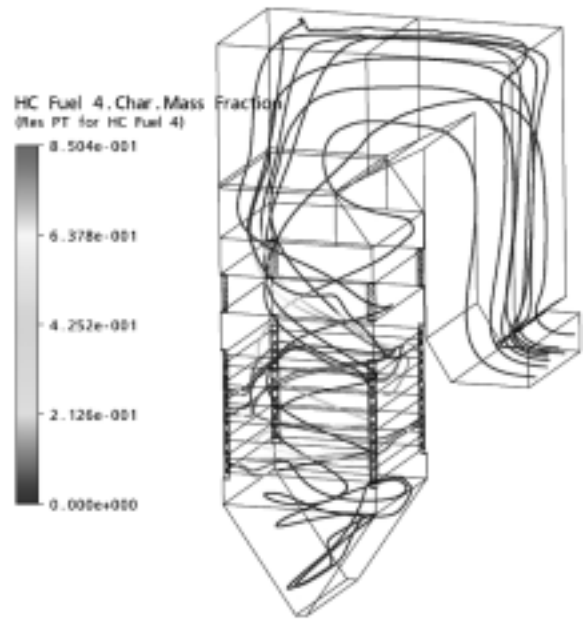


Fig. 12. Char mass fraction.

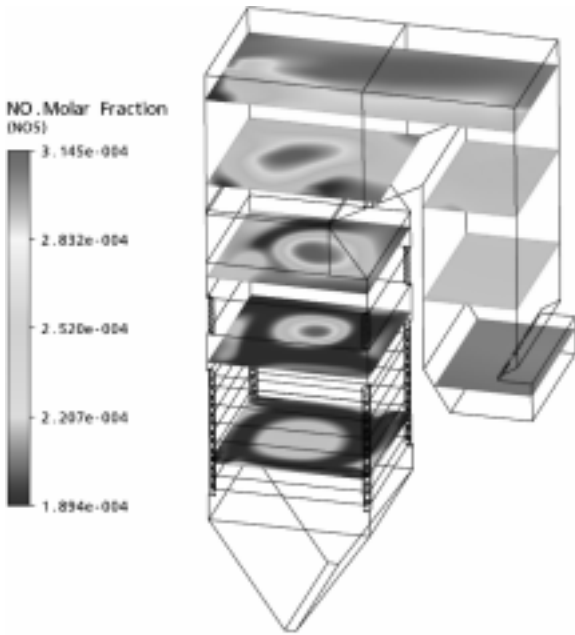


Fig. 13. No distribution.

분율을 나타내고 있다. 입자는 회와 탄소성분으로 구성된 char를 나타내며 보일러 내에서 char의 반응이 진행됨에 따라 회의 성분만 남게 되는 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 미분탄 버너를 나온 입자는 대개 연소로 내에서 반응이 완료되고 있으며 일부 입자가 SOFA를 지난 부분에서 char의 반응이 완료되는 것을 알 수 있다.

3.6. NO 분포

Fig. 13은 P1, P2, P3, P4, P5 단면에서의 NO 분포특성을 보여주고 있다. 미분탄의 연소구역인 P1 단면에서의 NO 분포는 앞서 설명한 바와 같이 연료과잉의 미분탄 화염이므로 NO 농도가 상대적으로 적은 것을 볼 수 있다. 연소구역을 지난 버너 상부인 P2 단면에서의 Fire Ball 중앙부에서 NO가 최대 920 ppm까지 보여주고 있으며 연료과잉 조건에서 생성된 CO나 미연 char의 연소를 위한 SOFA에서의 공기가 공급됨에 따라 가스온도가 상승하게 되어 P3 단면에서의 NO가 좀더 넓게 분포하고 농도가 약간 증가된 것을 볼 수 있다. 노즈 부분을 지난 연소가스의 NO는 P4 평면에서 더 넓게 분포하며 이후 대류 전열부인 P5 평면에서 약 200~300 ppm의 값을 보여주고 있다. P1, P2, P3, P4, P5 평면에서의 평균 NO 농도는 각각 322, 270, 294, 288, 287 ppm을 보여주고 있으며 보일러 출구에서는 285 ppm인 것으로 나타났다.

4. 결론

국내 A화력발전소의 보일러를 대상으로 보일러의 외부형상, 버너와 각종 연소용 공기공급 노즐, 전열관들을 모델링하고 실제 사용 중인 탄종과 운전조건을 기준으로 보일러 내부의 연소 및 열유동과정을 전산해석하였다. 실

제의 연소 및 운전조건을 가급적 실제와 가깝게 모사하였으며 해석 결과를 실측 및 설계 데이터와 비교하여 모델의 건전성을 확인하였다. 본 연구 결과 연소로내의 연소 가스는 선회하면서 노즈 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. 또한 버너의 수직 분사각이 -13.8°인 현재의 운전조건하에서 복사 과열기가 위치한 연소로 상부에서의 가스온도도 왼쪽 벽면쪽으로 치우쳐진 것을 볼 수 있었다. 최종 과열기 전단의 불균일한 연소가스의 온도 분포는 튜브의 열부하 분포에 편차를 발생시키며, 이는 장기간 운전시 튜브 과열의 한 원인으로 알려져 있다. 보일러 연소로 내에서의 O₂, CO, CO₂, 그리고 NO는 중앙에 Fire Ball의 형상과 같은 분포를 보여주고 있으며 보일러 출구에서의 실측 데이터와 비교할 때 만족할 만한 수준의 농도 예측이 이루어지고 있다.

참고문헌

1. Lockwood, F. C., Papadopoulos, C., Abbs., A. S., "Prediction of corner-fired power station combustor," *Combust. Sci. Technol.*, **58**, 5~23(1988).
2. Fan., J. R., Sun, P., Zeng, Y. Q., Ma, Y. L., and Cen, K. F., "Numerical and experimental investigation on the reduction of NOx emission in a 600 MW utility furnace by using OFA," *Fuel*, **78**, 1387~1394(1999).
3. Fan., J. R., Qian, L., Ma, Y., Sun, P., and Cen, K. F., "Computational modeling of pulverized coal combustion processes in tangentially fired furnaces," *Chemical Engineering Journal*, **81**, 261~269(2001).
4. Yin, C., Caillat, S., Harion, J. L., Baudoin, B., and Perez, E., "Investigation of the flow, combustion, heat-transfer and emissions from a 609 MW utility tangentially fired pulverized-coal boiler," *Fuel*, **81**, 997~1006(2002).
5. Yin, C., Rosendahl, L., and Condra, T. J., "Further study of the gas temperature deviation in large-scale tangentially coal-fired boilers," *Fuel*, **82**, 1127~1137(2003).
6. 한국전력공사, 현대엔지니어링주식회사, "화력발전소 보일러 운전지침서," (2004).
7. 한국전력공사, 현대엔지니어링주식회사, "화력발전소 보일러 보수지침서," Vol I(2004).
8. ANSYS, CFX 11.0 User's Guide(2005).
9. Siegel, R. and Howell, J. R., "Thermal radiation Heat Transfer," Hemisphere Publishing Corporation, Washington D.C.(1992).
10. Magnussen, B. F. and Hjertager, B. H., "On Mathematical Models of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion, 16th Symp. (Int'l) on Combustion," Cambridge, MA, Aug. pp. 15~20(1976).

11. Spalding, D. B., "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(1970).
12. Badzioch, S., Hawksley, P. G. W., "Kinetics of thermal decomposition of pulverized coal particles," *Ind. Eng. Chem. Proc. design Dev.*, **9**, 521(1970).
13. Field, M. A., "Rate of Combustion of Size-Graded Fractions of Char from a Low Rank Coal between 1200 K-2000 K," *Combustion & Flame*, **13**, 237~252(1969).