

# 500 MWe급 접선 연소 보일러 해석시 난류 혼합 속도 및 석탄 연소 모델의 영향 평가

양주향\* · 강기섭\* · 류창국\*†

## Assessment of the influence of coal combustion model and turbulent mixing rate in CFD of a 500 MWe tangential-firing boiler

Joo-Hyang Yang\*, Kie-Seop Kang\*, Changkook Ryu\*†

### ABSTRACT

Computational fluid dynamics (CFD) modeling of large-scale coal-fired boilers requires a complicated set of flow, heat transfer and combustion process models based on different degrees of simplification. This study investigates the influence of coal devolatilization, char conversion and turbulent gas reaction models in CFD for a tangential-firing boiler at 500MWe capacity. Devolatilization model is found out not significant on the overall results, when the kinetic rates and the composition of volatiles were varied. In contrast, the turbulence mixing rate influenced significantly on the gas reaction rates, temperature, and heat transfer rate on the wall. The influence of char conversion by the unreacted core shrinking model (UCSM) and the 1st-order global rate model was not significant, but the unburned carbon concentration was predicted in details by the UCSM. Overall, the effects of the selected models were found similar with previous study for a wall-firing boiler.

**Key Words** : CFD, Turbulent reaction rate, Devolatilization, Tangential firing boiler

석탄은 가격 경쟁력이 우수하고 매장량이 풍부하여 화력 발전소에서 오랫동안 안정적으로 사용되어져 왔다. 최근 중국과 동남아시아 등 개발 도상국의 발전으로 인하여 앞으로의 석탄 수요는 더욱 증가할 것으로 예상된다. 하지만 석탄은 온실가스 배출 계수가 높고 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, 미세 먼지 등 환경오염 물질 배출량이 많다는 단점이 있다. 환경 규제가 점차 증가함에 따라 석탄의 단점을 극복하기 위한 고효율, 친환경의 청정석탄발전 기술의 필요성 역시 증가하고 있다. 고효율 초임계압 연소 기술, 석탄 가스화 복합 발전, 순산소 연소 기술과 환경오염 물질 배출을 줄이는 바이오매스 혼소 기술 등이 전세계적으로 개발되고 있다. 이렇게 개발된 기술들을 실제 설비에 적용하고, 최적화하기 위하여 석탄 연소 해석의 중요성이 더해지고 있다.

석탄 열유동 해석은 연소 과정(탈휘발, 화반응, 가스반응)을 포함하여 열유동장에서의 입자의

거동을 계산한다. 이러한 해석은 전산 열유동 해석을 기반으로 질량, 난류, 운동량, 에너지, 화학종 보존식을 지배방정식으로 구성된다. 또한 석탄 연소를 모사하는 연소, 입자거동, 복사열전달의 세부 모델이 생성항(Source term)으로서 유기적인 영향을 주고받게 된다. 보일러 내의 입자와 가스 유동장의 거동을 모사하기 위하여 복잡하고 다양한 식과 모델들이 연계되어 예측하기 때문에, 연소 모델의 선택은 전체 해석의 신뢰성과 수렴성에 모두 영향을 미친다.

선행 연구[1]에서 상용급 대향류 보일러를 대상으로 연소 모델과 가스 혼합 반응 상수가 전산유동해석에 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구는 접선 연소 보일러에서 연소 모델과 가스 혼합 반응 상수가 미치는 영향을 평가할 것이다. 국내 500 Mwe급 접선 연소 석탄 화력 보일러를 대상으로 연소모델과 가스 혼합 상수에 따른 전산유동해석 결과를 분석하였다. 모델별로 화염의 형태, 온도 분포, 전열량 분포를 예측자료와 비교하고 모델별로 모사방법에 따른 차이를 분석하였다.

대상호기는 남동 발전의 삼천포 5호기이다. Fig. 1은 해석의 사용된 보일러의 형상과 격자

\* 성균관대 기계공학부

† 연락처, cryu@me.skku.ac.kr

TEL : (031)299-4841 FAX : (031)-299-5889

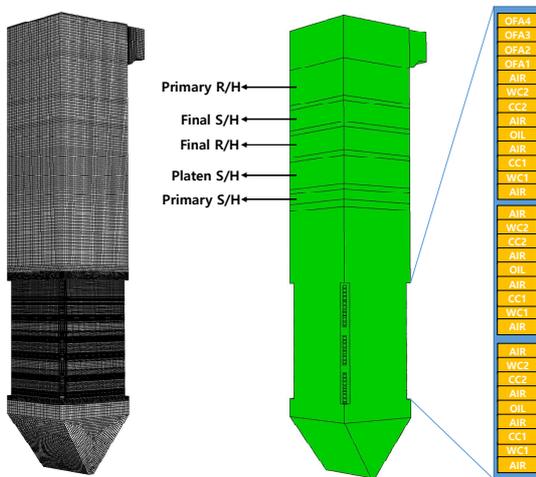


Fig 1. Schematic of a tangential-firing coal boiler at 500 MWe capacity

를 나타낸 것이다. 코너의 버너와 연소영역의 화로의 유동과 화학 반응 해석의 신뢰성을 위해 격자를 보다 조밀하게 구성하였다. 격자수는 1,835,900개의 육면체/사면체 셀로 구성하였다. 해석에 사용된 탄종은 아역청탄이며, 공업 분석 결과 휘발분 42.0%, 고정탄소 46.2%, 수분 10.3%, 회분 1.5%로 구성된다. 고위 발열량은 26.23 MJ/kg이다. 원소 분석결과는 C 73%, H 5.4%, O 20.5%, N 0.1%, S 0%로 해당 데이터는 FLASHCHAIN과 탈휘발 단일 화학종 모델의 설정에 사용되었다.

전산유동해석은 Ansys fluent 14.5ver로 진행하였으며, 해석에 사용된 케이스 구성은 Table 1과 같다.

석탄의 연소과정을 모사하기 위하여 탈휘발의 휘발분(Volatile) 조성은 각각 FLASHCHAIN[2]과 단순 휘발분 모델을 적용하여 비교하였다. FLASHCHAIN으로 예측된 휘발분 조성은

Table 1 Summary of test cases

Parameter	Models / Values
Volatiles composition	FLASHCHAIN, Single volatile species
Pre-exponential factor ( $AP = 9078 \text{ s}^{-1}$ )	1AP, 0.1AP, 10AP
Magnussen constant A	0.5, 1, 2, 4
Char reaction model	Unreacted core shrinking model (UCSM), Apparent rate/Diffusion rate model (A/DRM)

Table 2 Volatiles composition (wt.%daf) predicted by FLASHCHAIN (Tar:  $C_xH_yO_zN_rS_s$ )

Tar	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Total
32.9	0.4	5.1	3.93	7.6	7.5	7.4	66.07

Table2에 제시되어 있다. 단순 휘발분의 경우 원소분석과 공업분석 결과를 활용하여 고정탄소를 좌로 설정하여 나머지 원소조성으로 하나의 단일 화학종의 휘발분으로 구성하였다.

FLASHCHAIN의 경우 승온율을 고려하기 때문에 공업분석결과보다 많은 양의 휘발분을 예측하게 된다. FLASHCHAIN을 적용한 경우 공업 분석 결과보다 증가한 휘발분 함량을 66.07%로 예측하였다.

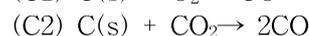
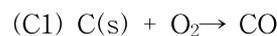
탈휘발 속도의 경우 FLASHCHAIN을 통해 예측한 Single rate 모델의 반응 상수( $A_p$ , E)를 적용하였으며, 각각  $A_p=9078 \text{ s}^{-1}$ ,  $E=24.5 \text{ MJ/kmol}$ 이다.  $A_p$ 값이 해석에 미치는 영향을 파악하기 위하여 각각 10, 0.1을 곱하여 비교하였다.

난류 유동장에서의 가스 반응(휘발분, 최반용 생성물)의 경우 연소 반응임으로 화학반응 속도가 난류 혼합속도보다 극히 빠르다. 따라서 난류 혼합속도가 전체 반응 속도를 지배하게 되는 데, 본 해석에서는 kinetic rate/eddy-dissipation rate model[3]을 적용하였다.

$$R = \min \left\{ R_s, \min \left( A_p \frac{\epsilon}{k} \min \left( \frac{Y_R}{\nu_R M_R}, AB_p \frac{\epsilon}{k} \frac{\Sigma Y_P}{\Sigma \nu_P M_P} \right) \right) \right\}$$

가스 반응 속도 모델에 적용되는 상수 A와 B는 실제 화염의 특성에 따라 변화하는 값으로서 각각 4와 0.5가 제시되어 있다. 하지만 화염의 규모와 보일러 내부 환경에 따라 달라지는 값으로 적절한 평가가 필요하다. 본 연구에서는 A값을 0.5, 1, 2, 4로 바꾸어 영향을 분석하였으며, 실제 운전 계측 자료와 비교하여 적정값을 도출하였다.

최(Char) 반응의 경우 최의 산화반응과 가스화 반응을 모두 고려하여 해석을 진행하였다. 최의 산화반응(C1)의 경우 온도가 비교적 낮고 산소가 많은 영역에서 지배적이며, 가스화반응(C2, C3)의 경우 1000℃이상의 산소 부족상황에서 지배적이게 된다.

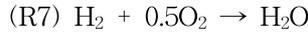
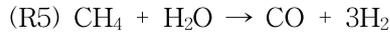
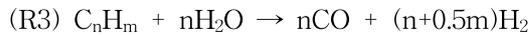
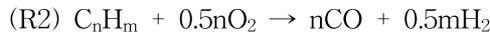


최반용의 속도는 Unreacted Core Shrinking Model (UCSM)[4]과 Apparent rate/diffusion

rate model (A/DRM)을 비교하였다. UCSM의 경우 좌의 산화에 따라 생성되는 좌 표면의 회분층의 영향을 고려하여, 반응이 진행됨에 따라 반응 속도가 느려지게 된다.

반면 A/DRM의 경우 회분층의 영향을 고려하지 않고 가스의 화학반응 속도와 좌 내부에서 가스의 확산 속도 중 느린 반응이 전체 반응속도를 지배하도록 구성된다.

좌전환과 탈휘발로 생성된 가스들의 반응 모델은 최종 연소 생성물로 전환하는 과정으로서 전체 반응 및 반응 속도는 Jones-Lindstedt mechanism[5]에 기반하여 구성하였다.



유동 해석의 경우 제트와 선회류에 있어 높은 신뢰성과 수렴성을 보이는 Realizable k-ε 모델을 적용하였다. 미분탄 입자는 Lagrangian 방식으로 추적하였으며, 입자의 크기는 평균 입경 55μm의 Rosin-Rammler 분포를 따른다. 연소실 벽면의 경계조건은 평균 스팀온도 671K, 유효열전달 계수 2500 W/m²K를 적용하였으며, 열교환기의 경우 관군부 UDF를 적용하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 난류 혼합 속도 상수 (Magnussens constants, A)에 따른 수직 평면의 온도 분포와 열전달 거동을 나타낸 것이다.

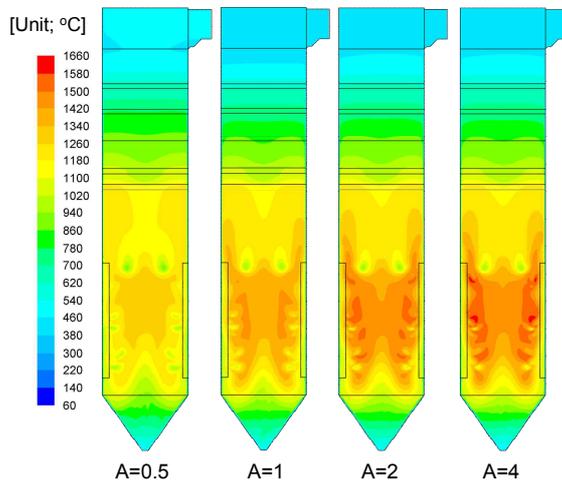


Fig. 2 Contours of temperature for different values of Magnussen constant A

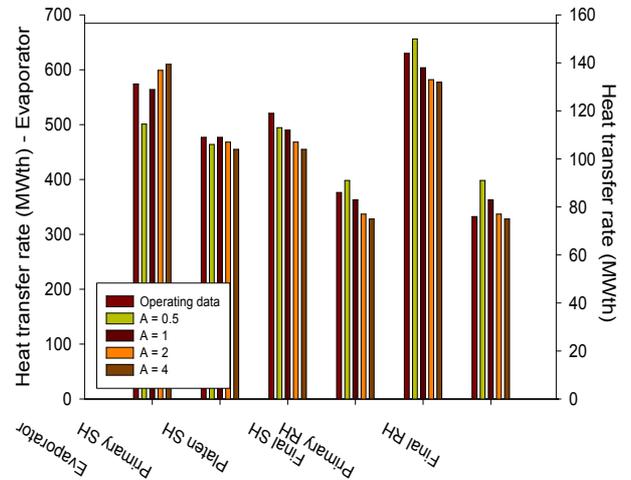


Fig. 3 Heat transfer distribution for different values of Magnussen constant, A

버너 인접한 부분부터 연소가 일어남에 따라 화구의 크기가 커지고 수냉벽에서 열전달이 크게 증가하였다. 실제 운전 자료의 전열량과 비교한 결과 A=1이 적절하다. 가스 혼합 상수가 클수록 버너영역에서의 반응이 빠르게 종료됨으로 수냉벽의 전열량이 매우 높은 반면에 후단 열교환기에서의 전열량은 A값이 작은 경우보다 낮다. 이는 A값이 작은 경우 버너영역 상단까지 가스반응이 일어나고 대향류 보일러에 비하여 S/H 및 R/H 패널이 버너 영역에 인접하여 위치하기 때문이다. 반면, A값이 증가할수록 버너영역에서 산소 농도가 급격히 감소하여 산소 희박 영역이 넓게 나타날 것으로 판단된다. 화학종의 분포 차이가 NOx해석에서 산화, 환원에 미치는 영향에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

Fig. 4는 탈휘발 모델에 따른 수평 평면의 온

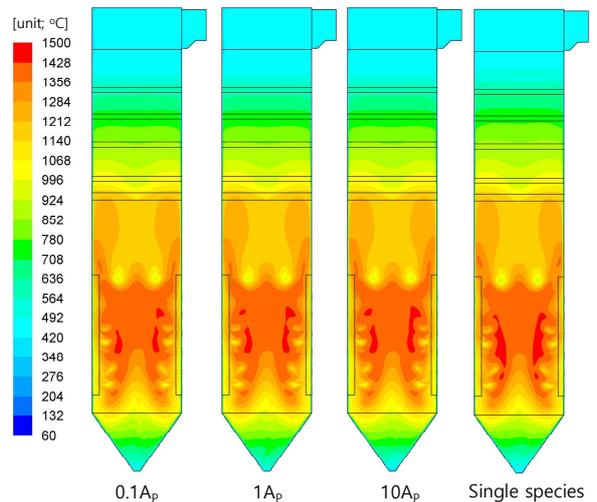


Fig. 4 Contours of temperature for different volatilization models

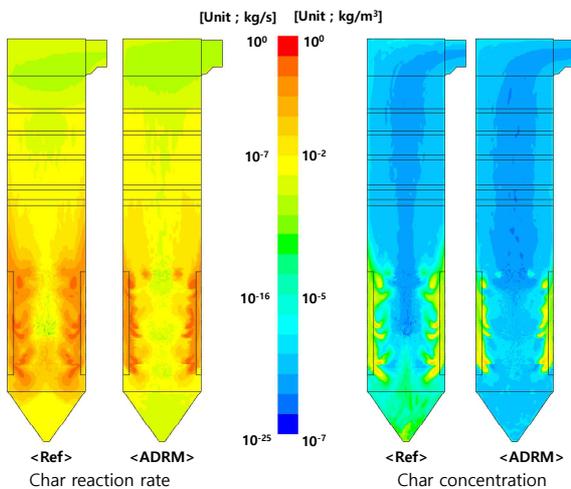


Fig. 5 Reaction rate and concentration of char for different char conversion models

도 분포를 나타낸 것이다. 단일 화학종으로 가정 한 경우에도 전체 가연분의 발열량이 같아 전열량 및 평면 온도 분포의 차이가 크지 않다. 하지만 단일 화학종의 경우 탈휘발로 생성된 타르가 CO로 전환되어 연소됨으로 국소적인 영역에서 반응이 일어나 고온 영역의 크기가 다르게 나타났다. 반면 전열량 등 실질적인 계측자료와의 차이는 크지 않다. 휘발분의 생성속도를 결정하는 Single rate model의  $A_p$  상수가 증가함에 따라 고온 영역이 다소 넓어지긴 했으나 눈에 띄는 변화는 없었다. 이는 탈휘발 속도가  $A_p$ 보다 온도에 지수적으로 변화하기 때문으로 보인다.

Fig. 5는 촉반응 모델에 따른 촉 산화속도 및 촉 농도의 수직평면에서의 비교이다. A/DRM의 경우 회분층의 생성을 고려하지 않음으로 반응속도의 저하 없이 빠른 속도로 반응이 일어나게 된다. 즉 버너 영역에서 촉 전환이 빠르게 일어나게 되고 급격히 촉의 농도가 감소하게 된다. 반면 UCSM을 적용한 경우 촉 전환이 일어남에 따라 점진적으로 반응속도가 감소하여 후단에서도 비교적 촉반응이 더 일어나게 되고, 촉의 농도 또한 완만하게 감소하는 것으로 나타난다. 이러한 속도 차이에 따라 두 모델의 촉 농도 분포가 버너영역 전반에서 다르게 나타난다. 또한, Hopper 영역에서 촉의 농도가 높게 나타나는 것으로 보아 미연탄소의 영향을 확인할 수 있을 것으로 보인다. 촉의 농도 차이는  $10^{-6}$  kg/m<sup>3</sup>이 하로 열유동 분포에는 영향이 미미하다. 반면 NO<sub>x</sub> 해석에 촉의 산화에 따른 NO<sub>x</sub>의 환원, 산화 반응이 일어나게 됨으로 변화한 촉의 농도가 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 석탄 연소 모델 중 탈휘발과 촉 반응 모사모델, 가스 난류 반응 상수가 점선 연소 보일러에 미치는 영향을 분석하였다. 점선 연소 보일러의 석탄 연소 모델 및 가스 혼합 속

도의 영향이 기존 대항류 보일러에서의 연구와 유사하게 나타났다. 가스 난류 반응 상수(A)의 경우 온도 분포와 연소 반응 영역의 크기에 모두 영향을 끼쳐 A값이 감소할수록 후단에서 전열량이 높게 나타났다. 수냉벽에서의 전열량을 고려하였을 때 A=1이 적절하다. 탈휘발 모델의 경우 휘발분의 화학종이나  $A_p$ 의 변화는 전열량 분포에 큰 차이를 보이지 않았다. 촉 반응 모델의 경우 두 모델의 반응 속도나 촉의 농도 차이가 두드러지게 나타났으나 이는  $10^{-6} \sim 10^{-7}$  kg/s 정도로 전열량과 온도분포의 차이는 없다. 반면 미연탄소의 거동에 대한 해석이 필요할 때는 UCSM 모델이 A/DRM 모델보다 타당할 것으로 보여진다.

## 후 기

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

## 참고 문헌

- [1] 양주향, 김정은, 류창국, "미분탄 보일러 연소 해석에서 석탄 반응 모델 및 난류 혼합 속도의 영향 평가", 한국연소학회지, 2015, Vol. 20.3, pp. 35-42.
- [2] Niksa S. PC Coal Lab version 4.1: user guide and tutorial, Niksa Energy Associates LLC, Belmont, CA, United states
- [3] B. F. Magnussen and B.H. Hjertager, "On Mathematical Models of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion", In 16th Symp. (Int'l.) on Combustion. 1976, Vol. 16, pp.719-729
- [4] Wen C. Y., Chung T. Z., "Entrainment Coal Gasification Modeling. Industrial and Engineering Chemistry Process and Development". 1979, Vol. 10, pp. 684-695
- [5] W. P. Jones and R.P. Lindstedt, "Global Reaction Schemes for Hydrocarbon Combustion", Combust Flame 1988, Vol. 73, pp. 233 - 249