

가스화 복합발전 기술의 현황 및 국내 연구개발 성과

윤 용 승

고등기술연구원 Plant Engineering 센터

Technology Trend of Integrated Gasification Combined Cycle and Related Research Results in Korea

Yongseung Yun

Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering

1. 서 론

석탄은 전세계에 걸쳐 널리 분포한 가장 매장량이 풍부한 화석연료로서, 현재의 사용량 기준으로 앞으로 수백년 채굴이 가능하다고 알려져 있다. 지난 100년간 석탄은 발전분야에 있어서 매우 중요한 연료로서 그 역할을 담당해 왔고, 다음 세대까지도 이러한 상황은 계속 지속될 것으로 전망되고 있다. 최근 범세계적으로 환경에 대한 관심이 높아지면서 공해물질 배출량에 대한 규제치가 점점 엄격해지고 있는 상황에서, 석탄사용과 관련된 여러 문제들을 해결하고 석탄사용을 늘이기 위해서는 환경적으로 적합하면서도 경제적으로 경쟁력 있는 새로운 석탄이용 기술이 요구되어지고 있다.

IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle)기술의 요체는 기본방식보다 높은 효율을 얻으면서도 향후 강화될 환경 규제치도 만족할 정도로 깨끗하게 더러운 시료로 여겨졌던 고유황, 고회분의 저급 석탄과 정유공장 부산물까지도 에너지원으로 깨끗하게 처리할 수 있다는 점이다. 현재까지 상용화에 선진각국이 그렇게 많은 자금과 시간을 투입하고도 지연되었던 이유는, 기술적으로는 각 기술을 시스템으로 연결시키는데 따른 어려움과 고체시료를 용융상태에서 처리 취급함에 따른 열교환지수 등 운전자료의 부족이 요인이었고 경제적으로는 LNG발전과 기존 미분연소발전 에 비해 건설비가 높았던 점이였다. 그러나, 현재는 IGCC발전소의 건설단가가 '95-'96년의 US\$2,000/kW에서 US\$1,250/kW정도까지 낮아진 상태이고 2000년대 초에는 US\$1,200/kW이하로 낮아질 것으로 예견됨으로서 경제성 측면에서의 문제점을 해결해 나가고 있다. 특히, 이탈리아에서의 정유공장 부산물에 대한 500MW급 상업용 규모 IGCC plant가 성공적으로 진행됨에 고무 받아 일본도 2003년 완공예정으로 342MW의 정유공장 부산물을 사용한 IGCC발전소를 건조하고 있어 기술에 대한 신뢰도도 크게 향상되고 있는 상황이다. 석탄을 사용하는 미국과 네델란드, 스페인의 상업용 demonstration plant 모두에서 많은 문제점이 노출되었으나, 현재는 해결에 자신감들을

갖고 다음 IGCC발전소 건설에의 기술 적용을 추진하고 있다.

국내에서도 지난 '92년부터 진행되고 있는 석탄가스화 복합발전 기술개발은 현재까지 선진국들에서 수십억불을 투입하여 각국의 정부와 민간기업, 정부연구소들이 공동으로 지난 20년 이상을 공동으로 개발하고 있는 환경적합적 발전기술이다. 지금까지의 국내 IGCC 연구성과들은 외국기술을 follow-up하는 단계에 있었다고 볼 수 있는데, 선진국에서 수십년간 수행하여 온 연구개발 성과들을 비록 규모는 한정되었다 하더라도 이렇게 단기간에 기반기술을 축적하였다는 것은 큰 성과로 보여진다. 지금까지는 IGCC기술의 요소부위별로 외국기술 수준에 도달키 위한 개별적 심층연구에 주안점이 있어 왔고, 이제까지의 연구 투자와 성과를 기반으로 IGCC기술의 핵심부위에 국내 고유기술을 접목시키는 단계로 이동할 국내여건이 구비되었다고 여겨진다.

국내에서 한정된 자금과 인력으로 개발되는 IGCC 관련기술이 수십억불과 20-30년의 투자로 이루어진 외국기술과 직접 상업용 규모 설비기술에서 경쟁한다는 것은 불가능하기 때문에, 본 연구의 첫 번째 방향은 우선 가장 빠른 기간 내에 외국의 기반기술 수준에 도달하고 최소한 bench급 설비의 기술에서는 경쟁이 가능하도록 기술 기반을 구축하는 것이었다. 그후 선진국에서 가동중인 기존 상업용 규모 IGCC설비들에서 문제가 되는 부분에 대한 핵심 기본기술을 국내에서 확보함으로써, 한국 고유의 IGCC기술로 발전할 수 있는 토대를 구축하는 것을 연구개발의 순서로 정하였다. 또한, 기술개발의 대상을 석탄만에 국한하는 것이 아니라 경제성에서 유리하게 판단되고 있는 정유공장의 부산물을 시료로 하여 전기, 스팀 외에 수소까지 생산할 수 있는 tri-generation까지를 대상으로 연구개발의 목표를 다양화하는 것도 향후 좋은 방향으로 판단하여 일부 software적 연구를 진행하였다. 본고에서는 선진국들에서의 IGCC기술개발 현황과 국내에서 추진된 2단계 IGCC과제로부터 도출된 대표적 성과들을 기술하였다.

2. IGCC기술의 개발동향 및 현황

2.1. 유럽, 미국, 일본의 기술개발 동향

'90년대 들어 본격적으로 상용화시험에 들어간 IGCC기술의 적용현황 내용을 살펴보면, 최근에는 석탄대상의 IGCC발전소만이 아니라 정유공장의 vacuum residue나 asphalt를 원료로 사용한 IGCC발전소가 1999년부터 여러 곳에서 동시에 시운전에 들어감을 볼 수 있다. 현재 미국과 네델란드에서 운전중인 IGCC공정의 demonstration급 300MW plant의 건조비용은 연구의 성격도 포함되어 있기 때문에 비교적 높은 \$1,800-2,000/kW에 달하고 있

다. 그러나, 국내에 기술이 도입될 시점으로 예상되는 2000년대 초에는 최대 \$1,300/kW에서 \$1,100/kW까지 건조비용을 낮출 수 있을 것으로 관련 전문가들은 예상하고 있다.

석탄가스화 복합발전시스템은 향후 2000년대에는 전세계 발전시장에서 매우 중요한 역할을 할 것으로 예견되어지며, 유럽, 미국, 일본 등의 기술 선진국들은 이미 100-250 MW급의 대용량 석탄가스화 복합발전시스템 개발경험을 쌓으면서 미래시장의 개척을 위해 많은 노력들을 기울이고 있다. 독일과 미국은 석탄가스화에 대한 기초기술을 이미 오래 전에 확보를 하고 있었으나, 80년대 들어 환경문제가 고조되면서 관심이 높아지게 된 가스화 기술의 고온/고압하 석탄발전의 이용은 이들 나라들도 불과 20-30년 안팎의 기술개발 역사를 가지고 있을 뿐이다.

분류층 석탄가스화 방식을 채택하여 석탄가스화 복합발전 기술을 개발하면서 상용화전 단계의 실험을 실시하고 있는 외국의 대표적인 사례들을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 미국의 경우

Texaco사는 1945년경부터 15, 20, 50톤/일급 공정개발 장치를 운영하면서 경험을 축적하였고, 이와 병행하여 700톤/일급의 실증플랜트 및 Cool Water IGCC project에서 1000톤/일급의 가스화기를 84년부터 89년까지 5년간 운전하였다. 현재는 2000톤/일급 (260 MWe)의 상업용급 플랜트를 미국 Polk (Tempa Electric Co.) 지역에 1990년 착공하여 1995년 8월에 건설을 완료하여 시험운전중이다. Texaco사는 그간 총 20억 US\$를 투입하여 연구를 진행시켜 왔다. Destec사에서는 262MWe급의 IGCC발전소를 1995년 8월에 완공하고 시험가동중에 있으며, Kellog Rust Westinghouse에서도 107MWe급의 발전소가 가동 중에 있다.

(2) 유럽의 경우

네델란드 Shell사에서는 1974년에 6톤/일 가스화장치를 개발하였고 현재까지 연구결과를 150톤/일 및 250톤/일 파일롯트 플랜트 적용시험을 거친 후 네델란드 Buggenum 지역에 2000톤/일급 (253 MWe)의 IGCC 발전소를 1988년 건설착수하여 1993년에 완공후 1994년부터 각종 운전시험 및 장비 tuning을 진행하고 있다. 1996년 이후에는 발전소 운영사인 Demkolec사에 인계예정에 있다. 그외 2000년을 목표로 600MWe급의 대형 IGCC 플랜트 건설계획을 추진중에 있다. 이때까지 Shell사는 IGCC관련 기술개발에 18년간 약 5억 US\$를 투입하였고 Beggenum의 253MWe IGCC플랜트의 경우 계획에서 시운전까지 7년이 소요되었고 총 건설비는 4.5억 US\$가 투입되었다.

독일의 Krupp Koppers(Prenflo)사의 경우는 1950년대에 상업화된 상업의 K-T공정을 가압으로 변경한 가스화 및 탈황설비 개발을 위하여 48톤/일 파일롯트 플랜트건설에 1974

년부터 약 18년간 2억 US\$를 투자하였고 1330톤/일 (160 MWe)급 플랜트를 독일 Essen 지방에 1992년 완공하여 가동중에 있으며 현재는 2600톤/일 (335 MWe)급 플랜트를 스페인 Puertollano (Elcogas사) 지역에 1997년 완공하였다.

항 목 \ Plant 명칭	Wabash River		Tampa		Buggenum	
	설계치	실제성능	설계치	실제성능	설계치	실제성능
Gas 터빈 Output (MW)	192	192	192	192	155	155
Steam 터빈 Output (MW)	105	98	121	125	128	128
보조설비 전력사용 (MW)	35.4	36	63	66	31	31
Net Power Output (MW)	261.6	252	250	250	252	252
Net Plant Heat Rate (kJ/kWh, LHV기준)	9,177	8,708	8,739	9,244	8,373	8,373
Net Plant 효율 (% , LHV기준)	39.2	41.2	41.2	38.9	43.0	43.0
'98년 조업총시간 (hr)	5,139		5,328		4,939	
'98년 On-stream factor (%)	59		61		56	
'98/12까지 총 운전시간 (hr)	10,393		10,010		13,768	

이들 미국과 네델란드에서 운전중에 있는 상용급 IGCC 플랜트의 현재까지의 운전성적은 <표 1>과 같다.

<표 1> 석탄사용 주요 IGCC Plant들의 설계치 대비 실제 성능치 비교 [2]

(3) 일본의 경우

일본은 NEDO 산하에 Clean Coal Technology Center를 1992년 10월에 조직하여 석탄액화, IGCC 등의 석탄가스화, 차세대 석탄이용기술 및 기반기술 개발과 이들 개발기술을 아시아 일원에 국제협력 및 정보교환 프로그램을 통해 보급함으로써 자국의 기술로 시장 교두보 형성을 추진하고 있다.

Sunshine project의 일환으로 1974년부터 1톤/일, 2톤/일 및 5톤/일급 가스화장치를 개발하여 시험하여 오고있고 이와 병행하여 200톤/일 (12.5MWe)급 파일롯트 플랜트를 1991년에 건설을 완료하고 현재 운영중에 있다. 일본은 IGCC기술개발에 20년간 약 1조원을 투입하였고 현재 추진중인 200톤/일 IGCC플랜트 개발을 위해 2톤/일급에서 시작된 기획단계인 1983년부터 성능시험 종료까지 10여년간 3500억원이 투자된 것으로 추정된다. 또한, 일본은 9개 전력회사들과 전원개발이 250MW IGCC 석탄발전소를 자체 개발한 미쓰비시중공업의 가스화기술을 사용하여 2004-2006년에 건설할 계획을 추진하고 있고, 150톤/일급의 가스화복합 연

료전지 기술의 개발을 위한

EAGLE 프로젝트를 위한 pilot plant를 건설중 (전경: 그림 1 우측 사진)에 있다.

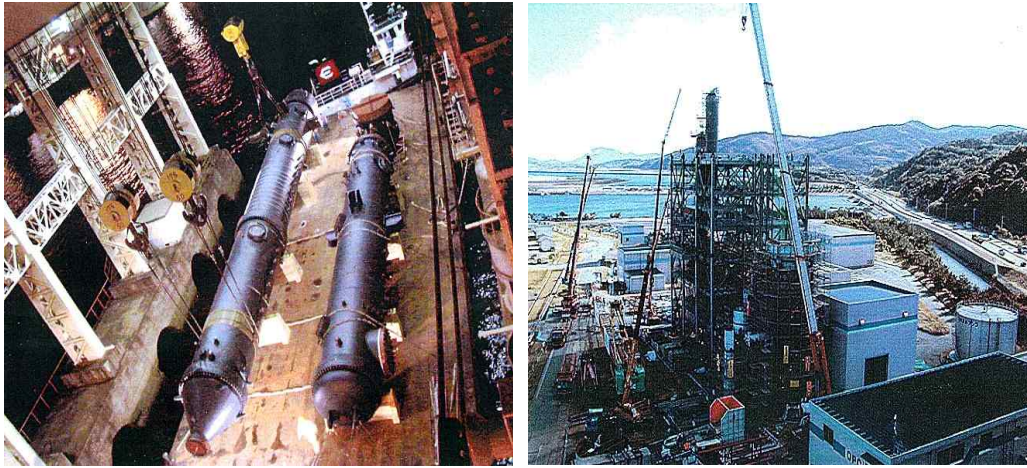


그림 1. 일본 가스화+연료전지 시험용 EAGLE 프로젝트에서 150톤/일급 가스화기/가스냉각기의 운송(좌) 및 가스화기 설치(우) 장면 (1999년)

위의 내용을 요약하면, IGCC기술은 미국, 독일, 네델란드 일본이 각국의 정부지원에 힘입어 (미국 50%, 유럽 10%, 일본 90%) 차세대 환경적합적 발전기술로 이제 상용화 바로 전단계인 demonstration 단계에 와 있고, 석탄의 경우는 300MW급 3기 (미국, 네델란드, 스페인)가 demonstration 운전중이다. 정유공장 중잔유나 petroleum coke의 경우는 현재 Italy와 일본에서 280-550MW급을 건조하거나 시운전 중에 있다.

그러나, 이들 발전소들에서는 아직 저온탈황 및 집진기술이 적용되고 있고 석탄을 사용하는 경우는 가스화기와 가스냉각기 사이에서 flyslag에 의한 문제점 등 아직 부분적인 기술개발이 계속되고 있는 상태이다. 그리고, 고효율을 위한 필수공정인 고온탈황과 고온집진 기술개발은 외국도 아직 bench급에 머물고 있어 국내의 연구수준이 뒤지지 않고 있다. 2000년 발간된 호주 CRC의 연구결과를 보면, IGCC기술의 상용화를 위해서는 높은 건설투자비, 낮은 availability의 문제를 해결하는데 약 5년간의 추가 1000MW 설치용량의 기술적 demonstration이 필요하다고 보고 있으며 천연가스 복합발전에 비한 경제성은 시료가격이 AU\$1.5/GJ 이하인 경우는 공정의 신뢰도문제만 해결되면 지금도 경제성이 있다고 보고 있다.

아시아 쪽에서 일본은 국가적으로 '83년부터 수조원의 지원을 하여 2톤/일급 설비로부터 '97년에 200톤/일급 IGCC 시험발전소에 대한 가동을 마쳤고, 외국기술 도입과 함께 자체 기술의 축적을 추진하고 있다. 중국은 300MW급 석탄 IGCC발전소를 계획 중에 있으며, 대만도 1톤/일급 정도의 가스화설비를 건설코자 내부 평가중이다. 호주의 경우도 '99년도

에 독일 DMT사로부터 270만 호주달러(약 22억원)에 고온고압 가스화설비를 turn-key로 구입하여 2000년 2월부터 시험을 시작하는 단계에 있다.

따라서, 국내 IGCC 기술개발 연구의 수준은 실용화를 위한 규모 면에서는 선진외국에 비하여 열세에 있으나 호주와 중국, 대만의 '98년부터 기술개발을 시작한 상태이므로 일본을 제외한 기타 아시아 국가들보다는 아직 우위에 있다. 이외의 IGCC관련 기술선진국들의 동향 및 관련 project 현황은 아래와 같이 요약할 수 있다.

- 석탄사용 IGCC 플랜트는 아직 기술개발과 운전경험이 더 필요한 상태이고, 정유공장에 적용할 수 있는 Heavy residue oil사용 IGCC 플랜트는 지금이라도 경제적으로 타당한 선택으로 보고되고 있음.
- IGCC 실증 플랜트들의 최대 availability는 현재 75%정도이고, 석탄 외에 Distillate oil이나 Natural gas의 대체연료 설비를 갖추고 있음.
- 석탄을 사용하고 있는 IGCC 플랜트는 실증 플랜트급인 300MW에서 현재 많은 공정들의 연계로 인한 문제점이 파생되고 있어, 발전플랜트에서 요구되는 90%이상의 availability를 얻기 위해서는 기술개발이 더 되어야 하는 상태임. 적어도 2~3년이 더 필요하리라 예상됨.
- 정유공장의 Heavy Residue Oil과 같이 액체성격의 시료는 IGCC 플랜트의 process availability가 90% 이상 현재 가능함.
- 미국의 경우 Vision 21 program으로 가스화/가스정제 기술을 21세기의 환경친화적 중점기술로 육성중임.
- 석탄 이용 가스화 기술은 300MW급의 상용설비를 건설하여 실증 운전중이며, 설계기술은 공정개발사인 공정사와 IGCC 플랜트 설계 경험이 많은 엔지니어링사에서 기술을 소유하고 있음.
- 주요공정사인 Texaco사, Destec사, Shell사 및 Krupp Uhde사 등이 상용규모 실증플랜트 운전을 통하여 상용화에 필요한 건설 및 운전 장애 대응기술을 적극 개발 중에 있음.
- IGFC 복합발전에 관해 NEDO, British Gas 등 선진국에서는 전력효율 상승을 위한 시스템 연구가 오래전부터 진행되고 있으며, IGCC 발전기술의 신뢰성을 확보하고 기술적으로 안정기에 도달하면 IGFC 발전연구는 21C에 본격적으로 추진될 것으로 전망됨.
- 미국 실증 플랜트급인 Tampa (저온정제 + 10%고온정제), Pinon Pine (고온정제 채용) 및 Vision 21 (고온정제 채용 + 용융탄산염/Solid oxide Fuel Cell) program에서 고온탈황을 적용하고 있음.
- 탈황제 개발과 관련하여 선진외국에서는 80년대부터 고온건식 탈황제 연구가 활발히

진행되어 90년대에는 아연계 탈황제를 중심으로 연구가 진행되고 있음.

- 선진국의 필터 제조업체와 공정개발 회사들이 다양한 fail safety 필터기술을 개발하고 있음.

2.2. 일본 이외 아시아지역의 기술개발 동향

아시아시장에서 가장 큰 규모인 중국의 경우에는 2000년대 초에 가장 중요시 될 석탄변환기술로서 전기만이 아닌 다양한 종류의 생산을 목적으로 하는 IGCC기술이라고 판단하고 있는데, 현재 IGCC Demonstration Project Leading Group을 구성하고 산동성에 300MW급의 석탄사용 IGCC발전소를 2000년대초에 건설하는 것으로 기획 준비중에 있다. 호주의 경우를 보면, 총 270만 호주달러 (21.6억원)의 예산으로 '98년 10월에 독일 Essen의 DMT-esellschaft mbH로부터 10 kg/hr 용량의 최대 10기압 분류층 건식 top-feeding 가스화기를 일괄 구입하여 IGCC기술에 대비하고 있다. 이러한 아시아 주변국들의 IGCC기술 연구에 대한 지속적인 투자와 상업용규모 플랜트의 도입추진 등을 감안할 때, 국내의 IGCC기술개발 연구도 조만간 가시화될 국내에서의 상업용규모 IGCC 플랜트 건조시에 가시적으로 국내산업에 기여할 수 있도록 차분한 연구투자가 이루어져야 한다고 판단된다.

2.3. 국내 기술개발의 성과 및 현황

석탄가스화 복합발전 기술개발의 2단계는 '97년부터 '99년까지 3년간 진행되었다. 이 단계에서는 IGCC기술의 핵심인 가스화, 고온건식 탈황, 고온건식 집진, advanced IGCC 시스템구성 및 100톤/일급 설비에 대한 3차원설계가 이루어졌다. 본 연구에서 운용되고 있는 국내의 가스화설비 및 고온탈황, 고압 Drop Tube Furnace 설비들의 모습은 그림 2, 그림 3과 같다. 건식 가스화기는 경기도 수원소재 아주대학교 구내에 설치되어 운영되고 있고, 습식 가스화기와 고온건식 탈황설비는 대전 에너지기술연구소에서, 그리고 고압 Drop Tube Furnace는 대전 전력연구원에서 운영중이다.



그림 2. 3톤/일급 건식 가스화기(좌)와 1톤/일급 습식 가스화기(우) 전경

수행된 IGCC연구의 내용중 가스화기에서의 운전 및 모사분야에서 얻은 성과를 살펴보면 다음과 같다. 우선 가스화기 운영측면에서 보면, 총 8개 수입 탄종에 대하여 12-29기압에서 고압 가스화시험을 수행되었다.



그림 3. 고온건식 탈황시스템(좌) 및 고압 Drop Tube Furnace 설비(우) 전경

가스화반응의 중요한 parameter들인 반응전환율과 냉가스효율은 호주 Curragh탄을 제외하고는 목표치인 95%와 60%보다 훨씬 높은 95%이상, 65-80%까지를 달성하였고, 상업용 IGCC용 가스화기들이 운전되는 22-28기압에서의 운전기술을 축적하였다. 호주 Curragh탄은 발열량이 오히려 다른 시료석탄보다 높은 유연탄이나 회분함량이 16%로 높고 반응성이 낮아 냉가스효율이 60%미만으로 판정되어 IGCC용 시료로는 문제가 있는 석탄종으로 판별되었다. 이

결과는 같은 유연탄이라도 석탄자체의 반응성에 따라 가스화성능이 크게 차이를 보여주어 IGCC용 석탄판별에 요긴한 자료가 되고 있다.

가스화기 주변장치 개선부분에서는 slag tap의 설계를 개조하여 녹아내리는 슬래크이 쌓이는 문제를 해결하였고, 가스냉각기를 설치하여 물분사에 의해 냉각시켰던 석탄가스를 간접방식으로 냉각시킴으로서 생성가스의 측정 및 열교환기에의 flyslag 점착문제를 살펴볼 수 있는 시스템을 구축하였다. 또한, 미분탄 운송용 질소공급 시스템을 4곳을 함께 제어하던 집합적 방법에서 각개를 제어하는 개별제어 방식으로 설비를 보강하여 고압운전의 안정성을 크게 향상시켰다.

가스화반응에 의해 생성된 슬래그의 용출수에 대한 분석결과에서는 대상탄의 슬래그 모두 용출수중의 중금속 성분이 검출되지 않거나 검출된 성분의 경우는 배출한계 이하의 농도를 나타냄으로써 중금속 성분들이 슬래그 내에서 안정한 화합물을 이루고 있는 것으로 보인다. 따라서 중금속 성분의 침출로 인한 2차 환경오염은 없을 것으로 판단되었다.

슬래그의 재활용 가능성을 판단하기 위해 잔존탄소함량을 측정한 결과 대상탄 슬래그중의 미연탄소함량은 검출되지 않거나, 일부 대상탄의 경우 약 1 wt%이하의 잔존탄소함량을 함유한 것으로 나타나 슬래그의 도로보강재 또는 건축자재로의 재활용이 가능할 것으로 판단되었다. 그 외에 BSU 가스화설비에 대한 동적모사 프로그램을 개발하여 실시간으로 가스화기 운전변수에 따른 가스화기의 특성변화를 추정할 수 있는 시스템의 기반을 구축하였다.

연구내용에서 가장 중요한 한 부분인 가스화 database 측면에서 보면, 3년간 8종의 탄종에 대하여 가스화 database를 확보하였으며 탄종별 고압 가스화특성을 비교할 수 있는 기반을 확립하였다. 석탄내 회분을 용융시켜서 얻는 슬래크는 상업용 규모 가스화기에서 배출되는 슬래크와 같은 형상과 내부구조 특성을 보임을 확인할 수 있어서, 규모는 상업용 규모의 2,000톤/일급보다는 훨씬 적은 3톤/일급에서라도 유사한 가스화결과를 도출할 수 있었음을 증명하였다. 특히, 아시아지역에서 선진국인 일본의 엄청난 비용투자가 되는 경우는 예외로 치더라도 상대적으로 작은 예산으로 단기간에 가스화에 대한 기반기술을 확보하고, 실제가스화상황에서 운전할 수 있는 설비를 갖추었다는 것은 장기적으로 우리나라가 중국이나 동남아 여러 나라에 보다 강화된 입장에서 환경적합적 석탄기술을 논할 수 있는 위치가 되었음을 나타낸다고 하겠다. IGCC 기술과 같이 많은 자금이 소요되는 기술분야에서는 절대적으로 문헌자료나 computer simulation만으로는 그 자료의 검증이 될 수 없으므로 장비를 가지고 있는 나라에 원천적으로 뒤질 수밖에 없는데, 일단 정부의 과감한 정책결단에 힘입어 국제적으로도 경쟁 가능한 IGCC용 가스화분야 연구의 입지는 확보하였다고 볼 수 있다. 호주에서 '98년 12월에 270만불을 투입하여 우리와 비슷한 규모의 고압가스화 설비를 건설하였다는 사실은 우리가 미리 연구를 시

작한 것이 현명하였음을 간접적으로 보여주는 사례일 것이다.

고온건식 탈황기술 개발 연구에서 '94년부터 1단계 3년간은 벤치규모 고온고압 semi-batch 유동층 반응기 설치 및 운전실험에 의한 특성파악, 탈황제의 recipe개발 및 TGA, micro-reactor에서 반응특성 실험 등에 중점을 두었고, '97년부터의 2단계 연구는 황화반응기와 재생반응기를 연결하는 고체순환기술에 중점을 두고 수행되었다. 2단계 1차년도 연구에서는 고체순환상온 장치의 설계 설치 및 실험, BSU의 운전실험, 2차년도에는 고체순환상온장치의 실험, BSU의 계속적인 운전실험, 3차년도에는 황화-재생의 연속실험, 그 동안의 결과해석 및 성능해석을 바탕으로한 5 톤/일의 개념설계 및 기본설계가 이루어졌다. 상온고체순환장치는 독자적으로 제안된 세 가지 modes의 탈황탑과 재생탑을 연결하는 고체순환고리가 제안되고 그의 장단점이 분석되었다. 국내에서 분무건조법에 의하여 자체 제조한 탈황제(KSZ1, EZ3, EZ4)를 이용하여 유속변화에 따른 층밀도와 고체순환량이 측정되었는데, 최고 $40 \text{ kg/m}^2/\text{sec}$ 의 고체순환량을 유지할 수 있었다.

고압 벤치규모 유동층반응기에서는 cyclic 실험이 이루어졌는데, 탈황제로는 호주산 철광석, 압출법, 진공압출법에 의한 아연계 탈황제, 분무 건조법에 의한 탈황제들이 사용되었다. 특히, 분무건조법에 의한 탈황제가 반응성능, 물리적 특성, 마모특성등이 호주산철광석, 압출법에 의한 탈황제들보다 우수함을 보여 주었고, 11000 ppm의 H_2S 주입농도에서 50 ppm미만으로 정제되었다.

내마모도 향상을 위하여 여러 가지 첨가제를 사용한 탈황제를 제조하여 실험한 결과 3wt.% MoO_3 를 사용한 탈황제가 내마모성이 우수하였으며, 소성조건이 850°C 에서 2시간 소성한 경우에 내마모성 및 탈황 반응성이 가장 우수하였다. 중저온 운전 조건에서 탈황 반응성을 높게 유지하기 위하여 ZnO 및 TiO_2 혼합물에 10wt.% NiO 및 10wt.% Co_3O_4 를 첨가하고 초기 반응성을 향상시키기 위해서 10wt.% FeO(OH) 를 첨가한 후 내마모성을 개선하기 위해서 3wt.% MoO_3 를 사용하여 ZTG40 탈황제를 제조하였다. ZTG40 탈황제에 대하여 내마모성 및 내구성 시험결과 내마모도가 94.08%였으며, 탈황/재생 100-cycle 연속 반복 실험에서의 황수용능력은 최대 23.05 g S/100g sorbent였으며 100-cycle에서 18 g S/100g sorbent를 유지하였다. 선진국에서 탈황제의 황수용능력에 대한 우수성 평가 기준을 15 g S/100g sorbent 이상으로 설정하고 있는 것을 감안한다면 본 연구에서 제조한 이 ZTG40 탈황제는 고온 건식 유동층 탈황 공정에 적용 가능한 내마모성 및 내구성을 가지는 탈황제로 평가할 수 있다. 또한, 상업용 유동층 탈황제의 조건에 거의 일치하는 탈황제 ZAC-4/4N을 제조하여 평가하였고 이의 재현성과 성능을 개선하기 위하여 ZAC-5, ZAC-9/9N, 과 ZAC-10을 제조하였다. 이 중 ZAC-9N에 대하여 집중적으로 성능평가를 실시하고, 제조 방법의 개선과 성형기술의 확립을 통해

ZAC-10을 제조하여, 분무건조 성형에 필요한 기본 조건을 확립하였다. 개발된 탈황제 ZAC-4N과 ZAC-9N의 물리적 특성은 상업용 탈황제 조건에 일치하며, 기초 반응성 평가와 고온고압 고정층과 유동층 반응기 평가에서도 국외에서 개발된 유망한 탈황제들의 성능대비 손색이 없다고 판명되었다.

고온집진 분야에서는 다음의 결과들을 도출하였다: 1) 세믹 필터 최적설계를 위한 기술자료 확보, 2) 세라믹 필터 최적운전을 위한 기술자료 확보, 3) 세라믹 필터 장기운전 특성확보, 4) 상용급 집진기 설계의 최적화를 위한 기초전산해석 기술 확보, 5) 세라믹 필터 여과재 제조를 위한 기초기술 확보, 6) 상용급 IGCC용 집진기 설계기술 개발을 위한 pilot급 집진기의 상세설계.

고온정제 공정을 적용한 IGCC 시스템 성능 해석은 Texaco 가스화기(oxygen blown)에 zinc titanate를 적용해 구성된 모델은 목적하는 바에 알맞은 건전성을 가진 것으로 나타났으며 기타 조건을 동일하게 설정했을 때 저온 정제 공정(MDEA amine 공정)을 적용한 경우에 비해 플랜트 효율이 약 3% 가량 상승하였다. 한편 동일한 고온정제 공정이라도 적용하는 흡수제를 zinc titanate에서 zinc ferrite로 달리 하는 경우 탈황 반응시 화학 반응의 차이로 인해 clean syngas의 조성 및 열량 변화를 초래하므로 약 0.5%의 효율 손실이 발생함을 알 수 있었다.

이러한 3년간의 IGCC연구 결과를 통하여 총 49건의 특허가 등록되고 18건의 특허를 출원하였으며, 국제학술지에 11편과 국내학술지에 51편의 논문이 수록됨으로서, 국내의 IGCC기술에 대한 기반구축에 기여를 하였다.

3. 결 론

IGCC기술은 고온/고압(30기압, 1400-1500°C)의 조건에서 발생하는 폭발성 및 유독성 가스를 취급하는 첨단기술로서 국내에서는 운전기술 및 설계기술이 전무한 현실이다. 현재까지의 국내 IGCC 기술개발 연구의 수준을 자체 평가한다면 다음과 같이 요약할 수 있다. 선진외국에 비해서는 전반적인 기술수준과 설비의 규모면에서 열세이나, 아시아지역에서 보면 일본 외에는 호주, 중국, 대만에서 '98년부터 기술개발을 시작한 상태로 국내수준이 우위에 있다. 아래에서는 선진외국에 대비한 현재까지 국내에서 개발된 IGCC 요소기술별로 기술수준을 비교하였다.

- 가스화기술 : 선진기술국은 상용화 플랜트와 동급의 슬랙 생산 및 플랜트 운전기술을 확보하였으며, 프로세스 및 단위장치 전산해석 분야에서는 국내에서도 동등 또는 우위 능력을 확보함. 대형플랜트 설계 및 운전경험에서는 아직 국내가 열세임.
- 고온탈황기술 : 선진기술국과 동등 또는 우위의 탈황제 제조기술을 확보하였으나, 대용

량 생산 경험이 아직 없음. 탈황시스템은 규모의 차이가 있으나 국내외 모두 연구단계에 있어 대등한 경쟁이 가능한 분야임.

- 고온집진기술 : BSU급 정치 운전 및 역세정기술에서 동등 수준의 운전경험을 확보함. 고온탈황기술과 마찬가지로 국내외 모두 연구단계이나 플랜트의 규모에서 열세임.
- 시스템설계기술 : 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 시스템의 설계능력은 동등 수준을 확보하였으나 실제 적용사례를 통한 검증단계가 열세임.

[참고문헌]

1. 윤용승 외, 2000, 석탄가스화 복합발전 기반기술 개발(II) 최종보고서.
2. Neville A. H. Holt, 2000, "IGCC Technical Status, Trends and Future- Improvements," Proceedings of Div. of Fuel Chem., ACS, pp.98-101.