

수소에너지 배경과 과제

김 종 원

한국에너지기술연구원, 과학기술부 21세기 프론티어 수소에너지사업단(jwkim@kier.re.kr)

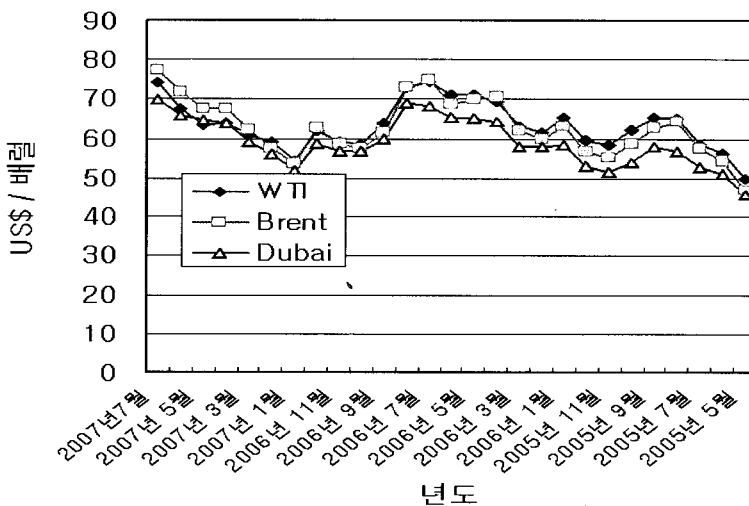
수소에너지 배경

최근의 유가추이를 보면 2006년 초 러시아, 우크라이나 사이의 가스공급 분쟁으로 인한 수급 차질 우려 때문에 배럴당 63\$로 시작한 이래, 이란 핵문제 우려와 나이지리아의 정세 불안, 이스라엘과 레바논 간의 분쟁, 원유 재고량과 원유 수요전망(인도와 중국의 경제규모 팽창에 따른 석유소비 증가), 미국지

역의 폭염, 허리케인 등 참으로 다양한 원인에 의해 등락을 거듭하고 있지만, 전반적으로는 원유가 상승 추세를 보이고 있다. 최근 2년간의 유가 동향은 그림 1에 보인 바와 같이 2005년 중반의 배럴당 50\$ 시대에서 지금은 70\$시대로 들어섰으며, 100\$ 선을 예측하는 보도마저 심심치 않게 나오고 있다.

석유나 천연가스생산량은 2020 ~ 2030년에 최고점에 도달될 것으로 예측하는데, 이 시기가 되면 에

최근 월평균 원유가 추이



[그림 1] 최근 유가 변동 추이



너지 공급의 불균형이 심화되어 약간의 차질로도 에너지 위기를 우려해야 한다는데 심각성이 있다. 이것이 전 세계가 에너지 부존국가를 대상으로 에너지원 확보를 위한 외교 총력전, 석유나 천연가스를 대체할 신 에너지를 개발하는 데에 관심을 쏟는 첫 번째 이유이다.

기후변화협약으로 화석에너지를 보유하고 있다고 해서 마음대로 쓸 수 있는 시대도 아니다. 기후변화협약은 기상이변과 사막화, 생태계 변화 등 부정적 결과를 유발하는 이산화탄소의 배출 저감을 위한 것이고, 우리나라를 포함 2004년 현재 189개국에 가입한 상태이다. 선진국은 온실가스 배출량을 1990년 수준으로 감축하기 위해 노력하여야 하고, 개발도상국도 기후변화방지에 기여하는 국가정책을 수립 시행하여야 할 시기가 오고 있다.

선진국은 이미 고도의 경제성장을 이루었기에 이산화탄소 총량 제어가 어느 정도 가능하지만, 개도국은 자국의 경제활동을 줄여야 하므로 배출량을 줄이기는 어렵다. 우리나라는 이미 세계 10위의 에너지소비(소비증가율 1위), 이산화탄소 배출 세계 9위(배출증가율 세계 1위)라는 수치가 말해주듯이 감축의무 부담이 경제에 주는 과급은 매우 클 것은 자명하다. 2005년 7월에 있었던 APEC 정상회담에서도, 청정개발과 기후변화협약을 위한 아태지역 파트너십을 체결하여, 다양한 기후변화 관련 에너지기술의 개발 및 기술이전에 협력할 것을 합의한 바 있다. 이제는 자원의 확보뿐만 아니라 고효율 및 환경 친화적으로 이용할 기술이 필요한 시대임을 공감하고 있다는 것이 신에너지기술개발의 두 번째 이유인 것이다.

세 번째 이유는 수소에너지 관련분야의 막대한 시장이 국가와 산업체의 경쟁력 강화의 계기가 될 수 있기 때문이다. 한 예로, 수소경제 관련기술의 시장 규모가 미국과 유럽만 해도 2010년대 말에 230억\$¹⁾에 달할 것으로 보고 있다.

그동안 상대적으로 값싼 석유에 안주한 탓에, 신재

생에너지에 대한 기술 개발과 투자가 정체되어 석유를 대체할 만한 기술은 현실적으로 경제성면에서 매우 뒤져 있어 정책과 환경 측면의 고려 없이 받아들이는 것이 쉽지는 않다. 어느 기술이나 마찬가지로, 원유가가 오르면 관심을 가지다가 가격이 내리면 잊어버리는 일의 반복으로는 획기적인 기술혁신을 기대하기 힘들다. 지금과 같은 집중적인 투자가 이루어지고 있는 것은 극히 최근의 일이다.

IEA의 한 보고서²⁾에서 발표한 바에 따르면, 현재 신재생에너지에 대한 정부 측 투자액은 전 세계적으로 매년 80억\$에 이르는 것으로 추산하고 있으며, 이 중 수소에너지관련기술에는 10억\$가 투입되고 있다. 기업체 투자 분은 정부투자분의 3~4배에 이를 것으로 보기 때문에 수소연료전지분야에만 50억\$ 정도가 매년 투자되는 셈이다. 대표적인 이용기술인 연료전지기술이 경제성, 기술완성도를 갖추는데 더딘 걸음을 하고 있기는 하지만, 이 분야의 연구비 및 연구수준에서 앞서가고 있는 미국이나 일본의 수소에너지 관련 기술 로드맵³⁾에 따르면, 대략 2015년까지는 연구개발에 주력하면서 틈새시장 진입을 시도하게 될 것이다.

수소경제 기술 개발 동향

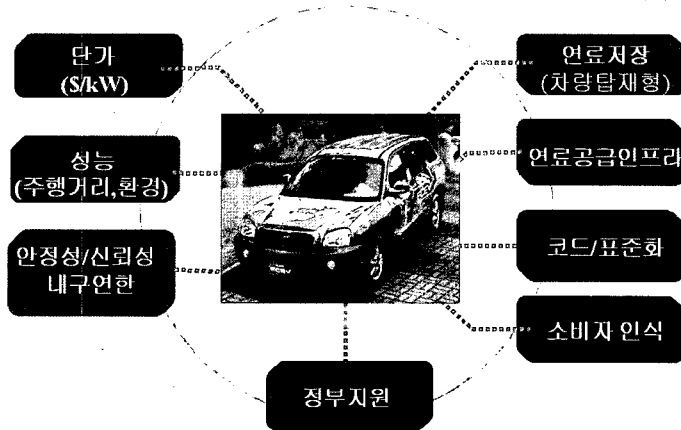
수소는 석탄, 석유, 가스화 같이 채굴을 통해 얻을 수 있는 "1차 에너지"는 아니며, 수소를 함유한 물질을 분해하여 얻어야 하는 "2차 에너지"에 해당된다. 과학과 기술이 필요하다는 것이다. 대표적인 수소함유물질은 지구상의 풍부한 물이며, 수소로 만들어 이용한 후에는 다시 물로 돌아가므로 완벽한 친환경적인 에너지순환이 이루어지는 셈이다. 수소는 전기와 같은 에너지매체이기 때문에 이것을 만들기 위해서는 '당연히' 어느 정도 에너지 손실이 불가피하지만, 이 에너지를 태양에너지 등 '안 쓰면 버려져야 할 재생에너지'로 해결하기 위한 노력이 이루어지고 있다. 태양에너지를 수소로 변환하여 이용하면 간헐적,

1) 2005 US& EU Hydrogen Market (Fuji-Keizai USA Inc.)

2) 수소 및 연료전지 전망(Prospects for Hydrogen and Fuel Cell), OECD/IEA, 2005.

3) 미국의 수소경제 실현을 위한 로드맵 자료.

상업화가 되려면 ?



[그림 2] 연료전지자동차가 상용화에 기술안정성, 경제성, 관련법과 표준화까지 필요성

저에너지밀도(약 1 kW/m²), 수요처와의 거리 등 고질적인 단점을 해결할 수 있다. 수소경제란 태양에너지체계에 속한다고 말하는 이유이기도 하다. 기술주도형의 에너지매체이기에, 자원빈국에서 탈피할 기회가 될 수도 있다. 수소경제로의 태동은 1차 석유위기가 닥쳤던 1974년부터 시작되어, 21세기 들어 본격화하였고, 국제표준도 함께 만들어지고 있다.

수소경제의 주요 변수는 수소에너지기술과, 또한 경쟁관계에 있는 여러 기술의 진보 정도에 달려 있다. 연료전지의 경우 이동형 전자기기용으로는 이차전지와 경쟁관계에 있으며, 자동차용으로서의 용도는 바이오연료나 기타 합성연료를 사용하는 기존 엔진과 경합을 벌여야할 처지에 있다. 하지만 전 세계가 궁극적으로는 무공해차량을 지향하고 있기 때문에 연료전지나 전기자동차가 저공해차량보다 최종 승자가 될 가능성이 매우 크지만, 소비자 입장에서 선뜻 구매할 만한 여건이 되려면, 그림 2에 보인 바와 같이, 가격이나 기술신뢰도 등과 관련 법규나 인프라 등의 분야에서 많은 노력이 필요한 것이 현실이다.

국내외 최신 동향 수소 제조기술

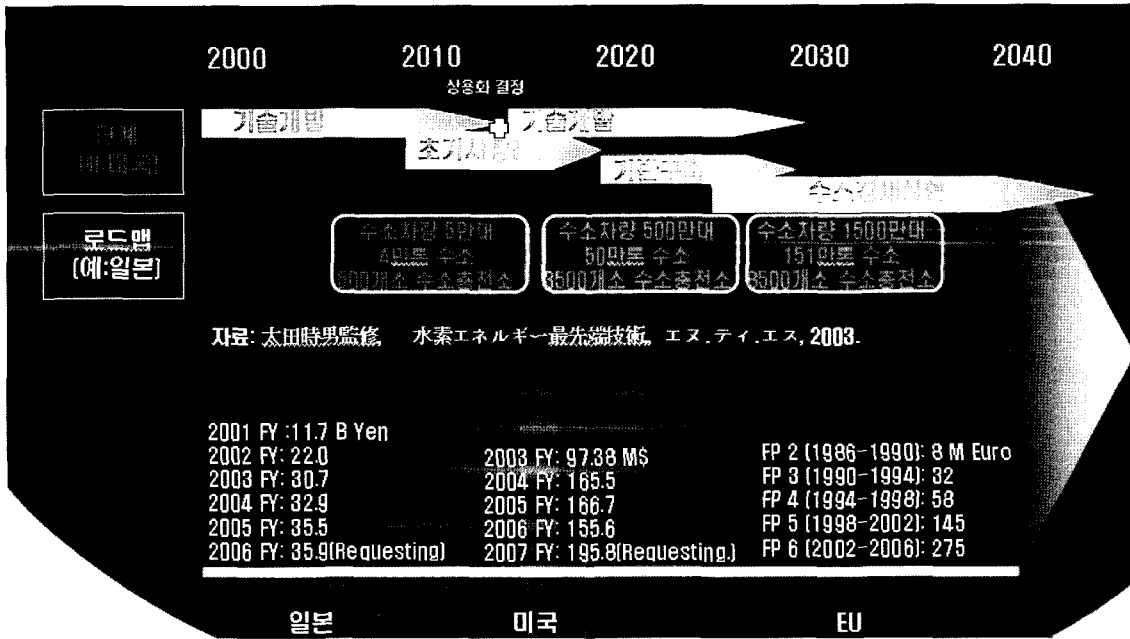
어느 나라든지 현 기술 수준을 감안할 때, 우선 분산전원용, 수소충전소 등 수소를 필요로 하는 현장에서의 수소제조공정이 부생수소이용과 함께 우선적으로 시장 진입하고, 시장 확대에 따라 인프라가 구성되면 중앙집중식의 대규모 수소제조 공정을 고려하고 있다.

현재 세계적으로 관심을 가지고 진행하고 있는 수소제조 기술은 다음과 같다.

(1) 상용화 기술의 활용

시범운행단계에 있는 연료전지자동차의 시장진입을 위해서는 이미 상업용 수소의 95% 정도를 공급하고 있는 기존 화석연료를 이용한 수소 제조기술이 필요하며, 전 세계적으로 LPG, 가솔린, 나프타, 천연가스, 전기 분해 등을 이용한 수소충전소를 건립 운영하고 있다. 이미 상업화되어 있는 기술을 이용하여 소형화 및 고효율화 하는 것이므로 기존 수소제조나 유통을 담당하고 있는 산업체가 참여하고 있다.

석탄을 이용하여 수소를 제조하는 기술은 이미 역사적으로 상용화된 사례가 있다. 석유의 고갈은 대체품이라 할 수 있는 천연가스와 석탄의 수급 불안과도 직결된다. 이미, 2007년 들어 국제 발전용 유연탄 시장이 수요자 중심에서 공급자 중심으로 무게



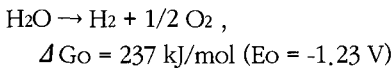
[그림 3] 미국과 일본의 수소경제 로드맵과 투자규모

중심이 이동함에 따라 유연탄 가격이 상승하고 있다. 지난해 56달러 선이었던 중국탄 가격이 70달러에 육박하고 호주탄과 인도네시아탄도 사정은 마찬가지다. 궁극적으로 수소제조 방법에 있어서는 탈탄소(탈화석연료)를 지향할 수밖에 없다.

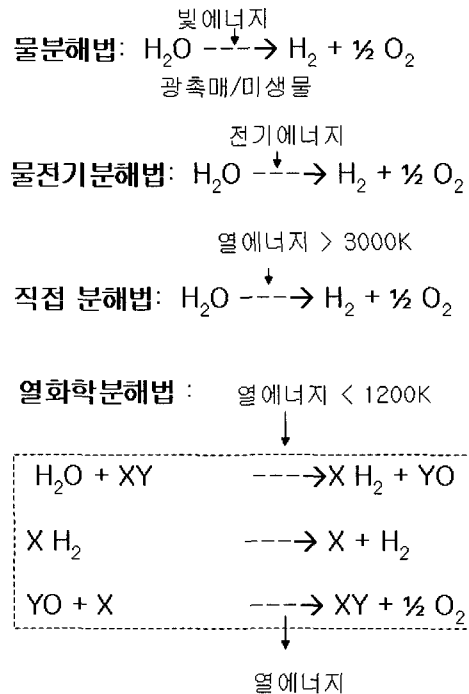
(2) 연구 중인 과제

화석연료를 사용하지 않는 기술은 미래지향적이며 이상적인 기술이나 아직은 효율이 너무 낮아 효율 상승과 비용 저감을 위한 연구를 수행하고 있다.

물의 분해는 다음과 같은 반응이 일어나야 한다.



이 과정에서 필요로 하는 에너지는 그림 4와 같이 방법에 따라 빛, 전기 또는 열 등의 형태로 공급할 수 있으며, 이때 촉매나 매개체 역할을 할 수 있는 물질도 관여하게 된다. 수전해는 상온 또는 고온에서 이루어지는데, 고온의 경우가 전체적인 효율 측면에서 유리하나, 아직 기초연구단계이며, 상온에서



[그림 4] 여러 가지 물분해 방법

의 수전해기술은 일찍이 상용화되어 전 세계 수소생산량의 4% 정도를 이 방식으로 만든다.

① 광화학/광전기화학적 수소제조 기술

지표에 도달하는 태양빛 중 700 ~ 920 nm 영역의 근적외선이 23.5%, 400 ~ 700 nm대의 가시광선이 44.4%, 315 ~ 400 nm까지는 2.7%를 차지하지만, 물이 흡수하는 빛의 스펙트럼 영역대는 100 ~ 210 nm대이므로 태양빛을 물을 분해하는데 이용하기 위해서는 별도의 노력이 필요하다.

광촉매는 빛에너지에 의해 활성을 나타내어 광반응을 가속시키는 촉매를 지칭하며, 광촉매의 소재는 주로 이산화티탄과 같은 반도체 물질이다. 반도체의 경우에는 전자에 의해 가득 채워진 가장 높은 에너지띠인 가전자대(공유티) (valence band)와 전자가 점유하지 않아 비어있는 전도대(전도띠, Conduction Band) 사이에는 전자가 점유할 수 없는 금지된 에너지 띠 간격(band gap E_g)이 존재한다. 반도체는 띠 간격 이상의 에너지를 갖는 광자($h\nu \geq g$)를 흡수하여 공유티에서 전도띠로 전자 여기를 일으키고 이때 공유티에는 정공(hole)이, 전도띠에는 전자가 생성된다. 반도체의 광 여기(Photoexcitation)는 빛에너지가 전기(태양전지)나 화학에너지(광촉매)로 전환되는 첫 번째 단계이다. 금속도 빛을 흡수하여 여기되나 전도띠 내의 에너지 준위가 연속적이어서 전자와 정공의 재결합이 엄청나게 빠르다. 이런 상황 하에서는 흡수된 빛에너지가 다른 형태의 에너지로 전환될 시간적 여유가 전혀 없다.

반도체에 생성된 전자와 정공을 외부회로에 연결하여 전력을 얻는 것이 태양전지라면, 이 전자와 정공의 화학전위 에너지를 이용하여 계면에서 환원과 산화반응을 일으켜 빛에너지를 화학에너지로 전환하는 것이 광촉매이다. 따라서 태양전지 전력으로 물을 전기분해하여 수소를 얻는 2단계 방식과 비교하여, 태양에너지를 직접 물 분해에 응용하므로 이론적으로 더 높은 효율을 얻을 수 있다.

일반적으로 띠 간격이 클수록 정공과 전자의 산화 환원 반응에 대한 구동력이 커지는 장점이 있으나

높은 에너지의 광자가 요구되므로 태양광을 효율적으로 이용할 수 없다는 단점이 뒤따른다. 반대로, 띠 간격이 작으면 태양광을 좀 더 많이 흡수할 수 있으나 산화 환원 반응에 대한 구동력은 떨어진다. 광촉매 개발은 적당한 밴드갭, 용액에서의 안정성, 가격, 구입 용이성 등을 고려하여야 한다.

현재 고려되고 있는 광촉매 종류는 질화물 계열(GaPN, GaInN) 및 CuInSse 분야, Fe_2O_3 , WO_3 등의 산화물을 이용한 하이브리드 광전극, 티타니아 광촉매 및 염료를 활용한 염료 감응 태양전지 분야, 광촉매/바이오촉매의 하이브리드 등이 있다. IEA-Annex 20에서도 광전기화학적 수소생산에 필요한 물질 및 시스템 개발을 목적으로 연구 협력하고 있으며, 우리나라도 참여하고 있다.

② 생물학적 수소생산 기술

물, 유기성 폐기물, 바이오매스로부터 태양에너지와 미생물을 이용하여 수소를 생산하는 기술은 1990년대에 들어 활발히 진행되고 있다. 노벨 물리학상 수상자(1997년)인 스티븐 추(Steven Chu) 로렌스 버클리 국립연구소장이 2005년 4월 18일, '고려대 개교 100주년 기념' 노벨 수상자 강연시리즈'에서 '공학문제에 대한 생물학적 접근방법'이란 제하의 주제 발표를 통해 언급한 '생물학을 활용한 태양 에너지의 축적과 전환'의 개념인 것이다. IEA에서도 Annex 10, 15, 21 (1995~2010)에 걸쳐 국제공동연구로 추진하고 있으며, 일부 기술은 기초연구단계를 벗어나 대규모 수소생산과 관련 사업을 구체화하고 있다⁴⁾. Annex 21에는 우리나라도 참여하고 있다.

실험실 최적조건에서 조류와 같은 광합성 미생물은 가시광선이 가지는 에너지의 약 22%를 화학에너지로 변환할 수 있는데, 햇빛 중 가시광선이 약 44% 정도 차지하므로 태양에너지의 10%를 변환하는 셈이다. 하지만, 실제 우리 주변의 나무나 곡식의 태양 에너지 변환 효율은 1% 이내로 추정된다. 이것이 우리 인류가 사용하는 식량, 연료(나무나 석탄)가 된 것이므로 이미 충분한 생물학적 에너지 축적기술의 혜택을 입고 있는 셈이다.

4) Gaudernack, B., Proc. 12th World Hydrogen Energy Conference, 12-15 (1998)



수소를 생산하는 미생물은 크게 광합성세균, 혐기성세균, 조류 등으로 구분된다.

대표적인 수소제조 기술로는 (1) 녹조류가 광합성 메커니즘에 의해 물로부터 양성자와 전자를 공급받아 수소를 생산하는 직접 물분해 수소생산 기술, (2) 광합성 작용에 의해 물을 분해하여 산소를 발생하고, 동시에 공기 중 이산화탄소를 고정하여 고분자 저장물질로 균체 내에 합성한 후 혐기발효 또는 광합성 발효에 의해 수소를 발생하는 간접 물분해 수소생산 기술 (3) 유기물을 기질로 이용하여 빛이 존재하는 혐기상태 배양 조건에서 홍색 세균에 의한 광합성 발효, (4) 광이 존재하지 않는 조건에서 혐기 미생물에 의해 유기물이 발효하여 수소와 유기산을 내는 혐기발효 (5) 광합성에 관여하는 엽록체 및 미생물 효소를 추출하여 물 또는 유기물로부터 수소를 발생하는 균체외(in vitro) 수소발생 (6) 광합성 미생물의 일산화탄소 가스 전환 반응에 의한 수소 생산 기술로 구분할 수 있다.

현재 미생물에 의한 이산화탄소 제거 및 수소생산, 수소생산 미생물 유전자 규명, 맞춤형미생물 및 수소발생효소(hydrogenase), 혐기발효에 의한 수소생산 대형화 시설 개발 및 생체모방 수소발생시스템 연구 등 다양한 기술이 개발되고 있다.

③ 열화학적인 방법

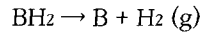
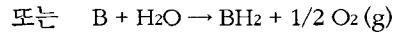
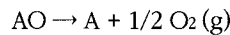
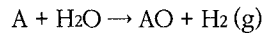
일반적으로 태양에너지를 집적하여 이용하는 고온에서의 열화학공정은 대략 그림 5와 같이 5가지 경로가 있다⁹⁾. 집적된 열을 물의 열분해 또는 열화학적인 분해에 이용하거나 (왼쪽 2가지) 화석연료개질에 필요한 열을 공급해주는 방법(오른쪽 3가지)이다.

열화학적 사이클이라 함은 물의 산화 환원을 도와 줄 수 있는 매체를 도입하여 물로부터 수소와 산소를 각각 다른 단계에서 분리 생산하고, 반응에 사용된 매체는 순환시켜 재사용함으로써 전체적으로는 비교적 낮은 온도(1300 K 이하)에서 물을 분해하는 폐사이클(close cycle)을 이루도록 하는 방법이다. 열적 분해 방법보다는 낮은 온도이기 때문에 고온 가스냉각로나 태양광 집열장치에서 나오는 950℃

내외의 열을 이용할 수 있다.

이것은 흡열현상과 발열현상으로 화학반응을 사용한 열기관과 일종이라 할 수 있다. 이와 같은 반응 사이클에 의한 일은 사실 자연 속에서 이미 존재하였다. 식물에서는 수확 단계에 걸친 반응 사이클이 작동하여 태양에너지로 물을 분해하여 수소원을 얻고, 식물을 구성하는데 필요한 물질 합성에 사용하고 있다. 다만, 식물체에서는 반응온도가 환경 온도로 한정되어 있다는 것과는 달리, 공업적 응용 사례에서는 온도 제한 없이 열에너지원의 온도와 반응진행에 필요한 온도를 자유롭게 설정할 수 있기 때문에 적은 반응 단수의 사이클 구성이 가능하다.

가장 간단한 2단계 화학반응으로 물을 분해하는 경우 반응매체를 A 또는 B라고 하면, 다음의 반응식으로 나타낼 수 있다.

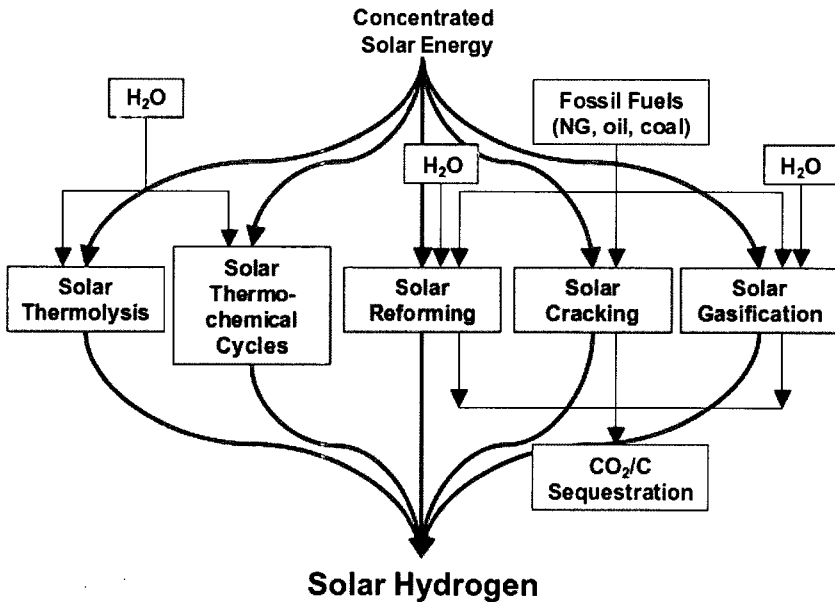


열화학적인 방법은 스위스의 PSI(Paul Scherrer Institute, ETH(Swiss Federal Institute of Technology), 이스라엘에 있는 WIS(Weizmann Institute of Science) 에서 활발히 연구 중이며, 우리나라도 이에 관심을 가지고 2000년부터 지속적으로 연구하고 있다.

수소 저장기술

대표적 무공해 차량인 연료전지자동차의 경우 연료인 수소를 차량에 수소형태로 저장 탑재하였다가 공급하는 방식, 특히 고압으로 압축하여 저장하는 방식이 주류를 이룬다. 경량, 고강도 복합 소재의 압력용기 개발에 힘입어 가장 실용화에 접근하고 있는 기술로서, 압축천연가스버스에서는 208기압 고압용기가 이미 상용화되어 있다. 압축저장기술이 주목받는 이유는, 액화 저장을 제외하고는 저장효율 면에서 월등하고, 액화저장용기의 복잡성 및 단열 등을

5) A Steinfeld A.: Solar Energy, 78, 603 (2005).



[그림 5] 태양-수소 생산의 5가지 경로

고려할 때 시스템 구성이 단순하고 경제적이기 때문이다.

수소는 질량당 에너지 밀도는 높으나 기존 천연가스차량의 4배에 해당하는 800 bar로 압축해도 용적 에너지 밀도는 가솔린의 1/3도 되지 않는다. 하지만, 연료전지의 높은 효율이 이러한 단점을 상쇄한다. 고압수소저장기술은 1회 충전 후 충분한 주행거리를 가질 수 있도록 저장압력을 높이면서도 차량에서 발생할 수 있는 여러 상황에서 사용자의 안전성을 보장할 수 있어야 한다. 현재 ISO 표준이 만들어지고 있는 만큼 단기적으로는 충분히 안전하게 이용할 수 있는 기술로 자리 잡을 것이다.

하지만, 고압저장은 전문가가 아닌 일반인이 다루기에는 불안감을 주는 것이 사실이어서 낮은 압력에서도 효율적으로 수소를 저장하는 기술 즉 고체 및 액체 상태의 저장 기술 개발이 전 세계적으로 이루어지고 있다. 사실, 어떤 형태로 수소를 저장하든 연료전지자동차 입장에서는 안전성, 충분한 수소 저장 능력, 가격경쟁력, 소형 경량화, 내구성, 빠른 충

전 및 안정적인 수소공급 등은 필수조건이다.

① 흡장

고체 저장기술의 하나로서, 상온에서 물질 내부에 수소를 원자상태로 흡수 저장하는 성질을 가진 합금을 이용하는 방식으로 고체저장 방식 중 가장 오래된 방법이다. Ni-MH 2차전지의 음극재료로 이미 널리 사용 중이나 수소저장능력이 비교적 낮은 편이다. 대략 수소저장 능력은 2 ~ 3 wt%로서 350 bar 고압저장시스템보다 낮은 수준이다. 수소흡장시 발열반응으로 충전시간이 길고, 또한 방출시 어느 정도의 온도가 필요하므로 수소 흡/방출 속도 제어를 위한 시스템 최적화가 필요하다.

② 흡착

비표면적이 넓은 나노구조체에 수소를 흡착한다면, 단위 무게당 많은 수소를 저장할 수 있고, 가역적인 수소 흡탈착이 가능할 것으로 예상하는 것은 당연하다. 하지만, 수소는 이원자 분자 중에서 제일

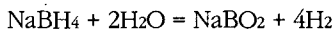


작고, 결합길어도 0.7Å에 불과하며, 가지고 있는 전자도 2개에 불과하다. 기화 온도는 -253°C로 질소보다도 58°C정도 더 낮다. 다른 기체와는 달리, 흡착을 통하여 미세 다공성 물질 안에 가두기가 쉽지 않을 것이란 뜻이다. 몇 년 전, 탄소나노튜브에서의 수소 저장량이 매우 크다는 실험 결과가 발표되었지만, 결국 실험 오류로 귀착될 듯하다. 하지만, 각종 유무기 또는 금속과의 하이브리드 형태의 나노구조체를 이용한 수소 저장 연구가 활발해지는 계기가 되었다. 수소를 다량 저장할 수 있는 구조가 어떤 것이며, 어떤 방식으로 수소가 저장되는가 하는 것조차 아직 명확하지 않아 이론적 계산 및 컴퓨터 모사실험을 통한 재료의 설계 및 선정, 실험적 증명 등을 포함한 노력을 지속하고 있다. 또한 전자개수가 적은 수소와 가장 효과적인 상호 작용력을 보이는 화학종을 찾아 이를 나노구조체에 도입하여 수소저장 능력을 개선하고자 하는 연구도 이루어지고 있다.

③ 화학반응

금속수소화물 또는 수소원자를 함유하고 있는 고체/액체 상태의 공유결합물질의 수소화/탈수소화 반응을 이용해 수소를 저장/방출하는 방법이다. 가역반응과 비가역반응 두 가지로 분류할 수 있는데, 같은 물질을 사용하더라도 단순히 온도와 압력 조건을 바꾸어 수소를 저장/방출하는 가역 방식과 물 또는 알코올과 반응시켜 수소를 발생시키고 이때 생성된 부산물을 회수해 열화학적인 방법으로 재생하는 비가역적인 방법이 있다.

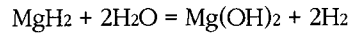
화학수소화물을 물로 산화하는 반응을 이용한 소듐보로하이드라이드(NaBH₄)가 가장 많이 연구된 예이다. 실제 사용 시에는 물과 섞은 슬러리상태로 일련의 반응이 일어나도록 하여 순수한 수소를 발생시키며, 반응속도는 산도(pH)와 촉매로 조절을 하게 된다.



수소발생량도 많고 발생 속도도 빠르게 할 수 있지만, 보로하이드라이드로의 재생은 별도로 이루어져야 하며, 재생에 드는 에너지, 가격, 순환과정은 해결해야 할 과제이다.

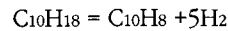
대개 시스템의 부피, 무게, 단순성, 물의 이용 등에 대한 것이 이슈가 되어 왔다.

MgH₂를 물과 반응시켜 Mg(OH)₂와 수소로 만드는 시스템은, MgH₂ 분말을 비수용액상의 슬러리로 하여 사용하지 않을 때는 물과 반응하지 않도록 하여야 한다.



무게비로는 11%에 이르지만, 슬러리 외에 물을 탈재해야 한다는 점과 Mg(OH)₂는 비탑재 상태에서 재생되어야 한다는 단점은 여전히 해결해야 할 점으로 남아 있다.

수소화/탈수소화 반응은 오래전부터 수소저장 수단으로 연구되어 왔다. 예를 들면, 데칼린/나프탈렌 반응은 210°C에서 7.3 wt%의 수소를 발생시킬 수 있다.

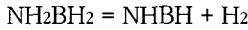
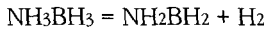


백금 등의 귀금속 촉매는 수소발생을 돕기 위해 사용한다. 이러한 시스템의 이점은 탈수반응이 물을 필요로 하지 않는다는 데 있다. 반응이 흡열반응이기에 연료전지나 내연기관 폐열을 이용하여야 하며, 액체라서 수송이나 주입이 간편하다. 재생 효율과 가격 문제가 중요한 변수가 된다.

수소를 많이 함유한 물질 중 하나가 암모니아이다. 암모니아는 17.8 wt%에 이르는 높은 수소저장량을 지니고 있으며 산업용으로 많이 쓰이기 때문에 수송, 분산, 저장, 이용하는 기술이 잘 확립되어 있다. 또한 암모니아는 25기압 정도면 액화시킬 수 있다. 0°C, 1기압에서 암모니아-공기의 폭발범위가 수소-공기보다 폭이 좁아 상대적으로 안전하며, 암모니아 이용 연료전지 발전은 CO_x와 NO_x를 발생시키지 않는다. 하지만, 큰 단점은 암모니아의 높은 독성이다. 암모니아의 배출허용기준은 시간 가중 평균(TWA, time-weighted average) 25 ppm에 불과하며, 500 ppm이면 호흡기와 접촉을 통해 인체에 매우 유독한 영향을 끼치게 된다. 또한 연료전지의 막에도 영향

을 줄 수 있다. 따라서 암모니아의 수소저장재로의 활용은 우수한 특성에도 불구하고 해결해야 할 점이 많이 남아 있다.

최근 암모니아의 증기압을 낮추기 위해 금속이온과 암모니아를 결합시킨 금속이온염 또는 아민-보란(Amine-Boranes)을 이용함으로써 암모니아를 수소 저장 매체로서 사용하는데 발생할 수 있는 유독성 문제를 해결하는 대안이 제시되고 있다⁶⁷⁾. 아민-보란을 수소저장 매체로서 이용하는 기술은 암모니아를 다른 금속 하이드라이드와 착화합물을 형성시킴으로서 암모니아의 유독성을 제거하고 상온에서도 안정적인 구조를 지니고 있어 냉각이 필요하지 않는 특성을 지니고 있다. 아민-보란 매체는 NaBH₄를 이용한 수소저장기술과 유사한 특성을 지니고 있어 특히 암모니아 분해 또는 개질 시스템이 간편하다.



첫 번째 반응은 120℃ 이하에서 6.1 wt%, 두 번째 반응은 160℃에서 6.5 wt%의 수소가 발생한다. 수소 방출 속도 등과 선택성을 나노크기의 암모니아 보란 입자를 써서 향상시켰다고 발표하고 있다⁶⁸⁾.

수소이용기술

수소에너지 이용기술의 대표 격인 연료전지기술은 가장 활발한 연구가 이루어지고 있는 분야로 IT, 자동차, 잠수함, 항공기 등 다양한 분야의 적용이 가능하다. 연료전지 외에 국내에서 연구되고 있는 분야만을 언급하면 다음과 같다.

(1) 리니어 피스톤 엔진

리니어 발전기와 결합된 2행정 예혼합 압축착화 방식(HCCI)의 프리피스톤 수소 엔진 개발, 프리피스톤

및 제너레이터 모델링 등을 통해, HCCI를 활용한 희박 연소에 의한 NO_x 저감과 압축비 증가로 인한 효율 향상으로 총 발전효율을 50%를 달성하는 것으로 목표로 진행하고 있다. 이러한 연구는 미국, 네덜란드, 호주, 우리나라 등에서 연구되고 있으며, 최종적으로는 실제 시리즈 하이브리드 차량에 적용한 주행 실증도 가능할 것으로 보고 있다.

(2) 센서기술

센서 분야는 충전소나 자동차 등 수소사용 영역이 일반인에게 점차 확대됨에 따른 시장과 안전 확보 측면에서 필요하며, 소형화, 저가화를 목표로 연구되고 있다.

수소 기체의 검지에 관한 연구는 수소에너지의 저장 및 이용 기술과 병행되어 선진국인 미국 일본 독일 및 우리나라에서 연구되고 있다. 광섬유형 수소센서, MEMS에 기초한 팔라듐 합금과 열판 결합형 수소센서, 수소를 연료로 사용하는 자동차의 연료 라인에 이용 가능한 Pd/Ag 합금 고체상 수소센서, MEMS에 기초한 접촉연소식 수소센서, Pd 게이트 FET 수소센서 등의 연구가 수행되고 있다⁶⁹⁾.

마치면서

에너지와 환경 문제를 해결하면서 경제 성장을 지속해 나갈 수 있는가 하는 화두는 에너지의 소비를 줄일 수 있는 신기술의 적용과 지속가능한 에너지에 기반을 둔 경제체제를 요구하고 있다. 수소에너지가 갖는 청정성과 원료 다양성은 수소경제를 꿈꾸고 이를 세계적 규모로 확대하려는 움직임이 21세기 들어 활발히 논의되고 추진되어 왔다.

수소에 대해 거는 우리의 기대는 크다. 이미 과학기술부 21세기 프론티어사업으로 수소에너지사업단(www.h2.re.kr)이 2003년, 산업자원부의 중점사업

6) F. Baitalow et al. "Thermal Decomposition of Ammonia-Borane Under Pressures up to 600 bar" Thermochemica Acta, 2006, 445, 121.
 7) S. D. Benedetto et al. "Effect of Milling and Doping on Decomposition of NH₃BH₃ complex" Thermochemica Acta, 2006, 441, 184.
 8) T. Autrey, Pacific Northwest National Lab.
 9) <http://www.sandia.gov/mstc/technologies/microsensors/techinfo.html>



단으로 수소연료전지사업단(www.h2fc.or.kr)이 출범하였다. 원자력수소(www.hydrogen.re.kr)도 연구되고 있다. 수소는 기술주도형의 에너지매체이기에, 청정하고 안전한 에너지로서 자리 잡을 수 있는 터전을 마련하기 위한 우리들의 노력이 결실을 맺는다면, 우리나라가 자원빈국에서 탈피할 기회로 삼을 수 있다. 하지만, 수소경제의 틀을 이뤄야할 궁극적인 수소제조기술이나 저장기술, 이용 기술 들 뿐만 아니라 기간시설, 표준화 등 각 분야에서 할 일이 많다.

수소제조분야의 도전적인 과제는 태양광과 물만을 이용한 궁극적 수소제조기술이다. 여기에 광촉매, 미생물이나 산화환원 매체가 관여하지만, 광변환 효율이 실용화를 논하기에는 아직 낮은 수준이라는 문제가 있다는 것이다. 생물학적 방법은 시스템이 복잡하다. 생물학적으로 물을 분해하기 위해서는 산화 및 환원 과정이 필요하며, 이 과정에서 복잡한 전자 이동 체계가 자연계에서는 존재하게 된다. 이를 광촉매가 대신하게 함으로서 수소발생 효율을 높일 수 있을까? 광촉매와 바이오 촉매를 결합시킬 때 예상되는 시너지 효과를 노리고 이 둘을 하나로 어우르게 하려는 시도가 국내에서도 이루어지고 있다. 이미 광촉매 제조에는 NT(나노기술)가, 미생물 분야는 새로운 BT(바이오기술)가 응용되고 있으며, 여기에 공학이 접목되어, 효율적인 수소 생산 반응을 일으킬과 동시에 생성된 수소를 최대한 모을 수 있는 장치 기술개발이 이루어진다면, '순수한 자연 에너지를 이용한 수소체제'의 꿈이 현실로 다가오게 될 것

이다.

특히 수소저장기술은 흡탈착이 자유로운 저장소재 활용을 꿈꾸어 왔으며, 이 분야에 나노소재의 역할에 기대하고 있다. 나노 물질이 벌크 크기일 때와는 매우 다른 일련의 특성을 나타냄은 잘 알려진 사실이나, 나노수준의 특성이 벌크 수준에서도 작동될지에 대해서는 미지수이기에 저장기술의 장벽을 뚫을 지는 검토해야 할 일이 많다. 지금까지 값싸고 효율적인 수소저장 기술 분야는 아직 이뤄내지 못한, 도전을 기다리는 영역으로 남아 있다.

수소경제를 언급할 때에 수소는 과연 안전한가 또는 안전하게 사용할 수 있는가에 대하여 질문을 많이 받는다. 수소 역시 가연성가스이기에 특정한 환경과 조건에서는 재앙으로 이어질 사고를 일으킬 수 있기 때문이다. 안전 이용에 대하여 중요한 역할을 해주는 것이 가스 누출 검지기이다. 담배를 피우면서 주유소에서 휘발유 주입하지 않듯이 안전수칙에 맞게 잘 취급한다면 휘발유나 경유 보다 안전할 수 있다. 눈에 보이지도 않고 냄새도 없는 수소의 안전을 보장하려면 검지기는 필수이며, 국내에서도 개발되고 있다.

이미 표준화도 진행되고 있고 실증수준에 까지 이른 기술도 있지만, 전반적인 수소분야의 연구는 기초와 응용단계에 이르는 단계이어서 기술융합, 학제간의 협력이 필요하다. 수많은 세월동안 진화를 거쳐 자연이 이미 터득한 메커니즘을 잘 이해한다면 수소의 활용에 급진전을 가져올 것이다. (●)