

석탄가스화 연료전지 발전(IGFC) 기술 개요 및 전망



임희천
한전 전력연구원 수석연구원

1. 개 요

석탄가스화 연료전지 복합발전(IGFC, Integrated Gasification Fuel Cell Combined Cycle) 방식은 석탄을 부분 연소시켜 가스화한 후 생성된 석탄가스를 이용하여 가스터빈, 연료전지를 구동 발전하고, 발전 후 나오는 배열(폐열)을 이용하여 스팀 터빈을 구동하는, 즉, 단일 연료를 사용해 3가지 발전 방식으로 운용되는 복합발전 방식이다.

이러한 발전 방식은 열효율이 높을 뿐 아니라 CCS(Carbon Capture & Storage) 기술 등을 접목할 경우 석탄을 활용한 고효율 청정 복합발전을 실현할 수 있다는 장점이 있다. 그러나

IGFC 발전방식은 수소(H₂), 일산화탄소(CO)가 주성분인 석탄가스를 연료전지에 적용하기 때문에 CO 피독성이 없고, 연료로 사용이 가능한 고온 연료전지를 선택해야 함은 물론 여러 종류의 불순물을 엄격하게 제거해야 할 필요성이 전제된다.

이러한 이유로 CO 및 유황 피독성이 큰 저온형 연료전지인 고분자 전해질 연료전지(PEMFC) 및 인산형 연료전지(PAFC)는 IGFC 적용에 있어 커다란 제한이 따르게 된다.

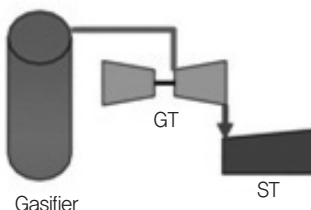
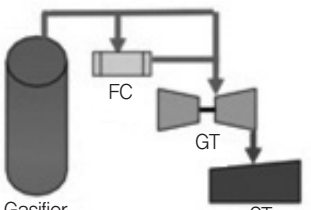
여기서는 석탄가스화 복합발전 기술을 소개하고, 사용되는 연료전지 기술로 고온 연료전지 기술인 용융탄산염 연료전지(MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell) 또는 고체 산화물 연료전지(SOFC, Solid Oxide Fuel Cell)와 연계된 석탄가스화 연료전지 발전 시스템의 가능성 및 전망에 대하여 기술하였다.

2. IGFC 기술 개발 필요성

화석연료 중 전 세계에 분포하고, 또 가장 큰 매장

량을 가지고 있는 것이 석탄이다. 석탄을 가스화하여 청정하게 처리한 후 석탄가스화 복합발전(IGCC) 및 직접발전 방식인 MCFC, SOFC에 이용하고, 또한, 복합발전을 통하여 에너지 이용효율을 높이게 되면 에너지원을 유효하게 이용하면서도 지구환경 보호를 꾀할 수 있다. 이러한 석탄을 가스화하여 이를 발전 방식에 적용하는 가장 효율적인 발전 방식이 IGFC 기술이다.

그림 1은 석탄을 이용하는 발전 방식의 발전 방향을 보여주고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 미분탄 연소의 최신 기술인 초초임계압 보일러를 이용하여 발전하는 경우 발전효율을 41% 정도 얻을 수 있다. 또한, 현재 최신 복합발전 기술에 해당하는 IGCC인 경우에도 46%에서 48%(Net 기준) 정도를 얻을 수 있으나, IGFC를 적용하는 경우에는 Net 기준 55% 이상의 전기효율을 얻을 수 있다. 이러한 효율을 얻는 경우 현재 미분탄 화력을 기준으로 한다면, CO₂ 발생을 25% 이상 저감 할 수 있는 가장 환경친화적인 발전 방식으로 판단된다.

① PCF		② IGCC(1500°C class)	③ IGFC
Latest PCF(USC)	700°C class(A-USC)		
Boiler	Boiler	Gasifier	Gasifier
ST	ST	GT	GT
ST	ST	ST	ST
Gross : 42~43%(HHV) Net : 41%(HHV) (Basis)	Gross : 48% Net : 46% CO ₂ reduction : approx. 11%	Gross : 51~53% Net : 46~48% CO ₂ reduction : approx. 13%	Gross : 60%~ Net : 55%~ CO ₂ reduction : approx. 25%~

PCF(Pulverized Coal)

USC 발전소 :
스팀 및 압력 증가를 통해 발전효율 향상(620°C)

A-USC 발전소 : 700°C 이상 온도 개발 중

IGCC

IGCC 발전소 :
GT와 ST 복합발전

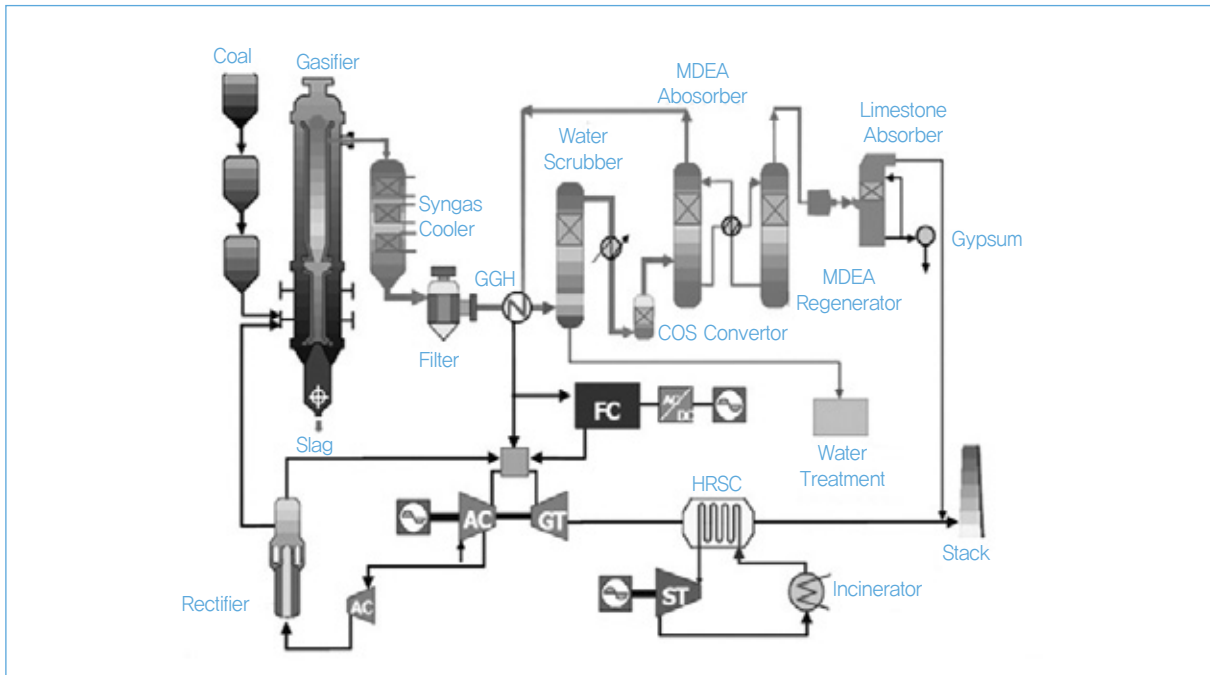
GT Inlet Gas Temp.
향상을 통해 효율 증대

IGFC

IGFC 발전소 :
GT와 ST 및 FC 복합발전

GT Inlet Gas Temp.
향상을 통해 효율 증대

[그림 1] 미분탄 화력 발전의 개발 방향 및 특성



[그림 2] 석탄가스화 복합발전 기본 개요

그리고 IGFC 시스템 내에 설치된 정제시스템을 통하여 사전에 SO_x나 NO_x, 분진 등을 제거함으로써 가장 환경친화적인 발전 설비로 운영할 수 있다. 이와 같은 장점으로 IGFC 발전 시스템은 향후 기력발전을 대체 할 수 있는 가장 확실한 발전 방식으로 주목받고 있다. 그림 2에는 이와 같은 석탄가스화 복합발전 시스템의 전체 모습을 보여주고 있다.

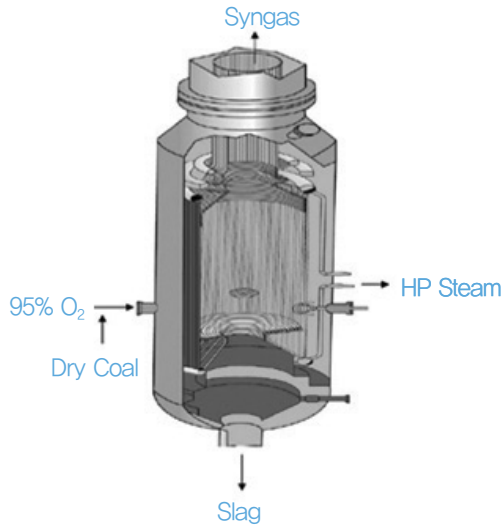
3. IGFC 기술 개요

연료전지 발전은 연료가 가지는 화학에너지를 전기화학 반응을 통해 공기 중의 산소와 결합시켜 물과 전기를 발생하는 직접 발전 방식이다. 직접발전 방식으로 에너지 변환 효율이 높으며 연소반응이 없어 환경친화적인 발전방식이다.

현재 일반적인 연료전지의 연료는 천연가스를 개질한 H₂ 가스가 주성분인 가스를 사용한다. 천연가스에서 개질된 가스는 H₂ 비율이 높고 연료전지에 영향

을 주는 불순물이 아주 적은 이상적인 연료이기 때문이다. 이러한 연료전지는 전해질 및 운전 온도에 따라 다양한 형태로 구분되는데 석탄을 가스화한 연료를 사용할 수 있는 연료전지는 고온 연료전지로 있는 MCFC와 SOFC가 있다. 이는 석탄가스 주성분인 수소 및 일산화탄소를 연료로 사용하는 것이 가능하기 때문이다. 반면 저온 연료전지로 있는 PEMFC 및 PAFC는 내부에 있는 촉매의 CO 피독성으로 사용에 제한이 따르게 된다.

석탄가스화로는 가스화 반응을 일으키는 반응로이다. 이는 반응로 내에서 산소 부족에 의한 불완전 연소를 유도하는 것으로 가스화 반응에 따라 석탄이 고온·고압에서 산소와 반응하여 가연성 가스로 변화된다. 가스 조성은 CO 30~60%, H₂ 25~30% 정도가 된다. 가스화반응기는 고정층(Fixed Bed), 유동층(Fluidized Bed), 분류층(Entrained Bed) 등이 있으나, 거의 모든 발전용 가스화로는 그림 3과 같은 분류층 방식이 사용되고 있다.



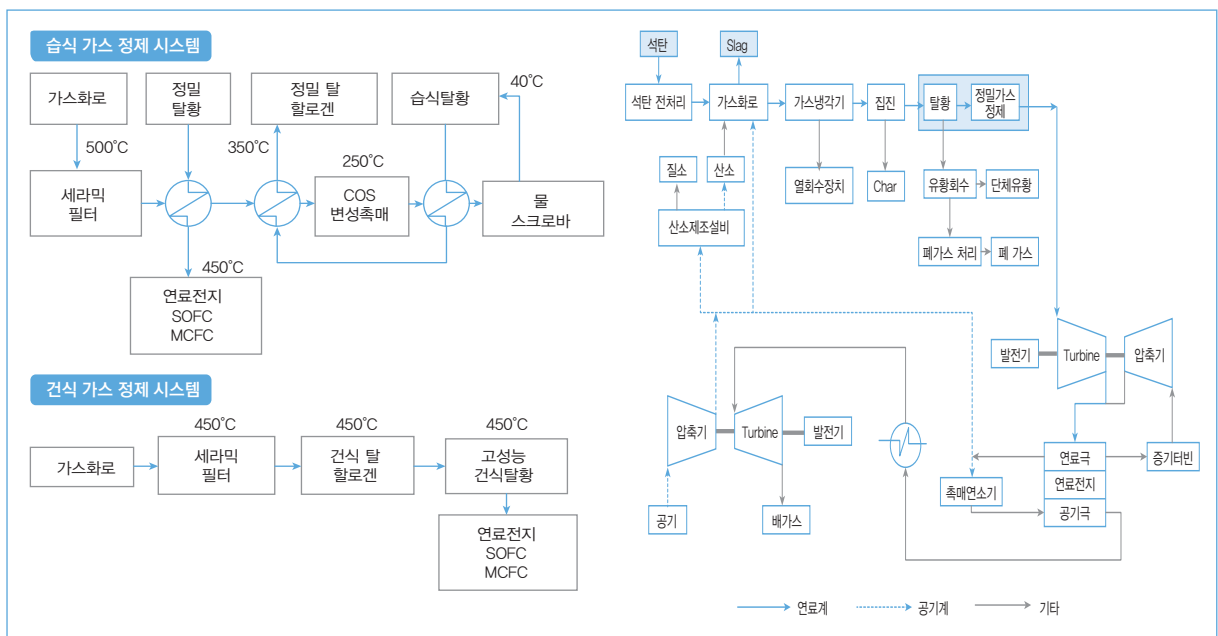
[그림 3] 분류층 석탄가스화로

석탄을 가스화한 연료의 주성분은 H₂ 및 CO 등 연소 성분과 수증기 및 이산화탄소의 비연소성 성분으로 이루어진다. 연소 성분은 주로 반응하여 전기를 생산하지만, 석탄가스 내 불순물로 있는 비연소 성분

인 유황(S), 암모니아, 미량의 금속 등은 연료전지의 성능에 큰 영향을 주게 된다.

특히 저온 연료전지에서는 S 및 CO에 취약하고 고온연료전지의 경우에도 유황 및 CO, 염소(Cl) 성분 등을 1ppm 미만으로 유지하여야만 한다. 따라서 연료전지에 석탄가스를 적용하는 경우 불순물제거를 위한 석탄가스정제기술이 필요하다. 이러한 정제 시스템에는 고온정제(건식) 및 저온정제(습식) 시스템이 있다.

보통 석탄가스는 고온, 고압에서 제조되고 연료전지 역시 고온에서 운전되기 때문에 고온에서 운용되는 건식 정제 시스템을 사용하는 경우 연료전지에서도 높은 에너지효율로 전기를 발생시킬 수 있다. 그러나 건식 기술은 아직 실용화되어 있지 않은 문제점이 있고, 기존 기술인 습식 가스정제 기술은 다양한 불순물을 동시에 제거하는 것은 가능하지만 가스정제 온도와 연료전지 운전 온도 간 차이가 커서 가스 냉각이나 재 가열을 위한 대규모 설비가 필요하다(그림 4 참고).



[그림 4] IGFC 정제시스템 및 IGMFCFC 시스템(일본 Denchuken Review)

4. IGFC 기술 개발 현황

IGFC 기술의 국내외 개발현황을 살펴보면 1990년대 이후 미국, 일본을 중심으로 연구개발이 시작되었으나 IGCC Plant 건설 취소 등 외부 환경변화와 고온 연료전지가 가지고 있는 기술적 난제로 연구개발이 지연되고 있다.

미국은 1992년 LGTI(Louisiana Gasification Technology Inc)에서 20kW 규모의 MCFC 파일럿 시험을 실시하였고, 2004년에는 KPE(Kentucky Pioneer Energy)에서 Wabash River Energy의 IGCC(192MWe 가스터빈, 104MWe 스팀터빈) 설비에 2MW급 MCFC(1MW규모 2기/FCE사)를 조합하여 실증시험을 준비하였으나 가스화기의 문제로 실증시험을 실시하지 못했다. 이 시스템에서는 기본설계에 따른 예측성능이 Syn Gas 이용 시 37.2%, NG 이용 시에는 46.2% 정도가 되는 것으로 보고되었다. 2000년 후반 IG SOFC 연구 및 2010년부터 Coal-based IGFC Project(DOE지원)를 수행하여 50kW SOFC-IGFC Test Stand을 구성, 3,000시간 이상 운전하였다.

일본은 통상산업성에서 CCT 기술개발의 하나로 J-Power의 EAGLE Project를 2002년부터 수행하였다. 이 프로젝트는 향후 계속 사용가능한 석탄을 보다 청정하게 사용할 수 있는 기술을 개발, 활용하기 위하여 타 기력 발전 기술보다 높은 발전효율 및 CO₂ 배출량의 감소가 가능한 발전 기술 개발을 목적으로 하고 있다.

이 프로젝트는 연료전지와 가스터빈, 그리고 스팀터빈을 연계한 발전 시스템의 실증을 목표로 하고 있는데 이를 Triple Combined Cycle로 부른다. 이는 석탄가스화 기술을 통해 석탄을 Ash free의 연소가스로 전환시켜 천연가스와 같은 편리한 운용이 가능하도록 정제하여 연료로 사용하려는데 목적이 있었다.

국내의 경우 IGFC에 대한 통합 프로젝트 수행 경

험은 없으나, 정부 주도의 'IGCC 기술 로드맵'과 한국에너지기술평가원(KETEP)의 '그린에너지 전략 로드맵 2011' 중 장기계획에 반영되어 있어 향후 기술개발이 추진될 것으로 예상된다.

석탄가스화 기술은 한전, 두산중공업, 한국서부발전 등에서, 고온 연료전지 기술은 한전, 포스코, 두산중공업 등에서 프로젝트의 단위 기술개발 수행 및 실증 경험을 가지고 있다. 이외 2015년 말 운용 예정인 태안 IGCC 시스템과 연계할 수 있는 시스템, 그리고 신규 건설예정인 Syn Gas 플랜트와 연계되는 IGFC 시스템 등에 대한 타당성 조사가 이루어지고 있다

5. 석탄가스화 연료전지 종류

가. 석탄가스화 MCFC 시스템(IGMFC)

석탄가스를 이용하여 MCFC와 복합발전 시스템을 구성하는 시스템은 2가지를 생각할 수 있다. 외부개질형 MCFC 시스템을 이용하는 경우 시스템은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 이 경우 가스화로는 공기 흡입 혹은 산소흡입 가스화로를 사용할 수 있다(가스화로 20기압, 연료전지 10기압). 이 시스템의 집진은 세라믹 필터를 이용하며, 탈황은 1, 2단계로 하고 탈황에서 회수된 유황을 저장해 사용하도록 한다.

MCFC는 Anode Recycle을 통하여 탄소 석출을 방지하고 공기극에서 필요로 하는 이산화탄소는 연료극에서 CO₂ Recycle을 통하여 공급 받는다. 이러한 IGMFC 시스템에서는 석탄가스 이용 시 석탄 가스화로 형태에 따라 생성가스 구성 성분이 차이가 나기 때문에 가스정제 설비도 가스 조성에 따라 성능에 크게 영향을 미치게 된다.

한편, 현재 상업화가 가장 앞서 있는 내부개질 MCFC 발전 시스템을 이용하는 경우 내부개질 MCF 시스템이 메탄을 원료로 사용하고 있기 때문에, 석탄가스 주성분인 CO, H₂ 메탄화 과정을 거쳐 고순도

메탄(CH₄)을 생산하여 이를 MCFC용 연료로 사용하여야 한다. 이 경우 석탄가스로부터 메탄화 하고 다시 이를 수소와 이산화탄소로 만들어 반응에 사용해야 하기 때문에 전체적으로 외부개질 MCFC를 사용하는 것보다도 종합효율이 크게 저하되어 경제성을 잃게 된다.

나. 석탄가스화 SOFC 시스템(IGSOFC)

연료전지를 SOFC로 대체하는 경우 MCFC와 비교하여 커다란 차이는 없다. 그러나 MCFC 운전온도가 SOFC 보다 낮고, 전해질 내 전하 이동 매체가 MCFC는 탄산이온(CO₃), SOFC는 산소이온 O₂라는 점에서 설비의 간소화가 가능하고, 고온의 배 가스를 이용 할 수 있어 효율이 높은 IGFC 발전 시스템 구성이 가능하다.

또한, IGSOFC 시스템은 SOFC 전지 반응 시 탄산가스의 흡수 및 방출도 없어 CO₂ Recycle 시스템이 필요 없고 이로 인하여 석탄가스 불순물이 공기 극 쪽으로 직접 유입하는 데 따른 대책이 필요 없다. 연료 전지 동작온도와 같은 온도로 가스화로가 운전되는 경우에는 냉각장치나 재가열 장치가 필요 없어 전지 동작온도에 맞는 건식 가스 정제법 개발이 필요하다.

이들 특징에 따라 SOFC용 석탄가스 정제는 종합적으로 MCFC에 비하여 그 비용이 경감될 수 있다. 그러나 SOFC는 아직 실용 시스템 개발 규모로 전지 개발에 따른 지속적인 검토가 필요하다.

6. 맺음말

IGFC는 차세대 발전기술인 IGCC 보다 한 단계 발전된 기술로 기존의 개발된 연료전지(MCFC 또는 SOFC)와 융·복합 시 보다 큰 시너지를 얻을 수 있는 차세대 신 발전 기술로 부각되고 있다. 또한, IGFC는 석탄가스를 연료로 고온연료전지와 복합하여 발전하는 경우(GT+FC+ST) 고효율과 더불어 CO₂ 저감을 예상할 수 있다.

이러한 장점으로 IGFC에 대한 연구 및 이들과 연계하기 위한 고온 연료전지(MCFC, SOFC), 그리고 정제시스템에 대한 기초 기반 기술에 대한 본격적인 연구를 착수할 필요가 있다.

국내 IGCC 플랜트의 운전이 2015년 계획되어 있고 석탄을 연료화한 SNG 기술 개발도 본격화되고 있다. 또한, 국내는 내부개질형 MCFC가 전 세계에서 가장 많이 이루어져 있어 이들 기술에 대한 관심이 고조되고 있다.

그리고 장기적으로는 IGFC에 유리한 외부개질 MCFC와 석탄가스화를 연계하는 프로젝트도 필요하다고 생각된다. 이 분야 미래기술 선점을 위해서는 국내 연구개발 및 원천기술 확보가 유리한 SOFC를 활용한 IGFC 기초 기술 연구를 먼저 진행하고, 아울러 미국 FCE사 IRMCFC와 연계된 시스템 개발을 통하여 발전사의 사업화 참여를 유도할 필요성이 있다. 