

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.11.858

500MW급 아역청탄 전소 보일러의 NOx 배출저감에 미치는 SOFA 영향에 관한 연구

강기태* · 송주헌** · 윤민지* · 이병화* · 김승모** · 장영준** · 전충환†
(2009년 4월 27일 접수, 2009년 9월 17일 수정, 2009년 9월 24일 심사완료)

A Numerical Study on the Effects of SOFA on NOx Emission Reduction in 500MW Class Sub-bituminous Coal-Fired Boiler

Ki-Tae Kang, Ju-Hun Song, Min-Ji Yoon, Byoung-Hwa Lee, Seung-Mo Kim, Young-June Chang and Chung-Hwan Jeon

Key Words: Sub-bituminous Coal-Fired Boiler(아역청탄 전소 보일러), Blended Combustion(혼소), NOx(질소 산화물), Separated Over Fire Air(다단 과잉 연소공기)

Abstract

A numerical investigation has been carried out about the performance of a 500MW class tangentially coal-fired boiler, focusing on the optimization of separated overfire air (SOFA) position to reduce NOx emission. For this purpose, a comprehensive combination of NOx chemistry models has been employed in the numerical simulation of a particle-laden flow along with solid fuel combustion and heat and mass transfer. A reasonable agreement has been shown in baseline cases for predicted operational parameters compared with experimental data measured in the boiler. A further SOFA calculation has been made to obtain optimum elevation and position of SOFA port. Additionally, clarifying on the effect of SOFA on NOx emission has been carried out in the coal-fired boiler. As a result, this paper is valuable to provide an information about the optimum position of SOFA and the mechanism by which the SOFA would affect NOx emission.

기호설명

A_{vi}	: 석탄 종류에 따른 운동 상수
α_{vi}	: 질량 당량 계수
C_i	: 지수 계수 [$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}(\text{Nm}^{-2})^{-n}$]
D_{ox}	: 확산 계수
d_p	: 입자 지름 [m]
E_{v1}, E_{v2}, E_p	: 활성화 에너지 [Jkg^{-1}]
K_{CH}	: 화학 반응률 계수 [$\text{kgs}^{-1}\text{m}^{-2}$]
R	: 이상 기체 상수
T_p	: 입자 온도 [K]

\bar{Y}_i	: 파브레 평균 질량 비
ϕ	: 스칼라 변수
Γ_ϕ	: 확산 계수
S_ϕ	: 생성항
w_i	: NOx 배출률 [$\text{kg}/(\text{sm}^{-3})^{-1}$]

1. 서론

석탄은 세계 에너지 소비량의 급격한 증가에 따라 화석 연료 중 보존량이 풍부하고 가격이 저렴하여 주요한 에너지원으로 새롭게 인식되고 있다. 그러나 세계 에너지 시장의 수요공급의 불안정으로 발전원가가 지속적으로 상승하고 있다. 에너지원의 다변화와 연료비용 절감을 위해 수분

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, Pusan Clean Coal Center
E-mail : chjeon@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-3051 FAX : (051)582-9818

* 부산대학교 기계공학부 대학원

** 회원, 부산대학교 기계공학부, Pusan Clean Coal Center

및 휘발분이 높은 아역청탄의 사용을 확대하고 여러 탄종의 혼소가 불가피한 실정이다.

따라서 국내 500MW급 표준 화력 중 아역청탄을 전소하는 발전플랜트의 경우 발생하는 다량의 질소산화물(NOx)을 안정적이고 경제적으로 감소시켜 배출농도 규제치를 준수하기 위한 연구가 필요하게 되었다.

NOx 배출저감을 위해서 직접적으로 탈질설비를 신설할 경우 비교적 쉽게 규제치를 준수할 수 있으나, 막대한 설치비와 아울러 운영비가 투입되어 발전원가 상승으로 이어진다.

다만 과잉 연소공기(SOFA, Separated Over Fire Air) 기법은 보일러 상단부에 기존 Windbox 이후에 SOFA를 추가하여 비용적인 측면에서 설치비만으로 상당량의 NOx 생성을 억제할 수 있는 방법이다. Fig. 1은 SOFA 의한 NOx 저감원리를 설명해 주는데, 연료 농후상태(state 1)에서 혼합이 일어날 경우, 시간적인 측면에서는 빠르게(state 2'), 당량비면에서는 공간상으로 균일하게(state 2) 일어나야 SOFA기법을 통해서 원하는 NOx 저감 효과를 얻을 수 있을 것이다. 따라서 SOFA에 의한 2차공기가 시간상, 공간상으로는 보일러 내부의 어떤 높이와 위치에서 공급하는가가 중요하다.

실제 발전플랜트에서 최적의 SOFA의 위치와 운전 조건을 실험적으로 구현하는 것은 많은 시간과 비용 등 현실적으로 거의 불가능하므로, 수치해석을 통해 SOFA에 의한 NOx저감의 최적화를 우선적으로 수행할 필요가 있었다. 그동안 많은 연구자들에 의해 수치 해석을 통한 미분탄 보일러의 열유동해석이 이루어져왔다.^(1~10) 그러나 수치해석을 통해 연소모델링이나 운전조건이 보일러 연소에 미치는 영향을 연구한 자료는 많으나 아직까지 추가적인 SOFA 설치에 따른 최적 위치와 SOFA 설치를 통한 보일러 최적 연소 조건을 수치적으로 연구한 자료는 발견하기가 매우 어렵다.

본 연구는 국내에서 유일한 500MW급 아역청탄 전소보일러를 대상으로 질소산화물 저감을 위해 SOFA를 가상적으로 설치하여 보일러 화로의 질소산화물 저감량과 최적 SOFA 위치를 수치해석적 방법으로 선정하고자 하였고, SOFA 설치가 질소 산화물 생성에 어떠한 영향을 미치는지 알아보하고자 하였다.

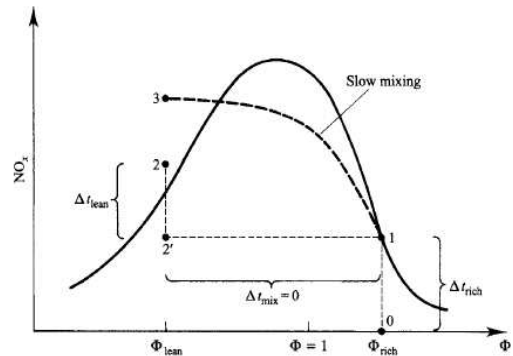


Fig. 1 Schematic representation of staged combustion on NOx-equivalence ratio coordinates.⁽²⁾

2. 수치해석 모델 및 이론

2.1 반응 유동 모델

본 연구에서는 미분탄 연소로 전산해석 전용코드인 GLACIER⁽¹¹⁾를 사용하였다. GLACIER는 Eulerian과 Lagrangian 기준 좌표계를 같이 사용하고 있다. 기체상(gas phase)의 유동, 열전달, 열복사 및 Scalar transport에 관한 지배방정식들은 Eulerian 좌표계에서, 고체상(solid phase)의 지배방정식들은 Lagrangian 좌표계에서 해석된다.

가스 상의 질량, 운동, 에너지방정식들은 3차원 Eulerian, 정상상태, 2차 비선형 편미분방정식으로 분류되어지며, 각 방정식들은 유한차분구조(Finite Differential Structure)로 단순화하는 표준 형태로 변환되어진다. 직교좌표계에서 가스 상의 지배방정식들에 대한 표준 형태는 파브르 평균형태(Favre-averaged)로 아래와 같이 표현되어 진다.

$$\frac{\partial(\overline{\rho u \phi})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{\rho v \phi})}{\partial y} + \frac{\partial(\overline{\rho w \phi})}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = S_{\phi} \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 속도, 엔탈피, 혼합기의 질량 분율 등과 같은 스칼라 변수를 나타내며 Γ_{ϕ} 는 확산항, S_{ϕ} 는 변수와 관련된 생성항을 나타낸다. 스칼라량인 ϕ , 생성항은 S_{ϕ} 에 대한 각종 지배방정식은 표준화된 형식으로 표현되며 자세한 내용은 Smoot와 Smith(1985)⁽¹¹⁾를 참고할 수 있다.

난류 모델은 Launder and Spalding⁽¹²⁾의 전통적인 k- ϵ 모델(two equation k- ϵ model)을 사용했다.

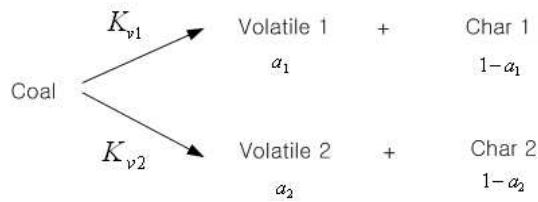


Fig. 2 Devolatilization model with two competing steps⁽¹⁵⁾

그리고 복사에 의한 열전달은 대형 보일러에서 열전달 모델 중 가장 중요한 모드로서 본 연구에서는 Discrete-ordinate method^(13,14)를 사용하였다.

미분탄 연소 모델인 GLACIER는 휘발화 모델, 좌 연소 모델, NOx 모델을 기본으로 하고 있으며, 2.2절에서 지배방정식들을 나타내고 있다.

2.2 석탄 연소 모델

2.2.1 석탄의 휘발화 모델

본 연구에서는 온도에 따른 휘발과정을 2단계로 묘사한 Two Competing Step Model⁽¹⁵⁾이 적용되어졌다. Kobayashi *et al.* (1977) 가 실험을 통하여 제안한 이 모델은 Fig. 2와 같이 두 단계로 나누어 있으며, 저온에서는 첫 번째 반응(K_{v1})이 지배적이며 고온에서는 두 번째 반응(K_{v2})이 지배적이라는 가정하에 수립되었으며 휘발률은 다음과 같이 표현된다.

$$m_v = \frac{dV}{dt} = \int_0^t (\alpha_1 K_{v1} + \alpha_2 K_{v2}) m_{v,0} \exp\left[-\int_0^t (K_{v1} + K_{v2}) dt\right] dt$$

where, $K_{v1} = A_{v1} e^{-E_{v1}/RT_p}$, $K_{v2} = A_{v2} e^{-E_{v2}/RT_p}$ (2)

A_{v1}, A_{v2} 는 각각 석탄의 종류에 따라 결정되는 상수(Pre-exponential factor)이며, E_{v1}, E_{v2} (Activation Energy)는 각각의 경우에 대한 활성화 에너지이다. 또한 α_1 은 석탄의 공업적인 분석에 의한 휘발분의 양이며 고 휘발률 역청탄을 비롯한 대부분의 매질에서 $\alpha_1 \cong \alpha_2$ 이다.

2.2.2 좌(char) 연소 모델

본 연구에서 사용된 좌 연소모델은 고정 탄소의 연소 반응률은 기체의 확산과 표면에서의 화학 반응에 의하여 지배 받는다는 Field 모델⁽¹⁶⁾을 사용하였다.

탄소와 산소의 화학 반응 계수는 Arrhenious 형태로 다음과 같이 표현된다.

$$K_{CH} = C_2 \exp\left(-\frac{E_p}{RT_p}\right) \quad (3)$$

산소의 확산 반응 계수는 아래와 같다.

$$D_{ox} = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{d_p} \quad (4)$$

여기서 d_p 는 입자의 직경, T_p 는 입자의 온도, T_∞ 는 주위의 온도이다.

그리고 고정탄소 입자의 반응률은 산소의 확산 반응 계수와 탄소와 산소의 화학 반응 계수의 조합으로부터 구해진다.

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p p_{ox} \frac{D_{ox} K_{CH}}{D_{ox} + K_{CH}} = -A_p p_{ox} \frac{\rho R T_\infty Y_{ox}}{M_{w,ox}} \frac{D_{ox} K_{CH}}{D_{ox} + K_{CH}} \quad (5)$$

석탄의 좌 입자 반응률은 산소의 확산 반응 계수와 탄소의 화학 반응 계수에 의해 좌우되기 때문에 연소 영역에서 교차하는 역할을 해준다.

2.3 질소 산화물(NOx) 생성 모델

NOx의 생성과 소멸을 지배하는 속도는 주요 열 방출 반응(primary heat release reaction)을 지배하는 속도들에 비해 상당히 늦다. 또한 NOx 화학은 국부 온도장과 속도장에 영향을 거의 미치지 않으므로 계산 시간을 단축하기 위해 전자의 난류 유동장 계산기법(solution of the turbulent flow field)에서 분리되어 따로 후처리(post-process) 과정으로 계산된다.

NOx의 평균 농도에 대하여 합당한 결과를 얻기 위해서는 난류와 유한 화학반응의 영향이 중요하다. 본 연구의 NOx 모델은 이 두 가지 면을 함께 고려하고 있다. 각각의 오염물질 화학종의 농도는 다음과 같은 대류·확산 방정식으로부터 얻어진다.

$$\nabla \cdot (\overline{\rho u \bar{Y}_i}) - \nabla \cdot (D_e \nabla \bar{Y}_i) = \bar{w}_i \quad (6)$$

여기서 \bar{Y}_i 는 관심 화학종의 파브레 평균(Favre mean) 질량비이며, \bar{w}_i 는 시간 평균 체적 순 생성 및 소멸률(time mean volumetric net formation and destruction rate)을 나타낸다. 이들 전달 방정식들은 연소 환경 시뮬레이션에서 계산된 온도장과 속도장에서 풀어진다. 시간 평균값, \bar{w}_i 를 계산하

기위해서는 난류에 의한 효과가 고려되어야 한다. 이를 위해 본 모델에서는 가정된 PDF (assumed PDF)와 축소된 반응 메커니즘(reduced mechanism)^(17,18)을 사용하였다.

본 연구에 사용된 축소된 메커니즘은 일반적인 축소 메커니즘(Reduced Mechanism) 접근 방법을 사용하였다. 이 접근 방법은 완전한 그리고 상세한 화학 메커니즘에 포함된 화학종 중 어떤 화학종은 정상상태(steady-state), 즉 그들의 생성과 소멸 속도가 같다는 가정에 근거한다.

2.3.1 Thermal NOx model

Thermal NOx는 공기 중 질소가 산소와 고온에서 반응하면서 생성된다. Thermal NOx는 온도에 비례하여 증가하며, 충분한 반응 시간과 반응 산소 농도에도 많은 영향을 받는다. 이 메커니즘은 Zeldovitch mechanism으로 잘 알려져 있다. Thermal NOx 반응 과정을 지배하는 화학반응식은 아래와 같다.^(8,19,20)



이때, 최종 질소산화물의 총 생성물은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{d[NO]}{dt} = & k_1 [O][N_2] + k_2 [N][O_2] \\ & + k_3 [N][OH] - k_{-1} [NO][N] \\ & - k_{-2} [NO][O] - k_{-3} [NO][H] \end{aligned} \quad (10)$$

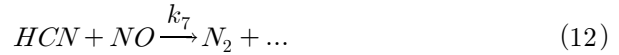
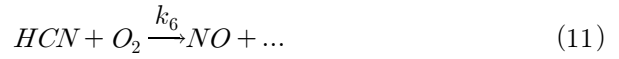
2.3.2 Fuel-NOx model

Fuel-NOx는 미분탄 연소에 있어 질소 산화물을 생성하는 주요한 원인이다. Fuel-NOx는 탈 휘발화 과정 중 생성되는 휘발 물질에 의한 질소 산화물과 좌에 의해 생성되는 질소 산화물로 나누어진다.

휘발 물질에 있는 질소가 입자에서 분리될 때는 주로 HCN 이나 NH₃과 같은 형태를 띠고, 두 개의 화학종은 국부 당량비에 따라 N₂로 되는 감소과정과 또는 NO를 만드는 생성 과정을 거칠 수 있다. 좌에 의해 생성되는 질소 산화물은 좌에 포함되어 있는 질소가 산화되면서 형성되며,

탄소 산화물에 비례한다. 또한 생성된 질소산화물과 좌의 반응에 의해 질소로 변화하여 총 질소 산화물량의 감소에 기여하게 된다.

이 같은 Fuel NOx 반응 과정을 지배하는 화학 반응식은 아래와 같이 표현된다.^(8,19,20)



위 반응식에 의해 생성되는 총 질소산화물 생성률은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{d[NO]}{dt} = & k_6 [HCN][O_2]^\alpha + k_8 [NH_3][O_2]^\alpha \\ & - k_7 [NO][HCN] - k_9 [NO][NH_3] \\ & - k_{char} C_{char} [NO] \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, α 는 산화반응차수이다.

3. 보일러 실험 및 수치 해석 조건

3.1 보일러 및 버너 특성

본 논문에 적용된 보일러는 500MW급 초임계압 관류, 원-패스, 아역청탄을 전소할 수 있는 보일러로서 Tangential Firing 방식을 채용하였으며, Fig. 3과 같이 폭16.5m×깊이16.5m×높이86.91m의 대형 보일러로 6대의 미분기와 각 미분기의 출구는 4개의 코너에 위치한 버너로 보일러 노에 연결되어있다. 버너계통은 질소산화물 배출농도 저감을 위해 PM(Pollution Minimum) 버너와 CCOFA(Close Coupled Over Fire Air)가 적용되었다. Fig. 4와 같이 PM버너는 미분기에서 공급된 미분탄이 두개의 버너로 나뉘져 보일러 노에 석탄을 공급하며, 각 각의 버너는 희박 연소와 농후 연소가 일어나 다단 연소를 하게 된다. 각 버너 중 농후 상태에서 연소가 일어나는 쪽을 CONC 버너라 하고 희박 상태에서 연소가 일어나는 쪽을 WEAK 버너라 한다. PM 버너는 Fig. 4와 같이 A형과 B형 2가지 종류로 구성되어있고 A형은 B, D, F 미분기에 B형은 A, C, E에 설치되어 AB, CD, EF 버너가 그룹별로 농후한 상태가 되어 질소산화물을 저감한다.

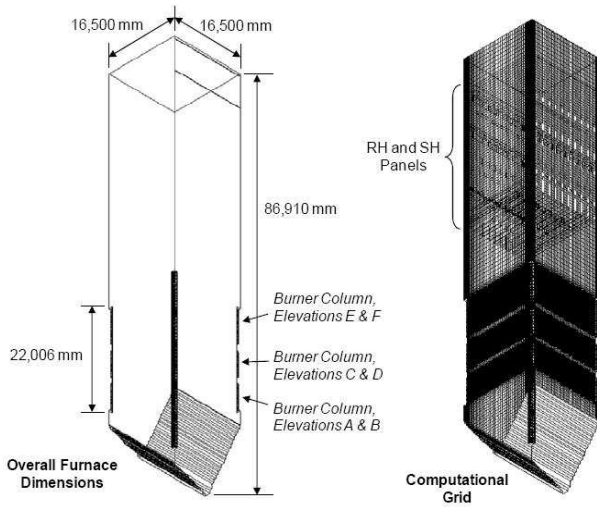


Fig. 3 Overall furnace dimensions and its computational grid

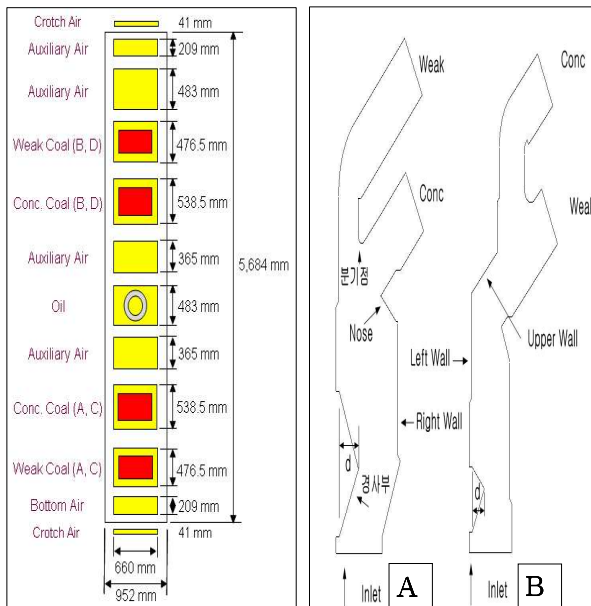


Fig. 4 A schematic of the PM burner (in left) with AB group burner magnified (in right)

3.2 보일러 시험 조건 및 방법

보일러 시험은 Table 1, 2에 나와 있는 Base 1, 2, 3의 시험 탄종과 운전 조건에 따라 실시되어졌고, 보일러 출구의 NOx 농도, CO 농도, 온도 분포를 측정하여 시뮬레이터의 계산 결과를 평가할 목적으로 진행되었다. 온도는 절탄기 입구부

분의 가스 온도를 측정하였고 NOx, CO 농도 측정은 굴뚝 입구 부분에서 이뤄졌다. 실질적인 연소는 보일러 노에서 종료되므로 후부 전열면은 비슷한 조건으로 간주하고 계산상 보일러에서 발생량과 측정값에 대한 경향성만 비교하기로 하였다.

3.3 수치 해석 조건

Table 1, 2를 보게 되면 각 유량 조건과 사용된 석탄의 성분 분석에 대해서 요약되어 있다.

Base 1에서 사용된 탄종은 Coal#1(역청탄), Coal#2(아역청탄), Coal#3(아역청탄)이며, 64:24:12의 비율로 혼소하였다. F 버너는 작동하지 않은 운전 조건이다.

Base 2는 Coal#4(아역청탄) 100%의 연소 조건이다. Base 3은 Coal#5(아역청탄)과 Coal#6(역청탄)을 88:12비율로 혼소하였다. Base 1과는 다르게 Base 2와 Base 3은 F 버너까지 작동한 조건으로써 운전에 사용한 석탄들의 총 발열량이 기준치에 못 미칠 경우 F 버너까지 작동을 해야 하는 상황이 발생하게 된 조건들이다.

또한 Base 3에 쓰인 Coal#5(아역청탄)은 Base 2 쓰인 Coal#4(아역청탄)보다 발열량이 낮아 Base 3의 하부에 Coal#6(역청탄) 12%를 혼탄 하여 기준 발열량을 맞추게 하였다. 이것은 연료비 절감과 발전량이라는 두 가지 조건을 충족시키기 위해서는 다탄종의 연소가 불가피함을 보여주고 있고, 다탄종의 연소 시 발생하는 여러 문제점에 대한 연구의 필요성이 제기되어지는 부분이라고 할 수 있다.

이에 NOx 배출 저감이 꼭 필요한 Base 3의 조건에 가상의 SOFA를 설치하여 SOFA의 영향과 최적 위치를 찾기 위한 계산을 수행하였다. SOFA 조건, 총 9개의 계산 조건에서는 CCOFA (closed couple over-fire air) 공기 주입량을 기준 조건의 50%로 줄이고 나머지 50%를 SOFA 위치에서 주입하였다. CCOFA를 제외한 화로 하부의 운전 조건은 기준 조건과 동일하다.

Fig. 5, 6에 나와 있듯이 SOFA 시뮬레이션에서는 각 높이별로 A, B, C 그리고 위치별로 Cn (Corner), SC (Side Corner), SM (Side Middle)으로 각각 4면에 주입구를 설치하였다.

Table 3에서는 총 9개의 SOFA 시뮬레이션 조건으로 분류하였다.

Table 1 Coal properties used in base conditions

		Base 1			Base 2	Base 3	
		Coal#1 (64%)	Coal#2 (24%)	Coal#3 (12%)	Coal #4 (100%)	Coal #5 (88%)	Coal #6 (12%)
Element	C (%)	68.10	56.42	55.92	48.77	50.95	65.42
	H (%)	4.21	3.99	3.98	3.89	3.72	4.56
	O (%)	6.80	14.51	12.73	17.85	15.18	5.82
	N (%)	1.02	1.03	0.80	0.76	0.74	1.7
	S (%)	0.07	0.06	0.04	0.01	0.02	0.18
Proximate	Ash (%)	6.67	3.84	1.57	2.16	2.49	12.76
	Moisture (%)	13.13	20.15	24.96	26.56	26.9	9.56
	Volatile (daf%)	36.42	47.88	47.97	42.56	43.74	31.42
Heating Value	HHVd (kJ/kg)	30390	28732	28882	27677	27388	28774
Size	60 Mesh	98.8 (wt% Under)*			99.4	99.4	
	100 Mesh	93.4 (wt% Under)*			94.3	93.9	
	200 Mesh	75.4 (wt% Under)*			75.7	77.6	

* wt% Under : 특정 입자 크기 이하의 무게 분율

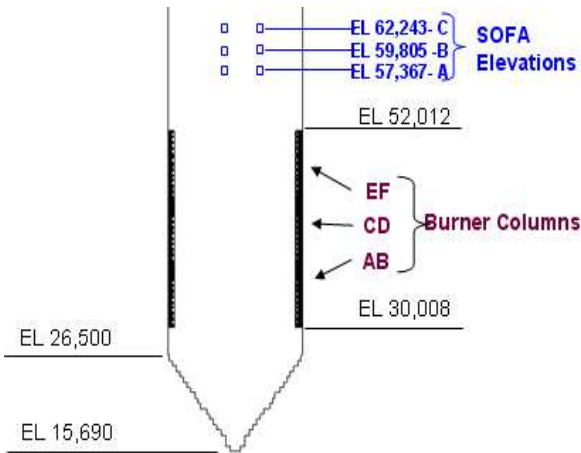


Fig. 5 A schematic of SOFA port elevations

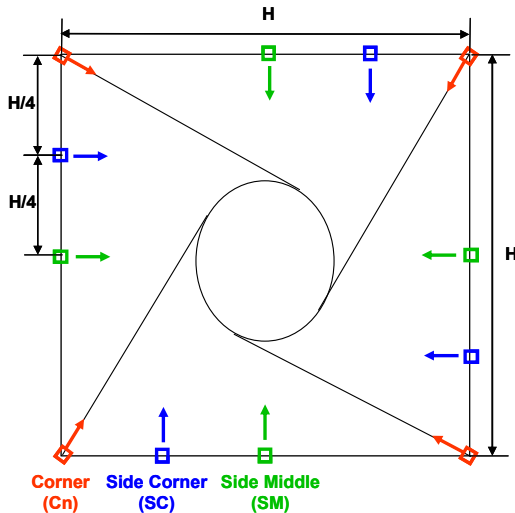


Fig. 6 A schematic of SOFA port positions

Table 2 Flow rate conditions for base conditions

	Base 1	Base 2	Base 3
Global Input (°C)			
PA Temperature	60	57	58
SA Temperature	309	339	341
Flow Rates (kg/s)			
Coal	56.1	64.7	62.9
Air	517	498.8	518.3
OFA (% of Total Air Flow Rate)			
SOFA	0	0	0
CCOFA	24	22	22
Combustion			
Stoichiometry	1.2	1.2	1.2
Excess O ₂ (%)	3.6	3.4	3.4

Table 3 Classification of SOFA cases

Notation	Elevation	Position
Case A-Cn	SOFA A	Position Cn
Case A-SC	SOFA A	Position SC
Case A-SM	SOFA A	Position SM
Case B-Cn	SOFA B	Position Cn
Case B-SC	SOFA B	Position SC
Case B-SM	SOFA B	Position SM
Case C-Cn	SOFA C	Position Cn
Case C-SC	SOFA C	Position SC
Case C-SM	SOFA C	Position SM

4. 결과 및 고찰

4.1 Base case 계산 결과

본 논문에서는 각 기준 조건(Base case)들을 통하여 수치해석 모델의 검증작업과 SOFA 설치의 필요성을 확인할 수 있었다.

Table 4는 3가지 보일러 운전인자의 실측값과 계산값을 비교한 표이다. 출구 온도의 경우, F버너를 제외한 5대 버너 운전 시 연소 영역이 노내 하부에 형성되므로 온도가 가장 낮고, 6대 운전 시 온도가 높음을 출구 온도 값을 통해서 잘 반영하고 있다. NOx 배출 농도는 실측값과 계산값이 절대값에서 45~60ppm의 차이를 보이나 계산이 운전조건이 Base 1에서 3으로 변함에 따른 실제 농도변화의 경향성을 비교적 잘 예측하고 있다고 판단되며, 약 50ppm을 차감 계산하였을 경우 5~10ppm의 오차범위 내에서 실제 NOx 배출 농도를 예측가능 할 것이다. 또한 CO의 농도는 미분기 6대 운전(Base 2,3)의 경우 5대 운전한 것(Base 1)보다 전체적으로 감소하는 경향은 일치하나, 미분기 5대 운전의 경우 CO 농도 값을 실험치에 비해 과다하게 예측하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 7~9에서는 Base case들에 대한 온도와 NOx, CO의 배출농도 분포를 비교해 보았다. Table 4와 Fig. 7, 8을 보게 되면 미분기 5대 운전(Base 1)보다 6대 운전(Base 2,3) 시 NOx 배출 농도가 증가 경향을 보인다. 이것은 F 버너 운전에 의한 석탄의 소모량의 증가와 노내 상부의 고온부 형성으로 NOx 배출농도가 증가된 것이다. 또한 출구온도는 Base 2가 Base 3보다 높아 thermal NOx으로 NOx 배출량의 증가가 예상됨에도 불구하고 Base 3의 NOx 배출농도가 높은 이유는 역청탄을 혼소하였기 때문이다. 이것은 역청탄의 질소함량이 많아 Fuel NOx 성분을 증가시킬 수 있기 때문이다. 또한 역청탄을 혼소함에 따라 Base 2에 비해 상대적으로 증가한 연소시간도 NOx 증가에 기여한 것으로 판단된다. 이에 SOFA를 설치하여 다탄종을 혼소했을 때와 F 버너까지 가동했을 때 증가하는 NOx 배출을 안정적으로 제어하고자 다음 절의 연구를 계속 수행한 것이다. 마지막으로 Fig. 8의 CO 농도의 경우 연소 시간이 긴 역청탄을 가장 많이 주입한 Base 1의 값이 Base 2, 3에 비해 높은 것을 확인할 수 있었다. 또한 Base 2와 3을 비교할 경우 연소시

간이 긴 역청탄을 혼소한 Base 3의 경우가 CO 배출량이 높음을 볼 수 있으며, 이는 앞서 NOx 증가현상과도 일치한다.

Table 4 Comparison of computed data with measured data at the furnace outlet

구 분		Base 1	Base 2	Base 3
미분기 운전수 (대)		5	6	6
온도 (K)	실측값	986	1022	1017
	계산값	981	1020	993
NOx 농도 (ppm)	실측값	60	105.3	118.3
	계산값	105	165	170
CO 농도 (ppm)	실측값	72.21	38.64	57.57
	계산값	586	0.76	1.5

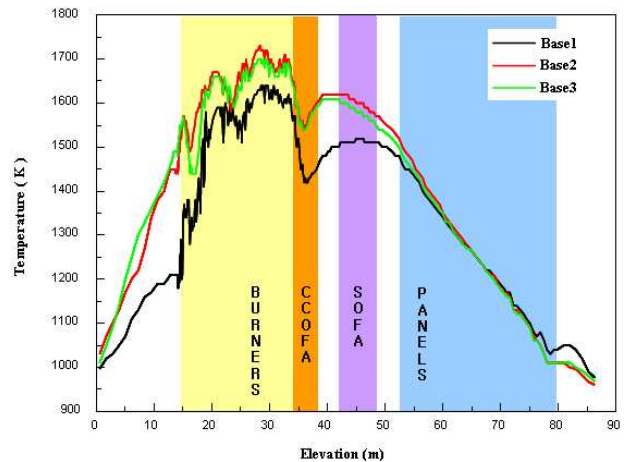


Fig. 7 Gas temperature as a function of furnace elevation for three different base cases

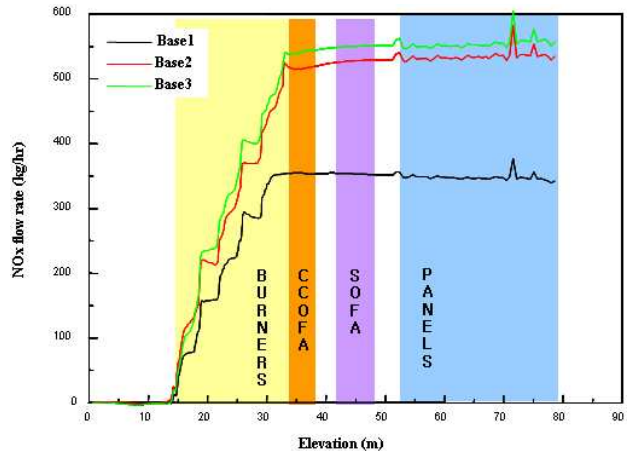


Fig. 8 NOx flow rate as a function of furnace elevation for three different base cases

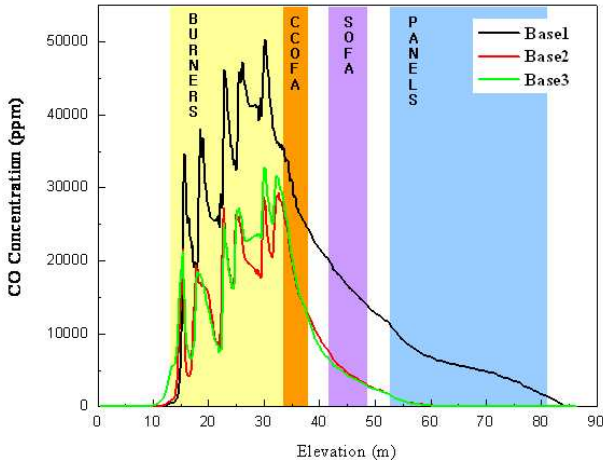


Fig. 9 CO concentration as a function of furnace elevation for three different base cases

4.2 SOFA case 계산 결과

4.2.1 SOFA의 최적 위치

SOFA Case의 결과를 통해 화로의 SOFA 적용의 타당성 및 유용성에 대해서 확인하였다. 또한, NOx 저감을 위한 최적의 SOFA 위치를 도출하기 위해 결과들을 비교하였다. NOx의 저감과 동시에 발전 효율적인 측면을 고려하여 SOFA Case들을 비교하고, 최적 위치를 도출하였다.

Table 5~7에 SOFA 결과가 요약 되어 있다. 높이에 따라 각 각의 SOFA 위치에서 Gas 온도와 CO 농도 그리고 NOx의 농도값을 정리하였다. CO의 농도가 적으면서도 NOx의 농도가 적은 SOFA의 위치를 Fig. 10와 같이 도출해낼 수 있었다.

Fig. 10는 각각의 SOFA 조건에서 CO와 NOx의 관계를 정리한 그래프이다. SOFA의 높이가 C일 때, 위치가 SM일 때 CO의 농도가 낮다. 이유는 SOFA의 높이가 높을 수록 SOFA 영역까지 미연 CO가 연소할 수 있는 연소 영역이 확대된 것으로 볼 수 있다. 또한 위치가 SM으로 갈수록 SOFA공기와 내부 연소가스가 잘 섞여 CO가 CO₂로 전환되는 균일 반응(homogeneous reaction)이 활발히 일어나 CO 감소량이 더욱 큰 것으로 나타났다.

특히, NOx의 배출 특성과 관련하여 SOFA의 높이는 뚜렷한 경향성이 없었으며, 위치에 영향을 받는 것으로 나타났다. CO 배출특성과 같이 코너 주입 형태보다는 화염구(fireball) 유동을 방해할 수 있는 벽면 주입 형태가 NOx 배출감소에 효율적인 것을 알 수 있다. 이것은 공기를 벽면

Table 5 Computed results of SOFA at elevation A

Case A	Cn	SC	SM
Horizontal Plane Below SH			
Gas Temperature (K)	1550	1560	1550
CO concentration(ppm)	4850	4300	4890
Model Exit Plane			
Gas Temperature (K)	990	992	996
CO concentration(ppm)	11.6	3.19	7.40
NOx (ppm wet@6% O2)	166	168	160

Table 6 Computed results of SOFA at elevation B

Case B	Cn	SC	SM
Horizontal Plane Below SH			
Gas Temperature (K)	1550	1580	1530
CO concentration (ppm)	5690	4300	4200
Model Exit Plane			
Gas Temperature (K)	991	991	983
CO concentration (ppm)	15.4	9.23	0.28
NOx (ppm wet@6% O2)	158	164	163

Table 7 Computed results of SOFA at elevation C

Case C	Cn	SC	SM
Horizontal Plane Below SH			
Gas Temperature (K)	1540	1550	1540
CO concentration (ppm)	5470	4410	4890
Model Exit Plane			
Gas Temperature (K)	986	989	983
CO concentration (ppm)	5.49	1.21	0.38
NOx (ppm wet@6% O2)	162	159	149

에서 주입하는 것이 연료와의 혼합이 잘되게 하였고, 농후 연소에서 희박 연소로 가는 시간을 단축시키기 때문이다. 이 시간이 길어질 수록 Fig. 1의 그래프와 같이 NOx가 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 농후 연소에서 희박 연소로 가는 시간이 다단 연소의 NOx 저감 효과를 결정짓는 중요한 요인이라고 할 수 있다.

결론적으로 발전 효율적인 측면과 NOx의 배출 조건을 동시에 고려하여 SOFA의 최적 위치를 선정하였을 때, SOFA 높이는 C 일 때, 그리고 위치는 Side-Middle일 때 가장 최적이라는 결론을 도출해 낼 수 있었다.

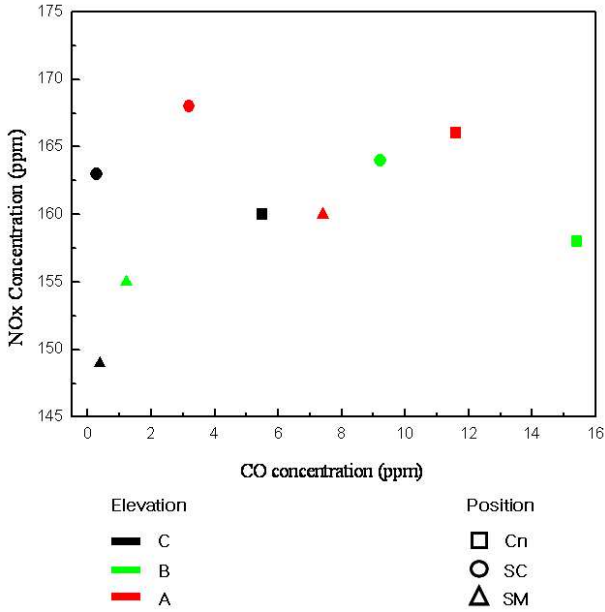


Fig. 10 Correlation between CO and NOx concentration at the model exit for six different SOFA cases

4.2.2 SOFA의 NOx 배출에 대한 영향

Fig. 11~13에서 온도와 NOx, CO 배출농도에 대해 Base 3와 Case C_SM의 두 경우를 비교하여 나타내었다. Fig. 11에 보이는 온도의 경우, SOFA를 설치하였을 때 CCOFA 단에서는 줄어든 공기량으로 Base 3 보다는 적게 온도가 감소하고, 줄어든 CCOFA단의 공기량으로 약간의 후 연소가 발생하여 온도가 조금 증가하였다. 이 결과를 통해서 농후한 연소 조건에 의해 연소가 지연되어 온도가 떨어졌고, SOFA 단에 와서는 투입된 공기량으로 인해 추가적인 연소가 일어나 온도가 급격히 감소되지 않고 유지되는 다단 연소 효과를 확인할 수 있었다. Fig. 13의 높이에 따른 CO 농도 그래프를 통해서도 온도와 일치하는 다단 연소 효과를 확인할 수 있었다. CCOFA 단에 만들어진 농후연소조건으로 인해 CO의 농도가 증가하였고, 추가적으로 SOFA로 공급된 공기량으로 CO의 농도를 감소시킬 수 있었다.

그리고 NOx의 경우, 상대적으로 CCOFA 영역에서 농후 연소 조건에 가까워져 NOx 발생이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 석탄 연소에서 NOx 발생의 주된 메커니즘은 Fuel-NOx임을 고려할 때, 이는 석탄에 포함된 질소가 주변의 산소 농도와와의 관계에 의해서 NOx가 발생하는 형태이다. CCOFA영역에서 농후 연소 조건에 가

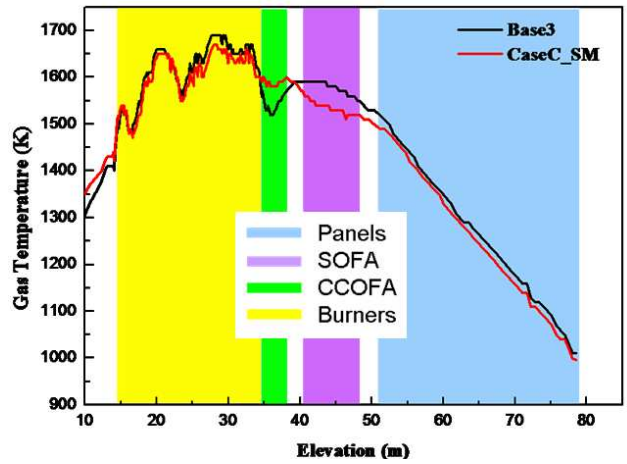


Fig. 11 Axial variation of gas temperature for Base 3 and Case C_SM

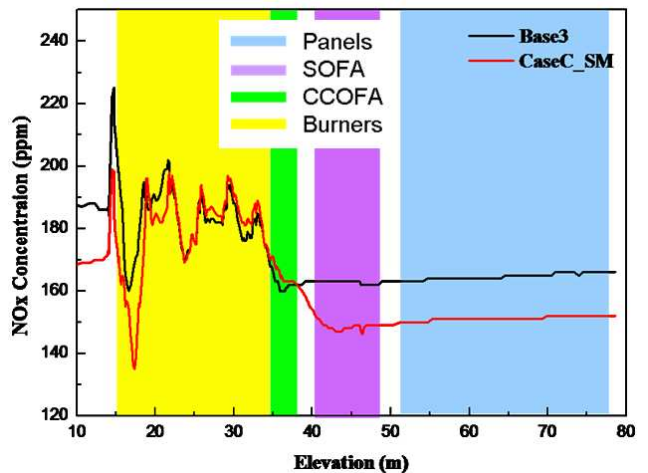


Fig. 12 Axial variation of NOx concentration for Base 3 and Case C_SM

까워진다는 것은 산소의 농도가 상대적으로 감소하였다는 것을 뜻하며 이는 NOx를 생성시키는 산소의 양이 적어졌다는 것으로 말할 수 있다. 즉, F 버너 가동 시에 SOFA를 설치하여 운전시키게 되면 연소가 계속 진행되는 CCOFA 영역의 산소 농도를 감소시켜 NOx 발생을 억제시키는 효과를 볼 수 있다. 또한 SOFA 위치가 SM(side middle)일 때 2 차공기와 농후 생성물간의 혼합이 잘 되었으며, 이로 인해 농후 상태에서 희박 상태로 전환되는 시간이 짧아져 NOx 저감량을 크게 할 수 있었다. SOFA를 설치하였을 경우, 전체적으로 모델 출구 쪽에서의 NOx 농도를 비교하였을 때 약 11% 정도 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

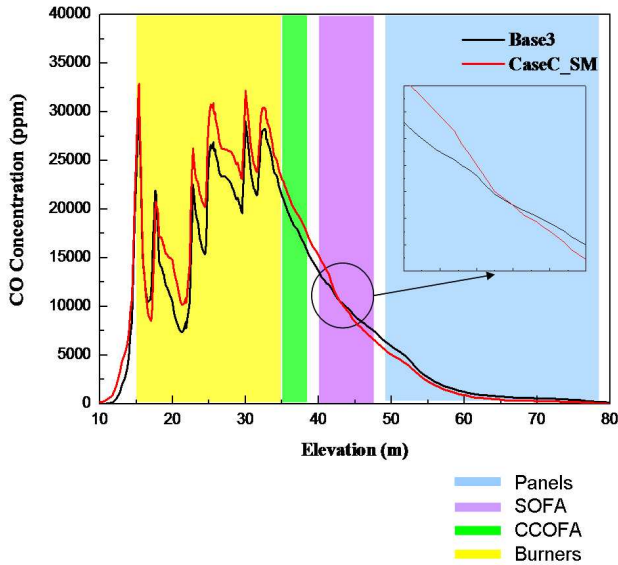


Fig. 13 Axial variation of CO concentration for Base 3 and Case C_SM

5. 결론

본 논문을 통해 아역청탄 전소 보일러 운전 조건에 따른 화로내의 연소, NO_x 특성 및 NO_x 저감을 위한 SOFA의 최적 위치를 예측해보았다. 본 연소 시뮬레이터를 이용하여 실제 운전에 앞서 화로내의 현상 및 NO_x의 경향에 대해서 예측 가능하다고 판단된다.

1. Base Case

(1) Base 1, 2, 3을 통해 연소 시뮬레이션 코드의 검증 작업을 하였다. 각 Base Case들의 계산 결과 값들은 실제 보일러의 운전 결과의 경향과 일치하고 있음을 확인 할 수 있다.

(2) F버너 운전에 의한 석탄의 주입량의 증가와 노 내 상부의 고온부 형성으로 NO_x 배출농도가 증가된 것이다. 또한 역청탄과 아역청탄을 혼소하게 되면, 역청탄만 연소되는 경우에 비해 NO_x 배출농도가 증가하는 경향을 보인다.

2. SOFA Case

(1) SOFA 영향을 파악하기 위하여 총 9개의 계산 조건을 수행하였으며, 계산 결과를 통해서 발전 효율적인 측면과 NO_x의 배출 조건을 동시에 고려했을 때, 최적의 SOFA인 높이는 가장 높은 C Level, 공급 방식은 벽면주입(Side Middle)형

태라는 것을 도출해 낼 수 있었다.

(2) 벽면주입형태가 1, 2차 연소공기의 혼합시간을 짧게 가져감으로써 NO_x, CO 배출량이 동시에 줄어드는 것을 볼 수 있었다.

(3) SOFA를 설치하여 운전하면 상대적으로 CCOFA 영역의 산소 농도를 감소시켜 F버너 가동 시 그리고 아역청탄과 역청탄의 혼소 시 증가하는 NO_x량을 억제시킬 수 있었다.

(4) SOFA를 통해 주입되는 공기로 연소 영역이 하류 부 까지 밀려나게 되어 석탄이 연소할 수 있는 공간을 충분히 확보함으로써 CO의 농도를 감소시키는 효과도 볼 수 있었다.

후 기

이 연구에 참여한 연구자는 2단계 BK21 사업과 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구 결과입니다.

참고문헌

- (1) Smoot, L. D. and Smith, P. J., 1985, *Coal Combustion and Gasification*, New York, Plenum Press.
- (2) Stephen R. Turns, 1999, *An Introduction to Combustion : Concepts and Applications*, McGraw-Hill Book.
- (3) Gibson, M. M. and Morgan, B. B., 1970, "A Mathematical Model of Combustion of Solid Particles in a Turbulent Stream with Recirculation," *Journal of the Institute of Fuel*, Vol. 43, pp.517~523.
- (4) Smith, P. J., Fletcher, T. J. and Smoot, L. D., 1981, "Model for Pulverized Coal Fired Reactor," *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*, Pittsburgh, The Combustion Institute, pp.1285~1293.
- (5) Benesch, W. and Kremer, H., 1984, "Mathematical Modeling of Fluid Flow and Mixing in Tangentially-Fired Furnaces," *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, Pittsburgh, The Combustion Institute, pp.549~557.
- (6) Thomas Le Bris, Francisco Cadavid, Sebastien Caillat, Stanislas Pietrzyk, Jacques Blondin,

- Bernard Baudoin, 2007, "Coal Combustion Modelling of Large Power Plant, for NOx Abatement," *Fuel*, Vol. 86, pp.2213~2220.
- (7) Hill, S. C. and Douglas Smoot, L., 2000, "Modeling of Nitrogen Oxides Formation and Destruction in Combustion Systems," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 26, pp.417~458
- (8) Luis I. Diez, Cristobal Cortes, Javier Pallares, 2008, "Numerical Investigation of NOx Emissions from a Tangentially-fired Boiler under Conventional and Over fire Air Operation," *Fuel*, Vol. 87, pp.1259~1269.
- (9) Sen Li, Tongmo Xu, Shien Hui, Xiaolin Wei, 2009, "NOx Emission and Thermal Efficiency of a 300MWe Utility Boiler Retrofitted by Air Staging," *Applied Energy*, Volume 86, Issue 9, pp.1797~1803
- (10) Wang, D. H., Cremer, M. A., Adams, B. R. and Santangeli, R., 2004, "CFD Modeling of Combustion Generated NOx in a Utility Furnace Firing Heavy Residual Fuel Oil," *5th International Bi-annual ASEM/JSME Symp.*, San Die, California, July, p.25~29.
- (11) <http://www.reaction-eng.com>.
- (12) Launder, B. E. and Spalding, D. B., 1972, *Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, London, England
- (13) Adams, B. R. and Smith, P. J., 1993, "Three-dimensional Discrete-ordinates Modeling of Radiative Transfer in a Geometrically Complex Furnace," *Combustion Science and Technology*, Vol. 88, pp.293~308.
- (14) Adams, B. R. and Smith, P. J., 1995, "Modeling Effects of Soot and Turbulence-Radiation Coupling on Radiative Transfer in Turbulent Gaseous Combustion," *Combustion Science and Technology*, Vol. 109,1~6, p.121.
- (15) Kobayashi, H., Howard, J. B., and Sarofim, A. F. 1977. "Coal Devolatilization at High Temperatures," *Sixteenth Symposium (International) on Combustion*, Pittsburgh, The Combustion Institute, pp.411~425.
- (16) Field, M. A., Gill, D. W., Morgan, B. B., and Hawksley, P. G. W. 1967. "Combustion of Pulverized coal," The British Coal Utilization Research Association, Leatherhead, England.
- (17) Smooke, M. D. (Ed.), 1991, *Reduced Kinetic Mechanisms and Asymptotic Approximations for Methane-Air Flames*, Springer.
- (18) Peters, N. and Rogg, B., (Eds.), 1993, *Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems*, Springer.
- (19) Flower, WL., Hanson, RK., Kruger, CH., 1974, "Investigation of Nitric Oxide Decomposition in The Temperature Range 2500 ~ 4100K," *Fifteenth Symposium (International) on Combustion*, Pittsburgh, The Combustion Institute, pp.823~832.
- (20) Monat JP., Hanson RK., Kruger CH., 1978, "Shock Tube Determination of The Rate Coefficient for The Reaction $O + N_2 \rightarrow N + NO$," *Seventeenth Symposium (International) on Combustion*, Pittsburgh, The Combustion Institute, pp.543~552.