

4-Layer Slagging Model을 적용한 300 MW급 Shell형 1단 분류층 석탄 가스화기 전산수치해석

홍정우* · 정효재* · 송지훈** · 황정호**

Numerical Study on the 300 MW Shell-type One-stage Entrained Flow Coal Gasifier Applied with 4-Layer Slagging Model

Jungwoo Hong, Hyo Jae Jeong, Jihoon Song and Jungho Hwang

ABSTRACT

A slag building simplified model was developed to determine wall heat flux of a Shell 300 MW coal gasifier. In the model 4 layers(particulate, sintered, molten slag, solidified slag) were considered and mass conservation and energy balance were used to obtain each slag layer's thickness and surface temperature. Thermo-chemical and fluid characteristics of the gasifier were studied with and without considering the slag model using commercial CFD code FLUENT. Consideration of the slag layer did not affect syn-gas mole fractions. However, the slag layer caused to increase the exit gas temperature by about 50 K.

Key Words : Gasification(가스화), Syngas(합성가스), Gasifier(가스화기), Coal(석탄), Slagging(슬래깅), CFD(전산유체역학), Entrained flow bed(분류층)

1. 서론

2000년도 이후, 중국과 인도와 같은 개발도상국들의 가파른 경제 성장에 따라 에너지 수요가 증가하였고, 앞으로 수십 년 동안 지속해서 증가할 것으로 예상된다. 이에 따라, 석유와 석탄과 같은 화석 연료 에너지 수요 역시 증가하고 있다. 석탄의 경우 200년 이상 사용할 수 있을 정도로 방대한 양이 매장되어 있기 때문에, 석탄 가스화 기술은 전력 생산에서 상당히 중요한 기술이 될 것으로 전망된다[1,2]. 특히, 석탄 가스화 복합 발전(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)기술은 석탄 가스화를 이용하여 합성가스(synthesis gas)를 얻어 발전하는 기술로 청정 석탄 기술 중 가장 활발히 연구와 개발이 되고 있는 기술이다[3-8].

일반적으로 석탄 가스화기는 가스화 형태에 따라 크게 고정층, 유동층 그리고 분류층으로 구분된다. 각각의 가스화기 형태에 따라 생성가스의 조성 및 발열량 그리고 가스화기내의 온도 분포가 크게 달라진다. 고정층 가스화기는 주로 저급탄 가스화에 이용이

되며 대략 1,000°C 근처에서 운전된다. 유동층 가스화기는 산화제와 연료간의 혼합작용이 활발히 일어나며 대략 800~1,000°C에서 운전된다. 분류층 가스화기는 탄소 전환율이 높고 입자의 체류시간이 짧으며 2000°C 근처에서 운전된다. 분류층 가스화기는 보통 높은 열전달과 짧은 체류시간으로 인해, 복잡한 열유동 및 화학반응에 대한 정보를 실험적으로 알아내는 것은 쉽지 않다. 또한, 가스화기의 실제 규모와 작동 조건의 변화로 인한 비용 역시 천문학적인 비용이 소요된다. 따라서 실험실 규모의 모의실험이나 CFD(computational fluid dynamics)를 통한 수치 해석적 연구가 그 어느 경우보다 필요할 것으로 판단된다[9].

Chen 등[10]은 200 ton/day 2단 분류층 석탄 가스화기에 대한 3차원 전산수치해석을 통해 석탄 투입 형태와 석탄 입자의 크기, O₂/Coal 비 등과 같은 작동 조건에 대해 연구하였다. 또한, 미국 국립 에너지 연구소(NETL)의 Zitney와 Guenther[11]도 상용 CFD code인 FLUENT를 사용하여, 상업용 규모의 2단 분류층 석탄 가스화기에 대한 3차원 전산수치해석을 수행하였다. CFD 모델과 Aspen Plus를 합친 APECS(advanced process engineering co-simulator)에 대한 연구도 진행하였다. 국내에는 Choi 등[12]이 낙하식 1단 분류층 석탄 가스화기 내부의 유동 분포와 O₂/coal 비

* 연세대학교 기계공학과

** (주)STX 조선해양

† 연락처, hwangjh@yonsei.ac.kr

에 따른 영향을 CFD를 통해 수행하였고, 서혜경 등[13]은 1 ton/day급 가스화기의 실험 및 CFD 해석을 통해 $N_2/coal$ 비, $O_2/coal$ 비와 같은 운전조건과 생성 가스 조성 등을 비교하였다. 송지훈 등[9]은 모델링 및 격자생성 소프트웨어인 GAMBIT을 사용하여 3차원 모델링과 약 64만개의 격자를 생성하였으며, 격자가 생성된 모델을 상용 CFD code인 FLUENT에 적용하여, 300 MW급 shell형 1단 분류층 가스화기의 $O_2/coal$ 비, steam/coal 비, 석탄 입자의 직경과 inlet 각도가 가스화기에 미치는 영향을 수치해석을 통해 살펴 보았다.

Fig. 1에 나타낸 것과 같은 형상인 Shell형 가스화기는 분류층 가스화기로 입구에 적정의 $O_2/coal$ 비와 steam/coal 비로 연료와 산화제, 스팀이 동시에 주입되어 가스화과정을 통해 고체 원료인 석탄을 Syngas (합성가스, $H_2 + CO$)로 전환하는데 목적을 둔 반응기이다. 가스화기 내부에서는 1) 석탄의 건조과정 2) 탈휘발화 과정(devolatilization)을 통한 휘발성물질(volatile matter)의 방출 3) 부분연소 과정(partial oxidation) 4) 가스화 과정(gasification)을 거친다. 또한, 가스화과정 후 석탄에 남은 회분분(ash)은 고온으로 용해하여 유리질의 슬래그(slag)로 만들어진다. 이는 가스화기 벽면을 타고 따라 흐르는 용융슬래그 형태로 slag bath를 통해 배출된다. 출구에서 얻어진 Syngas는 gas-cleaning 과정을 거쳐, 복합 사이클을 통해 전력을 생산하게 되는데 이를 IGCC(석탄 가스화 복합 발전)라고 한다.

Shell형 가스화기는 분류층 가스화기의 한 종류로 회분(ash)의 용융온도(약 1600 K)보다 높은 고온에서 운전된다. 이에 따라 가스화기 내부에서 회분이 용융되며 그 일부는 벽면에 부착되어 벽면을 따라 흘러내

리는 슬래그 층(slag layer)을 형성하게 된다. 이렇게 형성된 슬래그 층은 물로 가득 차 있는 호퍼(hopper)를 통해 액상(liquid) 형태로 대부분 제거된다. 나머지 일부는 벽면에서 떨어져나가 재결정되어 덩어리(pellet)의 형태로 배출되기도 한다. 형성되는 용융 슬래그(molten slag)로 인해 저온 가스화기에 비해 비산 분진 발생량이 적고, 회분이 벽면에 부착되어 용출 성분(leachable component)이 적은 고형물로 배출되는 안정성을 지니고 있다. 또한 슬래그(slag)가 가스화기 내부의 열을 외부로 방출시키는 것을 막아주어 열효율(thermal efficiency)을 높여주는 역할을 하게 된다. 뿐만 아니라 슬래그가 벽면을 감싸는 막을 형성하게 되면서 가스화기 벽면의 입자에 의한 마모를 막아주는 역할을 하여 내구성 측면에서도 긍정적인 역할을 하게 된다[14]. 그러나, 고온에서 운전되는 가스화기의 제작을 위해서는 많은 투자비용이 발생한다. 또한 내부 벽면을 따라 흘러내린 용융 슬래그는 냉각 효과에 의해 용융 슬래그 배출구 근처에서 다시 고형화되어 용융슬래그 배출구를 막게 된다. 이에 따라 계획 정비 주기를 앞당겨 그 횟수를 늘리게 되며, 막대한 유지 보수비용이 발생되게 하고 있다[15-17].

이러한 이유로 슬래그의 거동을 예측하는 것에 많은 관심이 쏟아지고 있다. 이에 슬래그의 유동과 열적 특성을 예측하는 수화 모델은 필요하며, 이에 대한 연구가 최근 들어 많이 수행되고 있다. Bockelie 등[18]은 REI(Reaction Engineering International)의 In-house tool인 GLACIER의 slagging wall model을 이용하여 1, 2단 분류층 가스화기의 슬래그(Slag) 거동에 대해 시뮬레이션 하였으며, Seggiani 등[19]은 분류층 가스화기에서 시간변화에 따른 슬래그(Slag) 거동에 대해 모델링 하였다. Zhou 등[20]은 슬래그 점성(Viscosity)에 따른 2-layer 슬래그 거동에 대한 모델링을 수행하였다. Li 등[21]은 3-Layer(Immobile/Plastic flowing/Real Liquid layer) model을 이용하여, 탄종 변화에 따른 슬래그 거동 및 벽면 두께 변화에 대한 시뮬레이션을 하였으며, Cundick[16]는 상업용 CFD 코드인 Fluent와 4-Layer(Particulate / Sintered / Solidified slag / Molten slag layer) model를 사용하여, 슬래그 거동 및 시간에 따른 벽면 두께변화를 실험 데이터와 비교한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 모델링 및 격자생성 소프트웨어인 GAMBIT을 사용하여 3차원 모델링과 약 64만개의 격자를 생성하였으며, 상용 CFD code인 FLUENT를 사용하여 Shell형 가스화기에 대한 전산수치해석을 수행하였다. 여기에 가스화기 벽면 조건은 in-house code를 사용한 4-layer slagging model를 계산한 결과를 적용하였다.

본 연구는 송지훈 등[9]의 후속 연구이다. 송지훈

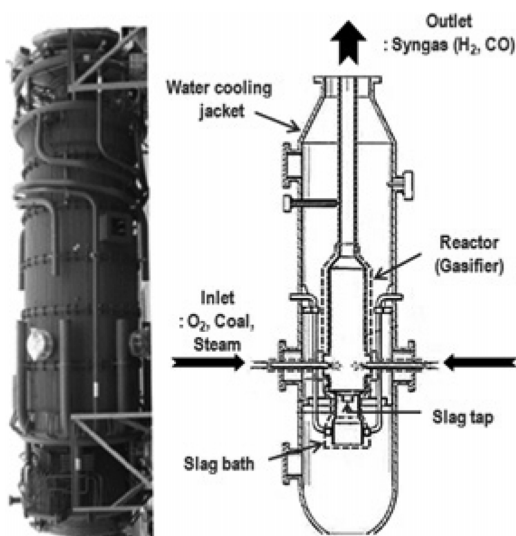


Fig. 1 Prototype of gasifier and water cooling jacket.

등[9]은 300 MW급 shell형 석탄 가스화기를 전산수치해석적 방법을 통하여 가스화기의 성능 예측에 대한 연구를 수행하였다. 이때 벽면 온도 조건을 석탄의 HHV(high heating value)대비 1.4%로 가정하여 heat flux로 적용하였다. 이 경우는 slagging이 고려가 되지 않은 조건이며, slagging이 고려된다면 벽면 조건이 바뀌게 된다. 본 논문은 slagging layer 이론을 통해 벽면 조건을 구하였다.

2. 수치해석 모델

본 계산에서 사용하는 가스화기 형상, 석탄, 계산조건 기체 모델 지배방정식, 석탄 탈휘발화 및 가스화 모델, 복사 열전달 모델은 송지훈 등[9]이 사용한 모델을 사용하였다. 자세한 내용은 송지훈 등[9]의 논문을 참고하기 바란다.

2.1. 석탄 선정 및 계산 조건

본 연구에서는 인도네시아 석탄을 선정하였으며, 이는 현재 서부발전 산하의 태안화력발전소에서 사용되고 있는 석탄 중 하나이다. 석탄에 대한 공업분석과 원소분석 결과를 Table 1에 표시하였다. 또한, Table 2에 수치해석 시 가스화기의 고정된 조건과 본

Table 1. Properties of tested coal

Proximate analysis (wt%)	Fixed carbon	42.8
	Volatile matter	39.3
	Ash	8.8
	Moisture	9.1
Ultimate analysis (wt%)	Carbon	65.52
	Hydrogen	5.92
	Nitrogen	1.09
	Chlorine	0.03
	Sulfur	0.84
	Oxygen	8.70
Higher/Lower Heating Value (MJ/kg)	29.3/27.7	

Table 2. Test conditions

Feed Rates (kg/s)	Coal	24
	O ₂ /Coal	0.82
	Steam/Coal	0.033~0.058
Coal Particle Sizes (μm)	100	
Inlet Angle (°)	0	
Heat Loss	Slagging Layer Model 적용	
Operating Pressure (atm)	42	

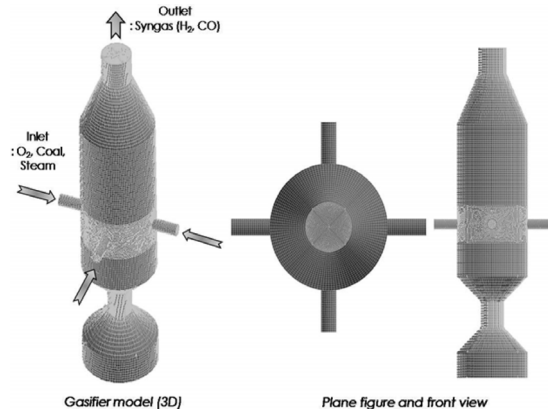


Fig. 2. Simplified geometry of the gasifier.

연구에서 살펴볼 항목에 대한 변수 범위를 나타내었다. 여기서 운전 압력은 송지훈 등[9]이 사용한 30기압에서 42기압으로 변경되었다.

2.2. 가스화기 모델 형상

Fig. 2는 가스화기 해석 형상을 나타낸 것으로 약 64만개의 격자로 구성되어 있다. 실제 가스화기는 평면도 기준으로 4방향, 상하좌우대칭의 4개의 입구에서 원료 산화제 및 스팀이 동시에 주입된다. 주입된 원료는 가스화기 내부에서 가스화 반응을 통해 합성가스로 전환된다.

2.3. 기체 및 석탄 입자의 거동 모델

본 가스화기 모델에서는 1) 기체의 난류유동과 혼합 및 반응 2) 석탄 입자의 유입과 난류에 의한 분산 3) 석탄의 탈휘발화(devolatilization), 휘발성분의 부분 연소, char의 부분 연소 및 가스화 4) 석탄, char, 회분 사이의 대류 및 복사에 의한 열전달을 고려하였다.

본 연구에서 사용한 가정들은 다음과 같다:

- 1) 3차원, 정상상태유동
- 2) 벽면의 경계조건은 no-slip condition(zero velocity)
- 3) 석탄 입자의 연소 및 반응은 표면에서부터 일어남
- 4) 가스화기 벽면에서의 열손실은 slagging model의 계산 결과 적용
- 5) Dilute system(입자의 부피비율이 기체의 부피비율의 10% 미만인 경우)이기 때문에, 석탄 입자 사이의 상호 작용은 무시하였다.

본 연구에서 사용한 기체 모델의 지배방정식, 석탄 입자거동 모델, 석탄 입자 반응 메커니즘 모델은 송지훈 등[9]의 논문을 참고하기 바란다.

2.4. Slagging Model

4-Layer slagging model은 각 layer에서 발생하는 열전달과 유동에 의해 결정된 온도에 따라 4개의 layer의 두께가 순차적으로 결정이 된다. 하지만 각 layer에서 일어나는 열전달과 유동은 매우 복잡하기 때문에 모든 현상을 해석하기는 힘들다. 따라서 본 연구에서는 4-layer slagging model에 대해 수치해석을 간단히 하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 각 layer에서의 열전달은 준평형(quasi-equilibrium)상태이며, x방향의 열전달만을 고려한다.
- 2) 각 layer의 슬래그 열전도 계수, 슬래그 밀도, 슬래그 방사율, 회분 소결온도, 슬래그 용융 온도는 일정하다.
- 3) 가스화 반응 및 가스화기 유동은 고려하지 않는다.
- 4) 슬래그의 점성(viscosity)이 크기 때문에, 슬래그 유동에 의한 대류 열전달은 고려하지 않는다.

2.4.1. Particulate layer(PL)

Fig. 3은 초기에 석탄 회분이 가스화기 벽면에 부착되는 모습을 나타낸 것이다. 석탄의 회분이 주변 유동에 의한 대류 현상, 온도 차이에 따른 열영동(thermoporesis) 그리고 확산 현상에 의해 벽면에 부착된다. 부착된 회분은 가스화기 벽면에서부터 성장하여 particulate layer(PL)를 형성하게 된다.

단위시간당 부착되는 PL의 두께는 질량 보존에 의해 결정이 된다. 즉, 가스화기 내에서 벽면으로 다가오는 회분의 질량은 가스화기 벽면에 부착되는 질량과 같으며, 단위 시간당 벽면에 부착되는 회분의 두께는 아래와 같은 식으로 표현이 된다.

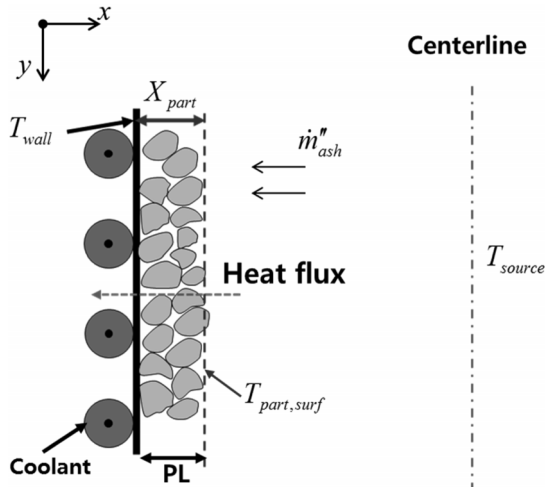


Fig. 3. Particulate layer(PL).

$$\frac{dX_{part}}{dt} = \frac{\dot{m}''_{ash}}{\rho_{part}} \quad (1)$$

여기에서 X_{part} , \dot{m}''_{ash} 와 ρ_{part} 는 각각 PL의 두께, 회분이 가스화기 벽면에 부착되는 질량 유량, PL의 밀도를 나타낸다.

PL의 최종 두께는 에너지 평형(energy balance)에 의해 구해진다. 이는 PL에서 가스화기 벽면으로 전달되는 열유속(heat flux)과 가스화기 중심에서 생성되는 높은 온도에 의한 복사 열전달이 평형을 이루기 때문이다. PL가 완성이 될 때 PL 표면의 온도는 회분의 소결온도와 같다. 가스화기 벽면으로 전달되는 열전도(heat conduction)에 의한 열유속은 다음과 같이 표현된다.

$$q''_{cond} = k_{eff,part} \frac{\partial T}{\partial x} = k_{eff,part} \frac{T_{part,surf} - T_{wall}}{X_{part}} \quad (2)$$

여기서 $k_{eff,part}$, $T_{part,surf}$ 와 T_{wall} 은 각각 PL의 유효 열전도도(effective thermal conductivity), PL 표면 온도와 가스화기의 벽면 온도를 나타낸다. PL에서 유효 열전도도를 사용한 것은 PL은 회분 입자가 바로 부착되어 비 연속적으로 이루어진 층이기 때문이다.

열원(Fire ball or heat source)에 의한 PL의 복사 열전달(radiation)은 아래와 같다.

$$q''_{rad} = \epsilon \sigma T_{part,surf}^4 - \sigma T_{source}^4 \quad (3)$$

여기서 ϵ 와 σ 는 각각 방사율(emissivity)과 Stefan-Boltzmann 상수이며, T_{source} 는 열원의 온도를 나타낸다.

가스화기 내부에서는 유동이 있기 때문에 유동과 PL 사이에 대류에 의한 열전달이 일어나게 된다. 가스화기 내부 유동과 PL 사이의 대류 열전달(convection heat transfer)는 다음과 같다.

$$q''_{conv} = h(T_{part,surf} - T_{gas}) \quad (4)$$

여기서 h 는 열전도 계수, T_{gas} 는 가스화기 내부에서 흐르는 기체상의 온도를 나타낸다.

정상상태(steady-state)에서 에너지 평형 방정식은 다음과 같다.

$$q''_{cond} + q''_{rad} + q''_{conv} = 0 \quad (5)$$

식 (2), (3)과 (4)를 (5)에 대입하면 다음과 같다.

$$k_{part} \frac{T_{part,surf} - T_{wall}}{X_{part}} + \epsilon \sigma T_{part,surf}^4 - \sigma T_{source}^4 + h(T_{gas} - T_{part,surf}) = 0 \quad (6)$$

식 (6)을 통해 PL의 두께 X_{part} 를 결정할 수 있다.

2.4.2. Sintered layer(SL)

회분이 벽면에 부착되고 PL이 성장함에 따라 PL은 가스화기 벽면 밖으로 이동하는 열전달을 방해하게 된다. 따라서 PL 표면의 온도는 점차 증가하게 된다. PL 표면 온도가 소결 온도보다 높아지게 되면 PL 표면에 부착되는 회분은 소결되기 시작하면서 Fig. 4와 같이 sintered layer(SL)가 형성된다. SL은 PL보다 높은 표면 온도와 밀도를 갖게 된다.

단위시간당 SL에 부착되는 회분의 두께는 질량 보존에 의해 결정이 되며 아래와 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{dX_{sint}}{dt} = \frac{\dot{m}''_{ash}}{\rho_{sint}} \quad (7)$$

SL의 두께 X_{sint} 는 PL과 비슷하게 가스화기 중심에서 전달되는 복사 에너지와 SL에서 PL로 전달되는 열전도 에너지 사이의 평형에 의해 결정된다. 먼저 SL가 최종적으로 발달하였을 때, SL에서 전달되는 열전도에 의한 열유속은 다음과 같다.

$$\dot{q}''_{cond} = k_{eff,sint} \frac{\partial T}{\partial x} = k_{eff,sint} \frac{T_{sint,surf} - T_{part,surf}}{X_{sint}} \quad (8)$$

여기서 $k_{eff,sint}$ 와 $T_{sint,surf}$ 는 각각 SL의 유효 열전도도 계수와 SL의 표면 온도를 나타낸다.

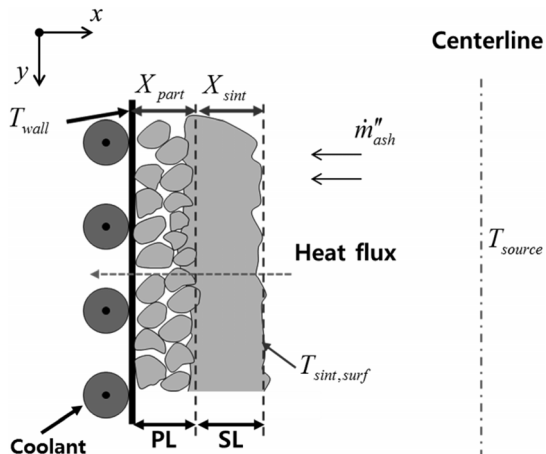


Fig. 4. Ash layer(PL + SL).

SL가 최종적으로 발달하였을 때, 가스화기 중심에서 발생하는 열원과 SL표면 사이의 복사 열전달은 아래와 같다.

$$\dot{q}''_{rad} = \epsilon \sigma T_{sint,surf}^4 - \sigma T_{source}^4 \quad (9)$$

PL과 마찬가지로 SL과 가스화기 내부의 기체상 사이에 대류에 의한 열전달이 발생하게 되며, 대류 열전달은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{q}''_{conv} = h(T_{sint,surf} - T_{gas}) \quad (10)$$

위의 식 (8), (9), (10)을 식 (5)에 대입시키면 다음과 같다.

$$k_{sint} \frac{T_{sint,surf} - T_{part,surf}}{X_{sint}} + \epsilon \sigma T_{sint,surf}^4 - \sigma T_{source}^4 + h(T_{sint,surf} - T_{gas}) = 0 \quad (11)$$

위 식을 통해 SL의 최종 두께 X_{sint} 를 결정할 수 있다.

2.4.3. Molten slag layer(MSL)

SL가 성장함에 따라 가스화기 벽면 내부에서 외부로 방출되는 열전달을 방해하면서 회분의 온도가 용융점까지 높아지게 된다. SL 표면의 온도가 회분의 용융점보다 높아지게 되면 회분은 용융되어 Fig. 5와 같이 molten slag layer(MSL)를 형성하게 된다.

MSL의 경우 다른 고체상의 layer와는 달리 액체 상태이기 때문에 중력에 의한 유동이 발생하게 된다. Slag layer(SL)의 두께는 가스화기 높이에 비해 매우 얇기 때문에 slag layer 두께 방향(x-direction)의 유동은 무시할 수 있다. 또한 용융 슬래그는 높은 점성을 가지고 있고, 슬래그의 유동 속도가 매우 작기 때문에 대류의 효과는 무시할 수 있다[16]. 이러한 가정을

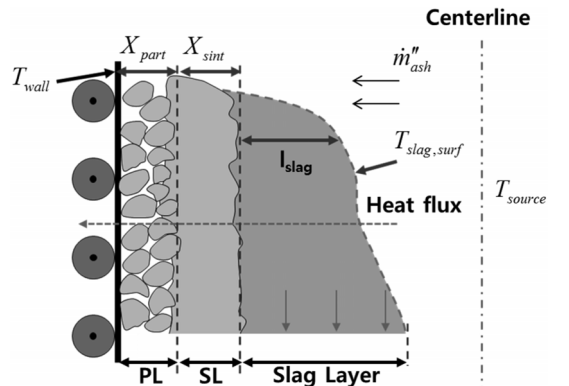


Fig. 5. Ash layer(PL + SL) and slag layer.

바탕으로 Navier-Stokes equation은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{slag} \frac{\partial u_{slag}}{\partial x} \right) = \rho_{slag} g \quad (12)$$

식 (12)의 미분방정식을 적분하여 경계조건을 적용시키면 용융슬래그의 속도 u_{slag} 을 얻을 수 있다.

$$u_{slag} = \frac{\rho_{slag} g}{\mu_{slag}} \left(-\frac{1}{2} \{x - (X_{part} + X_{sint})\}^2 + \{x - (X_{part} + X_{sint})\} l_{slag}(y) \right) \quad (13)$$

여기서 l_{slag} 는 slag layer의 두께를 나타내며 사용된 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x = X_{part} + X_{sint}, & \quad u_{slag} = 0 \\ x = X_{part} + X_{sint} + l_{slag}, & \quad \frac{\partial u_{slag}}{\partial x} = 0 \end{aligned}$$

MSL 표면에 부착되는 석탄 회분은 모두 녹는다고 가정하면, 밑으로 흘러내리는 용융 슬래그의 전체 양은 MSL 표면에 추가되는 석탄 회분의 양과 같다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$\int_{X_{part} + X_{sint}}^{X_{part} + X_{sint} + l_{slag}(y)} \rho_{slag} u_{slag} dx = \dot{m}''_{ash} y \quad (14)$$

여기서 y 는 가스화기의 높이 방향 길이를 나타낸다.

식 (13)과 식 (14)를 연립하여 $l_{slag}(y)$ 에 대해 정리하면 아래와 같이 용융 슬래그의 두께를 결정할 수 있다.

$$l_{slag}(y) = \left(\frac{3\mu_{slag} \dot{m}''_{ash} y}{(\rho_{slag})^2 g} \right) \quad (15)$$

또한 위의 식 (15)에서 구한 slag layer의 두께를 이용하여 MSL의 표면 온도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} k_{eff,slag} \frac{T_{slag,surf} - T_{sint,surf}}{l_{slag}(y)} + \epsilon_{slag} \sigma T_{slag,surf}^4 \\ - \sigma T_{source}^4 - \dot{m}''_{ash} H_{fus} + h(T_{slag,surf} - T_{gas}) = 0 \quad (16) \end{aligned}$$

여기서 $T_{slag,surf}$ 와 H_{fus} 는 slag layer의 표면 온도와 회

분의 enthalpy of fusion를 나타낸다.

식 (16)을 통해 구한 온도를 이용하여 MSL의 평균 점도 μ_{slag} 를 계산할 수 있다. 평균 점도는 MSL의 평균 온도를 이용하여 Urbain viscosity 모델을 통해 아래와 같이 구할 수 있다[12].

$$\mu_{slag} = a T_{av,slag} \exp \left[\frac{b \cdot 10^3}{T_{av,slag}} \right] \quad (17)$$

여기서 $T_{av,slag}$ 는 slag layer의 평균온도를 나타낸다. 또한 상수 $a = 2.08112 \times 10^{10}$ (kg/m · s · K), $b = 30.88$ 0901 (K)으로 정의된다.

2.4.4. Solidified slag layer(SSL)

Slag layer가 성장함에 따라, 가스화기 벽면에 부착된 slag layer 내부의 온도는 slag layer의 표면 온도에 비해 점차 낮아지게 된다. 따라서 MSL 내부의 일부 온도 또한 회분의 용융점보다 낮아지면서 용융 슬래그가 다시 고형화 되면서 Fig. 6과 같이 solidified slag layer(SSL)를 형성하게 된다.

SSL은 MSL에 비해 밀도가 낮기 때문에 고형화됨에 따라 slag layer의 두께가 줄어들게 된다. 이렇게 줄어들게 되는 두께는 아래와 같이 질량 보존에 의해 구해지게 된다.

$$\rho_{solid} X_{solid} = \rho_{slag} X_{slag \rightarrow solid} \quad (18)$$

여기서 $X_{slag \rightarrow solid}$ 는 MSL에서 SSL로 변화되는 두께를 나타낸다.

또한 SSL의 두께 X_{solid} 는 온도에 의해 형성이 된다. 따라서 MSL에서 SSL로 변화되는 두께는 에너지 평형식을 통해 구할 수 있다.

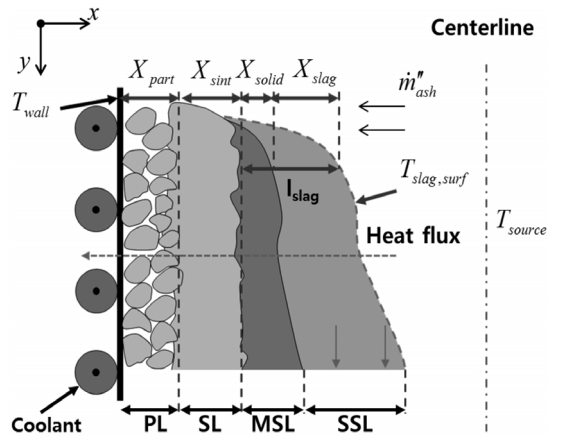


Fig. 6. Ash layer(PL + SL) and slag layer(MSL + SSL).

$$k_{eff,solid} \frac{T_{solid} - T_{sint,surf}}{X_{solid}} + \epsilon \sigma T_{surf}^4 - \sigma T_{source}^4 - \dot{m}_{ash} H_{fus} + h(T_{surf} - T_{gas}) = 0 \quad (19)$$

여기서 $k_{eff,solid}$ 는 SSL의 유효 열전도 계수이며, T_{solid} 는 용융 슬래그가 고형화 되는 온도를 나타낸다.

3. 해석 알고리즘

4-layer slagging model을 적용하여 가스화기를 해석하는 것은 가스화기 내에서 slag가 발달되는 현상과 가스화기 벽면에서의 경계조건을 보다 정확하게 적용하여 가스화기 내부의 온도를 보다 정확하게 예측할 수 있게 한다. 또한 가스화기 내부와 출구에서의 온도가 달라지면 가스화기 후단에 장착되는 합성가스 냉각기의 용량을 달리 설치해야 한다. 하지만 slagging model과 가스화기를 연동하여 해석하는 것은 매우 어려운 작업이며 해석하는데 걸리는 시간 또한 많이 걸리게 된다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 가스화기 해석과 slagging model 해석을 독립적 프로세스에 적용하여 두 가지 해석의 시간을 단축시켰다.

Fig. 7은 상용 CFD 프로그램은 FLUENT를 통해 가스화기를 해석한 결과와 in-house code인 slagging model 간 연동되는 process를 나타내었다. 먼저 FLUENT를 통해 가스화기 해석을 하게 되고, FLUENT 해석 결과인 석탄 회분이 가스화기 벽면에 부딪히는 질량 유량, 가스화기 중심의 온도 분포 그리고 가스화기 벽면의 온도 데이터를 추출한다. FLUENT에서 추출한 데이터는 slagging model에 적용된다. 이 때, slag 모델의 해석은 4-layer slagging model을 사용하며 석탄 회분의 부착, 에너지 평형, 유동을 순차적으로 계산하게 된

다. 4-layer slagging model의 해석 결과를 바탕으로 가스화기의 벽면 경계조건을 수정, 적용하여 가스화기를 다시 해석하여 결과를 얻게 된다.

4. 결과 및 토의

4.1. 4-layer slagging model

본 연구의 계산에 사용된 slag의 물성값을 Table 3에 나타내었다. 슬래그 두께를 계산하기 위해 가스화기 벽면 온도는 가정을 통해 고정시켰다. 이는 가스화

Table 3. Properties of slag

Variable	Value	Units	Ref.
T_{wall}	550	K	-
T_{sint}	1000	K	[22]
T_{slag}	1550	K	[23]
$k_{eff,part}$	0.5	W/m·K	[16]
$k_{eff,sint}$	2	W/m·K	[16]
k_{solid}	5	W/m·K	[16]
k_{slag}	5	W/m·K	[16]
h	2.79	W/m ² ·K	-
ρ_{part}	800	kg/m ³	[16]
ρ_{sint}	1500	kg/m ³	[16]
ρ_{solid}	2000	kg/m ³	[16]
ρ_{slag}	2200	kg/m ³	[16]
H_{fus}	154.43	kJ/kg	[22]
\dot{m}_{ash}	0.1016	kg/m ² sec	-
ϵ	0.83		[22]

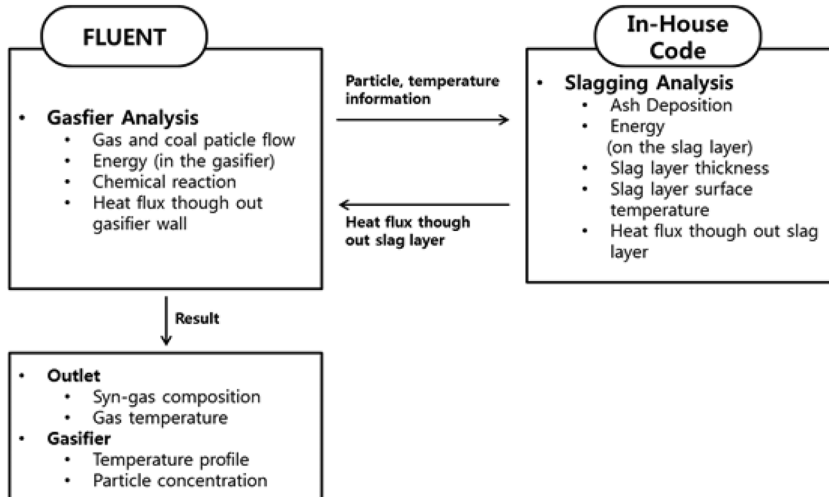


Fig. 7. Analysis process.

기 운전조건에 따라 변화할 수 있다. 대류 열전달 상수와 회분의 질량 플럭스는 FLUENT에서 계산되어진 값을 적용하였다. 각 층의 방사율은 일정하다고 가정을 하였다. 실제적으로 각 층의 상(phase), 온도, 표면 상태가 다르기 때문에 방사율은 일정하지 않을 것으로 예상된다. 하지만 각 층에 대한 방사율 값을 측정하는 것은 매우 힘들다. 따라서 이 부분에 대해서는 차후에 보완해야 할 문제로 여겨진다. 이에 대한 물성치와 회분이 상변화 함에 따른 enthalpy of fusion은 다음 식으로 구하였다[22].

$$H_{fus} = T_{slag} \Delta S_{fus} \quad (20)$$

여기서 ΔS_{fus} 는 entropy of fusion을 나타낸다.

또한 slagging model 계산에 사용된 T_{source} 는 Fig. 8에 나타내었다.

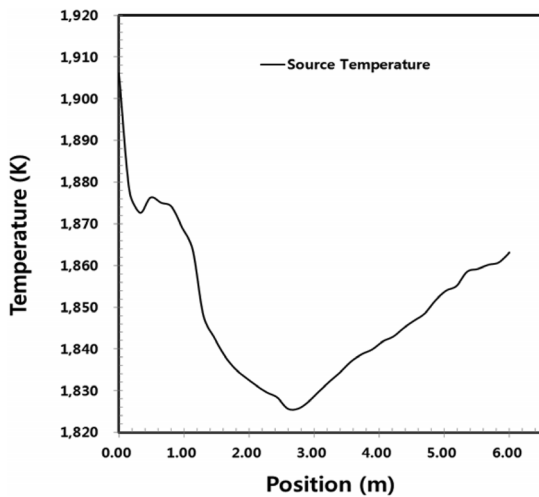


Fig. 8. Profile of source temperature.

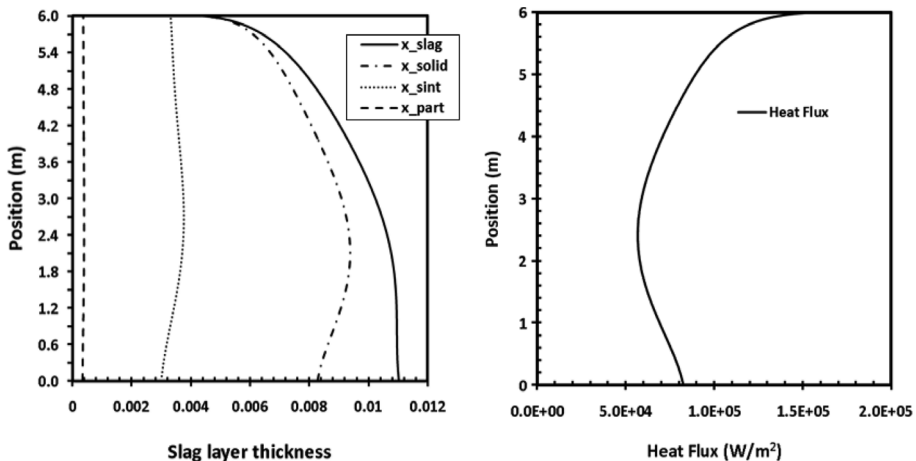


Fig. 9. Slag layer thickness and heat flux.

앞에서 언급한 4-layer slagging model을 이용하여 각 슬래그 층의 두께를 계산하였다. Fig. 9는 각 슬래그 층의 두께를 계산한 결과를 나타내었다. 그래프의 y축은 가스화기 입구($y=0$)에서부터 출구까지의 높이를 나타내었고, x축은 slag layer의 두께를 나타내었다. 가스화기 입구에서 연소반응이 일어나기 때문에 출구 쪽의 온도가 높으며, 그 결과 가스화기 입구 부분에서의 PL와 SL 두께가 얇게 나타났다. 또한 회분이 용융되면서 슬래그의 유동이 생기는 모습을 확인할 수 있었다.

이 결과는 Sun 등[24]이 Shell 가스화기 내의 slag 거동을 비정상상태로 해석한 결과와 비슷한 경향을 보인다. Sun 등[24]의 결과에 의하면 Shell 가스화기 slag의 두께는 약 2.3 cm로 본 연구에서 나온 결과인 약 1.1 cm와 큰 차이를 보이지 않았다.

위에서 구해진 slag layer의 두께를 바탕으로 가스화기의 slag layer를 통과하는 열유속을 아래의 식으로 구하였다.

$$q''_{out} = \epsilon_{slag} \sigma T_{slag,surf}^4 - \sigma T_{source}^4 - \dot{m}_{ash} H_{fg} + h(T_{surf} - T_{gas}) \quad (21)$$

위의 식에서 구한 열유속을 Fig. 9에 나타냈으며, 대상 석탄의 HHV(higher heating value)의 약 0.7%로 나타났다. 이는 송지훈 등[9]이 계산한 조건인 대상 석탄의 HHV의 약 1.5%보다 낮은 결과이다. Slag layer에 의해 가스화기 내부에서 빠져나가는 열유속이 방해받아서 slag layer를 고려하지 않은 조건보다 낮게 나타난 것으로 보인다. 또한, slag layer의 두께가 증가할수록 slag layer를 통과하는 열유속은 감소하는 경향을 보였다.

4.2. 가스화기 해석

가스화기 해석은 slag layer가 고려된 경우(S)와 고려되지 않은 경우(B)에 대해 합성가스의 몰 분율과 출구 가스온도를 비교하였다. O₂/coal 비 0.83과 작동 압력 42 atm을 고정하여, steam/coal 비를 0.033~0.067까지 달리하여 계산을 수행하였다.

Fig. 10과 11은 slag layer 모델을 적용하기 전과 적용하고 난 후의 가스화기 내에서의 CO와 H₂ 몰 분율과 온도의 분포를 나타낸 그림이다. CO와 H₂의 경우 가스화기 입구에서 생성되기 시작하여 가스화기 출구 쪽으로 갈수록 점차 증가하는 모습을 볼 수 있다. 또한 가스화기 입구에서 온도가 가장 높게 나타나며 가스화 반응이 일어나면서 온도가 점차 낮아지는 모습을 확인 할 수 있었다. 하지만 slag layer를 적용해도 전체적인 분포는 변화하지 않았다.

Fig. 12는 steam/coal 비에 따른 출구의 합성가스 양과 가스의 온도를 나타낸 그래프이다. steam/coal 비가 증가할수록 CO의 양은 줄어들고 H₂와 CO₂는 증가하였다. 이 결과는 송지훈 등[9]의 결과와 같은 경향을 나타냈다. 수증기는 char와 반응하여 일산화탄소와 수소를 발생시키지만 이렇게 생성된 일산화탄소를 수성가스변위반응을 통해 수소로 전환시키는 역할을 하기 때문에 전체적으로 수증기는 합성가스 중의 일산화탄소 농도를 낮추고 수소의 농도를 높인다[25]. 그러나 slag layer를 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우의 합성가스의 몰분율의 변화는 없었다. 또한 출구 가스의 온도는 steam/coal 비가 증가할수록 감소하였다. 이는 수증기가 수소의 농도를 높이고 일산화탄소의 농도를 낮추는 과정이 전체적으로는 발열 반응이지만 200℃의 저온으로 주입되는 수증기가 반응열을 흡수하는 효과가 더 크기 때문에 steam/coal 비와 반응 온도는 반비례함을 확인할 수 있다[25]. 출구온도의 경우 slag layer를 고려했을 경우가 slag

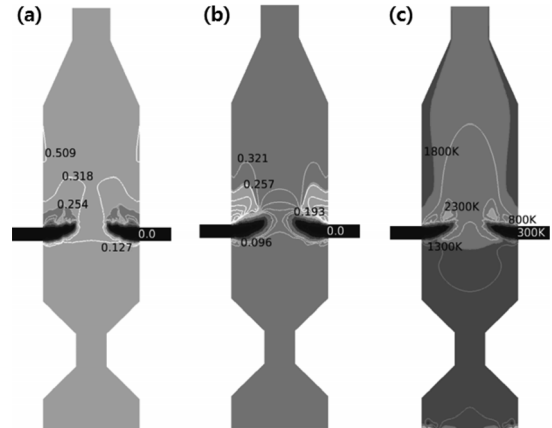


Fig. 10. Mole fraction of CO(a), H₂(b) and temperature (c) profile(w/o slagging).

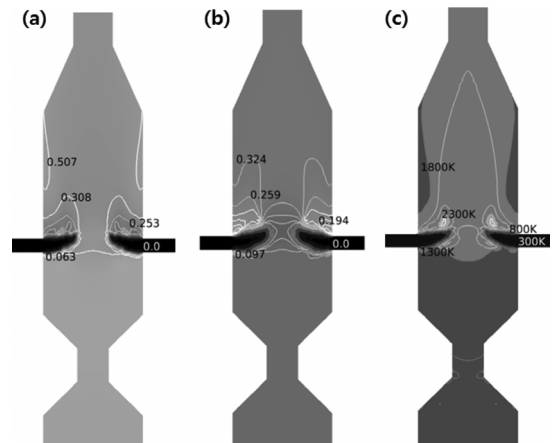


Fig. 11. mole fraction of CO(a), H₂(b) and temperature (c) profile(with slagging).

layer를 고려하지 않은 경우보다 약 50℃ 정도 높은 것으로 나타났다. 이는 가스화기 벽면에 형성되는 slag

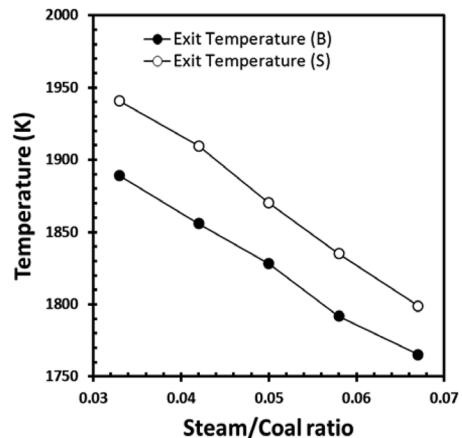
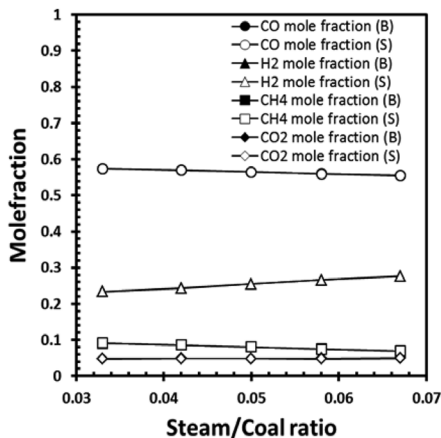


Fig. 12. Mole fraction and temperature of gas on the gasifier outlet.

layer가 가스화기 내부에서 벽면으로 빠져나가는 열손실을 방해하는 효과 때문으로 보인다.

Shell 가스화기는 다른 가스화기보다 높은 온도(2000 K 이상)에서 작동이 된다. 가스화기는 char 가스화 반응이 전체 반응을 좌우하게 된다. 김용택 등[26]에 의하면 CO₂ char 가스화 반응은 1150°C에서 화학반응이 지배적인 저온 영역과 확산이 지배적인 고온 영역으로 구분된다고 하였다. 따라서 그 이상의 온도에서는 확산이 지배적이며 이는 온도에 대한 영향보다는 char와 반응 매체간의 혼합이 중요하게 작용한다. 따라서 가스화기 벽면 조건에 의해 변화하는 가스화기 내부의 온도 차이는 출구 가스의 조성 변화에 큰 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다.

실제 가스화기의 벽면 온도가 525 K이 아닌지에 대해서는 가스화기 벽면에 설치된 coolant의 능력에 좌우된다. 따라서 slag의 두께를 정확하게 계산하기 위해서는 coolant에서부터 가스화기 벽면까지의 열전달 문제가 고려되어야 한다[27]. 이는 좀 더 보완될 필요가 있어 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 분류층 가스화기에서 slag layer 거동에 관한 모델링을 수행하였다. 또한 가스화기 해석에서 slag layer의 영향을 살펴보기 위해 가스화기의 벽면조건의 변화에 따른 결과를 수치해석을 통하여 예측하였다.

1) 4-layer slaging 모델을 통하여 Shell 가스화 내부에 증착되는 slag layer의 두께를 구하였다.

2) Slag layer를 가스화기 벽면 조건으로 적용한 가스화기 해석을 결과 출구 가스의 물 분율의 변화는 없었으며, 출구 가스 온도는 약 50°C 증가하였다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP) 신·재생에너지기술개발 사업-원천기술개발(과제번호: 2010T100101092)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] H. W. Liu, W.D. Ni, Z. Li, et al., "Strategic thinking on IGCC development in China", *Energy Policy*, Vol. 36, 2008, pp. 1-11.

[2] L. F. Zhao, Y. H. Xiao, K. S. Gallagher, et al., "Technical, environmental, and economic assessment of deploying advanced coal power techno-

logies in the Chinese context", *Energy Policy*, Vol. 36, 2008, pp. 2709-2718.

[3] O. Maurstad, "An overview of coal based integrated gasification combined cycle(IGCC) technology, Massachusetts Institute of Technology", 2005, Publication no. LFEE 2005-002 WP. See also <http://lfee.mit.edu/publications>.

[4] J. C. Corman, "Coal to electricity: Integrated gasification combined cycle", *Applied Energy*, Vol. 10, 1982, pp. 243-259.

[5] J. M. Beér, "Combustion technology developments in power generation in response to environmental challenges", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 26, 2000, pp. 301-327.

[6] X. Chen, M. Y. He, I. Spitsberg, N. A. Fleck, J. W. Hutchinson, A. G. Evans, "Mechanisms governing the high temperature erosion of thermal barrier coatings used in gas turbines", *Wear*, Vol. 256, 2004, pp. 735-746.

[7] E. L. Doering, G. A. Cremer, "Advances in the Shell coal gasification process", *Division of Fuel Chemistry*, Vol. 40, 1995, pp. 312-317.

[8] U. Buskies, "The efficiency of coal-fired combined-cycle powerplants", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 16, 1996, pp. 959-974.

[9] 송지훈, 강민용, 서동균, 임성진, 백민수, 황정호, "300 MW급 Shell형 1단 분류층 석탄 가스화기의 전산수치해석: 산소/스팀/석탄 주입비, 석탄입자 크기, 주입 노즐 각도가 가스화기 성능에 미치는 영향", 한국수소 및 신에너지학회 논문집, 제21권, 제3호, 2010, pp. 227-240

[10] C. Chen, M. Horio, and T. Kojima, "Numerical simulation of entrained flow coal gasifiers", *Chemical Engineering Science*, Vol. 55, 2000, pp. 3861-3833.

[11] S. E. Zitney, and C. Guenther, "Gasification CFD modeling for advanced power plant simulations", Conference: 22nd Annual International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh, PA, Sep. 12-15, 2005.

[12] Y. C. Choi, X. Y. Li, T. H. Park, J. H. Kim, and J. G. Lee, "Numerical study on the coal gasification characteristics in an entrained flow coal gasifier", *Fuel*, Vol. 80, 2001, pp. 2193-2201.

[13] 서혜경, 정재화, 주지선, "건식 석탄공급형 1 Ton/Day급 가스화시스템 설계조건 및 시운전결과", 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 20, No. 4, 2009, pp. 352-359.

[14] S. Z. Yong, "Multiphase models of slag layer built-

- up in solid fuel gasification and combustion”, M. I.T, M.S. thesis, 2010, USA
- [15] 라호원 외, “분류층 습식 석탄가스화 기술”, 한국화학공학연구정보센터, Vol. 48, 2010, pp. 129-139,
- [16] D. P. Cundick, “Characterization of the thermal transport through a temporally varying ash layer”, Brigham Young University, M.S. thesis, 2009, USA.
- [17] E. Steadman “Gasification ash and slag characterization”, Semiannual Technical Progress Report, U.S Department of Energy, 1992
- [18] M. J. Bockelie, D. A. Swensen, M. K. Denison, Z. Chen, C. L. Senior, and A. F. Sarofim, “CFD Modeling for entrained flow gasifiers in Vision 21 Systems”, Proceedings of the Gasification Technologies Conference 2002, San Francisco, CA, Oct. 28-30, 2002.
- [19] M. Seggiani, “Modeling and simulation of time varying slag flow in a Prenflo entrained-flow gasifier”, Fuel, Vol. 77, 1998, pp. 1611-1621
- [20] J. H. Zhou, J. P. Kuang and Z. J. Zhou, “Numericals simulation for pulverized coal gasifier's fluid flow characteristic on cold and hot condition”, Proceedings of the CSEE, Vol. 27, 2007, pp. 30-35.
- [21] X. Li, G. Li, Z. Cao, and S. Xu, “Research on flow characteristics of slag film in a slag tapping gasifier”, Energy and fuels, Vol. 24, 2010, pp. 5109-5115.
- [22] 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, 1986, pp. 904-910.
- [23] Y. Yun et al, “Selection of IGCC candidate coals by pilot-scale gasifier operation”, Fuel Processing Technology, Vol. 88, 2007, pp. 107-116.
- [24] B. Sun, Y. Liu, X. Chen, Q. Zhou, M. Su, “Dynamic modeling and simulation of shell gasifier in IGCC”, Fuel Processing Technology, Vol. 92, 2011, pp. 1418-1425.
- [25] 지준화, 오민, 김시문, 김미영, 이중원, 김의식, “석탄 가스화 반응의 동적 거동 전산 모사”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, 제22권, 제3호, 2011, pp. 386-401.
- [26] 김용택, 서동균, 황정호, “가스분석을 이용한 석탄 종류별 CO₂ 가스화 반응특성 연구”, 한국연소학회지, Vol. 15, No. 2, 2010, pp. 41-49.
- [27] 김봉근, 구자형, 김유석, 백민수, “석탄 가스화기 벽면의 슬래그 거동 및 열전달 해석”, 한국수소 및 신에너지학회 추계학술대회 논문집, 2011, pp. 233-237.