



# MCFC 발전 시스템을 이용한 CO<sub>2</sub> 농축 및 포집기술



임 희 천  
한전 전력연구원 수석연구원

## 1. 서 론

물의 전기 분해반응을 역으로 이용하는 연료전지 발전 방식은 연료가 가지고 있는 화학에너지를 전기화학 반응을 이용하여 전기에너지로 직접 변환시키는 저공해 고효율의 새로운 발전 방식이다. 여러 형태의 연료전지 발전 방식 중 석탄 가스화와 연계하여 복합발전으

로도 사용가능한 용융탄산염 연료전지 (MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell) 발전방식은 전력사업 분야에 적용 가능성이 가장 큰 발전 방식이다.

한편 화석연료를 이용하는 화력발전소의 가장 큰 문제는, 지구온난화의 가장 큰 원인으로 지적되고 있는 이산화탄소 발생 저감이다. 이를 해결하기 위하여 습식

및 건식 이산화탄소 포집 및 저장기술(CCS : Carbon Capture & Storage)들이 활발히 개발되고 있다. 그러나 이들 기술들은 화학공정상 에너지를 필요로 하는 방법이기 때문에, 설비 설치 및 유지에 많은 투자비를 필요로 한다.

한편 다양한 연료를 이용하여 발전하는 MCFC 발전 기술은 발전 외에도 이산화탄소의 분리 농축 기능을 가지고 있어 발전과 함께 이산화탄소 저감이 가능한 새로운 방법의 이산화탄소 저감과 발전을 동시에 적용할 수 있는 새로운 개념의 발전 기술이다. 특히 석탄화력 발전설비와 동시에 병설로 MCFC 발전설비를 건설할 경우 화력 발전 배가스를 MCFC 발전설비와 연결함으로써 화력발전 배가스 내 이산화탄소를 분리 농축하는 것이 가능하고 이를 통해 이산화탄소 저감에 크게 기여할 수 있다.

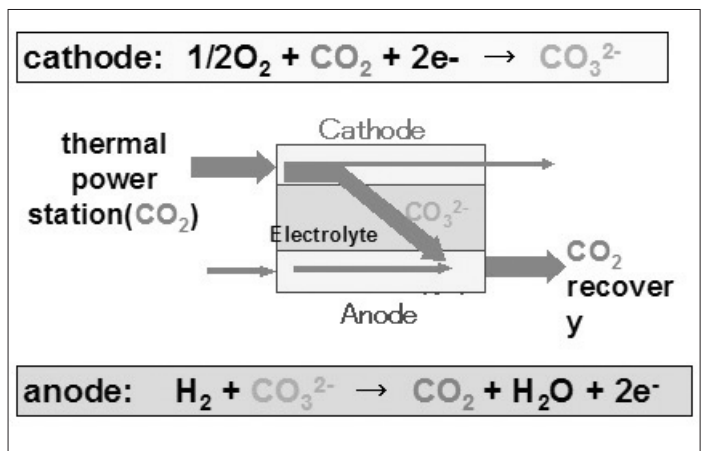
이와 같은 점에서 고효율, 연료의 다양성, 이산화탄소의 분리 농축 등의 특성을 가지고 있는 MCFC 기술을 이용한다면 고효율을 통한 에너지를 절약효과로 이산화탄소의 발생을 억제할 수 있고, 장래 석탄가스를 연료로 사용하여 석탄의 이용 다각화를 도모함과 동시에 폐기물 가스나 바이오매스 가스 이용을 통한 에너지의 유효 이용, 그리고 이산화탄소 농축 포집을 통한 CCS 기술과 연계되는 발전기술로 활용이 가능하다.

## 2. MCFC 발전이용 CO<sub>2</sub> 농축 포집 기술 개요

### 가. 기본원리

용융탄산염 연료전지는 일반적으로 그림1과 같이 다공성 연료극(anode)과 공기극 사이에 용융탄산염 전해질로 구성되어 있다. 수소가 주성분인 연료가스, 산소

와 이산화탄소로 구성된 산화제가 각각 연료극과 공기극으로 공급되며 다음과 같은 전기화학반응에 의하여 용융탄산염 연료전지는 전기와 열 및 물을 생산한다. 한편 이와 같은 전기화학 반응에서 그림 1과 같이 MCFC 공기극(Cathode)의 CO<sub>2</sub>가 선택적으로 연료극 쪽으로 이동하기 때문에 석탄 화력발전 연료의 배가스를 MCFC 공기극에 도입하는 경우, 이들 CO<sub>2</sub>가 연료극으로 이동하여 농축되는 결과를 얻을 수 있게 됨으로써 MCFC 발전에 의한 CO<sub>2</sub>의 회수가 분리 가능하게 된다.



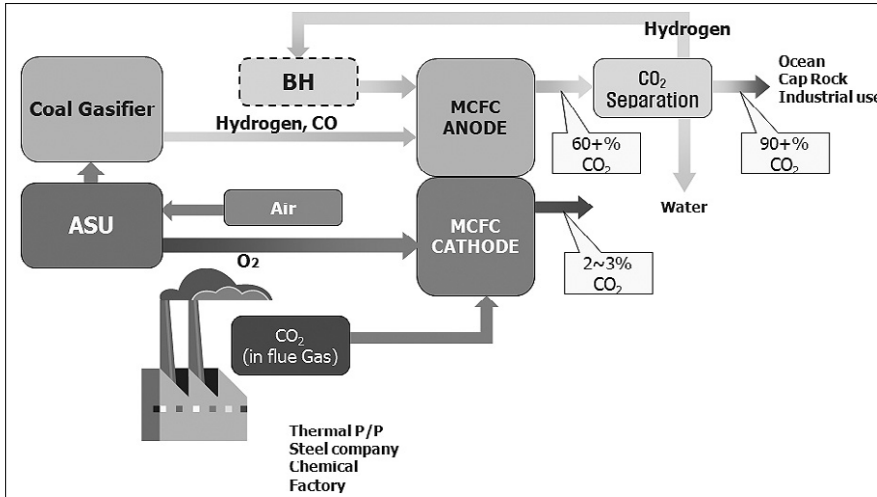
[그림 1] MCFC이용 CO<sub>2</sub> 농축 포집 기술 원리

### 나. MCFC CCS Hybrid System 구성

일반적인 용융탄산염 연료전지 발전시스템은 연료전지 스택을 중심으로 연료처리 장치, 직교류 변환 장치 및 배열 회수 이용 장치 등으로 구성된다. CO<sub>2</sub> 농축 및 포집을 위한 MCFC CCS hybrid 시스템의 경우에는 석탄화력 배가스 내 황 성분을 제거하기 위한 탈황설비를 포함한다.

시스템으로 MCFC 발전 방식은 외부 개질형 시스템이 다양한 형태로 연료 사용이 가능함으로써 CCS 시스템과의 Hybrid system으로 적용이 용이하다. 반면 내부개질형인 경우에는 메탄계(천연가스) 연료만 사용할

수 있다. 공급된 반응가스와 공기를 사용하여 전류와 열을 생성하는 연료전지 스택은 전기를 생산하는 기본으로 이들 단위전지가 수백 장 적층되어 스택을 구성한다. 직 교류 변환 장치는 연료전지에서 생성되는 직류 전기를 실제 사용가능한 교류로 변환시키는 역할을 한다. 스택에서 발생하는 고온, 양질 배열을 이용한 복합발전이 용융탄산염 연료전지에서는 가능하여 Rankine cycle을 이용하여 교류전류를 추가로 얻을 수 있다. MCFC 설비를 CCS 시스템과 병렬로 연계하는 시스템의 경우에는 화력발전 연돌에서 나오는 배가스 중 들어 있는 유황 성분 및 각종 이물질질을 제거할 수 있는 전처리 설비가 별도로 필요하다.



[그림 2] CO<sub>2</sub> Capture를 이용한 IGFC 시스템 개요

그림 2는 CO<sub>2</sub> Capture를 전제로 하는 석탄 가스화 MCFC 발전 시스템과 CCS 시스템과의 연계시스템 개요를 보여주고 있다. 석탄가스 내 CO, H<sub>2</sub> 혹은 부생수소를 시스템 내 연료극에 공급하고, 공기 중 산소를 분리하여 공기극 쪽에 공급하면서 석탄화력 내 배가스 혹은 공장 연돌의 CO<sub>2</sub>를 공기극 쪽에 공급하게 되면 MCFC 발전 시스템 내 연료극 쪽에 60% 정도의 CO<sub>2</sub>가 농축되고 이를 다시 분리공정을 통과하게 하면 90%까지 CO<sub>2</sub> 농도를 높일 수 있게 된다. 이후 이를 습식 혹은

건식 CCS 기술과 연계하면 보다 값이 싼 공정으로 CO<sub>2</sub>를 포집 저장 할 수 있는 CCS MCFC Hybrid 시스템으로 구성이 가능하다.

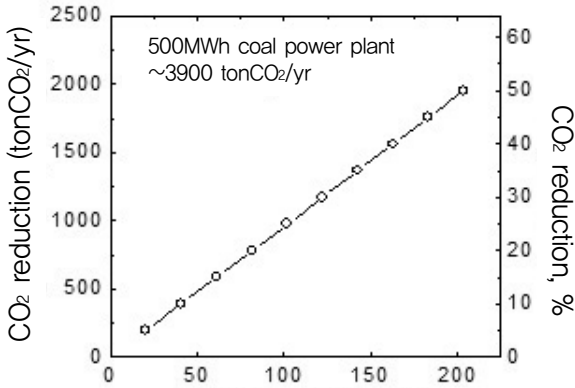
#### 다. MCFC 이용한 CCS Hybrid System CO<sub>2</sub>

##### 저감 효과

MCFC 이산화탄소 분리 농축 기능을 이용하여 이산화탄소를 회수하는 효율을 대규모 석탄화력 발전소로 시산한 예를 'CRIEPI Report' 에서 보여주고 있다. 적용된 석탄화력 발전소는 90만kW급으로 나오는 배가스 10% 정도를 사용하는 MCFC 발전 설비를 설치하는 경우를 예측한 결과이다. 이때 사용된 근거로는 석탄을

연료로 하는 90만kW 석탄화력 발전소와 이용량의 10% 정도인 천연가스를 연료로 하는 9만kW MCFC 발전설비를 설치한 경우이다. 천연가스 MCFC 발전 설비의 효율은 50% (LHV) 송전단으로 계산할때 해당 발전소에 공급되는 연료에 의한 탄소 발생량은 석탄 화력은 241ton-C /h, 천연가스 MCFC의 경우에는 9.5 ton-C/h 정도가 되어 발전소 발

생 총 이산화탄소의 배출량의 10% 정도를 분리수거 할 수 있는 것으로 알려지고 있다. 이상의 조건으로 화력 발전소 배가스 중 10%를 (탄소량 환산 22.1 ton-C /h) MCFC 공기극 쪽에 공급할 경우 MCFC 연료극 쪽에서는 이산화탄소가 농축되어 고농도 이산화탄소가 되어 이산화탄소의 분리 농축이 가능해 진다. 이 가스는 고압으로 처리하면 쉽게 액체 탄산가스로 회수가 가능하다. 시산 결과에 따르면, MCFC를 통하여 회수되는 이산화탄소는 21.7 ton-C/h로되고 양 설비에 공급되는 탄소량 대비 대기배출 탄소량의 10% 정도의 삭감이 가



[그림 3] 모사된 50만kW 석탄화력 배가스 이용 시 CO<sub>2</sub> 저감량

500MWh coal power plant	Normal Condition
Gas flow at stack inlet (Nm <sup>3</sup> /hr)	1,612,000
CO <sub>2</sub> , % by volume	14.07
O <sub>2</sub> , % by volume	3.48
N <sub>2</sub> , % by volume	74.28
SO <sub>2</sub> , % by volume	0.06
HO <sub>2</sub> , % by volume	8.11

능한 것으로 나타나고 있다.

이와 같은 조건에서 국내 표준 석탄화력인 50만kW 발전 설비에 2만kW MCFC 발전 설비를 설치하는 경우 CO<sub>2</sub> 양을 12%에서 5%까지 줄일 수 있는 것으로 나타나고 있다. 그림 3은 Unit 당 50만kW 석탄화력을 가지고 있는 보령화력 발전소 배가스 및 운전 조건을 보여주고 있으며, 이를 활용하여 200MW 규모의 천연가스 연료전지를 조합하는 경우 나타나는 CO<sub>2</sub>저감 효과를 보여 주고 있다.

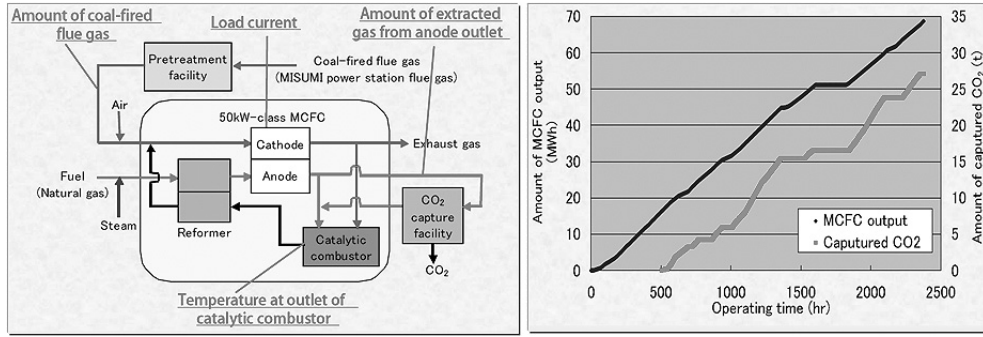
### 3. MCFC 발전 및 CO<sub>2</sub> 농축 포집 기술 개발 현황

#### 가. 국내외 MCFC 기술 개발 현황

용융탄산염 연료전지(MCFC)에 대한 본격적인 연구는 미국에서는 1970년대 말 그리고 일본에서는 1980년대 초에 각각 시작되었다. 미국은 초기 석탄의 효율적인 이용을 목표로 하여 개발이 이루어지고 있었으나 현재 FCE(Fuel Cell Energy)에서는 상업화된 분산형태로 300kW에서 2.4MW 규모의 내부 개질 시스템을 개발하여 전 세계에 판매하고 있다. 국내에서도 POSCO Power가 FCE와 협력, 국내에 주변기기 공장을 설립하여 국내 및 아시아 시장에 설비를 공급하고 있다. 외부

개질은 다양한 연료를 사용하기 때문에 석탄가스 및 복합발전을 목표로 개발하고 있는데 일본은 1980년부터 본격적인 연구가 시작되어 NEDO가 주관하여 개발하였다. IHI에서는 1999년 외부 개질형 MW급 시스템을 구성, 주부전력 구내에 설치하여 운전시험을 실시하였고 가스터빈과 연계된 300kW 복합발전 시스템 개발을 진행하였다. 이외 유럽에서는 이탈리아가 유로의 지원으로 500kW급 시스템을 개발을 진행하고 있으며, 독일 MTU에서는 미국의 FCE 스택을 도입, 독자적인 시스템으로 개발된 300kW급 시스템을 유럽지역에 공급하고 있다.

국내 기술개발은 1993년부터 선도 기술개발 사업으로 시작하여 2004년 100kW급 발전시스템 개발이 정부 대체에너지 기술개발 중점사업으로 선정되어 진행되었다. 이후 250kW 급 시스템 개발을 추진하고 있으며, 2010년 초 세계에서 가장 큰 10,000cm<sup>2</sup> 급 단위전지를 이용한 125kW 스택 및 운전시스템을 개발하여 3,000여 시간을 성공적으로 운전함으로써 외부 개질형 MCFC 스택의 상용 기반 기술을 확립하였다. 국내에서 개발된 이들 MCFC 기술을 이용하면 CO<sub>2</sub> 분리 농축, 저장 기술에 적용할 수 있다.



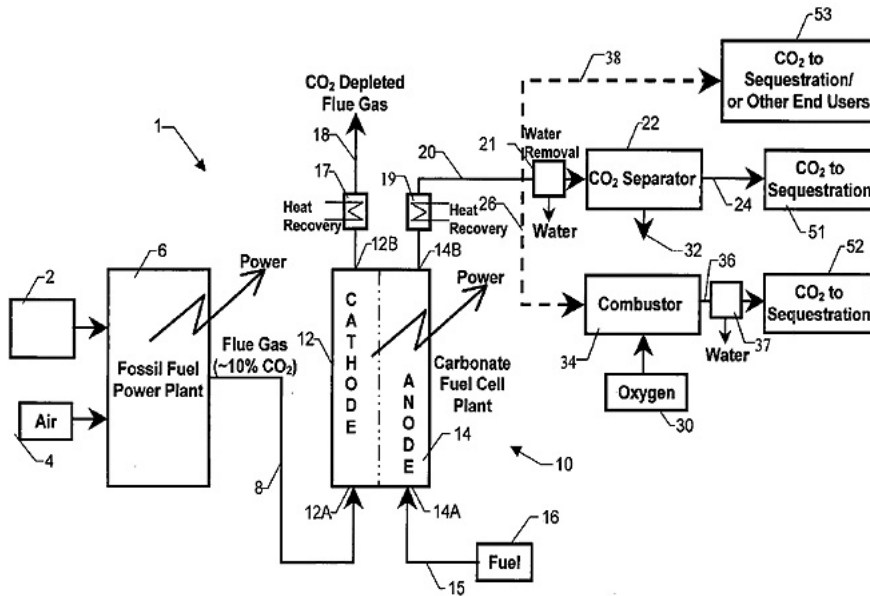
[그림 4] 중국전력 및 중부 전력 공동 150 kW MCFC Hybrid 시스템 시험 결과 (제4차 Int. CCT & FC workshop Presentation, 2008)

나. 국내외 MCFC 이용 CO<sub>2</sub> 분리 농축 기술개발 현황

MCFC를 이용한 CO<sub>2</sub> 농축 및 분리기술에 대한 실증 시험은 일본 중부발전, 중국발전이 공동으로 2004년 착수하여 2007년 실증시험을 완료하였다. 내용은 일본 중국발전에서 MCFC 전지 성능 유지를 위한 배가스 전 처리기술 (석탄 전처리 중 SO<sub>x</sub> 제거 기술) 및 전지 구성요소 내식성 향상 기술을 수행하였고, 중부발전에서는 CO<sub>2</sub> 회수기술 개발을 위하여 천연가스를 이용한 CO<sub>2</sub> 회수 성능 및 발전 성능 기술 개발을 진행하였다. 시스템 종합 시험은 2007년 이루어졌는데 150kW

MCFC에 의한 석탄화력 배가스 이용 CO<sub>2</sub> 회수 실증 시험을 진행하였다.

시험결과에 따르면, 2007년 운전한 실증시험에서 2,100 시간 운전기간 중 총 68MWh의 전력 생산과 함께 27.1ton의 CO<sub>2</sub>를 회수한 것으로 보고되었다. 한편 CO<sub>2</sub> 농축 28.5 kg-C/h 이고, 농축비는 78.5%를 보여 Hybrid 시스템으로 MCFC 가능성을 충분히 과시하였다. 그림 3은 일본 중국전력 및 중부전력 공동 150kW MCFC Hybrid 시스템 시험 결과(2007년)를 보여주고 있다.



[그림 5] 미국 FCE사 IR Type MCFC 시스템 이용 CO<sub>2</sub> Capture 특허

한편 미국에서도 FCE 사에서 IR Type MCFC 시스템을 이용한 CO<sub>2</sub> Capture 에 대한 특허를 출원하여 기술 개발을 진행하고 있다. 출원 (FCE US2005/0271914 A1) 시스템은 화석연료를 사용하는 기력발전 배가스를 MCFC 공기극에 연결한 후 연료극쪽에서 CO<sub>2</sub> 분리를 위해 순산소 연소 및 분리공정을 병렬로 설치하여 CO<sub>2</sub> 의 다양한 포집 및 적용을 제안하고 있다.

이외에도 천연가스를 사용하는 MCFC 시스템과 천연가스 복합발전 시스템과 연계하여 CO<sub>2</sub>를농축, 분리하는 경우 가스터빈 연소 후 CO<sub>2</sub> 농도 12% 배가스를 MCFC 공기극에 연결하는 경우 MCFC 연료극 배가스 내에 최대 83%까지 농축할 수 있는 것으로 보고되고 있다.

#### 4. 맺음말

MCFC 발전 방식은 타 화석연료를 사용하는 기존의 발전방식에 비하여 에너지 변환효율이 높고, 공해요인이 적다. 아울러 석탄가스 등 다양한 연료 사용이 가능하기 때문에 제 3세대 발전 방식으로 주목 받고 있다. 이는 향후 화력 발전기술의 진행 방향과 매우 일치하는 발전 방식이다. 석탄발전의 경우에도 향후 석탄 가스화와 연료전지 발전 방식이 복합된 IGFC (IGMCFC, IGSOFC) 복합발전 방식으로 화력발전 기술진보가 예상되고 있다. 이때 MCFC와 CCS 기술을 병합하게 되면 석탄을 연료로 하는 발전 설비에서 CO<sub>2</sub> 분리포집을 겸할 수 있고, 연료전지에 의한 발전과 동시에 CO<sub>2</sub>를 농축, 분리 수거하여 저장할 수 있는 일관공정이 가능하게 되어 CCS- MCFC 복합시스템으로 활용이 가능하다.

현재 국내에서는 전력연구원 주관으로 추진된 신 재생에너지 중점과제 ‘외부개질 MCFC 시스템 개발 사업’에서 125kW MCFC 스택 개발 및 시스템 운전에 성공함으로써 외부개질형 MCFC 스택 상용 기반기술을 확립하였다. 발전사들은 이를 기반으로 분산 MCFC 발전 시스템 개발 상업화 보급 외에도 현재 주목받고 있는 CO<sub>2</sub> 농축 및 포집 기술과 연계하여 RPS & CDM 사업을 동시 추진 할 수 있고, CCS 기술의 조기 상용화 및 기존 석탄화력 발전 설비를 환경 기준에 맞게 지속적으로 운용 할 수 있는 토대를 만들 수도 있다. 이와 같은 기술의 조기 실용화에 노력하여 MCFC 발전설비와 CCS 설비복합화기술을 확보한다면 보다 빠른 시일 내에 연료전지 및 CCS 상업화에 큰 도움이 될 것으로 전망된다.

#### 8. 참고문헌

- 1) 임희천 외 : ‘250kW급 열병합 용융탄산염 연료전지 발전시스템 Proto Type 개발(2단계 1차년도 사업보고서)’, 한국 전력공사 전력연구원, 대전, 2010
- 2) Mitsuo Toyoda etc ‘Development of CO<sub>2</sub> capture System with MCFC’ 4th Int. CCT & Fuel Cell Workshop, Wuxi, China Nov. 14-15, 2008
- 3) Tae Won Lee ‘Fuel Cell Derivative Products for Green Growth’ Symposium on Hydrogen and Fuel Cell, Energy Conference, DaeGu, Korea April. 7, 2010
- 4) Farooque etal, ‘United Patent Application Publication’ Pub No.: US2005/0271914 A1. Dec.8, 2005