

## 100 kW급 외부 개질형 MCFC 발전 시스템 개발

### Development of a 100 kW externally Reforming MCFC system

Korea Electric Power Research Institute

임희천, 이충곤, 유영성, 안교상, 강병삼, 서혜경  
한전 전력연구원,

#### 1. 서론

분산형 전원 및 석탄 가스화와 연계하여 복합 발전이 가능한 용융탄산염 연료전지(MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell)는 다양한 연료를 사용할 수 있고, 공해요인이 적으며, 높은 에너지 변환효율을 가지고 있어 여러 종류의 연료전지 발전 방식 중에서도 전력사업 분야에 적용 가능성이 새로운 발전방식이다. 현재 선진국에서는 MW급 실증플랜트 운전 시험을 완료하고 보다 높은 효율을 갖는 분산형 상용 발전시스템 개발이 진행되고 있다. 국내에서도 1993년부터 선도기술개발 사업의 하나로 시작된 MCFC 발전 시스템 개발은 1996년에 1,000 cm<sup>2</sup>급 단위전지 20장을 적층한 2 kW급 MCFC 시스템을 개발 운전시험에 성공하였고, 이를 바탕으로 2단계로 100 kW급 발전시스템 개발 연구가 진행되고 있다. 1997년부터 시작된 2단계 1차 사업에서는, 우선 25 kW급 시스템 개발을 추진하여, 1999년에는 6,000cm<sup>2</sup>급 단위전지를 이용한 25 kW 스택 및 시스템을 개발하여 성공적으로 운전함으로써 외부 개질형 MCFC 스택의 상용 기초기반 기술을 확립하였다. 여기서는 올해부터 본격적으로 추진되고 있는 2단계 2차 100 kW급 MCFC 발전 시스템 개발에 있어서, 지금까지 연구 결과를 바탕으로 한 100 kW MCFC 스택 구성요소, 시스템, 스택 및 주변기기 개발 내용을 소개하고자 한다.

#### 2. 100 kW급 MCFC 시스템 개발 계획

전력사업에 대한 적용가능성 및 장점 등으로 추진되고 있는 MCFC 개발 목적은 장기적으로는 실용시스템 개발 및 보급을 통한 저공해 고효율 MCFC 발전 시스템 대체를 통하여 에너지 절약효과 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 기술 개발 목표는 다음과 같다.

##### 1) 스택 형태

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

## 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 기술 개발목표

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

## 3. MCFC 구성요소 제조 및 제작 기반 확립

Anode는 우선 Ni+10w/oCr 제품 대량생산을 위한 장치를 set-up 하고 공정 개발을 추진하며 한편으로 Ni-Al 합금 anode 역시 기술 개발을 통하여 제작 및 단위전지와 short-stack 평가를 통하여 그 가능성을 판단한다. Cathode는 NiO를 이용하지만 NiO 용출에 대비하여 대체 cathode (Co 코팅 및 첨가) 제조에 대한 최적화 노력을 경주한다. Matrix 및 Electrolyte 역시 현재 기술을 기반으로 제작하지만, 열사이클 능력 강화를 위하여 알루미늄 화이버 첨가를 전제로 한 matrix를 제작하여 사용한다. Electrolyte 는 대량생산을 위하여 열풍건조가 필수적으로 공장 건립 후 빠른 시일 내에 적용되도록 조치할 필요가 있으며, 대체 전해질인 Li/Na은 short-stack 등에 적용될 수 있도록 기술 개발을 진행한다. 다음 표는 100 kW급에 적용될 MCFC 구성요소의 기술 규격을 보여주고 있다.

표1. 100 kW급 MCFC 시스템 기술 규격

	크기 (cm <sup>2</sup> )	재료	두께 (mm)	기공율 (%)	평균기공크기 (μm)	평편도 (μm)
Anode	51×121	Ni+10%Cr	0.73	58	3.5	±50
Cathode	50×120	NiO	0.65	80	9.2	±50
Matrix	80.8×130	LiAlO <sub>3</sub> (Fiber Added)	0.25	>55% after burn-out	0.25 after burn-out	±25
Electrolyte	80.8×130	Li/K 70/30w%	0.35	-	-	±50

#### 4. 100 kW용 MCFC 분리판 설계 및 제작

100 kW 스택 분리판 설계를 위하여 다양한 요건을 고려하여 선행 연구를 실시하였다. 이전 25 kW 스택 분리판을 기본형으로 하여 제작 여건 변화에 따라 분리판 크기 조정, 스택 적층 수와 가스 유량 증가에 따른 양극 출구 매니폴드 크기 증가, 그리고 용접공정 자동화에 따른 용접부위 면적 증가 및 용접 편이성 등이 고려하였다. 분리판 설계 시 고려되는 스택 형태에서 stack pressing은 one-end type으로 하고 gas flow pattern은 역-U자 형태를 적용하고 있으며, anode 및 cathode header가 모두 하부에 위치되도록 한다. 매니폴드 구조는 기존 SIM type을 유지하고 매니폴드 직경을 기존보다 증가시켜, cathode 출구 (anode 입구) 면적이 증가되도록 하였다. 이는 적층 수 증가에 따른 매니폴드 압력 변화를 조금이라도 줄이기 위한 것이다. 한편 용접 자동화 및 품질을 위하여 용접 부위를 확장하였지만 성형시 변형 부위는 그대로 유지되도록 하였다. 그림 2의 분리판 평면 설계도면에서 주요 치수에 대한 25 kW 설계 자료와 100 kW 분리판 제작을 위해 제시한 설계안의 비교는 표 1과 같다.

분리판 bi-polar plate 재질은 SS316L이며, 성형판 두께는 mask plate가 0.6t, shielded slot plate가 0.5t, center plate는 기존의 0.4t 대신 mask plate와 같은 0.6t를 사용한다. Shielded slot 형상은 용접시 변형 방지를 위하여 기존 일자형 슬릿에서 십자형 슬릿을 가공하여 사용한다. 용접 공정은 플랜지 용접법을 일괄적으로 적용하며 자동화 장치를 제작할 계획이다.

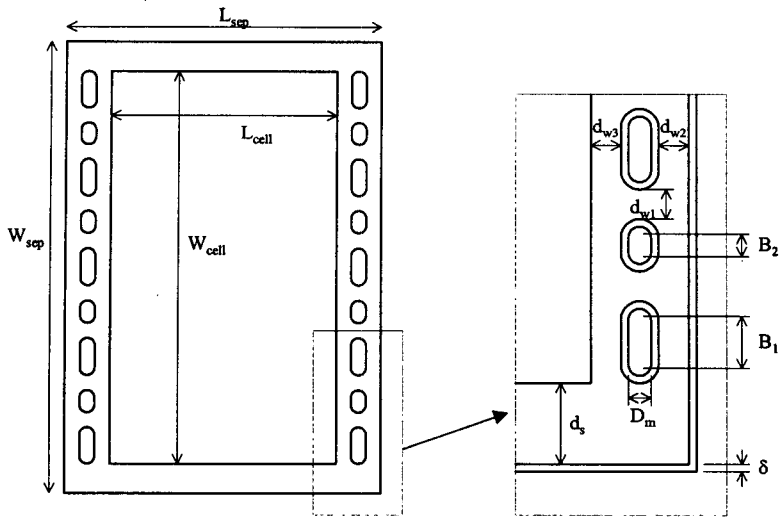


그림 1. Co-flow bipolar separator plate design

## 5. 100 kW용 MCFC 스택 설계

100 kW 급 MCFC 스택 전체 형태는 안정한 실험 결과를 확보하고, 향후 다단 모듈로 구성될 250 kW급 설비 설계에 대비하며, 스택의 구조적 안정성을 갖기 위하여 50kW sub-stack 2기를 제작하여 상하 2단으로 설치하는 것으로 구성하였다. 50 kW sub-stack의 가스 공급 및 배출은 가압 vessel 내 제한된 공간을 고려 공통 분배 및 배출관을 사용하고 2단 sub-stack은 전기적으로 직렬로 연결되도록 하였다. 본 설계에서 스택 지지대는 두개의 스택을 상하부에 설치하기 위한 구조물이며 가압 운전을 위해 서브 스택들은 가압 용기 내에 구성되었다. 두 개의 서브 스택에 내부적으로 균일한 가스 흐름을 위한 배관 구성과 온도 증가에 따른 배관의 열팽창을 고려해 인입 배관에는 주름관을 설치하였다. 가스 조성 변화 및 온도 상승이 수반되는 스택 전 처리과정 중 서브 스택에서 15cm정도의 수축을 고려하여 이 과정에서 스택에 균일한 면압을 주기 위해서 각 스택에 6개의 유압 실린더 및 면압 자동 조절 장치를 설치하였다. 전 처리 상압 운전이 끝나면 유압 장치를 제거하여 가압 용기를 이용하여 용기 내부에 압력을 3기압으로 상승하여 정상 운전에 들어갈 수 있도록 구성되었다. 실험에 필요한 데이터는 열전대, 전기 측정선, 전압 및 가열선을 이용하며 모든 데이터 측정선들은 하부 용기를 이용하여 인출되도록 구성되었다.

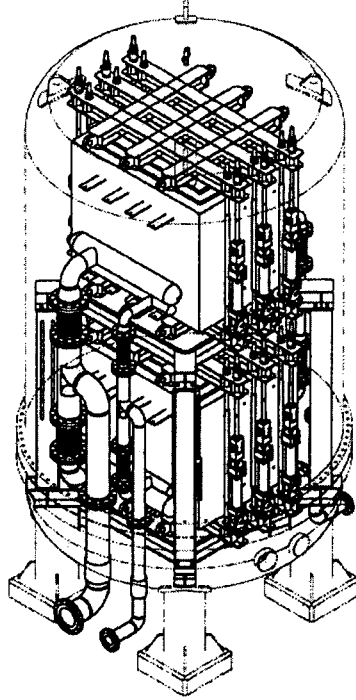


그림2. 100 kW급 MCFC 스택 configuration

## 6. 100 kW 급 MCFC 발전시스템 설계

한국 중부발전 보령화력에 설치될 100kW급 외부개질형 용융탄산염 연료전지 시스템 기본구성은 그림 4와 같다. 연료로 사용되는 천연가스는 외부 개질기를 통하여 수성가스 전이반응을 고려한 스팀 개질 방식을 이용하여 다량의 수소가 포함된 탄산가스 연료로 공급된다. 반응 후 남은 연료극 가스는 촉매 연소 시에서 연소되어 공기극 연료에 이산화탄소 및 열에너지 공급원으로 사용된다. 연료전지 스택에서 반응한 가스들은 열 교환기를 이용하여 배열회수 과정을 거치게 되며 리사이클을 이용하여 스택 냉각과 연료 이용률을 증가시키는 시스템으로 구성하였다. 100 kW급 용융탄산염 연료전지 시스템은 천연가스를 스팀 개질하여 연료가스로 공급하며 사용되는 개질 연료량은 52.48 Nm<sup>3</sup>/h이다. 스택 운전 조건으로는 3 bar의 압력과 스택 입·출구 온도를 각각 580, 680℃로 유지하며 CO<sub>2</sub> 리사이클 운영을 이용하여 연료 극에서 발생한 CO<sub>2</sub> 가스를 공기극에서 사용하게 된다. 전체적인 산화제의 이용률(U<sub>O<sub>2</sub></sub>)은 30%이며 연료 이용률(U<sub>F</sub>)은 60%, 연료극 가스는 100% 재사용하며 공기극인 경우 약 154 %로 리 사이클 운전된다. 소형 개질기의 특성을 고려하여 개질된 연료의 출구 온도를 750℃로 설정하였으며 평판형 개질기가 도입될 것을 대비하여 시스템에 추가하여 실험할 수 있도록 운전의 다양성을 고려하였다. 한편 100 kW급 발전 시스템 이 설치될 중부발전 보령화력 발전소의 천연가스의 압력, 유량, 토양, 수질 조사에 대한 기본 자료를 수집

검토하였고 이를 바탕으로 건축 및 토목 분야 설계를 완료하였다.

### 100kW Externally Reforming MCFC Power Generation System

Fuel gas : Externally Reformed Syn gas  
 MCFC Stack : 0.6 m<sup>2</sup>, 170ea, Co-Flow type.  
 Operation Condition : 1~7kg/cm<sup>2</sup>, 650 °C  
 Uf=0.8, Uox=0.3, 0.0V, 125mA/cm<sup>2</sup>

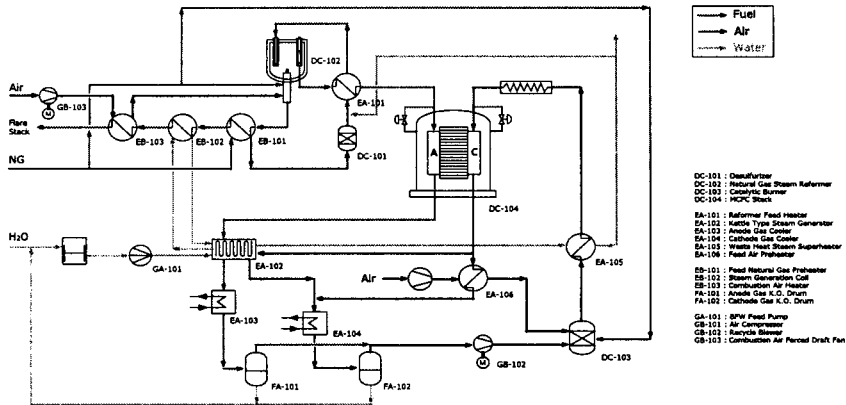


그림 3. 100kW급 외부개질형 용융탄산염 연료전지 시스템 공정도

## 7. 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 적용 가능한 평판형 개질기를 개발하기 위하여 원형 형태의 평판 개질기를 제작 운전시험을 실시하였다. 연소실험을 통해 가스 분배 성능을 확인한 후, 개질반응과 연소반응을 동시에 진행하여 개질기의 성능을 조사하였다. S/C 3.17, 개질온도 730.8 °C 이하, 최고 연소온도 778 °C 의 조건하에서 개질반응에 의해 생성된 개질가스를 분석한 결과, 수분을 제외한 dry gas의 조성(mol%)은 H<sub>2</sub> / CO / CO<sub>2</sub> / CH<sub>4</sub> = 77.18 / 12.11 / 10.35 / 0.36, CH<sub>4</sub> 전환율은 98.41%, H<sub>2</sub>와 CO 생성량은 각각 60.7N ℓ/min, 10.1N ℓ/min인 것으로 나타났다.

표2 2 kW급 평판형 개질기 기술 규격

항목	내용
형태 적층 단수 Dimension	Plate Cylindrical 5단/6단 12단 (Sch 40, 215L)
운전조건	압력 : 1 -3 기압 온도 (개질/연소) : 760/800 ℃ 원료 : CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> O (S/C=3.0) 수소 생산량 : 75L/min

#### 나. 전력 계통 연계형 전력변환기 개발

용융탄산염형 연료전지 발전시스템 개발과 관련하여, 연료전지로부터 생성된 전력을 전력 계통에 안정되게 연계하기 위한 각종 제어 장치 및 소프트웨어를 개발, 제작, 구성하여, 분산 전원을 안정적으로 계통에 연계하기 위한 100kW급 MCFC 발전시스템 용 전력변환기술 개발을 진행하고 있다. 1차년도인 당해연도에는 100kW급 전력변환기 설계의 기초단계로 25kW급 축소형 전력변환기 설계 및 제작, 시험을 수행하였다. 연료전지의 특성에 적합한 전력변환기술 개발을 위해, 연료전지용 전력변환장치 개발을 위해, MCFC의 출력 특성을 검토하였으며, 전력변환장치가 일정한 정격 출력을 내기 위한 연구를 진행하였다..

연료전지의 저전압, 대전류 특성에 적합한 전력변환장치 구성기기들 사양 및 설계가 시뮬레이션을 통해 검토되고 제작되었고, 제어 알고리즘 및 계통 접속시 계통에 대한 영향을 시뮬레이션 툴인 EMTDC를 사용하여 검증하였다. 검증된 제어 알고리즘을 바탕으로, 전력변환장치를 제어할 제어보드를 설계, 제작하였으며, 제어 프로그램을 개발하였다. 최종적으로 연료전지용 전력변환장치로 25kW급 축소형 모델을 설계, 제작하여 전력 변환장치 성능을 평가하였다.

#### 8. 결론

정부 대체에너지 중점 과제로 1997년부터 시작된 100 kW급 MCFC 시스템 개발 사업은 1999년 6,000cm<sup>2</sup> 급 단위전지를 이용한 1단계 25 kW 스택 및 시스템을 개발하여 성공적으로 운전함으로써 외부 개질형 MCFC 스택의 상용 기초기반 기술을 확립하였다. 이를 기반으로 2001년부터 본격적으로 추진된 2단계 100 kW급 MCFC 발전 시스템 개발에 있어서도, 전지면적 6,000 cm<sup>2</sup>인 단위전지 구성요소 기술개발 및 제작을 위한 기반을 구축하였고, 분리판 제작을 위한 설계를 완료하였다. 분리판 설계를 근간으로 100 kW급 스택구조물 설

계를 완료하고 스택의 열 및 구조적 안전성 등에 대한 검증을 실시할 예정이다. 시스템은 천연가스를 연료로 하는 가압형 시스템으로 설계하여 현재 상세 설계를 진행함으로써 100 kW급 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 실증 시험을 진행할 예정이다. 향후 MCFC 발전 시스템 개발 및 실용화를 통하여 화력발전 대체용 시스템 실용보급을 추진하면서, 최종적으로는 석탄가스화와 연계된 IG-MCFC 시스템의 전력사업 분야 적용 상용화 기반을 구축할수 있을 것으로 생각된다.

## 9. 참고문헌

- 1)고준호, 임희천, "100kW급 MCFC 스택 분리판 설계 기본안", 한전 전력 연구원, TM 01EC01. P20001.270 (2001)
- 2)이충곤, 임희천, "100kW급 MCFC 구성요소 제작 기본안", 한전 전력 연구원, TM 01EC01. P20001.270 (2002)
- 3)강병삼, 임희천, "100kW급 MCFC 발전시스템 설계 기본안", 한전 전력 연구원, TM 01EC01. P20001.270 (2002)