

100 kW급 외부 개질형 MCFC 발전 시스템 개발

임희천, 이충곤, 유영성, 안교상, 서해경, 안현구, 엄영창
전력연구원,

Development of a 100 kW externally Reforming MCFC system
H-C Lim, C-G Lee, Y-S Yoo, K-S Ahn, H-K Seo, H-G Ahn and Y-C Eom,
Korea Electric Power Research Institute

1. MCFC시스템 개발 개요

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. 국내에서도 1993년부터 선도기술개발 사업의 하나로 시작되어 1996년에 2 kW급 MCFC 시스템을 개발 운전시험에 성공하였고, 이를 바탕으로 정부 대체에너지 중점과제로 2단계 100 kW급 발전시스템 개발 연구가 진행되고 있다.

1997년부터 시작된 2단계 1차 사업에서는, 6,000cm² 급 단위전지를 이용한 25 kW 스택 및 시스템을 개발하여 1999년 성공적으로 운전하였고 2001년부터 시작된 100 kW급 MCFC 발전 시스템 개발에 있어서는 100 kW 스택 및 시스템의 상세설계를 완성하고 시스템 건설을 위한 준비가 진행되고 있다. 지금 까지 연구 결과를 바탕으로 한 100 kW MCFC 스택 구성요소, 시스템, 스택 및 주변기기 개발 내용을 소개하고자 한다.

100 kW급 MCFC 발전 시스템은 2008년 까지 상용화 Proto type MCFC 열병합 발전 설비의 개발을 목적으로 추진되고 있는데, 이를 바탕으로 분산형 MCFC 발전 시스템의 개발이며 향후 석탄 가스화와 연계된 발전 방식의 개발을 목적으로 하고 있다. 상용화 기반 기술의 개발 목표를 요약하면 다음과 같다.

가. 스택 및 시스템 형태

- 외부 개질형 내부 매니폴드형 MCFC 스택(병행류 형 ; Co-Flow Type)
- 50 kW Sub stack 2 Unit (적층 전지 수 90 매 x 2 stack)
- 연료개질 공정 : 천연가스 개질기
- Cathode gas recyle에 의한 스택 냉각 시스템 및 배열회수 시스템
- 인버터 를이용한 계통 연계형 시스템

나. 단계별 주요 기술 개발 목표

개발 목표	2단계 (- 2005)
용량	100 kW급 (50 kW Sub stack 2)
목표 전류밀도	0.8 V at 125 mA/cm ²
목표 운전시간	5,000시간
압력	상압 - 3 kg/cm ² · G
연료	Natural Gas

2. MCFC 구성요소 제작

가. MCFC 구성요소 제조 기술규격 결정

Anode는 이전 Ni+ 10% Cr 대신 soCreep 특성을 향상시킨 Ni+5w/o Al Alloy Powder를 사용하여 제조하였다. 현재 단위전지와 short-stack 평가를 통하여 그 가능성을 판단하고 있으며 초기 성능은 양호하지만 장기 신뢰성 시험 향상을 위한 연구가 필요한 것으로 판단된다. Cathode는 NiO를 이용하고 NiO 용출에 대비한 대체 cathode (Co 코팅 및 첨가) 제조 및 Matrix 두께 향상을 통하여 장기 운전전에 대비하도록 준비하였다. Matrix의 경우 열 사이클 능력 강화를 위하여 이전보다 두꺼운 매트릭스를 사용할 예정이다. Electrolyte는 두꺼운 매트릭스 사용 시 전해질 분포가 용이하도록 제작하고 있으며, 대체 전해질인 Li/Na에 대한 기초연구를 진행하고 있다.

표1. 100 kW급 MCFC 시스템 기술 규격

	크기 (cm ²)	재료	두께 (mm)	기공율 (%)	평균기공크기 (μm)	평편도 (μm)
Anode	51×121	Ni+Al Alloy	0.73	58	3.5	±50
Cathode	50×120	NiO	0.65	80	9.2	±50
Matrix	80.8×130	LiAlO3 (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

나. MCFC 구성요소 장기 신뢰성 시험

MCFC 장기 신뢰성 향상을 위하여 구성요소 중 매트릭스의 강도향상 및 기계적 강도 측정 방법을 진행하고 있다. 매트릭스 강도 향상을 위하여 LiAlO2 균일입자로 제작한 제작된 매트릭스를 이용한 단위전지가 5,000시간이상 장기 운전되고 있으며 또한 상용 화이버를 이용한 매트릭스의 제작 및 봉상 입자의 대량생산 공정을 추진하고 있다. 또한 매트릭스 기계적 강도 측정법 표준화를 통한 구성요소 성능 개선을 도모할 예정이다.

다. 100 kW용 MCFC 분리판 설계 및 제작

분리 판은 병행류 가스 흐름형태를 보내기 위하여 역-U자 형태의 메니폴드를 적용하였고, 독자적 분리판 형태인 SIM type으로 설계하였다. 메니폴드 구멍 직경은 45 mm로 하여 메니폴드 구멍 사이 wet seal 간격을 38 mm로 하여 이전 분리판 보다 다소 증가시켰다. 분리판 bi-polar plate 재질은 SUS 316L이고 성형판 두께는 mask plate가 0.6t, shielded slot plate가 0.5 t, center plate역시 용접성 향상을 위하여 0.6t를 사용하였다. Shielded slot 형상은 십자형 슬롯을 제작하여 사용하였고 용접 공정은 플랜지 용접을 일괄적으로 적용할 수 있는 자동화 장치를 설계 제작 활용하였다. 성형은 기계적 강도를 고려 레이저 커팅 법을 활용하였고 표면 처리 공정은 가공 정도가 좋고 현재 제작 가능한 IVD 법을 채택하였다.

제작 공정에서 분리판 성형 가공 및 표면 처리 과정에서의 품질 유지를 위하여 일괄공정으로 제작하였다. 용접은 Auto En, 성립첨단산업에서 Ni-도금 및 Al-PVD coating 그리고 화인 테크에서 Shielded slot을 제작하였고 (주)한중에서 금형 및 성형, 한국 코아에서 열처리 분야를 담당하여 분리판 제작 인프라 구축도 도모하였다. 제작 공정은 스텐레스 판을 Laser Cutting, Drawing & Forming, Ni-Plating (Anode) Al-coating, Heat treatment(830°C, 환원분위기) Laser welding 등의 순서로 이루어질 예정이다.

3. 100 kW용 MCFC 스택 설계

100 kW 급 MCFC 스택 전체 형태는 스택의 안정적인 실험 결과를 확보하고, 향후 다단 모듈로 구성될 250 kW급 설비 설계에 대비하며, 또한 스택의 구조적 안정성을 갖기 위하여 50 kW sub-stack 2기를 제작하여 상하 2단으로 설치하는 것으로 설계하였다. 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. 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 가열 선을 이용하며 모든 데이터 측정선들은 하부 용기를 이용하여 인출되도록 구성되었다.

4. 100 kW 급 MCFC 발전 시스템 설계

100 kW급 MCFC 발전 시스템은 외부 개질형으로 연료로 천연가스를 사용하며 운전압력 3기압에서 650°C조건에서 운전된다. 연료 및 공기 이용률은 각각 80%, 50%이며, 연료극 미반응 가스는 촉매 연소기의 연소용 연료로 공급되어 미 반응 가스를 최대한 활용하도록

구성되었다.

한국 중부발전 보령화력에 설치될 100 kW급 외부 개질형 용융탄산염 연료전지 시스템 기본구성은 그림 2와 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.

프랜트의 배치는 설치 예정인 보령화력 구내의 지질검사 및 현장 실 계측을 통하여 배치도면을 완성하였고 유틸리티의 공급 및 운전의 편의성을 고려하였다. 프랜트 건설은 기계설비, 전기 및 계장 설비 그리고 건축 및 토목분야로 나누어 진행할 예정이며, 본 공사는 금년 7월경 착공하여 2004년 7월 완공한 후 PAC Test를 거친 후 스택을 장착하여 본격적인 운전시험을 실시할 예정이다.

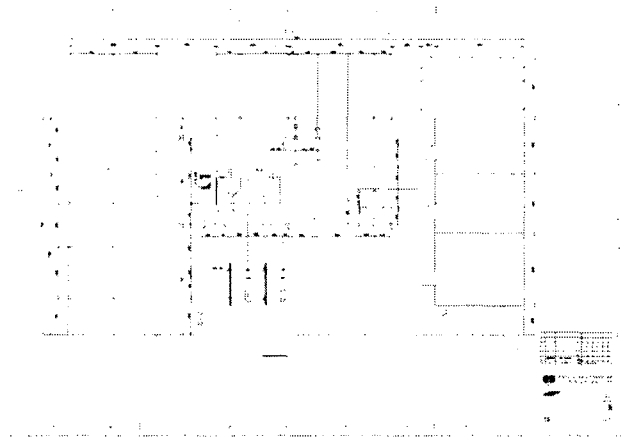


그림1) 보령화력 설치 MCFC 설비 배치도

	2001	2002	2003	2004	2005
(1) 기본설계	[Progress bar from 2001 to 2002]				
(2) 상세설계	[Progress bar from 2002 to 2003]				
(3) 발주준비	[Progress bar from 2003 to 2004]				
(4) 기기제작	[Progress bar from 2002 to 2004]				
(5) 스택설계 및 제작	[Progress bar from 2002 to 2004]				
(6) 토목 건축 공사	[Progress bar from 2003 to 2004]				
(7) 기계설비 설치	[Progress bar from 2004 to 2005]				
(8) PAC Test	[Progress bar from 2004 to 2005]				
(9) Stack 설치	[Progress bar from 2004 to 2005]				
(10) 운전시험	[Progress bar from 2004 to 2005]				

5 MCFC 제어 및 운전모드 설계

가. MCFC 발전시스템 제어 설비개요

감시 및 제어 설비는 MMI Software를 이용한 OS(일명 OT : Operating Terminal)와 PLC 등으로 구성하였다. 현장 설치는 계측센서(Instrument Sensor)로부터 계측 값을 입력받아 정해진 Process에 맞게 PLC와 MMI 내부 Program에 의해 자동으로 제어대상(Contrl Valve, MOV, Electric Heater 등)을 제어하는 역할을 하고, 또한 각종 자료 수집 및 저장, Display되도록 구성하였다. 제어시스템은 안전성 및 경제적인 System으로 구성되도록 역점을 두었다.

OS 설비는 OS 1,2,3 (Operating Terminal)로 구성되고 이들 각각 OT는 공히 Process 운전상황을 감시 및 운전을 할 수 있도록 되어있다. PLC System은 다양한 control logic을 함유하고 있으며, On-line/Off-Line시 Program 수정 및 Down Loading을 설비를 정지시키지 않고 수행되도록 하였고, System 구성의 경제성 고려, 센서 및 밸브와 컨트롤러의 Data 전송을 위하여 PLC I/O Port를 현장에 분산 배치하여 신호용 전선 량을 줄임과 동시에 현장에서 유지보수가 가능하게 하였다. PLC Analog I/O Module은 Process feedback제어를 하는 Close Loop의 경우 현장과의 전기적으로 분리하여 부분적인 고장이 계통 전체로 파급되지 않도록 하였다.

나. MCFC 발전시스템 제어 및 운전모드

그림 2는 100kW MCFC 시스템의 Process Flow 및 Control Diagram을 보여준다. 100 kW MCFC 시스템의 운전모드는 상압 운전 Mode와 가압 운전 Mode의 운전형태로 크게 나누고, 다시 상압운전은 NS(I) Mode 와 NS(II) Mode, 가압운전은 PS Mode 및 PR Mode로 분류하여 설계하였다. 운전Mode의 전환은 상압운전형태에서 가압운전형태로 이루어지며, 가동 시 NS(I)→NS(II)→PS→PR 로 되며, 정지 시는 그 역순이 된다.

NS(I) Mode는 상압 운전 형태로서 Stack 전 처리 및 직후 MCFC 운전형태이고 반응 가스는 가스 저장소에서 공급된다. NS(II) Mode는 Reformer 및 촉매연소기를 운전, Stack

을 가압운전(PS Mode)으로 전환하기까지 운전이다. Anode 가스공급은 천연가스를 개질하여 공급된다. PS Mode는 Cell Stack을 정상운전압력으로 운전하는 형태로서, Anode, Cathode 및 Stack Vessel을 각각 3kg/cm²abs의 가스압력으로 가압한다. 이때 Anode gas는 Carbon deposition을 방지하기위하여 Reformer 입구 측에 110°C의 포화증기를 넣어 운전한다. PR Mode는 MCFC 시스템 정상 운전형태로, Stack에서 1차 반응하고 배출된 가스 중에서 미 반응 가스는 Recycle Blower를 이용하여 Cathode측으로 재순환시는 운전Mode이다.

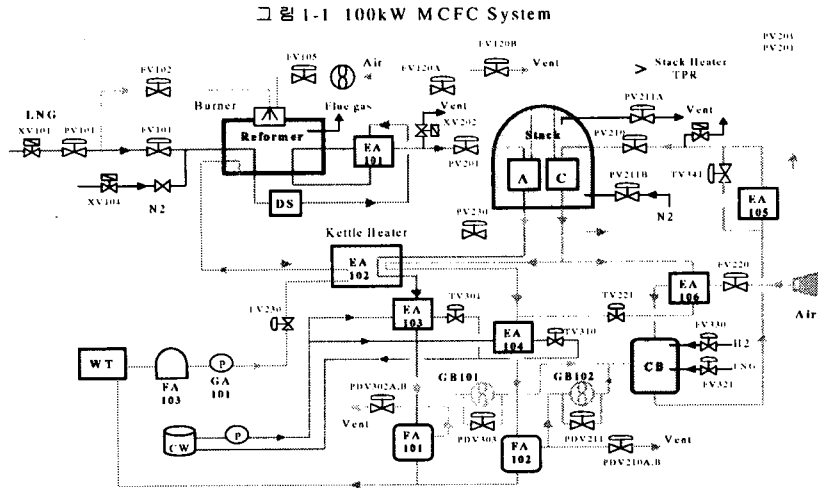


그림3) MCFC 시스템 제어 계통도

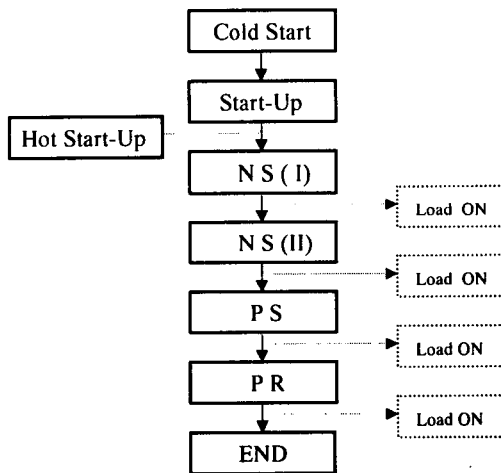


그림4) 운전Mode의 전환

6. MCFC Short Stack 운전시험.

MCFC의 개발은 단위전지의 대면적화 및 다 적층화의 방향으로 진행되고 있다. 또한 발전시스템으로의 연구에는 구성요소의 수명, 전지특성 평가 등이 필요하게 되어, 소형 (약 $1,000 \text{ cm}^2$) 분리판을 표준으로 하는 쇼트 스택 운전 시험을 실시하였다. 2002년 9월부터 $1,000 \text{ cm}^2$ 급 단위전지 20층을 적층한 약 2 kW급 스택 2기에 대한 운전평가를 실시하였다. 전해질 두께의 적정성 및 두께 차에 의한 성능변화를 살펴보고 두께 증가에 대비한 전 처리 운전 조건의 변화를 관찰하였다. Stack 1의 경우 초기성능은 150 A 부하에서 15.29 V Stack 2의 경우 15.79 V를 보여주었고 Stack 1의 경우 4,000 시간의 부하운전 시험을 실시하였고 Stack 2의 경우에는 현재 1,000 시간이상 운전 중으로 초기와 같은 성능을 보여주고 있다. Stack 1의 경우 매트릭스 두께 변화에 따른 성능평가에서 매트릭스 4장을 사용한 두께 1.73mm 쪽 단위전지가 가장 좋은 성능을 보여주었으나 장기 운전 후 성능은 매트릭스 5장을 사용한 4 group Cell 들이 가장 안정된 성능을 보여주었다.

또한 100 kW급 MCFC 스택에 적용된 면압 장치의 실제 적용 및 100 kW 적용 구성요소 및 분리판 운전 평가를 위해 $6,000 \text{ cm}^2$ 급 단위전지를 이용한 25 kW급 규모의 MCFC 스택 운전시험을 준비하고 있다. 100 kW 시스템의 경우, 외부 개질형 시스템으로서 가압 리사이클 운전이 가능하도록 anode의 배 가스를 활용하기 위해 설치되는 촉매 연소기의 성능 평가를 위하여, 천연가스 공급 설비를 부착하였고, Cathode 입구부 가스 리사이클 용 벤츄리관을 설치하는 등의 개조공사를 실시하였다. 스택의 설치는 오는 7월경으로 예정하고 있으며 이후 전 처리 과정 후 본격적인 운전시험을 실시할 예정이다.

7. 결론

정부 대체에너지 중점 과제로 2000년부터 시작된 100 kW급 MCFC 시스템 개발 사업은 현재 전지면적 $6,000 \text{ cm}^2$ 인 단위전지 구성요소 기술개발 및 제작을 위한 기반을 구축하고 이를 바탕으로 현재 제작 중에 있으며, 분리판도 본격적으로 제작이 진행되고 있다. 분리판 설계를 근간으로 100 kW급 스택 구조물 설계를 완료하였고 스택의 조립 공정에 대한 기본 안을 설계하였다. 시스템은 천연가스를 연료로 하는 가압형 시스템으로 설계하여 현재 상세 설계를 완성하고 오는 7월 설비공사에 착수 할 예정이다. 이후 2004년 7월부터 시운전 및 PAC test를 거친 후 Pilot Plant 실증 시험을 진행할 예정이다.