

## 21세기의 새로운 에너지기술 : 연료전지

최수현

한국에너지기술연구소, 에너지절약연구센터  
(1992년 11월 23일 접수)

### New Energy Technology for the 21st Century: Fuel Cells

Soo-Hyun Choi

Energy Conservation Research Center, Korea Institute of Energy Research  
(Received November 23, 1992)

#### 1. 서론

현대사회의 주 에너지원인 석유의 고갈이 예고되면서 세계가 당면하고 있는 공통적인 에너지문제는 한정된 에너지의 효율적인 이용과 석유 대체에너지의 개발 그리고 화석에너지 사용에 따른 지구환경의 파괴를 방지하는 것으로 요약된다.

연료전지(燃料電池)는 이러한 문제들을 해결해 줄 수 있는 새로운 에너지기술일 뿐만 아니라 우주항공, 자동차, 해양분야 및 국방산업 등에 다양하게 응용될 수 있는 혁신적인 기술이다. 에너지기술로서의 연료전지는 한정된 화석연료를 매우 효율적으로 사용할 수 있는 에너지절약형 기술이자 공해 발생요인이 극히 적은 깨끗한 에너지기술이라는 점에서 대단히 매력적이며 앞으로의 광범위한 사용을 쉽게 전망할 수 있다.

연료전지는 사용하는 연료의 화학에너지를 전기화학반응에 의해 전기에너지로 직접 바꾸어 주는 매우 효율적인 에너지변환장치이다. 일반 전지(battery)가 한정된 에너지를 저장하는 장치인 반면에 연료전지(fuel cell)는 연료와 산화제를 공급하는 한 지속적으로 전기를 생산하는 새로운 개념의 발전기(發電機)이다.

연료전지의 기본원리는 오래 전부터 알려진 바 있

으나 수소를 사용한 최초의 연료전지는 1839년에 W. R. Grove에 의해 실험된 바 있으며 1950년대에 Bacon cell이라 불리우는 기초적인 연료전지가 제작되어 실험된 바 있으나[1] 실용화되지는 못하였다. 연료전지가 실질적으로 사용된 것은 1960년대 초부터 미국의 유인우주선에 탑재된 것이 처음이며, 우주선에 이용된 연료전지기술을 대규모 에너지기술로 전환시키기 위한 연구는 1967년부터 미국의 가스회사들이 가스의 판매확대를 목적으로 연구개발비를 적극 지원하면서 본격적으로 시작되었다.

미국, 일본과 같은 기술선진국의 적극적인 개발결과로 현재의 기술수준은 인산(磷酸) 연료전지의 경우 전기출력 50-200kW급이 제한적으로 주문판매되고 있으며 전력사업용으로는 11MW 발전소가 시험가동중에 있다[2-4]. 또한 시내버스와 같은 차량의 동력원으로서의 기술개발도 적극 추진되고 있으며 각종 재료기술의 발전에 따라 교체전해질 또는 고분자막을 사용하는 차세대 연료전지에 대한 연구개발도 지속적으로 추진되고 있다.

이와같이 연료전지기술은 막연한 미래의 기술이 아니라 '90년대 후반부터는 부분적으로 실용화되면서 21세기의 주요 에너지기술로 다양하게 이용될 첨단 기술이다. 특히, 에너지 사용면에서 석유의존도가 높고 필요한 에너지의 90% 이상을 수입하는 우리나라

의 경우 연료전지와 같은 기술은 매우 유망시되며 최근에는 연구소, 대학, 산업체, 전력회사, 가스회사 및 정부에서의 관심이 많아지고 있으며 기술개발에 대한 연구인력도 급격히 확대되고 있다.

## 2. 연료전지의 종류와 발전(發電)설비 구성

### 2.1. 연료전지의 종류

다양한 종류의 연료전지가 개발되고 있으나 일반적으로 이온(ion) 전도체인 전해질의 종류에 따라 표 1에 보여진 바와 같이 알카리 연료전지, 인산 연료전지, 용융탄산염 연료전지, 고체전해질 연료전지 및 고분자전해질 연료전지의 5종류로 구분되며 종류에 따라 작동온도와 특성이 각각 다르다.

알카리 연료전지는 특수분야에서 이미 이용중인 기술이지만 순수 수소와 산소를 사용하기 때문에 높은 전류밀도를 얻을 수 있는 장점은 있으나 가격이 비싼 단점으로 일반 에너지기술로서의 경쟁력은 없다. 기술적으로 실용화 단계에 있는 인산(磷酸)연료전지는 반응열을 회수하여 건물의 난방용등에 사용할 수 있으며 '90년대 중후반부터 우리 생활주변에 다양하게 사용될 것으로 전망된다. 고온(高溫)에서 작동되는 용융탄산염 및 고체전해질 연료전지는 기술적으로 개발단계에 있으며 높은 온도의 반응열을 이용한 증기터빈과의 복합발전도 가능하다.

### 2.2. 발전(發電)원리와 기본 구조

연료전지의 기본구조는 다공질의 두 개의 전극 사이에 이온(ion) 전도성을 갖는 전해질이 들어 있으며, 전극과 전해질의 접촉면에서 이루어지는 전기화학반응에 의해 발생하는 전자(e<sup>-</sup>)가 외부회로를 통해 흐르면서 발전이 이루어진다. 이러한 기본단위를 단위전지(single cell)라고 부르며 연료전지 종류별로 단위전지가 전기를 발생시키는 개념은 그림 1에 요약된 바와 같다.

단위전지의 표준기전력(E)은 전지내 전기화학반응에서의 Gibbs의 자유에너지변화(ΔG), 전자수(n) 및 Faraday 상수(F)에 의해  $E = -\Delta G/nF$ 로 주어진다. 수소/산소 연료전지의 경우 단위전지당 이론적 기전력은 1.23볼트(V)이나 실제 발전에서는 외부회로와 연결시 0.6-0.7V에서 200-300mA/cm<sup>2</sup>의 전류밀도를 얻는다.

연료전지 종류에 따른 상세한 발전이론은 이미 여러 문헌상에서 자세하게 설명되고 있으며[5] 본 총설에서도 연료전지 종류별로 별도 소개되기 때문에 여기서는 생략한다.

### 2.3. 연료전지발전설비 구성

직류로 발전하는 연료전지는 필요에 따라 다양하게 응용될 수 있으며 사용목적에 따라 적정의 부대 설비

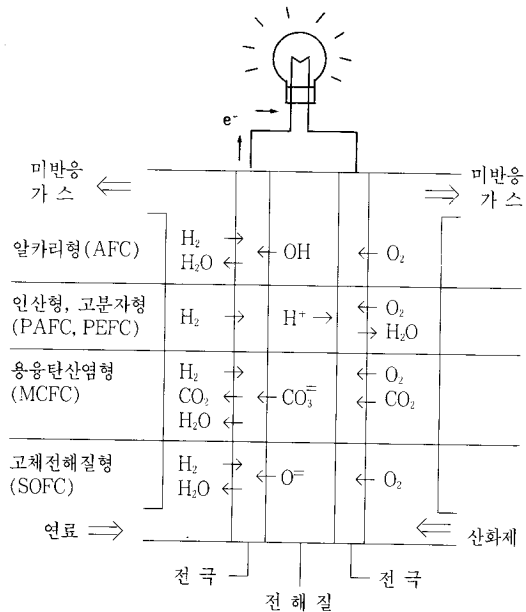


그림 1. 연료전지의 종류별 전기화학반응[6].

표 1. 연료전지의 종류 및 기술수준

종 류	전 해 질	작동온도	주요 연료	기술수준	용 도
알카리형(AFC)	KOH	~100℃	순수 수소	사용중	우주, 해양
인산형(PAFC)	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	~200℃	천연가스, 메탄올 등	실용화단계	전기사업, 수송용
용융탄산염형(MCFC)	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	~650℃	석탄가스, 천연가스	개발단계	전기사업(대용량)
고체전해질형(SOFC)	ZrO <sub>2</sub> · Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	~1000℃	석탄가스, 천연가스	연구단계	전기사업(대용량)
고분자형(PEFC)	고분자막	~80℃	천연가스, 메탄올 등	연구단계	전기사업, 수송용

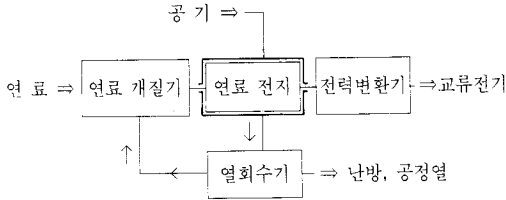


그림 2. 연료전지 발전설비의 주요 구성.

들이 필요하다. 대표적인 예로서, 저렴한 가격의 탄화수소계열의 연료를 사용하여 일반 사용자가 필요한 교류전기를 공급하기 위한 발전시스템으로서의 기본 구성은 그림 2에 보여진 바와 같다.

○ 연료개질기 : 도시가스, 나프타, 메탄올과 같은 다양한 종류의 탄화수소계열의 연료를 수소성분이 많이 포함된 가스로 전환시켜 연료전지 본체로 공급한다. 일반적으로 수증기반응(steam reforming)을 이용한 별도의 개질기가 사용되나 고온에서 발전되는 연료전지의 경우 연료전지 내부에서 연료를 개질시키는 기술도 개발되고 있다.

○ 연료전지 본체 : 개질기에서 공급된 연료와 산화제로서 공기(공기중의 산소)를 이용하여 직류전기를 발전하는 핵심장치이다. 그림 1과 같은 단위전지를 수십 내지는 수 백장씩 직렬로 적층하여 제작한 스택(stack)이라 불리는 적정 출력의 발전기를 필요 용량에 따라 여러개 연결하여 구성한다.

○ 전력변환기 : 본체에서 발전된 직류전기를 사용자가 필요로 하는 적정 전압, 위상과 주파수의 교류전력으로 변환시켜 공급하는 기능을 갖으며, 필요에 따라 발전설비의 최적 운전 및 부하추종을 포함한 각종 제어기능을 수행한다.

○ 열회수기 : 발전과정에서의 반응열을 회수하여 연료개질기에 필요한 열을 공급하며 필요에 따라 난방 또는 공정열 등에 사용한다. 일반적인 열병합발전의 기능 뿐만 아니라 고온 연료전지의 경우는 회수된 열을 이용한 복합발전도 가능하다.

### 3. 기술의 특성 및 응용분야

#### 3.1. 기술의 특성

전기화학적 반응에 의해 발전되는 연료전지는 연료의 연소과정이나 터빈 회전과 같은 기계적 운동이 없기 때문에 표 2에 요약된 바와 같이 발전효율이 매우 높고 환경공해 발생요인이 거의 없다는 뚜렷한

표 2. 화력발전과 연료전지발전의 특성비교[7]

	화력발전	연료전지
발전 효율	38-42%	50-60%
공해 배출	NOx, SOx, 분진	거의 없음
발전소 위치	원격지역	도심지

특성을 갖고며 이외에도 전력기술로서의 필요한 여러 가지 장점을 갖고 있다.

○ 효율특성 : 실질적으로 50%를 상회하는 발전효율을 얻을 수 있기 때문에 발전부문에서의 대규모 에너지절약이 가능함.

○ 환경특성 : 환경오염의 주 원인이 되는 NOx, SOx 및 분진의 발생이 기존 화력에 비하여 무시할 정도이며 터빈 등에 의한 소음발생 요인이 없으므로 실내 설치도 가능함.

○ 에너지 이용특성 : 반응열을 이용하여 열과 전기를 동시에 공급하는 열병합발전 또는 복합발전에 의해 에너지의 종합 이용효율을 90%선으로 향상시킬 수 있음.

○ 기타특성 : 전력기술로서 필수 요건인 발전설비의 기동정지가 용이하고 부하추종성도 매우 양호하며 설비 용량규모 또는 부하율에 관계없이 비교적 일정한 효율로 발전함. 대용량 발전소의 경우 건설면적이 상대적으로 적으며 모듈화된 대량생산으로 단기간 건설이 가능함.

#### 3.2. 다양한 응용분야

연료전지의 기술적 특징과 다양한 장점은 우주산업, 전력산업, 교통산업을 포함한 여러 분야에서 이용될 것으로 전망된다.

##### (1) 현지설치 열병합발전

공해발생이 없는 깨끗한 에너지기술인 연료전지는 건물 내부 또는 수요처 부근에 건설되어 전기와 열을 동시에 공급하게 되는 매우 흥미있는 이용분야이다. PAFC가 가장 먼저 보편적으로 사용될 것이며 기술 개발에 따라 SOFC와 산업용의 경우 MCFC의 이용도 전망된다. 일본과 미국에서는 건물용의 50kW, 200kW급 PAFC발전설비가 경제성면에서는 아직 미흡하나 시험적으로 주문 판매되고 있다.

##### (2) 전기사업용 발전소

전력수요가 집중된 지역에 전기출력 5-25MW 급

으로 분산 건설되어 경제적으로 전력을 공급하며 PAFC, MCFC, SOFC가 주로 이용될 수 있다. 궁극적으로 화력발전소를 대체할 수 있는 대형발전소(500-1000MW 규모)로의 기여는 MCFC 및 SOFC가 석탄가스를 연료로 사용하고 증기터빈과의 복합발전기술로서 이용될 전망이다. 분산전원용으로는 11MW급 PAFC발전소가 일본에서 시험가동중에 있다.

### (3) 수송수단

무공해의 장점으로 실내 작업용 지게차 또는 도심지에서 운행되는 버스의 동력원으로 사용될 수 있으며 현재는 PAFC를 사용하여 개발하고 있으나 기술향상에 따라 PEFC가 주로 사용될 전망이다. 잠수정의 동력원도 AFC 또는 PEFC의 이용분야중의 하나이다.

### (4) 우주선 및 기타분야

유인 우주선의 동력과 식수공급용으로 AFC, PEFC가 사용(1-10kW급)되며 소용량의 군용 발전기등 다양한 분야에 응용될 수 있다.

## 3.3. 경제성 및 실용화 전망

에너지기술로서의 연료전지는 아직은 많은 연구개발비가 투입되는 개발단계이므로 경제성을 판단하기에는 어려움이 있으나 제한적으로 시제품이 생산되기 시작한 인산연료전지의 경우 단위용량당의 설치비용이 표 3에서 보는 것과 같이 매우 빠르게 감소하고 있다.

인산연료전지(PAFC)를 중심으로한 기술개발의 진전에 따라 연료전지의 실용화 전망은 매우 유망한 것으로 판단되며 '90년대 중후반부터는 우리 주변에 부분적으로 사용될 것으로 전망된다. 특히, 자국의

표 3. 연료전지 설치비(\$/kW)[7]

년 도	미 국	일 본
'80년대 초기	10,000	-
1990년	2,500	20,000('89)
1992년	-	7,000
1995년	1,500	2,400
상용화 목표	1,000-1,400	1,500-2,000

주: 1. 환산기준: \$1=120엔

2. 설치비는 미국은 200kW급, 일본은 50kW급 기준

3. 상용화목표는 대용량 기준임

열악한 에너지여건의 개선과 21세기 주요 에너지기술의 확보를 전략으로 집중 개발하고 있는 일본의 경우 통산성 장기에너지 수요전망에 의하면 일본에서의 연료전지발전설비의 이용은 2000년까지 총 2,250MW 규모(현지설치 열병합발전용 1,200MW, 분산전원용 1,050MW) 그리고 2010년에는 약 11,000MW의 총 설비용량이 전망되고 있다.

## 4. 외국의 기술개발 현황과 전망

### 4.1. 미국의 기술현황

#### (1) 연구개발 배경

1960년대초 미국의 유인우주선에 연료전지가 사용된 이후 일반 에너지기술로서의 연료전지에 대한 기술개발은 1967년에 28개의 가스회사(미국 27, 캐나다 1)가 가스연료의 판매확대를 목적으로 TARGET (Team to Advanced Research for Gas Energy Transformation)을 구성하면서 본격화되었다. UTC의 기술로 기초연구(4년), 현장실험(3년)과 제품화 연구(3년)의 3단계로 1976년까지 추진된 이 계획에서는 전기출력 12.5kW의 시제품이 최초로 개발되어 시험되므로서 연료전지의 우수한 에너지절약 효과와 환경특성을 입증하였다.

#### (2) 개발 체계

에너지기술로의 이용분야는 에너지성(DOE)과 민간주도의 전력연구소(EPRI)와 가스연구소(GRI)가 협력 또는 독자적으로 연구비를 지원하며, 기술개발은 대부분 기업이 주도하고 있다. 여러 전력회사 출연에 의한 EPRI는 전기사업용 연료전지의 개발과 실용화에 주력하며 GRI는 현지설치형 열병합발전기술의 상용화에 많은 지원을 하고 있다. 우주 또는 군사용은 알카리연료전지(AFC)와 고분자전해질연료전지(PEFC)를 대상으로 항공우주국(NASA)과 국방성(DOD)에서 지원하고 있으며 예산 규모는 표 4와 같다.

미국에서의 기술개발은 다양한 체계에서 효율적인 협조하에 이루어지고 있다. 기술개발 초기에는 인산연료전지는 NASA-Lewis센터, 용융탄산염 연료전지는 Argonne 국립연구소(ANL)가 주관하였으며 기업으로의 기술이전이 이루어지면서 현재는 우주 및 군사용을 제외한 국가주도 에너지분야 응용연구는 에너지성 산하의 Morgantown 에너지기술센터(ME-

표 4. 미국의 연료전지 연구개발비 규모(1990)

지원 기관	기술 분야	예산 (백만달러)
에너지성(DOE)	PAFC, MCFC, SOFC, PEFC	43.6
국방성(DOD)	AFC, PEFC	5.7
항공우주국(NASA)		1.0
전력연구소(EPRI)	PAFC, MCFC, SOFC	3.5
가스연구소(GRI)	PAFC, MCFC, SOFC	2.8
	총 계	56.6

자료 : Fuel Cell Program of DOE, GRI and EPRI, 1990

TC)가 총괄하며 EPRI, GRI가 각각의 프로그램을 관리하고 있다.

### (3) 기술 동향

인산연료전지(PAFC)는 과거 20여년간의 집중적 연구개발로 실용화단계이다. 12.5kW(PC-11) 개발에 이어 DOE와 GRI가 총 5,600만 달러의 개발비로 49기의 40kW 열병합발전기(PC-18)를 제작하여 시험한 바 있으며, 최근에는 IFC(미국 UTC와 일본 Toshiba의 합작회사)에서 전기출력 200kW 발전기(PC-25)를 건물의 열병합발전용으로 개발하여 주문 판매하고 있다.

전기사업용으로는 UTC(현 IFC) 기술로 교류출력 1MW와 4.5MW 발전소가 시험된 바 있으며 현재는 IFC에서 분산전원용으로 개발한 11MW 발전소(PC-20)가 일본 동경전력에 건설되어 신뢰도 실증을 위한 시험가동중에 있다(특성: 표 5 참조). 1993년까지 시험가동될 11MW 발전소가 기술적으로 성공할 경우 연료전지발전소의 실용화가 매우 빠르게 촉진될 것으로 전망된다.

수송용으로는 PAFC는 지게차가 Engelhard 기술로 개발 시험된 바 있으며 현재는 에너지성과 교통성 공동으로 ERC등이 참여하여 메탄올을 연료로 사용하는 PAFC와 축전지의 hybrid형 시내버스가 개발중에 있다.

IFC와 Westinghouse(ERC의 스택기술 사용)가 주도하는 PAFC는 전류밀도를 현재의 300mA/cm<sup>2</sup> 수준에서 더욱 향상시키고 40,000시간 이상의 연속운전이 가능하기 위한 연구가 계속되고 있으며 가격을 낮추기 위한 압축기를 포함한 각종 발전설비 구성품의 최적화에 대한 노력이 집중되고 있다.

표 5. 인산 연료전지(PAFC)의 최근 기술수준

	FP-50	PC-25	PC-20
정격 출력	50 kW	200 kW	11 MW
송전단 발전효율 (HHV)	36%	36%	41.1%
연료	도시가스	도시가스	천연가스
전극 면적	2,000cm <sup>2</sup>	4,000cm <sup>2</sup>	1m <sup>2</sup>
전류 밀도(mA/cm <sup>2</sup> )	~240	~300	~200
에너지 공급	전기, 열	전기, 열	전기
스택기술 개발국 (회사)	일본(Fuji)	미국(IFC)	미국(IFC)

주 : 송전단 발전효율은 설계치 기준임

용융탄산염연료전지(MCFC)는 IFC, ERC 및 M-C Power 회사가 주도하여 개발하고 있으며 실용화를 위한 기술수준은 전극면적이 일본의 1m<sup>2</sup>에 비해 0.4m<sup>2</sup> 수준에 있다. 5kW급 스택이 IFC(석탄가스 연료)와 ERC(천연가스 연료)에 의해 5,000시간 이상 시험된 바 있으며 ERC의 경우 56%의 효율을 얻은 바 있다 [8]. 또한 IFC의 25kW스택 개발과 함께 ERC에서 2kW 스택으로 10,000시간 시험한 경험으로 18kW 스택과 70kW 스택을 개발하였으며 1992년에 전극 면적을 0.6m<sup>2</sup>로 확대하여 120kW급 스택을 개발할 계획에 있다[9].

작동온도가 높은 MCFC의 특성을 이용한 내부개질형 연료전지가 M-C Power/IGT에 의해 시험된 바 있고 현재의 전반적인 기술수준은 ERC, IFC 기술에 의한 20kW-120kW급 스택 개발수준에 있다. 발전설비로서의 개발은 최근 ERC가 1993년까지 2MW급 발전소의 건설을 목표로 하고 있으며 '90년대 후반에 100MW급 상용화도 계획되어 있다. 전반적으로는 MCFC도 상용화를 위한 기술의 실증단계에 근접하고 있으나, 아직도 재료의 부식, 전극면적의 확대와 적층기술 등 실용화를 위한 기본적인 문제에 대한 연구 개발이 수행되어야 한다.

고체전해질연료전지(SOFC)는 전극재료 및 전극기술 개발과 소용량의 스택 및 시스템개발 단계에 있으며 Westinghouse, ABB 등의 기업과 국립연구기관과 대학에서 연구개발되고 있다. Westinghouse에 의해 개발된 원통형(tubular type)의 25kW급 스택은 최근 전류밀도 250mA/cm<sup>2</sup>의 수준에서 20,000시간 운전 성공한 바 있으며 [9], 전기출력 25kW급 시험용 발전기가 개발되어 일본에서 시험되고 있다.

이외에도 Ceramtec, Ztek 등에서 평판형(Planar type)을, ANL/Allied Signal, ABB 등에서 일체형(Monolithic type) SOFC를 개발하고 있으나 기술수준은 아직 기초연구단계이다.

4.2. 일본의 기술 현황

(1) 연구개발 배경

일본의 경우는 열악한 에너지여건과 악화되는 대도시지역의 전력공급 문제를 해결하기 위한 내적인 필요성과 함께 차세대 새로운 에너지기술의 선점이라는 국가정책적인 면에서 연료전지 개발에 전략적으로 과감한 투자를 하고 있다. 기술개발은 자체 연구개발과 미국 기술의 도입을 병행하여 추진하고 있으며 정부를 포함하여 민간 전력회사 및 가스회사가 기술개발을 적극 지원하고 있다. 현재의 기술수준은 미국에 비해 다소 떨어지나 실용화면에서는 오히려 앞서가는 추세이다.

(2) 개발 체계

'60년대부터 대학, 국가연구소 및 기업에서 연구가 추진되었으며, 1970년대 초기에 가스회사들의 미국 연료전지개발계획에의 참여로 PAFC에 대한 연구와 통산성 산하의 공업기술원 주도의 Sunshine계획으로 AFC와 SOFC에 대한 기반연구가 수행된 바 있다. 본격적인 연구개발은 1981년에 연료전지를 포함한 대형 에너지절약기술의 실용화개발을 목적으로 공업

기술원이 주도한 Moonlight 계획이 추진되면서 시작되었다.

실용화를 위한 기술개발은 정부주도하에 전략적으로 추진하고 있으며 Moonlight 계획에 의한 연료전지개발은 공업기술원 주도하에 NEDO에서 기술개발을 관리하고 있다. MCFC의 재료개발과 평가를 포함하여 SOFC의 재료 및 요소연구 등 실용화 이전의 개발단계 기술들은 공업기술원 직접관리하에 국가 연구기관에서 수행하기도 한다. NEDO 주관의 기업주도 개발은 대상기술을 세분하여 여러 기업(東芝, 富士, 日立, 三菱, IHI 등)이 참여하여 경쟁적으로 개발하도록 하며 여러 전력회사와 가스회사들도 실용화 추진을 위한 별도의 기술개발계획을 추진하고 있다.

(3) 기술 동향

Moonlight계획에서 연료전지기술개발에는 일본 정부가 매년 30-40억엔 규모의 기술개발비를 투입하고 있으며 표 6에 보여진 바와 같이 과거 10여년간은 PAFC의 실용화를 위한 집중적 기술개발을 추진하였고 현재는 1MW 발전설비 개발을 통한 MCFC의 실용화에 주력하고 있다.

이와같이 요소기술, 스택기술, 시스템개발 등 기술의 진전에 따라 기술종류별로 집중 지원하는 정부주도개발계획의 추진으로 PAFC의 경우 전기사업용(분산전원)으로 1MW 발전소 2기를 개발하여 전력회사에서 시험완료한 바 있으며 1996년까지 5MW급이 개발될 전망이다. 현지설치용으로는 200kW 발전

표 6. 일본 Moonlight 계획의 연료전지 개발[10]

	1981	1983	1985	1987	1989	1991	1993	1995
인산형 (PAFC)	요소기술		1,000kW 발전소		○			
	○		○		○			
					○			
					○			
					○			
용융탄산염형 (MCFC)	요소기술,		1kW	10kW 스택	100kW급 스택	1MW급 발전소		
	○		○	○	○	○		
고체 전해질형 (SOFC)	요소기술연구				수백W 스택		kW급 스택	
	○				○		○	
알카리형 (AFC)	요소기술, 수kW급		○					
	○		○					
고분자 전해질형 (PEFC)							○	
							○	

기가 개발되어 도시가스를 연료로 하는 열병합용 1기는 호텔에 설치되어 전기와 함께 열(170℃)을 회수하여 냉난방에 사용중이며, 메탄올을 연료로 사용하는 1기는 낙도지역에 설치되어 송전단 발전효율 39.7%를 기록하면서 원격지 전력공급을 실증한 바 있다[10].

실용화에 근접한 PAFC는 건물설치용으로 Fuji(富士)에서 전기출력 50kW급을 주문 판매하고 있으며 1993년까지 500kW급을 상용화 개발할 계획이다. 전기사업용으로는 동경전력에서 미국기술의 4.5MW 발전소를 성공적으로 시험한 이래 현재는 IFC가 개발한 세계 최대출력의 11MW 발전소를 시험운전하고 있다. 五井발전소에 건설된 11MW PAFC발전소는 핵심장치인 스택(670kW급 18개)은 미국에서 개발되었고 전력변환등 주변기술과 시스템설계는 일본(東芝)기술로 공급되었으며 발전효율(송전단) 41.8%로 시험가동되고 있다[9]. 이외에도 Fuji(富士)에서 미국의 연료전지 시내버스계획에 참여하여 PAFC 스택을 개발한 바 있으며, 여러 전력회사와 가스회사가 일본과 미국에서 개발된 50~200kW급 발전기들을 구입하여 앞으로의 사용에 대비한 기술적 문제들을 시험하면서 연료전지의 실용화를 촉진시키고 있다.

MCFC기술은 '80년대 후반에 10kW 실험용 스택이 개발된 후 대용량화를 위한 전극면적의 확대 및 수명 향상을 위한 기술개발이 적극 추진되고 있다. 내부개질형으로 전극면적 1㎡의 3kW 스택개발이 IHI에서 1989년에 성공된 이후 30kW, 100kW 스택이 개발된 바 있으며 외부개질형으로는 전극면적 0.24㎡의 출력 10kW 발전시스템이 시험되었다[9].

SOFC 기술은 국립연구소(ETL, NCL) 및 전력중앙연구소(CRIEPI)에서 재료연구와 수백W 규모의 기초연구가 수행되고 있다. 1989년부터 수행된 NEDO 주도의 기술개발에서는 원통형의 경우 IHI에서 1kW급 모듈로 1,000시간 연속운전실험을 한 바 있으며 평판형은 Sanyo(三洋), NKK 등에서 200W급 스택으로 300mA/cm<sup>2</sup>의 전류밀도를 얻은 바 있다[9].

### 4.3. 유럽의 기술동향

에너지기술로서의 연료전지에 대한 유럽의 본격적인 개발은 '80년대 중반부터 21세기의 핵심 에너지 기술인 연료전지에 대한 미국과 일본의 기술독점에 대응할 목적으로 적극 추진되고 있다.

이태리와 네덜란드가 스택이상의 기술개발 능력을

갖고 있으며 덴마크(Haldor Tropsøe 회사)가 연료개질기를 개발하여 공급하고 있다. EC본부도 연료전지 개발에 지원하고 있으며 PAFC는 이태리에서 MCFC는 네덜란드가 개발하고 있다.

PAFC는 이태리에서 1kW급 스택을 CNR/TAE연구소에서 개발한 바 있으며, 유럽에서의 연료전지발전기술의 이용확대를 목적으로 출력 1MW PAFC 발전소가 건설되어 시험되고 있다. 이 발전소는 이태리 기술에 의한 시스템설계로 2개의 670kW IFC 스택과 유럽기술에 의한 개질기 및 전력변환 설비를 갖추었으며 1992년 기간중 PAC(process and control)시험을 완료하고 기술의 실증시험을 목적으로 2년간 운전될 계획이다[11].

MCFC는 네덜란드 ECN에서 미국 IGT기술로 1kW 스택을 개발한 바 있으며 현재는 10kW 스택 개발 수준에 있다. 이태리에서는 기초연구와 2.5kW IFC스택을 시험한 바 있으며 Ansaldo에서 단위전지 개발과 함께 1994년까지 20kW급 스택을 개발할 계획이다.

이외에도 Siemens 등이 잠수함용을 비롯한 특수용의 AFC, PEFC 기술을 보유하고 있으며. 스위스, 덴마크, 스페인, 노르웨이 등에서 미국, 일본에서 개발된 스택 또는 발전설비를 도입하여 운전하면서 기술 흡수와 향후의 이용에 대한 대비를 하고 있다. 연료전지의 종류별 각국의 기술 수준을 요약하면 표 7과 같다.

## 5. 국내 기술개발 현황

국내 에너지여건과 환경문제를 고려할 때 연료전지의 필요성은 매우 크지만 기술개발면에서는 전반적으로

표 7. 국가별 기술수준 비교(1992년)

	PAFC	MCFC	SOFC
미국	11MW(P)/-	100kW(S)	25kW(P)
일본	1MW(P)/11MW(P)	100kW(S)	1kW(S)/25kW(P)
독일	-/-	10kW(S)개발중	개발중
이태리	1kW(S)/1MW(P)	50kW(S)추진	기초연구
네덜란드	-/25kW(P)	10kW(S)	기초연구
한국	1kW(S)/5kW(P)	단위전지연구	기초연구
전류밀도(mA/cm <sup>2</sup> )	~300(미국), ~240(일본), ~170(한국)		

주: 1. (P)=발전설비(plant), (S)=연료전지본체(stack)를 표시  
2. PAFC, SOFC에서 A/B=자체개발기술(A)/연료전지본체 도입(B)

로 초기단계에 있으며 '80년대 후반부터 기술개발에 대한 관심도가 매우 빠르게 확산되고 있다.

전극개발을 포함한 핵심기술의 본격적인 개발은 1987년부터 수행된 과학기술처의 연료전지기술개발 사업 및 1989년부터 시작된 동력자원부의 대체에너지개발사업으로 요약된다.

과학기술처사업은 에너지기술연구소(구 동력자원연구소) 주관으로 PAFC스택개발(에너지기술연구소), 메탄올 연료개질기술(충남대, 서울대), 전력변환기술(에너지기술연구소)과 관련 기초연구(서울대, 연대, 과기원, 표준연)가 수행되었다. 1987-1992 기간중 1kW급 PAFC 스택, 메탄올 연료개질기 시제품 및 전력변환장치가 개발되어 국내 연료전지 관련 연구개발에 크게 기여하고 있다.

동력자원부의 대체에너지개발사업은 에너지관리공단(대체에너지개발센터)의 주관하에 기업(유공, 호남정유, 금성산전)과 대학 및 연구소의 참여로 40kW급 PAFC기술의 실용화가 추진되고 있으며, MCFC, SOFC에 대한 연구도 과학기술연구소등에서 적극 수행되면서 연료전지에 대한 연구개발이 확대되고 있다.

현재까지의 기술 개발현황은 PAFC의 경우 호남정유에서 500W급 스택개발이 보고된 바 있으며 에너지기술연구소가 1kW급 스택을 개발한 바있다[12, 13]. 단위전지는 0.7V에서 전류밀도 150mA/cm<sup>2</sup>로 4, 500시간 이상 연속운전된 바 있으며, 1kW급 PAFC 스택은 표 8에 요약된 바와 같이 전극면적 323cm<sup>2</sup>의 단위전지 35개로 적층되었고 공기냉각식으로 설계되었다[14]. 전류밀도, 수명 및 전극면적의 확대에 대한 연구가 정부의 G7 사업으로 계속될 계획이다.

표 8. 국산 1kW 연료전지 제원[13]

정격 출력	1 kW (최대 1.2 kW)
전압, 전류	20V, 50A
운전 온도	170℃
냉각 방식	공 냉 식
단위전지 수	35 개

MCFC 기술은 과학기술연구소에서 전극 및 단위전지가 실험된 바 있으며 삼성전자의 내부개질형 1kW급 스택기술의 개발과 한국전력 주도의 2kW급 스택개발이 추진되고 있다. SOFC는 동서산업에서 평판형 기술개발이 수행중이며 대학에서 재료연구가 수행되고 있다.

정부주도의 개발과는 별도로 1985년부터 한국전력과 에너지기술연구소가 Fuji(富士)의 5.9kW PAFC 스택을 도입하여 국내에서 설계제작된 연료개질기와 전력변환기 등으로 발전설비를 구성하여 운전이 성공한 바 있다[15]. 사용된 스택은 최신의 Fuji기술로 개량되어 1992년 10월 에너지기술연구소의 설비에 연결되어 직류 5.9kW 출력(최대출력 7kW)으로 설비 최적화를 목적으로 실험되고 있다.

국내에서의 연료전지에 대한 주요 연구과제를 요약하면 표 9와 같다.

## 6. 결 론

에너지전환 효율이 높고 환경면에서 깨끗한 기술인 연료전지는 지구환경에 대한 관심 증대와 함께 매우 유망한 차세대 기술로 평가되고 있다. 특히 국내와 같이 90% 이상의 에너지를 외국에서 수입하는 여건

표 9. 연료전지기술 관련 국내 주요 연구개발 현황

연구 사업	종류	기 간	주요 연구개발 내용	수행 기관	연구비 지원
연료전지 기초실험 및 발전설비성능개선	PAFC	'85-'89	<ul style="list-style-type: none"> <li>5kW급 발전설비 구성, 실험(연료전지 수입)</li> <li>개질기, 전력변환기 설계및제작</li> <li>실험용 부하 설계제작</li> </ul>	에너지기술(연)/한전 연구원	한국전력
		'90-'92	<ul style="list-style-type: none"> <li>5kW 발전설비 개조및 시스템 구성, 운전</li> <li>메탄올 개질기개발</li> <li>중양제어반 설계제작</li> </ul>		
연료전지 기초연구	PAFC	'85-'87	<ul style="list-style-type: none"> <li>전극특성, 전극부식</li> <li>천연가스개질특성</li> </ul>	한양대 경북대	과학재단



연구사업	종류	기간	주요 연구개발 내용	수행기관	연구비 지원
연료전지기술개발	PAFC	'87-'92	kW급 연료전지기술확보 ○ 전극제조 공정개발 ○ 1kW 스택개발 ○ 메탄올개질기 시제 ○ 전력변환장치 개발 ○ 전극및 스택 성능 시험장치 설계제작 ○ 관련 기초연구	에너지기술(연) (표준연, 과기원, 서울대, 연대, 충남대 참여)	과학기술처
40kW급 실용화 개발	PAFC	'89-'93	40kW발전설비 개발 ○ 천연가스개질기 ○ 40kW 스택제조 ○ 전력변환기 개발	유공, 호남정유 금성산전(서울대, 한양대, 포항공대, 연대, 경북대 참여)	동력자원부 대체에너지 개발사업
용융탄산염형 전극및 기본기술	MCFC	'89-	○ 전극특성연구및 단위전지	과기원, 한양대, 고려대	
내부개질형 스택		'92-	○ 1kW급 스택제조	삼성전자, 고려대, 전기연	
고체전해질형 기초연구	SOFC	'90-	○ 재료 물성연구 ○ 단위전지(평판형)	서울대, 동서산업	

주 : 이외에도 알카리연료전지(AFC)에 대한 기초연구는 ADD지원으로 대학에서 수행중임.

에서 연료전지와 같은 에너지절약형의 새로운 에너지 기술의 이용은 더욱 절실한 것으로 판단된다.

'60년대부터 기술개발을 추진한 선진국에서는 기술의 실용화가 가까와 짐에 따라 관련 기술의 독점을 위하여 많은 투자를 하고 있다. 국내의 기술수준은 아직은 초보적이지만 다행히도 근래에는 종합적인 개발계획이 수립되고 개발에 대한 관심이 높아가고 있으므로 대학에서의 기초연구가 활성화되고 연구소와 기업에서의 기술개발이 더욱 집중되어 다가오는 21세기에는 우리 기술도 선진국 대열에 위치할 수 있기를 바란다.

**참고문헌**

1. M. A. Kettani, Direct Energy Conversion, Addison-Wesley, 1970.
2. M. Warshay, "Status of Commercial Fuel Cell Powerplant System Development", IECEC '87, Aug. 10-14, Philadelphia, 1987.
3. V. D. Feerraro, et al., "Field Experience with 40kW Fuel Cell Power Plant at Military Bases", Program and Abstracts, p. 18, Fuel Cell Seminar, Oct. 26-29, Tucson, 1986.
4. N. Kato, "PAC Test Operation of 11MW PAFC Power Plant at TEPCO Goi Thermal Power Station", Program and Abstracts, p. 264, Fuel Cell

5. Seminar, Nov. 25-28, 1990, Phoenix, USA.
6. T. G. Benjamin, Handbook of Fuel Cell Performance, Chicago, IGT, 1980.
7. WEC Report, "Fuel Cells-Current Trends and Future Prospects", World Energy Council, London, 1990.
8. WEC Report, "Fuel Cells-Current Trends and Future Prospects", World Energy Council, London, 1990.
9. 최수현, "연료전지기술", 과기처 기술동향 발표자료, 1992.
10. Fuel Cell Implementation Committee, "Fuel Cell Program of DOE, GRI and EPRI", 1990.
11. International Fuel Cell Conference Proceedings, Makuhari, Japan, Feb. 3-6, 1992.
12. 廣瀬 研吉, 實用化間近の リン酸型 燃料電池, Energy, 4, p. 24, 1992.
13. ENEA Fuel Cell Program, ENEA, Italy, 1992.
14. 성준용, 인산형 연료전지 Stack제조기술개발, 대체에너지기술개발 범국가적 연구사업 연구발표집, 에너지관리공단, p. 145, 1992.
15. 최수현 외, 연료전지기술개발, 연구보고서 KE-91033S, 과학기술처, 1992.
16. 김창수 외, 1kW급 인산형 연료전지 스택제조 및 운전특성, 전기학회 추계학술대회 논문집, p. 283, 1992.
17. 지평삼, 최수현 외, 인산형 연료전지발전에 관한 기초실험연구, 연구보고서 KRC-85G-JO3, 한국전력, 1989.