

석탄 가스화시 회분의 임계점도온도 및 플럭스 비율 변화에 따른 벽면 슬래그 거동 특성 분석

예인수* · 류창국*[†] · 김봉근**

Effects of critical viscosity temperature and flux feeding ratio on the slag flow behavior on the wall of a coal gasifier

Insoo Ye*, Changkook Ryu*[†], Bongkeun Kim**

ABSTRACT

In the entrained-flow coal gasifier, coal ash turns into a molten slag most of which deposits onto the wall to form liquid and solid layers. Critical viscosity refers to the viscosity at the interface of the two layers. The slag layers play an important role in protecting the wall from physical/chemical attack from the hot syngas and in continuously discharging the ash to the slag tap at the bottom of the gasifier. For coal with high ash melting point and slag viscosity, CaO-based flux is added to coal to lower the viscosity. This study evaluates the effect of critical viscosity temperature and ash/flux ratio on the slag behavior using numerical modelling in a commercial gasifier. The changes in the slag layer thickness, heat transfer rate, surface temperature and velocity profiles were analyzed to understand the underlying mechanism of slag flow and heat transfer.

Key Words : Gasification, Slag layer, Numerical method, Flux, Critical viscosity

석탄 가스화 기술은 복합 발전(IGCC), 합성천연가스(SNG), 수소 또는 액체연료의 생산을 위해 지속적으로 적용되고 있다. 상용 가스화 설비에서는 Shell, Prenflo, Texaco, Siemens 등의 분류층 가스화기가 주로 적용되는데, 이 때 내부의 고온 분위기에서 용융된 석탄의 회분이 벽면에 부착되어 슬래그 층을 형성함으로써 벽면의 보호에 중요한 역할을 한다[1]. 초기에 부착된 회분은 낮은 벽면 온도에 의해 용융점 이하로 떨어져 고체 슬래그층을 형성한다. 이후 고체층에 의해 열저항이 커지면서 표면의 슬래그가 액체 상태로 유지되며 중력에 의해 아래로 흐른다. 두 상(phase)의 슬래그층은 정상적인 운전조건에서 일정 두께를 유지하며 회분을 하부로 배출한다.

벽면의 슬래그층 두께는 회분량이나 조성, 온도 등의 다양한 인자들에 의해 달라진다. 특히 회분의 양이나 조성은 석탄에 따라 차이가 있어 연속적인 슬래그의 배출을 위해 적절한 탄종의 선택이 중요하다. 이 때 슬래그의 점도는 층 두께를 결정하는 중요한 인자로서, 고온에서 Newtonian 유체의 특성을 띠지만 조성에 따라 낮은 온도에

서 non-Newtonian 거동을 보이기도 한다. 이런 경우 상대적으로 움직임이 거의 없기 때문에 고체층으로 분류하기도 하며, 이때의 점도를 임계점도(critical viscosity), 온도를 임계점도온도(critical viscosity temperature, Tcv)라 한다. 임계점도는 일반적으로 25 Pa·s 내외로 보지만 회분 조성에 따라 달라질 수 있다[2].

플럭스(flux)는 회분의 점도가 높은 탄종에 대해 석탄과 함께 투입되는 물질로서 보통 CaCO₃를 주성분으로 하여 슬래그의 점도를 낮춰 하부로 잘 흘러내리게 하는 역할을 한다.

회분 조성 및 함량, 슬래그의 점도, 플럭스 투입 비율 등 슬래그 거동에 영향을 미치는 주요 인자들은 슬래그 층의 두께와 유속, 이에 따른 벽면 열전달 등 운전 특성에 영향을 주게 된다. 따라서 이러한 인자들을 정량적으로 분석하면 이를 지배하는 메커니즘을 이해하고 설계 및 운전조건 수립에 참고할 수 있다. 본 연구에서는 슬래그 거동에 대한 수치해석모형을 이용하여 주요 인자인 슬래그의 임계점도와 회분/플럭스 투입비율에 따른 슬래그 거동 특성 변화를 분석하였다.

슬래그 거동에 대한 해석모형은 Seggiani[3]에 의해 제시된 모델이 여러 연구자들에 의해 쓰인 바 있고[4-6], 최근에 Yong 등이 새로운 모델을 제시한 바 있다[8]. 그러나 두 모델 모두 온도 분

* 성균관대학교 기계공학부

** 두산중공업 석탄전환시스템개발팀

† 연락저자, cryu@me.skku.ac.kr

TEL : (031)290-4841 FAX : (031)290-5889

Table 1 Conservation equations

Mass:	$m_{out} = m_{in} + m_{deposit}$
Energy:	$H_{out} = H_{in} + Q_{cond,in} + Q_{cond,out}$
Momentum:	$M_{out} = M_{in} + M_{deposit}$
	$+ \frac{A}{r} \frac{d}{dr} \left(r\mu \frac{dv}{dr} \right) + \rho g V \cos \theta$

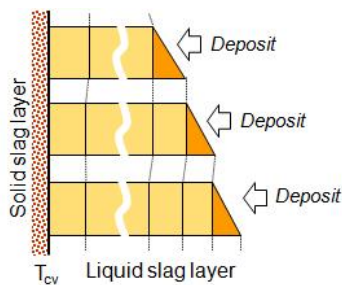


Fig. 1 Basic concept for the numerical model.

포와 슬래그 점도에 대한 단순화에 기초하고 있어, 각각 가스화기 온도가 낮거나 높은 경우 예측의 신뢰성이 떨어지는 단점이 있다[7].

진술한 모델의 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 Table 1과 같은 슬래그 거동의 지배방정식을 이산화한 2차원 수치해석모델을 수립하여 해석하였다[9]. 이 때 응용된 회분입자가 슬래그 층 표면에 지속적으로 부착되기 때문에 Fig. 1에 나타난 바와 같이 새로운 검사체적을 형성하는 방식으로 고려하였다. 즉, 회분이 부착되면 동일한 질량 유량의 제어체적을 추가하여 온도 및 속도에 따라 격자 간격이 결정되도록 설정하였다. 제어체적은 질량을 그대로 유지한 채 하부로 전달된다. 액체슬래그가 수치해석에 의해 거동 및 열전달 특성이 결정되면, 고체슬래그는 원통형의 열전달 방정식에 의해 구해진다. 고체와 액체 슬래그간 경계온도는 Tcv로 설정하였다.

해석에 적용할 형상은 Fig. 2에 나타난 스페인의 Prenflo 가스화기[3]로서 내부 온도는 1800 K 이고 벽면은 수냉벽 조건으로 고려하였다. 석탄의 회분 중 벽면에 부착되는 양은 총 4 kg/s로서 1750 K의 온도로 전체 벽면에 균일하게 부착되는 것으로 가정하였다. 그리고 회분과 플릭스의 조성을 통해 참고문헌의 상관식[3, 10-12]을 적용하였다. 이러한 기준조건에 대해 Table 2에 나타난 바와 같이 임계점도를 2.5-100 Pa·s의 범위에서 변화시킨 5개 경우와, 플릭스의 투입비율을 4:1-4:4까지 변화시킨 4개 경우에 대해 슬래그 거동에 대한 해석을 수행하였다. 임계점도가 변한 경우 임계점도온도는 1349-1710K의 범위에서 연

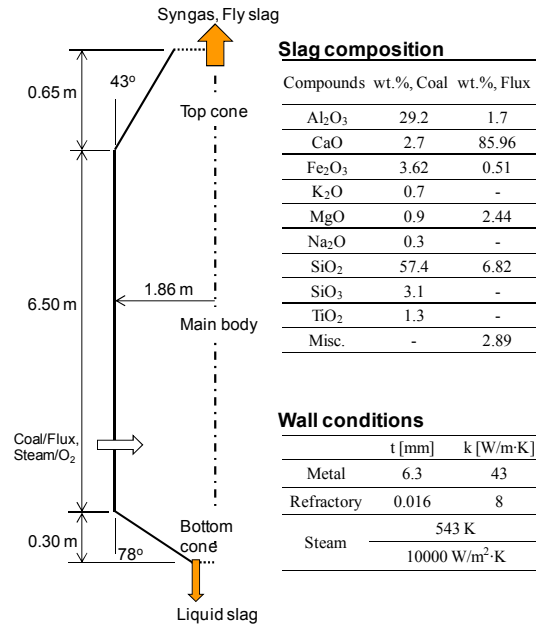


Fig. 2 Gasifier geometry and operation conditions

Table 2 Simulation cases

Ash: calcined flux	4:1, 4:2(ref.), 4:3, 4:4
Critical viscosity (Pa·s)	2.5, 10, 25(ref.), 50, 100

동되어 변한다.

Fig. 3은 플릭스의 투입량을 바꿨을 때 액체슬래그 층의 두께 변화를 나타낸 것이다. 플릭스 비율이 4:1에서 4:4로 커질수록 슬래그층 두께가 얇아졌으나 변화폭은 크지 않았다. 그리고 플릭스 투입량이 적을 때 슬래그의 총 부착량 증가로

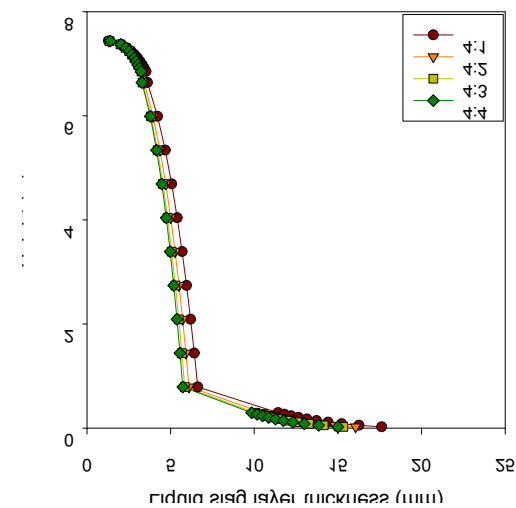


Fig. 3 Liquid slag layer thickness for different feeding rate (4 cases)

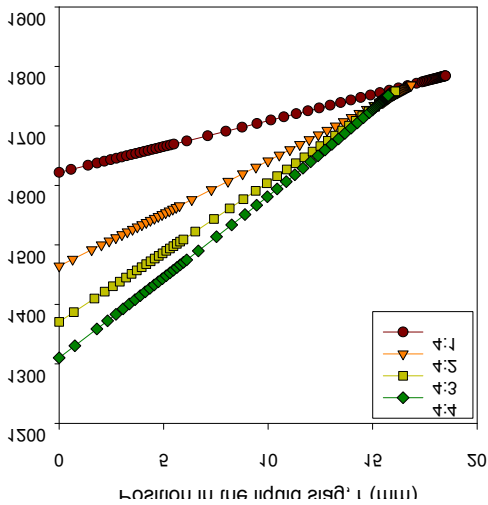


Fig. 4 Temperature profile in the liquid slag layer at the slag tap for different ash/flux ratios.

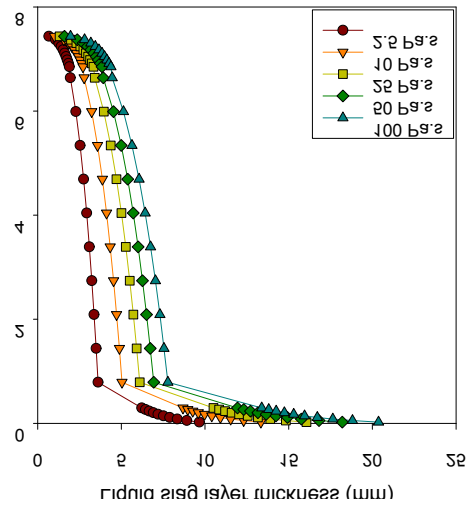


Fig. 6 Liquid slag thickness for different critical viscosities.

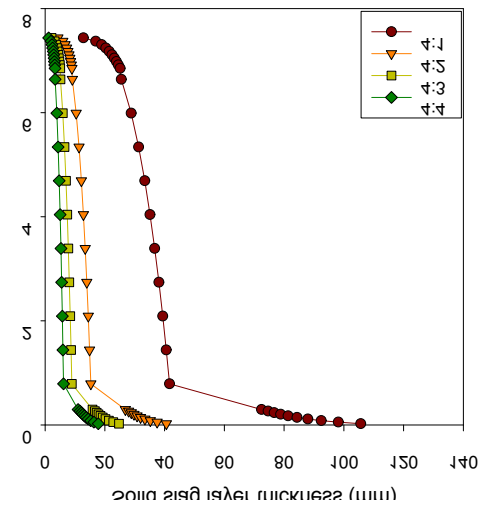


Fig. 5 Solid slag thickness for different ash/flux ratios.

인한 영향보다 점도 감소에 따른 영향이 더 크게 나타났다. 그러나 부착량이 증가함에 따라 증가폭은 점점 줄어드는 경향을 보였다.

Fig. 4는 플럭스의 투입비에 따른 액체 슬래그 내 온도분포를 나타낸 것이다. 여기에서 두께가 0 mm인 부분은 고체슬래그와의 경계면을 의미한다. 플럭스의 투입비율이 증가할수록 슬래그의 점도가 낮아지므로, 25 Pa·s를 기준으로 한 T_{cv} 역시 낮아지게 된다(4:1일 때 1622 K, 4:4일 때 1316 K). 또한 T_{cv} 의 변화폭에 비해 슬래그 두께와 표면의 온도 변화는 크지 않아 경계면 근처의 온도구배가 T_{cv} 에 의해 결정됨을 확인할 수

있다. 온도구배는 고체 슬래그층으로의 열전달량을 의미하므로, Fig. 5와 같이 층 두께를 결정하게 된다. 이 때 4:1 비율의 경우 고체 슬래그 두께가 최대 105 mm까지 나타났다. 이는 벽면에서 수직 방향의 두께이므로, 벽면 경사를 고려한 수평방향 두께는 620 mm가 된다. 따라서 슬래그 탭 출구 반경(433 mm)보다 크므로 막힐 가능성이 높다.

위 해석 결과를 통해 회분/플럭스의 비가 4:2인 경우를 대상으로 임계점도를 달리하여 계산하였다. 그 결과, Fig. 6과 같이 유사한 경향을 가진 액체 슬래그 두께 변화가 나타났다. 전체적으로 임계점도를 낮게 설정할수록 액체 상태로 거동할 수 있는 점도 영역이 좁아지기 때문에 두께가 얇게 나타났다.

T_{cv} 는 Fig. 7과 같이 2.5 Pa·s에서 1710 K이며 임계점도가 증가할수록 1349 K (100 Pa·s)까지 감소하였다. 앞서 Fig. 5의 결과와 달리 액체층 두께변화가 크게 나타나, 이에 따른 온도구배 및 열유속의 변화로 인해 Fig. 8에 나타난 바와 같이 고체슬래그층이 더 두꺼워졌다.

가스화기 벽면에서 형성되는 슬래그는 조성에 따라 다양한 거동을 보이기 때문에 이러한 변화에 대한 분석이 필요하다. T_{cv} 가 높은 경우 플럭스의 투입에 따라 급격히 감소하나, 일정비율 이상인 경우 감소폭이 작아지므로 이를 기초로 회분 특성에 따른 플럭스의 적정 투입 범위에 대한 분석이 가능할 것으로 판단된다. 임계점도의 경우 T_{cv} 를 변화시키는데 25 Pa·s 이상이면 슬래그 층 두께에 큰 영향이 없지만, 이하인 경우 민감하게 감소하게 된다. 따라서 탄종별 회분 특

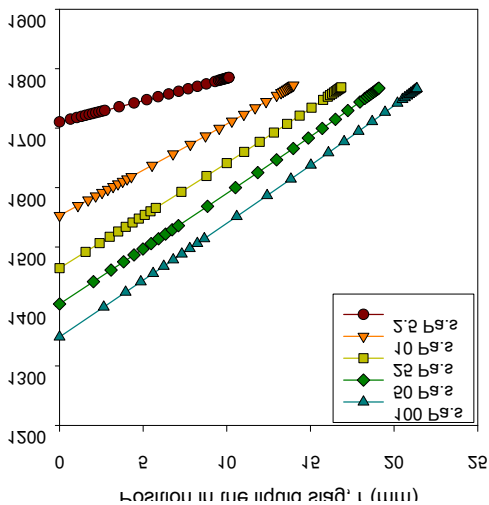


Fig. 7 Temperature profile in the liquid slag layer for different critical viscosity (5 cases)

성을 실험적으로 분석하여 실제 임계점도와 Tcv를 파악하는 것이 매우 중요하다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)과 두산중공업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(2011951010001A)

참고 문헌

- [1] N.P. Cheremisinoff, R. R. J. Rezaian, "Gasification Technologies", CRC Press, 2005.
- [2] C. Higman, M. Van Der Burgt. "Gasification", Oxford, 2008.
- [3] M. Seggiani, "Modelling and simulation of time varying slag flow in a Prenflo entrained-flow gasifier", Fuel, Vol. 77(14), 1998, pp. 1611-1621.
- [4] B. Li, A. Brink, M. Hulpa, "Simplified Model for Determining local heat flux boundary conditions for slagging wall", Energy & Fuels, Vol. 23, 2019, pp. 3418-3422.
- [5] J. Kittel, F. Hannemann, F. Mehlhose, S. Heil, B. Meyer, "Dynamic modelling of the heat transfer into the cooling screen of the SFGT-Gasifier", Proceedings of the 7th Modelica Conference. Como., Italy, 2009, p. 326.
- [6] J. Ni, Z. Zhou, G. Yu, Q. Liang, F. Wang, "Molten slag flow and phase transformation behaviors in a slagging entrained-flow coal

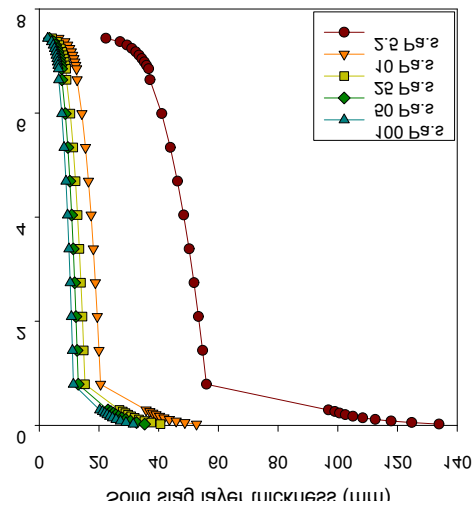


Fig. 8 Solid slag layer thickness for different critical viscosity (5 cases)

gasifier", Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 49(23), 2010, pp. 12302-12310.

[7] I. Ye, C. Ryu, B. Kim, "Numerical modelling of slag flow and heat transfer on the wall of an entrained coal gasifier. Part I: Model development and comparison with analytical models", Fuel, submitted.

[8] S.Z. Yong, M. Gazzino, A. Ghoniem, "Modeling the slag layer in solid fuel gasification and combustion-Formulation and sensitivity analysis", Fuel, Vol. 92(1), 2012, pp. 162-170.

[9] 예인수, 류창국, 김봉근, "석탄 가스화기 내벽의 슬래그 유동 해석 및 열전달 모델링", 제 47회 KOSCO SYMPOSIUM 초록집(2013년도 추계 학술대회), 2013, pp. 211-214.

[10] K.C. Mills and J.M. Rhine, "The measurement and estimation of the physical properties of slags formed during coal gasification : 1. Properties relevant to fluid flow", Fuel, Vol 68(2), 1999(a), pp. 193-200.

[11] K.C. Mills and J.M. Rhine, "The measurement and estimation of the physical properties of slags formed during coal gasification : 2. Properties relevant to heat transfer", Fuel, Vol 68(7), 1999(b), pp. 904-910.

[12] D.P. Kalmanovitch and M. Frank, "An effective model of viscosity for ash deposition phenomena", Proceedings of Mineral Matter and Ash Deposition from Coal; Bryers, RW; Vorres, KS, Eds, 1988, pp. 22-26.