

# 수소·연료전지 기술현황 및 전망

## 초록

수소에너지는 궁극적으로 인류가 당면하고 있는 에너지와 환경 문제를 동시에 해결할 수 있는 유일한 꿈의 에너지원으로 평가된다. 향후 30~40년 뒤에 예상되는 수소에너지 시대, 즉 수소경제의 비전이 달성될 때 수소이용 기술인 연료전지 기술은 보편화돼 새로 건설되는 발전소는 연료전지 발전소가 대부분일 것이며, 가정과 상업용 건물에도 연료전지가 설치될 것이다. 또한 운행되는 상당 부분의 승용차와 버스가 연료전지 차량이며, 이에 상응해 주유소의 절반 정도는 연료전지 차량에 수소를 공급하는 수소 주유소로 대체될 것이다. 그러나 이러한 꿈을 이루기 위해서는 수소에너지 체계의 핵심인 연료전지 기술의 상용화는 물론 풍력, 태양 등을 이용한 대체에너지원으로부터의 수소생산기술, 수소저장, 운송에 이르는 수송 인프라스트럭처 구축 등 해결해야 할 과제가 적지 않다. 본 고에서는 수소이용기술의 대표적 기술인 연료전지 기술의 개발현황과 전망을 소개하고자 한다. 특히 연료전지 기술을 조기 상용화 하고자 하는 각국의 노력을 소개하고, 응용분야별 해결되어야 할 기술적 문제 등을 소개한다.



홍성안  
한국과학기술연구원 책임연구원 단장  
산업자원부 연료전지 사업단 단장

## 1. 서언 : 에너지 고갈 및 환경 문제 대두

21세기에 인류가 당면하고 있는 가장 큰 문제 중의 하나는 에너지 자원의 한계성과 지구의 환경오염 문제이다. 인류의 생활과 산업 활동에 필수적인 에너지는 인구증가와 산업발전으로 인해 그 사용량이 계속적으로 증가하고 있다. 2025년에는 2001년 기준으로 에너지소비가 약 60% 증가할 전망이며, 특히 저개발국의 경제발전에 의한 에너지소비 증가는 가히 폭발적이어서, 저개발국들의 1인당 에너지소비가 OECD 국가의 1/2 수준으로 늘어나게 되면 현재 미국과

유럽을 합한 석유소비의 7배가 필요하다는 예측이 나오고 있다. 또한, 지구상의 화석연료는 매장량이 한정되어 있고, 그것이 만들어지는 속도에 비해 10만 배 이상이나 빠른 속도로 고갈되고 있다. 현재까지 확인된 가채 매장량은 2002년 기준으로 석유는 40년, 천연가스는 60년, 석탄은 204년 정도이며, 특히 석유의 경우 확인된 가채량의 66%가 중동지역에 편재되어 있어 세계 에너지 시장은 중동지역의 정치적 상황에 의해 크게 좌우되는 매우 불안정한 상태에 놓여 있다.

에너지 소비 증가에 따른 또 다른 부작용은 화석연료 사용량 증가에 의한 환경문제 악화를 들 수 있다. 1987년 UN의 세계환경개발위원회(World Commission on Environment and Development, WCED)의 보고서가 지적한 바와 같이, 경제개발의 형태는 세 가지의 위기 즉, 환경파괴, 개발한계, 에너지고갈 위기를 총체적으로 야기할 수 있다. 특히, 이산화탄소 발생에 의한 지구온난화 문제는 매우 심각하게 전개될 것으로 예측되고 있다. 따라서, 1997년에 채택된 교토의정서(Kyoto Protocol)에서는 2008년에서 2012년 사이에 선진국 전체의 이산화탄소 배출 총량을 1990년 수준보다 최소 5% 감축하는 것으로 규정하는 등 이산화탄소 저감계획을 구체적으로 결의하고 있다.

우리나라의 에너지부문도 경제발전과 생활수준 향상에 따라 에너지소비 증가와 에너지 소비 형태의 고급화 추세가 이루어지고 있다. 지난 10년간 국민총생산은 2.4배 증가한 반면, 에너지소비는 2.7배 증가하였으며, 에너지의 대외의존도는 97%에 이르고 있다. 또한, 세계경제에서 GDP 비중은 1.5% 이지만 에너지 소비 비중은 2.2%를 기록하여 에너지소비량이 전세계 10위를 기록하고 있다. 이러한 에너지 과다 소비 및 해외에너지 수입증대는 국제 환경문제 규제의 대두와 함께 국가경제의 경쟁력을 저하시킬 뿐만 아니라 장기적으로 경제사회 발전의 주요 제약요인이 될 것으로 우려되고 있다.

따라서 에너지의 안정적 확보를 위한 대책을 마련하고, 이와 더불어 새로운 대체에너지의 개발을 촉진하는 방향으로 에너지정책의 전환이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 이러한 대체에너지의 중심에 수소·연료전지 기술이 자리하고 있다.

## 2. 에너지 패러다임의 전환 : 수소에너지 시대로의 진입

수소에너지는 궁극적으로 인류가 당면해 있는 에너지와 환경문제를 해결할 수 있는 꿈의 에너지원으로 평가되고 있다. 즉, 수소는 전기와 같이 다른 에너지원으로부터 얻어지는 2차 에너지이지만 지구상에 존재하는 풍부한 물로부터 제조될 수 있어 자원의 제약이 없고, 연소생성물이 물밖에 없는 청정연료이다. 따라서, 현재 인류가 안고 있는 화석연료의 한계인 부존자원의 고갈과 지구온난화 및 환경오염 문제를 극복할 수 있는 유일한 대안이라 할 수 있다.

그러나, 수소는 자연에 독립적으로 존재하지 않고 다른 원소와 화합물 형태로만 존재하고 있기 때문에 수소를 생산하기 위해서는 추가로 에너지를 투입해야 한다. 따라서, 제조방법에 따라서는 생산된 수소에너지보다 투입된 에너지가 더 많아서 에너지의 경제성이 떨어지는 문제가 나타나기도 한다. 수소를 생산하는 방법은 그림 1과 같이 크게 2부분으로 구분할 수 있다. 즉, 화석원료로부터 생산하는 방법과 대체에너지로부터 생산하는 방법이 있다. 장기적으로는 태양광, 풍력, 광축매, 바이오 등과 같이 재생 가능한 무공해 대체에너지원을 사용하여 물로부터 수소를 추출하는 방법을 사용하는 것이 이상적이지만, 아직까지는 경제성이 낮기 때문에 크게 활용되지 않고 있는 실정이다. 따라서, 현재는 석유, 천연가스, 석탄 등과 같은 화석연료로부터 수소를 생산하는 방법이 더 경제적이다. 이 경우 동력변환 장치를 기존의 것과 동일하게 사용하는 경우에는 화

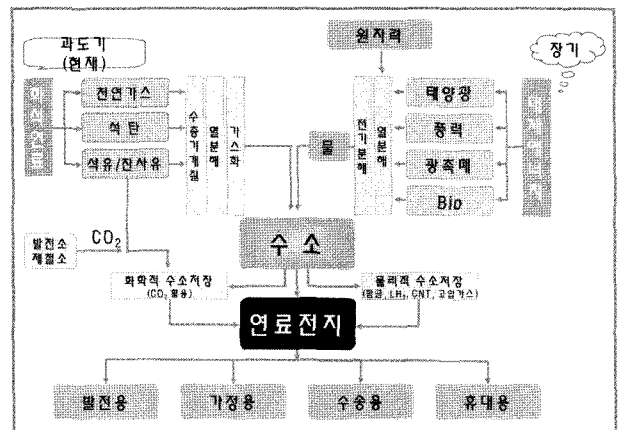


그림 1. 수소 제조기술 및 연료전지 기술의 계통도

# 3 Special

수소-연료전지 기술의 현황 및 전망

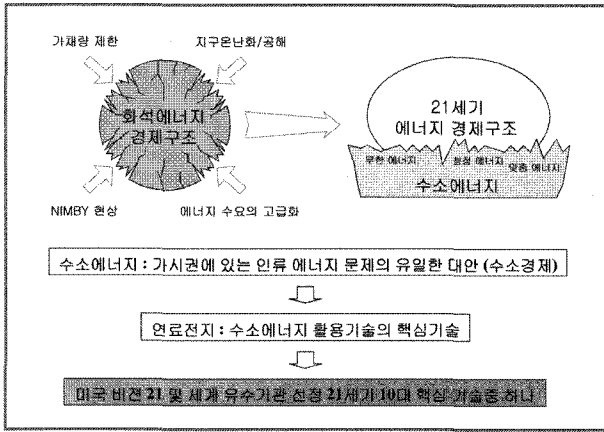


그림 2. 수소에너지와 연료전지 기술의 중요성

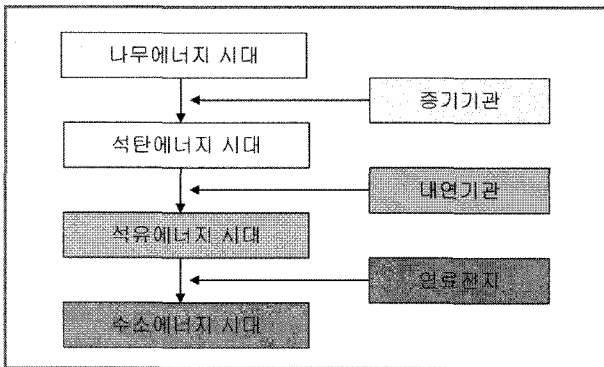


그림 3. 에너지원 및 에너지변환 장치의 변천

석원료를 직접 사용하는 경우보다 수소를 사용하는 것이 에너지효율이 낮을 수 있으나, 동력변환 장치를 연료전지로 사용하는 경우에는 동력원의 에너지효율이 기존의 동력원 보다 더 증가하기 때문에 수소를 생산하는 과정에서 야기되는 에너지효율 저하를 극복할 수 있다.

연료전지 발전기술은 수소에너지로 대표되는 미래에너지 경제 구도 즉 “수소경제” 구도에 있어서 풍력, 태양에너지 등과 같은 자연에너지의 수급상의 불균형을 가장 경제적으로 조절, 보완할 수 있는 전력사업용 에너지기술이며, 또한 자동차 동력원 및 휴대전원용 등 그 응용범위가 매우 넓어 향후 에너지 시장을 주도할 대표적인 기술로서 경제적인 개발 가치도 매우 큰 것으로 평가되고 있다. 이러한 이유로 연료전지는 그림2에서 나타낸 바와 같이 인류 에너지 문제의 유일한 대안으로 인식되고 있는 수소에너지를 가장 효율적으로 활용할 수 있는 핵심기술이다. 즉, 석탄을 에너지원으로 한 동력원으로서 증기기관이 개발되

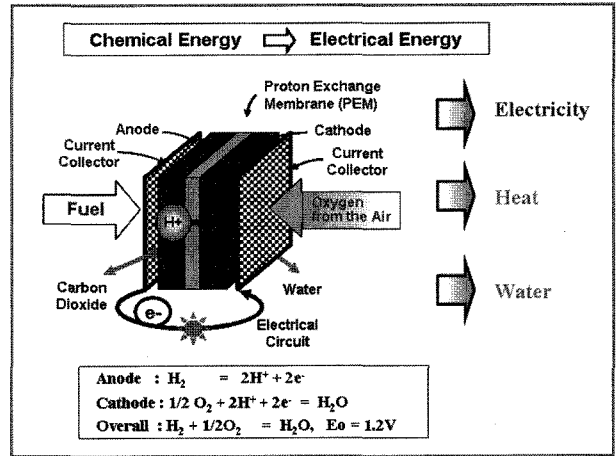


그림 4. 연료전지의 구조 및 발전원리: 고분자 전해질 연료전지

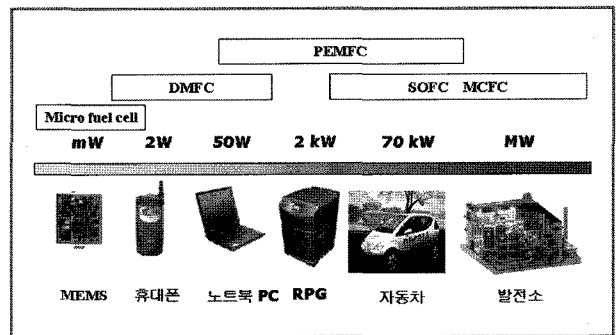


그림 5. 연료전지의 종류에 따른 활용분야

어 산업혁명이 이루어졌으며(그림3 참조), 석유시대에는 내연기관이 개발되어 20세기의 산업발전을 주도하였듯이, 연료전지는 수소에너지를 전기에너지와 열에너지로 전환시키는 환경친화적이고 에너지효율이 높은 발전장치로서 21세기 수소에너지 시대를 가능하게 할 새로운 동력원으로 평가되고 있다. 따라서, 연료전지 기술은 미국의 비전 21 및 세계 유수기관이 선정한 21세기 10대 기술 중 하나로서 그 중요성이 인정되고 있다.

석기시대가 돌이 부족하여 끝난 것이 아니듯이 석유시대도 석유가 고갈되기 훨씬 이전에 끝날 수 있다. 이 말은 석유를 대체할 새로운 에너지 즉 수소에너지의 등장을 예고하는 것으로 해석할 수도 있다. 수소 에너지 시대의 등장은 수소 이용기술인 연료전지 발전기술의 실용화가 전제조건은 앞에 언급한 바와 같다. 연료전지 기술의 실용가능성에 대해서는 매우 낙관적이다. 실용가능성 그 자체 보다는 어떠한 응용분야가 상업적으로 시장 진입에 먼저 성공할 것인가에 초점이 맞추어져 있다.

연료전지 수명 등 기술의 신뢰성과 제조 단가 저감 측면에서 연구개발이 더 필요하지만, 응용 분야에 따라서는 실증과 보급 단계에 조만간 도달 할 것으로 예측된다.

연료전지 기술의 상용화 전단계인 실증과 보급사업을 위해서는 수소 제조, 저장 등의 수소 infra가 필요하다. 예를 들어 연료전지 차량의 시범 운행을 위해서는 수소를 공급하고 저장하는 수소 주유소가 필요하다. 이러한 측면에서 진정한 수소 경제 구현은 연료전지 발전기술, 수소제조, 수소저장, 수소 운반 기술의 산업화가 전제조건이다. 또한 화석에너지 대체 측면의 수소 경제 구현이라면 대체에너지원과 연계된 물로부터 수소 생산 기술이 일부 실용화 되어야 할 것이다. 향후 30~40년 뒤에 예상되는 수소 경제의 비전이 달성될 때 연료전지기술은 보편화되어 새로 건설되는 발전소는 연료전지 발전소가 대부분일 것이며, 가정과 상업용 건물에도 연료전지가 설치될 것이다. 또한 운행되는 상당 부분의 승용차 및 버스(현대차 예측 2050년 운행 차량의 절반 정도는 연료전지 차량)가 연료전지 차량이며 이에 상응해 주유소의 절반 정도는 연료전지 차량에 수소를 공급하는 수소 주유소로 대체될 것이다. 현재 기술 수준에서 가장 예측이 힘든 부분은 수소 제조 기술 분야로서 관건은 그 당시 수소 생산량이 얼마만큼을 신 재생에너지원으로 부터 충당하느냐이다. 그러나 분명한 것은 화석에너지(특히 천연

연가스와 석탄), 신·재생에너지, 원자력에너지를 통한 수소 제조 방법이 공히 사용될 것이며, 점진적으로 대체에너지원으로 부터의 수소 생산 비중이 확대될 것이다.

### 3. 연료전지 발전기술의 개발현황

#### 3.1 연료전지 기술의 원리 및 활용분야

연료전지는 수소를 연료로 하여 전기를 발생시키는 일종의 발전기로서 물의 전기분해반응의 역반응을 이용하여 수소와 산소로부터 전기와 물을 만들어 낸다. 그림 4에서와 같이 전해질막의 양쪽에 접해 있는 양극과 음극에 각각 산소(공기)와 수소를 공급하면 음극에서는 수소가 수소이온과 전자로 분해되며, 수소이온은 전해질막(전기 부도체)을 통해 양극으로 이동되고, 전자는 외부전선을 통해 양극으로 이동하게 된다. 양극에서는 음극에서 이동되어온 수소이온과 전자 그리고 산소가 합쳐져서 물이 생성되는 반응이 일어난다. 이와 같은 반응을 통해 전기화학적 회로가 완성되어 수소와 산소로부터 전기와 물과 열이 생산되는 반응이 완결되는 것이다. 연료전지는 수소가 갖고 있는 화학에너지를 직접 전기에너지와 열로 변환하게 된다. 따라서, 기존의 열기관이 갖고 있는 열역학적인 제한(Carnot 효율)을 받지 않기 때문에 발전효율은 40~55%로서 기존의 발전장치에 비해 매우 높으며, 전기뿐만 아니라 열을 이용하는 열병합발전을 채택하는 경우에는 열효율이 80%에까지 이르게 된다.

연료전지는 표 1에 정리한 바와 같이 이온의 형태 및 전해질의 종류에 따라 운전온도, 구성요소, 시스템의 형태 및 활용분야가 결정된다. 직접메탄올 연료전지는 고분자 전해질 연료전지와 동일한 구성요소를 사용하고 있으나 연료로서 수소 대신 메탄올을 직접 사용하는 점이 다르다.

그림 5는 연료전지의 종류에 따른 적절한 전력범위 및 활용분야를 보여준다. 분산형 전원 또는 대형 발전시스템용으로는 용융탄산염 연료전지와 고체산화물 연료전지가 유리하고, 현지설치형 열병합 발전에는 인산형 연료전지나 고분자전해질 연료전지가 사용될 수 있으며, 자동차 동력원으로는 고분자전해질 연료전지, 배터리를 대체하는 휴대용 전원으로는 직접메

표 1. 연료전지의 종류

|  | PEMFC                  | PAFC               | MCFC                          | SOFC                       |
|--|------------------------|--------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Electrolyte                                    | Ion Exchange Membrane  | Phosphoric Acid    | Alkali Carbonates Mixture     | Yttria Stabilized Zirconia |
| Temperature (°C)                               | 80                     | 200                | 650                           | 1,000                      |
| Charge Carrier                                 | H <sup>+</sup>         | H <sup>+</sup>     | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | O <sup>2-</sup>            |
| Electrolyte State                              | Solid                  | Immobilized Liquid | Immobilized Liquid            | Solid                      |
| Cell Hardware                                  | Carbon- or Metal-based | Graphite -based    | Stainless Steel               | Ceramic                    |
| Catalyst                                       | Platinum               | Platinum           | Nickel                        | Perovskites                |
| Cogeneration Heat Fuel Cell Efficiency (% LHV) | None <40               | Low Quality 40~45  | High 50~60                    | High 50~60                 |

- PEMFC: polymer electrolyte membrane fuel cell, 고분자 전해질 연료전지
- PAFC: phosphoric acid fuel cell, 인산형 연료전지
- MCFC: molten carbonate fuel cell, 용융탄산염 연료전지
- SOFC: solid oxide fuel cell, 고체산화물 연료전지
- DMFC: direct methanol fuel cell, 직접메탄올 연료전지

탄을 연료전지 또는 고분자전해질 연료전지가 적합하다.

### 3.2 연료전지 기술의 국내외 개발현황

빌딩용 열병합발전이나 산업 및 상업용 발전을 목적으로 하는 중대형 발전용으로는 PAFC, PEMFC, MCFC, SOFC 등 다양한 연료전지가 개발되고 있으며, 특히 이것들은 안정적인 전력공급이 요구되는 병원이나 컴퓨터센터 등에 무정전 전원장치(UPS)로서 사용될 수 있을 것이다.

PAFC의 경우에는 200kW급 연료전지 모듈이 상용화되어 있으나 발전시스템의 설치비용이 US\$3,000/kW로 매우 높다. 국내에서는 LG-Caltex가 50kW 스택 개발을 수행하였으나, 상업화에 대한 전망이 불투명한 관계로 최근 들어 연구개발이 중단된 상태에 있다.

중대형 및 대형 발전에는 열병합 발전으로 에너지효율을 높일 수 있는 고온 연료전지가 유리한 것으로 평가되고 있다. 용융탄산염연료전지(MCFC)의 경우, 미국의 Fuel Cell Energy (FCE)에서는 2mw 시스템의 상용화를 추진하고 있으며, 시스템 수명 20,000시간, 시스템 제조가격 \$5,000/kW로 괄목할만한 기술적 진보가 이루어지고 있으며 향후 양산이 될 경우 가격은 더욱 많이 떨어질 것으로 보인다. 이외에도 일본의 IHI와 독일의 MTU, 이태리의 ENEA 등에서도 MCFC의 상용화를 위한 개발을 진행 중에 있다. 한편, 국내에서는 1993년부터 한국전력과 KIST의 주도로 MCFC 개발에 착수하여, 1999년 25kW급 스택을 개발하고 상용화를 위한 기반 기술을 확보한 상태이며 2005년 100kW급 시스템을 제작, 운전할 예정이며 상용화를 위한 최종 모듈 크기인 250kW급 시스템을 개발 하는 과제가 2004년 하반기에 시작되었고 2008년에 끝나게 되면 본격적으로 실증/보급이 실시될 예정이다.

고체산화물연료전지(SOFC)는 Westinghouse 모델의 경우 비싼 가격 때문에 상업화에 성공하지 못하고 있으며 따라서, 미국에서는 SECA 프로그램을 통해 제작단가가 \$400/kW 수준의 3-10kW급 평판형 SOFC 모듈을 개발 중에 있다. 일본 및 유럽에서는 저가의 소규모 SOFC 스택 및 발전시스템 개발이 추진되고 있다. 국내에서는 한국항공우주연구원과 KIER(에너지기술연구원) 주관으로 SOFC-가스터빈 하이브리드 발전시스템 개발 사업이 진행되고 있으나, 아직 기본기술 및 연구인력이 부

족한 상태이고 2003년과 2004년에 가정용 및 보조전원용으로 과제가 만들어져서 이 분야의 기술개발에 더욱 힘을 쏟고 있다.

가정용 연료전지는 열과 전기를 동시에 공급하기 위한 목적으로 1-3 kW급의 PEMFC와 SOFC가 주로 개발되고 있다. 일본은 밀레니엄 프로젝트(정치형 PEMFC 보급기반 정비사업) 지원 하에 Sanyo 등의 기업에서 1kW급 주택용 연료전지 시스템을 개발하여 시험평가 중이며, 미국의 Plug Power 사는 가정용 5kW 급 발전 시스템을 개발 중에 있다. 이외에도 미국과 캐나다의 많은 기업들에서 가정용 및 소형 PEMFC를 개발 중에 있다.

한편 스위스의 Sulzer-Hexis에서는 고온 SOFC를 이용한 1kW 급 열병합발전 시스템을 개발하여 상용화를 추진하고 있다. 이외에도, Delphi, Battelle, GE, Siemens-Westinghouse 등과 같은 회사에서는 1-3kW급의 소형 고체산화물 연료전지를 대형 자동차의 보조전원으로 사용하기 위한 연구를 진행하고 있다.

국내의 가정용 PEMFC 연구는 1994년부터 시작되었으며, 2002년부터 (주)세티는 KIER 등과 함께 3kW급 가정용 연료전지 시스템 개발을 국책과제로 수행하여 2004년에 개발을 완료하였고 가정용보다 용량이 더 큰 상업용 PEMFC 연료전지가 이어서 개발될 예정이다. 소형 SOFC 연구는 IMF 경제위기 이후 중단되었다가 최근 한전 주도의 1kW급 발전시스템 개발 사업이 KIST(한국과학기술연구원) 등과 함께 시작되었다.

수송용 고분자 전해질연료전지(PEMFC)를 개발하기 위한 연구는 각국 정부의 전폭적인 지원 하에 매우 활발히 진행되고 있으며, 세계유수의 자동차 업체인 도요다, 혼다 및 미국 Big 3 등이 차세대 연료전지 자동차 시장의 헤게모니를 놓고 치열한 각축을 벌이고 있다. 이들 중 일부는 이미 내연기관차에 근접하는 동력성능목표를 확보한 것으로 알려져 있다. 각국 정부의 연료전지 자동차 관련 지원 프로젝트 현황은 표 2와 같다.

국내에서는 1998년부터 2002년까지 수행된 G7 사업에서 현대자동차와 KIST의 주도로 차량용 25kW급 PEMFC 연료전지 시스템 개발이 이루어진 바 있으며, 올해부터 2012년 연료전지 성능 및 제조가격 측면에서 대량생산이 가능한 연료전지 시스템 제작기술 개발을 목표로 정부의 연구 개발 프로그램이 본격적으로 시작되어 첫 번째로 80kW급 연료전지 발전모듈을 개발하는 과제가 진행되고 있다. 또한 현대자동차는 미국 UTC의 연료전지 시스템을 이용한 완성차를 개발하여 캘리포니아 등에서 흑한 및 흑서 지형을 포함한 다양한 조건에서 도로주행

표 2. 각국의 연료전지 자동차 개발을 위한 정부 프로그램 현황

| 국기 | 프로젝트(추진기관)                   | 개발기간      | 예산                | 개발목표  |
|----|------------------------------|-----------|-------------------|---|
| 미국 | Freedom CAR(에너지성)            | '02 ~ '10 | \$ 5억('02 ~ '06)  | - 수소 자동차 개발을 통한 에너지 자급자족 실현<br>- 자동차 효율개선을 통한 석유 소비 저감          |
|    | Freedom FUEL(에너지성)           | '03 ~ '15 | \$ 12억('03 ~ '07) | - 연료전지, 수소생산 저장기술 개발을 통한 수소에너지 사회로 발전                           |
|    | 수소자동차/인프라<br>시범운영 프로그램(에너지성) | '04 ~ '08 | \$ 2.4억           | - 연료전지 자동차와 수소 인프라 시범운행을 통한 향후 연구개발 방향설정                        |
| 일본 | 수소/연료전지 시범운영<br>프로젝트(경제산업성)  | '02 ~ '04 | 680억 엔            | - 연료전지 자동차와 수소 인프라 시범운행을 통한 에너지절감 및<br>환경개선 효과 파악, 향후 연구개발 방향설정 |
| 유럽 | 6차 Frame Work Project(EC)    | '03 ~ '06 | 21억 유로            | - 자동차용 청정에너지/재생에너지 개발을 통한 수소에너지 사회로의 전환                         |
| 중국 | 863 프로젝트 (중앙정부)              | '01 ~ '05 | 1,500억원           | - 중국 자동차 산업의 기술경쟁력을 높이는 수단으로 연료전지 자동차<br>개발 지원                  |
|    | 수소기술 R&D프로젝트(한림원)            | '02 ~ '04 | \$ 1,200만         | - 수소기술 보유를 통한 국가 경쟁력 제고   |

을 실증한 바 있다.

휴대용 전자기기의 급속한 발전으로 인해 축전용량이 적은 기존의 리튬이온 전지를 대체할 수 있는 휴대용 연료전지를 개발하기 위한 연구개발이 경쟁적으로 이루어지고 있다. 일본 기업의 경우 NEC, Toshiba, Hitachi 등을 중심으로 하여 2002년부터 본격적으로 시제품을 발표하고 있으며, 2005년 개발완료 목표를 목표로 집중적으로 정보통신기용 휴대용 연료전지 개발에 박차를 가하고 있다. 휴대용 연료전지는 주로 직접메탄올 연료전지를 중심으로 개발되고 있으나, Casio는 수소를 발생시키는 마이크로개질기가 장착된 소형 PEMFC를 연구 중에 있다. 미국과 독일의 여러 기업들도 앞 다투어 휴대용 연료전지 개발에 집중하고 있으며, 2007년경에는 일본을 중심으로 휴대용 연료전지의 본격적인 상용화가 예상된다.

국내에서는 삼성종합기술원, 엘지화학, SKC 등의 기업과 KIST, KIER 등의 연구소에서 휴대용 DMFC에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 선진국에 필적할 만한 기술수준을 갖추고 있는 것으로 평가되고 있다. 현재 50W급 PEMFC, DMFC 시스템 개발을 위한 정부과제가 진행되고 있다.

### 3.3 연료전지 기술개발 이슈

현재 모든 종류의 연료전지에 있어 상용화를 위한 가장 핵심이 되는 기술개발 이슈는 가격 저감이며, 이와 더불어 안정성 확보를 위한 노력이 병행되고 있다. 예를 들어, 발전용 응용탄 산업 연료전지를 상용화하기 위해서는 최소 40,000시간 동안

안정적으로 운전 가능한 신뢰성 및 장수명성 확보 문제와 현재 kW당 약 \$5,000 이상에 이르는 건설단가를 약 \$1,000 수준으로 낮추는 경제성 확보 문제를 동시에 해결해야 한다. 건설단가 감축 문제는 본격적인 시장이 형성되어 연간 40MW 이상의 건설이 이루어지면 일부 해결이 예상되나, 40,000 시간 운전이라는 수명 및 신뢰성 확보를 위해서는 먼저 고온 및 용융염의 혹독한 부식 조건에서 40,000시간 이상의 내구성을 갖는 전지구성요소의 개발이 필요하다.

또한 오랜 기간동안 기술 발전을 해온 내연기관과 경쟁을 해야만 하는 자동차용 고분자 전해질 연료전지 (PEMFC)의 경우 잦은 on-off를 견뎌야 하며, 영하 20℃ 이하에서의 냉기동작이 가능해야만 하는 등 많은 기술적 안정성을 확보해야만 한다. 그리고 5,000시간 이상의 안정적 운전이 가능하도록 신뢰성이 확보되어야 하지만 현 수준으로는 500시간 이하에서 전지 성능의 열화가 나타나는 수준이다. 이 뿐만 아니라 kW당 \$ 50 이하의 가격을 확보해야만 시장 진입을 할 수 있다는 부담이 있다.

이에 비하여 직접 메탄올 연료전지 (DMFC)는 경쟁 기술인 배터리의 가격이 고가인 관계로 가격 경쟁에 대한 부담이 적은 반면 낮은 출력밀도, 메탄올 cross-over 등 원천적인 재료에 대한 문제점을 해결해야만 한다. 최근 이러한 문제를 시스템적으로 해결하기 위하여 반응물 및 생성물을 관리할 수 있는 마이크로 조절 시스템에 대한 연구 및 경박단소화를 위한 시스템 소형화에 대한 연구가 집중적으로 진행되고 있다(표 3 참조).

휴대용, 가정용, APU (차량보조전원)용, 발전용 등 광범위한 적용 분야를 갖고 있는 고체산화물 연료전지 역시 가격 저감과

표 3. 각 연료전지의 문제점 및 개선을 위한 연구 방향

| 종류    | 문제점  | 개선 방향   |
|-------|--|---|
| MCFC  | - Anode creep<br>- Cathode dissolution<br>- 전해질 고갈<br>- 매트릭스 강도  | - Ni-Al계 합금 연료극<br>- 알카리 토금속 첨가 안정화 공기극<br>- 전해질 저장 연료극<br>- 강화재료 첨가 복합 매트릭스  |
| PEMFC | - Pt 함량<br>- 물관리<br>- 나피온 대체<br>- 냉시동<br>- 일산화탄소 제거              | - 합금계 전극 개발<br>- 촉매 분산도 증진<br>- 고온 막 개발<br>- 스택 purging 기술 개발   |
| DMFC  | - 낮은 출력 밀도<br>- MeOH cross-over<br>- 반응물 및 생성물 관리<br>- 시스템 경박단소화 | - 고성능 촉매 개발<br>- 대체 매트릭스 개발<br>- 연료 재순환 기술 개발   |
| SOFC  | - 고온 작동<br>- 낮은 열사이클 안정성<br>- 고온 밀봉                              | - 세리아 혹은 LaGaO <sub>3</sub> 계 전해질 개발(저온화)<br>- 전극용 mixed conductor 개발<br>- 신 개념 스택 디자인 개발 (mixed reactants fuel cell) |

안정성 확보를 위하여 많은 연구가 진행되고 있으며, 특히 1000℃ 부근의 높은 작동온도로부터 금속 분리판을 사용할 수 있는 500~700℃ 온도 영역으로 작동온도를 낮추는 연구가 집중적으로 진행되어 왔다. 이는 작동온도를 낮춤으로써 전지의 안정성 증진을 꾀할 수 있을 뿐만 아니라 저가의 금속 재료를 사용할 수 있게 됨으로써 가격 저감을 실현할 수 있기 때문이다. 현재 전해질 박막화 기술의 발달과 새로운 고성능 이온전도체의 개발로 600~700℃ 작동이 가능해졌으나 금속 분리판 사용에 따른 구성요소간 열팽창 계수 차 및 고온 밀봉 문제는 아직 해결해야 할 연구 과제로 남아있다. 따라서 최근 기체 밀봉 및 분리판 문제를 해결하기 위한 혼합연료 주입형 연료전지 (mixed reactants fuel cell) 등 새로운 단전지 및 스택 디자인이 연구되고 있다.

## 4. 수소·연료전지의 보급 활성화 방안

### 4.1 외국의 현황

미국의 부시 대통령은 2003년 1월의 의회연설에서 향후 5년간 〈Hydrogen Fuel Cell Initiative〉와 〈Freedom CAR〉 프로그램을 통해 수소/연료전지 사업에 17억달러를 지원하기로

천명한 바 있으며, 미 에너지성에서는 2010년 경부터 수소에너지 체제로 진입한다는 계획 하에 가정 및 산업용 연료전지는 2010년부터, 자동차용 연료전지는 2015년부터 상업화를 추진하고 있다. 이러한 사업이 순조롭게 이루어지면 수소에너지와 연료전지의 도입으로 2040년 경에는 1,100만배럴/일 의 석유 수요 대체 효과를 이룰 수 있을 것으로 예상하고 있다.

일본에서는 정부주도 하에 1980년대부터 다양한 프로그램을 통해 연료전지 개발을 지원해 왔으며, 2003년에 일본정부는 도요타와 혼다로부터 연료전지 자동차 5대를 월100만엔의 비용으로 임대하여 운영을 하고 있는 등 연료전지의 상업화와 보급을 위해 많은 지원을 하고 있다. 일본에서는 2005년을 연료전지 상업화의 원년으로 하고, 2010년에는 본격적으로 확산을 시킨다는 계획을 추진하고 있다.

연료전지의 세계시장은 2010년 1,000억불로 확대될 전망이며, 가정용 연료전지시스템(RPG)은 240억불 정도의 시장이 형성될 것으로 예상된다. 또한, 전력산업용 연료전지는 2005년 경부터 본격적으로 시장이 형성되어 2010년에는 12,000~22,000MW 규모로 시장이 확대될 것으로 예측되고 있다.

### 4.2. 국내의 경우

국내에서는 1997년에 수립한 에너지기술개발 10개년 계획(1997~2006년)에서 2006년 기준으로 1차에너지의 2%를 신·재생에너지로 공급한다는 목표를 설정하고, 그동안 신·재생에너지의 기술개발 및 보급사업을 추진하여 왔다. 신·재생에너지는 수소와 연료전지를 비롯하여 태양광, 풍력, 바이오, 소수력, 지열, 폐기열, 석탄액화/가스화, 해양에너지 등 총11개의 에너지 지원으로 구성되어 있다. 2002년 12월에 확정된 제2차 국가에너지 기본계획에서는 기후변화협약의 대두와 국제환경의 변화를 감안하여 신·재생에너지의 보급목표를 2006년에는 1차에너지의 3%, 2011년에는 5%로 상향 조정하였으며, 또한 신·재생에너지의 전력생산 목표를 총 전력 소비량의 7%로 설정하였다.

정부는 신·재생에너지 개발보급에 1988년부터 2002년까지 총 5,333억원을 지원하였으며, 이 중에서 기술개발사업에 1,707억원(민간포함 2,482억원), 시설설치 보조사업에 768억원, 그리고 보급용자사업에 3,058억원을 각각 지원하였다. 기술개발사업에 지원된 총 2,482억원 중에서 연료전지는 707억

원으로 28.5%를 차지하여 신·재생에너지 분야에서 가장 많은 지원이 이루어졌다.

정부에서는 또한 2003년부터 2012년까지 10년간의 신·재생에너지 보급계획을 수립하였으며, OECD의 평균 전망치를 감안하여 2011년에 총에너지 대비 5%를 목표로 설정하였다. 신·재생에너지 가운데 가장 비중이 높은 것은 폐기물에너지로 56.54%를 차지하였으며, 수소·연료전지는 1.12%를 차지하는 것으로 되어 있다. 한편, 전력생산량을 기준으로 보면 2012년의 경우 연료전지의 발전량은 180MW로 신·재생에너지의 총 전력생산량 중 12.78%를 차지하는 것으로 예측되고 있다.

정부에서는 신·재생에너지의 보급을 위해 선택과 집중을 통해 개발효과를 극대화 할 계획을 갖고 있으며, 따라서 선진국과의 기술격차가 적고 시장잠재력이 큰 수소·연료전지, 풍력, 태양광 등 3대 분야를 중점적으로 추진하기로 결정하였다. 이러한 목표를 달성하기 위해 각 분야를 통합하여 그랜드 컨소시엄을 구성함으로써, 기술개발뿐만 아니라 성능평가, 실증연구 및 보급까지를 총괄하는 “프로젝트형 연구개발사업” 사업단을 2004년 1월에 발족시켰다.

이러한 계획 하에 연료전지의 경우에는 세계3위의 연료전지 기술보유국으로 진입하고, 세계일류의 상품을 개발하기 위해 2012년까지 다음과 같은 야심 찬 보급목표를 설정하였다.

- 가정용 연료전지시스템(RPG) : 10,000기
- 건물용 연료전지시스템 : 2,000기
- 전력사업용 연료전지시스템 시제품 : 300기
- 수소스테이션: 50 기
- 수송용 연료전지 (PEMFC): 승용차 10,000대,  
버스 5,000대

### 4.3 생산 및 이용촉진을 위한 지원 및 제도·정책의 개선

정부에서는 신·재생에너지의 생산 및 이용을 촉진하기 위해 여러 가지 지원책을 시행하고 있거나 향후에 시행할 예정이며, 그 내용은 다음과 같다.

- (1) 생산된 전기의 우선구매 및 차액 보전 정책을 시행하여, 생산된 에너지의 기준가격을 고시하고 전력 거래가격과의 차액을 지원함.

- (2) 소규모 신·재생에너지 발전사업의 지원을 확대하기 위해 발전사업자가 부담하는 인·허가비를 경감하고, 계통 접속 관련 규정 등을 정하도록 함.

- (3) 신·재생에너지 설비의 사후관리를 위해 보급된 발전설비 등의 하자문제 해결을 위한 A/S 체제 지원방안을 강구함.

- (4) 조세특례 제한법에 의한 관세감면 (세율 8% → 2.8%) 대상을 연차적으로 확대할 계획이며 또한, 신·재생에너지의 시설투자금에 대한 세제지원을 강구하고 대출기간을 개선함.

- (5) 연면적 3,000m<sup>2</sup> 이상의 신축 공공건물에 대해 건축비의 5% 이상을 대체에너지설비 설치 의무화

이외에도 정부에서는 발전사업자에게 적정비율의 신·재생에너지 발전전력을 구매토록 하기 위해 발전의무비율 할당제(RPS) 도입을 검토할 계획이다. RPS(renewable portfolio standards)는 발전사업자의 총 발전량과 판매사업자의 총 판매량의 일정비율을 신·재생에너지원으로 공급 또는 판매하도록 의무화하는 제도로써, 미국, 일본, 영국 등 다수의 국가가 현재 운영 중인 제도이다. 또한, 정부에서는 관련 제도와 정책의 개선을 통해, 신·재생에너지의 지원자금을 확충하고 이용촉진을 위한 특별법을 한시적으로 도입하는 등 신·재생에너지 개발과 보급의 활성화를 위해 적극 지원할 계획이다.

## 5. 결론

연료전지 분산전원, 자동차 등 일부 수소 이용 기술이 실용화 가시권에 접어들고 있으며, 수소제조, 저장 등 대부분 기술들의 연구개발사업이 활발히 추진되고 있어 21세기 초반을 넘어서면 분야에 따라서 어느 정도 경제성이 확보되기 시작할 것으로 예측된다. 다른 어느 분야 보다 국가의 정책적 지원이 절실히 요구되고 있으며 장차 그 파급 효과가 막대할 것이다. 장기적 안목을 갖고 인내심을 발휘하여 지속적 지원이 이루어질 때 승산이 있는 미래 에너지 기술로 부각될 것이 분명하다.

석유시대를 마감하고 다가오는 수소경제로의 전환은 선택과 가능성의 문제가 아니라 석유를 대체하는 에너지 패러다임의 대 변환 즉 유일한 대안으로 인식되어야 할 것이다.