大韓環境工學會誌・論文 - Original Paper - 272～277. 2009.

연소용 이차공기 수평분사각에 따른 질소산화물(NOx) 배출특성

김영주・박호영†・이성노*

한전전력연구원 신발전연소그룹・*충남대학교 기계공학과

(2009년 2월 19일 접수, 2009년 4월 28일 채택)

NOx Emission Characteristics Depending on the Variations in Yaw Angle of the Secondary Air Nozzles in a Coal Fired Boiler

Young Joo Kim・Ho Young Park†・Sung No Lee*

*Advanced Power & Combustion Group, KEPRI・*Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University*

ABSTRACT : Three dimensional numerical analysis for the coal fired boiler has been performed to investigate the effect of yaw angle variation of the secondary air nozzles on the combustion characteristics and NOx emission. It was found that the prediction gives a good agreement with plant data. The increase in yaw angle up to 20° have results in the decrease in NOx emission at furnace exit and recirculation flow intensity, together with the increase of unburned carbon in ash. It also has been recognized the remarkably change in configuration of fire ball with increase in yaw angle. The results from this study would be valuable in the case of the combustion modification of the corner firing coal-fired utility boiler.

Key Words : *NOx Emission, Unburned Carbon, Corner Firing, Furnace, Yaw Angle*

요약 : 국내 석탄화력발전소의 대용량 보일러를 대상으로 연소용 이차공기의 수평분사각을 변경한 경우에 대하여 화로에서의 연소특성과 NOx 발생특성을 전산유체역학적으로 해석하였다. 열유동해석 결과를 실제 운전데이터와 비교하여 해석의 신뢰성을 확인하할 수 있었다. 분사각을 20°까지 증가시킬 경우 노즐 근처에서의 재순환유동 감소, 화로출구 NOx 감소와 미연분 증가를 가져왔으며 화구의 형태가 많이 변화되는 것을 관찰하였다. 본 연구결과는 A화력발전소의 연소방식을 변경하는 경우 기본적인 설계 및 운전 데이터로 활용하고자 한다.

주제어 : 질소산화물 배출, 미연분, 코너 연소, 화로, 수평분사각

1. 서 론

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 차지하고 있다.[1,2] 석탄화력발전소에서 발생하는 질소산화물(NOx)은 최근 강화되고 있는 오염물질 배출 규제 강화에 따라, 신규 석탄화력발전소의 경우 배출량을 70 ppm까지로도 제한하고 있다.[3] 발전소에서 적용되어지고 있는 NOx 저감기술은 일반적으로 연소개선(Combustion modification)과 연소후 처리기술(Post combustion control)로 나눌 수 있다. 연소개선에 의한 저감방법은 연소조건을 변경하여 발생량을 줄이는 것으로 저과잉공기 운전(Low excess air), 화염온도 저감법(Temperature reduction), 다단연소(Staged combustion), 저 NOx 버너(Low Nox burner), 재연소(Reburning) 등이 있으며, 연소후 처리기술은 SCR (Selective Catalytic Reduction)과 SNCR (Selective Non Catalytic Reduction)이 대표적인 방법이다.[4]

우리나라 대부분의 석탄화력보일러는 저 NOx 버너의 채용과 함께 단계적 연소의 한 종류인 공기 다단연소(Air staging) 방법을 채용하고 있다. 특히, 최근에 건설, 운전중인 대용량의 코너연소 석탄화력 보일러는 LNCFS (Low NOx Concentric Firing System) 시스템을 채용하여 NOx 배출량을 저감하고 있다.[5] 이는 미분탄 노즐(Fig. 2의 Coal로 표기) 상하에 위치한 연소용 이차 공기(Fig. 2의 A640, A396으로 표기)를 미분탄과 엇갈리게 분사하여 연료와 공기의 혼합을 지연함으로서 연료과농(Fuel rich) 조건이 되어 NOx의 발생을 줄이는 신연소방식이다. 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.

이러한 LNCFS 방식 이전의 코너연소 보일러는 대부분 연소용 이차 공기의 분사각도가 미분탄 분사와 동일하고 CCOFA나 SOFA만을 채용한 화로 다단연소 NOx 저감방

† Corresponding author
E-mail: hypark@kepri.re.kr
Tel: 042-865-5602 Fax: 042-865-5609

법만을 사용하고 있다. 이러한 보일러는 외부구동장치를 추가 설치하여 이차공기 노즐의 수평분사각도(Yaw angle)를 0～30°로 조절할 있으며, 이 경우 LNCFS와 동일한 개념의 NOx 저감방법을 실현할 수 있다.

본 연구는 연소용 이차공기의 수평분사각을 변경한 경우 보일러 화로에서의 연소특성과 NOx 발생특성을 전산 유체역학적으로 해석하였다. A화력발전소의 보일러를 대상으로 실제 운전조건하에서 보일러내의 연소, 열유동해석을 수행하고 그 결과를 실제 운전데이터와 비교하여 해석의 신뢰성을 검증하였다. 이를 바탕으로 연소용 이차공기의 분사각 변화에 따른 유동, 온도, NOx 및 미연분 발생 특성을 해석하였다. 화로내 석탄 분사와 연소용 공기의 혼합지연에 따른 NOx 저감 효과에 대한 연구는 많이 보고되어지고 있으나 본 연구는 기존의 운영중인 특정 보일러를 대상으로 화로내 연소방식 개선으로 NOx 발생 및 미연분 발생을 구체적으로 시뮬레이션하여 설비 개선의 기본 자료로 활용하기 위한 연구이다. 따라서, 본 연구결과는 A화력발전소의 연소방식을 변경하는 경우 설계 변경, 혹은 설비 추가시의 기본 데이터 혹은 운전 지침 자료로 활용하고자 한다.

2. 해석 대상 보일러

본 연구의 대상인 A화력발전소의 보일러 외형과 미분탄 연소가 일어나는 화로부의 단면에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 화로(Furnace)의 크기는 폭 15.417 m, 길이 18.161 m, 높이 59.774 m로서 500 MW급 코너 연소식 보일러이다. 화로의 네 코너에는 6단의 버너와 공기 노즐들이 배열되어 있으며 보일러 상부에는 과열기(Super-heater)와 재열기(Reheater)가, 보일러 뒷부분에는 절탄기(Economizer)가 설치되어 있다.

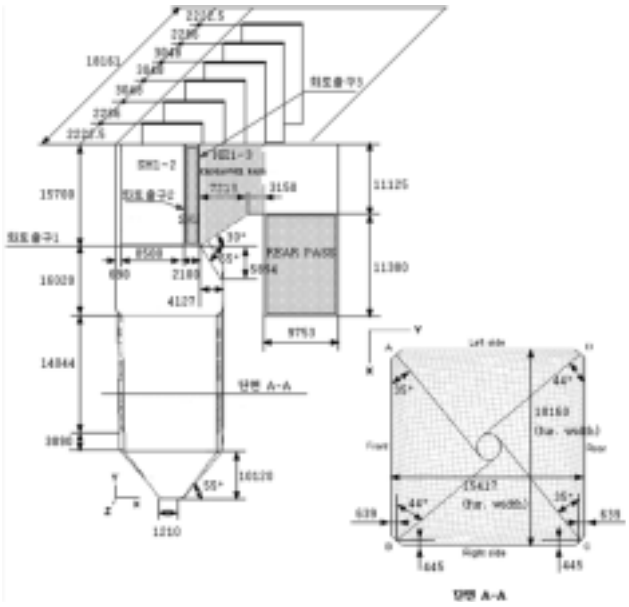


Fig. 1. Cross sectional view of the boiler.

화로내의 버너는 정상 운전중에 통상 5단만이 사용되고 있으며 미분탄과 이송용 일차공기(Primary air)가 연료분사노즐을 통해 분사되고, 이들 노즐 상·하에서 공기분사노즐을 통해 이차공기(Secondary air)가 분사된다. 미분탄-일차공기 혼합물은 화로 중심부에 대하여 네 코너에서 편향되게 분사되어 화로 중앙부에 선회 화염인 화구(Fire ball)가 형성된다(Fig. 1 우측 하단 그림 참조). 이에 따라 미분탄은 화로내에서 긴 체류시간을 가지면서 휘발화와 촤(Char) 연소반응이 일어나게 되며 화로 상부에는 CCOFA 포트가 설치되어 있다.

3. 연소해석 및 NOx 모델링

Fig. 2는 A화력발전소 보일러에 대한 계산 격자를 보여주며 화로내의 미분탄과 공기노즐을 개략적으로 나타낸 것이다. 버너와 공기노즐들이 있는 네 코너에는 격자 구성의 편의를 위해 프리즘 형태와 사면체 형태의 격자를 이용하였고 그 외의 영역에서는 육면체 격자를 이용하였다. 그리고 다공성 매체의 영역과 격자구성을 위해 16개의 블록으로 형상을 나누어 작업하여 해석 격자계는 총 51만 9천여 개의 셀로 구성되었다. 격자 생성시 셀의 개수에 대한 해의 의존성(Grid dependent) 테스트를 수행하였으며 보일러내의 각종 전열관군은 다공성 체적으로 처리하여 Heat & Momentum Sink가 발생하는 것으로 모사하였다. 보일러내 연소, 유동 및 열전달 현상에 대한 지배방정식들과 수치해석은 상용 소프트웨어인 Fluent v6.3을 적용하여 계산하였다.[6]

난류해석은 k-ε 모델을, 가스상의 연소해석은 Eddy Dissipation 모델을,[7] 복사해석은 Discrete Ordinary모델을,[8] 미

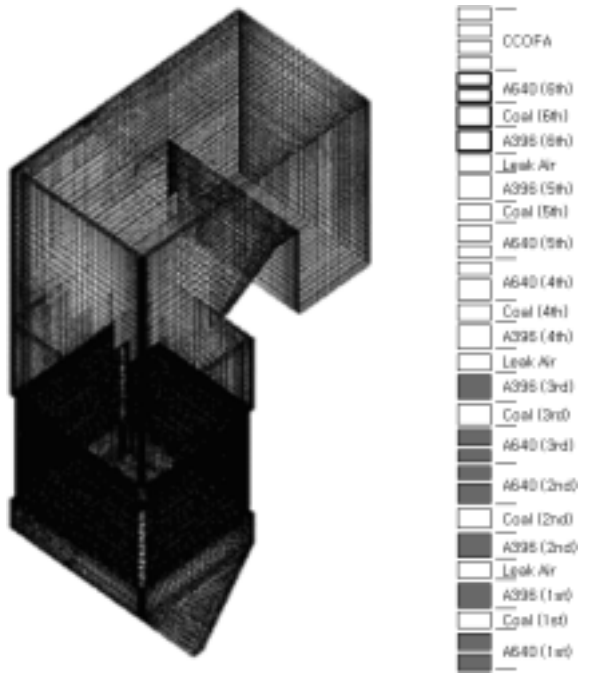


Fig. 2. Grid generation and burner array.

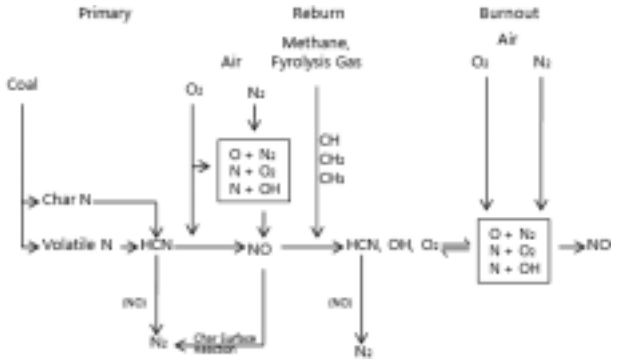


Fig. 3. Fuel NOx conversion mechanism.

분탄 연소해석은 일차 탈휘발화 모델과 Field의 촤 산화 반응 모델[9]을 사용하여 해석하였다.

본 연구에서 채용한 상용코드인 Fluent의 NOx 모델링은 Thermal NOx, Prompt NOx, 그리고 석탄화염에서 중요한 Fuel NOx를 모두 포함하고 있다. 이중에서 Fuel NOx에 대한 기본 반응 메카니즘은 Fig. 3과 같으며 Global kinetic mechanism을 채용하고 있다.[10] 석탄내의 질소성분은 가스상의 HCN으로 휘발화되고 촤에 남은 질소 성분도 HCN으로 전환되는 것으로 모사하고 있다. 가스상의 NO는 촤 표면적과 반응하여 다시 N_2로 전환되며 CHx 라디컬에 의한 Reburn 메카니즘도 포함되어 있다.[11]

반복계산에 대한 수렴조건은 각각의 지배방정식들의 변수들에 대해 각 초기 5회 계산에 대한 평균오차를 기준으로 매 반복계산시 발생하는 오차량의 크기를 비교하여 연속방정식은 2.0×10^{-3} 미만, 에너지는 2.0×10^{-5} 미만, 그리고 그 외 변수들은 1.0×10^{-3} 미만을 유지하도록 하였다.

4. 해석조건

본 전산해석의 신뢰성을 검증하기 위하여 실제 운전조건에 대한 해석결과를 실측 데이터와 비교하였다. Table 1과 2는 본 해석의 기준 조건(Base)에 사용한 호주산 수입 역청탄의 공업/원소분석, 발열량, 총수분량등의 성상과 보일러 화로로의 연료/공기 공급량, 온도등 주요 운전조건을 나타낸다. 석탄의 주요 성상과 석탄/공기의 공급 유량으로부터 계산된 당량비는 1.20이었으며 과잉 산소는 3.35% 이었다.

Table 1. Coal properties used in this study

Ultimate analysis (dry, wt. %)					
C	H	O	N	S	Ash
62.60	4.20	7.50	1.30	0.40	10.40
TM[1]	HHV[2] (kcal/kg)	Proximate (air-dry, wt.%)			
		IM[3]	FC[4]	VM[5]	Ash
13.60	5877	3.42	46.10	35.00	15.48

[1] TM : Total Moisture, [2] HHV : High heating value, [3] IM : Inherent moisture, [4] FC : Fixed Carbon, [5] VM : Volatile matter

Table 2. Operating conditions

Flow rate(ton/hr)		% of air flow rate		
Coal	Air	Over Fire Air	Primary Air	Secondary Air
213	1,915	10	22	68
Stoichio-metry	Excess O_2 (%)	Air temp (℃)		
		Over Fire Air	Primary Air	Secondary Air
1.20	3.35	348	65	348

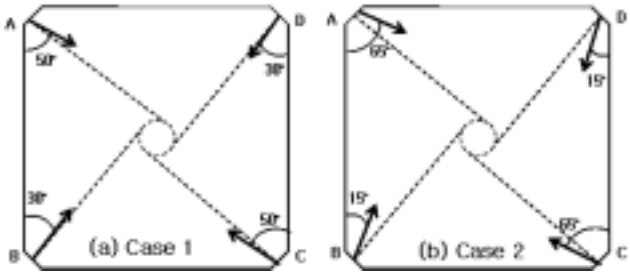


Fig. 4. Yaw angle for Case 1 and 2.

화로내 버너 1, 2, 3단의 공기노즐(Fig. 2의 음영으로 표시한 A396와 A640 노즐)의 수평 분사각을 10°, 20° 변경한 경우를 Case 1과 2로 설정하였다. Case 1과 2에 대한 네 코너에서의 분사각도를 Fig. 4에 나타내었다. 기준 조건은 이차 공기의 분사각이 미분탄 분사각과 같은 점선 방향이며 분사각이 커질수록 벽면에 가까워지는 것을 보여준다.

5. 해석결과 및 고찰

5.1. 해석 결과의 신뢰성 검증

석탄화력 보일러내의 전산해석 결과를 발전소 현장에서 측정 가능한 데이터와 비교하여 해석의 신뢰성을 점검하였다. 해석 결과는 보일러의 실측 데이터와 비교하여야 하는데 A화력발전소의 경우 화로 출구 온도와 보일러 출구에서의 산소와 NO 농도만이 실측 가능한 데이터이다. Table 3은 기준 조건에 대한 해석결과를 실측 데이터와 비교한 것이다. 해석 결과는 실측 데이터와 비교하여 상당히 정확한 수준까지 예측하고 있다. 화로내의 높이에 따른 온도의 경우도 설계상의 평균 온도와 비슷한 값을 보여주고 있음을 발전소 데이터로부터 확인한 바 있으며, 특히 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 수평 노즈(Nose) 부분의 화로 출구 단면 1에서의 가스 온도는 계산 결과가 측정치와 비슷함을 알 수 있다.

Table 3. Comparisons of predicted values with the plant data

Item	Calculated	Measured
Gas temp (K) at furnace exit I	1586	1600
O_2 concentration (%) at boiler exit	3.78	3.63
NOx (ppm) at boiler exit	176	160

5.2. 속도분포 해석

Fig. 5는 화로 높이(y)가 21.4 m인 지점에서의 기준 조건, Case 1과 2에 대한 속도 분포를 나타낸 것이다. 보일러의 측방향 단면인 z 방향(z = 1 m, 9.11 m)과 높이 방향인 y 방향(y = 14.6 m, 21.4 m, 28.0 m, 51.64 m)에 따라 속도 분포도 서로 비교하였다. 여러 단면에서의 속도 분포중에서 y = 21.4 m 단면에서 1～3단 공기노즐 수평분사각의 영향을 가장 잘 나타내주고 있어 이 단면에서 대표적으로 살펴보았다.

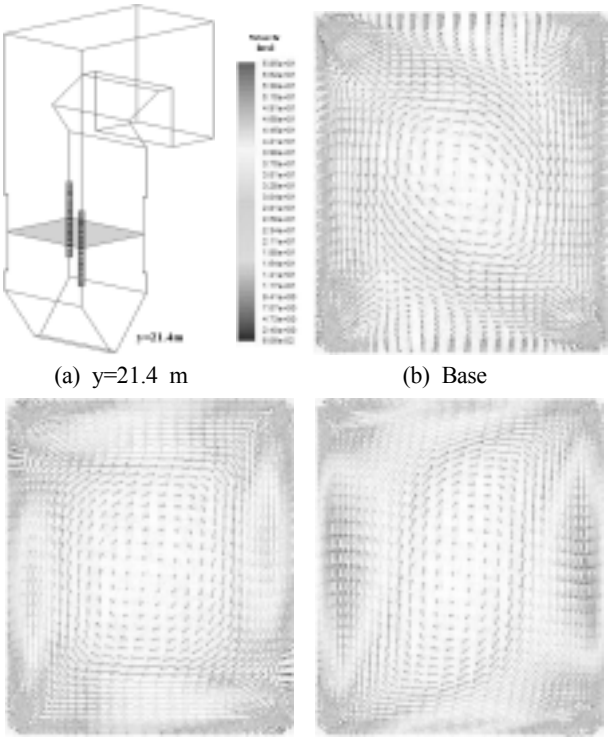
기준 조건의 경우 B와D 코너의 오른쪽 벽면에서 재순환 영역이 발생하고 있으며 왼쪽 벽면(그림의 세로방향)에서는 흐름이 벽면을 타고 쭉 뻗어가고 있음을 볼 수 있다. B와 D 코너 오른쪽 벽면에서의 재순환은 미연분이나 회성분이 이 부분에 퇴적(Deposition)될 가능성이 높을 것으로 보인다. A와 C 코너에서는 좌우측의 재순환영역이 그리 크지 않으며 화로 중앙부로 균일하게 분사됨을 보여준다. 화로 중앙부의 화구(Fire ball)가 찌그러진 형태의 원형, 즉 타원형을 보이고 있는데 이는 B와 D 코너에서의 분사가 벽면(그림의 세로 방향)을 따라 흐르기 때문인 것으로 보인다. 속도는 양쪽 세로 벽면 부근에서 가장 높은 것을 볼 수 있다.

공기 노즐의 수평 분사각이 10°로 증가된 Case 1의 경우 각 코너에서 벽면을 타고 흐르는 속도가 증가 되어 B와 D 코너의 오른쪽 벽면에서의 재순환 영역이 매우 작아졌으며 반면 A와 C 코너의 오른쪽 벽면의 재순환 영역은 약간 증가된 것을 볼 수 있다. 또한 벽면 근방에서의 속도가 기준 조건과 비교하여 크게 증가된 것을 볼 수 있다. 화구(Fire ball)의 경우 기준 조건과는 달리 화로 단면과 비슷한 직사각형 형태를 띠고 있다. 수평분사각이 20°인 Case 2의 경우 세로방향 벽면 근방에서의 속도가 가로방향 벽면에서도 보다 상대적으로 더 커졌으며 네 코너에서의 재순환 영역이 거의 없어졌음을 알 수 있다. Case 2의 화구는 Case 1의 경우보다 더 찌그러진 형태를 보이고 있다.

이상의 세 경우를 서로 비교하면 분사각을 20°까지 증가시킬 경우 공기 노즐의 수평 분사각이 커짐에 따라 벽면을 타고 흐르는 속도가 더 커지게 되는데 이는 벽면 근방에서 산소의 농도가 증가하게 되며 산화성 분위기가 되는 것을 의미하고 수냉벽 부식을 방지하는 효과가 예상된다.[5] 또한 분사각 증가에 따른 노즐 근처 오른쪽 코너에서 재순환 영역이 작아짐에 따라 미연분 혹은 회(Ash)의 퇴적이 적어지리라 예상할 수 있다.

5.3. 온도분포

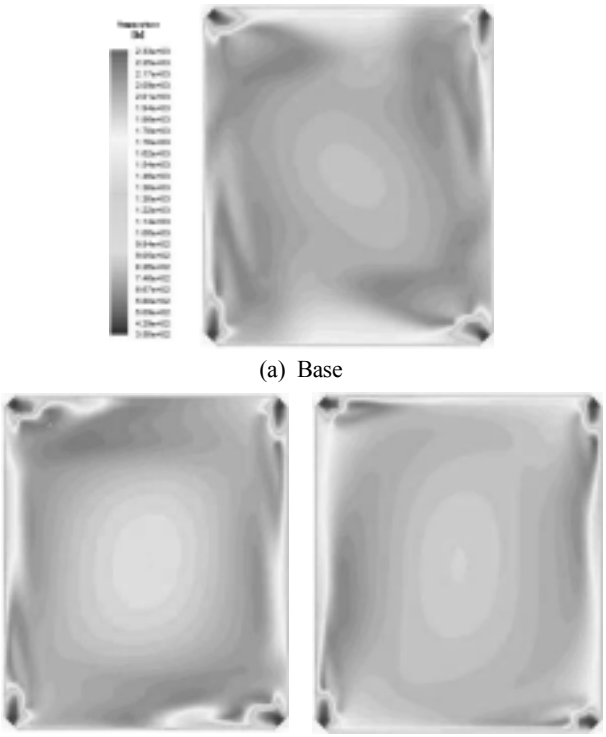
Fig. 6은 y = 21.4 m에서의 기준 조건, Case 1과 2의 온도분포를 비교한 것이다. 미분탄의 분사각과 연소용 공기의 분사각이 동일한 Base의 경우 버너 노즐 전방에 최대 온도가 나타나고 있으며 속도분포에서와 동일한 형태의 찌그러진 구형의 화구를 볼 수 있다. Case 1의 경우 연소용 공기가 벽면쪽으로 공급되어짐에 따라 단면내 최고 온도는 작아지지만 그 발생위치가 벽면쪽으로 이동함을 알 수 있다. 기준 조건에 비교하여 화염 온도가 낮아지고 화



(a) y=21.4 m (b) Base

(c) Case 1 (d) Case 2

Fig. 5. Velocity vectors for Base, Case 1 and 2.



(a) Base

(b) Case 1 (c) Case 2

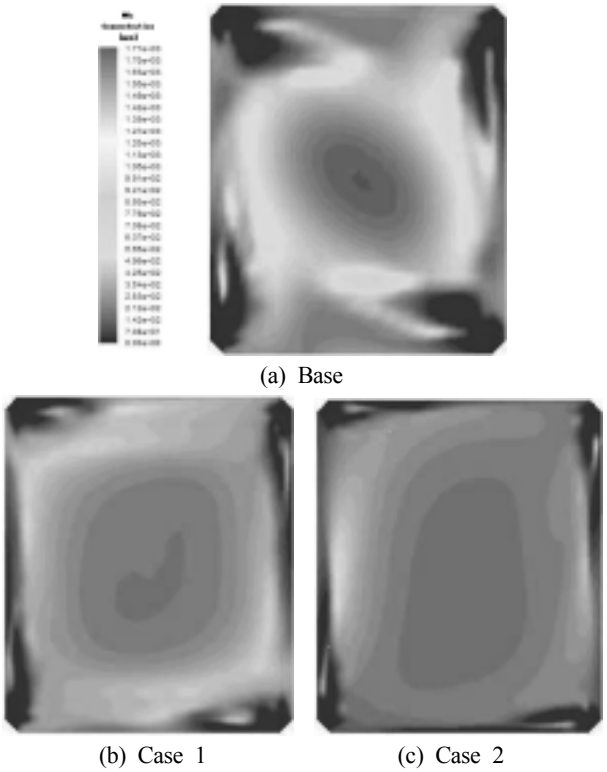
Fig. 6. Temperature distribution for Base, Case 1 and 2.

로 중앙부에 위치하던 화구가 널게 퍼지는 현상을 보여준다. Case 2의 경우 연소용 공기와 미분탄의 분사각이 서로 20° 차이가 나게 되어 연료와 공기의 혼합이 지연되어 최고 온도가 기준 조건이나 Case 1에 비해 작아진 것을 볼 수 있으며, 화구의 모양도 속도 분포에서 본 것과 같은 형태를 보이고 있다. 연소용 공기가 벽면을 따라 흐르기 때문에 벽면 근방에서의 온도가 다른 경우에 비해 대체적으로 낮은 것을 볼 수 있다.

세가지 경우를 비교해보면 단면에서의 평균온도는 Case 2가 가장 낮고 기준 조건의 경우가 가장 높아서 y = 21.4 m 단면에서의 Thermal NOx의 발생은 분사각을 20°까지 증가시킬 경우 분사각이 커짐에 따라 작아지리라 예측할 수 있다. 또한 화염온도의 저하의 주요인은 미분탄-공기의 혼합 지연에 따른 연료 과농(Fuel rich)상태의 연소조건이며, 이에 따라 Fuel NOx의 발생도 적어짐을 예측할 수 있다. Fuel rich 상태에서의 NO는 NOx의 Reburning 메카니즘에 의하여 CH 라디컬과의 반응에 의하여 N_2로 환원됨을 의미한다.

5.4. NOx 분포

Fig. 7은 y = 21.4 m에서의 기준 조건, Case 1과 2의 NOx 분포를 비교한 것이다. 기준 조건의 경우 화염이 형성되어 온도가 높은 부분에서 NOx 농도가 큰 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 3의 온도 분포와 비교시 그 분포 경향이 매우 비슷하며 화로 중심부에서의 NOx 발생이 작음을 알 수 있다. 네 코너에서의 연소용 공기의 수평분사각이 증가한 Case 1과 2의 경우 기준 조건에 비교하여 NOx가 좀 더 넓고 균일하게 분포함을 볼 수 있다. 또한 NOx 농도가 적은 부분이 벽면으로 치우쳐져 나타나고 있는데, 이는 연소용 공기가 벽면을 타고 흐르면서 온도가 낮아지고 Fuel NOx의 발생이 적어지기 때문으로 보인다.



(a) Base

(b) Case 1 (c) Case 2

Fig. 7. NOx distribution.

세가지 경우에 전체적인 NOx 발생은 연소용 공기의 수평분사각이 커짐에 따라 그 발생량이 적음을 볼 수 있다. 이는 속도와 온도분포에서 살펴보았듯이 온도 저감과 미분탄-공기의 혼합 지연에 따른 효과로 볼 수 있으며, 이 단면에서의 NOx 분포 형태가 속도와 온도의 분포 형태와 매우 유사함을 알 수 있다. 따라서 연소용 공기와 연료인 미분탄의 수평 분사각을 달리하여 그 혼합을 지연시키는 연료 다단연소(Fuel staging)의 효과가 뚜렷이 나타남을 알 수 있다. 본 논문에서는 y = 21.4 m에서의 분포만을 살펴보았으나 보일러의 다른 단면, 즉 y = 14.6, 28.0, 51.6 m, 그리고 z = 1.0, 9.1, 17.1 m인 단면에서도 속도, 온도, NOx 분포를 세가지 경우에 대하여 서로 비교하였다. 그 결과 본 논문에서 살펴본 현상과 부합되는 것을 확인하였다.

5.5. 미연분 발생량

일반적으로 NOx 발생량과 미연분(UBC : Unburned Carbon in Ash)는 서로 역비례하는 관계로 알려져 있다. 본 연구에서와 같이 화로내의 미분탄과 연소용 이차공기의 혼합을 지연한 Case 1과 2의 경우 NOx의 발생량이 적어지지만 미연분은 증가하리라 예측할 수 있다. 본 연구에서의 A화력 보일러는 NOx 저감방법으로 이미 화로 다단연소를 도입한 보일러로서 화로 하부의 미분탄과 이차공기의 혼합을 지연하여 더 심화된 연료 과농 조건을 만든 경우이다. 이 경우 화로 출구에서 NOx와 미연분의 발생량을 서로 세심히 살펴보아야 한다. Fig. 8은 이차공기 수평분사각에 따른 기준 조건, Case 1과 2의 보일러 출구인 후단부(Rear pass)에서의 NOx와 미연분을 서로 비교한 것이다.

수평분사각이 증가함에 따라 NOx의 발생은 감소하나 미연분의 량이 반대로 증가함을 볼 수 있으며 약 10°의 각도에서 서로 교차되고 있다. 여기서 최적의 수평각도는 NOx와 연소효율의 지표인 미연분뿐만 아니라 보일러 내

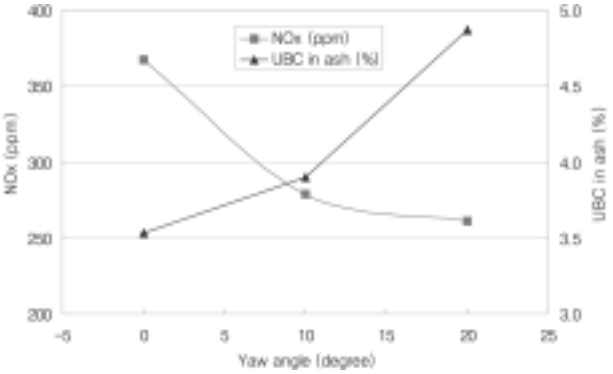


Fig. 8. NOx and UBC with yaw angle variation.

전열관군에서의 열흡수량과 이에 따른 보일러 효율, 운전 특성 측면 등을 종합적으로 고려하여야 한다.

6. 결 론

국내 A화력발전소의 보일러를 대상으로 연소용 이차공기의 수평 분사각 변화에 따른 보일러내 유동특성, 온도와 NOx 분포 그리고 미연분의 발생 특성을 해석하였다. A화력발전소의 실제 운전조건에 대한 해석 결과를 실측 가능한 화로 출구 온도, 보일러 출구 O_2 농도 및 NOx와 비교하여 해석의 신뢰성을 검증하였다. 이를 바탕으로 수평분사각을 10°와 20° 변경한 경우에 대하여 속도, 온도, NOx, 그리고 미연분 발생량을 서로 비교, 분석하였다. 수평분사각이 커질수록 코너에서의 재순환영역이 줄어들고 벽면을 따라 흐르는 속도가 커짐을 알 수 있었으며 이로 인한 화구(Fire ball)의 형상이 변화됨을 알 수 있었다. 속도분포의 영향과 연료-공기의 혼합이 지연되면서 온도분포는 좀 더 균일하게 나타났으며 이에 따른 NOx의 발생량도 적어지는 것으로 나타났다. 전체적으로 분사각 증가에 따라 NOx 발생은 감소하였으나 미연분의 량이 증가하는 전형적인 현상을 확인할 수 있었다. 최적의 수평분사각 선정은 NOx로 대표되는 환경특성과 미연분이 나타내는 연소효율뿐만 아니라 화로 벽면에서의 퇴적(Deposition), 운전특성, 그리고 종합적인 보일러의 효율 등을 함께 고려해야 할 것이다.

참고문헌

1. 국가에너지위원회, 제 1차 국가에너지기본계획(2008).
2. 한국전력거래소, ‘08년 발전설비현황(2008).
3. 한국남동발전(주), 한국남동발전 2006 환경보고서(2006).
4. 한국전력공사, 연소관리실무(1999).
5. U.S. Department of Energy, “Reducing emissions of nitrogen oxides via low-NOx burner technologies,” Topical report No. 5(1996).
6. Fluent User's Guide V6.3(2005).
7. 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).
8. Siegel, R. and Howell, J. R., Thermal radiation Heat Transfer, Hemisphere Publishing Corporation, Washington D.C.(1992).
9. Field, M. A., “Rate of Combustion of Size-Graded Fractions of Char from a Low Rank Coal between 1200 K-2000 K,” *Combust. Flame*, **13**, 237～252(1969).
10. Zarnitz, R. and Pisupati, S. V., “Evaluation of the use of coal volatiles as reburning fuel for NOx reduction," *Fuel*, **86**, 554～559(2007).
11. Niksa, S. and Cho, S., “Conversion of Fue-Nitrogen in the primary zones of pulverized coal flames,” *Energy and Fuels*, **10**, 463～469(1996).