

고분자 전해질막 연료전지 현황 및 최근 연구동향

김창수

1. 서론

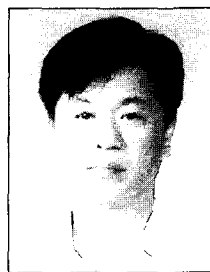
최근 수많은 R&D 활동으로 인해 전 세계적으로 경제가 급속도로 증가하여 왔다. 또한 전문가들은 매년 1.2~2%의 속도로 전 세계의 인구는 증가하고 있으며 이로 인하여 21세기 중반쯤엔 현 인구의 두 배가 될 것이라 예측하고 있다. 이러한 결과로 전 세계적으로 에너지의 소모량이 급증할 것으로 예상되지만, 주 수요 에너지인 전기나 운송을 위한 동력은 화석 연료로부터 생산되는 정유에만 의존하고 있는 실정이다. 하지만 이러한 화석연료는 중동의 몇 개 국가에서만 생산될 뿐만 아니라 그 보유량도 한정되어 있다. 이러한 관점에서 볼 때, 우리는 가까운 미래에 이러한 에너지 수급 문제를 반드시 해결해야 한다. 이를 위해서는 재생 가능하며 환경 친화적인 에너지 기술의 개발이 시급한 실정이다.¹

현재 연료전지는 앞서 언급한 청정에너지 기술의 요구를 충족시켜줄 유망한 해결책으로 각광을 받고 있다. 특히 고분자 연료전지의 연구 개발이 급증하고 있는 실정이다. 고분자 연료전지는 수소를 연료로 사용하고 공기 중 산소가 각각 양극과 음극에서 전기화학적 반응을 일으켜 전기와 열을 생산해내는 에너지 전환 기기이다. 이러한 고분자 연료전지는 양극에서 수소가 산화되어 수소이온으로 변하고, 고분자 전해질막을 통해 음극으로 이동한 수소이온은 공기 중의 산소와 결합하여 물을 생성해 내는 환경 친화적 기술이라 할 수 있다. 또한 기존의 열기관 시스템과 비교하여 보았을 때 고분자 연료전지의 특징으로는 높은 에너지 전환율과 오염물질이 배출되지 않는다는 것

이다. 따라서 앞으로 고분자 연료전지는 휴대용, 군사용, 수송용 및 정지용 등 광범위한 응용성을 가질 것으로 예상된다. 특히 미국, 일본, 유럽의 선진국을 중심으로 막대한 예산을 투자한 연료전지 개발 프로그램을 시행하고 있으며 전 세계적으로도 고분자 연료전지 분야에 투자가 집중되고 있는 현실이다.²

고분자 연료전지는 (i) 전극, 고분자 전해질막, 분리판으로 구성되어 있는 스택, (ii) 가압 저장 탱크, 개질기 및 디스펜서와 같은 연료공급 시스템, (iii) 전원 조정 장치, 펌프, 압축기와 같은 주변 장치로 크게 세 부분으로 나뉜다. 현재까지는 전해질막-전극 어셈블리, 분리판, 기체확산층 등으로 구성되어 있는 스택 내부의 요소 기술 개발에 집중되어져 왔다. 하지만 최근에는 고분자 연료전지의 상용화를 위하여 수소 공급 인프라 구축 및 통합 기술에도 많은 관심이 집중되고 있다.³

본 고에서는 이러한 고분자 연료전지의 국내외 현황과 연구동향을 세밀하게 살펴보고 고분자 전해질막 연구자에게 고분자 연료전지에 대한 전반적인 이



김창수

1977 연세대학교 요업공학과 (학사)
 1980 연세대학교 요업공학과 (석사)
 1982~ Argonne National Laboratory
 1983 객원연구원
 1994 한국과학기술원 재료공학과 (박사)
 1980~ 한국에너지기술연구원 책임연구원
 현재 부장

Recent R & D Status of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell

한국에너지기술연구원 (Chang-Soo Kim, Korea Institute of Energy Research, Fuel Cell Research Center, 71-2, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea) e-mail: cskim@kier.re.kr

해를 도모하여 앞으로 나아가야 할 고분자 전해질막의 연구 개발 방향을 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1 고분자 연료전지의 특징 (표 1)

고분자 연료전지란 제조된 수소의 화학에너지를 전기화학반응에 의해 전기에너지로 직접 변환하는 발전장치에 관한 기술로서, 기존의 발전기술 보다 높은 발전효율 그리고 공해물질 배출을 줄이면서 전기와 열을 동시에 생산 가능하다 (그림 1).

2.1.1 구성요소별 (그림 2)

- ① 스택 : 전해질, 촉매, 전극, 막전극접합체, 기체확산층, 분리판, 개스킷

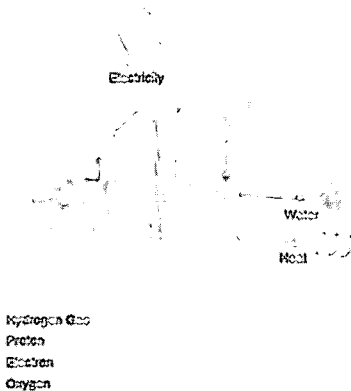






그림 1. 고분자전해질막 연료전지 (polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)의 원리.

표 1. 고분자 연료전지의 특징

종류	고분자전해질형 (PEMFC)
전해질	이온교환막
작동온도	60~80 °C
연료	H ₂
용도	IT용, 가정용, 자동차용, 분산전원

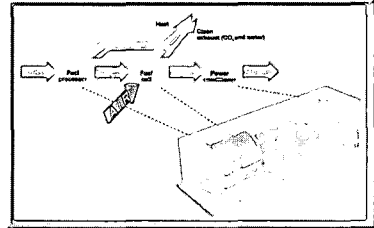
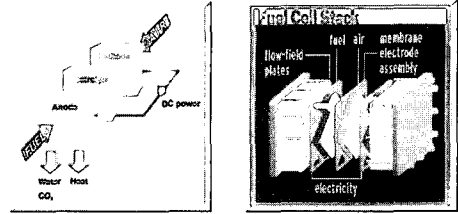


그림 2. 연료전지의 구성요소.

- ② 연료공급부 : 촉매, 버너, 개질기, 열교환기
- ③ 전원처리부 : 컨버터, 인버터
- ④ 주변기기 (BOP) : 펌프, 블로우어, 컴프레서, 액츄에이터, 센서, 제어부

2.1.2 특징

- 연료전지는 기존의 에너지 변환 방식과는 달리 화학에너지를 전기에너지로 직접 변환함으로써 고효율, 고출력, 무공해 및 무소음의 특징을 갖는 열병합 발전 시스템
- 공해물질의 배출이 낮다는 점에서 환경친화적이라 할 수 있고 그 중요성이 점점 커지고 있음
- 또한 연료전지 시스템은 앞으로 예상되는 급격한 전력 및 에너지 소비 증가에 따른 에너지 고갈과 점점 더 심각해지는 환경 문제를 해결할 수 있는 청정에너지원으로서 부각되고 있는 상황임
- 연료전지 작동원리 : 수소와 산소의 반응에 의해 연소과정 없이 전기화학적 반응에 의해 전기를 발생시키고 반응의 결과로서 물과 열만이 부산물로 생성됨
- 연료 중 산소는 공기를 공급하여 해결하고 수소는 재생 에너지원을 이용하여 전기 분해에 의해 얻어질 수도 있음
- 또한 탄화수소 계통의 연료를 이용하여 수소를 생성할 수 있는데 이 경우에는 부산물로 CO₂가 발생할 수 있으나, 종래의 열기관에 비해 에너지 효율이 높기 때문에 그만큼 CO₂의 배출량이 억제될 수 있음
- 또한 종래의 열기관의 연소과정에서 발생하는 질소산화물, 황산화물 등과 매연 등의 유해물질도

거의 발생하지 않는 장점이 있음

2.1.3 연료전지 응용제품별 특징

그림 3에서 나타난 바와 같이 고분자 연료전지는 다양한 응용성을 가지고 있음

① 이동형 연료전지의 특징

- 1990년대까지는 개발이 거의 진행되지 않았으나 최근 3년간 고분자 연료전지를 소형 및 휴대용 전원 분야로 적용하기 위한 움직임이 본격화되고 있음
- 이동용 전원은 연료전지 기술로서 상업화하여 시장에 나오는 진정한 첫 번째 제품이 될 것으로 기대됨
- 이동형 연료전지는 **그림 4**에서와 같이 대부분 PEMFC와 DMFC 기술이 사용되었으며, 수 MW~수W급을 위해서는 직접 메탄올을 연료로 사용하는 DMFC 기술이, 수W~수십W급의 기기를 위해서는 소형 개질장치를 가진 PEMFC 기술이 시장을 점유할 것으로 생각됨
- 실제 상업화 측면에서 보면 대부분의 가전회사들이 대량생산을 목표로 참여하고 있는 일본이 가장 적극적이라고 볼 수 있음
- 일본은 2003년 3월 소형 연료전지를 위한 표준

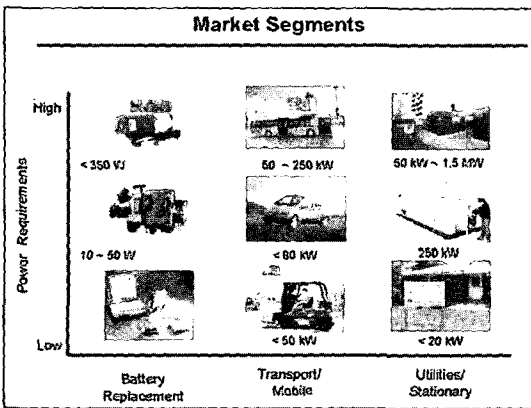


그림 3. 응용제품별 연료전지 분야.

Technology Type, Portable, by number of systems

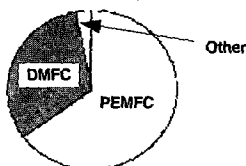


그림 4. 이동형 전원에 적용된 연료전지 기술의 분포.

을 만들려는 모임도 가지고 정부에서는 보조금 지급을 계획하고 있음

- 기존의 배터리 시장과 직접적으로 경쟁이 되는 분야
- 기반기술의 개발과 상업화에 대한 확신이 서면 이들 회사들이 주도적으로 이끌어 나갈 수 있는 분야임
- 개발초기에 정부의 주도에 의해 어느 정도 기초를 다져주면 가장 먼저 산업계로 이관될 분야로 전망됨
- 상용화를 위해서는 연료전지 측면에서 가격 절감, 성능향상, 안정성 및 안전성 확보 등의 해결해야 할 문제가 여전히 존재하고 있음
- 그러나 관련 기술은 이미 상용화에 매우 가까이 접근해 있고, 조만간 해결될 수 있을 것으로 예상됨
- 휴대용 연료전지의 경우는 안정적인 연료(수소)의 공급이 상용화를 위한 선결문제로 인식되고 있음
- 연료공급부 상용화 선결 조건 : 질량기준 에너지 밀도, 부피기준 에너지 밀도, 안전, 빠른 재충전 시간, 수월한 재충전/수소에 대한 인프라 구조, 낮은 가격 등

② 분산전원용 연료전지의 특징⁴

- 분산전원용 연료전지는 초기에 발전소의 전력을 일부 대체하려는 목적으로 주로 수백 kW급의 대형 시스템을 개발하였음 (**그림 5**).
- 고분자 연료전지의 경우 :
 - 전류밀도 및 출력밀도가 크며 저온 운전으로 설치 장소의 제약이 적음
 - 설비 구조가 단순하여 소형 시스템 구성이 용이.
 - 기동 시간이 짧은 동시에 부하 변화에 대한 응답특성이 빠름
 - 전해질로 고분자 막을 사용하므로 부식문제가

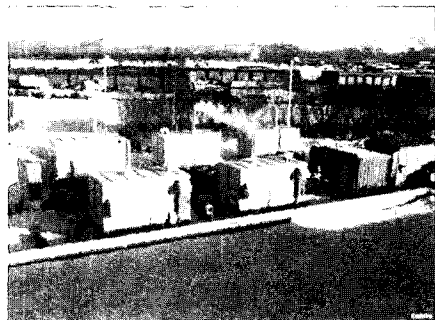


그림 5. 분산전원용 연료전지 시스템 실증실험.

적으며 전해질 보충이 필요 없음

- 아직은 내구성과 가격 면에서 더 개발이 필요함.
- 분산전원에 있어 연료전지의 가장 큰 경쟁자로는 마이크로 가스터빈 임
- On-site용 같은 대형 시스템의 경우 현재 위에서 열거한 여러 연료전지들이 가격이나 내구성 면에서 우위를 점하기 힘든 상황
- 장기적으로 많은 문제점들을 해결해야만 경쟁이 가능할 것으로 전망
- 종합하면, 주택용과 상업용 연료전지의 개발에 우선적으로 집중을 해야 할 것임
- 현재 전 세계적으로도 주택용을 가장 활발하게 개발하고 있으며 상업화도 가장 먼저 이루어질 것으로 전망됨.
- ③ 수송용 연료전지의 특징
- 위에서 설명한 여러 가지 장점으로 인해 고분자 연료전지만을 이용
- 차량의 운행환경 및 설계 요구조건에 따라 80 kW 내외의 출력을 나타내는 연료전지 기술의 개발이 필요
- 기존의 내연기관과 비교하여 충분한 경쟁력을 확보하기 위하여 승용차라는 제한된 공간에서 차량의 구동에 필요한 동력을 제공할 수 있는 고출력 밀도화를 위한 기술개발 필요
- 혹서/혹한 등의 다양한 환경조건 및 사용의 편의성과 안정성을 확보하기 위한 폭넓은 운전조건을 수용할 수 있는 기술을 확보해야 함 (그림 6)
- 자동차의 수명을 보증하기 위한 내구성 확보 기술

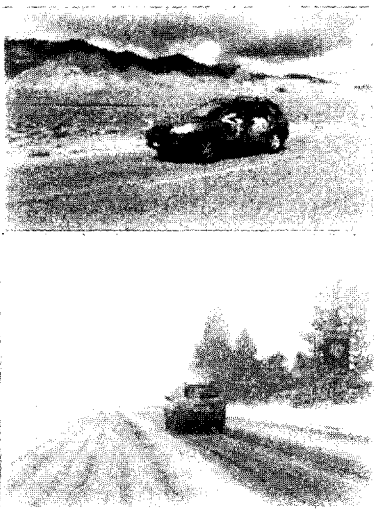


그림 6. 현대자동차 혹서/혹한 실험.

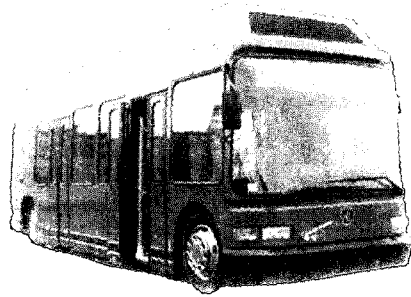


그림 7. 연료전지 버스.

및 가격 경쟁력을 확보할 수 있는 가격 절감 기술의 형태로 개발이 진행되어야 함

- 연료전지 버스: 도심 공기 오염 문제를 해결하고 화석연료 에너지원으로부터 다변화를 이룰 수 있는 기술로 주목받고 있음 (그림 7)
- 연료전지 버스는 그 사용 환경특성에 따라 200 kW 내외의 출력을 확보함과 동시에 승용차용 고분자 연료전지에 비해 우수한 내구성을 확보할 수 있는 연료전지기술의 개발이 필요함

2.2 고분자 연료전지 기술개발의 필요성

- 경제성장에 따른 에너지 사용의 급증으로 인하여 생기는 자원의 고갈과 환경문제를 심각하게 고려 시기 도래하였음
- 21세기 우리나라는 고유가 시대 및 자원의 무기화에 따른 에너지 공급 불안정성에 대비해야 하며, 동시에 에너지 사용에 수반되는 환경피해 및 지구 온난화에 대비하면서 지속적인 경제 성장을 해야 하는 과제가 주어진
- 이러한 과제는 서로가 유기적 관계를 갖고 있어서 어느 한 가지만 해결된다고 될 일이 아님
- 기존의 화석 에너지를 효율적으로 사용하는 방안에 더해 비화석 연료를 사용하여야 해결할 수 있는 문제임
- 이러한 점에서 에너지 기술의 중요성이 점차 강조되고 있으며, 화석 연료가 아닌 청정에너지인 수소에너지 사용의 중요성이 부각되고 있음
- 미래 에너지인 수소 에너지를 이용하는 기술 중 가장 효과적이고 경제적인 방법은 연료전지 발전 기술임
- 연료전지는 전기를 생산하는 효율이 40~50%로 높으며, 반응 폐열을 이용하면 총 효율은 70% 이상임
- 더욱이 전기 화학적인 반응에 의해 전기를 생산

하므로 공해물질을 배출하지 않는 무공해 발전소가 됨

- 그러므로 수소 에너지를 연료로 하는 연료전지 발전은 21세기 에너지 문제를 일시에 해결할 수 있는 신기술임

2.3 국내외 고분자 연료전지 현황

2.3.1 국내의 경우

- 80년대 중반부터 연료전지에 대한 기초연구를 실행해왔으며 88년도 대체에너지 개발촉진법에 따라 본격적인 기술개발 수행.
- 연료전지 기술개발투자 현황 ('88~2002)
 - 기술개발투자비 707억원 (정부 368억원, 민간 339억원)지원

2.3.1.1 이동용 연료전지

- 대형 발전소 대체와 자동차 및 분산전원용을 위한 연료전지 개발은 지금까지 정부의 지원을 받아서 수행되어 왔지만, IT 기기와 같은 분야에 적용하기 위한 소형 연료전지의 개발은 활발하지 않았음
- 한국에너지기술연구원: 파기부의 국가지정연구실 사업을 통하여 소형 이동전원용 연료전지 개발을 수행하여, PEMFC 기술을 소형기기에 적용하기 위한 기술을 축적하고 있음
- 그 외: 광주과학기술원, 서울대, 연세대 등에서 촉매, 전해질막, MEA 등에 대한 기초 연구가 진행 중

2.3.1.2 분산전원용 연료전지

- 국내에서는 파기부나 산자부의 주관으로 진행 중
- 한국가스공사: 1994년부터 1996년까지 상용제품으로 구성한 1 kW급 고분자 연료전지를 운전
- 한국에너지기술연구원
 - 1996년: 2 kW급 고분자 연료전지 스택 개발
 - 1999년: 메탄올을 연료로 사용하는 주택용 5 kW급 고분자 연료전지 스택 및 시스템을 개발
 - 2001년: 국내 최초로 도시가스를 연료로 이용하는 compact화된 주택용 5kW급 연료전지 시스템을 LG-Caltex와 공동으로 개발, 운전
 - 2002년~: (주)세티와 정부과제로 소형화, 자동화된 3 kW급 가정용 연료전지 시스템을 개발중
- KIST
 - 1999년 kW급 PEMFC 시스템을 개발
- (주)세티: 2000년에 가정용 연료전지 시스템을 상용화하기 위한 연료전지 전문 벤처회사인으로 설립되어 미국의 연료전지 기술 선도 회사인 Dais-Analytic Corp.과 공동으로 본격적으로 가정용

연료전지 시스템을 개발 중

- Fuel Cell Power: 2001년에 스택 부품인 MEA를 개발하여 상용화를 목표로 한 벤처회사가 설립
- (주) LG-Caltex: 1989년부터 1999년까지 40 kW 및 50 kW 인산형 연료전지 발전 시스템 개발을 추진한 바 있고, 인산형 연료전지에서 축적된 역량을 바탕으로 자체적으로 고분자 연료전지를 개발 중
- (주)한국타이어: 국책과제의 세부과제로서 연료전지용 몰딩 분리판 시제품 제작을 추진 중

2.3.1.3 수송용 연료전지

- 1996년~: 한국에너지기술연구원과 KIST에서 기반기술을 연구
- 선도기술개발 사업 (연료전지 자동차 개발)
 - 1단계 (1998. 11~2000. 10)
 - 10 kW 고분자 연료전지 스택 개발
 - 대우자동차와 한국에너지기술연구원이 5 kW 스택 2기를 연결한 10 kW급 스택 및 이를 이용한 연료전지/배터리 하이브리드 자동차 (레조)를 개발
 - 현대자동차와 한국과학기술연구원이 10 kW급 스택 및 이를 이용한 연료전지/배터리 하이브리드 자동차 (스포티지)를 개발
 - 2단계 (2000.11~2002.10)
 - 25 kW 연료전지 차량 개발을 목표, 현대자동차와 한국과학기술연구원 참여
- 2000년 11월 현대자동차는 자체 프로그램으로 UTC의 연료전지를 이용하여 75 kW급 연료전지 자동차를 개발하여 주행시험을 수행 중에 있으며, 캘리포니아 연료전지 파트너쉽 (CAFPCP)에 가입하여 연료전지 자동차를 시범운행 중

2.3.2 국외의 경우

2.3.2.1 정책 동향 (표 2)

- 미국의 경우, 1960년대부터 정부 주도로 연료전지 개발 사업을 진행해 왔으며, 현재 전력사업용은 Vision 21, 수송용은 PNGV, 이동용 및 군수용은 DARPA 프로그램으로 개발 추진 중임. 그 결과, 현재는 모든 종류의 연료전지가 상용화 prototype의 개발을 완료하고 실증실험을 진행하는 중임
- 일본의 경우, 1980년부터 본격적인 연료전지 개발을 정부 및 민간 합동으로 추진하여 왔고 현재는 New Sunshine 프로그램으로 추진 중
- 유럽은 각 국의 정부보다는 EU의 개발 프로그램

(Joule)을 활용하여 각 국가가 연합하여 연료전지 기술을 개발하고 있음

- 유럽의 기술개발 전략은 연료전지 스택은 미국으로부터 도입하고 주변 시스템 기술은 중점 개발하여 상용 제품을 제작하는 것임

2.3.2.2 분야별 기술 현황

① 이동용 연료전지


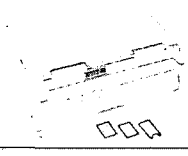

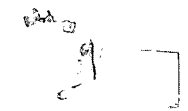
- 이동용 연료전지 연구 개발에서 현재 가장 활발한

표 2. 주요선진국의 연료전지개발 프로그램개발

구분	미국	일본	유럽
Program 명	· 전력사업용 Vision21 · 연료전지자동차 · FreedomCAR · 이동용전원 DARPA	· New Sunshine Program	Joule Program
본격 추진시점	1967년	1980년대	1989년
예산	*\$144.4million(2003)	**\$188 million(2002)	\$27.8 million ('99~'02)
추진기구	DOE NREL	NEDO	EC, RWE
주요내용	· Prototype 개발완료하고 실증시험을 진행 중 · 정부는 개발자금은 축소하고 보급지원금확대 추세	· 2000년까지 MCFC에 개발 차중 · 정지형, 수송용 고분자연료전지 개발보급 10개년 개발 착수	· 시스템기술에 중점 개발 · 각국가가 연합하여 개발

* PEMFC : \$97.4million, MCFC + SOFC : \$47million.
** PEMFC : \$156million, MCFC + SOFC : \$32million.

표 3. 주요 이동형 전원 관련 회사들의 연구현황

회사	개발제품	연료전지 종류	Power	Fuel	상용화 계획
Ball Aerospace	PPS-50 	PEMFC	50W	H ₂	군용으로 사용중
Casio Computer	Prototype PEMFC for Portable Devices 	PEMFC	-	MeOH	2004년
Coleman Powermate (with Ballard)	AirGen 	PEMFC	1kW	H ₂	판매중 US\$5,995
Voller Energy	VE10, VE100, VE1000 	PEMFC	10W, 100W, 1kW	H ₂	판매중

지역은 북미 (주로 미국)이지만 북미 회사들은 대부분은 정부 지원 프로그램에 참여하고 있고 프로젝트 기반으로 단지 몇 개의 시제품만을 만들었음

- 반면에, 거의 모든 일본 회사들은 (주로 배터리와 전자기기 업체들) 일반 소비자를 위해 대량 생산을 계획하고 있음
- 관련된 회사로는 볼 에어로스페이스 (50 W와 100 W 생산, 더 작은 시스템 연구 중); 스마트 퓨얼셀 (직접메탄올 연료전지 시스템, 100 W 미만); 유아사 (100 W 직접메탄올 연료전지 시스템) 및 일본 가전업체들 (캐논, 카시오, 후지쯔, 히다찌, 산요, 샤프, 소니, 도시바)로서 이들의 연구현황을 표 3에 정리하였음
- Jadoo Power Systems는 고분자 연료전지를 이용한 휴대용 전원공급 장치를 개발하고 있으며 천연가스 파이프라인을 감시하고 원격 측정하는 시스템 및 전문가용 캠코더에 사용하는 연료전지도 개발하고 있음 (그림 8)
- Ballard Power Systems는 텔레비전과 VCR의 구동에 이용된 100 W 시스템을 포함하여 많은 수의 휴대용 연료전지 시스템을 시범운전
- 현재 1.2 kW Nexa 시스템의 상업화에 집중하고 있는데 이것은 다양한 수요자의 욕구에 따라

OEM 방식으로 공급하려고 고안됨

- 첫 번째로 Nexa를 채용한 제품인 AirGen은 Coleman Powermate에 의해 개발된 휴대용 전력 공급 장치로, 휴대용 또는 비상전원용으로 사용하려고 고안되었으며 현재는 고압의 실린더로 수소를 공급하고 있지만 곧 금속수소화물 용기로 대체할 예정임 (그림 9)
- 카시오는 노트북과 PDA에 사용할 메탄올 개질기를 이용한 고분자 연료전지를 개발 중
- 2002년에 카시오 노트북 (Cassiopeia FIVA)을 리튬 이온 배터리보다 4배나 긴 20시간 이상을 운전할 수 있는 시제품을 선보였음
- 카시오의 연료전지는 고유한 메탄올 개질기를 사용하는데 실리콘 웨이퍼 박막위에 담지되었고 카시오의 반도체 마이크로 공정기술이 사용되었음 (그림 10)
- 마이크로 전자 공정을 이용하여 고분자 연료전지를 개발하고 있고 휴대용 기기를 위한 소형 수소 마이크로 연료전지를 개발하는 280만 유로 규모의 유럽연합 프로그램을 주도
- 독일의 Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE)는 여러 개의 시제품을 개발하고 시범운전 하였는데 대표적인 것이 LG Caltex Oil (한국) 및 한미 조인트 벤처인 Clean Energy



그림 8. Jadoo에서 개발한 연료전지가 장착된 캠코더를 작동중인 부시대통령.



그림 9. 백업전원으로 사용중인 AirGen 시스템.

Technologies Inc (CETI)와 공동으로 개발한 연료전지 노트북인데 2002년에 선보였음

② 분산전원용 연료전지 (표 4, 5)⁴

- 분산전원용 연료전지는 그림 11에서와 같이 대부분 PEMFC가 적용되었으며 일부 SOFC 기술이 사용되었음
- 소형 분산형 전원의 경우 연료전지 시스템의 가격저하 및 수명향상이 가장 큰 과제로 인식되고 있으며 대부분 실증단계에 머물러 있으며 이러한 문제로 인하여 최근에는 주택용 시장으로부터 백업용, 무정전 및 원격용 전원 쪽으로 관심이 전환되고 있음

③ 수송용 연료전지 (표 6)

- 수송용 연료전지로는 고분자 전해질 연료전지가 출력밀도, 상온 작동성, 내충격성, 수명 등이 다른 연료전지에 비해 우수하므로 현재 가장 많이 이용되고 있음
- 현재, 개질기 성능 향상 및 원가 절감에 의한 대량생산 기술을 개발을 위한 연구가 진행 중임
- 1955년 미국의 General Electric (GE)에서 고분자전해질 연료전지에 대한 연구를 처음 시작하였고 1962년 Gemini Space Program에 의해 우

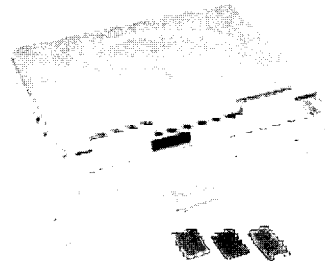


그림 10. Casio에서 개발한 노트북용 고분자연료전지 시제품.

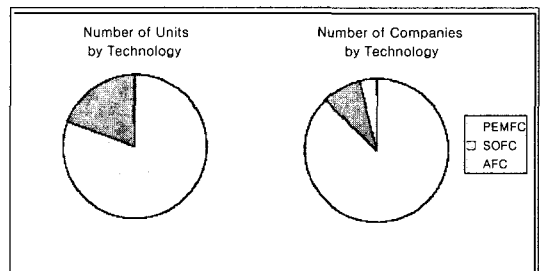


그림 11. 소형 분산전원용 연료전지 시스템의 기술별 분포.

주선에 사용하였으며 GE 기술은 1985년 United Technology Corp.(UTC) /Hamilton Standard Division으로 이전되었고 이후 Ergenics Power Systems Inc.(EPSI), Treadwell, Los Alamos National Lab. (LANL), International Fuel Cells (IFC), General Motors (GM), Giner Inc., Texas A&M, Analytic Power 등이 고분자전해질 연료전지 개발을 시작하였음

- 1993년 DOE는 GM, Ford, Chrysler 등의 자동차

회사, LANL, Argonne National Laboratory (ANL) 등의 연구기관, 기업연구소, 대학 등과 함께 차세대자동차 개발을 위하여 총연구비 3억\$, 총연구기간 10년 (1993년~2002년)의 PNGV 프로그램을 시작하였음

- 현재 Ballard는 연료전지 버스를 자체 제작하고 있을 뿐 아니라 Daimler Chrysler, GM, Ford, Honda, Nissan, Volkswagon, Volvo, Hitachi, Matsushita Electric Works, GPU International

표 4. 소형 분산전원용 연료전지 시스템의 개발현황

회사	개발제품	연료전지 종류	주요내용	상용화 계획
Avista Labs	Independence 1000	PEMFC	·출력: 1 kW급 ·연료: 산업용 수소 ·크기: 0.5×0.4×0.6 m, 66 kg ·운전: 수천시간 ·용도: 백업전원용 ·특징: MEA, 카트리지 모듈 적용 발전효율: 36~40%	시제품 판매 중 US\$8,050
Ballard Power Systems (Ebara)	1kW cogeneration stationary system	PEMFC	·출력: 1 kW급 ·연료: NG (개질기: Tokyo Gas) ·크기: 0.9X0.9X0.9m ·운전: 40,000시간목표 ·용도: 가정용 열병합발전 ·특징: 발전효율: 34%, 열효율: 58% 총효율: 92%	2004년 US\$4,000 예상
Nippon Oil	ENEOS	PEMFC	·출력: 1 kW급 ·연료: LPG ·크기: 1×0.9×0.5 m ·용도: 가정용, 열병합발전 ·특징: 발전효율: 32%, 열효율: 40% 총효율: 72%	2005년 US\$4,200 목표
NUVERA Fuel Cells	AVANTI	PEMFC	·출력: 3.7 kW급 ·연료: NG ·크기: 0.7×0.8×1.5 m, 431 kg ·운전: 1000시간보증 ·용도: 가정용, 열병합발전 ·특징: 발전효율: 31.5%	Prototype type 실증시험중
Plug Power	GenCore	PEMFC	·출력: 5kW급 ·연료: 수소가스 ·크기: 1.1×0.7×1.5 m, 180 kg ·용도: 백업전원용	시험중
Sanyo Electric	1kW PEMFC System	PEMFC	·출력: 1 kW급 ·연료: NG ·운전: 40,000시간목표 ·용도: 가정용, 열병합발전 ·특징: 발전효율: 35%목표	2005년 US\$4,000 목표
Toshiba International Fuel Cells (TIFC)	5kW PEMFC System	PEMFC	·출력: 5 kW급 ·연료: NG/LPG ·크기: 1.0×0.7×1.7 m, 550 kg ·용도: 상업용/가정용 ·특징: UTC 스택 및 Hydrogen sources, 부분산화개질기 적용	2004년 US\$ 25,000 목표

GEC Alsthom 등과 같은 회사에 자동차용 혹은 발전용으로 스택을 공급해주고 있음

- 수송형 연료전지 부문으로 일본은 PEFC R&D, We-Net 외 5개 프로그램이 운영 중이며 통산성 (METI) 산하 신에너지 개발기구 (NEDO)를 중

심으로 단계별로 진행하고 있음

- 일본에너지연구진흥협회 (ENAA)의 주관으로 연료전지자동차 주행시험 (2002년~2005년)이 진행 중이며, New H₂ Project(safety technology)는 2003년 4월에 시작되어서 2007년 말까

표 5. 대형 분산전원용 연료전지 시스템의 개발현황

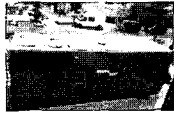
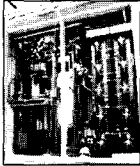
회사	개발시스템		연료전지 종류	주요내용	상용화 계획
Ballard Power Systems	250 kW Stationary Power Generator		PEMFC	· 출력 : 250kW급 · 연료 : NG · 용도 : 산업용 · 특징 : 여러지역에서 field, test 중	시험 운전 중
Hydrogenics	HySTAT		PEMFC	· 출력 : 50kW급 · 연료 : NG · 용도 : 산업용 · 특징 : 캐나다 무역센터에서 실증시험 예정	시험 운전 중

표 6. 국내의 주요 연료전지 자동차 개발현황

회사	개발차량		연료	주요내용	상용화 계획
현대자동차	산타페 (FCHEV)		압축수소 (350bar)	· 출력 : 75 kW급(hybrid) 20 kW Ni-MH battery · 최고속도 : 125km/h · 주행거리 : 160 km	2010년 국산화
GM	HydroGen3		액체수소 (4.6kg) 압축수소 (700bar 3.2kg)	· 출력 : 94 kW급(hybrid) · 시동 : 30초 · 최고속도 : 160 km/h · 주행거리 : 400 km (액체수소) 270 km (압축수소)	2004년
Ford	Focus FCV-hybrid		압축수소 (350bar)	· 출력 : 65 kW급(hybrid) Ballard PEMFC stack Sanyo Ni-MH battery · 최고속도 : 128 km/h · 주행거리 : 320 km	2004년
Daimler Chrysler	NECAR-5		MeOH	· 출력 : 75 kW급 · 최고속도 : 150 km/h · 주행거리 : 500km	2004년
Toyota	FCH-4		압축수소 (250bar)	· 출력 : 80 kW급(hybrid) · 최고속도 : 150 km/h · 주행거리 : 250 km	2003년
Honda	FCX		압축수소 (340bar)	· 출력 : 78 kW급 · 최고속도 : 150 km/h · 주행거리 : 355 km	2004년
Nissan	X-TRAIL FCV		압축수소 (350bar)	· 출력 : 75 kW급(hybrid) UTC PEMFC stack Li-ion battery · 최고속도 : 125 km/h	2005년

지 진행될 예정임

- 유럽은 JOULE Program을 1993년부터 시작하였으며 PSA, 르노, Volvo, De Norra 등이 참여하였음
- 2002년부터 6년간 프레임워크 6차 프로그램을 진행 중이며 정지형 및 자동차용 연료전지 개발, 저 코스트화와 연료전지용 첨단소재 개발, 수소 제조 및 공급인프라 등에 관련기술제조 등을 목표 하고 있음

2.3 연료전지의 기술적 현황 및 발전 방향

(가) 기술적 측면

- 일부 핵심기술에 있어서는 선진국에 근접한 수준에 도달
- 전반적으로 볼 때 부족한 기술들이 많음
- 스택에 대한 기술은 상당히 보유
- 시스템 측면에서 많은 경험이 없음

(나) 상용화 측면

- 시스템의 장기운전 경험이 없음
- 여러 가지 부품에 대한 양산라인이 없음
- 성능에 대한 신뢰성이 부족
- 전 세계적으로 상업화 된 적이 없어 시스템의 표준화가 이루어지지 않았음
- 앞으로 이루어질 표준화 작업에 적극적으로 참여해야 함

(다) 연료전지 스택 관련 기본성능 향상 측면

- 성능 : 출력 밀도의 향상 필요
- 내구성 : 내구성 향상 필요
 - 자동차용 5,000 시간 이상, 기동정지 3~6 만회(10년)
 - 분산전원용 40,000시간 이상
- 이온 교환막 : 이온 교환막의 내고온화 · 저가습화 · 무가습화 · 내구성 향상
- 촉매 : 백금 대체 촉매의 개발
- 분리판 : 분리판의 경량화 · 박형화 등

2.3.1 이동용 연료전지

① 경제성 확보

- 소형 이동용 전원으로 개발 중인 PEMFC의 경우, 요소기술 개발과 더불어 경제성 확보를 위한 기술의 혁신이 요구됨

② 고성능 저가 요소기술

- 촉매 제조 기술: 내피독성, 백금 담지량 감소, 담체
- 고성능 저가 membrane 개발
- 이온전도도, 안정성, crossover 방지
- 상용 Nafion 보다 싼 저가의 막 개발 필요

③ 주변기술

- 패키징 및 주변 장치 기술

④ 고성능 개질기

- compact system 설계 및 운영기술 필요
- 반응부산물 처리 기술 요구

⑤ 표준화 작업 및 안전 코드

- 부품 표준화
- 수소 및 메탄을 연료의 안전성 코드

2.3.2 분산전원용 연료전지

① 초기 개발단계

- 산업용 또는 발전용의 경우 인산형 연료전지, 용융탄산염 연료전지, 고체산화물 연료전지를 초기에 주로 개발하여옴
- 각각이 보유한 단점 때문에 아직 상업화에 성공하지 못함
- 현재는 개발이 중단되거나 몇 개의 회사만이 개발하고 있는 형편임

② 고분자 연료전지

- 현재 전 세계적으로 가장 많이 투자가 집중되고 있는 분야
- 선두주자인 발라드라는 회사에서 250 kW 시스템까지 만들어서 실증 시험 중
- 다른 연료전지와 마찬가지로 대용량 시스템의 경우는 연료전지가 아닌 마이크로 가스터빈과 같은 타 경쟁기술과의 경쟁에서 우위를 점하기가 힘들 것으로 보고 있음
- 고분자 연료전지는 주택용이 가장 큰 잠재시장
- 아직도 가격이 높을 뿐 아니라 시스템의 수명이 너무 짧다는 문제점 내포

2.3.3 수송용 연료전지

- 수송용 연료전지는 이동형과 분산전원용에 비해 가장 요구조건이 까다로운 분야
- 세부기술적인 측면에서의 문제점은 다음과 같음

① 고분자 전해질막 관련 기술

- 낮은 이온전도도
- 높은 팽창율 및 기체 투과도
- 낮은 기계적 안정성, 열적 안정성 및 내구성
- 폭 넓은 사용 조건 (습도, 온도, 부하변동 등)에 대한 저항성
- 높은 제조 가격
- 고기능성(고온(>100 °C) 및 무가습) 막 성형기술
- 강화막 제조기술
- 막의 재활용 및 폐기 관련 기술

② MEA 관련 기술

- 백금촉매의 고가격 (백금 촉매 사용량 저감기술)
- 대면적화에 따르는 성능저하 (촉매 코팅 및 분산성 향상기술)
- 음극 및 양극의 기능별 특화에 따른 고기능성 촉매 개발
- 다기능성 GDL 제조
- Membrane/전극/GDM 계면 특성 최적화 기술
- 음극 및 양극의 최적 전극구조 및 공정 개발
- 코팅방법별 최적 전극코팅 공정 개발
- 저가의 연속 생산공정과 품질관리기술 개발
- 장기운전시의 열화현상 분석 및 수명 예측 기술 개발
- 백금 촉매 및 탄소계 구성부품의 재활용 및 폐기 관련 기술

③ 스택 관련 기술

- 분리판 소재 및 양산화 제작 기술 부족
- 스택 모듈화 기술 부족
- 균일 분배 설계 기술 미흡
- 기밀구조 설계 및 관련 구성품 제작 기술
- 기밀 구조 일체화(MEA 또는 분리판) 기술
- 스택 체결, 조립 및 유지보수 관련 기술
- 물 및 열관리기술 미흡
- 유로 및 매니폴드 설계기술 미흡
- 구성부품의 폐기 및 재활용 기술

④ 시스템 관련 기술들의 기술적 장애요인

- 공기공급계 : 고성능 고회전 Blower/Compressor 개발
 - 동력손실 최소화, 가습 최적화
- 수소공급계 : 수소이용율 증대를 통한 차량연비 향상
 - 수소 재순환 Blower 또는 Ejector 개발
 - 수소 압력 조절 장치 개발
- 열 관리계 : 저온 시동성 (-30 °C) 확보
 - 스택 발생열 냉각효율 증대 (특히, 고온에서)
 - 고성능 라디에이터 및 열교환기 개발
- 물 관리계 : 동결기 수분제거기술, 물 이용 및 평형 유지 기술
- 운전 제어 부품 개발 : 차량용 각종 센서 및 밸브 개발

⑤ 차량 관련 기술들의 기술적 장애요인

- 수소연료의 안전성 검증
- 저온 시동성 개선
- 연료전지차 전용부품 개발
- 무가습 고온 이온교환막 개발

2.4 고분자 연료전지 응용을 위한 고분자 전해질막 개발 방향⁵⁻¹¹

- 현재 고분자 연료전지에서 사용되는 고분자 전해질막은 널리 이용되는 NafionTM임
- NafionTM막은 매우 고가이며 제조 공정이 매우 복잡하고 환경적인 문제를 일으킴
- 고분자 연료전지의 작동온도는 60~80 °C로 이는 널리 사용하는 상용 고분자 전해질막인 NafionTM막이 그 이상의 온도에서는 성능이 급격하게 감소하기 때문임
- 수송용 고분자 연료전지의 응용에서 스택의 성능을 유지하기 위한 가습기 및 라디에이터의 주변 장치가 상용화에 큰 걸림돌임
- 고분자 연료전지 스택 내 공기극 쪽에서 발생한 수분이 낮은 운전 온도에서 유로에 응축 현상을 일으키며 적절한 물배출을 해주지 못할 때에는 운전 성능을 저하시킴
- 개질기를 통해 공급되는 수소 연료에는 반응 부산물로 일산화탄소가 존재하는데 이는 연료극 내에서 촉매 피독 현상을 일으킴으로써 연료전지의 수명을 단축시킴
- 고분자 연료전지의 상용화를 위하여 저가 대체막 및 고온용 전해질막의 개발이 시급함
- 개발된 대체 고분자 전해질막은 저가이어야 하며, 제조가 쉬워야 하며, MEA 제작이 용이하며, 연료전지 스택 내 환경에 견딜 정도의 기계적, 화학적 안정성을 가져야 함
- 저가 고분자 전해질막의 상용화가 가능한 고분자의 종류 : α , β , β -Trifluorostyrene based-membrane (partially or non-fluorinated), Crosslinked or noncrosslinked sulfonated polyetheretherketone membrane, Sulfonated naphthalenic polyimide membrane (non-fluorinated), Sulfonated poly(4-phenoxybenzoy-1,4-phenylene) membrane (non-fluorinated), Styrene grafted and sulfonated poly(vinylidene fluoride) membrane (partially)
- 개발된 고온용 고분자 전해질막은 150 °C 이상의 고온 및 무가습 상태에서 충분한 이온전도도 (0.05 S/cm 이상)를 가져야 하며, 제조가 쉬워야 하며, MEA 제작이 용이하며, 연료전지 스택 내 환경에 견딜 정도의 기계적, 화학적 안정성을 가져야 함
- 고온용 고분자 전해질막의 상용화가 가능한 고분자의 종류 : Acid-doped polybenzimidazoles

membrane (non-fluorinated), Base-doped sulfonated-polybenzimidazoles membrane (non-fluorinated), Imidazole-doped sulfonated poly-ether-ketone membrane (non-fluorinated), Methylbenzenesulfonate polybenzimidazoles membrane (non-fluorinated)

- 개발된 고분자 전해질막은 MEA 제조 후 단위 전지 측정을 통해 실질적인 막성능을 확인하는 것이 필수적임

3. 결론

연료전지가 차세대 에너지원의 이용 기술로서 각광을 받은 이후 많은 연구자들에 의해 연구 개발이 이루어져 왔다. 다양한 연료전지 중 고분자 연료전지는 그 기술적 장점과 넓은 응용성으로 상용화에 가장 근접해 있는 연료전지 기술이라고 할 수 있다. 실제 지난 수년간 고분자 연료전지에 대하여 산업계에서는 순수 연구개발 단계에서 실제 생산 단계로 이동하기 시작하였으며 이러한 움직임은 일반인의 관심과 정부 주도의 연구 개발 프로그램의 시행에 힘입어 일어나고 있다. 고분자 연료전지 기술의 상용화를 위하여 고분자 전해질막 개발을 포함하여

다양한 분야의 기술들이 함께 빠른 속도로 개발되어야 하며, 적극적인 기술 홍보와 환경 친화적 기술에 대한 인식 재고를 통해 최종 수요자들이 고분자 연료전지를 구매할 수 있는 환경을 조성하는 것이 필요하다고 사료된다.

참고문헌

1. C.-S. Kim, *전기기술*, **39**(2), 2 (2002).
2. C.-S. Kim, *한국물리학회지*, **12**(9), 14 (2003).
3. C.-S. Kim 외 3인, *대한전기학회 하계학술대회 논문집*, pp. 24-26 (1999).
4. C.-S. Kim 외 5인, *한국수소 및 신에너지학회 논문집*, **14**(1), 35 (2003).
5. C.-S. Kim 외 3인, *세라믹학회지*, **40**(2), 159 (2003).
6. C. S. Kim *et al.*, *J. New Mat. Electrochem. Sys.*, **2**, 121 (1999).
7. C. S. Kim *et al.*, *J. Power Sources*, **106**, 328 (2002).
8. C. S. Kim *et al.*, *Int. J. Hydro. Energ.*, **28**, 657 (2003).
9. C. S. Kim *et al.*, *J. Power Sources*, **124**, 18 (2003).
10. C. S. Kim *et al.*, *Solid State Ionics*, **160**, 309 (2003).
11. V. Mehta and J. S. Cooper, *J. Power Sources*, **114**, 32 (2003).