

Adaro탄을 사용한 분류층 석탄가스화기의 운전특성

정석우, 김원배, 이계봉, 유영돈, 윤용승
고등기술연구원 Plant Engineering센터

Gasification Characteristics of an Entrained-Bed Coal Gasifier using Adaro Coal

S. W. Chung, W. B. Kim, K. B. Lee, Y. D. Yoo, Y. Yun
Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering

1. 서론

석탄가스화 복합발전(IGCC) 시스템에서는 고온/고압 조건에서의 반응에 의하여 CO와 H₂가 주성분인 생성가스가 발생되고 이후 정화공정, 가스터빈, 증기터빈 등을 거치면서 발전이 이루어지는데, 이러한 IGCC 시스템은 기존의 미분탄 발전방식에 비하여 효율이 높다는 점과 공해물질의 배출을 최소화할 수 있으며 미분탄내의 회분이 대부분 분진형태가 아닌 용융슬래크 형태로 배출되므로 환경적으로 안정하다는 특징을 가진다. IGCC에서 가장 핵심이 되는 설비인 가스화기의 경우 석탄 공급방식에 따라 고정층과 유동층, 분류층 가스화기로 구분이 가능한데, 본 연구에서는 반응기 체적에 비하여 많은 양의 미분탄을 처리할 수 있어 대용량화에 적합하고 비교적 넓은 범위의 탄종에 대하여 적용이 가능한 분류층 건식 가스화기 방식을 채택하였다.

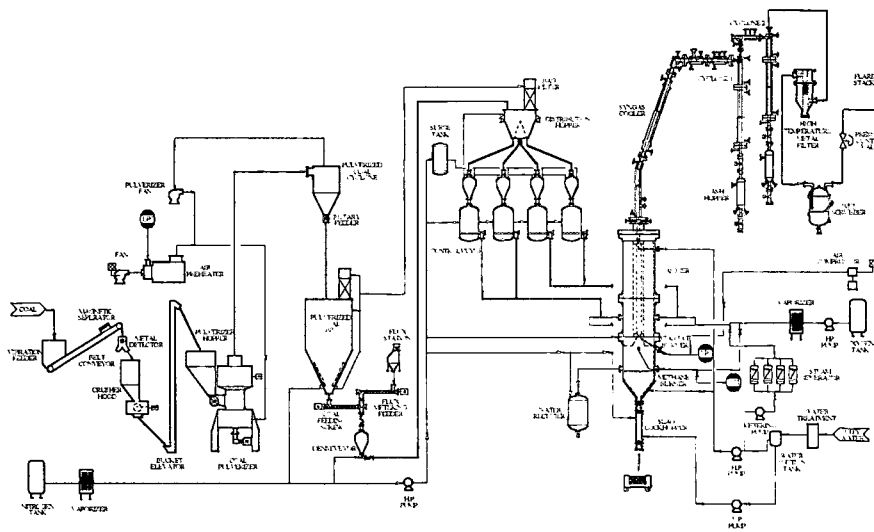
그리고, 가스화기에 사용되는 석탄시료의 경우 그 종류에 따라 운전특성에 차이가 있으므로 이에 대한 자료를 축적하는 과정은 상용화급 IGCC 기술을 적용하는데 있어서 중요한 사항이므로, 본 연구에서는 현재 고등기술연구원에서 보유한 3톤/일급 분류층 건식 가스화기 설비를 이용하여 1450~1500℃, 10기압의 운전조건에서 인도네시아 Adaro탄을 대상으로 가스화기의 운전특성을 조사하였다.

2. 실험장치

본 연구의 대상이 되는 3톤/일급 석탄가스화기 시스템은 대상탄을 저장 및 분쇄시키는 전처리 시스템과 미분탄을 공압수송 방식으로 이송하는 미분탄 수송 시스템, 석탄가스화기 본체, 생성된 가스를 냉각 및 정제하는 후처리 시스템으로 구성된다. 전처리 시스템에서는 대상탄을 분류층 가스화기에서 사용이 적합하도록 원탄을 건조, 분쇄시키게 되는데 3톤/일급 가스화기 시스템에서는 분쇄된 미분탄의 입자 크기가 76 μ m 이하 80% 정도되며 수분함량은 3% 이내로 건조시켜 실험을 진행하였다. 그리고, 이렇게 전처리된 미분탄은 공압수송 방식에 의하여 산화제와 함께 가스화기로 공급되어 가스상태의 CO와 H₂로 전환되며, 미분탄내의 회분은 용융되어 가스화기 하단의 슬래크첸처에서 급냉된 후 고형화된 상태로 배출된다.

가스화기에서 배출되는 1200℃ 이상의 고온 생성가스는 이중관 구조의 Syngas Cooler를 통과하면서 냉각되고 2단 사이클론에서 집진이 이루어지며, 스크러버를 통한 세정후 플래어스택에서 연소되어 대기중으로 배출되도록 후처리 시스템을 구성하였는데, 이러한 시스템의 공정흐름도는 [그림 1]에 나타내었다.

그리고, 실험을 위한 가스화기의 예열은 LPG를 연료로 사용하는 가스버너를 이용하여 24 시간동안 진행함으로써 가스화 반응구역의 온도가 예열 최종 단계에서 1250~1300℃ 정도까지 도달하도록 하였으며, 미분탄 수송과 퍼지를 목적으로 사용되는 질소 및 산화제로 사용되는 산소의 공급압력은 각각 가스화기의 운전압력보다 7kg/cm², 5kg/cm² 정도 높게 유지시키면서 실험을 진행하였다.



[그림 1] 3톤/일급 가스화기 시스템 공정흐름도

3. 실험결과 및 토의

3-1. 대상탄의 특성

실험에서 대상탄으로 선정된 Adaro탄의 물리적인 특성을 조사하기 위하여 일차적으로 공업분석 및 원소분석, 미분탄내 회분의 화학적 조성 분석 및 용융온도 측정, 발열량 측정 등의 분석을 실시하였다. 공업분석 결과에 의하면 대상탄의 휘발분은 45.73%로 일반 유연탄에 비하여 많은 편이고 회분은 1.29%로 함량이 상당히 적으며, 수분은 2.63%, 고정탄소는 50.35% 함유된 것으로 분석되었다. 원소분석에서는 탄소함량이 68.89%, 산소함량이 23.12% 포함된 것으로 나타났으며, 대상탄 회분내의 무기물 성분인 화학적 조성 분석 결과에 의하면 산성 산화물인 SiO₂와 Al₂O₃ 함량이 각각 18.78%, 39.18% 포함되어 있는 반면에, 회분의 용융온도를 낮추는 역할의 염기성 산화물인 Fe₂O₃, CaO, MgO 등의 함량이 각각 16.57%, 11.25%, 2.59% 정도인 것으로 분석되었다.

그리고, 가스화기의 운전온도를 결정하는데 있어서 중요한 대상탄 회분의 용융온도 측정

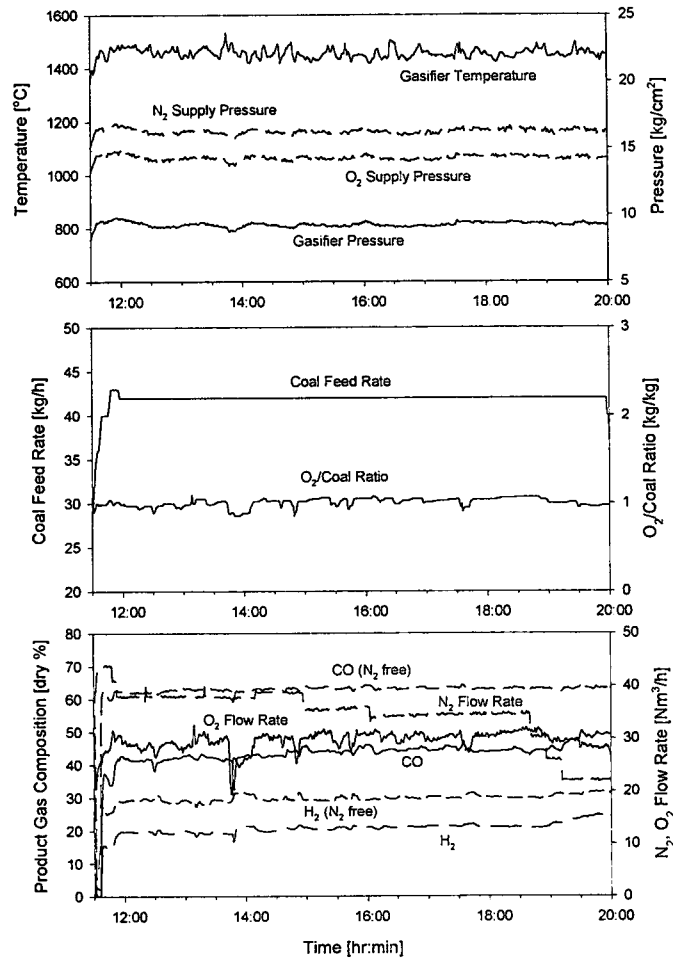
결과에 의하면 회분의 용융되기 시작하는 온도인 IDT가 1250℃, 회분이 용융되어 가스화기 내부에서 흘러내릴 수 있는 온도인 FT가 1340℃ 정도인 것으로 측정되었고, 발열량은 고위 발열량 기준으로 6,748kcal/kg인 것으로 측정되었다. 이러한 대상탄의 분석결과를 종합해볼 때 Adaro탄의 경우 휘발분 함량이 많고, 회분이 적으며 염기성 산화물이 상대적으로 많이 포함되어 있어서 회분의 용융온도가 낮은 편이므로 가스화기 운전에 적합한 탄종이라 할 수 있다.

3-2. 가스화 특성

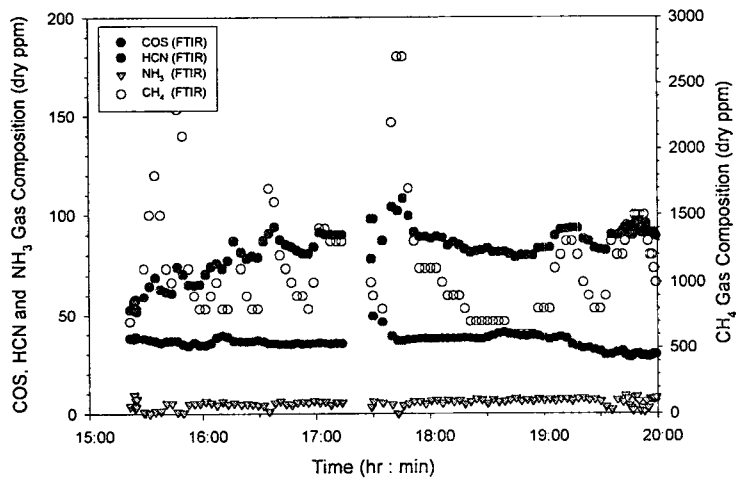
Adaro탄의 가스화 반응을 위한 가스화기 운전조건은 대상탄의 용융온도보다 100~150℃ 정도 높은 온도 범위에서 운전을 실시하였는데, 운전중 가스화기의 온도조절은 미분탄 공급량 변화에 따라 O₂/Coal Ratio를 변화시키면서 이루어진다. 가스화 실험에서 O₂/Coal Ratio의 경우 대상탄의 특성에 따라 운전범위가 변하게 되는데, 일반적으로 이 값이 낮게 운전될 경우 가스화기의 운전온도가 낮아지면서 미분탄내의 회분을 슬랙으로 용융시켜 배출하는데 문제점이 발생하게 되며, 반대로 지나치게 높은 범위에서 운전될 경우에는 가스화기의 운전온도가 크게 상승하면서 내화벽 손상이나 열전대의 파손 등을 초래할 수 있으므로 대상탄에 대한 적절한 가스화기 운전온도인 1450~1500℃의 조건을 유지하면서 실험을 진행하였다.

대상탄의 가스화 성능을 향상시키는 조건은 미분탄내 회분의 용융온도 보다 높은 적절한 온도를 유지하면서 탄소전환율을 높이고 대표적인 생성가스인 CO 및 H₂의 조성을 증가시키는 것이다. 이러한 조건을 기본으로 Adaro탄을 대상으로 가스화기 운전압력 10kg/cm²에서 실시한 가스화 실험의 운전결과는 [그림 2]에 나타낸 바와 같은데, 이 그림에 의하면 10kg/cm² 조건으로 가스화기 운전시 미분탄은 42kg/h가 공급되었으며 이때 O₂/Coal Ratio는 0.9~1.0의 범위에서 운전되었음을 알 수 있다. 그리고, 가스화 반응에 의하여 생성된 CO와 H₂의 농도는 운전중 on-line 분석기에서 측정된 값을 기준으로 각각 43%와 20% 정도를 나타내었는데, 가스화기에 공급되는 질소의 경우에는 불활성 가스로서 가스화기의 성능에 직접적으로 관여하지 않고 미분탄의 수송이나 계측기기의 막힘을 방지하기 위한 퍼지(Purge) 등의 목적으로 사용되므로 생성가스의 조성을 기준으로 가스화 특성을 평가할 때에는 반응에 관여하지 않는 질소를 제외한 기준(N₂ free basis)으로 평가하였다. 따라서, 측정된 생성가스 조성에서 질소를 제외한 기준으로 계산할 경우 가스화기 운전압력 10kg/cm², 운전온도 1450~1500℃ 조건에서 Adaro탄은 부피비로 CO와 H₂의 농도가 각각 60~65%, 28~32% 범위의 값을 가지는 것으로 평가되었다. 또한, 미분탄의 이송을 위하여 사용되는 질소 가스의 공급량 변화에 따른 생성가스 조성변화를 관찰하기 위하여 질소의 공급 유량을 감소시키면서 실험을 진행하였는데, 질소의 유량을 35Nm³/h에서 22Nm³/h까지 단계적으로 감소시켰을 경우 on-line 분석기로부터 측정되는 CO와 H₂의 조성이 각각 50%와 25% 정도까지 증가됨을 확인할 수 있었다.

[그림 3]은 가스화기의 운전중 생성되는 CH₄, COS, HCN, NH₃ 가스의 농도변화를 나타낸 것으로서 FTIR을 사용하여 분석한 자료인데, CH₄의 경우 가스화기 정상운전중 운전온도가 변화함에 따라 800~1500ppm 정도까지 농도가 변화하였으며, COS와 NH₃ 농도의 경우에는 큰 변화없이 각각 40ppm과 10ppm 정도를 나타내었다. 그리고, HCN 가스의 경우에는 CH₄의 농도변화와 유사한 거동을 보이면서 70~100ppm 범위에서 측정되었다.



[그림 2] Adaro탄을 사용한 가스화기의 운전결과 (운전압력:10kg/cm²)



[그림 3] 생성가스중 CH₄, COS, HCN, NH₃ 농도변화

3-3. 비산재 및 슬래크 특성

가스화 반응에서 대부분의 회분은 용융되어 슬래크 형태로 배출되지만 일부 미반응 입자들은 생성가스와 함께 가스화기를 빠져나가면서 비산재로 배출되는데, Adaro탄에 대한 비산재 특성을 알아보기 위하여 가스화기 시스템의 공정경로에 따라 부위별로 비산재를 채취하여 분석을 실시하였으며 그 결과는 <표 1>과 같다. 이 표에 의하면 사이클론 이후의 공정에서 채취한 비산재의 경우 미연탄소분 함량이 70~75% 정도로 상당히 높은 값을 나타내는데 그 이유는 일부 매우 작은 크기의 미분탄 입자들이 공압수송에 의하여 가스화기로 공급되면서 순간적으로 휘발분만 반응하고 가스화기를 빠져나오므로써 충분한 체류시간을 갖지 못했기 때문으로 판단된다. 그러나, 가스화기를 빠져나오는 이들의 양은 전체 미분탄 사용량에 비하여 매우 적은 양이다. 그리고, 슬래크의 발생량이 미분탄내 회분의 함량을 기준으로 계산한 4.33kg보다 적게 발생된 이유는 Adaro탄을 대상으로 실시한 실험에서 신규로 내화재를 타공하여 사용함으로써 상당량의 용융슬래크이 가스화기 내부 내화재 벽면에 코팅되었기 때문일 것으로 판단된다. 또한, 이 표에 나타낸 미분탄 공급량과 비산재 및 슬래크 발생량을 기준으로 탄소전환율을 계산해보면 약 97~99% 정도임을 알 수 있었다.

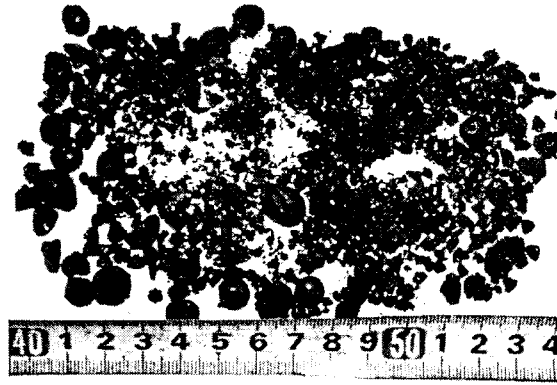
<표 1> Sampling 위치에 따른 비산재 분석결과

Sampling 위치	미분탄	슬래크	Cyclone I	Cyclone II	Scrubber	Flame Arrestor	
Proximate Analysis ¹⁾ [wt %]	M	2.63	-	39.1	64.13	83.68	68.12
	V.M	45.73	-	7.51	2.37	1.84	2.36
	Ash	1.29	-	16.75	7.73	3.48	7.07
	F.C	50.35	-	36.64	25.77	11.00	22.47
Ultimate Analysis ²⁾ [wt %]	C	68.89	2.19	71.90	76.33	75.78	75.39
	H	4.94	0.18	0.40	0.74	0.39	0.43
	N	1.67	0.29	0.80	0.62	0.65	0.86
	S	0.06	0.01	0.20	0.21	0.22	0.30
	O	23.12	-	-	0.55	1.64	0.87
	Ash	1.32	-	27.5	21.55	21.33	22.16
공급 및 발생량 [kg] ³⁾	336	0.05	0.5	0.4	2.99	-	

1) As-received 2), 3) Moisture free basis

가스화기에서 미분탄내 회분의 용융에 의하여 발생하는 슬래크의 경우에 그 형태는 냉각방식에 의하여 결정되는데, 일반적으로 냉각수에 의한 급냉방식의 경우에는 고온의 용융슬래크이 냉각수와 접촉하면서 열충격에 의하여 대부분 작은 입자들로 조각난 형태를 가지는 반면 대기중에서 서서히 냉각되는 경우에는 구형이나 타원형 등의 형태를 가지면서 강한 강도를 지니게 된다. 본 연구에서 적용된 3톤/일급 분류층 가스화기의 경우 고온의 용융슬래크이 슬래크 탭 하단에 설치된 슬래크 쉘터내의 냉각수에 의하여 급냉되는 방식이므로 실험후 배출된 고형화 슬래크은 [그림 4]에 나타낸 바와같이 대부분 조각난 형태로 발생되었다. 그리고, 이러한 슬래크 입자들에 대하여 실시한 SEM 및 XRD 분석결과에 의하면 회분내에서 형성되었던 결정형 구조가 가스화기 내부에서의 고온/고압 반응에 의하여 무정형 구조로 변화되었으며,

중금속 용출실험 결과에 의하면 슬래크에는 중금속이 상당히 많이 농축되어 있으나 용출수에서 거의 검출되지 않음으로써 가스화 반응에 의하여 발생하는 부산물인 슬래크이 환경적으로 무해함을 확인할 수 있었다.



[그림 4] 가스화 반응에 의한 Adaro탄의 슬래크 형태

4. 결 론

본 연구에서는 인도네시아 Adaro탄을 대상으로 1450~1500℃, 10kg/cm²의 운전조건에서 3톤/일급 분류층 석탄가스화기를 이용한 대상탄의 가스화 특성을 조사하였으며, 그 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다. Adaro탄의 경우 휘발분의 함량이 비교적 많고, 미분탄내 회분의 함량이 적으며 용융온도가 1340℃ 정도로서 O₂/Coal Ratio 0.9~1.0의 조건에서 가스화기 운전시 생성가스중 CO 및 H₂의 조성이 각각 60~65%, 28~32% 범위(N₂ free basis)의 값을 나타내므로 분류층 건식 가스화기에 적합한 탄종이라 할 수 있다. 그리고, 가스화 반응에 의하여 미분탄내 회분이 용융되면서 발생하는 슬래크의 경우 고온/고압 반응에 의하여 무정형으로 결합형태가 변화되었으며, 중금속 용출 실험결과 상당히 많은 중금속들이 농축되어 있음에도 불구하고 용출수에서 중금속이 거의 검출되지 않음으로써 아스팔트 보강재 등으로의 재활용시 2차적인 환경오염이 없을 것으로 판단된다.

감 사

본 연구는 산업자원부 산하 에너지관리공단 기술개발본부에서 지원한 “가스화 복합발전 시스템연계 실증 및 모사기술 개발” 연구의 일환으로 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 산업자원부, “석탄가스화 복합발전 기반기술 개발(Ⅱ)”, (2000)
- [2] 유영돈, 정석우, 김원배, 유희중, 윤용승, “석탄가스화를 위한 수입 석탄의 적합성에 관한 실험적 연구”, 한국에너지공학회 춘계학술대회, p.15-18, (2000)
- [3] 산업자원부, “Bench Scale급 건식 석탄가스화기 운전 및 모사기술 개발(Ⅱ)”, (1999)