2010 가스화 기술 컨퍼런스를 중심으로 살펴본 석탄 가스화 기술의 개발 동향 및 상업화 전개 현황

이진욱[†] · 유영돈 · 윤용승

고등기술연구원 플랜트 엔지니어링 센터

(2011년 3월 28일 접수, 2011년 6월 1일 수정, 2011년 6월 2일 채택)

Research and Development & Commercial Deployment Status for Coal Gasification Technology - Mainly from GTC 2010

Jin-Wook Lee[†], Young-Don Yoo and Yongseung Yun

Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering

(Received 28 March 2011, Revised 1 June 2011, Accepted 2 June 2011)

요 약

최근의 에너지 기술 개발 동향 중의 하나로서 화석에너지를 고청정 기술로 활용하는 것이며 대표적인 기술로 석탄가스화 기술을 들 수 있다. 석탄가스화 기술은 IGCC, 합성원유 및 합성천연가스 생산, 메탄올 또는 DME 등의 화학원료 생산 등에 적용할 수 있으므로 여러 선진 기술사들이 보다 진보된 기술을 개발하고 있으며 시장 선점을 위하여 다양한 노력을 기울이고 있다. 현재 미국과 유럽뿐만 아니라 이웃나라인 일본과 중국에서도 수천톤/일급의 대형화 기술의 개발을 거의 완료한 단계이다. 반면에 석탄에너지 활용이 필수적인 우리나라의 경우 아직 소규모 플랜트를 활용한 요소기술 개발에 머물러 있으므로 향후 이 분야에 대한 기술 개발에 많은 관심을 가져야 한다고 판단된다. 이에 본고에서는 석탄가스화 기술에 관한 전문 기술 교류의 컨퍼런스로서 가장 최근에 개최된 '2010 가스화 기술 컨퍼런스'에서 주요 기술 보유 업체에서 발표한 자료를 중심으로 하여 석탄가스화 기술 개발 동향 및 이들 업체들의 시장 선점을 위한 상업화 전개 동향을 살펴보았다.

주요어 : 석탄가스화, 상업화 전개, 석탄가스화복합발전, 이산화탄소 포집, 합성천연가스, 갈탄

Abstract — Coal Gasification Technology is one of the best alternatives among clean fossil fuel utilization. Major technology holding companies are devoting their efforts to develop more advanced technology to dominate the market in advance because of its importance on the applications such as IGCC, CTL, coal to SNG, various chemicals and so on. Japan and China, as well as America and European countries, have developed couple of thousands ton/day-class coal gasification technology. However, our gasification technology remains in the development stage with couple of ton/day-class pilot plant. So, we should be interested in developing this technology considering that we are heavily dependent of coal energy. In this paper, we summarized the trend and status of coal gasification technology development and commercial deployment of major technology holding companies mainly from the presentation materials of 'Gasification Technology Conference 2010', which is the biggest place of information exchange for recent coal gasification technology.

Key words : Coal Gasification, IGCC, Commercial Deployment, CO₂ Capture, SNG, Lignite

[†]To whom corresponding should be addressed.

Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering,
Suwon, Korea

Tel : 031-219-2669; E-mail : jwlee@iae.re.kr

1. 서 론

최근의 에너지 기술개발 동향이 지구온난화 기체인 이산화탄소 저감에 초점이 맞추어 지고 있는 점을 고려하면 장기적으로는 이산화탄소의 배출이 전혀 또는 거의 없는 신재생에너지 기술의 개발 및 사용이 최적이겠지만 상업적으로 경쟁력을 충분히 갖춘 신재생에너지 기술의 비중이 현재의 화석에너지 사용을 대체할 수 있는 최소 수십년간은 화석에너지를 고효율 및 고정정 기술로 활용하는 것이 필수적이다.

원유의 경우 인류에게 직접적인 에너지원으로서 그리고 수많은 필수품을 제공하여 주는 원료로서 중요성은 논의할 필요가 없는 주지의 사실이다. 그러나 2008년말 배럴당 40달러 이하이던 두바이유 가격이 2011년 3월 현재 배럴당 100달러를 넘어섰고, 브렌트유와 서부 텍사스유의 가격도 마찬가지로 100달러를 넘어서는 등으로 최근 원유 가격이 가파르게 상승하고 있다. 우리나라의 경우에는 필요한 원유의 전량을 수입에 의존하고 있는데, 가격을 떠나 매장 분포가 특정지역에 치우쳐 있다는 사실을 고려하면 에너지 안보의 달성이라는 측면에서도 원유 비중을 낮출 필요가 있다.

석탄의 경우 원유에 비하여 가채 년수가 훨씬 길고 매장량의 분포도 편중성이 약하여 향후 수십년간은 우리나라에서 적극적으로 사용할 수 있는 에너지원이지만 단위 전력 또는 단위 에너지 생산에서 원유에 비하여 훨씬 많은 이산화탄소를 배출하고 있다. 이에 전 세계적으로 석탄을 고정정 및 고효율로 사용할 수 있는 기술이 개발되고 있으며 가장 대표적인 기술로 석탄가스화 기술을 들 수 있다. 석탄가스화 기술은 IGCC 복합발전, 합성원유(Coal to Liquid) 및 합성천연가스(Synthetic Natural Gas, 이하 SNG) 생산, 메탄올, DME, 우레아, 암모니아 등의 화학원료 생산 등의 다양한 공정에 적용될 수 있는 기술적 특성으로 인하여 많은 기술 선진국에서 관심을 가지고 기술 개발에 박차를 가하고 있다. 석탄가스화 기술을 선점한 주요 기술사들은 매년 미국에서 개최되는 가스화 기술 컨퍼런스(Gasification Technology Conference, 이하 GTC 컨퍼런스)에서 자사 기술의 시장 확대를 위하여 최근 자사의 기술 개발 현황 및 상업화 실적 등을 상세하게 보고하고 있다. 본고에서는 가장 최신의 정보라고 할 수 있는 2010년 가을에 개최된 2010 GTC 컨퍼런스에서의 발표자료를 중심으로 하여 전세계적인 석탄가스화 기술개발 동향 및 상업화 동향을 살펴보고자 하였다.

2. 미국의 기술 개발 및 시장 전개 동향

2-1. ConocoPhillips

ConocoPhillips사는 Wabash River의 262 MWe급 IGCC 발전시스템을 건설(건설 당시 Destec사)한 습식 석탄가스화 기술을 보유하고 있는 회사이다. 이 회사의 발표가 GTC 컨퍼런스의 가장 첫 번째 발표이었으며, 발표자료에서 가장 첫 번째로 언급된 내용이 자신들이 아시아에 첫 번째로 라이선스(License)를 제공한 POSCO의 광양 프로젝트 [1,2]란 점이 흥미롭다. 자사의 기술로 현재 석탄가스화기를 대량으로 건설하고 있는 중국시장에 진출하지 못하였다는 것을 포함하고 있다는 점을 고려하면 최근에는 크게 주목을 받지 못하였다고도 할 수 있겠다. 이 회사의 가스화기 개발 방향은 같은 크기에서 고압 운전을 함으로써 대용량화를 이루는 것인데, 아역청탄을 4,500톤/일(as received basis)까지 처리하고자 계획하고 있다. 이 회사의 가스화기는 습식 공급 2단 분류층 가스화기로서 2단에서는 산화제를 공급하지 않고 미분탄 슬러리만을 공급하는데, 이곳에서 일부 메탄이 발생하여 수성가스 전이 반응(Water Gas Shift, 이하 WGS) 공정과 AGR(Acid Gas Removal) 공정이 작아지게 된다고 한다. 정확한 온도제어를 통하여 내화재의 수명을 연장시키고자 하며, 에너지연계(Heat Integration)를 통하여 효율 향상에 기여하고자 한다. 최(Char)의 재순환 시스템을 채택하고 있는데, 이것은 ConocoPhillips사의 기술의 특성상, 2단에서 분사하는 미분탄의 경우 one pass로는 높은 탄소전환율을 확보하는 데에 한계가 있기 때문이라고 판단된다. 이전 참고문헌 [3]의 자료에 의하면 2단에서 22% 정도의 미분탄을 분사하며 이곳에서 분사된 미분탄의 탄소전환율은 86% 정도라고 보고되고 있다 [3].

IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle) 발전소로는 전 세계에서 두 번째로 1995년에 건설이 완료된 Wabash River 발전소는 2010년 여름 Summer Peak 기간에 93%의 이용률(availability)을 확보하였다고 하는데, 2010년 1월에서 9월까지의 이용률은 77%로서, 이 값은 한국의 전력사 입장에서는 아직까지 만족할 수 있는 수준은 아닌 것으로 판단된다. 그리고 이 발전소에서 현재까지 총 350만톤의 Pet coke를 사용한 실적을 보유하고 있는데, 연료의 다변화를 고려하여야 하는 장기적인 관점에서는 주목할 가치가 있는 내용이라고 판단된다.

Fig. 1. E-STR process being developed by ConocoPhillips and the effect of the amount of coal injection at the second stage [4].

ConocoPhillips사는 현재의 E-Gas 가스화 기술을 보완한 E-STR 가스화기 기술을 개발하고 있는데, 이 기술의 특징으로 낮은 건설비(CAPEX)와 낮은 유지비(OPEX)를 들고, 또한 SNG 생산이 가능한 높은 압력에서 운전되는 점을 들고 있다 [4]. 특히 아역청탄과 갈탄 사용에 대하여 높은 비중을 두고 있으며, 2단에서 보다 많은 미분탄 슬러리를 공급함으로써 산소 소모량을 낮추고 냉가스효율을 높인다는 점에 기본 개념을 두고 있다. 따라서 2단(2nd stage)의 온도가 기존 기술(E-Gas)에 비하여 상당히 낮아지게 되므로, 2단에서 발생하는 타르와 액체 성분을 관리하고 파괴하는 것이 주요 관건이므로 촉매에 의하여 타르를 처리하는 기술을 개발하고자 하고 있다. Fig. 1에 E-STR 기술의 공정도(BFD : Block Flow Diagram)와 2단계 슬러리를 산소없이 공급함으로써 냉가스효율의 상승과 산소 소모량 감소를 가져올 수 있는 개념도를 함께 나타내었다.

2-2. GE Energy

GE Energy사는, 이전의 Texaco사의 실적을 합한 수치로서, 현재까지 전 세계 65곳에 145개의 가스화기를 제작한 경험을 보유하고 있다. 현재에는 6개의 프로젝트가 진행중인데, 이중 두 개는 중국에 가스화기를 건설하는 것이며, 가장 대형 프로젝트는 Duke Energy Edwardsport IGCC 프로젝트이다 [5]. Indiana 석탄을 사용하여 618 MWe IGCC 플랜트를 건설하는 것으로서, 2010년 10월 현재 전체 공정의 78%를 진행하였으며, 이중 가스화기, 가스터빈, 스팀터빈 등의 설치를

완료하였고 2012년 이내에 플랜트 완공 후 인도(Cash on Delivery, 이하 COD)를 목표로 프로젝트를 진행하고 있다. 특히 사항으로서 Simulator의 설치를 이미 완료하여 운전원 훈련 시스템으로 활용하고 있다는 점을 들 수 있으며, 국내에서도 IGCC 발전소 1호기 건설시에 참고할 만하다고 판단된다. 또한 호주에 IGCC+CCS(Carbon Capture & Sequestration, 이하 CCS) 프로젝트를 진행중인데, Wandoan Power사를 고객으로 하여 400 MWe IGCC+CCS 플랜트를 건설하는 것이 최종 목표이다. 플랜트의 COD 목표를 2015년으로 계획하고 있으며, Pre-FEED(Front End Engineering & Design)에 대한 자금을 확보하였다. GE Energy사가 추진하고 있는 Hydrogen Energy California 프로젝트는 첫 번째 상용화 IGCC+CCS 프로젝트로서 250 MWe 급이며 2010년 3/4분기에 FEED를 완료하였고 2016년에 COD를 목표로 하고 있다.

GE Energy사는 중국과 다양한 프로젝트를 진행하고 있는데, 최근 5년간에 11번의 성공적인 운전 시작(Start-up)이 있었으며, 가장 대표적인 프로젝트로는 Fig. 2에 나타난 Shenhua Baotou의 MTO(Methanol to Olefin) 설비인데, GE Energy사의 5개의 900ft³ 가스화기와 2개의 예비 가스화기를 포함하고 있다. GE Energy사는 현재에도 중국의 9개의 프로젝트에 엔지니어링 또는 건설 중으로 참여하고 있다. GE Energy사의 중국 프로젝트의 경우 예비 가스화기를 꼭 설치하고 있으며, 예로서, 5+2, 2+1, 1+1 Trains 등을 들 수 있다. 이 회사는 이러한 상업화 프로젝트 이외에 연구개발을 위하여 미국의 Wyoming에 5 MWth 가스

화기를 운전중이다. 이 가스화기를 이용하여 건식 공급, 고온가스처리 공정(warm gas clean up), 석탄 전처리 및 슬랙 첨가물 등의 새로운 기술에 대한 상업화 이전의 시험설비로 활용하고 있다.

또한 이 회사는 4,000톤/일까지 처리용량의 격상(scale-up)과 1250 psi(85 atm)까지 압력 증가 등을 가스화기 개발 방향으로 설정하고 있으며, 분체 공급 펌프를 이용하는 Posimetric Feed System을 개발하고 있고, 슬러리 공급 시스템 및 합성가스 냉각기의 개선을 위하여 전산유체역학 해석 등의 모델링 기술 개발도 계속해서 추진 중임을 소개하고 있다 [6].

2-3. KBR

KBR사의 TRIG(Transport Reactor Integrated Gasification) 기술은 자사의 오래된 기술인 FCC(Fluidized Catalytic Cracking) 기술을 기반으로 하여 고속이동층(고속순환유동층, Transport Reactor) 기술을 채택하여 Southern Company(미국의 전력회사)사와 공동으

로 DOE의 지원을 받아 개발한 기술이다 [7]. KBR사의 경우, 특히 저급탄(Low Rank Coal)과 고회분 석탄을 위한 기술이라는 점을 강조하고 있는데, 역설적으로는 유동층 기술의 분류에 속하는 자사의 기술 특성상 고급탄(High Rank Coal)에는 상대적으로 분류층 가스화 기술에 비하여 불리하다고 판단하였기 때문이라고 생각된다. KBR사는 자사의 기술을 채택함으로써 낮은 건설비(CAPEX)와 낮은 운영비(OPEX)를 주장하고 있는데, 분류층에 비하여 저온 운전을 하는 특성으로 인하여 재질 문제에서 자유롭고 이용률이 높기 때문이라고 설명하고 있다. KBR사는 기존 공개된 자료에서도 이와 같은 내용을 일관되게 주장하고 있으며 특히 이용률의 측면에서는 가장 자신있게 자랑하고 있다 [8]. 일반적으로 유동층 가스화 기술의 경우 탄소전환율이 낮은 것이 단점이라고 알려지고 있는데, 고속이동층 가스화 기술을 적용하여 반응성이 좋은 저급탄을 활용하면서 탄소전환율을 높일 경우 적어도 저급탄의 경우에는 상기의 주장에 대한 실현 가능성

Fig. 2. Edwardsport IGCC site of GE Energy and MTO facility of China [5].

Fig. 3. Coal to SNG Process of KBR and bird's-eye view of Kemper County IGCC plant [7,9].

이 있다고 판단된다. KBR사는 자사의 기술로 IGCC, Coal to SNG, CTL 등의 다양한 목적의 사업화를 고려하고 있는데, Fig. 3에 KBR사의 가스화 기술을 채택한 SNG 생산 공정도를 나타내었다.

현재까지 전 세계적으로 파일롯 플랜트를 포함하여 총 6개의 프로젝트가 진행되고 있는데, 그중 3개는 파일롯 규모이며 한국에서 진행 중인 3톤/일 플랜트를 포함하고 있다. 아직까지 운전되고 있는 상업용 규모의 가스화기는 없으며, 현재 상업용 규모로는 미국에 1개와 중국에 2개의 프로젝트가 진행 중이다. 가장 상업화에 가까운 프로젝트로는 중국 Dongguan에서 진행 중인 120 MWe IGCC 프로젝트를 들 수 있으며 2011년에 운전을 시작할 예정으로 있다. 가장 대형 프로젝트로는 미국의 Kemper County의 프로젝트를 들 수 있는데, 20억달러 이상을 투자하여 2개의 갈탄 가스화기로 524 MWe IGCC 플랜트를 건설하고자 하며, 65%의 CO₂를 포집하고 효율은 11,708 Btu/Kwh (효율=29.14%)를 예상하고 있다 [9]. 2010년 10월 중순에 건설을 시작하였으며 2014년 5월에 가동을 목표로 추진 중이다(Fig. 3).

2-4. PWR

PWR사는 건식 고체 펌프, 초밀집 미분탄 이송, 그리고 로켓 추진 기술에 적용된 급속 혼합 등의 기술을 활용하여 기존의 상업용 가스화기 대비 반응영역의 체적이 1/10 크기인 가스화기를 개발하고 있다. EMRE (ExxonMobil Research and Engineering Center)와 함께 개발하고 있으며, 캐나다의 Alberta Innovates에서 Alberta에서 생산되는 시료(Oil Sand로 추정됨)의 테스트를 위한 자금 지원, DOE에서 건식 고압 미분탄 펌프 및 미분탄 공급 시스템 개발에 대한 자금 지원을 담당하고 있고, ZEEP(Zero Emission Energy Plants)사에서 가스화 플랜트에 대한 라이선스를 가지고 건설을 담당(launch customer)할 예정으로 있다 [10].

이 회사는 가스화기 반응영역의 체적을 10% 이하로 감소시켜 가스화 시스템의 건설비를 기존 상업용 가스화기 대비 50% 수준으로 낮추면서도 높은 탄소전환율(99% 이상)과 높은 냉가스효율(80~85%)을 내고, 가스화시스템의 이용률이 99% 이상 가능하다고 주장하고 있다. 고압 운전 및 물분사 냉각시스템을 채택하여 수소 제조에 적합한 공정이라고 한다. 일리노이즈주 시카고의 GTI(Gas Technology Institute) 부지에 18톤/일 플랜트의 건설을 2009년 12월에 완료하여 파

일롯 플랜트 테스트를 진행하고 있는 단계이다.

Illinois #6 석탄을 이용한 실험 결과에서 10시간 이상의 운전 상태를 보여주고 있으며, 6시간 동안의 질량정산 구간에서 비교적 안정적인 운전 상태를 보여주고 있다. 실험 후 가스화기 내벽에 부착된 슬래크의 형상을 보여주고 있는데, 본인들은 좋은 상태라고 주장하지만 많은 숫자의 구슬이 가스화기 벽면에 붙어 있는 형상으로서, 일반적으로 부착된 슬래크가 도포(coating)되어 층을 형성하는 것이 바람직하다는 측면에서 슬래킹 특성이 우수하다고는 볼 수 없다고 판단되었다. 27기압(400 psi)의 압력 조건 및 0.1초를 약간 상회하는 짧은 체류시간에서 91% 수준의 탄소전환율을 보여주고 있는데, 그들의 Kinetic Model에 의하면 이러한 조건은 68기압(1,000 psi)의 압력 및 0.5초 체류시간에 99% 이상의 탄소전환율과 동등한 수준이라고 한다. 이러한 결과를 짧은 미래에 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD) 모델을 활용하여 검증하겠다고 하는데, 현재의 CFD 모델이 이러한 상황을 정확하게 모델링하기에는 한계가 많다는 점을 고려하면 PWR 기술진의 주장에 일부 의구심을 가질 수 있겠으나, 0.1초 정도의 짧은 체류시간에 91% 정도의 탄소전환율 자체를 과소평가 할 수는 없다고 생각한다. 그리고 가스화기는 상부에 가스화 반응영역과 하부에 급냉 영역으로 이루어져 있는데, 가스화기 반응영역의 길이를 달리하여 두 개를 제작하였으며, 조만간 0.3초 체류시간의 가스화기를 이용하여 실험을 진행할 예정이다.

EERC(University of North Dakota에 있는 EERC 연구소)에서는 공급 시스템과 건식 펌프 시스템의 테스트를 진행하고 있다. 콤팩트 가스화기 구현을 위하여 상부 공급형 다중 노즐 시스템을 Scale-up의 기본 개념으로 채택하고 있으므로 상업화를 위해서는 미분탄 분배기의 채택은 필수이며 이를 위하여 2007년부터 하나의 분류로부터 다수 개의 지류로 미분탄을 균일하게 분배할 수 있는 미분탄 분배 실험을 수행하고 있다. 미분탄 가압 펌프로 400톤/일의 미분탄을 82기압(1,200 psi)으로 분사할 수 있으며, 2011년에 펌프 테스트를 시작할 예정으로 있다. PWR사와 EERC는 이러한 기술을 조합하여 초밀집(Ultra Dense, 미분탄의 유량에 비하여 이송용 질소의 유량이 아주 적은 상태) 미분탄 공급 기술을 구현하고자 하고 있다. DOE에서도 1/10 크기 가스화기 구현보다는 이와 같은 미분탄 공급 시스템에 기대를 걸고 연구비를 지원하고 있는 것으로 알려지고 있다 [11]. 다음의 Fig. 4는 PWR사

Fig. 6. CCS demonstration plants with 1st generation technology and those with CCPI program, in USA [12].

Fig. 7. Conceptual drawing of ITM technology and efficiency increase of IGCC system with respect to the addition of new technologies [14].

과하지 않으면 CCS의 전개가 어렵다고 판단하고 있는데, 이로부터 탄소세 없이 가격 경쟁력이 있는 CCS 기술 개발의 어려움을 엿볼 수 있다.

EPRI의 연구에 의하면 CCS를 포함한 535 MWe-Net IGCC 플랜트의 평균 효율과 건설비(TPC: Total Plant Cost)는 30.5%(HHV basis)와 20억불이라고 한다. 따라서 R&D 로드맵에 가격 경쟁력을 가지도록 하는 것이 필수적인 요소라고 판단하고 있다 [13]. IGCC의 성능을 향상시키기 위한 다양한 방향을 제시하고 있는데, 산소 제조의 측면에서는 1단(single stage) 멤브레인으로 고순도 산소를 제조하는 ITM(Ion Transport Membrane) 기술을 제시하고 있으며 기존의 초저온 공정과 비교하여 0.8%의 시스템 효율 향상을 기대할 수 있다. 공기로부터 산소를 분리하기 위하여 세라믹 멤브레인을 사용하는 기술이며, DOE/EPRI의 현재 3단계 계획으로는 2011년까지 100 ton-O₂/day 플랜트를 건설하여 2013년까지 테스트하는 것이며, 2015년경에 시

작될 4단계에서는 2,000 ton-O₂/day 플랜트를 개발하여 250 MWe급 IGCC 플랜트 또는 110MWe급 순수 산소 연소 플랜트에 적용할 수 있도록 격상(scale-up)하고자 한다 [14]. 현재는 0.5 ton-O₂/day 및 1.0 ton-O₂/day 용량의 세라믹 스택을 보유하고 있는데, 1 ton-O₂/day 스택의 높이는 약 60~70 cm 정도이며, 이러한 세라믹 ITM으로부터 제조되는 산소의 순도는 99.5% 정도이다. Fig. 7은 1단 ITM 기술의 개략도와 단위 기술의 추가로 인한 IGCC 기술의 효율 향상 개념도를 보여주고 있는데, Fig. 5에서의 기술 추가에 따른 LCOE 가격과 비교하여 보면 효율 상승에 따른 COE의 감소와의 상관관계를 확인할 수 있다.

합성가스 처리 공정에서는 WGS에서 수증기 사용량의 감소, 고온고압 유황 제거 공정의 개발, CO₂ 고순도화 및 Ramgen CO₂ 압축 기술 등의 필요성을 제시하고 있다. 참고로 Ramgen CO₂ 압축 기술은 각각 압축비 10의 2단 압축과 중간 냉각 기술을 채택하여 CO₂

를 100기압까지 압축하며 기존 압축기에 비하여 1/10 크기 및 1/2 가격이라고 한다 [15]. 발전 분야에서는 고온 가스터빈과 공기 추출 비율의 증가를 들고 있다.

NETL의 자료에 의하면 연간 60억톤의 CO₂를 발생 하는 미국에서는 CCS 프로그램으로 CO₂ 발생원에서 90% 이상 포집하고 포집된 CO₂의 99% 이상을 저장하는 것을 목표로 연구를 추진 중이다 [16]. 이를 위하여 미국의 43개주와 캐나다의 4개주가 참여하는 RCSP (Regional Carbon Sequestration Partnerships) 프로그램을 통하여 100년 이상 장기간 CO₂를 저장할 수 있는 장소를 찾고(Phase I, 2003-2005), 염수층(saline formation)이나 사용한 유정 등에 주입 테스트를 거쳐서(Phase II, 2005-2010), 2008년 이후에는 대용량으로 저장하는 방안을 찾고 있는데(Phase III, 2008-2017 이후), 이 프로그램의 일정표를 Fig. 8에 나타내었다. 이들의 조사에 의하면 미국에는 염수층 등에 수백년 이상의 발생량을 저장할 수 있는 가능성을 지닌 것으로 나타났으며 이를 Fig. 8에 함께 나타내었다. 현재 PHASE III에서 1개의 대형 저장소에 주입을 시작하였으며 2011-2015년 사이에 8개의 대형 저장소에 CO₂ 주입을 시작할 예정으로 있다 (Fig. 8). 이외에도 중서부 지역의 CO₂ 저장 컨소시엄(Midwest Geological Sequestration Consortium)에서는 일리노이즈주와 미시간주에 2011년부터 3년간 및 4년간에 걸쳐서 각각 백만톤의 CO₂를 저장하고자 계획하고 있다. 이외에도 ‘Plains CO₂ Reduction Partnership’ 프로그램으로 연간 2.2백만톤 및 백만톤 이상의 CO₂를 저장하는 두 개의 프로젝트가 2012년 및 2013년부터 시작될 예정

으로 있고, ‘Southeast Regional CS Partnership’ 프로그램으로 2009년부터 하루 432톤을 주입하는 프로젝트가 시작되었으며 또한 2011년부터 3년간에 걸쳐서 총 30만톤을 저장하고자 하는 프로젝트를 추진하고 있다.

NETL의 경우 가스화 기술의 상용화를 앞당기기 위한 하나의 방안으로서 다상 유동(Multiphase flow) 해석을 위한 소프트웨어의 개발에도 관심을 가지고 있다. 기존의 CFD 코드로는 반응을 포함한 다상유동 해석에 대한 많은 제약이 있다. 이에 고속이동층(Transport) 가스화, 수소 가스화(Hydrogasification), 매체순환 반응(Chemical Looping), CO₂ 흡수 반응 등의 해석이 가능한 코드를 개발하고자 시도하고 있다 [17]. 참고로 순환되는 기체의 양에 비하여 고체 입자의 양이 많으면서 반응을 동반하는 분야의 해석은 기존의 상업용 CFD 코드로는 해석 자체가 불가능하거나 일부 영역에서는 해석이 가능하지만 슈퍼컴퓨터를 이용하여도 많은 계산 시간이 소요되는 특성이 있다. 이러한 노력의 중심에 C3M(Carbonaceous Chemistry for Computational Modeling) 소프트웨어가 자리를 차지하고 있다. C3M을 중심으로 공정해석 코드인 ASPEN, CFD 코드인 Fluent, CFD를 기반으로 하여 밀집 유동 입자 반응 해석을 강화하였다고 하는 Baracuda, DOE 개발 다상 유동 코드인 MFIX 등과의 연계를 통하여 NETL의 실험 결과 등을 활용하여 모델의 보완 및 검증 등에 활용하고 있다.

NETL은 이러한 CFD 도구들을 활용하여 KBR의 고속이동층 가스화기에 대한 해석을 수행하여 장치를

Fig. 8. Milestone of RCSP program of USA and potential CO₂ storage capacity [16].

Fig. 9. Results of CFD analysis for transport gasifier and comparison of CFD analysis with experiment for cold flow of chemical looping reactor [17].

보완하여 개조할 수 있는 현상들을 확인하였다. 이외에도 NETL에서는 C3M, MFIX 및 Fluent 등 3개의 소프트웨어를 연계하여 Hydrogasification을 해석하였고, Baracuda 코드를 활용하여 매체순환유동 시스템의 냉간유동장 해석을 수행하였으며, 반응을 포함한 유동장 해석을 시도하고 있다. Fig. 9는 고속이동층 가스화기의 반응장 유동 해석 결과 및 매체순환 반응기의 냉간유동장 해석 결과와 실험결과와의 비교를 각각 보여 주고 있다.

이외에도 NETL에서는 동적 시뮬레이터 연구 및 Process-CFD 연계 해석 등에 대한 연구를 수행하고 있다. 현재의 상업용 코드로는 해결이 불가능한 여러 가지 현상들의 해석이 가능한 코드들이 개발되어 간다는 점은 고무적이나, 또한 이러한 점은 현재로서는 기존의 상업용 코드로는 해석이 상당히 어렵다는 점을 역설적으로 잘 보여주고 있음을 참고하여 국내의 연구진들이 해석에 임하여야 함을 잘 보여주고 있다고 판단된다.

3. 유럽의 기술 개발 및 시장 전개 동향

3-1. Shell

Shell사는 1993년에 네덜란드의 Buggnem에 2,000 톤/일급의 가스화기를 적용하여 가장 먼저 250 MWe 급의 실증용 IGCC 플랜트의 가동을 시작한 석탄가스화 기술의 선두주자이다. 미분탄의 건식 공급, 멤브레인 벽을 채택한 가스화 기술을 보유하고 있으며 현

재 전세계적으로 가장 많은 상업용 가스화기 실적을 보유하고 있다. 이번 컨퍼런스에서는 석탄가스화 기술보다는 중질잔사유(Heavy Residue Oil), Pet Coke, 유사(Oil Sand) 등의 가스화 기술을 주로 소개하였는데, 최근 기술 개발 방향의 개념의 하나로서 ‘Converting Bottom of the Barrel into Valuable Products’라는 개념을 주된 내용으로 설정하였다 [18]. 석탄 가스화에는 멤브레인 가스화기를 주력 기술로 개발하고 있지만, Heavy Residue 가스화에는 내화재 가스화기를 적용하고 있다. 이러한 개념은 후술할 Siemens 가스화기의 개념과도 동일한데, 액체 연료를 사용할 경우에는 내화재의 손상이 적으므로 상대적으로 설계 및 제작이 용이하고 건설비가 낮은 내화재 가스화기를 적용하는 것이 유리하기 때문이다. 이러한 사실로부터 멤브레인 가스화기를 적용하여 석탄을 연료로 사용할 경우에 슬랙에 의한 손상을 막고자 하는 Shell사와 Siemens사의 기술개발 방향을 엿볼 수 있다. 이외에도 유사(Oil Sand)의 가스화와 GTL(Gas to Liquid) 프로젝트(Pearl GTL, Qatar) 등에도 지속적인 관심을 기울이고 있다.

석탄가스화로는 주로 중국에서 진행되고 있는 실제 플랜트에서의 운전현황 및 이용률 등을 소개하고 있는데, 8개의 플랜트 모두 연간 이용률이 85%를 초과하였고 이중 4개의 플랜트에서의 이용률이 90%를 상회하고 있음을 보여주고 있다 [19]. 내화재 가스화기의 경우 이렇게 상당히 높은 이용률을 확보하기가 어렵다는 점을 고려할 때에 대부분 멤브레인 벽을 이용한 가스화기라고 판단된다. 운전 자료 중의 하나로

Fig. 10. Availability of Shells's 8 gasifiers in China and the status of candle filter after 30 months operation [19].

Fig. 11. Process diagram of Shell's gasification system for upper and lower quenching [19].

서 고온·고압 캔들 필터의 수명이 30개월을 초과하였음을 보여주고 있으며 이는 세계에서 가장 오랜 시간 운전한 기록이라고 한다. Fig. 10에 Shell사가 중국에 설치한 8개의 가스화 플랜트의 이용률과 30개월 이상 사용한 필터의 상태를 함께 나타내었다.

Shell사의 초기 가스화 기술은 합성가스 재순환과 대류형 열교환에 의한 합성가스 냉각 시스템을 채택하였는데, 이번 컨퍼런스에서는 상부 급냉형 및 하부 급냉형 가스화 시스템을 소개하였다. 또한 가스화기의 석탄 처리용량을 계속 증가시키고 있으며, 최근에 진행할 예정으로 있는 호주 프로젝트(Coal to Urea 프로젝트로 판단됨)에는 4,000톤/일급의 가스화기를 공급할 계획으로 있다. Fig. 11에 상부 급냉형 및 하부 급냉형 가스화 시스템을 함께 나타내었다.

3-2. Uhde

Uhde사는 Prenflo Gasification, HTW Gasification, Koppers-Totzek Gasification 등의 기술로 100여개의

가스화기를 운전한 실적을 보유하고 있으며 최근에는 분류층 기술인 PSG(Prenflo Steam Generation) 기술과 PDQ(Prenflo Direct Quench) 기술을 주력으로 개발하고 있는데, 기술의 특징은 최대 1,200 MWth, 운전 압력 42 bar이다 [20]. 최근의 프로젝트로는 West Virginia주의 Mingo County에서 진행중인 Adams Fork Energy사의 TransGas 프로젝트인데, 2개의 PDQ 가스화기를 건설하여 18,000BPD의 가솔린을 생산하고자 하며, 2010년 10월에 EPC를 시작하였다. 중국에서는 Shanxi에 MTG(Methanol to Gasoline) JAM 프로젝트가 진행되었는데, 중국의 첫 번째 CTG(Coal to Gasoline) 프로젝트이며, 2009년에 가동을 시작하였다.

최근에는 바이오매스의 가스화에 대한 기술을 개발중인데 프랑스와 1.1억유로 이상의 연구비를 투입하여 7년 이상 Bio fuel 프로젝트를 진행하였다. 이 프로젝트에 Uhde사는 PDQ 가스화기를 적용하고자 하고 있으며, 스웨덴과는 유동층 가스화기인 HTW 가스화 기술을 이용하여 바이오매스로부터 메탄올을 생산하고 약

Fig. 12. PSG and PDQ gasifiers of Uhde and efficient decrease with respect to the proportion of WGS reaction [20,21].

간의 열을 주변에 공급하는 프로젝트를 구상하고 있다. HTW 기술을 채택한 상용급 CTM(Coal to Methanol) 프로젝트로서 독일의 Berrenrath에서 운전중인 140 MWth 플랜트를 소개하였는데, 현재까지 67,000시간을 운전하였으며 10년간의 이용률은 약 85%이고 최고 기록은 91%라고 한다. Fig. 12에 Uhde사의 PSG, PDQ 및 HTW 가스화기를 함께 나타내었는데, 2009년의 자사의 발표자료를 보면 PDQ의 경우 PSG에 비하여 건설비가 30% 이상 적게 들기 때문에 건설비의 감소가 직접 냉각에 의한 효율 감소를 충분히 상쇄할 수 있다고 하며, 특히 후단 공정에서 WGS 반응의 비중이 커질수록 효율 감소 비율이 상대적으로 줄어들기 때문에 PDQ가 유리하다고 주장하고 있는 등으로 기술 개발 및 사업화의 주력 방향을 PDQ로 설정한 분위기를 엿볼 수 있다 [21].

3-3. Siemens

2010년 현재 수천톤/일급의 Siemens사의 가스화기가 상업용으로 운전되고 있는 곳은 없는 곳으로 알고 있는데, 최근에는 시장 공략을 위하여 아주 적극적인 노력을 기울이는 것으로 판단되는 자료를 발표하였으며, 발표장의 지하에 설치된 전시장에 있는 직원들도 방문자들에게 아주 적극적으로 홍보하는 모습을 보여주었다. 현재 북미 및 중국에서 여러 개의 프로젝트를 진행 중이며 일부는 시운전을 시작한 것으로 보고하고 있다 [22]. 석탄가스화의 가장 큰 시장인 중국에서 4개의 프로젝트가 진행되고 있으며, 이중 NCPP I 프로젝트는 갈탄을 가스화하여 메탄올을 만들고 이 메탄올로 프로필렌을 생산하는 프로젝트인데(Fig.

13), Siemens사는 이 프로젝트에 5개의 SFG-500(각 500 MWth) 가스화기를 공급하여 현재 기계적 설치를 마친 상태이며 시운전을 시작하였다.

북미에서는 캐나다에서 진행 중인 하나의 프로젝트를 포함하여 총 5개의 프로젝트를 진행하고 있다. Security Energy Inc.사와 일리노이즈 주에 건설하고 있는 Decatur Gasification Plant에서는 10,000BPD 가솔린을 생산하고자 하는데 Siemens사는 이 프로젝트에 SFG-500 가스화기 2개를 공급하였다. Teneska Inc.사와의 Taylorville Energy 센터의 50% 이상의 CCS를 채택한 IGCC 프로젝트에는 2개의 SFG-500 가스화기를 공급하는 것으로 계획하고 있다. Summit Power Group과 추진하는 Texas Clean Energy 프로젝트는 400 MWe 복합생산(Poly-generation) 프로젝트이며, 역시 SFG-500 가스화기를 공급하며, 90% Carbon Capture를 목표로 하고 있으며, 포집된 CO₂는 EOR에 사용할 예정이다. 이 프로젝트의 특기사항으로는 고순도의 수소를 연소시키는 가스터빈(SFCC6-5000F) 시스템을 채택하였다는 점이며 이를 위하여 수소 가스터빈 기술을 지속적으로 개발하고 있다.

Siemens사 기술의 주요한 특징으로서, 회재 함량이 2% 이상인 원료의 사용 시에 Cooling Screen(나선형 멤브레인 벽) 형식의 가스화기(Fig. 13)를 적용할 것을 추천하고 있으며, 회재 함량이 2% 이하인 원료를 사용할 경우에는 내회재 가스화기를 추천하고 있는 점 [22,23]은 Shell사의 개념과 동일하다. 대용량 가스터빈을 개발하는 회사이기도 하는 Siemens사는 터빈 개발의 방향으로 수소 터빈의 개발을 들고 있다. IGCC 시스템에 CCS를 적용할 경우 8~9%의 효율 감

Fig. 13. Status of China NCPP I project with Siemens gasifier and cooling screen(membrane wall) & refractory lined gasifiers of Siemens [22,23].

Fig. 14. Dry ash fixed bed gasifier of Lurgi and slagging fixed bed gasifier of BGL [26].

소가 예상되는데 이를 만회하기 위하여 Advanced H₂ Turbine을 개발함으로써 5% 정도의 효율 향상을 가져올 수 있는 기술 개발을 DOE의 프로그램으로 진행하고 있다.

3-4. Lurgi와 BGL

Lurgi사는 고정층 가스화 기술로서 회재를 건식으로 처리하는 가스화 기술을 보유하고 있으며, 2009년 현재 101개의 가스화기가 운전 중이며, 지금까지 알려진 대표적인 프로젝트로는 남아프리카공화국의 CTL 프로젝트를 들 수 있다. 1955년에 남아프리카공화국 Sasolburg에서 16개의 가스화기를 이용하여 액상 연료와 화학원료를 생산하기 시작하였는데 이 플랜트는

현재 석탄 자원을 모두 사용하여 천연가스를 원료로 이용하고 있다. 1979년에 동 나라의 Secunda에 80개의 Mark IV 가스화기를 설치하여 $80 \times 10^6 \text{ Nm}^3/\text{day}$ 의 합성가스를 생산하여 액상 연료와 화학원료를 생산하고 있다 [24].

최근 진행 중인 프로젝트로는 중국의 Shenhua와 Datang에 건설중인 MTP(Methanol to Propylene) 프로젝트를 들 수 있는데, 각 프로젝트에서 연간 197만 톤/년의 석탄을 사용하여 Polypropylene 47만톤/년, 가솔린 18.5만톤/년, LPG 4.1만톤/년의 각종 화학원료를 생산하고자 하며 곧 가동을 시작할 예정이다 [25]. 이외에도 인도의 뉴델리에 35~40%의 고회분 석탄을 사용하여 제철 공정에 적용하는 프로젝트는 2011년

에 가동을 시작할 예정인데, 이 회사는 특히 고회분 석탄의 처리에 자신감을 보이고 있다. Lurgi사의 현재 주력 가스화기는 Mark IV인데, 보다 처리 용량이 큰 가스화기의 개발이 기술개발의 방향이라고 한다.

BGL 가스화기는 Lurgi 가스화기를 보완한 슬래깅 형식의 고정층 가스화기로서 1975년도에 300톤/일 가스화기 운전을 시작으로 현재까지 총 3개의 가스화기를 건설하였으며, 현재 시점에 운전 중인 가스화기는 BGL 3로서 가스화기 하나의 처리 용량은 약 600톤/일이다. 현재 중국에서 2개의 프로젝트와 인도에서 하나의 프로젝트가 진행 중이므로, BGL 가스화기의 완료 또는 건설 중인 실적은 총 6기이다. 이중 중국의 Hulunbeier 프로젝트는 2011년에 가동을 시작할 예정이고, 2+1(2개 가동, 하나 예비) BGL 3 가스화기로 약 1250톤/일의 갈탄을 투입하여 119,000 Nm³/hr의 합성가스를 생산하고자 하고 있다. 중국에서 진행 중인 또 하나의 프로젝트는 중국의 Yituo 프로젝트인데, 1+1 BGL 가스화기로 약 600톤/일의 고급탄(Hard Coal)을 투입하여 43,000 Nm³/hr의 합성가스를 생산하는 것이 목적인 프로젝트이며 2012년에 가동 시작을 목표로 하고 있다 [26].

미국에서는 SHED사를 고객으로 하여, 수소 생산(4.7M Nm³/day)과 EOR을 위하여, 예비 가스화기 없이 3개의 가스화기를 이용하여(3+0 BGL 가스화기) 5,700톤/일(as received)의 갈탄을 처리하고자 타당성 조사를 하고 있다. 다음의 Fig. 14에 BGL사와 Lurgi사의 가스화기를 비교하여 함께 나타내었다.

4. 일본의 기술 개발 및 시장 전개 동향

일본의 MHI(미쓰비시중공업)사는 CRIEPI(일본전력중앙연구소)와 공동으로 공기공급형 가스화기를 개발하여 왔으며 1984년부터 2톤/일 파일롯 플랜트를 이용한 연구를 수행하였으며, 1990년 초반에서 중반까지 200톤/일 가스화기를 이용한 연구개발을 수행하였다. 2톤/일급 가스화 기술을 100배로 격상(Scale-up)함에 따라 적지 않은 시행착오를 한 것으로 알려지고 있으나, 결국 1,700톤/일 용량의 가스화기를 건설하여 2007년에 Nakaso에서 상업용급 IGCC 플랜트의 운전을 시작하였다 [27]. 이 플랜트의 석탄처리 용량이나 발전량은 상업용급이지만, MHI사는 이 플랜트에서 합성가스의 10% 또는 100%를 처리하여 포집된 CO₂를 Nakaso에서 70 km 떨어진 가스전에 저장하는 CCS 프

로젝트에 활용하고자 하는 등으로 상업용 플랜트라기 보다는 실질적으로는 실증 플랜트로 활용하고 있다 [28]. 2009년도에 5,000시간 이상 운전을 수행하였으며, 2010년도에는 미국의 PRB 석탄과 인도네시아의 석탄 등을 활용하여 탄종에 따른 유연성 테스트를 수행하였다. 플랜트의 순발전 효율은 LHV 기준으로 42.9% (HHV 기준 약 41%) 수준이며 99.9% 이상의 탄소전환율과 1ppm 이하의 SOx 배출 등의 우수한 특성을 보이고 있다 [29]. 장기적으로는 자사에서 개발 중인 1,700°C 급의 가스터빈과 연계하여 IGCC 시스템의 효율을 더욱 높이겠다는 전략으로 기술 개발을 추진하고 있다.

동시에 Nagasaki에 24톤/일급의 파일롯 플랜트를 이용하여 공기공급형 및 산소공급형의 가스화기에 대한 연구를 계속 진행하였으며 [30], 이러한 기술 개발 경험을 바탕으로 3,600톤/일의 석탄을 처리하여 500 MWe급의 IGCC 플랜트의 상용화를 추진 중에 있는데, 이와 같은 MHI사의 기술개발 이력을 Fig. 15에 나타내었다. MHI사는 공기공급형 가스화 기술을 IGCC 플랜트에 적용하고 산소공급형 가스화 기술을 CTL이나 SNG 등의 합성연료 또는 화학원료 생산에 적용한다는 기술개발 방향을 설정하고 있으며, 복합생산(Polygeneration) 플랜트에서는 산소공급형과 공기공급형을 동시에 채택하는 경우를 고려하고 있다. 참고로, MHI사의 공기공급형 가스화 기술의 경우, 실제로는 공기에 산소를 추가한 산소부화형 산화제를 공급하는 것으로 알려지고 있으며, 산화제에서 산소의 농도는 약 30%인 것으로 알려지고 있다 [31].

MHI사는 호주의 ZeroGen 프로젝트에 참여하고 있는데, ZeroGen 프로젝트에서는 호주의 고급탄을 사용하여 530 MWe(gross)의 전력을 생산하고 65~90%의 CO₂를 포집하여 연간 2~3백만톤의 CO₂를 저장한다는 계획으로 추진중이며, 2010년 6월에 모든 검토를 마쳤고 2011년부터 FEED를 시작하여 2015년에 가동을 시작할 예정이다. MHI사에서는 Fig. 15에 나타난 바와 같이 이 프로젝트에 가스화기, 가스터빈 및 증기터빈 등의 대부분의 주요 기술을 호주에 공급하고 있다 [28]. 4개의 석탄을 대상으로 하여 MHI사의 공기공급형 가스화기에의 적용성을 평가하고 있으며, 24톤/일 파일롯 플랜트를 활용하여 슬랙 배출 특성 실험을 수행하여 안정적인 배출을 확인하였다. 이와 같은 점으로부터 수십~수백 톤/일급의 테스트베드(test bed)를 보유함으로써 기술 개발에 활용함과 동

Fig. 15. Technology development history of MHI and MHI's supply for ZeroGen project of Australia [27,28].

Fig. 16. Entrained flow gasifier of Hitachi and fluidized bed gasifier for low rank coal gasification of IHI [32,33].

시에 상업화 시점에서는 설계탄의 적합성의 파악에 활용하는 등의 기술개발 전략은 우리나라에서도 충분히 참고할 만하다고 판단된다.

일본에서는 MHI사 이외에도 Hitachi사에서 EAGLE (coal Energy Application for Gas, Liquid & Electricity) 프로젝트의 일환으로 150톤/일 가스화기를 2001년부터 운전하였으며, IGCC+CCS의 상업화를 위하여 170 MWe급 실증용 IGCC 플랜트를 건설하고자 계획하고 있다 [32]. EAGLE 프로젝트에서 가스화 기술의 궁극적 목표는 석탄으로부터 연료전지에 적합한 합성가스를 생산하는 것이다. 건식 공급 및 산소공급형 가스화기를 채택하였고, 상부와 하부 버너에 각각 산소와 미분탄을 선회력을 부여하며 공급하고, 하부에 고온 영역을 유지하여 회재를 슬래크로 처리하는 방식의 기술을 채택하였다(Fig. 16).

IHI사는 유동층 형식의 TIGAR(Twin IHI Gasifier) 가스화기를 개발하고 있는데, 연소기와 가스화기로 구분된 두 개의 반응기를 이용하며, 연소기에는 공기를

공급하여 휘발분의 연소 반응을 유도하고, 가스화기에서는 미반응 좌를 수증기를 이용하여 가스화하는 방식을 채택하고 있다. 2005년부터 6톤/일 규모의 파일롯 플랜트에서 갈탄에 대한 최적화 연구를 수행하였으며, 또한 인도네시아에서 2010년부터 50톤/일 플랜트의 설계를 진행하고 있다. 인도네시아 프로젝트에서는 2014년부터 연료 또는 화학원료 생산용 상업용 플랜트의 설계를 진행하려고 계획 중이며, 주로 아역청탄 및 갈탄 등의 저급탄을 활용할 계획으로 기술 개발을 추진 중이다 [33]. Fig. 16에 Hitachi사의 산소공급형 분류층 가스화기와 IHI사의 유동층 TIGAR 가스화기를 함께 나타내었다.

5. 중국의 기술 개발 및 시장 전개 동향

상기와 같은 자료로부터, ‘중국 시장을 제외하면 각 메이저 가스화 기술 보유 업체들의 발표 자료를 만들 수 없다’고 할 수 있을 정도로 중국의 가스화 시장의

성장은 놀라울 정도이다. 이와 같이 메이저 가스화기 업체들의 중국 시장 공략이 활발하지만 중국 자체로도 ECUST(East China University of Science and Technology)에서 가스화기 개발이 적극적으로 진행되고 있다. 현재까지 7개의 프로젝트를 통하여 16개의 가스화기가 운전 중이며, 이중 5개의 가스화기가 2,000톤/일 이상이라고 한다. 또한 현재 추가로 총 17개의 프로젝트를 통하여 총 45개(운전 중 16개 포함)의 가스화기를 건설 중인데, 최대 용량은 2,200톤/일이고 모두 슬러리 공급 방식을 채택하고 있다 [34]. 운전 중인 여러 개의 프로젝트에서의 성능을 소개하고 있는데, 대부분의 경우 $\text{CO} + \text{H}_2$ 함량이 80%~90% 이상의 수준이며 슬랙에서 가연분이 5% 이하이며 최대 운전 압력은 약 65기압이라고 발표하고 있다.

슬러리 공급 방식을 이용하여 대용량(2,000톤/일 이상) 가스화기를 건설함과 동시에 건식 공급 방식에 대한 기술 개발을 2007년부터 진행하고 있는데, 파일롯 플랜트 용량은 20~30톤/일이고 운전 압력은 20~25기압 수준이다. 수관벽(Water Wall) 가스화기를 채택하였고, CO+H₂가 90%(dry basis) 수준인 합성가스를 생산하고 있다. 또한 내몽고에 건식 공급 방식, 40기압 운전 및 1,200톤/일 용량의 두 개의 가스화기를 채택한 실증 플랜트를 건설하고 있는데, 2010년에 PDP (Process Design Package) 설계를 완료하였고 2011년에 운전을 시작할 예정으로 있다. Fig. 17에 ECUST의 가스화기를 적용하여 2010년 현재 운전 중 또는 건설 중인 프로젝트의 현황과 최근 개발 중인 건식 공급 방식의 1,200톤/일 가스화기 두 개를 채택한 실증 플랜트의 개략도를 함께 나타내었다.

ECUST가 습식 공급 가스화 기술을 주력으로 개발하여 온 반면에 중국의 TPRI(Thermal Power Research Institute)는 건식 가스화 기술을 주력으로 기술 개발을 진행하여 왔다. 멤브레인 벽을 적용하였으며, IGCC에의 적용을 위하여 합성가스 냉각기를 설치하는 가스화 기술(SGC, Syngas Cooler)과 수소 또는 메탄올 등의 화학원료 생산에의 적용을 위하여 직접 냉각하는 기술(SGQ, Syngas Quench) 두 가지 기술을 동시에 개발하고 있다. 2단 공급 및 상향류 형식의 가스화기를 채택하였으며, 1단에서는 미분탄과 산화제(산소와 수증기)를 함께 공급하여 고온에서 슬래깅 운전을 하며, 2단에서는 산소를 공급하지 않고 전체 공급량의 25% 이하의 미분탄과 수증기를 공급하는 화학적 냉각(Chemical Quenching) 방법을 적용하고 있다 [35]. 이와 같은 개념은 위에서 언급한 ConocoPhilips사의 기술과 동일한 개념이다. 이와 같은 기술에 의하여 가스화기 출구 온도를 약 800℃로 유지함으로써 고온의 합성가스의 현열을 최대한 사용하여 냉가스효율을 상승시키고자 시도하고 있다. 이와 같이 2단 공급 방식을 택할 경우에는 합성가스의 현열을 적절하게 활용함으로써 산소의 소모를 줄이면서도 냉가스효율을 증가시킬 수 있지만 흡열반응에 의하여 온도가 낮은 2단 영역으로 분사한 미분탄의 탄소전환율이 낮은 것이 문제점이 될 수 있다. 그럼에도 불구하고 TPRI 가스화기에서 탄소전환율이 99%가 넘고 냉가스효율도 83%를 초과할 수 있다고 주장하고 있다 [36]. ConocoPhilips사의 경우 2단에서 분사한 미분탄의 탄소전환율이 낮은 문제점을 극복하기 위하여 좌를 재순환시키는 방법을 적용하였으며, 마찬가지로 TPRI 가스화기의 경

Fig. 18. GreenGen project site and bird's-eye view of Good Spring project of USA, both with TPRI gasifier [35].

우에도 최악의 재순환 시스템을 채택하였기 때문에 99% 이상의 높은 탄소전환율이 가능할 수 있다고 판단된다. 자국의 기술로 IGCC 기술의 자립을 추진하고 있는 중국의 GreenGen 프로젝트에서 2,000톤/일급의 TPRI 가스화기를 채택하였으며 2010년 현재 공정의 80% 이상을 건설하였다. 이외에도 1,000톤/일의 역청탄을 사용하여 연간 30만톤의 메탄올을 생산하는 플랜트를 2011년에 가동하고 3,000톤/일의 갈탄을 사용하여 연간 60만톤의 메탄올을 생산하는 플랜트를 2012년에 가동할 예정으로 있는 등으로 대형 가스화기에 대한 운전도 곧 시작할 예정으로 있다. 한 가지 흥미로운 사실은 미국의 펜실바니아주(Good Spring)에서 계획하고 있는 270 MWe IGCC 플랜트에 TPRI의 2,000톤/일급 가스화기를 채택하였다는 점이다. 2010년에 모든 승인을 득하였다고 하며 2014년에 가동 시작을 목표로 추진 중인데, 만약 현실화된다면 가스화기 후발 주자인 중국 기술이 선발 주자인 미국에서 활용되는 결과이니 상당히 빠른 속도의 기술개발이라고 할 수 있겠다. Fig. 18에 중국 GreenGen 프로젝트 조감도 및 미국에서 추진 중인 Good Spring 프로젝트 조감도를 함께 나타내었다.

중국은 2000년 이전까지 가스화 기술의 후진국이었다고 할 수 있는데, 단기간의 대형 투자를 통하여 2010년 현재 가스화 기술 선진국과 유사한 수준의 기술을 획득하게 된 점은 국내의 가스화 기술 개발의 추진 전략에 있어서 시사하는 바가 크다고 생각된다.

6. 연료 및 원료 다변화 동향

6-1. 합성천연가스 활용 필요성 및 개발 동향

원유의 수급 변동성에 못지않게 천연가스의 수급 변동성에 대비하기 위한 합성천연가스(SNG) 생산에

대한 관심도 비교적 높다고 판단되었다. SFA Pacific사의 자료에 의하면 가스화를 통하여 SNG를 생산하고자 하는 이유는 ‘천연가스의 불확실한 공급 및 가격’ 때문이라고 한다 [37]. Fig. 19에서 알 수 있는 바와 같이 2000년대 이후에도 천연가스의 최대 가격은 최소 가격의 5배 이상일 정도로 가격의 변동성이 크다. 현재 천연가스 가격은 원유 가격과 연동되어 있는데, 일본과 한국의 경우, \$75/bbl-Oil=\$13/MMBtu-NG로 되어 있다. 일본의 경우 2008년 초에는 약 \$25/MMBtu 수준의 높은 가격이었을 정도로 원유의 수급 불균형과 천연가스의 수급 불균형은 깊은 상관성을 지니고 있기 때문이다.

현재 운영 중인 오래된 석탄 발전소를 합성천연가스를 이용한 Repowering을 통하여 CO₂ 배출을 줄이고 CCS 기술을 채택함으로써 최적화를 이룰 수 있는데, 특히 미국은 오래된 석탄 화력 발전소를 운영하여야 하므로 CO₂의 대폭적인 감소를 위해서는 SNG를 활용하는 NGCC 플랜트의 사용을 고려하여야 한다. 아시아의 저급탄을 활용하여 SNG를 생산하는 것은 원유 가격이 오를 때에 천연가스 가격도 아주 많이 오르는 것에 대한 방어막이 될 수 있다고 보고 있다.

한편 ASPEN Environmental Group의 자료에 의하면, CO₂ 저감을 위하여 천연가스 사용이 필요하지만 석탄 사용 플랜트를 천연가스 사용 플랜트로 바꾸는 것에 대한 어려움이 있음을 알 수 있다. 현재 미국의 석탄 사용 발전소를 천연가스 사용 플랜트로 바꾸기 위해서는 너무나 많은 천연가스가 필요하다고 한다. 즉, 335,000 MWe의 모든 석탄 발전소를 천연가스 발전소로 바꾼다면 연간 14.1 Trillion Cubic Feet 이상의 천연가스가 필요한데, 이는 현재 미국 사용량의 60%에 해당하는 양이다 [38]. 또한 공급 배관(Pipeline) 및 저장소도 충분하지 않으므로 천연가스로 석탄을 대체하

Fig. 19. History of natural gas price change [37].

Fig. 20. SNG production process of POSCO Gwangyang project and optimization concept for SNG production with ConocoPhillips's E-Gas Technology [2].

기에도 단순하지 않은 상황이다. 공급 배관의 경우 주(state)간의 협의도 필요하고 태풍에 대한 영향도 고려하여야 하는 등의 복합적으로 고려하여야 할 사항이 많다고 한다. 그러나 1985년 이후 미국의 천연가스 사용량이 생산량을 초과하였고, 반면에 CCS 기술을 적용하지 않고 탄소를 감소하는 방안으로서 천연가스 사용이 가장 확실한 대안이므로 천연가스 사용량에 대한 요구는 계속 증가하고 있다. 이에 매장량이 풍부한 셰일(Shale)을 활용하는 방안도 고려할 수 있다고 보고 있다.

위에서 간략하게 언급한 바와 같이, 국내에서도 SNG에 대한 관심으로 인하여 POSCO에서 ConocoPhillips사의 가스화 기술을 활용하여 SNG를 생산하는 사업이 시작되었다. POSCO 광양 프로젝트는 5,500톤/일

아역청탄을 투입하여 년산 50만톤의 SNG를 생산하여, 이를 발전사업과 제철 사업에 활용하고자 하는 프로젝트로서, 이 프로젝트는 부지 정비를 2011년까지 마치고 2013년까지 건설을 완료할 예정으로 진행되고 있다 [2]. Jacobs사에서 FEED(Front End Engineering & Design)를 수행하고, ConocoPhillips사에서 가스화기를 제공하며, Linde사에서 가스정제 설비인 Rectisol 공정을 제공하고, Haldor Topsoe사에서 메탄화 공정인 TREMP 기술을 제공하며 이를 POSCO E&C(포스코건설)에서 제작을 하는 것으로 컨소시엄이 구성되어 있다. Fig. 20은 POSCO SNG 프로젝트의 공정도 및 SNG 생산 공정에서의 효율 향상을 위하여 각 장치에 선택한 기술을 간략하게 나타내고 있다.

6-2. 저급탄 활용 동향

최근 전 세계적으로 저급탄, 특히 갈탄에 대한 관심이 높아지고 있는데, 이는 갈탄과 아역청탄을 합한 저급탄의 매장량이 고급탄의 매장량과 유사할 정도로 풍부함에도 불구하고 아직 활용이 부족하여 개발이 덜되었고, 무엇보다도 저가이며 Fig. 21에 나타난 바와 같이 유가의 변동에 민감하지 않은 특성을 지녔기 때문이다 [39].

SNC Lavalin International사의 자료에 의하면 특히 유럽에서 갈탄 활용 방안에 관하여 많은 관심을 기울이고 있다. 유럽의 갈탄 생산량은 연간 6.57억톤 정도로서, 유럽의 갈탄 생산량은 고급탄(Hard Coal) 생산량에 버금가는 정도이다 [40]. 유럽의 경우 채굴하는 갈탄의 대부분(90% 이상)을 발전소에서 사용하고 있으며, 그리스의 경우는 일부를 수입하여 자국의 생산량보다 많은 양을 발전소에서 사용하고 있다. 갈탄의 연료로서의 특징으로서, 고회분 및 고수분, 낮은

발열량 등의 불리한 요인이 있지만, 유럽의 관점에서 보면 여러 나라에서 생산되므로(Fig. 22) 에너지 독립의 특징을 지니고 있고, 수송거리가 짧고 무엇보다도 가격이 싸다는 장점이 있다. 그리고 갈탄의 가스화 기술을 North Dakota의 경우를 예를 들어 입증된 기술로 보고 있다.

이러한 갈탄 사용의 필요성에 의하여 우크라이나에서는 갈탄을 사용하는 KGP(Komsomolsk Gasification Project) 프로젝트를 진행하고 있다 [41]. KGP 프로젝트에서는 탄광과의 거리가 50 km 이내라는 점을 가장 중요한 요인으로 보고 플랜트를 건설할 장소를 선정하였다. 이 프로젝트에서는 수분 함량이 약 50%인 갈탄(Brown coal)을 3,900톤/일 용량으로 처리하여 약 100,000 Nm³/hr의 합성가스를 생산하여 발전과 제철 산업에 활용하고자 한다. Siemens 가스화기를 채택하였으며, 2011년 FEED를 시작하고, 2012년 건설을 시작하여 2014년말에 가동을 시작할 예정으

Fig. 21. Coal resources with the proportion of high rank and low rank coal and coal price change with respect to the change of crude oil price [39].

Fig. 22. Coal reserves in Europe including lignite(brown color) and weighting factor for technology selection for the case of KGP project.

Criterion	Siemens Score 1-5	Weighing Factor 1-5	Total Score
NPV/IRR	3	5	15
Maturity	2	3	6
Availability	3	3	9
Planning	4	2	8
Construction	4	1	4
Efficiency	4	3	12
Environmental Impact	2	3	6
Fuel Flexibility	4	2	8
Complexity	4	3	12
GRAND TOTAL			80

로 있다. Fig. 22에 유럽의 탄종별 석탄 매장량 분포와 우크라이나의 프로젝트에서 가스화 기술의 선택시에 항목별 가중치를 나타내었다. 최종 선택시의 점수 자체는 우크라이나의 주관적 판단으로 보더라도 각 항목별의 가중치는 참고할 수 있을 것으로 판단된다.

위에서 이미 언급한 ConocoPhilips사의 E-STR 가스화 기술도 자료의 제목에서 알 수 있듯이 [4], 갈탄의 사용에 많은 비중을 두고 있다. SES사의 경우 유동층 공정인 U-GAS 기술을 활용하여 중국의 내몽고 갈탄에 대한 테스트를 수행하였는데, 수분을 12% 정도로 건조시켜 투입한 실험에서 79%의 냉가스효율과 96%의 탄소전환율을 확보하였다. 이후 수분을 1.8% 수준으로 건조시켜 투입함으로써 82%의 냉가스 효율과 99% 이상의 탄소전환율을 확보할 수 있음을 보여줌으로써 자사 기술의 저급탄 활용 가능성에 대하여 강조를 하고 있다 [42].

국내의 POSCO 광양 프로젝트에서는 아역청탄을 활용하고자 하며, SK에너지(주)에서는 화확원료 또는 청정연료 생산을 목적으로 갈탄 가스화 기술을 확보하고자 하고 있고, 일부 화력 발전소에서 아역청탄을 혼소하는 등의 상황을 종합하여 판단할 때에 국내에서도 저급탄, 특히 갈탄의 가스화 또는 연소 기술의 개발이 시급하다고 판단된다. 특히 저급탄 활용 기술에서 플랜트의 가격 경쟁력이 문제가 되므로 이 부분을 해결할 수 있는 기술의 개발이 필요하다고 판단된다.

7. 결 론

석탄의 에너지원으로서의 중요성에 의하여 여러 기술 선진국에서는 석탄가스화 기술의 개발 및 상업화를 위한 다양한 노력을 기울이고 있다. 특히 중국의 경우 불과 십수년 전에 기술개발을 시작하여 집중적으로 투자함으로써 현재는 2,000톤/일 이상 가스화기의 개발을 완료하고 상업화 실적을 보유할 정도의 집중력을 보여주고 있다. 우리나라는 중국보다 석탄 가스화 기술 개발을 먼저 시작하여 저온 및 고온 탈황기술, 전산해석 기술 등의 몇 가지 요소기술에 대해서 세계적인 수준의 기술을 확보하였으며, 또한 수 톤/일급의 석탄가스화 시스템에서 많은 장비 및 체계 등을 국산으로 사용할 수 있도록 하는 등의 성과를 확보하였다. 그러나 소규모 연구개발을 지속하여 온 특성으로 인하여 2011년 현재 20톤/일급의 석탄 가스화기의 설계 및 건설을 포함한 연구가 시작될 정

도로 플랜트 규모의 대형화 관점에서는 아주 부족한 상황이다. 에너지의 대부분을 수입에 의존하고 있는 우리나라의 경우 다양한 신재생에너지의 개발이 추진되어야겠지만 향후 수십년간 가장 주요한 에너지의 하나로서 역할을 담당할 석탄의 활용 기술, 특히 석탄가스화 기술의 개발에 보다 많은 선택과 집중이 필요하다고 판단된다. 동시에 풍부한 매장량, 저가이면서도 원유가격의 변동에 민감하지 않은 특성을 지닌 저급탄의 활용 기술에도 관심을 기울일 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2009T100100675).

참고문헌

1. Amick, P., E-Gas™ Technology 2010 Outlook, Gasification Technology Conference, (2010).
2. Keeler, C., Lynch, T., POSCO Gwangyang Project for Substitute Natural Gas (SNG), Gasification Technology Conference, (2010).
3. Shi, C. et al., Modeling Coal Gasification with CFD and the Discrete Phase Method, 4th International Conference on Heat & Mass Transfer, Paris, France, (2005). (Fluent Technical Note TN287)
4. Tsang, A., E-STR™ Technology Development for Lignite Gasification, Gasification Technology Conference, (2010).
5. White, K., Projects on 3 Continents, Gasification Technology Conference, (2010).
6. Zuiker, J., GE Gasification Technology Update, Gasification Technology Conference, (2010).
7. Ariyapadi, S., KBR's Transport Gasifier - Technology Advancements & Recent Successes, Gasification Technology Conference, (2010).
8. Ariyapadi S. et al., KBR's Transport Gasifier (TRIG™) - An Advanced Gasification Technology for SNG Production from Low-Rank Coals, 25th Annual International Pittsburgh Coal Conference, (2008).
9. Rush, R., Overview of the Kemper County IGCC Project Using Transport Integrated Gasification (TRIG™), Gasification Technology Conference, (2010).
10. Darby, A., Compact Gasification Development and Test Status, Gasification Technology Conference, (2010).
11. PWR Gasifier Peer Review Report, www.netl.doe.gov, (2006).

12. Mollot, D., Overview of the DOE Industrial Carbon Capture and Storage Program, Gasification Technology Conference, (2010).
13. Schoff, R., Pathways to Improved IGCC Performance and Economics with CO₂ Capture & Storage, Gasification Technology Conference, (2010).
14. Steele, R., Ion Transport Membrane (ITM) Technology for Lower-Cost Oxygen Production, Gasification Technology Conference, (2010).
15. Ramgen CO₂ Compressor, www.ramgen.com
16. Rodosta, T., Sequestration Program Overview, Gasification Technology Conference, (2010).
17. Guenther, C. et al., Accelerating Commercialization and Deployment of Advanced Gasification Technology Through Multiphase Modeling, Gasification Technology Conference, (2010).
18. Mak, M., The Merits of Heavy Residue Gasification in Today's World, Gasification Technology Conference, (2010).
19. Volk, J., Shell Coal Gasification, Gasification Technology Conference, (2010).
20. Radtke, K., Uhde Biomass and Coal Gasification Applying Fluidized Bed and Entrained Flow Gasification, Gasification Technology Conference, (2010).
21. Radtke, K., PRENFLO PSG and PDQ - Update on Operation & Projects, Gasification Technology Conference, (2009).
22. Morehead, H., Siemens IGCC and Gasification Update, Gasification Technology Conference, (2010).
23. Morehead, H., Siemens Gasification and IGCC Update, Gasification Technology Conference, (2008).
24. Weiss, M., Tuma, O., A New Name, But a Well Proven Technology - Back to Lurgi, Gasification Technology Conference, (2009).
25. Zanno P., Judas, F., Update on New Project and Design Developments With the Lurgi FBDB Gasification and Integrated Process Offer, Gasification Technology Conference, (2010).
26. Hirschfelder, H., Olschar, M., Further Developments and Commercial Progress of the BGL Gasification Technology, Gasification Technology Conference, (2010).
27. Sakamoto, K., Mitsubishi IGCC Project Updates, Gasification Technology Conference, (2009).
28. Ishii, H., Technical updates of the MHI air blown and oxygen blown gasifier, Gasification Technology Conference, (2010).
29. Watanabe, T., Results and estimations of the 5000 hour durability test at the Nakaso air blown IGCC plant, Gasification Technology Conference, (2010).
30. Fujii, T., Deployment of IGCC Technology with Carbon Capture, Sixth Annual Conference on Carbon Capture & Sequestration, (2007).
31. Watanabe, H., Recent researches & developments on coal gasification technologies in CRIEPI, KEPRI-CRIEPI Technical Exchange Meeting, Sep. (2008).
32. Making coal use compatible with measures to counter global warming, www.jppower.co.jp
33. Overview of Clean Coal Technology in Indonesia, www.senternovem.nl
34. Liu, H., OMB Gasification -Industrial Application Updates of Slurry Feeding & Developments of Dry Feeding, Gasification Technology Conference, (2010).
35. A Two-stages Pressurized Entrained Flow Gasification with Dry Feed, Site Presentation, May (2010).
36. Douglas, B., TPRI Technologies and our Projects Updates, Gasification Technology Conference, (2010).
37. Simbeck, D., Coal to SNG via Gasification : Efficiency, Environmental and Economic Benefits, Gasification Technology Conference, (2010).
38. Elder, C., Implications of Greater Reliance on Natural Gas for Electricity Generation, Gasification Technology Conference, (2010).
39. US EIA, World Energy Council, (2007).
40. Ksiazkiewicz, W., Mazurek, S., New Look at Lignite, Gasification Technology Conference, (2010).
41. Wolters, C., A strategic fuel switch from NG to local lignite, Gasification Technology Conference, (2010).
42. Thompson, C., Cleanly Unlocking the Value of Low Rank Coal, Gasification Technology Conference, (2010).