

융합연구리뷰

Convergence Research Review

김종원 (한국에너지기술연구원 책임연구원)

강경수 (한국에너지기술연구원 책임연구원)

수소에너지 기술 현황과 융합

조영석 (한국과학기술연구원 선임연구원)

윤창원 (한국과학기술연구원 책임연구원)

액상 유·무기 화합물(LOHC, NH_3) 기반 대용량 수소저장기술 연구 개발 동향



융합연구정책센터

Convergence Research Policy Center

CONTENTS

- 01 편집자 주
- 03 수소에너지 기술 현황과 융합
- 31 액상 유·무기 화합물(LOHC, NH_3) 기반
대용량 수소저장기술 연구 개발 동향



융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2019 September vol.5 no.9

발행일 2019년 9월 9일

발행인 김주선

편집인 최수영·권영만

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터

02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

Tel. 02-958-4980 | <http://crpc.kist.re.kr>

펴낸곳 주식회사 동진문화사 Tel. 02-2269-4783



수소에너지 기술 현황과 융합

2015년 기후변화를 억제하기 위한 제21차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP21)에 195개국이 지구 온도 상승을 2°C 이내로 억제하기 위한 계획에 서명함에 따라 우리나라도 동참하게 되었다. 기후변화 억제를 위해서는 에너지전환이 필수적이며, 모든 산업은 해당 분야에서 탈탄소화의 필요성에 직면했다.

이에, 본 호 1부에서는 현재 수소가 가장 광범위하게 사용되고, 대중들에게 친근하게 알려진 수소 사용처인 수소 자동차에 대해 간략히 알아보고, 이의 조달방안을 알아보았다. 현재 국내에서만 170여만 톤의 수소를 제조·이용하고 있기에 수소전기차 운행에 당장 필요한 수소의 생산 및 수송기술을 확보한 상태이지만, 친환경적 방법으로 수소를 생산하는 그린 수소의 적용과 활용에 대해서는 지속적 연구가 필요한 상황이다. 수소 밸류체인에 있는 생산, 저장·운송, 이용 분야는 “꿀벌과 꽃”의 관계와 같이 상호 이득을 주는 공생 관계이며, 가격과 내구성, 안전성 등이 국민이 요구하는 수준까지 올라와야 자생적인 수소 사회로의 이행이 이루어지게 될 것이다.

본 호를 통해 “핑크빛 전망”만을 말하던 시기에서 벗어나, 가시적인 시장진입과 확산을 도모하는 단계를 거치고 있는 수소에너지에 대해 조금 더 면밀한 상황파악이 필요하다는 것을 알 수 있다. IPHE, IEA-HIA 등 수소 관련 국제기구와 다보스포럼에서 창설된 수소위원회 등 수소 사회로의 진입을 위해 국제적 공조를 통해 가까운 미래에는 또 다른 에너지원으로서 수소가 활용될 수 있기를 기대해 본다.

액상 유·무기 화합물 (LOHC, NH₃) 기반 대용량 수소저장기술 연구 개발 동향

지속적 인구증가 및 국가의 발전에 따라 에너지 수요는 지속적으로 증가하고 있다. 하지만 기후변화를 비롯한 다양한 환경 문제에 따라 기존의 전통적 에너지원 사용에 제약이 따르게 되었다. 이를 해결하고 지속 가능한 지구 환경을 유지하기 위해 재생에너지 기반의 청정에너지 공급망 확산이 전 세계적인 이슈로 부상하고 있지만, 간헐적이고 예측이 어려운 재생에너지의 생산량은 전력수요 및 공급 간의 불균형을 유발할 수 있다. 이에, 재생에너지의 안정적 공급 및 활용도 제고를 위해서는 잉여로 생산된 전력을 저장하고 필요할 때 다시 사용할 수 있는 에너지저장기술이 필요하다.

이에, 본 호 2부에서는 수소에너지의 상용화를 위해 수소 생산처로부터 수소 소비자까지 대용량의 수소를 안전하게 저장하고 운송하는 화합물 기반 수소저장 기술에 대해 알아보았다. 그 중, 대용량 수소저장기술 중, 최근 많은 관심이 주목되고 있는 액상유기수소운반체(Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC) 및 암모니아(NH₃)를 이용한 국내·외 대용량 수소저장 및 장거리 운송기술 개발 현황과 앞으로 진행될 연구개발 동향을 파악해보았다.

본 호를 통해 대용량의 수소를 효과적으로 저장·운송할 수 있는 기술개발의 필요성을 확인하였고, 세계 선진국들이 주목하고 있는 고용량 수소 운반체인 LOHC와 암모니아는 향후 대용량의 재생에너지를 장주기로 저장하고 활용하기 위한 필수 기술로 확인되었다. 앞으로 필연적으로 다가올 수소 사회로의 이행에 장기적 안목에서 체계적 준비를 통해 수소 사회로 매끄러운 진입에 도움이 될 수 있기를 기대해 본다.



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2019 September vol.5 no.9



01

수소에너지 기술 현황과 융합

김종원, 강경수(한국에너지기술연구원 수소연구실)

I 시작하면서

2015년 기후변화를 억제하기 위한 COP21(21st Conference of the Parties)에 195개국이 서명함에 따라 지구 온도 상승을 2℃ 이내로 억제하기 위한 계획에 동참하게 되었다.

기후변화 억제를 위해서는 에너지전환이 필수적이며, 모든 산업은 해당 분야에서 탈탄소화의 필요성에 직면했다. 기후변화 억제방안으로서 에너지전환은 재생에너지로의 전환을 의미하는데, 재생에너지의 비용 하락과 함께 일부 지역에서는 기존 화석연료와 경쟁할 수 있는 여건에 도달했다. 재생에너지 보급 확대를 위해서는 간헐적이라는 특성상, 대량 및 계간 에너지저장이 필요하여, 수소가 중요한 에너지 매체로 다시 조명받게 되었다. “수소 사회”, “수소 경제”라는 용어가 함께 쓰이고 있는데, 수소가 모든 것을 해결해준다는 의미가 아니라, 수소를 전기, 석유, 도시가스과 함께 주요 에너지의 하나로 이용하고 또 확대해 나가는 것이라 할 수 있다. 이러한 용어가 1970년대 석유 위기 이후 나타나 사용되기는 했지만, 그동안 핑크빛 전망만을 말했을 뿐 요즘처럼 비즈니스 측면에서 명백한 믿음을 준 적은 없었다. 그 바탕에는 포크리프트나 이동통신 증계기이용 보조전원 등에서 자생적 시장이 형성될 정도의 성공, 수소전기차 시판, 발전 및 가정용 연료전지의 상업화와 사용 경험에 힘입은 바 크다.

현재 전 세계적으로 연 7,000만 톤의 수소가 생산되고 있는데, 이중 3/4이 천연가스에서 추출되며, 이 양은 전 세계 천연가스 소비량의 6%에 해당한다. 또 다른 화석원료인 석탄을 원료로 한 수소 생산 시설은 주로 중국에서 운영되고 있으며, 석유와 전기의 비중은 적은 편이다. 현재는 대부분 산업용으로 소비하고 있으며, 이러한 수소를 재생 전원을 이용한 수소전기분해(이하 수전해)로 생산한다면 화석연료 이용에 따른 환경부담을 대폭 줄일 수 있다.

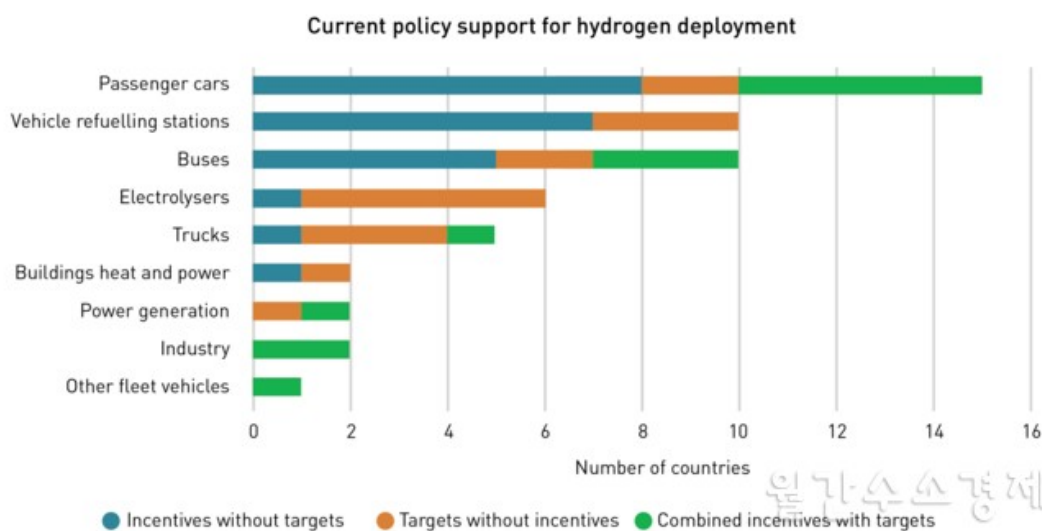
수소는 가장 가볍고, 비점이 낮아 -252.6℃가 되어야 액체로 된다. 폭발한계도 넓고 착화에너지가 작다. 공기 중에서 폭발 하한 및 상한 범위는 4~75%로 넓다. 특히 물을 분해하여 나오는 수소 2, 산소 1의 비율로 섞여 있는 혼합기체는 폭발기(爆鳴氣)라 하여 점화에 의해 폭발적으로 연소한다고 하는 것은 잘 알려져 있다. 일반인이 익숙하게 사용하고 있는 천연가스나 프로판 가스와 비교한다면, 연소속도와 확산속도가 빠르고 체적당 발열량은 작다. 순수한 수소는 무색, 무취의 기체로 인체에는 무해하다. 프로판, 천연가스, 수소 등 가연성

기체는 잘못 사용하면 안전사고를 일으킬 개연성은 상존하지만, 오랜 기간 산업에서 안전하게 다루어본 경험이 축적되어 있다.

II 전기구동화 추세와 수소전기차

지구온난화와 미세먼지에 의한 도시 대기질 악화로 환경규제는 강화되는 추세이며, 자동차 업체는 이 규제치를 만족시키지 못하면 벌과금을 물어야 하는 상황이다. 수소를 효율적으로 이용할 수 있는 연료전지와 함께 결합하여 만든 수소전기차는 배출물이 물밖에 없어 전기자동차와 함께 친환경 자동차로 인식되고 있다. 수소 기술개발에 투자 지원 정책을 펴는 국가가 늘고 있고, 대부분 그림 1과 같이, 자동차 등 운송수단에 집중하고 있다. 세계 자동차 업체를 대상으로 한 2018년 설문조사(KPMG, 2018)에서 그림 2에서 보인 바와 같이, 처음으로 수소전기차가 1위의 트렌드로 상승한 배경에는 환경규제로 수소전기차에 대한 가능성과 기대감이 부각되었기 때문이다.

그림 1 수소 활용을 위한 정책지원은 자동차와, 수소충전소, 버스와 트럭 등의 상용차, 수전해장치 등을 중심으로 이루어지고 있다



(출처: IEA 보고서, 2019)

중국은 세계 전기자동차 보급의 절반을 차지하는 국가이다. 위키사전에 따르면, 도로 위 주행 중인 전기자동차 200만 대(2018년 기준) 중 100만 대가 중국에 있다(Wikipedia). 중국의 자동차 분야 과학기술의 수장인 Wan Gang은 한때 아우디 자동차에서 근무한 바 있으며, 무공해 차량 개발에 앞장서 왔다. 중국은 전기차에 많은 지원을 해주고 있는 나라이며, 이제는 수소전기차에 관심을 집중하고 있다. 전기차에 대한 인센티브가 줄어들다 해도 수소전기차 개발에 대한 보조는 지속할 것이라고 언급해왔다. 중국의 수소전기차 초기 시장은 아주 작지만, 중국의 지난 20년간 전기차 대응사례로 보듯이 수소전기차 개발보급에 박차를 가한다면 상황은 아주 많이 달라질 것이다.

현재의 기술로 본다면, 근거리 및 소형차는 전기자동차, 장거리 또는 상용차는 수소전기차의 우위가 예상된다. 배터리와 연료전지 두 기술이 경쟁적으로 발전하면서 하이브리드화로 상호 보완해주는 역할을 하고 있다. 두 기술 모두 큰 가능성을 가지고 있어 어느 하나라도 포기할 수도 또 놓칠 수도 없다. 수소전기차는 이미 연료전지와 배터리의 하이브리드 형태이며, 배터리 용량도 비교적 큰 편이어서 우리나라의 강점인 배터리 시장 확대에도 도움이 된다.

우리나라 자동차산업은 세계 5위권(2015, 2016년)에서 이제 인도, 멕시코에 뒤진 7위권으로 내려섰지만, 부품업체와 판매, 정비 및 보험 등 광범위한 전후방 산업이 연관되어 있는 만큼, 국민소득 증대, 고용창출, 수출증대에 큰 역할을 하고 있다. 수소전기차 상용화에 앞장선 현대자동차는 2013년 투싼, 2018년 넥쏘(Nexo)를 선보였고, 일본 도요타 미라이(Mirai)는 2014년 12월, 혼다 클라리티는 2016년 3월부터 시판하였다. 전 세계적으로 약 1.2만대 이상의 수소전기차가 운행되고 있으며, 이 중 5,899대는 미국에서 운행되고 있다. 일본은 3,300대, 우리나라는 현재 2,800대가 넘어섰다.

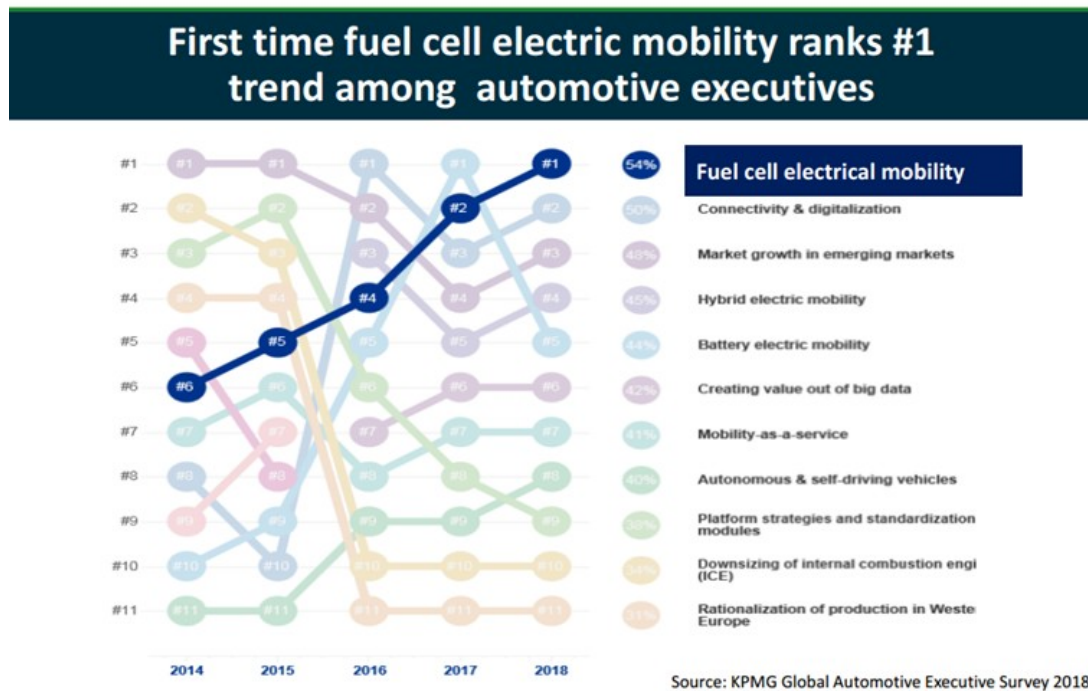
수소충전소도 미국 캘리포니아주는 2025년 200개소, 우리나라는 2022년 310개소 구축을 목표로 하고 있다. 일본은 이미 113기가 구축되어 있으며, 2025년 320기를 목표로 하고 있다. 독일도 50기를 운영 중이며 추가로 50기 이상 증설 계획이다. 아직은 일본을 제외하고는 대부분의 나라에서 인프라 구축이 계획보다 많이 지연되고 있는 것도 사실이다.

향후, 트럭과 버스 등의 상용차, 트램, 선박, 건설기계 등 수소연료전지의 적용처도 다양해지고 시장도 확대될 것으로 보고 있다.

수소위원회(<http://hydrogencouncil.com/>)의 2050년 전망(2017년 11월)에 따르면 수소가 에너지 소비 전체의 약 20%를 차지하면 CO₂ 배출량은 현재보다 연간 약 60억 톤 감축(파리 협정 목표 달성에 필요한 CO₂ 삭감량의 약 20%에 해당) 되며, 2조 5,000억 달러에 상당하는 비즈니스, 3,000만 명 이상의 고용

창출이 생길 것으로 보고 있다. 2030년까지 1,000만~1,500만대의 연료 전지차, 50만대의 연료전지 트럭이 보급되고, 산업 공정에서 원자재, 열원, 동력원, 발전용과 저장 등 다양한 형식으로 수소 사용이 증가할 것으로 보이며, 이에 따라 수소 수요는 2050년까지 현재의 10배로 증대될 것으로 예측한 바 있다. QYR Energy Research Center는 수소에너지 및 연료전지 시장 규모가 2017년 131억 달러, 2022년 261억 달러에 이를 것으로 보고한 바 있다(QYR Energy Research Center, 2017).

그림 2 친환경자동차는 전기구동화 경향이며, 내연기관을 사용하더라도 바이오 연료를 사용하거나 하이브리드 형태로 사용하는 것이 큰 흐름이 될 것이다. 전기자동차에 연료전지기술을 접목하는 시도도 있으며, 수소전기차도 배터리와의 하이브리드 형태인 기술의 융합이다. 2018년, 자동차 업계를 대상으로한 설문조사에서 처음으로 수소전기차에 대한 관심이 1위로 올라섰다. 현재의 상황으로 볼 때, 적어도 상위권 관심사를 지속적으로 유지할 것으로 보인다.



(출처: KPMG Global Automotive Executive Survey 2018)

III 수소전기차의 연료는 수소, 어떻게 조달할 것인가?

산업계에서는 전 세계적으로 연 7,000만 톤(IEA, 2019), 국내만 해도 170여만 톤을 제조·이용하고 있어, 수소전기차 운행에 당장 필요한 수소의 생산 및 수송기술도 있고 또 다루어본 경험도 많다. 화석연료로 수소를 제조해도 환경적인 측면에서 이득이 크지만(Joan et al., 2014), 풍력 및 태양광과 같은 재생에너지를 수소로 전환하면 대량 또는 계절 간 저장이 가능하여 재생에너지 공급 확대, 에너지 안보의 향상, 에너지 절약과 환경부하 저감에 큰 기여를 할 것으로 기대되고 있다.

현재의 수소생산량 7,000만 톤을 전량 물전기분해로 생산한다면 3,600TWh¹⁾의 전기를 사용하게 되며, 이는 EU의 연간 발전량보다도 많은 양이다.

태양광은 인류가 얻을 수 있는 가장 풍부하면서도 지속가능한 에너지이다. 지구상에 도달하는 태양 에너지양은 대략 12만 TW(1TW=1,012W)로서 현재 인류가 사용하는 연간에너지양 18TW(2013년 기준)²⁾에 비교하여 6,600배 수준에 달한다. 하지만 불행하게도, 태양 빛은 에너지밀도가 낮아, 위치에 따라 달라지기는 하지만, 평균적으로 지표면 1m²당 170와트 수준에 불과하다. 이 정도의 에너지를 효율적으로 받아들이고 저장하는 방법을 찾아내는 것이 우리에게 주어진 도전적인 과제이다.

사하라 사막(면적 920만 km²)의 1%도 안 되는 면적인 300km*300km 지역에 태양전지를 깔면 전 세계 전기에너지 소요량을 공급³⁾(2017년 기준 22,309TWh, 에너지경제연구원 자료)할 수 있다는 계산에서 보듯이 세계 전체로 보면 재생에너지 자원량은 막대하다. 재생에너지 전원을 이용하여 수전해로 수소를 공급한다는 것을 어느 나라나 이상적인 목표로 삼고는 있지만, 재생에너지 자원의 환경은 지역마다 국가마다 다르다. 전 세계가 공동의 목표인 이산화탄소 배출도 줄이면서 재생에너지로의 전환을 이루려면 수소가 국제 교역의 대상이 될 수밖에 없다.

1) 7,000만 톤 1,000kg/톤 * 11.2m³/kg * (4.5kWh/m³H₂)= 3,528TWh

2) 157,000TWh= 17.92TW (https://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_consumption)

3) 22,309TWh * (10⁹kWh/TWh)/(1kW/m²*5hr/day*365days*0.15*10⁶m²/km²)= 285km*285km. 태양광 효율은 17% 수준이나 15%로 가정함.

이미 지난 정권에서 우리나라는 2030년, 37%의 이산화탄소를 줄이는 목표를 국제사회와 약속한 바 있다. 이에 대한 방안으로 현 정부에 들어서서 30년에 20%까지 재생에너지 비율을 높이겠다고 하는 3020 계획을 발표했다. 2019년 6월에는 산업통상자원부가 2040년 재생에너지 발전 비중을 30~35%로 확대하고, 현재 12% 수준인 분산발전 발전 비중을 30%로 확대하는 계획이 담긴 “제3차 에너지기본계획”을 국무회의에서 심의·확정했다. 특히 현재 정부가 추진하는 수소 경제 활성화 정책에 대한 부분도 수소 경제 구현을 위한 산업육성 강화, 안전체계 확립과 분산발전원으로 순기능 역할을 할 수 있도록 국내 가정·건물용, 발전용 연료전지산업에 대한 육성 전략이 담겼다(가스신문, 2019). 또한 “수소경제법”도 국회에서 발의되었다.

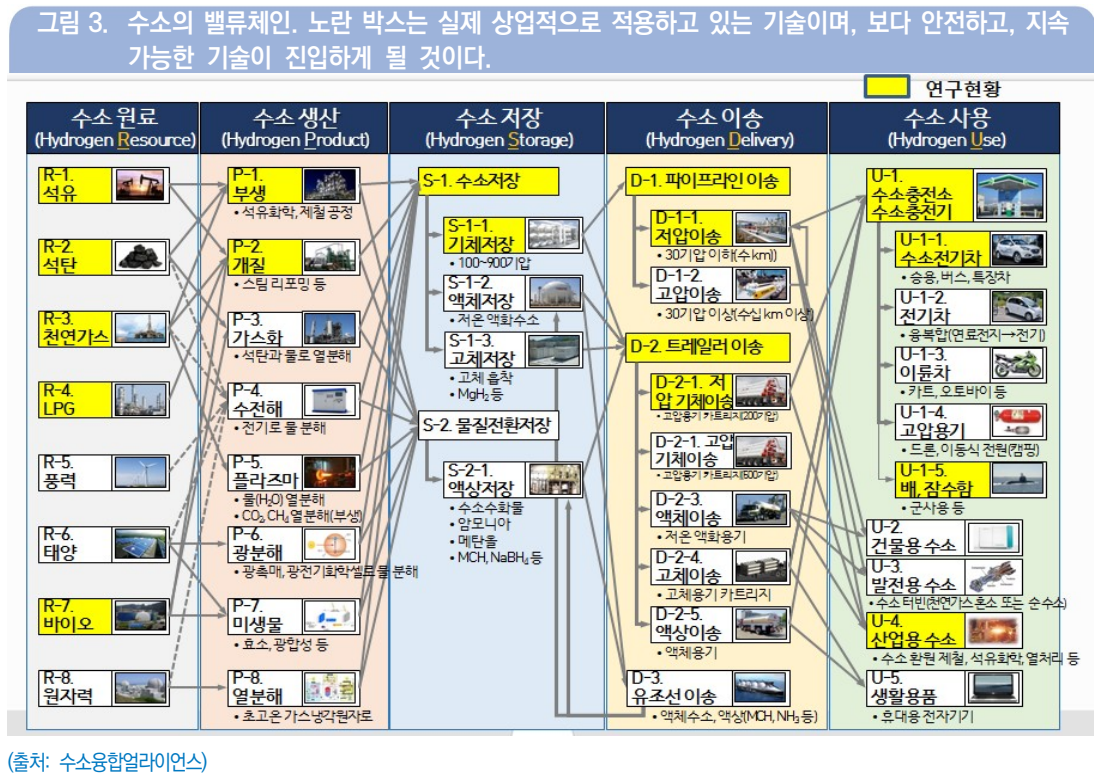
국제사회에 우리가 저감하기로 약속한 이산화탄소 중 해외에서의 사업으로 저감해야 할 양을 고려한다면, 우리 자본과 기술로 해외의 수력, 풍력, 태양광이 풍부한 지역에서 전기를 만들어 현지에 공급하고 일부를 수소로 전환하여 공급한다는 계획도 가능할 것이다. 물론 그린(재생에너지-수소), 그레이(화석연료-수소) 수소에 대한 공급 계획도 전 과정 평가 온실가스 배출량 분석으로 국제공인도 받는 동시에 비즈니스 모델로서의 타당성 확인 및 국민적 합의도 이루면서 지속가능하도록 진행하는 것이 필요하다.

최근 들어 수소전기차 분야에 뛰어든 중국은 세계에서 가장 큰 수소생산설비를 가지고 있으며, 대부분 석탄을 원료로 하는 수소생산시설이다. 생산량은 2012년 1,600만 톤, 2018년에는 2,000~2,200만 톤에 달할 것으로 보고 있다(Gasworld, 2019). 2018년 2월에 결성된 중국수소연합(China Hydrogen Alliance)은 “중국 수소에너지와 연료전지산업 백서”(2019.6.25.)에서, <표 1>과 같이 전망했다(China Hydrogen Alliance, 2019). 단기적으로 보면, 2018년 5월, 12개의 수소충전소를 운영 중이나, 2020년대에는 200기로 늘린다는 계획이다. 만약에 중국이 백서에 쓰인 목표를 달성하기 위해 노력한다면, 중국의 전기차 지원과 성과 사례에서 보듯이 향후 15년 이내에 에너지산업에 지각변동이 일어날 것이다(Cole A, 2019).

표 1. “중국 수소에너지와 연료전지산업 백서”에 따르면, 2050년 중국에너지시스템의 10%를 수소로 공급 하겠다는 목표를 세웠다.

기간	Industrial Output	수소전기차	수소충전소
2020~2025	1,480억 달러	5만 대	200기
2026~2035	7,400억 달러	1,500만 대	1,500기
~2050	1조 4,800억 달러	중국에너지시스템의 10% 수소 (6,000만 톤)	

기존 기술을 적용하고 점차 시장을 확대하면서 기술성숙도에 따라 보다 환경친화적이고 지속가능한 기술로 대체한다는 것이 어느 나라나 공통적으로 갖는 계획이다. 우리나라의 수소 경제 활성화 로드맵을 보면, 궁극적으로는 그린 수소를 활용하겠다는 것이며, 수소의 도입도 고려하고 있다.



재생전원과 수전해를 연계하여 생산하는 기술은 이미 알고 있는 두 가지 기술을 결합하는 것이기에 당장 이용이 가능한 방법이다. 수전해 업체인 E-ON은 유럽과 같이 일하고 있고, 하이드로제닉스도 캐나다에서 가장 큰 가스 공급업체인 엔브리지(Enbridge)와 함께 프로젝트를 수행했다. 엔브리지의 가스저장 용량은 234TWh로서, 캐나다 전기사용량의 40%에 이른다. P2G(Power-To-Gas)는 일종의 "exchanging the currency of energy"(에너지 화폐의 교환, 전기에서 가스로 바꾸는 것과 같이 에너지의 형태를 변화시킨다는 의미)로서, 온타리오에 1MW급 P2G를 건설했는데, 단순한 실증설비라기보다는 이를 완전히 활용하기 위한 적절한 투자라고 말하고 있다. 이 프로젝트 이후에는 5~10MW 규모의 프로젝트를 진행할 예정이며, 가스 주입에 관련된 캐나다 법령의 개정을 위해 노력하고 있다.

ITM Power는 독일 프랑크푸르트에 360kW 150kg H₂/day의 수전해장치를 설치했고, Shell과 ITM은 세계에서 가장 큰 10MW 수전해 장치를 만드는 프로젝트를 2017년에 발표했다. 그림 4는 유럽에서 진행 중인 P2G 프로젝트에 대한 현황을 보이고 있다(The Oxford Institute for Energy Studies, 2018). 원칙적으로 P2G는 수전해 기술에 의존하는데, 1990년대 말 이후 실험적인 P2G 플랜트가 개발되어왔다. 재생전원으로 물을 분해하여 수소나 수소를 이산화탄소와 반응시켜 메탄으로 전환하여 기존 가스산업에서 구축된 배관망을 통해 소비자에게 공급한다는 개념이다. 수소를 천연가스 배관망에 넣어 수송하는 문제는 법적인 문제와도 직결된다. 영국은 0.1%, 네덜란드는 0.02~0.5% 이내에서만 허용하고 있다. 대개 1~5%까지 허용하자는 데에는 의견이 모이고 있다. 너무 많은 수소를 넣게 되면 가스 그리드나 최종 사용자 측에서 일어날 수 있는 문제를 좀 더 검토해 보아야 한다. 재료에 따라서는 배관이나 천연가스 자동차 쪽에 문제가 발생할 수도 있다. 현재 영국 Keele 대학에서 20%까지 수소를 공급하는 HyDeploy 프로젝트를 진행 중이다. P2G는 가스와 전기 시스템과의 보다 밀접한 연계를 요구한다. 지금은 가스산업뿐만 아니라 전기산업에서도 수소에 대한 관심이 많아졌다. 열과 전기, 가스를 결합하는 에너지체계에서 수소의 역할이 보다 커져 가고 있는 것이다.

그림 4. 유럽에서 실증 중인 P2G 프로젝트 현황

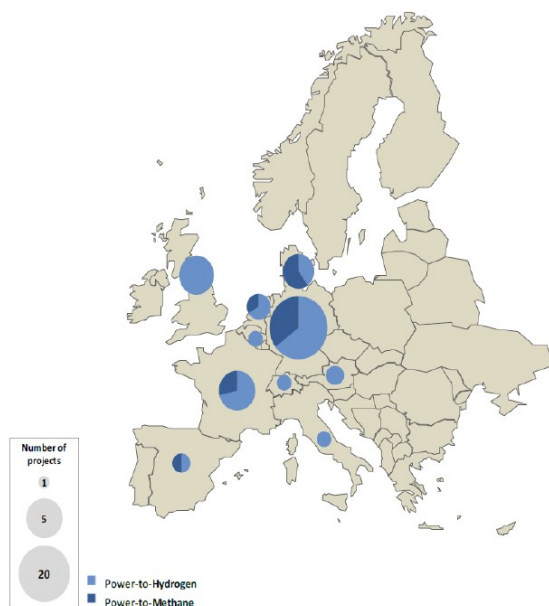
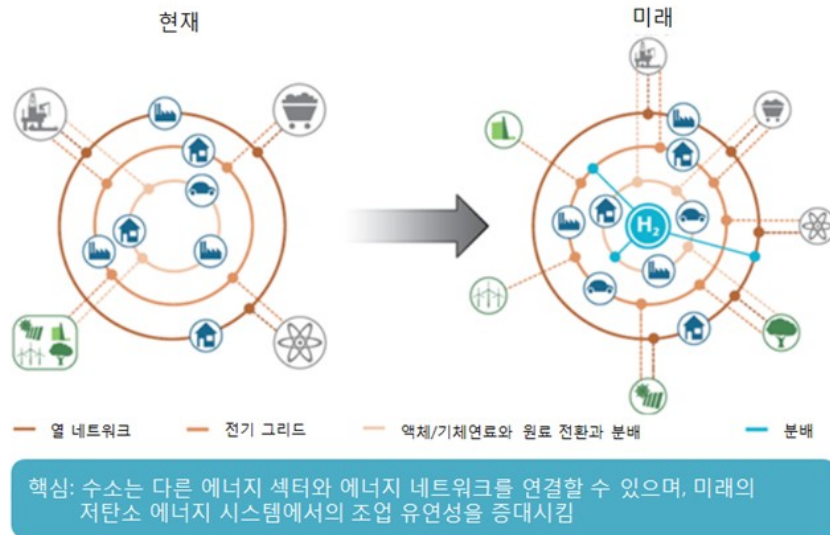


그림 5. 수소는 열과 전기를 주축으로 하는 현재의 에너지 체계에서 에너지간의 연계로 조업 유연성을 증대시켜줄 것이다.



(출처: IEA, "Technology Roadmap - Hydrogen and Fuel Cells"(2015), p10)

우리나라에서도 이엠솔루션과 엘캠텍이 각각 알칼리 수전해와 PEM 수전해 기술을 개발하여 충전소나 수소공급 장치에 적용하고 있고, P2G에 대해서도 실증할 계획이다.

플라스마 가스화 또는 천연가스를 수소와 탄소로 만드는 크래킹 기술도 있다. 아틀란틱 하이드로젠(Atlantic Hydrogen)은 마이크로웨이브(microwave)를 이용한 CarbonSaver 기술(Atlantic Canada Opportunities Agency, 2012)을 가지고, 미국 천연가스 가격을 기준으로 하루 3톤의 생산 규모라면 수소 1kg당 \$0.38의 가격으로 공급 가능할 것이라고 한다. 이와 유사한 시도는 노르웨이의 GasPlas가 있으며, 아직 이러한 기술들의 경제성이 입증된 것은 아니다.

IV 기술의 융합과 경합

생명체를 지속적으로 번성시켜 온 놀랄 만큼 현명하고 기발한 생물체 내부의 시스템을 이용하여 인류가 직면한 여러 가지 공학적 난제들을 해결한 사례는 많다. 기술혁신에 기반한 창조적 파괴는 IT, BT, NT 등 다분야 간 기술융합으로 일어난다. 이러한 기술의 융합은 수소 분야의 모든 밸류체인에서 큰 역할을 할 수 있다. 예를 들어, 수소 생산(수전해/개질)이나 수소 활용(연료전지) 분야에서 공통적으로 활용이 가능한 촉매기술의 경우, 기존의 백금 기반 촉매 소재는 비싼 가격으로 인해 경제성을 확보하기 어려운 문제점이 있다. 이러한 문제점 극복을 위해 촉매의 크기를 나노화하거나 나노구조 촉매 및 지지체를 형성하여 촉매 활성을 높여 촉매의 사용량을 줄일 수 있고, 나아가 값비싼 백금이 아닌 저가의 나노 촉매 신소재를 개발하여 경제성을 확보할 수 있어, 지금도 이러한 시도는 지속적으로 수행되고 있다.

태양전지기술을 잘 이해하고, 또 접목시킬 요소가 있는지도 관심을 가질 필요가 있다. 태양전지기술은 에너지 자원화하는데 있어 반도체라고 하는 물질을 사용한다는 공통점이 있는데다가, 시스템적으로도 상용화에 성공한 특징을 가지고 있다. 과기정통부 21세기 프론티어 사업인 수소에너지사업단(2003~2013)에서도 수소제조 공극적 방향인 태양광을 이용하여 광전기화학적 및 생물학적으로 수소를 만들어 내는 방안을 연구한 바 있다. 광전기화학적 수소제조는 반도체 광촉매를 이용하여 태양광 에너지에 의해 물을 분해하여 수소를 생산하는 방법으로, 실용성을 갖추기 위한 광효율과 내구성을 얻는 것이 지극히 어려워 “꿈의 기술” 혹은 “기술의 성배(Holy Grail)”로 불려 왔다. 반도체 물질이 태양광을 흡수하면 가전대의 전자가 여기되어 고도의 환원력을 가진 광전자(photoelectron)와 산화력을 가진 정공(hole)이 생성된다. 정공은 물을 산화하여 산소를 발생시키고 전자는 전선을 통해 음극 쪽으로 이동하여 물을 환원시켜 수소를 발생시켜 물이 각각 다른 방에서 수소와 산소로 완전분해하게 된다. 이미 상용화되어 있는 태양전지와 비교한다면, 전자의 이동으로 전기를 생성시키는 게 아니라 수소와 산소를 발생시키는데 사용한다는 점이 차이가 있다. 지금도 물질의 탐색과 최적화를 통해 효율을 극대화하고(현재 15% 수준, 미 에너지부의 궁극적 목표는 25% 이상)(DOE, 2019), 시스템의 장기안정성(현재는 수십 시간에 불과함)을 개선하려는 노력이 각국에서 진행 중이다. 향후 소재의 가격 저감, 시스템 엔지니어링(system engineering)과 스케일 업(scale-up) 기술이 접목되어야만 상업화가

가능할 것이다. 최근 보고된 바 있는(Leah C et al., 2019), 귀금속 없이도 수소를 생산해 낼 수 있는 촉매인 CdS/rGO(CdS Quantum Dot/reduced graphene oxide photocatalysts, 그래핀에 Cd를 올린 광촉매) 효소를 이용하여 합성하는 사례도 양산을 위한 시도 중 하나이다.

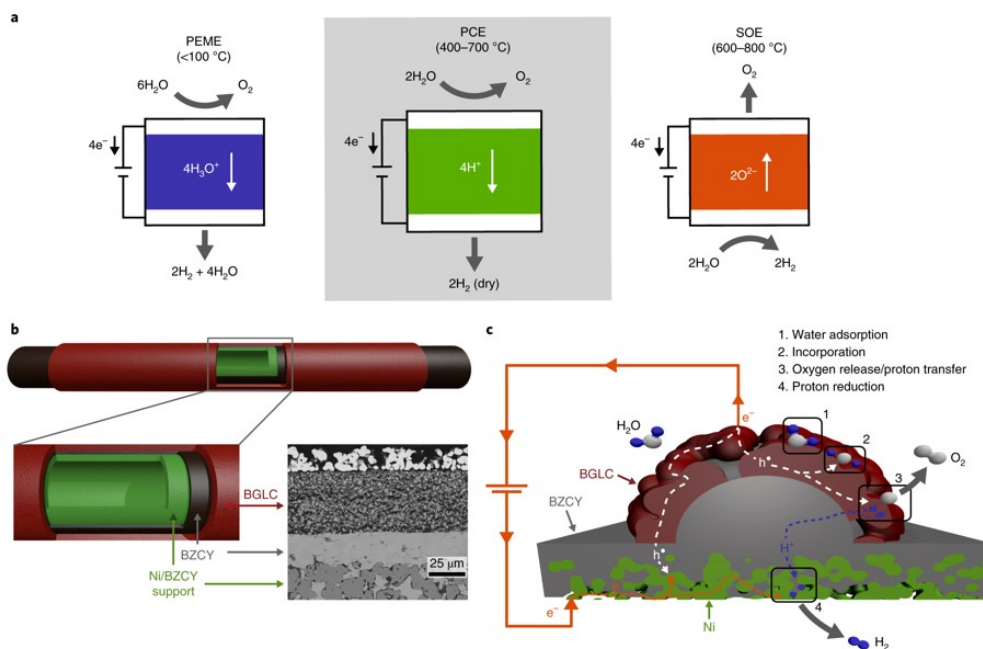
생물학적인 수소생산기술은 미생물 내부에 존재하는 수소 생산 효소들을 이용해서 미생물이 이 효소에 의해서 생산한 수소를 최대한 밖으로 내도록 유도하여 수소에너지로 활용하는 기술이며, BT와 ET 기술의 접목인 셈이다. 이미 미생물 내에서(in-vivo) 어떠한 메커니즘이 수소 생산을 하는가에 대한 많은 부분이 밝혀져 이제는 최첨단의 기술로 수소 생산 효소를 밖으로 꺼내어 마치 화학반응과 같이 물이나 유기물로부터 수소가스를 만드는 것을 생체 외(in-vitro)라고 하는데 이와 관련한 연구가 국내외에서 수행되어왔다. 미생물을 키우면서 수소를 생산하는 'in-vivo 기술'은 일반적으로 생산 비용이 적게 들지만, 수소 발생을 위한 조건 즉, 온도, 산도, 영양물질의 균형, 교반, 산화-환원 전위, 광합성 미생물 경우는 빛의 조명도나 파장 등 조절해야 할 요소가 많고, 미생물 자체가 수소를 발생할 수 있는 효율에도 한계가 있다. 이러한 단점을 극복할 수 있는 첨단기술이 'in-vitro 기술'이지만, 공기 중에 산소가 있으면 수소 생산 효소가 수소 생산을 할 수 없다는 문제가 있어 이를 극복하려는 연구가 진행 중이다. 이와 같이, 유사한 분야 또는 다른 분야와의 의사소통과 상호 이해는 기술의 혁신을 기대할 수 있는 좋은 방안 중 하나가 될 것이다.

당장은 기존 기술로 기술적·경제적 가능성을 실증하고 이를 기반으로 시장을 넓혀나가겠지만, 효율과 내구성 개선을 위한 새로운 개념의 도입은 언제나 필요하다. 예를 들어, 수전해는 저온(<100℃, 알칼리 및 PEM 방식)의 경우 상용화되어 있고, 고온수전해(SOE, 600~800℃)인 경우는 아직 연구 및 실증단계에 있다. 이외에도 400~700℃대 수준의 온도에서 수전해를 하는 개념(Proton Ceramic Electrolyser, PCE)도 연구되고 있다. PCE는 수증기를 이용해서 물이 없는 건조상태의 고압 수소를 얻는다는 이점이 있지만, 전자의 손실로 전기 효율에 한계가 있다는 단점이 있었다. 하지만, 최근에는 그림 6에서와같이, 혼합전도막의 재료를 개선하여 분극저항도 줄이고 활성화 에너지를 낮추어 패러데이 효율이 100%에 근접하는 결과를 보인 사례가 발표되었다(Einar V et al., 2019). 아직은 실험실적 규모의 결과에 불과하지만, 기계적으로 강하고, 고압에 잘 견딜 뿐만 아니라 스케일업에도 유리할 것으로 연구자들은 말하고 있다.

대표적 활용기술인 연료전지에서도 세라믹 연료전지 성능향상 기술로 고성능-고소결-고안정성 세라믹 나노파우더 및 나노 복합체 제조 기술, 박막 기술, 표면 및 계면막 기술, 이온-전자 동시전도 나노 전극 기술 등 다양한 성능향상 노력이 진행되고 있다. 무색무취인 수소의 사용 안전을 위해 누출을 감지할 수 있는 센서의 이용은 필수적이다. 비표면적이 넓고 반응물 및 전하의 동역학이 우수한 나노구조체나 나노소재를 이용하여

감도가 극대화되고 농도 분석이 가능한 수소 센서의 저가화 및 양산은 누출감지뿐만 아니라 연료전지의 효율적인 구동에도 기여할 수 있다.

그림 6. (a) PEM 방식, PCE, 고온전기분해 방식의 개념 비교. (b) 튜브형 PCE로 내부 음극쪽에서는 건조상태의 수소가 발생되며 100%에 가까운 효율을 보여준다. (c) PCE를 통하여 일어나는 반응메커니즘과 이동. 전극물질로서 혼합전도막(mixed protonic and electronic conductors, MPECs)을 사용해서 삼상(triple phase)의 경계층을 넘어서까지 반응영역이 확대되는 효과가 있다.



(BGLC: BaGd_{0.8}La_{0.2}Co₂O_{6-δ}, BZCY: Y-doped BaZrO₃-BaCeO₃)

V 수소충전소 등의 기반 시설과 안전성

수소전기차의 운행을 위해서는 수소충전소가 필요하다. 특히, 수소 생산, 수송 및 분배체계가 부족한 상황에서 민관의 위험비용 및 역할 분담이 필요하다. 수소전기차와 충전소 중 어느 것이 먼저 보급 확산되어야 하는가는 더이상 논쟁 대상이 아니다. 일본, 독일, 미국 캘리포니아 등 선진 사례에서 볼 수 있는 바와 같이, 우선 수소전기차와 수소충전소를 당장 필요한 수준은 지원을 통해 보급해 놓은 후 시장에 맡긴다는 전략은 어느 신기술이든 시장 진입과 정착을 위해 필요한 전략이다. 해외에서는 충전소 구축비용뿐만 아니라 운영비 지원도 해주고 있으나 우리나라는 아직 검토 중이다. 수소 밸류체인에 있는 생산, 저장·운송, 이용 분야는 “꿀벌과 꽃”의 관계와 같이 상호 이득을 주는 공생 관계이다. 각각의 가격과 내구성, 안전성 등이 국민이 요구하는 수준까지 올라와야 자생적인 수소 사회로의 이행이 이루어지게 될 것이다.

이밖에 규제, 코드, 표준화의 공조 등 다른 에너지와 마찬가지로 안전을 최우선적으로 고려하여야 한다. 최근 강릉에서의 수소저장 용기 폭발에 따른 인명피해는 참으로 안타까운 일이다. 수소와 관련된 사고로는 1937년에 일어난, 독일의 대륙 간 항로 운항용 비행선 힌덴부르크(Hindenburg) 화재사건을 대표적인 참사로 떠올려왔다. 이 사건은 당시 도시에 가스를 공급해 왔던 석탄 열분해 공정의 상업화 확산을 꺼리는 계기가 되었다. 1990년대에 들어서야 NASA 과학자인 베인 박사(Dr. Addison Bain)에 의해 직접적인 화재 원인이 수소가 아니라 비행선 표면에 코팅한 물질이 문제였다는 것이 밝혀졌다(Dessler A, 2004).

우리나라도 산업용으로 170만 톤 수준의 수소가 제조·이용되어 왔지만, 200기압 수준으로 유통 및 이용되며, 또 소수의 숙달된 전문가만 다루어 왔음은 사실이다. 수소 사회로 가는데 있어 필요한 기술, 산업이 아직 부족할 뿐만 아니라, 산업체가 액체 수소와 고압 수소에 대한 취급 경험이 적다는 우려도 있다. 수소 취급 가이드라인을 따르고, 기존 사고 사례를 철저히 분석하여, 재발을 방지하기 위한 기술적 조치들이 선결되어야 안전을 확보하고 또 소비자들의 두려움을 잠재울 수 있다. 주지하는 바와 같이, 수소뿐만 아니라, 가연성 물질인 휘발유, 경유, 도시가스, LPG 모두 사용상 위험성이 내재되어 있다. 연료 특성에 맞추어 안전하게 다룰 수 있는 취급 조건을 검증 및 표준화하고, 인재(人災)를 막을 수 있는 감시, 제어 시스템은 필수적이다.

해외 353개소, 국내 31개소(19년 말 예정 포함)의 수소충전소가 상용화 운영 중이지만, 지난 6월 10일

노르웨이 산드비카(Sandvika) 충전소의 화재사고 이외에는 안전사고 발생사례가 없을 정도로 안전성은 검증되었다. 국내 수소충전소 운영은 이제 초기 단계이며, 아직 안전 발생사고 사례는 거의 없다. 충전소 운영 시 발생하는 문제에 대한 모니터링을 통해 사소한 고장이라도 원인파악과 대처방안에 대한 데이터가 축적되어야 할 것이다. 또한, 안전 운영을 위한 가이드라인 뿐만 아니라 원격감지로 안전과 성능을 보장하기 위한 유지보수, 사고 예방 노력 및 정보공유가 필요하다. 이를 바탕으로 안전이 확보된 셀프충전의 도입여건이 마련되어야 운영 자립 시기가 앞당겨질 것이다. 국제적 협력 연구와 정보교환, 전주기 분석 평가와 이산화탄소 저감량 지표화, 수소 관련 인력양성을 위한 교육과 대중 수용성을 높이기 위한 홍보 등이 병행되어야 할 것이다.

표 2. 우리나라의 수소안전과 관련한 노력과 고시

수소안전 관련 기준	제·개정 및 고시
저장식 수소자동차 충전시설· 기술·검사기준	2011년 4월 KGS코드 제정, 12회 개정
제조식 자동차 충전시설· 기술·검사기준	2011년 4월 KGS코드 제정, 10회 개정
수소충전소용 복합재료 용기 허용	2015년 9월 고압가스안전관리법 시행규칙 개정
압축 수소가스용 복합재료 압력용기 제조기준	2015년 10월 KGS 코드 제정
용·복합 및 패키지형 자동차 충전소 시설기준	2016년 7월 산업부 고시
수소충전소 부품 KS인증 제도 도입	2017년 10월 고압가스안전관리법 개정, 2019년 11월 1일 시행
무인동력 비행장치용 압축 수소용기의 제조기준	2018년 4월 산업부 고시
수소가스시설 방폭 상세기준	2018년 7월 KGS코드 제정
이동식 수소자동차 충전소 시설기준	2018년 10월 산업부 고시
압축수소 운송용 비금속라이너 복합재료 용기제조 기준	2019년 2월 KGS 코드 제정

(출처: 한국가스안전공사)

VI 수소에너지의 이용확대

1. 상용차(버스, 트럭)

1990년부터 2010년 사이, 대형 트럭이 배출하는 이산화탄소 배출량은 35% 늘어났으며 계속 증가하고 있다. 하루 16시간을 운행하는 버스 한 대는 25대의 중형차량과 맞먹는 연간 50톤의 이산화탄소를 배출한다. 이미 중국은 2018년 중대형 수소 전기구동 트럭의 세계적인 선도국이 되었다. 발라드가 추산한 바에 따르면, 약 1,500대의 트럭과 버스가 보급되었으며, 국가보조금을 받기 위해 제출하는 차량목록(MIIT Promotion Catalogue)에 75종의 연료전지 차량이 등재되었다.

우리나라도 현대자동차에서 버스와 트럭에 적용하는 연구와 실증을 스위스의 H2Energy와 협력하여 진행 중이다(오토헤럴드, 2018). 넥쏘(Nexo)에 들어가는 스택 두 개를 연결한 190kW급으로, 충전시간 7분, 1회 충전 주행거리 400km를 목표로 하고 있다.

2. 수소 전기 열차와 트램

알스톰(Alstom)이 만든 수소 전기 기차 코라디아 아이린트(Coradia iLint)는 전기 기차와는 달리 전혀 동력선이 없거나 부분적으로 동력선이 없는 구간도 운행할 수 있다는 장점이 있는데, 2018년 9월부터 엘베(Elbe)에서 베세르(Weser)에 이르는 구간에서 상용 서비스를 하고 있다. 2019년 1월에는 6개 주를 도는 로드쇼를 실시한 바 있다(Alstom, 2019).

중국에서는 China South Rail Corporation의 자회사인 시팡(Sifang)이 중국 최초의 수소연료전지 도시용 트램(최고 속도 70km/h, 380명 탑승)을 2년간에 걸쳐 연구하여 실증하였는데, 3분 충전으로 100km 정도를 운행하며, 운영비 저감과 도심 대기질 개선에 기여한다고 발표하였다. China North Vehicle Yongji Electric Motor Corporation과 남서부교통대학도 2011년에 수소연료전지 구동 경량 전철을 실증한 바 있다. Tangshan

Railway Vehicle Co Ltd(TRC)도 2016년 허베이 지역에서 수소연료전지와 슈퍼캐퍼시터 하이브리드로 운행한 바 있다.

일본은 2017년 11월, Railway Technical Research Institute에서 수소연료전지 기차를 시험 주행하였고, 독일 지멘스도 수소 전기구동 기차 미에로(Micro)를 실증 중이다. 유럽연합 산하 Shift2Rail의 최근 보고서에 따르면 2030년이면 유럽에서는 수소 구동 기차가 신규 구입 기차의 20%에 달할 것으로 예상했다(Berger R, 2019).

우리나라도 현대로템이 수소 전기철도 차량의 개발을 미래 철도의 중요한 기술로 선정해 연구개발 로드맵을 만들어 개발에 착수했으며, 일차적으로 수소 전기 트램의 2025년 상업 운영을 목표로 하고 있다(월간수소경제, 2019). 트램은 노면 위 도로 또는 분리된 전용궤도를 주행하는 경량철도를 말하는데, 운영과 환경성 면에서 신개념 대중교통수단으로 주목받고 있다. 전기구동이라는 공통점을 지닌 수소전기차와 전기차와 마찬가지로 배터리 트램과 수소 전기 트램 또한 충전시간, 주행횟수와 노선 거리에 따라 각각의 장점이 부각되므로 상호보완적 관계이다. 향후 조성될 수소 도시의 친환경 대중교통수단으로 각광을 받을 것으로 예상된다.

그림 7. 현대로템에서 개발한 무가선 저상 트램은 배터리 트램으로 70km/h의 설계 최고 속도를 가지고 있다. 이를 기반으로 수소 전기 트램의 개발도 진행 중이며, 수소 1회 충전으로 200km 이상의 주행 목표를 가지고 있다.



(출처: 현대로템)

3. 수소 드론

두산 모빌리티 이노베이션(Doosan Mobility Innovation)은 드론용 연료전지 파워팩(DP20)을 개발하고 있는데, 수소 고압용기를 탑재하여 수소를 공급하는 방식이다(두산, 2019). 이 파워팩을 적용하는 모델은 DF20, DT20, M600이 있으며, 대표적인 드론업체인 DJI와 협력하고 있다. 비행시간 2시간 이상, 탑재 하중 5kg 이상, 제품 수명 1천 시간, 충전시간 10분, 손쉬운 비행을 목표로 하고 있으며, 수소공급 네트워크는 두산에서 주문을 받으면 전국배달망을 통해 고객에게 수소 충전된 고압용기를 배달하는 방식을 구상하고 있다.

그림 8. 두산 모빌리티 이노베이션에서 개발 중인 수소연료전지를 이용한 드론



4. 수소 전기선박

2018년 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 2050년까지 온실가스 배출량을 2008년의 절반 수준으로 줄인다는 내용의 규제를 발표한 바 있다(IMO). IMO에 따르면 2008년 11억 3,500만 톤의 이산화탄소가 선박에서 배출되었는데, 이는 당해년도 전체 이산화탄소 배출량의 3.5%에 이르는 양이다.

이산화탄소 배출 저감을 위해 수소 전기선박, 배터리 하이브리드 선박용으로 100kW부터 MW에 이르기까지 다양한 용량의 제품이 출시될 것으로 전망하고 있으며, 에너지밀도가 높은 액체 수소를 사용한다면 장거리 항해와 빠른 충전이 가능할 것이다. 향후 재생에너지로부터 얻은 그린 수소를 연료로 사용한다면, 연료전지 시스템은 well-to-wake⁴⁾ 제로 배출 동력원이 될 것이다.

5. 수소비행기

수소비행체 제작 업체 Alaka'i와 ZeroAvia는 서로 다른 접근을 하고 있는데, Alaka'i는 액체 수소를 이중벽을 가진 100psi 용기에 넣어 사용하는 방법을, ZeroAvia는 5,000psi 고압용기를 쓴다.

그림 9. Alaka'i의 full scale prototype



4) "well-to-wake"라는 용어는 항공연료에서 전주기평가 이산화탄소 배출량을 나타내는 용어로 선박에서도 사용함.

고압용기는 수소전기차에서도 사용 중이므로 연방항공국(Federal Aviation Administration, FAA)에서의 통과가 더 용이한 측면이 있다. 일리노이대학(University of Illinois)은 NASA에서 지원해주는 CHEETA 프로그램으로 저온 액체 수소를 이용하는 비행기를 개발하고 있는데, 연료전지 비용이 높다는 단점이 있지만, 낮은 연료비와 유지비로 통상적인 터빈 비행기의 절반의 운영비가 들것으로 예측하고 있다.

ZeroAvia는 500마일(800km) 운항 거리를 목표로 하고 있으며, 세계 항공기 운항의 50%가 500마일 이하의 거리를 운항하기 때문에 운항 거리는 충분하다고 주장하고 있다(Bogaitsky, 2019). 다만, 아직 연료전지의 높은 비용과 낮은 수요로 인해 상업성을 입증할 만한 단계는 아닌 것으로 전해진다.

그림 10. 300마일(480km)을 목표로 ZeroAvia는 Piper Matrix를 기반으로 개조한 수소 비행기를 시험 중이다. 운항 거리 목표는 500마일(800km)이다.



6. 기타

연료전지 자전거는 프랑스의 프라그마(Pragma Industries)가 개발중이다(Halvorson, 2019). 프라그마는 리튬이온 배터리만으로는 30마일(48km)을 가지만, 연료전지는 한번 충전으로 93마일(약 149km)을 갈 수 있고, 기상조건하고는 상관없이 일정한 주행 범위와 성능을 보인다고 말하고 있다. 150W 연료전지와 150Wh 리튬이온 배터리의 하이브리드로 사용하는데 36V, 250W까지 공급할 수 있다. 300기압, 2L 용량의 고압용기 사용하는데, 2분이면 충전이 되며, 파트너 업체인 Ergosup가 개발한 소형수소충전소인 HyRis를 이용할 수 있다. 2019년 8월 24일에 열리는 G7 정상회의에 200대 정도를 공식적으로 도입될 예정이다. 현재 가격이 \$7,500로 높고, 소형수소충전소도 거의 없다는 점은 향후 지속적으로 해결해야 할 사항이다.

그림 11. 프랑스 기업이 프라그마(Pragma)가 개발한 수소전기자전거 Alpha 2.0. 전기자전거보다 주행 거리가 더 길다는 것을 실증하였다



(출처: <https://www.pragma-industries.com/>)

자전거와 더불어 수소 스쿠터도 다양한 방식으로 개발되고 있다. 주로 10기압 이하에서 작동이 가능한 금속수소화물을 이용하는데, 집이나 사무실에서는 발전으로 전기를 공급해 줄 수도 있다(The Green Village).

VII 마치면서

수소에너지 기술은 국가마다 상황이 다르기는 하지만, “핑크빛 전망”만을 말하던 시기에서 벗어나, 가시적인 시장진입과 확산을 도모하는 단계이다. 국제기구로는 기존의 IPHE(수소 경제를 위한 국가 간 파트너십, 정부 간 채널), IEA-HIA(세계에너지기구 수소 이행협정, 국제공동 연구를 위한 연구자 중심의 조직) 외에 정부와 투자자 간의 협력 조직이라 할 수 있는 미션이노베이션, 산업체들이 모여 만든 수소위원회가 창설되었다. 특히 수소위원회는 2017년 다보스포럼에서 창설 당시 13개에서 60개로 선도적인 에너지, 자동차, 산업체 등의 참여가 급격히 늘어났다. 세계에서 가장 큰 전기차 생산국인 중국도 수소전기차 개발에 집중할 것으로 보도되었다(Barrett, 2019). 차이나 데일리(China daily)는 중국 정부가 2020년 5천 대, 2025년 5만 대, 2030년 100만 대의 수소전기차 운행을 바라고 있다고 보도했다.

그림 12. 승용차를 시작으로 버스, 트럭, 트램, 기차, 선박 등으로 수소 전기 파워팩을 이용한 적용 범위가 넓어질 전망이다.

분야	우리나라	해외
승용차		
버스		
트럭		
무인항공기 (드론)		
선박		
기차		
트램		

현대자동차도 70억 달러를 수소연료전지 분야에 투자할 것을 공언했고, 다임러(Daimler), 아우디(Audi)도 수소전기차 출시계획을 발표했다. 수소위원회는 2030년 12대 중 한 대를 수소전기차로 하겠다는 목표를 설정했다. 자율주행, 공유, 커넥티비티, 상용차 전기구동화 등의 변화는 수소 전기구동의 장점이 부각 될 기회가 될 것이다.

국제기구인 국제에너지기구(IEA)는 수소에너지의 현황을 살펴보고 미래를 전망하는 보고서를 2019년 6월 15~16일 일본에서 열린 “G20 에너지환경 장관회의” 하루 전인 6월 14일에 공개했다. 수소 확산을 위한 핵심권고안에서 (1) 장기적인 전략에 수소의 역할을 확립할 것, (2) 청정수소에 대한 상업적인 수요를 촉진할 것, (3) 수소분야의 투자위험 해소, (4) 비용절감을 위한 연구개발 지원, (5) 불필요한 규제를 제거하고 잘 조율된 기준을 만들 것, (6) 국제적 공조와 진행사항의 공유, (7) 기존 산업적인 항구를 저비용, 저탄소 수소 생산을 위한 허브로 활용, 기존 가스 기반 시설 활용, 육로 운송수단을 지원하여 수소 전기 차량의 경쟁력 향상, 수소교역을 위한 첫 번째 해상수송 경로 수립 등을 제시했다.

이를 바탕으로 현재의 정책, 인프라 및 기술을 토대로 상호 협력을 통해 인프라 개발을 확장하고 투자자의 신뢰를 높이며 비용을 절감하는 데 도움이 될 수 있다. 수소 사회로의 진입과 수소 경제 실현을 위해 산업계·학계·연구계 지원이 이루어질 수 있도록 정책적·기술적 고민을 해보아야 할 시기임은 분명하다.

저자_ 김종원(Jong Won Kim)

• 학력

KAIST 화학공학 박사
KAIST 화학공학 석사
연세대학교 화학공학 학사

• 경력

現) 한국에너지기술연구원 책임연구원
前) 21세기프론티어 수소에너지사업단 단장
前) 한국수소및신에너지학회 회장

저자_ 강경수(Kyoung Soo Kang)

• 학력

고려대학교 화학공학 박사
고려대학교 화학공학 석사
고려대학교 화학공학 학사


• 경력

現) 한국에너지기술연구원 책임연구원
前) (주)매그린 과장
前) 대한유화주식회사 기사

참고문헌

- 1) KPMG Global Automotive Executive Survey 2018
- 2) Wikipedia, "Electric car use by country", https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car_use_by_country
- 3) Global Hydrogen and Fuel Cells Market Research Report 2017 (QYR Energy Research)
- 4) IEA Report (2019.6)
- 5) Joan Ogden, C.Yang, M.Nicholas, L.Fulton, The Hydrogen Transition, ITS (Institute of Transportation Studies) UC Davis, July 29, 2014.
- 6) 가스신문, "수소 생산·활용 및 연료전지 분산발전 역할 강화", 2019.6.5., <http://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=87482>
- 7) gasworld, "Preview: The hydrogen economy in China", 2019.8.2., <https://www.gasworld.com/preview-the-hydrogen-economy-in-china/2017616.article>
- 8) China Hydrogen Alliance, "White Book on the China Hydrogen Energy and Fuel Cell Industry", 2019.6.25.
- 9) Cole A, "The godfather of EVs in China has turned his attention to hydrogen cars", 2019.6.20., https://www.greencarreports.com/news/1123693_the-godfather-of-evs-in-china-has-turned-his-attention-to-hydrogen-cars
- 10) The Oxford Institute for Energy Studies, "Power-to-Gas: Linking electricity and gas in a decarbonising world?", 2018.10., <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2018/10/Power-to-Gas-Linking-Electricity-and-Gas-in-a-Decarbonising-World-Insight-39.pdf>
- 11) Atlantic Canada Opportunities Agency, "Production of carbons for high value applications", 2012.3.8., <http://www.acoa-apec.ca/eng/ImLookingFor/ProgramInformation/AtlanticInnovationFund/Pages/AtlanticHydrogenInc.aspx?ProgramID>
- 12) DOE Hydrogen and Fuel Cell Program 자료, 2019
- 13) Leah C. Spangler, Joseph P. Cline, John D. Sakizadeh, Christopher J. Kiely and Steven McIntosh: "Enzymatic synthesis of supported CdS quantum dot/reduced graphene oxide photocatalysts", Green Chem., 2019, 21, 4046, DOI:10.1039/c9gc00097f

- 14) Einar Vøllestad, Ragnar Strandbakke, Mateusz Tarach, David Catalán-Martínez, Marie-Laure Fontaine, Dustin Beeff, Daniel R. Clark, Jose M. Serra & Truls Norby: "Mixed proton and electron conducting double perovskite anodes for stable and efficient tubular proton ceramic electrolyzers", Nature Materials, volume 18, pages 752-759 (2019)
- 15) Dessler A, "The Hindenburg Hydrogen Fire: Fatal flaws in the Addison Bain Incendiary-Paint theory", <https://pdfs.semanticscholar.org/cd5b/ac6ef8e8e3119a42c7a5e4dbfe453d6fa163.pdf>
- 16) 오토헤럴드, "현대차 대박, 수소전기트럭 1,000대 스위스 공급 계약", 2018.9.20., <http://www.autoherald.co.kr/news/articleView.html?idxno=32703>
- 17) Alstom, "RMV's subsidiary fahma orders the world's largest fleet of fuel cell trains from Alstom", 2019.5.21., <https://www.alstom.com/press-releases-news/2019/5/rmvs-subsiary-fahma-orders-worlds-largest-fleet-fuel-cell-trains>
- 18) STUDY ON THE USE OF FUEL CELLS AND HYDROGEN IN THE RAILWAY ENVIRONMENT, ISBN 978-92-95215-11-5 (doi:10.2881/495604) (2019.4)
- 19) 월간수소경제, "한국형 수소전기트럭 개발 열기 '뜨겁다'", 2019.8.4., <http://www.h2news.kr/news/article.html?no=7726>
- 20) 두산, <http://www.doosanmobility.com/>
- 21) International Maritime Organization, "Low carbon shipping and air pollution control", <http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/GHG/Pages/default.aspx>
- 22) Bogaisky J, "Startups bet hydrogen fuel cells are ready for takeoff in aviation", 2019.8.14., <https://www.forbes.com/sites/jeremybogaisky/2019/08/14/zeroavia-alakai-hydrogen-fuel-cell/#6ebf97ea18aa>
- 23) Halvorson B, "Hydrogen fuel-cell e-bike claiming longer range, quick refueling", 2019.8.16., https://www.greencarreports.com/news/1124598_hydrogen-fuel-cell-e-bike-claiming-longer-range-quick-refueling
- 24) The Green Village, "Hydrogen scooter as power plant", <https://www.thegreenvillage.org/projects/hydrogen-scooter-power-plant>
- 25) Barrett T, "China to cut subsidies for EVs and move towards hydrogen", 2019.4.16., <https://airqualitynews.com/2019/04/16/china-to-cut-subsidies-for-evs-and-move-towards-hydrogen/>



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2019 September vol.5 no.9



02

액상 유·무기 화합물 (LOHC, NH_3) 기반 대용량 수소저장기술 연구 개발 동향

조영석 (한국과학기술연구원 선임연구원)

윤창원 (한국과학기술연구원 책임연구원)

I 서론

현재 인류는 무분별한 화석에너지 사용에 따른 기후변화, 경제성장과 인구증가에 따른 에너지 수요의 폭발적 증가 등과 같은 다양한 에너지 및 환경 문제에 직면하고 있으며, 이를 해결하고 지속 가능한 지구 환경을 유지하기 위해 파리기후협정(Paris Agreement) 등 다양한 국제적 협력을 추진하고 있다. 이러한 노력의 일환으로 재생에너지 기반의 청정에너지 공급망 확산이 전 세계적인 이슈로 부상하고 있지만, 간헐적이고 예측이 어려운 재생에너지의 생산량은 전력수요 및 공급 간의 불균형을 유발할 수 있다. 그러므로 재생에너지의 안정적 공급 및 이의 활용도 제고를 위해서는 잉여로 생산된 전력을 저장하고 필요할 때 다시 사용할 수 있는 에너지저장기술이 반드시 필요하다. 다양한 에너지저장기술 중, 수소는 높은 무게대비 에너지 저장 밀도 (33.3kWh/kg-H_2)로 인해 전도유망한 재생에너지 운반체(renewable energy carrier)로 각광받고 있으며, 이러한 이유로 다양한 국가에서 수소·연료전지 활용 확대를 통하여 글로벌 차원의 에너지 패러다임의 전환을 선도하고 궁극적으로 제로-탄소 배출(zero-carbon emission) 사회를 실현하기 위해 노력하고 있다.

이러한 수소에너지의 상용화를 위해서는 수소의 생산, 저장·운송, 활용 등 모든 분야에서의 기술 혁신이 요구된다. 수소 활용기술인 연료전지는 이미 전 세계적으로 많은 연구·개발이 진행되었고, 특히 수송용 연료전지 기술은 상용화에 근접한 수준이나 여전히 가격 저감 및 내구성 향상을 위한 기술고도화가 필요하며, 상대적으로 투자가 이루어지지 않은 물로부터 수소를 생산하는 그린 수소생산 기술과 수소저장기술의 경우 기초부터 응용까지 아우르는 기술개발에 막대한 투자가 필요한 시점이다. 특히, 그린 수소의 생산처(재생에너지 생산처)와 소비처(수소충전소 및 연료전지발전소 등을 포함한 수소 도시) 간 지리학적 위치의 불일치성을 고려할 때, 수소에너지의 수요가 증가함에 따라 향후 수소 생산처로부터 수소 소비처까지 대용량의 수소를 안전하게 저장하고 운송하는 화합물 기반 수소저장 기술의 중요성이 강조될 것으로 예상된다. 본 리뷰에서는 미래 수소 사회 실현을 위한 핵심기술인 대용량 수소저장기술 중, 최근 많은 관심이 주목되고 있는 액상유기수소운반체(Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC) 및 암모니아(NH_3)를 이용한 국내·외 대용량 수소저장 및 장거리 운송기술 개발 현황을 소개하고, 앞으로 진행될 연구 개발의 동향을 파악해보고자 한다.

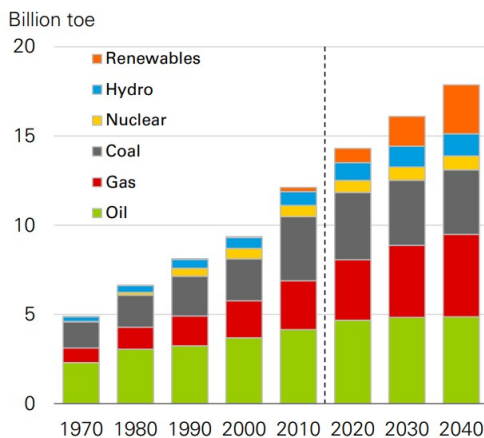
1. 배경 및 필요성

서론에서 서술하였듯이, 현재 인류는 경제성장에 따른 세계 인구 및 에너지 수요의 폭발적 증가와 막대한 화석연료 사용으로 인해 배출되는 온실가스에 의한 급격한 기후변화 등 전례 없는 에너지 및 환경 문제에 직면하고 있다. 최근, 이들 문제를 해결하기 위한 국제적 노력의 일환으로 2015년 12월, 파리기후협정(Paris Agreement)이 체결되었으며, 협정의 주요 내용은 지구 평균온도 상승 폭을 산업화 이전 대비 2°C 이하로 유지하고, 온도 상승 폭을 1.5°C 이하로 낮추기 위한 노력을 포함하고 있다(Paris Agreement, 2015).

이와 더불어, 최근 BP에서 발간한 2019 Energy Outlook 보고서에 따르면, 2040년까지 재생에너지의 비율이 다른 에너지원에 비해 가장 빠르게 증가할 것이며, 전 세계적인 에너지 수요 증가의 2/3를 재생에너지가 담당할 것으로 예상하고 있다(그림 1). 또한, 전 세계 에너지 수요전망 관련 보고서에는 2016~2040년 세계 1차 에너지 수요는 연평균 1% 증가하고 석탄, 석유와 같은 화석연료의 기여도는 감소하나 가스 및 신재생 에너지의 기여도가 증가할 것이며, OECD 국가들의 경우, 1차 에너지 수요는 연평균 0.2% 감소하나, 재생에너지가 화석에너지를 대체하는 현상이 두드러질 것으로 전망하였다(양의석 et al., 2017). 따라서, 향후 친환경 재생에너지의 비중이 증가할 것이 분명하며 이를 중심으로 한 글로벌 차원의 에너지 패러다임의 전환이 예상된다.

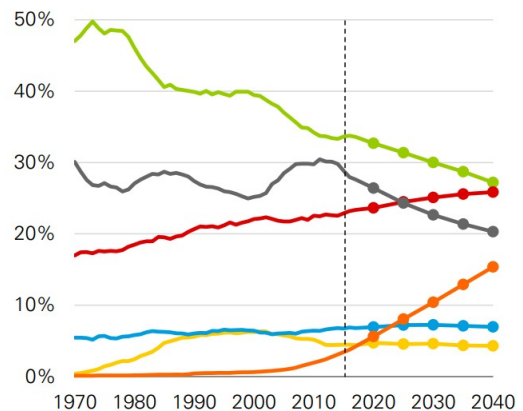
그림 1 에너지원에 따른 에너지 수요전망

Primary energy consumption by fuel



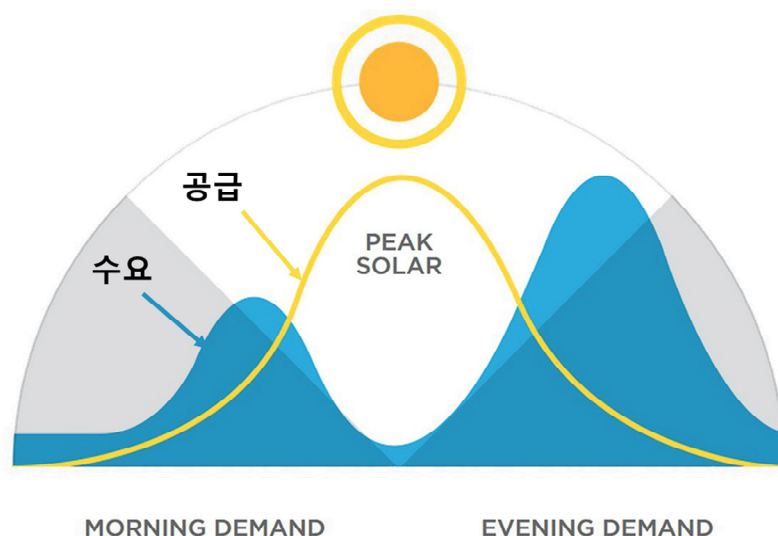
(출처: 2019 BP Energy Outlook).

Shares of primary energy



하지만, 재생에너지는 시간 및 지역에 따라 변화하는 발전 출력의 정확한 예측이 어려우며, 이는 실시간 전력수요와 공급 간 불균형을 초래하여 전력 공급의 안정성에 영향을 미칠 수 있다(그림 2). 따라서, 시간 및 계절에 따라 불규칙하게 생산되는 재생에너지를 안정적으로 이용하기 위해서는 잉여로 생산된 전력을 저장했다가 필요 시 다시 방출할 수 있는 에너지저장기술이 반드시 필요하다.

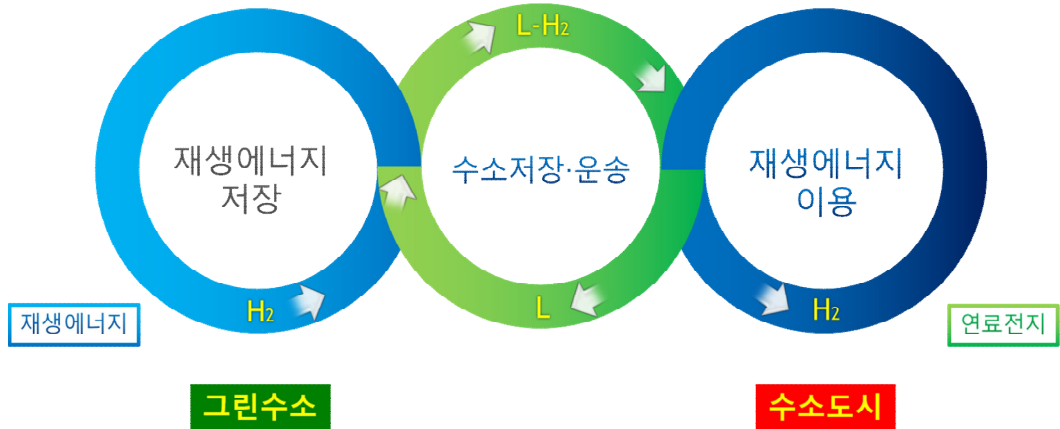
그림 2 시간에 따른 재생에너지의 공급과 수요의 불균형



(출처: Tesla Powerwall)

다양한 에너지저장기술 중, 수소를 이용한 에너지저장기술(Hydrogen based Energy Storage System, HESS)은 재생에너지 기반 잉여전력을 이용하여 물을 전기분해 함으로써 이산화탄소 배출 없이 재생에너지를 수소의 형태로 저장하고, 원하는 곳으로 운송한 후 필요할 때 연료전지와 연계하여 전기를 재생산하는 기술이며, 대용량 재생에너지의 장주기 저장기술로서 각광받고 있다(그림 3). 재생에너지 이용이 확대됨에 따라 가까운 미래에는 재생에너지 생산 부국과 빈국 간 에너지 거래가 이루어지는 새로운 글로벌 에너지 시장이 창출될 것으로 예측되는데, 대용량 재생에너지를 케이블을 이용한 전기의 형태로 국가 간 전송하거나 배터리에 전기를 저장하여 국가 간 운송하는 것은 막대한 투자가 필요하며 운송효율 및 경제성이 극히 낮다. 이러한 이유로, 재생에너지 부국에서 생산된 잉여의 초저가 대용량 재생에너지를 재생에너지 빈국으로 경제적으로 운반하기 위해서는 새로운 형태의 재생에너지 운반체(Renewable Energy Carrier)가 요구된다.

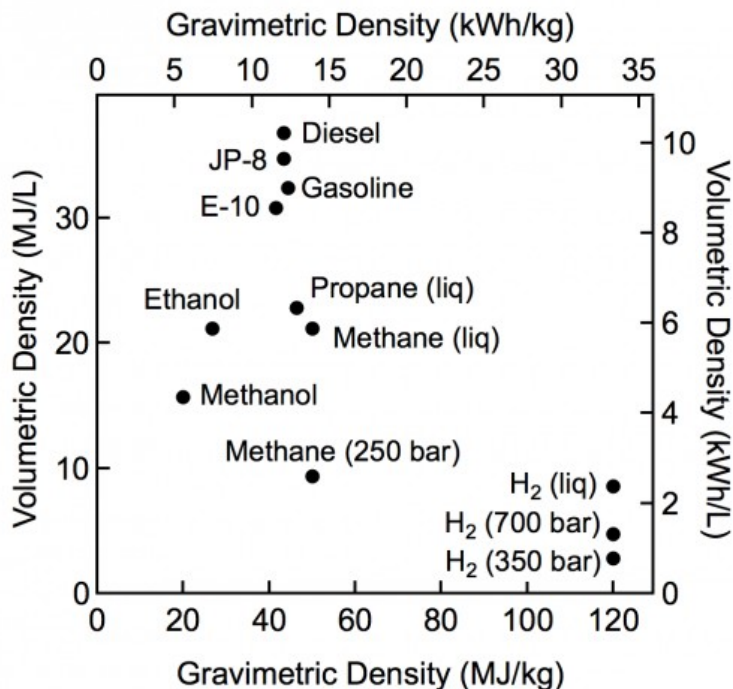
그림 3 수소를 에너지 운반체로 활용한 재생에너지 저장 및 활용 기술 개념



이렇게 대용량 재생에너지 운반체(Renewable Energy Carrier)로 수소가 주목받고 있는 이유는 다음과 같다.

- 1) 수소는 현재 수송용 연료로 많이 사용되는 가솔린 및 디젤이 가지는 에너지 밀도보다 약 3배 높은 33.3kWh/kg(120MJ/kg)의 무게대비 에너지 밀도를 가지므로 대용량 재생에너지 저장에 적합하다.
- 2) 연료전지와 연계 시 고효율로 에너지를 생산할 수 있으며 이산화탄소의 배출 없이 물만 배출하므로 전력 생산 프로세스가 친환경적이다.
- 3) 추후 그린 수소 생산 기술(예. 수전해)을 통해 물의 전기분해로부터 효율적으로 수소를 생산하는 경우, 이산화탄소 배출이 없는 재생에너지의 저장이 가능하다.

그림 4 다양한 연료의 무게 및 부피대비 에너지 저장 용량



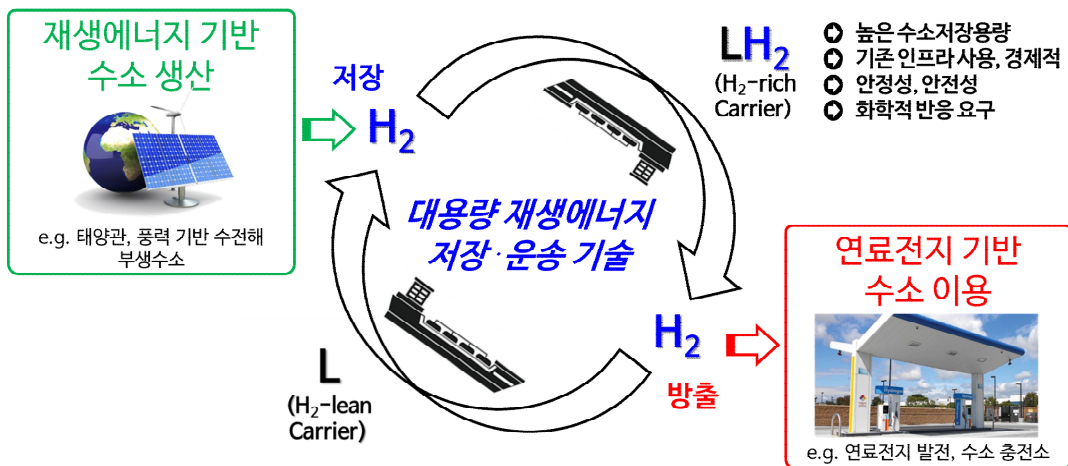
(출처: U.S. Department of Energy)

그러나 대용량의 수소를 장거리 운송하는 경우, 운송효율의 극대화를 위해 필요한 주요 인자는 수소가 가지는 부피대비 에너지 저장 특성이다. 즉, 수소가 가지는 낮은 부피대비 에너지저장밀도(2.97kWh/m³, 0°C & 1bar)는 대규모의 기체 수소를 선박을 이용하여 장거리로 운송하는 효율을 저하한다. 따라서 온도를 극한의 조건까지 낮춰 수소의 밀도를 물리적으로 증가시키는 방법들이 현재 활용되고 있지만, 수소를 액화시키더라도 여전히 다른 연료들에 비해서는 낮은 부피대비 에너지 저장밀도를 가지는 것을 알 수 있다(그림 4). 다시 말해, 이는 대용량의 수소를 선박 등에 고압으로 압축하여 장거리 저장·이송하는 것이 여러 가지 면에서 불리함을 의미한다.

상기 이유들로 인해, 최근 수소를 액상 화합물로 전환하여 대용량의 에너지를 장거리로 운송하는 기술개발에 대한 관심이 증가하고 있다. 액상 수소저장기술은, 현재 화석연료(예. 휘발유 및 디젤) 운송과 마찬가지로, 단위 부피당 높은 에너지 저장밀도를 갖는 액상 수소 운반체(Liquid Hydrogen Carrier)를 이용하여 수소를 저장하고 운송하는 기술로서(그림 5), 초기에 막대한 투자 없이 현존하는 화석연료 저장 및 운송 인프라의

사용이 가능하여 경제적인 이송이 가능하며 동시에 고압 기체 저장 방식보다 월등히 안전하게 장기간 저장할 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 수소저장과 방출 사이클에서 화학 반응이 관여하며, 이들 반응을 촉진하기 위한 에너지가 필요하다는 특성을 지니고 있다.

그림 5 액상 수소 운반체 기반 수소저장·운송 개념

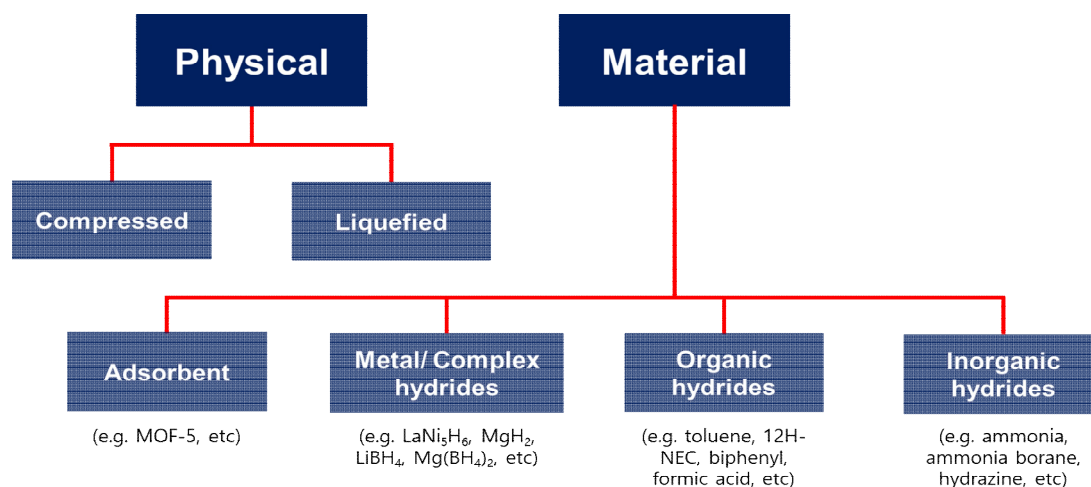


2. 기존의 수소저장 방법

현재 수소저장 기술은 크게 물리적(Physical-based), 그리고 물질기반(Material-based) 저장 방식으로 나눌 수 있다(그림 6). 기존의 수소저장으로 가장 많이 사용되는 방법은, 고압 및 액화 수소저장이다. 수소전기차의 경우 내부에 고압 수소탱크가 탑재되어 있으며, 다양한 방법으로 생산된 수소를 350 혹은 700bar의 압력까지 압축하여 사용한다. 이 경우, 압력에 따라 저장 탱크의 시스템 무게대비 5.2~5.5wt%의 수소저장이 가능한 것으로 알려져 있다. 하지만 수소 압축 시 저장된 수소의 9~12%와 동일한 에너지가 필요하며(Hydrogen Europe, 2019), 고압 탱크 제조에 사용되는 복합 탄소섬유 소재가 저장 비용의 65% 이상을 차지하고 있다(Hwang H, 2014). 고압 압축저장의 경우 단기적으로 수소에너지 및 연료전지 기반 수송 시스템의 상용화에 직접적으로 기여할 수 있는 중요한 기술이지만, 이론적인 부피대비 수소저장 용량이 $24\sim40\text{gH}_2/\text{L}_{\text{sys}}$ 로 타 기술에 비해 상대적으로 낮은 저장용량을 가지므로 대용량 재생에너지 저장·운송에 적용하기 위해서는 혁신적인 기술개발이 요구된다(Hwang H, 2014).

다른 물리적 저장기술로는 액화 수소저장(Cryogenic Hydrogen Storage)이 있다. 이는 수소를 -253°C 로 액화시켜 저장하는 방식으로 상압에서 약 70g/L 의 높은 부피대비 수소저장밀도를 가진다는 장점을 가지고 있다. 하지만 단열이 잘 되어있는 액화 수소저장 용기를 사용하더라도 미량의 수소가 발생하여, 장기간 수소저장이 어렵다는 단점을 가지고 있으며, 저장된 수소의 30~35%는 액화를 위한 에너지 공급에 사용되므로 에너지 효율이 낮다는 단점을 가지고 있다(Hwang H, 2014). 이 이외에도 물리적인 방법으로는, 압축 수소와 액화 수소의 장점을 합친 극저온 압축저장(Cryo-compressed Storage)기술 또한 연구되고 있지만, 상용화를 위해서는 추가적인 기술 혁신이 필요하다.

그림 6 수소저장 방법의 분류



상술한 물리적 수소저장 연구의 초점은 현재 미국 에너지부(U.S. Department of Energy, U.S. DOE)에서 지정한 승용 수소전기차의 수소저장 시스템 대비 높은 저장효율의 달성을 목표로 한다(그림 7). 이와 마찬가지로, 물질 기반의 수소저장 연구 또한 기존의 물리적 수소저장 방법에 비해 우수한 저장효율을 확보하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 소재를 기반으로 하는 고효율 수소저장시스템 개발을 위해서는 U.S. DOE의 2025년 기술개발 목표치인 수소저장시스템 대비 5.5wt%, 40g L^{-1} 의 수소저장 목표를 달성하기 위하여(U.S. Department of Energy), 수소저장 소재 기준 11wt%, 79g L^{-1} 의 저장용량을 가지며 동시에 수소 방출에 필요한 반응 엔탈피가 $30\text{kJ/mol}_\text{H}_2$ 를 가지고 있는 고효율 수소저장 소재를 발굴하는 것이 필요하며 이를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다(He T, 2016).

이러한 소재 기반의 수소저장방식에 사용되는 소재의 경우, 소재의 종류에 따라 (i) 흡착제(adsorbent), (ii) 금속수소화물/복합수소화물(metal hydride/complex hydride), (iii) 유기수소화물(organic hydrides), 및 (iv) 무기수소화물(inorganic hydrides) 네 가지로 분류할 수 있다. 먼저, 흡착 기반의 수소저장기술은 MOF(Metal Organic Framework) 혹은 제올라이트(Zeolite) 등과 같은 미세기공을 가진 물질들에 수소를 흡착시키는 방법이다. 금속수소화물/복합수소화물의 경우, 팔라듐(Palladium), 마그네슘(Magnesium), 란타넘(Lanthanum)과 같은 금속, 혹은 이들과 알루미늄 등과 같은 가벼운 금속의 합금, 혹은 이들 금속과 붕소 등을 함유한 무기물 간의 합금으로 이루어지며, 금속 격자에 수소 원자 형태로 수소를 저장하는 방식을 포함한다. 상술한 방법들 모두 현재 개발 진행 중이며, 소재의 안정성 및 수소의 탈착 혹은 흡착에 필요한 에너지를 효율적으로 공급하는 것이 중요한 이슈이다. 유기수소화물을 이용한 수소저장기술은, C=C 이중 결합을 포함하는 고리화합물(homocycles), 질소화 같은 이종원자를 포함하며 C=C 이중 결합을 포함하는 헤테로고리화합물(heterocycles), 개미산(formic acid) 등과 같은 유기화합물을 포함하며 주로 액상으로 존재함으로 인해 저장 및 운송에 큰 강점을 가진다. 마지막으로 무기수소화물을 이용한 수소저장기술로써 암모니아(ammonia), 암모니아보란(ammonia borane), 히드라진(hydrazine) 등과 같이 탄소 원자를 포함하지 않은 무기화합물을 이용하여 수소를 저장 및 추출하는 방식이다.

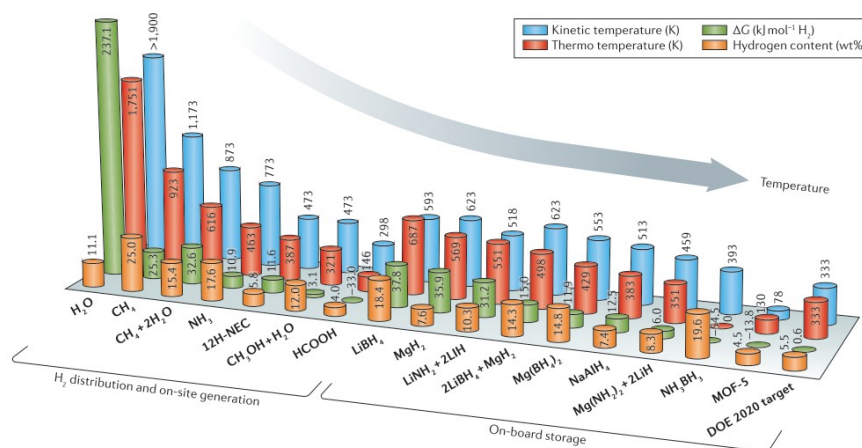
그림 7 수소저장시스템 개발 목표

Table 1. Technical System Targets: Onboard Hydrogen Storage for Light-Duty Fuel Cell Vehicles ^a (updated May 2017)				
Storage Parameter	Units	2020	2025	Ultimate
System Gravimetric Capacity: Usable, specific-energy from H ₂ (net useful energy/max system mass) ^b	kWh/kg (kg H ₂ /kg system)	1.5 (0.045)	1.8 (0.055)	2.2 (0.065)
System Volumetric Capacity: Usable energy density from H ₂ (net useful energy/max system volume) ^b	kWh/L (kg H ₂ /L system)	1.0 (0.030)	1.3 (0.040)	1.7 (0.050)
Storage System Cost : • Fuel cost ^c	\$/kWh net (\$/kg H ₂) \$/gge at pump	10 333 4	9 300 4	8 266 4

(출처: U.S. Department of Energy)

본 리뷰에서는 상술한 다양한 소재 기반 수소저장방식 중, 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 유기물 및 무기물 기반 수소저장방법, 특히 대용량 수소 운반체로서 활용이 가능한 액상유기수소운반체(Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC) 및 암모니아 기반 수소저장기술의 개발 현황과 전망에 대하여 알아보려 한다.

그림 8 수소 저장에 활용 가능한 물질 후보군과 후보군별 수소저장용량과 열역학적 특성



(출처: He T, 2016)

II 액상유기화합물 및 암모니아 기반 수소저장

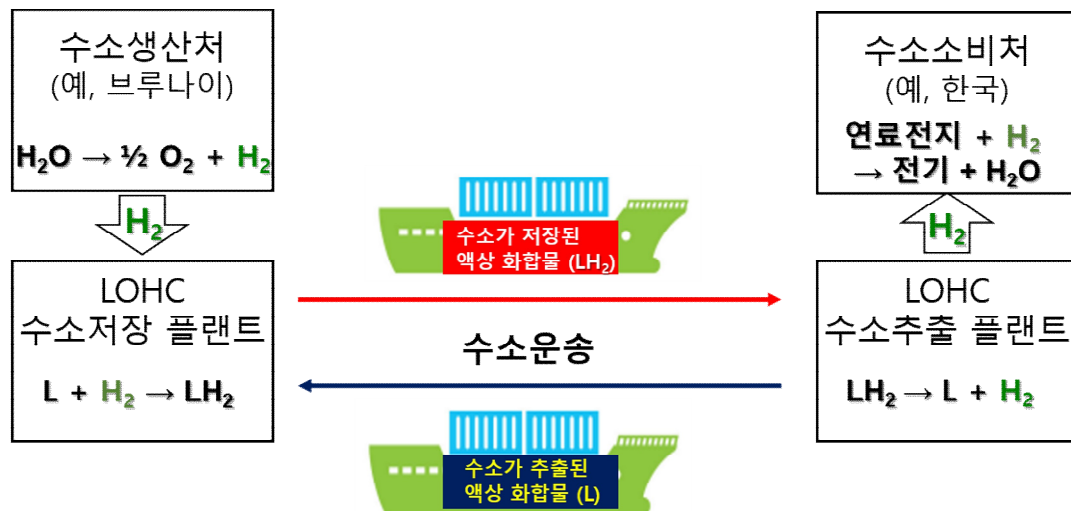
1. 액상유기수소운반체(LOHC) 기반 수소저장

대용량 수소저장 및 운송을 위한 대표적 액상 화합물 기반 수소 운반체로는 탄소-탄소 이중결합 구조를 포함하는 액상 유기화합물이 있으며 이를 Liquid Organic Hydrogen Carrier(LOHC)라고 부른다. LOHC를 이용한 상온, 상압 수소저장·운송 기술은 다음의 장점이 있다.

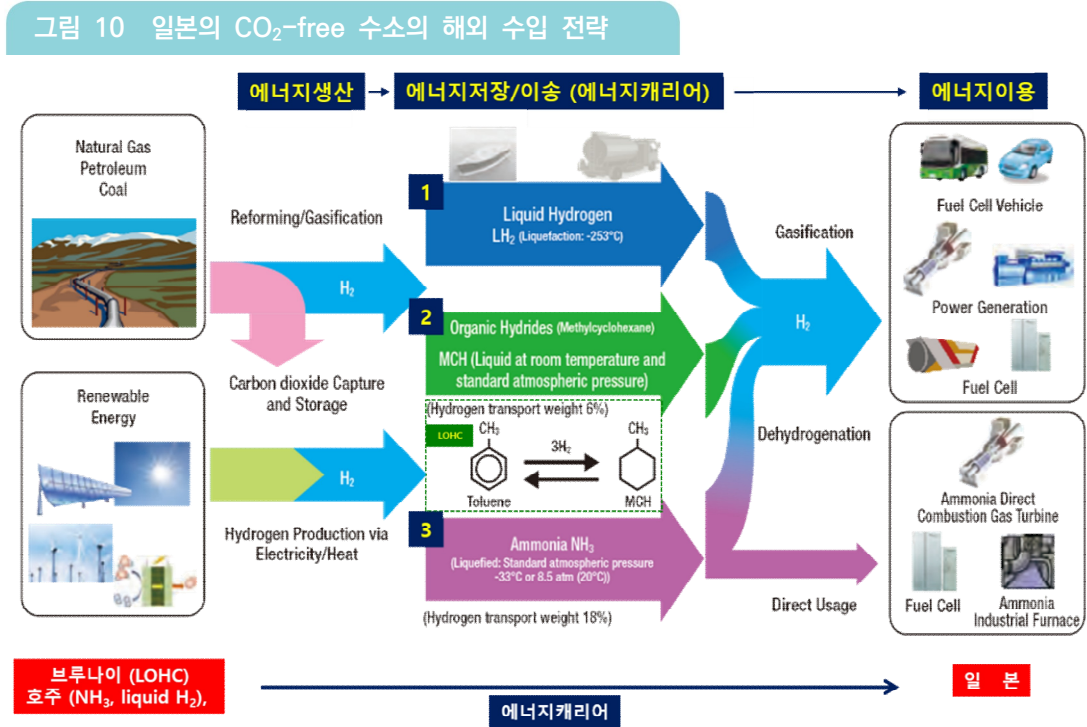
- 1) LOHC는 매우 높은 부피대비 수소저장용량($>55\text{kgH}_2/\text{m}^3$; $>1.83\text{ MWh}/\text{m}^3$, 소재기준) 및 높은 무게대비 수소저장용량 ($>6\text{wt}\%$, 소재기준)을 가진다.
- 2) LOHC를 이용하면, 반복적인 수소저장 및 수소 방출 사이클 구현이 가능하다.
- 3) LOHC는 현존하는 화석연료 저장·운송 인프라를 거의 그대로 이용할 수 있으므로 대용량의 수소를 경제적으로 저장·운송할 수 있다.

예를 들어, 수소전기차 1대당 약 5kg의 수소를 충전한다고 가정하면, 1m^3 부피를 갖는 LOHC는 대략 수소전기차 10대 이상을 충전할 수 있는 양의 수소를 저장할 수 있다. 이러한 LOHC를 이용한 국가 간 재생에너지 저장·운송의 개념은 다음과 같이 요약할 수 있다. 먼저 액상 유기화합물(L)을 이용해 재생에너지를 활용하여 물을 분해하여 생산된 수소를 액상 유기화합물(LH₂)로 변환한다. 그다음으로는 이렇게 생산된 대용량의 LH₂를 선박 등을 이용하여 원하는 국가로 이송 후 저장하고 있다가, 필요할 때 저장된 수소를 추출하여 연료전지 등과 연계하여 청정에너지 생산에 이용한다. 마지막으로 수소가 추출되고 남은 유기화합물(L)은 다시 재생에너지 생산국으로 이동하여 생산된 수소를 저장한다. 그러므로, LOHC 기반 수소저장운송 개념에서는 수소 생산처는 수소저장 플랜트가 요구되고, 수소 소비처는 수소 방출 플랜트를 필요로 한다.

그림 9 LOHC 기반 수소저장·운송 개념: 국가 간 재생에너지 저장·운송 예시



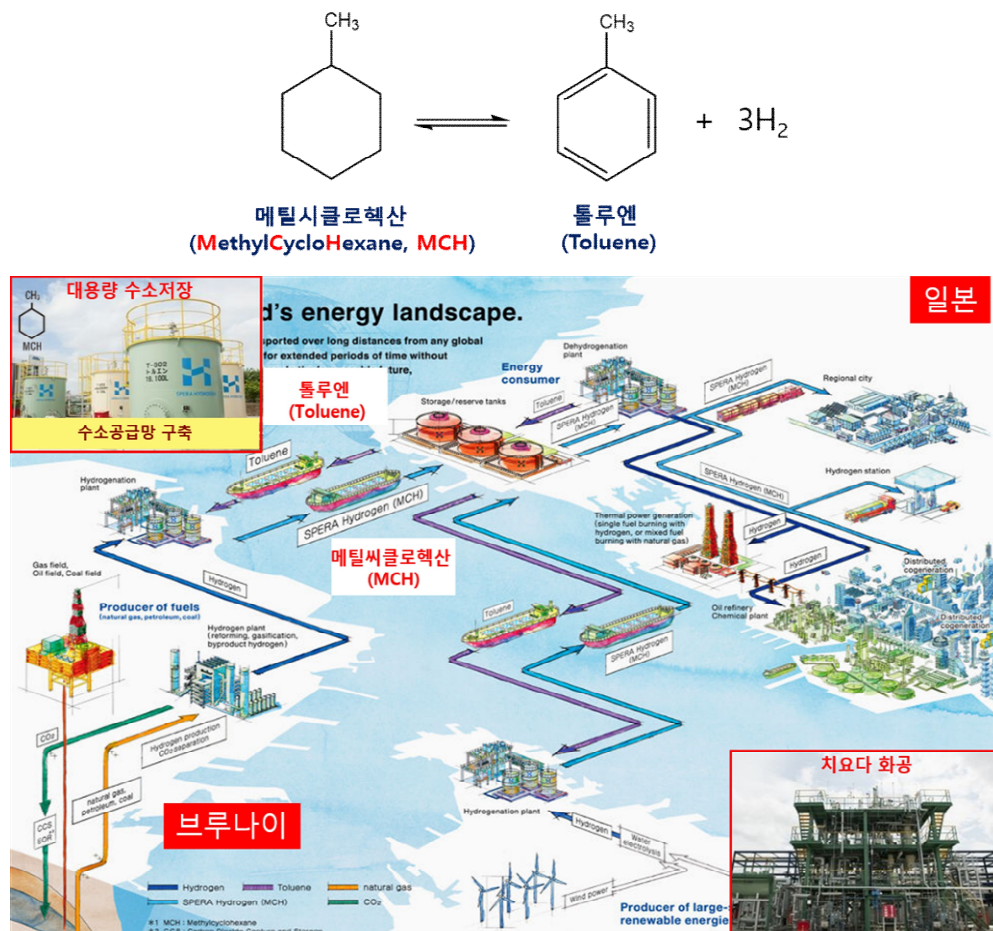
상기 개념을 가지고 LOHC 기반 대용량 수소저장·운송을 실현하고자 하는 대표적인 나라는 바로 일본이다. 일본은 국가적 로드맵 및 “수소공급망(hydrogen supply chain)” 구축에 대한 전략적 계획을 수립하였으며(그림 9), LOHC 이외에도 암모니아와 액화 수소 등의 다양한 수소 운반체 및 저장시스템을 개발하여 해외로부터 생산된 저가의 대규모 CO₂-free 수소를 공급받아 이용하는 방안을 체계화하고 있다.



(출처: Japan SIP Energy Carriers [10])

예로, 일본 치요다화학건설은 톨루엔(Toluene)을 이용한 수소저장 및 운송기술을 개발 중인데, 톨루엔에 수소를 저장하면 액상 메틸시클로헥산(methylcyclohexane, MCH)이 생성되며 상온, 상압 운송이 가능하다. 메틸시클로헥산 화합물 내 저장된 수소의 저장용량은 무게 및 부피 기준으로 각각 약 6.1wt% 및 47kgH₂/m³이며, 활용처에서 메틸시클로헥산으로부터 촉매를 이용한 탈수소화반응을 통해 수소를 추출할 수 있다. 치요다화공을 주축으로 일본에서 선박을 이용하여 톨루엔을 브루나이로 가져간 후 브루나이에서 생산된 수소를 현지에서 메틸시클로헥산으로 전환하고 이를 다시 선박으로 일본까지 이송하는 국가적 차원의 “SPERA Hydrogen” 프로젝트를 수행 중이며(그림 10), 운송한 대량의 메틸시클로헥산을 저장하고 있다가 필요할 때 수소를 추출하여 발전소 등의 연료로 활용하는 국가적 차원의 실증 프로젝트를 진행 중에 있다.

그림 11 일본의 Toluene-MCH 기반 수소저장 사이클(위) 및 대용량 수소저장 및 장거리 운송을 위한 SPERA Hydrogen 프로젝트(아래)의 모식도

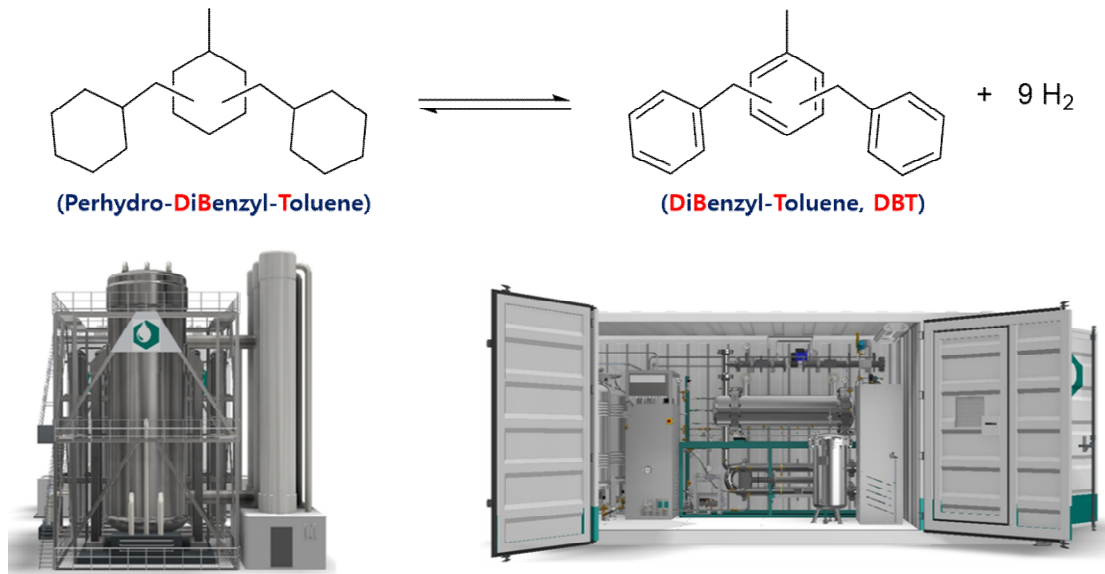


(출처: Chiyoda Corporation)

일본과 더불어, 독일 역시 LOHC를 이용한 수소저장·운송 및 에너지저장기술 개발을 수행하고 있다. Hydrogenious Technologies에서는 디벤질톨루엔(dibenzyltoluene) 기반의 상용 열매체유 (Marlotherm)를 이용하여 대량의 수소를 저장하고 상온 및 상압에서 운송하며 필요 시 화합물에 저장된 수소를 추출할 수 있는 시스템을 개발하였다(그림 11). 수소저장 플랜트의 경우 시간당 30~50bar 에서 5,000Nm³의 수소저장 및 8,000L의 수소가 저장된 LOHC 생성이 가능하고, 수소 방출시스템의 경우 시간당 250Nm³ 까지 수소 방출이 가능하다. Hydrogenious Technologies는 LOHC 시스템을 독일 및 미국 시장에 출시하였으며,

최근에는 중국의 수소연료전지 분야를 선도하는 기업 중 하나인 Zhongshan Broad-Ocean Motors와 전략적 파트너십을 체결하고 LOHC를 활용한 수소충전소 네트워크 수립을 추진하고 있다.

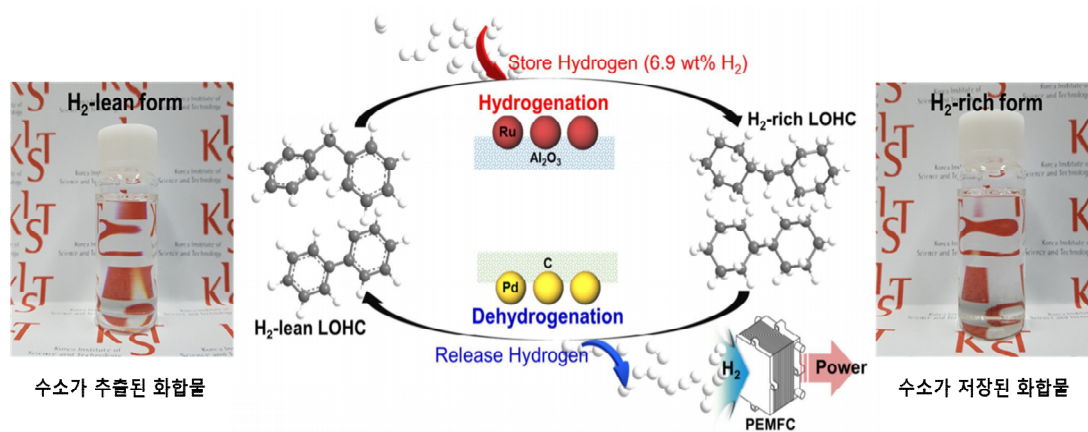
그림 12 독일 Hydrogenious Technologies의 수소저장 및 방출 물질(위) 및 시스템 모형도: 수소저장시스템(왼쪽 아래) 및 수소 방출시스템(오른쪽 아래) 그림



(출처: Hydrogenious LOHC Tehcnologies)

한국에서는 현재 LOHC 관련 기초 연구를 수행하고 있다. 한국과학기술연구원(KIST) 수소·연료전지연구단은 산업통상자원부 및 과학기술정보통신부의 지원으로 신규 LOHC를 발굴하고 2017년 국내 최초로 이를 이용한 소규모 수소저장 및 수소 방출시스템을 개발하였다. KIST가 개발한 LOHC는 상용 화합물인 바이페닐(biphenyl)과 디페닐메탄(diphenylmethane)이 혼합된 액상물질로서, 가격이 저렴하고 높은 안정성으로 인해 반복적인 수소저장-수소 방출 사이클 구현이 가능하다(그림 12). 현재 KIST는 해당 소재를 기반으로 추가적인 물성 향상, 수소저장 및 수소 방출을 위한 고성능 촉매 개발과 더불어 고효율 시스템 개발을 위한 노력에 박차를 가하고 있다.

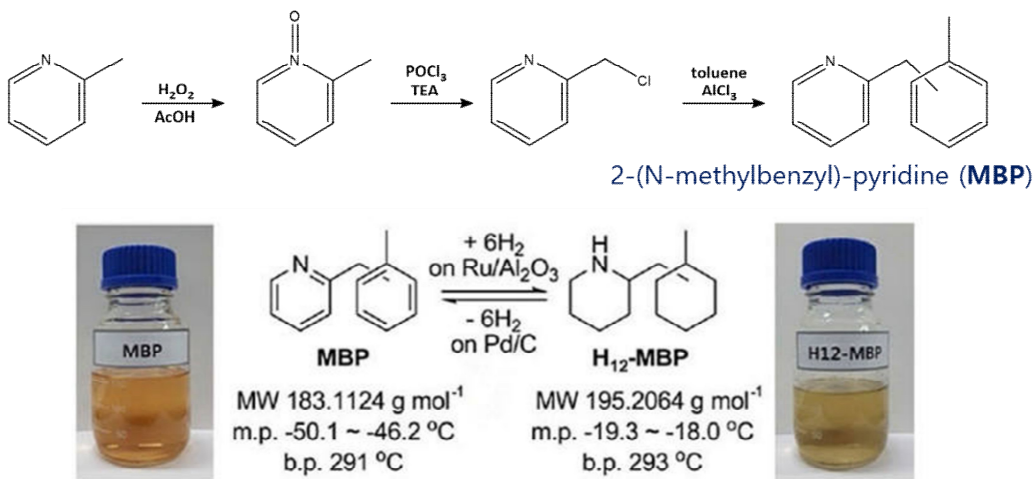
그림 13 한국과학기술연구원 수소·연료전지연구단이 개발한 신규 LOHC 및 이를 활용한 수소 저장/추출 사이클



(출처: Jo Y, 2019)

또한, 한국화학연구원, 한양대학교, 및 포항공과대학교 등으로 구성된 연구팀은 그림 14와 같이 메틸벤질피리딘 (MBP) 기반의 LOHC를 발굴하여 가역적인 수소저장 및 방출 사이클을 실증한 바 있다.

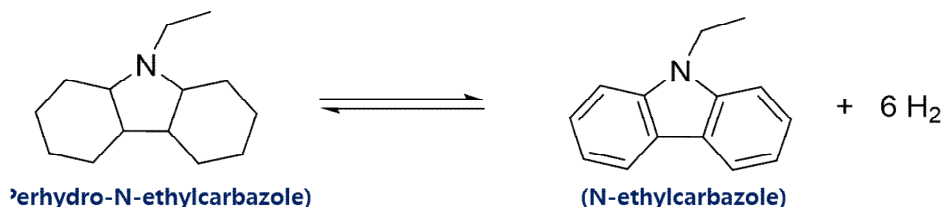
그림 14 한국화학연구원, 한양대학교, 및 포항공과대학교 연구팀이 개발한 신규 LOHC



(출처: Oh J, 2017)

위에서 소개한 톨루엔, 디벤질톨루엔, 바이페닐/디페닐메탄 혼합물 등과 같이 화합물의 고리 내부에 탄소와 수소로만 구성되어 있는 homocyclic compounds는 일반적으로 수소추출에 큰 에너지를 필요로 한다(Δh dehydrogenation > 60kJ/molH₂). 하지만 탈수소화 반응에 요구되는 높은 반응열은 LOHC 재설계를 통하여 소재의 열역학적 특성을 변화시킴으로써 낮출 수 있다(Zhu Q, 2015). 대표적인 예로는 미국 Air Products가 미국 에너지부의 지원을 통해 개발한 에틸카바졸(N-ethylcarbazole)이 있는데(그림 15), 이 화합물은 고리 구조 내 탄소 원자, 수소 원자와 더불어 질소 원자를 포함하고 있다. 이렇게 분자의 고리 내 질소 원자와 같은 이종원자(heteroatom)를 포함하는 heterocyclic compounds의 다른 예로는 indole, pyridine 등이 있다. Air Products가 발굴한 에틸카바졸의 경우 5.8wt% 및 57kg·H₂/m³의 무게 및 부피대비 수소저장용량을 가진다.

그림 15 미국 Air Product가 개발한 N-Ethylcarbazole 기반 LOHC



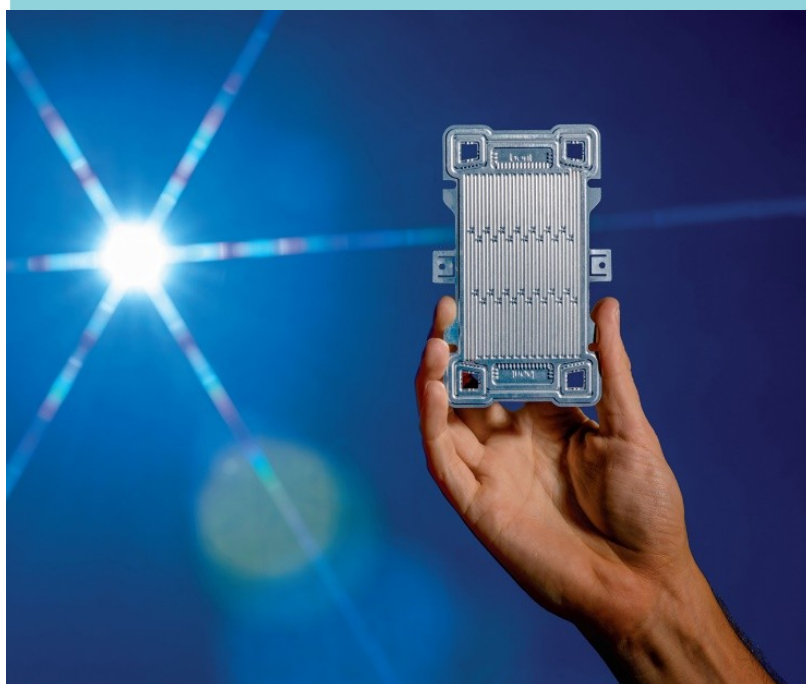
(출처: Air Products)

2. 암모니아(NH₃) 기반 수소저장

위에 상술한 유기화합물 이외에도 무기화합물인 암모니아 또한 비교적 낮은 압력에서 액상으로 대용량의 수소를 저장하고, 이를 안정적으로 운송할 수 있는 전도유명한 수소 운반체로 각광받고 있다. 현재 하버-보쉬(Haber-Bosch) 공정 기반의 암모니아 생산은 전 세계 에너지 소비의 2%, 이산화탄소 배출의 1%를 차지하고 있지만, 재생에너지와 연계하여 이산화탄소 배출을 감소시키는 기술들의 개발이 활발히 진행되고 있다. 호주 재생에너지부(Australian Renewable Energy Agency)에서는 재생에너지와 연계하여 생산된 암모니아의 수출을 위한 기술개발을 주도하겠다고 발표하였으며, 궁극적으로 낮은 온도에서 전기화학적으로 암모니아를 생산하여 기존의 하버-보쉬 공정을 대체하고 이산화탄소 배출을 없애기 위한 기술개발에 매진하고 있다(그림

16). 이러한 움직임은 암모니아가 전 세계적으로 퍼져있는 재생에너지 생산처와 활용처를 잇는 중요한 수소에너지 운반체가 될 가능성에 기반을 두고 있다.

그림 16 물과 질소로부터 암모니아 생산이 가능한 전기화학 장치

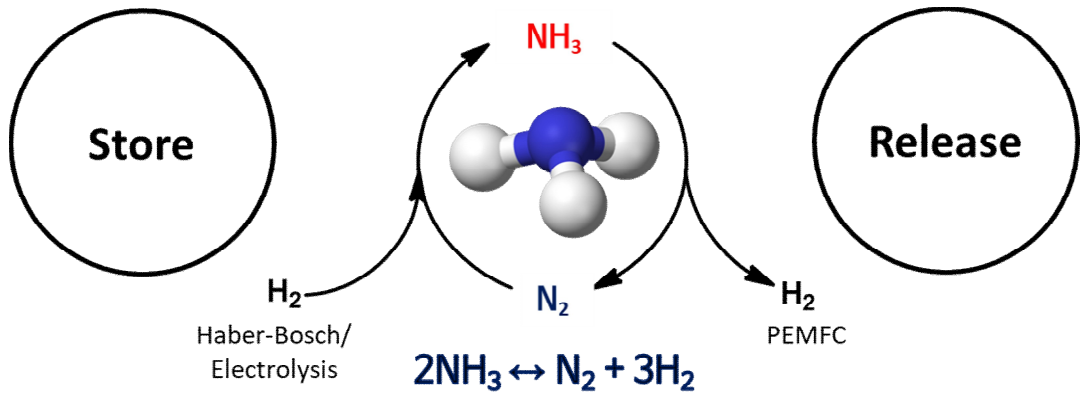


(출처: Service R, 2018)

암모니아가 수소운반체로서 가지는 장점은 다음과 같다.

- 1) 무게 및 부피대비 수소저장용량이 각각 17.7wt% 및 $120 \text{ kg-H}_2/\text{m}^3$ 로 LOHC 및 다른 액상 수소 저장체보다 월등히 높다.
- 2) 암모니아는 분해 후 질소와 수소만 생성하고 이산화탄소를 배출하지 않는다(그림 17).
- 3) 암모니아는 수소와 달리 액화가 용이하다(약 8기압, 20°C).
- 4) 현존하는 암모니아 저장 및 이송 인프라를 거의 그대로 활용할 수 있으므로 경제적인 수소저장 및 이송을 구현할 수 있다.

그림 17 암모니아 기반 수소저장 및 방출 사이클



암모니아는 자극적인 냄새와 더불어 독성이 있어 신중한 취급이 요구되나, 현재 다양한 산업에서 암모니아를 안전하게 사용하고 있다. 암모니아는 단방향 수소 캐리어로서 수소 이용처에 수소추출 플랜트만을 필요로 한다. 즉, 호주, 중국과 같은 암모니아 수출국으로부터 구입한 대량의 암모니아를 선박으로 이송한 후, 수소 이용처(예, 일본, 한국)에서 수소추출 플랜트를 통해 암모니아 분해를 통해 생산된 수소는 에너지 생산에 활용하는 방식이다(그림 18). 이 과정에서 생성된 질소 기체는 공기 중에 방출하거나, 액화 질소 제조 등에 사용될 수 있다.

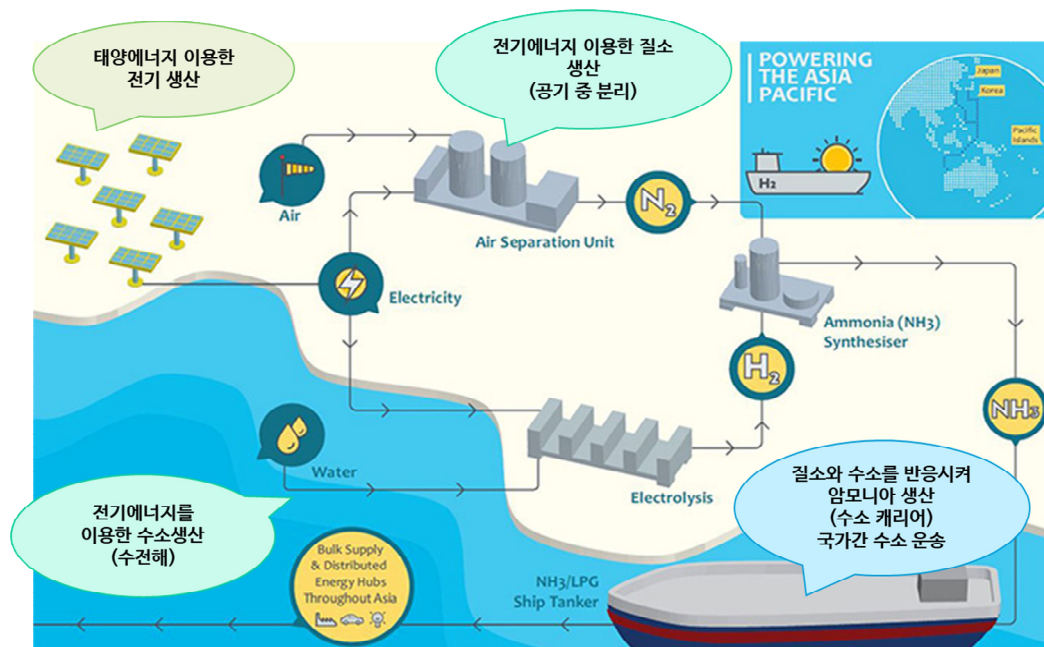
그림 18 암모니아 기반 수소저장·운송 개념



(국가 간 재생에너지 저장·운송 예)

일본은 LOHC와 더불어 외국에서 대량의 수소를 수입하기 위한 수소 운반체로 암모니아를 고려하고 있다(그림 9). 일본은 호주와 협업으로 암모니아를 대용량 수소 운반체로 활용하는 국가적 차원의 프로젝트를 추진 중인데, 그림 19에서 보듯이, 호주가 보유하고 있는 풍부한 재생에너지로부터 생산된 전기를 이용하여 물을 분해 후 수소를 만들고, 재생에너지를 활용해 공기 중의 질소를 분리해 내며, 이렇게 생산된 수소와 질소를 하버-보쉬 공정을 통해 합성하여 암모니아를 제조한다. 이렇게 생산된 암모니아는 선박을 통해 일본으로 운송된 후 대규모로 저장해 두었다가, 필요 시 암모니아 분해를 통해 수소를 생산하고 이를 수소전기차 및 연료전지 발전에 사용한다.

그림 19 호주에서 추진 중인 이산화탄소 배출량이 저감된 암모니아 생산 공정과 수출 계획

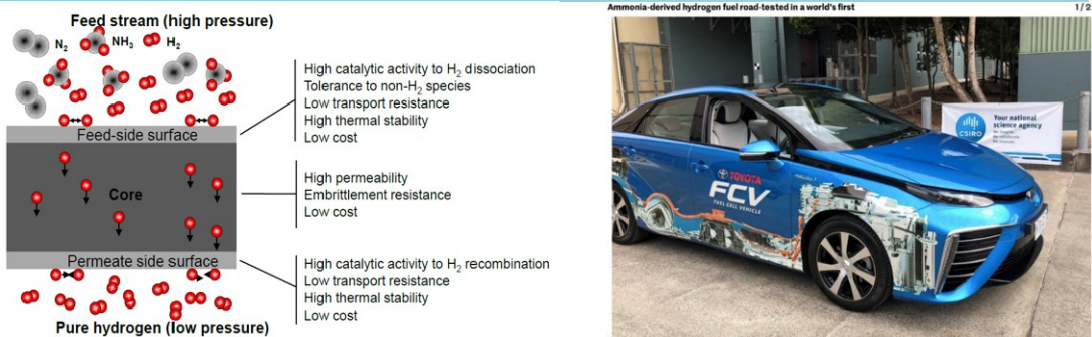


(출처: ABC News, 2017)

동시에, LOHC와는 달리, 암모니아는 직접 연료로 활용하여 연소를 통해 에너지를 생산하거나 직접 연료전지에 공급함으로써 발전할 수 있는 특징을 가지고 있다. 이와 함께, 2018년에는 다이요닛산, 히로시마 대학 등으로 구성된 공동연구팀이 암모니아 분해를 통해 생성된 수소 및 질소 혼합가스로부터 PSA(Pressure Swing Adsorption) 공정을 활용하여 고순도의 수소를 분리해 내는 20Nm³/h 급 고효율 수소정제시스템을 개발한 바 있다.

일본이 개발한 암모니아 분해 반응을 통해 수소 및 질소 혼합가스를 생산하고 이로부터 고순도의 수소를 분리하는 시스템과 달리, 호주 연방과학원(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, CSIRO)은 암모니아로부터 생산된 혼합가스를 다른 방식으로 분리하여 자동차 연료로 사용할 수 있는 기술을 오랫동안 개발해 왔다. 2018년 호주 연구팀은 수소를 분리할 수 있는 멤브레인 기술을 이용하여 암모니아 분해를 통해 생산된 수소를 고순도로 분리하는 기술개발에 성공하고, 현대 넥쏘(Nexo) 및 도요타 미라이(Mirai) 수소전기차에 충전을 실증하였다(그림 20). 이 기술은 호주에서 만든 수소를 액상 암모니아 형태로 바꾸고 이를 일본을 포함한 아시아의 해외 시장에 대량으로 운송한 후, 멤브레인 기술을 이용하여 다시 고순도 수소로 전환하여 수소전기차에 충전을 가능케 한다. 해당 기술은 수소전기차 충전 이외에도 수소를 사용하는 다양한 응용에 적용할 수 있다. 호주는 개발된 기술을 바탕으로 친환경 수소를 아시아를 비롯하여 전 세계에 수출하는 방안을 고려하고 있다.

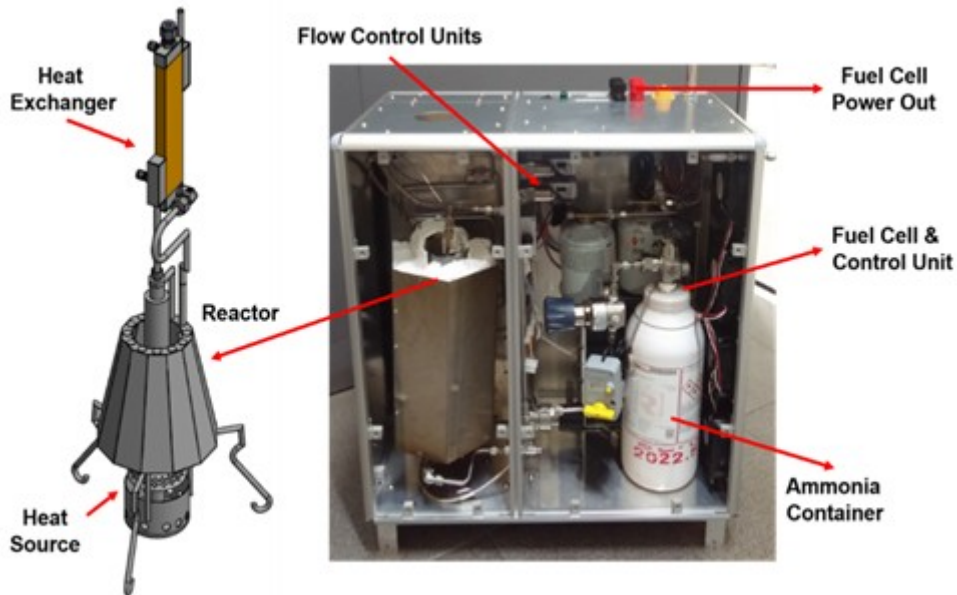
그림 20 바나듐 분리막을 활용한 암모니아 기반 수소생산-분리 시스템과 이를 활용한 수소차 충전 시연 사진



(출처: Australian financial review, 2018)

일본 및 호주와 더불어, 우리나라도 암모니아를 수소 운반체로 활용하는 기술을 개발해 왔다. KIST 수소·연료전지연구단은 국내 최초로 LOHC 뿐만 아니라, 암모니아 분해를 통해 생산된 수소를 이용하여 연료전지 발전 및 수소전기차 충전에 응용하는 연구 개발을 추진 중에 있다. KIST는 산업통상자원부의 지원을 받아 암모니아로부터 수소를 생산할 수 있는 Ru 금속 기반 불균일계 촉매를 개발하였으며, 이를 이용하여 1kW급 암모니아 기반 수소-연료전지시스템을 이용한 분산 발전시스템 개발에 성공하였다(그림 21). 현재 KIST는 기 개발된 암모니아 기반 수소생산 기술들을 바탕으로 ㈜씨이에스, 한국에너지기술연구원, 현대자동차, 및 젠스엔지니어링과 함께 산업통상자원부 프로젝트(2018~현재)로 20Nm³/h급 암모니아 기반 고순도 수소생산시스템 기술개발을 추진 중에 있다.

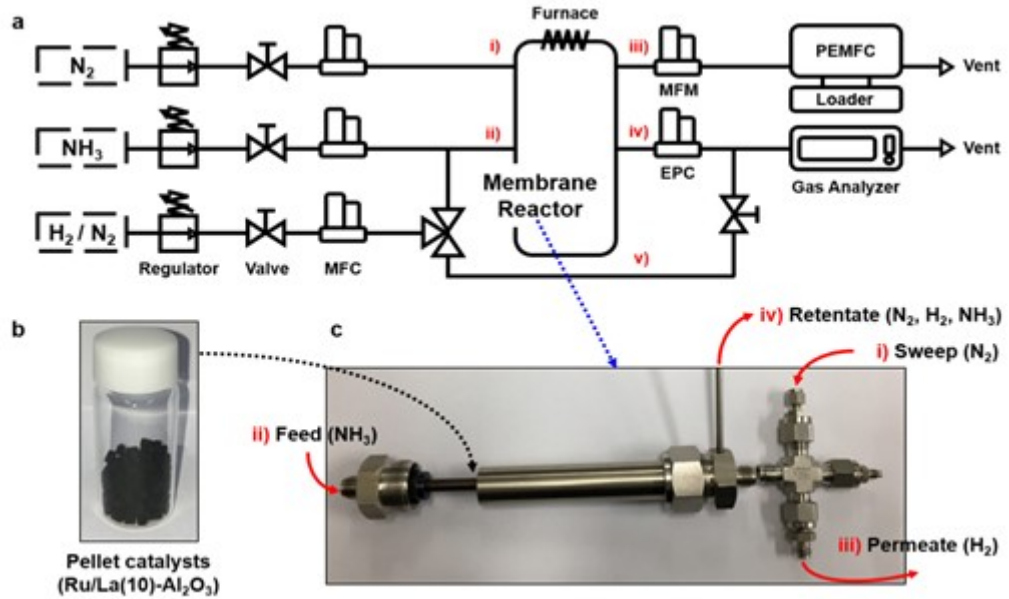
그림 21 KIST 수소·연료전지연구단에서 개발한 1kW급 암모니아 수소생산시스템



(출처: Yoon C, 2018)

이 이외에도 KIST는 개질반응과 분리를 동시에 수행하는 분리막 반응기를 개발하여 99.999% 이상의 순도를 가지는 수소를 별도의 분리공정 없이 생산하고, 12W급 연료전지와 연계 운전을 한 바 있다(그림 22). ㈜원익머트리얼즈는 암모니아를 안전하게 저장할 수 있는 고체 암모니아 저장체를 개발하고, KIST와 협업으로, 필요 시 암모니아를 방출하고 수소로 전환하여 연료전지에 적용할 수 있음을 보였다.

그림 22 KIST 수소·연료전지연구단에서 개발한 암모니아 기반 수소생산 분리막 반응기



(출처: Jo Y, 2018)

III 전망과 결론

지금까지 국내·외 LOHC 및 암모니아 기반 대용량 수소저장기술을 간단하게 소개하였다. 환경 및 에너지 이슈에 대응하기 위한 인류의 전 지구적 노력에 발맞춰, 화석에너지에서 재생에너지로의 에너지 패러다임 전환이 지속적으로 이행될 것으로 사료된다. 상술한 바와 같이, 재생에너지의 활용 극대화를 위해서는 잉여 전력의 수소로의 전환이 요구되며, 더 나아가 대용량의 수소를 효과적으로 저장·운송할 수 있는 기술개발이 시급하다.

세계 선진국들이 주목하고 있는 고용량 수소 운반체인 LOHC와 암모니아는 향후 대용량의 재생에너지를 장주기로 저장하고 활용하기 위한 에너지저장시스템(ESS), 분산전원발전(distributed power plant), 독립형 발전시스템(off-grid power generator), 비상용 백업전원시스템, 선박용 및 군사용 수소저장·공급시스템뿐만 아니라, 수소를 사용하는 다양한 산업 분야에 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 우리나라도 앞으로 필연적으로 다가올 수소 사회로의 이행에 장기적 안목에서 체계적으로 준비해야 할 때이며, 특히, 대용량 수소저장기술은 재생에너지의 활용 극대화뿐만 아니라, 향후 그린 수소 생산처와 수소 도시를 잇는 핵심기술로서 그 중요성이 증가할 것으로 생각된다.

저자 _ 조영석 (Young Suk Jo)

• 학력

MIT 기계공학 박사
MIT 기계공학 석사
Rice University 기계공학 학사

• 경력

現) 한국과학기술연구원 선임연구원
前) 한국과학기술연구원 위촉연구원
前) Shell Global Solutions Research Scientist

저자 _ 윤창원 (Chang Won Yoon)

• 학력

University of Pennsylvania 화학과 박사
포항공과대학교 화학과 석사
포항공과대학교 화학과 학사


• 경력

現) 한국과학기술연구원 수소·연료전지연구단 단장
現) 한국과학기술연구원 책임연구원
前) University of California, Berkeley 박사 후 연구원

참고문헌

1. Paris Agreement, Paris, 12 December 2015, Chapter XXVII, 7.d.
2. Dale, S., 2019 BP Energy Outlook, <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook>
3. 양익석, 김아름, 김비아, 신보람, “세계 에너지수요전망(WEO-2017)과 에너지수급 변화 요인” 세계 에너지현안 인사이트 special, 제17-3호 2017.12.4.
4. Tesla, Powerwall, <https://www.tesla.com/powerwall>
5. U.S. Department of Energy, Hydrogen Storage, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
6. Hydrogen Europe, Hydrogen Storage, <https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-storage>
7. Hwang, H., Hydrogen storage for fuel cell vehicles, Current Opinion in Chemical Engineering 5 (2014): 42-48
8. U.S. Department of Energy, 2017, “Target explanation document: Onboard hydrogen storage for light-duty fuel cell vehicles”, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/05/f34/fcto_targets_onboard_hydro_storage_explanation.pdf
9. He, T., Hydrogen carriers, Nature Reviews Materials, 1 (2016) 16059
10. Japan SIP Energy Carriers, 2016.5., “Energy carriers”, https://www.jst.go.jp/sip/pdf/SIP_energycarriers2015_en.pdf
11. Chiyoda Corporation, “SPERA Hydrogen: Chiyoda’s Hydrogen Supply Business”, <https://www.chiyodacorp.com/en/service/spera-hydrogen/>
12. Hydrogenious LOHC Technologies, <https://www.hydrogenious.net>
13. Jo, Y., A High-Capacity, Reversible Liquid Organic Hydrogen Carrier: H₂-Release Properties and an Application to a Fuel Cell, ACS Sustainable Chemistry and Engineering, 7 (2019) 1185-1194
14. Oh, J., 2-(N-Methylbenzyl)pyridine: A Potential Liquid Organic Hydrogen Carrier with Fast H₂ Release and Stable Activity in Consecutive Cycles, ChemSusChem, 11 (2017) 661-665
15. Zhu, Q., Liquid Organic and Inorganic Chemical Hydrides for High-capacity Hydrogen Storage, Energy & Environmental Science, 8 (2015) 478
16. Air Products, “Hydrogen Storage and Delivery in a Liquid Carrier Infrastructure”, <http://www.icmr.csb.edu/programs/archive/documents/Pez.pdf>

17. Service, R., Liquid Sunshine, Science, 361 (2018) 120-123
18. ABC news, 2017.5.11., "Renewable hydrogen - how it works", <https://www.abc.net.au/news/2017-05-11/hydrogen-graphic/8518118>
19. Australian financial review, 2018.9.10., "'Liquid sunshine' offers hope for new energy export industry", <https://www.afr.com/companies/energy/liquid-sunshine-offers-hope-for-new-energy-export-industry-20180910-h155h1>
20. Yoon, C., Ammonia as an efficient COX-free hydrogen carrier: Fundamentals and feasibility analyses for fuel cell applications, Applied Energy, 224 (2018) 194-204
21. Jo, Y., A viable membrane reactor option for sustainable hydrogen production from ammonia, Journal of Power Sources, 400 (2018) 518-526



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2019 September vol.5 no.9