특 집

직접메탄올 연료전지 연구개발 동향

김상경 · 백동현

1. 서론

직접메탄올 연료전지 (direct methanol fuel cell, DMFC)는 작동의 간편성과 연료 교체의 편리함, 시스템의 간단함으로 인한 초소형화 가능성 등으로 인하여 1차, 2차 전지의 대체품으로 각광받고 있다.[1-4] DMFC는 메탄올을 직접 연료로 사용하기 때문에 수소를 연료로 사용하는 여타의 연료전지에 비하여 장점을 가지게 된다. 우선 메탄올은 구하기 쉽고 값싼 액체연료로서 에너지 밀도 (energy density)가 가솔린과 비슷하다. 수소 대신 메탄올을 사용하기 때문에 수소의 제조와 저장에 관한 문제가 사라진다. 수소 자체의 에너지 밀도는 높지만 수소를 저장하는 방법이 비효율적이어서 저장 방법까지 고려한다면 에너지 밀도가 떨어지게 된다. 또한 DMFC 시스템은 수소 사용 연료전지 대비 주변 장치가 줄어들어 시스템의 무게를 상당히 감소시킬 수 있다.

DMFC의 문제점은 연료극 (anode)에서의 반응이 수소에 비하여 느리다는 것이다. 수소의 산화는 비교적 쉽게 일어나나 메탄올의 산화는 좀더 복잡하고 반응 속도가 느리다. 이로 인하여 같은 수소를 사용하는 경우보다 출력이 낮다는 단점이 있다. 또 다른 문제점으로는 연료가 분리막을 통하여 투과한다는 것이다. 일반적으로 전해질로는 수소이온 전도성 고분자막을 주로 사용하는데 이들은 메탄올을 쉽게 흡수하게 되고 공기극 (cathode)으로 넘어간 메탄올은 공기극에서 반응하여 셀의 성능을 저하시킨다. 이러한 두가지 원인으로 인하여 수소를 사용하는 PEMFC (proton exchange membrane fuel cell)보다 성능이 낮아지게 된다. 이러한 문제들이 해결된다면 DMFC는 자동차와 같이 높은 출력을 요하는 곳에도 사용될 수 있을 것이다. 그러나 현실적으로 본다면 위와 같은 문제의 완전한 해결이 빠른 시일 내에는 어려울 것이다. 따라서 DMFC 시스템은 수 W에서 수십 W의 출력을 요구하는 응용분야에 적당할 것이며, 핸드폰, 캠코더, 노트북컴퓨터 등이 좋은 예가 될 것이다. 현재 이러

김상경

1996 한국과학기술원 화학공학과 (학사)
1998 한국과학기술원 화학공학과 (석사)
2004 한국과학기술원 생명화학공학과 (박사)
2004~현재 현재 한국에너지기술연구원, 선임연구원

백동현

1985 부산대학교 무기재료공학과 (학사)
1988 인하대학교 무기재료공학과 (석사)
1996 RWTH Aachen 에너지재료전공 (박사)
1997~현재 현재 한국에너지기술연구원, 선임연구원

R&D Status of Direct Methanol Fuel Cell
한국에너지기술연구원 신연료전지연구센터 (S. K. Kim and D. H. Peck, Korea Institute of Energy Research, Advanced Fuel Cell Research Center, 71-2, Jangdong, Yuseong, Daejeon 305-343, Korea)
e-mail: ksk@kier.re.kr, dhpeck@kier.re.kr

한 전자기기들에는 리튬이온 충전지가 널리 사용되고 있는데, DMFC가 이의 대체품이 될 것으로 기대되고 있다. 따라서 DMFC 개발 목표는 리튬이온 충전지를 대체하는 것으로 잡는다면 적당할 것이다. DMFC는 리튬이온 전지 대비 메탄올을 부어 넣기만 하면 되는 빠른 충전이 가능한 장점이 있으나 현재로서는 신뢰성, 가격 등의 개선이 필요하여 이에 대한 연구개발을 국내외에서 매진하고 있다. 또한 수십 와트에서 킬로와트 급의 이동수단용, 휴대용 전원으로의 응용이 가능하다.

DMFC의 단위전지 구성은 고분자전해질을 중심으로 하여 연료극과 공기극으로 구성된다. 연료극에서는 물과 메탄올이 반응하여 이산화탄소와 6개의 수소이온, 6개의 전자가 발생하고 연료극에서는 전해질 막을 통하여 이동되어온 수소이온과 외부회로를 통하여 이동되어온 전자가 산소를 환원시켜 물이 된다.[5]

Anode 반응 : $CH_3OH + H_2O(l) \rightleftarrows CO_2 + 6H^+ + 6e^-$

Cathode 반응 : $6H^+ + 3/2O_2 + 6e^- \rightleftarrows 3H_2O(l)$

전체반응 : $CH_3OH + 3/2O_2 \rightleftarrows CO_2 + 2H_2O(l)$,

$\Delta G° = -702.4$ kJ/mol

이때 표준 기전력은 다음과 같다.

$U° = -\Delta G°/6F = 1.21$ V

전체 반응식에서 엔탈피 변화는 $\Delta H = -726.5$ kJ/mol이다. 이것을 화학에너지라고 생각하면 화학에너지를 전기에너지로 변환하는 DMFC의 효율은 다음과 같다.

$\eta = -\Delta G°/\Delta H° = 0.97$

즉, 이론적으로는 메탄올이 가지는 화학에너지 (연소시의 엔탈피변화에 해당)의 약 100%가 전기에너지로 변환되는 것을 알 수 있다.

메탄올 1몰 (약 32 g)로부터 얻어지는 전기에너지는 자유에너지 변화와 같고, 702.4 kJ의 값은 195.1 Wh에 해당한다. 이는 1 W 소비의 휴대전화로서는 약 200시간의 연속통화가 가능하다. 1회 충전으로 연속통화 160분 가능한 리튬이온 충전지와 비교하면 메탄올 0.44 g이면 160분의 연속통화가 가능하다. 물론 이것은 이론치이고, 반응에는 메탄올 외에도 물이 필요하고 연료전지의 효율과 연료이용률 등을 고려하면 실제 시스템에서는 수배의 메탄올이 필요하다.

2. 기술개발 현황

현재 DMFC의 개발은 높은 동력을 요구하는 수십 W-kW급 이상의 이동수단용 및 정치형의 전지 개발과 비교적 낮은 동력을 요구하나 운전의 편이성 및 휴대용 동작이 가능한 수 W급 미만의 배터리 대체형 DMFC 개발로 크게 나누어져 개발되고 있다.

DMFC의 개발은 1960년대와 1970년대 Shell과 Exxon-Alsthom사에 의해 각각 황산과 알칼리 전해질을 이용하여 개발되어 졌다. 그러나 이의 연구는 매우 느린 메탄올 산화반응속도 및 연료인 메탄올의 투과 (crossover) 문제를 해결하지 못하여 스택 성능 향상의 한계점에 직면하여 큰 진전을 보지 못하였다. 1990년대 초에 고체 고분자 전해질막 (polymer electrolyte membrane, PEM)이 DMFC의 전해질로 사용되면서 DMFC의 개발은 새로운 전환점을 맞이하였다. PEM을 이용하면 액체상을 전해질로 사용하던 시스템에 비하여 운전온도를 상승시킬 수 있기 때문에 메탄올의 산화시 생성되는 부반응에 의한 백금 촉매의 활성저하를 방지하고 메탄올의 산화반응속도가 증가되며, 메탄올의 투과 (crossover)가 적어서 성능이 우수한 DMFC 개발이 가능해 졌기 때문이었다.

또한 휴대용 전자기기에 사용하기 위하여 시스템의 소형경량화, 취급하기 쉽고, 운전이 간편하며 기동과 정지가 용이하며, 진동과 충격에 강한 고체 고분자 연료전지의 시제품이 2000년대에 들어서면서 계속해서 발표되고 있다. 휴대용 연료전지 시스템으로는 메탄올의 고에너지 밀도와 저장 용이성 및 전체 시스템의 간편함 등으로 인하여 액체인 메탄올을 연료로 사용하는 직접메탄올 연료전지가 가장 활발히 개발되고 있다.

2.1 미국 및 유럽의 기술개발 현황

미국에서의 DMFC 개발은 1990년대 초 JPL, Giner사 등에서 DMFC를 이동전원 및 국방장비에 널리 사용되는 일차 및 이차전지 대체용으로 개발을 시작하여 현재에 이르고 있다. 미국 및 유럽의 DMFC 기술개발 현황을 **표 1**에 정리하였다.

이동수단용 DMFC의 개발로는 캐나다에 본사를 두고 있는 Ballard사가 DMFC를 장착한 수송용 및 이동용 전원으로 개발하기 위하여 3 kW급 1인용 승

용차를 개발하여 시운전에 성공한 적이 있으며 독일의 Daimler-Chrysler사에서도 유사한 기종을 개발하여 시운전에 성공하였다. 그리고 최근인 2004년 10월에는 독일의 Research Centre Juelich가 1.3 kW급 DMFC를 장착한 스쿠터를 개발하였다 (**그림 1(A)**). 2003년 fuel cell seminar에서는 미국의 Vectrix사가 DMFC/Battery 하이브리드 스쿠터의 시제품을 선보였다 (**그림 1(B)**). 이때 연료전지만으로는 30 km/hr의 속력을 얻었으며 hybrid 시스템으로는 0~50 km/hr의 속력을 얻는데 3.6초가 걸렸고, 주행거리는 250 km를 넘을 수 있었다. 특히 본 스쿠터는 가속력이 150 cc 또는 400 cc 급의 가솔린동력 스쿠터에 비하여 동일하거나 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

휴대기기용 DMFC로는 미국의 Manhattan Scientifics사, Polyfuel 등이 개발을 시작하여 각각 2 W급 휴대전화기용 DMFC 시작품과 메탄올 크로스 오버를 50% 이상 줄이는 새로운 멤브레인 개발과 고성능의 MEA를 시장에 내놓고 있다. Motorola사는 휴대전화기용 충전기와 PDA용 전원을 개발하였으며 (**그림 2(A)**), MTI사는 2 W급 휴대전화기용 전원 (**그림 2(B)**), 500 mW급 충전기, 20 W급의 군수용 DMFC 개발을 보고하고 있다 (**그림 2(C)**). 유럽에서는 독일의 Smart Fuel Cell사가 카메라, 노트북, PDA, 국방용으로 수 W -50 W급 DMFC 시스템 (**그림 2(D)**)을 개발하여 상용화를 위한 준비를 하고 있다.

표 1. 미국 및 유럽의 DMFC 개발 현황

국가	개발기관	용량	용도
미국, 캐나다	Jet Propulsion Lab.[6]	수 W~1 kW	배터리대체 독립전원
	Ballard[7]	3 kW	1인용 승용차
	Giner Co.[8]	50~150 W	배터리대체 독립전원
	Manhattan scientifics[9]	수 W 미만	휴대폰 배터리 전원, 충전기
	Motorola[10]	수 W 미만	휴대폰 배터리
	Polyfuel[11]	수 W	휴대용 전원
	Vectrix[12]	800W	스쿠터용 전원 개발
	Los Alamos National Lab.[13]	수 W~수십 W	군사용 배터리 대체, 휴대용 전자기기
독일	Smart fuel cell[14]	수W~수십W	휴대용, 국방용
	Daimler-Chrysler[15]	3 kW	1인용 승용차
영국	Johnson Matthey[16]		촉매개발
	Newcastle Univ.[17]		단위전지, 촉매개발
이탈리아	CNR-TAE[18]		소형 시스템개발
	Denora[19]	수W~수KW	이동전원용
이스라엘	Medis EI Ltd[20]	수 W	전자기용 배터리 대체

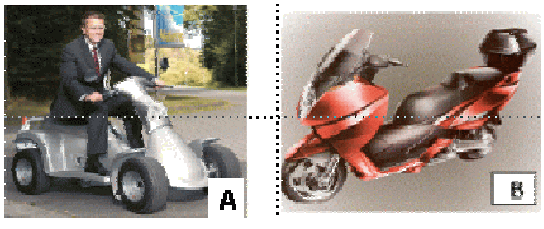


그림 1. 이동수단용 DMFC. (A) Research Centre Juelich의 1.3 kW Scooter와 (B) Vetrix사의 DMFC Scooter.

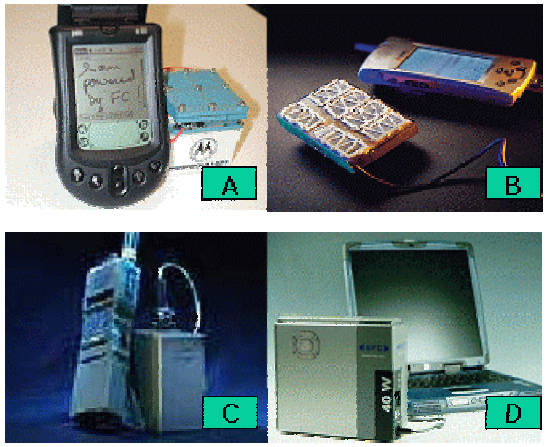
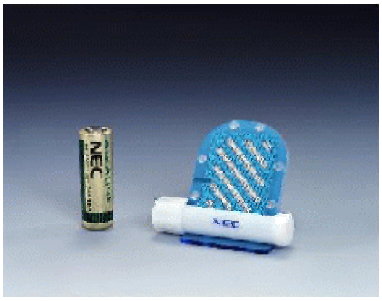


그림 2. 미국 및 유럽에서의 DMFC 개발 시제품: (A) Motorola, (B) MTI 500 mW 충전기, (C) MTI 20 W 군사용 배터리 대체, (D) Smart Fuel Cell 휴대용.

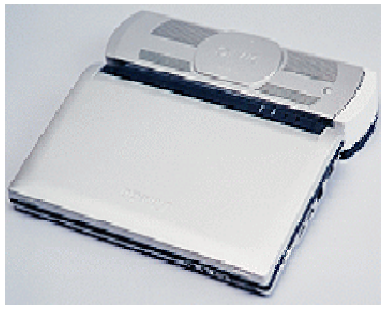
2.2 일본의 기술개발 현황

일본의 직접메탄올 연료전지 개발은 히타치 (Hitachi) 사에서 1980년대 초반부터 소형 이동용 전원에 목적을 두고 DMFC/Battery hybrid 시스템을 개발한 것이 시초이다.[21]이후 효율적인 멤브레인의 개발이 지연되면서 개발이 중단되었으나 1990년대 후반부터 휴대전자제품용 전원으로 본격적인 연구 개발을 시작하여 일부 분야에는 미국의 연구 개발을 앞서나가고 있다. 휴대전화기용 DMFC의 경우 2006년 3월까지 휴대전화기에 내장하는 타입을 KDDI와 공동 제품화할 계획이며, 노트북용의 경우에는 국제 표준의 책정 상황에 맞추어 2007년까지 특정 기종에 의존하지 않는 외장형 타입을 제품화할 예정으로 개발하고 있다.[22]

일본의 NEC는 카본나노혼을 촉매담지체로 사용하는 새로운 전극촉매를 개발하여 이를 이용하여 휴대기기용 DMFC를 개발하여 종래의 연료전지에 비해 출력이 약 20% 정도 향상시켰으며, 이를 이용하여 노트북 시장의 선점을 기획하고 있다.[23] Sony사는 2002년에 전해질로 탄소계 재료인 플러렌을 사용하여 소형 DMFC의 성능향상을 시도하고 있으며, 도시바사



(A) NEC PDA 전원 공급기



(B) Toshiba 노트북 PC

(C) Hitachi 1 W급 휴대폰용형 전원

(D) NEC 노트북 PC

그림 3. 일본에서 개발된 소형 직접메탄올 연료전지 시제품.

표 2. Toshiba 20W DMFC 구동 PC 특성

분류	특성
제품	DMFC PC
출력	평균 12 W, 최대 20 W
전압	11 V
크기	275×75×40 mm (823 cc)
중량	900 g
운전시간	평균 5시간 (50 cc 용량), 10시간 (100 cc 용량)
Cartridge 중량	120 g (100 cc), 72 g (50 cc) (Approximate)
Cartridge 크기	100 cc : 50×65×35 mm 50 cc : 33×65×35 mm

도 소형 DMFC를 이용하여 IT용 전원을 개발하여 시제품을 보이고 있다. **그림 3**은 최근 NEC 및 도시바, 히타치에서 개발한 마이크로 연료전지 및 노트북 PC의 외형이며,[24] Toshiba에서 개발한 PC용 특성은 **표 2**에 나타난 바와 같다. 또한 Sanyo도 2005년 양산을 목적으로 휴대폰용 DMFC 개발에 박차를 가하고 있다.[25] 특히 히다치에서는 CEATEC 2004 전시회에서 휴대용 연료전지 시제품을 제작한 바 있는데 1 W급 휴대전화용 외장용 (**그림 3(C)**), 2 W급 휴대정보기기 (PDA)내장형, 10 W급 노트북형 외장형 (**그림 3(D)**)의 3 종류를 출품하고 있다.

2.3 국내 기술개발 현황

국내의 DMFC 개발은 1994년 한국에너지기술연구원이 국책연구기관의 고유사업으로 연구를 시작한 것이 효시이다. 이때에는 DMFC를 이동용 전원에 사용할 목적으로 연구가 진행되었으며 (200 W급 미만) 촉매와 분리막에 대한 기초 연구와 시스템에 대한 연구를 주로 수행하였다. DMFC를 IT 및 휴대용 전원으로 사용하기 위한 연구는 2~3년 전부터 본격화되기 시작하였으며 현재는 삼성종합기술원, LG화학, LG전자, SK, CETI 등의 기업들과 KIER, KIST 등의 연구소와 여러 대학에서 DMFC 촉매, 전극, 분리막 등의 요소기술개발과 시스템 개발에 주력하고 있다. 국내에서 괄목할만한 연구 성과로는 삼성종합기술원이 2004년에 개발한 노트북용 PC용 20 W급 DMFC 시스템 (**그림 4**)과 KIER, LG화학, LG전자, KIST 등이 공동으로 개발한 진공청소기용 200 W급 시스템이다 (**그림 5**).[26] 최근 삼성에서는 연료 카트리지 하나 (100cc)로 10시간 운전 가능한 DMFC 노트북을 시연하였다고 발표하였다.[27] 장착한 DMFC는 100 W급, 100 cm^3이었으며 메노포러스 탄소 재료에 3 nm 입자의 촉매를 담지하여 촉매 사용량을

50% 감소하고 새로운 나노컴포짓 개념을 도입한 멤브레인으로 메탄올 크로스오버를 90% 이상 감소시켰다고 발표하였다.

2004년도에는 그 동안 달성하였던 연구 결과를 토대로 하여 과학기술부의 핵심 소재 기술 개발이 KIER, KIST, 화학연 등의 국가 출연 연구기관과 서울대, KAIST 등의 교육기관이 참여하여 시작되었다. 또한 50 W급 시스템을 개발하여 노트북 PC에 적용시키는 연구가 산업자원부 대체에너지 개발 사업으로 LG 화학이 주관 기업이 되어 시작되었다.

그림 4. 삼성종합기술원이 개발한 노트북용 PC용 DMFC 시스템.

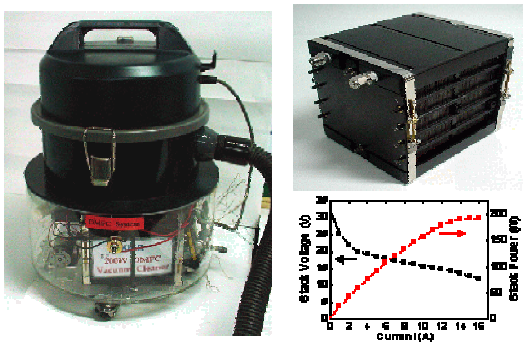


그림 5. 200 W급 무선 청소기용 DMFC 시스템.

3. 요소기술 연구 동향

DMFC는 상기의 휴대기기의 충전지 대체 전원, 소형 수송용 전원 이외에 국방용 기기 등으로의 응용에 관심이 높다. 장래 가능성 있는 발전기술로 DMFC가 자리 잡기 위해서는 요소기술, 스택킹 기술, 실용화를 위한 가격저감 연구 등이 필요하다. **표 3**과 **4**는 미국 DOE에서 목표로 삼고 있는 수송용 PEMFC의 성능 및 가격 목표이다. 표에서와 같이 향후 5년간 DMFC를 PEMFC 시스템에 비하여 전체적인 성능이나 가격, 내구성 등이 PEMFC의 복합 시스템 수준에 도달시키는 것을 목표로 하고 있다.[28] DMFC의 요소별 가격은 **표 4**에 나타낸 바와 같이 촉매부분이 가장 많으며, 바이폴라 판, 전극 순서이다. 또한 고분자막은 DMFC의 성능을 좌우하는 중요한 요소이기 때문에 필수적으로 개발되어야 할 품목 중의 하나이다. 본 절에서는 DMFC의 성능향상을 위해서는 필수적으로 수행하여야 할 촉매, 고분자막의 개발 현황 및 연구동향에 대하여 간략히 소개한다.

3.1 촉매

DMFC의 성능과 가격을 결정하는 가장 중요한 요소 중의 하나는 촉매이다. 1960년대의 DMFC 연구는 주로 Pt를 사용하여 메탄올을 산화시켰으나 낮은 메탄올의 산화성 및 CO에 대한 내식성이 우수하지 못하여 1990년도에는 PtRu 합금 촉매가 메탄올 산화 촉매로 주로 사용되고 있다. 현재에 촉매를 신속하게 시험할 수 있는 콤비내토리알 방법이 개발되어

표 3. 미국 에너지성의 2004년 목표[29]

	PEMFC	연료개질기	복합 시스템*	DMFC
에너지효율, %	60	80	48	50~60
에너지밀도, W/l	500	750	300	300
비출력, W/kg	500	750	300	300
가격, US$/kW	35	10	50	45
내구성	5000	5000	5000	5000

*복합시스템은 연료개질기, 스택, 부속품 포함.

표 4. DMFC 구성 요소의 가격 비율

요소	비율, %
촉매	30~45
고분자막	2~10
전극	15~30
바이폴라판	15~25
냉각판	10~12
어셈블리	5~7

PtRuOsIr, RuSnMoSe 등의 메탄올 산화성이 우수한 4성분계 촉매를 비롯하여 연료극에서 투과(crossover)되어온 메탄올에 대한 저항력이 우수한 RuSnSe 계의 환원 촉매 등의 개발이 이루어지고 있다.[30] 메탄올 산화 성능 증가를 위한 새로운 합금귀금속 촉매 개발을 비롯하여 촉매의 담지 능력과 분산성을 우수하게 하는 CNT (carbon nano tube), CNH (carbon nano-horn)를 사용한 새로운 전극의 개발도 진행되고 있다. 장시간 사용시 CNT를 촉매 담지체로 사용하면 Pt 입자의 응집이 일어나지만 CNH에서는 표면에 부착된 촉매입자가 CNH의 틈새에 들어가기 때문에 촉매의 분산성이 우수하고 촉매입자간의 응집이 어렵기 때문에 종래의 활성탄을 촉매담지체로 사용한 촉매에 비하여 촉매의 사용량을 줄이고 전지성능의 저하가 적게 일어나는 것으로 평가되고 있다.

3.2 고분자 분리막

DMFC의 고분자 분리막은 우선 무엇보다도 수소전도성이 우수하여야 하고, 전자전도성이 없어야 하며, 수소이외의 타분자 (메탄올, 물)의 투과나 확산이 적어야 하고, 가스 불침투성, 형상 안정성, 화학적 안정성 및 기계적 강도가 커야 한다. 고분자 분리막으로 사용되기 위해서는 이온전도도 (ionic conductivity)와 면저항이 각각 $1\sim5\times10^{-2}$ S·cm^{-1}와 0.2~2 Ω·cm^{-2}가 되어야 하며 80~120 ℃에서 작동이 가능하여야 하고, 메탄올 투과율이 없거나 아주 적어야 한다. 일반적으로 사용되고 있는 고분자 분리막은 **표 5**와 같다.

Nafion 117과 112는 **표 5**에 나타나있는 바와 같이 이온전도도가 우수하고 물의 이동성이 적어 현재 DMFC 분리막으로 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 메탄올의 투과율이 높아 메탄올 투과 (crossover)에 의한 성능감소를 많이 유발시키기 때문에 메탄올의 투과성을 감소시키고 이온전도도가 우수한 새로운 분리막 및 복합 분리막의 개발이 필수적인 과제로 등장하고 있다. 실질적으로 LANL 등에서는 메탄올의 투과율이 Nafion에 비하여 50% 감소되는 분리막을 개발하여 실제 DMFC에 적용하여 시스템의 성능향상을 도모하고 있다.[32] 메탄올의 투과가 적고 물이 없어도 수소이온의 전달이 가능한 플러렌계의 수소이온 전도체나 상온 용융염을 전해질로 응용하려는 연구도 진행되고 있다.[33] 그 외에도 고온에서 운전이 가능하여 촉매의 활성을 향상시킬 수 있는 새로운 고온 작동용 분리막의 개발도 이루어지고 있다.

4. 결론

DMFC는 휴대의 간편성, 작동의 편리성, 연료 교체의 용이함 때문에 휴대용 전자기기나 소형 이동수단용 전원으로서 리튬이온전지의 대체품으로 각광받고 있다. 그러나 상용화되기 위하여서는 메탄올의 투과를 막을 수 있으면서 이온전도도가 높은 분리막의 개발, 메탄올 산화에 고활성이며 안정성이 큰 촉매 개발 및 배터리를 대체할 수 있는 초소형의 최적화된 전지의 설계와 제조 기술 등의 개발이 과제로 남아 있다. 이러한 문제들이 해결된다면 시스템이 매우 단순하기 때문에 상용화를 위한 전지의 제작이 다른 연료전지에 비하여 용이하다. 그러므로 학계나 연구소뿐만 아니라 기업체에서도 전지 성능을 개선하기 위한 요소기술과 시스템 기술 개발에 매진하고 있으며, 최근에는 성능이 개선된 직접메탄올 연료전지들을 개발한 결과들이 활발히 발표되고 있으므로 상업화의 길은 멀지 않을 것으로 전망된다.

표 5. 상용 고분자 분리막의 특성[31]

Membrane	EW	Thickness (μm)	Ionic Conductivity (S/cm)	Conductance (S/cm^2)	Water Uptake[c] (%)	Hydraulic Permeation[d]	Methanol Permeability
GORE-SELECT	1100	20	0.52[a], 0.53[b]	26	32	3.7	
GORE-SELECT	1100	5	0.28[a]	56	-	-	
GORE-SELECT	900	12	0.96[b]	80	43	12.9	
Nafion 117	1100	200	0.14[a], 0.10[b]	5~7	34	1.0	20%
Nafion 112	1100	60	0.10[b]	17	34	3.3	
Dow	800	100	0.15[b]	15	56	4.0	

[a] z-direction, sulfuric acid immersed sample measured with a four-point probe. [b] x-y direction, high-frequency measurement for membrane immersed in deionized water. [c] Expressed as percent of membrane dry weight. [d] Hydraulic permeability relative to Nafion 117.

참고문헌

1. K. Kordesch and G. Simader, "Fuel Cells and Their Application", VCH Publishers, New York, 1996.
2. A. J. Appleby and F. G. Foulkes, "Fuel Cell Handbook", Van Nostrand Reinhold, New York, 1989.
3. L. Blomen, J. M. J. and M. N. Mugerwa, "Fuel Cell Systems", Plenum Press, New York, 1993.
4. G. Hoogers, Ed., "Fuel Cell Technology Handbook", CRC Press, 2003.
5. J. Larminie and A. Dicks, "Fuel Cell System Explained", Wiley, UK, 2003.
6. B. C. Chun, *et al., Fuel Cell Seminar*, November 16−19, Palm Spring Convention Center, 1 (1998).
7. D. H. Jung and D. Y. Shin, *The Magazine of the IEEK*, **27**(8), 62 (2000).
8. J. A. Kosek, *et al., Fuel Cell Seminar*, November 16−19, Palm Spring Convention Center, 693 (1998).
9. http://www.mhtx.com/
10. J. Pavio, *Fuel Cell Seminar*, November 3−7, Miami Beach USA, 973 (2003).
11. P. Cox, *et al., Fuel Cell Seminar*, November 3−7, Miami Beach USA, 977 (2003).
12. http://www.fuelcells.org/
13. P. Zelenay, *Fuel Cell Seminar*, November 3−7, Miami Beach USA, 965 (2003).
14. *Fuel Cells Bulletin*, Volume 2004, Issue 5, Page 5 (2004).
15. http://www.daimlerchrysler.com/
16. *Focus on Catalysts*, Volume 2003, Issue 1, Page 3 (2003).
17. A. K. Shukla, *et al., J. Power Source,* **111**, 43 (2002).
18. A. S. Arico, *et al., Electrochimica Acta,* **48**, 85 (2002).
19. http://www.denora.net/
20. *Fuel Cells Bulletin*, Volume 2004, Issue 7, Page 10 (2004)
21. *Fuel Cells Bulletin*, Volume 2003, Issue 12, Page 2 (2003).
22. KISTI 자료, 원본 : nikkeibp.jp/wcs/leaf/CID/onair/jp/elec/335102.
23. *Fuel Cells Bulletin*, Volume 2003, Issue 8, Page 1 (2003).
24. *Fuel Cells Bulletin*, Volume 2003, Issue 8, Page 1 (2003).
25. *Fuel Cells Bulletin*, Volume 2003, Issue 10, Page 5 (2003).
26. "100 W급 직접메탄올 연료전지 (DMFC) 개발에 관한 연구" 보고서, 2004, 산업자원부 과제 2001−N−FC01−P−02.
27. *Fuel Cells Bulletin*, Volume 2004, Issue 6, Page 6 (2004).
28. *Fuel Cells Bulletins*, Volume 2, Issue 7, Page 6 (1999).
29. http://www.eere.energy.gov/
30. B. C. Chan, et al., *Fuel Cell Seminar*, November 16−19, Palm Spring Convention Center, 1 (1998).
31. "5 kW급 고체고분자 연료전지 시스템 개발" 보고서, 1997, 통상산업부 과제 9611403112AG1.
32. J. A. Kosek, *Fuel Cell Seminar*, November 18−21, Palm Springs USA, 482 (2003).
33. *Fuel Cells Bulletin*, Volume 2002, Issue 6, Page 16 (2002).