

# 100kW급 용융탄산염형 연료전지 발전시스템 개발

—1단계 25kW급 MCFC시스템 운전 및 평가—

임 희 천

한전 전력연구원 발전연구실 책임연구원/공학박사

## 1. 서론

현재 전력사업이 안고 있는 문제점으로는 급격한 전력 수요 증가에 따른 전원확보의 어려움과 날로 증가되는 지구환경 문제를 들 수 있으며 특히 지구온난화 문제에 따른 CO<sub>2</sub> 규제 등이 커다란 장애요인이다. 따라서 이러한 문제점을 효율적으로 해결하기 위하여 공해요인이 적으며, 에너지 변환효율이 높은 새로운 발전방식의 개발 필요성이 요구되고 있다. 연료전지 발전방식은 고효율 저공해 발전방식으로서 이와 같은 문제점을 해결할 수 있는 방안으로 제시되고 있다. 여러 종류의 연료전지 발전방식 중에서도 용융탄산염 연료전지(MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell, 이하 MCFC)는 650°C의 고온에서 운전되며, 연료로 천연가스 외에, 석탄을 가스화한 연료를 사용할 수 있어 대규모 상용발전 플랜트로서 전력사업에 대한 적용가능성이 가장 큰 발전 방식이다.

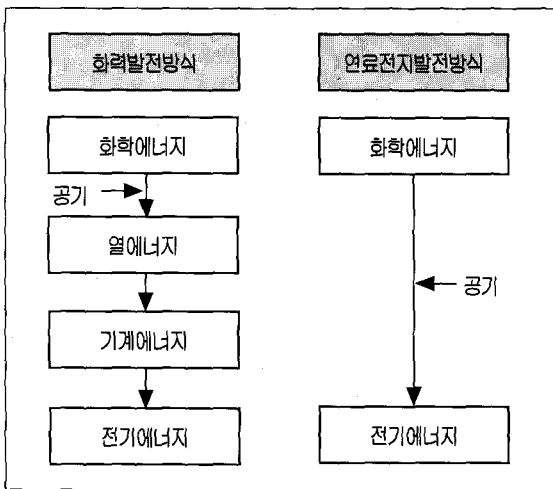
이러한 이유로 국내에서는 2003년까지 100kW급 MCFC 발전시스템 개발을 한전 전력연구원을 중심으로 한국중공업(구 삼성중공업), KIST 및 여러 대학이 참여하여 선도기술개발사업(G7)의 하나로 추진하여 오고 있

다. 이 결과, '99년말 세계에서 네번째로 순수한 자체기술로 25kW 규모 발전시스템을 제작 설치, 운전시험에 성공함으로써 상용화를 위한 새로운 전환점을 맞이하고 있다. 본고에서는 기력 발전방식을 대체할 수 있는 새로운 발전방식인 MCFC 발전방식에 대하여 그 원리 및 종류에 대하여 살펴보고, 현재 진행중인 100kW MCFC 시스템 개발계획과 운전 시험한 25kW MCFC 개발에 대한 내용을 간략히 서술하고자 한다.

## 2. 연료전지 원리 및 특징

### 가. 연료전지의 원리

연료전지 발전방식의 기본원리는 물의 전기분해와 반대되는 반응, 즉 수소와 산소를 반응시켜 전기와 물을 발생시키는 발전장치로서 수소는 천연가스, 석탄으로부터 얻고 산소는 공기로부터 얻을 수 있다. 그림 1은 연료전지 발전방식과 기존 화력 발전방식의 에너지 변환과정을 비교하여 보여주고 있다. 연료전지 발전방식은 연료가 가지고 있는 화학 에너지를 직접 전기화학 반응에 의하여 전기에너지로 변환시키지만, 화력발전의 경우, 석탄이나 석



〈그림 1〉 연료전지와 기존 화력발전방식과의 차이

유 등 연료를 연소시켜 얻은 열 에너지를 터빈을 회전시키는 기계에너지로 변환시키고 이를 다시 발전기를 통하여 전기에너지로 변환하는 발전방식이다.

#### 나. 연료전지의 특징

연료전지가 가지고 있는 가장 큰 특징은 그림 1에서도 알 수 있는 것과 같이 직접 발전방식이기 때문에 에너지 변환효율이 아주 높다는 점이다. 이론적으로 연료전지 발전방식은 80% 이상 높은 전기에너지 변환효율을 기대할 수 있지만 실제로는 저항 성분으로 인하여 50% 정도의 전기적 효율을 얻을 수 있다. 그러나 발전 시 배출되는 배열을 이용하여 증기를 생산하고, 공정 열, 난방, 냉방 등에 활용하거나 복합 발전용 열원으로 이용하는 경우에는

더욱더 높은 열효율을 얻을 수가 있다.

두번째로 연료전지가 갖는 특성은 환경 친화적인 발전 방식이라는 점이다. 연료전지 발전은 기존의 열기관과는 다르게 연소과정을 거치지 않으므로 공해물질의 배출이 적다. 특히 연료전지 발전방식에서는 일반적으로 열기관에 의한 발전시 고온 연소시에 발생하는 NOx는 연료전지의 동작온도가 낮으므로 발생량이 적고, SOx도 연료로부터 근원적으로 제거하여 공급하기 때문에 발생량이 없어 아주 깨끗한 발전방식으로 알려지고 있다. 또한 연료전지 설비는 직접 발전방식으로서 주요설비가 엔진 등과 같은 회전기기로 되어 있지 않아 소음 및 진동 등의 공해요인도 줄일 수 있으며 기존의 화력발전 방식과 같이 온배수에 의한 영향을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.

이외에도 연료전지 발전은 통상의 발전기가 최대출력 발생시 최대 효율을 얻을 수 있는데 반하여 부분 부하시에도 전압의 상승에 따른 내부저항 손실이 적어 높은 열효율을 얻을 수 있으며, 부하상승시 부하 추종성이 좋다는 전기적 특성을 함께 가지고 있다. 이상의 연료전지 특징을 요약하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- ① 발전효율이 높고 폐열을 이용할 수 있다
  - ② 저공해, 저소음 발전방식이다
  - ③ 부분부하에서도 효율이 높다
  - ④ 소형에서도 효율이 높다
  - ⑤ 모듈화할 수 있어 쉽게 이설 및 증설이 가능하다
- 다음 표 1은 전해질의 종류와 동작온도에 따라 분류한 연료전지의 종류를 보여주고 있다.

〈표 1〉 연료전지의 종류

구 분	고체고분자 전해질	인산형	용융탄산염형	고체전해질형
전 해 질	Nafion	인산	용융탄산염	안정화지르코니아
이온종류	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>
동작온도	50~80℃	160~220℃	600~700℃	~1000℃
연 료	NG, 메탄올, H <sub>2</sub>	NG, 메탄올, LPG	NG, 석탄가스	석탄가스 등
적 용	자동차, 소형	현지설치	대형화력, 분산형	대형, 분산, 소형
효 율	45~60	35~45	45~50	50~60

### 다. 연료전지 발전시스템 구성

그림 2는 연료전지 발전시스템의 구성을 보여주는 그림이다. 그림에서와 같이 연료전지 발전시스템은 전기를 생산하는 연료전지 본체(Fuel Cell Power Section) 연료인 천연가스, 메탄올, 석탄, 석유 등을 수소가 많은 연료로 변환시키는 개질장치(Reformer) 등을 포함하는 연료 처리계(Fuel Processor), 발전된 직류전기를 교류전기로 변환시키는 전력 변환장치(Power Conditioner)가 주요한 구성요소이며 이외에도 제어장치(Control System) 및 배열이용 시스템(Heat Recovery System) 등이 추가된다. 연료전지 단위전지(Cell)는 기본적으로 전해질이 함유된 전해질 판, 연료극, 공기극 그리고 이들을 분리하는 분리판 등의 단위전지로서 구성된다. 단위전지는 그 전압이 아주 낮아 이를 여러 장 쌓아 필요로 하는 만큼 전압을 상승시켜야만 전기를 사용할 수 있다. 이를 위하여 단위전지를 수백장 직렬, 혹은 병렬로 연결하여 연료전지 스택을 구성한다.

연료 처리계는 연료전지에서 필요로 하는 연료가스를 공급하는 장치로서 사용되는 연료 특성에 따라 다르게 개

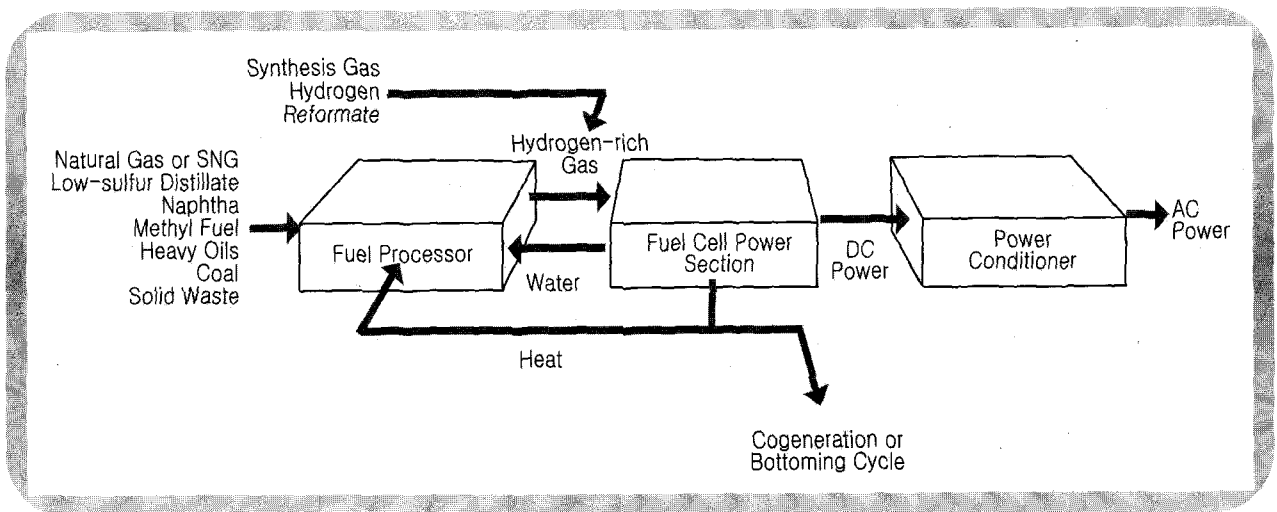
발되고 있다. 천연가스를 이용하는 경우 천연가스를 수증기로 개질하여 수소와 일산화탄소를 얻고 이들 연료가스에 의하여 발전한다. 석탄을 연료로 사용하는 경우에는 석탄을 가스화 하여 일산화탄소 및 수소를 발생시키는 석탄가스화장치와 이러한 석탄가스내의 불순물인 황화합물, 할로겐 화합물을 제거하기 위한 석탄가스 정제시스템을 필요로 한다.

전력 변환장치는 직류로 발생되는 전기를 교류로 변환시키는 장치로서, 인버터 전류를 변환시키는 방법에는 자려식과 타려식이 있는데 연료전지 인버터에서는 자려식을 많이 사용하는 것으로 알려져 있다.

### 3. 용융탄산염 연료전지(MCFC) 발전 시스템

#### 가. 시스템 개요 및 특징

용융탄산염 연료전지는 용융탄산염( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$  또는  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )을 전해질로 하여  $650^\circ\text{C}$  온도에서 동작하는 연료전지이다. 고온에서 동작하므로 열효율이 저온형

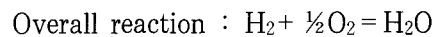
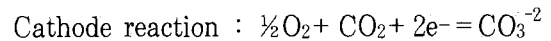
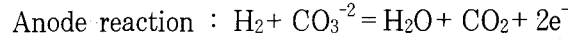


〈그림 2〉 연료전지 발전시스템 구성

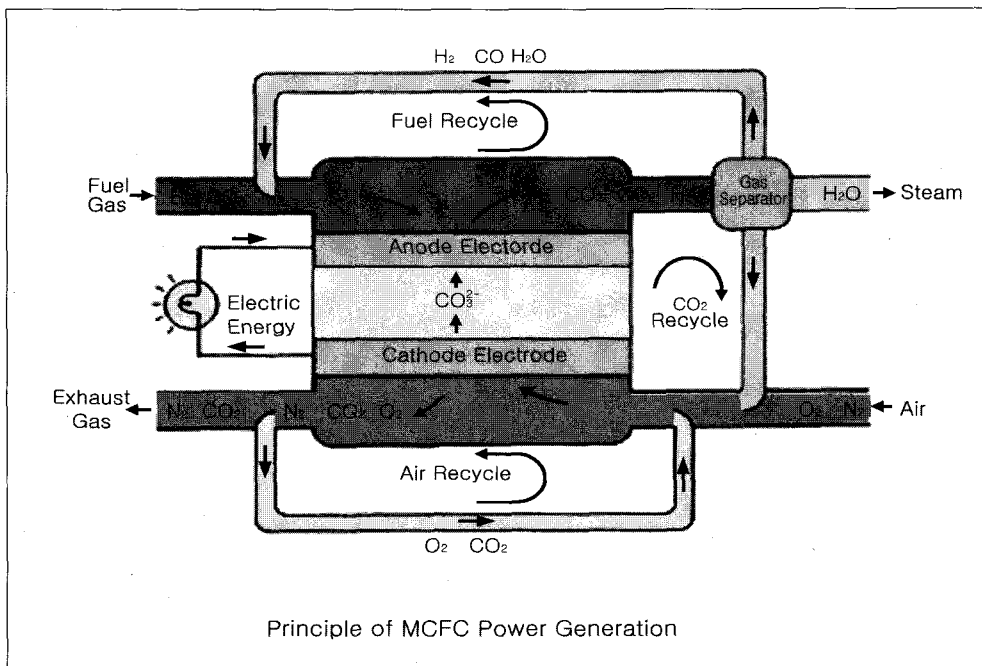
연료전지보다 높고 전극으로는 Ni 및 NiO가 사용되며 동작 후의 배열은 아주 높은 고온을 얻을 수 있기 때문에 Bottoming Cycle에 의한 복합발전이 가능하다. 특히 연료로 수소 이외에도 CO의 사용이 가능, 석탄가스화기와 조합하여 복합발전 시스템으로 활용이 가능하기 때문에 대형 발전시스템을 근간으로 하는 전력사업 적용가능성이 가장 큰 발전 방식이다. 그러나 고온 용융탄산염을 전해질로 사용하기 때문에 부식 문제가 있고 전해질로 이용하는 탄산염은 상온에서 고체상태였다가 연료전지의 동작 온도에서 액체로 변화되기 때문에 열 사이클에 의한 체적변화에도 성능저하가 없는 내구성 재료 및 구성요소의 개발이 필요하다. 아울러 실용시스템 개발을 위하여 고온에서 동작되는 리사이클 송풍기 등의 주변기기 개발도 필요로 한다.

용융탄산염 연료전지는 일반적으로 그림 3과 같이 다공성의 Ni 연료극(Anode)과 NiO 공기극(Cathode) 사

이에  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 와  $\text{K}_2\text{CO}_3$ 의 혼합 용융탄산염 전해질이 다공성의  $\text{LiAlO}_2$  매트릭스 내에 함침되어 단위전지로 구성된다. 수소가 주성분인 연료gas와 산소와 이산화탄소로 구성된 산화제가 각각 연료극과 공기극으로 공급되며 다음과 같은 전기 화학반응에 의하여 용융탄산염 연료전지는 전기와 열 및 물을 생산하게 된다.



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 사용 가능한 연료gas로 전환시키는 연료처리 장치, 공기 공급장치 및 정화장치 등으로 구성된다. 반응가스 처리장치에서 적절히 조절된 연료와



<그림 3> 용융탄산염 연료전지의 원리

공기를 사용하여 전류와 열을 생성하는 연료전지 스택은 적층된 수백장의 단위전지로 구성되며, 반응가스가 각 단위전지로 균등하게 공급되도록 설계된다. 기본적으로 각 단위전지는 전해질 매트릭스에 의하여 분리된 연료극과 공기극의 양 전극으로 구성된다. 직교류 변환장치는 연료전지에서 생성되는 직류 전기를 실제 사용 가능한 교류로 변환시키는 역할을 한다. 용융탄산염 연료전지에서는 스택에서 발생하는 고온, 양질의 배열을 이용한 복합발전이 가능하여 Rankine Cycle을 이용하여 교류전류를 추가로 얻을 수 있다.

용융탄산염 연료전지 용도는 연료의 다양성, 모든 부하에서의 높은 전기효율, 환경친화성 및 열병합 발전으로 대표되는 장점으로 병원, 호텔, 아파트단지 등에 직접 설치하는 수백kW, 수십MW급 현장설치형 및 분산배치형에서부터 기존 대형 화력발전을 대체하는 수백MW급 이상의 중앙 집중형 발전방식에 이르기까지 다양하게 적용될 수 있다. 발전규모에 따라 석탄가스화 연계가 가능한 외부개질형 용융탄산염 연료전지는 주로 대형 발전소를 목표로 중앙집중형 발전방식으로 개발이 진행되고 있는 반면, 천연가스가 주 연료로 예상되는 내부개질형 용융탄산염 연료전지는 소규모 열병합 발전을 주 목표로 개발되고 있다.

#### 나. MCFC 연료전지 기술개발 현황

##### (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.), MC Power 등에서 실용규모의 스택을 개발하고, IGT(Institute of Gas Technology) 등에서 관련

기초기술에 대한 연구를 진행하고 있다. ERC에서는 1996년 5월 전력회사 및 정부의 도움으로 Santa Clara 시에 내부개질형 125kW 스택 16기로 구성된 2MW MCFC Demonstration Plant를 설치하여 5,200여 시간 운전시험을 실시하였다. MC Power는 외부개질형 250kW MCFC Stack을 개발, San Diego의 Naval Base에 설치하여 운전시험을 시작하여 2,000시간 이상 운전하였다.

일본은 New Sunshine 계획으로 1980년부터 본격적인 연구가 시작되어 NEDO가 주관하여 개발하고 있다. Hitachi, IHI에서는 외부 개질형 250kW급 스택을, 그리고 Mitsubishi에서는 내부개질형 200kW급 스택을 개발하여 1999년 MW급 시스템을 구성 주부(中部)전력 구내에 설치하여 3,000시간의 운전시험을 실시하여 MCFC Demonstration에 대한 기반을 마련하였다.

이외에도 유럽에서는 네덜란드에서 10kW 규모로 그리고, 이태리 등에서는 100kW급 시스템을 개발 운전시험을 완료하였다. 그러나 MCFC 시스템은 고온(650°C)에서 동작되므로 내열성, 내식성 재료의 개발 등 기술적인 어려움을 가지고 있어 본격적인 상용화는 21세기 초반이나 가능할 것으로 전망된다. 하지만 전력사업 분야에서는 용융탄산염 연료전지가 가지고 있는 많은 장점으로 인하여 선진각국에서 시스템 개발에 많은 노력을 기울이고 있다(표 2 참조).

##### (2) 국내기술 현황

국내에서의 용융탄산염 연료전지 개발은 1989년 한국과학기술연구원(KIST)이 한전의 자금지원으로 소규모 단위전지 제작 및 운전특성시험 등 기본기술개발이 시작되었고 이어 1992년 정부의 21세기 선도기술개발사업(G7)의 하나로 MCFC 시스템 개발이 선정됨으로써 본격적인 개발이 시작되었다. 1993년부터 시작된 선도기술개발 1단계 사업은 한국전력이 주관기관이 되어 삼성

〈표 2〉 전세계 용융탄산염형 연료전지 운전현황

제작자 및 실험자	최 대 출 력		
	최대출력	장 소	스택의 형태
아 시 아			
Hitachi	250kW	Goi, Japan	IM,ER,5atm
IHI	250kW	Goi, Japan	IM,ER,5atm
KEPRI	28.6kW	Taejon, Korea	IM,ER,1atm
MELCO	200kW	Melco Lab, Japan	EM,IR,1atm
Sanyo	30kW	Saitama, Japan	EM,IR,1atm
Toshiba	5kW	Toshiba Lab, Japan	IM,ER,5atm
유 럽			
Ansaldo	100kW	Ansaldo Italy	EM,ER,1atm
ECN/BCN	10kW	ECN, Netherland	IM,ER,1atm
ERC	7kW	Elkraft, Denmark	EM,IR,1atm
MTU	200kW	MTU, Germany	EM,IR,1atm
미 국			
ERC	2,140kW	Santa Clara, CA	EM,IR,1atm
MC Power	250kW	Burr Ridge, IL	IM,ER,1atm

IM : 내부메니폴드,      EM : 외부메니폴드  
ER : 외부개질            IR : 내부개질

중공업 및 KIST가 참여하여 총 47개월 동안 2kW급 연료전지 스택을 개발하여 운전 평가하는 사업으로 1996년 7월 전력연구원내에 개발된 스택을 설치하여 2.5kW의 출력시험 및 2,800시간 이상 장기운전시험에 성공함으로써 이에 대한 기초 기반기술을 확립하였다. 한편 내부 개질형 스택에 대한 개발은 삼성중공업이 1993년부터 시작하여 1996년 2kW급 스택을 개발 운전시험에 성공한 바 있다.

이어 1997년부터 1999년까지 2단계 사업으로 단위전지 대면적화 및 다적층 기술, 시스템 종합 및 운용기술, 고성능 장수명 기술 등을 중심으로 기술개발을 추진하여 1998년 7.6kW 규모의 스택을 5,860시간 운전하였고 이어 전지면적 6,000cm<sup>2</sup>인 단위전지 40장을 적층한 25MW급 MCFC 발전시스템을 제작 설치하여 성공적으로 운전함으로써 상용화에 대한 기반을 확립하였다. 이

들 기술을 바탕으로 2000년부터는 100kW급 MCFC 시스템을 개발할 예정으로 이 사업에는 주관 연구기관으로 한전이 그리고 한국중공업, 한국과학기술연구원(KIST) 및 다수의 대학이 참여하여 공동으로 연구를 수행할 예정이다.

## 4. 100kW급 외부개질형 MCFC 발전 시스템 개발

### 가. 기술개발 배경

현재 국내 발전설비 용량은 4426만kW('99년 6월 현재)이고 장기전원 개발계획에 의하면 2015년에는 약 7900만kW로 증가될 것으로 예상된다. 이러한 발전설비 용량 증가의 대부분은 화석연료를 사용하는 기력발전 설비로 2015년에 이들이 차지하는 비율은 60% 정도가 될 것으로 예측하고 있다. 그러나 이러한 전력수요의 증가는 에너지 수급을 위한 화석연료 확보라는 문제뿐만 아니라 날로 증가되고 있는 지구 환경 문제, 특히 온실효과 원인으로 지적되고 있는 CO<sub>2</sub> 배출량의 총량 규제라는 면에서 전력산업에 있어서 커다란 장애요인으로 대두되고 있어, 이러한 문제를 효율적으로 해결하기 위하여 공해요인이 적고 효율이 높은 새로운 발전방식의 개발필요성이 대두되고 있다.

연료전지 발전은 공해요인이 적고 열효율이 높아 이와 같은 문제점을 해결할 수 있는 새로운 발전방식으로 기대를 모으고 있으며 특히 고온 연료전지인 용융탄산염 연료전지는 화력발전소 대체용 전원으로 더욱 주목을 받고 있다. 즉 MCFC 발전시스템은 앞으로도 계속적으로 이용 가능한 석탄을 자원으로 하는 석탄가스를 이용할 수 있으며 또한 작동온도가 고온이기 때문에 발전효율이 높고 배열을 이용하여 복합발전으로 사용할 수 있다는 점에서 무공해의 대규모 상용 발전플랜트로서 기존의 화석연료를

사용하는 화력발전방식을 대체할 수 있는 발전방식으로 그 보급가능성이 가장 크다. 따라서 선진각국에서는 많은 관심을 가지고 연구개발을 진행하고 있고 최근에는 실용화를 목표로 실계통에 연계된 MW급 Demonstration 플랜트 실증시험을 완료하여 수 년 내로 실 규모 플랜트가 보급될 전망이다.

이와 같은 이유에서 국내에서도 한국전력을 중심으로 하여 MCFC에 대한 기술개발의 필요성을 인식하고 본격적인 기술개발을 진행하고 있다. 그러나 우리 나라는 선진국에 비해 이에 대한 기술개발이 10년 이상 늦게 시작되어 상용 기술수준에 있어서는 커다란 기술적 격차를 보이고 있으며, MCFC 개발사업이 대형 발전시스템 개발사업으로 장기간의 연구개발 기간이 소요되고 대규모 자금을 필요로 하는 첨단 에너지분야 기반사업이라는 특징이 있다. 따라서 자체적으로 실용화 기술을 확보하여 실용화하기 위하여 정부, 산업체 및 학교, 연구소 등의 산학연 협동 연구 체제로 체계적인 연구 및 기술개발을 추진하여야 한다. 이와 같은 배경에 따라 정부에서는 본 사업을 선도 기술개발 사업 중 신에너지 기술개발 사업의 하나로 선정하고 2010년 이내에 MCFC 상용화 기술을 확보한다는 목표로 MW급 발전 플랜트 개발계획을 세워 추진하고 있다.

#### 나. 100kW급 MCFC 개발사업 목표 및 주요 내용

정부 21세기 선도 기술개발사업(일명 G7사업) 중 신에너지 분야 기술개발 사업의 하나로 진행중인 100kW급 외부개질형 용융탄산염 연료전지시스템 개발사업은 한전, 한국중공업(구 삼성), KIST와 다수의 국내대학이 참여하고 있는 대형 국가사업이다. 한전에서는 전력 수요의 급격한 증가에 따른 신규 전원설비 확보의 필요성과 이에 따른 입지난, 전력 Cost 증가 그리고 공해에 따른 지구환경 문제 등에 대한 대응책으로 고효율 무공

해의 새로운 발전방식의 개발 필요성을 인식하고, 그 개발대상으로 연료전지를 선정하였다. 연료전지 발전방식 중에서는 전력사업에의 적용 가능성이 가장 큰 외부개질형 용융탄산염 연료전지 개발을 중장기 개발계획내의 신에너지분야 기술개발사업으로 포함시켜 적극적으로 추진하고 있다.

따라서 본 연구개발사업에 있어서 궁극적인 목표는 기존 기력발전 설비를 대체하기 위하여 석탄가스를 이용하는 용융탄산염 연료전지 복합발전 시스템의 실용화이다. 이와 같은 목표 달성을 위하여 MCFC 발전설비의 실용화 및 국산화 기술개발을 위하여 3단계로 단계별 목표를 설정해 놓고 개발을 진행하고 있다.

즉 작년까지 완료된 1단계 사업에서는 국내에서 진행되어 오던 소형 단위전지의 제작기술을 근간으로 하여 1993년부터 1996년까지 4년 동안 2kW급 용융탄산염 연료전지 Stack을 제작하고 이에 대한 운전시험 및 평가를 통하여 MCFC 스택제작 및 시스템 구성을 위한 기초 기반기술을 확립하였다. 2단계 사업은 1997년부터 2003년까지로 계획되고 있는데 100kW급 MCFC 발전 시스템을 개발운전 평가함으로써 MW급 MCFC 시스템 개발을 위한 상용화 기반기술을 확립하는 것으로 되어 있다. 그리고 마지막 3단계 사업에서는 MCFC 발전시스템 기술의 상용보급 전 단계로 구체적인 방향설정은 2단계 사업이 마무리된 후 국내 기술수준 및 경제성 등을 평가한 후 결정되어야 하겠지만 잠정적으로는 MW급의 Demonstration Plant 시험을 거친 후 2010년경 전력사업용 수십 MW급 석탄가스화 용융탄산염 연료전지 발전시스템의 실용화를 구체화하는 것으로 되어 있다.

이와 같은 중장기 개발계획 내에서 사업 주관은 개발주체인 한전이 총괄적으로 운영하고 있으며 1단계 사업에서 한전은 발전시스템의 설계 및 스택의 장기운전 평가분야를 그리고 본 사업의 핵심기술인 Stack 개발사업은 정부 출연연구소인 KIST가 담당하였고 발전분야 민간 제

조업체인 한국중공업(구 삼성)은 분리판 기술개발 등에 부분적으로 참여하였다. 그러나 2단계 및 3단계 개발사업에서는 상용기술 개발을 목적으로 하고 있기 때문에 역시 한전에서는 기술개발사업을 총괄적으로 주관함과 동시에 시스템 종합 및 운전 평가분야를 담당하고 있으며, 참여 기업인 한국중공업은 1단계 사업기술을 KIST로부터 인수받아 스택의 개발을 주도하도록 되어 있다. 이와 함께 정부출연 연구소 및 대학에서는 고성능, 장수명, 신소재, 재료물성 등 기초 기술분야 개발 등 기술적 우위 확보를 위한 신기술개발분야에 참여하고 있다.

1997년부터 시작된 2단계 연구개발 사업은 다시 2 Phase로 나누어져 있는데 Phase 1에서는 25kW급 시스템을 그리고 중간 평가를 거친 후 Phase 2에서 100kW급 시스템을 개발하는 일정이다. Phase 1에서는 전지면적 6,000cm<sup>2</sup>인 단위전지 40장을 적층한 25kW급 Stack을 제작하여 운전 평가하는 것으로 되어 있다. Phase 2에서는 2002년까지 100kW급 외부개질형 MCFC발전 시스템을 운전 평가할 예정이다. 현재 계획중인 25kW급 MCFC 스택은 전지면적이 6,000cm<sup>2</sup>로 일본이나 미국에서 개발되고 있는 1m<sup>2</sup>급보다는 적지만 용융탄산염 연료전지의 제작을 위한 상용화 기반기술의 확립이라는 점에서는 아주 중요한 단계이다.

#### 다. 25kW MCFC 발전시스템 구성 및 운전평가

2단계 MCFC 개발사업으로 100kW급 규모의 스택

개발 및 실증시험을 통하여 상용화에 필요한 기반기술을 확립하기 위하여 1997년부터 중간과정으로 25kW급 MCFC 시스템 개발을 추진하여 6,000cm<sup>2</sup>급 대형 단위전지를 40단 적층한 25kW급 Stack 제작에 성공하였다. 개발된 스택은 운용기술을 확보하기 위하여 개발된 25kW MCFC 발전 운전시험설비 내에 장착되어 운전 평가되었다. 25kW MCFC 발전시스템은 전체 시스템 효율 제고와 스택 대형화에 따른 냉각을 위하여 가압 및 공기극 리사이클 시스템을 사용하였고 '99년 12월 29일 최초 부하운전 시험을 실시하였다.

#### (1) 25kW MCFC 스택 구성

25kW MCFC 스택에 사용된 구성요소는 단위전지 전극면적이 6,000cm<sup>2</sup> 단위전지를 40단 적층하여 구성하였다. Cathode, Anode, Matrix, 전해질 등은 Tape Casting 방법에 의하여 제작하였고 매트릭스는 강도보강을 위하여 Alumina Fiber를 첨가하여 제작하였다. 제작된 구성요소들의 물리적 성질을 살펴보면 표 3과 같다. 분리판은 단위전지 구성요소의 단순화 및 대량생산을 위하여 프레스형 Shield Slot 형태로, 가스 흐름방향은 병행류 형태로 제작되었다. 분리판 제작은 스텐레스 박판을 이용하여 Anode 쪽에 Ni 도금을 실시하였고, Wet-seal 부에 Al 코팅을 실시하여 부식방지를 도모하였다. 스택 적층은 Shield Slot 형태 분리판에 Anode를 장착한 후, 그 위에 전해질 Matrix를 놓고, Cathode가 장착된 분리

〈표 3〉 Specification of 25kW MCFC Stack Components

구 분	Matrix	Electrolyte	Anode	Cathode	Separator
Material	LiAlO <sub>2</sub>	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Ni+10%Cr	NiO	SUS 316L
Fabrication Method (cm x cm)	Tape casting 120 x 80	Tape casting 120 x 80	Tape casting 110 x 55	Tape casting 110 x 55	Press shield slot 120 x 810
Thickness(mm)	0.2~0.4	0.3~0.4	0.75	0.65	5
Porosity(%)/ Pore Size(μm)	55/0.25	—	65/3-4	80/7-10	—



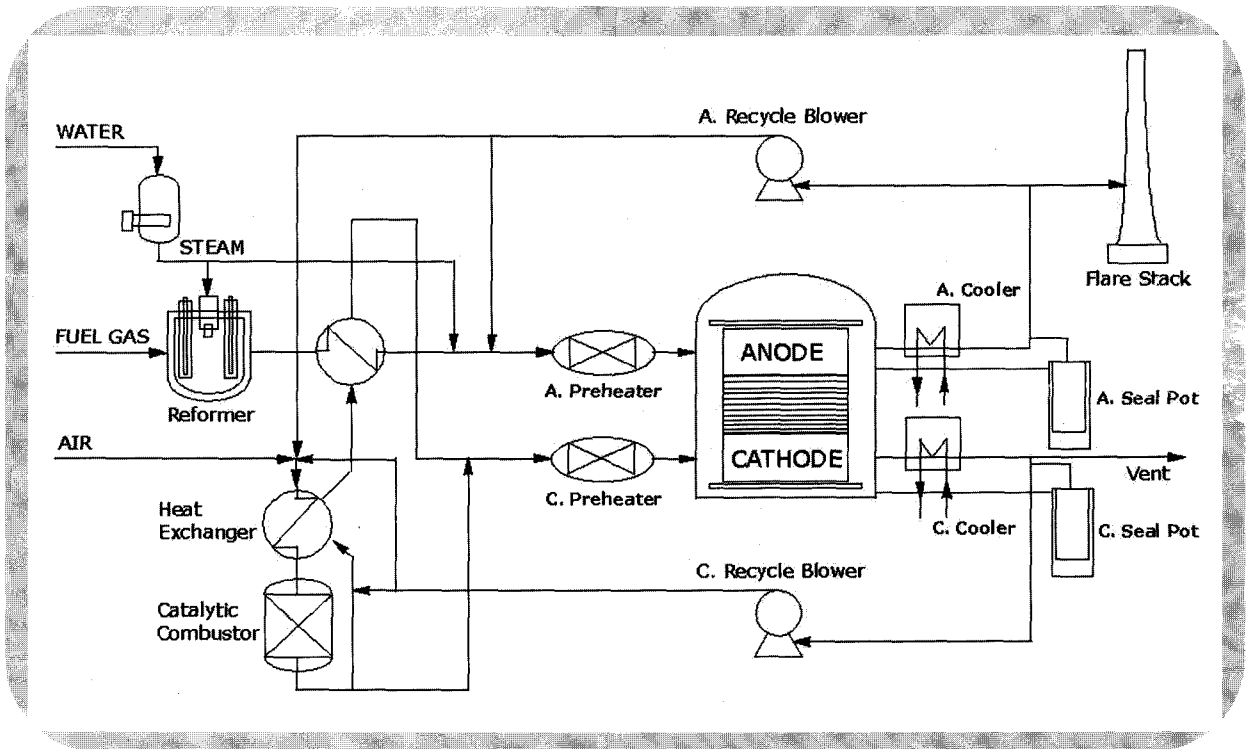
판이 그 위에 위치하도록 하여 단위전지를 구성하였고 이들 단위전지를 중간 가스공급 매니폴드를 중심으로 상·하 20장씩 수직으로 쌓아 적층하였다.

(2) 25kW MCFC 시스템 설계 및 제작

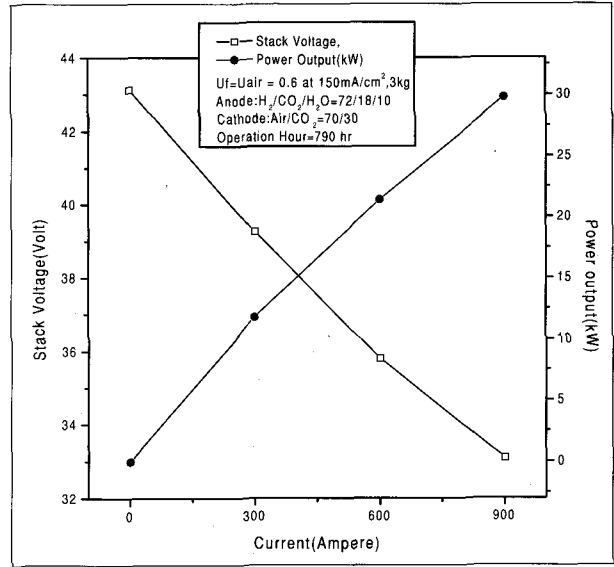
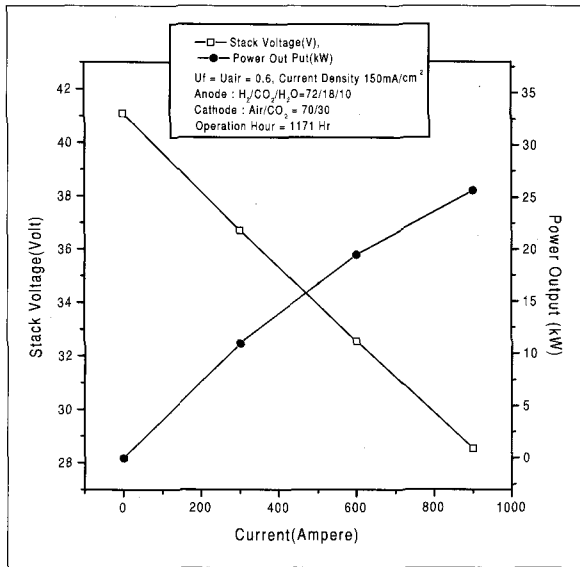
25kW급 외부 개질형 MCFC 스택의 성능 및 장기운전에 대비하기 위한 시스템을 설계하고 그 시스템 내에 구성요소들을 제작하였다. 플랜트의 일반적인 개념도를 그림 4에서 보여주고 있다. 연료가스는 천연가스를 이용하여 개질기에서 개질하여 연료 예열기에서 승온한 후 연료전지 연료극으로 공급된다. 산화제로 있는 공기는 압축기로부터 공급되며 연료극 배가스가 촉매 연소기에서 산화되어 만들어진 탄산가스와 혼합된 후 가스 예열기를 거

쳐 공기극으로 공급된다.

본 설비는 산화제 가스 리사이클을 통하여 스택을 냉각하는 방식이며 이를 위하여 리사이클용 송풍기와 냉각기가 사용된다. 스택은 가압 운전과 절연 및 외부 단절을 위하여 압력용기 내에 수납되었고 양극간의 차압 조절을 위하여 질소가스를 공급하여 일정압력으로 조절하였다. 반응된 연료전지 연료극 배가스는 촉매 연소기를 통과하여 완전 연소하여 공기극에 이산화탄소를 공급하며 잔여가스는 Flare 스택에서 완전 연소된 후 배출된다. 본 시스템에는 전기/계측 제어 및 감시장치를 설치하여 신속하고 정확한 데이터 처리를 도모하였고 아울러 운전에 필요한 가스의 분석을 위하여 가스분석장치도 설치하였다.



〈그림 4〉 25kW급 MCFC 발전시스템 개념도



〈그림 5〉 25kW MCFC 스택의 상압 및 가압시 단위전지 전압 분포

본 설비는 1998년 10월 9일 건설에 착수하여 '99년 9월 완성하였고 이때부터 본격적인 시운전 및 PAC (Process and Control) 시험에 착수한 후 '99년 11월 25kW 스택을 적층하여 설치하고 본격적인 운전시험에 들어갔다.

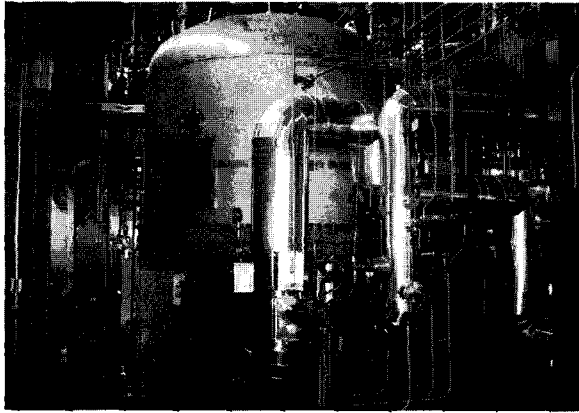
### (3) MCFC 스택 운전특성

스택은 초기 상압 상태에서 정 출력 운전특성을 확인한 후 가압 운전 특성시험을 실시하였다. 상압 및 가압 운전 특성 시험에서는 정격부하 및 부분 부하운전을 실시하였고 또한 가압 상태에서 시스템의 안정적인 운용상태를 점검하였다. 25kW급 MCFC 시스템 운전조건은 연료 이용률 및 공기 이용률이 60% 상태에서 상압 및 가압 상태에서 특성 시험을 실시하였다.

상압 및 가압 상태에서 전류밀도 150mA/cm<sup>2</sup>(900A 부하)에서 스택의 전류-전압 관계를 그림 5에 나타내었다. 승운을 시작하여 790시간 경과한 후 측정된 개회로 (무부하) 전압은 42.17V, 단위전지 평균 개회로 전압이

1.057V/cell을 보여주었다. 이와 같이 개회로 전압이 낮은 이유는 전지 면적증대에 따라 내부 온도분포가 균일하지 않기 때문인 것으로 생각된다. 한편 150mA/cm<sup>2</sup> (900A)에서 스택 전압은 31.28V(단위전지 평균 0.782V)로 28.15kW의 출력을 보여주었다. 가압 3기압 상태에서 가운을 시작하여 1,100시간 경과한 후 측정된 개회로(무부하) 전압은 41.09V(단위전지 평균 1.027V)를 보여주었으며 부분부하 특성에서 50mA/cm<sup>2</sup>(300A)에서는 35.88V(0.897V/cell), 100mA/cm<sup>2</sup>(600A)에서는 32.55V(0.813V/cell)를 보여주었고 정격 부하인 150mA/cm<sup>2</sup>(900A)에서 전압은 28.53V로 25.68kW의 출력을 나타내어 설계된 성능을 충분히 보여 주었다. 그러나 800시간 운전 후 연료 예열기 수리시 발생한 압력 변동에 따라 스택 내 단위전지가 영향을 받아 스택 전체 전압이 저하되어 예정된 장기간의 운전에는 성공하지 못하였다(그림 6 참조).

이와 같은 결과로 스택제작 및 운전에 관한 기본 기술을 확립하였으나 목표로 하는 대형 스택 신뢰성 확보를



〈그림 6〉 25kW MCFC 스택의 운전모습

위하여 구성요소의 고성능화, 장수명화 외에도 주변기기의 고 신뢰성을 확보하는데 더욱 노력할 필요가 있는 것으로 생각된다.

## 5. 국내 MCFC 기술개발 전망

MCFC 기술은 기술이 실용화되는 경우 발전설비 분야에서 기력 발전설비를 대체할 수 있고 지구 환경적인 면에서 그 부가가치 및 부수 효과가 아주 큰 발전방식이다. 기술개발 측면에서 본다면 실용화까지 많은 개발분야가 필요하며, 또한 많은 자금과 장기간이 소요된다는 특징을 가지고 있다. 이러한 이유로 국가적으로 에너지 분야 기반기술로서 전략적 개발 필요성이 있는 기술이다. 국내 MCFC 개발은 이러한 바탕에서 우선 그 기반이 되는 기초 기반기술 확보 및 상용 기반기술 확보를 목표로 하여 1992년부터 선도기술개발 사업내 신에너지 기술개발 사업으로 연구개발을 수행하여 오고 있다. 이와 같은 기술개발 전략에 따라 100kW급 MCFC 발전시스템 개발을 통하여 상용화 기반기술을 확립하는 것을 중간 목표로 25kW급 MCFC 발전시스템을 개발하여 성공적으로 운전 평가함으로써 상용화를 위한 기초기반

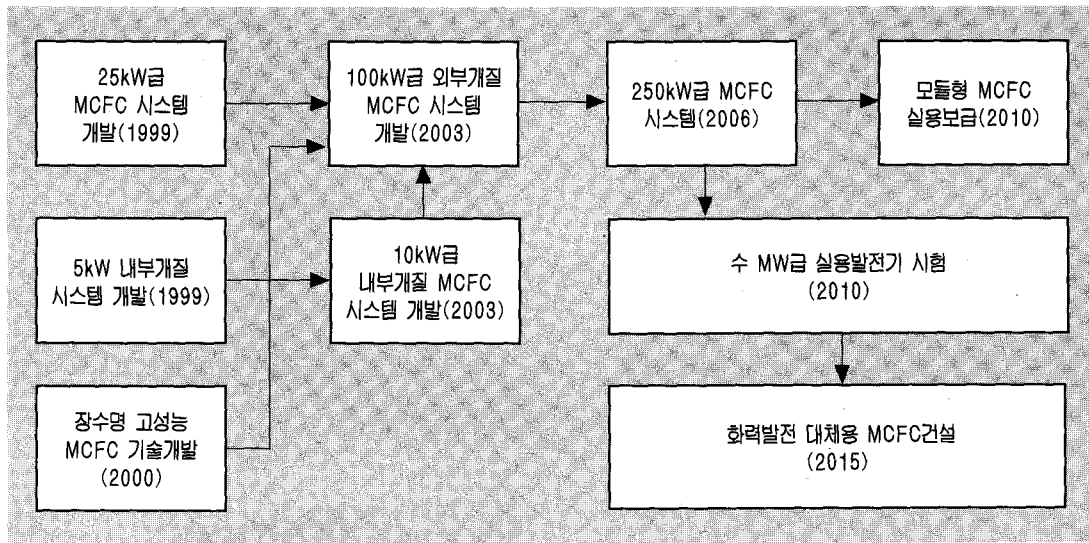
을 마련하였다.

국내 MCFC 발전시스템의 상용화 및 실용화를 목적으로 한다면 그 최종 목표는 중앙 집중형태 석탄가스화 복합발전 시스템 구성 및 보급이고, 이를 위하여 기술경쟁력 및 경제성을 갖는 스택 및 주변기기의 개발 능력을 갖추게 된다면 수백MW 규모의 화력발전 대체용 MCFC 발전설비가 2015년 이후에 실용화 될 것으로 예측된다. 이와 같은 실용화 단계에 이르기 위하여 중간 단계로 수MW급 실용발전기의 실증시험을 필요로 하며 이를 위하여는 많은 투자비와 시간을 필요로 하게 된다.

따라서 보다 빠른 초기 상용화 및 실용화를 위하여 초기시장 형성이 용이한 250kW 규모의 시장 진입형 모듈 형태 열병합 발전설비를 중간 진입 형태로 개발하여 열병합 발전설비로 개발 보급을 유도하고, 이를 바탕으로 대규모 화력발전을 겨냥한 MW급 발전설비의 실증시험을 거친 후 최종적으로 화력발전 대체용 MCFC 발전시스템 실용화를 도모할 수 있을 것으로 예측된다. 그림 7에 MCFC 발전시스템의 실용화를 위한 개발 흐름도를 나타내었다.

## 6. 결론

MCFC 발전기술은 그 기술이 가지고 있는 장점으로 인하여 앞으로 발전설비 분야에서 기력 발전설비를 대체할 수 있다고 생각되며 이에 따라 이를 실용화하여 보급하기 위해서는 MCFC가 가지고 있는 기술적, 경제적인 검토를 통하여 정확한 MCFC 기술개발 계획이 필요하다. 또한 MCFC 실용화를 위해서는 기술적으로 고성능화 장수명화를 도모함과 함께 시장 진입을 위하여 저 비용화가 필요하며 이를 통하여 보급 실용을 촉진하기 위한 시장 진입형 모듈형태의 발전설비 개발이 요구되며 이에 따른 구체적인 기술개발목표 및 기술개발 일정이 필요할 것으로 생각된다.



(그림 7) 국내 MCFC 기술 개발 진행도

현재 국내 MCFC 개발사업은 적절한 기술개발 계획에 따라 산·학·연 연구협동 체제로 효율적인 연구를 수행하여 25kW급 MCFC 시스템 개발 및 운전실험을 통한 MCFC 기초 기반기술을 확립하였고 일부 기초기술 분야에서 국제적인 기술 경쟁력을 확보한 것으로 판단된다. 그러나 이와 같은 기술개발 성과가 상용화 기술로 이어지려면, 적절한 기술개발 계획 및 전략, 정부 및 기업의 적

극적인 개발의지 및 지원에 크게 좌우된다고 판단된다. 따라서 MCFC 기술개발의 효율적 추진을 위한 개발전략 및 이의 적극적인 실행이 더욱더 요구되는 시점이라고 생각되며 이를 위하여 새로 시작되는 프로그램이 효과적으로 이루어질 수 있도록 지속적인 정부의 지원 및 산·학·연의 관련 연구진들의 분발이 필요할 것으로 생각된다.

[참고문헌]

1. L. J. M. J. Blomen, M. N. Mugerwa, "Fuel Cell Systems", Plenum Press, New York and London, 1993
2. K. Kinoshita, F.R.McLarnon, E. J. Cairns, "Fuel Cells, A Handbook"(Revision 3), DOE/METC-88/6096, U. S. DOE, 1995.
3. 임태훈, 임희천, 홍성안, "용융탄산염 연료전지 기술 개발 현황 및 전망", 화학공업과 기술, Vol 16, No. 6, (1998. 10)
4. 임희천 외, "100kW급 외부개질형 MCFC 시스템 개발(1단계 25kW급) 중간보고서", 한전 전력연구원 보고서 TM. 97TJ38.M1999.20 (1999)
5. 임희천 외, "국내 용융탄산염형 연료전지 개발 연구기획", 한전 전력연구원 보고서, TC.00ES02.P2000.111 (2000)
6. 임희천 외, "100kW급 외부개질형 용융탄산염 연료전지 시스템 개발(1단계 25kW급) 최종보고서", 전력연구원 보고서 TR.97TJ38.J2000. 20. (2000)