

# 수소 에너지 - 현황과 전망



**김 종 원**

한국에너지기술연구원  
프론티어 수소에너지사업단장

## 1. 수소경제 배경

석유경제시대인 지금 수소경제가 화두가 된 이유는 무엇인가? 국제적인 미래연구그룹인 로마클럽(The Club of Rome)이 ‘성장의 한계(The Limits to Growth)’라는 보고서(1972)를 통해 들려준 경고를 들어보자. “세계는 현재의 공업 생산의 성장을 정지시키고 또 인구 증가를 억제하는 한편 과학기술이 신자원 개발과 공해 방지에 전념하지 않는다면, 2030년경에는 이 지구는 우리 인류가 살기 어려운 환경이 되고 말 것”이라는 것이다.

### 1.1 화석연료의 고갈

2001년, 로열 더치 쉘사(社)의 필 왓츠 회장은 세계를 산업시대로 이끈 석탄·석유·천연가스 등 화석연료로부터 21세기에는 수소를 기반으로 한 새 에너지 체제로 대체될 것이며, 이에 대비 중임을 밝혔다. 최근 제러미 리프킨<sup>1)</sup>도 저서 “The Hydrogen Economy”에서 석유시대의 종말을 선언하고 세계

경제의 미래를 “수소에너지체제”로 설명하여 큰 반향을 일으키고 있다.

주지하는 바와 같이, 산유국의 정치적 불안요인, 산유국의 감산정책, 허리케인에 의한 생산시설의 피해 등 여러 가지 요인과 맞물려 배럴당 50\$대를 오르내리게 되었다. 그동안 고장난 시계처럼 원유고갈이라는 경종을 수시로 울렸는데, 이것이 현실화되는 전조가 아닐까 하는 불안감은 기우에 불과할까?

미국의 에너지정보국(EIA)은 산업발전, 인구 증가 등으로 세계에너지 수요가 계속 증가해 2025년에는 2001년 대비 소비가 58% 증가할 것으로 전망하고 있다. 특히 저개발국의 경제가 발전하면서 에너지 수요가 급증하게 되어, 저개발국의 1인당 에너지 소비가 OECD 국가의 1/2 수준으로 늘어난다고 가정하면, 현재 미국과 유럽을 합한 석유소비의 7배가 필요하다. ([그림 1] 참조) 하지만, 주요에너지원의 가채년수로 보면, 석유는 2010~2020년, 천연가스는 2020년~2035년에 생산량이 정점에 도달할 것으로 보고 있다. 굴지의 석유회사인 BP에서 나온 “Statistical Review of World Energy 2003”에 따르면, 2002년을 기준으로 한 가채년수는 석유 40.6년, 천연가스 60.7년, 석탄 204년이다. 북미 등의 석유고갈은 멀지 않았고, 세계 매장량의 65%를 차지하는 중동 석유를 둘러싼 긴장이 고조될 것으로 보고 있는 것이다.

공급이 정점에 도달하는 때는, 수요가 불안하게 되어 가격을 예측할 수 없는 혼돈의 시작을 예고해주는 시점이다. 지구물리학자인 허버트(M.King

Hubbert)는 1956년 미국의 원유생산이 1970년대 초에 최고조에 달할 것이라고 정확히 예측한 바 있다. 당시 석유산업에 관련된 모든 사람들이 이러한 분석에 반론을 제기하였지만, 미국의 원유생산은 1970년 이후로 감소되기 시작하였다. 허버트의 이론이 맞아 떨어진 것이다.<sup>2)</sup>

이 이론에 따라 1995년경 세계원유에 대해 분석한 바에 따르면, 2004년부터 2008년 사이에 최고조에 달한다고 예측되었으며, 이는 네이처, 사이언스 및 사이언티픽 아메리칸 잡지에 보고 된 바 있다. 이 예측이 맞다면, 세계 경제에 지대한 영향을 줄 것이다. 아무리 가난한 나라라 할지라도 연료는 필요할 것이기 때문이다. 이것이 가져다줄 이점은 이산화탄소 배출량이 줄어든 것이라는 점 밖에 없다.

우리나라는 에너지소비 세계 10위, 석유소비 세계 6위로 경제규모에 비해 상대적으로 많은 에너지를 소비하면서도, 수입의존도가 97%이며, 석유의 중의존도가 70% 이상으로서 에너지 환경 변화에 민감하다. 2003년도 기준 GDP중 8.2%인 383억 \$를 에너지 수입에 사용하였으며, 이는 총 수입액의 18.9%에 해당한다. 천\$기준으로 한 에너지원단위는 0.37 TOE로서 일본과 미국에 비하여 60% 정도 높은 값이다. 2004년 들어 중국의 경제성장에 따른 원자재 가격 급상승이 있었는데, 앞으로도 언젠고 반복될 일이다.

새로운 탐사기술로 채굴 가능한 매장량을 늘리고, 신기술로 에너지 소비를 줄여나가는 것이 지금 당장은 필요한 것이지만, 그렇다 해도 원유자체가 유한한 자원임에는 변화가 없다. 동원 가능한 기술을 이용하여 점진적으로나마 자원고갈을 대비하여야 한다. 기간시설은 10~20년 내에 급격히 만들어 질 수 있는 것은 아니기 때문이다.

|   |                             |   |
|---|-----------------------------|---|
| 1 | 석유부족에서 신규유전 발견이 거의 없다       | 2000년도 이전에는 에너지 생산량보다 많은 신규 유전 발견 및 기술개발에 의한 가뭄년소 증가- 매년 가뭄매장량 증가 (20년-40년) |
| 2 | 중국, 인도 새로운 거대시장 출현          | 중국: 원유 수입 250만 배럴, 인도 원유 200만 배럴 (2004년, 4/4분기)                             |
| 3 | 석유생산량 증가를 막기 내수민감제에 따른 기술개발 | 생산량의 한계로 증가가 어려움  |
| 4 | 민시적인 온도변화 - 석유가격 급등         | 전략 비효율: 최악의 일시적인 처방   |
| 5 | 가스                          | 석유와 대부분이 연동되어 있음  |

▶ 앞으로 유가는 50\$ 시대 유지

[그림 1] 에너지 분야의 전망

### 1.2 지구온난화

화석연료 사용으로 인한 지구온난화 우려는 1997년 교토의정서(Kyoto Protocol)로 구체화되었으며, 러시아가 2004년 10월 27일 비준함에 따라 2005년 2월 16일부터 정식 발효되어, 석탄, 석유의 소비 억제가 불가피하게 되었다. 또한, 화석연료의 주요 사용처 중의 하나인 자동차의 배기가스 규제도 점차 강화되어가고 있는 추세에 있다. 화석연료가 풍부하다 하더라도 이제는 환경오염을 막는 기술이 적용되어야 한다는 것이다.

따라서 에너지의 안정적 확보를 위한 대책으로 신재생에너지의 비중을 높이고, 에너지의 효율적 사용과 신기술 확보 노력을 하여야 한다. 지구에 도달하는 태양에너지는 전 인류가 필요로 하는 에너지량의 1만 배에 이르는 풍부한 양이다. 자원고갈과 지구온난화를 걱정한다면, 태양에너지를 수소의 형태로 변환 및 저장하여 태양에너지가 갖는 장점을 넘어서야 한다. 수소의 변환 이용은 태양에너지의 효율적 활용을 위한 방안중 하나인 셈이다. 이러한 기술들은 지금은 경제성을 논할 단계도 안 되지만, 기술개발의 효과가 발휘될 시기가 곧 다가올 것이다.

### 1.3 경제의 원동력

수소경제를 논할 때, 빠짐없이 거론되는 것이 수소의 이용기술 중 하나인 연료전지인데 이를 이용하면, 완전무공해로 열과 전기를 동시에 만들어낼 수 있다. 또한 이용범위도 넓어 몇 와트급의 이동형 전원 뿐만 아니라 메가 와트급의 발전, 연료전지 자동차 등에 이르기 까지 다양하게 이용될 수 있다.

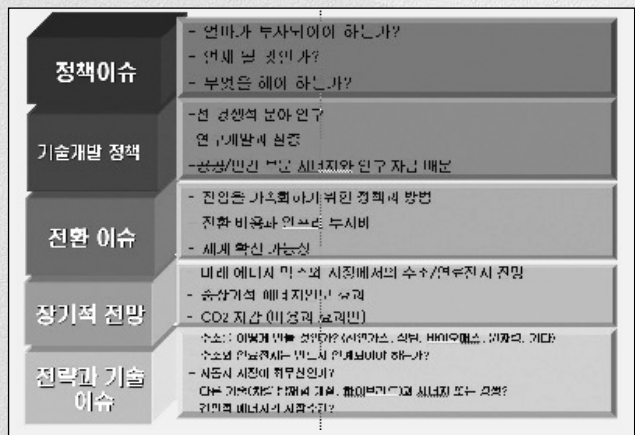
2010년대에는 수소연료전지 분야의 시장이 1800억\$에 이를 것이라 예측되는데, 이러한 시장은 기술을 갖춘 자의 몫이지 아무나 넘볼 수 있는 것은 아니다. 일본의 고이즈미 총리의 말대로 “경제의 견인차” 역할을 해줄 수소연료전지 분야의 원천기술은 산업체의 경쟁력 나아가서는 국가의 경쟁력을 일으킬 중요한 원동력이다.

구 소련 경제학자인 콘드라티에프( Nikolai Kondratiev)의 50년 주기설에 따르면, 경제는 주기 폭이 50년이 되는 큰 사이클을 그리며, 이에는 기술 혁신이 밑바탕이 되어 왔다고 보고 있다.<sup>3)</sup> 서방 세계에서는 현재가 제4파동의 끝점(2010년에 끝난다고 봄)에 있거나 아니면 제5파동의 시작점(1990년 이후 시작되었다고 보는 관점)에 있는 것으로 보고 있다. 이제 제5 파동은 수소 등 신에너지 기술에 의해 움직이는 것이 아닐까? 패러다임 변화에 대비를 하지 않는다면 전통적 산업은 무너질 수 있다. Utterback 과 Abernathy<sup>4)</sup>의 기술변화와 혁신 전략에 대한 이론과 같이 어떠한 특정 기술을 기반으로 한 산업 자체가 사라지는 현상이 발생하는 것을 기술수명이라고 한다. 수소연료전지 자동차가 팔리기 시작하면 기존 자동차 산업에 관련된 분야는 쇠퇴될 수 밖에 없다는 시각으로 보아야 한다. 수소경제 관련 분야의 원천기술은 국가와 산업의 경쟁력 제고에 큰

기여를 할 것이며, 각국이 기술 선점을 위한 각축을 벌이고 있는 이유이다. 이미 노대통령도 금년 3월에 임기 중 전폭적인 지원을 약속한 바 있었고, 산업자원부에서는 수소경제를 향한 틀을 구체화하고자 하고 있다.

### 2. 수소에너지시대는 오는가?

인류의 에너지 이용 변천사를 보면 석탄, 석유 그리고 천연가스 순으로 단위 질량당 탄소수가 적어지는 쪽으로 변화하여 왔으며, 고체에서 액체로, 그리고 기체로 편리하면서도 보다 깨끗한 에너지를 찾아 움직여왔다. 현대의 에너지 체제는 전기와 가스를 주축으로 하는 체제이며, 수소는 가스이면서 열과 전기, 동력을 효율적으로 만들어 낼 수 있어 기존 에너지 체계에 적용하기에 적합하다. 재생에너지 기술도 수소경제를 이루는 한 축이 될 것이며, 이 둘은 보완 관계이지 양립할 수 없는 별개의 것이 아니다. 수소경제(hydrogen economy)라는 말은 1970년 전기화학자인 보크리스(John O'M Bockris)가 처음 사용한 것으로 알려져 있는데, 그가 꿈꾸었던 것도 태양에너지를 이용한 수소경제인 것이다.<sup>5)</sup>



[그림 2] 수소경제의 이슈

수소경제에 대한 정책, 기술개발, 전망 등에 대해서는 [그림 2]에서 보는 바와 같이 지금도 끊임없이 토론되고 또 수정 보완되고 있으며, 비전 공유 노력을 지속하고 있다.

### 2.1 수소경제를 향한 우리의 노력

많은 사람들이 수소경제를 말하고는 있지만, 아직은 먼 곳에 있음이 현실이다. 수소경제라 한다면 수소를 경제 활동의 대상으로 하여 휘발유와 같이 일반인도 쉽게 사고 팔고 이용할 수 있어야 한다. 주지하는 바와 같이, 수소는 군사용 등 극히 일부를 제외하고는 에너지로서의 사용이 거의 없고 대부분 금속, 화학공업, 식품공업 등에서 공업적인 목적으로 이용되어 왔다. 수소경제가 된다면 [그림 3]과 같이 기존 산업용도로서의 시장이 아닌, 상업용, 가정용으로까지 확대될 것이므로 소요되는 수소의 양도 만만치 않다. 또한 적용 대상에 따라서는 수소를 이용하는 기기도 연료전지뿐만 아니라 가스터빈, 연소기, 내연기관 등 매우 다양화될 것이며, 법적 및 제도적 지원과 규제가 뒷받침되어야 할 것이다.

소요에너지의 97% 수입 의존, 배럴당 40\$ 이상의 고유가, 연 300억\$ 이상의 비용 지출이 우리가



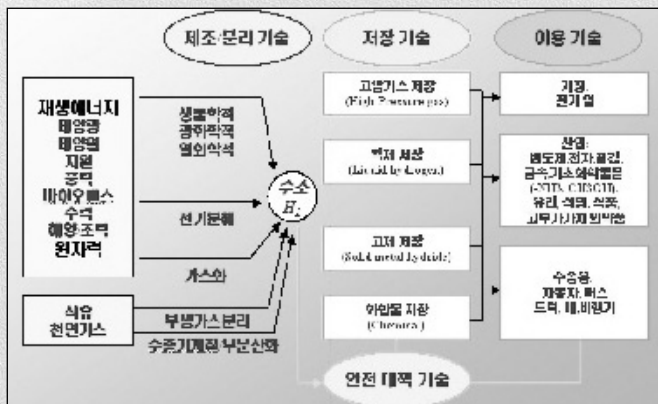
[사진 1] 노무현 대통령의 연료전지 자동차 시승 (2005년 3월11일, 청와대사진기자단)

가진 에너지 문제이다. 더구나 인구밀도가 높고 대도시에서 인구가 집중되어 있는 상황에서, 2005년 2월 현재 자동차 등록대수가 1500만대를 넘어 환경오염으로 인한 대기질의 악화는 우려하지 않을 수 없다.

2000년 대에 들어 우리나라에서도 수소 분야에 대한 관심을 갖고 중점적 지원을 시작하고 있으며, 2003년 미국의 주도하에 결성된 “수소경제를 위한 국제 파트너십(IPHE)”에도 적극 참여하고 있다. IPHE의 설립목적은 2020년까지 수소 연료전지 자동차의 기존의 자동차와의 가격 경쟁력 확보에 있으며, 수소경제로의 이행을 위한 다자간 연구개발, 실

증, 상용화 협력 체계의 구성 및 운영, 그리고 정책개발이나 표준화를 위한 포럼 창설을 기능으로 하고 있다. 현재 참여 국가는 오스트리아, 브라질, 캐나다, 중국, 프랑스, 독일, 아이슬란드, 인도, 이탈리아, 일본, 한국, 노르웨이, 러시아, 영국, 미국 및 EC 등 총 16개국이며, 뉴질랜드와 남아공화국 등이 새로이 참여하고자 하고 있다.

수소 경제로의 전환은 국가마다 다르나 적어도 10~20년 정도의 단기간에 이루어질 일이 아니므로 장기적 계획과 2~3년



[그림 3]수소의 경로

<표 1> 수소에너지 관련 국가 프로그램

| 프로그램 명                             | 연차별 예산               | 비 고   |
|------------------------------------|----------------------|---|
| 수소연료전지사업단<br>(산자부, 04.1 출범)        | 5년간 1500억 투자 계획      | 연료전지 관련 기술<br>(개발 및 보급계획완료)<br><a href="http://www.h2fc.or.kr">http://www.h2fc.or.kr</a>                      |
| 수소에너지사업단<br>(과기부 프론티어 사업, 03.9 출범) | 10년간 연 100억 수준       | 수소제조, 저장 기술 위주<br>(단계별 계획 완료)<br><a href="http://www.h2.re.kr">http://www.h2.re.kr</a>                        |
| 원자력수소<br>(과기부, 04.3 출범)            | 1차년도 30억<br>2차년도 90억 | 수소생산용 신형원자로<br>개발과 수소생산기술<br>(단계별 계획 완료)<br><a href="http://www.hydrogen.re.kr">http://www.hydrogen.re.kr</a> |

주기의 수정 보완이 필요하다. 우리나라도 과학기술부, 산업자원부, 건설교통부 등 관련 부처의 계획이 한데 어우러져 국가 장기 계획으로 추진 보완될 것이며 대표적인 수소에너지 관련 사업은 다음 <표 1>과 같다. 2004년 현재 우리나라의 수소연료전지 분야 정부투자액은 400여억원대에 이르며 점차 확대될 전망이다.

## 2.2 수소경제 국제 동향

수소의 주원료는 천연가스, 원유와 같은 화석연료 가 주류를 이루며, 인공위성 추진체 외에는 대부분 산업용으로 사용되어 왔다. 하지만, 에너지로서의 수소의 가치는 수소가 발견된 지 200년 정도가 흐른 1973년 석유위기 이후 석유고갈 및 환경오염의 심각성으로 부각되어 각국이 국가적 차원의 연구계획을 시작하였다. 대규모 실용화를 목표로 수소기술 개발계획이 1980년대 중반 독일에서 시작된 이후, 미국과 일본에서도 본격적인 계획 수립에 착수하여 미국은 1990년, 일본은 1993년을 기점으로 대규모의 수소기술 개발 프로그램을 시작하였다. 또한 아이슬란드도 1998년 세계 최초로 2030년대경 수소경제를 이룩한다는 목적으로 국가프로젝트를 시작하였다.

## 2.3 국제 협력 동향

국제에너지기구(IEA)는 제1차 석유위기 다음 해인 1974년에 설립하였으며 경제협력개발기구(OECD)의 산하기구로서 운영하고 있다. 1977년에 수소 생산, 저장 그리고 최종 이용 기술의 향상과 수소의 도입과 광범위한 이용을 가속화하기

위하여 수소협정(Hydrogen Agreement)으로 알려진 수소 생산 이용 프로그램을 착수하여 기술적 경제적 장벽을 해소하기 위해 17개 분야에 걸쳐 공동연구를 진행하였거나 하고 있다.<sup>6)</sup>

이와 같은 협력에 힘입어 이미 재생 가능한 수소 생산과 고체 저장 물질에 있어 중요한 진보를 이루어냈으며, 통합 수소에너지 시스템들을 평가하고 최적화하는 도구의 개발을 이끌었다. 이외에 IEA SolarPACES 이행협정에서도 Task II로 태양광화학연구를 포함하고 있는데, 여기에서는 열화학적 수소제조 방법이 연구되고 있다.<sup>7)</sup>

2003년 1월 미국 부시대통령이 연두교서에서 “수소연료선도계획(Hydrogen Fuel Initiative)”을 발표한 이래로, 4월 미국 에너지부 장관이 수소 및 연료전지기술의 잠재적 협력분야 발굴 및 증진을 목적으로 하는 “수소경제를 위한 국제 파트너십(IPHE)”을 국제에너지 기구에서 제안을 계기로, 동년 11월 20일 워싱턴에서 IPHE 창립 각료회의를 개최하면서 발족되었다.<sup>8)</sup>

대규모의 수소생산과 관련하여 원자력은 중요한 역할을 할 수 있는데 이는 물의 전기분해에 의한 수소생산 공정에서 전기를 공급함으로써, 혹은 화석연료 전환공정이나 열화학적 사이클 공정에서 고온열

을 공급함으로써 이루어진다. 2003년 미국 에너지성(DOE)은 2015년까지 수소생산 실증원자로 개발을 추진하고, 2010년까지 연구개발비 10억\$ 투자를 발표하였다. 미국이 주축으로 제안한 GenIV<sup>9)</sup>는 차세대 원자로에 대한 가능성을 타진하기 위해 구성되었으며, 우리나라도 원자력수소분야 등에 동참하고 있다.

Futuregen 프로그램<sup>10)</sup>은 석탄이 다른 화석연료 자원과 비교하여 상대적으로 풍부한 연료이기 때문에 석탄에서 수소를 만들고 전기를 생산함에 있어 이산화탄소의 분리 및 처리까지 고려하여 경제적, 기술적 가능성을 검증하는데 목표가 있으며, 석탄이 풍부한 미국이 주도하여 이 분야의 국제공동 연구를 모색하고 있다. 석탄이 풍부한 나라들은 이에 관심을 가지고 있으며, 우리나라의 경우 이미 G7 계획으로 관련기술인 석탄가스화복합발전(IGCC) 프로그램을 진행한 바 있었다.

### 3. 관련기술 현황

#### 3.1 수소제조기술

앞으로 수소 경제 체제로 진입하게 되면 수요를 충족할 만한 수소를 무엇으로부터, 어떻게, 어디서 제조하는가가 수소에너지 시스템의 보급에 있어서 매우 큰 과제이며, 수소에너지 시스템 도입의 효율, 에너지 다변화 효과, 에너지 절약 효과, 환경 부하 저감 효과를 크게 좌우한다. 수소는 물, 화석연료, 바이오매스, 폐기물 등과 같이 각종의 연료로부터 만들 수 있고, 실용단계에서부터 기초 연구단계까지 다양한 제조 공정이 개발되고 있다.

수소를 어디서 제조하는가에 대해서는 수소의 저장·수송·이용 형태와 밀접하게 관련되고, 수소에너지 시스템의 전반에 걸친 구성을 크게 좌우한다.

예를 들어, 연료전지 자동차에 이용할 경우에는 수소를 외부 공장 혹은 수소 충전소에서 제조하여 공급하는 방식(수소 탱크 탑재형, off-board)과 연료전지 자동차에 개질기를 탑재하여 메탄올이나 휘발유 등으로부터 수소를 제조하는 방식(차내 개질형, on-board)이 있다. 최근의 세계적인 추세로는 수소탱크 탑재형이 전제가 되어 연료전지 자동차용 수소저장기술이나 수소충전소 등과 같은 인프라의 개발에 역점을 두고 있다.

수소제조는 저장·수송·이용되는 수소경제 연쇄사이클의 출발점에 위치하고 있고, 그 방식은 저장·수송·이용기술을 포함한 기술개발 동향, 연료전지 시스템의 보급 동향, 인프라 정비 동향, 에너지 시장 환경 등에 따라 결정될 것이다.

미래에 우리가 필요로 하는 수소량은 현재 산업사원부에서 만들고 있는 수소에너지 계획에 따라 결정될 것이지만, 우선 다음과 같은 가정을 전제로 검토해 보자.

산자부 수소연료전지 사업단의 기획과제를 통해 세워진 연료전지자동차 및 정치용 연료전지의 도입 목표(안)는 각각 2012년에 1만대, 11.7만kW, 2020년에 150만대, 264만kW, 2030년에 300만대, 1320만kW, 2040년에 900만대, 3300만kW로 하고 있다. 이 목표에 따르면 수소 수요량은 2012년에 7.46억Nm<sup>3</sup>/년이고, 2020년에는 188.7억Nm<sup>3</sup>/년으로 현재의 수소 생산능력을 크게 넘어서는 수준이다. 2002년 우리나라의 수소 생산량은 연간 50.65억Nm<sup>3</sup> 수소유통량은 연간 약 1.74억Nm<sup>3</sup>(공급가능량 연간 약 4.9억Nm<sup>3</sup>)정도로서, 유통되는 수소의 대부분은 석유화학공장에서 자체소비를 위하여 생산된 수소 중 여분의 것과 부산물로 생성된 것을 정제한 것이다.

이 목표 수치는 우리나라의 총에너지 중 수소 기여율이 2012년에 0.033%, 2020년에 2.4%,

2030년에 9.0%, 2040년에 19.2%가 되는 수준이다. 이 양은 매우 의욕적인 수치이기는 하지만, 2012년까지는 기존 유통가능 수소와 부생수소를 최대한 이용한다면 어느 정도 수요 충당이 가능하나, 중장기적으로는 수소의 공급 방안이 문제가 됨을 보여주고 있다.

수소제조법은 원료, 공정, 제조 장소 등 여러 관점에서 분류 가능하지만, 크게는 수소제조 공장에서의 중앙 집중 생산, 수소 이용 장소에서의 현장(on-site) 설치(분산형)로 생산되는 수소로 구별할 수 있으며, <표 2>에서 보인 바와 같이 원료 또는 이용 에너지원으로 화석연료를 사용하는 방법과 그렇지 않은 방법으로 구별할 수 있다. 이는 기술 축적이나 실용화 정도에 크게 차이가 있고, 에너지·환경 문제의 해결을 고려할 경우 이 2가지 방법으로 나누는 것이 적당하기 때문이다.

이중 현재 실용화되어 있는 것은 화석연료 개질

및 물의 전기분해이다. 석탄 및 경유는 부분 산화법, 나프타는 수증기 개질, 그리고 천연가스의 경우 용도에 따라서 수증기 개질, 부분산화, 자열 개질법이 이용될 수 있으며 수증기 개질법이 가장 경제적이어서 널리 이용되고 있다.

물의 전기분해는 오래전부터 잘 알려진 공정이며, 전세계 수소생산량의 4% 정도가 이 방법으로 만들어진다. 몇 가지 물의 전기분해법 종류와 특징을 <표 3>에 보였는데, 널리 실용화 되어있는 것은 알칼리 수전해법이며 전해질로 20~30%정도의 KOH 수용액을 이용하고 있다. 생성된 수소의 순도가 높고 장치 구조가 간단하지만, 1Nm<sup>3</sup>의 수소를 제조하기 위해서는 약 4kWh의 전력을 필요로 하며, 전력요금이 수소제조 가격에 크게 영향을 미친다. 물의 전기분해시 원자력이나 수력, 풍력(사진 2 참조) 또는 태양광 등 재생에너지에 의한 전력을 이용한다면, 화석연료의 소비나 온실가스의 배출을 없앨 수 있다.

**<표 2> 수소제조방법의 분류**

| 구 분                    | 방 법     | 원 료            | 에너지원        | 기술개발 단계<br>(국외) | 기술개발 단계<br>(국내) |
|------------------------|---------|----------------|-------------|-----------------|-----------------|
| 화석연료 이용                | 수증기 개질  | 천연가스, LPG, 나프타 | 열           | 실용화 단계          | 실용화 단계          |
|                        | 부분산화    | 중질유, 석탄        | 열           | 실용화 단계          | 실증 단계           |
|                        | 직접 분해   | 천연가스           | 열           | 실용화 단계          | 실증 단계           |
|                        | 자열 개질   | 천연가스, LPG, 나프타 | 열           | 실용화 단계          | 실용화 단계          |
|                        | 전기분해    | 물              | 전력(화력)      | 실용화 단계          | 실용/실증단계         |
| 순수 물 분해<br>(비 화석연료 이용) | 전기분해    | 물              | 전력(수력, 원자력) | 실용화 단계          | 실용/실증단계         |
|                        | 열화학 분해  | 물              | 원자력, 태양열    | 실증 단계           | 기초연구 단계         |
|                        | 생물학적 분해 | 바이오매스          | 열, 미생물 등    | 실증 단계           | 기초연구 단계         |
|                        | 광화학적 분해 | 물              | 태양 광        | 기초연구 단계         | 기초연구 단계         |

**<표 3> 물의 전기분해법과 특징**

| 구 분                      | 알칼리 수전해         | 고분자 전해질 막 수전해  | 고온 수증기 전해       |
|--------------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 전해질                      | 20~30%KOH수용액    | 이온교환막          | 고체이온전도성 세라믹     |
| 전도 이온                    | OH <sup>-</sup> | H <sup>+</sup> | O <sup>2-</sup> |
| 온도(°C)                   | 50~100          | ~150           | 800~1,000       |
| 전류밀도(A/cm <sup>2</sup> ) | 0.1~0.3         | 1~3            | 0.1~0.5         |
| 특징                       | 상용, 대용량화        | 높은 전류밀도, 소형화   | 높은 효율           |



[사진 2] 풍력-수소 프로젝트(Stuart Energy Project, Palm Springs, CA, 미국)

단, 전력은 가격이 비싼 에너지이고 이를 대규모 수소제조에 사용하기 위해서는 다른 전력 수요와의 균형, 총괄 에너지 공급 가격 등을 고려할 필요가 있다. 물의 전기분해법은 기존의 전력 인프라를 최대한으로 활용가능하다는 이점이 있고, 발전소의 설비 이용 효율 향상을 위한 야간 유휴전력 활용 등의 관점에서 주목받고 있다.

생물학적 물분해, 광촉매를 이용한 물분해, 열화학적 물 분해 기술 등은 아직 연구 단계에 있는 기술이며, 프론티어 사업단<sup>11)</sup>에서도 장기적 관점에서 지원해 주고 있는 분야이지만 지면 관계상 상세한 설명은 생략하기로 한다.

### 3.2 수소저장기술

수소를 최종 이용자(혹은 사용처)가 큰 어려움 없이 경제적으로 활용하기 위해서는 수소저장이 꼭 필요하다. 수소저장은 생산된 수소를 사용하기 위한 원활한 다리 역할을 해주는 것이다. 물질 중에서 가장 적은 원자량을 지니고 있는 것이 수소이기 때문에 기체와 액체 상태로 존재할 때도 아주 적은 밀도를 나타낸다. 설령 액체상태로 존재하더라도, 수소의 밀도는 그리 크지 않다. 수소와 산소로 이루어진 물은

m<sup>3</sup>당 111kg의 수소를 포함하고 있는 반면, 액체수소 m<sup>3</sup>당 71kg의 수소만을 포함하고 있을 뿐이다. 그러므로 물은 단위부피당 더 많은 수소무게를 지니게 되는데, 이는 수소 자체보다 더 치밀한 분자구조를 이루기 때문이다.

기본적인 수소저장방법과 특징에 대하여 <표 4>에 간략히 정리하였는데, 차량 탑재용으로는 고압가스 저장용기에 대한 국제 표준이 현재 만들어지고 있는 단계이다.

현대자동차에서는 지난 2001년 6월 세계 최초로 350기압 수소저장시스템을 개발하여 신타페 연료전지 차에 장착하고 시험운전을 성공적으로 완료하였는데, 이후 대부분의 자동차 회사들이 350bar(기압) 급의 복합재 압력용기가 탑재되고 있다.<sup>12)</sup> 최근에는 더 많은 수소를 저장하기 위해 700bar의 초고압으로 수소를 압축하여 저장할 수 있는 복합재 압력용기가 개발되고 있으며, 연료전지자동차의 실용화를 위한 핵심기술 중 하나로 주목받고 있다. 현대자동차에서도 국제적인 기술검증 컨소시엄에 참가하여 저장탱크, 레귤레이터 및 각종 부품들을 평가하였으며, 이를 바탕으로 700기압 수소저장 시스템이 개발될 예정이다. 현재 수준은 어느 것도 기존 차량에 필적할 만한 수소저장 능력을 확보하지는 못하였다. 고압저장과 액체저장은 기술상으로는 상용화가 가능한 수준까지 이르렀으나, 저압 및 상온에서 고용량으로 수소를 저장하고 운송할 수 있는 기술에 대한 개발은 아직도 이루어지지 못하였다.

현재 연구 중인 기술들은 프로티어사업단 웹사이트(www.h2.re.kr)를 참조하기 바라며, 이중 어느 것이 승자가 될 것인가 하는 판단을 하기에는 더 많은 시간이 필요로 하고 있다. 최근 물에 미량의 용매를 첨가한 후 만든 얼음 속에 나노 크기의 축공공 같은 공간을 마련하여, 이곳에 수소 가스를 안정적으로 저장해 놓는 개념도 발표된 바 있는데,<sup>13)</sup> 수소저

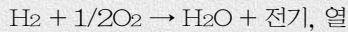


장 목표를 만족해줄 수 있는 획기적인 수소저장소재 개발이 중요한 기술적 돌파구가 될 것으로 보인다.

### 3.3 수소이용기술

#### ① 연료전지

연료전지는 물 전기분해와는 반대로 수소와 산소로부터 전기 및 열을 동시에 발생하는 전기화학적 장치이다.



또한 연료전지와 터빈을 조합해도 높은 효율로 발전하는 것이 가능하게 된다. 이 분야는 수소의 이용 분야 중 가장 큰 관심을 끌고 있는데, 연료를 주입하는 한 전기를 지속적으로 생산해 내는 발전기에 해당한다.

화력발전과 비교한다면 연료를 태워 열에너지 → 역학적 에너지 → 전기에너지 순으로 얻는 것이 아니라 연료가 가진 화학에너지를 이용하여 직접 전기 에너지를 얻는다는 점에서 차이가 있다. 이러한 차이에 기인하여 연료전지는 기존의 내연기관에 비해 월등히 높은 효율을 보이는 것이다. 연료전지의 종

류는 <표 5>와 같이 크게 6가지로 분류하는데, 수소와 산소의 전기화학반응으로 직접 전기와 열을 얻는 것은 공통점이지만 이온의 이동 통로인 전해질의 종류가 다르다. 이에 따라 작동온도가 크게 다르고, 출력과 이용 분야, 소비자층이 다르다. 이를테면 인산형 연료전지, 고체고분자형 연료전지는 저온형 연료전지이며, 분산형의 열 병합 전원과 자동차용 동력 원으로서 시장진출을 탐색하고 있다. 용융탄산염 및 고체산화물형은 고온형 연료전지로서 열기관적인 요소를 겸비하고 있으므로 열병합발전이나 중규모의 발전소용으로 개발되고 있다.

직접메탄을 연료전지는 자동차엔진용으로 고려되었지만, 최근에는 휴대전화 등 이동기기용으로의 실용화를 목표로 하고 있다.

알칼리형 연료전지는 이산화탄소가 존재하면 현저히 열화 되기 때문에 순수수소나 순산소를 이용하는 우주선용 이외에는 이용되고 있지 않지만, 발전효율이 높고 가격저감의 장점이 있기 때문에 장래 실용화 가능성은 여전히 남아 있다. 상세한 내용은 수소 연료전지사업단의 웹사이트<sup>14)</sup>를 참조하기 바란다.

<표 4> 기본적인 6가지 수소저장방법 및 특징

| 저장 방법             | 무게밀도 [무게%] | 부피밀도 [kg-H <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ] | 적용 온도 [°C] | 적용 압력 [bar] | 특징 |
|-------------------|------------|---|------------|-------------|----|
| 고압수소 저장           | 13         | < 40                                      | 실온         | 800         | A  |
| 액화수소 저장           | 크기에 따라 달라짐 | 70.8                                      | -252       | 1           | B  |
| 물리흡착에 의한 저장       | ≈ 4        | 20  | -208       | 70          | C  |
| 금속수소화물에 의한 저장     | ≈ 2        | 150                                       | 실온         | 1           | D  |
| 복합수소화물에 의한 저장     | 18         | 150                                       | 실온         | 1           | E  |
| 알칼리 복합체와 물에 의한 저장 | < 40       | > 150                                     | 실온         | 1           | F  |

- A. 경량복합용기(재질의 장력은 2000MPa)에 압축된 수소분자 상태임.
- B. 액화수소분자 상태, 실온에서 하루에 수%의 수소가 증발하여 손실됨.
- C. 매우 큰 비표면적을 가지는 탄소와 같은 물질표면에 수소분자가 물리적으로 흡착, 거의 완전한 가역성을 나타냄.
- D. 금속(host metal)사이 에 수소원자 상태로 존재, 실온에서 작용하는 금속수소화물은 거의 완전한 가역성을 나타냄.
- E. 복합화합물 형태([AlH<sub>4</sub>]<sup>-</sup> 혹은 [BH<sub>4</sub>]<sup>-</sup>), 높은 온도에서 탈착하고 고압에서 흡착시킴.
- F. 물과 금속에 의한 화학적 산화반응과 수소방출, 비가역적 반응임.

#### ② 내연기관

현재 내연기관에서 유해배기가스가 발생하는 것이 환경적인 측면에서 단점으로 부각되고 있다. 수소엔진도 연소한다는 측면에서 기존의 내연기관과 동일하게 취급하는 경향이 있다. 그러나 주지의 사실과 마찬가지로 배기가스에는 탄소, 황성분 및 입자상의 물질은 전혀 배출되지 않는다. 유일하게 생성되는 NO<sub>x</sub>는 거의 무공해수준으로 저감

<표 5> 각종 연료전지의 비교

| Type<br>Parameter        | PAFC<br>(인산)  | AFC<br>(알칼리)   | MCFC<br>(중온도소금)  | SOFC<br>(고체산화물)  | PEFC/PEMFC<br>(고분자전해질)  | DMFC<br>(직접비연료)   |
|--------------------------|---|--|--|--|---|---|
| Electrolyte              | 100%<br>H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                                    | 35 - 45%<br>KOH  | 62% Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub><br>38% K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                                | Yttria-stabilized<br>ZrO <sub>2</sub>                                    | Nafion  | Nafion  |
| Operating<br>Temperature | 190 ~ 200 °C  | 80 ~ 90 °C   | 650 °C   | 600 ~ 1000 °C  | 25 ~ 80 °C  | 25 ~ 90 °C  |
| Anodic<br>material       | Pt/C  | 80% Pt<br>20% Pd   | 90% Ni<br>10% Cr   | Ni-ZrO <sub>2</sub>  | Pt black<br>or<br>Pt/C  | Pt black<br>or<br>Pt/Ru/C   |
| Anodic<br>reaction       | H <sub>2</sub> →<br>2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup>                     | H <sub>2</sub> + 2OH <sup>-</sup> →<br>2H <sub>2</sub> O + 2e <sup>-</sup> | H <sub>2</sub> + CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> →<br>H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup> | H <sub>2</sub> + O <sup>2-</sup> →<br>H <sub>2</sub> O + 2e <sup>-</sup> | H <sub>2</sub> →<br>2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup>                     | CH <sub>3</sub> OH + H <sub>2</sub> O<br>→<br>CO <sub>2</sub> + 6H <sup>+</sup> + 6e <sup>-</sup> |
| Cathode<br>material      | Pt alloy/C  | 90% Au<br>10% Pt   | Lindoped<br>NiO  | Sr-doped<br>LaMnO <sub>3</sub>   | Pt black<br>or<br>Pt/C  | Pt black<br>or<br>Pt/C  |
| Cathode<br>reaction      | O <sub>2</sub> + 4H <sup>+</sup> + 4e <sup>-</sup><br>→ 2H <sub>2</sub> O | O <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O + 4e <sup>-</sup><br>→ 4OH <sup>-</sup> | O <sub>2</sub> + 2CO <sub>2</sub> + 4e <sup>-</sup><br>→ 2 CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>                 | O <sub>2</sub> + 4e <sup>-</sup><br>→ 2O <sup>2-</sup>                   | O <sub>2</sub> + 4H <sup>+</sup> + 4e <sup>-</sup><br>→ 2H <sub>2</sub> O | 3/2O <sub>2</sub> + 6H <sup>+</sup> + 6e <sup>-</sup><br>→ 3H <sub>2</sub> O                      |
| Large<br>R&D<br>group    | ONSI Corporation:<br>200kW<br>(Cost: \$3000/kW)                           | Cienergy   | FCE 300kW-2MW<br>MTU 250kW<br>IH: 300-500kW  | Sulzer Hoesl<br>CMBH: 2kW<br>GE: TMI                                     | Balford Power<br>작은차력서  | JPL: 200 W<br>GINER: 55 W   |

시킬 수 있는 기술이 확보된 상황이다. 내연기관은 다른 어떤 동력시스템에 비하여 비출력이 크며 열효율도 비교적 높다. 열효율은 임의 고정된 운전조건 하에서 비교적 높아 선박용 엔진의 경우는 거의 50% 수준에 접근하고 있다.

이러한 관점으로 보면 수소엔진은 운전조건이 급격히 변화하는 자동차용 기관보다 부하 및 정속운전을 하는 발전기 등의 동력시스템으로서 개발 가능성이 높다. 특히 수소연소 프리피스톤 동력시스템은 연료전지 수준의 고효율을 달성할 수 있는 수소엔진이다. 프리피스톤 수소기관은 기존의 왕복형 내연기관과 달리 왕복운동을 회전운동으로 변환하는 크랭크기구가 없어 기계손실이 적다. 또한 피스톤운동이 제약을 받지 않아 팽창과정이 길며 예혼합 압축착화가 가능하여 50%이상의 고효율을 달성할 수 있는 것으로 평가되고 있다. 최근 개발되고 있는 리니어 발전기와 결합한다면 분산전원 및 하이브리드자동차의 동력시스템으로서의 적응성이 무한하므로 개발 가능성이 큰 기술이다.<sup>15)</sup>

한편 수소에너지이용에 대한 인식은 아직 안전성 측면에서 부정적이다. 수소이용기술을 대중화시키기

위해서는 무엇보다 수소에너지에 대한 불안감 등과 같이 사회적으로 부정적인 인식을 불식시켜야 된다. 수소-천연가스 혼합 연료 동력시스템은 수소가스와 천연가스를 동시에 사용하므로 본격적인 수소에너지 시대의 도래에 앞선 기술적 완충단계로서의 과도기적 수소에너지 이용기술로 수소에너지에 대한 불안감을 불식시키는 동시에 수소의 사용을 점진적으로 증가시키는 기술 개발로 볼 수 있다.

수소엔진은 기존의 내연기관과 달리 수소연료에 적합한 기술이 확립되어야 하고 또한 역화발생억제를 위해 해결해야 할 점이 많다. 그러나 내연기관 개발 시 축적된 많은 기술의 활용이 가능하다. 또한 수소연료전지와 같이 현재 개발되고 있는 수소이용기술 중 가장 저비용으로 단기 내에 실용화시킬 수 있는 기술로 평가되고 있다.

#### 4. ISO의 기술표준 움직임

불과 30년전, 1974년 3월 미국에서 수소 에너지에 대한 최초 국제회의(THEME conference)가 열리고, IAHE (International Association of Hydrogen Energy) 설립되기 전에는 에너지 매체로서의 수소에 대한 투자는 거의 없었으며, 'Hydrogen Energy', 'Hydrogen Economy', 'Hydrogen Energy System'의 인식조차 없었으나 현재에는 미국, 일본, 오스트레일리아, 한국에 이르기까지 수소 전담 기관이 생겨나고 있다.

또한, 1990년에 스위스 제네바에 근거를 둔 국제표준기구(ISO)는 수소에너지 기술에 대한 국제적

표준을 준비할 시기가 도래했다고 판단하여 ISO/TC-197이라는 위원회를 발족시켰다. 그 첫 모임에서 수소에너지 기술의 표준에 대한 작업을 위해 10개의 하부위원회를 구성하여 수소연료 제품명세 등 2종은 이미 국제표준으로 만들어졌으며, 가스 수소 충전소 등 12종이 현재 제정 작업 중이다. 제정중인 규격을 분류하면 <표 6>과 같으며, 수소자동차가 운행된다는 전망 하에 이에 필요한 기술의 표준화가 우선적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

<표 6> 제정중인 규격 분류

|   |  |
|---|--|
| 액화수소의 연료탱크(1)<br>수소연료 주입설비(1) 및<br>연결부품(1)<br>가스수소 : 연료탱크(5),<br>주유소(1) | 수소시스템 : 안전(1)<br>수소제조 : 전기분해(1),<br>연료처리방법(1)<br>수소저장(1) |
|---|--|

ISO(국제표준기구)<sup>16)</sup>는 1947년에 설립되어 회원국이 140여개국에 이르고 있으며, 우리나라도 1963년에 가입하여 산업자원부 기술표준원이 국가대표로 활동하고 있다.<sup>17)</sup> 우리나라는 ISO TC 197에 2001년 가입하였으며, 간사국인 캐나다를 비롯하여 독일, 미국 등 16개국이 정회원국가로 활동하고 있다.

또한 연료전지 분야의 표준이 이루어지고 있는 IEC(International Electrotechnical Commission)<sup>18)</sup>은 1906년에 설립되어 65개 회원국이 가입하였으며, 전기기술에 관한 모든 분야의 국제 공업 규격을 작성하고 있다. 우리나라는 이 기구에도 1963년에 가입하였으며 역시 기술표준원이 국가대표로 활동하고 있다.

IEC에서 제정하고 있는 국제표준은 <표 7>에 보인 바와 같이 관련 용어뿐만 아니라 고정형, 이동용, 휴대용, 초소형 연료전지의 안전성과 성능에 관한 내용 등 다양하게 이루어지고 있다.

<표 7> IEC에서 제정중인 국제표준의 분류

|   |  |
|---|--|
| - 용어(1)<br>- 고정형 연료전지<br>안전성(1), 성능(1) 및<br>설치방법(1)<br>- 이동용 연료전지<br>시스템(1) | - 휴대용 연료전지의<br>안전성 및 성능(1)<br>- 초소형 연료전지의<br>안전성(1), 성능(1) 및<br>호환성(1) |
|---|--|

아직은 국제표준화가 초기 단계에 있으므로 우리나라의 입장을 반영하고 기술표준을 제안할 수 있는 유리한 시점이다. WTO 출범으로 세계시장이 단일화 되어있고, 국가 표준을 국제표준에 맞출 것을 권고(선진국은 2005년, 개도국은 2010년까지)하고 있는 만큼 세계시장에서의 표준의 영향력은 심화될 것으로 보인다. 1999년 OECD 보고서에서는 세계 교역량의 약 80%가 표준에 영향을 받고 있는 것으로 보고하고 있는 등 국제표준의 중요성이 인식되고 있다.

국내에서 기술개발중인 모든 기술은 이미 시장의 요구와 기술진보에 맞추어 끊임없이 보완되고 있으며, 이는 기술 및 표준화와 직결된다. 세계가 단일시장으로 되어 있는 현재에 있어서는 국제표준화 노력이 최우선시 되어야 하며, 세계적 우위의 기술도 세계표준으로 채택되지 않으면 사장될 수밖에 없다. 기술개발, 지적재산권, 표준화가 삼위일체가 되어야 세계시장이 융이하게 될 것이므로 초기 개발단계부터 이를 염두에 두어야 하며, 또한 기업들은 표준화를 경쟁력 확보수단으로 활용하여야 한다. 정부 측에서는 WTO/TBT 협정에서 대응하기 위한 관계법령 제정 등 대응책이 강구되고 있으나, 이 방침을 구체적으로 수행할 민간의 움직임은 미약한 상황에 있다. 따라서 국가에서도 수소연료전지를 비롯한 신재생에너지 분야의 ISO, IEC 등의 동향을 소개하고

<표 8> 수소에너지 관련 KS규격

| 규격번호      | 규격명                           | 비고       |
|-----------|-------------------------------|----------|
| KS D 8510 | 수소저장합금의 압력조정 등온선(PCT선)의 측정방법  | JIS 7201 |
| KS D 8504 | 수소저장합금의 반복 수소가스 저장·방출 특성 시험방법 |          |
| KS D 8505 | 수소저장합금의 수소화열 측정방법             |          |
| KS D 0066 | 수소저장합금 용어                     |          |
| KS M 1131 | 수소                            |          |

표준화 활동에 적극 참여하여 국내산업 육성 및 경쟁력을 높이는데 주력을 하고 있다.<sup>19) 20)</sup>

수소분야 KS규격은 <표 8>에서 보인 바와 같이 수소 등 제정된 규격 5종과 수소연료 제품명세서 등 제정중인 규격 2종이 있으며, 연료전지분야 KS규격은 전무한 상황이어서 수소 및 연료전지 분야의 연구 참여 인력을 중심으로 기술기준에 대한 대응체계 협력, 선진국의 기술 기준 적용 동향조사 및 국제 협력을 통한 공조시스템 구축이 필요한 시점이다.

우리나라의 수소 및 연료전지 표준화사업은 한국정밀화학공업진흥회를 주관기관으로 하여 위탁기관으로는 한국과학기술연구원이 참여하고 있으며, 사업관리는 산업자원부의 기술표준원에서 하고 있다.

지금까지 수소경제의 배경과 기술에 대하여 간략히 소개하였다. 연료전지 자동차가 굴러다니려면 수소충전소도 있어야 하고, 차량에는 연료탱크에 해당하는 고압수소저장용기나 액화수소저장 용기가 탑재되어 있어야 한다. 이들에 대한 관련 규정이 만들어지거나 보완되고 있는 단계이기는 하지만, 한편으로는 실증 프로그램을 통해 일반인과 친숙해지면서 시장 진입이 되도록 배려하여야 한다. 강조하건대, 수소경제로의 전환은 10~20년 정도의 단기간에 이루어질 일이 아니다. 관련 부처의 계획이 한데 어우러져 국가 장기 단일 계획으로 추진 보완됨으로서 국가와 산업의 경쟁력을 제고시킬 원천기술과 보급 활성화에 큰 기여를 할 것이다.

(참고문헌)

- 1) Jeremy Rifkin, The Hydrogen Economy, 2002.
- 2) Kenneth S,Deffeyes, Hubbert's Peak: the impending world oil shortage, Princeton University Press, 2001.
- 3) [http://www.absoluteastronomy.com/encyclopedia/N/Ni/Nikolai\\_Kondratiev.htm](http://www.absoluteastronomy.com/encyclopedia/N/Ni/Nikolai_Kondratiev.htm)
- 4) William J. Abernathy and James M. Utterback, "Patterns of Innovation in Industry," Technology Review, Vol. 80, No. 7, June-July 1978, pp. 40-47.
- 5) [www.hydrogenassociation.org](http://www.hydrogenassociation.org)
- 6) (1) IEA/H2/Ar-98, IEA Agreement on the production and Utilization of Hydrogen, Annual report, 1998, (2) <http://www.iea.org>
- 7) <http://www.solarpaces.org/>
- 8) <http://www.iphe.net>
- 9) Gen IV <http://gen-iv.ne.doe.gov/>
- 10) <http://www.fossil.gov/programs/powersystems/futuregen/>
- 11) <http://www.h2.re.kr>
- 12) 오형석, 임태원, 현대자동차의 연료전지자동차 기술, 제16회 신재생에너지워크숍, 243-250(2004.11.4).
- 13) Juen Lee 외, "Tunning clathrate hydrates for hydrogen storage", Nature, 434, 743-746 (2005)
- 14) [www.h2fc.or.kr](http://www.h2fc.or.kr)
- 15) 이종태, 수소를 엔진현황과 전망, 한국화학공학회, 수소에너지와 기술전망, 2004년도 봄학술대회 특별심포지엄(2004)
- 16) <http://www.iso.ch>
- 17) 신성호, "신재생에너지 및 차세대전지 표준화 추진 현황", 수소연료전지 및 차세대 전지 기술표준세미나, 산업자원부 기술표준원 (2004.11.4)
- 18) <http://www.iec.ch>
- 19) 전기산업, 2004년 11월 8일자 6면 기사 ([www.energydaily.co.kr](http://www.energydaily.co.kr))
- 20) 신성호, "수소연료전지 표준화", 제3회 수소에너지심포지엄, 서울 팔레스호텔 (2004년 11월 12일)