

## 분류층 석탄가스화기 하부 슬래그 탭 부근의 슬래그 거동 해석

정재화<sup>†</sup>, 지준화\*, 이중원\*, 서석빈\*, 김기태\*, 박호영\*

\*한국전력공사 전력연구원 수화력발전연구소

### Analysis of Slag Behavior near the Slag Tap in an Entrained Flow Coal Gasifier

JAEHWA CHUNG<sup>†</sup>, JUNHWA CHI\*, JOONGWON LEE\*, SEOKBIN SEO\*, KITAE KIM\*, HOYOUNG PARK\*

\*Power Generation Lab. KEPCO Research Institute, 65 Munji-Ro,  
Yuseong-Gu, Daejeon, 305-760, Korea

#### ABSTRACT

A steady-state analysis has been conducted to predict the behavior of the slag layer in the entrained-flow slagging coal gasifier. The analysis takes into consideration the composition dependent slag properties such as density, viscosity, heat capacity, thermal conductivity, and temperature of critical viscosity. The amount of added flux to the design coal and the variation of syngas temperature inside the gasifier have been adopted as calculation parameters. The predicted results are the local thickness of the molten and the solid slag layers, and the slag viscosity and the velocity distribution across the molten slag layer along the gasifier wall near the slag tap.

**KEY WORDS** : Slag behavior(슬래그 거동), Coal gasification(석탄가스화), Slag viscosity(슬래그 점도), IGCC(석탄가스화복합발전), Flux(첨가제)

#### Nomenclature

$A_i$	: wall surface area of the cell-i, m <sup>2</sup>	$m_{ex,i-1}$	: slag mass flow rate to the cell-i, kg s <sup>-1</sup>
$C_p$	: slag heat capacity, J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	$q_{in,i}$	: heat transfer rate to the cell-i, W
$D_i$	: average wall diameter of the cell-i, m	$q_{ex,i}$	: heat transfer rate exiting the cell-i, W
$g$	: gravitational acceleration, 9.8 m s <sup>-2</sup>	$q_{dep,i}$	: heat transfer rate from the ash deposit, W
$m_{in,i}$	: mass flow rate supplied to the cell-i, kg s <sup>-1</sup>	$q_{out,i}$	: heat transfer rate to the metal wall, W
$m_{ex,i}$	: slag mass flow rate exiting the cell-i, kg s <sup>-1</sup>	$q_{ex,i-1}$	: heat transfer rate flowing to the cell-i, W
		S	: silica ratio
		T	: slag temperature, K
		$T_{cs}$	: temperature of critical viscosity, K

<sup>†</sup>Corresponding author : jhchung@kepri.re.kr

[ 접수일 : 2011.10.7 수정일 : 2011.11.1 게재확정일 : 2011.12.27 ]

- $T_m$  : average metal temperature, K
- $T_r$  : average refractory temperature, K
- $T_{rs}$  : slag-refractory interface temperature, K
- $T_g$  : syngas temperature, K
- $T_0$  : syngas temperature, K
- $v_s$  : slag velocity,  $\text{ms}^{-1}$
- $x$  : distance from the slag-gas interface, m
- $x_i$  : molar fraction of species  $i$
- $\alpha_{eff}$  : slag thermal diffusivity,  $\text{m}^2\text{s}^{-1}$
- $\beta$  : slope of gasifier wall,  $^\circ$
- $\delta_l$  : liquid slag thickness, m
- $\delta_m$  : membrane wall thickness, m
- $\delta_s$  : solid slag thickness, m
- $\epsilon$  : liquid slag emissivity
- $\eta$  : slag viscosity,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$
- $\lambda$  : thermal conductivity,  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
- $\lambda_m$  : metal wall thermal conductivity,  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
- $\lambda_r$  : refractory thermal conductivity,  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
- $\lambda_s$  : slag thermal conductivity,  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
- $\rho_s$  : slag density,  $\text{kgm}^{-3}$
- $\tau$  : viscous shear stress, Pa
- $\sigma$  : Stefan-Boltzmann constant,  $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

## 1. 서 론

석탄은 매장량이 풍부하여 발전용 연료로 향후에도 지속적으로 사용될 것으로 전망된다. 석탄가스화 복합발전(IGCC)은 석탄을 이용한 고효율 차세대 발전방식으로 전세계적으로 격상설계와 상용화가 활발히 진행되고 있다. IGCC에 사용되는 가스화기는 고온고압에서 운전되는 분류층 가스화기(entrained-flow gasifier)가 주로 사용되고 있다. 이러한 고온고압 분류층 가스화기에서는 석탄에 포함된 회 성분을 대부분 고온에서 용융 슬래그 형태로 가스화기 벽을 타고 흘러내리게 하여 가스화기 하부의 슬래그 탭을 통해 배출시킨다. 따라서 가스화기의 설계와 안정적인 운전을 위해서는 고온 고압의 석탄가스화기에서 용융 슬래그를 원활하게 배출시키는 것은 매우 중요하다.

고온고압 분류층 가스화기에서 용융슬래그의 유동은 다상유동이며 복잡한 열전달과 물질전달을 수

반한다. 이러한 용융슬래그의 거동을 파악하기 위해서 최근 여러 전산해석적 연구가 수행되어 왔다. 먼저 Seggiani<sup>1)</sup>는 시간 변동에 따른 슬래그 해석모델을 제시하여 Puertollano의 IGCC 플랜트에 있는 Prenflo 가스화기의 슬래그 거동을 해석하였다. 그 후 Benyon 등<sup>2)</sup>과 Bockelie 등<sup>3)</sup>이 Seggiani의 모델을 토대로 다른 형태의 가스화기에 적용하여 슬래그 거동을 해석하였다. Yong 등<sup>4)</sup>은 입자포집 모델과 용융 슬래그의 3차원 온도함수 적용 등을 통하여 슬래그 모델을 개선하여 정상상태의 슬래그 거동을 해석하였다. 아울러 슬래그-가스 유동을 VOF (volume of fluid) 모델을 사용하여 2상유동으로 해석<sup>5,6)</sup>하는 연구도 수행되고 있다. 국내에서는 최근 한 국형 가스화 플랜트의 설계 및 운전기술 개발을 위하여 가스화 공정, 가스화 특성, 슬래그 특성에 관한 전산해석과 모델링 연구가 활발히 수행되고 있다<sup>7-11)</sup>.

본 논문에는 상용급 가스화기 형상을 고려하여 슬래그의 거동을 정상상태로 해석할 수 있는 모델을 도출하였다. 도출된 슬래그 해석 모델을 사용하여 가스화기의 설계탄을 대상으로 flux로 석회석을 첨가하였을 경우에 첨가비율과 가스화기내의 합성 가스 온도를 변경하여 가스화기 하부 슬래그 탭 부근에서의 슬래그 거동을 해석하였다. 주요 해석결과로 flux 첨가량에 따라 슬래그 탭 하부에서 용융 슬래그 및 고체 슬래그 두께, 슬래그의 점도, 용융 슬래그의 점도 및 속도분포 등 슬래그 거동의 주요 특성들을 예측하였다. 또한 가스화기 내부의 합성 가스 온도가 변할 경우에 대해서도 용융 슬래그 및 고체 슬래그의 두께변화를 해석하여 가스화기 설계와 슬래그 배출을 원활히 할 수 있는 적정 운전조건 도출에 기초자료로 활용할 수 있도록 하였다.

## 2. 슬래그해석 모델

### 2.1 슬래그 물성치

슬래그의 거동해석을 위해서는 슬래그의 물성치에 관한 정보가 필요하며, 여기서는 본 논문에서 사용한 슬래그의 물성치들인 밀도, 점도, 비열, 열전도도를 구하기 위해 사용한 수식들을 정리하였다.

Table 1 Coal slag composition of design coal

Components	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Others
Wt%	57.4	29.2	4.4	0.3	0.7	1.3	2.7	0.9	3.1

Table 1은 본 연구에 사용한 가스화기 설계탄의 ash 조성을 나타내며, 이 조성을 기반으로 슬래그의 특성을 해석하였다. Table 1에 표시한 설계탄의 ash 조성은 acidic 성분들(SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>)이 다량 포함되어 있어서 슬래그의 용융점이 높을 것으로 예측된다. 따라서 설계탄에 Table 2의 성분으로 구성된 석회석을 flux로 추가하여 ash의 용융점을 낮추어 슬래그의 특성 변화에 미치는 영향을 해석하였다.

Rodgers<sup>12)</sup>는 슬래그 밀도는 화학조성과 물리적 구조에는 의존하고 온도의 영향은 무시할 수 있으며, 석탄 슬래그의 밀도는 2,000~3,000kg/m<sup>3</sup> 범위임을 제시하였다. 본 연구에서는 화학조성을 기반으로 슬래그의 밀도를 구하기 위해서 Mills 등<sup>13)</sup>이 제시한 다음 식 (1)을 사용하였다.

$$\rho_s = 2460 + 18(\%FeO + \%Fe_2O_3 + \%MnO) \quad (1)$$

여기서, %는 슬래그 조성성분의 질량분율을 나타낸다.

슬래그의 거동해석에 필요한 열용량  $C_p$ 는 Mills 등<sup>14)</sup>이 제시한 식 (2)를 사용하여 구하였다. 이 식에서 슬래그를 구성하는 순수 성분에 대한 열용량 값과 각 성분의 몰분율로부터 슬래그의 열용량  $C_p$ 를 산정한다.

$$C_p = x_1 C_{p1} + x_2 C_{p2} + x_3 C_{p3} + \dots \quad (2)$$

여기서  $x_i$ 는 슬래그의 구성성분 중  $i$ -성분의 몰분율,  $C_{pi}$ 는  $i$ -성분의 열용량 값을 나타낸다.

Table 2 Flux composition<sup>11)</sup>

Components	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	Others
Wt%	90.0	3.0	4.0	1.0	0.3	0.2	1.5

또한 슬래그의 열전도도는 슬래그의 열확산 계수, 슬래그 열용량 및 슬래그의 밀도로부터 다음 식 (3)으로 구하였다<sup>1)</sup>.

$$\lambda_s = \alpha_{eff} C_p \rho_s \quad (3)$$

여기서  $\alpha_{eff}$ 는 슬래그의 열확산 계수,  $C_p$ 는 슬래그의 열용량,  $\rho_s$ 는 슬래그의 밀도이다.  $\alpha_{eff}$  값은 실험치이며  $4.5 \times 10^{-7} m^2/s$ 를 사용하였다.

본 연구에서 슬래그가 용융상태로 유지되는 최소 온도로 임계점온도(temperature of critical viscosity,  $T_{cv}$ )를 사용하였다.  $T_{cv}$ 는 슬래그는 고온에서 낮은 점도를 유지하다가 온도가 낮아지면서 점도가 급격히 증가하며 이 때의 온도로 정의하며, 고체 슬래그와 용융 슬래그의 경계조건으로  $T_{cv}$ 를 사용하였다. Vargas 등<sup>15)</sup>의 논문에서  $T_{cv}$ 를 예측하기 위한 여러 경험식들이 정리되어 있으나, 박 등<sup>10)</sup>은 기존의 경험식들 보다 Factsage 평형계산에 근거한  $T_{cv}$ 의 예측식이 실용성이 높음을 확인하였다. 구 등<sup>11)</sup>은 Factsage 해석결과로부터 Table 1의 300MW급 IGCC용 가스화기 설계탄은  $T_{cv}$ 가 1,650 °C로 매우 높으므로, 석회석을 flux로 첨가하여  $T_{cv}$ 가 낮아지는 것을 예측하였다. 구 등<sup>11)</sup>의 Factsage 해석결과에서 flux로 석회석을 2%, 4%, 6%, 8% 첨가(석탄 무게 기준)했을 경우에 대한  $T_{cv}$  값을 발췌하여 본 슬래그 거동 해석에 사용하였다.

슬래그의 점도는 슬래그의 거동예측에 중요한 변수이며 본 연구에서는 아레니우스 형으로 표현되는 다음 식을 사용하였다<sup>15)</sup>.

$$\log(\eta) = 4.468S^2 + 1.265(10^4/T) - 8.44 \quad (4)$$

여기서  $\eta$ 는 점도로 단위는 Pa·s이고,  $T$ 는 슬래그의 온도이며 단위는 K이다. 또한  $S$ 는 실리카 비(silica ratio)이며 다음 식 (5)로 정의한다. 식 (4)에서 슬래그의 점도  $\eta$ 는 슬래그 온도  $T$ 와 실리카 비  $S$ 의 영향을 받는다. 즉, 슬래그 온도  $T$ 가 높고 실리카 비  $S$ 가 낮을수록 슬래그의 점도  $\eta$ 가 낮아진다.

Table 3 Change of slag properties with flux addition

Flux addition (coal base)	2%	4%	6%	8%
$T_{cv} (^{\circ}C)$	1,430	1,460	1,400	1,320
$\rho_s (kg/m^3)$	2,536	2,533	2,529	2,526
$C_p (J/kgK)$	1,435	1,438	1,439	1,440
$\lambda_s (W/mK)$	1.64	1.64	1.64	1.64
$S$	0.79	0.74	0.68	0.64

$$S = \frac{SiO_2}{(SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO)} \quad (5)$$

Table 1의 석탄 ash 조성에 Table 2의 석회석을 추가할 경우 슬래그의 조성이 변한다. Table 1의 석탄 ash 조성에 flux로 석회석을 2%, 4%, 6%, 8% 첨가(석탄 무게기준)했을 경우 슬래그의 조성 변화를 고려하여 식 (1)~(5)로부터 본 해석에 사용한 슬래그의 물성치를 산정하여 Table 3에 정리하였다.

## 2.2 슬래그 해석 모델

슬래그 거동특성을 해석하기 위해서 Seggiani<sup>1)</sup>가 사용한 비정상 상태 슬래그 모델을 기반으로 정상상태(steady state)의 해석식을 유도하여 아래에 정리하였다. 본 슬래그 거동해석을 위해서는 Reid 등<sup>16)</sup>과 유사한 다음의 가정들이 사용되었다.

- 슬래그 유동은 정상상태(steady state)이다.
- 용융 슬래그의 흐름은 뉴턴 유동이다.
- 고체 슬래그와 용융슬래그의 경계면에서의 온도는 임계온도( $T_{cv}$ )이다.
- 합성가스와 용융슬래그 표면 간의 전단응력은 무시한다.
- 슬래그 층을 통한 온도구배는 선형이다.
- 열전달은 벽면에 수직이다.
- 슬래그의 밀도, 열용량 및 열전도도는 온도에 무관하다.

본 슬래그 해석은 멤브레인(membrane) 벽 타입 가스화기를 기준으로 하였다. Fig. 1은 슬래그 거동 해석을 위해서 사용한 벽면 슬래그 계산 제어체적

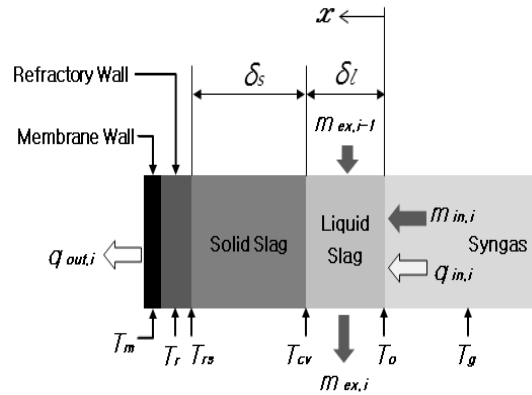


Fig. 1 A control volume (the i-th cell) for calculating the slag behavior in the gasifier

을 보여준다. Fig. 1에서 슬래그 층의 형성되는 모양을 표시하였으며, 금속의 멤브레인 벽 위에 내화재(refractory)로 코팅된 벽이 있고, 그 위에 고체 슬래그 층과 용융 슬래그 층이 생성된다. 가스화기가 고온고압에서 운전되면 고체 슬래그 층이 멤브레인 벽 위에 코팅되어 멤브레인 벽을 보호하는 역할을 한다.

Fig. 1에서,  $m_{in,i}$ 는 가스화기 내부에서 ash가 가스화기 벽면에 부착되는 슬래그의 질량유량,  $m_{ex,i-1}$ 는 상류 계산 제어체적에서 현재 계산 제어체적으로 흘러들어오는 슬래그의 질량유량이며,  $m_{ex,i}$ 는 계산 제어체적에서 벽면 아래로 흘러내리는 슬래그의 질량유량이다. 용융 슬래그의 두께는  $\delta_l$ , 고체 슬래그의 두께는  $\delta_s$ 로 표시하였다.  $x$ 는 합성가스와 인접한 용융 슬래그 표면에서 고체 슬래그 방향으로의 거리를 나타낸다.

Fig. 1 하부에서  $T_g$ 는 가스화기 내부의 합성가스 온도,  $T_0$ 는 용융 슬래그의 표면온도,  $T_{rs}$ 는 고체 슬래그와 내화재의 접촉면 온도,  $T_r$ 은 내화재의 평균 온도,  $T_m$ 은 멤브레인의 평균온도를 나타낸다.

정상상태에서의 용융슬래그의 질량 보존식은 다음 식으로 표현된다.

$$m_{in,i} + m_{ex,i-1} - m_{ex,i} = 0 \quad (6)$$

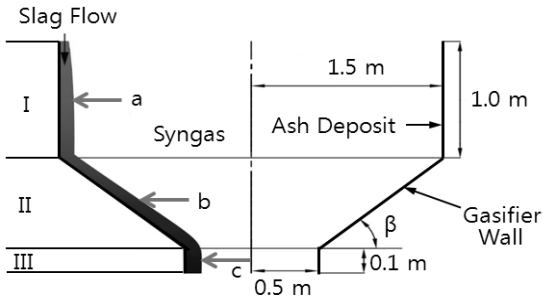


Fig. 2 Geometry of the gasifier near the slag tap

각 슬래그의 계산 제어체적에서 상류 제어체적으로부터  $m_{ex,i-1}$ 이 정해지고, 벽면에 부착되는 슬래그의 질량유량  $m_{in,i}$ 에 대한 정보가 있으면 현재 제어체적에서 흘러나가는 슬래그의 질량유량  $m_{ex,i}$ 를 구할 수 있다.

Fig. 1의 계산 제어체적에서 용융 슬래그의 계산 제어 체적에 대해, 모든 가속도항을 무시하면 정상 상태 운동량 보존식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d}{dx} \left( \eta \frac{dv_s}{dx} \right) = \rho_s g \cos \beta \quad (7)$$

여기서  $v_s$ 는 슬래그-가스 접촉면으로부터 거리  $x$ 만큼 떨어진 위치에서의 슬래그 속도,  $\beta$ 는 Fig. 2에 표시된 바와 같이 슬래그 유동이 중력 가속도 방향과 이루는 경사각도,  $g$ 는 중력가속도를 나타낸다. 식 (7)을 해석하기 위한 경계조건<sup>17)</sup>은 다음과 같다.

$$x = 0 \text{ 에서 } \tau = \eta \frac{dv_s}{dx} = 0$$

$$x = \delta_l \text{ 에서 } v_s = 0$$

여기서,  $\tau$ 는 전단응력을 나타내며 슬래그-가스 사이의 마찰이 무시하여  $\tau=0$ 으로 가정한다. 또한 용융 슬래그와 고체 슬래그 경계면에서의 유동속도  $v_s = 0$ 이다.

용융 슬래그 층 내부에서 슬래그의 점도는 거리

$x$ 에 따라 변하며, Bird 등<sup>17)</sup>의 가정에 따라 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\eta(x) = \eta(0) \exp\left(-\frac{\alpha x}{\delta_l}\right) \quad (8)$$

$$\text{여기서, } \alpha = -\ln \frac{\eta(\delta_l)}{\eta(0)}$$

$\eta(0)$ 은 용융 슬래그 표면에서의 점도,  $\eta(\delta_l)$ 은 용융 슬래그와 고체 슬래그 경계면에서의 점도를 표시하며 앞의 식 (4)를 사용하여 값을 구할 수 있다.  $\eta(\delta_l)$ 은 앞의 식 (4)에서 온도 항에  $T_{cw}$ 를 대입하여 구하며,  $\eta(0)$ 은 용융 슬래그의 표면온도  $T_0$ 를 알면 계산된다.

식 (8)을 식 (7)에 대입하여 적분하면 용융 슬래그의 유동속도  $v_s$ 가  $x$ 의 함수로 다음 식으로 표현된다.

$$v_s(x) = \frac{\rho_s g \delta_l^2 \cos(\beta)}{\eta(0)} \times \left[ e^{\alpha \left( \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} \right)} - e^{\frac{\alpha x}{\delta_l} \left( \frac{x}{\alpha \delta_l} - \frac{1}{\alpha^2} \right)} \right] \quad (9)$$

식 (9)를 용융 슬래그의 두께 방향으로 적분하면  $i$ -제어체적을 통과하는 질량유량  $m_{ex,i}$ 가 다음과 같이 구해진다.

$$m_{ex,i} = \pi D_i \int_0^{\delta_l} \rho_s v_s(x) dx = \frac{\pi D_i \rho_s^2 g \delta_l^3 \cos(\beta)}{\eta(0)} \times \left[ e^{\alpha \left( \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} + \frac{1}{\alpha^3} \right)} - \frac{2}{\alpha^3} \right] \quad (10)$$

여기서  $D_i$ 은 제어체적에서의 가스화기의 평균직경을 표시한다. 식 (10)으로부터 용융 슬래그의 두께  $\delta_l$ 이 구해진다.

Fig. 1의 계산 제어체적에서 정상상태에서 용융

슬래그에 대한 에너지 보존식은 다음과 같이 표현된다.

$$q_{in,i} + q_{ex,i-1} + q_{dep,i} = q_{out,i} + q_{ex,i} \quad (11)$$

여기서,  $q_{in,i}$ 는 가스화기 내부에서 용융 슬래그 표면으로의 열전달율,  $q_{out,i}$ 는 용융 슬래그에서 멤브레인 벽 쪽으로 전달되는 열전달율,  $q_{ex,i-1}$ 은 상부 제어체적으로부터 유입되는 열전달율,  $q_{ex,i}$ 는 제어체적에서 하부 제어체적으로 빠져나가는 열전달율,  $q_{dep,i}$ 는 용융 슬래그 표면으로 퇴적되는 ash 입자에 의한 열전달율을 나타낸다.

여기서 Li 등<sup>18)</sup>이 사용한 가정을 적용하여  $q_{ex,i-1}$ 와  $q_{ex,i}$ 의 차이가 없는 것으로 하고, 퇴적되는 ash 입자에 의한 열전달율  $q_{dep,i}$ 을 무시하면 식 (11)을 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$q_{in,i} = q_{out,i} \quad (12)$$

가스화기 내부로부터 용융 슬래그 표면으로의 열전달율은 주로 복사열전달에 의해 이루어진다고 가정하면 다음 식이 성립한다.

$$q_{in,i} = A_i \sigma \epsilon (T_g^4 - T_0^4) \quad (13)$$

여기서,  $A_i$ 는 계산 제어체적 벽의 표면적,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수로  $5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ 이며,  $\epsilon$ 은 용융 슬래그의 흡수율이며 0.83으로 가정하였다.

또 슬래그를 통한 온도 구배가 선형적이라는 가정으로부터 용융 슬래그에서 멤브레인 벽 쪽으로 전달되는 열전달율  $q_{out,i}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$q_{out,i} = A_i \lambda_s \frac{T_0 - T_{cw}}{\delta_l} \quad (14)$$

식 (13)과 식 (14)를 식(12)에 대입하면 용융 슬래그 표면온도  $T_0$ 를 수치해법으로 구할 수 있다.

일단  $q_{out,i}$ 가 식 (14)에서 정해지면 아래의 열전도식들로부터 내화재의 평균온도  $T_r$ , 내화재-고체 슬래그의 접촉면 온도  $T_{rs}$ , 고체 슬래그의 두께  $\delta_s$ 가 다음 식들로부터 계산된다.

$$T_r = q_{out,i} \left( \frac{\lambda_r \delta_m + \lambda_m \delta_r}{2\lambda_r \lambda_m A_i} \right) + T_m \quad (15)$$

$$T_{rs} = q_{out,i} \left( \frac{\delta_r}{2\lambda_r A_i} \right) + T_r \quad (16)$$

$$\delta_s = A_i \lambda_s (T_{cw} - T_{rs}) / q_{out,i} \quad (17)$$

앞의 식들에서  $\delta_m$ 과  $\delta_r$ 은 멤브레인 벽의 두께와 단열재의 두께를 각각 나타내며,  $\lambda_m$ 과  $\lambda_r$ 은 멤브레인 벽과 단열재의 열전도도를 각각 나타낸다.

### 2.3 슬래그 해석 조건

고온에서 운전되는 분류층 가스화기의 벽면을 따라서 흘러내리는 용융 슬래그는 가스화기 하부의 슬래그 탭을 통해서 배출된다. 따라서 탄종과 가스화기의 운전조건에 따라 슬래그 탭이 막히지 않고 용융상태의 슬래그가 원활히 배출되어 가스화기가 안정적으로 운전될 수 있도록 하기 위해서는 슬래그 탭 부근에서의 슬래그 거동을 정확히 예측하는 것이 매우 중요하다. Fig. 2는 본 논문에서 해석 대상으로 사용한 가스화기 하부 슬래그 탭 부근의 단면형상을 보여준다. 가스화기의 내경은 3m, 슬래그 탭의 직경은 1m로 가정하고, 가스화기하부에서 슬래그 탭 홀로 연결되는 부분은 경사각도  $\beta$ 는  $30^\circ$ 로 가정하여 해석하였다. 가스화기 해석을 위해서는 슬래그 탭 부근을 3부분(I: 가스화기 몸체 하부, II: 가스화기 슬래그 탭과 연결되는 경사부, III: 슬래그 탭 홀 부)으로 나누어서 해석하였다.

해석을 위해서는 전체 슬래그의 질량 유량은 4.5 kg/s로 가정하였다. 이 값은 회성분 함량이 높은 300 MW 급 IGCC용 가스화기의 설계탄을 기준으로 설계탄에 포함된 회성분의 약 75%가 슬래그로 배출되는 것으로 가정하여 산정한 값이다. Fig. 2에서 I

Table 4 Simulation input parameters

Syngas temperature (°C)	1400~1,600
Total slag discharge rate (kg/s)	4.5
Thermal conductivity of refractory coating $\lambda_r$ (W/mK)	8
Thermal conductivity of membrane wall $\lambda_m$ (W/mK)	43
Thickness of refractory coating $\delta_r$ (mm)	16
Thickness of membrane wall $\delta_m$ (mm)	6.3

부분의 상부에서 가스화기 벽면을 따라 4.0kg/s의 슬래그가 유입되는 것으로 가정하였다. 또한 I, II 및 III 부분에 가스화기 벽면으로 ash가 퇴적되어 슬래그로 되는 총량은 0.5kg/s으로 설정하였고, 가스화기 벽면에 퇴적되는 슬래그양은 가스화기 표면적에 비례하는 것으로 가정하여 해석하였다. 가스화기 내의 합성가스 온도는 1,400°C에서 1,600°C 까지 50°C 간격으로 증가시키면서 해석하였다. Table 4에 해석에 사용한 주요 입력 변수들을 정리하였다.

### 3. 슬래그 해석결과

#### 3.1 Flux 첨가량의 영향 해석

먼저 가스화기 내부의 합성가스 온도를 1,550°C

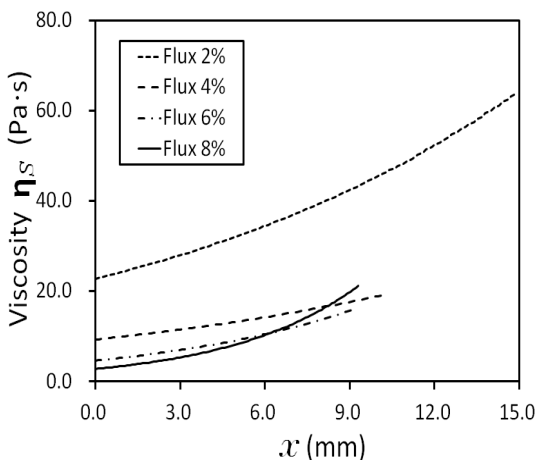


Fig. 3 Viscosity change across the liquid slag layer with different flux additions at the position c ( $T_y = 1550^\circ\text{C}$ )

로 일정하게 가정하고, 슬래그의 용융온도와 점도를 낮추기 위해서 설계탄에 flux로 첨가하는 석회석 양은 2%~8% 범위로 변수로 하여, 용융 슬래그의 두께, 고체 슬래그의 두께, 용융 슬래그의 표면온도, 용융 슬래그 내부의 점도분포, 속도분포 등을 해석하였다. 해석결과는 Fig. 2에서 I 부분의 중간 단면인 a 위치(position a), 직경이 좁아지는 II 부분의 중간 단면인 b 위치(position b), 슬래그 탭인 III 부분의 중간 단면인 c 위치(position c)에 대해서 정리하였다.

Fig. 3은 flux 첨가량에 따라서 c 위치에서 용융 슬래그 표면( $x=0$ )에서 고체 슬래그의 경계면( $x=\delta_l$ )까지 슬래그 내부로 진행하면서 슬래그의 점도 변화를 계산한 결과를 보여준다. 전체적으로 flux를 추가함에 따라서 용융 슬래그 내부의 점도가 낮아지는 경향을 볼 수 있다. 그러나 flux를 2%만 추가할 경우는 용융 슬래그 내부에서 점도가 전반적으로 높은 값을 보이고 있다. 따라서 본 연구에 사용한 설계탄에 flux를 2%만 추가할 경우는 가스화기의 운전시에 슬래그의 배출에 어려움이 예상된다. Flux를 4% 이상 첨가한 경우는 점도가 상당히 낮아지는 것을 알 수 있다. Flux를 추가함에 따라서 용융 슬래그 표면 근처는 점도가 낮아지지만, flux를 8% 추가할 경우는 용융 슬래그와 고체 슬래그의 경계면 부근에서 flux를 4%나 6% 추가한 경우에 비해서 점도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 그 이유는 Table 3에 나타낸 바와 같이 flux를 8% 추가한 경우  $T_{cw}$ 가 상대적으로 더 낮아서 점도가 커지기 때문이다.

Fig. 4는 위치 c에서 flux 첨가량 변화에 따라 용융 슬래그 표면( $x=0$ )에서 고체 슬래그의 경계면( $x=\delta_l$ )까지 용융슬래그 내부로 진행하면서 슬래그의 유동속도 분포를 보여주는 계산 결과이다. Flux를 2% 추가한 경우는 전체적으로 용융 슬래그의 두께가 두꺼우며 속도가 느리고 슬래그의 길이가 길어지는 것을 볼 수 있다. Flux 첨가량이 증가할수록 점도가 낮아지므로 용융 슬래그의 유동속도가 증가하고 두께도 얇아지는 경향을 볼 수 있다.

Fig. 5는 flux인 석회석 첨가량 변화에 따라서

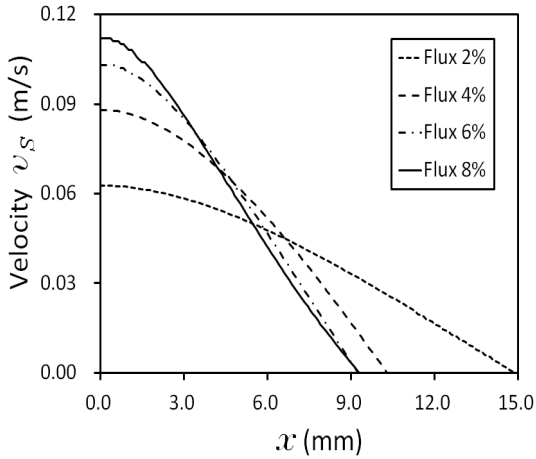


Fig. 4 Velocity profile across the liquid slag layer with different flux additions at the position c ( $T_g = 1550^\circ\text{C}$ )

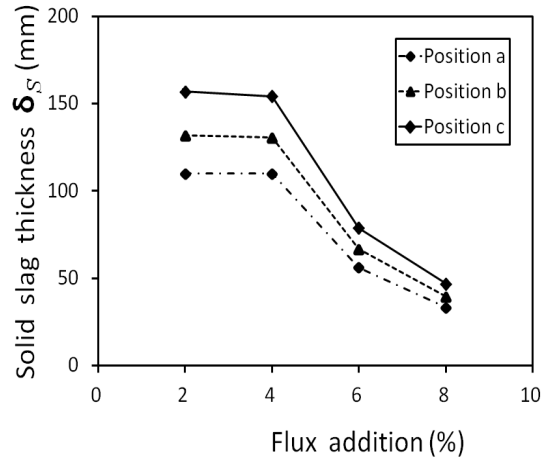


Fig. 6 Thickness of solid slag layer with flux addition at different positions ( $T_g = 1550^\circ\text{C}$ )

Fig. 2에 표시한 가스화기 하부 각각의 위치별로 용융 슬래그 두께  $\delta_l$ 의 변화를 계산한 결과를 보여준다. 이 그림에서 flux 첨가량이 증가함에 따라서 슬래그의 유동성이 커져서 슬래그의 속도가 증가하게 되므로 용융 슬래그의 두께는 얇아지는 경향을 볼 수 있다. Flux 첨가량이 2%의 경우는 용융 슬래그의 두께가 가장 두꺼우나 flux 첨가량이 4% 이상에서는 용융슬래그의 두께 변화가 크지 않다. 또한

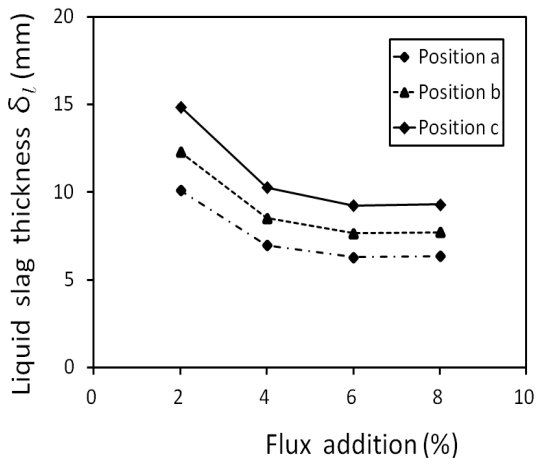


Fig. 5 Thickness of liquid slag layer with flux addition at different positions ( $T_g = 1550^\circ\text{C}$ )

Fig. 2에서 표시한 위치 a에서, 위치 b와 위치 c로 가스화기 하부로 슬래그가 흘러감에 따라 가스화기의 단면적이 줄어들고 벽면에서 퇴적되는 ash도 슬래그로 용융되므로 용융슬래그 층은 점차로 두께가 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 flux 첨가량 변화에 따라서 가스화기 하부에서 위치별로 고체 슬래그의 두께  $\delta_s$ 의 변화를 계산한 결과를 보여준다. 고체 슬래그는 용융 슬래그에 비해서 flux 첨가량이 증가함에 따라서 두께가 크게 줄어드는 경향을 볼 수 있다. 특히 flux의 첨가량이 적은 2%나 4%가 첨가된 경우는 슬래그의  $T_w$ 가 상대적으로 높고 슬래그의 유동성이 충분히 확보되지 않아 고체 슬래그의 두께가 상당히 두꺼운 것을 알 수 있다. 따라서 flux의 첨가량이 적은 경우는 슬래그 탭에서 막힘 현상이 발생할 가능성이 높아지게 된다. Flux 첨가량이 적을 경우에는 가스화기의 각 위치별(위치 a, 위치 b, 위치 c)로 고체 슬래그의 두께 차이가 크지만, flux 첨가량이 증가함에 따라서 가스화기의 각 위치별 고체 슬래그의 두께 차이는 줄어든다.

Fig. 5와 Fig. 6의 예측 결과에서 flux 첨가량이 6%인 경우는 슬래그의 물성치인 슬래그의 실리카 비  $S = 0.68$ 이므로 Seggiani<sup>1)</sup>의 해석에 사용한 값인



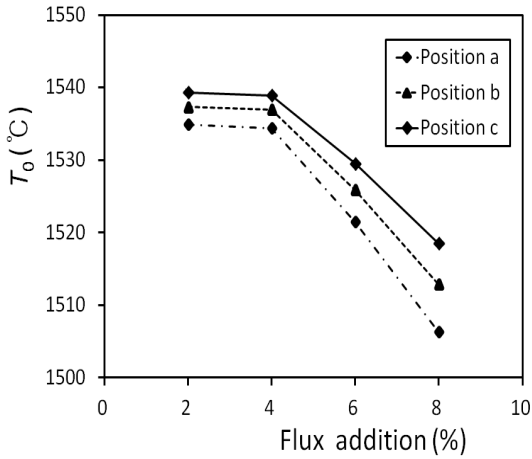


Fig. 7 Change of liquid slag surface temperatures with flux addition at different positions ( $T_g = 1550^\circ\text{C}$ )

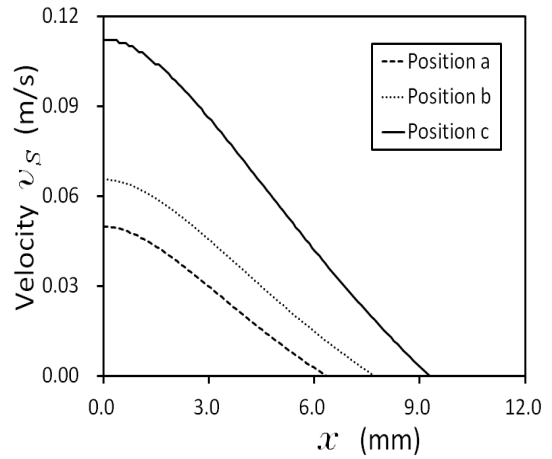


Fig. 9 Velocity profile across the liquid slag layer at different positions (flux addition = 8%,  $T_g = 1550^\circ\text{C}$ )

$S = 0.699$ 와 가장 근접하여 본 예측 결과와 상호 비교가 가능하다. Seggiani는 정상상태 조건에서 슬래그 탭 근처에서 용융 슬래그의 두께가 10~16mm 범위, 고체 슬래그의 두께는 60~80mm 범위에 있음을 예측하였다. 앞의 Fig. 5와 Fig. 6의 해석 결과에서 flux 첨가량이 6%인 경우 용융 슬래그의 두께가 9.2mm, 고체 슬래그의 두께는 78.7mm로 Seggiani의 해석결과와 정량적으로 근접하여 본 해석의 타

당성을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 flux 첨가량 변화에 따라서 가스화기 하부 각각의 위치별로 용융 슬래그 표면온도  $T_0$ 의 변화를 계산한 결과를 보여준다. Flux 첨가량이 증가하면서 슬래그의 두께가 감소하면서 용융 슬래그의 표면온도가 떨어지는 경향을 보인다. Flux 첨가량에 따라서  $T_0$ 의 변화는 고체 슬래그의 두께 변화와 반대의 경향을 보인다. 즉 flux가 적을 경우에는 가스화기의 각 위치별(위치 a, 위치 b, 위치 c)로  $T_0$ 의 변화가 작지만, Flux 첨가량이 증가함에 따라서 가스화기의 각 위치별  $T_0$ 의 변화 폭은 증가하는 경향을 보이고 있다.

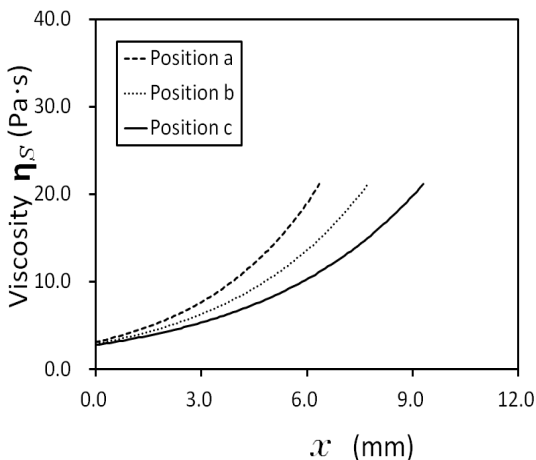


Fig. 8 Viscosity change across the liquid slag layer at different positions (flux addition = 8%,  $T_g = 1550^\circ\text{C}$ )

Fig. 8과 Fig. 9는 flux 첨가량이 8%인 경우 Fig. 2에 표시한 가스화기 하부 각각의 위치 a, b, c에서 용융슬래그 내부의 점도분포와 유동속도분포를 계산한 결과를 보여준다. Fig. 8에서는 가스화기의 각 위치별로 용융슬래그의 두께는 다르지만 슬래그의 조성이 동일하므로 점도가 변하는 경향과 점도의 최대값 및 최소값은 동일하다.

Fig. 9에서는 용융슬래그가 가스화기 벽면을 따라 슬래그 탭으로 흘러가면서 가스화기의 직경이 축소되므로 위치 a, 위치 b, 위치 c로 진행하면서 용융 슬래그 층의 두께가 증가하고, 용융 슬래그의 유

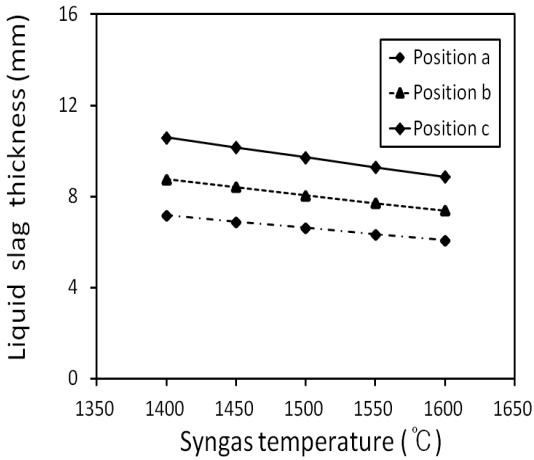


Fig. 10 Liquid slag thickness (flux addition = 8%)

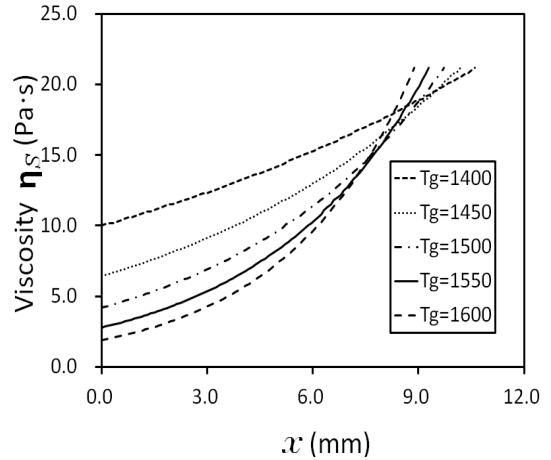


Fig. 12 Viscosity change across the liquid slag layer at different syngas temperatures (flux addition = 8%, position c)

동속도도 c 위치가 a 위치에 비해서 2 배 이상 빨라지는 결과를 보이고 있다.

### 3.2 합성가스 온도의 영향 해석

가스화기의 운전온도가 슬래그 거동에 미치는 영향을 해석하기 위해서 flux 첨가량이 8%인 경우에 대해서 합성가스 온도를 1,400°C~1,600°C 범위에서 50°C 간격으로 변경시키면서 슬래그 거동을 해석하여 결과를 정리하였다.

Fig. 10은 합성가스의 온도 변화에 따른 용융 슬래그의 두께를 해석한 결과이며, Fig. 11은 고체 슬래그의 두께를 해석한 결과이다. Fig. 10에서 가스화기 내의 합성가스 온도가 낮아지면 용융 슬래그의 두께는 Fig. 2에 표시한 각각의 위치별로 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 반면 고체 슬래그의 두께는 Fig. 11에서와 같이 각각의 위치별로 합성가스 온도가 감소하면서 두께가 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 12는 슬래그 탭이 있는 위치 c에서 합성가스

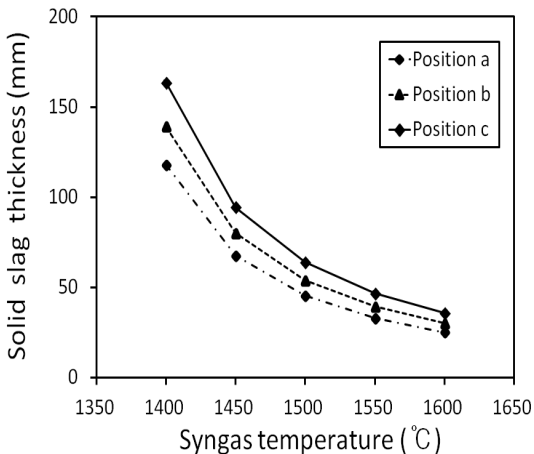


Fig. 11 Solid slag thickness (flux addition = 8%)

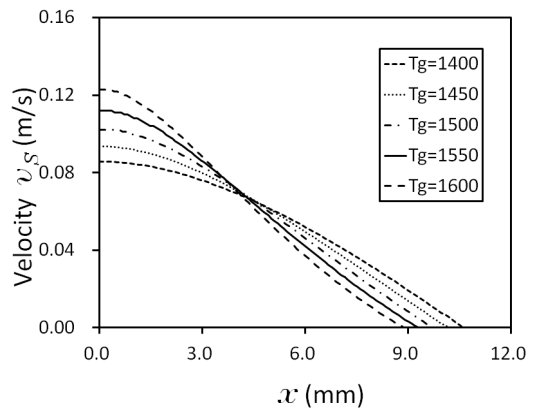


Fig. 13 Velocity profile across the liquid slag layer at different syngas temperatures (flux addition = 8%, position c)

의 온도를 변수로 하여 용융 슬래그 내부의 점도 변화를 해석한 결과를 보여준다. 합성가스 온도가 낮아질수록 용융슬래그 표면 부근에서의 점도가 커지는 경향을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 슬래그 탭이 있는 위치 c에서 가스화기 내부의 합성가스 온도가 변화할 경우에 용융 슬래그 내부의 유동속도 분포를 해석한 결과를 보여준다. 전체 슬래그의 질량유량은 고정되어 있으므로 합성가스 온도가 낮아질수록 용융슬래그 표면( $x=0$ )에서의 유동속도는 느려지고 슬래그의 두께가 두꺼워지는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

상용급 분류층 가스화기를 대상으로 대상탄에 석회석을 flux로 첨가할 경우, 슬래그의 물성치들을 산정하고 가스화기 하부 형상을 고려하여 정상상태 조건에서 물질수지, 운동량 및 에너지 보존식을 유도하여 슬래그 탭 주위에서의 슬래그 거동을 해석하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론들을 정리하면 다음과 같다.

설계탄에 첨가하는 flux의 양을 변수로 하여 가스화기 하부의 각 위치별로 용융 슬래그 내부의 유속분포, 점도분포를 해석하였으며, 용융슬래그 및 고체 슬래그의 두께 등을 산출하였다. Flux 첨가량이 증가하면 슬래그의 점도가 감소하여 용융 슬래그의 두께는 줄어들고 유동속도는 빨라지는 것을 정량적으로 확인할 수 있다. 또한 flux 첨가량의 증가에 따라서 고체 슬래그는 용융 슬래그에 비하여 두께가 급격히 감소하는 결과를 얻었다. 슬래그가 가스화기 벽면을 따라 진행하면서 단면적의 변화와 ash 퇴적의 영향으로 슬래그의 두께가 증가하는 것을 정량적으로 확인할 수 있었다.

가스화기 운전온도의 영향을 분석하기 위해서 합성가스 온도를 변경하면서 해석한 결과에서는 합성가스 온도가 줄어들면 용융슬래그의 두께는 선형적으로 증가하였으나, 고체 슬래그의 두께는 급격히 증가하는 경향을 보여주었다.

본 연구결과는 가스화기의 설계나 적정 운전조건

도출시 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대되며, 향후 슬래그 물성치와 ash 퇴적 특성자료 등에 관한 보다 신뢰성 있는 자료가 확보되면 본 연구결과를 토대로 더욱 정밀한 슬래그 거동 및 벽면 열전달 특성의 예측이 가능할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 500MW급 보일러 저급탄연소 핵심요소기술 개발(No. 2011T100200203)과 IGCC 실증플랜트 기술개발사업(No. 2011951010001C)의 연구결과입니다.

## 참 고 문 헌

- 1) M. Seggiani, "Modelling and Simulation of Time Varying Slag Flow in a Prenflo Entrained-flow Gasifier", Fuel, Vol. 77, No. 14, 1998, pp. 1611-1621.
- 2) P. J. Benyon, "Computational modeling of entrained flow slagging gasifiers", University of Sydney, 2002.
- 3) M. J. Bockelie, M. K. Denison, Z. Chen, T. L. Linjewile, C. L. Senior, and A. F. Sarofim, "CFD modeling for entrained flow gasifiers in vision 21 systems", Proceedings of the 19th annual international Pittsburgh coal conference, 2002.
- 4) S. Z. Yong, M. Gazzino, and A. Ghoniem, "Modeling the slag layer in solid fuel gasification and combustion - Formulation and sensitivity analysis", Fuel, 2011, available on-line.
- 5) S. Liu and Y. Hao, "Numerical study on slag flow in an entrained-flow gasifier", Proceedings of International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Seattle, 2007.
- 6) J. Ni, Z. Zhou, G. Yu, Q. Liang, and F. Wang, "Molten slag flow and phase transformation behaviors in a slagging entrained-flow coal

- gasifier”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 49, No. 23, 2010, pp. 12302-12310.
- 7) 이중원, 김미영, 지준화, 김시문, 박세익, “석탄 가스화 공정 모델링에 관한 연구”, *한국수소 및 신에너지학회 논문집*, Vol. 21, No. 5, 2010, pp. 425-434.
  - 8) 송지훈, 강민웅, 서동균, 임성진, 백민수, 황정호, “300MW급 Shell형 1단 분류층 석탄 가스화기의 전산수치해석: 산소/스팀/석탄 주입비, 석탄입자 크기, 주입 노즐 각도가 가스화기 성능에 미치는 영향”, *한국수소 및 신에너지학회 논문집*, Vol. 21, No. 3, 2010, pp. 227-240.
  - 9) 지준화, 오민, 김시문, 김미영, 이중원, 김의식, “석탄 가스화 반응의 동적 거동 전산모사”, *한국수소 및 신에너지학회 논문집*, Vol. 22, No. 3, 2011, pp. 623-630.
  - 10) 박윤경, 오명숙, “환원 조건에서 석탄 슬래그의 Tcv 예측”, *화학공학*, Vol. 44, No. 6, 2006, pp. 623-630.
  - 11) 구자형, 백민수, 유정석, 김봉근, 김유석, 이황직, “300MW IGCC 가스화플랜트의 가스화성능 및 Slag System 용량 예측”, *한국신재생에너지학회 2008년도 추계학술대회논문집*, 2008, pp. 234-237.
  - 12) M. E. Rodgers, “Slag layers in coal-fired MHD generators”, Ph.D Thesis, Stanford University, 1978.
  - 13) K. C. Mills and J. M. Rhine, “The measurements and estimation of the physical properties of slags formed during coal gasification: 1. Properties relevant to fluid flow”, *Fuel*, Vol. 68, 1989, pp. 193-200.
  - 14) K. C. Mills and J. M. Rhine, “The measurements and estimation of the physical properties of slags formed during coal gasification: 2. Properties relevant to heat transfer”, *Fuel*, Vol. 68, 1989, pp. 904-910.
  - 15) S. Vargas, F. J. Frandsen, and K. Dam-Johansen, “Rheological properties of high-temperature melts of coal ashes and other silicates”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 27, 2001, pp. 273-429.
  - 16) W. T. Reid and P. Cohen, “The flow characteristics of coal-ash slags in the solidification range”, *Trans. ASME*, Vol. 66, 1944, pp. 83-97.
  - 17) R. B. Bird, W. E. Stewart, and E. N. Lightfoot, “Transport Phenomena”, John Wiley, 1960.
  - 18) B. Li, A. Brink, and M. Hupa, “Simplified model for determining local heat flux boundary conditions for slagging wall”, *Energy & Fuels*, Vol. 23, 2009, pp. 3418-3422.