



휴대용 연료전지 기술

글 ■ 하 흥 용 / 한국과학기술연구원(KIST) / e-mail ■ hyha@kist.re.kr

이 글에서는 휴대용 연료전지의 종류 및 작동원리에 대해서 알아보고, 국내외의 연구개발 동향에 대해 살펴보았다.

연료전지를 휴대용 전원으로 사용하기 시작한 것은 1960년대부터였지만, 본격적으로 상업화를 위한 연구는 1990년대 중반부터 시작되었다고 할 수 있다. 휴대용 연료전지라고 하면 1W에서 1kW까지의 용량을 포함하지만, 현재에는 주로 수십 와트급 이하의 연료전지 시스템 개발에 초점이 맞추어져 있다. 특히, 1990년 이후 휴대전화, PDA(Personal Digital Assitant), 노트북컴퓨터 등과 같은 휴대용 전자기기의 수요가 증가하면서 고성능 휴대 전원에 대한 수요가 크게 늘어나게 되었다. 예를 들어 2002년에 들어 국내 휴대전화 가입자는 3,000만 명을 넘어섰고, 중국은 2억 명, 전 세계적으로는 10억 명이 넘어서게 되었다. 이외에도 PDA나 노트북컴퓨터의 수요증대도 괄목할 만한 수준에 이르고 있다(그림 1). 그러나 갈수록 휴대용 기기의 기능이 다양화되면서 소비전력이 증가하게 되고, 따라서 기존의 배터리(2차전지)로는 사용시간이 매우 제한되는 문제점이 나타나게 되었다. 예를 들어, 현재 휴대전화는 3W급의 배터리를 사용하고 있으며, 통화시간은 2시간에 불과하다. 그러나 2003년부터 시작되는 IMT-2000 사업에서는 휴대전화를 통해 동영상 전송이

가능하므로 소비전력은 더욱 커지게 될 것이다. 또한, 점차 수요가 늘고 있는 노트북 컴퓨터의 경우도 사용시간이 2시간 정도에 불과한 문제점이 있다.

현재의 리튬계 2차전지의 에너지 밀도는 최대 300Wh/kg 수준이나 향후에 개발될 고성능 전자기기의 사용을 위해서는 500Wh/kg 이상이 필요할 것으로 예측되고 있다. 따라서 일각에서는 휴대전원이 이동통신기기의 발전에 장애가 될 것이라는 전망도 나오고 있는 실정이다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 지금까지 2차전지의 발전이 지속적으로 이루어져 왔으나, 현재는 어느 정도 한계에 다다른 느낌이며, 따라서 기존의 2차전지가 갖고 있는 에너지밀도의 한계를 극복하기 위한 대안으로 연료전지가 주목을 받고 있다. 소형 연료전지가 휴대용 전원으로 사용되기 위해서는 다음과 같은 요구사항을 만족시켜야 한다.

- 1) 에너지 밀도가 높아야 하고(300Wh/kg 이상)
- 2) 작동온도와 압력이 낮아야 한다.
- 3) 연료의 재충진(1분 이내), 보관, 취급, 운반, 구입이 용이하고, 값이 싸야 한다.
- 4) 연료 누출시 인체에 무해해야 한다.

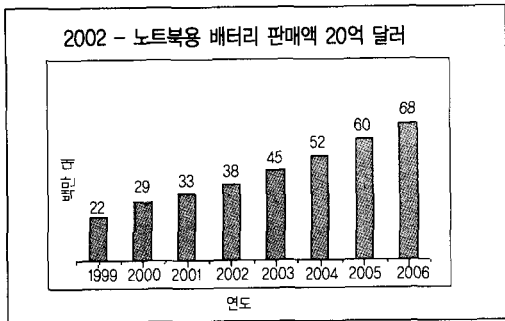


그림 1 전 세계 노트북 컴퓨터 판매량

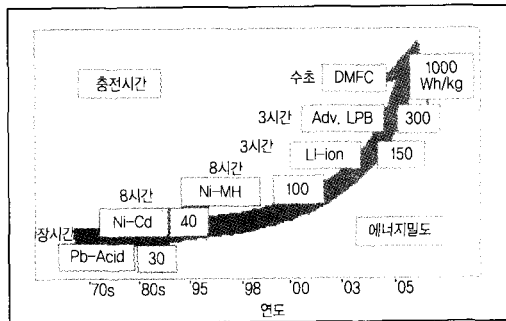


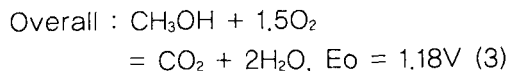
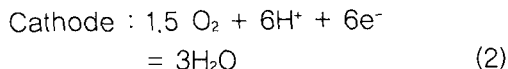
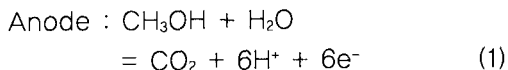
그림 2 에너지 저장장치의 변화 추이

- 5) 수명이 길어야 하고(2년 이상)
- 6) 가격이 저렴해야 하고(\$5/W 이하)
- 7) 부하에 대한 응답특성이 좋아야 한다.
- 8) 운전시작 시간(start-up time)이 짧아야 한다.

연료전지는 여러가지 종류가 있으며, 용도와 크기에 따라서 적절한 형태의 연료전지를 사용하게 된다. 수십 와트급 이하의 휴대용 전원으로는 직접메탄을 연료전지(DMFC : Direct Methanol Fuel Cell)와 고분자 전해질 연료전지(PEMFC : Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)가 사용 가능한 것으로 알려져 있다. DMFC는 메탄올을 연료로 직접 사용하는 반면에 PEMFC는 수소를 사용하며, PEMFC의 경우에는 수소를 공급하는 방법에 따라서 다양한 기술이 적용된다.

먼저, 직접 메탄올 연료전지의 작동원리와 구성재료에 대해서 간략히 설명하면 다음과

같다. DMFC의 작동원리는 그림 3과 같으며, 전지 내의 애노드와 캐소드에서 일어나는 반응은 식 (1)~(3)과 같다.



애노드 쪽으로 메탄올 수용액이 공급되면 전극에 있는 촉매층(백금-루테늄 촉매)에서 산화반응이 일어나 식 (1)에서와 같이 수소이온과 전자가 발생하고, 전자는 외부회로를 통해 캐소드로 이동하며, 발생된 수소이온은 이온전도성 전해질 막을 통해 캐소드로 이동한다. 캐소드(백금촉매)에서는 외부에서 공급되는 산소가 수소이온과 전자와 합쳐져서 물을 만드는 반응을 일으키게 된다. 전체 반응을 보면 메탄올과 산소가 반응하여 물과 이산화탄소를 생성시키며, 이와 동시에 전기를 발생시키게 된다. 이때 이론적인 기전력은 1.18V가 된다. 여기

표 1 휴대용 연료전지의 종류 및 사용 연료

연료전지형태	사용연료	장점	단점	개발회사
직접메탄올 연료전지 (DMFC)	메탄올	사용편리	저성능, 고가격	다수
고분자전해질 연료전지 (PEMFC)	압축수소	고성능	휴대불편	
	금속수소화물	고성능	가격, 불편	
	연료개질기 (메탄올, 휘발유)	연료공급 용이	고온 일산화탄소 발생	카시오
	화학적 수소화물 (NaBH ₄)	연료공급 용이	반응조절 어려움	밀레니엄셀

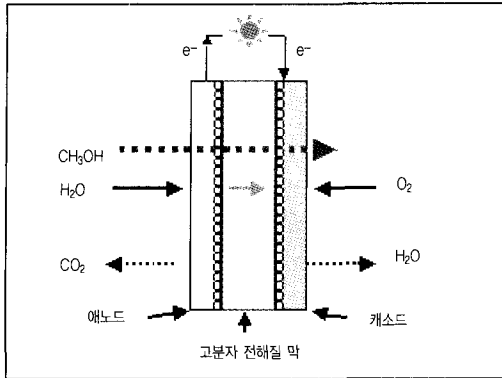


그림 3 직접메탄올 연료전지의 구조

에서 전해질 막으로는 수소 이온전도성을 갖는 퍼플루오로술폰산(perfluorosulfonic acid) 계통의 고분자막을 사용하는데, 현재는 듀폰에서 판매하는 Nafion™이라는 전해질 막이 가장 많이 사용되고 있다.

PEMFC와 DMFC는 동일한 전극물질(백금계 촉매)과 고분자 전해질막을 사용하고 있으나, PEMFC는 수소를 연료로 사용하고, DMFC는 메탄올을 전극에 직접 주입하여 사용한다. 따라서, DMFC는 반응속도가 느리고, 메탄올이 애노드에서 캐소드로 넘어가게 되어 전극 성능이 낮아지는 문제점으로 인해 PEMFC에 비해 전지 성능이 1/3~1/5

수준에 불과하다. 그러나 메탄올은 액체이므로 휴대하기가 용이하고 연료의 공급이 쉬우며, 장치가 단순하고 소형으로 만드는 것이 가능하기 때문에 휴대전원으로서 상업화 가능성이 매우 높다. 그림 3은 단위전지에 대한 그림이며, 실제 운전시에 단위전지에서 발생하는 전압은 0.3~0.5V 수준이다. 따라서, 3V의 전압을 얻기 위해서는 6~10개의 단위전지가 직렬로 연결되어 있는 스택(stack)을 만들어야 한다. 연료전지에서 생성되는 전류의 양은 전극의 면적에 비례하고, 전압은 전지의 갯수에 비례한다.

그림 4는 Hockaday(Energy Related Devices, Inc.)가 고안한 소형 DMFC 스택이다. 5W급 이하의 휴대용 전원으로 사용하기 위해서는 펌프나 송풍기의 도움 없이 연료와 공기가 확산이나 자연대류에 의해 공급되는 공기호흡형 연료전지 형태를 가져야 한다. 현재 DMFC를 상업화하기 위한 연구 개발이 활발히 이루어지고 있으나, 상용화 가능한 수준이 되기 위해서는 다음과 같은 몇 가지 기술적 과제를 해결해야 한다.

- 1) 높은 출력밀도의 스택(>100W/kg)
- 2) 주변기기의 소형화
- 3) 반응물(메탄올, 공기)의 공급과 생성물(물, 이산화탄소)의 제거

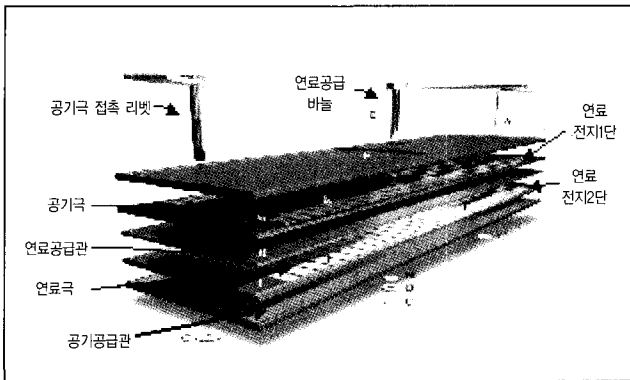


그림 4 마이크로 연료전지의 구조



그림 5 NEC에서 개발한 DMFC로 가동되는 PDA

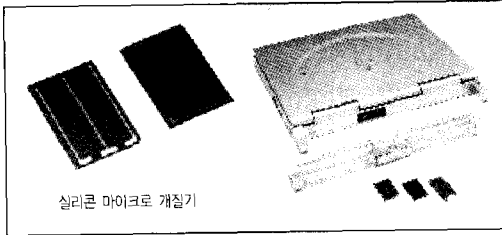


그림 6 실리콘 기판으로 제작한 마이크로 연료개질기(왼쪽)와 개질기와 PEMFC를 장착한 노트북컴퓨터(Casio Inc. 시작품)

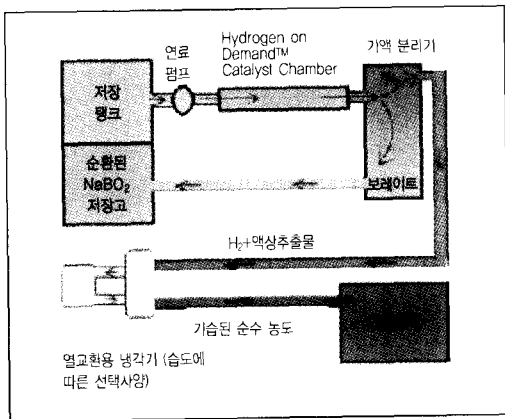


그림 7 화학적 수소화물을 이용한 수소 발생장치(Millennium Cell Inc.)

4) 생산단가 저감

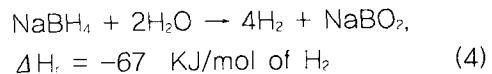
이러한 과제를 해결하기 위해서는 전극용 촉매 활성을 높이고, 전극 구조를 최적화하여 전극 성능을 제고해야 하며, 스택 형태를 정밀하게 디자인하여 내부저항을 최소화하고 단위부피당 출력밀도를 높여야 하며, 분리판의 유로를 최적화하여 반응물 및 생성물의 물질전달 저항을 최소화해야 한다.

고분자전해질 연료전지는 이미 상당한 연구개발이 이루어져 있는 상태이나, 이것을 소형 휴대용 전원으로 사용하기 위해서는 수소를 공급하는 문제가 해결되어야 한다. 수소를 생산하는 방법은 앞의 표 1에 열거한 바와 같이 네 가지로 분류할 수 있다. 먼저, 압축수소를 사용하는 방법이 가장 쉬우나 휴대용으로는 적합하지 않으며, 금속수소화

물을 사용하는 것은 휴대와 사용이 간편한 장점이 있는 반면에 가격이 비싸고 수소공급 인프라가 구축되지 않은 단점이 있어서 실용화에는 적합하지 않다. 수 년 전에는 탄소나노튜브(CNT : Carbon NanoTube)를 사용하여 수소를 저장하면 CNT 무게 15% 정도의 수소를 저장할 수 있다는 주장이 제기되어 한 때 관련 연구자를 흥분시킨 사건이 있었으나, 실험상의 오류로 판명되어 이 분야에 대한 열기가 상당히 식은 상태이다.

최근 들어 관심을 끄는 것이 마이크로 연료개질기를 사용하는 방법과 화학적 수소화물을 사용하여 수소를 생산하는 방법이다. 마이크로 연료개질기(micro fuel processor)는 기존의 대형 개질기를 MEMS(Micro ElectroMechanical System) 기술을 활용하여 소형화한 것으로, 연료인 메탄올이나 휘발유로부터 수소를 생산하는 장치를 가리킨다. 일반적으로는 메탄올을 연료로 사용하는데, 개질반응의 온도가 200~300°C이고, 생산된 수소 중에 상당량의 일산화탄소가 포함되어 있는 문제점이 있다. 따라서, 개질기의 크기를 소형화하는 것과 수소 중의 일산화탄소 농도를 50ppm 이하로 줄일 수 있는 기술을 개발하는 것이 핵심과제이다.

화학적 수소화물로부터 수소를 생산하는 방법은 알카리금속수소화물을 촉매 존재하에서 물과 반응시키면 수소가 발생하는 원리를 이용한 것이다. 가장 대표적인 것으로는 sodium borohydride(NaBH₄)가 있으며, 반응식은 다음과 같다.



휴대용 연료전지의 경우에는 간헐적으로 전기를 사용하기 때문에 수소 생산도 그에 따라 조절할 수 있어야 하나, 화학적수소화



그림 8 NaBH₄ 수소발생기로 가동되는 50W급 PEMFC

물의 가수분해 반응은 물과 촉매 존재 하에서 한번 시작되면 멈추어지지 않는 특성이 있고(촉매를 제거하여 반응을 멈추게 할 수는 있음), 또한 수소화물이 강한 부식성 물질이기 때문에 연료전지의 집전체 등을 부식시키는 문제를 야기할 수 있다. 또한, 평상시에 수소 생성을 방지하기 위해 NaBH₄ 용액을 pH14 이상의 고알칼리 상태로 보관하게 되는데, 누출되면 인체에 위험할 수도 있다. 그림 7은 밀레니엄셀 사에서 고안한 수소 발생장치 모형도이고, 그림 8은 수소 발생장치를 장착한 50W급 PEMFC 시스템이다.

최근 들어 새롭게 연구되고 있는 분야가 MEMS 기술을 이용한 실리콘 연료전지 기술이다. 실리콘 연료전지는 실리콘 기판에 반도체의 식각 공정을 이용해서 유로를 형성시키고, 이 위에 다시 박막 증착기술 등을 동원하여 전극과 전해질막을 형성시켜 만든 아주 작은 박막 연료전지를 가리킨다. 실리콘 연료전지는 두 가지 목적으로 개발되고 있다. 첫째는 휴대폰이나 소형 디지털 장치, 독립작동 센

표 2 국내의 회사들의 휴대용 연료전지 개발 동향 및 상업화 목표 시점

회 사	개 발 상 품	상업화 목표 시점
맨하탄 사이언티픽	휴대전화 충전기	2003
폴리퓨얼	노트북컴퓨터, 휴대전화 전원	2003
메카니컬 테크놀로지	휴대전화 전원	2004
메디스 테크놀로지	휴대전화 전원, 충전기	2003
모토롤라	휴대전화용 차세대 전원, 충전기	2004~6
스마트 휴얼셀	소형전자기기용 휴대전원	2003
삼성	휴대전화, 노트북 전원	2005
엘지화학	전자기기용 고성능 휴대전원	2006

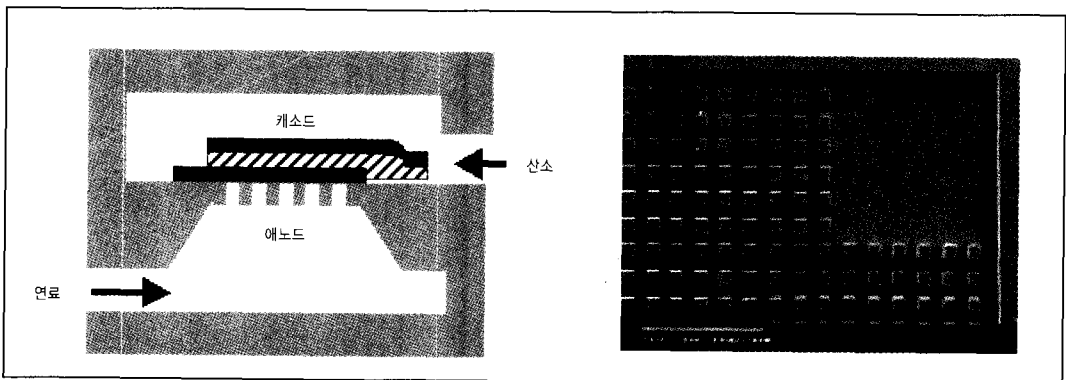


그림 9 실리콘 연료전지의 기본구조(왼쪽) 및 실리콘 위에 구현된 폭 100μm의 마이크로 유로(오른쪽)



그림 10 KIST에서 제작한 2.5W급 DMFC로 구동되는 모형차

서, 내장된 모니터 또는 MEMS 장치 등에 사용할 수 있는 밀리와트급의 전원을 개발하기 위한 것이고, 둘째는 전극이나 전해질막 등의 구성요소를 박막화함으로써 기존의 연료전지가 갖고 있는 출력밀도에 대한 한계를 극복하고자 하는 것이다. 박막화된 실리콘 연료전지는 기존의 연료전지에 비해 여러가지 장점을 갖고 있다.

- 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 기술 활용 가능
- 6) 연료전지 팩 제조의 자동화 및 일괄공정화 가능
- 7) 촉매와 전해질 막 등의 구조를 임의로 변경 가능
- 8) 대량생산 용이

그러나 아직은 연구의 초기 단계이며, 전지 성능을 높이기 위해 다양한 다양한 구조를 시험하고 있는 중이다. 기존의 연구결과들을 정리해보면 기판에 형성된 기공 또는 유로의 크기 및 모양, 제조방법, 전극 및 MEA를 형성시키는 방법, 집전체의 형태, 연

료의 종류 및 공급 방법 등에 있어서 많은 차이가 있다.

휴대용 연료전지는 기존의 2차전지의 단점을 보완할 수 있기 때문에 전 세계의 많은 나라에서 상업화를 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, 미국, 일본 등에서는 기존의 PEMFC 관련연구와 연료전지 재료부분의 성과를 바탕으로 하여 휴대용 연료전지의 상업화를 위한 노력에 박차를 가하고 있다.

표 2는 국내외 주요 회사들의 개발내용과 상업화 목표시점을 정리한 것이다. 국내에서도 삼성종합기술원, LG화학, KIST, 에너지기술연구원 등에서 수년간 이 분야에 대한 연구를 수행하고 있다. 특히 삼성종합기술원은 2와트급 DMFC 팩을 제작하여 휴대폰을 구동시킨 바 있으며, KIST에서도 1~2.5와트급의 여러가지 DMFC 시작품을 만들어 무전기나 모형자동차 등을 성공적으로 가동시킨 바 있다.(그림 10)

지금까지 살펴 본 바와 같이 휴대 전원용 소형 연료전지에 대한 연구가 전 세계적으로 매우 활발히 이루어지고 있으며, 많은 기업들이 이 분야에 진출하고 있다. 특히, 연료전지에 사용되는 재료 및 부품회사들의 관심은 매우 뜨거우며, 세계 곳곳을 순회하면서 제품을 선전하기 위해 열심이다. 물론, 아직도 휴대용 연료전지를 상업화하기 위해서는 3~5년 정도의 기간이 더 소요될 전망이다. 많은 연구투자가 이루어져야 할 것이다. 그러나 연료전지 관련기술의 국내외 격차는 그리 크지 않으며, 상업화가 이루어지면 경제적 효과는 매우 높을 것으로 예상되므로, 국내에서도 연료전지 관련기술에 대한 연구투자를 활성화시킴으로써 차세대 전원기술을 선점하기 위한 경쟁에 박차를 가해야 할 것이다.