

## 고온공기를 이용한 고형연료의 가스화 운전 특성

최영찬\*, 김재호, 홍재창, 김용구, 이시훈, 이재구

### Characteristics of Air-blown Gasification in a Pebble bed Gasifier

Young Chan Choi\*, Jae Ho Kim, Jae Chang Hong, Young Ku Kim,  
See Hoon Lee, Jae Goo Lee

#### ABSTRACT

High temperature air blown gasification is new concept to utilize the waste heat from gasifier that is called the multi-staged enthalpy extraction technology. This process was developed to solve the economic problem due to air separation cost for the oxygen-blown as a gasifying agent. In this study, we have performed the construction of pebble bed gasifier and operated it by controlling the pebble size and bed height. As a result, we can produce the syngas with the calorific value of 700kcal/Nm<sup>3</sup> at the condition of air temperature 650°C.

**Key Words** : High temperature air, gasification, wastes, coal, syngas

#### 1. 서 론

고온공기를 이용한 가스화는 다단계로 폐열을 회수 이용하는 방식(MEET: Multi staged Enthalpy Extraction Technology)으로 열을 회수하여 가스화를 위한 산화제인 공기를 가열하여 사용하는 방법이다. 순산소를 사용하는 가스화 방식은 합성가스 발열량은 높지만 산소를 제조하는 비용이 추가되므로 이와 같은 경제적인 문제점을 극복하기 위하여 일본에서 CREST(Core Research for Evolutional Science and Technology)사업의 일환으로 처음으로 연구개발이 시작되었다.<sup>1)-2)</sup> MEET 방식의 목적은 탄화수소계의 어떠한 저급연료에 대해서도 거의 동일한 기기 구성으로 대응할 수 있고 연소에 수반하는 환경부하를 최저상태로 제어하면서 고효율 발전을 할수 있는 경제적이고 compact하며, 또한 신뢰성이 높은 획기적인 발전 시스템을 개발함에 있다.<sup>3)-5)</sup>

고온공기 가스화 방식은 열을 유지할수 있는 축열체 부위(Pebble Bed)를 설치하여 중소규모 플랜트 위주를 대상으로 하고 있다는 점이 큰 특징으로 되어있다. 고온공기 가스화 발전 시스템에서는, 1000°C 이상으로 가열된 고온 공기로 연료를 가스화해, 생성 가스중의 환경오염 물질을 제거한 후에, 생성 가스를 다시 고온 공기로

저NOX 연소시켜, 증기터빈이나 가스터빈을 구동하는 방식을 채용하고 있다.

고온공기 가스화의 전체 시스템 구성은 Fig. 1과 같다.

석탄이나 잔사유, 폐기물등의 연료는 가스화반응기 내부에서 가스화 되어 연료용 합성가스로 변화된다. 가스화제로는 1000°C정도의 수증기가 포함되거나 단독형태의 공기를 이용한다. 공급된 연료로부터 가스화에 의해 생긴 합성가스는 열교환하여 온도를 내린 후에, 정제한다. 정제된 합성가스는 그일부를 가스화제인 공기를 고온에 가열하기 위해서 이용하고 나머지는 여러가지 용도의 연료로 이용한다. 고체연료중 회분은 가스화로 내부에서 용해 분리되어 슬래그로서 배출된다. 이와 같이 고온공기를 이용하고 축열체 Pebble을 이용하는 방식은 회분이 없는 합성가스를 제조하는 과정에서 가스온도를 회분의 유점 이상으로 유지해준다. Pebble bed 가스화 반응기는 가연분을 가스화함과 동시에 회분을 용융하는 용융가스화로의 일종으로 MEET방식에 의한 시스템에서 가장 중요한 핵심 요소기술이다.

본 연구에서는 고온공기 가스화 장치 제작과 가스화 운전 실험을 통하여 새로운 시스템 개발에 대한 데이터를 확보하고자 하였다.

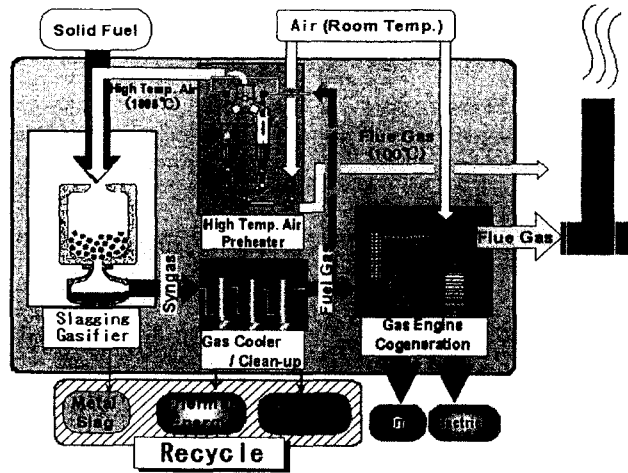


Fig. 1. MEET 방식에 의한 합성가스제조 및 이용시스템

2. 실험

2-1. 시료

본 연구에 사용되는 시료는 미분쇄된 석탄 시료 4종을 사용하였으며, Table 1. 은 각 시료의 분석결과를 나타내었다.

2-2. 장치

Lab. scale 고온공기 가스화장치는 고온공기에열기, 고온공기가스화장치, 석탄 공급장치 및 제어장치로 구성되었으며, 전체 시스템의 흐름도는 Fig. 2와 같다. 고온공기 가스화장치는 내부에 10mm, 30mm세라믹 볼의 충전층이 하부에 설치되었고, 내부온도 측정을 위하여 4개의 온도계와 반응기 벽면 내화재 온도를 측정하기 위하여 3개의 온도계를 설치하였다. 공기에열장치는 최대 1,000°C까지 가능하며, 시료 공급장치는 screw feeder를 사용하였다. 고온의 합성가스는 가스화장치 후단부에서 냉각하였고, 분석을 위한 샘플링 과정에는 사이클론 및 집진장

치를 설치하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 온도분포

온도측정은 가스화제로 공급되는 고온공기의 1,2차온도와 분류층 부위의 상부 및 중앙부 온도 및 하부 pebble 부위의 온도를 측정하였다. 고온공기는 전기가열식에 의해 1차 및 2차 가열로를 사용하여 공기량 10~15Nm<sup>3</sup>/h 범위에서 온도를 600~1,000°C로 가열하는 것이 가능하도록 한 것이다. 본 연구에서 고온공기의 온도는 가열로의 한계로 인하여 600~800°C 범위까지 가능하였다. 반응기 내부온도는 3개의 벽면을 관통하는 R-type 열전대를 설치하여 특히 slag 용융을 위한 조건으로 pebble bed위치에서의 온도를 운전관리 point로 선정하여 실험을 수행하였다. 반응기 내부의 온도는 LPG 버너를 사용하여 반응부위의 온도가 1,200°C, pebble bed 온도가 1,000°C 수준으로

Table 1. 시료의 원소, 공업 및 발열량 분석결과

시료명	원소분석(wt%)					공업분석(wt%)				발열량 (kcal/kg)
	탄소 (C)	수소 (H)	산소 (O)	질소 (N)	황 (S)	수분 (M)	휘발분 (V.M)	회분 (Ash)	고정탄소 (F.C)	
Alaska	74.70	3.74	1.43	0.74	2.60	4.45	21.75	16.79	57.01	6,590
Datong	74.77	4.26	0.82	0.70	10.81	10.58	29.18	8.64	51.60	6,580
Drayton	74.60	4.61	1.67	0.57	6.39	5.45	29.31	12.16	53.08	6,820
Kideko	72.45	4.92	1.14	0.06	19.53	18.15	39.97	1.90	39.63	6,270

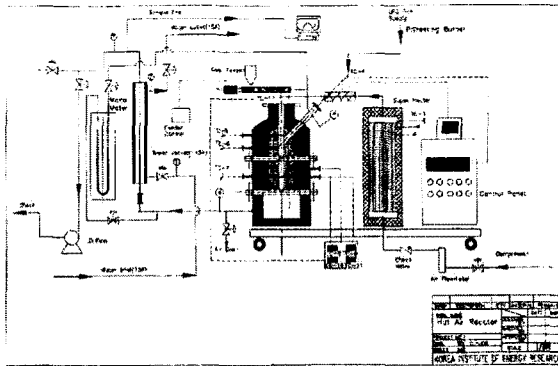


Fig. 2 고온공기 가스화장치 흐름도

가열한 다음 석탄을 주입하여 가스화 실험을 수행하였다. 정상적인 운전조건하에서 Fig. 3에서 볼 수 있는바와 같이 반응기 내부의 온도는

반응시의 가스화기 내부온도 변화를 나타낸 것이다. LPG로 예열시 반응기 내부에서의 온도분포는 예열온도가 상부온도와 비슷한 값을 보이며, 가스화

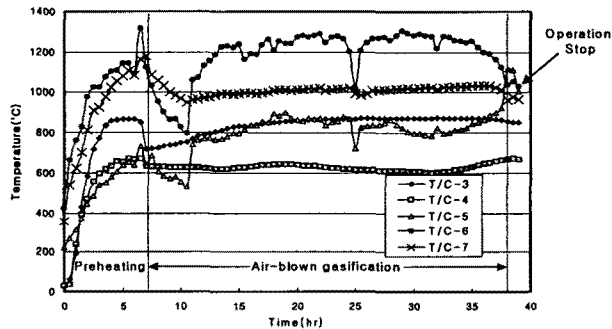


Fig. 3. 운전시간에 따른 가스화 반응기 내부에서의 온도분포

부위별로 중간부위, pebble bed부위, 상부순으로 높은 온도를 보였다. Fig. 4는 LPG로 예열 및 가스화

반응시에 pebble bed 온도는 중앙부분의 온도보다 낮은 값을 나타내었다. 이는 실제로 pebble bed의 온도가 낮았다고

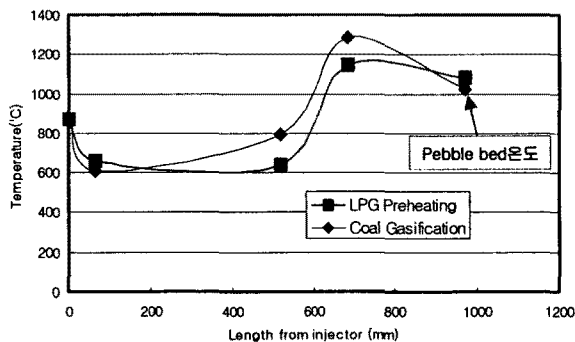


Fig. 4. 운전시간에 따른 가스화 반응기 내부에서의 온도분포

보다는 미반응물질 및 회재가 용융되면서 열전대부위에 쌓이게되고 이로 인하여 측정치가 실제보다 낮아지는 것으로 보여진다. 이는 벽면을 관통하지 않은 벽면에 합몰된 온도의 측정치로부터 예측되는 결과인데, 이의 결과로부터 측정된 온도는 실제의 온도보다 300℃이상 낮게 측정된 것으로 볼 수 있다.

가스예열시의 화염과 석탄가스화시에 형성된 화염을 비교하면 Fig. 5와 같다. 가스연소시에 나타나는 화염을 대체로 균일한 화염 형태를 보이나, 석탄의 가스화시 생성된 화염은 고체입자의 산란으로 인한 화염이 관측되었으며, 공기량 증가에 따라 화염이 노즐에서 멀어지는 현상을 보였다.



(a) LPG 연소 (b) 석탄가스화 화염  
Fig. 5. LPG 연소 및 석탄가스화 화염비교

3-2. Pebble bed에서의 압력손실

반응기 하부는 pebble이 빠지지 않도록 conical 형태를 유지하고 있으며, pebble의 충전은 Fig. 6과 같이 아래쪽으로 굽은 3cm ball을 3층으로 장입하고 그위에는 4층으로 1cm ball을 넣었다.

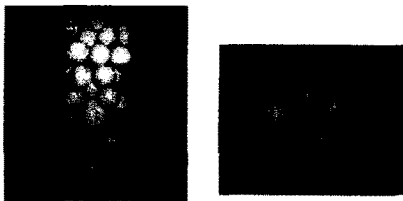


Fig. 6. Pebble bed 충전 상태

Pebble bed에서의 차압은 반응기에서 생성된 합성가스의 출구 역할을 하게되므로 이 부분이 막히게 되는 것은 운전의 신뢰성에 문제가 되기 때문에 pebble bed 상하에서 압력차를 측정하였다. Fig. 7과 같이 LPG로 예열하는 경우에는 차압이 20mmH<sub>2</sub>O를 유지하였으며, 석탄을 공급하면서 차압은 다소 증가함을 보였다.

정상적인 운전상태에서는 차압이 25mmH<sub>2</sub>O를 유지하였으나 슬래그의 충분한 용융이 이루어지지 않거나

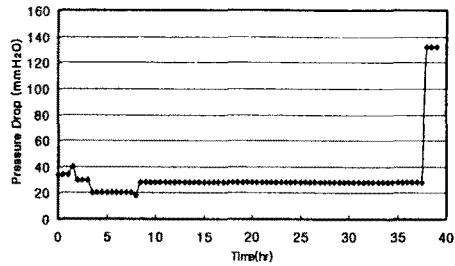


Fig. 7. Pebble bed에서 측정된 차압

석탄공급량이 증가하는 경우에 압력차가 급격하게 증가하여 막힘 현상을 초래하였다. 따라서 ID Fan으로 배기하는 조건하에서 적정공급량을 유지하지 못하는 경우에는 가스화 장치의 가동중지 원인을 제공하였다.

석탄과잉공급 상태나 용융슬래그가 응고된 상황에 대한 현상을 Fig. 8에 나타내었다.



Fig. 8. 석탄의 과잉공급으로 인한 pebble bed의 막힘현상

3-3. 합성가스 조성

3종류의 석탄에 대한 가스화 실험을 수행하였다. 가스화 실험에서 예열공기 온도는 800℃까지 가열하였으나 열손실등으로 인하여 650℃ 수준으로 공급되었다. 실험한 석탄은 Drayton, Datong, Kideco탄으로 합성가스의 분석결과는 Fig. 9~Fig. 11과 같다. 석탄의 공급량은 1kg/h의 수준으로 유지하였고, 공기의 공급량은 석탄과의 무게비로 1~4를 유지하였다.

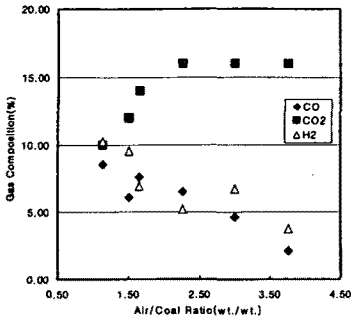


Fig. 9. 공기량에 따른 합성가스 조성변화(Drayton탄)

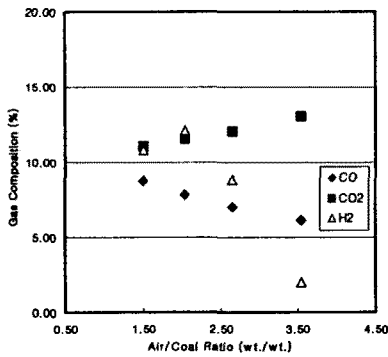


Fig. 10. 공기량에 따른 합성가스 조성변화(Datong탄)

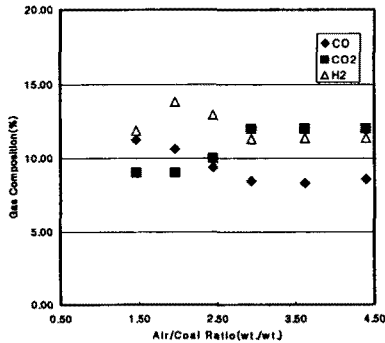
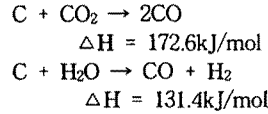


Fig. 11. 공기량에 따른 합성가스 조성변화(Kideco탄)

공기량 증가에 따라 석탄입자의 분산 및 연소성이 좋아져서 CO<sub>2</sub> 생성량이 증가하고 가연성 가스성분인 CO와 H<sub>2</sub>의 조성이 감소하였다. 본 실험범위에서는 CO 5~10%, H<sub>2</sub> 5~15%로 조성이 나타났으며, 이는 Datong탄을 900℃에서 실험한 결과(H<sub>2</sub> 16.1%, CO 23.1%)보다 낮은 값을 보였다. 열역학적으로 char-CO<sub>2</sub> 및 char-H<sub>2</sub>O 반응은

흡열반응으로 서로 배타적인 온도 범위에서 이루어지며, 온도가 상승할수록 char-CO<sub>2</sub> 반응은 char-H<sub>2</sub>O 반응보다 우선하게 진행되어서 공기예열온도가 낮은 경우에는 CO에 대한 상대적인 H<sub>2</sub> 발생량이 많은 것으로 해석되어진다.



탄종별 실험결과 발생한 합성가스의 열량변화는 Fig. 12와 같다. 공기비를 1.5~2.5로 유지하는 경우 합성가스 열량은 500~700kcal/Nm<sup>3</sup> 수준으로 나타났다. 향후 합성가스열량을 800~1,000kcal/Nm<sup>3</sup>로 증가 시키기 위해서는 공기온도를 보다 증가시켜야 할 것으로 보여진다. 본 실험결과 고온공기를 이용한 가스화성능은 Kideco탄, Datong탄, Drayton탄 순으로 나타났으며, 이는 고온 TGA에서의 반응성 측정결과와 동일한 결과를 보였다.

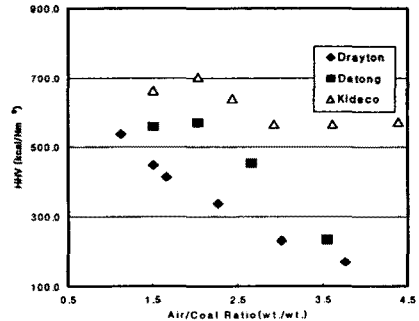


Fig. 12. 탄종별 공기량에 따른 합성가스 발열량 변화

### 3-4. 슬래그 형성

고온공기 가스화 실험중 용융 슬래그의 흐름성을 파악하기 위하여 하부의 sight glass에서 관측된 현상과 회수된 슬래그 및 pebble에 남아 있는 상태는 Fig. 13과 같다.

Table 2는 pebble 표면에 부착된 슬래그의 결부분을 분석한 결과로 회재 성분 중 휘발온도가 낮은 성분인 Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O등은 함량이 감소되고 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 성분이 증가하여 alumino silicate 화합물로 변화됨을 짐작할 수 있다. Pebble 벽면에 부착된 slag 외부표면을 분석한 자료로부터 철분 성분이 상당히 높은 것을 알 수 있다. 이로부터 슬래그 응고에는 환원된 금속 철분 성분의 증가가 기여하는 것으로 보여진다. 또한

냉각후 pebble에 남아 있는 슬래그 모양으로 볼 때 합성가스중에 포함된 회분이나 미연분은 관성 층돌에 의해 pebble 표면에서 포획된 것으로 보여진다.



Fig. 13. 용융 슬래그의 낙하상태

Table 2. Pebble 표면에 부착된 슬래그의 표면분석

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
35.71	16.15	30.38	14.45	2.24	1.06

#### 4. 결론

본 실험의 Pebble bed 가스화기에서 고온공기 가스화 실험을 통하여 얻은 연구 결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 소규모 Pebble bed 가스화 장치를 제작하여 탄종 및 공기량에 따른 성능특성 평가 실험을 수행하였다.
2. Pebble 크기와 층높이를 조절하여 적정 압력차와 슬래그 형성을 위한 운전조건을 파악할 수 있었다.
3. 고온공기 제조는 전기식 히터를 사용하였으며, 650℃ 고온공기를 사용하여 700kcal/Nm<sup>3</sup>수준의 합성가스를 제조할 수 있었다.

4. 합성가스 열량은 고온에서 측정된 반응성과 일치하게 Drayton탄, Datong탄, Kideco탄 순으로 증가하였다.

#### 참고문헌

1. Yoshigawa, K., "R&D on Micro-gasifiers for Efficient Thermal Utilization of Solid Fuels", Proc. of 2000 Int. Joint Power Generation Conference, IJPGC2000-15076 (2000)
2. 加藤義隆, "Pebble bed 熔融가스화로를 이용한 固體燃料의 가스화", 東京工業大學 博士學位論文 (2002)
3. Pian, C.C.P. and Yoshigawa, K., "Development of a High-Temperature Air-Blown Gasification System", Bioresource Technology 79, 231-241 (2001)
4. Young, L., and Pian, C. C. P., "High-Temperature, Air-Blown Gasification of Dairy-Farm Wastes for Energy Production", Energy 28, 655-672 (2003)
5. 新宮 外, "STAR-MEET 方式 小型廢棄物L가스화 發電시스템" 化學裝置, No.3, 42-44 (2003)