

미분탄 탈휘발 및 최반응 모델 평가

정대로* · 한가람* · 허강열*[†] · 박호영**

Evaluation of the empirical and structural coal combustion models in the IFRF no.1 Furnace

Daero Joung*, Karam Han*, Kang Y. Huh*[†], Hoyoung Park**

ABSTRACT

This study describes 3D RANS simulation of a 2.1 MW swirling pulverized coal flame in a semi-industrial scale furnace. The simulation of pulverized coal combustion involves various models for complex physical processes and needs information of pyrolysis rate, the yields and compositions of volatiles and char especially in coal conversion. The coal conversion information can be acquired by the experiment or the pre-processor code. The empirical model based on the experiment of the IFRF and the structural model based on the pre-processor code of the PC-COAL-LAB were evaluated against the measurement data.

Key Words : pulverized coal, devolatilization, char combustion, FLASHCHAIN, CBK

미분탄 연소는 탈휘발(devolatilization), 최반응(char combustion)을 포함하는 석탄 개조 반응과 가스 연소, 난류 유동의 상호 작용, 복사 열전달 등의 복잡한 물리현상을 동반한다. 석탄 개조 반응에 대한 모델링은 석탄 입자의 특성, 탈휘발 속도, 휘발분 산출량 및 조성에 대한 정보를 필요로 하는데 이는 주로 실험 데이터에 의존해왔다.[1] 그러나 1990년대에 이르러 석탄의 공업 분석과 원소 분석만을 통해 석탄 특성 및 탈휘발 예측이 가능한 연구가 진행되었고 탈휘발 및 최반응 예측 코드를 통해 개조 반응에 필요한 정보의 취득이 가능해졌다.[2]

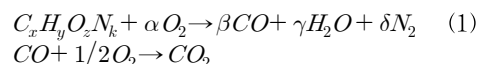
본 연구에서는 2.1 MW 실험실 규모의 미분탄 연소로에 대해 각각 실험과 탈휘발 예측 코드에 기초하여 탈휘발 및 최반응 모델의 특성을 파악하고자 한다.

Figure 1은 미분탄 연소로의 형상이다. 상압에서 263 kg/h로 석탄이 공급되고 약 0.9의 스웰비를 가지고 공기가 공급된다. 7개의 냉각 채널을 가지고 5개의 위치에서 속도, 온도 및 화학종의 농도를 측정하였다. 석탄의 특성 및 운전 조건은 참고 문헌[3,4]을 바탕으로 하였고 해석은 실제 형상의 1/4에 대해 periodic 조건으로

상용 소프트웨어인 Fluent ver. 13을 사용하였다.

석탄 개조 반응은 앞서 언급한 바와 같이 두 가지 방식을 적용하였다. 첫 번째 방식은 IFRF report[3]의 측정값을 바탕으로 탈휘발 및 최반응에 대해 경험식(empirical model)을 적용하는 것이다. 이때 탈휘발은 single rate model[5]을 적용하고 최반응은 kinetic/diffusion rate limited model[6]을 적용하였다. 두 번째 방식은 탈휘발 및 최반응 예측 코드인 NEA(Niksa Energy Associates)의 PC-COAL-LAB[7]을 이용하는 것이다. 탈휘발 및 최반응 모델은 single rate model과 CBK[7]를 user-defined function(UDF)의 형태로 적용하였다. 이때 탈휘발 속도, 휘발분 산출량 및 조성은 석탄의 화학적 특성 및 구조에 입각한 탈휘발 모델인 FLASHCHAIN[2]을 바탕으로 계산되고 single rate model의 상수로 사용된다.

가스 연소 모델은 Eddy dissipation model (EDM)을 사용하였고 이때 가스 반응은 식(1)과 같이 global 2 step reaction을 사용하였다.



난류 모델은 standard k-e model을 사용하였고 복사 열전달은 optical thickness를 고려해서 P1 모델을 적용하였다.

* 포항공과대학교 기계공학과

** 한국전력공사 전력연구원

† 연락처, huh@postech.ac.kr

TEL : (054)279-2841 FAX : (054)-279-3199

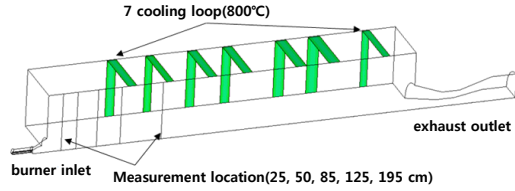


Fig. 1 Schematic of IFRF no.1 Furnace

Table 1 Coal, volatile matter properties of the Sarr coal fired by experiment and pre-processor code(drop tube furnace : $T_g=1250^{\circ}\text{C}$, $D_p=45\mu\text{m}$)

Coal particle properties	Exp	code
Density(kg/m ³)	1000	1136
Cp(J/kg · K)	1200	2160
Volatile matter properties		
molecular weight(kg/kmol)	86	51.6
ultimate yield	1.7	1.49
Swelling Index	1	1.1
Single rate, A(1/s)	2e05	9.8e4
Single rate, Ea(J/kmol)	7.4e07	4.5e7

Table 1은 IFRF의 측정값과 PC-COAL-LAB 코드를 이용하여 계산한 석탄 입자와 휘발 성분의 특성 및 탈 휘발 속도 상수를 나타낸 것이다. 이 때 FLASHCHAIN은 가스 온도가 1250 °C, 입자 지름이 45 μm인 조건의 drop tube furnace에서의 탈휘발 과정을 모사한 결과이다.

Figure 2, 3, 4는 버너 입구 벽면으로부터 측 방향으로 각각 25, 85, 195 cm 위치에서의 온도와 화학종의 농도를 나타낸 것이다. 1000 °C 이상의 고온에서 휘발분 산출량은 공업 분석치보다 더 많은 양의 휘발분이 생성되는데 IFRF의 측정치는 공업 분석치의 1.7배로 약 64 %의 휘발분이 생성되는 것으로 나타난다. 반면에 최는 약 27 %로 감소한다. Yield=1.7은 초기 휘발분의 양을 64 %로 가정한 것이다. 25 cm 위치에서 측정값에 비해 온도를 400 °C 정도 과대, 과소 예측하는 구간이 발생하는데 25 cm 위치는 연소 gas와 주변 공기의 속도 차이에 의해 전 단층(shear layer)이 형성되는 영역이다. 실험에서는 미분탄이 비균질 공급되면서 전 단층내에서 화염 불안정이 발생하고 이로 인하여 실제로 측정된 값은 전 단층 내에서 반경 방향으로 평균한 값이라고 보고하였다.[4] 촉반응은 125 cm 부근에서 종료되는데 85 cm 위치에서는 200 °C 내로 실험과 유사한 경향을 나타내고 연소기 후단인 195 cm에서는 50 °C 내로 거의 일치한다.

휘발분 산출량은 탄종에 따라 정도의 차이는 있으나 약 500 °C 이하에서 공업 분석치를 유지하고 온도가 증가함에 따라 비례해서 증가하고

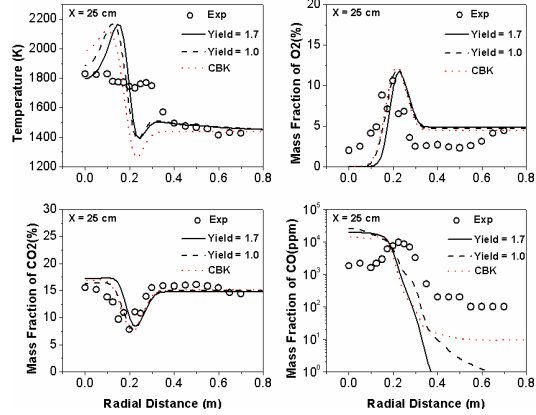


Fig. 2 Radial profiles of the mean temperature and species mass fraction at x=25cm

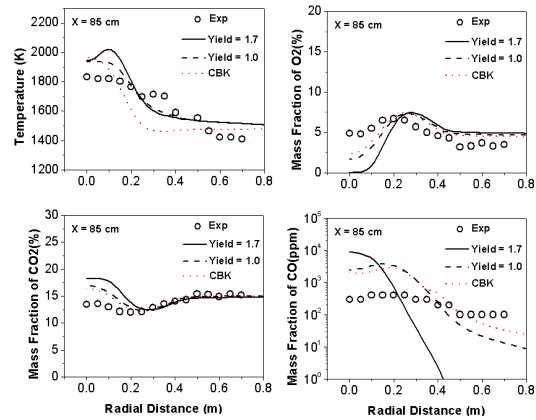


Fig. 3 Radial profiles of the mean temperature and species mass fraction at x=85cm

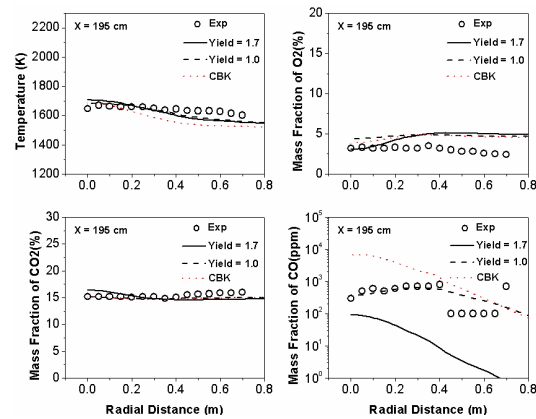


Fig. 4 Radial profiles of the mean temperature and species mass fraction at x=195cm

1000 °C 이상에서 최대량으로 고정되기 때문에 본 계산에서 초기 휘발분의 양을 64%로 고정된 것은 타당하지 않다. 그러나 실제 휘발되는 것이 공업 분석치와 최대 산출량 사이에 있는 것을 고려할 때 초기 휘발분을 yield=1.7 로 가정한 경우와 반대로 온도에 상관없이 초기 휘발량이 공업 분석치와 같은 yield=1로 가정한 경우를 통해 실제 연소 현상을 유추해 볼 수 있다.

CO의 생성은 휘발분 연소와 좌반응의 두가지 측면으로 생각할 수 있다. 초기 휘발량에 따라 휘발분의 성분이 달라지는데 이에 따라 식(1)의 가스 반응이 yield=1.7 인 경우 $VM + 3.42O_2 \rightarrow 5.05CO$ 로 yield=1.0 인 경우 $VM' + 3.32O_2 \rightarrow 3.57CO$ 로 바뀌게 된다. 탈휘발화가 10 cm 에 위치한 버너 입구 근처(quarl zone)에서 대부분 발생하는 것을 고려하면 yield=1.7인 경우 y=1.0에 비해 CO의 증가량이 더 커지고 이로 인해 CO₂의 반응 또한 증가하는 것을 Figure 2 와 3을 통해 알 수 있다. 85 cm 이후는 휘발분 연소에 비해 좌반응의 영향이 증가하는 구간으로 좌의 양이 많은 yield=1.0의 경우 CO의 농도가 증가하는 것을 알 수 있다.

앞의 두 경우는 석탄의 개조 반응이 측정값에 기초한데 반해 FLASHCHAIN과 CBK를 적용한 경우는 석탄의 공업 분석과 원소 분석 데이터만을 바탕으로 탈휘발 및 좌반응 예측 코드를 이용해 계산한 결과이다. Table 1에서 볼 수 있듯이 석탄 입자 및 휘발 성분의 특성에서 측정값과 차이가 있지만 yield=1.7인 경우에 비해 모든 위치에서 실험 데이터와 정량적으로 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Table 2는 출구에서의 평균 온도와 화학종의 농도를 나타낸 것이다. 실험에서 온도의 오차를 ±25 °C 로 보고한 것을 고려하더라도 20 °C 내로 과소 예측하였는데 냉각 채널에 의한 열전달량이 측정값과 3% 내인 것을 고려하면 복사에 의한 냉각의 영향이 큰 것으로 판단된다.

탈휘발 예측 코드를 통해 도출된 석탄 입자의 특성 및 개조 반응에 대한 정보는 신뢰할 수준이라고 판단된다. 그러나 온도에 따른 휘발분 산출량 정도에 대한 개선이 필요하고 무엇보다 열분해 과정에서 나타나는 다양한 화학종의 산출량 및 반응 메커니즘을 적용한 기체상 화학 반응을 고려해야 할 것으로 판단된다.

Table 2 Mass flow averaged temperature and area averaged species volume fraction at the outlet

	Exp	Y=1.0	Y=1.7	CBK
T(K)	1353	1318.4	1318.7	1314.5
O ₂ (vol%,dry)	3	4.6	4.6	4.2
CO ₂ (vol%,dry)	15.60	15.0	15.0	15.3
CO(ppm,dry)	30	1.3E-4	4.9E-6	0.37
Heat Extraction(kW)	1038	1018	1014	1041

후 기

본 연구는 지식경제부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 500MW급 보일러 저급탄연소 핵심요소기술 개발(No.2011T100200203)의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] A. Williams, R. Backreedy, R. Habib, J.M. Jones, M. Pourkashanian, "Modelling coal combustion: the current position", *Fuel*, Vol. 81, 2002, pp. 605-618.
- [2] S. Niksa, "FLASHCHAIN Theory for Rapid Coal Devolatilization Kinetics. 3. Modeling the Behavior of Various Coals", *Energy and Fuels*. 1991, vol 5, pp. 673-683.
- [3] R. Weber, J. Dugue, A. Sayre, A.A.F. Peters and B.M. Visser, "Measurements and Computations of Quarl Zone Flow Field and Chemistry in a Swirling Pulverized Coal Flame", IFRF Doc. No. F36/y/20, 1992.
- [4] A.A.F. Peters and R. Weber, "Mathematical Modeling of a 2.4 MW Swirling Pulverized Coal Flame", *Combustion Science and Technology*, 1997, vol, 122, pp. 131-182.
- [5] S. Badzioch, P.G.W. Hawksley, 1970, Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, Vol. 9, pp. 521-530.
- [6] M.A. Field, "Rate of Combustion of Size-graded Fractions of Char from a low-rank Coal between 1200K and 2000K", *Combustion and Flame*, 1969, vol 13, pp. 237-252.
- [7] PC Coal Lab Version 4.1, User Guide and Tutorial