

# 발전용 외부 개질형 MCFC 발전 시스템 개발

임희천\*, 김의환\*\*, 강승원\*\*\*, 김도형\*\*\*, 김범주\*\*\*\*, 이정현\*\*\*\*, 전중환§

(한전 전력연구원 \*수석연구원, \*\*책임연구원, \*\*\*선임연구원, \*\*\*\*일반연구원,

§포항산업과학연구원 수석연구원)

## 1. 서론

물의 전기 분해반응을 역으로 이용하는 연료전지 발전방식은 연료가 가지고 있는 화학에너지를 전기화학 반응을 이용하여 전기에너지로 직접 변환시키는 저공해 고효율의 첨단 발전 방식이다. 여러 형태의 연료전지 발전 방식 중 분산형 전원 및 석탄 가스화기와 연결하여 복합발전으로도 사용가능한 용융탄산염 연료전지(MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell)는 전력사업 분야에 적용 가능성이 가장 큰 발전 방식이다. 현재 선진국에서는 MW급 이상 실증운전 시험을 완료하고, 보다 높은 효율을 갖는 분산형태 상용 발전시스템으로 개발하여 보급이 활발히 진행되고 있다.

국내에서 외부개질형 MCFC 발전 시스템 기술개발은 1993년부터 선도기술개발 사업으로 시작하여 2004년 100kW급 발전시스템 개발이 정부 대체에너지 기술개발 중점사업으로 선정되어 진행되었고, 이어 상용 250kW급 시스템 개발을 추진하여, 2008년 말에는 세계에서 가장 큰 10,000cm<sup>2</sup>급 단위전지를 이용한 75kW 스택 및 운전시스템을 개발 3,000여 시간 성공적으로 운전하고 이어 125kW급 스택을 개발 운전에 들어감으로써 외부개질형 MCFC 스택 상용 기반 기술을 확립하였다. 여기서는 현재 진행 중인 250kW급 외부개질 MCFC 발전 시스템 설계 및 125kW 스택 개발 결

과를 간략하게 소개하고자 한다.

## 2. 외부 개질 MCFC 발전 시스템의 개요

외부개질 용융탄산염 연료전지 단전지는 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 전해

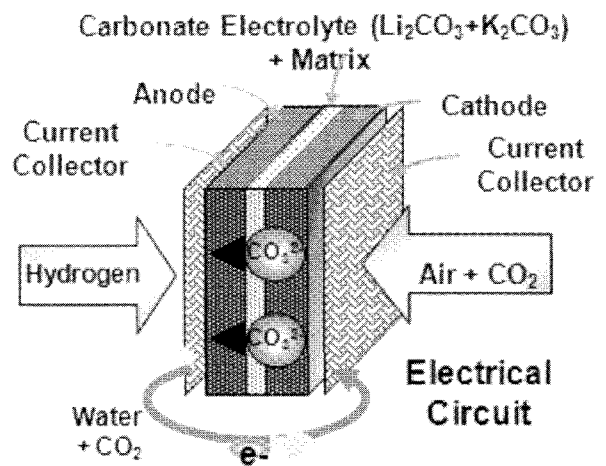
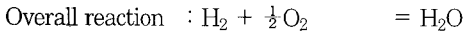
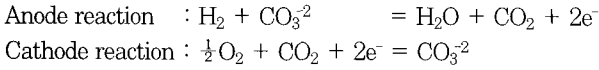


그림 1 MCFC 발전 원리

질로 구성하고 역시 다공성의 LiAlO<sub>2</sub> 매트릭스로 구성된다. 수소가 주성분인 연료가스와 산소와 이산화탄소로 구성된 산화제가 각각 연료극과 공기 극으로 공급되며 다음 그림 1과 같은 전기화학반응에 의하여 용융탄산염 연료전지는 전기와 열 및 물을 생산한다.



전압이 낮은 단전지를 소비자에게 공급될 수 있는 고 전압 전력을 얻기 위하여 단전지를 수백장 적층하여 스택을 구성한다. 이러한 스택은 공급된 반응가스와 공기를 사용하여 전류와 열을 생산하는 기본이 된다. MCFC 발전시스템은 이러한 연료전지 스택을 중심으로 연료처리 장치, 직교류 변환 장치 및 배열 회수 이용 장치 등을 조합하여 구성된다.

MCFC 스택 종류에는 연료전지가 필요로 하는 수소를 연료처리 장치에서 공급하는 외부개질형태(External Reforming Type) MCFC 스택과 연료전지 스택 내에서 연료가 직접 수소로 전환하여 공급되는 내부개질 형(Internal Reforming) MCFC 스택이 있다. 외부 개질스택의 경우 다양한 형태의 연료 사용이 가능한데 반하여 내부개질형인 경우 메탄 계(천연가스) 연료만 사용할 수 있다. 스택은 반응가스가 각 단위전지로 균등하게 공급되도록 설계된다.

외부개질 MCFC 시스템은 전기를 생산하는 MCFC 스택, 연료공급 장치로 석탄, 천연가스 등을 수소 또는 수소 및 일산화탄소 등 연료전지 스택 내 반응가스로 전환시키는 연료처리 장치, 공기 공급 장치 및 정화 장치 등 기계적 보조기기(MBOP)로 구성된다. 이외 시스템은 연료전지에서 생성되는 직류 전기를 실제 사용가능한 교류로 변환시키는 전력변환장치(PCS)가 부가되며 스택에서 발생하는 고온, 양질 배열을 이용하여 복합발전 혹은 난방에 활용하기 위한 배열 회수 장치가 있다.

연료의 다양성, 모든 부하에서의 높은 전기효율, 환경친화성 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 집중 대형 발전방식에 이르기까지 다양하게 적용될 수 있다. 발전규모에 따라 석탄가스화 연계가 가능한 외부개질 형 용융탄산염 연료전지는 주로 대형 발전을 목표로 개발이 진행되고 있는 반면, 천연가스가 주 연료로 예상되는 내부개질 형 용융탄산염 연료전지는 소규모 열병합 발전을 주 목표로 개발되고 있다.

### 3. 국외 기술개발 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 3 MW 규모의 내부 개질 시스템을 개발하여 전 세계에 판매하고 있다. 국내에서도 POSCO Power가 FCE와 협력 국내에 주변기기 공장을 설치하여 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 주부 전력 구내에 설치하여 5,000시간의 운전시험을 실시하였고 가스터빈과 연계된 300kW 복합발전 시스템 개발을 진행 하였다. 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. 표 1에 세계 및 국내현황을 요약하였다.

### 4. 125kW급 외부개질 MCFC 발전 시작품 설계 및 제작

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.

표 2는 125kW MCFC 시스템 기술 개발 규격을 보여주고 있다. 125kW급 MCFC Proto Type 개발은 실제 상용화를 위한 열병합 발전 설비로서 보급 가능성 및 실증을 위한 설비

표 1 MCFC 발전 시스템 종류 및 개발현황

구분	외부개질(ER) MCFC	내부개질(IR) MCFC
연료	황석연료 H <sub>2</sub> , Coal Gas etc.	Methane (NG)
현황	IHI(Japan): MW 설충(2000) 300 kW (2006) ANSALBO (Italy): 500 kW 개발 중	FCE(USA): 300 kW, 1.2 MW, 2.4MW Commercialization MTU FCE(Germany): 300 kW hot Module 500 kW 개발 중
국내	KEPCO/KEPPI/ABST: 160 kW (2005) 250 kW (2009)	POSCO - FCE 협력 (국내 및 아시아 지역 판매) 누산 중 - 300 kW 개발 중
개발방향	KEPCO-POSCO 공동연구 KRC, 삼성전(전기) 모형수소 System (전기)	기술수입 및 국내개발 Stack/System Development 분산형 (전기 및 열기)

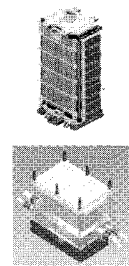


표 2 125kW MCFC 시스템 기술 규격

Components	Anode	Ni+Al Alloy
	Cathode	NiO (in situ)
	Matrix, Electrolyte	$\gamma$ -LiAlO <sub>2</sub> , Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
	Separator	STS 310, Al coating
Stack	Gas Flow	Internal Manifolds
	Reforming	Externally Reforming
	Numbers	1 stacks (125kW)
	No. of cells	180 cells (1m <sup>2</sup> )
Reformer		Conventional Type
Catalytic Combustor		Pre mixing Type
System	Pressure	Atmospherics Pressure
	Recycle	Anode off gas recycle
	Type	Package

로, 저 코스트 단위전지 구성요소 개발 실증 및 시스템의 기본 구성을 통하여 고 적층 전지, 고효율 개질기 연계 운전 실증을 진행 할 예정이다.

4.1 125kW MCFC 시스템 상세설계

상세 설계가 완성된 125kW MCFC 시스템 개략도와 3D Drawing을 그림 2에서 보여주고 있다. 125kW MCFC 시스템은 크게 개질기와 MCFC 스택 그리고 연료극(Anode) Recycle 시스템으로 구성된다. 이외 개질기 및 스택 내에 스팀을 공급하는 증기 발생기 및 수처리 장치, 공기공급 장치 등이 있다.

연료 극에는 개질기에서 천연가스로부터 수첨 개질반응(Steam Reforming)을 통하여 얻게 되는 수소와 Steam 그리고 이산화탄소가 공급된다. 공기극(Cathode)에는 Anode off 가스는 Eductor를 통하여 그리고 공기는 blower를 통하여 촉매연소기로 공급된다. 촉매연소기에서는 Anode off 가스를 연소하여 생성된 이산화탄소와 공기가 혼합 공급되고 또한 전기히터를 통하여 600℃ 이상 가열되어 스택 내로 공급된다. 스택 내에서는 Anode 및 Cathode에 공급된 반응가스가 전극 내에서 반응하여 전기를 생산하고 반응 가스는 외부로 배출된다. Cathode 배기가스는 열교환기를 통하여 Anode 공급 가스를 가열함과 동시에 열열병합 공급원으로 이용된다.(그림 2 참고)

4.2 125kW MCFC 스택 설계 및 제작

125kW MCFC 스택은 1m<sup>2</sup>급 유효 전극 면적을 갖는 단위전지들로 구성될 예정이며, 가스의 흐름은 Internal Manifold & Co-flow Type 형태로 되어있다. 단위전지는

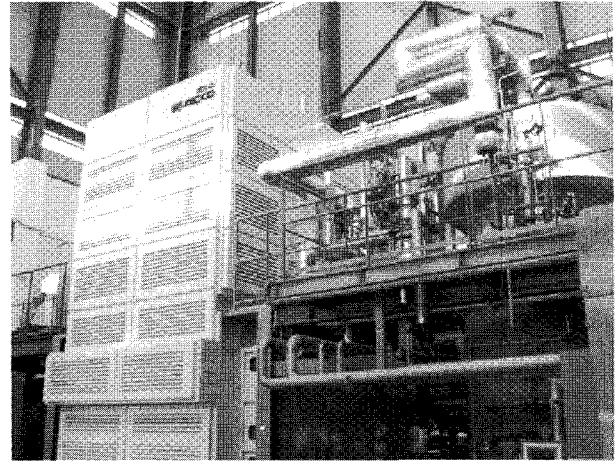
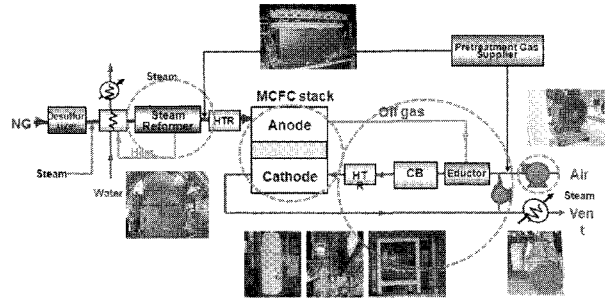


그림 2 125kW MCFC System Configuration 및 Package 모습

표 2 125kW MCFC 스택 단위전지 구성

Components	Thickness	Remarks
Anode	0.65 mm	Ni + Al Powder mixing Electrolyte impregnated
Cathode	0.7 mm	Electrolyte impregnated
Matrix	0.3 mm	$\gamma$ -LiAlO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> fiber
Electrolyte	0.37~0.38 mm	Added Electrolyte At wet-sealarea

10,000cm<sup>2</sup> 반응면적을 가지고 있고 이들 단위전지 180여장 적층되어 MCFC 스택을 구성하게 된다. 단위전지는 연료극, 전기극 및 전해질 매트릭스와 분리판으로 구성된다. 연료극은 Ni + Al Alloy Powder를 사용하여 제작하였고, 공기극은 Ni을 In-Situ로 산화시켜 NiO화 하여 사용한다. 양전극 모두 전해질을 함침 시켜 스택 제작 시 높이 변화를 최소화시킬 수 있도록 제작하였다.

분리판은 0.4 mm 두께의 STS 310S 스텐인레스 재질을 이용하며 유동 및 차압 등을 고려하여 Soft Rail 형태로 설계 제작하였다. Wet seal 부는 부식방지를 위하여 Al coating처리하였고 Masking plate 및 center plate 그리고 집전 판으

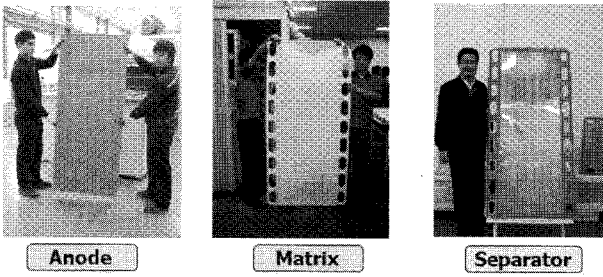


그림 3 MCFC스택 단위전지 구성요소

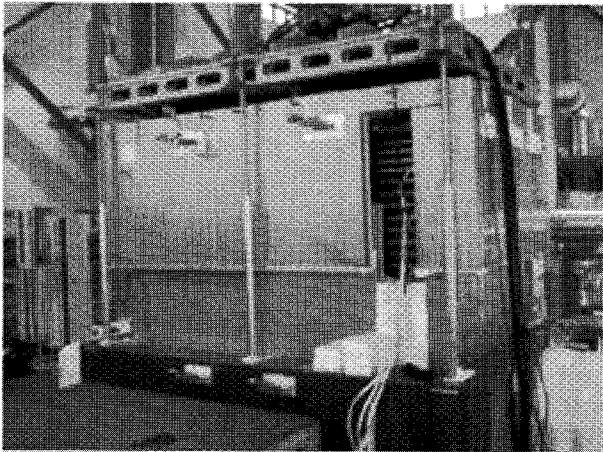


그림 4 125kW MCFC 스택 조립모습

로 구성되어있다. 3매의 STS 판은 Laser 용접으로 처리하여 기밀이 유지되도록 제작하였다. 이외 분리 판의 강성을 주기 위하여 별도 강성 분리판을 설계 제작 설치하여 Stack 전체의 강성과 면압이 유지될 수 있도록 설치하였다.

스택 내 반응가스를 공급하기 위한 스택 내부에 입, 출구 매니폴드를 가지고 있으며 스택 내 유동은 입구 매니폴드에서 분리판 하부로 반응가스가 공급되어 상부 단위전지로 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 평행 류(Co-Flow Type)형태를 보여주고 있다. 기타 스택 내 압력 유지 및 안전을 위하여 stack vesse, 면압 유지 실비 등을 별도로 제작하여 설치하였다. 그림 4는 125 kW 스택 조립 모습을 보여주고 있다.

4.3 주변기기 개발

개질기는 본 연구에서는 경제적으로 제작 가능하고 스팀수 첨 개질기를 삼성엔지니어링에서 개발하여 제작을 준비 중에 있다. 스팀 개질기는 Conventional한 형태로 크기가 3m×3m×3m, 로 Compact한 형태로 설계되었다. 24개의

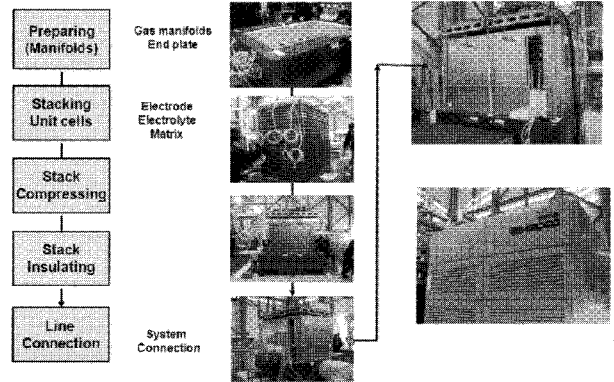


그림 5 125kW MCFC Stack Installation 모습

Reactor tubes에서 개질반응이 이루어지며, 공급가스는 천연 가스로 63.2Nm<sup>3</sup>/h가 공급되어 473Nm<sup>3</sup> 규모의 반응가스가 생성된다. 이외 연료극 배출가스를 연소하여 CO<sub>2</sub>를 공급 라고 공기극 열을 공급하는 Anode Recycle 시스템을 자체로 개발하여 제작 운전시험을 진행하였다.

주) 효성에서는 125kW급 발전시스템에서 생성된 전력을 전력계통에 안정되게 연계하기 위한 250 KVA MCFC 발전 시스템 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 125kW MCFC 시스템 운영을 위하여 보령 현장에 설치되어 성능을 평가하고 있다.

4.4 125kW 시스템 운전

125kW급 MCFC은 2009년 12월 보령화력 발전소 연료전지 시험 중에 설치된 Package 내에 설치되어 운전 시험을 진행하고 있다. 장착된 스택은 총 750여시간의 전처리 기간이 끝나는 2010년 1월 말부터 본격적인 부하운전을 실시 할 예정이다. 다음 그림 5는 Package 형태로 개발된 125kW MCFC 스택 장착 순서 및 운전 모습을 보여 주고 있다.

5. 125kW급 스택 개발을 위한 75kW 스택 운전평가

MCFC 구성요소 요소별 기술 수준을 점검하고 개발 방향을 점검하기 위하여 125kW 스택을 제작하여 운전하기 전에 중간규모 75kW급 MCFC Short Stack을 제작 운전평가를 시행하였다. 75kW급 MCFC Short stack은 125kW에서 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.

표 3 75kW MCFC 스택 운전 결과

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

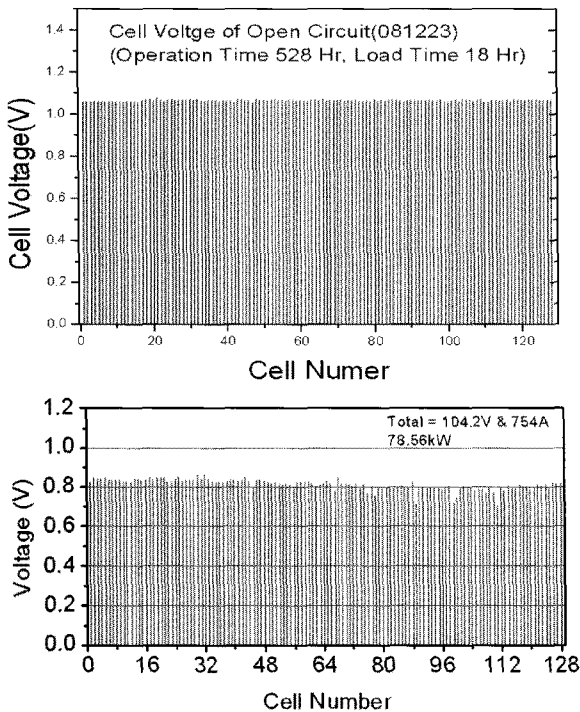


그림 6 OCV & Cell Voltage Distribution of 75kW MCFC Stack

스택은 483시간의 전처리 과정을 마친 후 초기 무 부하 상태에서 스택의 특성을 확인한 후 부하운전을 실시하였다. 초기 부하는 PCS를 통하여 DC 출력 기준으로 75kW 까지 점차 증가시켜 정 부하 부하운전을 수행한 후 전류밀도를 낮추어 20에서 30kW 출력을 유지하면서 장기성능을 시험하였다. 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. 발생된 총 전력량은 78.5MWh, 최대 출력은 78.56kW이었다.

초기성능 시험은 75kW까지 부하운전을 계획하였고 무 부하 (0 A)상태에서의 스택의 전체 전압은 136.96V, 평균전압이 1.070V를 보여주었다. 스택의 최고출력은 754A에서 셀 전압 103.7V, 평균전압이 0.810V로 78.189kW DC 출력을 보여주었다. 그림 3에서 75kW MCFC 스택의 전압 분포를 보여주고 있다.

## 6. 향후 MCFC 개발 방향

MCFC 발전 방식은 다 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.

## 7. 결론

정부 신 재생에너지 중점 과제로 2004년부터 시작된 250 kW MCFC 시스템 개발 사업은 사업 규모를 축소하여 2008년 세계최대규모 10,000cm<sup>2</sup> 급 단위전지를 이용한 75kW 스택 및 시스템을 개발하여 성공하였고 최종 목표인 125kW MCFC 스택을 제작하고 이를 운전할 수 있는 Package를 개발 설치운전 시험을 진행하고 있다.

기술 진행현황을 살펴보면 이전 수행한 MCFC 발전 시스템 개발 연구를 기반으로 구성요소에 대한 인프라 구축 및 스택 구조 및 분리판 구조 변형을 통한 성능향상을 도모하였다. 아울러 250kW MCFC 스택 구성요소 제작 인프라구축을 위한 구성요소 제조 설비를 선정/도입 설치하였다. 시스템에 있어서는 250kW 상압 발전 시스템에 대한 개념설계를 완성하였고 이를 실현 할 수 있는 실행 시스템에 대한 기본 및 상세 설계를 완료하였다. 시스템 설계에서는 시스템의 단순화와 더불어 발전효율을 높이는 방안으로 검토되고 있고 이를 통한 125kW 시스템 Package 형 고유모델을 설계 제작하여 10,000cm<sup>2</sup> 급 전극 및 분리 판을 가지고 있는 125kW MCFC stack을 제작 2009년 말 부터 운전시험을 진행하고 있다. 이를 실증하기위한 사전 75kW MCFC short 스택은 2008년 11월 27일부터 스택 해체시점인 2009년 3월 30일까지 운전 시험을 실시하였다. 이때 생산된 총 전력량은 78.5MWh, 최대 출력은 78.56 kW이었다.

## 참고 문헌

- [1] 임희천, 안교상 김도형 외: "250 kWMCFC 발전 시스

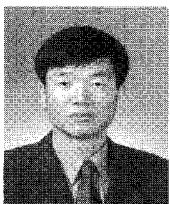
- 템 개발 III”, 2007년도 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, 2007. 7.
- [2] 임희천 외 : “250kW급 열병합 용융탄산염 연료전지 발전시스템 Proto Type 개발(2단계 1차년도 사업보고서)”, 한국 전력공사 전력연구원, 대전, 2008.
- [3] 강승원, 외 : “75kW급 용융탄산염 연료전지 스택 운전결과”, 한국 수소 및 신에너지 학회 논문집, Vol 20, No. 3, 2009. 6.
- [4] Hee Chun Lim “Status of Fuel Cell Development and dissemination in Korea”, 4th Int. CCT & Fuel Cell Workshop, Wuxi, China Nov. 14-15, 2008.
- [5] H-C Lim, D-H Kim, S-W Kang, B-J Kim J-H Lee and J-H Jun “Test Results of a75 kW MCFC stack with 1m2 effective electrode for the developing 250 kW ER Type MCFC system”, 10th Asian Hydrogen Energy Conference, DaeGu, Korea April. 9-10, 2009.

〈 필 자 소 개 〉



**임희천(林希天)**

1982년 성균관대 기계공학과 졸업. 1996년 충남대 대학원 기계공학과 졸업(석사). 2000년 동대학원 기계공학과 졸업(공학박). 1982년 한전 입사. 2007년 한전 전력연구원 수석연구원. 2008년~2009년 전기화학회 연료전지 분과 위원장. 2004년~현재 한국 수소 및 신 에너지학회 부회장.



**김의환(金宜煥)**

1996년 충남대 기계공학과 졸업(석사). 2001년 충남대 기계공학과 졸업(공학박). 1995년~현재 한국전력공사 전력연구원 책임연구원.



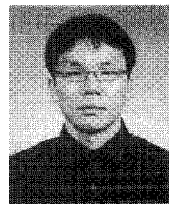
**강승원(姜丞遠)**

2005년 충남대 기계공학과 졸업(석사). 1991년~현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원.



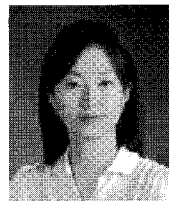
**김도형(金度亨)**

2005년 광주과학기술원 재료공학과(공학박). 2006년~현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원.



**김범주(金範柱)**

2006년 서울대 기계공학과 졸업(석사). 2007년~현재 한국전력공사 전력연구원 일반연구원.



**이정현(李廷玪)**

2003년 서울대 지구환경과학부 졸업(석사). 2008년~현재 한국전력공사 전력연구원 일반연구원.



**전중환(全中煥)**

1983년 서울대 금속공학과 졸업. 1985년 동 대학원 금속공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 금속공학과 졸업(공학박). 1988년~현재 포항산업과학연구원 수석연구원.