

연료전지 - 21세기 에너지 변환 기술



홍 성 안

KIST/전지·연료전지연구센터장

기술개발의 중착역인 상용화 전단계는 시범 운전단계(Demonstration Stage)로 기술의 신뢰성 및 Marketing과 관련된 기술적 문제점을 점검하고 해결하는 아주 중요한 단계이다. 새로운 밀레니엄을 시작하는 현재 연료전지 기술수준은 연구개발 단계를 넘어선 시범 운전 단계에 와 있어 차세대 발전장치 또는 무공해 동력원으로 서 기대가 큰 기술이다.

연료전지의 기본원리는 물의 전기분해 역반응을 이용하는 것으로 수소와 산소로부터 전기와 물을 만들어 내는 것이다. 외부에서 연속적으로 공급되는 연료와 공기를 연소에 의하지 않고 전기화학반응에 의하여 연료가 갖고 있는 화학에너지를 직접 전기에너지와 열로 변환시키는 발전장치이다. 따라서 원리상 열기관이 갖는 열역학적인 제한(Carnot 효율)을 받지 않기 때문에 발전효율은 40-55%로 기존의 발전장치에 비하여 매우 높으며 발전과 동시에 지역 냉난방 등에 의한 열회수까지 고려할 때 열효율은 70%에 이른다. 또한 배기가스 중에 질소화합물이나 유황화합물이 적고 소음이나 진동이

거의 없는 환경친화적 발전방법이며, 다양한 용량으로 제작이 가능하고, 전력 수요지내에 설치가 용이하여 송변전 설비를 줄일 수 있는 등 전력계통의 운영측면에서도 기대가 큰 첨단 기술이다.

연료전지의 기본 작동원리는 19세기에 가시화 되었으나 60년대 우주선이나 군사용의 목적으로 그 응용이 시작되었으며, 70년대초의 오일 파동이후 본격적으로 민수용 목적으로 개발이 진행되어 오고 있다. 알칼리 연료전지는 1965년 미국의 아폴로 우주계획에서 제미니 3호의 전원으로 채택되어 최초로 실용화되었고, 현재 인산연료전지는 민수용 발전으로, 고분자 전해질 연료전지는 무공해 자동차 동력원으로 그 실용화를 목전에 두고 있는 실정이다.

연료전지는 전해질의 종류 및 작동온도에 따라 분류되는데 인산연료전지, 용융탄산염 연료전지, 고체산화물 연료전지는 민수용 발전으로 개발되고 있으며, 고분자 전해질 연료전지 및 알칼리 연료전지는 단위무게당 에너지 출력이 상대적으로 커서 수송용, 잠수함 등의 군사용,

〈표 1〉 연료전지 종류별 요소 재료 및 특성

구 성 요 소 및 특 징	인 산	용 용 탄 산 염	고 체 산 화 물	알 칼 리	고 분 자 전 해 질
전 해 질	H ₃ PO ₄	K ₂ CO ₃ -Li ₂ CO ₃	ZrO ₂ -Y ₂ O ₃	KOH 용액	Sulfonated hydrocarbon acidic ion exchange membrane
전 해 질 판	SiC	LiAlO ₂	고체산화물	Asbestos	고분자 전해질
전 극	Pt	Ni, NiO	NiO-ZrO ₂ La _{0.9} Sr _{0.1} MnO ₃	Pt, Pt-Au합금	Pt
연 료	H ₂	H ₂ -CO	H ₂ -CO	H ₂ (고순도)	H ₂
산 화 가 스	공기	공기, CO ₂	공기	O ₂ (고순도)	O ₂
조업온도(°C)	160-190	650	800-1100	82-104	82
전지전압(V)	<0.8	<0.85	<0.9	<0.97	<0.95
불순물허용치	CO<2000ppm H ₂ S<1ppm	No H ₂ S	미결정	No CO No CO ₂	CO<2000ppm H ₂ S<1ppm
개 발 단 계	제1세대 연료전지	2세대 연료전지	3세대 연료전지	Apollo 우주선	Gemini 우주선
연료극 반응	H ₂ →2H ⁺ +2e ⁻	H ₂ +CO ₃ ²⁻ →H ₂ O+CO ₂ +2e ⁻	H ₂ +O ²⁻ →H ₂ O+2e ⁻ CO+O ²⁻ →CO ₂ +2e ⁻	H ₂ +2OH ⁻ →2H ₂ O+2e ⁻	H ₂ →2H ⁺ +2e ⁻
공기극 반응	2H ⁺ +1/2O ₂ +2e ⁻ →H ₂ O	CO ₂ +1/2O ₂ +2e ⁻ →CO ₃ ²⁻	1/2O ₂ +2e ⁻ →O ²⁻	H ₂ O+1/2O ₂ +2e ⁻ →2OH ⁻	2H ⁺ +1/2O ₂ +2e ⁻ →H ₂ O

우주선 등의 특수용으로 개발되고 있다. 각 연료전지의 작동원리 및 구성요소 재료, 특징을 〈표1〉에 요약하였다.

연료전지 발전시스템은 전기를 생산하는 연료전지 본체, 연료인 천연가스, 석탄가스, 메탄올 등을 개질하여 수소가 많은 연료가스로 만드는 개질기, 발전된 직류전기를 교류로 변환시키는 직교류 변환기, 제어장치 그리고 연료전지 본체에서 발생하는 열을 효율적으로 이용하는 배열이용시스템 등으로 구성되어 있다. 연료전지 본체는 적층된 수 백장의 단위전지들로 구성되어 있으며 반응가스인 연료와 공기가 각 cell로 균일하게 공급되도록 설계되어 있다. 기본적으로 각 cell은 전해질이 함유되어 있는 전해

질판(matrix)을 사이에 두고 있는 연료극(anode)과 공기극(cathode)의 두 전극판으로 구성되어 있으며, 다시 각 cell들은 분리판(separator)에 의하여 분리되어 있다. 연료전지 본체에서 얻을 수 있는 출력은 전극면적 및 적층전지 높이에 의하여 결정되는 바, 예를 들어 1 m²의 전극면적에 의하여 구성된 단위전지를 250장 적층할 경우 300kW 정도의 출력을 얻을 수 있다.

연료전지의 기술개발 측면에서는 미국과 일본이 가장 앞서 있으며 응용측면에서는 민수용 발전으로는 화력발전을 대체하는 것이며 또한 초저공해 전기자동차 동력원으로 활용하는 것이다. 일본의 경우 연료전지가 에너지 절약형

발전기술인 점을 고려하여 1981년부터 시작된 국가 에너지 프로젝트인 Moon Light Program에 의하여 기술개발을 추진하고 있으며, 현재는 환경과 신에너지 개념을 통합한 New Sunshine Program에 의하여 계속 수행되고 있다.

차세대 민수용 발전장치로 가장 유망시 되는 용융탄산염 연료전지의 경우 1996년 미국 M-C Power사의 2MW 시범 운전이 이어 최근 일본에서는 1MW급의 시범 plant를 건설, 성공적으로 실증 운전함으로써 지난 20여년 축적한 연구개발 성과의 금자탑을 이루었으며, 또한 용융탄산염 연료전지 발전기술의 상용화 가능성을 더욱 밝게 해주었다.

미래의 발전기술로 각광 받는 연료전지는 아직 많은 연구개발비가 투자되는 실증 실험단계이기 때문에 경제성 및 정확한 시장 예측은 어려우나 2000년 초반부터 인산 연료전지를 중심으로 부분적으로 실용화 되면서 21세기의 주요한 에너지 기술로 등장할 전망이다. 미국의 A. D. Little사의 예측에 의하면 연료전지에 의한 민수용 발전의 시장규모는 2005년 1600MW, 2008년 4500MW에 이를 전망이다.

연료전지 이용기술의 양대축은 민수용 발전

과 연료전지 자동차이다. 어쩌면 연료전지 자동차의 실용화가 민수용 발전으로서 연료전지 기술의 실용화보다 빠를 수 있다. 선진국을 중심으로 저공해 또는 무공해 자동차 개발에 관한 법령이 제정되고 있으며, 이어 전세계적으로 무공해 자동차 등 환경 친화형 자동차의 개발이 한창 진행되고 있기 때문이다. 미국 정부는 연료전지 자동차의 실용화를 앞당기기 위하여 PNGV (Partnership for New Generation Vehicle) 프로그램을 통하여 성능향상, Compact화, 저가격화를 지향하는 고분자 연료전지 stack 개발 및 연료체계의 Infrastructure 구축을 위한 다연료 개질기 개발에 많은 투자를 하고 있으며 미국의 3대 자동차 회사, 일본의 토요타, 니산, 혼다, 독일의 BMW 등은 물론 세계 굴지의 자동차 회사들이 연료전지 시범 자동차를 선보이는데 앞장을 서고 있다.

우리 나라에서도 연료전지 기술개발의 중요성을 인식하여 국가의 대체에너지 개발사업 및 선도기술 사업 (일명 G7사업)을 통하여 1993년부터 연료전지 분야를 중점지원 사업으로 선정하여 한전의 전력연구원, 국책연구소, 대학 민간기업이 참여하는 형태로 개발 연구가 진행되

〈표 2〉 국내 연료전지 발전기술 개발사업의 단계별 최종목표

연료전지	1단계 (1992 - 1996) 목표	2단계 (1997 - 2002) 목표
인산 연료전지	1) 50kW stack 및 시스템 구성 2) 50-20kW 시스템 도입, 실증시험	1) 현지설치형 50kW시스템 실용화 2) 200kW급 시스템 구성 및 운전 3) MW급 시스템 도입 및 실증시험
용융탄산염 연료전지	2kW Stack구성 및 운전 (외부 및 내부 개질형)	1) 외부개질형 100kW 시스템 구성 및 운전 2) 내부개질형 20kW 시스템 구성 및 운전
고체산화물 연료전지	100W급 Stack 구성 및 운전	2kW Stack 구성 및 운전
고분자전해질 연료전지	1kW급 Stack 구성 및 운전	15kW Stack 구성 및 운전

어 오고 있다. 또한 1998년 부터는 정부의 전기 자동차 개발 프로그램에 연료전지 자동차 개발이 포함되어 본격적 연구개발 사업이 시작되었다. 범국가적으로 수행되고 있는 G7 프로젝트 및 대체에너지 프로그램의 연료전지 분야별 발전기술 개발사업의 단계별 최종목표는 <표 2>와 같으며, 연료전지 분야별 국내외 기술 개발 현황은 다음과 같다.

1. 인산 연료전지 (Phosphoric Acid Fuel Cell : PAFC)

외국의 경우 기술개발은 거의 완료된 상태이며 미국의 ONSI사에서는 200kW system을 제작, 판매하고 있다. 1999년말 현재 150기 이상의 보급실적이 있으며, 미국은 매기당 소비자에게 \$1,000/kW의 rebate제도 (판매가의 30-40%)를 실시하여 연료전지 보급을 장려하고 있다. 연구개발 방향은 cost down 및 신뢰성 향상, compact화에 집중하고 있다. 일본의Fuji사는 미국 ONSI와의 경쟁에서 졌다고 판단하고, 지난10여년간 지속되어오던 개발사업을 중단하고 새로운 전략 수립에 부심하고 있다. 일본 정부는 연료전지 보급차원에서 Field Test의 경우 40%정도의 정부 보조금을 지원하는 정책을 실시중이며, 한편 개발 측면에서는 stack 대형화 사업보다 신뢰성 향상을 위한 기초연구를 오히려 강조하고 있다. 유럽 (이태리등)은 stack의 경우 자체개발은 하지 않고 자국내의 주변기술을 연계하여 system을 구성, 운전하는 시범사업 정책을 수행하여 오고 있다.

국내의 경우 1987년 과기처 특정연구개발사업, 1989년 대체에너지 개발사업으로 시작된 인산 연료전지 개발사업은 소규모 stack제작기술

및 발전시스템 구성 기본기술 확보면에서 어느 정도 진전이 있었으나, 핵심기술개발에 대한 경험부족, 기반기술의 낙후성, 미래기술에 대한 기업의 의지 부족 등으로 많은 시행착오를 겪고 있는 상황이다. 외국의 시스템 도입에 의한 운전기술 경험으로는 한전의 50kW (Fuji사 제품), 가스공사의 200kW (ONSI사 제품) 시스템 운전 등이 있었다. 현재 LG-Caltex 정유, 에너지기술연구소를 중심으로 100kW stack개발을 목표로 연구개발이 진행되고 있으며, 현대 중공업은 자체내 사업으로 미국 ONSI사와의 판권 계약을 체결한 상태이며 현재 정부의 일부지원으로 가스공사와 공동으로 ONSI사 제품인 200kw급 연료전지의 시스템 운전 연구를 수행 중이다. 기술개발 측면에서 외국과의 현격한 기술격차를 줄이는 문제 및 개발주체의 뚜렷한 개발목표제시, 또한 외국에서 실용화를 대비하여 연료전지 보급측면에서 국가정책 방향이 재점검되어야 할 필요가 있다.

2. 용융탄산염 연료전지 (Molten Carbonate Fuel Cell : MCFC)

대형 stack의 developer로는 미국의 ERC, M-C power, 일본의 IHI, Hitachi, Mitsubishi Electric 등이 있다. ERC사의 2MW급 내부개질형 MCFC 발전시스템이 Santa Clara에서 시범 운전중이며 일본은 1999년 현재 1MW급 외부개질형 발전시스템 시범 운전을 성공적으로 수행하였다. 1995년말 완료된 일본의 100kW급 MCFC 발전시스템 시범운전은 초기성능면에서는 성공하였으나 연료전지의 내구성 및 신뢰성 측면에서 많은 기술적 문제점을 제시하였으며,

이와 같은 결과를 보완하고 개선하는데 연구개발 방향이 조정된 바 있다. 유럽의 경우 선두주자는 네덜란드의 ECN으로 당초 계획되었던 stack 대형화 사업을 수정하여 신뢰성있는 연료전지 stack을 개발하는 방향으로 조정된 바 있으며, 용융탄산염 연료전지 실용화를 위한 consortium형태인 BCN사를 설립, 새로운 계획을 발표하였다. 이 계획에 의하면 1998년까지 2kW stack을 구성, 운전하고 1999년에 20-60kW stack, 2003년까지 0.2-2MW의 신뢰성 있는 MCFC system을 완료하는 것으로 되어 있다.

국내의 경우 용융탄산염 연료전지 개발연구는 1989년부터 대체에너지 개발사업의 일환으로 KIST에서 시작하였으나 본격적 개발연구는 1993년부터 한전 및 정부의 집중적 연구개발비 투자와 함께 시작되었다. 한전은 대형전원의 입지안 및 이에 따른 전력생산비의 증가와 지구환경 문제에 대한 대응책으로 전력사업에 적용가능성이 크다고 판단되는 용융탄산염 연료전지개발을 정부 program에 의하여 수행하고 있다. 석탄가스를 이용하는 용융탄산염 연료전지 복합 발전시스템 실용규모 plant 개발의 국산화를 최종목표로 하고 있으며 1998년에 7kW급 stack을 성공적으로 제작, 3,000시간 운전함으로써 stack 대형화를 위한 제반 기본 기술을 확립한 바 있으며, 1단계 사업이 끝나는 1999년 현재 25kW급 system을 시범 운전하고 있다. 2002년까지 100kW급 system제작 및 운전을 목표로 현재 한전, 삼성중공업, RIST, KIST, 대학 등이 공동으로 참여하는 산.학.연의 공동 연구협동체제가 구성되어 있으며 stack의 대형화 사업은 삼성중공업 주관하에, 시스템 구성 및 운전은 한전, 고성능, 고신뢰성 stack개발은 KIST가 담당하고 있다.

3. 고체산화물 연료전지 (Solid Oxide Fuel Cell : SOFC)

제3세대 연료전지라 불리는 SOFC는 현재 100kW 이상의 발전 시스템으로 개발이 진행되고 있는 PAFC 및 MCFC 보다 뒤늦게 개발이 시작되었으나, 최근 급속한 재료 기술의 발달로 PAFC 및 MCFC에 이어 21세기초에 실용화에 이를 전망이며, 이를 위하여 선진국에서는 기초 연구 및 대형화기술 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 현재 5kW 이상 스택 개발현황은 표 3과 같으며, 그 형태는 원통형, 평판형으로 크게 나뉠 수 있으나 같은 형태라도 여러 가지 다양한 방법으로 제작이 가능하고 각각 장단점이 있어 현재 많은 연구 기관에서 제작 방법을 서로 달리하여 연구 개발을 추진하고 있다.

Westinghouse의 원통형 SOFC는 오랜 기간 개발이 진행되어 스택 용량 및 안정성 면에서 평판형 SOFC 보다 우수하다고 알려져 있으며, 현재 25kW 발전 시스템 실증 시험이 수행되고 있고, 제조 원가를 절감하여 실용화를 앞당길 수 있도록 기술 개발을 추진하고 있다. 평판형 SOFC의 경우에는 대량 생산에 의한 경제성 면에서는 원통형 보다 우위에 있어 여러 연구 기관에서 개발을 추진하고 있으나 단위전지를 대면적으로 제작하는 데에는 기술적 어려움이 있어, 한 분리판에 비교적 작은 단위전지를 여러 장 늘어놓는 형식 (multiple cell array)이 많이 사용되고 있으며, Siemens에서는 이러한 방법으로 20kW 스택을 제작하여 시험하고 있다. 한편 이전에 일체형 SOFC를 목표로 기술 개발을 추진하던 Allied Signal에서는 같은 기술을 사용하여 출력 밀도가 매우 높은 평판형 SOFC를 제작하였으며, 1kW/kg, 1kW/l의 출력을 목표로 기술 개발을 추진하고 있으며, 고효율 복합 발

〈표 3〉 SOFC 국외 개발 현황

개발 회사	형태	1997년 개발 현황
Westinghouse (美)	원통형 (seamless tubular)	25~100kW
Mitsubishi 중공업 (日)	원통형 (band-cell-in-series)	10kW
Ztek (美)	평판형 (원반형)	25kW
Siemens (獨)	평판형 (multiple cell array)	20kW
AlliedSignal (美)	평판형 (thin YSZ film)	1kW/kg, 1kW/l
Mitsubishi 중공업 (日)	평판형 (Mono block layer)	5kW
TONEN (日)	평판형	5kW

전 시스템을 구성하기 위하여 작동 압력을 증가시킨 가압 SOFC 스택 실험도 Ztek에서 수행되었다. 그러나 전체적으로 볼 때 SOFC 스택의 형태는 1995년 이전과 거의 동일하며, 모듈의 용량은 최대 20~25kW에서 그치고 있어, 용량 증가에 의한 대형화보다는 소규모 스택의 성능 및 신뢰성 향상에 역점을 두어 연구 개발이 추진되고 있으며, SOFC의 실용화를 위하여 1) SOFC 성능 및 안정성 향상, 2) 저온형 SOFC, 3) thermal cycle 특성 향상, 4) SOFC의 가압 운전, 5) SOFC 제조 원가 절감에 대한 연구가 추진되고 있다.

국내의 경우 대학을 중심으로 기초연구가 산발적으로 수행되어 왔으나 1994년부터 1997년까지 쌍용중앙연구소 (위탁기관: KIST, 서울대) 주관하에 100kW급 평판형 연료전지 개발을 수행한 바 있으나 불행히도 참여기업의 구조조정에 의하여 현재는 중단될 상태이다. 현재기술수준은 고체전해질 및 전극제조, 단위전지, 소형 stack을 구성하여 운전함으로써 기본기술을 습득한 정도이다. 고체산화물 연료전지의 경우 연료전지의 형태, 제작 방법이 다양하고 재료선정 측면에서 아직 우위 기술이 결정되지 않은 점

을 고려하여 타 연료전지와 다른 개발 추진 전략이 필요하다.

4. 고분자 전해질 연료전지 (Polymer Electrolyte Fuel Cell: PEFC)

미국에서는 1990년부터 DOE가 GM, Ford, Chrysler 등을 통하여 고분자전해질 연료전지 시스템의 개발을 추진 중에 있으며 Energy Partner가 자동차용 15kW 고분자전해질 연료전지스택을 구성하고 시범용 battery/연료전지 hybrid 자동차인 "EP Green Car"를 1993년에, "Genesis"를 1995년에, "Gator"를 1996년에 각각 선보였다. 캐나다의 Ballard Power Systems는 고분자전해질 연료전지 스택개발의 선두주자로 1993년 5kW 스택 24개를 연결한 120kW 성능의 버스 전기자동차를 처음으로 선보였다. 이 버스는 2,000km 이상의 주행실험을 통하여 만족할만한 결과를 내었는데 1995년에는 같은 부피에서 2배의 성능을 보이는 향상된 선택을 이용한 전기자동차 제작에 성공하였다. 또한

Ballard에서는 발전설비용으로 천연가스를 이용한 10kW 연료전지를 제작하였고 chlor-alkali 공정의 부산물인 수소로 작동하는 35kW 시스템을 제작하였으며 이를 기반으로 250kW 발전시스템을 개발 중에 있다. 독일의 Daimler-Benz는 Ballard의 30kW 스택을 자동차에 적용하는 연구를 수행하여 6인승 미니밴을 1996년 제작하였고 Siemens는 잠수함용 34kW급 스택을 1993년에 개발하였다. 이탈리아의 ENEA와 De Nora는 1988년부터 공동연구에 들어가 1991년 10kW급 스택을 개발하였으며 특히 Ansaldo는 De Nora의 30-120kW급 스택을 이용한 승용차, 버스, 보트를 개발하기 위하여 여러 가지 프로그램을 운영하고 있다. 이외에 프랑스, 영국, 스웨덴 등이 공동으로 혹은 단독으로 스택개발이나 응용 프로그램에 참여하고 있으며, 러시아의 Kurchatov 연구소는 4kW급 스택개발에 성공하고 10kW 급 스택개발을 준비중이었으나 예산의 부족으로 연구개발이 중단된 상태이다. 일본의 경우에는 통산성 공업기술원 산하 신에너지개발기구 (New Energy Development Organization, NEDO) 주도로 시작된 New Sunshine Project의 일부로 고분자전해질 연료전지의 연구를 1993년부터 시작하였으며, 9개 회사가 요소기술 개발을 분담하여 1996년에 1kW module을 제작하였다. 한편 Fuji Electric 및 Mitsubishi Heavy Industries는 1989년부터 개발을 시작하여 1994년에 5kW 스택을 제작하였으며 Matsuda 자동차는 1992년 Ballard의 7.8kW 스택을 이용하여 2인승 골프카트를 제작하였다.

국내에서는 1990년초 포항공대를 시작으로 하여 연세대, 한양대 등 일부 대학 에서 고분자전해질 연료전지에 대한 기초연구를 수행하여 왔다. 1995년에는 한국가스공사에서 전

국 및 고분자전해질막을 수입하고 분리판을 자체 제작하여 1kW 스택에 대한 운전 연구를 수행하였으나 지금은 회사내의 사정으로 중단된 상태이며, 1996년에 에너지기술연구소와 한국과학기술연구원이 kW급 스택의 국산화 개발을 목표로 연구를 새로이 시작하였다. 또한 현대자동차는 1998년 말부터 정부의 전기자동차 개발 program의 일부로 고분자 연료전지를 동력원으로 하는 자동차 엔진 개발에 KIST, SK(주), 자동차 부품연구원과 새로이 개발 연구를 시작하였으며, 1999년 현재 4kW Stack 운전 성공하였다.

6. 결 언

국내 연료전지 기술의 수준은 아직은 선진 외국기술을 쫓아가는 연구개발 단계이지만 지난 10여년의 짧은 개발 역사에도 불구하고 연료전지 관련 연구자들의 분발과 이를 뒷받침해 준 정부 및 기업의 후원에 힘입어 괄목할 만한 성장을 입증하였다. 다만 현시점에서 우려되는 것은 요즈음 유행병처럼 번지는 국내기업의 구조조정으로 연료전지 개발사업에 참여하고 있는 한전 및 민간 기업들의 개발 의지가 약화되 지나 않을까 하는 점이다. 모처럼 성공적으로 수행되어온 연료전지 개발 프로그램을 효과적으로 지속하여 2000년대 초반 선진외국과 발맞추어 기술의 상용화를 위해서는 막대한 개발 투자비에 대한 정부의 지속적인 지원과 산·학·연의 긴밀한 협동체제로 선진외국과의 기술격차를 단기간에 줄이는 노력이 어느때 보다 요구되고 있다. 