

고분자 연료전지의 역사와 기술현황

고분자 연료전지의 역사와 최근의 기술개발 동향에 대해 소개한다.

엄석기

한국에너지기술연구원 고분자연료전지연구단(sukkeem@kier.re.kr)

서론

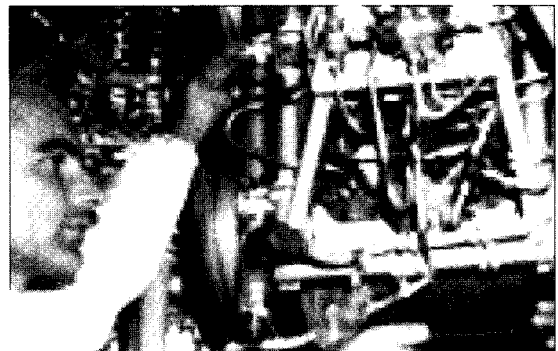
고분자 연료전지 기술은 Thomas Grubb와 Leonard Niedrach의 연구에 의해 1960년대 초 General Electric에서 발명되었다. GE는 해군 군함대(전자 분함대)와 육군 통신대가 공동으로 계획한 프로그램용으로 1960년대 중반에 소형 연료전지 개발의 첫 성공을 발표했다. 그 장치는 물과 수소화물의 혼합에 의해 발생된 수소에 의해서 연료가 공급되었다. 이 연료 혼합물은 전장에서 군인들에게 쉽게 공급될 수 있는 일회용 캐니스터에 들어있었다. 전지는 소형이면서 간편했지만 백금 촉매는 값이 비쌌다.

고분자 연료전지 기술은 NASA의 Gemini 프로젝트의 일부분으로 제공되었다. 2차전지들은 초기의 Mercury 프로젝트에서 우주선 동력으로 제공되었지만 달 비행은 더 긴 지속시간을 가진 동력원을 필요로 하는 Apollo 프로젝트를 위해서 계획되었다. Gemini의 주요 목적은 Apollo를 위한 장비와 절차를 테스트하는 것이었다. GE의 고분자 연료전지가 선택되었지만 PB2 연료전지는 내부전지 오염과 막을 통과하는 산소의 누출 등을 포함하는 반복되는 기술적 문제들에 직면하게 되었다. 따라서 Gemini 1호부터 4호까지는 2차 전지로 비행했다.

GE는 새로운 모델인 P3 고분자 연료전지를 재설계했으며, 그것은 Gemini 5호에서 오작동과 뒤떨어진 성능에도 불구하고 남아있는 Gemini를 위해 적절히

제공되었다. 그러나 Apollo 프로젝트 계획자들은 10년 후 우주왕복선 설계자들이 한 것처럼 모선과 달 착륙선을 위해 알칼리 연료전지를 사용하기로 결정했다.

GE는 고분자전지에 관한 연구를 계속했고, 1970년대 중반에 US Navy Oxygen Generating Plant에서 지내는 해상 생활 유지를 위해 고분자 물 전기분해 기술을 개발했다. 영국 왕립해군은 해저 함대를 위해 1980년대 초기에 이 기술을 채택했으며, 또 다른 집단들도 고분자 연료전지를 주시하기 시작했다. 1980년대 후반과 1990년대 초반에 Los Alamos National Lab와 Texas A&M University는 고분자 연료전지를 위해 필요로 한 백금의 양을 감소시키는 방법을 실험했다.



[그림 1] 1965년 Gemini 7호 우주선에 장착된 고분자 연료전지

최근에 고분자 이온 교환막 개발자들은 전해질을 강화시키기 위해 비바람에 잘 견디는 물질인 Gore-Tex를 추가했다.

고분자 연료전지 기술

고분자 연료전지(Polymer Electrolyte Fuel Cells, PEFCs)는 얇은 침투성 막의 형태인 고분자 전해질에 의해 작동된다. 이 막은 작고 가벼우며 낮은 온도에서(섭씨 50~80도) 작동하며, 상대적으로 다른 전해질은 섭씨 1,000도와 같은 높은 온도를 필요로 한다.

반응을 가속화시키기 위해서 백금 촉매가 막의 양쪽 면에 사용된다. 수소 원자는 anode에서 전자가 떨어져 나가며(이온화), 양으로 대전된 양성자는 다공성 막의 한쪽 면을 통해서 확산하고 cathode 쪽으로 이동한다. 전자는 anode에서 cathode로 외부 회로를 통해서 지나가며 도중에 전기적인 에너지를 공급한다. cathode에서는 전자, 수소이온, 그리고 공기로부터 제공된 산소가 물을 형성하기 위해 결합한다. 이 연료 전지가 작동하기 위해서, 고분자전해질은 수소이온이 계속해서 지나가도록 해야 하는 반면 전자와 다량의 기체의 통행은 막아야 한다.

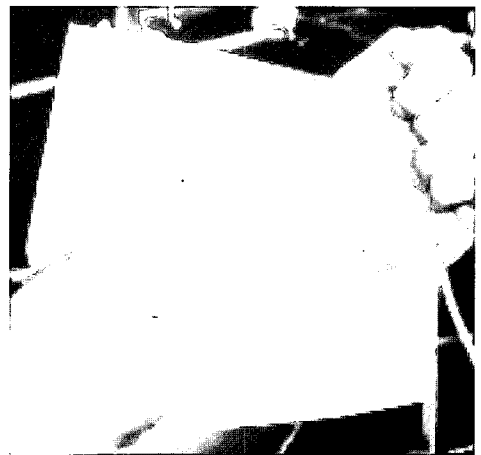
고분자 연료전지 특성

고분자 연료전지는 수소 경제 지지자들에게 훌륭한 연료전지라고 생각된다. 배기관으로 순수한 물을 방출하는 자동차가 상상이 된다. 아마도 가까운 미래에 가정, 회사 그리고 주유소로 공급하는 수소 송유관이 있게 될 것 같지는 않다. 많은 기업들은 고분자 연료전지 시스템이 메탄올이나 천연가스와 같은 탄화수소 연료로부터 수소를 추출할 수 있을 것이라고 생각하고 있다. 수소로 작동하고, 공기 가압이 없을 때 고분자 연료전지의 효율은 높은 반면, 연료개질과 공기 압축을 사용하는 실제 시스템은 효율 면에서는 낮다. 30 kW AC 동력장치는 35% 전기적인 효율이 될 것이고, 200 kW 장치는 40%, 큰 장치는 45%일 것이다. 수소화합물과 탄소와 같은 다른 물질들로 수소를 저장하게 하는 진척이 있었으며 만약 그런 물질들이 완성될 수 있다면 자동차 응용분야에

서 고분자 연료전지의 성공 가능성을 극적으로 증가시킬 것이다. 복잡한 개질기는 필요하지 않지만, 보편적으로 나라를 가로지르는 송유관을 통해서 수소가 이용될 수 있지 않다면 주유소에서 지역적으로 수소가 제조되어야 할 것이다. 이것이 큰 도시 주유소에서는 가능하지만 외딴 작은 도시의 주유소에서는 실용적이지 않다.

일반적으로 고분자 연료전지는 좁은 범위의 적온에 맞고, 어느 정도 값싼 재료를 사용하게 하는 80℃에서 작동한다. 불행하게도, 이 낮은 온도는 100에 이르는 자동차 엔진의 잉여열을 처리하는 것을 방해하는 대기온도에 아주 근접한 온도이다. 또한 촉매는 수반된 낮은 온도에서 화학적 반응을 촉진시키게 된다. 전에는 스택에 사용된 백금 촉매가 이러한 연료전지의 형태로 인해 비싸게 만들어졌다. 고분자 전해질에서 매우 얇은 촉매층을 코팅하는 새로운 기술이 자동차 한대 당 약 150\$로 촉매의 비용을 줄이게 되었다.

고분자 연료전지는 수소연료만 연료전지에 사용될 수 있기 때문에 특별한 것이다. 탄화수소연료는 확실히 개질되어야 한다. 연료전지에서 아주 소량의 일산화탄소도 영구적으로 촉매의 작용을 억제할 수 있기 때문이다. 개질기가 사용되면 몇 분간의 워밍업이 필요하다. 저장된 수소는 시동단계에서 사용되어야 한다. 연속적으로 작동하는 보다 큰 제조 장치는 매우 순수한 수소를 공급할 수 있는 더 높은 가능



[그림 2] 1965년도에 개발된 고분자 전해질 이온 교환막

성을 가진다.

연료전지 시스템도 다른 에너지 변환시스템처럼 냉각시스템이 필요하며 이때 사용되는 냉매는 연료전지가 불순물에 매우 취약하다는 점을 고려하여 선택되어야 한다. 이것은 연료전지 내부에 순수한 물이 있다는 것에 유의해야 한다는 의미이다. 현재까지는 순수한 증류수를 연료전지 냉매로써 보편적으로 사용하고 있다. Ballard사는 빙점온도 아래에서 연료전지를 테스트했으며, 스택에서 손상은 없었다. 스택 냉각수는 운전 중 중단한 후에 배출되어야 하는 것으로 보인다. 반복된 결빙 해동 과정에서 물이 배출되더라도 수화된 스택에 어떤 영향이 있는지는 모른다.

1 kW보다 큰 고분자 연료전지는 일반적으로 수반된 낮은 온도에서 화학 반응을 증가시키기 위해서 가압되었다. 적당한 출력 밀도를 가지기 위해 연료전지에서는 약 3기압이나 그 이상인 공기압축이 사용된다. 작은 시스템에서는 이것이 많은 효율 감소를 초래한다. 또한 공기 압축기는 연료전지를 상당히 복잡해지게 한다. 자동차와 버스에서는 두 개의 공기압축기가 사용된다. 하나는 배기 터빈 과급기이고 나머지는 엔진 과급기이다.

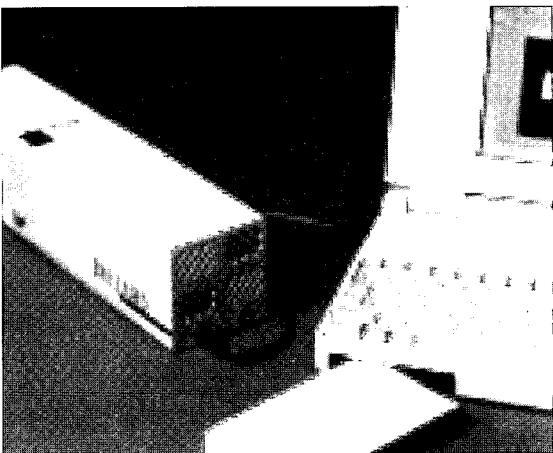
고분자 연료전지 기술의 응용

우주에서는 고분자 연료전지가 혼란한 결과를 가

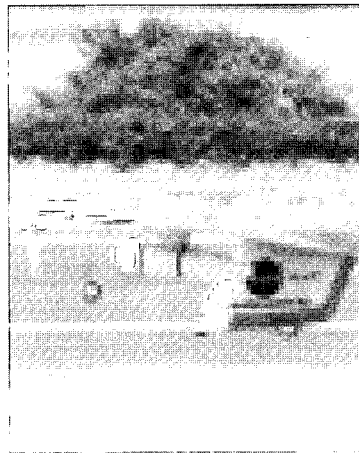
질지도 모르지만, 몇몇 회사들은 좀더 현실적인 수송 수단으로 연료전지를 테스트하고 있었다. 1995년에 Ballard Systems는 Vancouver와 Chicago에서 버스로 PEM 전지를 테스트했으며, 이후에 Daimler Chrysler에서 만든 실험용 수송 수단으로 실험했다. 고분자 연료전지는 또한 Aerostat라 불린 무인 소형 비행선과 Sonar 신호를 발생시키고 받는 해상의 부표인 Sonobuoy에 동력을 공급해왔다.

2000년 초에 AeroVironment사는 긴 체공시간을 가진 항공기인 태양 전지가 달린 Helios를 위해서 야간에 동력을 제공하기 위해 고분자 연료전지 기술을 채택했다. 목표는 전동기를 작동시키고 물을 전기분해하기 위해서 낮 동안 광전지 패널을 사용함으로써 6개월 동안 계속적으로 비행할 수 있는 무인 항공기를 만드는 것이었다. 밤에는 연료전지가 수소와 산소를 다시 물로 전환하면서 모터를 작동했다. 몇몇 시험 항공기들이 2001년부터 2003년까지 연료전지를 장착하여 또는 연료전지 없이 만들어졌다.

California에서 대기 품질 규정이 더 엄격하게 꾸준히 변화함에 따라 자동차 연구는 새로운 긴급한 일이 되었다. Energy Partners와 the U.S. Department of Energy's Office of Advanced Automotive Technologies는 하이브리드 전기자동차의 성능을 평가하기 위해서 Virginia Tech과 Texas Tech대학에 20 kW 연료전지 스택 두 개를 제공했다. 또한 Ford와 Volkswagen 같은 주요 자동차 회사들도 고분자



[그림 3] Ballard 노트북용 연료전지



[그림 4] Helios 무인항공기

연료전지 수송 수단을 테스트하고 있다.

더 공표된 실험 중의 하나는 New York Albany에서 1998년 6월에 가정에 공급하기 시작한 Plug Power's 고분자 연료전지였다. "첫 번째 영구적인 가정용 설비"로서 회사에 의해 설립된 5 kW 동력장치는 회사가 GE와 Detroit Edison 양쪽 모두와 함께 중요한 협력을 하도록 도와주었다. 이 파트너들은 2002년 동안 주거용 연료전지를 시장에 진출시키기를 기대했으나 계획들은 연기되었다.

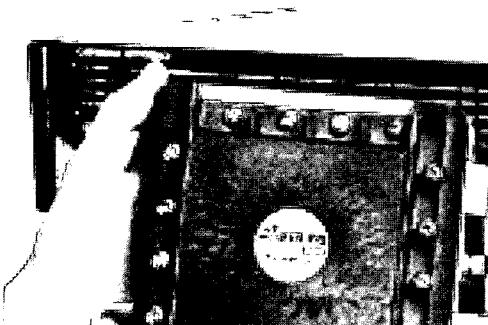
자동차용 연료전지

주요 선진국들은 지난 1997년 12월 Kyoto에서 2008~2012년까지 CO₂를 1990년 대비 EU 회원국은 8%, 미국은 7%, 일본은 6%를 삭감할 것을 골자로 하는 의정서를 채택하였다. 현재 운송수단에 사용되는 에너지는 전체의 약 30%에 달하고 있기 때문에 CO₂ 총량 규제는 자동차 산업 자체를 위축시킬 수 있는 요소이다. 실제로 유럽자동차협회에서는 CO₂를 2010년까지 120 g/km 수준으로 감축할 것을 제시하였고, 2008년까지 140 g/km라는 감축 목표치를 수정 제시한 상태이다. 이는 현 수준(170~180 g/km) 대비 25%를 삭감한다는 것으로, 전 산업에서 평균 5%를 삭감하는 것에 비하면 매우 가혹한 규제라고 할 수 있다. 이들은 유럽 지역으로 수출하는 모든 국가의 자동차 업계에도 협약 참여를 요구하고 있는데, 한국도 물론 포함되어 있다. 미국 캘리포니아주는 2005년부터 Big 3를 포함한 상위 7개 회사에는

4%의 무공해 자동차, 6%의 저공해 자동차를, 그 밖의 회사에는 저공해 자동차를 10% 의무적으로 판매하도록 법규를 개정하였다. 이렇듯, Green Round에 의한 CO₂ 총량 규제, 선진국의 자동차 배기가스 규제 등은 기존의 내연기관 자동차로는 해결할 수 없는 환경기술 장벽을 구축하고 있다. 연료전지 차는 환경친화적 고효율, 고충정 자동차 중에서도 가장 유력한 후보로서, 선진국의 환경기술 장벽을 극복하고 국내 자동차 산업의 중흥을 이어나갈 견인차 역할을 할 것이다.

1990년대 초반일 때만해도 많은 자동차 제조 회사들은 연료전지 자동차가 내연기관(Internal Combustion Engines, ICEs)의 출력, 무게, 가격 등의 엄격한 기준과 경쟁을 할 수 있을 지에 대하여 의구심을 품고 있었다. 이 시기에 다임러 벤츠에서는 내부적으로 승합형 운반 차량에 연료전지를 장착하여 운행 시험을 하기로 하고, 그 결과를 1994년에 발표하였다. 벤츠는 연구결과를 통해 향후 10년 또는 그보다 크게 멀지 않은 기간 안에 연료전지가 지속 가능한 자동차 기술로의 진보를 이끌 것이라고 주장했다. 첫 연료전지 자동차들은 혼다와 토요다에서 수 시간의 간격을 두고 2002년 12월 23일에 소비자에게 공개되었다.

연료전지 자동차가 가지고 있는 장점은 연료의 효율성, 경쟁 상대가 없는 배출 가스의 저감률, 연료와 생산물의 유연성 등을 들 수 있다. 현재 내연기관 하이브리드 자동차의 최고 기술력을 보유하고 있는 토요다는 연료전지를 이용해서 배출 가스가 거의 없거



[그림 5] Avista 7.5 kW 가정용 연료전지



[그림 6] 현대자동차 투산 연료전지 자동차



나 zero이면서 오늘날의 차량보다 연료 효율성이 3 배인 차량을 만들 수 있을 것으로 믿고 있다. 이러한 수치는 하이브리드 자동차보다도 효율성이 높다고 볼 수 있다.

대중교통형 버스는 수소 사회에서의 운송과 교통을 위한 연료전지 상용화에 있어 최선의 전략 중의 하나로 널리 알려져 있다. 연료전지 버스는 아래에 열거할 수 있는 많은 장점을 가지고 있다.

- 대중교통 버스는 정기적인 운행 시간과 경로를 가지고 있으며, 중앙 집중화된 연료 주입과 유지 보수 설비를 갖출 수 있고 정비 인력을 집중할 수 있다.
- 연료전지 및 관련 장치들을 설치할 수 있는 공간적인 여유가 충분하다.
- 현재 사용되고 있는 디젤 버스의 소음과 공해에 비하여 연료전지를 통해 충분한 성능 향상을 가져올 수 있다.
- 운송 서비스 기관들은 정부의 보조를 받음으로써 기술개발에 들어가는 위험과 비용에 대한 부담을 덜 수 있다.
- 연료전지 홍보에 대단히 효과적이다.
- 대중교통 버스를 위해 개발된 연료전지 기술들은 여타 중장비와 중간급 운송 기관에 바로 적용할 수 있다.

결과적으로 북미, 유럽과 아시아의 정부들은 연료전지 버스 시연을 위해 많은 지원을 하고 있으며 연료전지 버스의 수는 기하급수적으로 늘고 있는 중이다. 2003년에 제작되어 운전된 연료전지 버스의 수만으로도 이전의 2 배에 달하며 세계적으로 65 곳이 넘는다. 실증 실험은 연료전지 상용화 서비스에 대한 검토와 운전 및 유지관리 비용, 성능, 신뢰성에 대한 자료 수집 등을 할 수 있도록 계획되어있다.

현재 거의 모든 연료전지 버스는 고분자 연료전지를 사용하고 있으며 200 kW 이상의 출력을 낼 수 있다. 또한 대부분의 연료전지 버스는 압축 수소 가스를 연료로 사용하고 있으며 4 개에서 9 개의 수소 탱크를 버스의 지붕에 설치하는 방식을 사용하고 있다. 수소 연료의 재충전 시간은 기존의 가솔린 탱크의 주입 시간과 비슷하다.

국내 연료전지 산업 기술 동향 및 전망

국내의 고분자 연료전지 및 연료전지 시스템 개발 연구는 주로 RPG(Residential Power Generation)용과 승용차용으로 개발되고 있다. RPG용의 경우 5 kW 이하의 연료전지 및 연료전지 시스템 개발이 현재 진행 중이며, 승용차용의 경우 30 kW급의 연료전지 스택 및 연료전지 시스템의 개발이 완료되어 차량에 탑재되어 평가되고 있다. 승용차의 경우 80 kW급의 연료전지가 필요하므로 현재 용량 증대 및 출력밀도 향상을 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 버스와 같은 대중교통의 경우 200 kW급 이상의 출력이 요구되고 있다. 승용차의 경우 5000 시간의 운행시간이 요구되며, 버스의 경우 20,000 시간의 운전 시간을 보장해야 한다.

현재까지 진행된 국내 고분자 연료전지기술의 경우 분산형 발전용은 대표적으로 GS 칼텍스와 퓨얼셀 파워에서 1 kW급 가정용 연료전지를 개발하여 실증하는 단계이며, LG전자와 오신텍 등은 고분자 연료전지의 주변장치(Balance of Powerplant, BOP) 및 전력 변환시스템 개발에 주력하고 있다. 연료전지 자동차 개발은 현대자동차와 한국에너지기술연구원에 의해서 진행되어 왔다. 2000년을 기점으로 국내 연료전지 연구는 정부의 적극적 지원에 힘입어 자동차용 연료전지시스템 개발의 일대 전환기를 맞이한다. 현대자동차는 2000년에 산타페 수소 연료전지 자동차를 개발한 후 2004년 11월에 미국의 UTCFC와 공동으로 80 kW급 고분자 연료전지 시스템을 장착한 투산 하이브리드 연료전지 자동차를 출시하여 미국에서 시험 운행 중이다. 동 시기에 한국에너지기술연구원에서는 독자기술로 제작된 2 kW급 공랭식 연료전지 스택을 이용한 하이브리드 기술 개발에 성공하게 된다. 상대적으로 현재까지 국내에서 연료전지시스템에 의해 구동되는 대중교통 수단(궤도차량 또는 시내버스)을 개발하기 위한 연구는 없었으며, 대중교통용 환경친화차량으로는 디젤엔진-전기모터 하이브리드 버스가 연구용으로 개발되었었고 천연가스 시내버스는 상용화 개발되어 현재 전국 대도시에서 2,000 대 이상 운행되고 있는 실정이다. (●)