

나노 물질을 이용한 수소 저장

Hydrogen Storage Using Nano-Materials

IT-에너지 융합부품소재 특집

유한영 (H.Y. Yu)	차세대에너지기술연구팀 선임연구원
김병훈 (B.H. Kim)	차세대에너지기술연구팀 Post-Doc.
오순영 (S.Y. Oh)	차세대에너지기술연구팀 선임연구원
윤용주 (Y.J. Yun)	차세대에너지기술연구팀 선임연구원

목 차

-
- I . 서론
 - II . 수소 에너지
 - III . 나노 물질을 이용한 수소 저장
 - IV . 앞으로의 전망

지구상에 존재하는 화석연료는 산업혁명 이후 그 사용에 있어서 지속적인 증가 추세를 유지하여 왔고, 급기야는 그 잔존량의 고갈 및 이들 연료의 사용으로 인한 지구의 대기 오염 등을 유발하고 있다. 이에 따라 새로운 에너지원, 즉 태양 에너지, 수소 에너지, 바이오 에너지 등에 그 활용 시각이 돌러지게 되었으며 이들은 다음 세대의 전인류적 에너지원으로 활용될 가능성이 원유 가격의 상승에 따라 점점 높아지고 있다. 이들 대체 에너지 중에서 수소 에너지는 지구뿐만 아니라 우주적으로 현존량이 가장 많은 에너지로 알려져 왔으며 이러한 수소 에너지 활성화를 위하여 무엇보다도 중요한 것이 수소 저장 능력에 관한 것이다. 본 분석에서는 이러한 수소 에너지를 비롯한 수소 저장에 대한 내용을 다루고 있으며 앞으로의 수소 저장 방향에 대해서 또한 언급한다.

I. 서론

인간은 지구가 그 태생으로 이룩하여온 활용 가능한 에너지를 그들 본분이 가지고 있는 원천적 요구사항을 벗어나 욕심 어린 활용으로 그 활용 끝 지점 문제 봉착이라는 위기를 스스로 맞이하고 있다. 이러한 위기의 극복을 위하여 에너지 흐름의 최대 효율성 도달, 지구 에너지 문제의 환경 친화적 물질 응용에 대한 연구 및 활용이 다각적으로 모색되고 있으며 수소 에너지 또한 그 해결책의 하나로 간주되고 있다. 그러나 이러한 수소 또한 기존의 지구가 이룩해 놓은 에너지 저장고를 그대로 유지한다는 단점이 있어 실질적으로 수소가 앞으로 대두되는 새로운 대체에너지 구실을 할 수 있는지에 대한 의구심은 많이 일고 있지만 수소를 생산하는 기반 자체를 친환경적인 방법으로 이룩하고자 하는 노력이 있으므로 어느 정도 수소가 친환경 대체에너지로 명명된다 하더라도 그 문제점은 미약하다고 볼 것이다.

II. 수소 에너지

1. 수소

수소는 주기율표 상에서 원자 번호는 1번이고 원자량은 1.00794 g/mol이다. 수소의 물리적 특성은 녹는 점은 14.01 K, 끓는 점은 20.28 K로 극단적인 경우를 제외하고는 일상적인 상온에서는 가스 형태의 상을 가지게 된다. 비록 수소는 대기 중에서는 1 ppm 이하로 극미량으로 존재하지만 우주적인 입장으로 본다면 그 양이 전체 우주 원소 질량의 75% 정도 차지하게 되어 우주의 대부분 물질은 수소로 이루어져 있다 하여도 과언은 아니다.

이러한 수소는 기본적으로 태워서 에너지를 발생하게 될 때 일반적으로 사용하는 가솔린 열량의 세 배에 달하는 열량을 방출한다. 이러한 고열량으로 인하여 가솔린 기관을 수소를 이용한 기관으로 대체하게 될 때 가솔린 보다 높은 열효율을 발생하게 되어 고효율 기관을 만들 수 있게 된다. 또한 수소는

손쉽게 연료 전지 등과 같은 방법을 이용하여 전기를 생산할 수 있기 때문에 수소는 에너지 면에서 전기와 동등한 역할을 수행할 수 있다. 즉 전기는 발전소를 통하여 생산하고 전선을 통한 이송 그리고 활용을 하게 되는데 수소는 이와 같은 에너지 이송을 연속적인 전선을 통하여 이루는 것이 아니라 단독적인 전력 생산이 가능하기 때문에 수소는 독립적인 에너지원이지만 전기와 같은 수준의 에너지 등급으로 볼 수 있다.

더불어 수소는 공기와의 부피비로 4% 이상 96% 이하로 존재하게 되고 560도 이상의 열이 공급되었을 때 수소는 자연적으로 폭발하게 된다. 이러한 폭발성 때문에 일반적으로 수소는 폭발성 가스로 분류가 되고 수소의 사용에 대한 인식이 위험하다는 데 편향되어 있다.

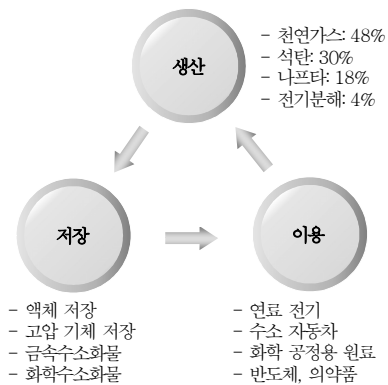
그러나, 수소의 위험성은 수소와 산소의 결합에 따른 폭발 보다는 수소가 가스로서 가지는 특성으로의 위험성이 더 크다. 즉 가스는 일반적인 가스 상태의 물질보다 물질을 보관하고 있는 용기의 흡입에 따라서 분출하는 보관 물질의 배출이 국소적인 부분에 압력이 가해짐으로써 그 위험성이 존재한다. 이로 인하여 가스 상태의 물질은 폭발 시에 액체보다 그 위험성이 크다. 이와 마찬가지로 수소 또한 산소와의 결합에 의한 폭발보다는 위와 같은 가스 폭발에 의한 위험이 훨씬 크다. 또한 수소가 산소와 만나 폭발하기 위해서는 국소적으로 그 비율이 맞아야 하는데, 수소의 분자량이 극히 작음으로 인해 수소의 운동 속도는 그와 반비례하여 여타 가스보다 훨씬 크다. 이로 인하여 수소가 배출되었을 때에는 그 분자 속도로 인해 급격히 공간으로 퍼져 폭발의 위험은 그만큼 줄어든다.

또한 이러한 위험성은 모두 가스 형태의 수소가 가지는 것으로 수소를 고체 표면에 고정하여 이용하는 고체 저장 방법을 사용하게 되면 이러한 위험 또한 사라진다. 즉, 수소를 금속 수화물 형태로 저장하고 이용하고자 할 때 수소의 배출은 흡열 반응을 일으키기 때문에 수소의 위험성은 그만큼 줄어든다고 볼 수 있다.

2. 수소 경제

수소의 이용도를 보편화하여 수소를 원료로 한 수소 경제를 활성화하기 위해서는 (그림 1)에서와 같이 수소의 생산, 저장, 이용이 모두 한 수레바퀴 안에서 원활하게 이루어져야 하는 당위성이 있다. 그러나, 기본적으로 수소 경제를 통하여 현재의 화석 에너지를 대체하기 위해서는 수소의 저장이 가장 중요하다고 볼 수 있다.

그 이유는 수소의 이용은 생산과 저장이 필수적으로 요구되고 있고 그 중에서 생산은 비록 그 효율이 떨어지긴 하지만 태양 에너지 등과 같은 자연 에너지를 통하여 그 성과를 얻을 수 있는 가능성이 있는 반면, 저장은 전통적인 가스 형태의 저장으로는 수소경제를 뒷받침해 줄 수 있는 능력이 되지 못하기 때문이다. 따라서 수소 경제는 무엇보다 먼저 고효율의 저장 방법 그리고 그 뒤를 이어 고효율의 생산방법이 수반되어야 한다.



(그림 1) 수소 경제의 순환 관계도[1]

3. 수소의 생산

익히 알고 있는 일반적인 수소의 생산 방법은 물을 전기 분해하여 얻는 방법이 아니라 천연가스를 수증기 개질을 통하여 얻는 방법을 주로 사용한다. 즉, 대량의 수소를 생산하기 위하여 드는 에너지 비용이 물을 전기 분해하여 얻는 방법보다 지각에 존재하는 천연 가스를 발굴하여 손쉽게 고온의 수증기

를 통하여 얻는 것이 훨씬 효율적이라는 것이다. 그러나 이러한 방법도 수소의 활용이 방대해지게 되면 수소의 공급이 수요에 비하여 지극히 낮은 수준으로 머물러 있게 되기 때문에 새로운 방법을 통한 수소의 생산이 필요하게 될 것이다.

수소의 생산은 크게 천연가스를 이용하는 방법, 석탄 및 나프타를 이용하는 방법, 그리고 물을 전기 분해하여 얻는 방법이다[1]. (그림 1)에서도 알 수 있듯이 수소의 생산량 대부분은 천연 가스를 이용하여 얻고 있으며, 이러한 천연 가스가 또 하나의 화석 연료이기 때문에 환경에 대한 지대한 오염을 일으키게 될 수 있다는 것은 쉽게 알 수 있다.

위와 같은 여러 가지 수소의 생산방법 외에 현재에는 원자력 에너지를 이용하는 방법도 제시되고 있다. 즉, 야간에 사용하지 않는 원자력 에너지를 이용하여 수소를 생산하는 것이다. 그 구체적인 방법은 천연 가스의 수증기 개질과 같이 고온의 수증기 분위기 속에서 촉매를 이용하여 물로부터 수소를 분해하여 그 생산성을 높이려 연구하고 있다. 하지만, 이 또한 원자력 에너지 생산의 부산물인 방사능 오염에 대한 대비책이 영구히 강구되지 않는 한 그 위험성은 항상 존재하는 수소 생산방법이라고 볼 수 있다.

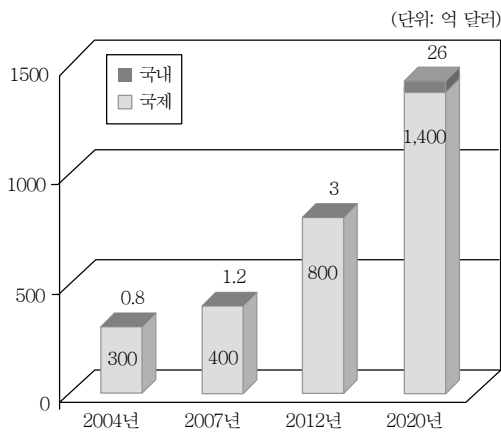
이와는 다르게 순수한 자연에너지 중의 하나인 태양에너지를 활용하여 태양전지로부터 전기를 얻고 이러한 태양전지로부터 물을 전기분해 하고자 하는 연구도 진행되고 있다. 즉, 효율이 높은 태양전지를 활용하여 이를 통한 전기분해로 궁극적으로는 태양에 의존하는 수소 에너지를 생산하고자 하는 것이다. 이렇게 태양을 이용하여 수소에너지를 생산하는 것은 전기에너지를 생산하여 저장 및 수송하는 것보다 효율 및 안정성 면에서 우수하기 때문이다.

그리고, 이러한 물리적, 화학적 수소 생산과 더불어 생물학적 방법을 이용하여 수소를 생산하는 방법도 많이 연구가 되고 있다[2],[3]. 즉, 수소를 분해하는 효소를 가진 미생물이나 박테리아를 통하여 수소를 생산하는 방법이 연구되고 있으며 쓰레기와 같은 배출물의 부패에 따른 메탄 가스의 분해를 통한 수소의 생산에도 많은 연구가 진행되고 있다.

4. 수소의 활용

수소의 활용은 현재 대부분이 (그림 1)에 나와 있는 것처럼 화학 공정용 재료로 대부분 사용되고 있다. 이것은 수소의 활용면에서 그 운송 수단이 안정성 및 효율성 면에서 떨어지기 때문에 이렇게 미비한 활용만 있을 뿐이다. 그러나, 수소의 저장 및 생산이 활성화될 경우 수소는 자동차, 연료전지를 포함하여 전력 생산용 원재료로 활용될 수 있을 것이다.

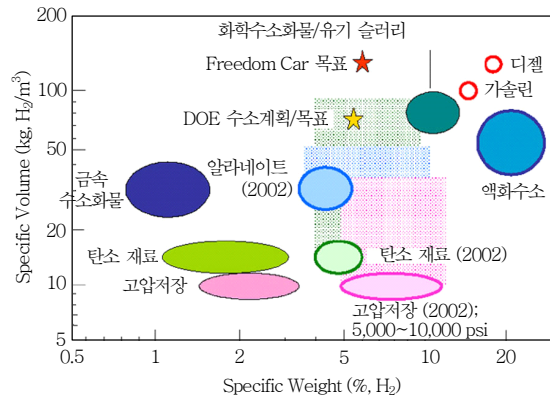
이러한 수소를 이용한 수소 경제에서 수소 시장은 점점 증가하는 추세를 보이고 있으며 2020년에는 1400억 달러 이상의 시장 형성이 가능할 것으로 예측하고 있다(그림 2) 참조).



(그림 2) 수소 시장 전망[1]

Ⅲ. 나노 물질을 이용한 수소 저장

수소 저장은 미국 에너지성(DOE)에서 효율면으로 비교를 하였을 때 필요한 최소의 저장량은 2010년을 기준으로 질량으로는 0.060 kg/kg, 부피로는 0.045 kg/L 이상이 되어야만 상업적으로 가치가 있다고 판단하고 있다. 이러한 물리적 양뿐만 아니라 수소를 저장하는 데 드는 비용은 \$4/kWh 이하, 그리고 재충전 시간은 1.5 kg/min 이상을 요구하고 있다[5]. (그림 3)은 이러한 미국 에너지성의 요구량과 현재의 기술 수준으로 달성 가능한 각각의 저장 방법에 대하여 도표로 표시가 되어 있다.



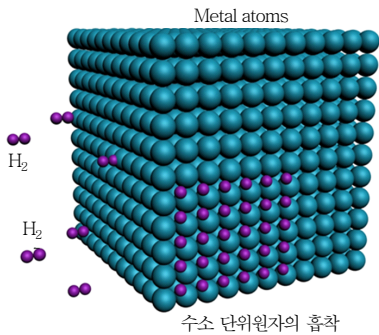
(그림 3) 수소 저장 목표 및 현재 저장량[4]

현재 수소를 저장하기 위한 여러 가지 방법들은 기존에 사용되어온 화석 연료의 효율에 비하여 아직까지 그 효율이 떨어짐을 알 수 있고 이로 인하여 수소 저장이 가능한 대면적의 물질에 연구를 기울이고 있다.

1. 금속 수화물 저장

수소를 고체로 저장하는 방법은 수소의 저장효율을 높이기 위해서 수행해왔던 가장 많이 알려진 방법이다. 즉, 수소를 이온화시켜 금속 표면에 화학적 결합을 이루어 수소를 저장하는 방법이다. 이러한 방법은 가스 형태로 이루어진 수소를 수소와 화학적 결합을 잘 이룰 수 있는 금속 주위에 주입함으로써 가스 형상의 수소가 금속에서 이온화하여 서로 결합되어 있음을 의미한다. (그림 4)는 이러한 이온화된 수소의 흡착을 잘 보여주는 모식도이다. (그림 4)에서 알 수 있듯이 가스 형태의 수소가 주입되었을 때 수소와 수소간의 인력은 깨어지고 이렇게 깨어진 수소간의 인력은 수소 이온을 형성하게 된다. 서로간의 인력이 약해진 수소는 보다 큰 인력을 가지는 금속과 수소간의 인력을 이루고 이것이 금속 원자의 사이사이에 흡착하여 수소 저장을 이루는 것이다.

이러한 이온화된 수소의 금속간의 결합 중에서 가장 잘 알려진 물질이 Alane(AlH_3)이다[6],[7]. 이 구조에서는 알루미늄 원자 한 개에 수소가 네 개 붙어 있는 구조로 그 흡착률이 제일 높은 물질로 알



(그림 4) 수소의 고체 저장 모식도

려져 있다. 뿐만 아니라, 이러한 구조를 통틀어 aluminum hydride라고 일컬어지며 이러한 알루미늄 복합 물질은 대략 10 wt% 이상의 수소 흡착률을 가진다고 알려져 있다. 이러한 저장량은 aluminum hydride가 가지는 6가지 형상에 따라서 달라지며 이 부분에 대해서는 상업적으로 많은 연구가 이루어지고 있다.

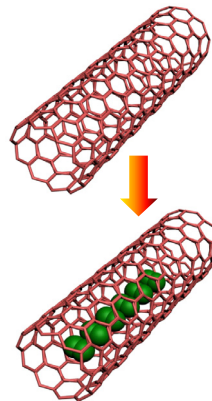
이와 더불어 많은 형태의 복합 물질로 되어 있는 금속 수화물(metal hydrides)에 수소를 저장하는 방식이다. 이러한 물질에서 Ti을 도핑하여 만든 Na, Al 수화물 그리고 NaAlH₄ 등이 있으며 이러한 물질에 대한 연구 또한 활발히 이루어지고 있다[8].

또한 금속 수화물이 가지는 재현성이 미흡한 단점을 보완하여 만든 금속 수화물 복합체가 있다. 이러한 종류에서 알칼리 금속, 즉 Li, Na, K와 같은 물질을 위에서 말한 알루미늄 수화물과 섞어서 만든 복합 물질이다. 이러한 물질은 연료전지로도 또한 사용 가능하다.

이러한 금속 수화물 중에서 나노 물질의 다공성 및 거대 표면적을 이용하여 수소를 저장하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서 잘 알려진 물질로는 Li-Sn, Li-Al-Sn, Li-Al-Si 등과 같은 물질이 Li₂O에 포함되어 있는 물질이다. 이들 물질은 일반적으로 전지의 음극 전극으로 사용하고 있으며 수소 저장 매체로도 활용이 가능하다[9].

2. 탄소 나노튜브 및 활성탄

탄소 나노튜브가 처음 합성되어 보고되었을 때



(그림 5) 탄소 나노튜브를 이용한 수소 저장의 모식도

탄소 나노튜브가 가지는 체적 대비 거대 표면적으로 인하여 최적의 수소저장 물질 가능성에 대하여 각광을 받았다. 이러한 시발점으로부터 탄소 나노튜브는 전기적 특성뿐만 아니라 저장 매체로서의 특성이 연구되기 시작하였으며 그 저장량이 상용화 가능한 수소 저장량을 넘어선 결과가 보고되기도 하였다[10]-[12]. 뿐만 아니라 일반적인 금속 수화물에서 사용되고 있는 알칼리 금속을 이용하여 탄소 나노튜브에 도핑을 하게 되면 그 저장량이 훨씬 높게 나온다는 결과도 발표를 하였다. 그러나, 수소의 저장량을 분석하는 데 있어서 일반적인 수소 가스가 포함하고 있는 물이 저장되었을 가능성에 대해서 많은 반론을 제기하였고 탄소 나노튜브를 이용한 수소저장은 아직까지 상용화 단계에 접어들지 못하고 있다.

탄소 나노튜브는 (그림 5)에서 보는 바와 같이 흑연의 한층, 즉 graphene을 말아서 만들어 놓은 구조를 가진다. 즉 각각 이러한 graphene을 말게 될 때 말리는 방향에 따라서 그 전기적 특성이 달라짐에 따라 각각 다르게 이름을 붙이게 된다. (그림 6)에서 보여지는 탄소 나노튜브는 가장 간단한 구조를 가지는 탄소 나노튜브이다. 이와 다르게 탄소 나노튜브는 그 끝이 서로 붙어 있는, 즉 일반적인 죽부인에서 보이는 끝 봉합 구조를 가진다. 이러한 봉합 구조는 그 특성이 아주 우수하며 구조적으로도 안정적인 형태를 가진다. 이로부터 수소를 저장하고자 할 때에는 그 구조를 무너뜨리는 형태, 즉 탄소 나노튜브 끝 또는 옆구리에 흠집을 내어 수소가 쉽게 들어갈 수

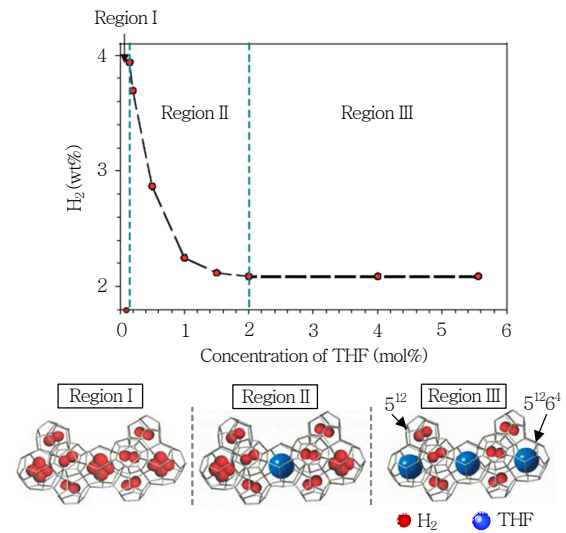
있는 구조를 만든다. 이러한 과정은 질산 또는 초음파 파괴기를 통하여 이루어진다. 즉, 탄소와 탄소간의 결합을 깨뜨리고 이렇게 깨뜨려진 탄소 나노튜브는 그 흡집으로 인하여 내부로 통하는 출입구를 만들게 된다. 이러한 출입구는 수소가 쉽게 드나들 수 있는 형태이며 이를 이용하여 수소를 저장한다.

위에서 언급한 금속 수화물을 이용한 수소저장은 화학적 결합을 이루는 수소저장이다. 즉, 수소와 금속간의 화학적 결합을 이용하여 수소가 쉽게 금속에 흡착되어 운송을 위한 매체로 활용됨을 의미한다. 그러나 탄소 나노튜브를 포함한 나노 물질의 수소저장은 화학적 결합이 아닌 물리적 결합을 통하여 수소를 저장한다. 화학적 결합에 비하여 물리적 결합을 가지는 수소 저장은 저장 및 활용에 많은 장점을 가지고 있다. 다시 말하면, 물리적 결합을 이용하여 수소를 저장하는 방법은 온도에서 수소를 고체 표면에 흡착하여 낮은 온도에서 배출하는 방식인 반면, 화학적 결합을 이용하여 수소를 흡착 및 이용하는 방법은 비록 낮은 압력, 낮은 온도에서 수소 흡착을 이루기는 하지만 수소를 활용하기 위해서는 고온, 즉 650도 이상의 고온을 사용해야만 화학적으로 결합되어 있는 수소를 탈착하여 이용할 수 있다. 이것은 수소와 금속간의 결합력이 높기 때문에 이러한 결합력을 깨기 위해서는 높은 온도를 가하여 줌으로써 고체 격자의 운동에너지를 높여 주고 이로 인하여 화학적 결합을 이루고 있는 수소와 고체간의 인력을 깨게 되는 것이다. 이에 반하여 수소를 물리적 결합으로 저장을 하는 것은 수소와 고체 표면이 물리적 힘, 즉 반데르발스 힘에 의해서 흡착이 되어 있기 때문에 수소를 배출하는 데 필요한 온도는 고온이 아니라 저온이 되는 것이다.

그러나, 이러한 물리적 결합에도 단점이 있다. 즉, 물리적 결합은 약한 인력에 의하여 수소가 흡착되어 있기 때문에 쉽게 고체 표면으로부터 수소가 떨어질 수 있는 가능성이 존재한다. 이러한 약한 인력은 물리적 결합을 이용하여 수소를 저장하는 데 있어서 가장 큰 걸림돌이 되고 있으며 이 또한 해결해야 할 문제로 남아 있다.

3. 수화물을 이용한 수소 저장

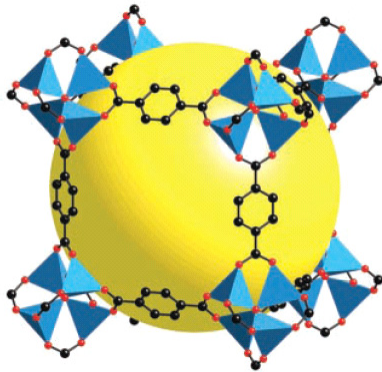
수화물을 이용한 수소 저장은 THF 수화물[13]을 이용하여 수소를 저장하는 것으로 그 구조는 $(CH_2)_4O$ 의 구조를 가지는, 즉 산소가 한 부분에 위치하고 나머지 네 곳에 탄소가 위치한 오각형 구조를 가지는 화학적 구조물이다. 이러한 구조물에서 THF와 물의 복합물질 그리고 이러한 구조에서 수소가 흡착하여 최대 5.002 wt%의 수소가 흡착될 수 있음을 보였다. 이것은 THF 수화물 구조에서 THF 양의 조절에 따라서 저장되는 수소의 양이 틀려짐을 말하는 것으로 공간의 적절한 활용이 수소 흡착의 비율을 높여줄 수 있음을 의미한다. (그림 6)은 각 THF 양의 변화에 따라서 수소의 흡착이 얼마나 일어나는지 보여주는 결과이다.



(그림 6) THF를 이용한 수소 저장[13]

4. MOF를 이용한 수소 저장

MOF[14]는 앞서 언급한 탄소 나노튜브와는 그 구조가 사뭇 다르다. 즉 탄소 나노튜브는 그 구조가 가운데가 비어 있으면서 길이가 긴 막대 형태를 가진 반면에 MOF는 개개의 분자가 엮이면서 가운데 공간을 비워둔 형태, 즉 육면체 가운데가 비어 있는 구조를 지닌다. 즉, 이러한 구조는 유기 분자들의 연



(그림 7) MOF-5 ($Zn_4O(BDC)_3$)의 구조[14]

결과 금속 이온들의 매듭으로 이루어진 다공성 물질을 의미한다. 전체적인 구조는 (그림 7)에서와 같이 유기 분자들이 연결고리로 가운데 존재하고 육면체 각 꼭지점에는 금속 이온들이 존재하는 형태를 띄고 있다. 이러한 구조에서 연결고리와 각 꼭지점은 전체적으로 정육면체 구조를 가지며 그 내부는 비어 있는 다공성 분자라고 볼 수 있다. 이러한 다공성 분자 구조에서 내부의 면적 또는 외부의 표면적이 전체적인 체적에 비하여 넓기 때문에 또한 이러한 구조에서 각 면의 한 변의 길이가 대략 1나노미터 정도 가지기 때문에 전체 분자의 합성 물질은 벌크 물질보다 훨씬 넓은 표면적을 가진다. 이러한 이유로 인하여 MOF는 좋은 수소 저장 매체로 알려져 있다.

또한 이러한 구조는 내부의 공간은 넓으나 외부에서 출입하는 출구는 좁은, 즉 동굴과 같은 구조를 가진다. 이러한 동굴 형태의 MOF를 이용하여 처음 수소에 대한 보고가 이루어졌을 때 최대 4.5 wt% 이상의 수소가 흡착될 수 있음을 보여 수소 저장 매체로의 가능성을 보여주었다[14]. 또한 MOF의 구조 및 구성물의 변화를 통하여 MOF의 수소 저장 능력이 변할 수 있음을 알아냈고 이를 통하여 MOF의 수소 저장 능력은 MOF에서 각 분자의 형태 및 금속의 형태 그리고 전체 구조의 크기에 따라 다르지만 대략 77 K, 70기압에서 7.5 wt% 정도의 수소를 저장할 수 있다고 보고하고 있다[15].

이러한 MOF는 Zeolite 등과 비교하였을 때 처음 시료를 보고하였을 때에는 물에 민감한 단점을 지니

고 있었지만 현재 보고되는 연구결과는 이러한 단점을 보완하여 충분히 안정된 구조를 가짐을 보이고 있다. 또한 이러한 MOF는 시료의 합성이 용이하여 대량생산이 가능하고 대면적의 결정성을 띄고 있어 상업적으로 응용되었을 때 그 재현성을 확보할 수 있는 장점이 있다.

이러한 MOF의 장점은 앞서 언급한 것과 같이 구조적으로 동굴 모양의 형태를 지닌다는 것이다. 이러한 구조의 장점은 가스가 출입하는 출입구는 비록 작지만 내부의 공간이 넓어서 가스가 출입구를 통하여 출입을 하더라도 내부의 공간이 넓기 때문에 내부에 가스가 들어가 운동에너지를 지닌다 하더라도 나가고자 하는 방향의 출구가 좁아서 내부에서 그 운동을 지속적으로 추구한다고 볼 수 있다.

수소 저장 그 중에서도 물리적 결합을 통하여 수소를 저장하기 위해서는 물리적 결합력도 중요하지만 운동하는 가스 분자의 운동량이 흡착이 이루어져 있을 때 어느 정도 줄어드느냐가 관건이라고 볼 수 있다. 즉, 물리적 결합은 포괄적으로 말한다면 분자와 분자가 결합력을 가지고 결합을 한다고 볼 수 있는 반면에 그 결합력이 낮기 때문에 약한 운동을 한다고 봐도 과언은 아니다. 즉, 결합이 이루어진 가스 분자가 열에너지로 인하여 운동을 하게 되고 이러한 운동은 다음에 흡착하게 되는 가스 분자의 운동과 또 다른 교감을 이룬다고 볼 수 있다. 이러한 교감이 추후에 표면에 결합하고자 하는 가스의 결합에 영향을 미치게 되고 이러한 영향은 흡착률을 낮게 만든다.

이러한 상호 인력 작용을 줄여주기 위해서는 먼저 가스의 운동을 제약할 수 있는 구조와 다음으로 가스의 운동량을 줄여주는 환경이 수반되어야 한다. 가스의 운동에 제약을 주는 방법은 위에서 언급한 동굴 형태의 구조를 만들어주어 가스의 충돌이 운동을 할 수 있는 공간이 좁은 출입구에서 주로 일어난게 만들어 주고 결과적으로 흡착하고자 하는 공간은 넓게 하여 가스 운동 제약이 덜한 부분을 만들어 주는 것이다. 또한 가스의 운동량을 줄여주는 방법은 가스 분자가 포함되어 있는 공간의 열 에너지를 줄

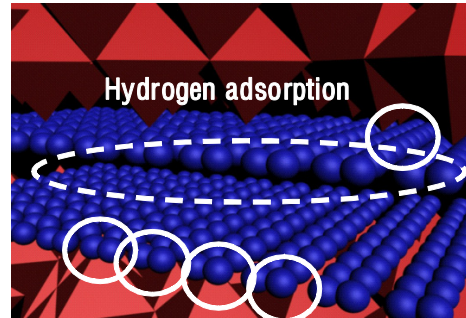
여름으로써 가스 분자의 운동량을 줄여주는 것이다. 이러한 운동량 감소 방법은 액체 질소 분위기나 기타 냉각할 수 있는 방법을 동원하여 수소 가스의 운동량을 줄여주어 흡착률을 높여주는 방법이다.

5. 다층 구조를 이용한 수소 저장

수소 저장에 있어서 가장 큰 핵심은 전체 부피에 비해 표면적이 얼마나 넓느냐 하는 것이다. 즉, 물질이 고유하게 가지고 있는 체적에 비하여 그 표면에 흡착할 수 있는 양이 전체 체적 또는 질량에 따라 어느 정도 수소를 흡착할 수 있느냐에 따라서 상업적으로 응용이 가능하나 아니냐를 판가름 할 수 있는 기준이 된다.

이러한 기준으로 볼 때 여러 층을 가지고 있는 물질, 즉 다층 구조를 가지고 있는 물질[16] 또한 수소 저장 매체로 각광 받을 수 있을 것이다. 이러한 다층 구조의 단적인 예는 흑연이라고 볼 수 있다. 즉 graphite는 탄소들이 화학적 결합을 이룬 평면 구조가 삼차원으로 적층되면서 층과 층 사이가 비어 있는 다층 구조의 단적인 예를 보여준다(그림 8) 참조). 수소 저장 초기에 이러한 다층구조를 가지는 물질을 통하여 많은 연구자들이 수소 저장에 대한 연구를 수행하여 왔다. 그러나 기대했던, 즉 graphite가 가지는 거대 표면적에 비하여 저장되는 수소의 양은 극히 미량으로 밝혀졌다. 이러한 원인은 많은 곳에서 찾을 수 있으나, 가장 큰 문제점은 수소가 물리적 결합을 이루어 흡착을 이루는 데 문제점이 있다는 것이다. 즉, 비록 대면적의 표면적을 가지고 있지만 하지만 수소가 흡착할 수 있는 연결 에너지 자체가 미약하여 수소가 쉽게 흡착하여 그 상태를 유지하지 않고 쉽게 이탈하는 단점을 지니고 있다는 것이다.

이러한 단점을 보완하기 위해서는 대면적의 표면적도 중요하지만 물리적 결합을 이룰 수 있는 인력이 순차적으로 필요하다는 것이다. 이것은 전체적으로 완벽한 결정성 구조물을 가지는 것이 아니라 중간 중간에 결합을 가지는 형태의 구조물이 반드시



결점을 가지는 구조

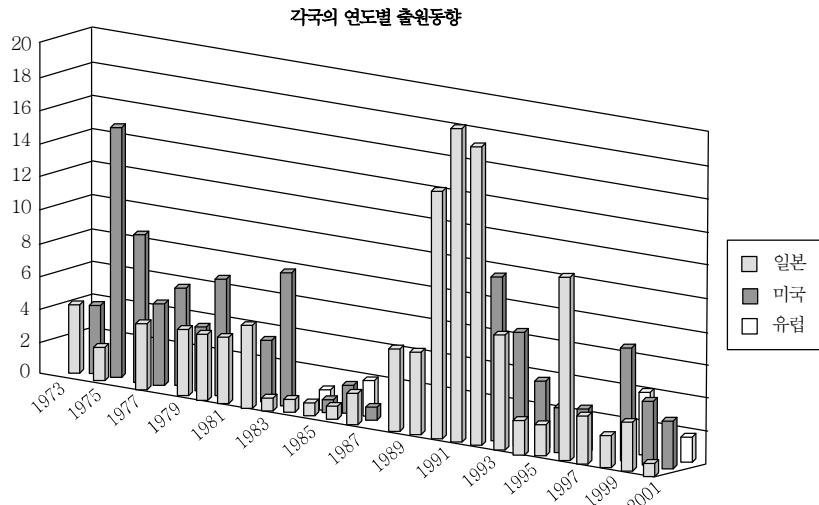
(그림 8) 층상 구조를 가지는 물질의 수소 저장

존재해야 하는 것이다. 하나의 예로 (그림 8)에서와 같이 층상구조를 가지고 있는 다층 구조의 나노 물질에서 그 표면적을 최대한 확보한 다음 층과 층 사이에 결정 구조물이 안정되지 않는, 즉 결합을 가지는 구조물을 형성하도록 한다. 이러한 결합은 화학적으로 안정된 결합을 이루지 않기 때문에 여분의 전자 혹은 이온을 공간에 분포시키게 되고 이로부터 유도되는 전기적 인력은 수소를 조금 더, 즉 물리적 결합보다 높은 인력을 제공함으로써 수소의 저장량을 높일 수 있다.

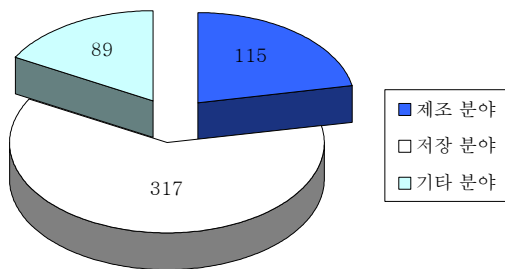
6. 지적 재산권 및 실용화 동향

수소의 활용은 현재까지 수소 자동차에 대한 적용이 가장 우세하게 나타나고 있다. 이에 따라서 수소 에너지에 대한 특허는 대부분 수소 자동차에 집중되어 있으며 그 활용에 연구의 중점이 이루어져 있다. 이러한 수소 자동차의 수소 엔진 관련 특허 출원 동향을 살펴보면, 1990년 중반에서 지속적인 증가세를 보이다가 2000년대에는 그 출원 수가 줄어드는 추세로 나아가고 있다(그림 9) 참조).

또한 수소 에너지 분야의 관심도가 지속적으로 증가함에 따라서 수소 에너지 전체에 대한 특허 또한 이전 연도에 비하여 증가하는 추세에 있다. 이 중 수소 에너지 전 분야에 걸친 특허를 분석하여 보면, 2001년에서 2006년까지[17] 국내 출원이 426건(82%), 국제 출원이 95건(18%)으로 나타나며 이중 출원되는 분야의 각 부분을 살펴보면 (그림

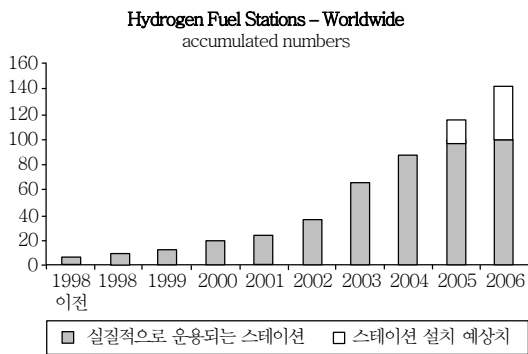


(그림 9) 수소 엔진 관련 특허 출원 추이[17]



(그림 10) 출원되는 수소 에너지 기술별 특허 건수

상용화로 나아가고 있는 방향은 수소 스테이션을 이용한 액화수소의 직접적인 주입 및 사용이다. 일반적인 자동차 연료의 주입과 같이 수소를 직접적으로 수소 자동차에 주입하여 수소 자동차를 활용하는 수소 스테이션은 전 세계적으로 증가하는 추세이며 ((그림 11) 참조), 이를 바탕으로 수소 경제를 활성화하고자 하는 것이 전세계적인 기류라고 볼 수 있다.



(그림 11) 세계적 수소 스테이션 증가 추이[18]

10)과 같다. 즉, 수소 저장에 대한 특허 출원이 주를 이룸을 알 수 있다. 이러한 특허 출원의 추이로 볼 때 수소 에너지의 활용에서 수소 저장의 중요성을 보여준다.

그러나, 수소 저장에 대한 특허는 비록 증가하고 있는 추세이지만 실질적으로 수소가 사용되는, 즉

IV. 앞으로의 전망

수소는 앞으로 어떠한 연구 경로로 연구가 되든지 그 활용은 이미 누구나 될 것이라고 예상하고 있다. 더불어 생산이나 저장 방법에 대한 연구도 현재보다 조금 더 현실에 적합한 결과를 도출할 수 있는 연구 방향으로 진행될 것이다. 수소의 생산은 친환경적인 방법, 즉 태양 에너지나 바이오 매스 방향으로 많은 연구가 진행될 것이며 식물의 광합성 작용의 접목으로도 그 연구가 진행될 것이다. 수소의 저장은 여러 방향으로 그 연구 진전을 보게 될 것이며 특히 나노 물질을 포함한 고체 저장과 액체를 이용한 액체 저장이 그 주를 이룰 것이다. 이러한 면에서 볼 때 수소의 연구는 비록 그 길이 멀다 할지라도 지속적인 연구 및 투자가 필요하다.

약어 정리

BDC	benedicarboxylate
DOE	Department of Energy
MOF	Metal Organic Frameworks
ppm	part per million
THF	Tetrahydrofuran
wt%	Weight percent

참고 문헌

- [1] 에너지 기술 연구원, “수소 연료 사업단 연구 보고서,” 2005.
- [2] 김미선, “수소 혁명의 시대,” 살림 출판사, 2005.
- [3] 윤영수 외, “태양광을 이용한 생물학적 수소생산 기술,” 태양 에너지, Vol.1, No.3, 2002, pp.14-17.
- [4] 에너지 기술 연구원, “수소 연료 사업단 연구 보고서,” 2004.
- [5] DOE EERE HFCIT Program, 2002.
- [6] G. Sandrock et al., “Accelerated Thermal Decomposition of AlH₃ for Hydrogen-fueled Vehicles,” *Appl. Phys. A*, Vol.80, 2005, p.687.
- [7] J. Graetz et al., “Decomposition Kinetics of the AlH₃ Polymorphs,” *J. Phys. Chem. B*, Vol.109, 2005, p.22181.
- [8] J. Graetz et al., “Characterization of the Local Titanium Environment in Doped Sodium Aluminum Hydride Using X-ray Absorption Spectroscopy,” *Mat. Res. Soc. Conf. Proc.*, 2005, p.837.
- [9] J. Graetz and J. Reilly, “Nanoscale Energy Storage Materials Produced by Hydrogen-driven Metallurgical Reactions,” *Adv. Eng. Mat.*, Vol.7, 2005, p.597.
- [10] A.C. Dillon et al., “Storage of Hydrogen in Single-walled Carbon Nanotubes,” *Nature*, Vol.386, 1997, pp.377-379.
- [11] C. Liu et al., “Hydrogen Storage in Single-walled Carbon Nanotubes at Room Temperature,” *Science*, Vol.286, 1999, pp.1127-1129.
- [12] Y. Ye et al., “Hydrogen Adsorption and Cohesive Energy of Single-walled Carbon Nanotubes,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol.74, 1999, pp.2307-2309.
- [13] H. Lee et al., “Tuning Clathrate Hydrates for Hydrogen Storage,” *Nature*, Vol.434, 2005, pp.743-746.
- [14] N.L. Rosi et al., “Hydrogen Storage in Microporous Metal-organic Frameworks,” *Science*, Vol.300, 2003, p.1127.
- [15] U. Mueller et al., “Metal-organic Frameworks—prospective Industrial Applications,” *J. Mater. Chem.*, Vol.16, 2006, p.626.
- [16] H.Y. Yu et al., “V₂O₅ Nanowire-based Nanoelectronic Devices for Helium Detection,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol.86, 2005, p.253102.
- [17] 특허 법인 바른, 2007년 자료
- [18] Alexandra Baker, Fuel Cell, Today, 25 May 2005.