

김 대 성 한국서부발전 IGCC 발전처 차장 | e-mail : uijin0919@iwest.co.kr

고체연료인 석탄을 사용하기 편리한 기체나 액체연료로 변환하는 석탄가스화 기술은 1900년도 초 독일에서 필요한 연료의 많은 부분을 석탄을 이용해 사용했던 기술이며, 최근 석탄사용으로 인한 먼지, 황산화물 등 발생에 대해 상대적으로 친환경 설비인 IGCC 발전설비에 대해 소개하고자 한다.

## 현 황

세계적으로 전력 생산에서 석탄이 차지하는 비중은 현재 42%이며, 2035년에도 37%(EIA, 2011년)로 여전히 중요한 에너지원으로 사용될 것으로 전망된다. 석탄은 가채 매장량이 풍부하고 가격변동이 크지 않아 발전용 연료로 수요가 계속 증가될 것으로 예상되지만, 석탄연소에 따른 환경문제 즉 황산화물(SOx)과 질소산화물(NOx), 먼지 등과 온실가스 원인물질로 주목받고 있는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 배출이 타 발전원보다 상대적으로 많이 배출되는 문제점을 안고 있다.

이러한 석탄연소에 따른 해결방안 중 대안으로 고체인 석탄을 가스화하여 LNG와 같은 청정연료를 생산하고 그 가스연료로 발전할 수 있는 석탄가스화복합발전(IGCC) 기술개발을 위해 정부와 한국서부발전이 R&D과제로 2006년도에 기술개발을 추진하여 2016년 8월에 상업운전을 시작하였다. 현재 IGCC 플랜트는 미국, 네덜란드, 독일, 일본, 중국을 중심으로

자체기술을 개발하여 보유하고 있으나, 운전 Availability는 80~85%선 수준으로 이를 90% 이상으로 향상시키기 위하여 차세대 IGCC용 설비와 단위 공정 개발이 다양하게 추진되고 있다.

석탄가스화 복합발전은 석탄을 증기 및 산소와 함께 고온고압의 가스화기에서 반응시켜 일산화탄소(CO)와 수소(H<sub>2</sub>)가 주성분인 연료가스를 제조하여 가스터빈을 구동하며, 가스화 반응열과 가스터빈 배열을 이용하여 증기를 생산, 증기터빈 구동을 통해 전기를 생산하는 복합발전기술이다. 기존 미분탄 화력 발전방식에 비해 환경오염 물질인 황산화물과 질소산화물 및 먼지의 제거효율이 우수한 특성을 가지고 있으며, 특히 발전효율을 고려할 경우 동일한 전력생산을 위해 연료공급량이 줄어들기 때문에 지구온난화 가스인 이산화탄소의 배출량이 연료사용량 감소분 만큼 적다. 또한 석탄가스 중 일산화탄소는 수성가스화반응(WGS)<sup>1)</sup> 수소로 치환이 가능하고 이때 발생하는 고농도의 이산화탄소는 별도로 분리하여 제거가 가능하므로 향후 이산화탄소 저감에 용이한 기술

1) WGS(Water Gas Shift) : 일산화탄소와 물이 반응하여 수소와 이산화탄소로 변환하는 반응

2) ASU(Air Separation Unit) : 공기의 주성분인 질소와 산소를 분리하여 공정에 이용하는 설비

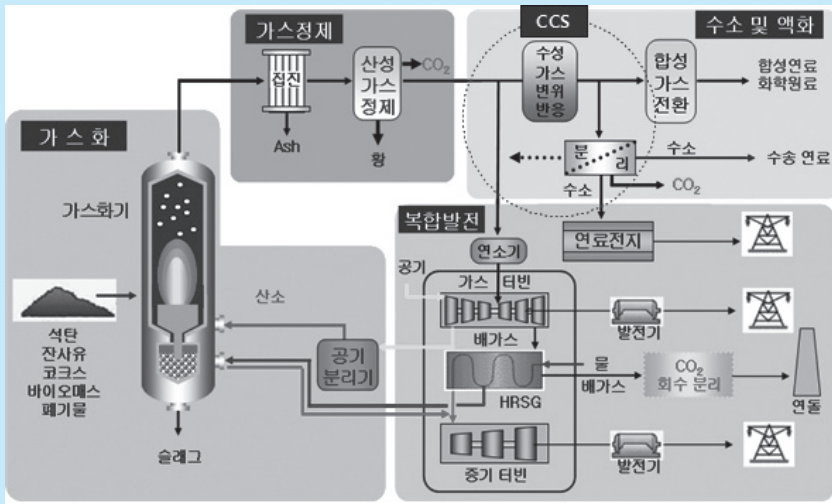


그림 1 가스화 기술 및 연계기술

로 각광받고 있다. 또한 생산된 합성가스는 가스터빈의 연료로 사용함은 물론 화학제품 원료 또는 연료전지의 연료로도 활용이 가능하다.

### 가스화기술 특성

석탄가스화복합발전은 크게 공기 중의 산소를 분리하는 산소플랜트(ASU)<sup>2)</sup>와 석탄을 가스화하여 합성가스를 생산, 정제하는 가스화 플랜트, 그리고 합성가스를 연료로 사용하여 전기를 생산하는 복합발전 플랜트로 구성된다. 가스화 플랜트는 석탄을 가스화기에 공급하는 연료공급설비와 석탄을 가스화 반응을 통해 합성가스를 생산하는 가스화기, 고온의 합성가스로부터 증기를 생산하는 가스 냉각기, 발생된 먼지를 제거하는 미립자 제거설비와 석탄에 함유되어 있는 황 성분에 의해 발생하는 황화수소(H<sub>2</sub>S)를 제거하는 산성가스 제거설비로 구성되어 있다. IGCC는 합성가스를 사용하여 가스터빈을 구동하고, 가스화할 때 발생하는 반응열과 가스터빈 배열을 이용하여 증기를 생산하여 증기터빈을 구동하는 복합발전 시스템으로, 발전효율이 기존 석탄화력에 비해 상대적

으로 높다.

그러나 산화제로 사용되는 산소 생산을 위한 소비동력이 높아 송전단 기준으로 약 42% 수준으로 유지되고 있다. 최근 고효율, 고용량 가스터빈의 개발이 활발히 추진되고 있고 조만간 IGCC에 적용될 것으로 예상되고 있으며, 고효율 가스터빈 채택 시에는 송전단 기준으로 44~45% 수준으로 높아질 전망이다. 또한 선진국을 중심으로 분리막을 이용한 산소분리기술 개발 및 고온 전식 정제설비의 개발이 추진되

고 있어 이러한 기술이 적용될 경우에는 최대 50% 수준으로 효율향상이 기대된다. 이에 따라 경제성 개선은 물론 온실가스인 CO<sub>2</sub>의 배출도 현격히 줄일 수 있을 것으로 전망된다.

또한 IGCC 발전소는 황산화물 및 먼지를 가스터빈 연소 전에 처리함에 따라 제거효율이 매우 높아 기존 미분탄 발전소 대비 약 10% 수준으로 매우 낮으며, 질소산화물은 가스터빈의 저NO<sub>x</sub> 시스템을 통하여 별도 저감설비 없이 기존 발전소의 20~30% 수준으로 유지가 가능하다. 특히 사용한 증기의 냉각을 위해 이용되는 해수의 온배수가 어패류의 생태변화를 야기하고 있는데 IGCC는 총 발전량에 대한 증기터빈 발전량의 비율이 낮기 때문에 온배수의 발생량을 저감할 수 있는 등 환경성이 매우 우수하다. 연료사용 측면에서 IGCC는 사용연료로 석탄뿐만 아니라 증유, 오리멸전, 전사유 및 바이오매스 등 다양한 원료를 사용할 수 있고, 특히 최근 국내 도입량이 확대되고 있는 수분함량이 높은 갈탄이나, 회분의 용점이 낮은 탄 등 저급탄도 사용할 수 있어 연료사용의 유연성이 매우 높다.

## 가스화기술 동향

최근 석탄가스화는 IGCC와 이산화탄소 포집, 원유채굴활용(EOR: Enhanced Oil Recovery), SNG(Synthetic Natural Gas), 고부가가치 화학 원료 생산이 포함된 Poly-generation 프로젝트로 진화하는 추세이다. 미국은 CCS 중 현재 경제성이 있는 분야는 원유나 천연가스 채굴에 CO<sub>2</sub>를 활용하는 EOR이 가장 적정하다고 판단하고 있으며 자국의 낮은 천연가스 가격에도 불구하고 EOR이 연

계되는 석탄 IGCC는 경제성이 있다고 판단하고 있다. 중국은 정부의 지원에 힘입어 중동, 미국, 호주에 자체 가스화기뿐만 아니라 엔지니어링 기술도 수출 산업화 하고 있다. 일본은 후쿠시마 원전사고 이후 자체기술을 사용한 대형 석탄 IGCC를 하나의 대안으로 생각하고 있다.

### 가. 미국

미국은 'Cool Water Project'를 1984년부터 추진하였다. 이후 미국 정부의 자금 지원을 받아 300MW급 석탄 IGCC 발전소로 GE Energy의 Pork IGCC과 Phillips66의 Wabash River IGCC를 실증설비로 건설하여 현재 운전 중에 있다. 또한 최근 Duke Energy사는 인디애나 주 에드워드포트에 600MW급 IGCC 발전소를 2008년 6월 착공한 후 2013년 6월 10일 상업운전을 시작하였다. 에드워드포트 IGCC 발전소는 순 출력 618MW로 설계되었고, GE가스화기 2기, 가스터빈(7FB) 2기, 폐열회수보일러 2기, 스팀터빈 1기로 구성되어 있으며, 스타트업과 백업연료로 천연가스를 사용하게 된다. 또한 미국의 전력회사인

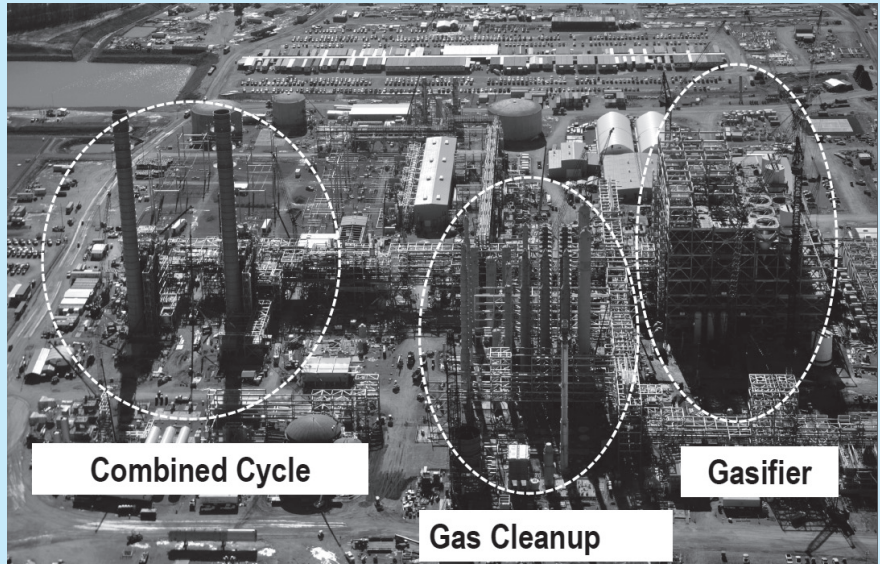


그림 2 미시시피주 Kemper 프로젝트(2014.2)

Southern Company사는 KBR사와 공동으로 개발한 가스화 기술을 적용하여 미시시피 주의 Kemper County에 갈탄을 원료를 사용하여 IGCC와 이산화탄소 포집 및 EOR(Enhanced Oil Recovery)프로젝트로 전력은 582MW, 이산화탄소는 약 300만 톤/년을 포집할 예정이다. Kemper 프로젝트는 독일의 지멘스사 가스터빈 2개와 일본 도시바사 스팀터빈 1개를 연계한 플랜트로 2016년에 상업운전할 예정이다.

### 나. 유럽

유럽의 석탄가스화기술은 네덜란드 Shell사와 독일의 Uhde 및 Simens사가 주도하고 있는데, 최근에는 Shell사가 중국 등지에서 가장 활발한 영업활동을 하고 있다. 네덜란드의 대표적인 IGCC 프로젝트는 Shell사의 가스화공정을 도입하여 1994년에 네덜란드 Buggenum에 세계 최초로 300MW급 IGCC를 건설한 것이며, 석탄가스화발전에 많은 기여를 하였다. 하지만 높은 운전비용 및 낮은 전력가 등 운영 수익성이 낮아 2013년 4월 1일부로 운전을 중단하였다.

독일의 Uhde 공정은 1973년부터 고압 분류층 가

스화기에 대한 연구개발을 Shell사와 공동으로 추진하였으며, 1981년부터 독자적인 Prenflo 공정을 개발하기 시작하여 1997년에 스페인 Elcogas사의 주도 하에 스페인, 프랑스, 포르투갈 기업들과 공동으로 Puertollano에 300MW급 IGCC 플랜트를 건설하여 실증시험을 완료하고 현재 상업운전 중에 있다.

Siemens사는 2006년에 중형급 석탄가스화 기술을 보유한 독일의 Future Energy사를 매입하여 상용급 석탄 IGCC 발전프로젝트에 참여할 준비를 하고 있으며, 최대 1,000MW급의 석탄가스화 플랜트 건설을 독일의 Saxony 지역에서 추진하고 있다.

영국의 경우 아직까지 건설된 IGCC 플랜트는 없으나 2009년 이후 CCS와 연계된 3건의 프로젝트를 추진 중에 있으며, 영국의 IGCC+CCS는 CO<sub>2</sub> 포집 후 북해유전에서 EOR(Enhanced Oil Recovery)에 이용할 예정이다. 2012년 3월 2Co Energy 사와 삼성물산이 Hatfield에 건설할 Don Valley Power Project(DVPP)에 대해 계약을 체결하였으나, 영국 정부의 financing 지연으로 연기되고 있는 상태이다.

#### 다. 일본

일본의 경우에는 IGCC 기술을 8대 청정에너지기술로 선정하여 IGCC Power Generation 프로젝트와 석탄가스화 기술을 연료전지와 연계한 'EAGLE' 프로젝트를 추진하고 있다.

일본은 'Sunshine' 프로젝트의 일환으로서 1983년부터 정부에서 수 조원을 지원하여 일 2톤급 설비로부터 1997년에 일 200톤급 석탄가스화 시험플랜트에 대한 가동을 마쳤으며, 자체 개발한 기술을 설계, 설치 및 운영을 통한 상용급 가스화 공정의 개발을 위해 일본 9개 전력회사 및 일본 전원개발 사와 공동으로 CCP(Clean Coal Power) R&D Co.를 2001년에 설립하였다. 이 프로젝트는 정부에서 약 30%의 자금을 지원하였으며, 2004년부터 건설에 착수하여 2007년에 완료하고 현재 실증운전을 진행하고 있다. 일본 가

스화기술 개발 프로그램의 특징은 세계시장 확보를 위해 일본 통산성의 지원을 받아 20년 이상 투자한 결과 2008년에 300MW급 IGCC 자체기술을 보유하고, 세계 기술추세인 산소 사용이 아닌 공기를 사용하는 독자방식을 고수하면서 많은 시행착오를 겪은 후 실증을 통한 IGCC 기술 실증능력을 보유하고 있다.

현재 운영 중인 가스화 플랜트는 1960~1980년대에 5개가 건설되어 운전 중에 있으며, 2003년 발전 용도로 793MW의 Negishi IGCC가 완공되어 운전 중에 있다. 이 플랜트는 잔사유를 연료로 사용하며 가스화기는 Texaco 가스화기가 설치되었다. 플랜트의 용도는 메탄올, 합성가스, 발전, 암모니아 제조 등 다양한 포트폴리오로 운행 중에 있다.

일본은 2014년 5월에 동경전력과 석탄 IGCC 운영사인 Joban Joint Power사가 500MW 규모의 석탄 IGCC를 2기 건설계획을 발표하였다. 동경전력 Hirono발전소와 기존 Nakoso IGCC 실증설비 인근에 건설하여 2020년에 상업운전을 할 예정이다.

#### 라. 중국

중국은 'Agenda 21' 계획을 통하여 IGCC를 가장 중요한 기술항목으로 정하고 1994년도에 6개 정부기관으로 IGCC 운영위원회를 구성하여 본격적인 개발을 추진하고 있다. 현재로서는 자국의 기술 개발보다는 우선적으로 미국 GE Energy사, 네덜란드 Shell사, 독일 Lurgi사 및 Siemens사 등 외국의 가스화기술을 도입하여 메탄올, 암모니아 등 석탄 사용량 200,000톤/일 규모의 화학플랜트를 운영하고 있다. 특히, 선진 석탄가스화기술을 일단 10여 기 이상씩을 자국에 건설하면서 설계와 제작의 상당부분을 자체 기술로 흡수하여 자국 가스화 플랜트 기술에 대한 능력을 향상시켰다. 1990년대 초부터 자체 기술로 개발한 OMB(Opposite Multi Burner)기술, TPRI(Thermal Power Research Institute)기술, HT-L기술, MCSG기술 등 여러 기술을 개발 적용함

으로써 석탄 사용량 기준 총 250,000톤/일 규모 가스화 플랜트를 운영 중에 있다.

TPRI에서 석탄가스화기를 개발한 이력을 보면, 1998년 이전에는 1톤/일 규모의 기초연구를 진행한 후 1998년에 36톤/일 규모의 파일럿 설비를 건설하여 본격적인 자체기술 개발을 추진하였으며, 2009년 2,000톤/일 규모 석탄가스화기를 자체 설계, 제작하여 운영 중이다. 기술 자체는 일본 미쓰비시사 2단 석탄가스화기를 거의 그대로 모방하였다는 말을 듣고 있지만, 선진 석탄가스화기를 각 기술별로 10기 이상을 자국 내에서 상세설계, 제작, 운영한 노하우를 살려서 자체 기술화하였고 지금은 독자기술로 인정받아 미국 수출까지 추진 중에 있다. 또한 오일 잔사유를 원료로 하는 사우디아라비아 Jazan IGCC 프로젝트에 중국의 업체가 수주하는 성과를 올렸다.

### 한국형 300MW급 IGCC 실증플랜트 기술개발

우리나라도 1990년대 초반부터 정부의 G7 프로젝트로 IGCC 상용화를 위한 연구소 중심의 기초연구를 추진하여 선진국 대비 40~60% 기초기술을 확보하고 있으나, 아직 파일럿 수준에 있다. 정부에서는 IGCC의 조기 정착과 설계 및 운영기술 자립을 통한 수출상품화를 위해 국가 R&D 기술개발과제를 2006에 1단계로 2010년까지 추진하였으며, 이 기간 동안 가스화 기술 공정사 선정 및 IGCC 기본설계를 실시하였다. 한국형 300MW급 IGCC 실증플랜트 기술개발사업은 정부, 한국서부발전, 두산중공업과 IGCC분야 주요 연구를 수행해 온 고등기술연구원, 에너지기술연구원과 국내 주요 대학 등 20개 기관이 참여하였으며, 1

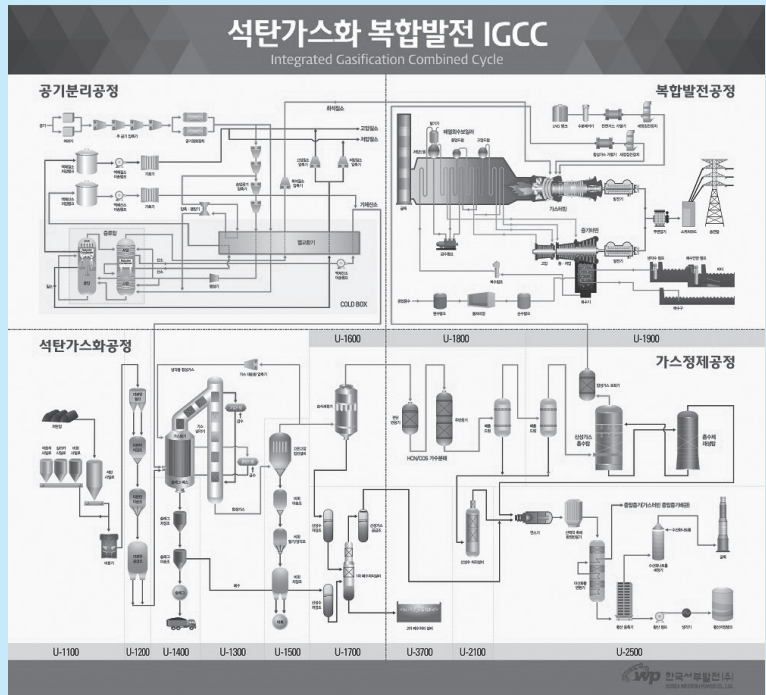


그림 3 태안 IGCC 계통도

세부과제로 가스화플랜트 종합설계 및 자립기술개발 상세설계를 두산중공업에서 수행하였으며, 이를 바탕으로 한국형 IGCC 실증플랜트 종합설계 제작 및 건설기술개발은 한국서부발전에서 수행하였다. 또한 IGCC 연소최적화 및 시뮬레이터 개발 등 실증플랜트 운영기술개발분야는 현대중공업에서 수행하였다. 2단계 사업은 2011년에 시작하여 당해연도 11월에 가스화플랜트를 착공하였으며, 2014년 상반기까지 건설공사를 진행하였고, 2014년 7월에 주요 단위가 가동을 위한 수전을 시작으로 시운전을 시작하였다. 2015년 9월에 가스화기 가동을 통한 합성가스를 생산하는 등 종합 시운전 공정을 통해 2016년 8월 19일에 상업운전을 시작하였다. 태안 IGCC는 가스터빈 230MW와 증기터빈 150MW로 총 380MW의 전력을 생산할 수 있으며 석탄사용량은 연간 약 90만 톤을 사용할 예정이다.

국내 최초 석탄가스화복합발전 기술개발사업인 태안 IGCC 실증플랜트는 열효율이 42% 이상, 황산화



그림 4 태안 IGCC 실증플랜트

물 15ppm, 질소산화물 30ppm, 먼지 5mg/Sm<sup>3</sup> 이하로 설계되었다. 황산화물, 미세먼지 등 최근 이슈화 되고 있는 석탄화력의 배출물질과 대비하여 태안 IGCC 실증플랜트의 시운전 기간 동안 황산화물 0.1ppm 이하, 질소산화물 25ppm 이하, 먼지 3.5mg/Sm<sup>3</sup>로 설계치 대비 상당히 낮은 수준으로 환경성이 우수하였으며 향후 탈질설비를 추가 설치하여 질소산화물의 경우 5ppm 이하로 낮출 계획이며, 가스화기 부하특성 및 최적운전을 위한 산소/탄소 비율 등 다양한 운전 노하우 취득을 바탕으로 안정적 가스화기 운영을 위한 실증운전을 2017년 5월까지 수행한 후 국가 R&D 기술개발과제를 종료할 예정이다.

## 전망

전 세계적으로 IGCC 기술은 상업화 초기단계에 있어 기존의 미분탄 석탄화력에 비하여 현 단계에서는 경제성이 다소 낮은 상태이다. 그러나 IGCC 실증발전설비의 건설경험을 토대로 한 설계·제작기술 자립 및 설비 개선을 통한 후속 호기 건설 시 경제성 개선의 토대를 구축하고, 향후 다수 호기 건설에 따른 건설단가의 저감 및 기후변화협약과 연계된 온실가스

저감기술의 도입이 현실화될 경우, 기존 석탄화력 대비 경제성이 높아질 것으로 예상된다. 국내는 태안 IGCC 실증플랜트 부지에 국내 고유 가스화기 개발의 일환으로 20톤/일급 석탄가스화 Test-bed가 구축되었으며, 향후 300MW급 실증설비의 고가 소모성 자재의 국산화 및 Trouble-shooting을 위해 이용될 예정이다. 포스코는 석탄가스화 SNG 플랜트를 2011년 6월에 착공하고, 2016년 하반기에 상업운전을 할 예정이다.

태안 IGCC 실증플랜트의 원활한 운영을 위해 각종 법규사항과 석탄슬래그 등 재활용을 위한 제도개선이 필요하며, IGCC 핵심부품 국산화 개발을 위한 산·학·연 공동 기술개발이 활성화 되어야 할 것이다.

태안 IGCC 실증플랜트가 2015년 준공 이후 300MW급 한국형 IGCC 설계기술을 확보되면 최근 에너지 수요가 급격히 증가되고 있는 중동 등 아시아 시장을 포함한 세계 에너지 시장에 고부가 가치의 플랜트 설계기술 수출은 물론 석탄가스를 이용한 화학 플랜트용 석탄가스화기 및 정제설비 등 관련 플랜트 수출에 일익을 담당할 것으로 전망된다.