



# 250 kW급 외부 개질형 MCFC 발전 시스템 개발

임 희 천  
한전 전력연구원 수석연구원

## 1. 서론

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 분산형 전원 및 석탄 가스화와 연계하여 복합발전으로도 사용가능한 용융탄산염 연료전지 (MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell) 발전방식은 전력사업 분야에 적용 가능성이 가장 큰 발전 방식이다. 현재 선진국에서는 MW급 실증플랜트 운전 시험을 완료하고, 보다 높은 효율을 갖는 분산형대 상용 발전시스템으로 개발, 국내에서도 보급이 활발히 진행되고 있다.

국내 기술개발은 1993년부터 선도기술개발 사업으로 시작하여 2004년 100 kW급 발전시스템 개발이 정부 대체에너지 기술개발 중점사업으로 선정되어 진행하였고 이어 250 kW 급 시스템 개발을 추진, 2008년 말 세계에서 가장 큰 10,000cm<sup>2</sup> 급 단위전지를 이용한 75 kW 스택 및 운전시스템을 개발하여 3,000여 시간 성공적으로 운전함으로써 외부 개질형 MCFC 스택의 상용 기반 기술을 확립하였다. 여기서는 2004년부터 추진되고 있는 250 kW 급 외부개질 MCFC 발전 시스템 개발 결과를 간략하게 소개하고자 한다.

## 2. MCFC 발전 시스템의 개요

### 가. 기본원리

용융탄산염 연료전지는 일반적으로 그림 1과 같이 다공성의 Ni 연료극(anode)과 NiO 공기극(cathode) 사이에 Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>와 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>의 혼합 용융탄산염 전해질로 구성하고 역시 다공성의 LiAlO<sub>2</sub> 매트릭스로 구성된다. 수소가 주성분인 연료가스와 산소와 이산화탄소로 구성된 산화제가 각각 연료극과 공기 극으로 공급되며 다음과 같은 전기화학반응에 의하여 용융탄산염 연료전지는 전기와 열 및 물을 생산한다.

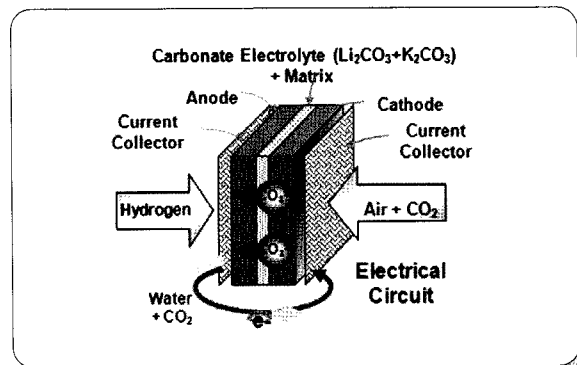
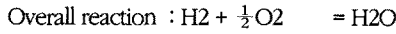
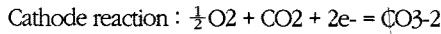
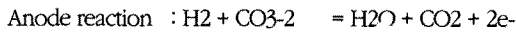


그림 1. MCFC 발전 원리



나. MCFC 발전시스템 종류 및 용도

용융탄산염 연료전지 발전시스템은 연료전지 스택을 중심으로 연료처리 장치, 직교류 변환 장치 및 배열 회수 이용 장치 등으로 구성된다. 시스템의 종류에는 연료전지가 필요로 하는 수소를 연료처리 장치에서 공급하는 외부개질형태(External Reforming Type)의 MCFC와 전기를 생산하는 연료전지스택에서 연료가 직접 수소로 전환하여 공급되는 내부개질형(Internal Reforming)MCFC 시스템이 있다. 외부개질형 시스템의 경우 다양한 형태의 연료 사용이 가능하는데 반하여 내부개질형인 경우 메탄 계(천연가스) 연료만 사용할 수 있다. 외부개질 시스템의 경우 연료공급 장치로써 석탄, 천연가스 등을 스택에서 사용 가능한 연료가스로 전환시키는 연료 처리 장치, 공기 공급 장치 및 정화 장치 등으로 구성된다.

공급된 반응가스와 공기를 사용하여 전류와 열을 생성하는 연료전지 스택은 전기를 생산하는 기본으로 이들 단위전지가 수백 장 적층되어 스택을 구성한다. 스택은 반응가스가 각 단위전지로 균등하게 공급되도록 설계된다. 기본적으로 각 단위전지는 전해질 매트릭스에 의하여 분리된 연료극과 공기극 등 두개 전극으로 구성된다. 직교류 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.

연료의 다양성, 모든 부하에서의 높은 전기효율, 환경친

화성 및 열병합 발전으로 대표되는 용융탄산염 연료전지 장점으로 MCFC 용도는 병원, 호텔, 아파트단지 등에 직접 설치하는 수백 kW, 수십 MW급 분산형 전원으로부터 기존 대형 화력발전을 대체하는 수백 MW급 이상의 중앙 집중대형 발전방식에 이르기까지 다양하게 적용될 수 있다. 발전 규모에 따라 석탄가스화와 연계가 가능한 외부개질형 용융탄산염 연료전지는 주로 대형 발전을 목표로 개발이 진행되고 있는 반면, 천연가스가 주 연료로 예상되는 내부개질형 용융탄산염 연료전지는 소규모 열병합 발전을 주 목표로 개발되고 있다. 그림은 향후 발전될

다. 국외기술개발 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 Energy에서는 상업화된 분산형태 300 kW에서 2.4 MW 규모의 내부개질 시스템을 개발하여 전 세계에 판매하고 있다. 국내에서도 POSCO Power가 FCE와 협력 국내에 주변 기기 공장을 설치하여 국내 및 아시아 시장에 설비를 공급하고 있다. 외부개질은 다양한 연료를 사용하기 때문에 석탄가스 및 복합발전을 목표로 개발하고 있는데 일본은 1980년부터 본격적인 연구가 시작되어 NEDO가 주관하여 개발하였다. IHI에서는 외부개질형 1999년 MW급 시스템을 구성 주부전력 구내에 설치하여 5,000시간의 운전시험을 실시하였고 가스터빈과 연계된 300 kW 복합발전 시스템 개발을 진행하였다. 이외 유럽에서는 이태리가 유로의 지원으로 500 kW급 시스템을 개발을 진행하고 있으며, 독일 MTU에서는 미국의 FCE 스택을 도입 독자적인 시스템으로 개발된 300kW급 시스템을 유럽지역에 공급하고 있다. 표1에 세계 및 국내현황을 요약하였다.

표 1. MCFC 발전 시스템 종류 및 개발현황

전 압	외부 개질(ER) MCFC	2012년
연 료	화석연료 H <sub>2</sub> , Coal Gas etc.	Methane (NG)
현 황	IHI(Japan) : MW 실증, (200) 300kW (2006) ANSALDO (Italy) : 500kW 개발 중	FCE(USA) : 300kW, 1.2MW, 2MW Commercialization MTU CFC(Germany) : 300kW hot Module 500kW 개발 중
국 내	KEPCO(KEPRI)/RIST : 100kW (2005) 250kW (2009)	POSCO - FCE 협력 (국내 및 아시아 지역 판매) 두산 중 : 300kW 개발 중
개발방향	KEPCO-POSCO 공동연구 IGFC 상업화 (장기) 부생수소 System (단기)	기술 수입 및 국내개발 Stack/System Development 분산형 (단기 및 중기)

### 3. 250 kW급 외부개질 MCFC 발전 시작품 개발 개요

전력사업 발전분야에서 에너지 절약효과 및 지구환경 문제에 대응하고, 특히 분산전원 및 대형 발전으로 적용가능성에 따라 추진되고 있는 MCFC 개발은 장기적으로는 석탄을 연료로 하는 대형 발전 시스템의 대체, 단기적으로는 분산전원 적용을 위하여 소규모 발전시스템 개발을 통한 국내 상용 기반 기술 확보에 있다.

250 kW급 MCFC 열병합 Proto Type 개발은 실제 상용화를 위한 열병합 발전 설비로서 보급 가능성 및 실증을 위한 설비로, 저 코스트 단위전지 구성요소 개발 실증 및 시스템의 기본 구성을 통하여 고 적층 전지, 고효율 개질기 연계 운전 실증을 진행 할 예정이다. 주요한 기술개발 목표로 출력 250 kW AC (송전단) 압력은 상압을 기본으로 하며, 목표 운전시간은 10,000 시간으로 연료는 천연가스 그리고 발전효율은 40% (시스템 효율 60%)를 목표로 한다.

표 2. 250 kW MCFC 시스템 기술 규격

Components	Anode	Ni+AL Alloy
	Cathode	NiO (in situ)
	Matrix, Electrolyte	α-LiAlO <sub>2</sub> , Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
	Separator	STS310, Alcoating
stack	Gas Flow	Internal Manifolds
	Reforming	Externally Reforming
	Numbers	2 sub stacks (125kW)
	No. of cells	150 cells(1 m <sup>2</sup> )
Reformer		Conventional Type
Catalytic Combustor		Premixing Type
	Pressure	
	Recycle	

### 가. 250 kW MCFC 시스템 설계

상세설계가 완성된 250 kW MCFC 시스템 개략도와 3D Drawing을 그림 에서 보여주고 있다. 250 kW MCFC 시스템은 크게 개질기와 MCFC 스택 그리고 연료극(Anode) Recycle 시스템으로 구성된다. 이외 개질기 및 스택 내에 스택을 공급하는 증기 발생기 및 수처리 장치, 공기공급 장치 등으로 이루어져 있다. 연료 극에는 개질기에서 천연가스로부터 수첨 개질반응을 통하여 얻게 되는 수소와 Steam 그리고 이산화탄소가 공급된다. 공기극(Cathode)에는 촉매연



소기에서 생성된 이산화탄소와 공기가 공급되어 전기히터에 의해 600℃ 이상으로 가열되어 스택 내로 공급된다. 스택 내에서는 Anode 및 Cathode에 공급된 반응가스가 전극 내에서 반응하여 전기를 생산하고 반응 가스는 외부로 배출된다.(그림 2 참고)

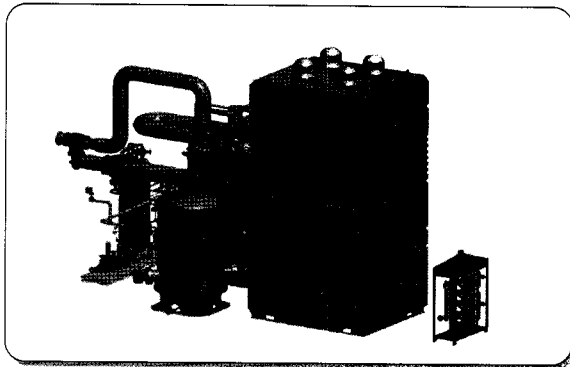
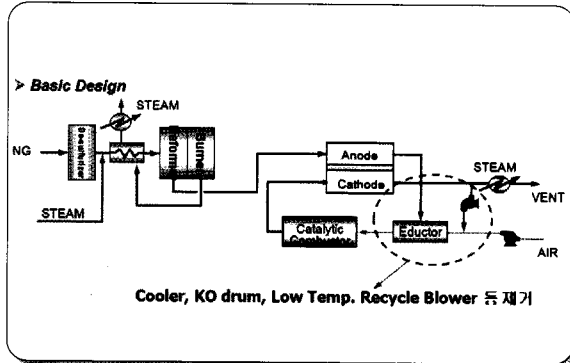


그림 2. 250 kW MCFC System Configuration 및 3D Drawing

#### 나. 250 kW MCFC 스택 설계

250 kW MCFC 스택은 125 kW급 MCFC 스택 2기로 구성되며, 1m<sup>2</sup>급 유효 전극 면적을 갖는 단위전지들로 구성될 예정이며, 가스의 흐름은 Internal Manifold & Co-flow Type 형태로 되어있다. 단위전지는 10,000cm<sup>2</sup> 반응면적을 가지고 있고 이들 단위전지 150 장 적층되어 MCFC 스택을 구성하게 된다. 스택 내 반응가스를 공급하기 위한 스택 내부에 입, 출구 매니폴드를 가지고 있으며 스택 내 유동은 입구 매니폴드에서 분리판 하부로 반응가스가 공급되어 상부 단위전

지로 분산 공급 된다. 반응이 이루어진 가스는 다시 하부 분리 판에서 하부 매니 폴드로 모이고 스택 출구 관을 통하여 배출된다. 따라서 스택 내 Anode 가스와 Cathode 가스는 같은 쪽에서 들어와서 반대방향으로 나가는 평행류(Co-Flow Type)형태를 보여주고 있다.

#### 4. 250 kW급 스택 개발을 위한 75 kW 스택 운전평가

##### 가. 75 kW MCFC 스택 장착

MCFC 구성요소 요소별 기술 수준을 점검하고 개발 방향을 점검하기 위하여 125 kW 스택을 제작하여 운전하기 전에 중간규모의 75 kW급 MCFC Short Stack을 제작 운전평가를 시행하였다. 75 kW급 MCFC Short stack은 125 kW에서 사용될 10,000 cm<sup>2</sup> 유효 전극 면적을 갖는 단위전지 128장을 적층하여 구성되어 있다. 완성된 스택은 보령화력 발전소 연료전지 시험 동에서 2008년 11월에 설치되어 운전 시험을 진행하였다. 그림은 3은 75 kW급 MCFC 스택의 장착 및 운전 모습을 보여주고 있다.

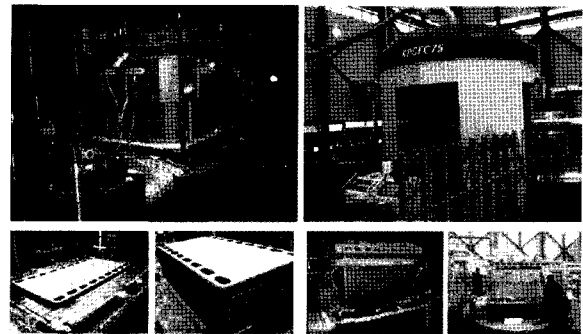


그림 3. 75 kW MCFC Stack Installation 모습

##### 나. 75 kW MCFC 스택 운전 결과

스택은 483시간의 전처리 과정을 마친 후 초기 무 부하 상태에서 스택의 특성을 확인한 후 부하운전을 실시하였다. 초기 부하는 PCS를 통하여 DC 출력 기준으로 75 kW 까지 점차 증가시켜 정 부하 부하운전을 수행한 후 전류밀도를 낮추어 20에서 30 kW 출력을 유지하면서 장기성능을 시험

하였다. 스택의 운전시간 및 발전전력량을 표 2에 정리하여 보여주고 있다. 스택 전처리가 시작된 2009년 11월 27일부터 스택 해체시점인 2009년 3월 30일까지의 운전시간은 약 3,000 시간이고, 이중 부하운전 시간은 1,890시간이었다. 발전된 총 전력량은 78.5 MWh, 최대 출력은 78.56 kW이었다.

표 3. 75 kW MCFC 스택 운전 결과

최고 출력	78.5 kW DC
총 발전량	45.8 MWh
총 운전시간	2,892 시간 ('09.3.30 기준)
총 부하운전시간	1,890시간 ('09.3.30 기준)

초기성능 시험은 75 kW까지 부하운전을 계획하였고 셀 평균전압이 0.7 V 미만일 경우 추가로 부하를 가하지 않도록 계획하였다. 무 부하 (0 A)상태에서의 스택의 전체 전압은 136.96 V, 평균전압이 1.070 V를 보여주었다. 스택의 최고출력은 754 A에서 셀 전압 103.7 V, 평균전압이 0.810 V로 78.189 kW DC 출력을 보여주었다. 스택은 전류밀도를 증가함에 따라 스택의 전압은 선형적으로 감소하였다. 그림 3에서 75 kW MCFC 스택의 전압 분포를 보여주고 있다.

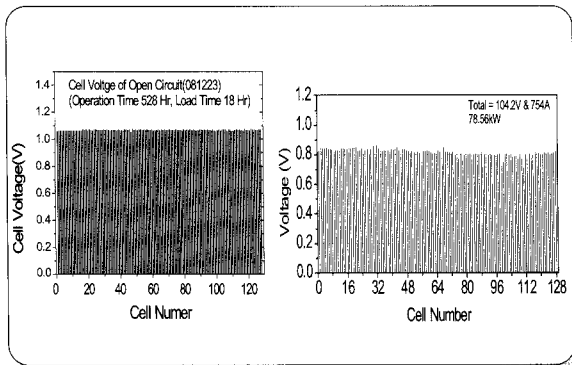


그림 4. OCV & Cell Voltage Distribution of 75 kW MCFC Stack

## 5. 주변기기 개발

개질기는 본 연구에서는 경제적으로 제작 가능하고 스택 수점 개질기를 삼성엔지니어링에서 개발하여 제작을 준비

중에 있다. 스팀 개질기는 Conventional한 형태로 크기가 3m x 3m x 3 m,로 Compact한 형태로 설계되었다. 24개의 Reactor tubes에서 개질반응이 이루어지며, 공급가스는 천연가스로 63.2Nm<sup>3</sup>/h가 공급되어 473Nm<sup>3</sup> 규모의 반응가스가 생성된다. 이의 연료극 배출가스를 연소하여 CO<sub>2</sub>를 공급하고 공기극 열을 공급하는 Anode Recycle 시스템을 자체로 개발하여 제작 운전시험을 진행하였다.

(주) 효성에서는 250 kW급 발전시스템에서 생성된 전력을 전력계통에 안정되게 연계하기 위한 250 KVA MCFC 발전시스템 전력 변환기를 제작하여 현재 운전시험을 진행하고 있다. 연료전지가 갖는 저 전압, 대 전류 특성에 적합한 전력 변환장치 구성기기들에 대한 기기 규격 및 설계가 시뮬레이션을 통해 검토하여 제작되었고, 현재 IGBT 소자를 이용한 250 kVA PCS를 제작하여 전력 변환장치 성능을 평가하고 있다.

## 6. 향후 MCFC 개발 방향

MCFC 발전 방식은 타 화석연료를 사용하는 기존의 발전 방식에 비하여 에너지 변환효율이 높고, 공해용인이 적으며, 아울러 석탄가스 등 다양한 연료 사용이 가능하기 때문에 제 3세대 발전 방식으로 주목 받고 있다. 이는 향후 화력 발전기술의 진행 방향과 아주 일치하는 발전 방식이다. 변환효율 향상과 공해요인 저감을 목적으로하는 천연가스 발전의 경우 입구온도를 높혀 효율을 높이는 ACC(Advanced Combined Cycle) 복합발전 다음 발전방식으로 MCFC, SOFC 와 연계된 복합발전이 각광을 받을 것으로 여겨진다., 석탄발전의 경우에도 기존의 초임계압 보일러 다음으로 유동층연소 그리고 IGCC가 출현 할 것으로 여겨진다. 그러나 다음단계로는 석탄 가스화와 연료전지 발전 방식이 복합된 IGFC(IGMCFC, IGSOFC) 복합발전 방식으로 화력발전 기술 진보가 예상되고 있다.(연료전지 비교우위 형성) 그림은 일본의 화력발전 방식의 기술 개발 로드맵을 보여주고 있다.

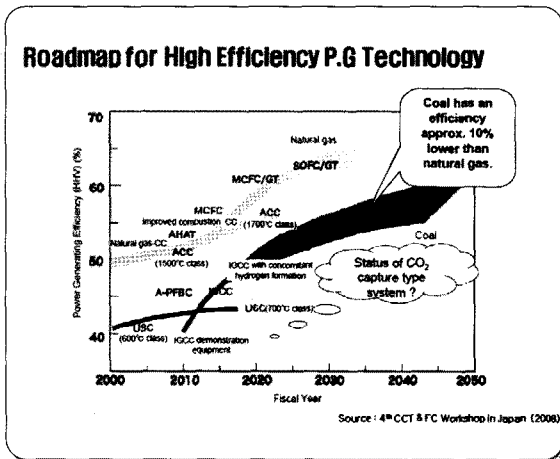


그림 5. 일본의 화력발전 방식의 기술 개발 로드맵

### 7. 맺음말

정부 신 재생에너지 중점 과제로 2004년부터 시작된 250 kW MCFC 시스템 개발 사업은 2008년 세계최대규모 10,000 cm<sup>2</sup>급 단위전지를 이용한 75 kW 스택 및 시스템을 개발하여 성공적으로 운전함으로써 외부 개질 형 MCFC 스택의 상용 기반기술을 확립하였다. 이를 기반으로 250 kW급 MCFC 발전 시스템 개발 및 10,000 cm<sup>2</sup>인 단위전지 구성요소 및 분리판 제작기반을 구축하고, 이를 근간으로 250 kW급 스택구조물 설계를 완료하였다.

현재 250 kW급 열 병합 Proto Type 개발 연구에서는 이전 수행한 MCFC 발전 시스템 개발 연구를 기반으로 구성요소에 대한 인프라 구축 및 스택 구조 및 분리판 구조 변형을 통한 성능향상을 도모하였다. 아울러 250 kW MCFC 스택 구성요소 제작 인프라구축을 위한 구성요소 제조 설비를 선정/도입 설치하였다. 250 kW 상압 발전 시스템에 대한 개념설

계를 완성하였고 이를 실현 할 수 있는 실행 시스템에 대한 기본 및 상세설계를 진행하였다. 시스템 개념에서는 시스템의 단순화와 더불어 발전효율을 높이는 방안으로 검토되고 있다. 이어 고유모델의 MCFC 구성요소에대한 검증 및 10,000cm<sup>2</sup>급 전극 및 분리 판을 설계 제작하고 이를 이용한 75 kW MCFC short stack 운전 시험을 진행하였다. 75 kW 스택은 2009년 11월 27일부터 스택 해체시점인 2009년 3월 30일까지의 운전시간은 약 3,000 시간이고, 이중 부하운전 시간은 1,890시간이었다. 발생된 총 전력량은 78.5 MWh, 최대 출력은 78.56 kW이었다. 이어 올해 250 kW급 규모의 시스템 제작 및 운전 평가를 준비하고 있다.

### 8. 참고문헌

- 1) 임희천, 안교상 김도형 외: "250 kW MCFC 발전 시스템 개발 III, 2007년도 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, 2007.7
- 2) 임희천 외: "250kW급 열병합 용융탄산염 연료전지 발전시스템 Proto Type 개발(2단계 1차년도 사업보고서)", 한국 전력공사 전력연구원, 대전, 2008 "
- 3) Hee Chun Lim "Status of Fuel Cell Development and dissemination in Korea" 4th Int. CCT & Fuel Cell Workshop, Wuxi, China Nov. 14-15, 2008
- 4) H-C Lim, D-H Kim, S-W Kang, B-J Kim J-H Lee and J-H Jun "Test Results of a 75 kW MCFC stack with 1m<sup>2</sup> effective electrode for the developing 250 kW ER Type MCFC system" 10th Asian Hydrogen Energy Conference, DaeGu, Korea April. 9-10, 2009