

## 미분탄 연소에 따른 슬래깅 예측 모델 개발 및 검증

장권우\* · 한가람\* · 허강열\*\* · 박호영\*\*

### Prediction of ash deposition propensity in a pilot-scaled pulverized coal combustion

Kwonwoo Jang\*, Karam Han\*, Kang Y. Huh\*\*, Hoyoung Park\*\*

#### ABSTRACT

In pulverized coal fired boilers, slagging and fouling may cause significant effect on the operational life of boiler. As increasing a consumption of low rank coal, slagging and fouling are main issues in pulverized coal combustion. This study predicts ash deposition propensity in a 0.7 MW pilot-scale furnace. Slagging model is employed as a User-Defined Function (UDF) of FLUENT and validated against measurement and prediction. The results show good agreement compared with experiment. There is need to development of a pulverized coal combustion and slagging analysis at low coal.

**Key Words** : Pulverized coal combustion, Ash deposition, FLUENT UDF

온실가스 감축 및 각종 환경 규제를 충족하기 위해 친환경 에너지 개발과 더불어 기존의 석탄 화력발전소에 대한 성능 개선의 필요성이 증가하고 있다. 더불어 세계적으로 석탄소비량의 증가에 따른 석탄가격 상승과 수입 불안 가중으로 인해 저급탄에 대한 수요가 증가하고 있다 [1]. 그러나 저급탄은 고급탄에 비해 휘발분과 ash의 양이 많아 슬래깅과 파울링에 의해 열전달 감소 및 설비 수명 단축 등의 문제점이 있다.

본 연구에서는 0.7 MW 실험실 규모의 미분탄 연소소에 대해 실험과 전산해석 결과를 통해 슬래깅 예측 모델을 검증하고자 한다.

Baxter에 의해 고안된 슬래깅 예측 모델[2]은 다음과 같다.

$$\frac{dm_i}{dt} = I_i(\tau, t)G_i(\tau, t) + T_i(\tau, t) + C_i(\tau, t) + R_i(\tau, t) \quad (1)$$

슬래깅을 일으키는 4개의 mechanism 중 inertial impaction이 슬래깅에 가장 큰 비중을 차지한다고 밝혀졌다[2]. inertial impaction은 ash의 충돌 횟수와 ash의 부착정도에 비례한다. ash의 충돌 횟수는 유동의 영향을 받게 되며 충돌 후 부착 정도는 critical viscosity와 ash 점성의 크기를

비교하여 부착여부를 결정한다.

$$\text{Sticking probability} = \begin{cases} \frac{\eta_{critical}}{\eta} & (\eta > \eta_{critical}) \\ 1 & (\eta < \eta_{critical}) \end{cases} \quad (2)$$

부착여부의 기준인 critical viscosity는 운전 조건 및 탄종에 따라 다양한 값을 가진다. 선행 연구에 따르면 범위가 8~10<sup>8</sup> Pa·s의 범위를 가지나 약 10<sup>4</sup>~10<sup>5</sup> Pa·s 정도가 적절하다고 알려져 있다 [3~5]. ash의 점성은 Modified-Urbain 모델을 적용하였다 [6].

Figure 1은 스윙 버너 격자 및 미분탄 연소로 형상이다. 스윙 버너는 약 56만 여개, 연소로 격자는 약 45만 여개의 육면체 격자로 구성되었다. 스윙 버너의 해석결과를 미분탄 연소로 2차 공기 운전조건으로 적용하였다. 미분탄 연소로 벽면에 설치된 총 6개의 패널을 통해 ash 부착량을 측정하였다. 각 패널은 수냉식과 공냉식을 활용하여 약 750K를 유지하였다. 해석은 상용 소프트웨어인 FLUENT ver. 13을 사용하였다.

석탄 개조 반응에서 탈 휘발은 FLASHCHAIN을 바탕으로 한 single rate model을 활용하였고, 화 반응 모델은 CBK/E를 UDF의 형태로 적용하였다 [7]. 난류 모델은 standard k-ε model을 사용하였고, 복사 열전달은 P1 모델을 적용하였다. 탄종은 SUEK탄과 ADARO탄 두 개의 탄을 활용하였으며 각각 과잉공기비 1.2, 1.0, 0.9 대해 진행하였다.

\* 포항공과대학교 기계공학과

\*\* 한국전력공사 전력연구원

† 연락처자, [huh@postech.ac.kr](mailto:huh@postech.ac.kr)

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

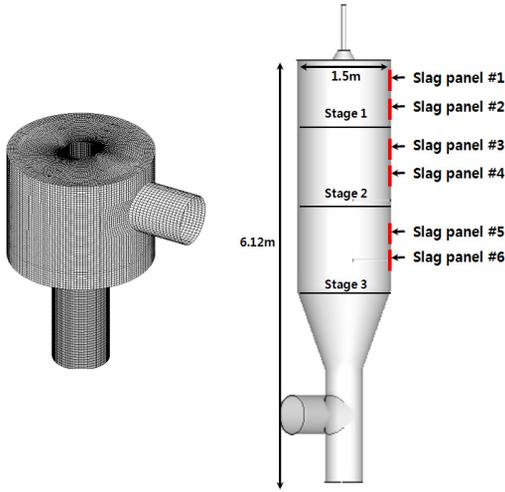


Fig. 1 Computational grid of swirl burner and schematic of KEPRI furnace

Figs. 2, 3은 각각의 과잉공기비 조건 하에 SUEK탄과 ADARO탄의 ash 부착량을 실험값과 비교한 결과이다. SUEK탄의 경우 stage 2, 3에 부착된 패널 3~6의 ash 부착량을 나타낸다. ADARO탄의 경우 stage 1, 2, 3에 부착된 패널 중 3을 제외한 모든 패널에서 ash 부착량을 나타낸다

다. Figure 4는 해당 조건하에 각 패널별 부착된 형상을 실험과 해석을 비교한 것이다. 실험과 해석에 있어 큰 값의 차이를 보이지 않았다. 이를 통해 식 (1)의 ash 부착의 mechanism 중 inertia l impaction에 의한 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

Figure 5는 연소로 내 유선과 온도분포를 나타낸 것이다. 유선을 살펴보면 스월의 영향에 의해 유동이 패널 2와 3으로 향하는 것을 확인하였다. 유동을 따라 움직이는 ash가 패널 2와 3에 충돌하는 횟수가 다른 패널에 비해 많아 패널 2와 3에 많은 양이 부착됨을 예상할 수 있다. 또한 stage 1의 하단부와 stage 2의 상단부에 화염이 형성되어 고온 영역을 이루고 있다. 이로 인해 화염부근의 고온에서는 ash의 점성이 낮아져서 부착 확률이 증가하여 패널 2와 3에 많은 양의 ash가 부착됨을 예상된다. Figure 2에서는 상술된 예상대로 유동의 영향을 가장 많이 받는 패널 3이 가장 많은 양의 쌓였으며 연소로 하단부로 향할수록 온도가 낮아져서 ash점도가 증가하여 ash 부착량이 줄어드는 것을 확인하였다. Figure 3에서는 상술된 예상과 달리 실험에서는 패널 4에서 가장 많은 부착량을 보이고 있으며 연소로 하단부로 향할수록 낮아지는 온도의 영향으로 ash 부착량이 감소하는 것을 확인하였다. 반면 해석 결과는 유동과 온도장을 고려하여 패널 2에서 가장 많은 양의 ash가 부착되는 것을 예측한다. 이

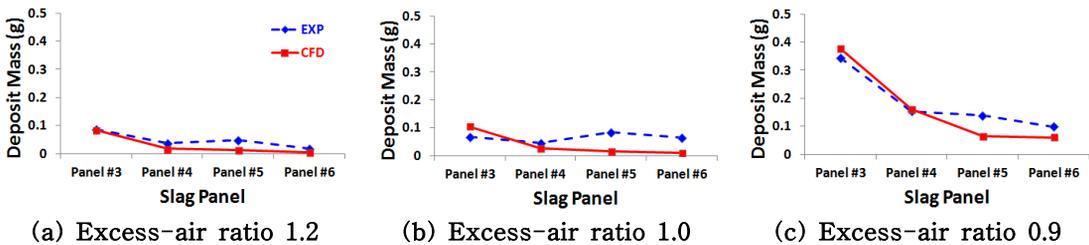


Fig. 2 Ash deposition mass for SUEK

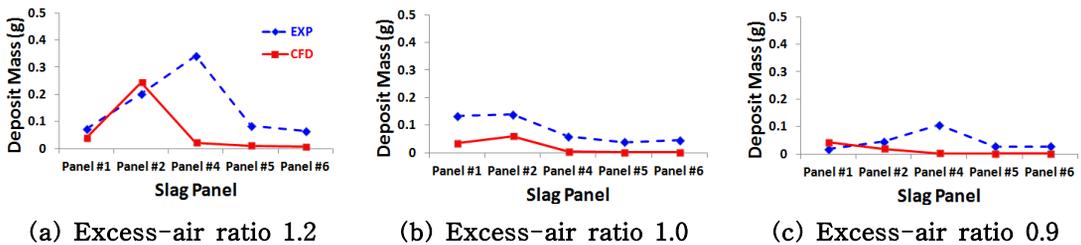


Fig. 3 Ash deposition mass for ADARO

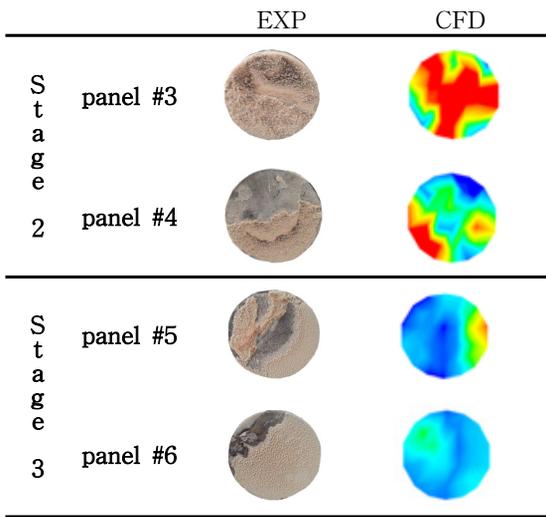


Fig. 4 Results of experiment and simulation for SUEK at excess air ratio 0.9

는 ADARO 탄의 특성을 고려하지 못한 연소 해석이 원인이라 생각된다.

Figure 6은 과잉공기비 0.9에서 SUEK탄의 온도와 화학종 농도를 비교한 것이다. 온도결과 는 실험값과 해석의 차이가 오차 수용범위를 만족한다. 과잉공기비가 0.9는 당량비가 1보다 작은 운전조건을 나타낸다. 해석은 산소가 부족한 상태로 간주하여 연소로 상단부에서 연소에 필요한

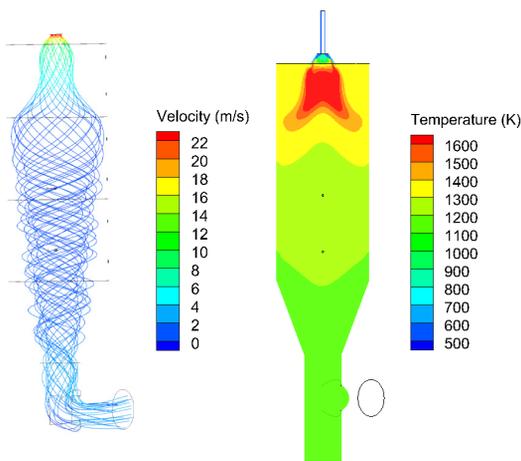


Fig. 5 Stream line and temperature contour for SUEK at excess air ratio 1.2

산소를 모두 소비하여 stage 1 하단부부터 산소 농도를 낮게 예측하는 반면 실험에서는 연소로 후단부에서도 산소가 측정되었다. 또한 해석에서는 실험에 비해 과잉 산소 소모를 예측하여 CO<sub>2</sub> 농도가 실험에 비해 높게 예측되었다.

Figure 7은 과잉공기비 0.9에서 ADARO탄의 온도와 화학종을 비교한 것이다. 전반적인 화학종 농도 경향은 Figure 6의 SUEK탄 결과와 유사하나 온도 값은 차이를 보인다. 연소로 상단부는 실험값과 해석결과가 유사하나 후단부로 갈수록 많은 차이를 보인다. 이는 상술된 바 같이 ADARO탄의 성분함유량에 따른 해석의 한계에 기인한다고 생각된다. 실험 결과를 보면 ADARO탄의 많은 수분함유량으로 인해 탈 휘발 및 최악의 연소시간이 SUEK탄에 비해 길어져서 패널 3과 4부근에서 고온의 영역을 형성하게 된다. 그러나 FLUENT의 경우 미분탄 입자가 포함하는 수분에 대해 고려하지 않고 완전 건조된 탄을 기준으로 해석을 수행한다. 이와 같은 해석상의 차이로 인해 수분함유량이 적은 SUEK탄의 경우 수분으로 인한 미분탄 연소 해석의 영향이 적은 반면 많은 수분을 가진 ADARO탄의 해석에 있어서는 수분의 영향을 충분히 반영하지 못하여 온도의 차이를 발생한다고 생각된다. 그로 인해 발생된 실제보다 낮은 온도예측을 통해 ash 점성이 낮게 예측되어 부착정도가 낮아져서 패널 4에서 실험값에 비해 낮은 부착량을 예측하게 된다고 생각된다.

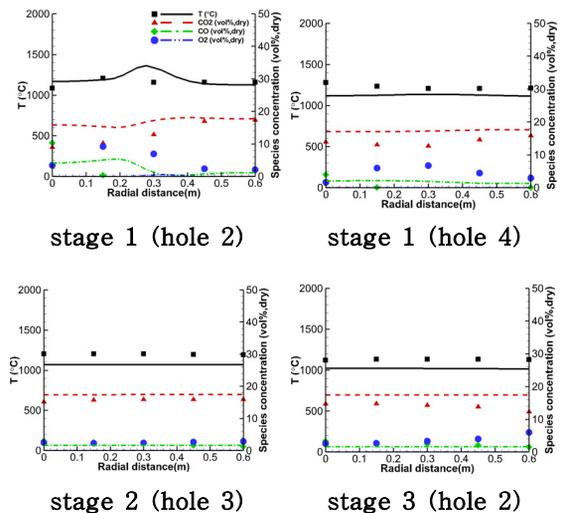
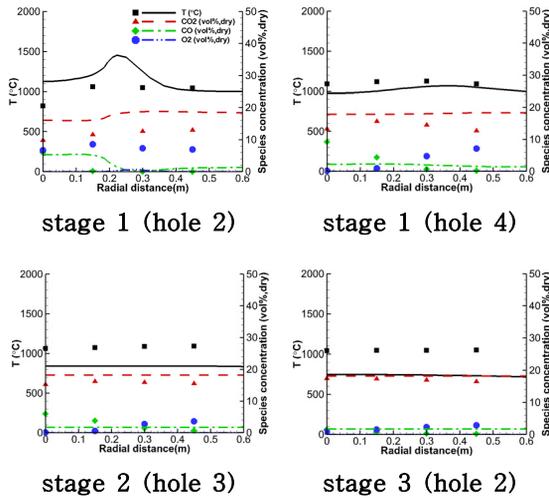


Fig. 6 Results of temperature and chemical species concentration for SUEK at excess air ratio 0.9



**Fig. 7 Results of temperature and chemical species concentration for ADARO at excess air ratio 0.9**

앞선 결과를 보면 SUEK탄과 같은 고 등급탄의 경우 낮은 수분과 ash 성분으로 인해 정확도 높은 연소 해석이 이루어져서 만족스러운 슬래깅 해석이 이루어졌다. 반면 ADARO탄과 같이 수분과 ash 함유량이 높은 저 등급탄의 해석에 있어서는 향후 수분과 ash의 영향이 충분히 고려된 연소 해석을 바탕으로 슬래깅 예측이 이루어지면 보다 나은 결과를 얻을 수 있으리라 생각된다.

## 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] 에너지경제연구원 "국제 석탄시장 여건 변화에 따른 동북아 석탄 수급구조 분석 연구", 2008.
- [2] Baxter, L.L, Richard W. DeSollart, "A mechanistic description of ash deposition during pulverized coal combustion: predictions compared with observations" Fuel, Vol. 72, 1993, pp. 1411-1418
- [3] Peter M. Walsh, Alan N. Sayre, David O. Loehden, Larry S. Monroe, János M. Beér and

Adel F. Sarofim "Deposition of bituminous coal ash on an isolated heat exchanger tube: Effects of coal properties on deposit growth" Progress in Energy and Combustion Science, Vol 16, 1990, pp. 327-345

[4] S. Srinivasachar, C.L. Senior, J.J. Helble and J.W. Moore "A fundamental approach to the prediction of coal ash deposit formation in combustion systems" Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Vol 24, 1992, pp. 1179-1187

[5] Galen H. Richards, Peter N. Slater and John N. Harb "Simulation of Ash Deposit Growth in a Pulverized Coal-Fired Pilot Scale Reactor" Energy & Fuels, Vol 7, 1993, pp. 774-781

[6] Kalmanovitch, D.P., Frank, M. "An Effective Model of Viscosity for Ash Deposition Phenomena" In Engineering Foundation Conference on Mineral Matter and Ash Deposition from coal, 1988

[7] 정대로, 한가람, 허강열, 박호영 "탈휘발 예측 코드를 활용한 탈휘발 및 최반응 모델 평가", 한국연소학회 Vol 17, 2012, pp. 32-39