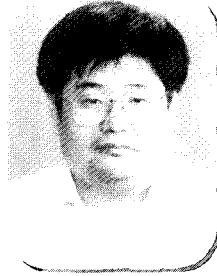


마이크로 연료전지 현황 및 전망



임태훈
한국과학기술연구원
연료전지연구센터 센터장

1. 서론

연료전지는 주지하다시피 연료가 갖는 화학에너지를 전기화학반응에 의해 직접 전기에너지와 열로 변환시키는 장치로서 기존의 어느 열기관보다 높은 열효율과 환경친화성을 자랑한다. 그 원리는 이미 19세기 초 영국의 Sir William Grove에 의해 발견되었지만, 큰 주목을 받지 못하다가 유인 우주선에 사용되면서부터 새로이 상업적 가치가 인식되면서 본격적 개발이 1960년대 미국을 중심으로 시작되었다. 국내의 경우도 산업자원부의 대체에너지 사업을 중심으로 1980년대 후반부터 개발이 시작되었다. 그러나 이제까지의 개발 노력에도 불구하고 연료전지는 아직 경제성 및 신뢰성이 상업화 수준으로 확보되지

못하여 본격적인 시장진입은 2010년부터 가속화될 것이라는 것이 일반적 전망이다.

이와 같은 사정으로 연료전지 기술개발에 대한 국내 일반기업들의 관심은 매우 제한적이었으나, 최근 4-5년 사이 전력 및 자동차 업계를 중심으로 상용화를 위한 본격적인 연구개발 투자가 급속히 증가하고 있다. 특히, 지난 6월과 7월에 걸쳐 삼성경제연구소를 비롯한 민간 기업과 과학기술부, 산업자원부 등 정부에서 연료전지를 10년 후에 국가경제를 이끌 10대 신 성장엔진의 하나로 지목함에 따라 연료전지에 대한 관심은 그 어느 때보다 높다고 할 수 있다. 이처럼 연료전지가 신 성장엔진의 하나로 자리 매김을 하게 된 이유는 연료전지가 갖는 고효율, 환경친화성에서 찾을 수 있겠지만, 그 보다는 우리가 현재에

표 1. 연료전지의 종류

구분	인산형 (PAFC)	용융탄산염 (MCFC)	고체산화물 (SOFC)	고체고분자 (PEMFC)	직접메탄올 (DMFC)
운전온도	220℃	650℃	1000℃	80℃	50℃
용도	분산형	분산형, 중앙집중형	분산형, 중앙집중형	수송용, 이동형, 분산형	이동형, 초미세전원
실용화시기 (국내)	1999 (2007)	2005 (2010)	2010 (2015)	2004 (2007)	2004 (2007)

너지 패러다임의 큰 변화 즉, 화석에너지 시대에서 수소에너지 시대로 넘어가는 길목에 살고 있으며, 수소에너지 시대를 선도하는 연료전지의 첨병 역할에서 찾는 것이 더욱 타당하다고 생각된다.

연료전지의 종류는 사용되는 전해질에 따라 분류하는 것이 일반적이며, 고체산화물 연료전지(SOFC), 용융탄산염 연료전지(MCFC), 인산형 연료전지(PAFC), 고체고분자 연료전지(PEMFC), 직접메탄올 연료전지(DMFC), 알칼리 연료전지(AFC) 등으로 구별할 수 있다(표 1). 이와 같은 일반적인 연료전지에 대한 총설은 이미 여러 차례 관련 학술지나 심포지움 등에서 소개된 바가 있기에, 본고에서는 새로운 연료전지의 응용분야로 각광을 받고 있는 소형 이동전원 분야 즉, 2차전지 대체를 목표로 개발되고 있는 마이크로 연료전지에 대해 개발 현황 및 기술적 이슈들을 간단히 정리해 보겠다.

휴대폰, 무선 인터넷과 같은 정보 통신기기는 우리 생활을 근본적으로 바꾸고 있으며, 이런 추세는 정보 통신기기의 발달에 따라 더욱 가속화될 전망이다. 동영상의 전송이 가능한 갈라 휴대폰, 무선 인터넷, PDA, Palm Top PC, TV 수신기가 달린 휴대전화 등은 이미 우리와 친숙해 진 상태이다. 더욱이 IMT-2000 사업이 본격화되면 무선 이동통신 기기의 발전이 더욱 가속화 될 것이며, 미래에는 입고 다니는 컴퓨터(wearable computer) 등이 개발될 것으로 예측되고 있다. 이와 같은 무선 이동통신의 발달과 함께 로봇, 휴대용 가전기기 및 보병용 휴대군사장비 분야

도 급격한 기술개발이 예상되고 있으며, 이것은 가까운 장래에 휴대용 전원 수요가 폭발적으로 증가할 것을 의미한다. 따라서 이러한 수요를 충족하기 위한 휴대용 전원 기술개발도 현재 2차전지를 중심으로 활발하게 진행되고 있다. 그러나 차세대 이동 통신 제품이나 휴대용 가전제품 등의 시장 확대는 높은 시장수요에도 불구하고 당분간 제한적일 것이라는 전망도 일각에서 조심스럽게 대두되고 있는데, 그 직접 이유는 그러한 무선통신 기기를 가동할 수 있는 전원 문제의 해결이 쉽지 않기 때문이다. 삼성 전자에서 산출한 수치에 의하면 차세대 이동 통신기거나 랩탑 컴퓨터, PDA 등을 사용하기 위해서는 수년 내에 500w-h/kg의 출력을 갖는 전원이 필요한 것으로 알려져 있고, 또 미국 국방성에서는 육군 보병이(그림1) 첨단 휴대용 전자기기를 사용하기 위해서는 2003년까지 1000w-h/kg, 2006년까지는 3100w-h/kg의 출력을 갖는 전원이 필요할 것으로 전망하고 있다. 그러나 그림 2에 도시된 것처럼 기존 2차전지 재료 및 기술의 한계치는 약 300w-h/kg 으로 요구 출력을 맞출 수가 없다는 데 문제의 심각성이 있다.

이러한 문제점을 해결할 수 있는 대안으로 요즈음 크게 주목 받고 있는 기술이 소형 또는 마이크로 연료전지로 불리는 기술인 것이다. 물론 마이크로 연료전지 기술도 시장 경쟁력을 갖추기 위해서는 아직 남아있는 여러 가지 기술적·경제적 문제점들을 해결해야 한다.

본고에서는 마이크로 연료전지의 원리, 제조기술, 현재의 개발동향, 해결해야 할 기술적 문제점대해

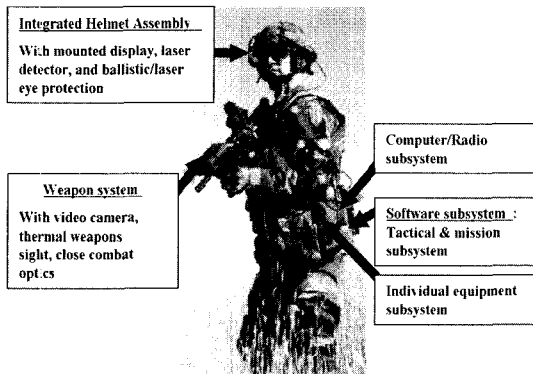


그림 1. 최첨단 보병 무기 시스템.

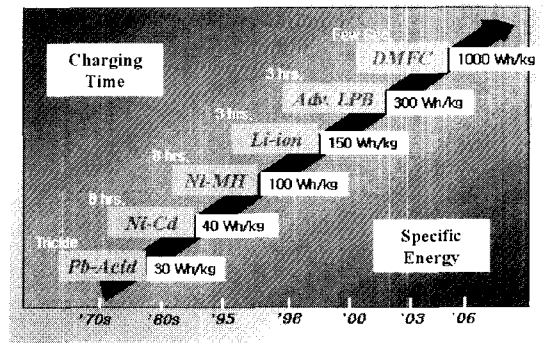


그림 2. 휴대전원의 발전 추세.

간략히 서술함으로써 전기전자 재료 분야가 마이크로 연료전지 기술개발에 기여할 수 있는 분야를 소개하고자 한다.

2. 마이크로 연료전지의 정의

‘마이크로 연료전지’란 용어는 연료전지의 용량이나 크기에 따라 명확하게 정의된 개념은 아니다. 다만 4-5년 전부터 Hockaday란 사람이 소형 휴대용 연료전지를 개발하면서 자기 제품을 “micro fuel cell™” 이라고 명명한 후, 많은 연구자들이 소형 연료전지를 ‘마이크로 연료전지’라고 따라 부르면서 전문 용어인 것처럼 알려지게 되었다. 즉, 마이크로 연료전지의 마이크로는 크기 및 용량이 기존의 연료전지와는 달리 매우 소형임을 강조하기 위하여 부쳐진 것이다. 이후 연구개발의 대상이 되는 연료전지가 점점 다양화되면서 출력 용량에 따른 분류가 시도되어, 200W 이하는 미니 연료전지(mini fuel cell), 5와트 이하는 마이크로 연료전지(micro fuel cell)라고 소개된 바가 있다. 아주 최근 들어서는 실리콘을 기판으로 하고 반도체 공정 및 MEMS (Micro Electro-Mechanical System) 기술을 활용하여 제조한 정밀로 아주 작은 연료전지가 개발됨에 따라 이것만을 마이크로연료전지라고 주장하기도 한다. 그러나 일반적으로는 수W급 이하의 휴대용 연료전지를 미니어처 또는 마이크로 연료전지라고 혼용하여 부르고 있다.

3. 연료전지 원리 및 구조

연료전지의 원리를 마이크로 연료전지의 주요 개발 대상인 DMFC를 중심으로 간단히 살펴보겠다. 그림3은 DMFC의 구조를 간략히 그려놓은 것이다. Anode 쪽으로 메탄올 수용액이 공급되면, 전극에 있는 촉매층(백금-루테튬 촉매)에서 산화반응이 일어나 식(1)과 같이 수소이온과 전자가 발생하여, 외부 회로를 통해 cathode 이동하며, 발생된 수소이온은 이온전도성 전해질 막을 통해 캐소드로 이동한다. Cathode(백금촉매)에서는 외부에서 공급되는 산소가 수소이온 및 전자와 합쳐져서 물을 만드는 반응을 일으키게 된다. 전체 반응을 보면 메탄올과 산소

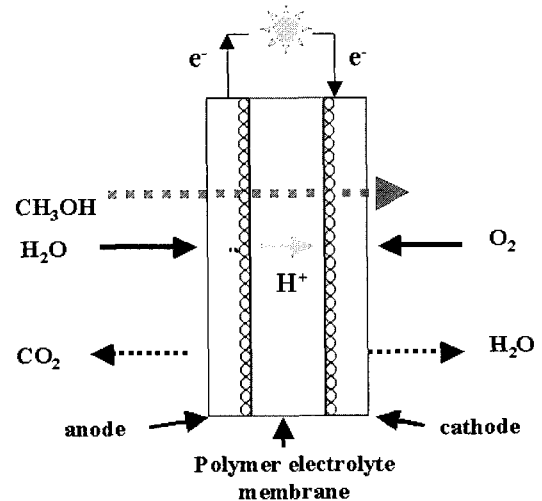


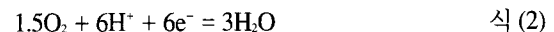
그림 3. DMFC의 구조 및 원리.

가 반응하여 물과 이산화탄소를 생성시키며, 이와 동시에 전기를 발생시키게 된다. 이때 이론적인 기전력은 1.18V가 된다. 여기에서 전해질 막으로는 수소 이온전도성을 갖는 퍼플루오로술폰포닉산(perfluorosulfonic acid) 계통의 고분자 막을 사용하며, 현재는 듀폰에서 판매하는 Nafion™이라는 전해질 막이 가장 많이 사용되고 있다.

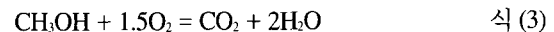
Anode reaction :



Cathode reaction :



Overall reaction :



$$E_0 = 1.18 \text{ V}$$

고분자 전해질 연료전지(PEMFC)도 DMFC와 동일한 구조와 유사한 재료로 구성되지만, 연료가 수소인 점이 다르고 메탄올보다 수소의 반응성이 훨씬 높기 때문에 80℃, 1기압에서 산화제로 공기를 사용할 때를 기준으로 하면, PEMFC의 성능은 0.4-1W/cm², DMFC는 0.1-0.2W/cm² 수준이다.

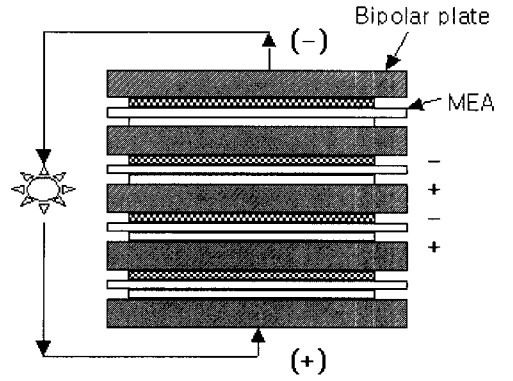
단위전지 하나로 얻을 수 있는 전압은 이론 기전력을 넘을 수 없고, 실제 운전조건에서는 보통 0.4-0.7V

정도의 전압밖에는 얻을 수 없기 때문에 전지 용량을 키우기 위해서는 여러 개의 단위전지를 직렬로 쌓아서 스택을 만들어야 한다. 스택은 일반적으로 전극과 전해질 그리고 분리판을 교대로 반복하여 쌓아서 (+)극과 (-)극이 교대로 놓이도록 하는 바이폴라(bipolar) 형태 (그림 4-a)를 사용하는 것이 일반적이다, 이것은 수십W 이상의 중대형 용량에서 주로 사용되는 형태이고, 수W 이하의 소 용량에서는 전해질 막 위에 전극을 나란히 놓은 다음, (+)극과 (-)극이 각각 동일 평면상에 놓이도록 하여, (+)극과 (-)극을 전선으로 교대로 연결한 모노플라 형태의 스택 (그림 4-b)을 사용하게 된다. 모노플라 형태의 스택은 바이폴라에 비해 부피 출력밀도를 높일 수 있고, 외부동력 없이도 연료공급이 가능하며, 비교적 형태를 자유로이 제작할 수 있는 장점이 있다.

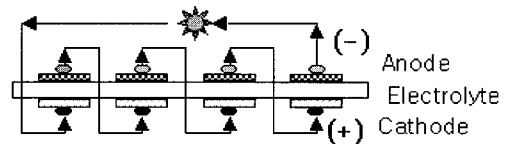
4. 마이크로 연료전지의 종류

마이크로 연료전지의 종류는 어떤 특정한 형태로 정해진 것이 없으며, 기왕에 나와 있는 여러 가지 연료전지 중에서 휴대용 전원에 사용할 목적으로, 특히 5W급 이하로 작게 만들어진 것을 일반적으로 가리키지만, 표 2에 정리한 마이크로 연료전지의 요구 사항은 반드시 충족되어야 한다.

표 2에 서술한 정량적 목표 이외에도 마이크로 연료전지의 연료는 구입과 휴대가 용이해야하며, 혹시 누출 사고 시에도 화재나 폭발 위험성이 낮아야한다. 이렇게 까다로운 조건을 만족시킬 수 있는 연료전지를 제작하기는 매우 어렵지만, 많은 연료전지 중에서 직접 메탄올 연료전지 (DMFC, direct



(a) Bipolar stack



(b) Monopolar stack

그림 4. 연료전지 스택 형태.

methanol fuel cell) 및 초소형 연료 개질기를 부착한 고분자 전해질 연료전지 (PEMFC, polymer electrolyte membrane fuel cell) 그 가능성을 인정받아

표 2. 마이크로 연료전지 요구 조건.

항목	요구 수준
에너지 밀도	500W-h/L 이상
운전 조건	상압, 상온
연료 재충전	1분 이내
가격	\$5/W 이하
수명	2년 이상
시동 시간	30초 이내

현재 휴대용 전원으로 활발한 연구개발이 진행되고 있다.

4.1 마이크로 DMFC

DMFC는 앞에서 언급한 바와 같이 수소에 비해 에너지 밀도가 높은 메탄올을 연료로 사용하며, 메탄올을 전극에 직접 주입하기 때문에 개질기가 필요 없어서 소형화가 가능한 장점이 있으나, 메탄올의 분해 반응속도가 낮기 때문에 고가의 백금촉매를 다량 사용해야 하며, 고분자 전해질 막을 통해 anode에서 cathode로 메탄올이 투과되어 넘어가는 crossover 문제로 인해 성능이 저하되고, 수명이 단축되는 단점이 있다. 즉, 높은 활성을 갖는 촉매재료의 개발과 메탄올 crossover를 줄일 수 있는 새로운 고분자 막의 개발 혹은 표면 개질이 상용화에 다가가는 핵심기술이다.

위의 기술들이 왜 중요한가는 DMFC의 에너지 밀도를 기존의 리튬이온 배터리와 비교계산해 보면 더욱 자명해진다. 현재 소형 전자기기에 사용되는 리튬이온 배터리는 대부분의 소형 기기가 요구하는 125W/L 수준의 전력밀도를 충족시키고 있으나, 이러한 전력밀도로는 매우 제한적인 시간에서만 작동이 가능하다. 즉, 현재 배터리의 에너지밀도인 350W-h/L 로서는 125W/L 수준의 전력밀도로 약 3시간 정도 기기의 가동이 가능하며, 이후 배터리를 충전해야 하는 것이다. 또한 현재 배터리에 사용되는 LiCoO₂/graphite 시스템은 최대 에너지밀도가 480W-h/L 정도로 나타나고 있어, 향후 보다 가혹한 환경에서 장시간 운전을 요하는 휴대 전원으로 사용되려면 새로운 배터리 재료가 개발되어야 하는 실정이다. 이러한 관점에서 배터리를 대체하기 위한 마이크로 연료전지에 핵심적으로 요구되는 사항은 500W-h/L 이상의 고에너지밀도이다.

마이크로 연료전지 발전시스템은 연료전지와 연료/공기 공급 장치, 시스템 제어 장치 및 연료저장장치로 구성된다. 배터리와는 달리 전력을 생산하는 연료전지 부분과 전력 생산 시간을 결정하는 연료저장장치가 분리되어 있으므로, 연료를 계속 충전하는 경우 연속적인 전력 생산이 가능하다. 따라서 마이크로 연료전지용 연료가 일반인이 사용하기에 안전

하며, 연료를 쉽게 그리고 싼 값으로 구입할 수 있고, 연료의 충전이 쉬운 경우에는 연속적으로 전력을 발생시키는 이상적인 전원이란 생각할 수 있다. 그러나 현실적으로는 연료의 안전성, 구입 및 충전의 용이성 등이 문제가 되고 있으며, 다른 문제점이 해결되더라도 연료를 자주 충전하는 일은 불편한 일임에 틀림이 없기에 1회 연료 충전 시 전체 시스템의 에너지밀도가 되도록 높게 제작 되어야 하는 것이 필수 조건이다.

이상적인 마이크로 연료전지 발전시스템은 초소형 연료전지와 초소형 연료/공기 공급 장치 및 시스템 제어 장치와 함께 연료 저장 장치가 대부분의 부피를 차지하도록 구성되어야 하며, 또한 농도가 높은 연료를 사용해야 한다. 이것은 마이크로 연료전지의 에너지 밀도가 다음 식 (4)와 같이 일차적으로 연료의 에너지밀도, 연료의 농도 및 연료저장 장치의 부피에 의해 결정되기 때문이다.

$$EDFC = EDFU \times VFU \times VFST \times EFFC \times EFS \quad \text{식 (4)}$$

EDFC : 마이크로 연료전지의 에너지 밀도 (Wh/L)

EDFU : 연료의 에너지밀도 (Wh/L-fuel)

VFU : 연료통에서 연료의 부피비
(L-fuel/L-fuel storage tank)

VFST : 전체 시스템에서 연료통의 부피비
(L-fuel storage tank/L-system)

EFFC : 연료전지의 전력변환 효율

EFS : 연료전지 주변 시스템의 에너지 손실을 고려한 시스템 효율

다시 말해서, 연료의 에너지밀도가 높을수록, 연료의 농도가 높을수록, 그리고 연료전지 및 주변 시스템의 부피가 작을수록 마이크로 연료전지 발전시스템의 에너지밀도가 높은 것이다. 물론 전체 시스템의 고에너지밀도를 위해서 연료전지 및 주변시스템의 효율이 높아야 하는 것은 두말할 것도 없다.

현재 DMFC는 메탄올 수용액을 연료로 사용하는 경우가 대부분인데, 이때의 에너지밀도를 알아보면 다음과 같다. 35 vol% 메탄올 수용액을 연료로 사용할 때 DMFC의 효율을 35%, 연료전지 주변 시스템

의 효율은 90%로 가정하고, 연료통이 전체 부피의 80%를 차지한다고 할 때, 메탄올의 에너지밀도 4,780W-h/L를 고려하여 식 (4)에 따라 마이크로 DMFC 발전시스템의 에너지밀도를 계산해 보면 422W-h/L가 된다. 그러나 현재 DMFC에 많이 사용되는 메탄올의 농도가 전극이나 고분자 막의 성능 때문에 10 vol% 내외로 제한됨을 고려하면 현재 DMFC의 에너지밀도는 기존 배터리를 대체할만한 수준에는 이르지 않았다고 생각된다. 물론 DMFC의 고분자막 및 전극 기술 특히, 재료개발에 급진전이 있어 보다 고농도의 메탄올이 사용가능하며, 연료전지의 효율이 향상되고, 연료전지 및 주변장치가 더욱 작아지면 에너지밀도는 더욱 향상될 것이다.

한편, 새로운 재료를 개발하는 방법 이외에도 마이크로 DMFC의 에너지밀도를 증가시키는 방법으로 생성된 물을 재이용하는 방법이 고려되고 있다. 즉, DMFC의 cathode에서 발생하는 물을 회수하여 메탄올과 함께 혼합하여 연료전지에 공급한다면 보다 고농도의 메탄올을 연료로 사용할 수 있을 것이다. 100% 메탄올을 연료로 사용하는 경우 연료전지 발전시스템의 에너지밀도를 살펴보면 다음과 같다. 물을 회수하여 메탄올과 혼합하여 연료로 사용할 경우 메탄올의 농도가 높아질수록 전해질인 고분자막을 통한 메탄올의 crossover가 심해져서 DMFC의 효율은 감소하므로, 연료전지의 효율을 먼저보다 낮은 30%라 가정하고, 시스템의 효율 및 연료통의 부피비가 물 회수 및 공급 시스템이 추가되어 각각 75%로 가정하면 전체 시스템의 에너지 밀도는 806W-h/L로 계산된다. 따라서 배터리를 대체할 목적으로 DMFC

발전 시스템을 구성하는 경우, 생성되는 물을 재순환하여 이용하는 것이 매우 효과적임을 알 수 있다 또한, 이온전도도는 그대로 유지하면서 메탄올 crossover를 획기적으로 감소시키는 전해질막의 개발을 통하여 DMFC의 효율을 향상시키고, 물의 회수 및 재순환 시스템도 소형화를 이루어야 전체 시스템의 에너지밀도가 더욱 향상됨을 알 수 있다.

이와 같은 문제에도 불구하고 마이크로 DMFC는 상업화 가능성이 매우 높은 것으로 인식되고 있으며, 따라서, Manhattan Scientific, Inc., 모토롤라. Mechanical Technical, Inc. 듀폰, 소니, NEC, 도시바. 삼성, 엘지 등 국내외 유수의 기업들이 DMFC의 상업화에 열을 올리고 있다. 그림 5는 모토롤라에서 발표한 것으로, DMFC를 전원으로 하여 PDA를 가동시키는 사진이다.

4.2 마이크로 PEMFC

DMFC에 비해 PEMFC는 수소를 연료로 사용하므로 적은 양의 백금을 사용하고도 전력변환효율이 높다는 이점이 있다. 그러나 수소공급이라는 난제 때문에 아직까지 휴대전원으로 사용되기까지는 많은 기술개발 특히 수소공급을 위한 기술개발이 필요하다.

마이크로 PEMFC에 수소를 공급하는 방법은 5가지 정도로 분류할 수 있다. (1) 금속 수소화물(metal hydride) (2) 화학적 수소화물(chemical hydride) (3) 마이크로 연료개질기 (micro fuel processor) (4) 탄소나노튜브 (5) 압축수소. 표 3에 정리된 연료전지용 연료의 에너지밀도를 비교해 보면 chemical hydride를 이용하여 수소를 생산하거나, 마이크로 개질기를 사용하여 메탄올과 같은 액체연료에서 수소를 생성시켜 사용하는 것이 가장 가능성이 높은 것을 알 수 있다.

Chemical hydride로서 NaBH₄를 사용할 경우 에너지 밀도를 계산해 보면, PEMFC의 효율을 50%, 시스템 효율을 70%, 연료저장장치의 부피비를 70%로 가정했을 때 전체 시스템의 에너지 밀도가 392W-h/L로 계산되며, 시스템 효율 및 연료저장장치 부피비를 각각 80%이상으로 했을 때 500W-h/L 이상의 에너지 밀도를 얻게 된다. 그러나 실제로 NaBH₄를 사용하여

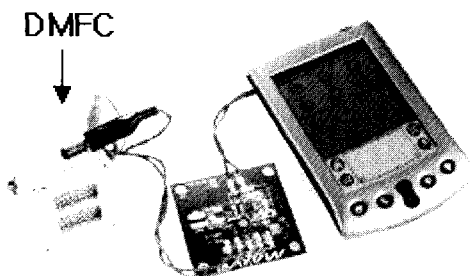


그림 5. 모토롤라의 마이크로 DMFC 시제품.

표 3. 연료전지용 연료의 에너지밀도 비교.

Fuel	Volumetric Energy Density (W-h/L)	Gravimetric Energy Density (W-h/kg)
Compressed H ₂ (2000psi)	520	248
H ₂ in metal hydride, LaNi ₅ H ₆	2,700	300
Chemical hydride, NaBH ₄	1,600	2,400
Methanol	4,780	6,050
C ₈ H ₁₈	9,400	13,400
Li-ion	350	160

PDA, MP3 등을 가동하는 PEMFC 발전시스템을 구성해 본 경험에 의하면 아직까지는 반응제어장치를 포함하는 수소제조장치의 부피가 너무 커 이에 대한 소형화 기술개발이 요구됨을 알 수 있었다.

한편, 메탄올 등의 연료를 개질하여 수소를 생산한 후 PEMFC에 공급하려면, 초소형 PEMFC와 함께 그림 6과 같은 초소형 개질기가 필요하다. PEMFC용 개질반응으로는 메탄올 수증기 개질반응이 주로 이용되는데 이것은 메탄올의 수증기 개질반응이 200~300°C의 비교적 낮은 온도에서 일어나며 생성되는 개질가스 중 CO의 농도도 1% 이하로 비교적 낮기 때문이다. 그러나 일반적인 PEMFC는 anode의 피독 현상 때문에 10ppm 이하의 CO가 공급되어야 하므로, 메탄올 수증기 개질반응기 이외에 CO의 농도를 1%에서 10ppm 이하로 낮추는 반응장치가 필요하다. 따라서 시스템의 에너지밀도를 증가시키려면 메탄올 개질기와 CO 제거장치를 아주 작게 제작하거나, 150°C 이상의 고온에서도 작동 가능한 PEMFC를 고안하여 높은 농도의 CO에서도 PEMFC가 작동될 수 있도록 해야 한다. 50 vol% 메탄올 수용액을 연료로 사용하여 연료개질기가 장착된 PEMFC 발전시스템을 구성하는 경우 에너지밀도를 계산해 보면, 연료전지 및 개질기 포함된 주변 시스템의 효율을 각각 50% 및 60%라 가정하고, 연료통의 부피비가 70% 일 때 501W-h/L에 도달한다. PEMFC 주변 시스템으로는 개질기와 CO 제거 반응기, 그리고 연료 기화기, 연료 및 공기 공급용 소형 펌프와 밸브, 센서와 제어 시스템을 들 수 있는데, 이들을 모두를 결합한 스택 주변 시스템의 효율이 60%를 넘기란 현 기술수준으

로 매우 힘들다. 미국 PNNL의 결과를 보면 초소형 개질기의 효율이 60% 정도로 나타나고 있어, 개질기의 효율 향상과 함께 그 주변 장치의 효율도 향상시켜야 함을 알 수 있다. 또한 전체 시스템에서 PEMFC와 스택 주변 시스템이 차지하는 부피가 30% 이하가 되도록 충분히 소형으로 제작되어야 한다. 한편 위의 DMFC 부분에서 언급한 바와 마찬가지로 개질기를 사용하는 PEMFC 시스템에서도 메탄올 수용액을 사용하는 대신 공기극에서 발생하는 물을 회수하여 사용하면, 100% 메탄올을 연료로 사용할 수 있으므로 발전시스템의 에너지밀도는 더욱 향상될 것이나, 물 회수 및 재순환에 소요되는 장치 또한 소형으로 제작할 필요가 있다.

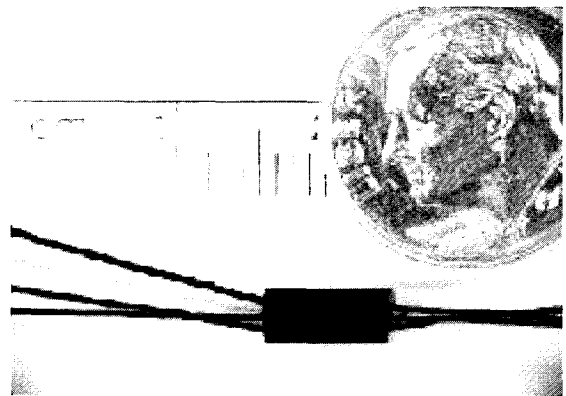


그림 6. 초소형 개질기 시스템 (100mWe) (기화기+개질기+연소기).

4.3 실리콘 연료전지

연료전지의 소형화를 위한 노력의 일환으로 명실 상부하게 마이크로 연료전지라고 부를 수 있는 실리콘(silicon) 연료전지 또는 박막(Thin film) 연료전지가 개발되고 있다. 실리콘 연료전지는 실리콘 기판에 반도체의 식각 공정을 이용해서 유로를 형성시키고, 이 위에 다시 박막 증착기술 등을 활용하여 전해질 및 전극 등을 형성시켜 만든 아주 작은 연료전지를 가리킨다. 물론, 이 경우에도 연료전지의 전극 크기가 마이크로미터 차원으로 작아지지는 않으며, 단지 실리콘 기판에 형성된 기공이나, 전극 또는 전해질 막의 두께가 마이크로 단위가 된다.

실리콘 연료전지는 두 가지 목적으로 개발되고 있다. 첫째는 휴대폰이나 소형 디지털 장치, 독립작동 센서, 내장된 모니터 또는 MEMS 장치 등에 사용할 수 있는 mW급의 전원으로 개발하기 위한 것이고, 둘째는 전극이나 전해질 막 등의 구성요소를 박막화하여 기존의 연료전지가 갖고 있는 출력밀도에 대한 한계를 극복하고자 하는 것이다. 박막화된 실리콘 연료전지는 기존의 연료전지에 비해 여러 가지 장점을 갖고 있는데 (1) 전해질 막의 저항 감소 (2) 메탄올 및 물 투과도 저감 (적절한 전해질 막 선정시) (3) 확산 경로의 단축 (4) 전해질막과 전극 간의 접촉저항

저감 (5) 기존의 MEMS (micro electromechanical system) 기술 활용 가능 (6) 연료전지 팩 제조의 자동화 및 일괄공정화 가능 (7) 촉매와 전해질 막 등의 구조를 임의로 변경 가능 (8) 대량생산 용이하다는 점들이다.

DMFC 원리를 활용한 실리콘 연료전지의 대표적인 기본 구조는 그림 7과 같으나, 실리콘 기판에 형성된 기공 또는 유로의 크기 및 모양, 그리고 제조방법, 전극 및 MEA를 형성시키는 방법, 집전체의 형태, 연료의 종류 및 공급 방법 등에 있어서 많은 종류가 가능하다.

여러 연구자들이 서로 다른 아이디어를 가지고 실리콘 기판 위에 수십 마이크로미터 크기의 구멍을 뚫거나 유로를 형성시켰으나, 실제로 온전한 박막형 연료전지를 제조하여 성능을 측정할 때는 매우 드물며, 제조된 전해질 및 전극의 성능 역시 만족할 만한 수준에는 이르지 못하고 있다. 실리콘 연료전지가 박막형태로 제대로 구현되기 위해서는 실리콘 기판 위에 anode, cathode 그리고 전해질 막을 차례로 형성시켜야 하나, 지금까지 발표된 연구결과들은 비록 다공성 실리콘 기판을 사용하였다고는 하나 전극제조는 기존의 분사법(spraying)을 사용하고, 전해질 막 역시 기존의 나피온 전해질 막을 그대로 이용하는

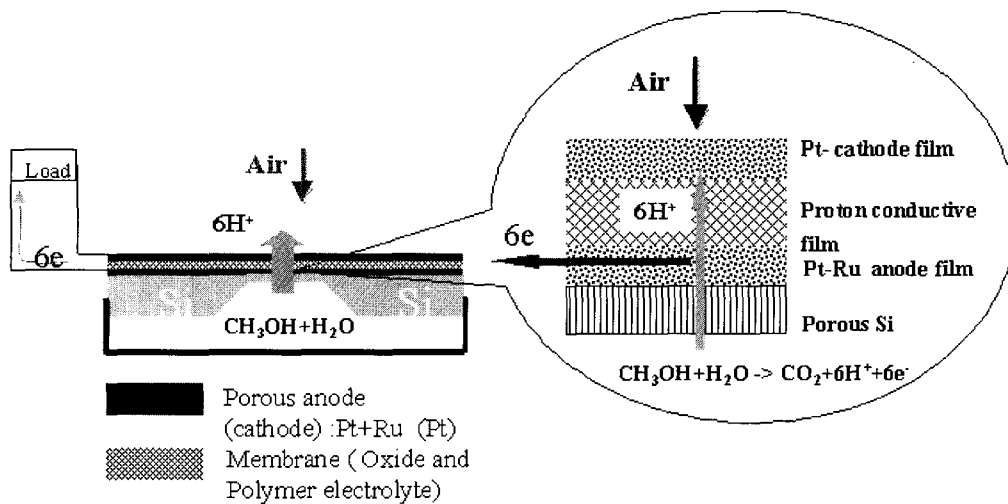


그림 7. 실리콘 연료전지의 대표적 구조.

방법을 사용하는 것이 대부분이다. 즉, 기존의 방법을 약간 변형하여 MEA를 만든 다음, MEA의 양쪽에 다공성 실리콘 기판을 포개놓은 수준에 불과한 것이다. 이것은 박막 증착법에 의한 전극의 제조 및 전해질 막의 캐스팅이 생각만큼 쉽지 않다는 것을 반증하는 것이다. 따라서 증착법에 의한 고성능 박막 제조 및 박막형 전해질 막 재료의 개발에 대한 연구가 보다 심도 있게 그리고 새로운 아이디어를 통해 전개되어야 할 것이다.

5. 국내외 연구동향

지금까지 휴대용 소형전원으로서 마이크로 연료전지에 대한 기술적 이슈들을 살펴보고, 이제부터는 국내외에서 치열하게 진행되고 있는 기술개발 현황에 대해 알아보겠다. 기존 배터리에 비해 높은 에너지 밀도를 기질 수 있다는 점 때문에 마이크로 연료전지의 상업화가 이루어진다면 매우 큰 시장을 형성할 수 있을 것으로 전망되고 있으며, 따라서 세계 유수의 대기업들과 수많은 벤처기업들이 기술개발 경쟁에 합류하고 있다.

마이크로 DMFC 개발에 가장 먼저 뛰어든 업체는 Manhattan Scientifics, Inc. 로서, 휴대전화의 충전기로 사용할 수 있는 Power Holster™ 시작품을 개발하였으며, 일본의 Mihama 사와 합작으로 1W급 휴대폰 충전기를 상업화하기 위한 협정을 체결하였다. 또한, 세계적인 휴대폰 제조회사인 Motorola는 일찍부터 로스알라모스 국립연구소와 공동으로 휴대용 DMFC 개발에 착수하였으며, 앞의 그림 6과 같은 DMFC 팩을 수 년 내에 상업화하기 위해 개발에 박차를 가하고 있다. 또한, 미국의 벤처회사 Polyfuel, Inc 는 고성능 DMFC 스택을 개발하여 휴대폰을 시연하는데 성공하였으며, 수백만불에 달하는 투자를 유치하여 상업화를 추진하고 있는 것으로 알려져 있다. 또한, 나피온 전해질 막 제조회사인 듀폰은 연료전지 전문회사인 H-Power와 공동으로 DMFC의 상업화를 추진하고 있으며 최근에는 (2001년 12월) Univ. of Southern Calif.와 Jet Propulsion Lab.이 합작하여 DMFCC (Direct Methanol Fuel Cell Corporation) 라는 회사를 설립하고 중소형의 DMFC 상용화에 착수

하였다. 이외에, 일본과 유럽 등지에서도 많은 기업들이 휴대용 연료전지 개발에 참여하고 있다.

최근 들어 괄목할만한 사실은 일본 업체들이 휴대용 연료전지 부분에서 상당한 수준의 개발 성과를 발표하고 있는 점이다. 2001년 8월 NEC와 SONY에서 그 동안의 연구결과를 발표하였다. 일본 최대의 휴대전화 생산업체인 NEC는 카본나노튜브로 촉매를 제조하여 고출력의 연료전지를 개발하였다고 발표하였으며, 소니에서도 Fullerene (C60)을 전해질(gas-permeable electrolyte)로 사용하여 고성능 연료전지를 개발하였다고 발표하였다. 플러렌을 전해질로 사용하면 물이 없어도 사용할 수 있기 때문에 영하 20℃의 저온에서도 작동이 가능하고, 운전 시작 시간(start-up time)이 매우 짧은(1~2초) 장점이 있다고 주장하여 향후 연구결과가 주목도니다고 하겠다. 한편, 2002년 1월에는 도시바에서 휴대용 DMFC로 작동되는 PDA 시연회를 가진 바가 있다.

한편, 마이크로 PEMFC를 휴대용으로 개발하기 위한 연구는 Fraunhofer, ISE, 카시오 등에서 일부 이루어지고 있으나, 수소를 공급하는 마이크로 개질기 개발 문제 때문에 큰 진전은 아직 없는 상태이다. Chemical hydride를 수소 공급원으로 하여 PEMFC를 구동하려는 시도로는 Millenium Cell 사의 NaBH₄를 수소원으로 한 PEMFC 자동차 개발과 Manhattan Scientifics, Inc.의 휴대용 충전기 개발이 대표적이라 알려져 있다. 그러나 NaBH₄는 반응속도 조절이나 부식성, 인체 유해성 등의 면에 있어서 아직도 해결해야 할 점이 많기 때문에 휴대용 마이크로 연료전지

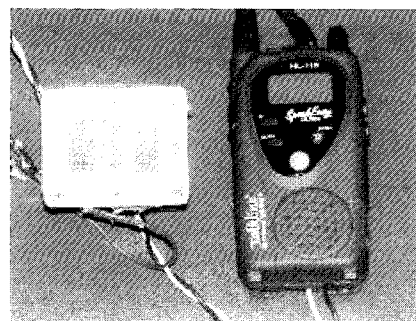


그림 8. 무전기를 위한 1,100mW-DMFC stack (KIST, 2001년).

에 활용하기 위해서는 좀 더 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다.

국내에서도 2~3년 전부터 마이크로 연료전지 특히, 직접메탄올 연료전지에 대한 관심이 증대되어 왔으며, 현재는 삼성종합기술원, 엘지화학, SK, 세티 등과 같은 기업들과 한국과학기술연구원과 에너지기술연구원 등의 연구소, 그리고 여러 대학에서 DMFC 전극, 스택, 발전 시스템, 촉매, 전해질 막, 분리판 등에 관련한 연구를 수행하여, 현재는 선진기술 수준의 상당히 높은 경지에 올라와 있다. 그림 8은 2001년 한국과학기술연구원에서 발표한 1,100mW급 DMFC 팩이다.

6. 결론

지금까지 살펴 본 바와 같이 휴대용 전원으로 사용하기 위한 미니어쳐 또는 마이크로 연료전지에 대한 연구는 전 세계적으로 매우 활발히 이루어지고 있으며, 특히 최근에는 이 분야에 대한 기업들의 연구개발 투자가 매우 활발하다. 그러나 앞에서 지적한 바와 같이 사용되는 재료 및 부품의 획기적인 개발 혹은 개선이 뒷받침될 때에만 진정으로 마이크로 연료전지의 상용화 및 시장 경쟁력 확보가 이루어질 것이다. 이와 같은 관점에서 향후 3-5년 동안에 재료 부문, 특히 전기전자재료 분야에서의 기술개발 참여가 절실히 요구되고 있다. 국내 개발수준도 그동안의 투자로 이미 외국과 경쟁이 가능할 정도로 높은 상태이기 때문에 재료 분야에서의 획기적 개선이 이루어진다면 향후 세계 시장에서 국내 기술의 경쟁력 확보는 쉽게 예상되는 사실이다. 앞으로 마이크로 연료전지 개발에서 전기전자재료 분야의 활발한 참여를 기대하면서 간단하나마 마이크로 연료전지에 대한 소개를 마무리한다.

참고 문헌

[1] J. Larminie and A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, Wiley, 2000.
 [2] S. C. Kelly, G. A. Deluga, and W. H. Smyrl, Electrochem. Solid-State Lett., Vol. 3, No. 9, p. 407,

2000.

[3] 3rd Int. Symp. Small Fuel Cells, Apr. 22-24, 2001, Washington, DC, USA.
 [4] 2nd Int. Symp. Small Fuel Cells, Apr. 26-28, 2000, New Orleans, USA.
 [5] Proceedings of Portable Fuel Cells, June 21-24, 1999. Lucerne, Switzerland.
 [6] S. J. Lee, S. W. Cha, Y. C. Liu, R. O' Hayre, and F. B. Prinz, High Power-Density Polymer-Electrolyte Fuel Cells by Microfabrication, In: Micro Power Sources, K. Zaghbi and S. Surampudi (eds.). Proceedings Volume 2000-3, The Electrochemical Society Proceeding Series, Pennington, NJ, 2000.
 [7] C. K. Dyer, Scientific American, Jul. 1999, p70.
 [8] J. D. Halladay, et al., "Fuel processor development for miniature power supplies to power microdevices", AIChE Spring Meeting, March. 2002.
 [9] S. C. Amendola, et al., Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 25, p. 969, 2000.

· 저 · 자 · 약 · 력 ·

성명: 임 태 훈

❖ 학력

- 1981년 서울대 공업화학공학과 공학사
- 1984년 State Univ. of New York at Buffalo 화학공학과 공학석사
- 1986년 State Univ. of New York at Buffalo 화학공학과 공학박사

❖ 경력

- 1987년 - 1995년 KIST 선임연구원
- 1996년 - 2003년 KIST 책임연구원
- 현재 KIST 연료전지연구센터장