

## 300MW급 실증 가스화기의 최적 운전조건 및 성능 예측

유 정석<sup>1)</sup>, 구 자형<sup>2)</sup>, 백 민수<sup>3)</sup>, 이 황직<sup>4)</sup>

### The Optimal Operation Condition and Estimation Performance for 300MW Demonstration Gasifier

Jeongseok Yoo, Jahyung Koo, Minsu Paek, Hwangjik Lee

**Key words :** IGCC(가스화 복합발전), Gasification(가스화), Entrained Flow(분류층), Gasifier(가스화기), Cold Gas Efficiency(냉가스 효율)

**Abstract :** The optimal operation condition of gasifier is one of the most important parameters to increase efficiency and reliability in IGCC plant. Also the prediction of the syngas composition and quantity must be predicted to carry out process design of the gasification plant. However, the gasifier process licensor are protective with information on process design and optimal gasifier design conditions. So, the most of process studies in the engineering company for gasification plant have carried out to look for key parameters and optimal design conditions using several prediction methods.

In this paper, we present the estimated preliminary optimal operation condition of the 300MW Demonstration Entrain Flow Gasifier using Aspen Plus. The gasifier operation temperature considering slag flow was predicted by FactSage software and Annen Model.

### 1. 서 론

가스화기술은 1920년대 말에 Coke를 부분산화 시켜 25% 이하의 연료 전환율을 가지는 낮은 발열량의 가스( $3,500\sim6,000 \text{ kJ/m}^3$ )를 연속적으로 생산한 것이 시발점이었으며<sup>1)</sup>, 현재는 사용하는 연료의 발열량이 75~83% 까지 합성가스의 발열량으로 전환시킬 수 있는 수준까지 기술이 향상되었다. 가스화 연료로는 중질잔사유 같은 저급 액체연료와 석탄과 같은 고체 연료를 사용할 수 있다. 고체연료의 경우에는 연료 중에 포함된 재의 발생으로 인해 액체연료와 비교하여 장치설계 및 플랜트 운전에 어려움이 있는 것으로 알려져 있다. 이는 지난 10여 년간 석탄 IGCC 실증플랜트가 설비 안정화와 Availability 향상을 위해 설비 및 운전 기술을 개선한 사례 보고서를 통하여 알 수 있다. 석탄 IGCC 플랜트에 문제를 일으키는 주요 원인 중에 하나인 석탄재는 슬래그로 전환하여 처리하는 것이 일반적이다. 그러나 이때 슬래그의 생성 및 처리 특성은 가스화기의 운전온

도에 영향을 받으며, 가스화기 운전온도는 가스화기 성능과 밀접한 상관관계를 가지고 있다. 따라서, 가스화기 설계 및 운전을 위하여 조업 변수와 성능의 상관성에 대한 이해가 필요하며, 가스화기에 대한 모델링<sup>3)</sup> 또는 실증운전 Data를 이용한 운전조건에 대한 Case 분석은 가스화 플랜트 설계, 운전 Logic 구성에 반영되어야 하고 건설이후 운전 시에 활용되어 가능하다.

본 연구에서는 국내에 건설예정인 300MW급의 분류층 석탄가스화기에 대한 설계조건과 운전

- 1) 두산중공업 기술연구원  
E-mail : jeongseok.yoo@doosan.com  
Tel : (042)712-2157 Fax : (042)712-2230
- 2) 두산중공업 기술연구원  
E-mail : jahyung.koo@doosan.com  
Tel : (042)712-2218 Fax : (042)712-2230
- 3) 두산중공업 기술연구원  
E-mail : minsu.paek@doosan.com  
Tel : (042)712-2123 Fax : (042)712-2230
- 4) 두산중공업 발전 BG  
E-mail : hwangjik.lee@doosan.com  
Tel : (02)513-6091 Fax : (02)513-6692

조건에 대한 선정방법과 성능예측 모델링 결과로 최적운전 범위를 예측하고자 한다. 가스화기 성능 예측 모델은 국내 IGCC 1호기 예상 설계탄을 기준으로 하였으며, 석탄, 스텀, 산소 주입량을 운전 변수로 하여 Aspen Plus를 사용하여 가스화 성능을 예측하였다. 그리고 FactSage와 점도 예측 모델을 사용하여 온도별 슬래그의 점도 특성을 예측함으로서 석탄재를 연속적으로 처리할 수 있는 운전온도를 검토하였다.

## 2. 모델 구성 방법

본 연구에서 사용된 가스화기 모델은 국내 가스화공정으로 채택될 가능성이 있는 것 중의 하나인 건식 석탄을 주입하는 분류층 공정을 대상으로 하였으며, 사용되는 석탄은 표 1과 같이 1호기의 예상설계기준탄을 자료로 사용하였다.

Table 1 Design Coal Analysis

PROXANAL		ULTANAL		SULFANAL	
Element	Value	Element	Value	Element	Value
MOISTURE	10	ASH	15.8	PYRITIC	0.4
FC	52	CARBON	69.0	SULFATE	0.0
VM	28	HYDROGEN	4.3	ORGANIC	0.4
ASH	15	NITROGEN	1.4		
		CHLORINE	0.0		
		SULFUR	0.8		
		OXYGEN	8.7		

### 2.1 가스화기 모델링

운전조건별 가스화기에 대한 성능을 예측하기 위하여 화학공정 모델로 알려진 Aspen Plus를 사용하였다. 석탄 가스화기 모델은 석탄 열분해, 슬래그 생성, 반응가스 혼합, 가스화 반응, 슬래그 분리를 포함하여 5단계 구성되었으며, 그림 1은 가스화기에 대한 모델 공정도를 나타낸 것이다. 가스화 반응은 화학평형반응에 의해 계산하도록 되어 있으나, 탄소 전환율 예측은 가스화기의 운전 자료를 참고하여 반응온도에 따라 별도 계산 할 수 있도록 하였다. 가스화 반응에 큰 영향을 주는 온도는 Membrane Wall의 스텀 회수율과 벽면 열 손실을 고려 할 수 있도록 구성하여 실제운전 Data에 근접할 수 있도록 하였다.

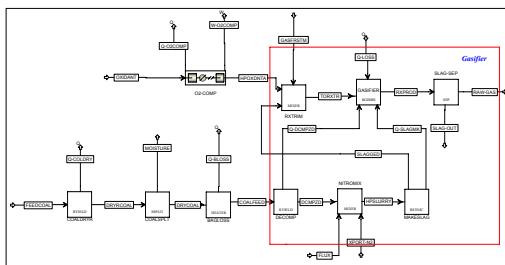


Fig. 1 Aspen Plus Model of 300MW Gasifier

## 2.2 슬래그 점성 예측

국내 건설예정인 가스화기는 분류층 가스화 방식으로 석탄재의 대부분은 슬래그로 전환시켜 가스화기의 벽면을 타고 흘러내리도록 설계되어 진다. 이 과정에서 슬래그의 점도 증가가 가스화기 운전에 많은 문제를 발생시키기 때문에 석탄재 성분에 대한 슬래그의 점도 예측을 하고 이를 운전 조건에 반영하는 것이 중요하다<sup>3)</sup>.

본 연구에서는 슬래그의 점도를 예측하기 위하여 평형 예측모델에 보편적으로 사용하는 FactSage를 이용하여 결정체의 생성온도와 생성량을 계산하고 점도 예측을 위해 식(1)의 Annen model을 이용하였다. 본 방법은 오명숙<sup>4)</sup> 등이 제안한 석탄 슬래그 점도 예측 방법을 사용하여 가스화기의 운전 온도를 결정하기 위한 자료로 활용하였다.

$$\begin{aligned} \mu_{\text{melt}} &= \mu_{\text{slag}} \times f(C) \\ \mu_{\text{slag}} &= \text{Viscosity of the melts ,Watt - Fereday Model} \\ f(C) &= (1 + 2.5C + 9.15C^2) \\ C &= \text{Volume fraction of solids} \end{aligned} \quad (1)$$

### 3. 해석 결과 및 고찰

가스화기에 대한 최적 설계 및 운전조건을 선정하기 위하여 개발된 가스화기 모델링 결과와 슬래그 점도예측 결과를 분석하였다. 본 분석을 통하여 최적의 가스화기의 운전 온도와 스텀 및 산소 주입량을 결정하게 되고, 그때의 성능을 예측하였다.

#### 3.1 열역학 기본 특성

개발된 가스화기 모델에 대한 신뢰성을 확보하기 위한 방법으로 열역학 일반 특성을 점검하였으며, 특히 발표된 건식 가스화기에 대한 운전결과와 비교하여 개발된 모델의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

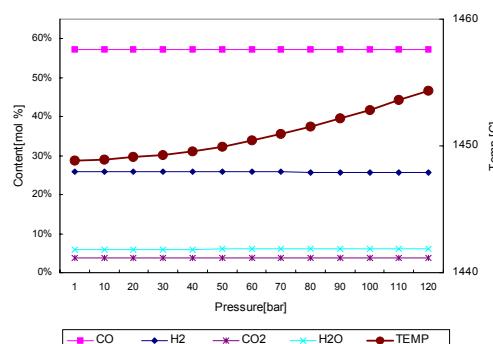


Fig. 2 Variation of Syngas composition

가스화기의 운전 압력은 사용조건에 따라 낮게는 10bar에서 100bar까지 다양하게 설정되고 있다. 특히, IGCC 플랜트의 가스화기는 가스터빈에 유입되는 합성가스의 최종 압력 약 14~25bar를 유지하기 위한 압력으로 설계된다. 따라서, 가스화기와 가스터빈간의 CO<sub>2</sub> 제거 등의 정제설비의 증가로 압력손실이 증가하게 되면 가스화기의 운전 압력역시 동시에 증가하게 된다. 가스화기의 운전 압력이 10bar에서 100bar까지 증가할 경우, 그림 2의 그래프와 같이 열역학 적으로 가스화기의 온도가 3.3°C 증가하게 되며, 이에 따라 CO, H<sub>2</sub>의 농도가 미세하게 감소하고 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O가 소폭 상승하여 가스화 효율은 감소한다. 본 결과는 Chris Higman(2003)<sup>1)</sup>의 결과와 동일하다.

그림 3은 건식 가스화기의 운전자료와 AspenPlus 모델링 결과를 비교한 그래프이다. 합성가스의 예측결과최대 오차율이 ±1.1을 나타낸 것으로 보아 Aspen Plus 모델이 가스화기 성능예측에 신뢰성이 있는 것으로 판단할 수 있다.

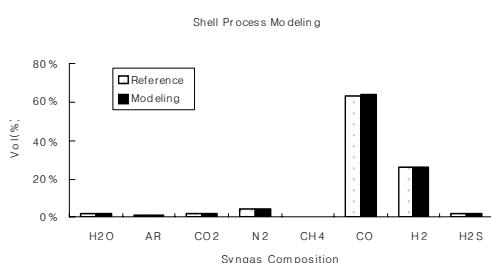


Fig. 3 Comparison of modeling result

### 3.2 가스화기 온도 선정

가스화 플랜트 운전 시 가스화기 Tap hole의 막힘 문제로 인하여 가스화기내에서 슬래그의 점성을 일반적으로 250 Poise 이하로 유지하는 것으로 알려져 있다. 따라서, 가스화기 설계시에 석탄의 특성을 고려하여 슬래그의 점성을 예측 또는 측정하여 가스화기의 운전 영역을 설정하는 것이 중요하다. 가스화기의 온도가 증가할 수록 슬래그의 점성은 낮아지지만 가스화기의 온도가 증가한다는 것은 가스화기내에 산소가 많이 유입되어 부분 산화에서 산화영역으로 이동하는 것을 의미함으로 운전온도가 증가함에 따라 가스화기 성능은 감소하게된다. 그밖에 반응기 온도의 증가는 내화벽돌 혹은 수냉관에 영향을 주기 때문에 최적의 온도 선정이 필요하다.

최적온도 선정을 위하여 석탄과 함께 CaO를 함유하고 있는 Flux를 주입하여 T250의 온도를 제어하고 있다. 그림 4는 Flux 주입량에 따른 T250의 온도가 변화되는 Slag 모델링 결과를 나타내고 있다. 결과에 따르면 CaO가 Ash의 무게분율로

1~6% 첨가될 경우에는 선형 함수로 온도가 하강하지만 6% 이상 주입될 경우 T250의 온도변화가 없거나 오히려 다시 증가하게 됨을 알 수 있다.

T250 기준으로 운전온도를 예측해본 결과 Flux를 주입하지 않을 경우에는 1438°C 이상에서 운전해야 하며, CaO 6% 주입 조건에서는 83°C 낮은 1355°C까지 운전온도를 낮출 수 있음을 알 수 있었다.

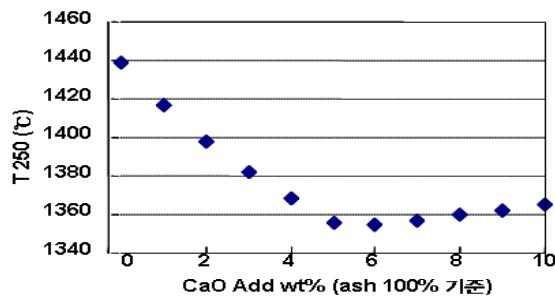


Fig. 4 Effect of Flux addition to T250

### 3.3 최적 운전 조건

본 모델은 300MW IGCC 플랜트를 운전하는데 필요한 발열량 520~530Gcal/hr를 기준으로 하여 석탄주입량을 결정하고 산소량, 스텁량, Flux의 주입량을 운전 변수로하여 모델링하였다.

#### 1) 가스화기 온도 변화

가스화기의 반응온도는 가스화 반응기내에 유입되는 input 조건에 의해 결정된다. 그림 5는 반응기의 운전 압력을 30bar로 고정하고 건식의 미분탄을 105.8ton/hr로 주입하는 조건에서 산소와 Steam의 주입량 변화에 따른 온도 변화를 나타낸 것이다. 산소 증가에 따라 가스화기의 온도는 증가함을 알 수 있다.

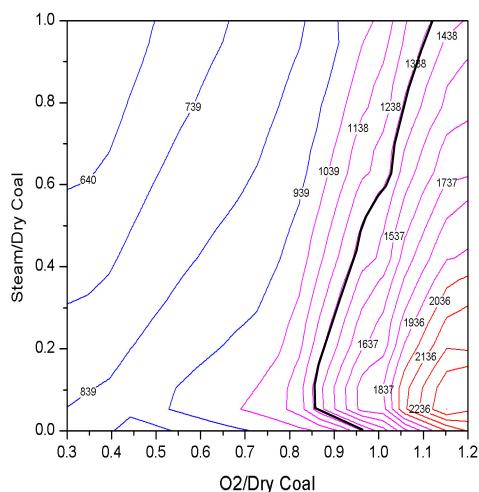
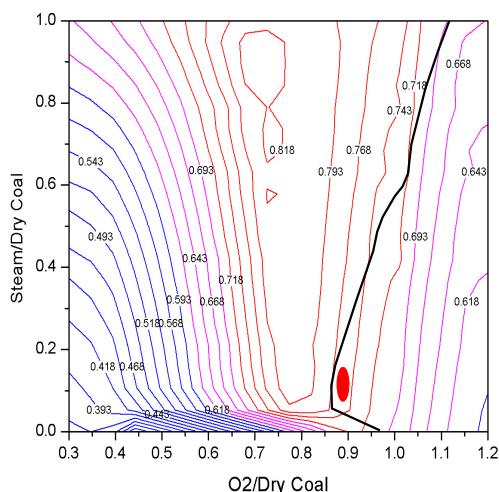


Fig. 5 Effect of H<sub>2</sub>O/Coal and O<sub>2</sub>/Coal on Gasifier reaction temp.

가스화기의 반응온도 결정은 앞서 슬래그의 점성과 연계되며, CaO 6% 주입조건에서 1355°C 이상의 온도를 운전 영역으로 선정하고 그림5에 경계선을 표시 하였다.

### 2) Cold Gas Efficiency (CGE) 변화

운전 변수에 대하여 Cold Gas Efficiency를 나타낸 그림6의 결과와 같이 효율은 900~1000°C 영역에서 CGE 81%를 나타내고 있다. 온도가 증가하면 연소가 일어나 CO보다는  $\text{CO}_2$ 의 농도가 증가하여 효율이 감소하며, 온도가 낮아지면 탄소 전환율이 떨어져 효율이 감소한다. 여기서, 가스화기의 온도는 슬래그 특성을 고려한 1356°C 이후이며, Cold Gas Efficiency는 76~69%까지 나타내고 있다. 그림 6에 표기한 온도경계선에서 CGE가 가장 높은 영역에서 운전하는 것이 결과적으로 최적의 운전영역이 된다.



**Fig. 6 Effect of  $\text{H}_2\text{O}/\text{Coal}$  and  $\text{O}_2/\text{Coal}$  on Cold Gas Efficiency.**

### 3) Flux 주입의 영향

가스화기내에 주입된 Flux는  $\text{CaCO}_3$ 이며, 주입된 Flux는 고체의 CaO와 가스 상태의  $\text{CO}_2$ 로 분리되어 가스화 반응에 참여한 것으로 모델링 하였다. Flux 1kg 투입 시  $\text{CaCO}_3$ 은 0.9kg이 포함되어 있으며 그중에 0.56kg의 CaO가 Slag에 영향을 준다. CaO 6% 주입 조건은 석탄 105.8ton/hr 기준으로 Flux를 1.889 ton/hr 주입하는 것이며, 약 45ton/d 공급을 필요로 한다. 모델링 결과 생성되는 합성가스량과 비교하여 매우 적은 양이기 때문에 가스화기 조성을 거의 변화시키지 못하였다.

## 4. 결 론

이론적으로 석탄 가스화기의 성능을 높이기

위해서는 석탄의 탄소 전환율을 높이고, 가스화 반응에 소요되는  $\text{O}_2$ 와 Steam량을 최적화하고, 가스화반응을 통해 생성된 엔탈피를 최대한 회수하여, 낮은 엔탈피를 가지는 높은 발열량의 합성가스를 얻어내는 것이다.

본 연구를 통하여 국내에 건설예정인 300MW급의 분류층 석탄 가스화기에 대한 설계조건과 운전조건에 대한 모델링 결과 아래와 같이 예측되었다.

1) 가스화기 운전온도는 슬래그 점도 특성을 고려하여 CaO를 석탄재의 6% 주입 조건으로 하여 가스화기 온도 1355°C 이상에서 운전함.

2) 가스화기 운전온도인 1355°C 이상을 유지하고 필요한 열량을 얻기 위해서는 Dry Coal의 주입량은 105.8 ton/hr이며, 이때 필요한 산소량은 89.9~92 ton/hr, 스텁은 5.29~13.8ton/hr으로 운전

3) 제안된 운전조건 Cold Gas Efficiency 77%이며, 합성가스의 조성은 물분율로  $\text{CO}$ : 56.45%,  $\text{H}_2$ : 25.04%,  $\text{H}_2\text{O}$ : 6.74%,  $\text{CO}_2$ : 4.58%의 결과를 나타냄.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 신재생에너지기술개발사업의 일환(2006-N-C012-P-01-0-000)으로 수행되었습니다.

## References

- [1] Chris Higman and Maarten van der Burgt, 2003, "Gasification" elseviser pp. 2-28.
- [2] Mile Bockelie, Martin Dension, Hong Shimm Connie Senir and Adel Sarofim 2005, "CFD Modeling of Entrained Flow Gasifier" ACERC Annual Conference pp.18-19.
- [3] Alex Kondratiev and Evgueni Jak, 2001, "Predicting Coal Ash Slag Flow Characteristic(Viscosity model for the  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{CaO}$ - $\text{FeO}$ - $\text{SiO}_2$  system) Fuel 80 (2001) pp.1989-2000.
- [4] 박윤경, 오명숙, 2002, "Factsage 프로그램을 이용한 석탄 슬래그 점도 모델개발" 홍익대학교 이학기술논문집 제14권 pp. 833~844.