

건식 가스화기 시료의 선정인자 및 변화에 따른 가스화 특성과 주요 운전상 문제점

윤용승 · 정석우 · 김원배

고등기술연구원 플랜트 엔지니어링 센터

Gasification Performance in the Dry-Feeding Gasifier with Variation of Feed Ingredients and Main Operational Problems

Yongseung Yun, Seok Woo Chung and Won Bae Kim

Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering

요 약

일일 최대 석탄처리 용량이 3톤인 건식 석탄가스화기를 사용하여 가스화에 미치는 주요 변수들중 산화제내 산소농도와 증기 주입량을 변경시켜 가스화성능을 조사하였고, IGCC용 대상석탄을 선정하는 입장에서의 주요 인자 및 고온고압 조건에서의 가스화기 운전상 특성과 문제점을 파악하여 운전상 문제에 대한 대책을 제시하였다. 사용한 석탄은 유연탄인 중국 대동탄과 아역청탄인 미국 알라스카의 유시벨리탄이었는데, 두 탄종 모두 건식 가스화기의 운전상에는 문제가 없었다. 가스화를 위한 산소의 농도는 90% 까지 그리고 석탄시료 무게 대비 증기량 10~12%까지는 가스화의 온도 유지와 가스조성 측면에서 무리 없이 적용할 수 있다고 판단되었다. 이들 가스화 시험을 통하여 생성된 슬래크는 가스화기 슬래크 탱크의 조업 온도와 대상석탄 회재의 용융특성에 따라 침상 또는 알갱이 형태로 배출되었으며, 슬래크로부터 중금속 성분이 유출되는지를 분석해 본 결과 침출수에 의한 2차오염은 없는 것으로 확인하였다. IGCC용 석탄을 선정하는 석탄특성에서는 미분탄의 수분함량, 회재함량, 회재용융온도, 발열량 측면에서 검토하였는데, 건식가스화기의 경우 미분탄의 표면수분의 제거가 중요하고 회재의 함량과 회재의 용융온도를 같이 고려하여 적절한 시료 석탄이 선정되어야 한다는 결론을 얻었다. 가스화기 운전측면에서는 여러 기계적인 문제점들이 발견되었는데 시료공급노즐의 막힘문제, 역화문제, 고온가스 누출문제, 추운 겨울 운전시 오링(O-ring)문제 등에 대한 논의와 대책을 제시하였다.

Abstract — Through the operation of a 3 ton/day-class dry-feeding coal gasifier, several important aspects of the gasifier for IGCC applications were studied. Effects of operational variables such as oxygen content in the oxidant gas and the amount of steam addition upon the gasifier performance were analyzed along with the study regarding the guideline that would be suitable for selecting major ingredients in IGCC candidate coals. Tested two coals that were Chinese Datong coal in bituminous rank and the Alaskan Usibelli coal in subbituminous rank exhibited reasonable gasifier performance. Adjusting the gasification conditions down to 90% in oxygen purity of the oxidant as well as adding up to 10~12% steam/coal ratio have not caused any significant impact on the maintenance of the gasifier temperature and the product gas composition. With differences in operating temperature at the slag tap area and the slag melting characteristics of the coal, needle-like or bead-like slags were produced without generating any secondary pollution via leaching. Among the criteria for selecting the suitable IGCC candidate coals, four major values like moisture content of the powdered coal, ash content, slag melting temperature, heating value were discussed and concluded that surface moisture of the coal was more important than the total moisture for smooth coal feeding and that ash content must be considered along with the slag melting temperature. Important operational problems that were encountered during the tests were discussed and remedies for the problems were presented. Among the noticeable problem areas were plugging in the feeding lines, flash-back through the nozzle, the leakage of

hot explosive coal gas, and the o-ring leakage during the cold winter weather.

1. 서 론

차세대 석탄 화력 발전의 가장 현실성 있는 기술의 하나로 대두되고 있는 석탄가스화 복합발전기술(IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle)은 기존 석탄화력발전소에서의 발전효율인 36~38% 보다 적어도 2~6% 우수한 효율을 보이고 있고, 21세기 석탄 이용시 적용될 환경규제치를 가장 현실적으로 만족시킬 수 있는 차세대 석탄화력발전 시스템으로 평가받고 있다. 이 IGCC 기술은 신석탄 발전기술(CCT : Clean Coal Technology) 중 가압유동층 연소기술과 함께 가장 유력한 차세대 석탄발전 기술로서, 선진외국에서는 실용화단계에 근접하고 있다. 이중 IGCC 기술은 500 MW급 이상으로 대용량화가 가능하며 탈황측면에서는 기존의 정유공장에서 사용하고 있는 저온정제기술을 그대로 적용할 수 있다는 면에서 가압유동층 연소기술에 비해 더 빨리 상용화가 될 것으로 일반적으로 판단되고 있다. 현재 미국과 네델란드, 스페인에서 300 MW급의 IGCC 실증(demonstration) 발전소가 운영중이거나 건설중인데, 아직까지는 IGCC 기술을 석탄에 적용하여 85% 이상의 공정신뢰도를 갖게 발전소를 운영하지는 못하고 있는 실정이다. 따라서, 국내에 IGCC 기술을 사용한 CCT 발전소를 건설한다고 하면 최소한 국내에서 IGCC 발전소에 적용하려고 하는 시료 석탄에 대한 기초 운전자료는 꼭 필요한 전제조건이 될 것이다.

IGCC 기술의 장점으로는 환경적으로 LNG와 근접하게 석탄을 깨끗하게 발전원료로 사용할 수 있으면서 복합발전의 최신기술을 모두 접목시킴에 따라 플랜트효율이 기존 발전소보다 높고, 향후 플랜트효율이 50% 이상까지도 가능하도록 점진적인 기술향상이 가능하다는 점들을 들 수 있다. 신규발전소의 운전기간을 30년 이상으로 본다면, 점차 강화되는 21세기초의 환경규제치를 고려하여 석탄을 환경적합적으로 깨끗하게 사용할 수 있는 IGCC 기술은 국내에서 반드시 사용될 차세대 발전 기술로 보인다. 국내에서 앞으로 30~50년 내에는 발전 연료의 최소한 30%는 석탄이 담당해야만 할 상황이고, 그 이후도 획기적인 에너지전환방법이 개발되지 않는 한 IGCC 기술이 가장 적절한 석탄이용 환경적합적 발전기술임이 분명하다. 또한, 향후 IGCC 기술이 연료전지에 연계된 고효율의 발전방식으로 향상될 것이므로 향후 석탄발전의 신기술 추이는 IGCC쪽이라 판단된다. 따라서, 소규모이거나 국내 IGCC 발전소에 대비하여 국내 인력에 의한 고온고압 석탄가스화를 통한 실질적 결과를 얻

는다는 것은 큰 의미가 있다 하겠다.

IGCC 기술은 지난 30년대부터 지속되어온 연소반응에 근거한 발전방식과는 판이하게 달라, 많은 부분들이 화공공정에 가까운 특성을 지니고 있고 외관상의 발전소 모양도 기존 발전소보다는 오히려 정유공장과 더 유사하다. 지난 수십년간 기술이 정립된 미분탄연소 발전방식이 있음에도 불구하고 이러한 IGCC 석탄발전기술이 고려되기 시작한 것은 지난 70년대 두 번에 걸친 석유파동과 80년대에 들면서 인식이 바뀌기 시작한 환경문제가 두 주요 원인이다. 석탄은 전세계적으로 고르게 분포되어 있으므로 가격 폭등의 염려가 원유에 비해 상대적으로 적은 점과, 연소방식에 의한 발전에서는 석탄내 함유된 S와 N 성분이 모두 SO_x, NO_x 형태로 발생되어 환경오염을 야기하는데 반해 불완전연소에 근거한 가스화는 석탄내 S와 N 성분을 H₂S와 NH₃ 형태로 발생시킴으로서 가스의 정제가 대단히 용이케 되는 장점이 IGCC 기술을 개발토록 한 주요 이유들이다. H₂S가스의 정제는 이미 원유의 정제시에 50년 이상 사용되고 있는 기술로서, 저온정제기술을 결합한 현재의 IGCC 발전소 외관형태가 정유공장과 유사해 보이는 다른 한 요인이다. 최근의 추세는 H₂S의 정제를 고온에서 진행시킴으로서 열손실을 적게 하고자 하는 것이나, 아직 기술이 개발되고 있어 상용화에의 적용은 최소한 5년 이상이 소요되리라 예측된다. 또한, 국내의 NO_x 규제치도 2003년부터 80 ppm으로 강화되는 방향으로 추진되고 있고 미국의 경우도 2003년부터 미시시피 동부의 22개주에서는 석탄화력발전소의 배출 NO_x량을 2001년 기준의 85%까지를 줄여야 하는 현실이어서^[1] 석탄을 저공해방식으로 발전에 사용하는 일은 이제 당장의 문제로 부각되고 있다.

그리고, IGCC에 적용되는 가스화 기술은 반응시간이 3~6초에 불과하면서 고온고압의 극한조건에서 반응이 일어나게 되어, 발전소에 필수적인 장시간의 안정적 운전을 위한 가스화기 유지보수, 제어, 운전 등의 측면에서 국내 사용자 입장에서도 아직 습득해야만 하는 분야가 많다고 하겠다. 특히 전식의 고압 가스화에 의해 발생하는 석탄가스는 15~30 기압에서 CO가 50~60%, 수소가 20~35%에 달하고 반응시간이 워낙 빠르기 때문에, 순간적인 기기의 오작동이나 운전미숙은 대형 폭발로 끝 이어질 수 있는 잠재적 위험성을 내포하고 있으므로 안전한 연속 운전기술은 상용급 IGCC 발전소를 운전하기에 필수적으로 습득되어야 하는 항목이다.

따라서, 본 연구에서는 유연탄 1종과 아역청탄 1종의

석탄시료에 대하여 고온고압 가스화시험을 수행하여 가스화 운전변수의 영향과 발생된 슬래크에 대하여 조사하였고, IGCC용 대상석탄을 선정하는 입장에서의 석탄특성에 대한 판단자료 제시와 고온고압 가스화기의 운전상에서의 문제점을 파악하고 이에 대한 대책을 제시하였다.

2. 가스화설비 및 실험

1995년 4월에 건조된 3톤/일급의 건식 석탄가스화기 설비는 경기도 수원소재 아주대학교 구내에 설치되어 있으며, 95년 7월부터 가스화결과를 얻고 있다. 이 설비는 30기압, 1650°C까지 가스화가 가능하고 유연탄, 아역청탄을 주 대상시료로 설계하였고 petroleum coke 등도 가스화가 가능하다. 석탄시료는 미분탄연소 발전소에서 사용하는 입자크기와 동일한 -200 mesh 80~90% 통과 크기를 질소로 dense-phase 상태에서 분체 유송하여 가스화기로 주입하고, 미립 석탄은 가스화기내로 공급되기 바로 전에 99.5% 농도의 산소와 합해져 주입된다. 본 실험에서 산소의 농도는 이 산소의 일부를 질소로 대체하여 변경시켰다. 수증기는 시료주입 노즐끝에서 별도로 공급되도록 하였다.

가스화설비의 구성은 Fig. 1에 보여진 바와 같다. 본 설비는 8 m×17 m×20 m의 크기로서, 제어실과 고압가스

공급설비 및 연돌을 포함한 전체설비는 30 m×50 m의 부지에 설치되어 있다. 수 cm 크기인 괴탄 형태의 원탄이 벨트콘베이어를 거치면서 전자석 금속선별기와 금속감지기를 통하여 분쇄기에 금속조각이 들어가 손상이 일어나는 일을 방지되도록 되고 버킷 엘리베이터를 통하여 높은 위치로부터 석탄분쇄기로 원탄이 투입되도록 구성되어 있다. 석탄분쇄기에서 원탄이 분쇄되는 과정에서 350°C의 LPG 연소가스에 의해 미분탄이 수분함량 3~4% 이하로 건조되며 분쇄기 전후의 연소가스 온도는 280°C와 230~240°C로 조절되며 백필터의 화재가능성을 줄이기 위해 백필터 유입가스의 온도는 80°C로 제어된다. 분쇄된 미분탄은 질소가스로 충전된 호퍼에 저장되었다가 20 m 높이의 분배호퍼로 분체유송되고 무게 계량호퍼를 거쳐 록호퍼로 공급된 후 가스화기로 질소가스를 사용한 분체수송으로 가스화기내로 주입된다. 시료주입 노즐은 2중관 형태로서 내부관을 통하여 질소가스가 미분탄을 운송하고 가스화기 주입 바로 전에 150~180°C로 예열된 산소와 혼합되도록 시료들의 혼합영역이 있으며, 증기는 미분탄 운송관과 별도로 노즐에 부착되어 공급되도록 구성되었는데 이는 증기에 의한 미분탄의 영김 현상을 방지하기 위한 사항이다. 그리고, 가스화기내 고온과 접촉하는 노즐의 끝단에는 냉각수 재킷이 있어 노즐이 보호된다.

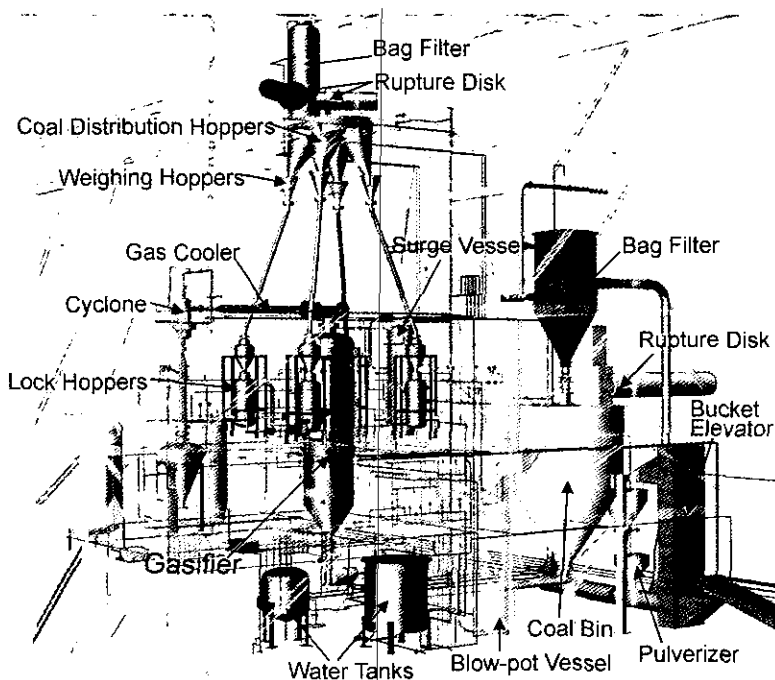


Fig. 1. Three-dimensional view of the 3 ton/day-class pilot-scale gasification facility.

가스화기로 주입된 미분탄과 산소는 급격한 반응을 통해 일산화탄소와 수소를 생성하고 불연분인 회분은 용융되어 가스화기내 벽면을 타고 아래로 흘러 슬래임을 통하여 수조로 떨어져 잘게 부서진 슬래임으로 배출되게 된다. 생성된 석탄가스는 가스화기 상부로 나가 냉각관을 거치면서 최종 200°C 이하로 냉각되고 2단의 사이클론 거친 후 물이 분사되는 탱크에서 세정되게 된다. 세정된 가스의 일부는 실시간 가스조성 분석장치로 보내져 가스조성(CO, H₂, N₂, O₂, H₂S, NH₃, COS, HCl)이 측정되고, 대부분의 가스는 연돌로 보내져 소각된다. 제어실에서 가스화기 운전상태를 알 수 있도록 주요 가스 성분들인 CO, H₂, O₂, H₂S, NH₃는 전용 실시간 분석설비를 사용하였고, 정확한 정량을 위해서는 5~10초 간격으로 조성이 자동 분석되는 이동형 가스크로마토그래피를 사용하였다. 그리고, 부식성의 COS, HCl, HCN 등의 가스조성 측정에는 이동형 FTIR 장치가 설치되어 있다.

본 연구에서 사용한 석탄은 유연탄인 중국 대동탄과

아역청탄인 미국 유시벨리탄이었고, 두 탄의 조성 및 물성치는 Table 1에 나타나 있다. 산소순도와 증기공급량에 따른 영향을 보기 위한 시험에는 알래스카 유시벨리탄을 사용하였고 슬래임형성 및 가스화특성 시험에는 위의 두 탄을 사용하였다. 여기서 석탄내 회분의 분석에는 XRF(X-ray Fluorescence Spectrometer, Phillips PW1480, 기초과학지원연구소)를 사용하였고 950°C에서 정량분석을 위한 bead를 만든 다음 1200°C에서 정량분석을 수행하였다. 표에서의 LOI는 950°C에서 bead를 만들 때 초기시료에 비해 휘발된 SO₃ 등 성분의 무게감량이고 석탄내 CaCO₃ 등이 고온에서 분해하면서 무게감량이 추가로 있으므로 표에서와 같이 성분의 합이 100%가 안되게 된다. 슬래임과 슬래임의 용출수내에 포함된 중금속의 함량은 ICP/AES(기초과학지원연구소)를 사용하였고, 용출수 제조는 국내 폐기물법에 고시된 폐기물 시험방법의 제2장 제5항 용출시험방법^[2]을 따랐다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 가스화 운전변수의 영향

가스화반응에 가장 중요한 인자로는 산화제의 양으로 판별되었는데, 산화제인 산소량이 변할 때에 가스화기 온도와 생성가스 조성이 가장 민감하게 반응함을 알 수 있었다. 그 다음으로 중요한 인자로는 가스화 압력인데, 압력이 증가할수록 단위석탄량당 소요 산소량은 소량씩 적어짐을 알 수 있었으며, 일반적으로 석탄질량 대비 0.6~0.9 근처의 산소량에서 최적의 가스화반응 상태를 보여 주었다^[3].

2중관(예혼합관과 동심관)으로 제작된 석탄주입 노즐을 통하여 가스화기로 공급되는 반응물은 미분탄(예혼합관으로 공급), 산소(동심관으로 공급), 수송용 질소(예혼합관으로 공급) 그리고 증기(별도의 증기 공급관으로 공급)이다. 산화제의 농도가 가스화의 특성에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하기 위하여 동심관으로 공급되는 산소에 질소를 첨가 혼합시킴으로써 산화제농도를 변경시켜 시험하였고 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 동심관으로 공급되는 산소량은 25.6 Nm³/h로 일정하게 공급하면서 질소를 0.0~9.5 Nm³/h 변화시켜 동심관으로 공급되는 산소의 농도를 100%에서 73%까지 변경시켰다. 이때 동심관을 통과하는 산소와 질소의 전체유량은 일정하게 유지하였고 가스화기의 압력은 17~18 bar 조건이었다. 현재 상용급 석탄가스화기는 95% 정도 순도의 산소를 사용하고 있고, 스페인에 건설되어 시운전중인 300 MWe급 Puertollano 건식 분류층 가스화실비는 85% 순도의 산소를 사용하고 있기도 하다^[4]. 일본의 경우에 자체기술을 개발하는 프로젝트에서는 상용급까지 산소

Table 1. Properties of tested coals.

Analysis item	Coal Alaska Usibelli	Datong	
Proximate analysis (as-received, wt %)			
Moisture	9.14	4.60	
Volatile matter	44.11	32.64	
Fixed carbon	36.88	55.04	
Ash	9.87	7.72	
Ultimate analysis (maf, wt %)			
C	61.03	72.98	
H	5.10	4.69	
N	0.72	0.72	
S	0.18	0.65	
O (by-difference)	32.97	20.96	
Inorganic analysis (wt %)			
Al ₂ O ₃	18.93	17.60	
SiO ₂	42.73	50.89	
Fe ₂ O ₃	6.00	12.16	
TiO ₂	0.74	0.72	
CaO	21.01	7.87	
MgO	3.13	1.14	
K ₂ O	1.27	1.29	
Na ₂ O	0.93	0.59	
P ₂ O ₅	0.33	0.21	
L.O.I.	1.08	0.36	
Gross heating value (moisture-free, kcal/kg)	5303.8	6607.5	
	I.T	1162	1241
Ash fusion temp. (Reducing, °C)	S.T	1184	1259
	H.T	1224	1285
	FT	1257	1343

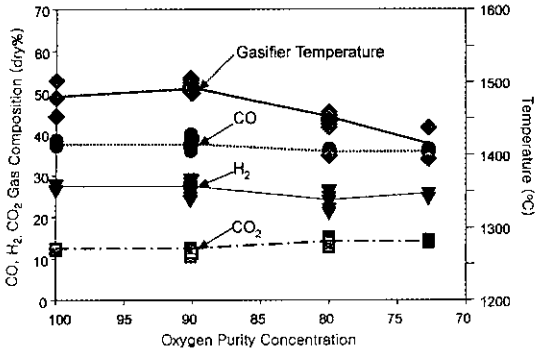


Fig. 2. Variation of product gas composition and temperature with oxygen content in the oxidant gas for the Usibelli coal.

대신 저렴한 공기를 사용하는 방식도 순수산소를 사용하는 공정과 더불어 개발하고 있고, 해외기술을 도입하여 건조하는 프로젝트와 연료전지와 연계하는 EAGLE (coal Energy Application for Gas, Liquid, and Electricity) 프로젝트⁶⁾의 경우에는 95% 순도의 산소를 기준으로 하고 있다. 그러나, 공기를 사용하는 경우에는 산화제의 가격은 저렴한 대신 불필요한 질소가 추가되어 많은 가스 질량을 가스정제 단계의 후단공정에서 처리하여야 하고 석탄내 회분을 용융시킬 때의 어려움과 많은 미연탄소가 날라가게 되어 탄소전환율을 높이기 위해서는 재순환시스템을 추가하여야 하는 문제점 등이 있다.

Fig. 2의 결과를 보면, 총공급 산소량 중 질소로 10%를 치환한 90% 순도의 산소농도까지는 생성가스의 조성은 CO 38~40%, H₂는 27~30% 정도를 유지하고 가스화기 온도도 1500°C 정도를 유지하지만 산소순도가 80% 정도에서는 CO가 37~38%, H₂는 23~28% 정도로 생성가스의 조성이 감소하기 시작하고 가스화기 온도도 1450°C 정도로 저하함을 알 수 있다. 산소순도가 73%까지 낮아진 경우에는 CO가 35%, H₂는 23% 정도로 감소하고 가스화기 온도는 1430°C 정도로 떨어짐을 알 수 있다. 이 결과로부터 100% 가까운 고순도 산소를 산화제로 사용하는 경우에 비해 10% 정도까지의 질소를 포함한 산소를 사용하여도 가스화 특성에는 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 즉, 산소순도를 공기와 순수산소를 혼합하여 80%까지 낮추어 사용하는 것은 가스화기 온도 유지 등의 측면에서 무리가 있으나 산소공급량의 13%까지 공기로 치환하여 산소농도가 90% 정도 되는 조건까지는 가스화기 운전특성에 큰 차이점이 없음을 알 수 있다. 물론, 반응에 미참여하는 질소량의 증가에 따른 가스화기 후단공정의 처리용량의 증가는 피할 수 없게 된다. 따라서, 가스화반응에 산소순도가 90%인 산화제를

공급하여도 가스조성과 가스화기 온도 측면에서 판단한 가스화기 성능에는 무리가 없으나, 산소농도를 20%까지 감소시키는 경우에는 가스화기 온도와 가스조성에 대한 영향이 너무 크므로 가스화기의 조업상 무리로 보인다. 또한, 스페인의 석탄과 petroleum coke를 1:1로 섞은 시료를 사용한 플랜트의 경우에 85% 순도의 산소를 사용하였고 '98년 3월부터의 시운전결과 전체 IGCC 공정 운전중단의 사유 중에서 가스화부분에 의한 경우가 58%로 높게 나타났는데⁷⁾ 이것이 가스화용 산화제의 산소농도와 얼마나 관련이 있는지는 밝혀진 바가 아직은 없다.

가스화기에 공급되는 증기의 영향을 파악하기 위하여 증기/미분탄의 무게비를 5.8%, 11%, 14%로 변경시키면서 실험을 실시하였는데 그 결과는 Fig. 3과 같다. 일반적으로 건식 분류층 가스화기에서는 석탄 무게비로 0~15%의 증기를 가스화반응에 사용⁸⁾하고 있으므로 이 범위에 준하여 증기 공급비를 선정하였다. 증기를 공급하지 않을 경우에는 CO가 36~40%, H₂는 20~27% 정도로 발생하지만, 증기가 11% 첨가될 때는 증기 공급이 없는 경우에 비해 CO 농도가 2% 정도 낮아지는 경향을 보이고 H₂는 7~8% 정도 증가하는 결과를 보여주고 있다. 이는 스팀가스화반응에 의해 나타나는 결과로 예측된다. 증기 공급비가 14%까지 증가할 때는 CO가 37% 정도이고 H₂는 33% 정도로 변화하여 증기공급이 없는 경우에 비해 CO는 별로 변화가 없고 H₂는 증가되는 경향을 얻었다. 따라서, 증기공급량이 증가함에 따라 CO의 변화는 약간 감소하는 경향을 보이고 H₂는 CO의 감소폭에 비해 더 큰 폭으로 증가하는 결과를 보여주고 있다. 그리고, 증기공급량 11% 이상의 조건에서는 CO와 H₂의 증감폭이 변화가 없음을 알 수 있어서, 석탄가스내 수소의 함량을 증가시키는 목적으로는 증기의 공급량이 석탄무게 대비 10~12% 정도이면 충분하다고 보이며 그 이상의 증기공급은 가스화기 온도의 조절 등의 목적 외에

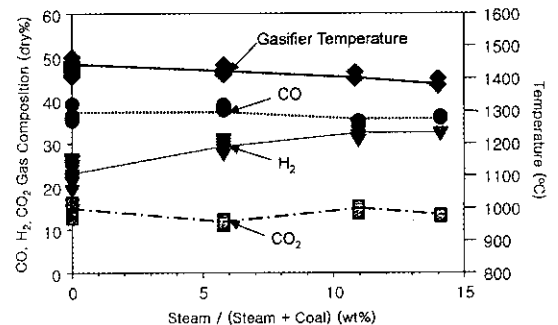


Fig. 3. Variation of product gas composition and temperature with steam addition for the Usibelli coal.

는 반응에 큰 역할이 없는 것으로 판단된다.

가스화기에서 일반적으로 증기는 가스화기 온도를 낮추는 제어제로 사용되는데, Fig. 3에서 보는 실제 실험 결과는 증기공급량이 증가함에 따라 가스화기의 온도는 점차 감소하는 경향을 보여주고 있으나 석탄가스내 수소의 농도를 높이기 위한 일반적 증기 공급범위 내에서는 가스화기 운전에 큰 영향을 줄 정도의 역할은 없는 것으로 파악된다. 즉, 증기를 14% 무게비까지 공급하여도 가스화기 온도는 30~40°C 감소하는데 그쳐 온도에 결정적인 영향을 미치지 않는 것으로 파악되었다. 만약 증기에 의해 가스화온도가 급격히 떨어지는 민감한 반응을 보인다면, 일정온도(일반적으로 석탄의 경우는 1350~1400°C) 이하에서는 용융슬래이 유동을 못하고 정체되어 굳는 현상이 발생할 수 있으므로 가스화기의 운전 측면에서는 슬래임이 쉽게 막히는 등의 어려운 상황이 될 수 있다. 증기가 석탄무게비로 10% 이상 공급되면 가스화기 온도가 어느 정도는 저하되나, 정상상태에서는 산소/석탄 무게비 0.05 이내로 산소량을 늘려주면 가스화기의 온도를 증기 공급전과 같게 유지시킬 수가 있었다. 가스화기 내부의 온도는 가스화반응 영역에 있는 내화재가 보유한 열함량(heat content)과 공급되는 산소에 의한 반응열에 의해 유지되므로, 증기가 공급되어 반응온도가 일부 수습도 낮아지더라도 1350~1400°C 이상의 가스화에 필요한 반응온도를 유지하는 데에는 소량의 추가 산소공급만으로 충분하였다.

Fig. 4는 알래스카 유시벨리탄을 사용하여 산화제 내의 산소농도를 변경시켰을 때, 실시간 가스분석기로 분석한 메탄의 농도와 가스화기내 온도를 나타낸 것이다. Fig. 4의 결과도 17~18 bar의 압력조건에서 얻은 것이고, 산소공급량을 정상상태보다 과다하게 변경시킴으로써 가스화기의 온도 변화를 크게 조절하여 가스화기 온도에 따른 메탄 발생농도의 변화 폭을 볼 수 있도록 시험을 진행하였다. 따라서, Fig. 4의 온도 결과는 실제 정상상태의 가스화기 온도 유지곡선을 의미하지 않는다. 이 결과를 보면 가스화기내 온도가 1450°C 이하로 저하되면 급격히 메탄농도가 증가함을 볼 수 있다. 가스분석기까지 생성가스의 도달시간을 고려하여 살펴보면, 가스화기 내부온도와 메탄농도는 반비례관계로서 열전대 없이도 메탄농도를 통해서 가스화기 내부의 온도를 일정범위에서 산정하는 것이 가능함을 보여주고 있다. 실제 상용급 가스화기에서도 가스화기 내부온도를 추정하는 데에 실시간 메탄농도 자료를 사용하고 있는데, 한 상용급 습식 석탄가스화기의 경우에는 250 ppm 이하의 메탄농도를 기준으로 가스화기를 운전하고 있다. 그러나, 탄종별로 가스화반응에 따른 메탄 발생농도가 다르므로 실제의 고온고압조건에서 실험에 의해 가스화기 내부온도와

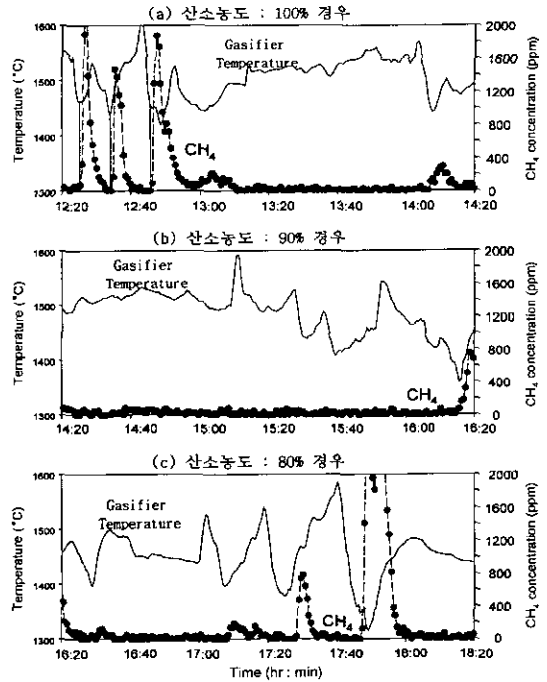


Fig. 4. Changes of methane concentration with gasifier temperature at various oxygen purity of oxidant for the Usibelli coal.

메탄농도간의 자료를 얻을 수밖에 없는데, 이 경우 본 연구에서 사용한 상용급에 비해 소규모인 설비의 실험 결과가 중요하게 사용될 수 있다.

3-2. 생성 슬래임의 분석

Fig. 5와 6에서는 미국 알래스카 유시벨리탄과 중국 대동탄으로부터 생성된 알갱이 형태의 슬래임 모습과 슬래임부를 200배 확대한 SEM 사진들을 보여주고 있다. 이때 가스화기의 압력은 24~29 bar였고 가스화기의 변경 온도범위는 1300~1690°C로 넓게 변경시켰다. 가스화기의 운전압력, 운전온도 및 슬래임 배출온도에 따라 생성되는 슬래임의 형태는 구형, 침상, 또는 깨진 모양 등으로 다양하게 발생되고, 또한 석탄내의 회분성분들이 녹아 용융상태로 가스화기의 벽면을 따라 흘러서 가스화기 하단의 슬래임통을 통해 슬래임가스로 떨어질 때에 냉각수와 접촉하는 방식에 따라라도 생성되는 슬래임의 모양과 크기가 다양하게 나타나게 된다. 가스화 반응후 녹아 떨어지는 슬래임이 서서히 냉각될 경우에는 알갱이 형태를 유지하면서 단단한 슬래임이 형성되는 반면에, 가스화기로부터 슬래임이 고온에서 빠르게 흘러내려 냉각수와 직접 부딪치면서 급격히 냉각된 슬래임은 냉각수와 접촉하는 과정에서 알갱이 형태가 열충격으로 깨져 모서리가 날카

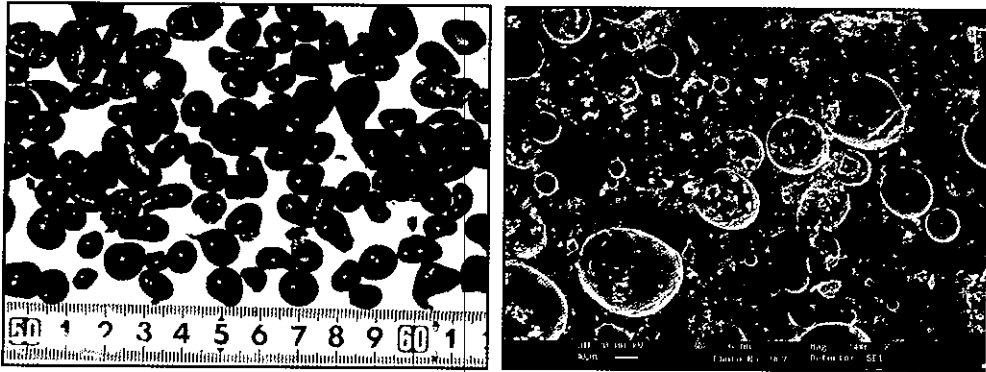


Fig. 5. Slags of bead shape obtained from American Usibelli coal and SEM picture (x200) of inner slag structure (Gasification: 24-28 bar, 1300-1540°C) (unit : cm).

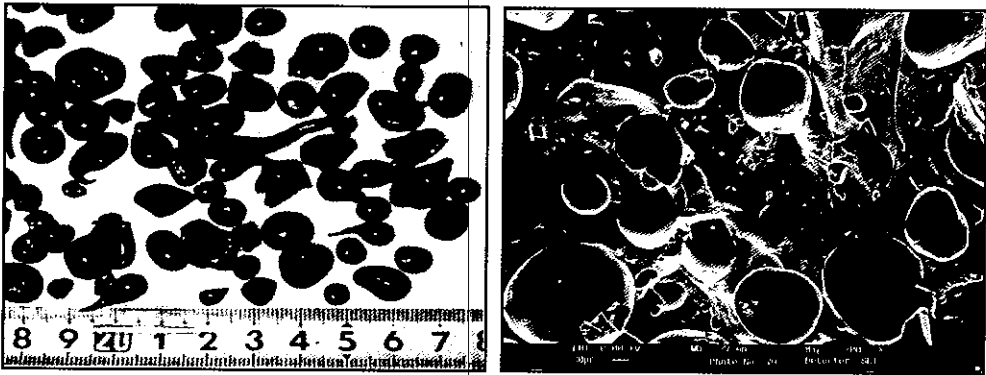


Fig. 6. Slags of bead shape obtained from Chinese Datong coal and SEM picture (x200) of inner slag structure (Gasification: 24-29 bar, 1450-1690°C) (unit : cm).

로운 작은 조각으로 배출되게 된다. 슬래키 깨진 형태로 배출된 슬래키의 형태는 Fig. 7에 나타나 있는데 수 mm 크기로 잘게 부서진 모습을 보여주고 있다. 또한, 고온에서 회재가 용융되는 경우에는 바늘형태의 침상으로도

슬래키 배출되기도 한다. 용융된 슬래키 슬래탭을 통해 하부의 냉각조로 떨어질 때 슬래탭 하단에 부착된 상태로 일정시간 정체되면 Fig. 5-6과 같은 알갱이 형태로 상당부분 표면이 굳은 상태로 냉각수로 떨어지게 되고,

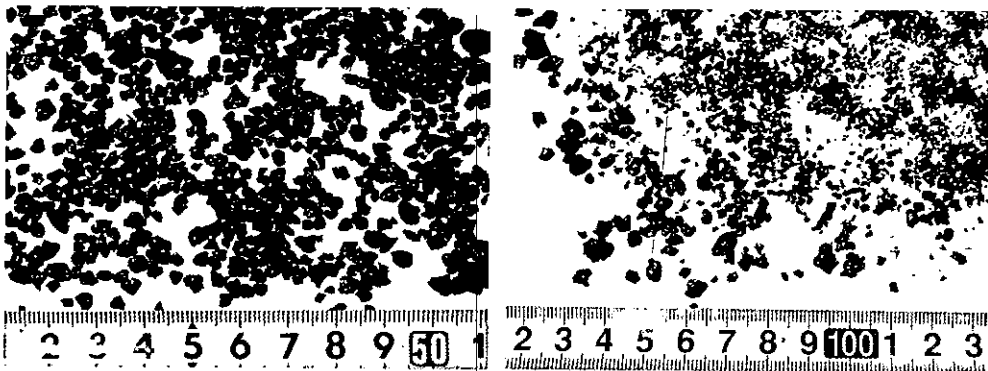


Fig. 7. Slags of cracked shape obtained from Usibelli coal (Left : 17-18 bar, 1400-1570°C) and Datong coal (Right : 17-19.5 bar, 1400-1620°C) (unit : cm).

가스화기 내부 및 슬래킷의 온도가 충분히 높은 경우에는 용융된 슬래킷이 녹은 상태로 곧바로 냉각수로 떨어져 깨지게 되므로 Fig. 7과 같은 잘게 부서진 형태를 띄게 된다. Fig. 5~6에 보여진 알갱이 형태의 슬래킷도 아주 오랜시간 서서히 냉각시키지 않는 한 약간의 힘만 가하여도 Fig. 7과 같이 부서지게 된다. 슬래킷이 바늘형태의 침상으로 배출되는 경우는 가스화기의 온도가 필요 이상으로 높게 유지된 경우인데 이 경우 산소소모량이 과다하게 된다. 따라서, 슬래킷이 막히는 가스화기 운전상 최악의 경우를 방지하면서 Fig. 5~7과 같은 형태로 알갱이와 부서진 상태의 슬래킷이 혼재되어 배출되는 상태의 운전온도가 적절한 가스화기 운전온도이다. 슬래킷에 슬래킷이 정체되는지의 여부는 슬래킷 상하간에 설치된 차압계를 통하여 측정되고 이 값에 따라 산소량을 제어하여 가스화기 온도를 조절하게 된다. 이 경우 차압계의 값이 증가하는 경향을 보이면 미리 조치를 취하여야 슬래킷이 정체되면서 먼저 정체된 슬래킷 내부에서 굳어 슬래킷이 좁아지는 상황을 예방할 수 있다.

Fig. 5~6에 나타난 슬래킷의 200배 확대 내부구조 사진을 살펴보면 모두 원형의 수포형태를 볼 수 있는데, 이것은 석탄내의 광물질들이 고온에서 녹으면서 이 과정에서 발생한 기체들에 의해 발생된 것이다. 고온에서 잘 형성된 슬래킷은 내부에 이러한 원형의 작은 수포를 포함하게 되므로, 이러한 수포의 존재는 슬래킷이 잘 용융되

Table 2. Ultimate analysis results of slags from Datong and Usibelli coals (wt%).

Coal	Gasification pressure (bar)	C	H	N	S
Datong	10	0.19	n.d.	n.d.	n.d.
	14	0.03	0.03	0.16	n.d.
	16	0.13	0.03	0.32	0.004
	19.5	0.03	0.05	0.11	n.d.
	27.2	0.08	0.05	0.15	n.d.
Usibelli	12	0.29	0.03	0.14	0.001
	16	0.20	0.02	0.12	n.d.
	17	0.19	n.d.	0.36	n.d.
	26.6	0.06	0.03	0.11	n.d.

n.d. : not detected.

었는지를 판별하는 기준으로도 사용된다.

슬래킷의 겉보기 색깔은 석탄회분내의 철성분 등에 의해 검은색을 띄어 겉보기에 미연탄소가 많이 함유되어 있는 것처럼 보이나, 잘 용융된 슬래킷은 잘게 가루로 부서어 보면 밝은 갈색을 띤다. 슬래킷내에 함유된 미연탄소분은 Table 2에서 보는 바와 같이 0.3% 미만으로서 연소에 의한 회재에 포함된 수 %의 미연탄소분에 비해 월등히 적은 양이다. 따라서, 연소회재내 잔존 5% 이상의 미연탄소분에 의한 회재 재활용의 문제점이 가스화 반응에 의한 용융슬래킷의 경우에는 존재하지 않게 된다.

Table 3. Heavy metal concentrations in the raw coals, slags, and the extracted water from slags (Datong coal).

Heavy metal concentration (ppm)	Datong coal					Korea's environmental standard (ppm)
	Raw coal	Gasification at 9~10 bar		Gasification at 17~19.5 bar		
		Slag	용출수	Slag	용출수	용출수
Cu	8.78	11.24	n.d.	n.d.	n.d.	3.0
Zn	13.93	14.89	0.08	n.d.	n.d.	-
Co	4.54	27.04	n.d.	n.d.	n.d.	-
Ni	10.30	76.88	n.d.	96.13	n.d.	-
Mn	101.5	583.4	n.d.	231.85	n.d.	-
Cr	19.99	10970	n.d.	74630	n.d.	1.5
Sr	148.1	692.8	0.03	694.1	n.d.	-
Pb	53.61	534.8	0.08	n.d.	n.d.	3.0
Ba	357.4	1146	0.15	1406	0.06	-
Cd	0.91	4.25	n.d.	n.d.	n.d.	0.3
Se	n.d.	2048.0	n.d.	n.d.	n.d.	-
As	0.91	14.59	n.d.	15.39	n.d.	1.5
Sb	n.d.	182.3	n.d.	n.d.	n.d.	-
Hg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.005
Be	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	-
V	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	-
Zr	36.34	197.5	n.d.	4211	n.d.	-

n.d. : not detected.

Table 4. Heavy metal concentrations in the raw coals, slags, and the extracted water from slags (Alaska Usibelli coal).

Heavy metal concentration (ppm)	Alaska usibelli coal					Korea's environmental standard* (ppm)
	Raw coal	Gasification at 17~18 bar		Gasification at 25 bar		용출수
		Slag	용출수	Slag	용출수	
Cu	8.51	89.58	n.d.	112.6	n.d.	3.0
Zn	12.76	11.45	0.526	435.9	0.10.	-
Co	3.95	<1	n.d.	<1	n.d.	-
Ni	9.72	84.15	n.d.	121.8	n.d.	-
Mn	99.06	805.4	n.d.	951.8	n.d.	-
Cr	8.81	16370	n.d.	15620	0.12	1.5
Sr	155.3	1571	0.01	1479	n.d.	-
Pb	47.71	<1	n.d.	<1	n.d.	3.0
Ba	395.0	4263	n.d.	3596	0.10	-
Cd	0.30	<1	n.d.	<1	n.d.	0.3
Se	n.d.	<5	n.d.	<1	n.d.	-
As	n.d.	<5	n.d.	<1	n.d.	1.5
Sb	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	-
Hg	n.d.	<5	n.d.	<1	n.d.	0.005
Be	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	-
V	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	-
Zr	30.39	1131	n.d.	12120	0.04	-

n.d. : not detected.

생성된 슬래크의 침출수내 중금속 배출농도를 측정해 본 결과가 Table 3~4인데, 이를 보면, 슬래크 자체에는 중금속이 농축되고 슬래크로 부터의 용출수에서는 국내 환경기준에서 규정한 중금속이 측정기기에서 검출이 안될 정도로 농도가 극히 낮거나 측정되었다라든가 환경기준치에 비해 현저히 낮은 수치로 나타나고 있음을 알 수 있

다. 다른 두 유연탄으로부터 발생된 슬래크와 슬래크 용출수의 중금속 함량에 대한 결과^[9]도 본 연구와 유사한 결과를 보여주고 있다. 따라서, 연소반응에 근거한 미분탄 연소발전소에서는 생성된 회재의 중금속 침출문제가 항상 문제가 되는데 반해, IGCC 발전소의 가스화기내 고온에서 용융되어 생성된 슬래크에서는 침출수에 의한 지

Table 5. Coal selection criteria for IGCC gasifier based on the studied coal characteristics.

항 목	본연구 시험범위	결 론
Coal rank	유연탄, 아역정탄 각 1종	· 건식 석탄가스화기에 모두 적용가능
Moisture (as-received)	4.6, 16.3 wt%	· 표면수분 완전건조 필요 · 절대수분량이 아니라 표면수분 제거율이 중요
Ash (as-received)	3.8, 7.7 wt%	· 일정회분 이상이 되면 가스화기 내부가 슬래크 코팅이 되므로 내화재가 보호되나, 장시간 운전측면에서는 회분함량 낮으면 유리. · 7~10% 경우는 내부 슬래크 코팅이 양호 · Ash 용융점과 연계 판단 필요
Ash fusion temperature (Fluid Temp.)	1260, 1340°C	· 용융점이 너무 낮으면 용융 비산슬래크(flyslag)에 의해 가스화기 후단부에서 판로의 막힘현상 가능성 커짐 · 가스화기 반응영역 온도인 1400~1500°C 보다 용융점이 100°C 정도 낮은 석탄이 적절 · 회재 용점강화를 위한 Flux 첨가 없이도 슬래크의 배출 양호
발열량(air-dried)	5300, 6600 kcal/kg	· 건식 가스화기에서는 발열량이 5,000 kcal/kg 근처라도 운전측면에서는 큰 문제 안됨. 경제성분석에 따른 판단 필요함

하수 등의 2차 환경오염이 거의 없게 된다.

3-3. IGCC용 석탄의 선정 인자

IGCC 발전소에 사용하는 석탄의 선정인자에는 여러 측면이 있겠으나, 본 건식 가스화기 실험을 통하여 파악한 기술적 측면에서의 주요인자들을 살펴본 결과를 Table 5에 요약하였다.

우선 석탄 탄종에 대하여 살펴보면, 건식 석탄가스화기에서는 대상으로 사용한 중국 대동탄의 유연탄과 미국 알라스카 유시벨리탄의 아역청탄 모두 가스화에는 성공적으로 적용할 수 있었다. 건식가스화기의 특징중 하나는 모든 탄종의 석탄을 사용할 수 있다는 점이므로 유연탄과 아역청탄인 시료들에 대해서는 예상대로 가스화기 운전상에서 가스화 자체에 대한 문제는 없었다. 이에 반해 습식가스화기는 미분탄과 물을 섞어 사용하기 때문에 물의 증발에 필요한 열량이 충분히 공급되어야 가스화에 필요한 1350~1400°C 이상의 온도를 유지할 수 있으므로 일반적으로 발열량이 높은 유연탄에 한정되어 적용되고 자체 함유 수분이 높은 아역청탄이나 갈탄의 경우에는 사용을 않는다. 또한 국내부연탄과 같은 반응성이 낮은 탄종은 반응 자체에 너무 많은 시간이 요구되므로 반응기의 크기가 커져야 하고 이러한 큰 반응기를 회재가 용융될 정도로 고온으로 유지키 위해서는 너무 많은 석탄과 산소량이 소모되므로 경제성이 낮아지게 되어 분류층 가스화기를 일반적으로 적용치 않는다. 가스화기의 반응온도를 유지키 위해 사용되는 석탄의 열량은 대체로 공급석탄 발열량의 20~25% 정도인데 이같이 큰 반응기가 요구되는 경우에는 30% 이상의 석탄발열량이 단지 반응기의 온도를 유지하는데 쓰이게 되어 그만큼 효율이 떨어지게 된다.

시료탄의 수분함유량의 경우는 건조 후 절대 수분량이 아니라 운송에 직접 영향을 미치는 표면수분의 제거율이 더 중요함을 알 수 있었다. 이는 주로 미분탄의 분체용송시 운송관이 막히는 등의 가능성을 줄이기 위한 점이 주된 이유이나, 가스화효율 측면에서도 부정적인 영향을 미치기도 한다. 본 연구에서는 석탄시료의 표면수분은 전부 제거하고 석탄공극에 포함된 내부수분도 건조시 일부 제거하여 전체수분 함량이 3% 이하로 유지되도록 하였다. 6톤/일급 건식 석탄가스화설비에서 미국 일리노이 5번 석탄에 대한 실험결과를 보면, 시료 미분탄의 수분이 7.4~12.7%인 경우 수분함량 1.4~4.8%인 시료에 비해 전체 열효율이 3.5%까지 낮아지고 CO₂ 발생농도도 2% 가량 높아지는^[10] 가스화에 부정적인 영향을 주었다.

대상석탄의 회분함량 측면에서 살펴보면, 회분이 7%, 10%되는 2개 대상석탄에 대한 실험으로부터 2개 석탄

모두 양호한 슬래크형태와 내화재 coating 형태를 보여주고 있어 대상석탄내 회분의 범위는 슬래크용 건식 가스화기에서 적절함을 입증하였다.

석탄내 회분의 함량과 특성은 IGCC에서 사용하는 분류층 가스화기 형태가 회분을 모두 용융시켜 슬래크로 배출하는 형태이므로 특히 중요한 대상탄 선정인자가 된다. 본 연구를 통하여 파악된 회분의 가스화에 대한 특성 중에서 우선 가스화 성능을 판별해야 하는 실험적인 입장에서는 석탄내 회분이 어느 정도 있는 것이 가스화기 내부의 표면을 슬래크이 도포하여 내화재를 보호하는 측면에서 바람직한 측면이 있는 반면에 회분함량이 10% 이상되는 경우라면 회용융점의 특성에 따라 가스화기 후단까지도 영향이 지대하므로 신중을 기해야 한다. 슬래크의 가스화기 표면보호 측면에서 살펴보면, 가스화 반응이 1400°C 이상에서 적절히 진행되는 과정에서는 용융슬래크이 가스화기 내부의 내화재 벽면을 2~4 mm 정도 도포하게 되는데 이 과정에서 내화재는 자체보호 되는 결과를 낳는다. 회분의 용융점이 1260°C로 낮은 알라스카탄의 경우에는 4 mm 정도 슬래크이 내화재 표면에 도포된 것을 시험 후 확인할 수 있었고, 상대적으로 회분 용융점이 1340°C로 높은 중국 대동탄의 경우에는 2 mm 안팎의 도포가 이루어졌다.

상업용 IGCC 발전소와 같은 장시간 운전이 필요시되는 가스화기에서는 가능한한 회분이 적은 석탄을 사용하는 것도 용융비산슬래크(flyslag)과 슬래크에 포함되어 방출되는 미연탄소를 최소화하는 최선의 방법이 될 것으로 보인다. 본 연구의 운전결과로부터 판단하였을 때, 회분이 적은 탄의 경우는, 슬래크를 통한 가스화기 운전상태의 간접적인 모니터링이 어려워지는 점은 있으나 가스화기 다음공정인 syngas cooler 등 열교환기에서 용융비산슬래크에 의한 플러깅(plugging) 문제가 현저히 적어지는 면에서 큰 장점이 있다. 그러나, 어느 정도의 석탄내 회분은 앞서 밝힌대로 가스화기 내부를 용융슬래크로 도포하여 내화재를 보호해 주는 측면도 있으므로 석탄가격, 회용융온도 등 여러 인자들을 복합적으로 연결하여 대상석탄의 함유회분의 적정량을 판단하여야 할 것이다. 미국과 유럽에서 현재 운영중인 demonstration급 IGCC 발전소들에서 발생하는 운전정지(shutdown)의 주요 원인도 슬래크의 응결과 마모에 많이 기인하므로, 가스화기 후단으로 공급되는 슬래크의 양을 줄이는 문제는 설계기준탄의 선정시부터 면밀히 조사되어야 할 문제로 보인다.

알라스카탄과 같이 회분의 용융점이 너무 낮으면 가스화기 출구를 통하여 가스냉각기로 날아가는 미립의 회분성분이 회재 형태가 아닌 점착성이 있는 용융비산슬래크 형태로 되어 가스화기 후단부의 배관을 막는 현상이

발생할 확률이 크게 높아지게 된다. 본 연구의 초기단계 시험중 알라스카탄의 경우에는 수차례 가스화기 후단부 배관이 막히는 경향을 보였는데, 이는 짧은 시간이라도 가스화기 출구의 가스온도가 회분용융점 이상으로 유지되면 그 확률은 급격히 높아짐을 볼 수 있었다. 따라서, 건식형태의 가스화기에 사용할 대상탄의 회분용융점은 가스화기 반응영역의 온도인 1400~1500°C 보다 100°C 정도 낮은 회분용융점을 가진 석탄을 선정하는 것이 유리하다고 판단된다. 즉, 회분용융점이 1300~1400°C 인 석탄을 대상탄으로 선정하는 것이 타당하다고 보았다. 여기서 100°C 차이를 둔 것은 고체를 시료로 사용하는 반응기에는 항상 국부적 고온영역과 저온영역이 있게 마련이고 이를 근본적으로 해결하기는 어렵기 때문이다. 게다가 만약 불충분하게 용융된 슬래이 덩어리 형태로 엉기게 되면 슬래이배출구를 막아 전체 플랜트를 비상정지시키고 최소 1주일 이상 수리를 하게 되는 일이 발생할 수가 있으므로 회분용융점은 특히 주의가 요구되는 대상탄의 선정 인자이다. 그러나, 각 시료별로 회의용융 특성이 다르므로 여기서 내린 결론을 모든 경우에 확대 적용하는 것은 바람직하지 않고, 다른 대상탄에 대해서는 시험을 통해 입증하여야만 확인될 사항임을 인지할 필요가 있다.

대상석탄의 발열량 측면에서 보면, 건식 가스화기에서는 발열량이 5,000 kcal/kg 정도로 낮은 석탄의 경우라도 회분함량과 회분용융점의 조건이 맞다면 가스화에 사용하는 데는 기술상 문제는 없어 보인다. 그러나, 발열량이 낮은 석탄은 석탄을 전량 수입하여야 하는 국내의 입장에서 굳이 저발열량 석탄을 수입하여 사용하여야 하는지는 경제성 등의 다른 판별기준으로 판단하여야 하리라 본다.

3-4. 가스화기 운전측면의 특성 파악과 대책

운전측면에서는 가스화기의 실험을 통하여 운전시 발생할 수 있는 주요 문제의 특성을 파악하였고 그 문제점들의 원인과 대책에 대하여도 조사하였는데 그 결과를 Table 6에 요약하였다.

고온고압 조건에서 운전되고 건조된 미분탄을 원료로 사용하는 분류층 가스화공정 설비는 단순회기체 및 액체를 원료로 사용하는 공정과 비교하여 현재까지도 조업측면에서 기술적으로 완전히 해결되지 않은 문제점을 갖고 있다. 따라서, 이러한 문제점 해결을 위한 노력이 절실히 요구되며 또한 조업중 운전자의 세심한 주의가 필요하다.

본 가스화공정 설비의 운전경험을 통하여 가장 빈도수가 높은 문제점중의 하나는 버너로 주입되는 미분탄의 막힘 현상이다. 이러한 막힘 현상을 조업중에 운전

화면을 통하여 관측하고 예측할 수 있도록 본 공정에서는 원료공급라인 각각에 오리피스 및 차압 변환기를 설치하여 조업중인 공정을 감시할 수 있도록 하였다. 버너의 끝에서 막힘 현상이 발생되면 미분탄 주입용기와 가스화기 사이에 설치된 차압계의 차압이 급속히 상승하고 미분탄 주입용기로 공급되는 수송용 질소배관에 설치된 오리피스 차압값이 급격히 감소한다. 또한, 버너로 주입되는 산소라인에 설치된 오리피스 차압값이 감소하며 예혼합 질소라인에 설치된 오리피스 차압의 값 또한 급격히 감소하는 결과를 보인다. 이러한 현상이 감지되었을 때 버너를 통하여 흐르는 모든 흐름이 중단된 것을 예측할 수 있으며 이로부터 버너의 출구 끝이 미분탄 혹은 용융슬래 등에 의해서 막혔다고 판단할 수 있다.

이러한 문제점이 발생한 경우에는 현 공정에서는 버너의 배관상에 설치된 고압공기를 순간적으로 분사함으로써 막힘현상을 조업중에 해결한다. 미분탄의 막힘 현상은 여러 가지 원인에 의해서 발생될 수 있지만 특히 버너 끝에서의 미분탄 및 가스의 분사속도가 너무 느리게 조업되어 발생하는 경우와 미분탄 주입용기의 후단 공정 압력변동이 급격히 발생하여 버너로의 역압 발생 등이 원인이 될 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 가스화공정의 설계시 버너에서의 분사속도는 일정치(약 15~20 m/s) 이상 유지하여 조업될 수 있도록 설계되어야 하며, 가스화기의 압력변동에 빠르게 적용할 수 있도록 미분탄 주입용기의 용적은 가능한 한 적게 설계하는 것이 유리하다.

상기한 바와 같은 원료공급의 막힘 현상 이외에, 주입용기내에 저장된 미분탄에 스크류가 회전함에 따라 동공이 발생하여 스크류의 일정한 회전수에서도 주입되는 미분탄의 유량이 심하게 변동되는 외란이 발생할 수 있다. 이러한 외란으로 인하여 스크류의 회전수 및 산소/석탄비가 일정한 정상상태 조업조건하에서 갑자기 가스화기의 온도가 상승하며 생성가스의 조성이 변동되는 현상을 볼 수 있었다. 즉 가스화기 온도 및 생성가스의 조성이 일정한 정상상태 운전중 조작변수의 변동이 없었음에도 불구하고 갑자기 온도가 상승하고 생성가스 조성중 CO₂는 증가하는 반면 CO 및 H₂는 감소하는 경향을 보여 산소/석탄 비를 감소시켜 외란을 극복했던 조업결과를 볼 수 있었다. 이러한 현상을 사전에 예측하고 대처하기 위해서는 운전중 가스화기의 온도 및 생성가스 조성의 변화현상을 주의 깊게 감시하여야 하며 이러한 현상을 사전에 방지하기 위해서는 미분탄의 흐름성을 높게 유지하는 것이 중요하다. 이를 위해서 본 설비에서는 석탄의 전처리공정인 분쇄/건조공정으로부터 생성된 미분탄의 수분 및 입도를 중요한 인자로 관리하고 있다. 또한, 이러한 외란을 좀더 쉽게 예측하고 대처하

Table 6. Major experienced operational problems at the pilot-scale gasification system and the proposed remedies.

항목	상황	주요 변수	대책
슬래배출 tap 막힘	<ul style="list-style-type: none"> · 주 가스화반응 영역 밑에 슬래프로 변환이 미처 안된 char 형태의 입자가 영겨 배출구 부근에 덩어리로 정체. · 슬래텡 온도저하로 용융슬래고화, 텡 막음. 	<ul style="list-style-type: none"> · 미분탄주입 속도 · 슬래텡/가스화 영역사이 온도차 · 슬래텡 온도 · 슬래텡 상하 압력차 	<ul style="list-style-type: none"> · 슬래텡 독립적 가열 설비 필요 · 슬래텡 상하 압력차 모니터링 · 슬래텡 온도 모니터링
가스화기 출구 배관 막힘	<ul style="list-style-type: none"> · 용융비산슬래(flyslag) 포함 석탄가스가 냉각없이 가스화기 방출시 flyslag 출구관 벽면에 고화, 관 막힘. · Ash 용융점이 너무 낮은 석탄 사용시 flyslag 다량발생하여 출구관은 경우 증가. 	<ul style="list-style-type: none"> · 냉각 석탄가스 온도 · 가스화기 방출 석탄가스와 출구관의 온도차 	<ul style="list-style-type: none"> · 가스화기 배출 석탄가스 온도 강하 필요. · 출구배관벽 온도 낮추는 수냉관 등 설치. · 출구온도 일정온도 이하 항상 유지필요.
시료주입 노즐 역화발생	<ul style="list-style-type: none"> · 가스화기내 급격한 석탄량 변화시 가스생성에 따른 local 압력증가로 역압발생. · 질소관에 산소첨가시 역화경향 증가. · 순간적 미분탄공급 불균일시 국부적 높은 산소농도 발생, 역화진행. 	<ul style="list-style-type: none"> · 노즐 배관별 차압 · 노즐내 국부적 산소농도 · 노즐 표면, 내부온도 	<ul style="list-style-type: none"> · 산소와 석탄과의 노즐내 접촉 시간 최소화 · 노즐 표면온도 측정, 일정온도 이상시 alarm 작동, 석탄주입 중단 · 가스화기 압력조절 밸브 개도율 조절로 일정차압 유지.
시료주입 노즐내 증기 응축에 따른 미분탄정체	<ul style="list-style-type: none"> · 증기와 미분탄의 노즐내 혼합시 증기의 응축, 미분탄 덩어리로 인해 노즐배관 막음. 	<ul style="list-style-type: none"> · 노즐내 배관 차압 · 증기 과열온도 	<ul style="list-style-type: none"> · 증기공급 유로 노즐 내 별도 설치 · 과열증기 공급
Ball Valve류 Leak	<ul style="list-style-type: none"> · 소량의 leak에 의해 고온의 석탄 가스가 valve에 도달하여 고온에 못견디는 valve fail로 인한 대량 leak로 확대. 	<ul style="list-style-type: none"> · 플랜지 체결 완결도 · 밸브의 고온 특성 	<ul style="list-style-type: none"> · 비상차단 slide valve와 플랜지 차단 시스템 설치 · 냉각용 물 배관 설치 · 차압/표면온도 모니터링
O-ring leakage	<ul style="list-style-type: none"> · 영하 10°C의 겨울시험시 O-ring이 너무 수축되어 valve action용 공압이 leak되면서 밸브 작동 중단. 	<ul style="list-style-type: none"> · 가스화기주변 대기온도 	<ul style="list-style-type: none"> · 설비주변 보온 · O-ring 미사용 설비로 대체
미분탄공급라인의 이물질에 의한 막힘	<ul style="list-style-type: none"> · 배관내 발생 녹 조각에 의한 노즐 끝부분 막힘. 	<ul style="list-style-type: none"> · 미분탄공급 배관 차압 	<ul style="list-style-type: none"> · 배관내 녹 제거설비 구비. · SUS 재질 사용.
석탄공급 lock hopper에서 분탄정체	<ul style="list-style-type: none"> · 미분탄공급 호퍼의 공급 석탄량 불균일. · 미분탄 불충분 건조시 호퍼내 정체. 	<ul style="list-style-type: none"> · 미분탄 표면수분 제거율 · 미분탄 함유수분 	<ul style="list-style-type: none"> · 미분탄 표면수분 완전제거. · 정체 예상구역 차압 모니터링
석탄분급 hopper별 공급석탄량 차이점 발생	<ul style="list-style-type: none"> · 공압수송시 호퍼 위치별 배관 길이 차이에 의한 공급량 분균일. 	<ul style="list-style-type: none"> · 배관 대칭성 	<ul style="list-style-type: none"> · 석탄 정량분배기 설치, 운용
Orifice 차압에 의한 유량측정시 분진정체로 인한 부정확	<ul style="list-style-type: none"> · 소량의 미립자가 오리피스 하부에 쌓여 차압특성 변화하여 유량측정 부정확해 짐. 	<ul style="list-style-type: none"> · 오리피스 구멍 형태 · 미립자 축적 확률 	<ul style="list-style-type: none"> · Eccentric 오리피스 설치 · 분기된 병렬배관에 annular flowmeter 추가설치, 간헐적 별도측정을 통한 유량 재확인
운전 주 computer화면 제어불능	<ul style="list-style-type: none"> · Control software의 주화면이 mouse에 미반응하여 공급산소량 등 유량제어 불능상태 발생 	<ul style="list-style-type: none"> · Control S/W 최대처리 변수숫자 · Data 저장 RAM 크기 · Optimal control S/W programming 	<ul style="list-style-type: none"> · PLC 로직 프로그램을 통하여 직접제어. · 제어실 연계 레이터 크기 커짐에 따른 충분한 RAM 카드 추가 필수. · Dual control 시스템 고려.
Thermocouple wire tube를 통한 미량 고온가스 leak	<ul style="list-style-type: none"> · 고온 부식성 석탄가스가 가스화기내 열전대끝을 녹여 열전대 wire 구멍을 통한 가스 leak. 	<ul style="list-style-type: none"> · 이중 보호관 여부 · Sealing 형태 	<ul style="list-style-type: none"> · 2중 sealing 고유모델 열전대 제작 사용

기 위해서는 현재 본 설비에서 사용하는 방식인 스크류 회전수에 대한 보정식을 이용하여 미분탄의 유량을 계산하는 방식을 보완하여 현재 산업적으로 각종 상업공정에서 널리 이용되고 있는 저장용기의 무게감량 속도를 기준으로 하는 질량기준 정량공급장치의 활용을 고려할 수 있다. 그러나 고압공정에서의 정량공급장치는 현재까지 보편화된 기술이 아니기 때문에 설계 및 운영 관점에서 보다 면밀한 검토가 있어야 한다.

상기한 원료 주입상의 문제점 이외에 석탄가스화공정의 조업문제점으로 자주 나타날 수 있는 현상은 석탄 반응후 잔여 물질인 용융슬래 및 비산재 때문에 야기될 수 있는 문제이다. 분류층 방식을 사용하는 석탄가스화공정에서 가장 많이 발생하는 조업상의 문제점은 용융슬래의 배출 문제이다. 분류층 방식의 가스화공정에서 슬래 배출부분의 온도가 용융온도보다 낮게 조업될 경우 급냉용기로 배출되지 못하고 배출구 주변에서 응고해 배출구를 막는 현상이 나타날 수 있다. 이러한 조업문제점은 가스화공정의 비상정지를 초래하기 때문에 상용화 관점에서 볼 때 반드시 해결해야 할 문제이다. 본 설비에서는 조업중 이러한 슬래 배출구의 막힘 현상을 관측하기 위해서 가스화기와 슬래 급냉용기 사이에 차압계를 설치하여 감시하고 있다. 슬래 배출구의 온도는 슬래의 용융온도 이상이 되도록 운전하여야 하는데, 이를 위하여 본 설비에서는 슬래 배출구의 하단에 고압 메탄버너를 설계하여 설치하였다. 운전중 메탄버너를 통하여 소량의 메탄과 산소 및 질소 혼합가스를 주입함으로써 슬래 배출구의 온도를 높게 유지하여 운전하고 있으며 고압 메탄버너의 사용 이후에는 슬래 배출구의 막힘 현상으로 인하여 가스화공정을 비상정지 시킬 경우는 발생하지 않았다.

이러한 용융슬래의 배출문제 이외에도 운전중 문제점을 야기할 수 있는 또 다른 요인은 비산되는 미량의 용융슬래으로 인한 문제이다. 분류층방식의 가스화공정에서 비산된 용융슬래는 가스화기와 연결된 후단공정의 흐름방향이 변동되는 구간이나 관경의 축소부분에서 부착되고 응고되어 관경의 축소 및 막힘 현상을 초래할 수 있다. 이러한 현상을 예측하고 감시하기 위해서 본 설비에는 가스화기와 냉각기, 냉각기와 사이크론 및 사이크론 입출구 사이에 차압계를 설치하여 관경의 축소 혹은 막힘 현상을 예측 및 감시하고 있다.

현재 운영중인 미국과 네델란드의 250 MW급 실증 IGCC 플랜트의 상황을 보면, 플랜트의 설비가동률은 최대 60~80% 수준에 머물고 있어 발전플랜트에서 요구되는 90% 이상의 가동률을 위해서는 아직 운전기술과 운영기술에서 많은 개선의 여지가 있음을 보여주고 있다. 특히, 미국 플로리다에 있는 Tampa 플랜트의 경우에는

운전 1차년도의 설비가동률이 50%였고 2차년도에는 60~70%로서 석탄을 사용한 IGCC 실증플랜트에서 예상의 운전상 문제점을 노출시켰다. 이에 따라 열효율 성적도 설계치인 42%에 못미치는 38~39%만을 현재 달성하고 있어 운전기술의 중요성을 일깨워주고 있다. 이러한 현재의 문제점들은 향후 국내에 건설코자 하는 시기까지는 모두 해결되겠지만, 그렇다고 한곳에서 해결된 문제가 다른 곳에서 그대로 해결책이 되리라는 보장은 없어 보인다.

규모는 틀리나 미국의 경우, 지난 70년대말부터 Cool Water 프로젝트를 통하여 100 MW급의 실증시험을 끝내고 가스화기이하 대부분의 IGCC 기기들에 대한 자신감을 발표하였으나 300 MW급으로 3배정도 대형화(scale-up)한 경우에는 다시 기계적인 문제로부터 시작하여 설치상의 문제, 열전달계수 측정오차, 고체슬래의 마모도 예측 부정확, 예상보다 심한 부식문제 등으로 2년여 동안이나 실증설비에서 많은 시행오차를 겪었다. 특히 문제가 되는 부분은 가스화기로부터 나온 석탄가스가 가스냉각기를 통과하면서 처음 예측하였던 슬래의 열교환기 벽면의 오염인자 지수(fouling factor)가 설계시 잘못 예측 반영되어 석탄가스가 가스냉각기를 통과하여 나오는 시점에는 가스의 온도가 설계치보다 너무 낮게되어 고온가스정제설비로 가스를 보낼 수 없는 상황이 되었고 가스-가스 열교환기는 필요가 없게 되어 철거하는 상황이 발생하였다^[11].

상용급 실증 전식 IGCC 플랜트인 네델란드 Demkolec 플랜트에서도 많은 운전상의 시행오차를 겪었는데, Shell사에서 발표한 이때까지의 주요 문제점들로는 가스터빈의 humming과 진동문제, 고온집진설비에서의 세라믹 필터들이 깨지는 문제, 미립 슬래입자들의 배출문제, 슬래 배출시 문제, 불충분하게 정제된 물에 의한 문제들이 보고되었다^[12].

앞서 설명한대로 가스화기의 운전상 가장 큰 문제점은 가스화기의 상하 어느 쪽이 슬래에 의하여 막히는 것일 것이다. 만약 가스화기의 배출구가 막히면 이는 가스화기내의 압력이 급상승할 우려가 있고 최악의 경우 가스화기에 설치된 파열판(rupture disk)이 터져 가스화기내 고온고압의 폭발성가스를 플레어스택 등 원하는 곳으로 유도하여 처리할 수 있을 것이나, 이는 전체플랜트를 비상정지 시켜야 하는 일이며 일반적으로 교체 슬래이 엉겨서 발생한 비상정지의 경우는 다른 경우와 다르게 직접 사람이 엉긴 슬래를 깨내고 보수를 해야 하므로 장시간의 보수기간이 요구된다.

슬래에 의하여 막히는 문제점 외에 다음으로 중요한 사항은 시료 주입시에 노즐에서 역화가 발생하여 일부 배관이 폭발하는 가능성일 것이다. 이는 노즐내의 배관

에서 역압이 어떤 원인으로든 발생하여 고온의 폭발성 석탄가스가 산소와 건조된 석탄분말이 있는 쪽으로 밀려오게 되면 항상 일어날 수 있는 상황이며, 발생하는 속도는 수초 내에 일어날 수가 있는 것을 시험을 통하여 경험하였다. 이런 경우, 조업자가 대응할 수 있는 시간적 여유는 길어야 1~2분에 불과하다. 따라서, 이러한 상황이 언젠가 일어날 것이라고 가정하고 모든 설비의 설계와 운전이 이루어져야 한다.

기존의 연소반응에 기초한 보일러나 유동층의 경우에는 아무리 시스템이 IGCC와 같은 가압 조건일지라도 생성되는 가스가 주로 CO₂로서 폭발성은 없다. 그러나, IGCC의 경우는 발생하는 가스가 상온에서도 폭발성이 큰 CO와 수소로 이루어져 있는데다가 가스의 온도가 1400°C 근처이고 20기압 이상인 상태에서, 적은 양의 가스누출이 있더라도 방출된 가스는 폭발할 가능성이 매우 크게 된다. 석탄가스중 수소는 18~35%까지 존재하는데, 수소는 대기중의 상온 상압에서도 폭발범위가 4~75%로서 가스화기로부터 석탄가스가 새게 되어 접화원만 있다면 폭발한다. CO의 경우도 상온 상압의 대기중에서 공기중에 습기가 있을 때 폭발범위는 12.5~74% 농도인데, 가스화기내 석탄가스 중 CO의 농도는 35~65%까지 존재한다. 따라서, CO의 경우도 가스화기에서 대기중으로 새게 되면 접화원에 따라 폭발할 가능성이 높다. 그러므로, IGCC 시스템에서는 모든 플랜지와 밸브류들의 유지보수에 남다른 세밀함이 요구된다.

국내의 추운 겨울에는 대기온도가 영하 10도 이하로도 자주 내려가는데, 대기온도가 영하 10도에서 가스화 시험을 수행하였을 때 예기치 않게 밸브조절을 위한 공기압 조절 시스템 내에 있는 오링(O-ring)들이 수축되어 공압이 새게 되어 밸브를 작동시키지 못하는 일을 경험하였다. 이러한 경험으로 미루어 보아 가능하면 오링이 사용되지 않는 방식으로 밀봉처리 하는 방안이 좋을 것이라는 결론을 얻었다. 아니면 최소한 오링이 있는 부위는 온도를 보온하는 설비를 준비해야만 할 것이다. 이러한 사실들을 미리 알고 대처하면 비용 면에서는 아무 것도 아닌 사소한 일이 될 것이나, 그렇지 못한 경우에는 전체 플랜트를 비상정지 시켜야 되는 상황이 발생할 수도 있어 비용 면에서 큰 손해를 입을 수도 있을 것이다.

4. 결 론

건식 석탄가스화기에서는 중국 대동탄의 유연탄과 미국 알래스카 유시벨리탄의 아역청탄 모두 가스화에는 성공적으로 적용할 수 있었으며, 수분의 경우는 건조후 절대수분량이 아니라 운송에 직접 영향을 미치는 표면수분의 제거율이 더 중요함을 알 수 있었다. 본 연구를 통

하여 파악된 회분의 가스화에 대한 특성 중에서 우선 가스화 성능을 판별해야 하는 실험적인 입장에서는 석탄내 회분이 어느 정도 있는 것이 유리하였다. 회분이 7~10%되는 2개 대상석탄에 대한 실험으로부터 2개 석탄 모두 양호한 슬래크 형태와 내화재에의 도포 상태를 보여 주고 있어 대상석탄내 회분의 범위는 슬래크용 건식 가스화기에서 적절함을 입증하였다. 또한, 건식형태의 가스화기에 사용할 대상탄의 회용용점은 가스화기 반응영역의 온도인 1400~1500°C 보다 100°C 정도 낮은 회용용점을 가진 석탄을 선정하는 것이 유리하다고 판단하였다. 즉, 회용용점이 1300~1400°C인 석탄을 대상탄으로 선정하는 것이 타당하다고 보았다.

산소농도를 변경시켜 시험한 결과에 의하면, 산소농도를 20%까지 질소로 대체하는 것은 가스화기 온도 유지 등의 측면에서 무리가 있으나 산소공급량의 10%까지는 가스화기 운전특성에 큰 차이점이 없었다. 따라서, 산소농도를 공기분리공정에서 90%로 공급하여도 가스화기 성능에는 무리가 없다는 결론이나, 가스화기로 산소대신 질소가 더 공급되면 가스화기 후단공정인 가스정제공정의 장치가 커져야하는 단점이 있으므로 공기분리공정과 가스정제설비의 장치투자비 등의 측면에서 적절한 산화제 농도를 판단하여야 한다. 증기의 공급량이 석탄무게 대비 10~12% 정도이면 충분하다고 보이며 그 이상의 증기공급은 가스화기 온도의 조절 등의 목적 외에는 가스화 반응에 큰 역할이 없는 것으로 판단된다. 또한, 유시벨리탄 가스화 실험결과를 통하여 보면 가스화기내 온도가 1450°C 이하로 저하될 때에 메탄농도가 800 ppm 이상으로 급격히 증가함을 볼 수 있었는데, 가스화기 내부의 온도를 열전대 대신 메탄농도로도 유추할 수 있음을 알 수 있었다.

운전측면에서는 가스화기의 실험을 통하여 운전시 발생할 수 있는 주요 문제점을 파악하였고 그 문제점들의 원인과 대책에 대하여도 조사하였다. 파악된 가장 큰 운전상 문제점으로는 가스화기 슬래크 배출구나 용융 비산 슬래크에 의한 가스화기 후단부가 막히는 문제와 시료공급 노즐에서의 역화 발생에 의한 폭발가능성 문제, 그리고 소량의 석탄가스 방출로 인한 점진적인 밸브나 플랜지의 파손과 이에 따른 폭발 가능성 문제들이 주요한 것들이었다.

아무리 외국에서 오랫동안 기술개발을 하여 왔고 실증플랜트들을 운전하고 있으나 여러 기술이 복합된 IGCC 기술의 완전한 상업화에는 IGCC 기술 선진국들도 아직 시행오차를 겪고 있는 단계에 있다. 특히, 기술검증이 완료되었다고 알려졌던 미국 Texaco사의 가스화기도 대용량의 실증단계에서는 다량의 미연탄소를 포함한 슬래크를 배출하고 있는 현실이고, 그 외에 가스화기내의 내화재열

전대 파손, 슬래택의 막힘문제, 시료주입 버너의 장시간 운전시 마모문제 등 고체시료에 따른 가스화기의 운전 안정성과 설비가동률 증대측면에서는 아직 개선되어야 할 기술사항들이 많다. 이들 문제의 국내 시행오차를 최소화하는데 본 연구의 운전요소기술 등에서의 연구결과가 향후 많은 기여를 할 것으로 판단되며, 최소한 3톤/일급 가스화기와 같은 소규모 엔지니어링급 규모에서의 시험설비 운전이 국내에서 이루어지고 있다는 것은 상업용 규모에서의 시행오차를 최소화할 수 있는 최적의 방향으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부에서 지원한 “석탄가스화 복합 발전 기반기술(II)” 과제와 전력연구원에서 지원한 “3톤/일급 건식 석탄가스화기 운전특성 연구” 과제의 일환으로 수행되었습니다. 이에 관계자들에게 감사드립니다.

참고문헌

- McCoy, M.: “Cleaning Up the Air With Chemicals”, Chem. & Eng. News, 79(4), 35 (2001).
- 수질오염·폐기물·토양오염 공해공정시험방법, 동화기술 (1996).
- Yun, Y., Yoo, Y.D., Lee, H.G. and Chung, S.W.: “Performance of a 3 Ton/Day Coal Gasifier under High Pressure Conditions”, Proceedings of 2nd Korea-China Joint Workshop on Coal & Clean Energy Utilization Technology, 311 (1998).
- Schellberg, W. and Hooper, M.: “The Puertollano IGCC Plant with Prenflo Technology”, Proceedings of 13th Pittsburgh Coal Conference, 427 (1996).
- Schellberg, W. and Pena, F.G.: “Project Status of the Puertollano IGCC Plant”, Proceedings of Gasification 4 the Future, Session 3-2 Paper (2000).
- Maruyama, H., Takahashi, S., Iritani, J. and Miki, H.: “Status of the EAGLE Project: Coal Gas Production Technology Acceptable for Fuel Cells”, Proceedings of 2000 Gasification Technologies Conference, Session 4-10 Paper (2000).
- Mendez-Vigo, I.: “Puertollano IGCC”, Proceedings of 2000 Gasification Technologies Conference, Session 4-7 Paper (2000).
- Ploeg, J.: “Gasification Performance of the Demkolec IGCC”, Proceedings of Gasification 4 the Future, Session 3-1 Paper (2000).
- 정봉진, 이중용, 이계봉, 윤용승: “Bench Scale급 기류층 석탄가스화기에서 회분의 용융특성”, 한국에너지 공학회지, 8(1), 127 (1999).
- Nager, M.: “Evaluation of U.S. Coal Performance in the Shell Coal Gasification Process (SCGP)”, EPRI Report AP-2844, Vol. 2 (1984).
- Black, C.R.: “Tampa Electric Polk Power Station Startup & Operations”, Proceedings of 1997 Gasification Technologies Conference, Session 1-1 Paper (1997).
- de Winter, H.M.J. and Eurlings, T.: “IGCC Buggenum Commercial Operation”, Proceedings of 1998 Gasification Technologies Conference, Session 1-1 Paper (1998).