

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.6.587

석탄 화력 보일러의 공기 다단공급방식을 통한 연소 및 배기 배출물 특성 최적화에 관한 수치해석 연구

윤민지* · 이병화* · 송주현** · 김규보*** · 장영준** · 전충환**†

* 부산대학교 기계공학부, ** 부산대학교 기계공학부, RIMT, PC³, *** 부산대학교 화력발전에너지분석기술센터

Numerical Study of the Optimization of Combustion and Emission Characteristics of Air-Staged Combustion in a Pulverized Coal-Fired Boiler

Min Ji Yoon*, Byoung Hwa Lee*, Ju Hun Song**, Gyu Bo Kim***, Young June Chang** and Chung Hwan Jeon**†

* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.,

** School of Mechanical Engineering, RIMT, PC³, Pusan Nat'l Univ.,

*** Pusan Clean Coal Center(PC³), Pusan Nat'l Univ.

(Received October 23, 2009 ; Revised April 11, 2010 ; Accepted April 20, 2010)

Key Words: Air Staged Combustion(공기다단연소), NOx Emission(NOx 배출물), Close Coupled Over Fire Air(CCOFA, 근접 상급 연소 공기), Separated Over Fire Air(SOFA, 분할 상급연소 공기)

초록: 공기다단연소는 석탄화력발전에서 NOx를 저감하기 위한 기술 중에 하나로 잘 알려져 있다. 본 연구에서는 미분탄 보일러에 공기다단연소를 적용하여 현 수준을 유지하면서도 NOx 저감을 이룰 수 있는 최적의 운전조건을 제안하고자 한다. 공기다단연소를 적용하기 위해 미분탄 보일러에 설치된 CCOFA와 SOFA를 통해 공급공기비율을 16.7/83.3%, 25/75%, 50/50%, 75/35% 그리고 83.3/16.7%로 서로 다르게 공급하여 연소 및 배출물질 특성을 연구하였으며, 또한 공기다단연소기술의 적용에 의한 냉각 영향과 재연소반응 영향을 확인하기 위해 동일한 조건에서 공기와 질소를 각각 공급하여 NOx 저감영향을 확인하였다. 본 연구결과를 통해서 CCOFA와 SOFA에 동일한 양을 공급한 공기다단연소조건에서 NOx의 최대저감효과를 확인하였고, 최적의 운전조건을 도출하였다.

Abstract: Air-staged combustion is known to be one of the techniques of NOx reduction. The objective of this study is to determine the optimal ratio of air flow distributed for CCOFA and SOFA; at this optimal ratio, the combustion and exhaust emission characteristics of a pulverized coal-fired boiler are maintained at a satisfactory level. A numerical investigation was performed at various airflow ratios of 16.7/83.3%, 25/75%, 50/50%, 75/25%, and 83.3/16.7%. An inert gas was considered as a substitute for air to isolate the effects of the cooling process and chemical reaction on NOx reduction; during NOx reduction in air-staged combustion, both the effects typically occur simultaneously. The results of our study show that the optimum condition, under which the maximum NOx reduction and highest boiler efficiency can be obtained, corresponds to the equal splitting of the over-fire air between CCOFA and SOFA.

- 기호설명 -

$A_{v1,2}$: 탈휘발의 선지수 함수 인자 (1/sec)
 A_{char} : 화(char) 연소의 선지수 함수 인자 (s/m)
 B : 초기 화의 질량과 소비된 화의 질량비
 C : 연소되는 초기석탄의 양 (kg)

d_p : 입자 직경 (m)
 $E_{v1,2}$: 탈휘발 반응의 활성화 에너지 (J/kmol)
 E_{char} : 화 연소 반응의 활성화 에너지 (J/kmol)
 $F_{h,j}$: x_j 방향으로의 확산에너지 유속(J/m²s)
 $F_{i,j}$: 화학종의 확산 항
 K_c : 화학반응 계수 (s/m)
 K_d : 확산 계수 (s/m)

† Corresponding Author, chjeon@pusan.ac.kr

- k_i : 반응 속도 상수(Thermal NOx reactions)
 M_i : 화학종의 분자량 ($kg/kmol$)
 p : 주위 압력 (N/m^2)
 P_g : 주위 가스에서의 산소분압 (N/m^2)
 P_s : 좌 표면에서의 산소분압 (N/m^2)
 q : 단위 표면적당 소비율 (kg/m^2s)
 R_u : 기체상수 ($8314.3J/kmol \cdot K$)
 R_{NO} : NO 생성률 ($kg/m^3 \cdot s$)
 S_h : 에너지 Source 항
 S_i : 화학반응 Source 항
 S_m : 질량 Source 항
 S_n : 모멘텀 Source 항
 T : 온도 (K)
 T_m : 입자와 가스의 평균 온도 (K)
 u_i : x_i 방향으로의 유량 속도 요소 (m/s)
 V : 휘발물질의 양 (kg)
 $[X]$: 화학종 X 의 몰 농도($kmol/m^3$)
 x_i : 데카르트 좌표($i=1, 2, 3$)
 Y_i : 화학종 i 의 질량분율
 ρ : 밀도 (kg/m^3)
 τ_{ij} : 응력 텐서 요소들
 η : 좌에 의한 NO변환 효율

1. 서론

발전용 표준화력 미분탄 보일러의 운영 시 발생하는 배기 배출물중 하나인 질소산화물(NOx)은 호흡기질환, 광화학스모그 및 산성비의 주요원인이다. 환경문제의 심각성이 지속적으로 제기됨에 따라 질소산화물의 배출규제 또한 강화되고 있다. 이에 질소산화물 저감을 위한 다양한 방법들이 연구되고 있다.

질소산화물 저감을 위한 방법으로는 연소기술을 개선하여 질소산화물을 억제하는 방법과 배기가스의 후처리를 통해 질소산화물을 제거하는 방법, 질소성분이 적은 연료를 사용하는 방법 등이 있다. 본 연구를 통해 적용하고자 하는 공기다단연소(air staged combustion)는 연소기술을 개선하여 질소산화물을 억제하는 방법 중 하나인 단계적 연소(staged combustion)에 기초를 두고 있으며, 이 기술은 다른 질소산화물 저감방법에 비해 운전 중인 보일러에 적용이 용이하며, 경제적인 장점을 가지고 있다. 발전용 미분탄 보일러에 공기다단연소를 적용하기 위해 OFA(Over Fire Air)를

설치하여 적용하고 있으며, 특히 CCOFA(Close Coupled Over Fire Air)와 SOFA(Separated Over Fire Air)로 구분하고 있으며, 버너에 대한 높이별로 적용하여 연소를 제어하고 있다. 단계적 연소는 초기에 공기량이 적은 농후한 상태에서 연소함으로써 열분해로 생성되는 질소화합물과 연료중 질소성분의 산화를 막고, 이후 완전 연소에 필요한 나머지 공기를 공급하여 온도가 비교적 낮은 화염을 형성시켜 전체 NOx발생을 저감시키게 된다.^(1,2)

앞서 언급한 미분탄 보일러에서 OFA의 공기다단연소를 통한 NOx 저감 연구로 Luis 등⁽³⁾은 OFA를 이용한 NOx 저감 및 보일러 연소특성을 수치 해석적 방법을 통해 예측하였으며, Sen 등⁽⁴⁾은 300MW 상용 미분탄 보일러에서 OFA의 공기조건에 따른 NOx 배출 및 연소특성을 연구하였으며, 보일러효율은 0.21% 줄어들었지만 NO저감은 44%에 이르는 결과를 실험적으로 확인하였다. Tomas 등⁽⁵⁾은 OFA를 적용한 NOx 저감의 효과를 시뮬레이션과 실제 보일러에서의 측정결과와 비교를 통해 살펴보았다.

Kokkinos 등⁽⁶⁾은 전산 시뮬레이션을 통하여 OFA설치에 따른 NOx 저감 효과를 확인하였고 이를 실제 보일러에 적용하여 그 경향성이 일치함을 파악하였다. Ki-Tae 등⁽⁷⁾은 미분탄 보일러의 연소에 있어서 SOFA의 설치높이 및 공기 주입위치에 따른 연소최적화를 전산 시뮬레이션을 통해 살펴보았다.

본 연구에서는 미분탄 보일러의 OFA부분을 CCOFA와 SOFA로 구분하여 설치하였으며, 공기다단연소에 의한 연소 및 배기 배출물 특성연구를 수행하였다. 용어에서도 알 수 있듯 CCOFA는 버너의 끝단 바로 위에 설치되며, SOFA는 버너와 일정수준 떨어진 부분에 위치하게 된다.⁽⁸⁾ 발전용 보일러의 특성상 SOFA를 보일러에 실제 적용하여 실험을 수행하기에는 시간과 비용적인 측면에서 어려움이 많다. 이에 본 연구는 수치 해석을 통해 가상의 SOFA를 설치한 후 CCOFA 및 SOFA의 공기유량조건을 변화시켜 그에 따른 보일러 내부에서의 연소 및 배기 배출물 특성을 살펴보고, 보일러의 효율을 고려한 NOx 및 배기 배출물 발생을 최소화 할 수 있는 최적의 공기유량조건을 제공하고자 한다.

2. 수치 해석 모델

석탄은 유기물과 무기물로 이루어진 혼합물로, 석탄연소를 수치해석하기 위해 석탄의 수분증발, 탈휘발화(devolatilization), 가스화된 휘발물의 균질 연소(homogeneous turbulent combustion) 그리고 최종적으로 남은 고체상의 화 입자의 비균질연소(heterogeneous combustion)를 고려하였다. 미분탄 보일러의 연소해석에서 석탄입자는 다상 라그랑지안(Multi-phase Lagrangian) 처리방법을 적용하였다. 가스의 경우, Navier-Stokes 방정식을 통해 질량, 운동량, 화학종 그리고 에너지 보존방정식이 적용되었고⁽⁹⁾, 난류모델은 표준 k-ε 모델⁽¹⁰⁾이 적용되었다. 또한 복사에 의한 열전달은 DOM(Discrete Ordinate Method) 방법⁽¹¹⁾을 적용하여 계산을 수행하였다. 사용한 난류 가스 반응모델과 석탄입자 반응모델들은 다음과 같다.

2.1 난류반응 유동모델

2.1.1 질량 보존방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = S_m \quad (1)$$

2.1.2 운동량 보존방정식

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_n \quad (2)$$

$i = 1, 2, 3 \quad j = 1, 2, 3$

식 (1)과 식 (2)는 일반적으로 압축성과 비압축성 유동에 관한 것이며, 유동이 난류일 때, 시간적 평균을 적용하여 해석을 수행한다. 가스 상태의 모든 성분들은 이상기체로 가정하고, 속도 구배에 의해 발생하는 Viscous stress tensor(τ_{ij})는 Newtonian 유체의 가정으로부터 주어진다. Source 항(S_n)은 부력(buoyancy)과 회전(rotation)으로 인하여 발생하는 외부 body forces들을 고려하게 된다.

2.1.3 화학종 보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_i - F_{i,j}) = S_i \quad (3)$$

식 (3)에서는 각 화학종에 대한 질량 및 운동은

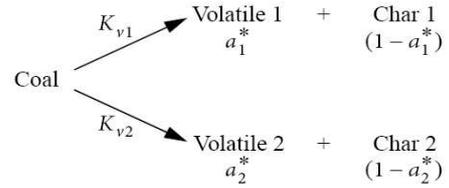


Fig. 1 Devolatilization model with two competing steps

보존이 되며, 각 화학종에 따른 확산 플럭스($F_{i,j}$)가 고려가 된다. Source 항(S_i)은 반응에 의해서 생성되는 화학종을 고려하게 된다.

2.1.4 에너지 보존방정식

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho h u_j + F_{h,j}) = \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h \quad (4)$$

식 (4)에서 열유속은 열적인 요소와 화학적 요소의 합을 나타내며, 온도 구배에 따른 전도, species 농도 구배에 의한 enthalpy 확산을 포함한다. 그리고 Source 항(S_h)은 화학반응에 때문에 생기는 열을 나타내게 된다.

2.2 석탄 탈휘발화 모델

탈휘발에 사용된 모델은 two-competing-step 모델⁽¹²⁾이다. 이 모델은 Kobayasi et al⁽¹²⁾에 의해 제안된 모델로 저온과 고온에 대한 휘발량을 모두 고려하여 전체 휘발율을 예측할 수 있는 모델로 탈휘발률은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{dV}{dt} = (K_{v1} a_1^* + K_{v2} a_2^*) C \quad (5)$$

$$\text{where } K_{vn} = A_{vn} \exp\left(\frac{E_{vn}}{RT_p}\right)^{n=1,2} \quad (6)$$

위의 식 (5)과 식 (6)을 적분하게 되면 시간(t)에 따른 전체 휘발분의 양을 나타낼 수 있다.

$$V = \int_0^t (K_{v1} a_1^* + K_{v2} a_2^*) C_0 \cdot \left[\exp\left(-\int_0^{t'} (K_{v1} + K_{v2}) dt''\right) \right] dt' \quad (7)$$

Table 1 Kinetic constants for devolatilization⁽¹⁵⁾

Rate parameters	Numeric values
Activation energy (<i>J/kmol</i>)	$E_{v2}=2.09e+08$
Pre-exponential factor (1/sec)	$A_{v2}=1.46e+13$
Stoichiometric coefficient	$a_1^*=0.4, a_2^*=1$

Table 2 Kinetic constants for char oxidation⁽¹⁶⁾

Rate parameters	Numeric values
Activation energy (<i>J/kmol</i>)	$E_{char}=9.343e+07$
Pre-exponential factor (<i>s/m</i>)	$A_{char}=10.4$

2.3 석탄 좌 연소(char burnout) 모델

좌 연소 반응은 가장 늦은 반응물을 가지므로, 석탄의 연소과정에서 그 과정을 지배하는 매우 중요한 부분이다. 좌 연소 모델링은 좌의 구조, 좌와 반응물(예, O₂, H₂O, CO₂, H₂)간의 복잡한 반응 메커니즘, 좌의 분열 및 고유성분 같은 많은 요소들에 의해 지배를 받게 된다. 이 같은 불확실성 때문에 좌 연소 모델링은 실험결과에 많이 의존하게 되고, 좌와 산소사이의 표면 반응률이 매우 높은 경우, 좌 소비율은 경계조건으로부터의 O₂ 확산율에 의해 지배를 받는다. 본 연구에 적용된 좌 연소 모델은 first-order combined rate 모델로 다음의 수식과 같이 간략화 시켰다.

$$q = K_d (P_g - P_s) \quad (8)$$

K_d 는 확산계수이며, 실험결과에 기초하여 다음과 같이 표현된다.⁽¹³⁾

$$K_d = 5.06 \times 10^{-12} \frac{T_m^{0.75}}{d_p} \quad (9)$$

그리고 표면에서 일어나는 반응률을 고려하여 first-order 반응률은 다음과 같이 나타내어진다.

$$q = K_c P_s^n, \quad n=1 \quad (10)$$

$$K_c = A_{char} \exp\left(-\frac{E_{char}}{R_u T_p}\right) \quad (11)$$

K_c 는 좌의 표면 면적에 기초한 화학반응계수이다. 따라서 좌 연소율은 산소 확산율과 화학 반응률에 의해 지배를 받는다. K_c 와 K_d 가 혼합된 모델이 사용되었으며, 전체 반응률은 다음과 같다.⁽¹³⁾

$$q = \frac{P_g}{\frac{1}{K_d} + \frac{1}{K_c}} = \left(\frac{K_c K_d}{K_c + K_d}\right) P_g \quad (12)$$

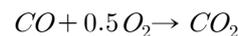
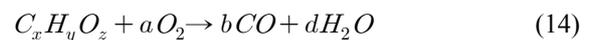
결론적으로, 전체 표면적에 대한 좌 연소율이 다음과 같이 결정된다.

$$\frac{dm_{char}}{dt} = -q\pi d_p^2 \quad (13)$$

Table 1~2는 본 연구에서 사용된 탈 휘발 과정 및 좌 연소 과정의 반응상수들을 보여준다.

2.4 탈휘발 가스 난류연소 모델

휘발물질은 연소성의 탄화수소 가스들, 산소, 수분과 배기배출물의 생성에 기여하는 몇몇의 무기물 화학종(예, N, S, Cl)으로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용된 모델은 Extended Eddy Break-Up (EBU)모델이다.⁽¹⁴⁾ 본 모델은 연소반응이 대부분 난류 혼합에 의해 영향을 받는다고 가정을 하고, 화학반응에 따른 영향은 고려하지 않는다. 이때, 휘발분의 연소반응은 다음과 같이 일반화된 연료의 2단 연소반응으로 근사 되었다.



2.5 질소 산화물 생성 모델

2.5.1 열적 질소 산화물(Thermal NOx)

Thermal NOx의 생성은 온도에 지배적이며, 아래의 확장 Zeldovich 메커니즘과 같다.⁽¹⁷⁾

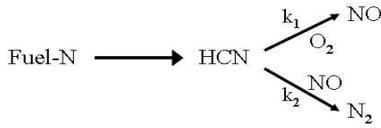


Fig. 2 Gas-phase reaction mechanism to Fuel NOx

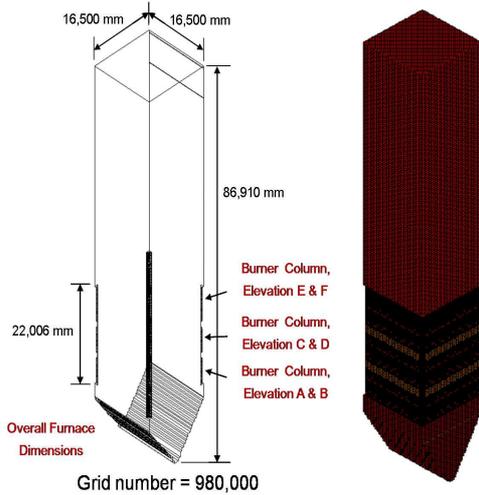
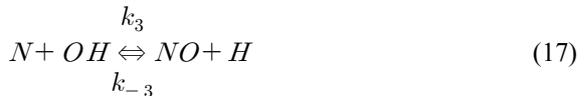


Fig. 3 Grid geometry and mesh of boiler furnace with a tangential burner



(k_i : 반응 속도 상수, $i: \pm 1, \pm 2, \pm 3$)

2.5.2 급속 질소 산화물(Prompt NOx)

Prompt NOx는 농후한 당량비에 지배적이며 생성률은 De Soete^(18,19)에 의해 다음과 같이 나타낸다.

$$R_{NO,pt} = k_{pt} M_{NO} \quad [kg m^{-3} s^{-1}] \quad (18)$$

$$k_{pt} = k_r [O_2]^b [N_2] [Fuel] \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (19)$$

2.5.3 연료 질소 산화물(Fuel NOx)

Fuel NOx 생성은 연료에 포함된 질소 원자에서

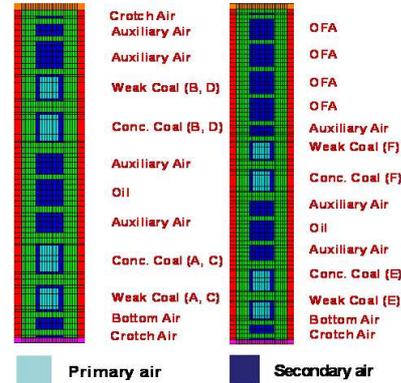


Fig. 4 Arrangement of the burner columns

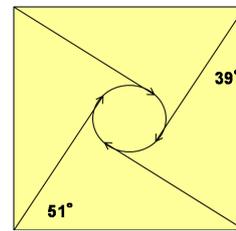


Fig. 5 Firing angles of the furnace

발생하며, 연료로부터 휘발된 기체상의 질소 산화와 좌의 질소에 의한 불균일한 산화로 나뉠 수 있다. HCN과 같은 휘발된 기체상 질소의 산화에 의한 NOx의 생성과정 및 해당 반응물은 다음과 같다.⁽¹⁴⁾

$$R_{NO} = (k_1 - k_2) \rho \frac{M_{NO}}{M_{mix}} \quad (20)$$

$$R_{HCN} = R_{vol,HCN} - (k_1 + k_2) \rho \frac{M_{HCN}}{M_{mix}} \quad (21)$$

$$R_{N_2} = k_2 \rho \frac{M_{N_2}}{M_{mix}} \quad (22)$$

한편, 좌의 질소에 의한 NOx 생성률($R_{NO,char}$)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R_{NO,char} = R_{char} Y_{n,char} B \eta \frac{M_{NO}}{M_{mix}} \quad (23)$$

3. 수치 해석 방법

3.1 보일러 형상, 경계 및 초기조건

본 연구에 적용한 발전용 표준 화력 미분탄 보일러는 높이 86.91m, 가로 16.5m, 세로 16.5m 의

Table 3 Flow conditions of fuel and air at baseline condition

Level		Coal (kg/s)	Primary Air (kg/s)	Secondary Air (kg/s)
Burner	EF	2.8	7.2	17
	CD	5.6	10.9	22.7
	AB	5.6	10.9	22.4
OFA		-	-	31.4
Crotch Air		-	-	6.5
Total		14	29	100

Table 4 The fraction of CCOFA and SOFA over total air flow ratio

CASE	CCOFA (%)	SOFA (%)
1	16.7	83.3
2	25	75
3	50	50
4	75	25
5	83.3	16.7

실제 보일러 형상을 전산해석을 위하여 3차원 모델로 형성하였으며, Fig. 3에 나타내었다. 모델링에 사용된 격자수는 98만개이며, 격자는 모두 정육면체로 구성하였다. 보일러의 4개 코너부분에는 접선형 버너들이 6층에 걸쳐 24개가 설치되어 있다. Fig. 4는 버너 칼럼의 배열을 나타낸 것이다. 버너 칼럼의 아래로부터 A, B, C, D, E, F 순으로 되어 있으며, 버너 칼럼 AB와 CD는 같은 형식과 크기로 배열되어 있다. 공기공급은 석탄과 함께 공급되는 1차 공기(primary air) 주입부분과 독립적으로 구성된 2차 공기(secondary air or auxiliary air) 주입부로 구분된다. 석탄 공급부의 경우 Concentrated와 Weak로 구분되며 서로 다른 비율의 석탄이 들어가게 되는데 Concentrated 주입구에 3.5배 더 많은 석탄이 들어가게 된다. 그리고 EF버너 위에는 OFA가 설치되어 있다. Fig. 5는 버너 칼럼에서 공기와 석탄이 주입되는 각도를 나타내고 있으며, 틸팅 각(titling angle)의 효과는 주지 않았다. 주입되는 면에 각도를 주어서 화염불을 형성하도록 하며, 공기와 연료의 혼합도를 증가시키게 된다.

Table 3은 각 칼럼에 주입되는 연료와 공기의 양을 나타내고 있으며, 이는 향후 해석 시 기준 조건으로 사용하였다. 실제 500MW급 발전용 보일러에서 사용되는 조건을 적용하였으며, 주어진

Table 5 The elevation range of each portion

	Elevation (m)
CCOFA region	34.3 - 50
SOFA region	50 - 51
POST(Superheater) region	51 - 70

조건은 칼럼 당 연료와 공기의 양이므로 총량은 4배를 해주어야 한다. 입구조건에는 각 유량을 속도와 밀도, 그리고 면적을 고려하여 1차 공기, 2차 공기를 넣어주었으며, 출구조건은 대기압 조건으로 유량이 배출되도록 하였다. 그리고 보일러의 벽면 조건은 온도를 524K로 지정을 하였다. 또한 1차공기의 온도는 333K이며, 2차공기의 온도는 582K로 지정을 해주었다.

3.2 해석 조건

본 연구에서는 접선 분사형 보일러에서 다른 변수는 고정하고, 기존의 OFA영역에 가상의 SOFA영역을 추가함으로써 SOFA의 설치에 따른 보일러 내부 연소 특성 및 공기 유량비에 따른 NOx 저감의 최적 조건을 살펴보고자 하였다. 기존의 OFA를 CCOFA라 지정하고 SOFA와 구분하여 사용하도록 하였다.

Table 4은 각 조건에 따른 CCOFA 및 SOFA 유량비 분배 변화를 나타내었으며 총 공기유량은 31.4kg/s로 가상의 SOFA설치에 따른 추가적인 공급유량은 없다. 즉, 기존 OFA에 주입되던 유량을 가상의 SOFA에 나누어 공급하게 되는 것이며, CASE 1에서 CASE 5로 갈수록 CCOFA의 공급유량은 늘고 SOFA의 공급유량은 줄도록 하였다.

Table 5에서는 Table 4의 5가지 조건에 따른 보일러 연소 및 배기 배출물 특성을 자세히 살펴보기 위해 CCOFA, SOFA 및 POST영역 등 세 가지의 보일러 높이별로 지정한 영역을 나타내었다. 특히 POST영역은 superheater부근으로 이 부분의 온도는 보일러 효율을 판단하는 중요한 근거로 사용될 수 있다. 또한 CCOFA와 SOFA에서의 NOx 저감에 대한 화학반응과 냉각효과의 개별 영향을 살펴보기 위하여 각 조건에 따라 CCOFA 또는 SOFA에 공기대신 비활성기체인 질소(N₂)를 주입하여 미분탄 보일러에 미치는 영향을 살펴보았다. N₂조건인 경우 영역에 따라 각 OFA에 N₂를 공급하는 것 이외에 다른 모든 변수는 공기 조건과 동일하게 유지하였다.

4. 해석 결과 및 고찰

4.1 SOFA 투입공기량 효과

Fig. 6~8은 CCOFA 및 SOFA에 주입되는 공기량비 변화에 따른 보일러내부의 온도, NO 및 CO 분포를 나타낸 것으로 주입되는 공기량 비에 따라 보일러내부의 연소상태 변화를 확인 할 수 있다. CASE 1은 SOFA에 주입되는 공기량이 CCOFA 영역에 주입되는 공기량보다 상대적으로 매우 많은 조건으로 이 영역에 주입되는 공기의 영향으로 인해 SOFA부분에 온도, NO 및 CO의 분포가 다른 조건에 비해 비교적 낮음을 볼 수 있으며, 특히 그림의 맨 위에 표시된 SOFA영역의 면적에 대한 평균 온도, NO농도 및 CO 분포값을 통해 그 정도를 확인 할 수 있다. 그에 반해 CASE 5로 갈수록 SOFA영역에 주입되는 공기량이 상대적으로 작아서 SOFA부분에서의 평균 온도, NO 및 CO 농도는 증가하는 대신, CCOFA 부분에 급격한 온도 및 배기 가스변화를 가져옴을 볼 수 있다.

4.2 화학반응 및 냉각효과 분석

Fig. 9~11은 미분탄 보일러 연소에서 두개의 OFA 즉, CCOFA와 SOFA의 영향을 각각 알아보기 위해 영역별로 체적에 대해 평균한 온도, NO 및 CO농도를 나타낸 것이다. 각 그래프의 OFA_AIR조건은 두 OFA 모두에 공기를 넣어준 조건이며, CCOFA_N₂조건은 CCOFA에는 N₂를 넣고 SOFA에는 공기를 주입한 조건이고, SOFA_N₂ 조건은 CCOFA에는 공기를 넣고 SOFA에는 N₂를 주입한 조건이다. 대표적인 세 개 영역별로 N₂조건과의 비교를 통해 두 OFA에 의한 화학반응 및 냉각효과를 각각 분리하여 NO_x저감 원인을 구체적으로 살펴보고자 하였다.

4.2.1 CCOFA영역

Fig. 9(a)는 CCOFA 영역에서의 공기 유량비 변화에 따른 온도, NO 및 CO농도를 나타내었다. 또한 곡선상의 각 점은 Table 4에서 나눈 세 영역 중 하나인 CCOFA영역의 체적 평균값을 나타내었다. 먼저 온도 변화를 살펴보면 CCOFA부분에 주입되는 공기량이 증가함에 따라 온도가 낮아지는 경향을 볼 수 있는데, 이를 통해 CCOFA

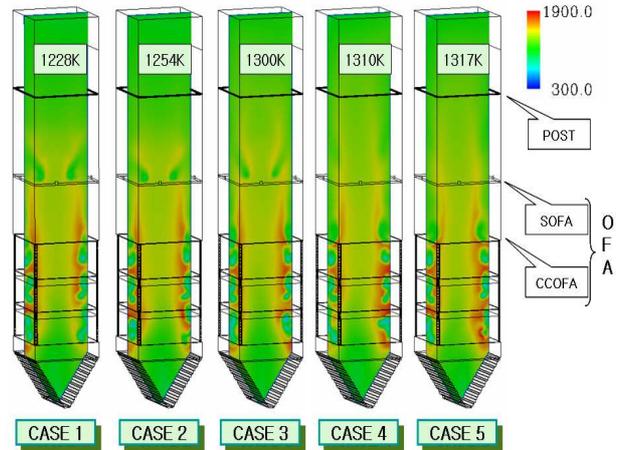


Fig. 6 Temperature distribution as a function of air flow rate supplied for SOFA

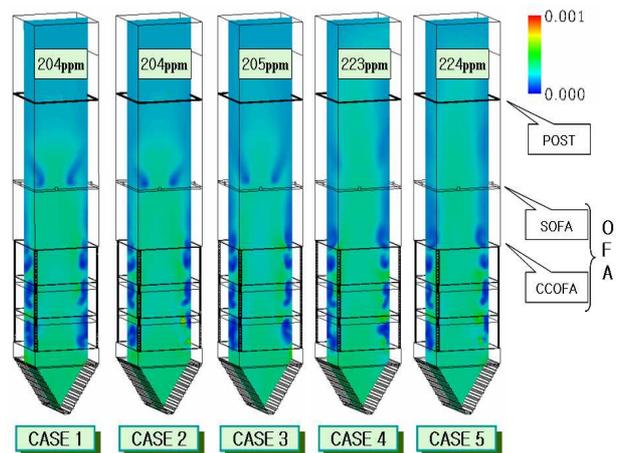


Fig. 7 NO distribution as a function of air flow rate supplied for SOFA

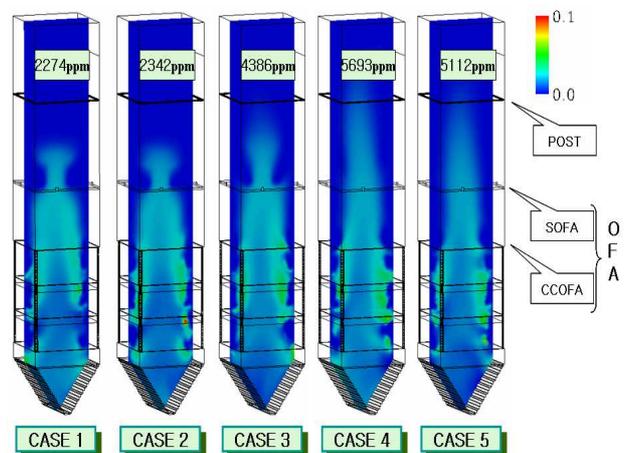


Fig. 8 CO distribution as a function of air flow rate supplied for SOFA

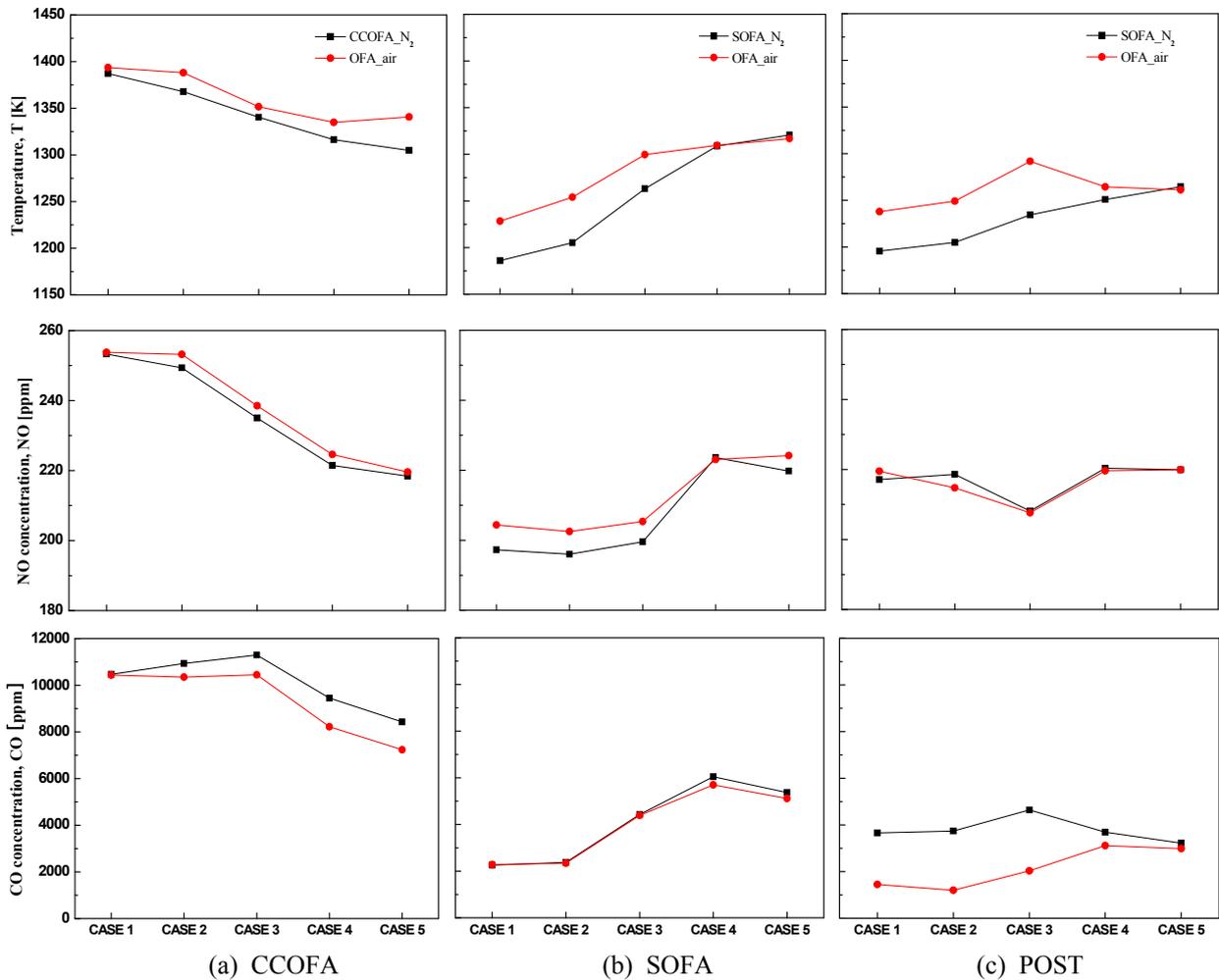


Fig. 9 Characteristics of averaged temperature, NO and CO at the (a) CCOFA, (b) SOFA and (c) POST regions when each air and N₂ injection were injected at the positions

영역에 주입되는 공기에 의한 냉각효과를 확인할 수 있다. 특히 공기조건과 N₂조건 간의 그래프 사이에 차이가 거의 없다는 것은 온도와 NO_x 농도가 냉각효과에 지배를 받고 화학반응에 의한 영향이 적다고 판단 할 수 있다. 그러나 CASE 5의 공기 조건의 경우에 전체적인 경향과 반하여 약간의 온도가 상승함으로써 N₂조건과의 차가 상대적으로 커진 것을 볼 수 있는데 이것은 CCOFA부분에 주입되는 공기의 양이 과도하게 많아 질 경우 화학반응이 어느 정도 일어나 온도가 약간 상승한 것이라 판단된다.

NO농도 그래프의 경우 온도 그래프와 마찬가지로 CCOFA에 주입되는 공기량이 증가함에 따라 NO농도가 감소되는 경향을 보이는데, CCOFA에 주입되는 공기량이 증가하면 냉각효과에 의해 온도가 낮아지고 그 결과 Thermal NO_x가 저감된

것이라 사료된다.

석탄 연소의 경우 고온으로 갈수록 전체 생성 가스 중에서 CO가 차지하는 비율이 증가된다고 알려져 있다.⁽²⁰⁾ CO농도는 온도 변화와 비슷한 경향을 가지며 특히 CCOFA 부근에 주입되는 공기량이 증가 할수록 냉각 효과에 의해 온도가 감소하여, CO농도가 줄어든다고 볼 수 있다.

4.2.2 SOFA영역

Fig. 9(b)는 SOFA 영역에서의 공기 유량비에 따른 온도 및 NO, CO농도를 나타내며, 온도 그래프에서 CCOFA부분에 주입되는 공기량이 증가하고 SOFA부분에 주입되는 공기량이 감소함에 따라 SOFA영역의 온도는 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 SOFA영역에 공기량이 줄면서 냉각효과 또한 줄어들고 있다는 것을 나타낸다. 온도에

영향을 많이 받는 NO의 경우에도 비슷한 경향을 보이고 있다. 온도 그래프에서 SOFA부분에 공기를 주입한 조건과 비활성 기체인 N₂를 주입한 조건과의 온도차를 확인 하여 보면 SOFA부분에 주입되는 공기량이 감소할수록 그 차가 상대적으로 줄어들고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 화학반응의 영향이 감소한 것으로 볼 수 있다. 특히, CASE 4이후 조건의 경우 공기조건과 N₂조건에 따른 차이가 거의 없는데 이는 SOFA부분에 주입되는 공기량이 희박해 짐에 따라 화학반응이 이루어질 만큼의 충분한 산소가 공급되지 못했기 때문으로 사료된다. NO농도는 SOFA에 주입되는 공기량이 상대적으로 많은 CASE 3조건까지는 비교적 낮은 수치를 보이거나 CASE 4이후 조건에서는 급격하게 증가하는 현상을 보인다. 이것은 실제로 NO농도가 증가한 것이라기보다는 냉각효과에 의한 NO저감이 이루어지지 못하였기 때문으로 Fig. 9(a)의 NO농도 그래프와 Fig. 9(b)의 NO농도 그래프를 비교하여 보면 SOFA에 주입되는 공기량이 비교적 많은 경우인 CASE 3조건까지는 CCOFA영역의 NO농도에 비하여 SOFA영역의 NO농도가 저감되었음을 볼 수 있다. 반면에 SOFA영역에 주입되는 공기량이 상대적으로 적은 CASE 4조건 이후는 Fig. 9(a)의 CCOFA영역과 비교하여 NO의 농도에 거의 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 즉, SOFA영역에 주입되는 공기량이 일정 수준 이상이 되어야 냉각효과에 의한 NO저감을 기대 할 수 있음을 알 수 있다. 또한 공기조건과 N₂조건을 비교하여 보면 온도 그래프와 마찬가지로 SOFA영역에 주입되는 공기량이 감소함에 따라 화학반응의 영향이 줄어들음을 확인할 수 있다. 특히, SOFA영역에 주입되는 공기량이 일정수준 이상 일 때 공기를 주입한 조건의 경우가 N₂를 넣은 조건 보다 NO의 농도가 높은 것을 볼 수 있는데, 이를 통해 공기 주입에 따른 화학 반응의 결과로 온도 상승에 의한 Thermal NO생성이 이루어 졌음을 알 수 있다. 결과적으로 SOFA영역에서는 SOFA에 주입되는 공기량비가 증가하면 냉각효과 보다는 화학 반응의 영향이 보다 더 지배적이라고 할 수 있다. 결과적으로 SOFA영역에서는 SOFA에 주입되는 공기량비가 증가하면 화학반응의 영향 보다는 냉각효과에 의한 영향이 더욱 지배적이라고 할 수 있다.

CO농도 그래프를 살펴보면 SOFA영역에 주입

되는 공기량이 상대적으로 많은 조건에서는 보일러내부의 연소 및 유동이 매우 활발해져 낮은 CO농도를 나타낸다. 반면 SOFA에 주입되는 공기량이 적은 조건에서는 공기 유동에 의한 혼합이 잘 일어나지 않을 뿐만 아니라 연소에 필요한 산소가 충분히 공급되지 않게 되어 CO농도가 높게 나타나는 경향을 확인할 수 있다.

4.2.3 POST 영역(Superheater)

Fig. 9(c)은 POST영역에서의 공기 유량비 변화에 따른 온도, NO 및 CO 농도 변화를 나타내었다. 앞서 언급했듯이 POST영역은 보일러의 후단으로 이 영역의 연소 상태에 따라 보일러의 효율 및 배기 배출물 특성이 결정되므로, 본 연구의 목적인 발전용 보일러 연소의 최적 공기 유량비 조건을 도출하는데 있어 POST영역의 결과를 살펴보는 것이 매우 중요하다. 먼저 온도 그래프를 살펴보면 SOFA부분에 주입된 공기량이 상대적으로 많은 조건에서 공기조건과 N₂조건 사이의 온도 차이가 크며 주입된 공기량이 줄어들에 따라 그 차가 점차 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 SOFA에 들어가는 공기량이 감소하여 상기 언급한 화학 반응의 영향이 줄어 든 것이며, 또한 POST영역의 연소 상태는 SOFA영역에 주입된 공기량에 따라 많은 영향을 받게 된다는 것을 알 수 있다.

NO농도 그래프의 경우 SOFA영역에 주입된 공기량이 비교적 많은 CASE 2조건까지는 Fig. 9(b)의 SOFA영역의 NO농도 그래프와 비교 하였을 때 화학반응에 의한 NO가 발생하여 높은 NO농도를 보이며 CASE 3조건 이후 조건의 경우 SOFA영역의 NO농도와 비교하여 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 즉, SOFA에 주입되는 공기량이 과도하게 많아지면 SOFA영역에서는 냉각효과로 인한 NO저감의 효과를 얻을 수 있겠지만 보일러의 후단인 POST영역에서는 오히려 NO가 생성되는 결과를 보이게 된다.

CO농도 그래프의 경우 공기 조건과 N₂조건을 비교하여 보면 온도 그래프와 마찬가지로 SOFA부분에 주입되는 공기량이 감소할 수록 공기조건과 N₂조건의 차가 작아짐을 통해 화학반응의 영향이 줄어들음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 9(b) SOFA영역의 CO농도 그래프와 비교 했을 때 Fig. 9(c) POST영역의 CO농도가 훨씬 낮음을 볼 수

있는데 이는 POST영역에서 이전 영역에서 발생된 미연의 화와 중간 과정의 탄화수소가 SOFA에 주입되었던 공기와 반응하였기 때문이며 앞서 언급하였듯이 SOFA에 주입되는 공기가 감소함에 따라 화학반응의 영향은 줄어들게 된다. POST영역에서 보일러 내부의 온도가 상승하는 것은 보일러 과열기의 효율을 높이는 요인이 되기도 하지만 그에 따라 NO_x도 함께 증가하는 결과가 나타난다. 따라서 보일러의 효율을 고려하면서 NO_x발생을 최소화 할 수 있는 최적 공기 유량비 조건을 찾는 것은 매우 중요하다. 위의 Fig. 9(c)의 그래프를 살펴보면 CASE 3의 조건에서 보일러내의 온도는 가장 높지만 NO의 농도는 가장 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 CCOFA와 SOFA에 주입되는 공기량의 비에 따른 보일러내의 연소 상태에 의한 것이며, 공기비를 통하여 냉각효과와 화학반응 정도를 조절함으로써 최적의 조건이 CASE 3임을 확인 할 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 표준 석탄 화력 발전 보일러 연소에 있어서 NO_x저감 방법 중 하나인 OFA기법을 적용하여 실제 설치 운용중인 CCOFA이외에 가상의 SOFA를 설치 한 후 보일러 내부의 연소 및 배기 배출물 특성을 수치 해석적으로 살펴보았으며, 그를 통해 CCOFA 및 SOFA에 주입되는 공기 유량비 변화에 따른 최적 조건을 연소 및 NO_x 배출 측면에서 도출하였다.

(1) CCOFA 영역에서는 CCOFA에 공급되는 공기가 많아질수록 경우 냉각효과에 의한 온도 저하 및 이에 따른 NO_x 저감의 효과를 확인하였고, 화학반응의 효과가 적음을 확인하였다.

(2) SOFA 영역에서는 SOFA에 공급되는 공기량이 증가함에 따라 냉각효과 보다는 재연소 화학반응에 의한 온도 상승과 이로 인한 NO_x가 오히려 증가함을 확인하였다.

(3) POST영역에서는 SOFA에 공급되는 공기량이 증가에 따라 보일러의 내부온도가 증가하는 것을 확인하였고, NO생성의 경우 CCOFA에서의 냉각효과와 SOFA에서의 재연소 및 냉각효과가 상호보완적 관계에 있음을 확인하였다.

(4) 두 OFA영역에 주입되는 공기량에 따른 최적조건은 CCOFA영역과 SOFA영역에 각각 절반

씩 공기를 주입한 조건으로 CCOFA영역에서는 냉각효과에 의한 초기 NO발생 억제 효과를 얻고, SOFA영역에서는 과도하지 않은 재연소 화학반응으로 인한 추가 NO발생을 최소화시켜 POST영역에서 고온을 유지하면서 최소의 NO배출조건을 확인하였다.

후 기

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업 대학전력연구센터의 지원으로 연구를 수행하였으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Man CK, Gibbins JR, Witkamp JG, Zhang J., 2005, "Coal Characterization for NO_x Prediction in Air-Staged Combustion of Pulverized Coals," *Fuel*, Vol. 84, pp. 1290~1295.
- (2) Molina A, Eddings EGD, Pershing W, Sarofim AF., 2000, "Char Nitrogen Conversion: Implication to Emissions from Coal-Fired Utility Boilers," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 26, pp. 507~531.
- (3) Luis I. Díez, Cristóbal Cortés, Javier Pallarés, 2007, "Numerical Investigation of NO_x Emission from a Tangentially-Fired Utility Boiler Under Conventional and Over Fire Air Operation," *Fuel*, Vol. 87, pp. 1259~1269.
- (4) Sen Li, Tongmo Xu, Shien Hui, Xiaolin Wei, 2009, "NO_x Emission and Thermal Efficiency of a 300 MWe Utility Boiler Retrofitted by Air Staging," *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 1797~1803.
- (5) Tomas Le Bris, Francisco Cadavid, Sebastien Caillat, Stanislas Pietrzyk, Jacques Blondin, Bernard Baudoin, 2007, "Coal Combustion Modelling of Large Power Plant, for NO_x Abatement," *Fuel*, Vol. 86, pp. 2213~2220.
- (6) Kokkinos, A., Wasyluk, D., Brower, M. and Barna, J.J., 2000, "Reducin NO_x Emissions in Tangentially- Fired Boilers-A New Approach," *ASME International Joint Power Generation Conference*, Miami, Florida, U.S.A.
- (7) Ki-Tae Kang, Ju-Hun Song, Min-Ji Yoon, Byoung-Hwa Lee, Seung-Mo Kim, Young-June

- Chang, Chung-Hwan Jeon, 2009, "A Numerical Study on the Effects of SOFA on NO_x Emission Reduction in 500MW Class Sub-bituminous Coal-Fired Boiler," KSME, In press.
- (8) Laux S, Grusha J., 2003, "The Benefits of Coal/Air Flow Measurement and Control on NO_x Emission and Boiler Performance," *Powergen Europe Düsseldorf*, Germany.
- (9) Warsi, Z.V.A., 1981, "Conservation form of the Navier-Stokes Equations in General Nonsteady Coordinates," *AIAA Journal*, Vol. 19, pp.240~242.
- (10) El Tahry, S.H., 1983, "The k- ϵ Equation for Compressible Reciprocating Engine Flows," *AIAA, J. Energy*, Vol. 7(4), pp.345~353.
- (11) Siegel, R., Howell, J., 1992, "Thermal Radiation Heat Transfer," Hemisphere Publishing, Washington.
- (12) Kobayashi H., Howard J.B., Sarofim A.F., 1977, "Coal Devolatilization At High Temperatures," *16th Symp. (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 411~425.
- (13) Field M.A., Gill D.W., Morgan B.B., Hawksley P.G.W., 1967, "Combustion of Pulverized Coal," *The British Coal Utilization Research Association*, Leatherhead, England.
- (14) Magnussen B.F., Hjertager B.W., 1981, "On the Structure of Turbulence and a Generalized Eddy Dissipation Concept for Chemical Reaction in Turbulent Flow," *19th AIAA Aerospace Meeting*, St. Louis, USA.
- (15) Goetz, G. J., Nsakala, N. Y., Patel, K. L., Lao, T.C., 1982, "Combustion and Gasification Kinetics of Chars from Four Commercially Significant Coals of Varying Rank," *Second Annual Conference on Coal Gasification*, EPRI, Palo Alto, CA.
- (16) Ubhayakar S.K., Stickler, D.B., Von Rosenberg C.W, Gannon, R. E., 1976, "Rapid Devolatilization of Pulverized Coal in Hot Combustion Gases," *16th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, pp.427.
- (17) Miller, J. A., Bowman C. T., "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion," 1989, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 15, pp. 287~338.
- (18) De Soete, G.G., 1975, "Overall Reaction Rates of NO and N₂ Formation From Fuel Nitrogen," *15th Symp. (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1093~1102.
- (19) De Soete, G.G., 1990, "Heterogeneous N₂O and NO Formation from Fuel Bound Nitrogen Atoms During Coal Combustion," *23rd Symp. (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1257~1264.
- (20) Charles R. Monson, Geoffrey J. Gernane, Angus U. Blackdam, L. Douglas Smoot, 1995, "Char Oxidation at Elevated Pressures," *Combustion and Flame*, Vol. 100, pp. 669~683.