

미분탄 보일러의 연소용 공기공급 변화에 따른 노내 연소상태 해석

서상일* · 박호영*[†] · 강동수** · 정동해**

*한전전력연구원, **한국남동발전(주)

(2010년 8월 10일 접수, 2010년 9월 10일 수정, 2010년 9월 10일 채택)

Combustion Characteristics of Coal-Fired Boiler Depending on the Variations in Combustion Air Supply Method

San Il Seo*, Ho Young Park*[†], Dong Soo Kang**, and Dong Hae Jeong**

*Korea Electric Power Research Institute, KEPCO, **Young Heung Power Station, KOSEP

(Received 10 August 2010, Revised 10 September 2010, Accepted 10 September 2010)

요 약

국내 미분탄 보일러의 노내 공기량 공급에 따른 연소특성 분석을 위한 3차원 전산해석 연구를 수행하였다. 보일러 연소해석 해석 결과의 건전성 검증을 위하여 보일러 출구, 즉 절탄기 후단에서의 가스 온도, O₂, NO, SOx 농도를 발전소의 실제 운전데이터와 비교하였다. 검증된 해석 결과를 기준조건으로 SOFA(Separated Over Fire Air)와 CCOFA(Closed Coupled Over Fire Air)에서의 연소 공기량을 변화시킨 경우 보일러내 NOx와 가스 온도 분포를 중심으로 각각의 경우를 비교하였다. 본 연구를 통하여 CCOFA보다는 SOFA 공기량의 변화에 따라 NOx 농도의 민감도가 더 큰 것을 알 수 있었으며 대류 전열부의 전열관군에서의 온도 분포가 다르게 나타나고 있어 가스온도 편차 방지를 위한 연소조정이 필요함을 알 수 있었다.

주요어 : 석탄연소, 질소산화물, 수평분사각, 연소로, 과열기

Abstract — 3-D CFD(Computational Fluid Dynamics) work were carried out to investigate the combustion characteristics in a boiler depending on the variations in air supply condition. For the gas temperature, O₂, NO, SOx at the outlet of economizer, the predicted values were been compared with the measured data. With the verified CFD model, the effects of air flow rates through SOFA(Separated Over Fire Air) and CCOFA(Closed Coupled Over Fire Air) on the combustion behavior in a boiler were simulated, and the distributions of NOx and gas temperature were mainly compared each other. The change in SOFA air flow rate gave the more sensitive effect on NOx than that in CCOFA. The distributions of gas temperature at convection path are differed with the changes in SOFA and CCOFA flow rate, so the combustion modification such as yaw anlje adjustment are required to get an enhanced gas temperature distribution.

Key words : Coal combustion, NOx Emission, Yaw angle, Furnace, Superheater

1. 서 론

2008년 기준 화력발전은 전세계 전력생산의 약 65%

[†]To whom corresponding should be addressed.
Korea Electric Power Research Institute, KEPCO
1045 Daeduk-daero, Dukjin-dong, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-353,
Korea
Tel : 042-865-5602; E-mail : hypark@kepri.re.kr

를 차지하고 있으며 연료별로는 석탄화력이 약 40%, 천연가스는 약 20%, 석유는 약 5%의 전력을 담당하고 있다 [1]. 우리나라의 에너지원중에서 석탄의 소비율은 2006년 기준으로 석유(43.6%) 다음으로 높은 24.3%를 차지하고 있으며, 대부분의 소비처인 전력부분에서 석탄화력은 전체 발전량의 약 36%를 차지

하고 있다. 우리나라의 경우 2008년 기준 화력발전은 총 발전 설비용량 72,491 MW의 약 67%를 담당하고 있으며 이중에서 석탄화력이 약 33%, 석유화력이 약 8%, 그리고 복합화력이 약 26%를 차지하고 있다 [2].

우리나라 대부분의 석탄화력 보일러는 저 NOx 버너의 채용과 함께 단계적 연소의 한 종류인 공기 다단연소(Air staging) 방법을 채용하고 있다. 최근에 건설, 운전중인 대용량의 코너연소 석탄화력 보일러는 LNCFS(Low NOx Concentric Firing System) 시스템을 채용하여 NOx 배출량을 저감하고 있다 [2]. 또한 화로 하부의 주연소구역은 연소용 공기량의 70~90%를 공급하여 당량비(Equivalence ratio)가 1보다 적은 연료 과잉상태를 유지하고, 화로 상부의 CCOFA (Closed Coupled Over Fire Air) 또는 SOFA(Separated Over Fire Air) 포트로 나머지 공기를 투입하여 연소를 완료하는 화로 다단연소(Furnace Air Staging) 연소방식을 취하고 있다 [3].

발전용 미분탄은 보일러 연소로내에서 미분탄과 공기의 공급 조건, 운전 조건에 따라 연소 상태가 달라지며 이는 열효율이나 연소의 안정성, 오염물질 배출 특성 등에 민감한 영향을 미친다. 또한 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.

본 연구에서는 A화력발전소의 보일러를 대상으로 실제 운전조건하에서 보일러내의 연소, 열유동해석을 수행하고 그 결과를 실제 운전데이터와 비교하여 해석의 신뢰성을 검증하였다. 검증된 해석 결과를 기준 조건으로 SOFA와 CCOFA에서의 연소 공기량을 변화시킨 경우 보일러내 NOx와 가스온도 분포를 중심으로 해석 결과를 서로 비교, 분석하였다. 본 연구는 기존의 운영중인 특정 보일러를 대상으로 연소방식 변경에 따른 화로내 연소 및 열유동 거동특성 해석한 것으로 향후의 설비 개선이나 보일러 최적 운영을 위한 기본 자료로 활용할 수 있을 것이다.

2. 해석 방법 및 해석조건

2-1. 대상 보일러

본 연구 대상인 A화력발전소 보일러에 대한 전체

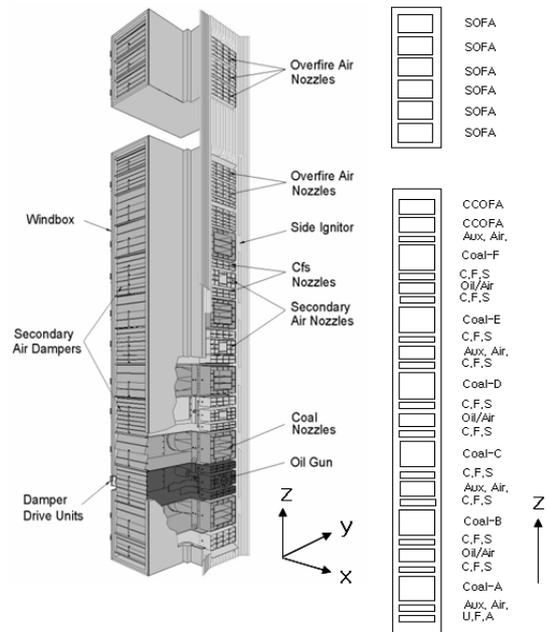


Fig. 1. Burner arrangement and dampers.

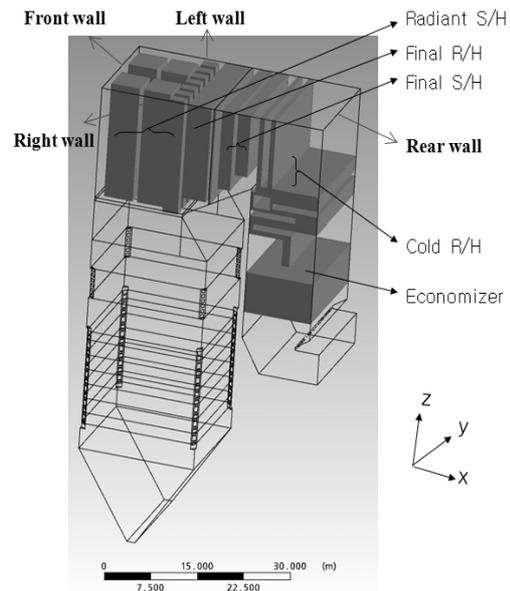


Fig. 2. Heat exchangers in the boiler.

구조와 화로내 버너, 노즐 및 연소조건에 대한 설명은 다른 문헌에 자세히 소개되어 있다 [4]. 보일러는 높이가 약 71 m, 가로, 세로가 각각 19.5 m로서, 초입계압, 관류형 보일러로서 화로(Furnace)의 6층의 버너에서 연소된 미분탄 연소 가스는 화로 상부의 각종 전열관군, 즉 복사과열기(Division & Platen Super-heater), 최종재열기(Final Reheater), 최종 과열기(Final Super-heater), 재열기(Reheater), 절탄기(Economizer)를 거치

며 열교환이 이루어진다. Fig. 1은 보일러내 미분탄 버너와 각종 공기노즐을 개략적으로 보여준다. 보일러내 미분탄 버너들은 보일러의 4개 코너에 6층에 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 수직 분사각(Tilt Angle)을 -30° 에서 $+30^\circ$ 까지 조절할 수 있다.

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 공급되어지고 있다. 화염이 형성된 평면의 상부에는 연소로 하단부의 연료과잉조건에서 발생된 미연성분의 연소를 위한 6개의 공기 노즐(SOFA)이 설치되어 있다 [5,6]. 6층의 미분탄 버너와 CFS 중간 중간에 보조공기(Aux. air) 노즐이 4개가 설치되어 있으며 버너 최상부의 CCOFA 노즐이 2단으로 설치되어 있다. 또한 화염이 형성된 평면의 상부에는 연소로 하단부의 연료과잉조건에서 발생된 미연성분의 연소를 위한 6개의 공기 노즐(SOFA)이 설치되어 있다.

2-2. 계산 격자 및 모델링

A화력발전소 보일러에 대한 계산 격자는 프리즘 형태와 사면체 형태의 격자를 이용하여 약 150만개의 노드를 가진 600만 요소의 사면체 격자를 사용하였다. 보일러내 각종 전열관군은 다공성 매체로 처리하여 열흡수원(Heat sink)와 운동량 흡수원(Momentum sink)가 발생하는 것으로 모사하였다. 해석에는 상업용 전산유체해석 코드인 CFX 11.0 프로그램 [7]을 이용하였으며 수렴조건으로 질량, 속도 및 난류장의 Residual 값이 1.0^{-4} , 온도장과 농도장의 불평형(Imbalance) 값

이 2%이하일 경우 수렴한 것으로 판정하였으며 기존의 수렴된 해를 초기조건으로 하여 대략 2~3일 소요되었다. 전산해석시 난류모델은 $k-\varepsilon$ 모델을, 복사모델은 Discrete Transfer 모델 [8]을 사용하였으며, 가스상의 반응에 대해서는 Eddy Dissipation [9,10] 모델을 사용하였다. 미분탄의 연소반응을 탈휘발화 반응과 탈휘발화 잔류물인 촉(Char)의 산화반응으로 구분하였다. 탈휘발화 반응은 일차 탈휘발화모델인 Badzioch와 Hawksley(1970) [11]의 속도상수를 사용하였으며 촉 반응은 Field(1969)의 모델 [12]을 사용하였다.

2-4. 해석조건

A화력 보일러의 2008년 11월 실제 운전 조건을 기준으로 전산해석을 수행하였다. 사용된 석탄은 DBCT탄으로서 그 성상은 Table 1과 같으며 보일러에 공급된 공기량 및 미분탄 공급량, 미분탄 노즐 및 SOFA의 수직 분사각(Tilt angle)과 수평 분사각(Yaw angle) 등을 간략히 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 해석 결과 검증

해석 모델의 건전성 검증을 위하여 A화력의 2008년 11월의 어느 하루에 대한 운전조건에 대하여 전산해석을 수행하였고 그 결과(Case 1)를 운전 및 설계 데이터와 서로 비교, 검증하였다. Table 2는 계산 결과를 실제 운전 데이터와 비교한 것이며 화로출구 가스온도(FEGT : Furnace Exit Gas Temperature)의 경우 설계 데이터와 비교하였다. 보일러 출구에서의 온도는 출구 단면에 균일하게 설치된 6개의 열전대로부터 측정된 평균값이며 가스 농도는 지르코늄형 산소분석기, NDIR(Non-Dispersive Infrared) 온라인 SOx, NOx 분석기로부터의 측정값이다. 이와 같은 온도와 농도 측정방법은 현재 대부분의 석탄화력발전소에서

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
	12.87	6,26	6.67	60.27	20.73	12.33	78.83	3.72	2.55	1.42	0.27
Operating condition	Primary air flow(t/h)	Secondary air flow(t/h)	Coal flow(t/h)	BNR ⁵⁾ tilt($^\circ$)	SOFA tilt($^\circ$)	CCOFA tilt($^\circ$)	CCOFA yaw($^\circ$)	Mill No.			
	506	2,108	269	-4.8	0	0	D(-15 $^\circ$)	5			

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

채용되고 있는 방식으로 발전소 운전의 유용한 참고 데이터로 쓰이고 있다. Table 2에서 보는 바와 같이 절탄기 출구에서의 가스온도, 산소, SOx 및 NOx 해석 값이 운전 데이터와 매우 근접함을 알 수 있다. 보일러 화로출구 가스온도(FEGT)의 해석 결과는 1,195°C로서 설계값인 1034°C와 약 161°C의 차이를 보여주고 있다. 현재 A 화력의 보일러에서 사용중인 미분탄량과 공기량은 설계치보다 초과하여 사용하고 있으며 실제 보일러 설계 열부하보다 더 높게 운전되고 있어서 실제 가스온도는 설계치보다 높은 것으로 추정되고 있다. 이는 이미 발전소에서 알려진 사항으로 본 해석 결과가 합당한 계산 결과를 보여주고 있음을 보여준다.

3-2. SOFA 개도 변화에 따른 노내 연소 상태

실제 운전조건의 해석 결과인 Case 1의 SOFA 공기 공급량(590 t/h)을 감소시키고 그 감소분 만큼 화로내 연소용 공기를 증가시킨 경우에 대하여 해석하였다. Case 2는 SOFA 공기공급량을 313 t/h로 감소시킨 경우이며 Case 3의 경우는 126 t/h로 감소시킨 경우이다. 이는 Table 3의 SOFA와 CCOFA의 개도

에 대응하는 값이다. SOFA로의 공기량의 감소는 연소구역인 화로에서의 연소조건이 Fuel-lean 조건으로 이동됨을 의미하며 가스온도가 증가되고 이에 따라 열적 NOx(Thermal NOx)가 증가하게 된다. 해석 결과도 노내 공기량이 증가함에 따라 NOx가 증가함을 보여주며 FEGT의 경우도 Case 3에서 약간 상승함을 보여준다. 절탄기 출구에서의 가스 온도도 약 12°C 증가하는 것으로 계산되었다. SOx의 경우는 잘 알려진 대로 연료 황(Fuel S) 성분이 모두 SO2로 전환되어 화로내 공기량 변화와 관계없이 거의 동일한 값을 보여준다. 보일러 화로내 온도 분포는 Fig. 3에서와 같이 거의 동일한 것으로 보이나 화로 상부의 대류 전열부의 온도분포가 다른 것을 볼 수 있다. 온도 분포의 첫 번째 단면은 복사(Radiant) 과열기가 위치한 부분으로 온도 분포가 큰 차이를 보이지 않으나 두 번째 단면인 최종 과열기 전단면에서는 가스 온도분포가 서로 상이함을 보여준다. Case 1의 경우는 가스의 최고온도가 오른쪽 하부(보일러 전면에서 바라 본 경우)에서 발생되고 있으나 Case 2와 3의 경우 왼쪽 하부로 옮겨 간 것을 볼 수 있다. 이에 따라 보일러

Table 2. Comparison of the predicted values with the measured ones.

	At Economizer Outlet				Designed Data
	Gas temp.(°C)	O ₂ (%)	NOx(ppm)	SOx(ppm)	FEGT(°C)
Predicted(Case 1)	388	3.32	200	181	1,195
Measured	380	3.1	199	181	1,034

Table 3. SOFA & CCOFA opening and predicted results.

Test Name		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	plant data (Case 1)
SOFA opening(%)	F	15	15	15	15	15	15
	E	15	15	40	40	40	
	D	15	15	50	50	50	
	C	30	15	50	50	50	
	B	50	15	50	50	50	
	A	50	15	50	50	50	
CCOFA B opening (%)		100	100	100	50	0	100
CCOFA A opening (%)		100	100	100	50	0	100
FEGT(°C)		1195	1176	1205	1202	1197	1034
NOx(ppm)		200	278	282	213	185	199
SOx(ppm)		181	182	180	181	181	181
Gas Temp(°C)		388	398	400	400	411	380
O ₂ (%)		3.32	3.41	3.48	3.55	3.50	3.1

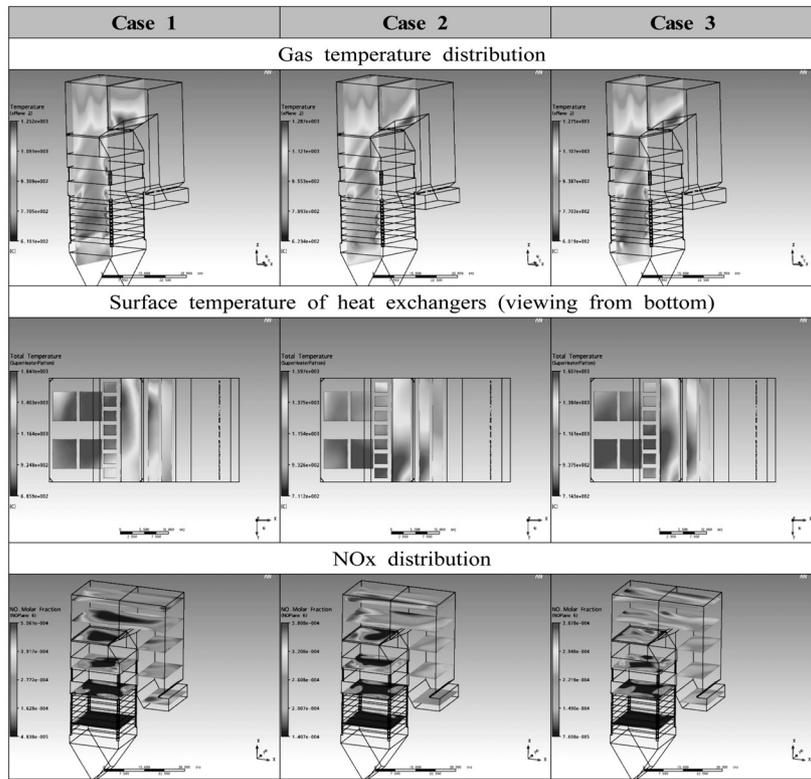


Fig. 3. CFD prediction for Case 1, 2 and 3.

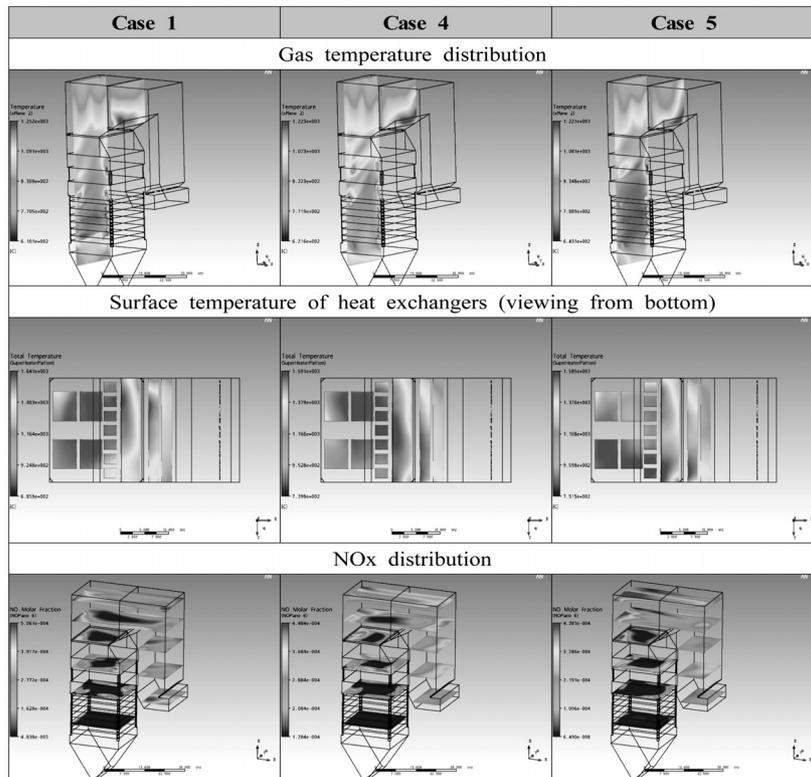


Fig. 4. CFD prediction for Case 1, 4 and 5.

상부에 위치한 대류전열 관군의 하부 부분에서의 표면온도 분포에서도 관찰할 수 있다. Case 1의 경우 Radiant 과열기 하부의 온도분포는 오른쪽이 높고 이후의 재열기와 최종 과열기에서도 오른쪽이 높게 유지됨을 볼 수 있다. 반면 Case 2와 3의 경우는 이와 반대로 최고온도가 왼쪽으로 옮겨 간 것을 볼 수 있다. 이는 앞선 연구에서 확인하였듯이 통상의 조건하에서 본 보일러의 경우 보일러 화로내 잔류 선회유동의 영향으로 최종과열기 전단의 가스온도는 왼쪽으로 치우쳐진 것을 확인하였으며 이는 최종과열기에서 자주 발생한 튜브 파열의 주요 원인인 것으로 파악되었었다 [4]. 이에 본 기준 조건인 Case 1의 경우는 발전소에서 자체 연소조정을 통하여 D 코너의 CCOFA의 수평 분사각도(Yaw angle)를 (-) 각도로 조정하여 가스온도의 편류를 완화시킨 경우이다. 그러나 Case 2, 3의 경우 최종과열기 전단의 가스온도분포가 다시 왼쪽으로 치우쳐져 있어 SOFA 개도의 감소에 따라서 다시 화로내 연소공기의 수평 분사각도(Yaw angle)를 다시 조정할 필요가 있다.

3-3. CCOFA 개도 변화에 따른 노내 연소 상태

기준조건(Case 1)에서 CCOFA 공기량(443 t/h)을 감소시키고 그 감소분만큼 화로에서의 공기량을 증가시킨 경우에 대하여 해석하였다. Case 4의 CCOFA 공기량은 252 t/h 이며 Case 5는 CCOFA에 연소용 공기가 공급되지 않는 경우이며 이에 상당하는 개도는 Table 3과 같다. SOFA 댐퍼 개도는 일정하게 유지되어 동일한 공기량이 공급되고 CCOFA의 개도 감소에 따라 화로의 공기량은 증가하게 된다. Case 4의 경우 NO_x는 오히려 증가하며 Case 5의 경우는 기준조건보다 감소하게 된다. SO_x 농도는 Case 1, 2와 마찬가지로 큰 차이를 보이지 않는다. 화로출구 가스온도(FEGT)의 경우 기준조건과 비교 큰 차이를 보이지 않으며 절탄기 출구 가스온도가 411°C까지 상승함을 보여준다. 가스 온도의 분포를 보면 Case 1, 2와 매우 다른 것을 볼 수 있다. Case 4의 경우 Radiant 과열기에서의 온도는 오른쪽이, 최종과열기 전단의 최고 가스온도가 왼쪽으로 치우친 것을 볼 수 있다. 그러나 Case 5의 경우는 최고 가스온도가 왼쪽 부분에서 발생하고 있음을 보여준다. 이는 Case 1, 2와 마찬가지로 연소공기량의 공급조건이 변화함에 따라 보일러 각 전열부에서의 가스온도 분포가 틀려짐을 알

수 있다. Case 4의 경우 보다는 Case 5의 편류현상이 더 심한 것을 알 수 있으며 Case 5의 경우 연소조정이 필요함을 보여준다.

4. 결 론

국내 A화력발전소의 보일러를 대상으로 전산해석 모델을 수립하고 실제 사용중인 탄종과 운전조건에 대하여 보일러 내부의 연소 전산해석을 수행하였으며 해석 결과를 실측 및 설계 데이터와 비교하여 모델의 건전성을 확인하였다. 이를 바탕으로 SOFA와 CCOFA의 공기공급량을 변화시킨 경우에 대한 보일러 내부 연소 해석 결과 CCOFA보다는 SOFA에서의 공기공급량의 변화에 따라 NO_x 농도가 더 민감하게 변화함을 알 수 있었다. SOFA와 CCOFA 공기공급량이 변함에 따라 보일러내 대류 전열부의 가스온도 분포가 변하고 있으며 경우에 따라 전열관군에서의 편향된 온도분포를 완화시키기 위하여 연소조정이 필요함을 알 수 있었다. 특히 최종 과열기 전단의 불균일한 연소가스의 온도 분포는 튜브의 열부하 분포에 편차를 발생시키며 이는 장기간 운전시 튜브 파열의 한 원인으로 알려져 있어 본 연구에서 살펴본 가스온도 분포에 대한 해석 결과는 열부하 편차 제거를 위한 연소 조정시의 유용한 자료가 될 것이다.

참고문헌

1. 한국전력거래소, '08년 발전설비현황, 2008.
2. 김의현, "저탄소 녹색성장 기술 고효율 '전력' : 화력발전", 과학기술 2.0, 20103.
3. U.S. Department of Energy, "Reducing emissions of nitrogen oxides via low-NO_x burner technologies", Topical report No. 5, 1996.
4. Park, H.Y. and Kim, Y.J., "Studies on the combustion characteristics and NO distribution in the pulverized coal fired boiler", J. of KSEE, 2008, 30, 552-559.
5. 한국전력공사, 현대엔지니어링주식회사, 화력발전소 보일러 운전지침서, 2004.
6. 한국전력공사, 현대엔지니어링주식회사, 화력발전소 보일러 보수지침서 Vol. I, 2004.
7. ANSYS, CFX 11.0 User's Guide, 2005.
8. R. Siegel and J.R. Howell, Thermal radiation Heat Transfer, Hemisphere Publishing Corporation, Washington D. C., 1992.
9. 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.
10. 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.
 11. Badzioch, S., Hawksley, P.G.W., Kinetics of thermal decomposition of pulverized coal particles, Ind. Eng. Chem. Proc. design Dev., 1970, 9, 521-526.
 12. Field, M.A., Rate of Combustion of Size-Graded Fractions of Char from a Low Rank Coal between 1200 K-2000 K, Combustion & Flame, 1969, 13, 237-252.