

신재생에너지 산업 III - 연료전지 산업(2)

한국과학기술연구원 연료전지 연구센터 남석우

연료전지와 관련된 산업에는 자동차 산업, 가정용/중대형 발전 산업, 휴대용 전자기기 산업, 수소에너지 산업 등이 있으며 관련 산업별로 기술동향 및 산업전망을 정리하면 다음과 같다.

1. 연료전지 자동차 산업

지속적으로 강화되는 환경규제에 대비하기 위하여 에너지 변환 효율이 높은 자동차를 개발하기 위한 노력이 계속되고 있다. 자동차로부터 발생하는 CO₂는 전체 CO₂ 발생량의 1/3을 차지하고 있어 CO₂의 배출을 저감시키기 위해서도 자동차 분야에서의 혁신적인 변화가 필수적이다. 가솔린이나 디젤을 연료로 하는 내연기관 자동차의 경우 효율을 획기적으로 증가시키기 위하여 배터리와 하이브리드로 동력원을 구성한 하이브리드 차량이 개발되고 있으며, 이미 일부 자동차는 상용화에 이르러 있다. 배터리를 사용하는 전기자동차 보다는 연료전지와 하이브리드 차량, 또는 연료전지만을 동력원으로 사용하는 연료전지 차량이 미래에 요구되는 초저공해 차량으로서 전세계적인 자동차 회사를 중심으로 기술개발이 이루어지고 있다.

화석연료로부터 출발해서 자동차 바퀴에 동력이 전달될 때까지의 효율을 well-to-tank 및 well-to-wheel로 나누어 나타내면 아래 그림 1과 같이 연료전지 자동차의 효율이 가장 높음을 알 수 있으며, 이에 따라 국내에서도 연료전지 자동차 및 버스 개발을 위한 연구개발 사업이 시작되었다.

산타페 기준	Well-to-Tank (연료생산효율, %)	Tank-to-Wheel (차량효율, %)	Well to Wheel (WtTxTtW) (총괄효율, %)			
			10	20	30	40
가솔린 내연기관 ¹⁾	88	18	16			
디젤 내연기관 ²⁾	89	22	20			
하이브리드자동차 ³⁾	88	30	26			
전기자동차	26 ⁴⁾	80	21			
연료전지자동차	75 ⁵⁾	48	36			
연료전지자동차(목표)	70	60	42			

1) 가솔린내연기관: 128kW, AT, 2) 디젤내연기관: 94kW, AT, 3) 하이브리드자동차: 내연기관+보조전원, 4) state of the art, 5) Natural gas to hydrogen

그림 1. 차세대 자동차 효율 (2005년 봄 화학공학회 현대-기아자동차 발표자료).

기존 자동차의 내연기관을 연료전지로 대체하는 연료전지 자동차에는 시동이 간편하고 성능이 높은 PEMFC가 가장 적합하다고 알려져 있으며, 압축수소, 수소저장장치를 탑재하거나, 개질기를 장착하여 기존 자동차연료로부터 수소가 풍부한 가스로 변환하여 사용하는 두 가지 방법이 있다. 이 중 자동차 내에 개질기를 장착하는 방법은 현 기술수준으로 볼 때 시동시간 단축 및 개질기 소형화면에서 한계가 있어, 현재 대부분의 자동차 회사들은 350~700기압의 압축수소통을 사용하고, 수소 충전소를 설치하여 수시로 수소를 충전하는 방법을 선호하고 있다.

한편 일부 자동차 회사에서는 수소를 연료로 하는 내연기관 차량도 개발하고 있으며, 미국 및 유럽을 중심으로 고급승용차 및 트럭용 보조전원(auxiliary power unit, APU)으로서

연료전지 시스템도 개발하고 있다. 자동차가 고급화될수록 운전제어 및 냉방 등에 소요되는 전력이 많아지는데 현재 내연기관으로부터 전력을 생산하는 방식의 효율이 매우 낮으므로, 연료전지로 보조전력을 생산하면 공해배출이 저감될 것이다. 이를 위해서 기존 자동차연료를 사용하여 부분산화나 자열개질 등의 방법으로 합성가스로 변환시킨 후 5kW 정도의 SOFC에 공급하는 방법이 Delphi, BMW 등에서 개발되고 있다. SOFC에는 CO가 공급되어도 연료로 사용되므로 개질기의 부피를 최소화시킬 수 있는 장점이 있다.

연료전지 자동차의 시장형성 전망은 시장형성이 차량의 가격을 낮출 수 있는 한 부분이기 때문에 현시점에서 매우 중요한 의미를 가진다. 시장예측은 기본적 가정에 따라 다양하게 예측될 수 있는데, 대부분 2015년을 기점으로 연료전지 차량의 판매대수가 경제성을 완전 확보할 때까지 서서히 늘려갈 것으로 전망하고 있다. 미국의 학술원이 발표한 자료에 의하면, 그림 2와 같이 현재 주류를 이루고 있는 내연기관 차량은 2010년을 기점으로 점차 판매대수가 감소하고, 연비 측면에서 유리한 배터리-내연기관 하이브리드차가 그 감소분을 충당할 것으로 전망된다 (Automotive World Car Industry Forecast Report, Global Insight, 2004 The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs, The National Academies, 2004). 하지만 궁극적으로 석유를 사용하는 하이브리드차의 한계성 때문에 2025년을 정점으로 하이브리드차는 연료전지 자동차로 대체되며, 낙관적 예측이긴 하지만 2040년경에는 판매되는 차의 약 90%정도를 연료전지차가 차지할 것으로 예상된다.

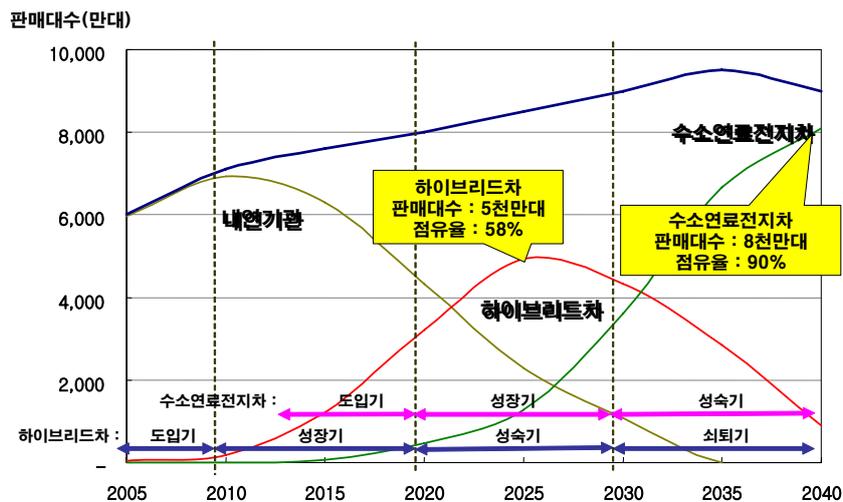


그림 2. 수소·연료전지 자동차의 시장전망 (2005년 봄 화학공학회 현대-기아자동차 발표자료).

연료전지 자동차와 관련하여 현재 전세계적으로 연료전지 스택의 내구성 향상과 전체 시스템의 경제성 및 냉시동성 향상을 목표로 기술 개발이 추진되고 있으며, 연료전지 이외에 관련 소재 및 부품 개발도 자동차회사 주도로 이루어지고 있다. 국내의 경우 수소.연료전지 사업단 주도로 자동차 구동용 80kW급 PEMFC 발전모듈 개발 및 버스용 200kW급 PEMFC 시스템 개발과제가 현대자동차를 주관기관으로 진행되고 있다. 현재 현대자동차는 80kW급 스택 조립 기술 및 영하 20℃에서의 냉시동 기술을 확보한 상태이며, 수명 및 경제성 향상을 위한 연구개발을 진행하고 있다. 2010년 까지 기술개발 목표는 내구성 5,000시간 (10년), 냉시동 영하 40℃, 가격 1억원/대 이다. 또한 연료전지 자동차의 모니터링 사업 및 이에 따른 수소스테이션 개발사업을 시작하여 2008년까지 8개의 수소스테이션을 설치하여 운영할 계획이다.

2. 가정용/중대형 발전 산업

연료전지가 발전장치로 적합한 이유는 발전효율이 높아 CO₂, NO_x 등의 공해물질 배출이 적고, 발전 용량에 관계없이 높은 효율을 유지할 수 있으며, 유용한 열을 생산할 수 있고, 가스터빈과 연계하여 발전효율의 극대화가 가능하며, 다양한 연료를 사용할 수 있기 때문이다. 특히 최근 전력시장의 자율화에 따라 고효율 분산형 발전방식이 요구되고 있으며, 연료전지는 이러한 용도에 적합하다고 알려져 있다. 그러나 이러한 가능성에도 불구하고 연료전지는 아직 높은 가격과 장기 사용시 내구성 문제 때문에 상용화에는 이르지 못했다. 상용화를 위해서는 US\$1,000/kW 및 40,000 시간 운전이 가능해야 하며 이를 위해 좀더 많은 연구개발이 필요하다. 발전용 연료전지는 그 용량에 따라 a) 소형 (10kW 이하) 가정용, b) 중형 (10~300kW) 산업 및 상업용 및 c) 대형 (수십 MW 정도까지) 발전용으로 구분할 수 있다.

가정용 연료전지 발전 산업

가정용 발전 (residential power generation, RPG) 산업은 일반 가정이나 상업용 건물에 필요한 열과 전기를 동시에 공급하는 소규모 CHP (combined heat and power) 산업과 관련되어 있으며, 현재까지 가장 많이 보급된 시스템은 화석연료를 이용한 발전기 및 이와 연계된 보일러 시스템이다. 소규모 발전 시스템의 경우 디젤, 석유 등을 사용하는 대부분의 발전기는 효율이 낮은 반면 비교적 소형으로 설치가 간단하다는 장점이 있어 많이 사용되고 있다. 그러나 최근 보다 효율이 높은 연료전지 발전 시스템이 개발되고 있으며, 현재 전 세계적으로 진행 중인 전력사업의 deregulation 및 21세기 전력 소비 형태의 다양성 등을 고려할 때 고효율 저공해 발전 방식의 연료전지가 전기와 열을 동시에 생산하는 열병합 발전용으로 먼저 실용화에 이를 것으로 예상되어, 연료전지를 사용하는 소규모 CHP 시스템의 실증시험이 미국, 유럽, 일본 등에서 많은 이루어지고 있다.

가정용 열병합용 연료전지로서 PEMFC 및 SOFC가 개발되고 있다. 연료로는 천연가스가 주로 사용되는데, PEMFC의 경우에는 개질기에 CO의 농도를 10ppm 이하로 낮추어 개질가스를 공급해야 하는 반면, SOFC는 CO가 연료로 사용되므로 개질기 구조가 보다 간단해진다. 그러나 PEMFC의 경우 저온에서 작동이 가능하므로 반응가스가 공급되면 바로 전력이 생산되는 반면, SOFC는 고온의 작동온도까지 온도를 올려야 하므로 시동시간이 비교적 길다. 가정용 열병합시스템으로서 PEMFC 발전시스템은 Ebara Ballard, Matsushita, Sanyo, Plug Power, Vaillant 등 많은 회사들이 개발을 진행하고 있으며, SOFC의 발전시스템은 Sulzer Hexis 등에서 개발하고 있다.

동경가스에 의하면 가정에 열병합용 연료전지 발전기를 도입함으로써 전기와 난방비용의 절감효과는 일반 전력 및 보일러 사용 대비 12~13% 정도, CO₂ 배출량은 40%, 에너지 절감효과는 26%로 알려졌다. 일본에서는 현재 정부지원 하에 대규모 모니터링 사업을 전개하고 있으며, 국내에서도 수소.연료전지 사업단 주도로 가정용 연료전지 시스템의 실용화 보급을 위한 실증사업이 진행되고 있다. 현재 국내에서 가정용 연료전지 개발에 참여하는 대표적인 회사는 GS Fuel Cell 및 Fuel Cell Power이다. 가정용 연료전지 상용화에 있어서 기술 개발은 효율, 운전성, 안전성, 내구성 및 경제성 향상을 목표로 진행되고 있으며, 특히 연료전지 발전시스템의 제작단가를 현재의 \$130,000/kW에서 2012년 \$10,000/kW로 낮추는 것을 목표로 기술 개발이 추진되고 있다.

중대형 연료전지 발전 산업

중대형 발전용으로는 빌딩용 열병합발전과 산업 및 상업용 발전 목적으로 PAFC,

PEMFC, MCFC, SOFC 등 다양한 연료전지가 개발되고 있으며, 특히 안정적인 전력공급이 요구되는 병원, 컴퓨터센터 등에 무정전 전원장치(UPS)로서 사용하려는 시도가 많다.

PAFC의 경우에는 200kW 연료전지 모듈이 상용화되어 있으며, 전력변환 효율은 약40%, 열병합발전의 경우 80%까지 효율을 증가시킬 수 있다고 보고되었다. PAFC 발전시스템은 효율이 높고, 200℃ 부근에서 운전되므로 PEMFC 시스템에 비해 열회수 및 CO 내성 면에서 유리하나, 발전시스템의 설치비용이 \$5,000/kW로 비교적 높고, 앞으로도 설치비용이 낮아질 가능성은 크지 않다고 알려져 있다.

PEMFC의 경우에는 전력변환효율은 40~60%, 설치비용은 \$2,500/kW 정도까지 낮출 수 있다고 알려져 있으며, 높은 출력밀도(300~900mW/cm²)로 인하여 발전장치를 소형화시킬 수 있으나, 앞에서 언급한바와 같이 CO에 의한 백금 촉매의 피독을 방지해야 하며, 이를 위해 100ppm 이상의 CO 농도에서도 내성이 있는 연료극과 CO 제거를 포함한 고효율 연료개질 시스템 개발이 필요하다. PEMFC의 백금 사용량은 현재 0.1~0.3mg/cm² 정도로 백금 사용량을 저감시키기 위한 연구개발도 진행되고 있으며, 장기 내구성 향상을 위한 기술개발도 추진되고 있다.

중대형 발전에는 저온 연료전지에 비해 고온 연료전지가 적용하기에 유리할 수 있는데 이것은 고온 작동으로 인하여 다양한 연료를 사용할 수 있으며, 내부개질에 의하여 효과적으로 연료전지에서 발생하는 열을 제거할 수 있고, 마이크로 가스터빈과 연계하여 전력변환효율을 70% 이상으로 향상시킬 수 있기 때문이다. 최근 MCFC 및 SOFC는 100~250kW 모듈의 상용화를 위한 기술개발이 진행되고 있으며, 가스터빈과 연계한 고효율 발전시스템 구성 및 운전이 실시되고 있다. 또한 MCFC는 MW급 발전 플랜트의 실증시험이 이루어졌다. 미국 FCE 및 독일 MTU의 MCFC 시스템 실증 사업 결과에 의하면 시스템의 전력효율은 45%, 전체 열효율은 75% 이상이었다.

현재 국내에서는 한전 주관으로 250kW MCFC 발전 시스템에 대한 국내 자체기술 개발이 진행되는 한편, 포항제철 주관으로 미국 FCE의 MCFC 발전 모듈을 도입하여 실증하는 사업이 실시되고 있다. SOFC에 대해서는 한전 주관의 5kW 열병합 모듈 개발과제가 추진되고 있다. 고온 중대규모 발전용 연료전지의 국내 기술개발 과제는 내구성 40,000시간, 시스템 전력효율 40% 이상, 전체 효율 70% 이상 및 경제성 \$1,500/kW 등이며, 이를 위하여 MCFC에서는 제작단가 절감, 분리판 부식 및 전해질 손실에 의한 성능감소 문제 해결, SOFC의 경우에는 제조단가 절감, 운전온도 저감에 의한 수명 증가 및 열사이클 특성 향상 등에 대해 연구가 이루어지고 있다.

3. 휴대용 연료전지 산업

2000년대 이후 정보통신 산업의 급속한 발전으로 인해 무선 이동통신기기에 대한 수요가 폭발적으로 증가하고 있다. 특히 우리나라의 경우 휴대전화 가입자는 현재 4,000만명을 돌파하였고, 중국은 4억명, 전 세계적으로는 11억명 이상이 휴대전화를 사용 중에 있다. 휴대전화 이외에도 차세대 동영상 휴대전화 사업을 비롯하여, PDA, Palm Top PC 등 다양한 휴대용 정보통신기기의 사용이 급증할 것으로 예상된다. 휴대용 정보통신기기가 발전함에 따라 컬러 디스플레이의 면적이 커지고, 대용량의 데이터 송수신 기능과 사진 및 동영상 기능이 추가됨에 따라 더욱더 고용량의 전원을 필요로 하게 되었으며, 현재 사용되는 이차전지의 용량 부족과 긴 충전 시간으로 인해 휴대용 정보통신기기를 장시간 사용하는데 불편함이 있는 것이 현재 실정이다. 차세대 이동통신기기를 사용하기 위해서는 수 년 내에 500Wh/kg의 출력을 갖는 전원이 필요할 것이나 기존의 배터리의 최고 출력은 300Wh/kg 정도에 불과하므로 기존의 이차전지를 보완 또는 대체할 수 있는 고성능, 고용량의 새로운 대체 전원으로 연료전지가 개발되고 있다.

휴대용 연료전지로는 연료의 공급체계가 가장 간단한 DMFC가 적합하여 개발이 진행되고 있으며, 최근에는 미세가공기술을 적용하여 DMFC를 구성함으로써 부피 및 무게를 혁신적으로 줄이는 마이크로 연료전지 기술개발이 진행되고 있다. 이러한 연료전지는 수10W 이하의 출력을 나타내며, 대용량 연료전지와는 달리 단위전지가 평면상에서 연결되는 모노플라 분리판의 구조를 채택하고, 연료인 메탄올 수용액은 카트리지로, 공기는 자연대류에 의해 공급된다. 전극에는 $5\text{mg}/\text{cm}^2$ 정도의 귀금속이 포함되어 있는데 이를 저감시키기 위한 연구도 진행되고 있으며, 고분자막으로 통한 메탄올의 소모(cross-over)를 억제하기 위한 전해질막의 특성향상 연구도 수행되고 있다. 최근 삼성에서는 1,200Wh DMFC를 650Wh/L의 에너지밀도로 개발함으로써 노트북용 연료전지 전원의 소형화에 한층 더 기술 진전이 있었다고 발표하였다. 국내에서는 LG 화학에서도 DMFC 소형전원 개발을 추진하였으며, 국외에서는 Smart Fuel Cell, MTI Micro Fuel Cell 등에서 소형 DMFC 전원을 개발하고 있다.

한편 소형 수소발생기를 장착한 PEMFC도 휴대용 전원으로 개발이 추진되는데 국내에서는 삼성에서 LPG를 사용하는 레저용 연료전지 전원 개발을 진행하고 있으며, 여러 연구기관에서 초소형 메탄올 개질기를 포함한 PEMFC 전원을 개발하고 있고, 삼성 엔지니어링에서는 NaBH_4 로부터 수소를 발생하는 소형 수소발생기를 사용하는 PEMFC 전원 시스템을 개발한 바 있다. 미국에서 휴대용 PEMFC 전원을 개발하는 곳으로는 Millenium Cell 및 UltraCell이 있으며, 각각 NaBH_4 및 메탄올로부터 수소를 발생하는 소형 반응기를 장착한 PEMFC 전원을 군사용 등 특수목적으로 개발하고 있다. 일본 카시오의 경우에는 미세채널 개질기를 이용하여 메탄올 수용액을 수소로 변환시킨 후 소형 PEMFC에 공급하는 방법을 개발하고 있다.

한편 미국 국방성 주도로 진행되는 군사휴대용 전원 개발에서는 SOFC도 개발대상으로 연구가 진행 중에 있다. SOFC는 고온에서 작동되어 전극의 CO 피독문제가 없으므로 연료 개질기를 최소화할 수 있어 휴대용전원의 무게 및 부피를 줄일 수 있다. 그러나 고온에서 작동되므로 연료 및 공기의 열교환을 위한 고온용 열교환기가 필요하며, 소형 SOFC 스택의 경우 표면적이 비교적 넓어 열손실이 크므로 고온을 유지하기 위한 촉매연소기도 필요하다.

4. 수소에너지 산업

수소는 석유화학공정에서 생산되어 원료로 사용되는 경우가 대부분이나, 최근 반도체, 광통신 분야에서의 사용량이 증가되고 있는 추세이다. 일반적으로 수소는 나프타, LPG, 천연가스로부터 개질반응을 통하여 생산되며, 암모니아 분해를 통해서도 생산된다. 최근에는 차세대 청정연료로서 전 세계적인 부각을 받아 제조, 저장 및 이용 전 분야에 걸쳐 연구개발이 활발히 이루어지고 있으며, 특히 신재생 에너지원과 연계된 수소제조 시스템이 연료전지와 함께 수소경제를 실현할 가장 기본적인 요소로 개발되고 있다.

수소는 석유화학산업, 전자, 재료, 반도체제조공업, 제철공업, 및 우주항공산업 등에서 현재 그 수요가 꾸준히 증가하고 있으며 (매년 5~10% 증가), 특히, 차세대 운송장치인 연료전지 자동차의 운영이 다양하게 실용화되어질 경우, 그 잠재 시장규모는 엄청날 것으로 예상된다. 현재 사용되는 대부분의 수소는 천연가스 스팀 개질이나 정유공장 부생 가스의 분리로 충당하고 있지만, 화석연료 사용이 환경문제의 심각성으로 제한될 경우, 대체에너지를 활용하여 물로부터 수소를 생산하는 방식으로 전환될 전망이다.

국내에서는 수소에너지 사업단 주도로 수소의 제조 및 저장기술 개발이 진행되고 있으며, 수소.연료전지 사업단 주도로 수소스테이션 개발 및 수소 저장기술 연구 과제가 진행되고 있다.