

연료전지 자동차용으로 기대되는 PEFC 기술현황



김귀열

한국전기연구소 전기재료연구부 선임연구원

1. 서 론

고체 고분자 전해질형 연료전지(Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell, SPEFC 혹은 PEFC)는 우주선, 군사용등으로 사용할 목적으로 제한적인 연구가 진행되어 왔으나 1980년대 말에 이르러 석유제품을 쓰는 자동차가 환경오염의 주범으로 대두됨에 따라 다시 연구의 활기를 찾게 되어 세계적으로 연료전지를 전기자동차(연료전지 자동차, Fuel Cell Vehicle : FCV)에 사용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근의 국제학술대회에서 연료전지에 대한 발표는 문중 80% 이상이 PEFC에 대한 연구결과였음은 주목할 만 하다. 이처럼 PEFC에 대한 관심이 집중되고 있는 이유는 이 연료전지의 특성이 vehicular power 로서 매우 적합하다는 이유 때문이다. PAFC, MCFC, SOFC 등의 중 고온 연료 전지의 응용분야가 정치형 발전장치인데 반하여 PEFC는 전기자동차의 동력원과 같은 이동용 발전장치로서 개발이 진행되고 있다.

다양한 연료전지중에서 전기자동차에 이용할 수 있는 것은 고분자 전해질형, 알카리형, 인산형 연료전지 및 고체산화물형 연료전지등이다. 이 중에서 PEFC와 AFC는 저온형(40-100℃)인 반면 PAFC은 중온형(200℃), 그리고 SOFC는 고온형(1000℃)이다. 이중 승용차와 같은 소형 전기자동차용 연료전지로서 적용가능한 것은 현재 상업화 단계에 와 있는 인산형

과 알카리형 그리고 고분자 전해질형 등을 들수 있다.

이중 고분자 전해질형 연료전지가 기술적으로 우수한 전기자동차용 동력원으로서 주목을 받고 있는 이유는 단위면적당 높은 전류밀도, 단위무게당 높은 전류밀도, 상온에서도 출력이 가능할 정도로 작동온도가 낮고, cost start 시간이 가장 짧으며, 전해질은 고체인 고분자막을 사용함으로 인산형 연료전지와 같이 부식 및 전해질 조절이 필요없으며, 또한 기계적 충격 등에 비교적 안전하다는 점등이다.

많은 PEFC관련 연구중에서 가장 활발하게 진행되고 있는 것은 전해질/전극 접합체 제조 및 운전특성, 연료중의 CO의 영향, 연료로서 메탄올을 직접 사용할 수 있는 연료전지 개발, 열/물 처리등 이다. PEFC의 핵심기술은 전해질막과 전극의 접합체(MEA: membrane/electrode assembly)를 제조하는 것이다. 연료전지 기술의 수준은 완성된 전지의 출력 특성을 평가함으로써 비교할 수 있는데, 현재 0.7W/cm² 정도의 출력밀도가 세계 최고의 수준이다. 출력밀도를 향상시키기 위해서는 MEA 제조과정이 중요하다.

본 보고에서는 고체 고분자 전해질형 연료전지의 기술개발 현황을 통하여 기능성 고분자재료의 새로운 적용분야를 소개하고자 한다.

2. 구성요소 기술

1) 고분자 전해질 막

고분자 전해질 연료전지의 전해질은 H⁺ 이온을 전달

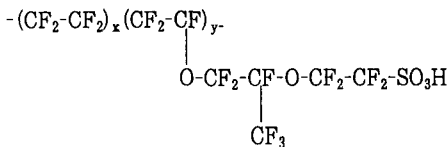
표 1. Important proton - exchange membrane properties

Physical Properties	Flat, non-reinforced Dense, no prose Not brittle in dry state Thickness = 50~100 μ m
Chemical Properties	Strong acid, -SO ₃ H Ionic resistivity < 10 Ω cm (80 $^{\circ}$ C) Ionic resistivity < 0.1 Ω cm (80 $^{\circ}$ C) Electroosmotic transport H ₂ O/H ⁺ = 1~3 Electronic insulation
Stability	Thermal and hydrolyte stability(100 $^{\circ}$ C) Oxidative stability Reductive stability

하는 고분자 이온교환막을 사용하는데, 1959년 Grubb에 의해서 처음 연료전지에 도입되어 1980년대 들어서 많은 성능향상을 가져왔다. 이러한 고분자 전해질 막은 술폰산(sulfonic acid) 기를 포함하고 있는 고분자 구조로 되어 있다. 막의 수화작용은 -SO₃H를 이동성이 있는 H⁺aq 와 고정되어 비이동성인 -SO₃⁻로 분리시키는 것이다. 막이 가져야 할 가장 중요한 성질은 표 1에 나타난 바와 같다.

지금까지 고려된 것은 술폰산 막 뿐이었는데, 이것은 술폰산 막이 완전히 해리되기 때문이다. 초기에는 페놀 포름알데히드(phenolformaldehyde) 술폰산이 이용되었으나 백금이 있을 때 가수분해를 일으켜 수명이 짧고 전력밀도도 매우 낮았다. 그러나 폴리스티렌(polystyrene) 술폰산 막이 개발된 후 많은 성능향상이 있어 Gemini 연료전지에 이용되었다. 그러나 폴리스티렌 술폰산 막은 70 $^{\circ}$ C 이상에서 성능이 급격히 떨어지는 단점이 있었다. 폴리플루오로스티렌(polytrifluorostyrene) 술폰산 막은 더욱 더 향상된 성능을 보였으나 물리적 성질이 좋지 않아 실제로 연료전지에 응용되지는 못했다. 획기적인 성능향상을 가져온 것은 Du Pont에서 개발한 퍼플루오로 술폰산(perfluorinated sulfonic acid) 막이 Nafion이다.

Nafion의 화학식은 대략 (CF)₁₈₋₂₈SO₃H 로서 구조식은 다음과 같다.



한편 고분자 전해질 연료전지용 고분자막을 개발하고 있는 회사로는 미국의 Du Pont외에 Dow Chemical(XUS), Gore-Tex(Gore-Select), 캐나다의 Ballard Advanced Materials(BAM3G), 일본의 Ashahi Chemical(AcipleX), Asahi Glass(Flemion), Chlorine Engineer(Product "C"), Tokuyama Soda(Neosepta-F) 등이 있다.

나 이중 상업적으로 유용한 고분자막은 Du pont의 Nafion이다. Dow Chemical의 XUS막(위 Nafion 구조식에서 m=0)은 Nafion보다 functional group이 많고 두께가 얇으면서 수분함량이 높아 이온전도도가 뛰어나며, 따라서 전기저항이 감소되고 전류밀도는 증가하는 것으로 알려져 있으나, 상업적으로 시판되고 있지 않다.

(1)막의 이온투과특성

이온 전달막에서의 이온투과현상은 이온이 전기화학적 전위구배나 농도차에 의해서 막을 통과하는 현상으로, 그 특성은 막에 고정된 전달자와 이온간의 친화력, 그리고 막의 친수성이나 소수성에 의해 결정된다. 고분자 전해질형 연료전지는 연료극에서 생성된 수소이온이 막을 통해 산소극으로 이동한 후 산소극에서 산소 환원반응을 일으켜 전기를 발생한다.

(2)함수율(Water Content)

Nafion 이온교환막은 술폰산기가 막의 내부에 있어 전도에 좋은 친수성의 연속 표면을 제공하며 막의 외부는 소수성의 플로오르화된 겔(gel) 형태의 물질로 수분함량이 감소함에 따라 수축되고 재배열된다. 막은 일반적으로 강산과 산화제에 영향을 받지않고 무게의 20%가 수화되었을 때 수소이온에 대한 상당한 전도성을 가지게 된다.

그러므로 이온교환막의 전도도는 수화정도에 따라 급격히 변하고 막의 탈수는 막의 수축을 유발하여 막-전극간의 접촉을 저하시키게 되며, 결국 막과 전해질사이의 접촉저항을 증가시킨다. 일반적으로 고분자 전해질 연료전지에 쓰이는 원료가스는 막의 탈수를 줄이기 위해 물로 포화시키며 수화된 H₃O⁺ 형태로 막을 통과해 효과적인 수소이온의 전달을 용이하게 한다.

따라서 가스의 가습이 필수적이다. 이때 가습된 가스는 많은 양이 막에 침투되는 것 처럼 보이나 과량의 열발생과 함께 부수반응물로서의 소비에 의해 탈수현상을 일으킬 수도 있다. 따라서 효과적인 가습은 고분자 전해질 연료전지의 운전조작에 있어서 매우 중요하다.

(3)이온교환능력(A_R)

이온교환능력은 이온교환수지의 기본성질로서 건조 수지 1g중에 있는 고정이온의 밀리당량 (meq)으로 나타낸다.

$$A_R = m \text{ eq/g dry resin}$$

또한 막의 단위부피 중의 이온농도 또는 막의 물 단위량에 대한 이온농도를 나타내는 고정 이온농도를 이온교환 용량과 함수율로 구할 수 있다.

2) 전극

고분자전해질 연료전지용 전극은 촉매층과 지지해주는, 지지체로 구성되어 있다. 촉매물질로는 수소의 산화 및 산소의 환원반응에 적합한 Pt를 주로 사용하고 지지체로는 발수처리된(hydrophobic coating) 다공성 carbon paper 나 carbon cloth가 널리 쓰인다. Pt는 촉매의 유효 표면적을 크게 늘리기 위하여 2-5nm의 Pt입자를 미세한 탄소입자 표면적에 입힌 supported Pt/C 촉매의 형태로 사용된다.

전극에서 전기화학적 반응이 잘 진행되어 높은 성능을 보이게 하기 위해서는 Pt/C의 전기적 연속성, 얇은 H₂O막으로 채워진 전극기공 내로의 산소의 원활한 이동, 그리고 H⁺ 이온의 Pt 촉매로의 원활한 이동등이 만족되는 제조법을 선택하여야 한다.

이때 전극의 두께는 되도록 얇아야 하며 두께도 균일해야 접촉저항 및 물질전달 저항을 최소화 할 수 있다. 특히, 기체인 산소, 이온인 H⁺, 금속촉매의 전자등 이들 세가지가 모두 만나는 반응지점이 존재하여야 하기 때문에 기체, 액체, 금속촉매 간의 삼상계면이 폭넓게 형성되어야 한다.

촉매물질이 촉매층을 형성하고 유지할 수 있도록 하는 결합체의 역할로 보통 polytetrafluorethylene(PTFE : Teflon)을 첨가하는데, 이는 촉매층의 소수성을 조절함으로써 삼상계면을 형성하는 역할도 한다. 즉 Teflon이 덮여 있는 소수성 기공은 반응기체 통로가 되고 Teflon이 덮여 있지 않은 친수성 기공은 전해질이 채워지게 되어 촉매층에 삼상계면이 형성되도록 하는 역할을 한다.

그러나 실제적으로는 삼상계면의 형성이 어려우며 따라서 삼상계면에서의 전기화학 반응보다는 반응기체가 H₂O에 용해된 후, 금속표면으로 확산되어 가서 용해된 산소와 H⁺ 이온이 금속촉매의 표면에서 반응하는 액체-금속촉매의 이상계면에서의 반응이 대부분을 차지한다. 실제반응에 있어서 H⁺ 이온의 백금촉매로의 이동은 ionomer를 통하는 것이 물을 통하는 것보다 훨씬 빠르므로 백금촉매와 ionomer의 연결은 전극성능의 향상을 위해서는 중요한 문제이다.

따라서 고분자전해질 막과 촉매전극이 잘 접촉하게 하고 수소이온이 원활하게 이동하게 하기 위해서는 supported Pt/C 촉매에 액상의 Nafion을 혼합해 주면 이온전달통로가 형성되어 삼상계면이 늘어나고 촉매의 유효반응면적이 확대될 뿐만 아니라 고분자전해질 막과 전극의 계면에서 발생하는 저항이 줄어든

게 된다. 이와 같은 전극의 개발에 있어 초기에는 Pt black을 사용하여 전극 단위면적당 촉매함량이 4mgPt/cm²로 비교적 높았으나 supported Pt/C 촉매를 사용함으로써 백금촉매의 함량을 약 0.4mgPt/cm²로 낮추면서도 향상된 성능을 보이는 전극제조 방법이 소개되고 있다. 그리고 최근에는 0.1~0.15mgPt/cm²의 낮은 백금함량으로도 우수한 성능을 보이는 전극제조법(decals process, direct coating process)도 보고 되었다.

3) 분리판

양극판(bipolar plate) 또는 유로판(flow filed plate)이라고도 하는 분리판(separator)은 한쪽면에는 연료극 가스 channel을, 다른 한쪽면에는 산소극 가스 channel을 가지고 있는 전기전도성 판으로 연료극에서 생성된 전자를 산소극쪽으로 전도해주는 current collector 역할을 하고 MEA를 지지해주며, 연료극 및 산소극쪽으로 연료와 산화제를 공급해주는 통로를 제공해주는 동시에 전지운전중에 생기는 물을 제거해 주는 통로를 제공해 준다.

분리판의 재질로는 전기전도도가 높고 부식성이 적은 tantalum, niobium, titanium 등과 magnesium, copper 등의 금속, 그리고 합금이 사용되기도 하지만 가격이 비싼 단점이 있다. 또한 금속은 표면이 산화되기 쉬워 전기전도도가 떨어질 우려가 있으므로 표면을 platinum group 금속과 같은 비산화성 물질로 피복해야 하기 때문에 추가비용이 소요된다.

한편 이러한 금속 물질들은 수소를 흡수하여 metal hydride를 형성함으로써 구조를 약하게 하고 깨지기 쉽게 하는 경향이 있다. 따라서 GE에서는 탄소나 graphite 와 같은 전기전도성 입자들을 phenolic 고분자 결합체나 fluoropolymer 결합체와 함께 isostatic molding하여 사용하였다. 최근에는 전기전도성 입자들을 isostatic molding한 후 resin을 함침시켜 사용하는 데, 이때 resin은 분리판으로 반응기체가 침투하는 것을 방지해 주는 역할을 한다.

분리판에서의 유로설계는 고분자전해질 연료전지의 운전, 특히산화제로 공기를 사용할 때 아주 중요하며 이유로는 기계적 가공이나 molding을 통하여 제작한다. 한편 전기화학반응에 의해 생성된 열을 효과적으로 제거하기 위하여 cooling plate를 분리판 사이에 설치하기도 하고 외부가습기가 차지하는 부피를 줄이기 위해 내부가습용 셀을 부착하기도 한다.

3. 스택개발기술

고분자전해질 연료전지 스택에 대한 연구개발은 주로 전기자동차의 전지를 대신하는 수송용 동력원으로서의 응용을 목표로 진행되어 오고 있으나 그외에도 이동용 전원, 현지설치형 전원, 군사용 전원등 그 응용범위가 다양하다. 다음 표 2는 외국의 고분자전해질 연료전지 스택 개발현황을 요약해 놓은 것이다.

다음 표 3은 연료전지 자동차의 개발현황을 나타내

표 2. 대표적인 자동차용 PEFC 스택 개발현황

Manufacturer	Output	Fuel	Oxidant	Oper. Year	Remarks
GM Allison(USA)	10kW	MeOH	Air	1993~	Bread board
Energy Parter(USA)	15kW	H ₂	Air	1993~	Van, 770cm ³
Ballard(Canada)	120kW	H ₂	Air	1993~	Bus, 232cm ³
De Nora Permelec(Ita)	5kW	H ₂	Air	1993~	Bus, 225cm ³
Analytic Power(USA)	150W	H ₂	Air		Scooter
Ford(USA)		H ₂	Air		Van
Chrysler(USA)		H ₂	Air		Van
Matsuda/Ballard	8kW	H ₂	O ₂	1994~	Golf car, 232cm ³
Tanaka Kikinzoku	360W	H ₂	O ₂	1994~	Scooter, 3000h

표 3. 세계 각국의 연료전지 자동차 개발현황

국가	제작사	적용	종류	용량(kW)	연료	운전
미국	GM	승용차	PEFC	60	메탄올	1997
	Ford	승용차	PEFC	30	수소	1996
	Chrysler	승용차	PEFC	30	수소	1996
	IFC	군용	PEFC	15	수소	1994
캐나다	Ballard	버스	PEFC	120	수소	1993
벨기에	Elenco	버스	AFC	78	수소	1993
독일	Siemens	잠수함	PEFC	34	수소	1993
	Daimler-Benz	승용차	PEFC	30	수소	1993
이태리	Ansaldo/DeNora	버스	PEFC	10	수소	-
	Renault의	승용차	PEFC	30	수소	1996
영국	Vickers	잠수함	PEFC	20	수소	-
일본	Toshiba	승용차	PEFC	1	수소	1995
	Fuji	승용차	PEFC	5	수소	1994
	Mitsubishi	승용차	PEFC	1	수소	1995

었다. 특히 미국에서는 1990년 11월에 자동차 배기 가스를 규제하기 위한 대기보전법(Clean Air Act)이 제정됨으로써 2003년 이후 California를 비롯한 3주에서 판매되는 전체 자동차중에 무공해 자동차가 차지하는 비율이 10% 이상이어야 한다고 되어 있어 앞으로 무공해 자동차의 보급은 필연적일 것으로 예상된다.

따라서 현재 대부분의 세계 주요자동차 제작사들이 연료전지 자동차 개발 프로그램에 참여하고 있는 중이며, 연료전지 자동차 시제품을 개발하기 위한 연구가 한창 진행중이다. 벨기에의 알카리형 연료전지인 용 버스와 미국 H-Power 사의 인산형 연료전지 버스 연구도 있지만 캐나다 Ballard사의 고분자전해질 연료전지 승용차를 비롯하여 특히 고분자전해질 연료전지 자동차에 대한 기술을 많은 기업체에서 연구하고 있다. 이것은 고분자전해질 연료전지가 에너지 밀도가 높기 때문이다. 그러나 현재 수송용으로 모든 종류의 연료전지가 연구 검토될 수 있다.

이와 같이 연료전지 자동차에 대해 많은 연구가 이루어지고 있는 한편, 최근 세계 각국의 자동차 제조 회사에서 환경공해의 대책으로 전기자동차에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있는 것은 주지의 사실이

다. 대기오염의 주원인인 내연기관 차량을 대체할 수 있는 무공해 차량으로는 원래 전지를 동력원으로 하는 전기자동차가 각광을 받고 있는데, 전지를 전기 자동차 동력원으로 사용 할 경우 충전시 많은 시간을 요구하고, 에너지 밀도가 낮아 주행가능 거리가 짧으며, 전지의 수명이 짧은 문제점이 있다. 또한 전기 자동차가 상용화된다면 많은 전기충전소의 설치가 필요하며, 여기서 사용되는 전기는 대규모 발전소에서 공급되므로 결국 오염원의 이동에 불과하다고 볼 수 있다.

1) 캐나다

캐나다의 Ballard Power Systems은 고분자전해질형 연료전지 스택개발의 선두주자로 1993 5kW스택 24개를 연결한 120kW성능의 버스 전기자동차를 처음으로 선보였다. 연료는 버스 밑부분에 장착된 실린더에서 나오는 3,000 psig의 압축수소를 이용하였다. 이 버스는 2,000km 이상의 주행실험을 통하여 만족할 만한 결과를 내었는데, 1995년에는 같은 부피에서 2배의 성능인 250kW의 성능을 보이는 향상된 스택을 이용한 전기자동차 제작에 성공하여 현재 이의 실용화를 추진중에 있다. 또한 Ballard에

서는 발전설비용으로 천연가스를 이용한 10kW 연료 전지를 제작하였고 chlor-alkali공정의 부산물인 수 소로 작동하는 35kW시스템을 제작하였으며, 이를 기반으로 250kW발전시스템을 개발중에 있다.

2) 미국

고체 고분자전해질형 연료전지에 대한 연구는 1995년 미국의 GE사에서 처음으로 시작되었다. 초창기에는 GE Research Laboratory에서 행해지다가 1960년경부터는 GE Direct Energy Conversion Operation 이라는 기구에 의해 power plant 설계 및 제작이 행해졌다. 1962년 GE는 Gemini Space Program에 의해 1kW급 PEFC 스택 2개로 이루어진 모듈을 개발하여 제미니 3호부터 12호까지 사용하였다. 1978년에는 Brookhaven National Laboratory(BNL), US Army등에서도 자동차용 연료전지 프로그램을 사작하였으며, 1990년대에 DOE는 GM, Ford, Chrysler 등을 통하여 PEFC 시스템의 개발을 추진 중에 있다.

즉 1993년 9월에 미 연방정부와 GM, Ford, Chrysler으로 구성된 미국자동차 연구위원회 사이에 협력방안으로 PNGV(The Partnership for a New Generation of Vehicles)이 체결되었다. 이의 목적은 에너지 효율이 높고 환경친화적인 차세대 차량을 위한 기술을 개발하여 미국기업을 강화시키려는 데 있으며, 2000년까지 50kW급 연료전지 스택 시스템 기술을 개발하고 2004년까지는 성능, 범위, 안전도 및 신뢰성 면에서 내연기관과 가격경쟁력을 갖춘 자동차용 연료전지 시스템을 개발하는 것으로 되어 있다.

따라서 GM, Ford 및 Chrysler가 주동이 된 산업계에서는 DOE의 협조하에 공동으로 비용을 부담하여 10~50kW 급 연료전지 시스템을 개발하고 있으며, 특히 GM은 메탄을 연료전지 시스템을 개발하고 Ford와 Chrysler는 수소 연료전지 시스템을 개발중에 있다. 한편 1997년 9월부터 IFC(International Fuel Cells)과 Arthur D. Little은 가솔린, 메탄올, 에탄올 및 천연가스로 운전되는 50kW급 PEFC 시스템 개발을 사작하였다.

3) 유럽

독일의 Daimler-Benz는 Ballard의 30kW스택을 자동차에 적용하는 연구를 수행하여 6인승 미니밴을 1996년 제작하였으며 메탄올을 연료로 사용하고 주행거리가 400~500km인 연료전지 자동차 Prototype을 1997년 Frankfurt Auto Show에서 발표하였다. 또한 수소를 사용하는 연료전지버스를 1997년 시험운전한 적도 있다. 특히 Daimler-Benz와 Ballard는 2004년부터 전기자동차와의 경쟁을 위하여 년 4만대 규모의 양산을 목표로 연구개발을 진행 중에 있으며, 여기에는 Ford가 참여하고 있다. 한편 독일의 Siemens는 잠수함용 34kW급 스택을 1993년에 개발한 후 250kW급 스택을 개발중에 있다. 이태리의 ENEA와 De Nora는 1988년부터 공동연구

에 들어가 1991년 10kW급 스택을 개발하였으며 특히 Ansaldo는 Do Nora의 30~120kW급 스택을 이용한 승용차, 버스, 보트를 개발하기 위하여 여러 가지 프로그램을 운영하고 있다.

4) 일본

일본의 경우에는 통산성 공업기술원 산하 신에너지 개발 기구(New Energy Development Organization, NEDO)주도로 시작된 Moonlight Project의 일부로 고분자전해질형 연료전지의 연구를 1993년부터 시작하였으며, 9개회사가 요소기술 개발을 분담하여 1996년에 1kW module을 제작하였다. 한편 Fuji 전기와 Mitsubishi 중공업은 1989년부터 개발을 시작하여 1994년에 5kW스택을 제작하였으며 Matsuda 자동차는 1992년 Ballard의 7.8kW스택을 이용하여 2인승 골프카를 제작하였다. 또한 Honda와 Nissan도 Ballard의 스택을 이용한 연료전지 자동차개발을 진행중에 있으며, Toyota는 메탄올을 연료로 사용하고 주행거리가 400~500km인 연료전지 자동차 Prototype을 1997년 발표하였다.

5) 우리나라

국내에서는 1990년대초부터 일부대학(포항공대, 연세대, 한양대)에서 PEFC에 대한 기초연구를 수행하여 왔다. 1995년에는 한국가스공사에서 전국 및 구분자전해질 막을 수입하고 분리판을 자체제작하여 1kW스택에 대한 운전연구를 수행하기도 했다. 또 1996년부터 한국에너지기술연구소와 한양화학 중앙연구소는 2kW스택을 제작 운전을 하기도 했으며, 특히 한양화학이 개발한 고분자전해질 막은 고가의 고분자막의 국산화 기술개발에 크게 기여한 것으로 사료된다. 한편 1996년부터 한국과학기술연구원도 고성능 스택본체 개발을 목표로 연구를 시작하였으며, 현대중공업과 삼성종합기술원도 1997년부터 연구개발을 진행중이다. 그리고 자동차부품연구원, 현대자동차, 대우자동차와 삼성자동차등 무공해 연료전지 자동차의 필요성을 인식하고 개발을 계획하고 있다.

4. 결 론

연료전지의 용도는 발전용, 전기사업용, 우주용, 운수용등 다양하며, 그 중에서 수소를 동력원으로서 연료전지의 적용이 기대된다. 연료전지 자동차에 대한 관심은 전기자동차와 연료전지기술의 발전과 환경, 혹은 무배출자동차에 대한 기대 때문에 크게 발전이 진전될 가능성이 많다.

연료전지 자동차는 NO_x의 배출이 거의 없고, 효율이 가솔린 엔진 자동차보다 3배정도 높아서 연료탑재량도 줄일 수 있다. 또한 전기배터리는 충전에 많은 시간이 소요되지만, 수분내에 재충전이 가능한 특징이 있다. 따라서 연료전지 자동차는 향후 계속적인 기술개발과 시운전이 성공하면 빠른 속도로 우리 곁으로 다가올 것으로 기대된다.

*참고문헌 저자들에게 감사를 드립니다.

참고문헌

1. S. Gottesfeld and T. A. Zawodzinski, "Polymer Electrolyte Fuel Cells", *Advances in Electrochemical Science and Engineering*, p. 195, 1997.
2. 김귀열의, "연료전지 자동차의 가능성과 기술분석", *전기학회 '95 하계학술대회 논문집*, 7, 1995.
3. 김귀열, "연료전지 발전시스템의 기술개발동향", *전기기술동향지*, 9, 5, 1996.
4. Denki Kagaku, "New Developments in Fuel Cells", *전기화학 및 공업물리화학지*, 64, 6, 1996.
5. Leo J. M. T. Blomen and M. N. Mugewa, "Fuel Cell Systems", 1993.
6. A. J. Appleby and F. R. Foulkes, "Fuel Cell Handbook", 1989.
7. 연료전지연구회, "연료전지기술", '97 학술발표회 논문집, 3, 1997.
8. A. Landgrebe et al, "Proton Conducting Membrane Fuel Cell", *The Electrochemical Society*, 1995.