

소형 정지형 연료전지 시스템과 스택의 기술개발 현황

홍병선

1. 서론

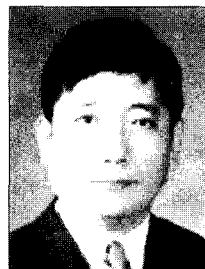
최근 전 세계적으로 수소경제 사회로의 전환과 연료전지 개발에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 이러한 관심의 증가는 에너지 문제와 관련한 두 가지의 큰 흐름에 근거한 것이다. 첫째, 지난 수세기에 걸쳐서 주된 에너지원인 화석연료가 향후 수십 년 내에 고갈된다는 점이다. 화석연료는 전기, 열, 동력의 에너지원이었으며 산업혁명과 근대화의 바탕이었다. 이러한 화석연료는 부존자원이며, 중동 지역 등 특수한 지역에 편재되어 있고, 산업발달과 함께 과도한 수요증가를 수반하여 에너지원의 고갈을 불러 일으키게 되었다. 인류는 생존을 위하여 새로운 에너지의 패러다임을 필요로 하게 되었다.

둘째는, 화석에너지 사용에 따른 지구환경의 문제이다. 기존의 에너지 운용은 화석연료를 태울 때 발생하는 열을 이용하는 것이다. 예를 들어 발전소나 자동차는 화석연료를 태우면서 발생하는 열을 동력으로 변환하여 이용하는 것이다. 이 연소과정에서 필연적으로 발생하는 이산화탄소나 황화물, 질소 산화물 등이 대기를 오염시켜 지구온난화의 주범이 되고 있다. 최근의 전 세계적으로 이상 기후에 의한 홍수, 가뭄, 태풍 등에 의한 피해가 급증하고 있는데 이 원인이 지구온난화 때문이라는 견해가 지배적이다.

화석에너지 자원의 고갈과 환경문제를 함께 해결해야 하는 것이 21C의 인류가 생존하기 위하여 해결해야 하는 절대 절명의 과제임에 틀림없다. 수소의 이용과 연료전지는 이러한 위기에 대한 가장 명확한 해답인 것으로 받아들여지고 있어 미국, 일본,

EU 등에서는 정치 지도자까지 나서서 연료전지의 상용화를 지휘하고 있는 실정이다.

수소관련 문제는 필요한 수소를 어떻게 생산하고 저장하고 분배하느냐에 대한 것이다. 궁극적으로는 수소는 물에서 얻게 될 것이나 현재는 기술적인 문제로 인하여 비용이 많이 발생하므로 당분간은 비경제적일 것이다. 따라서 기존의 석유나 천연가스와 같은 화석연료나 메탄올과 같은 탄화수소 계 원료를 분해하여 수소를 생산하는 것이 우선적으로 시도될 것이다. 또한 재생에너지원인 태양광, 풍력과 연계하여 수소를 생산하거나 폐기물, BIO 등에서 수소를 추출하여 사용하려는 기술개발도 진행되고 있다. 그러나 수소를 생산한다고 하더라도 수소를 이용해 우리가 필요로 하는 전기, 열, 동력을 얻을 수 있는 장치가 있어야 한다. 현존하는 기술 중에 수소를 이용해 직접 고효율의 전기를 생산할 수 있는 유일한 방법은 연료전지이다. 즉 연료전지는 수소에너지 시대에 있어서 없어서는 안 될 중요한 발전장치인 것이다. 여기서는



홍병선

- 1983 한양대학교 금속공학과 (학사)
- 1985 한국과학기술원 재료공학과(석사)
- 1992 미국 Northwestern 대학교 재료공학과 (박사)
- 1992~ Northwestern 대학교 재료연구센터 Post-Doc 연구원
- 1994 삼성코닝(주) 연구소 개발팀장
- 2000 (주)퓨얼셀파워 연구소장
- 2001~ 현재

Technology and Commercialization Issues for Proton Exchange Membrane Fuel Cells

(주)퓨얼셀파워 (Byung Sun Hong, FuelCell Power, Inc., D-101 Bundang Technopark, Yatap 151, Bundang, Sungnam, Kyunggido 463-760, Korea) e-mail: bshong@fuelcellpower.co.kr

연료전지 중에 기술개발의 성숙도와 상용화 정도에서 가장 앞서있는 고분자 전해질 연료전지, 특히 소형 정지형 연료전지 시스템과 스택에 대하여 기술개발 현황 및 상용화 문제를 다루고자 한다.

2. 연료전지 원리 및 기술 혁신

연료전지란 **그림 1**에 설명된 바와 같이 수소이온만을 통과시키는 고분자막을 경계로 수소와 산소를 양쪽에 공급하면 전기가 발생되는 원리를 이용한 것이다. 즉 물의 전기분해의 반대방향의 반응을 이용하는 것이다. 수소극에서는 수소가스가 촉매를 만나 수소이온과 전자로 나누어지며 수소이온은 고분자막을 통하여 산소극으로 이동하고 전자는 별도의 외부 회로를 통하여 산소극에 도달한다. 산소극에서는 촉매의 도움으로 산소기체와 수소이온 및 전자가 반응하여 물을 생성하게 된다. 즉 외부에서 지속적으로 수소와 산소를 공급하여 주면 전기와 물이 지속적으로 발생하므로 일종의 전기화학 반응에 의한 발전인 것이다. 이러한 원리는 이미 1839년 영국의 Grove라는 과학자에 의하여 처음 제안되었다. 그러나 100여년 간 크게 주목을 받지 못하다가 1959년 NASA의 GEMINI 우주선에 전력과 물의 공급원으로 연료전지가 탑재된 이래 과학적인 관심이 증가하였다. 그러나 이때까지만 해도 연료전지는 매우 비싸고 만들기 힘든 과학자의 발명품에 지나지 않았다.

본격적인 개발은 1980년대 및 1990년대에 이르면서 적어도 세 분야에서 기술적인 혁신이 이루어지

면서부터 시작되었다.¹ 첫째는 Dupont사가 이온전도성과 내구성이 뛰어난 불소계 고분자막인 NafionTM이라는 고분자를 성공적으로 개발한 것이다. 프로톤 전도막은 연료전지의 핵심소재인데 NafionTM은 높은 이온전도도와 내구성으로 기존의 연료전지의 수명과 성능을 향상시키는데 크게 기여하였다. 둘째는 촉매의 사용량을 크게 저감하는데 기여한 Supported Pt/C 개념이다. 미국의 Los Alamos National Lab.에서 촉매를 미세한 카본입자 위에 나노입자로 분산시킴으로써 촉매 사용량을 기존의 수 십분의 1로 줄여도 오히려 성능은 증가하는 기술적인 혁신을 이루었다.² 셋째는, 연료전지에 엔지니어링의 개념을 최초로 접목시킨 벤처 기업인 캐나다의 발라드파워시스템(BPS)사의 기술 혁신이다.³ 캐나다의 BPS사는 1990년에 접어들면서 연료전지에 공학의 개념을 도입하여 연료전지를 꿈이 아닌 현실의 제품으로 탈바꿈시키는데 지대한 공헌을 하였고 현재 전 세계 고분자 연료전지 기술을 선도하고 있는 기업이다. BPS사는 연료전지의 핵심부품인 스택의 개념을 정립하였으며 수소 및 공기의 공급 방식, 공기극에서 생성되는 물의 효율적인 제거와 고분자막의 적절한 가습 등 시스템화를 위해서 필수적인 문제들을 공학적인 접근을 통하여 대부분 해결하였다. BPS사는 이러한 기술적인 혁신을 통하여 1990년 중반이후에 세계 최초로 연료전지 버스를 자체 제조하여 시범 운전하는데 성공하였으며 스택분야에서도 수분관리를 해결하여 내구성을 증명해 보이기도 하였다.

상기의 세 가지 분야의 기술혁신과 최근의 환경문제, 에너지자원의 고갈문제의 대두는 연료전지를 21C 에너지 문제 해결의 유일하고 현실성 있는 대안으로 여기게 되었다. 지난 세기의 정보통신과 인터넷의 혁명에는 마이크로칩이라는 혁신기술이 있었던 것과 같이 향후의 수소사회에서 연료전지는 이러한 혁신기술을 담당하게 될 것이다. 수소에너지와 연료전지는 여러 선택중의 하나가 아닌 유일하고 궁극적인 대안으로 받아들여지고 있는 것이다.

3. 연료전지 시스템

연료전지는 원리는 간단하지만 시스템으로서 작동하기 위해서는 여러 가지 복잡한 문제를 해결해야 한다. **그림 2**는 연료전지 시스템의 구성을 나타내며 일반적으로 스택, 개질기, 전력변환기 등 관련 보조부

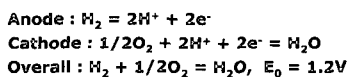
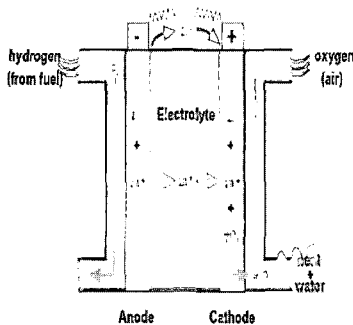


그림 1. 연료전지의 반응원리.

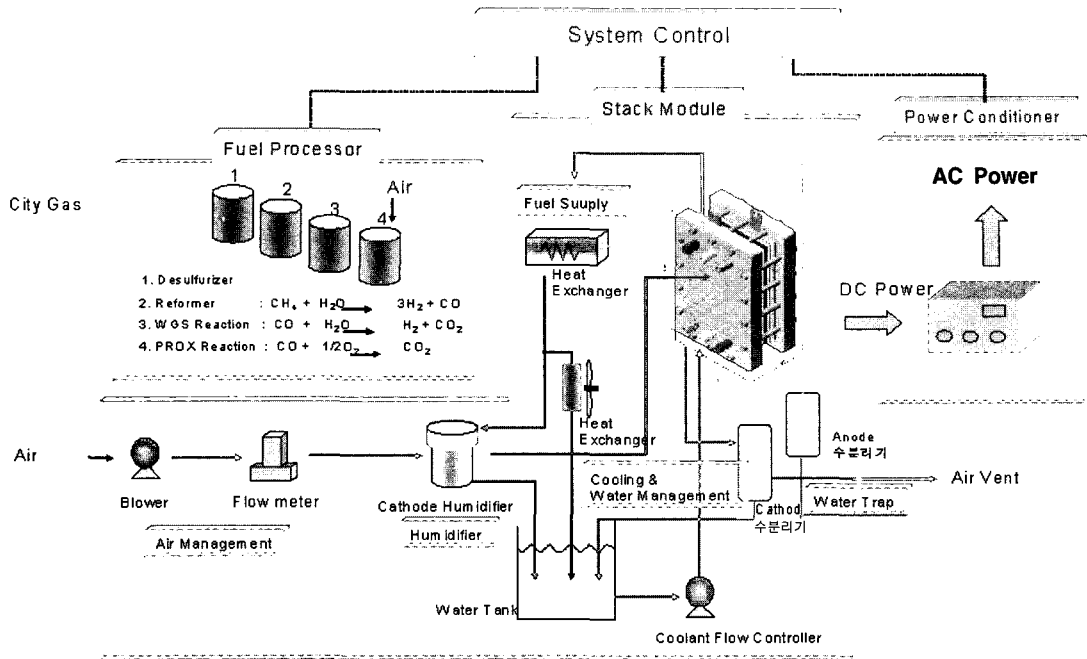


그림 2. 연료전지 시스템의 구성요소.

품 (balance of plant)로 이루어져 있다.

연료전지 시스템의 핵심은 가스를 이용해 직접 전기를 생산하는 스택이다. 스택에서 생산되는 전기는 직류이므로 일반 소비자가 사용하려면 교류로 바꾸어 주어야 한다. 스택에서 생산된 전기를 교류로 바꾸어 주는 inverter와 converter로 이루어진 부분을 합하여 전력변환기 (power conditioner)라고 한다. 전력변환기는 필요에 따라 전력계통선에 연계하여 운전할 수 있는 기능을 포함할 수 있다. 연료개질기 (reformer or fuel processor)는 수소를 연료로 사용할 때는 필요 없으나 LNG나 LPG 등 탄화 수소계 연료를 사용할 때는 이들 가스를 분해 및 개질하여 수소를 포함한 연료를 만드는데 이용된다. 연료전지의 연료로 기체 이외에 액체 연료도 가능한데 메탄올을 직접 연료로 사용하는 것을 직접메탄올 연료전지 (direct methanol fuel cells)라고 부르며 주로 노트북용과 같이 소형 전자기기용 전원으로 응용될 수 있다.

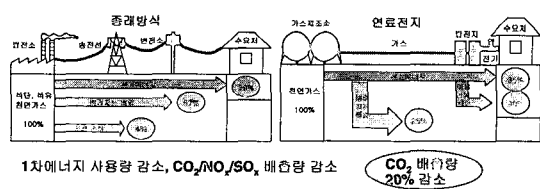
연료전지 시스템에서 가장 중요한 것은 전기효율이다. 즉 시스템에 들어가는 연료가 가지는 에너지 중에 순수하게 시스템 외부로 공급되는 전기에너지가 얼마나 되는지이다. 시스템의 전기효율은 아래의 식으로 표기된다.

$$\eta_{System} = \eta_{Reformer} \times \eta_{Stack} \times \eta_{BOP} \times \eta_{Inverter}$$

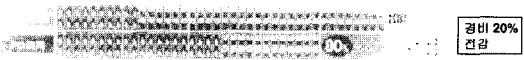
연료전지 시스템의 전기효율을 높이기 위해서는 개질기, 스택 및 전력변환기의 효율이 높아야 함은 물론 시스템을 구동시키기 위한 제반 보조장치 (BOP)의 효율도 높아야 함을 알 수 있다. 시스템에서의 두 번째로 중요한 문제는 신뢰성이다. 연료전지 시스템은 용도별로 목표수명이 있다. 예를 들어 정지형 연료전지에서는 40,000시간 (5년)이며, 자동차 분야에서는 5,000시간 (100,000마일 이상), 이동용에서는 1,500시간, 그리고 UPS 분야는 200시간 정도를 목표 수명으로 하고 있다. 이렇게 목표 수명이 다른 것은 연료전지의 운전조건이 각각 다르며 연료전지의 수명은 운전조건에 밀접하게 관련되어 있기 때문이다. 신뢰성을 높이기 위해서는 핵심부품의 신뢰성 확보는 물론 최적의 운전제어를 확보할 필요가 있다. 연료전지 시스템에서 세 번째로 중요한 것은 가격이다. 연료전지는 상용화 초기에는 그 구성부품 및 판매량이 미미하므로 가격이 비싸다. 따라서 정부에서는 초기 보급단계에서 기업에 대한 적극적인 지원을 통하여 양산을 유도하고 시장을 창출하여 기업이 가격 경쟁력을 확보할 수 있도록 하여야 한다. 일본과 미국에서는 기업에서 개발한 연료전지 시스템을 정부와 지방자치단체 등이 전액보조로 구매를 함으로써 기업이 경쟁력을 유지할 수 있도록 지원하고 있다. 연료전지 시스템에서 가장 먼저 상용화가 전개되

는 것은 가정용 연료전지 (residential power generator, 이하 RPG)라는 1~5 kW급의 연료개질기를 포함한 시스템이다. RPG 시스템은 가정에 연결되어 있는 도시가스 망을 이용하여 전기를 생산하며 열회수를 통한 온수 사용으로 30% 이상의 전기효율과 열효율을 포함한 종합효율 75% 이상의 고효율을 얻을 수 있는 발전장치이다. 가정에서는 가스를 이용하여 고효율의 전기를 생산하므로 가스 및 전기비용을 합한 유틸리티 비용의 절감이 이루어지며 국가적으로는 CO₂의 20% 정도 절감이 이루어지고, 동고하저의 가스이용과 여름철 전력난을 동시에 해결함은 물론 신규 발전소 건설의 부담을 줄일 수 있는 등의 장점이 있어 기술적인 성숙과정을 거쳐 보급이 이루어지면 급격한 시장 침투가 예상되고 있는 분야이다. **그림 3**에 연료전지 RPG 시스템의 환경효과 및 경제성이 정리되어 있다.

가정용 연료전지는 미국에서는 Plug Power사를 중심으로 한 5~7 kW급의 독립형 운전 시스템이 주종이며, 일본에서는 마쯔시다, 도시바, 산요 등 대기업을 중심으로 국가적 목표인 도시가스를 연료로 하는 1 kW급 계통연계형 시스템에 집중적인 개발이 이루어졌다. 일본에서는 2001년부터 일본도시가스협회



1차에너지 사용량 감소, CO₂/NO_x/SO_x 배출량 감소
CO₂ 배출량 20% 감소



Source : Toyota Motors 자료

그림 3. 가정용 연료전지 시스템의 환경효과 및 경제성.

가 주관하는 RPG의 실증이 이루어졌으며 현재는 전국적인 규모로 2차 실증이 진행 중이다. 일본의 경우는 국가적으로 1 kW라는 목표를 정하여 개질기, 전력변환기, BOP 등 모든 관련 부품이 1 kW에 최적이 되도록 개발하였으며, 이로서 효율과 시스템 크기, 신뢰성면에서 세계에서 가장 우수한 RPG 시스템 기술을 보유하고 있다.

국내에서는 한국에너지기술연구원이 개발한 연구소 프로토타입인 5 kW급 주택용 연료전지 시스템 개발이 2002년 완료된 이래, 대구도시가스, 퓨얼셀 파워, 세티 등 3개의 민간기업에서 RPG 상용화 프로토타입을 발표하였고, 2004년부터 2년간 정부지원으로 진행되는 실증연구 사업이 착수되었다. **그림 4**는 세 회사에서 개발한 RPG 시스템의 사진을 보여주고 있다. 국내 연료전지 시스템 개발에서 아쉬운 점은 일본의 1 kW 시스템의 경우와 같이 국가적인 전략에 의한 개발의 전략적 집중이 미흡하다는 점이다. 지금이라도 스택과 개질기에 편중된 연료전지 개발을 센서나 해당 BOP 등의 개발로 확대하고 국가적인 목표를 분명히 할 필요가 있다.

국내 연료전지 보급 측면에서, 산업자원부에서 발표한 RPG 보급계획에 의하면 2012년까지 10,000호 보급을 목표로 하고 있는데 2010년까지의 일본의 400,000대 보급 계획에 비하면 40분의 1에 해당하는 규모이다.^{4.5} 일본과 한국의 GDP 규모가 4분의 1이라는 점을 고려하면 상기의 계획은 수정되어야 할 것으로 보인다.

일본에서 분석한 자료에 의하면 2010년에 일본의 고분자연료전지의 시장은 **그림 5**에 나타난 바와 같이 100억 달러 규모에 이를 것으로 전망되며 이 중 소형 정지형 분야가 대부분을 이룰 것으로 보고 있다. 자동차 분야는 여전히 초기 시장이며 2010년 이후에 대규모 시장이 전망된다. **그림 6**에서는 2003년

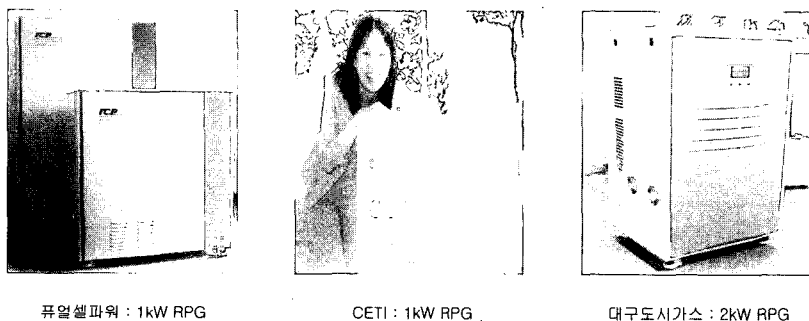
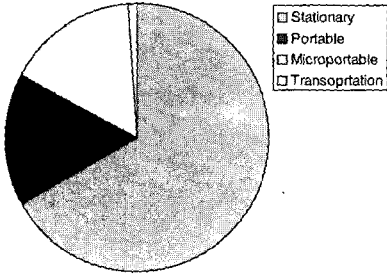


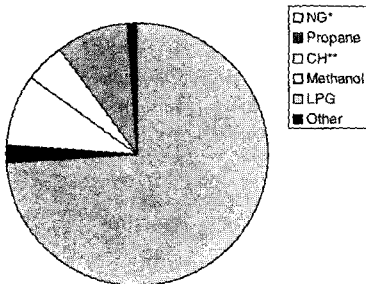
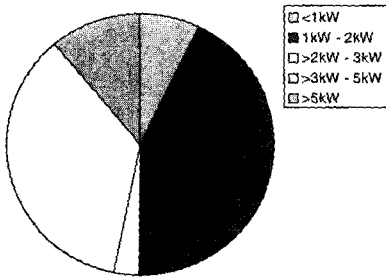
그림 4. 국내에서 개발한 가정용 연료전지 시스템.



2010년 PEMFC 시장 전망
 전체 : 100억\$ USD
 (Dupont Japan사 분석)

그림 5. 2010년 고분자 연료전지의 시장규모 전망.

The small stationary fuel cell
 by size of units



*NG=Natural Gas,

**CH=Compressed Hydrogen

Source: Fuel cell today 2003; market survey

그림 6. 0.5~10 kW 범위의 가정용 및 상업용 시스템의 보급에서 크기와 연료별 구성비.⁶⁾

기준으로 이미 보급된 소형 정지형 연료전지 시스템 중에서 출력 크기별과 사용 연료별로의 구성비가 나타나 있다. 그림에서와 같이 소형 연료전지 시스템은 1~2 kW급과 5 kW급 이상의 RPG가 주류를 이루며, 연료로는 순수수소가 아닌 기존의 인프라가 구축되어 있는 도시가스를 개질하여 사용하는 것이 주요 시장임을 알 수 있다. 따라서 향후 상용화 보급과 산

업기반을 구축하는 전략으로 상기의 제품과 기술에 전략적 집중을 해야 할 것이다.

가정용 연료전지의 보급은 기존의 중앙집중적인 전력인프라가 분산화된 분산전력 시대로 접어드는 시발점이 될 것으로 기대되고 있다. 즉 전기는 이제 필요한 곳에서 청정하게 직접 만들어 사용하게 되는 패러다임의 이동이 일어날 것이다.

4. 연료전지 스택

연료전지 시스템의 심장이라고 할 수 있는 연료전지 스택은 여러 가지 기술과 하위 부품으로 이루어진 종합 부품의 성격을 지니고 있다. 그림 7에는 셀스택의 모형을 그림 8에는 실제 스택의 사진을 보여주고 있다. 연료전지 스택은 막전극접합체 (membrane electrode assembly, 이하 MEA), 분리판, 밀봉부품, 전류집전체, end plate로 구성되어 있으며 각 부품의 기능 및 기술을 아래에 설명하였다.

4.1 막전극접합체 (MEA)

MEA는 스택을 구성하는 핵심부품으로 이온만을 이동시키는 고분자막과 막 양쪽에 위치하여 가스를

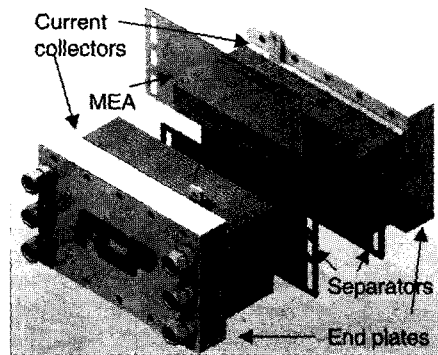


그림 7. 고분자연료전지 셀스택 모형도.

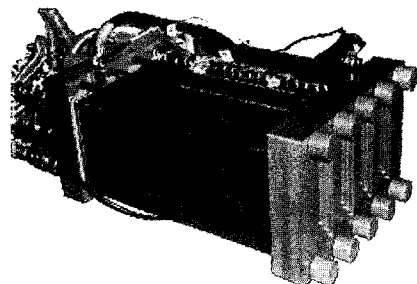


그림 8. 퓨엘셀 파워의 5 kW 스택.

이온으로 분해하는 촉매층으로 구성되어 있으며 필요에 따라 촉매층 외부에 가스의 원활한 공급과 공기극에서의 물배출의 기능을 담당하는 다공성의 가스 확산층이 위치한다. 고분자막에 촉매층이 코팅된 상태를 CCM (catalyst coated membrane)이라 하고, 여기에 가스확산층이 추가된 것을 5 layer MEA라고 부른다. MEA는 수소극에서의 수소의 산화반응과 공기극에서의 산소의 환원반응을 통하여 1개의 단위 전지당 약 1.2 (OCV) ~0.5 V 정도의 전압과 100 ~1,000 mA/cm² 정도의 전류밀도를 발생시킨다.

스택은 복수개의 단위전지를 직렬로 적층하여 구성하는데, 발생하는 전류는 셀의 면적에 비례하고 전압은 셀의 적층 수에 비례한다. 따라서 스택에서 발생하는 출력은 셀의 활성면적에 비례하는 전류와 셀의 적층 수에 비례하는 전압의 곱으로 표현될 수 있다.

4.2 분리판 (Bipolar Plate)

분리판은 MEA의 양쪽에 위치하며 한쪽에는 수소 연료를 반대면에는 공기를 운반하는 유로와 매니폴드를 포함한 판을 의미한다. 분리판에는 가스의 흐름을 위한 유로가 설계 및 가공되어져 있으며, 스택에서는 여러 셀에 가스를 균질하게 공급하기 위하여 분리판에 적절히 매니폴드가 설계/가공 되어져 있다. 분리판은 수소판과 같이 한 종류의 유로만이 가공된 판 (monopolar plate)과 공기채널과 냉각채널을 한 개의 판의 양면에 구비한 판 (bipolar plate)의 두 가지 종류가 있다. 스택은 한 개의 단위 전지당 2개의 분리판의 조합으로 이루어지는 것이 일반적이다. 분리판 재질은 흑연판, 수지가 함침된 흑연판, 흑연/수지 복합재료 및 금속재료 등이 사용되며 유로의 가공방식으로는 CNC가공, 압축몰딩, 에칭 등의 방법이 사용되어지고 있다.

4.3 밀봉부문

연료전지는 가스의 공급을 통하여 전기를 발생시키는 장치로서 상당히 높은 수준의 밀봉 기술을 요구한다. 밀봉재는 보통 탄성을 지닌 고무로 제작되는데 매니폴드와 활성면적 모두를 감싸고 있다. 따라서 수소와 공기 및 냉각수가 정해진 경로를 따라서만 흐르게 되며 절대로 서로 섞이거나 밖으로 누출되지 않도록 잘 밀봉되어야 한다. 밀봉재의 구성은 O-ring의 형태, 판상의 형태 등을 이용하여 구성되고 있다.

4.4 전류집 전체

MEA와 분리판이 직렬로 적층되어 구성된 스택에서 최종적인 전류는 스택의 양 끝에 위치한 전류집전

체에 모아진다. 전류집전체는 분리판과의 접촉저항이 적어야 하며 부식환경에 대한 저항성도 높아야 한다.

4.5 End Plate

스택의 가장 바깥쪽에 존재하며 스택체결 시, 각 셀에 일정 압력을 균질하게 부과하여 밀봉도 및 구성부품 간의 접촉저항을 줄여주는 역할을 한다. 스택의 end plate는 두께가 얇으면서 단위 전지에 균질한 응력을 전달해 주어야 하므로 재질과 설계 측면에서 최적화가 필요하다. 일반적으로 스테인레스 스틸이나 알루미늄계 합금이 사용되나, 경량화 문제로 엔지니어링 플라스틱이 적용되는 경우도 있다.

연료전지 스택은 외부에서 공급되는 연료와 공기를 이용해 전기화학반응에 의하여 전기를 생산하는 핵심부품으로서 다음의 작용이 일어난다.

- 수소연료와 공기를 스택 내부로 유입하여 각 셀에 균질하게 공급함.
- 공급된 가스의 산화, 환원반응, 고분자막을 통한 이온의 이동, 분리판과 가스 확산층을 통한 전자의 이동으로 이루어지는 전기화학반응이 계속적으로 이루어짐.
- 단위전지에서 생성되는 전자를 MEA와 분리판을 통하여 전류집전체에 모음.
- 공기극에서 발생하는 반응생성물인 수분을 배출하여 공기가 원활히 촉매층에 공급되도록 함.
- 스택에서 발생하는 열을 냉각수를 통하여 효과적으로 제거함.

연료전지 스택은 각 구성요소 부품의 정확한 제어와 체결을 통하여 응력분포, 유동분포, 가습 및 물배출, 및 냉각에서 균질성을 유지하는 것이 가장 중요하다. 연료전지 스택의 균질성은 셀간의 균질성도 중요하지만 셀 내부에서의 영역간의 균질성도 중요하다. 일반적으로 활성면적이 커지면 작을 때에 비하여 성능이 감소하는데 이것은 크기효과로 알려진 바와 같이 보통의 serpentine 유로를 가진 분리판의 경우에 셀 내부에서의 가습과 온도 등을 균질하게 유지하기가 셀의 면적이 커질수록 어려워진다는 것을 의미한다. 대면적 셀에서는 균질성을 유지하기 위하여 분리판의 유로 특성과 냉각수의 흐름을 포함한 전체적인 엔지니어링 설계가 필수적이며 이를 위하여는 특히 대면적 셀에서의 물거동의 면밀한 연구와 해석이 필요하다.

국내의 고분자 연료전지 스택 개발은 초기의 한국에너지기술연구원과 한국과학기술연구원의 기본연구에 이어 현대자동차, 퓨얼셀파워, 세티, LG정유 등 기

업에서 상용화 제품개발이 이루어지고 있다. 최근 퓨얼셀과워는 1~3 kW 스택을 상용화하여 국내외에 판매하고 있으며 동시에 자체개발한 개질가스형 5 kW 스택의 정부실증연구를 수행하고 있다.

표 1은 연료전지 스택 부품의 국내의 기술개발현황을 설명하고 있다.

5. 향후 기술개발 및 상용화 과제

고분자연료전지의 현재의 기술은 초기 상용화를 착수하는데 충분한 기술이라고 판단된다. 최근 미국과 일본의 가정용 연료전지 시스템은 실증단계를 거쳐 2005년부터 보급을 통한 상용화를 계획하고 있다. 국내도 민간 개발업체가 개발한 가정용 연료전지의 실증사업을 진행 중이다. 그러나 향후 본격적인 시장 전개를 위해서는 여러 가지 면에서 극복되어야 할 과제가 있다. 이러한 문제점은 초기 보급이 이루어지면서 기업, 연구소, 대학교, 그리고 정부에서 지혜와 노력을 집중하여 극복되어야 할 것이다. 여기서 중요한 것은 연료전지가 국가 간의 경쟁의 모습을 보이고 있으며, 한국이 경쟁의 주도권을 확보하는 전략이 중요하다. 주도권의 확보의 핵심은 먼저 상용화에 성공하는 것이다. 이는 무선통신, 초고속인터넷 분야에서 초기

기술 성숙도에서 다소 떨어졌지만 상용화를 먼저 달성한 한국이 세계적인 산업 주도권을 확보하는데 성공하였던 경우와 유사하다고 보겠다.

5.1 초기 상용화 (2005~2007) 과제

초기 상용화의 전략을 수립하는데 있어서 국내보다 앞서서 진행되고 있는 일본과 미국의 초기 상용화 과정을 살펴보는 것이 유용할 것이다. 일본에서는 정부 주도의 실증 사업을 마무리하고 2005년부터 초기 보급이 시작될 전망이다. 일본은 실증과제를 수행하면서 가정용 연료전지 시스템의 기술적인 문제점들을 해결하였고 여러 가지 새로운 문제점도 이해하게 되었다. 연료전지 시스템은 가격, 신뢰성 측면에서 아직 본격적인 상용화를 시작하기에는 무리가 있음을 인정하는 분위기이다. 그러나 일본 정부에서는 초기 시장의 형성과 기업의 경쟁력 확보라는 목표로 초기 상용화 계획을 수립하고 있다.

먼저 가격 문제는 예를 들어 도시바사의 700 W RPG 시스템의 가격이 2004년 기준 1,500만엔 정도이다. 이는 시스템을 소량 시험제작하기 때문이다. 따라서 일본 정부는 가정용 1 kW급 연료전지의 실용화를 촉진하기 위하여 시스템 제조사가 적어도 연간 일정분량의 시스템을 제조 보급할 수 있는 여건을 조성하려는 계획을 세우고 있다. 예를 들어 일본의 차원 에너지청에서는 연간 25억엔의 예산을 확보하여

표 1. 고분자 연료전지 스택관련 국내의 기술개발 동향

구분	기술	주요 이슈	국내 기술 개발 현황	해외 기술 개발 현황
스택 제조 기술	분리판	· 소재와 가공	· 한국타이어 : 흑연복합체 몰딩기술 개발중 · 일도, 대양, 모간 : 흑연+수지합침, CNC 가공 · 현대하이스코 : 금속분리판 개발 착수	· SGL Carbon : BMA5, BPP4 등 흑연복합체 · Nisshinbo : 흑연복합체 압축몰딩 · 스미토모금속 : 금속분리판 · 모건(영국) : 흑연소재 Electroetch 기술
	MEA	· 성능 · 연속제조공정 · 고온/저가습막	· KIER, KIST 등 출연연 자체 Lab 샘플제조 · FCP 5 layer MEA 개발, 초기 시장 진입 · LG화학 개발중 · 연속 제조 공정 개발 미약함	· Gore Fuel Cells MEA 상용화, 선두업체 · Umicore : CCM 상용화 · Ionpower : 미국 벤처, MEA 상용화 · Dupont, 3 M : 상용화, 후발주자 · Celanese : 고온막 개발 벤처
스택 설계 기술	해석/설계	· 대연적 셀의 열/유동/전기장 해석	· 유동 시뮬레이션이 대부분이며, 화학반응을 고려한 해석시도 부족 · 물생성 및 이동에 대한 고려 전무함 · 다채널을 갖는 분리판에 대한 해석은 미비 · 출연연과 대학 등에서 기초적 수준	· 미국의 대학, 연구소, 기업에서 상용코드개발 · Fluent, Star CD 등 연료전지 상용코드 개발 중이나 해외유출에 소극적 · 다채널특성, 이상유동 현상은 현재 시도중
	스택 체결 기구 · 응력해석	· 스택 체결 기구 · 응력해석	· 스택체결의 엔지니어링 개념 도입 미비 · 응력해석 및 실험을 통한 검증과정이 부족함	· 발라드사, UTCFCA 등 엔지니어링 스택 설계/제조 · 금속재료 이외의 소재적용 시도
스택 운전 기술	스택 운전 기술	· 저가습, 고온운전	· 정지형 : 풀가습(RH>80%) 운전(60~70 °C)	· 정지형 : 풀가습 (RH>80%) 운전 ((70~75 °C)) · 80 °C 이상, 저가습 (RH<60%) 운전 목표로 개발 중임

2005년부터 가정용 1 kW급 연료전지의 실용화를 위해 top runner (가장 싼 가격을 제시한 기업) 방식으로 연간 400대 규모의 모니터 사업을 시작하려는 계획을 세우고 있다. 2005년부터 3년간 시행될 이 사업은 100% 전액을 정부가 보조하여 구매하며 매년 구입 물량을 늘리고 구매 가격을 낮추어 2007년도에는 5,000대와 100만엔/대 까지를 달성하는 것을 목표로 하고 있다. 이러한 초기 시장과 보급 지원을 통하여 관련 기업의 경쟁력을 구축하려 하고 있다. 미국에서도 정부와 지방자치 단체가 대규모 프로그램을 마련하여 벤처기업인 plug power사로부터 수백개의 시스템을 전액보조로 구매하여 분산발전 시대에 대비하는 경험과 기술을 축적하고 있으며 본격적인 상용 보급을 준비하고 있다. 미국과 일본의 초기 상용화 전략에서는 관련기업 경쟁력 구축과 본격적인 상용화를 위한 기술 및 운용 경험의 축적을 핵심으로 하고 있다.

국내에서도 초기 상용화를 위한 바람직한 전략으로 가정용 연료전지의 개발 선두업체를 중심으로 일정량의 보급이 보장되는 방향으로 기업의 가격 경쟁력을 확보할 필요가 있다. 정부 주도하에 대규모의 실증단지 조성하여 여러 가지의 운전 경험과 시스템 보안을 위한 노력이 필요하며 향후의 발전단계 차익보상과 시스템 목표 가격 등의 실질적인 데이터를 얻는 것이 중요하다. 이러한 초기 집중화 노력은 국내의 관련 산업분야에 시장의 확신을 주게 되어 적극적인 신규참여가 자연적으로 유도될 것이다.

5.2 본격적인 상용화 (2008 이후) 및 기술개발과제

가정용 연료전지의 본격적인 상용화가 전개되면 시스템의 5년 이상의 내구성과 1 kW당 오백만원의 가격을 달성해야 하는 것으로 일본에서는 분석하고 있다. 이는 정부의 보조금 지원 없이 기업이 자체 경쟁력으로 달성해야 하는 것으로 시스템 제조기업의 임계 수량 이상의 생산수량 확보와 시스템에 소요되는 각종 부품인 공기공급장치, 센서, 스택 및 스택부품, 개질기 및 개질기 부품, 각종 배관류, 시스템 제어 등에서 국내 산업의 제조기반이 구축되어야 한다. 따라서 초기 상용화를 통하여 관련 기업들이 적극적인 참여가 필요하다. 관련 기업으로는 도시가스회사, 보일러회사, 펌프 및 컴프레서 관련 제조회사, 흑연 및 고분자관련 소재회사, 전기전자부품회사 등이 유력하다. 연료전지는 스택과 개질기를 제외하면 기존의 산업기반으로서 충분히 부품 경쟁력을 확보할 수 있기 때문에 기존의 유사분야에서 경쟁력을 보유한 기업

의 적극적인 참여와 참여유도가 매우 중요하다.

연료전지 시스템의 본격적인 보급을 위해서는 향후의 기술 혁신이 지속되어야 하는데 가장 대표적인 분야가 고분자 멤브레인과 촉매 분야이다. 첫째로 고분자 멤브레인 분야에서는 가습의 부하가 적은 혹은 무가습의 조건에서 이온전도성이 우수한 저가의 고분자막의 개발이 필요하다. 현재의 Nafion™막은 가습을 충분히 해 주어야 하는 제약 조건 때문에 80 ℃ 이상의 고온 운전이 불가능하여 CO 피독에 대한 저항성에 한계가 있어 복잡하고 제어가 어려운 연료개질기를 필요로 한다. 또한 시스템 냉각부하가 과도하여 시스템을 복잡하게 만드는 요인이 되고 있으며 열병합 효율도 한계가 있다. 따라서 적어도 120 ℃에서 작동이 가능한 고분자막이 개발된다면 연료전지 시스템의 가격, 성능, 내구성에 혁신적인 역할을 하게 될 것이다. 둘째는, 촉매분야이다. 현재는 플라티늄 등의 귀금속 촉매 및 합금 촉매가 주류이다. 그러나 스택과 개질기를 포함하여 귀금속계가 아닌 보통의 소재로 구성되는 촉매가 귀금속 촉매를 대체할 수 있다면 대규모의 보급에 대한 장벽이 제거될 수 있다. 국내의 대학과 연구소에서는 경쟁력 있는 상기 요소기술을 장기적으로 개발할 필요가 있으며 정부에서도 적극적인 지원이 요망된다.

6. 결론

연료전지는 수소에너지 시대와 함께 선택이 아닌 반드시 당연하게 될 신에너지 시대의 고효율, 청정 발전 장치로 우리 앞에 다가오고 있다. 연료전지는 궁극적으로는 재생에너지원으로부터 생성되는 수소를 이용하게 될 것이나 향후 수십년 동안은 기존의 에너지 인프라를 이용하면서 기술적인 성숙과 실용화 보급이 이루어질 전망이다. 보급에 있어서 기존의 왜곡된 저가격의 전기비용과 초기의 높은 제품가격이 상용화의 장벽으로 작용할 것이나 정부의 적극적인 보급 지원과 환경 규제 및 혁신적 기업의 기술 개발 노력으로 상용화가 이루어 질 것이다. 문제는 신산업의 기회를 선점하는 것이다. 연료전지 산업은 신규 고용 창출 효과가 크며, 결국 신산업의 출현을 의미하기 때문에 먼저 상용화를 달성하는 국가가 국제적인 기득권을 유지하게 되는 자명한 일이다. 따라서 미국과 일본, EU 등에서는 기업은 물론, 정치 지도자가 까지 나서서 자국에서 먼저 상용화가 이루어지도록

록 총력을 기울이고 있는 것이다. 국내에서도 초고속 인터넷 통신 인프라의 공격적 보급, 휴대 단말기의 보급 등의 경험을 살려 신산업의 주도권을 확보할 수 있도록 하는 국가적인 지혜와 노력이 필요하다.

참고문헌

1. Fuel Cell Systems Explained, Second Edition, by James Larminie and Andrew Dicks, John Wiley & Sons, Ltd. (2003).
2. M. S. Wilson and S. Gottesfeld, *J. Appl. Electrochem*, **22**, 1 (1992).
3. www.ballard.com.
4. 제2차 신재생에너지 기술개발 및 이용 보급 기본계획 (2003-2012), 산업자원부, 12 (2003).
5. "Japan's Approach to Commercialization of Fuel Cell/Hydrogen Technology", Akihiko Morota, METI, Japan, 2003.
6. "Fuel Cell Market Survey : Small Stationary Applications", by Stefan Geiger, Mark Cropper - Fuel Cell Today, 30 July (2003).