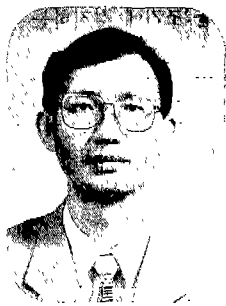


연료전지 기술과 개발 현황



글 / 최 중 옥
한전 중앙교육원 교수

목 차

- I. 서론
- II. 연료전지의 원리와 구성
- III. 연료전지의 특성
- IV. 발전시스템 기술
- V. 기술개발 현황
- VI. 결론

I. 서론

연료전지의 개발은 1839년 영국의 Grove경이 그 원리를 실험으로 제시한 이래 1965년 미국의 우주 계획에서 제미니호의 전원으로 채택되어 최초로 실용화 되었으며, 70년대 초 오일파동 이후 본격적으로 전기사업용으로의 개발이 진행되어 현재 미국, 일본 등 선진국에서는 MW급 발전용연료전지의 실용화를 목전에 두고 있다.

연료전지는 연료가 지닌 화학에너지를 전기화학 반응에 의해 직접 전기에너지로 변환시키는 새로운 발전원으로 화력발전처럼 연료를 태우는 연소 과정이 필요 없어 열효율이 높고, 분진이나 황산화물과 같은 공해물질을 배출하지 않는다. 또한 무소음으로 환경문제가 거의 없으며, 다양한 용량으로 제작이 가능하고 전력수요지 내에 설치가 용이하여 송변전설비를 줄일 수 있는 등 전력계통의 운영측면에서도 기대가 큰 첨단 기술이다.

이러한 연료전지는 전해질의 종류에 따라 인산형(PAFC), 용융탄산염형(MCFC), 고체전해질형(SOFC), 고체고분자형 연료전지(SPEFC)로 크게 분류한다. 이 가운데 인산형 연료전지는 기술개발이 가장 앞서 있어 현재 실용 규모의 플랜트에 의한 실증시험이 진행되고 있고, 건물의 열병합용이나 분산배치형태의 전원으로 실용화를 눈앞에 두고 있다. 용융탄산염형 연료전지의 경우는 석탄을 자원으로 하는 석탄가스를 연료로 이용할 수 있고, 또한 배열을 이용하여 복합발전으로도 이용할

수 있다는 점에서 화력발전소의 대체용 전원으로 유망하다.

한편, 고체전해질형 연료전지는 작동온도가 높아 고효율이 기대되고 있으나 고온재료, 내구성 등 기술적으로 해결되어야 할 문제점이 많아 아직은 개발 초기 단계에 있으며, 고체고분자형 연료전지의 경우 전류밀도가 높아 자동차용 등으로 개발이 진행되고 있다.

국내에서도 연료전지에 대한 기술개발의 필요성을 인식하고 '93년 국가 선도기술개발과제(G7 프로젝트)의 하나로 선정해 활발히 추진 중에 있으며, '98년 5월에는 7kW급 용융탄산염형 연료전지와 10kW급 인산형 연료전지 개발에 성공하여 국내 기술수준을 한층 높여 놓았다. 따라서 본고에서는 관심이 과거 어느 때보다도 높아지고 있는 연료전지에 대하여 기술특성 및 개발 현황을 살펴 보고자 한다.

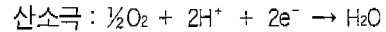
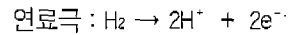
II. 연료전지의 원리와 구성

연료전지(Fuel Cell)의 기본원리는 물의 전기분해의 역현상을 이용한 것이다. 전기분해는 물(전해질)에 전기를 통과시켜 물을 수소와 산소로 분리하는 것이지만, 연료전지는 이 순서를 역으로 하여 연료인 수소와 공기중의 산소를 반응시켜 전기와 물을 얻을 수 있으며, 반응과정에서 발생하는 열을 난방이나 복합발전의 열원으로 이용한다.

연료전지는 그림 1과 같이 이온전도성은 있으나

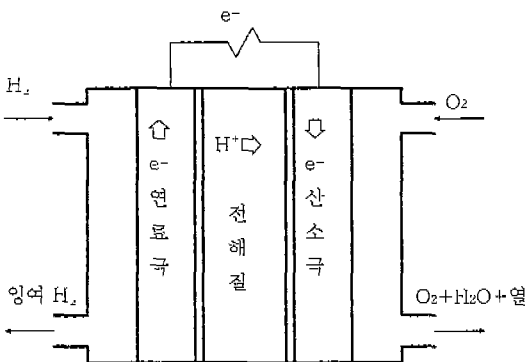
전자를 통과시키지 않는 전해질(Electrolyte)과 두 개의 다공질을 갖는 전극(Anode, Cathode)으로 구성되어 있고, 외부로부터 계속적으로 반응물질을 공급해야 된다.

전기화학반응은 연료극(Anode)으로 공급된 수소가 촉매에 의해 수소이온과 전자로 분해되고 수소이온은 전해질을 통하여 산소극(Cathode)으로 이동하며 외부회로를 통해 온 전자와 공기중의 산소가 반응하여 화학적으로 안정된 상태인 물을 생성한다. 이를 식으로 표시하여 보면

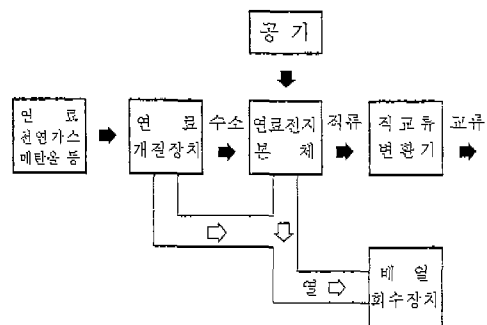


가 되고 외부회로에 부하를 연결하게 되면 전자의 흐름과 반대되는 방향으로 전류가 흐르게 되어 전체적으로 수소와 산소가 결합하여 물이 되면서 전기를 발생하게 된다.

한편, 연료전지 발전시스템의 기본구성은 수소, 산소반응으로 전기를 발생시키는 연료전지본체(Fuel Cell Stack)와 천연가스, 석탄가스, 메탄올 등의 화석연료를 고농도의 수소가스로 만들어 본체 내에 공급하는 연료개질장치(Reformer), 그리고 발생된 직류전기를 교류전기로 변환시켜 주는 직 교류변환기(Inverter)로 구성되어 있다. 이와 같은 기본장치 외에도 반응열 및 개질기 배열을 이용하여 온수를 공급하거나 복합발전의 열원으로 사용하는 배열회수장치 등이 있다. 그림 2는 이러한



<그림 1> 연료전지의 원리 개념도



<그림 2> 연료전지 발전시스템

<표 1> 대표적인 연료전지

구 분	인 산 형 (PAFC)	용융탄산염형 (MCFC)	고체전해질형 (SOFC)	고체고분자형 (SPEFC)
동작온도	150 ~ 220°C	600 ~ 700°C	900 ~ 1000°C	50°C
전 해 질	H ₃ PO ₄	Li ₂ CO ₃ + K ₂ CO ₃	ZrO ₂	Nafion
전해질판	SiC	LiAlO ₂	고체산화물	고분자전해질
전 극	Pt	Ni, NiO	NiO - ZrO ₂	Pt
연 료	천연가스, 메탄올, 나프타	천연가스, 메탄올, 나프타, 석탄가스	천연가스, 메탄올, 나프타, 석탄가스	천연가스, 메탄올
특 징	촉매 백금 이용 CO함유 연료이용 불가 배열이용 가능	석탄가스이용 가능 배열이용 가능 복합발전 이용	높은 효율기대 배열이용 가능	부식문제 없음 전류밀도 높음
용 도	현지설치형 분산배치형	화력발전대체 분산배치형	화력발전대체	자동차, 군사용 등 특수목적

연료전지 발전시스템의 구성 예를 보여주고 있다.

연료전지본체는 연료극(Anode), 산소극(Cathode) 두 개의 전극과 전해질(Electrolyte)을 함유하고 있는 전해질판(Matrix)으로 구성되어 직류전기를 발생시키는 단위전지(Unit Cell)와 이들 단위전지를 여러장 적층하여 이로부터 발생하는 전류를 직렬로 연결, 필요로 하는 전기량을 발생시킨다.

III. 연료전지의 특성

1. 연료전지의 종류

연료전지의 종류에는 전해질의 종류 및 동작온도에 따라 분류되는데 인산형(PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell), 용융탄산염형(MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell), 고체전해질형(SOFC : Solid Oxide Fuel Cell), 알칼리형(AFC : Alkaline Fuel Cell), 고체고분자형 연료전지(SPEFC : Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell) 등이 있다. 이중 인산형, 용융탄산염형, 고체전해질형 연료전지는 전력대체용으로 개발되고 있으며, 알칼리 및 고체고분자형 연료전지는 단위 무게당 에너지 출력이 커서 수송용, 군사용, 우주선 등의 특수용도로 개발되고 있다(표 1).

2. 연료전지의 특징

연료전지 발전이 가지고 있는 특징으로는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

- ① 연료전지 발전은 직접 발전방식이기 때문에 기존의 화력발전에 비해 열효율이 40~60% 정도로 높고, 발생열을 회수하여 이용할 경우 종합효율은 80%까지도 높일 수 있다.
- ② 배기가스중에 SO_x, NO_x 등이 거의 없어 환경을 오염시키지 않고, 또한 기계 회전부위가 없어 소음, 진동 등의 영향도 적다.
- ③ 천연가스, 석유, 메탄올, 석탄가스 등 다양한 연료를 사용할 수 있다.
- ④ 입지의 제약이 적어 도심근교 등 수요지 근방에 설치가 가능하기 때문에 송전손실 및 설비비 등을 줄일 수 있다.
- ⑤ 최저부하에서 정격출력까지의 출력변화가 수 초이내에 이루어지며 부분부하에서도 높은 효율을 유지한다.

이와 같이 연료전지는 효율 및 환경면에서 매우 우수할 뿐 아니라 도심지역 또는 건물내의 설치가 가능하여 경제적으로 에너지를 공급할 수 있고, 천연가스·메탄올·석탄가스 등 다양한 연료를 사용함으로써 전원의 다변화에 기여할 수 있다.

3. 연료전지의 응용

전력산업 특히 발전분야에서 연료전지는 앞에서

살펴본 제반 장점을 고려하면, 앞으로의 주요 발전기술로서 대두될 것이며, 응용분야로는 우선 현지설치형, 분산배치형, 화력발전대체용, 자동차동력원 등 특수용도 형태의 운용을 들 수 있다.

① 현지설치형(On-site) 발전

현지설치형(On-site)은 수십kW~수천kW 출력규모의 연료전지를 호텔, 병원, 아파트, 공장 등의 전기 수요지 부근에 설치하여 전기와 열을 동시에 공급하는 방식이다. 연료전지는 특성상 소용량 발전규모에도 높은 발전효율을 얻을 수 있으며, 용량규모 또는 부하율에 관계없이 효율이 일정하기 때문에 부하변동이 많은 장소에 설치하면 유리하다. 또한 부하변동에 응답성이 좋고 대기오염물질의 배출이나 소음을 무시할 수 있기 때문에 현지설치형 연료전지 발전은 인산형이 가장 유용한 응용분야 중의 하나이다.

② 분산 배치형 발전

분산배치형 전원은 사용자와 가까운 거리에 설치하여 송전비용을 절감하기 위한 발전으로 출력규모는 수천~수만kW 규모이다. 종래의 전원 개발은 발전소 입지 제약에 따라 점차 수요지에서의 원격화로 말미암아 송변전 투자 부담이 증대되어 왔다. 이에 따른 문제점 해결의 하나로서 공해배출이 거의 없는 연료전지 시스템을 수요지 근방에 위치한 현재의 변전소에 설치하는 경우 송배전 투자의 억제 및 송전손실의 방지를 꾀할 수 있으며, 또한 송변전 고장에 따른 광범위한 정전을 피할 수 있어 계통신뢰도의 향상을 도모할 수 있다.

이 응용분야에서는 인산형이 제일 먼저 실용화될 전망이며 용융탄산염용 및 고체전해질형 연료전지도 기술개발 정도에 따라 경쟁기술로 등장할 것이다.

③ 화력발전 대체용 발전

대형 화력발전 대체용으로는 우선 출력규모에서 수백MW 이상의 용량을 가져야 한다. 연료전지의 화력발전 대체용으로서의 가장 큰

요인은 기존의 발전방식과 비교하여 환경면에서 우수한 특성을 가지고 있다는 점이다. 유황화합물은 거의 발생되지 않으며 질소산화물의 경우에도 전지본체내에서는 발생되지 않으나 연료를 수소가스로 전환시키는 과정에서 약간 발생되며, 이 경우에도 기존의 발전방식에 비하면 10분의 1정도에 지나지 않는 것으로 알려지고 있다. 또한 발전효율이 높아 발전비용 저감이 기대되며 전기적인 특성으로 부하추종성 및 운전특성도 좋아 첨두부하 설비로서의 운용이 고려되고 있다.

지금까지 여러 형태의 실증시험을 종합하여 보면 화력발전을 대체하는 경우에는 발전효율, 비용, 대규모화, 연료이용의 다양화라는 관점에서 천연가스를 이용하는 용융탄산염형 및 고체전해질형 연료전지 그리고 석탄가스를 이용하는 용융탄산염형 및 고체전해질 복합발전 시스템으로서의 이용이 기대되고 있다.

④ 특수 용도

특수용도로서의 연료전지 응용에는 벽지나 도시지역과 같이 전력수급이 어려운 지역의 전원공급, 우주선의 전원공급, 그리고 실내에서의 작업이 필요한 지게차의 전원공급, 도시 환경 오염을 줄이기 위한 무공해 자동차의 동력원 등이 있다. 이외에도 각종 비상발전용, 해저탐사선의 동력, 잠수함의 동력, 무소음의 군사용 전원, 각종 레크리에이션용 장비의 전원 등 다양한 분야에 응용이 가능하다.

IV. 발전 시스템 기술

연료전지 발전기술은 스택으로 구성되어 있는 연료전지 본체를 제작하는 본체기술과, 주변기기 및 보조 시스템을 조합하는 시스템구성기술, 전체 발전시스템을 설계·설치 운영하는 시스템 종합기술 등으로 구분 할 수 있다.

현재 연료전지에 반응가스를 공급하는 장치인 연료개질장치(Reformer)는 사용되는 연료특성에 따라 다양하게 개발되고 있으며, 연료전지의 저전압, 고전류 특성에 맞는 직교류 변환장치 및 고온

의 배열을 이용하여 열효율을 향상시키는 배열이 용시스템에 관한 기술 등이 연료전지발전 시스템의 개발에 필요한 주요 기술들이다. 그림 3은 연료전지 발전시스템의 개발에 필요한 관련 기술을 나타내고 있다.

V. 기술개발 현황

1. 국외 기술개발 현황

연료전지는 1839년 영국의 Grove경이 그 원리를 확립하여 개발이 시작되었고 본격적인 실용화가 이루어진 것은 미국의 유인 우주선에 전원으로 사용되기 시작하면서 부터이다. 즉, 1965년부터 제미니 우주선 및 아폴로 우주선용 전원으로 개발되어 이용되었고 현재에는 우주왕복선의 전원으로도 이용되고 있다. 미국은 이와 같은 연료전지 개발경험을 근간으로 하여 연료전지의 적용가능성을 인식하여 본격적으로 전기사업용 및 가스사업용의 상용전원으로서 개발을 시작하게 되었다.

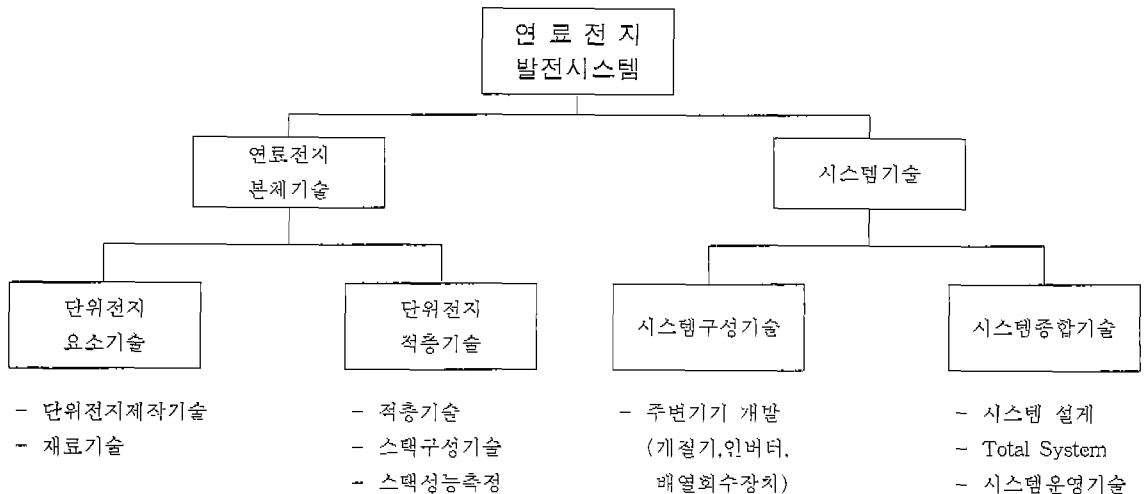
현재 미국에서의 연료전지의 연구개발은 에너지성(DOE), 전력회사(EPRI), 가스회사(GRE)를 중심으로 진행하고 있다. 기술개발이 가장 앞서 있는 인산형 연료전지의 경우 이미 400kW급을 개발, 건물의 에너지원으로 활용하고 있으며, 기존의 화

력발전 플랜트에 대응하는 비교적 대용량의 연료전지로서 기대되고 있는 것이 용융탄산염형으로서 MW급의 실증시험이 진행중에 있다.

현재 주목받고 있는 프로젝트의 하나는 캘리포니아 샌타클라라 지역에 250kW급 연료전지 8개를 연결한 2MW규모의 실증플랜트 시험운전이다. 1996년 4월 2주간의 운전시험에서, 전기출력은 발전단에서 2.17MW(DC), 송전단에서 1.93MW(AC), 발전효율은 44%에 달했다. 이 실증플랜트는 2년간에 걸쳐 실험운전이 진행되고 있다.

고체전해질형 연료전지의 경우 아직 그 개발이 초보단계에 머무르고 있는데 미국 W.H사에서 개발된 25kW급의 원통형 시스템이 가장 개발이 앞서 있으며 미국 및 유럽에서 100kW급 시스템의 실증시험이 계획되고 있다.

일본에서의 연료전지개발은 1981년 정부 주도하에 시작된 Moon Light 계획으로 본격화 되었으며 현재는 새로 개편된 New Sunshine 계획에 의한 자체 기술개발과 미국에서 개발된 시제품의 도입 및 운전실험을 통한 기술축적을 병행하여 추진하고 있다. 현재 인산형 연료전지의 경우 상용화를 앞두고 MW급 발전시스템을 실증하는 시험단계이며, 용융탄산염형은 100kW급 스택개발 및 소규모 플랜트 실증시험 단계를 마치고 1998년 완공예정 으로 MW급 플랜트 개발을 진행하고 있으며, 고



<그림 3> 연료전지 시스템의 관련기술

<표 2> 국내연료전지 기술개발 현황

과 제 명	기 간	주 요 내 용	수 행 기 관	지 원 기 관	비 고
인산형 연료전지 발전시스템 구성 및 운전	'85~'89 (3년)	5kW급 인산형: · 발전시스템 구성 · 발전특성	에기연	한 전	전지본체수입
소출력 연구전지 개발 (연료전지 기술개발)	'87.12~'92.8~	2kW급 인산형: · 전지 본체 · 개질기 · 전력변환기 · 시스템 종합	에기연 과기원 표준연 대학	과기부	· 국책연구 사업 · 선도기술과 연계
대체에너지 개발사업 (법 국가적 사업)	'89~'93	· 40kW급 인산형 연료전지 발전 시스템 실용화	가스공사(종합) 호남정유(스택) 유공(개질기) 금성전기(인버터) 포항공대, 서울대	산자부	법 국가적 연구사업
대체에너지 개발사업 (선도기술)	'89~'94	· 용융탄산염-1kW 스택개발	삼성전자 대학(고려) 기업(삼성)	산자부	
대체에너지 개발사업 (선도기술)	'93~'97	· 40kW급 인산 연료전지요소 기술	에기연, 삼성전자, 대학 (서울대, 연대, 한양대, 인하대, 과기원)	산자부, 과기부 에너지자원기술 개발지원센터	
대체에너지 개발사업 (선도기술)	'93~'97	· 7kW급 용융탄산염 연료전지개발	한 전 삼성중공업 KIST, 대학	산자부, 과기부 에너지자원기술 개발지원센터	

체전해질 연료전지는 자체기술로 10kW급의 소규모 스택 개발에 와 있다.

유럽에서의 연료전지 개발은 20여년 전부터 시작되었으나 1976년을 전후로 중단되었다가 1986년 CEC(Commision of European Communitis), 이탈리아, 네덜란드 등에서 새로운 개발 프로그램이 세워지면서 본격적인 개발이 진행되고 있다. 유럽에서의 연료전지 개발전략은 미국, 일본에 비하여 기술이 뒤진 분야는 시스템을 도입 운전하여 시스템 기술을 확보하는 것을 목표로 하고, 개발 경쟁 가능성이 있는 용융탄산염형 및 고체전해질형 연료전지는 자체적으로 요소기술 및 스택 기술개발을 추진하고 있다. 현재 용융탄산염형 연료전지 경우에는 이탈리아, 네덜란드, 독일 등에서 미국의 기술을 기반으로 하는 10kW규모의 실증시험을 진행하고 있으며, 고체전해질형 연료전지는 독일의 Siemens 등에서 수kW급에서 10kW급 규모의 설비

를 제작 실증시험이 활발히 진행되고 있다.

2. 국내 기술개발 현황

국내에서도 연료전지 기술개발의 중요성을 인식하여 과기부의 특정연구사업, 산자부의 대체에너지 개발사업, 한전전력연구원의 연료전지 중장기 사업의 일환으로 소규모 스택개발을 추진 중에 있으나 아직은 초보단계를 겨우 벗어난 수준으로 선진기술에 비하면 개발면에서 많이 뒤져있는 실정이다. 국내에서의 연료전지 연구개발은 1985년 한전 전력연구원과 에너지기술연구소 공동으로 기초 실험연구를 수행함으로써 본격적으로 시작되었다. 이 연구에서는 5kW급 소규모 인산형 연료전지 스택만을 일본으로부터 도입하고 국내기술로 주변시스템을 설계, 설치 구성함으로써 1988년 말까지 운전함으로써 각종 특성시험을 실시하였고 메탄을 직접개질기를 개발하여 연계시험 함으로서 국내

연료전지 기술개발에 대한 기본기술을 확보하였다.

인산형 연료전지의 국내 자체기술개발은 1987년부터 전지본체 및 주변기기 개발을 시작하여 에너지기술연구소에 의하여 1992년 1kW급 공냉식 연료전지 본체의 운전시험에 성공하였다. 이어 1988년부터 시작된 연료전지개발의 범국가 사업으로 한국가스공사, 호남정유, 금성산전, 유공 등이 참여하여 인산형 연료전지 40kW급 시스템개발을 착수 1994년 호남정유에서 40kW급 본체에 대한 개발을 완료하고 이어 시스템을 종합하여 실증시험을 실시하였다. 시스템의 운용, 즉 실증시험에 있어서는 한전에서 일본의 Fuji사에서 제작한 50kW급 시스템을 1993년 도입하여 대전 EXPO 전기에너지관 별관에 설치 운전하여 1994년 말까지 각종 운전시험을 실시하였다.

용융탄산염형 연료전지의 경우에는 1989년부터 정부출연 연구소를 중심으로 기술개발이 시작되었으나 아직은 선진국과 많은 격차를 보이고 있다. 그러나 1991년 연료전지의 개발이 정부의 선도기술 개발사업의 하나로 확정됨으로서 본격적인 기술개발이 시작되어 1993년부터 1단계로 7kW급 시스템의 개발을 그리고 2단계 사업으로 2001년까지 100kW급 시스템 개발을 추진하고 있다. 이 사업은 한전이 주관기관 그리고 삼성중공업을 참여기업으로 하여 KIST, 대학들과 공동으로 개발을 진행하고 있는데 94년말 1.7kW급의 스택을 개발 운전시험에 성공하였다. 이외에도 삼성전자가 중심이 되어 1kW급 스택의 개발이 진행되어 1995년초 이에 대한 실증시험을 실시하였으며, 기타 대학 및 연구소 등에서도 기초재료 및 물성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 고체전해질형의 경우에는 소규모 단위전지시험이 국책연구소 및 대학 등에서 진행되고 있다. 특히 쌍용연구소등에서는 새로이 각광받고 있는 평판형 연료전지에 대하여 100W급 개발을 목표로 한 연구를 착수하여 25cm급 단위전지의 제작에 성공하고 있으나 아직은 기초 연구단계에 머무르고 있다.

최근에는 1993년부터 선도기술 개발사업으로 시작한 7kW급 용융탄산염형 연료전지를 한국전력·한국과학기술연구원·삼성중공업 공동으로 수행하

여 개발하는데 성공하였다.

이 연료전지는 전극면적이 3,000cm²에 이르고 2,000시간 이상 성능저하 없이 연속운전시험에 성공하여 신뢰성을 확인했다. 현재까지 국내의 주요 기술개발 현황은 표 2와 같다.

VI. 결론

지구환경 문제나 에너지문제에 관련해서 미래의 발전기술로 각광받고 있는 연료전지는 아직 많은 연구개발비가 투자되는 개발단계이기 때문에 경제성 및 정확한 시장 예측은 어려우나 '90년대 후반부터 부분적으로 실용화되면서 21세기의 주요한 에너지기술로 등장할 것이다.

미국 등 선진국에서는 지속적인 투자와 연구개발로 이미 상당한 기술수준에 있으며 곧 MW급 화력발전 대체용 전원으로서의 실용화가 예견되고 있다. 국내에서도 산·학·연 각 분야에서 연구개발활동을 의욕적으로 전개하고 있고 연료전지 본체를 포함한 연료개질장치, 전력변환장치 등의 주변 기술개발을 범국가적으로서 소규모 시제품 개발을 목표로 하여 추진 중에 있으므로, 1단계 선도기술 계획이 끝나는 '98년 이후에는 실용화에 근접된 발전시스템이 개발될 것으로 전망된다.

이와 같은 연료전지발전 기술은 지구 환경문제에 대응할 수 있을 뿐 아니라 부존자원이 빈약한 우리나라로서는 안정적인 에너지 수급을 위한 에너지 공급원의 다변화 및 이용효율 증대에도 아주 중요시되는 기술이기도 하다.

따라서 국내의 연료전지 기술개발에 정부는 물론 산·학·연 모두가 투자와 지원을 아끼지 말아야 할 것이며, 보다 큰 관심과 노력으로 기술개발 속도를 더욱 가속화하여야 할 것으로 여겨진다.