

수소 저장 기술 현황 및 전망

김 종 원, 심 규 성, 한 상 도

(한국에너지기술연구원 수소에너지연구센터 책임연구원)

1. 서 론

환경문제 및 화석연료의 가격상승이나 고갈을 예상할 때 궁극적인 미래의 대체에너지원 또는 에너지 매체(energy carrier)인 수소에너지의 제조와 저장·수송분야를 포함한 이용기술의 확보는 미래 21세기 에너지안보 및 국가 경쟁력을 결정하는 중요한 요소가 될 것이다. 수소는 화학제품의 원료 및 화학공장의 공정가스로 널리 사용되고 있어, 오래 전부터 화석연료를 원료로 하여 수소를 제조하는 기술은 상용화되었으며, 산업용으로서의 수소 저장기술은 기존의 기술로도 큰 어려움은 없었다. 하지만, 인류가 꿈꾸고 있는, 무한정인 물을 원료로 하여 수소를 제조하고, 사용 후 다시 물로 재 순환하는 수소에너지시스템이 되어 모든 인류가 일상생활에서 쉽게 이용하도록 하기 위해서는 기존의 석유를 다루듯이 보다 용이한 에너지 저장 기술이 개발되어야 한다.

수소는 상온, 상압에서 기체로 존재하기 때문에 체적당 에너지 밀도가 매우 낮고 액체연료에 비한다면, 저장, 운반이 불편하다는 문제점을 가지고 있다. 따라서 사용에 편리하고 경제적인 수소저장 기술의 개발은 수소에너지의 실용화를 위한 중요한 기술의 하나이다. 수소저장용기로서 가장 이상적인 시스템은 안전하고 많은 양의 수소를 저장할 수 있어야 하는 점을 들 수 있다. 특히 수소를 도시의 대기환경적인 측면에서 이점이 큰 수소자동차 등의 차량용으로 이용하기 위해서는 저장용기가 가볍고, 크기가 작아야 하며, 비교적 값이 싸야 한다.

여러 가지 수소저장시스템의 수소저장능력을 [그림 1]에 비교하여 보았는데, 미국 에너지성(DOE)에서는 수소저장량이 6.5 wt%(62 kgH₂/m³)에 이르면 기존 가솔린엔진과 비교하여도 경제성을 갖출 것으로 보고 이를 목표 수치로 제시하고 있다. 사실 자동차에 있어서는 기존 휘발유나 경유차량에서 볼 수 있듯이, 연료저장에 큰 비중을 두고 있는 않았으며, 간단하고 쉽게 작동되면서 1회 연료 주입에

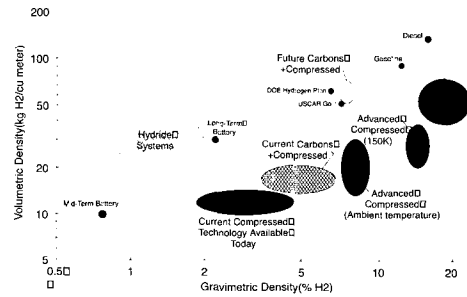


그림 1. 수소저장능력의 비교 [1]

약 500km의 주행이 가능한 시스템을 요구하고 있다. 본고에서는, 지금까지 개발된 수소의 저장 기술과 연구개발중인 여러 가지 기술을 소개하고자 한다.

2. 수소의 저장기술

미래의 에너지 체계는 전기와 가스를 위주로 하여 진행될 것으로 예측하고 있는데, 이차 에너지로서 우수한 특성을 갖는 전기에너지와 수소에너지는 상호 보완적이다. 전기에너지는 저장하기 어려우며, 열에너지로의 변환효율이 낮고, 송전에 의한 전력의 손실이 크다는 등의 결점을 가지고 있다. 발전소는 대형화할수록 경제성이 좋으나 환경보존이나 안전성 등의 이유로 전력 수요처에서 먼 곳에 위치하는 경우에는 송전 설비비가 매우 높고 송전에 의한 전력손실이 증대하여 전력의 단가가 높아진다. 또한 원자력발전에서는 부하변동에 따라 출력조절이 곤란하므로, 잉여전력이 발생하는 경우에는 이용이나 저장 수단이 필요하다. 수소에너지는 전기에너지와 비교하면 경제적이고 효율적인 에너지의 저장 및 수송수단을 가지고 있는 등 전기와 상호 보완적인 역할이 가능한 여러 가지 우수한 특징이 있다. 물의 전기분해에 의해 수소를 제조하는 방법은 전해전력의 변동에 대응

하는 것이 가능하고 전기에너지를 저장성이 좋은 화학에너지로 고효율 변환이 가능하므로 우수한 잉여전력의 저장수단으로 사용될 수 있다. 물의 전기분해 공장의 설비장소에서는 지형적, 지역적 제한이 없다는 등의 이점도 갖추고 있다. 미국의 연구 예에서는 물의 전해수소를 파이프라인에 의해 수송하면, 약 88km 이상의 수송거리에서는 물 전기분해에 추가되는 여분의 비용을 감안하여도 송전선에 의한 수송보다 수소의 파이프라인 수송이 효율적이고 경제적으로 유리할 수도 있음을 확인한 바 있다.

수소에너지 시스템을 실용화하기 위해서는 안전한 수소의 저장과 수송기술의 개발이 중요한 과제이다. 수소는 가장 가벼운 연료이고, 질량당의 에너지밀도는 가솔린, 액화천연가스나 액화석유가스에 비해 매우 높다. 그러나 수소는 비등점이 -252.6°C 로 상온, 상압에서는 기체이고 체적당 저장 가능한 에너지량이 적다. 현재 수소저장 방법으로 액체 수소저장방법, 기체 수소저장방법, 수소저장 합금방법 등이 이용되고 있으나 안정성 및 경제성 면에서 각각 장단점이 있어 새로운 저장기술도 활발히 연구되고 있다.

2.1 기체수소의 고압저장

수소의 저장 방법 중 가장 널리 사용되는 방법이 수소가체를 압축하여 용기에 충전시켜 저장하는 방법이다. 제한된 체적의 용기에 다량의 수소를 채우기 위해 150 ~ 200기압의 고압 수소가스로 하여 저장하게 되는데, 고정식으로는 구형의 대용량 탱크가 이용되고, 소용량의 저장 및 수송용으로는 수소실린더라는 내압 용기가 사용되고 있다. 얇고 가벼운 철강재를 사용한다 해도 용기의 총중량이 커지고 비용도 증가한다. 고압 수소저장용 실린더는 120 ~ 150 기압의 압력으로, 40 l 와 47 l 인 용기를 사용하므로 수소를 약 5~7m³를 저장하게 되며, 이 용기의 총중량은 대략 55kg 이다. 수소를 대량으로 저장할 경우는 저장탱크를 이용하는데, 원통형 및 구형의 것이 많고 재질은 압력용기용 강판 등을 사용하며, 최고 충전압력은 수소실린더보다 훨씬 낮은 5~10 kg/cm² 정도이다. 일반적인 기체수소의 저장탱크의 모양은 (그림 2) 및 (그림 3)과 같다.

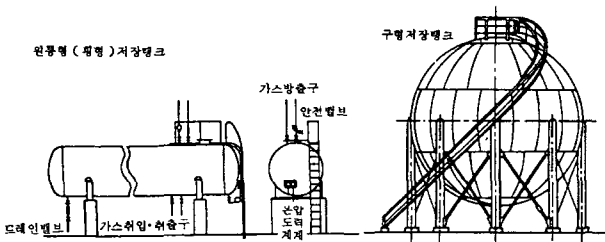


그림 2. 원통형 및 구형 액체수소 저장탱크 외관도^[2]

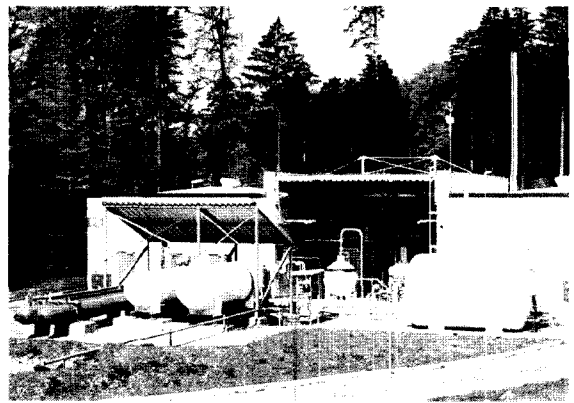


그림 3. 수소 고압저장 설비 (Linde 사 자료)

기체수소 및 액체수소의 수송은 (그림 4)와 같이, 파이프라인, 일반용기, 집결용기, 탱크로리 및 탱커 등 다양한 방법이 사용되고 있는데, 파이프라인(Pipe line)에 의한 수소의 수송은 가장 보편화된 수소의 수송기술로 기체수소의 경우는 기존의 천연가스나 도시가스와 같이 파이프라인에 의해 쉽게 수소를 수송할 수 있다. 그러나 액체수소의 경우는 공장부지내 정도의 가까운 거리가 아니면 기화손실이 커서 사용하기가 어렵다.

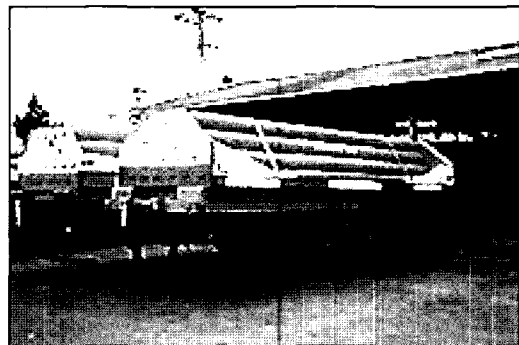


그림 4. 고압수소 수송차량 및 파이프라인 수송 (덕양가스 자료)

고압용기는 대부분 고강도 철강합금이 활용되고 있으나, 최근 섬유로 보강한 복합재료 기술이 개발되고 있어, 차량 탑재용인 경우 중량대 체적비가 0.5~0.4까지 경량화가 가능하다. (철강실린더의 경우 1.15~0.7) 가격도 2~3배 비싸져 비용저감 노력이 필요하다.

2.2 수소의 액화 저장 기술

1898년에 최초로 영국의 왕립과학연구소 듀어(Dewar, J.)에 의해 수소의 액화가 성공적으로 이루어졌으며, 이에 앞서 1892년에는 저온의 액체를 넣는 용기를 발명하여 그 속에 액체수소를 저장하면 오랜 시간동안 증발하지 않도록 되어 있어 저온에서의 과학진보에 크게 기여하였다. 이것을 듀어병이라고 부른다. 공업적인 규모의 액화는 미국의 경우 1950년대 말, 유럽은 1966년, 일본은 1978년에 우주개발용 로켓의 연료로 사용되기 시작되면서부터이다. 1970년대에 들어서 미국의 우주개발이 이루어지면서 공업용 수소가스 시장에 액체수소가 등장하였다.

수소를 -253℃ 의 극저온으로 액화시키면 상압에서의 기체수소에 비해 체적은 1/800로 할 수 있다. 액체수소는 고압수소로 만들고, 액화공정에서 수소 1kg당 10~14kW의

전력을 필요로 한다. 또한 액체수소는 쉽게 증발되므로, 단열성이 좋은 특수한 용기에만 저장할 수 있으므로 저장 이용에 많은 비용이 소요된다. 액화수소 저장탱크는 액화수소 저장용기와 같이 내조와 외조의 이중구조로 되어 있으며, 단열방법으로는 퍼얼라이트 충전 진공단열 또는 적층 진공 단열방법이 사용된다. 재질은 오스티나이트계 스테인레스강(SUS-304)으로 용량 1,000 l~100,000 l의 원통형과 구형이 가장 많이 사용되고 있다.^[3]

용기의 단열성능은 액체수소를 장기간 저장할 경우 기화손실을 줄이는데 큰 역할을 하므로, 내용기와 외용기 사이를 적층 진공 단열한 용기들이 개발되고 있으며, 내용기와 외용기는 이동시 진동과 충격에 대해서도 충분히 견딜 수 있는 구조로 되어 있으며, 그 구조를 [그림 5]에 보였다.

독일의 자동차회사인 BMW에서는 액체저장 방법이 무게 또는 체적당 저장에너지의 크기면에서 유리한 것으로 평가하고 있는데, 연료 저장 무게를 비교하면 <표 1>과 같이 요약될 수 있다.

수소액화에 필요한 기술은 -253℃ 이하의 온도를 구현할 수 있는 냉각기술, ortho수소를 para수소로 변환하는 기술, 수소를 정제하는 기술 등과, 저장을 위한 여러 가지 단

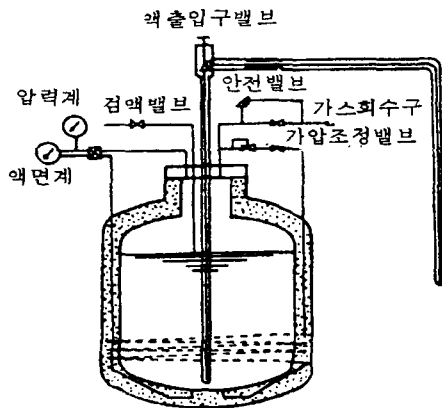


그림 5. 액체수소 저장용기^[2] 및 액체수소 수송차량 (Linde사 자료)

표 1. 연료저장 무게 비교

저장방법	연 료		용기무게(kg)	총중량(kg)
	체적(l)	무게(kg)		
휘발유	30	22	5	27
고압수소	670	8.2	755	763
액체수소	115	8.2	65	73
금속수소화물		8.2	764	772

열기술이 또한 중요한 기술이다. 2원자 분자인 수소분자의 두 원자의 스핀이 같은 방향이면 ortho, 반대방향이면 para수소인데 상온에서는 75:25, -253℃에서는 0.2:99.8의 비율로 평형을 이룬다. 온도가 낮아지면서 ortho에서 para로 변환되며, 발열과정이기 때문에 액체에 의한 저장효과를 얻으려면, 충분한 양만큼 ortho에서 para로 변환되어야 한다. 국내에서는 한국과학기술연구원에서 수소액화 및 저장시스템의 기본 설계기술 및 기술적 타당성을 검토하고, 실험실적 규모의 실험을, 홍익대에서는 수소액화시스템 시뮬레이션에 대한 연구를 수행한 바 있다.⁴⁾

2.3 수소저장합금에 의한 수소의 저장

수소저장합금이란 다량의 수소를 가역적으로 흡수(저장) 및 방출(이용)할 수 있는 능력을 가진 합금을 말하며, 금속 수소화물(MH, metal hydride)이란 수소저장합금과 수소의 화합물로서 수소저장합금이 수소를 흡수하면 금속수소화물이 된다.

수소저장합금(M)과 수소가스(H)가 반응하여 고체상태의 금속수소화물을 형성하는 반응에 대한 반응식은 $M + \frac{1}{2}H_2 \rightarrow MH + Q$ 로 나타낼 수 있다. 이 반응은 가역적이며, 금속수소화물의 형성시에는 반응열 Q를 방출하고 분해시에는 반응열 Q를 흡수하게 된다.

금속중에는 수소와의 친화력이 매우 커서 안정한 수소화물을 형성하는 원소, 수소와의 친화력은 있으나 수소화물을 형성하기 위해서는 매우 높은 수소압력이 필요한 발열반응형 원소, 그리고 수소와의 친화력이 거의 없는 흡열반응형 원소 등이 있다. 어떤 금속이 수소저장재료로 사용되기 위해서는 상온, 상압 부근에서 수소를 가역적으로 흡수, 방출할 수 있어야 한다. 그런데 순금속 수소화물은 너무 안정하고, 다른 순금속들은 수소와의 친화력이 너무 약해 이 두가지 종류의 원소들로 구성된 금속간화합물(intermetallic compound)을 이용하는 경우가 대부분이다. <표 2>에서 보

는 바와 같이 갖가지 금속수소화물들이 액체수소 이상의 밀도로 수소를 저장할 수 있으므로, 고압가스로 수소를 저장하는 것보다 저장효율 향상이 기대되어 많은 금속수소화물의 개발이 이루어지고 있으며, NaAlH₄ 등 보다 경량의 소재를 얻기 위한 노력이 꾸준히 이어지고 있다.⁵⁾

일반적으로 수소의 흡수 및 방출 반응은, 수소의 압력과 관계가 있으므로 온도 및 압력을 조절하여 수소를 저장하거나 저장된 수소를 다시 방출시킬 수 있다.

수소는 금속 또는 합금 중에서 어떻게 저장되고, 어떠한 상태로 금속수소화물을 형성하고 있으며, 어떤 금속이 수소를 저장하기 쉽고, 또 방출능력을 높이는 것인지를 살펴보면 다음과 같다. 수소는 스핀지의 외형이 변형되지 않고 물을 흡수하듯이 금속 중으로 저장된다. 이는 금속의 원자크기가 수소원자에 비해 월등히 크므로 금속결합의 틈 사이에 쉽게 수소가 들어갈 수 있기 때문이다. (그림 6)에서 보는 바와 같이 수소(H₂)가 금속과 접촉되면, 먼저 금속표면에 흡착이 이루어지고, 분자상으로 물리흡착한 수소의 H-H결합이 절단되어 그림에 나타난 것처럼 원자상 수소(H)로 분리하고, 금속원자와 금속원자사이에 존재하는 "틈"(결정격

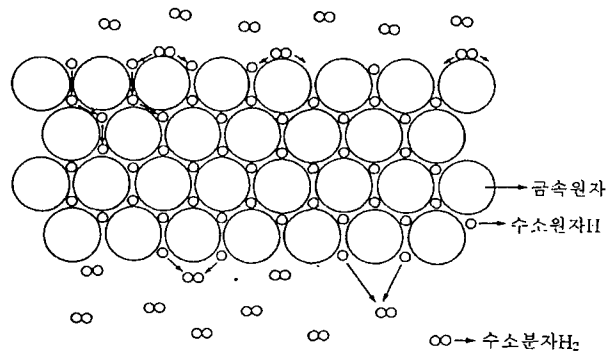


그림 6. 수소의 저장·방출 메커니즘

표 2. 기체, 액체, 고체수소와 금속수소화물의 밀도와 수소함량

매체	밀도(g/cm ³)	수소함량(wt%)	원자수 H/cm ³ (10 ²²)
H ₂ (액체)	0.07	100	4.2
H ₂ (기체, 150기압, 20℃)	0.012	100	0.38
NH ₃ (액체)	0.6	17.7	6.5
MgH ₂	1.4	7.6	6.7
TiH ₂	3.8	4.0	9.1
VH ₂	2.9	2.08	11.37
Mg ₂ NiH ₄	2.6	3.6	5.6
FeTiH _{1.95}	6.1	1.52	5.5
LaNi ₅ H ₆	8.25	1.37	6.76

자간 위치)으로 들어가고 내부에 확산하게 되는 것이다. 이렇게 하여 금속원자의 결합사이에 수소원자가 일정농도 이상 채워진 부분은 금속수소화물로 상변화를 하게 된다. 수소의 방출반응은 이러한 반응과정이 역으로 일어나는 것으로, 수소원자는 먼저 금속표면에서 수소분자로 되어 방출하게 되는 것이다. 실제 사용에서는 금속 또는 합금의 표면적을 크게 하기 위해 분말상으로 하여 이용하고 있으며, 수소가스와 반응 속도를 증가시키기 위한 연구가 수행되고 있다. 수소저장 용도로 사용되는 수소저장합금은 이런 각각의 반응과정이 모두 가역적으로 빠르게 열역학적인 평형상태에 도달할 수 있는 것에 한정되고 있다.

따라서, 수소저장 재료로서 금속수소화물은 활성화가 용이할 것, 수소의 저장능력이 클 것, 수소의 흡수 및 방출속도가 클 것, 사용온도에 적합한 생성열(반응열)을 가지고 있을 것, 수소의 흡수와 방출과정에서 평탄압력을 나타내는 영역이 크고, 그 경사도가 작을 것, 수소의 반복적인 흡수와 저장에 따라 열화되지 않을 것, 불순가스에 대한 내피독성이 클 것, 가격이 저렴하고 가벼울 것, 그리고 합금의 미분화가 작고, 내구성이 우수할 것 등의 특성을 요구하고 있다.

2.3.1 수소저장합금의 에너지변환과 응용분야

수소저장합금의 응용분야는 상당히 넓다. 즉, 수소저장합금의 수소저장성을 이용하는 방법, 수소저장합금이 수소를 흡수, 방출할 때에 발생하는 열량을 이용하는 방법, 수소를 에너지원으로 이용하는 방법, 수소의 정제에 이용하는 방법 등을 통하여 많은 분야에 응용할 수 있다.

수소저장합금의 응용으로 최초로 착안한 것은 합금에 수소가스를 저장·수송하는 방법이다. 이 방법은 합금이 수소와 반응하여 금속수소화물 형태로 수소를 저장하고, 가열 또는 감압하면 수소를 방출한다는 성질을 이용하는 것이다. 1970년 초반부터 이런 합금의 성질을 응용하여 수소저장·수송용기, 수소자동차용 연료탱크, 수소분리·정제장치 등의 개발이 진행되고 있으며, 몇 가지 분야에서는 상용화도 이루어지고 있다.

한편 수소저장합금은 가역적으로 수소를 저장·방출하는 능력을 갖고 있으며, 그 반응속도도 빠르고, 저장시에 발열·방출시에 흡열을 수반한다는 성질로부터 에너지변환기능을 갖는 재료로서도 주목을 받고 있다. 1980년대에 들어서부터 합금을 이용한 축열장치, 히트펌프, 냉·난방장치, 냉동시스템, 압축기, 니켈-수소 2차전지 등의 개발이 왕성하게 진행되고 있으며, 최근에는 상온핵융합의 중수전해법의 음극재료로서도 이용되고 있다. 이것은 수소저장합금이 수소라는 화학에너지를 열, 기계 또는 전기에너지로 변환하는 에너지변환 재료로서 이용되고 있는 것이다. 이렇게 수

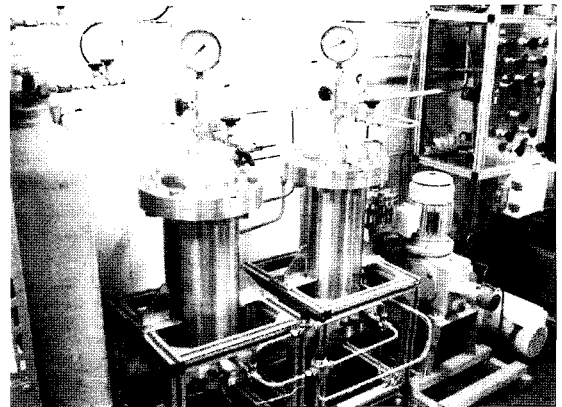


그림 7. 금속수소화물을 이용한 열수송 이용 실험 장치
(자료 : 한국에너지기술연구원)

소의 저장·수송기술이 이외의 응용분야로 합금의 이용이 차후의 에너지분야로 크게 기대되고 있는데, [그림 7]에 열수송 분야에 응용한 장치의 예를 보였다.

2.3.2 금속수소화물에 의한 수소저장시 문제점

금속수소화물을 이용한 수소저장 장치는 수소 저장시에는 발생하는 열을 제거하여 주어야 하며, 수소 방출시에는 여기에 필요한 열을 외부에서 공급하여주는 장치가 필요하다. 이 경우에 장치내에서 열교환이 높은 효율로 이루어지도록 장치의 구조를 결정하여야 한다. 또한 안전대책 기술도 고려하여야 한다. 즉 이들 합금은 수소의 흡수와 방출이

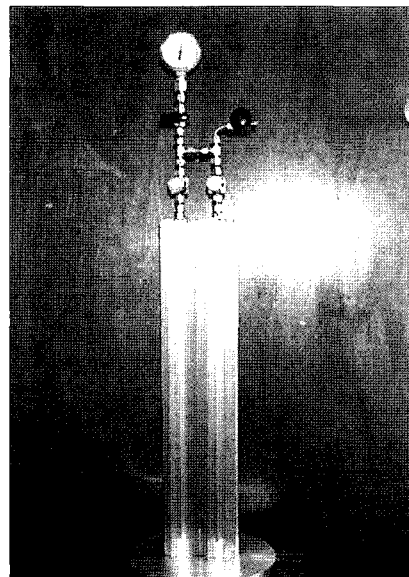


그림 8. 금속수소화물을 이용한 500g 저장탱크의 시제품
(자료 : 한국에너지기술연구원)

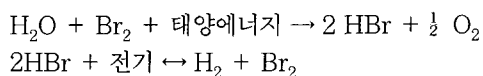
계속되면 팽창과 수축이 반복되어 미분화되므로 장치내에서 합금의 충전밀도가 높게되어 전열효율이 저하된다. 이에 따라 국부적인 응력이 걸리며, 그 결과 용기의 변형을 일으키기도 하고, 이것에 의해 수소 누설의 원인이 될 우려도 생긴다. 또 미분화된 금속수소화물이 방출되는 수소가스 중에 혼입되어 파이프나 밸브가 막히는 원인이 될 수도 있다. 미분화된 합금은 공기중에서 발화하며, 또 분진폭발을 일으키기도 한다. 금속수소화물의 분진폭발 하한계 농도, 분진폭발 압력 및 압력상승 속도 등에 대해서는 연구가 이루어지고 있다. 수소의 저장에 적합한 합금을 제조하고, 이들 합금을 저장할 수 있는 탱크의 제작, 그리고 합금과 저장되는 수소의 열출입에 따른 열출입시스템이 필요하므로, 저가이면서도 가볍고 수소저장 능력이 우수한 합금의 개발과 저장 탱크에서 수소저장합금과의 열전달을 향상시킬 수 있는 기술이 중요하며, (그림 8)에 열출입을 고려하여 설계 제작한 금속수소화물을 이용한 수소저장용기의 사진을 보였다.

3. 기타 저장기술

지금까지는 실용화되었거나 실증이 이루어지고 있는 단계의 기술에 대하여 서술하였으나, 이외에도 기존 방법의 결점을 보완하기 위하여 여러 가지 기술이 연구이며, 대표적인 예는 다음과 같다.

3.1 화합물 이용 기술

수소와 질소를 사산화철과 알루미늄의 혼합촉매에서 200~1,000기압과 400~700℃ 온도에서 반응시키면 암모니아(NH₃)를 얻을 수 있다. (N₂ + 3H₂ → 2 NH₃) 암모니아는 1기압, -33.3℃에서 액화가 가능하므로, 대량의 수소를 액화 및 수송이 용이한 암모니아의 형태로 저장, 수송하고 수요처에서 이를 다시 수소와 질소로 분해시켜 수소를 이용할 수 있을 것이다. 메탄올이나 에탄올 등은 부피로 보면 액체 수소보다 더 많은 수소를 함유하고 있으며, 이를 고온에서 수증기 개질하면 수소를 얻을 수 있으므로 메탄올 합성 반응 등 많은 화학반응들이 고려되고 있다. 이밖에도 수소와 브롬을 이용한 수소저장기술이 미국의 에너지성 프로그램으로 진행되고 있는 등 다양한 기술이 태양에너지의 저장수단으로서 또는 태양에너지 이용기술로서 연구 중이다.⁶⁾



3.2 제올라이트 이용 기술

제올라이트는 3차원 골격구조를 가지고 있으므로 이들의

미세 결정체들은 전체부피의 약 50%가 빈 공간인 동공(Cavity)으로 구성되어 있고, 이들 동공들은 3차원으로 연결되어 각종 분자차원의 입구를 가진 Channel과 Window들을 형성하므로 분자체로서도 현재 많이 사용되고 있다⁷⁾. 이러한 제올라이트의 물리화학적 특성과 분말이라는 물리적인 특성을 이용하여 수소의 저장시스템으로 활용하고자 하는 연구들이 1960년대 초부터 시작되었는데, 미국의 Sandra Laboratory에서는 제올라이트와 함께 구조화합물을 이용한 연구가 진행되고 있으며⁸⁻⁹⁾, 이스라엘의 Weizmann Institute에서는 합성 제올라이트 A를 이용한 수소의 캡슐화가 연구 중에 있다⁹⁾. 제올라이트의 동공들은 분자차원의 크기이므로 수소기체 분자들을 고농도로 저장할 수 있어서 수소기체의 안전한 취급 및 정량과 미량의 사용을 가능하게 하고, 저장시 수반되는 분리효과로 고순도 수소기체를 얻을 수 있다.

3.3 나노구조탄소재 이용 기술

나노구조를 가지는 탄소재료는 단일벽나노튜브(SWNT), 다중벽나노튜브(MWNT), 탄소나노파이버(CNF), graphite nanofiber(GNF), vapor-grown carbon fiber(VGCF)등 탄소재료의 구조형태 및 제조 방법에 따라서 분류하는데, 일반적으로 탄소나노튜브(CNT)라고 불리는 것은 SWNT, MWNT를 일컫는다. CNT는 주로 아크 방전 및 레이저 증착, 화학기상증착법으로 제조하며 결정성이 우수하다. SWNT의 경우는 단일벽으로 이루어져 있고 1~1.4nm 이하의 직경을 가진 반면 MWNT의 경우는 흔히 2~30 개의 흑연층으로 이루어진 다중벽을 가지면서 그 직경이 10~50nm 정도이다⁶⁾. CNF 및 GNF, VGCF는 용어의 쓰임에 있어서 자주 혼동되어 사용되고 있으며 주로 메탄, 아세틸렌, 벤젠 등 탄화수소를 촉매금속의 열분해 방법을 이용하여 합성한다. CNT에 비해 직경이 수십 nm 이상으로 상당히 크고 성장 방법에 따라서 파이버 내부가 비어있거나 혹은 막혀 있기도 한다. 이중 특히 직경이 100nm 이상일 경우에 특별히 VGCF라고 명하고 있다¹⁰⁾. 지금까지 발표된 나노구조 탄소재료의 수소저장특성을 <표 3>에 나타내었는데, 수소저장량이 현저한 차이를 보임을 알 수 있고 또 초기에 발표된 경우보다 조금씩 수소저장량이 감소하는 경향을 보여 주었다. 사용한 재료의 특성에 따라 수소저장량이 다르고 또 같은 재료라고 해도 실험방법에 따라 수소저장특성이 다른 것을 감안한다 할지라도 그 차이가 상당히 크게 나타났다.

다양한 결정구조를 갖는 탄소재료의 수소저장특성과 수소저장방법 등을 고찰해 볼 때, 많은 연구 결과들이 이미 미국 에너지성(DOE)의 목표를 초과하는 연구결과를 보고한 반

표 3. 다양한 탄소재료의 수소저장량 비교⁽¹¹⁾

Material	Gravimetric hydrogen storage amount(wt%)	Storage temp. (K)	Storage Pressure(Mpa)
SWNTs (low purity)	5-10	273	0.040
SWNTs (high purity)	3.5~4.5	298	0.040
GNFs (tubular)	11.26	298	11.35
GNFs (herring bone)	67.55	298	11.35
GNFs (platelet)	53.68	298	11.35
Li-MWNTs	20.0	~473-673	0.1
K-MWNTs	14.0	<313	0.1
SWNTs (high purity)	8.25	80	7.18
SWNTs (50%)	4.2	300	10.1
CNFs	~10	300	10.1
CNFs	~5	300	10.1
Li-MWNTs	~2.5	~473-673	0.1
K-MWNTs	~1.8	<313	0.1
Li/K-GNTs(SWNT)	~10	300	8~12
GNFs	~10	300	8~12
GNFs	6.5	~300	~12
MWNTs	~5	~300	~10
SWNTs	~0.1	300~520	0.1
MWNTs (electro-chemical)	<1	-	-
Nano-structured graphite	7.4	~300	1.0
SWNT (50-70% purity, electro-chemical)	~2	-	-

면, 탄소재료의 수소저장 재료로서의 가능성을 확신하기 위해서는 아직도 연구해야 할 많은 문제점들이 남아있다고 지적하고 있다. 효율적 수소저장 방법이 값 싼 수소제조 방법과 함께 수소에너지 시대를 열 중요한 기술이므로 앞에선 언급한 탄소재료의 문제점이 해결된다면 수소를 에너지로 이용하는데 큰 역할을 할 것이나 아직도 많은 연구와 노력이 필요하다. 탄소재료에 수소저장 상용화를 위해서는, 수소저장에 유리한 구조와 그 적정 조건을 찾는 연구, 나노구조 탄소재료의 대량생산 및 고순도를 갖는 정제기술 개발, 수소저장 메커니즘 규명 및 수소저장이 발생하는 장소를 찾는 연구, 후처리기술(표면처리, 도핑)등을 통한 수소저장량 향상, 그리고 수소저장 중 또는 후의 탄소나노튜브의 물성 변화 등의 연구가 필요하다.⁽¹¹⁾

이밖에도 나노크기의 기공을 제어한 탄소나노구조체를 이용한 수소저장기술이 한국에너지기술연구원에서 이루어지고 있으며⁽¹²⁾, 또한 플로렌(C₆₀)이 플로렌 하이드라이드(C₆₀Hx) 형태로 하면 7.7Wt %까지 수소를 저장할 수 있다는 가능성 때문에 연구중이다.⁽¹³⁾

3.4 glass 이용 기술

속이 빈 작은 구형 유리 입자들(hollow glass microspheres)이 수소를 안전하게 저장하는 데 사용될 수 있다. 유리구 속 빈 공간에 수소를 채울 때는 유리구 벽의 수소투과도를 높이기 위하여 유리구 입자들을 가열한 상태에서(100~400℃) 고압 수소 가스 속에 두게 되며, 이후 다시 냉각시키면 수소가 유리구들 속에 갇히게 된다. 유리

구 속에 갇혀있는 수소를 다시 유리구들로부터 방출시키려면 온도(heating때의 온도보다 낮아도 됨)를 증가시키면 된다. 이 방법의 특징은 ① 안전성이 매우 높고, ② 오염에 대한 저항성이 크고, ③ 저압에서 수소를 저장할 수 있다는 것으로 요약된다. 원리적으로 >10wt% H₂의 수소 저장능력과, 저가격화를 달성할 수 있는 잠재력을 가진 것으로 평가되며, 미세 유리구의 합성, 가공 및 수소 흡수/방출 때의 열 및 압력 조절 등이 고려 사항이다. 상업적으로 제조 가능한 미세 유리구들의 크기는 직경 5~200 μ m, 유리구 벽 두께는 0.5~2 μ m이며, 분말로 제조된다.

3.5 기타 연구중인 기술

수소저장능력을 높이기 위한 노력의 일환으로 고분자에 분산시킨 수소저장합금을 이용하는 시도도 이루어지고 있다. 저밀도의 고분자에 수소저장합금을 분산시켜 분자 수준에서 상호 연계시킴으로써 수소저장특성을 갖게 하면서, 더 많은 수소를 고분자 구조체에 저장시키고자 한 것인데, 아직은 수소저장수준이 그리 높지 않다.^[14] 또한 전도성 고분자를 이용한 수소저장 기술이 한국에너지기술연구원에서도 그 가능성을 높이 평가하여 연구중이다.^[15]

4. 마치면서

수소에너지를 효율적으로 이용하기 위한 수소의 저장기술에 대하여 요약하였다. 현재까지 고압기체, 액화, 수소저장합금 등의 매체를 이용한 다양한 수소저장 기술이 개발되어 실용화 단계에 이르고 있으나, 수소저장합금, 탄소재 등은 중량당 수소저장용량이 수요자의 요구에 미치지 못하여 아직 범용화되지 못하고 있는 실정이다. 또한, 수소의 사용처나 사용 목적에 따라 경제성을 갖추기 위해서는 지속적인 연구개발이 필요한 상태이다. 특히 자동차용의 수소저장장치는 일반인을 대상으로 하고 있는 만큼, 무엇보다 안전하여야 하며, 주행거리나 중량, 공간 등을 고려하여 경량화 및 소형화가 필수적이며, 가격도 저렴하여야 한다. 따라서 수소를 잘 아는 전문가들이 다루는 산업용의 수소 저장방법보다도 보다 엄격한 기준이 적용된다 할 것이다. 이미 2004년부터는 수소자동차의 시제품이 출현될 전망이기는 하지만, 아직 경제성과 안전성 등을 고루 갖춘 실용적 수소 저장장치의 시장 진출은 다소 시일이 요구될 것이다.

참 고 문 헌

[1] S. Hynek, W. Fuller, J. Bentley, Hydrogen storage by carbon sorption, Int. J. Hydrogen Energy, 22 (1997) 601.

[2] 수소안전기술, 한국가스공사 (1988).

[3] 심규성 외; 수소의 저장 및 수송기술 연구, 한국에너지기술연구원 보고서 (KIER-982224 /1) (1998.12).

[4] 남기석 외; 수소에너지기술, 에너지관리공단 수소에너지연구회, (2001.2).

[5] K.J.Gross, G.J.Thomas, E.Majzoub and G.Sandrock: "Light weight hydride development" in proceeding of the 2001 DOE Hydrogen Program Review, NREL/CP-570-30535.

[6] R.Parker and W.L.Clapper, Jr: "Hydrogen based utility energy storage", in proceeding of the 2001 DOE Hydrogen Program Review, NREL/CP-570-30535.

[7] Breck, D.W., "Zeolite Molecular Sieves: Structure chemistry and use": John Wiley & Sons, New York, N.Y., 634-641 (1974).

[8] U.S. NTIS Pubilshed searches, ps 79-0582 (SAND-75-8040) (1975).

[9] U.S. NTIS Pubilshed searches, ps 79-0582 (SAND-76-8206) (1976).

[10] M. Endo, K. Takeuchi, K. Kobori, K. Takahashi, H. Kroto, N. Rodriguez: "Hydrogen storage in graphite nanofibers", J.Phys.Chem.B. 102(22) (1998).

[11] 황준연, 최정운, 심규성, 김종원: "나노구조 탄소재료의 수소저장에 관한 고찰", 수소에너지, 12 (2) 103-120 (2001).

[12] 김종원, 조성준, 김태환 외; "탄소계 신소재 이용 수소저장 기술개발", KIER-A02401, 한국에너지기술연구원 보고서 (2001).

[13] R.O.Loutfy and F.M.Wexler: "Feasibility of fullerene hydride as a high capacity hydrogen storage material", in proceeding of the 2001 DOE Hydrogen Program Review, NREL/CP-570-30535.

[14] W.R.Schmidt: "Hydrogen storage in polymer-dispersed metal hydrides (PDMH)", in proceeding of the 2001 DOE Hydrogen Program Review, NREL/CP-570-30535.

[15] 조성준, 송광섭, 김종원, 김태환, 추고연: "신규 수소 저장재료로서의 전도성 고분자를 이용한 수소저장 특성 연구", 한국수소에너지학회 추계학술발표회 (2001).

〈 저 자 소개 〉



김종원(金鍾元)

1978년 연세대학교 화학공학과(학사). 1980년 한국과학기술원 화학공정공학과(석사). 1987년 한국과학기술원 화학공학과(박사). 현재 한국에너지기술연구원 책임연구원, 수소에너지연구센터장. 과기부 국책사업 고효율수소제조기술개발사업단장, 한국수소에너지학회 감사.



심규성(沈揆聖)

1970년 성균관대 화학과(학사). 1979년 성균관대 화학공학과(석사). 1988년 프랑스 루이파스퇴르대(박사). 현재 한국에너지기술연구원 책임연구원, 한국수소에너지학회 고문.



한상도(韓相道)

1975 경북대 물리학과(학사). 1982 충남대 물리학과(석사). 1994 프랑스 보르도대(박사). 현재 한국에너지기술연구원 책임연구원, 한국센서학회 이사.