

접선연소식 보일러에서 미분탄 연소 시 공기 배분의 영향에 대한 전산해석연구

강기섭 · 류창국[†]

성균관대학교 기계공학부
16419 경기도 수원시 장안구 서부로 2066
(2016년 10월 15일 접수, 2017년 5월 9일 수정본 접수, 2017년 5월 22일 채택)

Numerical Simulation on the Effects of Air Staging for Pulverized Coal Combustion in a Tangential-firing Boiler

Kieseop Kang and Changkook Ryu[†]

School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, 2066, Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon, Gyeonggi, 16419, Korea
(Received 15 October 2016; Received in revised form 9 May 2017; accepted 22 May 2017)

요 약

본 연구는 560 MWe급 접선연소식 미분탄 보일러에서 공기단계연소에 의한 연소 및 NOx 배출 특성과 슬래깅성에 대하여 분석한 것이다. 이를 위해 고급 석탄 연소 모델이 적용된 전산유체역학(CFD) 시뮬레이션을 이용하여 전체 연소공기의 당량비(SR)는 1.2로 고정하고, 버너 영역의 SR을 0.94에서 0.995까지 변화시켰다. 공기 배분의 변화에 따라 버너 영역 및 열교환기의 온도 및 전열량 분포가 변하지만 보일러의 전체 효율은 거의 동일하게 나타났다. 버너 영역의 SR이 0.94로 낮아지면 Fuel NOx의 생성이 억제되어 절탄기 출구 NOx 배출량은 20% 감소하나, 미연분과 슬래깅성에는 큰 영향이 나타나지 않았다. 따라서, 이 보일러에서 NOx 배출 저감을 위해 공기배분을 조절하여 버너 영역의 SR를 낮추고 상부연소공기(OFA)의 값을 높여 운전하는 것이 타당함을 확인하였다.

Abstract – This study investigated the influence of air staging on combustion and NOx emission in a tangential-firing boiler at a 560 MWe capacity. For air staging, the stoichiometric ratio (SR) for the burner zone was varied from 0.995 to 0.94 while the overall value was fixed at 1.2. The temperature and heat flux in the burner zone and upper furnace corresponded to the distribution of SR, while the total boiler efficiency remained similar. The NOx emission at the furnace exit was reduced by up to 20% when the SR in the burner zone decreased to 0.94. However, the amount of unburned carbon and slagging propensity was not noticeably influenced by the changes in the SR of the burner zone. Therefore, it was favorable to lower the SR of the burner zone for reduction of NOx emission.

Key words: Tangential-firing boiler, Computational fluid dynamics, Air-staging combustion, NOx, Slagging

1. 서 론

석탄 및 천연가스 등의 화석연료를 사용하는 화력발전은 최근의 원자력 및 재생에너지에 대한 관심에도 불구하고, 전세계 발전 설비 용량에서 지속적으로 높은 비중을 차지할 것으로 예상된다. 따라서, 화력발전의 연료 청정화, 발전 효율 향상 등과 같은 기술 혁신이 필요하다[1]. 이 중 석탄 연소 후 발생하는 배출물 중의 하나인 질소산화물(NOx)은 광화학 스모그와 산성비, 미세먼지의 기여 요인으로서 저감기술의 향상이 필수적이다[2].

본 연구는 대형 미분탄 보일러에서 공기 배분을 제어하는 단계적 연소를 통한 NOx 저감 방식과 이에 따른 연소 및 열전달, 슬래깅 특성 등 설비 영향을 분석하기 위한 것이다. 공기단계연소(air staged combustion)는 연소영역의 공기 배분의 제어를 통해 주연소 영역에서 환원 분위기 형성을 통해 NOx 생성을 억제한 후 충분한 공기를 추가 공급하여 완전연소를 하는 방법으로서 운전 중인 보일러에 적용이 용이하다는 장점을 가지고 있다[3,4]. 발전용 미분탄 보일러에 공기단계연소를 적용하기 위해 OFA (over-fire air) 포트가 설치되어 있으며, 위치에 따라 CCOFA (close coupled OFA)와 SOFA (separated OFA)로 구분한다. 이를 통해 버너에 대한 높이별로 적용하여 연소를 제어하게 된다.

석탄 연소 시 공기 단계 연소와 다양한 인자에 대한 NOx 저감 관련 연구는 다양한 실험 및 해석적인 방식을 통해 이루어졌다. 시험규모의 연소로를 이용한 연구는 공기량 투입위치, 당량비, 공기

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: cryu@me.skku.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

단계연소와 비단계연소 비교 등에 따른 분석이 수행되었다[5-10]. 이 중 Chae 등은 6.6 kW 및 2.5 MW의 연소로에서의 실험을 통해 NOx의 농도는 당량비보다는 연료농후의 환원영역의 조건에 의존되고 0.8~0.9일 때 가장 양호하며 연소성이 좋음을 보고하였다. 이때 환원영역의 온도가 950 °C 이상에서 50%의 저감 효과를 나타내었다[5]. Jang 등은 1MWth 연소로에서 실험 결과 다단공기량이 증가할수록 NOx가 저감됨을 확인하였다. 이때 다단공기 공급량은 전체 공기량의 40%가 되어야하며 배기가스 재순환으로 인한 NOx 저감은 재순환량이 전체 30%이고 2차, 3차 공기에 균등하게 배분한 조건에서 최대 42% 효과를 얻었다[6]. Yang 등은 70 kW 연소로에서 미분탄 연소시 air staging 연소 기술을 통하여 당량비를 0.65까지 낮춘 경우 최대 70%까지 저감되는 것을 확인하였다[7].

상용급 연소로에 대한 연구에서는 주로 CFD를 통하여 다단연소를 통한 NOx 저감에 대한 연구가 진행되었다[11-17]. Bris 등은 500 MW 규모의 접선연소식 보일러에서 버너부와 OFA 공기량을 변화시킨 조건을 분석한 결과 버너부 공기량을 10% 적게 투입한 조건에서 약 70 ppmv 정도가 낮은 결과를 보였다[11]. Li 등은 300 MW 접선연소식 보일러에서 OFA의 공기량 변화 따른 NOx 배출 및 연소특성을 연구한 결과 2차공기의 맵퍼가 국부적으로 100, 50, 25% 개도되고 CCOFA를 20%, SOFA 50% 개도된 조건에서 보일러 효율은 0.21% 줄어들었지만 NO 저감은 44%에 이르는 결과를 확인하였다[12].

또한 석탄 연소 시 발생하는 슬래깅에 관한 다양한 연구가 진행되었다[22-25]. 슬래깅은 용융된 회분이 노 벽에 부착된 것으로 전열량의 감소와 부식의 원인이 되므로 운전조건 변화에 따른 영향을 파악하는 것이 필요하다.

Barnes는 미분탄 연소 시 회가 용융되어 발생하는 슬래깅 파울링에 대한 내용을 연구하였다. 또한 슬래깅과 파울링에 대한 정의와 다양한 분석 방법을 통한 회분의 조성을 파악하여 슬래깅 및 파울링 생성 매커니즘에 대해 정리하였다[18-21]. Scott은 석탄의 회분의 특성에 대해 실험적인 연구 결과를 토대로 회분 조성 및 용점 등을 통해 슬래깅 인자를 계산할 때 사용되는 조성간의 상관관계 등을 통한 슬래깅 계산 할 때 사용되는 조성의 점성 등을 정리하였다[23].

Wang 등은 85 MW 연소로에서 실험과 전산 해석연구에 회부착 모델을 적용하여 입자 충돌 속도, 입자 점착, 회부착 성장에 대하여 실험 데이터와 비교 검증하였다[24].

Srinivasachar 등은 실험실 규모의 연소로에서 관성 부착(inertial impaction)에 대한 연구를 진행한 결과 임계점도 범위에 따른 슬래깅 정도와 입자 충돌율 등을 계산하여 실험과 유사한 값을 증명하였다[25]. Modlinski는 380, 430 MW 용량의 두 미분탄 보일러에 대해 부착 모델(충돌 입자의 부착 확률)을 전산유동해석에 적용하였다. 이를 통해 실험 데이터와 회분 입자 충돌, 침적 두께, 열저항, 슬래그 표면 온도 등을 비교 하였고 실제 실험과 유사한 결과를 얻었다[26].

본 연구에서는 국내 560 MWe급 접선 연소식 석탄화력 보일러를 대상으로 공기단계연소에 대한 전산유동해석(CFD)을 수행하였다. NOx 배출을 억제시키는 가장 대표적인 연소 개선법인 공기단계연소에 의한 영향을 확인하고자 버너와 OFA (over fire air) 당량비를 변경하여 연소특성, 전열량 분포 슬래깅성의 변화를 NOx 농도와 함께 비교 분석하였다.

2. 연구 방법

2-1. 대상 보일러

Fig. 1은 본 연구 대상인 560 MWe급 미분탄 보일러의 구조이다. 보일러는 초임계압, 관류형 보일러로서 화로(furnace)의 6개 버너에서 연소되고 미분탄 연소가스는 화로 상부의 각종 전열 관군, 즉 복사 과열기(division superheater), 최종 재열기(final reheater), 최종 과열기(final superheater), 재열기(reheater), 절탄기(economizer)를 거치며 열교환을 이루게 된다. 연소장치 구성에서 미분탄 버너들은 보일러의 4개 코너에 6개씩 총 24개가 설치되어 있고 미분탄 버너 상하로 각종 연소용 2차 공기 노즐이 설치되어 있다. 미분탄 버너는 하단부터 상단으로 A, B, C, D, E, F로 호칭된다. 각 코너에서 분사된 석탄-공기 혼합물은 화로 중앙부에 화구(fireball)를 형성하며 보일러 상부에서 볼 때 시계방향으로 선회한다. 버너영역 상부에는 미연성분의 연소를 위한 6개의 공기 노즐(SOFA, separated OFA)이 설치되어 있다.

전산해석을 위한 격자는 약 186만개로 구성하였으며 버너 영역 코너의 일부만 사면체 셀을 사용하고 나머지는 육면체 셀을 사용하였다.

2-2. 운전 조건

Table 1은 석탄 연료 분석 결과로서 일정 기간 동안 운전한 데이

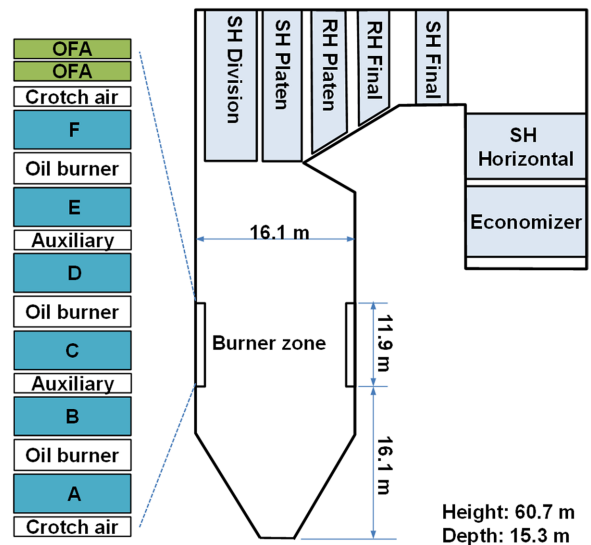


Fig. 1. Schematic of 560 MWe tangential-firing boiler.

Table 1. Fuel properties of coal

Analysis		Value
Proximate analysis (wt% air-dry)	Volatile matter	34.09
	Fixed carbon	47.89
	Inherent moisture	5.19
	Ash	12.83
Ultimate analysis (wt% daf)	C	83.11
	H	5.48
	O	9.31
	N	1.69
	S	0.38
HHV (MJ/kg)		28.14

Table 2. Simulation cases with changes in stoichiometric ratio of the burner zone and OFA

Case	Burner zone	OFA
1	0.995	0.125
2	0.98	0.14
3	0.96	0.16
4	0.94	0.18

터를 취합하여 평균한 자료이다. 총 수분(Total moisture) 함량은 12.5%이며, 기진 기준 수분 5.19%, 휘발분 34.09%, 회분 12.83%이다. 가연분 내 N 함량은 1.69%, 고위발열량은 28.14 MJ/kg이다.

Table 2는 해석조건을 정리한 것이다. 석탄 투입량은 53.35 kg/s으로서, 고위발열량 기준 입열량은 1501 MW_{th}이다. 각 경우별 총당량비는 1.12 (과잉공기비 12%)로 고정하고, 버너 영역의 당량비를 0.94~0.995의 범위에서 변경시킨 4가지 조건을 설정하였다. 당량비 변화에 따른 버너부의 공기 투입량은 미분기를 통해 석탄 이송에 사용되는 1차 공기를 고정하고 2차 공기를 조절하였다. 당량비 0.995는 OFA를 최소화하고 있는 현재의 운전조건을 의미하며, 각 조건에 따라 OFA 영역의 당량비는 0.18~0.125의 범위가 된다. 버너 영역의 당량비는 최저 0.85까지 낮출수 있는 것으로 알려져 있으나, 환원 분위기가 커질 경우 대상 설비 노후화에 따른 부식 증가 가능성을 고려하여 운전에 무리가 없는 범위를 설정하였다.

2-3. 해석 방법

Table 3은 해석에 사용된 모델을 정리한 것이다. 전산유동해석은 ANSYS FLUENT ver 14.5를 사용하였다. 석탄 입자는 Lagrangian method를 적용하여 개별입자(10구간, 10~182 μm, 평균 55 μm)의 거동과 연소반응, 열전달 등을 반복적으로 계산한 뒤 기체상(gas phase)에 대한 생성항으로서 적용하였다. 석탄 입자의 탈휘발 속도와 휘발분 조성은 PCCoalLab의 FLASHCHAIN을 이용하여 해석한 뒤 user-defined function (UDF)를 통해 입력 조건으로 설정하였다[27]. 좌 연소 반응은 고온 분위기에서 입자내 탄소 코어 크기의 점진적인 감소와 표면의 회분층 형성에 따른 가스 확산의 저하를 고려할 수 있는 unreacted core shrinking model (UCSM)을 적용하였다[28]. 가스의 연소 반응은 Jones-Lindstedt mechanism[29]을 사용하였고, 유동에 의한 가스 반응속도의 영향을 고려하기 위해 kinetic rate/eddy dissipation model을 적용하였다[30]. 난류는 제트와 선회류

등 복잡한 유동에 대해 높은 신뢰성과 수렴성을 갖는 Realizable k-ε model을 적용하였다. 복사열전달은 구분중좌법을 이용하였으며, 가스의 흡수계수는 회색기체가중합법(weighted sum of gray gases model)으로부터 계산하였다.

각 조건별 NO_x 배출 특성은 연소해석 결과에 대해 Fuel NO_x와 Thermal NO_x를 고려하여 분석하였다. 이때, 휘발분에 포함된 N이 HCN과 NH₃로 전환되는 비율은 석탄 5:1로 가정하였고, 최의 경우 모두 NO로 산화되는 것으로 보았다.

슬래깅성의 분석은 개별적인 입자 추적에 따른 과도한 소요시간을 줄이기 위해 연소해석 과정에서 이미 도출된 회분의 평균적인 농도 분포와 가스 온도, 속도 벡터를 이용하여 단순화하였다. 각 벽면 셀에 부착되는 회분의 양(\dot{m}_{dep} [kg/m²s])은 아래와 같이 회분 농도 (C_{ash} [kg/m³])와 벽면에 수직인 속도(V_{normal} [m/s])를 곱한 회분의 무게에 부착 효율(η_{stick})을 곱하여 구할 수 있다.

$$\dot{m}_{dep} = \dot{m}_{ash} \eta_{stick} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{ash} = V_{normal} C_{ash} \quad (2)$$

부착효율은 기존의 여러 연구에서 타당성을 보인 회분의 온도에 따른 점성을 기준으로 계산하였다[31].

$$\eta_{stick} = \begin{cases} 1 & \text{if } \mu_p < \mu_{crit} \\ \mu_{crit} / \mu_{p,i}(T_p) & \text{if } \mu_p > \mu_{crit} \end{cases} \quad (3)$$

회분의 점성은 측정된 조성으로부터 Kalmanovich와 Frank의 상관식을 이용하여 아래와 같이 결정하였다[32].

$$\mu = 2.22 \times 10^{-11} T \exp(36.9835 \times 10^3 / T) \quad (4)$$

또한, 회분의 부착성을 결정하는 기준 점성인 μ_{crit} 는 10⁵ Pa.s로 보았다[33]. 이때의 회분 온도는 1280 °C가 되므로, 고온인 버너 영역에서는 거의 1에 가까운 부착효율을 보이게 된다. 이때 \dot{m}_{dep} 는 단위시간 및 면적당 부착량을 의미하나 단순화된 기법을 통한 분석이므로 슬래깅 경향을 정성적으로만 비교하는 것이 타당하다.

3. 해석 결과

3-1. 유동 및 온도 분포

Fig. 2는 당량비 변화에 따른 유선분포를 나타낸 것이다. 점선 연소식 보일러 특징으로 버너 영역과 OFA 부근에 걸쳐 크게 선회류

Table 3. Submodels adopted in CFD simulations

Element	Sub-model
Particle tracking	Discrete phase model / turbulent stochastic tracking
Devolatilization	FLASHCHAIN (UDF) - Volatiles: Tar 56.1%, H ₂ 0.18%, CH ₄ 2.8%, C _x H _y 1.83%, CO 1.3%, CO ₂ 2% H ₂ O 3.8% - Rate: A= 4.09e+05 1/s, E= 71.34 MJ/kmol
Char conversion	Unreacted Core Shrinking Model (UDF)
Chemical reactions	· Species: Tar, CO, CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , C _x H _y , SO ₂ , O ₂ , N ₂ · Global reaction scheme: Jones-Lindstedt mechanism · Reaction rate: kinetic-rate/eddy-dissipation-rate model
Turbulence	Realizable k-ε model
Radiation	Discrete ordinate method Weighted sum of gray gases model
NO _x	Thermal NO _x : Extended Zeldovich mechanism Fuel NO _x : De Soete mechanism
S/H, R/H tube bundles	Porous media with flow resistance and local heat absorption (UDF)

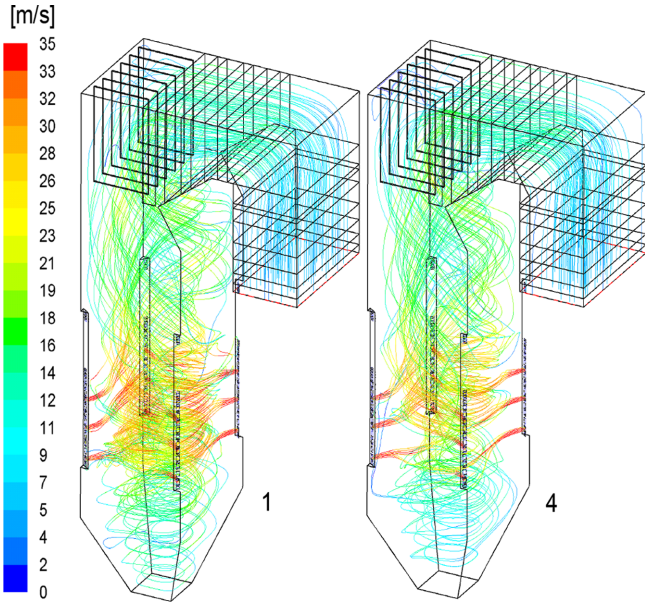


Fig. 2. Pathline of gas flow from burners A, C and E for Cases 1 and 4.

는 화구(fireball)가 형성된다. 또한 버너 하단부(coal A level)에서 빠져 나가는 유선은 보일러 하부로 하강하고 선회한 뒤, 다시 상승하면서 화구의 중심부를 통과하게 된다. 유동이 크게 발달함에 따라 연료와 공기의 혼합이 잘 이루어져 화염이 고르게 분포하게 된다. 버너 영역의 당량비를 낮추었을 때 Case 1 보다 온도 분포가 점차 낮아지고 이에 따라 속도가 감소하나 유동 형태의 차이는 크지 않았다.

Fig. 3은 화로 내 온도 분포를 비교한 것이다. 연소로 중앙의 수직단면에서는 화구의 바깥쪽에서 벽면 사이에 고온부가 나타나며, 화구의 중심은 로 하부로 선회하면서 온도가 하락한 유동이 다시 상승하면서 진입하기 때문에 온도가 낮다.

미분탄을 포함한 유동이 시계방향으로 회전하면서 인접한 코너에서 공급된 연소공기와 만나 혼합하면서 각 코너에 1400 °C 이상

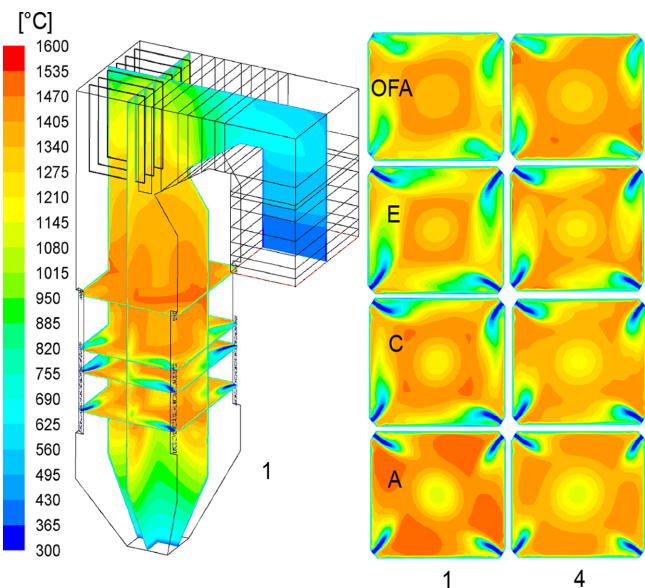


Fig. 3. Contours of gas temperature for Cases 1 and 4.

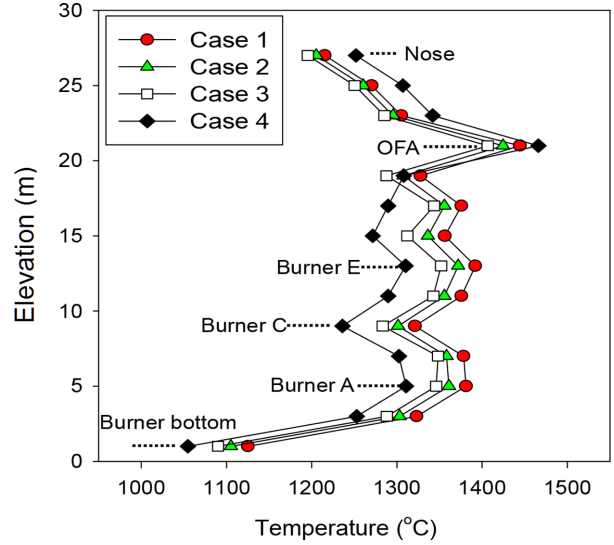


Fig. 4. Average temperature profile along the furnace height.

의 높은 온도가 나타난다.

Fig. 4는 수평 단면에서의 평균 온도 분포를 비교한 것이다. 버너 영역 당량비가 감소함에 따라 점진적으로 온도가 하락한다. 이에 따라 Case 4의 경우 Case 1 대비 최대 80 °C 까지 온도가 감소하였다.

반면, OFA가 공급된 이후 미연분의 추가적인 연소가 진행됨에 따라 Case 4의 온도가 가장 높게 상승하였다. 이는 화분 입자의 온도를 높여 상부의 관군부에 부착되는 고온 파울링의 증가로 이어질 수 있다. 로 상부의 노즈(nose) 부분의 온도는 Case 4의 경우 1250 °C 로서 다른 경우들에 비해 50 °C 이상 높게 나타난다. 따라서 버너단의 주입 각도를 하향하여 화구의 높이를 낮추고 로 하부의 전열량을 증가시켜 상부의 온도를 감소시킬 필요가 있다.

3-2. 화학종 분포

Fig. 5는 연소로 중앙 수직단면과 주요 수평단면의 O₂ 농도를 나

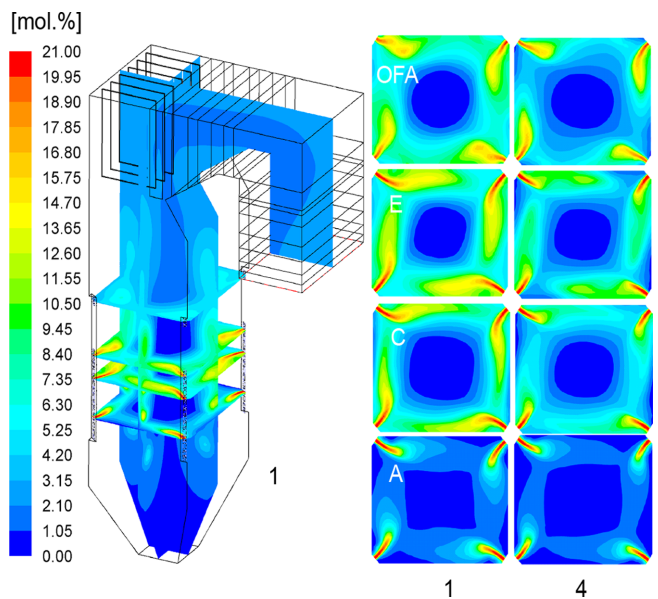


Fig. 5. Contours of O₂ concentrations for Cases 1 and 4.

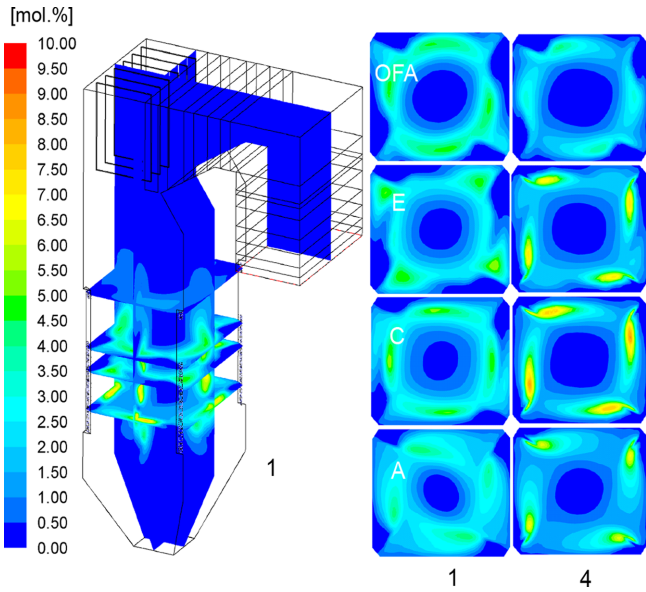


Fig. 6. Contours of CO concentrations for Cases 1 and 4.

타낸 것이다. 연소 공기는 버너 영역에서 제트 형태로 공급되기 때문에 선회류의 바깥쪽을 따라 국부적으로 O₂ 농도가 높고, 연소로 하부에서 화구의 중심부로 이어지는 상승 유동을 따라 낮은 농도를 보인다. 10% 이상 높은 O₂ 농도가 유지되는 영역은 Case 1에서 가장 넓다.

O₂ 농도는 가연분의 연소반응 뿐 아니라 연료에서 생성된 HCN, NH₃의 NO로의 산화나, 생성된 NO의 N₂로의 환원반응에 영향을 주게 된다. 따라서 화구 외부의 NO의 O₂ 과잉 영역에서는 Fuel NOx의 생성이 화구 내부에서는 NO의 환원반응이 일어나며 Case 4의 환원반응 영역이 더 넓게 된다. 이에 대해서는 후술하였다.

Fig. 6은 연소로 중앙 수직단면에서의 CO 농도를 나타낸 것이다. CO는 버너 영역에서 화구 외곽의 화염체트를 따라 연료 입자의 탈휘발과 촉의 산화로 인해 급격히 생성되면서 높은 농도를 보인다.

이후 지속적인 선회에 의한 혼합과 반응이 계속 진행되고, OFA의 공급에 따라 점차 농도가 감소하며 사라지게 된다. 특히 버너 영역 당량비가 0.94로 감소한 Case 4에서 가장 높은 CO 농도가 나타난다.

3-3. 촉 반응 속도 및 미연탄소

Fig. 7은 당량비 변화에 따른 촉의 반응 속도를 나타낸 것이다. 촉의 반응은 화구의 선회류를 따라 화로 벽면 부근에서 빠르게 진행된다. 반면, 화구의 중심부는 버너 하단부에서 입자가 상승하면서 연소로 하부를 거치는 특징 때문에 긴 체류시간을 통해 촉 반응이 종료된 입자가 진입하므로 촉 전환반응이 일어나지 않는다. 또한 연소로 상부의 과열기 패널에 이르기 전에 촉 반응이 실질적으로 종료되어 미연탄소의 문제가 발생하지 않을 것으로 예상된다.

Fig. 8은 촉 반응 속도의 정량적인 비교를 위해 높이별로 각 수평 단면에서의 면적평균 값을 비교한 것이다. Case 4는 Case 1 대비 버너 영역의 촉 반응속도는 낮지만, OFA 공급 시점 이후 빠르게 진행되어 전체적인 형태가 유사하다. Case 4의 경우 버너 영역 당량비가 낮아 촉 산화반응 비율은 92.5%로 Case 1의 96.0%에 비해 감소하나 CO₂와 H₂O에 의한 촉 가스화 반응 반응이 증가하면서 전

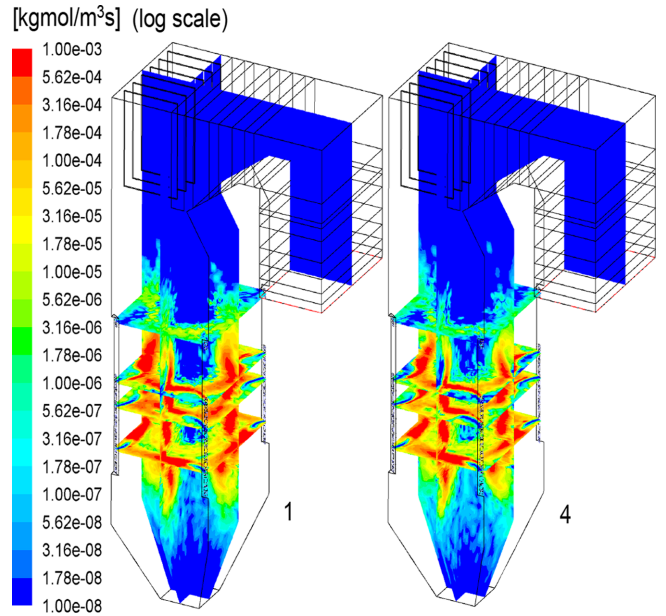


Fig. 7. Char conversion rate for Cases 1 and 4.

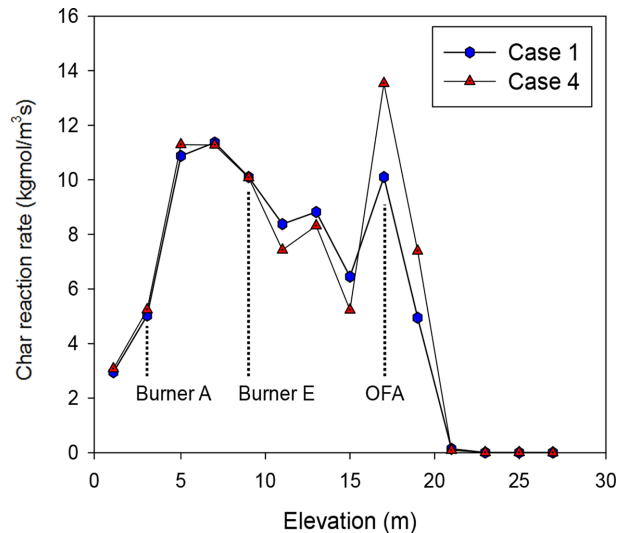


Fig. 8. Char reaction rate along the furnace height.

체적인 반응속도의 차이가 감소하는 것으로 분석되었다. 따라서 Fig. 9와 같이 당량비 분포 변화에 따른 미연분 농도는 두 연소조건에 따라 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

3-4. 벽면 열유속 및 전열량 분포

Fig. 10은 당량비 변화에 따른 벽면 열유속 분포를 나타낸 것이다. 벽면 총 열유속은 복사와 대류 열유속의 합으로, 입자(촉, 회분)를 포함하여 고온의 유동이 벽면에 인접할 때 국부적으로 높은 분포를 나타낸다. 버너 부근에서는 한 코너에서 벽면을 따라 출발한 공기와 연료입자가 제트의 선회류를 따라 인접한 코너의 벽면으로 접근하기 때문에 4개의 벽면 모두에서 250 kW/m² 이상 높은 지점이 한쪽 코너로 치우쳐 나타난다. 반면 버너영역 상부에서는 코너의 제트가 존재하지 않고 원형의 균일한 선회류가 벽면에 접근하기 때문에 중앙 부분에서 열유속이 높게 된다.

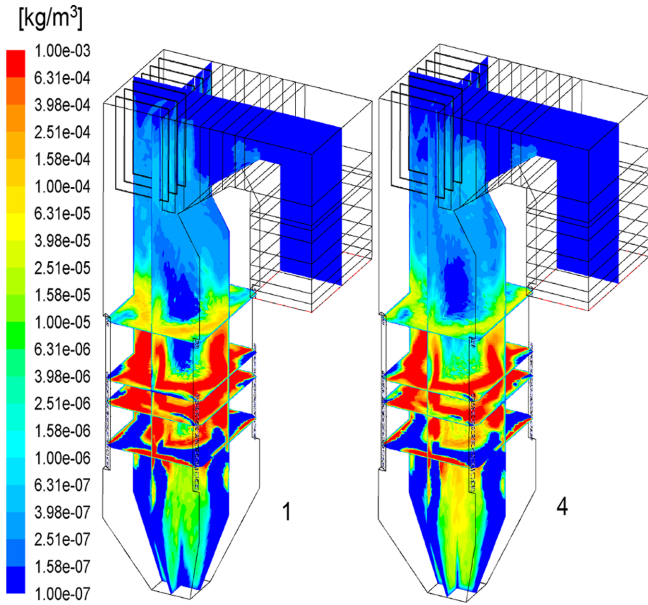


Fig. 9. Unburned carbon concentration for Cases 1 and 4.

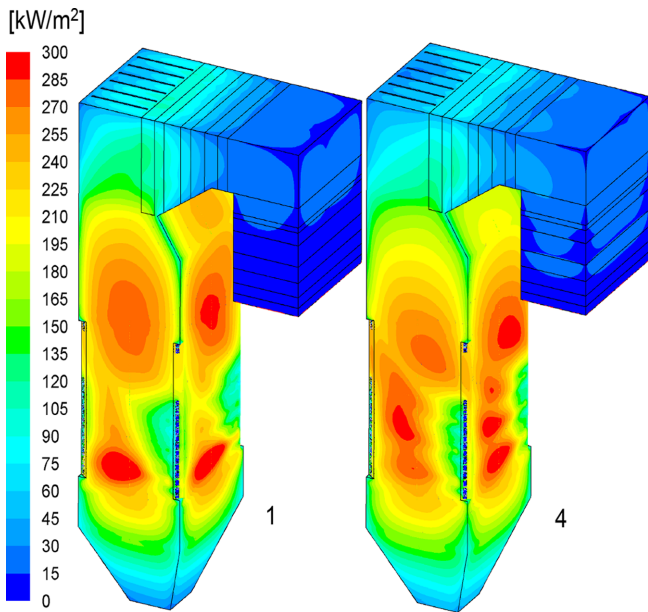


Fig. 10. Total heat flux on the wall in Cases 1 and 4.

Fig. 11은 당량비를 변경하였을 때 각 열교환기 별 전열량을 나타낸 것이다. 당량비를 낮추었을 경우 버너 영역 온도의 하락과 이에 따른 복사열전달의 감소로 인해 점진적으로 낮아져, Case 4의 경우 Case 1과 비교하여 15 MW_{th} 정도 감소하는 것으로 나타났다. 반면, 상부의 관군부 및 backpass에서 흡수량이 반대로 증가하게 되는 경향을 나타낸다. 그 결과, 전체 전열량 또는 보일러 열효율에는 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나, 후단 열교환기에서의 전열량 증가는 과열기 및 재열기 출구의 스팀 온도를 높여 이를 제어하기 위한 spray water의 유량이 증가하는 등 보일러 운전에 영향을 줄 수 있다. 따라서, 전술한 바와 같이 접선연소 보일러의 장점인 버너 각도의 제어를 통해 화구의 위치를 낮춤으로써 하부에서의 전열량을 증가시키고 상부의 온도를 감소시킬 필요가 있다.

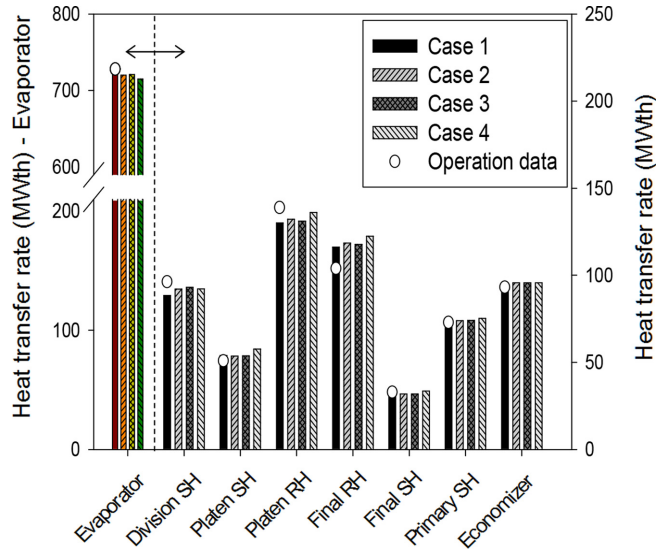


Fig. 11. Distribution of heat transfer rate on heat exchangers.

3-5. NO 농도 변화

Table 4는 보일러 출구에서의 NO 농도를 비교한 것이다. 실제 운전 자료는 160~216 ppm의 범위에서 평균 178 ppm를 보였으며, Case 1에 대한 해석 결과는 169 ppm으로서 타당한 결과를 보였다. Case 1에서 버너 영역 당량비를 낮춘 경우 132 ppm까지 최대 34%가 저감되어 매우 효율적인 NO 저감 방식임을 확인하였다.

Fig. 12는 Fuel NO 반응속도를 비교한 것이다. Fuel NO는 Thermal NO에 비해 지배적인 생성기작으로서 총 NO 생성량의 95% 정도를 차지하였다. 그림에서 양(+)의 반응속도는 NO의 생성,

Table 4. NO concentration (ppm, 6%O₂) at the furnace exit

Case	1	2	3	4
Measured	178 (160-216)	-	-	-
Predicted	169	153	150	132

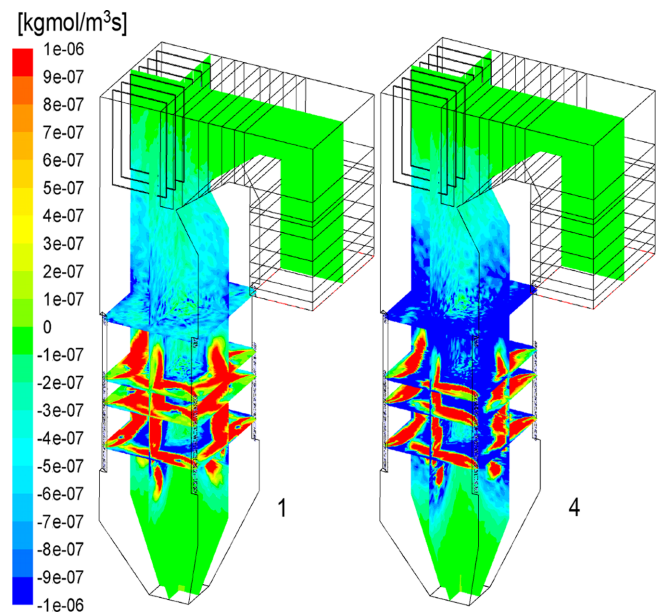


Fig. 12. Reaction rate of Fuel NO for Cases 1 and 4.

감 사

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20131010101830).

References

1. Seo, S. I., Park, H. Y. and Lee, S. N., "Computational Studies on the Combustion and Thermal Performance of the Coal Fired Utility Boiler : Temperature and Thermal Energy Distribution," *Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng.*, **21**, 157-166(2009).
2. Okazaki, K. and Ando, T., "NOx Reduction Mechanism in Coal Combustion with Recycled CO₂," *Energy*, **22**, 207-215(1997).
3. Man, C. K., Gibbins, J. R., Witkamp, J. G. and Zhang, J., "Coal Characterization for NOx Prediction in Air-Staged Combustion of Pulverized Coals," *Fuel*, **84**, 1290-1295(2005).
4. Molina, A., Eddings, E. G., Pershing, D. W. and Sarofim, A. F., "Char Nitrogen Conversion: Implication to Emissions from Coal-Fired Utility Boilers," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **26**, 507-531(2000).
5. Chae, J. O., Chun, Y. N. and Yi, U. Y., "A Study of NOx Reduction in Stage Combustion," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, **17**, 1556-1571(1993).
6. Jang, G. H., Chang, I. G., Jeoung, S. Y., Sun, C. Y. and Chon, M. H., "An Experiment Study on NOx Reduction in Pulverized Coal Combustion," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, **1**, 724-729(1999).
7. Yang, J., Sun, R., Sun, S., Zhao, N., Hao, N., Chen, H., Wang, Y., Guo, H. and Meng, J., "Experimental Study on NOx Reduction from Staging Combustion of High Volatile Pulverized Coals. Part 1. Air Staging," *Fuel Process. Technol.*, **126**, 266-275(2014).
8. Fan, W., Lin, Z., Kuang, J. and Li, Y., "Impact of Air Staging along Furnace Height on NOx Emissions from Pulverized Coal Combustion," *Fuel Process. Technol.*, **91**, 625-634(2010).
9. Jang, G. H., Chang, I. G., Sun, C. Y., Chon, M. H., and Yang, G. M., "Effect of Air Staging on NOx Reduction in Pulverized Coal Combustion," *J. Korean Soc. Combust.*, **1**, 149-154(1999).
10. Sung, Y. M., Moon, C. H., Eom, S. Y., Choi, G. M., and Kim, D. J., "Coal-particle Size Effects on NO Reduction and Burnout Characteristics with Air-staged Combustion in a Pulverized Coal-fired Furnace," *Fuel*, **182**, 558-567(2016).
11. Bris, T. L., Cadavid, F., Caillat, S., Pietrzyk, S., Blondin, J. and Baudoin, B., "Coal Combustion Modelling of Large Power Plant, for NOx Abatement," *Fuel*, **86**, 2213-2220(2007).
12. Li, S., Xu, T., Hui, S., and Wei, X., "NOx Emission and Thermal Efficiency of a 300 MWe Utility Boiler Retrofitted by Air Staging," *Appl. Energy*, **86**, 1797-1803(2009).
13. Diez, L. I., Corte, C., and Pallare, J., "Numerical Investigation of NOx Emissions from a Tangentially-fired Utility Boiler under Conventional and Over Fire Air Operation," *Fuel*, **87**, 1259-1269(2008).
14. Seo, S. I., Park, H. Y., Kang, D. S. and Jeong, D. H., "Combustion Characteristics of Coal-Fired Boiler Depending on the Variations in Combustion Air Supply Method," *Energy Eng. J.*, **19**, 156-162(2010).
15. Yoon, M. J., Lee, B. H., Song, J. H., Kim, G. B., Chang, Y. J. and Jeon, C. H., "Numerical Study of the Optimization of Com-

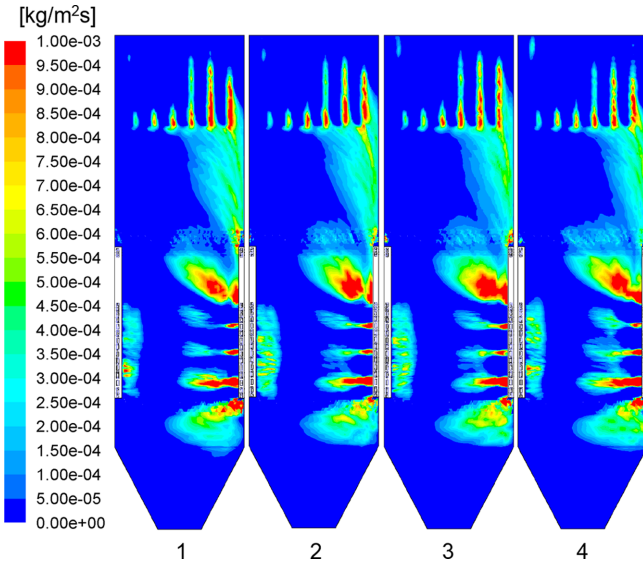


Fig. 13. Contours of ash deposition for Cases 1~4.

음(-)의 값은 NO의 환원을 의미한다. 버너 영역에서는 미분탄 입자로부터 방출된 HCN, NH₃ 및 화-N의 산화에 의해 NO가 빠르게 생성된다. 반면, 산소 농도가 낮은 화구 내부 및 버너 영역의 상부에서는 NO가 느리게 환원되는 것을 알 수 있다. Case 4는 버너 영역의 당량비 감소에 따라 Case 1 대비 NO의 환원 영역이 크게 확장된 것을 알 수 있다.

3-6. 슬래깅 경향성 비교

Fig. 13은 당량비 변화에 따른 벽면의 슬래깅성을 비교한 것이다. 분석 결과 보일러 내 형성된 선화하는 유동으로 인하여 버너영역의 벽면 및 상부의 코너를 중심으로 부착됨을 알 수 있다. 당량비 변화에 따라 전체적인 유속과 온도 분포가 변하게 되나, 슬래깅 경향성은 조건별로 큰 차이가 나타나지 않았다.

4. 결 론

본 연구에서는 점선연소식 상용 미분탄 보일러에서 버너와 OFA의 당량비 변화에 따른 NO의 저감 특성과 연소, 열전달, 미연탄소 및 슬래깅 경향성의 영향에 대해 CFD를 통해 분석하였다. 주요 결론은 아래와 같다.

- (1) 버너 영역의 당량비를 0.995에서 0.94까지 감소시킨 결과 최대 26%까지 NO 배출량의 저감이 가능함을 확인하였다.
- (2) 당량비를 0.94로 감소시킨 경우 버너 영역의 온도는 평균 80 °C 정도 낮아지고, OFA 상부에서는 50 °C 정도 증가하게 된다.
- (3) 그 영향으로 전열량 분포도 연소실 벽면에서 15MWth 정도 감소하고 후단 관군부에서 증가하게 되나 전체 전열량은 유사하였다.
- (4) 버너 영역의 당량비를 낮추는 경우 고온 과열링의 저감을 위해 연소실 상부의 온도를 하락시키고 전열량 분포의 변화를 최소화하기 위해서는 버너 각도의 하향이 필요함을 확인하였다.
- (5) 당량비 분포의 변화는 대상 보일러의 유동 특성으로 인해 미연탄소의 배출량 및 슬래깅 경향성에 큰 영향을 주지 않았다.

- bustion and Emission Characteristics of Air-staged Combustion in a Pulverized Coal-fired Boiler? *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, **34**, 587-597(2010).
16. Kokkinos, A., Wasyluk, D., Brower, M. and Barna, J. J., "Reducing NOx Emissions in Tangentially-Fired Boilers - A New Approach," ASME International Joint Power Generation Conference, 2000.
 17. Kang, K. T., Song, J. H., Yoon, M. J., Lee, B. H., Kim, S. M., Chang, Y. J. and Jeon, C. H., "A Numerical Study on the Effects of SOFA on NOx Emission Reduction in 500 MW Class Sub-bituminous Coal-fired Boiler," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, **11**, 858-868(2009).
 18. Lee, S. H., Park, S. C., Yim, Y. J. and Kim, H. T., "A Study on the Deposit Formation of Coal Ash," *Korean Chem. Eng. Res.*, **34**(1), 8-16(1996).
 19. Lee, S. H., Lim, H., Kim, S. D. and Jeon, C. H., "A Study on Ash Fusibility Temperature of Domestic Thermal Coal Implementing Thermo-Mechanical Analysis," *Korean Chem. Eng. Res.*, **52**(2), 233-239(2014).
 20. Barnes, D. I., "Slagging and Fouling in Coal-fired Boilers," CCC/147, IEA Clean Coal Centre, London UK, 43(2009).
 21. Jung, B. J., "Sintering characteristics of Low-rank Coal Ashes," *Korean J. Chem. Eng.*, **13**(6), 633-639(1996).
 22. Scott, D. H., "Ash Behaviour during Combustion and Gasification," *Energy Fuels*, **15**, 502-502(2001).
 23. Wang, H. and Harb, J., "Modeling of Ash Deposition in Large-scale Combustion Facilities Burning Pulverized Coal," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **23**, 267-282(1997).
 24. Srinivasachar, S., Helble, J., and Boni, A., "An Experimental Study of the Inertial Deposition of Ash under Coal Combustion Conditions," 23rd Symposium (International) on Combustion, **23**, 1305-1312(1991).
 25. Lee, B. H., Kim, S. I., Kim, S. M., Oh, D. H., Gupta, S. and Jeon, C. H., "Ash Deposition Characteristics of Moolarben Coal and its Blends during Coal Combustion," *Korean J. Chem. Eng.*, **33**(1), 147-153(2016).
 26. Modlinski, N. J., "Computational Modeling of a Tangentially Fired Boiler with Deposit Formation Phenomena," *Chem. Eng. J.*, **35**, 361-368(2014).
 27. Niksa, S., PC Coal Lab version 4.1: User Guide and Tutorial, Niksa Energy Associates LLC, Belmont, CA, United States, 1997.
 28. Jones, W. P. and Lindstedt, R. P., "Global Reaction Schemes for Hydrocarbon Combustion," *Combust Flame.*, **73**, 233-249(1988).
 29. Magnussen, B. F. and Hjertager, B. H., "On Mathematical Models of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion," 16th Symposium (International) on Combustion., **16**, 719-729(1976).
 30. Wen, C. Y. and Chaung, T. Z., "Entrainment Coal Gasification Modeling," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **18**, 684-695(1979).
 31. Garba, M. U., Ingham, D. B., Ma, L., Degereji, M. U., Pourkashanian, M. and A, Williams, "Modelling of Deposit Formation and Sintering for the Co-combustion of Coal with Biomass," *Fuel*, **113**, 863-872(2013).
 32. Kalmanovitch, D. P. and Frank, M., "An Effective Model of Viscosity for Ash Deposition Phenomena," Proceedings of Mineral Matter and ash deposition from coal, United Engineering Trustees Inc Santa Barbara, 89-101(1988).
 33. Srinivasachar, S., Senior, C. L., Helble, J. J. and Moore, J. W., "A Fundamental Approach to the Prediction of Coal Ash Deposit Formation in Combustion Systems," 16th Symposium (International) on Combustion, **1**, 1179-1187(1992).