

분류층 건식 석탄가스화기에서 유시벨리탄의 가스화 특성

유영돈, 유희중, 윤용승, 정광국*, 안달홍*
고등기술연구원 에너지/환경연구실, 전력연구원 수화력발전 연구실*

Gasification Characteristics of Usibelli Coal in a Entrained Bed Coal Gasifier

Y. D. Yoo, H. J. Yoo, Y. Yun, K.K. Jeong*, D.H. Ahn*
Energy/Environment Lab., Institute for Advanced Engineering,
Power Generation Research Lab., Korea Electric Power Research Institute*

1. 서론

석탄을 이용한 차세대 발전 시스템으로 석탄가스화 복합발전(IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle)이 하나의 대안으로 제시되고 있다. 기존 석탄화력 발전소의 발전 효율인 36-38%보다 적어도 2-6% 우수한 효율을 나타내고 있으며 21세기 석탄 이용시 적용될 환경 규제치를 가장 현실적으로 만족시킬 수 있는 차세대 석탄화력발전 시스템으로 평가받고 있다. 고청정 환경성의 측면에서 석탄가스화 복합발전설비는 기존의 유연탄 화력발전 방식에 비해서 SO_x, NO_x 및 분진 등의 배출량을 크게 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 재(ash)를 분진형태가 아닌 용융된 후 영긴 슬래크형태로 수거하므로 환경적으로 안전하며, 슬래크와 탈황공정에서 만들어지는 황원소를 회수하여 경제성 있는 부산물로 활용할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 이유로 국내에서도 석탄가스화 복합발전 시스템의 상업화를 위한 기초 및 응용 연구개발이 현재 진행되고 있다.

석탄가스화 공정은 크게 고정층, 유동층, 분류층 방식으로 나눌 수 있는데 고등기술연구원에서는 대용량에 적합한 분류층 가스화 공정을 대상으로 하였다. 그리고 분류층에서도 미분탄을 물과 함께 슬러리 형태로 공급하는 습식 방식과 미분탄을 기류 상태로 수송하여 산화제와 혼합시킨 후 분사시키는 건식 방식이 있는데, 본 연구에서는 반응기 체적에 비하여 높은 시료 처리량을 갖고 있으면서 넓은 범위의 탄종 시료에 적용할 수 있는 건식 분류층(Dry-feeding Entrained-bed) 방식을 택하였다^{1,2)}. 또한 가스화기 운전 온도를 1450~1550℃ 사이에서 운전 함으로서 석탄에 포함된 회분을 용융된 슬래크로 처리하는 슬래깅(slagging) 운전 방식을 택하였다. 본 논문에서는 아역청탄으로 회 용융점이 낮은 알래스카 유시벨리탄(Alaskan Usibelli coal)에 대하여 가스화 운전 변수인 운전 압력, 산화제 공급량, 산화제 농도 그리고 증기량의 변화에 따른 가스화 특성을 조사하였다.

2. 실험 장치

본 실험에서 사용한 3톤/일급 석탄가스화기 시스템은 미분탄 저장 및 분쇄 시스템, 미분탄 수송 시스템, 가스화기, 석탄가스 처리시스템 등으로 크게 구성되었으며 가장 핵심 장치인 가스화기는 공급된 미분탄과 산소 등을 반응시키는 반응로(reactor)와 미분탄에 함유된 회분을 용융 상태인 슬래크 형태로 가스화기 하단부로 배출하여 슬래크을 냉각, 저장 그리고 배출시키는 슬래크 처리부(slag quencher), 그리고 생성된 가스를 냉각시키는 가스 냉각부(gas cooler)로 나누어져 있다. IGCC용 석탄 가스화기는 25기압 이상, 1400~1600℃ 조건에서 운전되므로 본 가스화기 내부도 고온/고압에서 사용 가능한 내화벽으로 이루어져 있고 미분탄과 산화제를 공급하는 공급노즐, 온도 측정 장치, 가스 샘플링 장치 등이 설치되어있다.

슬래크 처리부는 가스화기 벽면을 타고 흐르는 슬래크을 냉각시키고 저장하는 역할을 하는 부분으로 냉각수 저장 호퍼와 일정량 이상의 슬래크을 주기적으로 외부로 배출시키는 록호퍼(Lock hopper) 시스템으로 구성되었다. 본 실험에서 생성된

슬래크에 대한 용출 실험을 실시한 결과³⁾ 중금속이 용출되지 않아 슬래크을 전자재 등으로 활용하였을 때 침출수에 의해 2차 환경 오염 문제가 없음을 알 수 있었다.

가스 냉각부는 고온의 석탄가스를 냉각시켜 외부로 배출시키는 시스템으로 생성 가스에 직접 물을 분사 냉각시키는 직접 냉각 방식을 채택하였다. 본 실험에서는 배출되는 배출 가스의 온도를 250℃ 설정하여 자동 온도 조절 시스템을 설치하여 생성된 석탄가스의 배출 온도를 제어하였다.

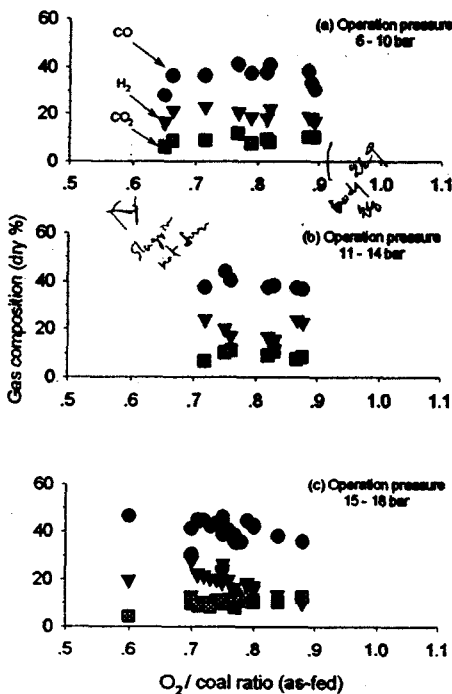


Fig. 1 알래스카 유시벨리탄에 대하여 압력에 따른 생성 가스 조성 변화

3. 실험 결과 및 토의

3.1 산소/미분탄의 무게비 및 압력의 영향

Fig. 1은 유시벨리탄에 대하여 가스화기 운전 압력이 변화할 때, 산소/미분탄의 무게비에 따른 생성된 석탄가스의 주성분인 CO, H₂ 그리고 CO₂의 농도를 나타낸 것이다.

여기서, 가스화기 운전압력까지 가압하는 방법은 상압 예열/질소 가압법⁴⁾을 사용하였다. 유시벨리탄에 대한 기초 분석치는 Table 1에 나타내었다.

<Table 1> 유시벨리탄의 기초분석치

Proximate Analysis(wt %)		
Moisture	16.34	
Volatile Matter	43.40	
Fixed Carbon	36.44	
Ash	3.82	
Ultimate Analysis(wt %)		
C	49.43	
H	4.13	
N	0.58	
S	0.15	
O	26.70	
Ash	9.87	
Moisture	9.14	
Inorganic Analysis(wt %)		
Al ₂ O ₃	18.93	
SiO ₂	42.73	
Fe ₂ O ₃	6.00	
TiO ₂	0.74	
CaO	21.01	
MgO	3.13	
K ₂ O	1.27	
Na ₂ O	0.93	
P ₂ O ₅	0.33	
L.O.I	1.08	
Gross Heating Value* (kcal/kg)		
5303.83		
Ash Fusion Temp.	I.T(°C)	1162
	S.T(°C)	1184
	H.T(°C)	1224
	F.T(°C)	1257

먼저 가스화기 운전 압력이 6~10 기압일 때는 산소/미분탄의 무게비가 0.77~0.88 사이에서 CO와 H₂ 농도가 최대임을 알 수 있으며 이때 CO는 40% 정도, H₂는 20% 정도의 값을 갖는다. 압력이 11~14기압, 15~18기압으로 증가되면 생성가스의 주성분인 CO와 H₂ 농도가 각각 45%, 25% 정도로 증가되는데 이러한 결과는 중국 대동탄의 가스화 연구 결과³⁾와 동일 경향으로 압력이 증가되면 CO 및 H₂ 농도의 최대값이 증가할 뿐만 아니라 최대 CO 및 H₂ 값을 얻을 수 있는 산소/미분탄의 무게비도 더 낮아짐을 알 수 있다. 즉, 15~18 기압 실험에서는 CO 및 H₂를 최대로 얻을 수 있는 산소/미분탄의 무게비가 0.7~0.8 주위에서 존재함을 알 수 있다. 특히 6~10 기압에서는 산소/미분탄의 무게비가 0.65이하에서는 가스화기의 운전 온도가 저하되어 슬래깅 가스화기 운전이 불가능하지만 압력이 15~18 기압인 경우는 산소/미분탄의 무게비가 0.6까지도 우수한 가스화 특성을 갖음을 알 수 있다. 그러나 대동탄의 경우와 비교하여 압력이 증가하였을 때 생성가스 조성의 증가폭은 크지 않았다.

석탄가스화 반응이란 가스화기 내에서 석탄과 산화제와의 산화 반응을 일으켜 연소열을 방출하면서 연소 생성물(CO₂, H₂O)이 생성된 후 이들 생성물과 잔류하는 미반응 촉와의 흡열 반응인 가스화 반응(촉-가스 반응)이 아래와 같이 진행되는 것을 말한다. 따라서 공급된 산소량은 연소생성물인 CO₂, H₂O의 양을 결정할 뿐만 아니라 가스화기 온도도 결정하므로 산소의 공급량이 가스화 특성에 가장 직접적으로 영향을 미친다. 따라서 산소 공급량은 연소 반응을 적절히 일으켜 가스화기 온도를 고온으로 유지하면서 생성된 CO₂, H₂O와 촉의 흡열 반응을 충분히 지속할 수 있는 양을 공급하여야한다. 너무 낮은 산소/미분탄 비에서 가스화기를 운전하면 연소에 의한 발열량이 작아 가스화기 온도도 낮을 뿐만 아니라 CO₂, H₂O의 발생양도 적으므로 미반응 촉가 많이 발생된다. 따라서 이 경우

에는 원하는 목적인 석탄가스의 주성분인 CO 및 H₂ 발생량도 적을 것이다. 그러므로, 산소량이 어느 한계까지 증가하면 이 구간에서는 산소/미분탄의 무게비에 따라 가스화기 온도는 상승하고 연소 생성물의 증가로 인하여 CO 발생량도 점차적으로 증가할 것이다. 그러므로 6~10기압에서는 0.65에서 0.77까지는 산소/미분탄의 공급량 증가에 따라 CO는 증가하지만 0.88 이후부터는 CO 및 H₂ 가 감소하기 시작한다.

3.2 미분탄의 공급량 변화에 따른 영향

Fig. 2는 가스화기 운전 압력이 14~15기압인 조건에서 미분탄 공급량을 변화시켰을 때 나타난 생성가스 조성의 변화를 보여주고 있다. 먼저 미분탄 공급량이 32 kg/h 일 때 CO, H₂ 농도의 최대값은 대략 40%, 18% 정도이지만, 미분탄이 공급량이 45kg/h로 증가된 경우에는 CO, H₂ 농도의 최대값이 대략 43%, 20%로 증가되고, 미분탄이 공급량이 52kg/h 일 경우에 CO, H₂의 최대값은 대략 45%, 25% 정도로서 약간씩 증가함을 알 수 있다. 이는 동일한 운전압력일 때에 증가

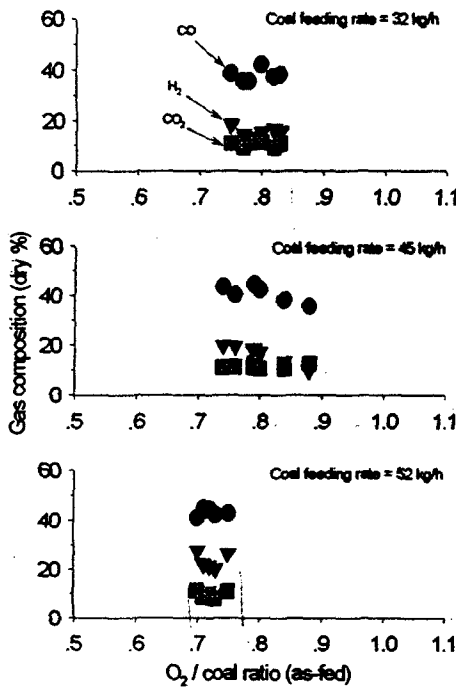


Fig. 2 알래스카 유시벨리탄에 대하여 가스화기 운전 압력이 일정할 때 미분탄 공급량의 변화에 따른 영향

된 미분탄양은 가스화기 내에서 평균 유속의 증가로 인해 체류시간이 감소되어 가스화 반응(최의 가스화 반응)에는 부정적인 영향을 초래하지만, 증가된 질량의 유량에 의해 단위체적당 발생하는 발열량이 증가되고 이로 인해 가스화기내 온도가 상승되어 가스화 반응이 촉진되게 된다. 따라서, 미분탄 공급량의 증가는 체류시간의 감소와 가스화기 온도의 상승이라는 2가지 상반되는 효과를 나타내게 되는데 이러한 효과 중에서 우세한 반응에 의해 가스화 특성이 지배될 것으로 생각된다. 본 BSU 가스화기에서는 Fig. 2와 같은 실험 조건에서 질량 유속이 증가되면 두 가지 효과 중에서 후자에 의한 영향이 우세하여 가스화 성능이 향상된 것으로 판단된다. 따라서 동일 압력에서 미분탄의 공급량을 변화시킨 실험에서 미분탄 공급량에 따라 가스화 성능이 향상되는 범위와 저하되는 미분탄 공급 범위가 있다는 연구 결과가 발표된 경우도 있다⁵⁾.

3.3 산화제농도 변화에 따른 영향

산화제의 농도 변화에 따른 가스화 특성을 파악하기 위해서 공급되는 산소의

농도를 변경시킨 실험 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 공급되는 산소량을 $25.6\text{Nm}^3/\text{h}$ 로 일정하게 유지시키고 여기에 질소를 $0.0\sim 9.5\text{Nm}^3/\text{h}$ 첨가하여 산화제인 산소 내의 질소 함량을 0%에서 27%까지 변경시키면서 실험을 실시하였다. 총공급 산소량 중 질소로 10%를 치환한 정도까지는 생성가스의 조성은 CO 38~40%, H_2 는 27~30% 정도, 가스화기 온도도

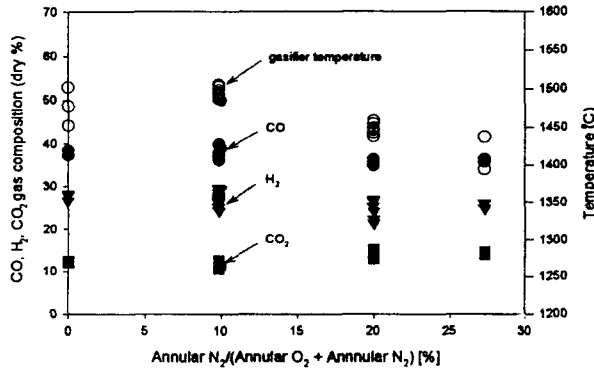


Fig. 3 알래스카 유시벨리탄에 대하여 산화제 농도 변화에 따른 생성 가스 조성의 변화

1500℃ 정도를 계속 유지하지만, 치환된 질소가 20%정도에서는 CO가 37~38%, H_2 는 23~28% 정도로 감소하기 시작하고 가스화기 온도는 1450℃ 정도로 저하

함을 알 수 있다. 질소가 27% 치환된 경우에는 CO가 35%, H_2 는 23% 정도로 감소하고 가스화기 온도는 1430℃ 정도로 떨어짐을 알 수 있다. 이 결과로부터 100% 가까운 고순도 산소를 산화제를 사용하는 것보다 10% 정도까지의 질소를 포함한 산소를 사용하여도 가스화 특성에는 큰 영향이 없음을 알 수 있다.

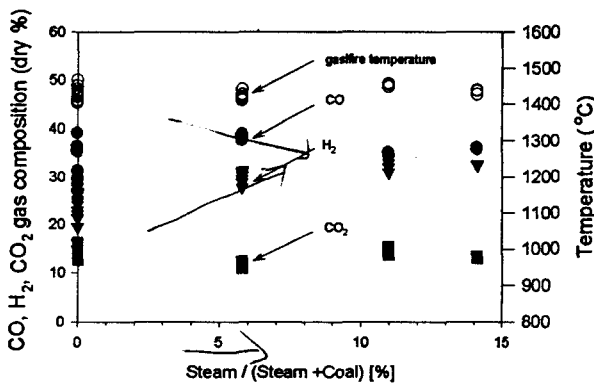


Fig. 4 알래스카 유시벨리탄에 대하여 증기 공급량의 변화에 따른 생성 가스 조성의 변화

가스화기에 공급되는 증기의 영향을 파악하기 위하여 증기/미분탄의 무게비를 5.8%, 11%, 14%로 변경시키면서 실험을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 증기를 공급하지 않을 경우에는 CO가 36~40%, H_2 는 24~27% 정도이

3.4 증기에 따른 영향

지만, 증기 공급비가 14%까지 증가하면 CO는 35% 정도 H₂는 31~32%정도로 CO는 감소되고 H₂는 증가되는 경향을 얻었다. 가스화기 온도는 크게 저하될 것으로 예상되었으나 30℃ 정도만 감소하였다.

4. 결론

본 연구에서는 알래스카 유시벨리탄의 가스화 특성을 조사하기 위하여 가스화기 운전 압력 산소/미분탄의 비, 산화제의 농도, 증기의 영향을 조사하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

가스화기 운전 압력이 증가시키면 석탄가스의 주성분이 CO 및 H₂의 농도가 증가하며 최대로 얻을 수 있는 산소/미분탄의 무게비도 낮아진다. 그리고 동일 압력 하에서 미분탄의 공급량을 32~52 kg/h 범위에 걸쳐 증가시켰을 때 CO 및 H₂의 농도가 증가한 결과를 얻었다. 산화제의 변화에 대해서는 산화제인 산소에 10% 정도의 질소를 첨가시켜도 생성가스 조성에는 큰 영향을 미치지 않는 결과를 얻었으며 미분탄 공급량의 0~14%의 범위에 걸쳐 증기를 공급하였을 때 CO는 3% 정도 감소 H₂는 6% 증가하는 경향을 얻었으며 예상했던 가스화기 반응 영역의 온도 감소는 대략 30℃ 정도로 큰 변화는 없었다.

후기

본 연구는 한전산하 전력연구원에서 지원하는 "3톤/일급 건식 석탄가스화기 운전 특성 연구"의 일환으로 수행되었습니다. 이에 전력연구원 관계자들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. 통상산업부: "Bench Scale급 건식 석탄가스화기 운전 및 모사기술개발 (I)", (1997).
2. 윤용승, 유영돈, 이한구, 이제봉 : "Research results of the 3 ton/day entrained-bed engineering scale coal gasifier in Korea", 제2회 석탄가스화 복합발전기술 워크샵, 183-200 (1997).
3. 이제봉, 조성수, 유희종, 윤용승 : "Bench Scale급 건식 석탄가스화기에서 생성된 Slag의 분석", 한국에너지공학회 추계학술대회 논문집, 123-128 (1996).
4. 유영돈, 윤용승, 박호영, 안달홍 : "분류층 건식 석탄가스화기에서의 가스화 특성", 대한기계학회논문집(B), 21(12), 1690-1700 (1997).
5. Cope, R.F., Smoot, L.D. and Hedman, P.O. : "Effects of pressure and coal rank on carbon conversion in an entrained coal gasifier", Fuel, 68, 806-808 (1989).