

# 연료전지 자동차의 소개

## Introduction to Fuel Cell Vehicle



배 중 면 / Joongmyeon, Bae

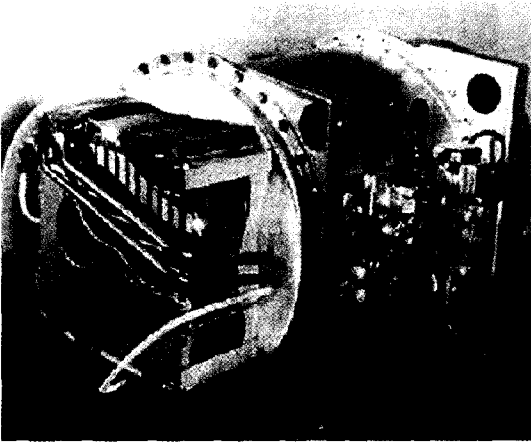
한국과학기술원 / Korea Advanced Institute of Science & Technology

### 연료전지 소개

21 세기의 인류에게 던져진 여러 화두 중에서 가장 인류 문명에 지대한 영향을 줄 수 있는 것을 꼽으라고 한다면 단연 에너지와 환경문제가 그 첫번째로 지목될 것이다. 에너지의 사용은 점점 증가하는 추세이지만 대표적 화석연료인 석유의 경우 40년이 지나면 그 바닥을 드러낼 것으로 예상되고 있고, 환경오염문제도 심각하여 대기 중의 이산화탄소의 농도는 지난 수십만 년간 전례가 없을 정도로 증가하고 있어 2100년의 대기 온도는 현재보다 약 2℃정도 상승하여 해수면이 50cm나 상승하게 될 것으로 예측하고 있다. 이에 1960년대 이후부터 각국에서는 태양열/광, 풍력, 수력, 지열, 조력 등의 대체에너지원에 관심을 쏟기 시작했다. 그러나 이러한 에너지원은 모두 전력의 형태로 만들어지므로 운송수단의 에너지원으로 사용이 곤란하므로 에너지 매개체로서 수소를 사용하는 방안이 현재 집중적인 관심을 끌고 있으며, 가까운 미래에는 수소를 사용하는 가장 효과적인 에너지 변환기구인 연료

전지 중심의 수소에너지체계가 이루어질 것으로 예상되고 있다. 따라서 현재 전체 에너지의 3분의 1 이상을 사용하고 있는 운송수단도 수소 사용에 알맞은 형태 즉 연료전지를 장착한 모습으로 바뀌어야 할 것이다. 이런 움직임을 단적으로 보여주는 예가 미국의 부시 대통령이 2003년 의회연설에서 미국이 수소자동차 개발에서 세계적인 리더가 되도록 12억 달러를 투자할 것이라는 "FreedomCAR Project"를 발표한 것이다. 여기서 차세대 자동차의 핵심 기술인 연료전지에 대해 간단히 알아보고자 한다.

연료전지는 1839년에 영국의 Sir William Grove에 의해 발명된 후 오늘에 이르고 있다. 그 당시 전기 생산 방법이 특별히 발달하지 못한 상황에서 연료전지는 발전기구로 주목을 받았으나 연료전지를 본격적으로 활용한 최초의 예는 긴 시간이 지난 1960년대에 미국 NASA에서 추진했던 우주 개발계획에서이다. <그림 1>은 미국 GE사에서 개발하여 아폴로 우주선에 40여일 간 전력을 공급했던 1 kW급의 고분자연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell,



〈그림 1〉 Gemini에 탑재된 GE사의 1kW급 연료전지

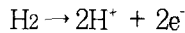
PEMFC)이다. 중국의 우주선에도 연료전지가 탑재되었다. 이후 연료전지기술은 여러 차례에 걸쳐 상용화의 시도를 하게 되나 풀기 어려운 여러 기술적 난제와 높은 가격이라는 장벽에 가로 막혀 성공적으로 사회에 뿌리 내리지 못했다. 그러나 최근 에너지와 환경문제가 더 이상 뒤로 미룰 수 없는 상황에 이르게 되어 각국의 유수 자동차 회사와 선진국 정부들은 경쟁적으로 막대한 예산을 집행하며 연료전지와 수소경제의 개발 및 보급을 추진하고 있다.

그 명칭에서 알 수 있듯이 연료전지도 다른 일반전지와 마찬가지로 전기반응, 즉 전기화학반응에 의해 전기에너지를 생산해 낸다. 그러나 일반전지가 에너지 저장장치의 개념이 강한 반면, 연료전지는 연료(주로 수소)를 계속적으로 공급하는 한 전기를 연속적으로 생산하기 때문에 내연기관과 마찬가지로 에너지 변환 기구로 볼 수 있다.

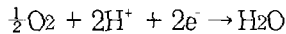
대표적인 연료전지인 PEMFC(Proton Exchange Membrane Fuel Cell)의 원리가 〈그림 2〉에 나타나 있다. Anode에는 연료인 수소가 공급되고 Cathode에는 산화제인 산소가 공급된다. Anode에 공급되는 수

소는 전자를 잃고 양성자(Proton)가 되어 전해질을 통과하여 Cathode로 이동하고 수소가 잃은 전자는 전지 외부회로에서 전기적 일을 하고 Cathode로 이르게 된다. Cathode에서는 Proton이 산소 원자와 전자와 결합해 물이 생성된다. 이를 화학 반응식으로 나타내 보면 다음과 같다.

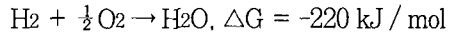
▶ Anode(연료극)



▶ Cathode(공기극)



▶ 전체 반응식

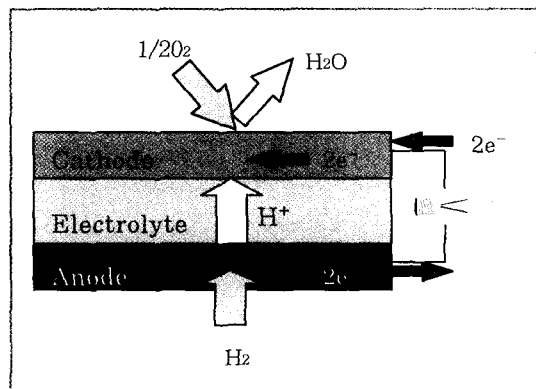


이때 생성되는 전기에너지는 열역학적으로 사용 가능한 일과 같고 그 값은 전체반응식의  $\Delta G$  (Gibbs Free Energy의 차이)와 같다. 이를 식으로 나타내면,

$$\Delta G = -\Delta W = -(nFE)$$

$$E = 1.1 \text{ volt}$$

F : 패러데이 상수, E : 기전력



〈그림 2〉 연료전지의 원리

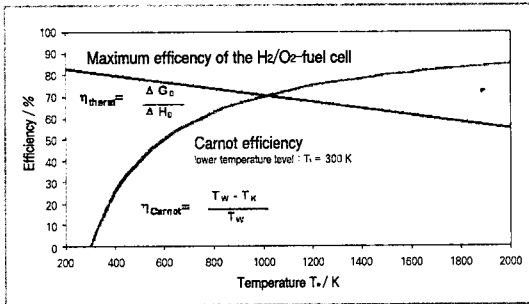
즉 수소를 사용하는 연료전지 단전지에서 열역학적으로 얻을 수 있는 전압은 약 1.1 V 정도이며 연료전지의 효율은 전압을 측정함으로써 알 수 있다. 필요한 전압과 전력을 얻기 위해서는 단전지를 스택(적층)하게 된다. 이때 에너지 손실이 전혀 없는 이상적인 연료전지의 효율(열역학적 효율)은 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_{FC} = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

내연기관의 이상적인 효율은 다음 식과 같이 Carnot Efficiency로 표현된다.

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_H - T_L}{T_H}$$

이를 통한 작동 온도에 따른 두 Energy Conversion System의 효율을 살펴보면 <그림 3>과 같다. <그림 3>에 나타난 것처럼 이상적인 연료전지의 열역학적 효율은 연료전지의 사용가능 온도 범위인 1,000℃이하에서 높다. 반면 이상적인 내연기관인 카르노 기관의 효율은 고온으로 갈수록 높아진다. 이는 연료전지가 내연기관보다 상대적으로 저온에서 작동하는 이유를 잘 보여준다.



<그림 3> 이상적인 연료전지와 카르노기관의 작동 온도에 따른 효율 비교

<표 1> 연료전지의 종류 및 특징

	인산형 (PAFC)	용융탄산염형 (MCFC)	고체산화물형 (SOFC)	고체고분자형 (PEMFC)	알칼리형 (AFC)
전해질	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub> +8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	프로톤 교환막	KOH
전극	Graphite +Pt	NiO/Ni (Cr)	LSM(YSZ)/Ni(YSZ)	Graphite +Pt	Pt or Ni
작동온도	약 200℃	약 650℃	1000℃~600℃ 700℃~350℃	상온~90℃	상온~100℃
전도종	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>
사용연료	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CO	H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , Hydrocarbon	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
발전효율	40~50%	45~55%	45~55%	40~50%	45~55%
활용분야	분산형전원	대형발전 시스템	중(대)형발전 시스템	이동형전원 (자동차)	우주선전원

연료전지는 전해질(Electrolyte)의 종류에 따라 크게 다섯 종류로 구분된다. <표 1>은 연료전지의 다섯 가지 종류를 간략히 정리하여 표기하고 있다. 전해질의 종류에 따라 이온 전도성에 대응하는 작동온도가 결정되는데 <표 1>에서 보는 바와 같이 가장 저온에서 작동하는 PEMFC의 경우 80℃정도이며 고온에서 작동하는 고체 산화물 연료전지의 경우 1,000℃의 고온에서 작동한다.

연료전지의 가장 큰 특징이자 장점으로는 높은 효율을 들 수 있다. 연료전지는 전기화학 반응을 통해서 비교적 낮은 온도와 압력에서 화학에너지를 직접 전기로 변환한다. 따라서 화학에너지를 고온에서 역학적 에너지로 변환한 뒤 다시 전기에너지로 변환하는 발전시스템에 비해 비가역성이 적기 때문에 보다 높은 효율이 가능하다. 즉 수소를 내연기관에서 사용하는 것보다는 연료전지를 통한 전기에너지로의 변환하는 것이 보다 수소를 효율적으로 사용하는 방법인 것이다. 순수한 수소를 직접 연료전지에 사용하지 않더라도 기존화석 연료를 개질(Fuel Processing)하여 생성된 수소를 연

료전지로 사용할 경우 전체시스템 효율 또한 석유를 내연기관에서 사용했을 때보다 더 높을 수 있기 때문에 비단 미래의 수소에너지 체계에서만뿐만 아니라 과도기에서도 기존의 화석연료를 사용하는 효과적인 방법으로서는도 연료전지 연구는 충분히 가치가 있다.

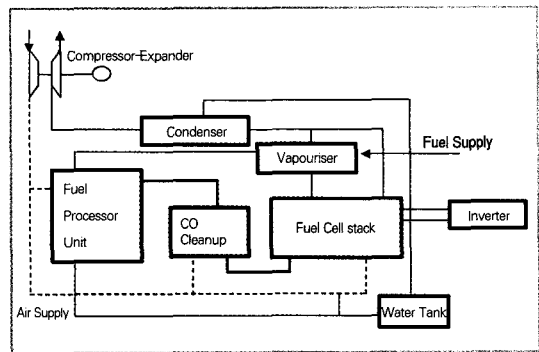
이런 효율상의 장점 이외에도 연료전지는 여러가지 실용적인 이점을 가지고 있다. 먼저 연료전지는 시스템의 크기나 부하에 거의 관계없이 일정한 성능을 유지하기 때문에 스택의 구성에 따라 여러 출력에 적용할 수 있는 모듈화 가능성을 가지고 있어 작게는 노트북, 휴대전화 등의 이동용 전원으로부터 열병합발전소급의 규모까지 넓은 출력범위에서 응용의 확장이 가능하다. 즉 독립적 전원을 필요로 하는 어떤 분야에도 그 응용가능성이 열려있다 할 수 있겠다. 또한 동작부위가 없어 유지 비용 저렴하고, 연료전지 자체는 소음이 전혀 없다는 등의 장점도 가지고 있다.

### 연료전지 자동차의 개발

앞서 언급했듯이 연료전지는 일반적인 전지와 달리 연료를 공급하는 한 충전할 필요 없이 연속적인 전기 화학반응에 의해 전력을 계속적으로 공급하는 내연기관과 같은 에너지 변환기구이며 전기화학 엔진(Electrochemical Engine)이라고 불리기도 한다. 연료전지자동차는 내연기관엔진 대신에 전기화학엔진인 연료전지를 동력원으로 사용하는 자동차를 말한다.

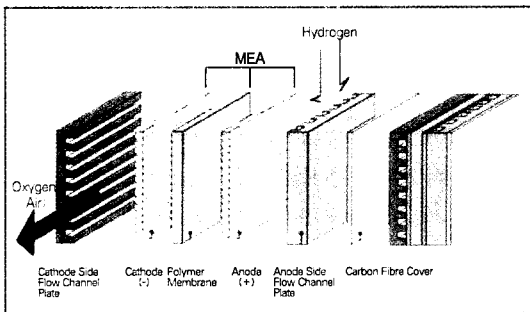
연료전지는 현재의 내연 기관을 대체하는 고효율의 친환경적인 에너지 변환기구로 여겨지고 있다. 내연기관을 이용한 자동차의 경우 배출가스의 27%가 이산화탄소로서 이것은 지구 온난화의 직접적인 원인이 되며, 또한 내연기관 자동차에 의한 대기오염이 전체 85%를 차지하여 규제가 불가피한 실정이다. 이 때문에 미국 캘리포니아의 경우 2005년부터 주 전체 자동

차 판매대수의 10%를 ZEV(Zero Emission Vehicle)로 판매할 것으로 의무 규정을 정해두고 있다. 공해문제 외에도 석유 자원의 문제에 있어서도 한정된 매장량을 보다 오래 효율적으로 사용하기 위하여, 근본적으로는 미래의 수소에너지체계를 대비하기 위하여 내연기관을 연료전지로 대체하여 고효율의 전기 자동차를 개발하려는 국가적 기업적 노력이 선진국을 중심으로 이루어 있으며 개발 시기와 양산화에 세계 유수의 자동차 메이커들은 촉각을 곤두세우고 있다. 연료전지에 공급되는 연료는 순수한 수소를 저장하여 직접 사용하거나 차내개질기(On-Board Fuel Processor)를 통하여 저장된 가솔린이나 메탄올을 개질하여 생성된 수소를 연료전지에 공급 할 수 있다. 순수한 수소를 저장하는 방법으로는 액체나 기체형태로 탱크에 넣는 방법, 티타늄 등의 금속 내부에 넣어 메탈하이드라이드(Metal Hydride) 형태로 저장하는 방법, 화학반응을 이용하여 하이드라이드 형태를 만드는 방법이 있다. 최근에는 탄소나노튜브를 이용하여 수소를 저장하는 방법을 연구하기도 한다. 그러나 현재 수소저장기술의 한계로 저장할 수 있는 수소 용량이 크게 제한되어 있어, 기존 차내개질기를 장착하여 탄화수소 연료인 가솔린, 메탄올, 디젤, 천연가스 등을 개질하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. <그림 4>는 연료전지 엔진을

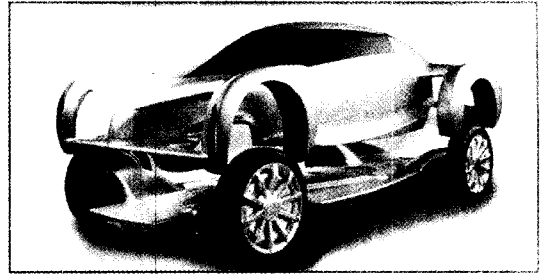


<그림 4> 연료전지 엔진의 구성

구성하는 요소들을 나타낸 것으로서 크게 Fuel Cell Stack, Fuel Processor(수소저장용기를 직접 사용가능), Compressor-Expander, Water Management System으로 나눌 수 있다. 연료전지스택 (Fuel Cell Stack)은 연료 수소와 산화제인 공기가 공급되어 전기를 생산하는 부분이다. 연료전지에는 앞서 <표 1>에서 살펴본 것처럼 다양한 종류가 있고, 그 중 PEMFC가 주로 전기 자동차에 쓰이고 있다. PEMFC는 높은 에너지 밀도를 가지고 저온 작동으로 시동이 빠르며 내충격성이 좋기 때문에 자동차 및 휴대용 전원 등이 동용 전원에 알맞은 것으로 알려져 있다. 스택의 구성은 <그림 5>와 같이 다수의 MEA(Membrane Electrode Assembly)를 그 사이에 Bipolar Plate를 두고 적층(Stack)하여 원하는 출력 값을 가지게 된다. 연료전지스택에서 발생한 전기는 DC 형태로 AC로 변환하기 위하여 인버터(Inverter)를 거치게 된다. 연료개질부는 가솔린이나 메탄올과 같은 화석연료를 개질하여 연료전지에 공급될 수소를 생성하기 위한 연료개질기와 개질기의 생성물에서 PEMFC 전극의 귀금속 촉매를 피독시키는 CO를 제거하기 위한 공정으로 이루어 진다. Compressor-Expander는 연료전지와 연료개질부에 필요한 공기를 공급하기 위한 장치이다. 현재의 내연기관을 탑재한 자동차는 발전에 발전을 거듭하여 매우 성숙한 기술수준을 가지고 있으며 그 가

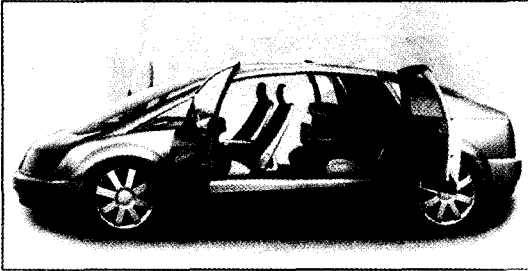


<그림 5> 연료전지 스택 구성



<그림 6> GM의 컨셉카 Autonomy

격 또한 매우 저렴하다. 이러한 내연기관을 대체하여 연료전지 자동차를 보급하는 것이 기술적, 경제적으로 결코 쉬운 일은 아니다. 그러나 전 세계적으로 절대다수의 비율을 차지하는 가솔린엔진의 경우 연료효율이 불과 12~15%에 불과하며 이 보다 높은 효율을 자랑하는 디젤엔진의 경우에도 질소산화물이나, 분진 (Particulate Matter, PM) 등의 공해배출문제를 효과적으로 해결하지 못하고 있는 실정이다. 물론 사회의 에너지 기반이 수소로 옮겨 가게 되어 내연기관에서 수소를 사용하는 경우, 배출하는 물질 역시 수증기만 있는 Zero Emission Vehicle(ZEV)이 되지만 연료전지보다 변환효율이 매우 낮다. 연료전지 자동차는 단순히 엔진을 연료전지와 Motor로 교체한 것이 아닌 전혀 새로운 개념을 바탕으로 디자인 될 것이다. <그림 6>은 미국 GM 사의 연료전지를 탑재한 컨셉카인 Autonomy이다. 자동차 구동부분에 해당하는 파트는 스케이트보드와 같은 하체부분에 전부 설치가 되며 뒷부분의 탑승자의 공간은 하체부분과 전기적인 연결로 이루어 지게 된다. 내부의 공간은 혁신적으로 넓어지며 안전면에서도 하체부분을 충돌에 강하게 설계하는 것으로 확보할 수 있다. <그림 7>은 GM의 이러한 면을 이용한 또 다른 컨셉카인 Monaco이다. 자동차의 생산방식 또한 혁신적으로 바뀌게 되며 소비자가 자동차의 외형을 기호에 따라 뒷부분만의 교체가 가능하며 구동부분에 문제가 생기면 하체부분만 교체하는 것이



〈그림 7〉 GM의 컨셉카 Monaco

가능하다. 또한 연료전지는 스택 자체만 보면 기계적으로 움직이는 부분이 전혀 없으며 공기 공급이나 냉각을 위한 컴프레서나 펌프 등에서만 소음이 발생하므로 내연기관보다 훨씬 정숙한 승차감을 제공할 수 있다.

### 연료전지 자동차의 장점과 문제점

연료전지 자동차의 가장 큰 장점은 친환경적인 특성일 것이다. 연료전지 자동차는 저온에서 작동하기 때문에 NOx를 거의 발생하지 않는 저공해 자동차이다. 수소나 Methanol을 사용할 경우 〈표 2〉에서 보는 바와 같이 연료전지는 오염물질을 전혀, 혹은 거의 발생하지 않는다. 연료전지 자동차의 개질 시스템을 가정하더라도 개질 시스템 자체의 온도도 1,000℃이하로

그다지 높지 않기 때문에 PM, NOx 등의 오염 물질은 거의 발생하지 않는다.

〈표 2〉의 Methanol FCEV(Fuel Cell Electric Vehicle)은 NECAR3(DaimlerChrysler사, 1997)의 실험결과로 CO와 NOx는 거의 발생하지 않고 있고 Hydrocarbon의 경우 엄격한 California SULEV(Super-Ultra-Low-Emission) 요구사항보다도 매우 낮은 정도의 오염물질을 배출하는 것을 알 수 있다.

사실 〈표 2〉에서 수소를 연료로 사용하는 연료전지와 기존의 화석연료를 사용하는 내연기관의 배출가스를 비교하는 것은 거시적인 관점에서 적당치 못하다고 볼 수 있다. 수소를 사용할 경우 오염물질이 전혀 발생하지 않는 것은 연료전지보다는 탄소를 포함하지 않는 수소 고유의 특성으로 인한 것으로 볼 수 있다. 순수한 수소를 내연기관에서 사용할 경우에도 부산물은 물과 약간의 NOx 뿐으로 오염물질은 거의 발생하지 않을 것이다. 물론 낮은 작동 온도로 약간의 NOx조차 발생하지 않는 것은 연료전지의 우월성이다.

연료전지의 친환경적인 특성보다 근본적인 장점은 높은 효율이다. 〈표 3〉의 Tank to Wheel Efficiency를 보면 현재 개발되고 있는 연료전지 자동차들은 이미 내연기관의 약 2배 정도 되는 높은 효율을 보이고 있다. 더해서 〈표 2〉은 수소를 기준 연료에서부터 개질하여 얻었을 때를 가정하여 내연기관과 Well to

〈표 2〉 기존자동차와 연료전지자동차의 배출가스 비교

(All g/km)	CO	NOx	HC/T HC
SULEV Standard	0.6	0.013	0.006
EURO 3 Gasoline ICE *	2.30	0.15	0.2
EURO 4 Gasoline ICE	1.00	0.08	0.10
Hydrogen FCEV**	0	0	0
Methanol FCEV	0	0	0.004

\*ICE (Internal Combustion Engine) : 내연기관  
\*\*FCEV(Fuel Cell Electric Vehicle) : 연료전지 자동차



〈그림 8〉 NECAR 2, 1, 3(왼쪽부터)

〈표 3〉 일본 도요타사의 각종 자동차 시스템의 연비 비교

Vehicle	Efficiency	Well to Tank	Tank to Wheel	Well to Wheel(%)			
				10	20	30	40
Gasoline 자동차		88	16	14%			
Gasoline HV			30	26%			
Diesel 자동차		89	22	20%			
Diesel HV			30	27%			
Hydrogen FCV		58	38	22%			
Hydrogen FCHV			50	29%			
Target FCHV		70	60	3xGasoline, 1.5x HEV			

Wheel Efficiency를 비교해 보았을 때도 같은 HV여 부일 때 연료전지 자동차의 효율이 더 높음을 보여주고 있다. 연료전지 자동차 기술은 현재 발전 중이라는 것을 감안하여 목표치를 살펴 보면 FCHV의 Well to Wheel Efficiency는 약 42%로 현재 가장 효율이 높은 Diesel HV에 비해 15%이상 높다. 이는 기존화석 연료를 사용하는 데 있어서도 연료전지가 매우 효과적

일 수 있는 가능성을 잘 보여준다.

〈표 3〉는 연료 선택과 그 처리과정과 자동차의 종류에 따른 에너지 변환효율의 변화를 좀 더 자세히 보여준다. 먼저 석유에 비해 매장량의 여분이 많고 값이 싸며 오염물질의 배출이 적은 천연가스를 자동차의 에너지원으로 사용했을 때의 효율이 나타나 있다. 천연가스를 메탄올로 변환한 뒤 이를 개질기를 통하여 수소

〈표 4〉 자동차 연료선택과 에너지 변환효율

Energy Resource	Recovery	Processing	Reformer	Energy Conversion	Power Management	Energy to Wheels
Natural Gas	Extraction/ Cleaning Delivery 88%	Methanol Conversion/ Storage 76~81%	Methanol Steam Reformer 80~85%	Fuel Cell 50~55%	Motor/ Controller/ Accessories 75~84%	Overall Efficiency 20~28%
		Hydrogen Conversion/ Storage 68~75%		Fuel Cell 50~60%		Overall Efficiency 20~33%
Crude Oil	Extraction 96%	Gasoline Processing/ Delivery 88%	Autothermal Reformer 75~80%	Fuel Cell 50~55%	Motor/ Controller/ Accessories 75~84%	Overall Efficiency 24~31%
						Gasoline IC Vehicle(Current) 18%

를 발생하여 연료전지 자동차에 공급하는 방법과 천연 가스를 직접 개질하여 연료전지 자동차에 공급할 때의 효율이 비교 되어 있다. 두 경우 모두 효율이 20%이상으로 천연가스의 저렴한 가격을 고려했을 때 자동차용으로 사용될 석유의 대체에너지원으로서 충분히 가능성을 가지고 있음을 보여준다.

〈표 4〉의 도표는 원유를 에너지원으로 사용했을 때의 연료전지 자동차와 가솔린 내연기관 자동차와의 비교하고 있다. 연료전지 자동차의 경우 석유의 처리 뒤 개질과 연료전지 뒤의 전기에너지를 역학적 에너지로 변환하는 과정이 필요하나 전체 효율은 가솔린 내연기관에 비해 최고 두 배 이상 크다는 것을 보여준다. 이렇듯 연료전지 자동차의 경우 기존 내연기관에 비해 높은 효율이 가능하다. 높은 효율은 화석연료의 절약과 이산화탄소 배출량의 감소를 가져오므로 연료전지는 대체에너지 이전의 과도기에서도 중요한 역할을 할 수 있을 것이다.

연료전지 자동차는 연료전지의 높은 효율과 환경에의 이점 이외에도 성능 저하 없이 전기자동차의 편안함과 편리함을 가지고 있다. 연료전지 자동차의 전기적 동력시스템(Powertrain)은 속도 0에서부터 일반 주행속도까지 최고 토크를 낼 수 있게 해준다. 이는 하나의 속도를 갖는 기어박스의 사용을 가능하게 해주고 비슷한 출력의 내연기관보다 더 좋은 가속으로 이어질 수 있다. 예를 들어 55kW 전기 자동차는 160N의 토크를 0에서부터 최고속도까지 낼 수 있게 해주고 이는 약 15초 동안 1,200kg의 자동차를 0에서 100km/h 까지 가속시킬 수 있음을 의미한다.

연료전지 자동차의 성능 데이터가 운전의 느낌을 좋게 하는 것은 아니다. 연료전지 자동차의 운전자는 내연기관에서와 같이 낮은 속도에서의 약한 가속력이나 기어 변환 없이 시원스러운 가속감을 느끼게 된다. 더해서 FCEV 큰 특징은 조용하다는 것이다. 유일한 소음발생가능 기구는 공기를 압축시키는데 사용하는 공

기 압축기뿐이다. 〈표 5〉를 보면 연료전지 버스가 디젤 버스에 비해 소음이 거의 절반가량이라는 것을 알 수 있다.

연료전지 스택과 연료개질 모듈은 여러 출력 레벨을 같은 Unit을 여러개 병렬로 연결함으로써 간단히 가능하게 해준다. 이는 개별적 디자인의 필요성을 줄여주고 큰 하나의 블록보다는 작은 Unit들을 제공한다. 심지어 모터도 두 개 혹은 각 바퀴에 한 개씩 할당하여 4개로 나누어 질 수 있다. 이런 모듈화 디자인 개념은 생산의 효율을 높이고 유지보수를 더욱 수월하게 할 것이다. 또한 앞서 언급한 대로 자동차 구조의 융통성이 늘어나 다양한 개개인의 취향, 욕구에 맞도록 자동차를 구성하는 것도 가능해질 것이다.

그러나 연료전지 자동차가 상용화 실용화 되기 위해서는 아직 많은 과제가 남아있다. 우선 가장 실제적인 문제로 가격문제를 들 수 있다. PEM의 높은 가격은 주로 전극에 쓰이는 귀금속 촉매와 스택을 구성하는데 쓰이는 분리판 때문이다. 가격문제의 경우 연료전지에서도 실제 양산체제로 가게 될 경우 급속도로 떨어질 가능성이 있으나 내연기관에서는 100만원(엔진주요부분)이 안 되는 가격으로 우수한 성능을 나타낼 수 있으나 연료전지는 연료전지스택 부분만 고려해도 전체 자동차의 가격보다 비싼 가격으로 겨우 공급이 가능한 실정이다.

〈표 5〉 연료전지 버스와 기존버스들과의 소음 비교

	Idle	At 50 km/h
NEBUS	53/57	53/59
Natural Gas Bus	49/58	63/73
Diesel Bus	60/68	65/73

연료전지의 출력밀도도 아직 부족하다고 할 수 있다. 가정용 자동차의 경우 가솔린엔진과 이의 출력에 상응하는 연료전지를 비교하면 단위부피당 출력, 무게당 출력을 비교해보면 연료전지는 1 kW/1L, 1



kW/kg 정도의 출력을 보이고 있으나 내연기관은 이러한 비교에서 적어도 20% 이상의 앞선 출력을 보이고 있다. 물론 출력밀도를 높이는 노력과 발전은 계속되고 있고 보다 높은 연료전지 자동차의 효율을 위해 중요한 문제이나 연료전지를 새로운 사고방식의 자동차 디자인이라는 시각에서 다시 고려해 보면 출력밀도의 부족은 자동차 구조의 근본적인 변화로 인해 충분히 해결될 수 있을 것으로 보인다.

PEMFC의 기술적인 면에서의 난제 중 대표적인 것이 Water Management의 어려움이다. PEM은 높은 양성자 전도성을 위하여 항상 습기를 유지 하여야 하는 반면, 물이 너무 많으면 다공성 전극을 막아 전극 반응을 막기 때문에 공기극에서 생성된 물은 적절히 배출되어야 한다. 물은 Ionic Drag에 의해 연료극에서 공기극으로 이동하여 고전류에서 Anode쪽의 수분이 없어질 수 있다.

반면 확산에 의해 공기극에서 물의 농도가 상대적으로 작은 Anode로 통과, 이동하기도 한다. 물은 보통 공기극에서 흐르는 공기에 의해 제거되는데, 65℃ 이상에서는 제거되는 물의 양이 생성되는 물의 양보다 항상 많기 때문에 공기 혹은 연료를 가습하여 공급하여야 한다. 이때 공기의 흐름에 의한 습기의 변화를 잘 조절하여 전체 전해질 막에서 균일한 습기를 유지하여 높은 연료전지의 성능 저하를 막는 것은 매우 어려운 문제이다.

열 설계도 PEM의 효율에 영향을 주는 중요한 문제이다. 전류  $i$ 에서 작동전압  $V$ 인 PEMFC에 발생하는 열은 다음과 같이 표현된다.

$$Q = i \left[ \left( \frac{-\Delta H}{2F\eta_i} \right) - V \right]$$

$i$ : 전류                       $\Delta H$ : 연료전지 전체 반응 엔탈피 차  
 $F$ : 패러데이 상수         $V$ : 작동전압  
 $\eta_i$ : 연료사용률(Fuel Utilization)

PEMFC의 효율이 50%정도라고 생각했을 때 50kW의 전기출력을 가지는 PEMFC는 50kW의 열을 방출하게 된다. 그러나 PEMFC는 80℃의 저온에서 작동되므로 열을 방출하는 것이 쉽지 않아 연료전지자동차와 같이 수십 kW급의 스택을 사용하는 경우 보통 따로 수냉을 하고 있다. 이는 곧 전력의 손실을 의미하며, 낮은 작동온도로 열교환기가 지나치게 큰 문제점도 가져온다.

따라서 보다 높은 효율을 위하여는 130℃이상에서 작동하는 PEM 혹은 새로운 종류의 전해질의 개발이 요구되며 현재 많은 연구가 이루어지고 있다. 작동온도의 상승은 CO를 20ppm이하의 매우 작은 농도로 줄여야 하는 연료개질 시스템의 부담을 덜어주는 역할도 할 것이다.

이와 같이 현재 연료전지 자동차의 개발 및 보급에 많은 장벽이 있는 것이 사실이나 그 중에서 가장 주요 문제점을 꼽자면 가격 문제 다음으로 수소저장용기문제와 수소공급을 위한 사회기반시설의 부재 문제를 들 수 있다. 또한 연료전지 자동차를 위한 부수장치(Balance of Plant, BOP)들의 개발 역시 동시에 이루어져야 한다. 이에 대해서는 다음 절에서 설명될 것이다.

(배중면 편집위원 : jmbae@kaist.ac.kr)