

# 100kW급 외부 개질형 MCFC 발전시스템 개발

임 희 천

한국전력공사 전력연구원 연소신발전그룹 책임연구원

## 1. 머리말

물의 전기분해 반응을 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) 발전 방식은 전력산업 분야에 적용 가능성이 가장 큰 발전 방식이다. 현재 선진국에서는 MW급 실증플랜트 운전시험을 완료하였고, 보다 높은 효율을 갖는 분산형태 상용 발전시스템으로 개발, 보급이 진행되고 있다. 국내에서도 1993년부터 선도 기술개발 사업으로 시작되어 1996년에 1000cm<sup>2</sup>급 단위 전지 20장을 적층한 2kW급 MCFC 시스템을 개발 운전 시험에 성공하였고, 이를 바탕으로 2단계로 100kW급 발전시스템 개발이 정부 대체에너지 기술개발 중점사업으로 선정되어 진행되고 있다.

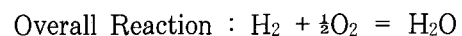
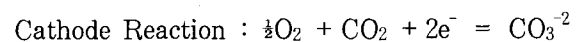
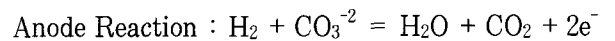
1997년부터 시작된 2단계 사업에서는, 중간단계로 우선 25kW급 시스템 개발을 추진, 1999년에는 6000cm<sup>2</sup>급 단위전지를 이용한 25kW 스택 및 시스템을 개발하여

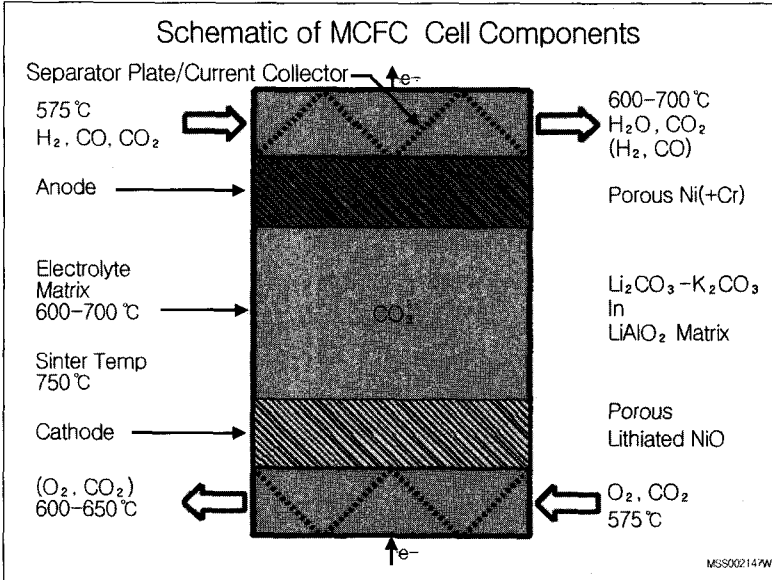
성공적으로 운전함으로써 외부 개질형 MCFC 스택의 상용 기초기반 기술을 확립하였다. 여기서는 2001년부터 추진되고 있는 2단계 100kW급 MCFC 발전시스템 개발에 있어서 지금까지의 연구결과를 바탕으로 한 100kW MCFC 스택 구성요소, 시스템, 스택 및 주변기기 개발 내용을 소개하고자 한다.

## 2. MCFC 발전시스템의 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 공기극으로 공급되며 다음과 같은 전기화학반응에 의하여 용융탄산염 연료전지는 전기와 열 및 물을 생산한다.





〈그림 1〉 MCFC 기본 구성 및 원리

**나. MCFC 발전시스템 기술 개요**

용융탄산염 연료전지 발전시스템은 연료전지 스택을 중심으로 연료가스 처리장치, 직교류 변환장치 및 배열 회수 이용장치 등으로 구성된다. 연료가스 처리장치는 연료전지에 사용되는 반응가스를 공급하는 장치로서 석탄, 천연가스 등을 스택에서 사용가능한 연료가스로 전환시키는 연료처리장치, 공기공급장치 및 정화장치 등으로 구성된다. 반응가스 처리장치에서 적절히 조절된 연료와 공기를 사용하여 전류와 열을 생성하는 연료전지 스택은 적층된 수백 장의 단위전지로 구성되며, 반응가스가 각 단위전지로 균등하게 공급되도록 설계된다. 기본적으로 각 단위전지는 전해질 매트릭스에 의하여 분리된 연료극과 공기극 등 두개 전극으로 구성된다. 직·교류 변환장치는 연료전지에서 생성되는 직류 전기를 실제 사용가능한 교류로 변환시키는 역할을 한다. 스택에서 발생하는 고온, 양질의 배열을 이용한 복합발전이 용융탄산염 연료전지에서는 가능하여 Rankine Cycle을 이용하여 교류전류

를 추가로 얻을 수 있다.

**다. 용도**

연료의 다양성, 모든 부하에서의 높은 전기효율, 환경친화성 및 열병합발전으로 대표되는 용융탄산염 연료전지의 장점으로 말미암아 용융탄산염 연료전지의 용도는 병원, 호텔, 아파트단지 등에 직접 설치하는 수백kW, 수십 MW급 분산형 전원으로부터 기존의 대형 화력발전을 대체하는 수백 MW급 이상의 중앙집중 대형 발전방식에 이르기까지 다양하게 적용될 수 있다. 발전규모에 따라 석탄가스화 연계가 가능한 외부 개질형 용융탄산염 연료전지는 주로 대형발전소

를 목표로 개발이 진행되고 있는 반면, 천연가스가 주 연료로 예상되는 내부 개질형 용융탄산염 연료전지는 소규모 열병합발전을 주 목표로 개발되고 있다.

**(1) 국외 기술개발 현황**

용융탄산염 연료전지(MCFC)에 대한 본격적인 연구는 미국에서는 1970년대 말 그리고 일본에서는 1980년대 초에 각각 시작되었다. 미국은 석탄의 효율적인 이용을 목표로 하여 DOE, EPRI와 GRI 등의 지원으로 개발이 이루어지고 있으며 ERC(Energy Research Corp. 현재 FCE : Fuel Cell Energy로 개칭), MC Power 등에서 실용규모의 스택을 개발하고, IGT(Institute of Gas Technology) 등에서 관련 기초기술에 대한 연구를 진행하였다. FCE는 1996년 5월 전력회사 및 정부의 도움으로 Santa Clara시에 125kW 스택 16기로 구성된 2MW MCFC Demonstration Plant를 설치하여 5200여 시간 운전시험을 실시하였다. 이어 분산전원으로서의 개

발 가능성에 따라 250kW급 시스템을 개발 2만시간 이상 장기운전시험에 성공, 운전 신뢰성을 확보하고 현재 실용 보급을 준비중이다. 미국 LA에(LADW) 현재 운전중인 250kW 2기를 비롯하여 총 12MW 규모의 설비가 보급 될 예정이며 설비공급 능력을 연간 50MW 규모로 확장 할 계획이다.

일본은 New Sunshine 계획으로 1980년부터 본격적인 연구가 시작되어 NEDO가 주관하여 개발하고 있다. Hitachi, IHI에서는 외부 개질형 250kW급, Mitsubishi에서는 내부 개질형 200kW급 스택을 개발하여 1999년 MW급 시스템을 구성 주부(中部) 전력 구내에 설치하여 5000시간의 운전시험을 실시하여 MCFC Demonstration에 대한 기반을 마련하였다. 현재 가스터빈과 연계된 750kW 복합발전 시스템 개발을 진행중이다. 이외에도 유럽에서는 네덜란드에서 10kW 규모로 그리고, 이태리 등에서는 100kW급 시스템을 개발 운전시험을 완료하였고 현재 500kW급 MCFC 발전시스템 개발을 추진중이며, 독일 MTU에서는 미국의 스택을 도입 독자적인 시스템으로 개발된 250kW급 시스템을 개발 Essen의 에너지 Park 및 병원 등에서 운전시험을 진행하고 있다.

### 3. 100kW급 MCFC 발전시스템 개발 개요

#### 가. 100kW급 MCFC 시스템 개발계획

전력산업분야 특히 분산전원 및 대형 발전 적용 가능성에 따라 추진되고 있는 MCFC 개발은 장기적으로는 실용시스템 개발 및 보급을 통한 저공해 고효율 MCFC 발전 시스템 대체를 통하여 에너지절약 효과 및 지구환경 문제에 대응하고자 하는 것이며, 단기적으로는 분산전원 적용을 위하여 소규모 발전시스템 개발을 통한 국내 상용 기초기반 기술 확보 및 지원에 있다. 본 개발 계획에서의 기술개발 목표는 다음과 같다.

#### (1) 스택 형태

- 외부개질형 내부 메니폴드형 MCFC 스택
- 가스흐름 형태 : 병행류형(Co-Flow Type)
- 적층 전지수 : 100kW(180매)

#### (2) 시스템 형태

- 연료개질 공정 : 천연가스 개질기 및 평판형 개질기 개발
- 인버터 및 Cathode Gas Recycle에 의한 스택 냉각 시스템
- 배열회수를 위한 HRSG 채택

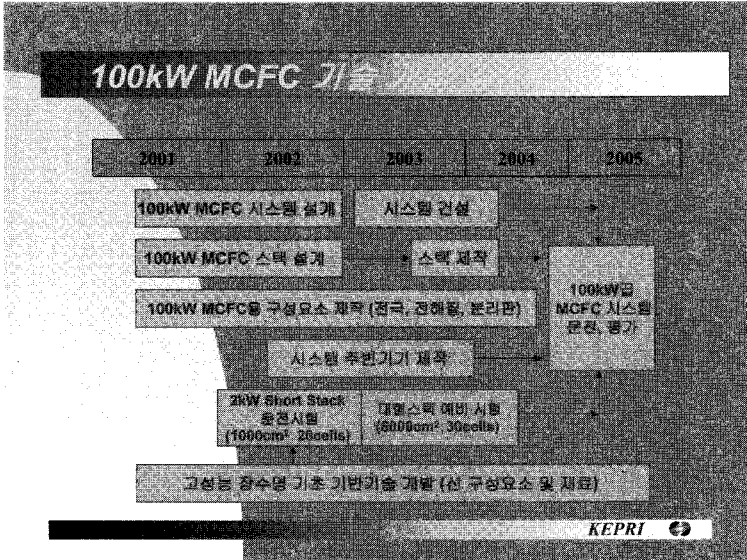
#### (3) 단계별 주요 기술개발 목표

개발 목표	2단계(~2005)
정성목표	기본 기술 확립
용량	100kW급
목표 전류밀도	125mA/cm <sup>2</sup>
초기 전압	800mV
목표 운전시간	5,000시간
압력	3~5kg/cm <sup>2</sup> · G
연료	Natural Gas

#### (4) 단계별 기술개발 일정(그림 2 참조)

### 4. MCFC 구성요소 제조 및 100kW급 MCFC 스택 설계

MCFC 스택은 Matrix, Cathode, Anode, 전해질, 분리판 등으로 구성된 단위전지를 여러장 적층하여 구성한다. 표 1은 100kW급 MCFC 스택에 사용될 단위전지 구성요소의 기술 특성을 보여주고 있다. 현재 개발되고 있는 100kW 스택에서는 내부 메니폴드형 분리판을 사용하였고 분리판 면적은 약 6000cm<sup>2</sup> 직사각형 형태로 제작될 예정이다.



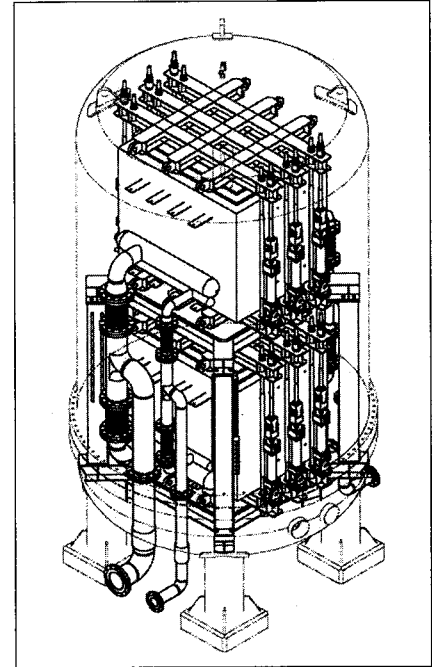
〈그림 2〉 단계별 기술 개발 일정

〈표 1〉 100kW급 MCFC 시스템 기술 규격

구 분	크기(cm <sup>2</sup> )	재 료	기공률(%)	평균기공크기(μm)
Anode	51×121	Ni+Al	58	3.5
Cathode	50×120	NiO	80	9.2
Matrix	80.8×130	LiAlO <sub>3</sub> (Fiber Added)	>55% After Burn-Out	0.25 After Burn-Out
Electrolyte	80.8×130	Li/K 70/30w%	-	-

연료가 공급되는 연료극(Anode)은 Ni-Al 합금으로, 그리고 공기극(Cathode)은 NiO를 이용하고 있다. 전기 화학 작용이 일어나는 전해질을 함침하는 역할을 하는 매트릭스(Matrix)는 LiAlO<sub>3</sub> 라는 세라믹 물질을 그리고 전해질은 Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>와 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>를 70대 30 비율로 섞어서 가공하여 사용한다. 분리판을 제외한 모든 MCFC 구성요소는 Doctor Blade를 이용하여 제작하는 Tape Casting 방법을 사용하여 대량 생산을 도모하고 있다.

스택 내 반응가스를 공급하는 방법으로 연료가스와 공기가 같은 쪽에서 공급되는 병행류 형태로 하여 가스의



〈그림 3〉 100kW급 MCFC 스택 Configuration

흐름이 원활하고 유로 전체의 압력강하가 적게 되도록 설계하였다. 스택 내에서 가스공급 및 배출의 위치도 스택 하단 부에서 분배구를 따라 분배되어 상판 쪽으로 공급되어 다시 하판으로 모아져 배출하는 역 U형으로

설계하였다. 100kW급 MCFC 스택은 전극면적 6000 cm<sup>2</sup>의 단위전지를 90단을 적층한 50kW급 Sub 스택 2기로 구성된다. 적층은 기본적으로 단위전지를 순차적으로 수직방향으로 적층하여 용량을 증가시키는 방법을 사용한다. 전기의 인출은 집전용 단자를 설치하여 집전하며, 단위전지의 분리 및 가스분배의 역할을 하는 분리판은 스테레스강을 모재로 하여 고온 상태에서의 부식을 방지하기 위하여 연료극에는 Ni Coating을 그리고 전해질이 닿는 부분에는 Al Coating을 하여 운전중 고온부식에 대비하였다. 100kW급 MCFC 스택 전체 형태는 스

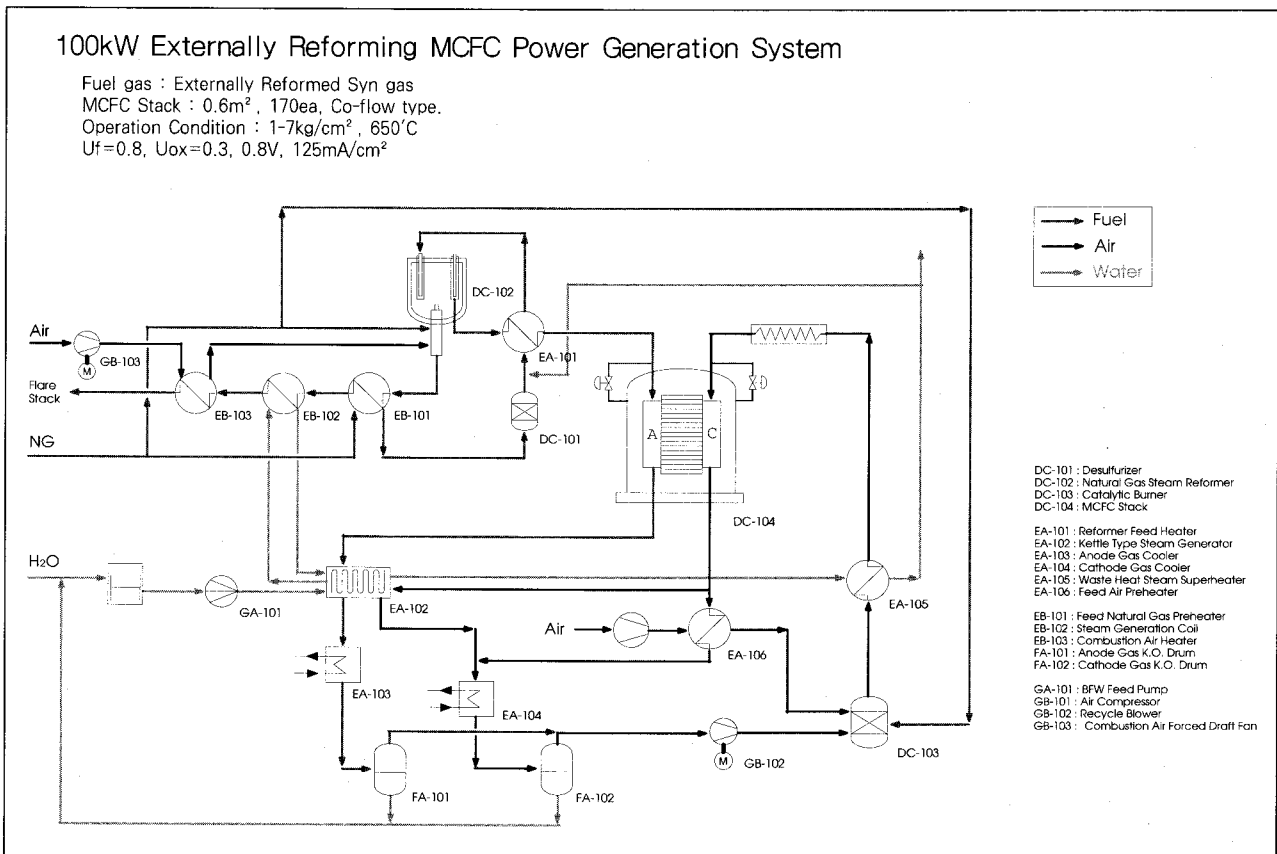
택의 구조적 안정성을 갖기 위하여 50kW Sub-Stack 2기가 상하 2단으로 설치하는 것으로 구성하였고, 가압운전을 위해 서브 스택들은 가압용기 내에 구성되었다(그림 3 참조).

### 5. 100kW급 MCFC 발전시스템 설계

한국중부발전 보령화력에 설치될 100kW급 외부 개질형 용융탄산염 연료전지 시스템 기본구성은 그림 4와 같다.

연료로 사용되는 천연가스는 외부 개질기(External

Reformer)를 통하여 수성가스 전이반응을 고려한 스팀 개질 방식을 이용하여 다량의 수소가 탄산가스에 포함되어 연료로 공급된다. 반응 후 남은 연료극 배 가스는 촉매 연소기에서 완전하게 연소되어 공기극에서 필요로 하는 이산화탄소 및 열에너지 공급원으로 사용된다. 연료전지 스택에서 반응한 가스들은 열 교환기를 이용하여 배열회수 과정을 거치게 되며, 공기극 반응 가스들은 스택 냉각 및 연료 이용률을 증가시키기 위하여 재순환되는 리사이클 시스템으로 구성하였다. 100kW급 용융탄산염 연료전지 발전시스템은 천연가스에 스팀을 공급하고 개질하여 연료가스로 공급되게 되는데 이때 필요로 하는 개질 연료



〈그림 4〉 100kW급 외부 개질형 용융탄산염 연료전지 시스템 공정도

량은  $53\text{Nm}^3/\text{h}$  정도가 된다.

스택 운전조건으로는 압력 3기압, 스택 입·출구 온도를 각각  $580, 680^\circ\text{C}$ 로 그리고 스택 내 온도는  $650^\circ\text{C}$ 가 되도록 유지시키며, 이를 위하여 공기극쪽  $\text{CO}_2$  리사이클 운전을 이용하여 연료 극에서 발생한  $\text{CO}_2$  가스를 공기 극에서 사용하게 된다. 전체적인 연료 이용률은 60~80%, 연료극 가스는 100% 재사용하며 공기극인 경우 약 154%로 리사이클이 운전되도록 설계하였다.

## 6. 주변기기 개발

### 가. 평판형 개질기 제작 및 운전시험

평판형 개질기는 단위 부피당 전열면적이 크기 때문에 콤팩트화 할 수 있고 연소온도가 낮아 상용 촉매를 사용할 수 있으며 가스통과 거리가 짧아 압력손실이 적다는 장점과 더불어 Scale Up이 용이하다. 본 연구에서는 경제적으로 제작 가능하고 가압 시스템에 적용가능한 평판형 개질기를 개발하기 위하여 원형 형태의 소규모 2kW급 평판 개질기를 제작 운전시험을 실시하였고, 앞으로 적용 가능성을 확인한 후 향후 100kW급 시스템을 설계 운전시험을 진행할 예정이다(표 2 참조).

〈표 2〉 2kW급 평판형 개질기 기술규격

항 목	내 용
형태 적층 단수 Dimension	Plate Cylindrical 5단/6단 12단(Sch 40, 215L)
운전 조건	압력 : 1-3 기압 온도(개질/연소) : $760/800^\circ\text{C}$ 원료 : $\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O}$ (S/C=3.0) 수소 생산량 : 75L/min

### 나. 전력계통 연계형 전력변환기 개발

100kW급 용융 탄산염형 연료전지 발전시스템에서 연

료전지로부터 생성된 전력을 전력계통에 안정되게 연계하기 위한 100kW급 MCFC 발전시스템용 전력변환기술 개발이 진행되고 있다. 연료전지가 갖는 저전압, 대전류 특성에 적합한 전력 변환장치 구성기기들에 대한 기기 규격 및 설계가 시뮬레이션을 통해 검토 제작되었고, 제어 알고리즘 및 계통 접속시 계통에 대한 영향을 시뮬레이션 툴인 EMTDC를 사용하여 검증하고 있다. 현재 IGBT 소자를 이용한 25kW급 축소형 모델을 설계, 제작하여 전력변환장치 성능을 평가하고 있다.

## 7. 맺음말

정부 대체에너지 중점 과제로 1997년부터 시작된 100kW급 MCFC 시스템 개발 사업은 1999년  $6000\text{cm}^2$ 급 단위전지를 이용한 1단계 25kW 스택 및 시스템을 개발하여 성공적으로 운전함으로써 외부 개질형 MCFC 스택의 상용 기초기반 기술을 확립하였다. 이를 기반으로 본격적으로 추진된 2단계 100kW급 MCFC 발전시스템 개발에 있어서도, 전지면적  $6000\text{cm}^2$ 인 단위전지 구성요소 및 분리판 제작기반을 구축하고, 이를 근간으로 100kW급 스택구조물 설계를 완료하였다. 시스템은 천연 가스를 연료로 하는 가압형 시스템을 기본 개념으로, 상세 설계를 진행함으로써 100kW급 MCFC 시스템 제작 및 운전을 위한 기본을 확립하였다. 이후 이들 기본으로 시스템 건설 및 스택 제작은 2003년 착수하여 2004년부터 시운전 및 PAC Test를 거친 후 Pilot Plant 실증시험을 진행할 예정이다.

향후 MCFC 발전시스템 개발 및 실용화를 통하여 화력발전 대체용 시스템 실용보급을 추진하면서, 최종적으로는 석탄가스화와 연계된 IG-MCFC 시스템의 전력사업 분야 적용 상용화 기반을 구축할 수 있을 것으로 생각된다.