

수소저장소재 기술 연구 동향 4 (액체 수소: 액체형태의 수소저장)

1. 액체수소의 개요

(1) 기체수소와 액체수소

- 최근 수소는 질량당 고에너지 밀도(142kJ/g), 높은 발전효율 (연료전지 기준 47%), 경량성(액체 기준: 0.07 g/cm³)을 이용, 무인항공기, 우주선 추진 발사체의 연료로서 관심이 집중되고 있으며, 자기영상의료장비, 의료장기 저온냉동보관뿐만 아니라 청정에너지로서 수소연료전지 자동차 등에 대한 응용성이 높다.

- 현재 수소의 저장 방식은 고압 기체수소, 액체수소, 고체수소 방식(수소저장합금), 물질변환 방식(LOHC 저장, 암모니아 저장) 등으로, 현재 국내에서 상용화되는 방식은 주로 고압 기체 상태의 수소 저장이다. 고압 기체수소 방식은 압력용기내의 수소 저장 밀도를 높이기 위해 높은 압력으로 가압하는데, 저장 압력이 높아질수록 용기의 두께가 두꺼워져 무게가 증가하게 되므로 질량 효율(용기를 포함한 질량당 수소의 질량비율)이 떨어지고 적은 양의 수소 저장에도 큰 부피의 공간이 요구되므로 저장량의 한계가 있다. 또한, 기체수소는 폭발위험성 때문에 현재 수소 튜브트레일러의 저장압력을 200bar이하로 규제하고 있어 수소충전소에서는 이를 다시 900bar로 압축하기 위해 가스압축설비를 설치해야 하고, 이마저도 용량은 500kg/day까지 한정된다. 이외에도 수소충전소에서 고압 가스의 보관 및 주입에 오랜 시간 (12시간 이상)이 소요되고, 높은 시설비용과 넓은 부지 면적을 필요로 하며, 100 m³ 이상의 트레일러 상주공간이 필요하다. 따라서 고압을 견딜 수 있고, 경제성 있는 압력장비의 설계 및 개발뿐만 아니라 공간적 문제 해결이 추가적으로 필요하며, 이에 대한 대체 수단으로 '액체수소'가 주목받고 있다. 표 1은 기체수소와 액체수소의 활용에 대해 비교한 것이고, 그림 1은 온도와 압력에 따른 수소 저장량을 나타낸 것이다.

표 1. 기체수소와 액체수소 비교

	기체수소 활용	액체수소 활용	비고
기체수소 생산	탄화수소 개질	탄화수소 개질	동일
액체수소 생산		수소액회플랜트	자본투자, 에너지 다소비
생산수소 저장	저압 저밀도 기체 저장 35ton (389,000m ³) 20 bar	상압 고밀도 액체 저장 35ton (500m ³) 1bar	액체 저장용량 (기체대비 780배, 대기압)
압축	200bar 압축		
운송	Tube Trailer, 300kg	LH ₂ Trailer, 3,500kg	
저장	Tube Trailer, 300kg	LH ₂ 탱크, 1,000kg	
승압	압축기 700bar	극저온 펌프 700bar +기화기	기체수소 압축의 경우 액체 펌핑에 비해 많은 에너지 소모

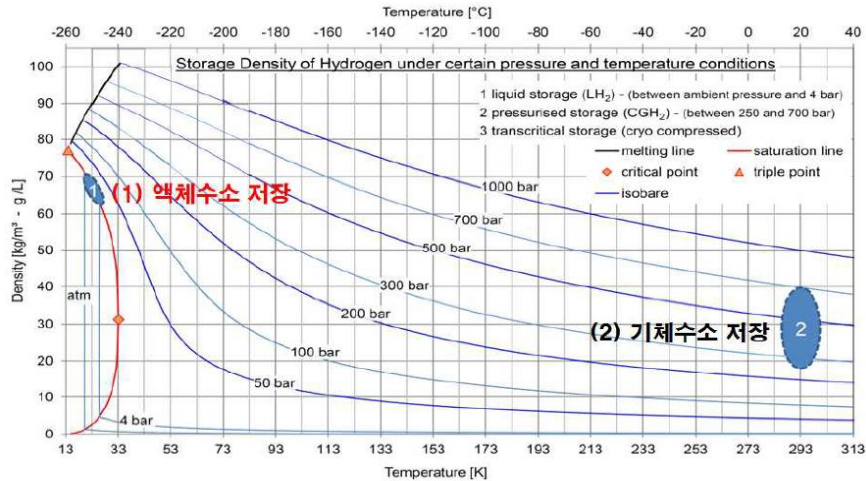


그림 1. 온도와 압력에 따른 수소 저장량.

- 수소를 액체 변환시 기체대비 부피는 1/800로 감소하므로 저장능력은 크게 증가해, 대용량 수소저장에 유리하고 ((기체수소: 0.3g/L, 액체수소: 70.8g/L)), 기존 고압 기체수소 대비 폭발 위험성 또한 낮다. 즉, 액체수소는 영하 253°C (대기압)에서 1ℓ당 70.8g으로 극저온 저장될 수 있으며, 이는 상온의 700bar에서 1ℓ당 39.6g의 기체상태로 초고압 저장되는 경우보다 거의 2배의 질량이 되므로 큰 에너지 효율 증가로 연결된다. (그림 2) 실제, 액체 수소를 활용한 충전소를 구축할 경우 기체 수소를 활용한 충전소의 설비 면적(127평)보다 21배나 적은 설비 면적(6평)을 필요로 하므로 충전소향 수소저장형태로 유리하다. 또한, 액체수소를 연료전지 자동차에 적용시, 68ℓ의 극저온 저장용기에 약 5kg의 액체수소를 저장할 수 있고 이 양으로 약 480km를 갈 수 있다.

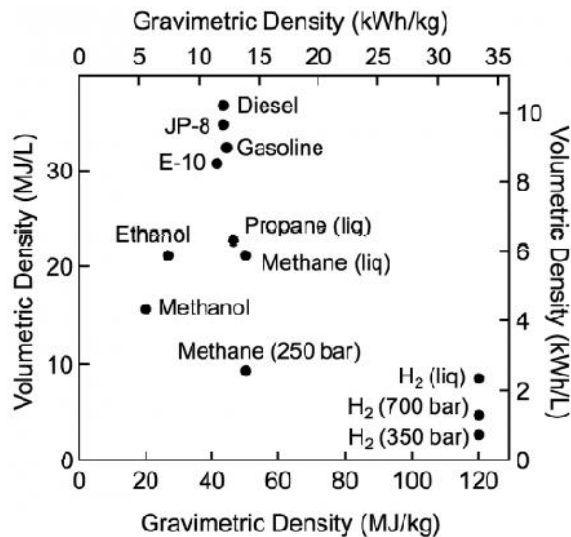


그림 2. 수소의 에너지 밀도

- 수소의 운송관점에서 액체수소는 고압이 필요한 압축 수소와 달리 대기압에서 저장이 가능하므로 저장용기와 운송의 안정성 부분에서 큰 장점을 가지고 있다. 예컨대, 저밀도 압축수소는 개인용 차량에 충분하나, 대형 운송 부문은 액체수소가 공급에 좀더 유리하다. 또한, 대규모 수소 공

급 시 25톤급의 액체수소 탱크로리는 200기압 고압가스 튜브 트레일러 대비 1회당 약 10배 이상 (4톤)의 운송이 가능해져 운송비용을 획기적으로 절감할 수 있다. 따라서 액체수소기반 저장 및 운송은 그림 3에 나타나 있는 바와 같은 다양한 수소 운송법 중 최적의 방법으로 거론되고 있다. 이런 관점에서 액체수소는 초고압 압축기체 수소 저장 시스템보다 빠른 충전시간, 차량충돌 시 예상되는 안정성 면에서 훨씬 유리하므로, 전세계적으로 액체 수소의 이용 범위도 넓어지고 있다.

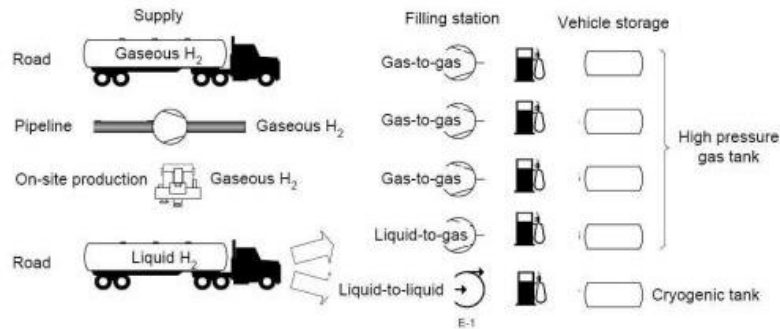


그림 3. 수소 운송 방식별 개념도.

(2) 국내외 액체수소 관련 기술 동향

- 이러한 액체수소에 대해, 세계적으로 대형 수소액화 플랜트를 설계 및 제작할 수 있는 국가는 미국(Air Product & Chemicals, Praxair 등), 독일(Linde), 프랑스(Air Liquide) 등이고 이로부터 기술을 전수받은 일본 (이와타니)과 중국 등이 중형급 플랜트를 제작 및 운영하고 있다. 미국은 1950년대부터 수소 액화 및 저장시설을 구축해 지속해서 늘리며 생산·소비하며 우주항공 분야, 반도체, 국방, 운송 등 다양한 분야에서 활용하고 있고, 오늘날 300,000m³ 이상의 저장용기 용량, 1,000일 이상 저장기간인 상용화 시설을 갖추고 있다. 또한, 미국은 우수한 체적에너지 밀도를 갖고, 우주항공 및 군사 등의 연료로 활용되는 액체수소를 수출 금지 품목으로 분류해 관리하고 있다.

- 일본은 국가 차원에서 액체수소 기반 인프라 구축 및 대형 생산 플랜트, 충전소 등을 설치하고 있고, 세계 최초의 액체수소 운반선인 '수소프론티어'를 진수했다. 또한, 일본은 액체수소 기반 유통을 중심으로 (전체 유통 중 40% 이상) 수소 공급시스템을 추진하고 있다. 아울러 독일의 린데, 프랑스의 에어리퀴드 등 세계적인 수소 생산·저장 업체들은 최고 수준의 액체수소의 저장과 생산 기술을 갖추고 다양한 용도의 고성능 압축 액체수소 저장 및 디스펜서 시스템을 개발하고 있다.

- 국내의 경우, 대용량 수소액화 플랜트가 전무하고, 액화플랜트뿐만 아니라 운용기술, 활용기술이 부족하다. 현재 지자체를 중심으로 액체수소 플랜트 구축 사업 수립 및 인허가 등을 지원할 뿐만 아니라, 수소 상용화를 위한 액체수소 생산 등의 기반 인프라 투자에 박차를 가하고 있다.

(3) 액체수소의 상용화 이슈

- 액체수소의 상용화 촉진을 위해서 아직 많은 기술적 이슈들이 존재한다. 액체수소는 -253°C 로 액화되므로 대규모 시설투자가 필요하고, 액화과정에서 압축수소보다 훨씬 높은 에너지가 소모(수소 에너지의 30~35% 수준)되어 kg당 1680원 추가비용이 발생한다. 또한, 충전후 단순 기화만으로 즉시 활용이 가능하나, 동시에 지속적 증발(boil-off)로 인해 장시간 보관이 힘들다. 예컨대, 직경 110mm, 길이 280mm의 액체수소 저장용기는 약 80겹의 복합단열층과 증기냉각복사단열(vapor-cooled radiation shields)층이 결합돼 있고 액체수소를 안전하고 장시 보관하기 위한 장치가 결합돼 있어야 한다. 저장용기를 냉각시키고 액체수소 충전이후 24시간이 지나면 저장용기 바닥에서 상부로 층류화(stratification)가 일어나면서 액체수소표면에서 증기방출이 생성되며 포화상태이상(약 0.3bar) 압력이 걸린다. 이후 하루에 약 1.3%씩 기체수소가 증발생성되므로 이에 대한 보완이 필요하다. 또한, 액체수소의 체적밀도는 0.070kg/L으로, 700기압의 기체수소(0.033kg/L)대비 높으나 하루에 전체 저장용량의 3~5%정도의 BOG(Boil Off Gas)가 발생되고 액화에 필요한 에너지와 보냉 유지기술이 필요하다. 이를 위해 압축방식과 액화방식의 장점을 합친 극저온 압축저장(cryo-compressed storage)기술이 연구되고 있으나 상용화는 쉽지 않다.

2. 액체 수소의 제조

(1) 액체 수소의 개요

- 액화수소 (LH_2 : Liquefied Hydrogen)는 저온에서 수소기체를 물처럼 '액화' 시킨 것으로 녹는점 -259.2°C , 끓는점 -252.7°C 의 극저온 상태의 무색 액체다. 수소저장을 위해 고압압축기를 이용한 수소가스의 고압 압축과 초저온 냉동기를 이용한 수소액화가 필요하다. 아래 표 2에 나타난 바와 같이, 수소액화공정과 기체수소 압축(700bar) 공정 효율과 비교시, 기체수소 1kg을 700bar로 압축시 전력량(3kWh)은 동일 질량(1kg)의 수소액화(>10kWh) 대비 많이 소요되므로, 초기투자비와 효율(70%) 측면에서 고압 압축수소(80~91%) 대비 비효율적이다.

표 2. 수소압축과 수소액화 효율

	이론효율 (kWh/kgH ₂)	실제효율 (kWh/kgH ₂)	비고
700bar Compression (from 20 bar)	1.4	3.0	
700bar LH ₂ Pump		0.4	US DOE HDSAM V 3.1
Liquefaction	2.8	10.0 ~ 13.4	From 22bar GH ₂ to 2bar LH ₂
Liquefaction with LNG Precooling 1	2.5	8.5	Feed H ₂ precooling only (3.2kg LNG / kgH ₂)
Liquefaction with LNG Precooling 2	1.4	3.6	Feed H ₂ precooling + Recycled H ₂ cooling (25.7kg LNG/kgH ₂)

- 수소액화 공정기술은 크게 수소의 온도를 액체온도인 -252.8°C 까지 냉각하는 기술, ortho 수소($o\text{-H}_2$)를 para 수소($p\text{-H}_2$)로 변환 기술, 수소 정제 기술로 구분할 수 있다.

- 일반적으로 질소, 아르곤 등의 기체는 고압 압축 후 줄-톰슨 팽창(Joule-Thomson expansion)을 시키면 온도가 감소해 액체를 생성할 수 있으나, 수소, 헬륨 등의 기체는 상온 줄-톰슨 팽창시 온도가 상승하는 경향을 보인다. 이와 같이 상온보다 역전온도 (Inversion Temperature)가 낮은 기체를 액체로 변환하기 위해서는 역전온도 이하로의 예냉 (Pre-cooling)이 요구된다. 25 기압으로 압축된 수소의 역전온도는 약 192K이며 (그림 4), 수소의 액화를 위해서는 상온 수소를 1,520.5 kJ/kg 이상의 열교환 통해 192K 이하로 예냉한 후 줄-톰슨 팽창을 수행하여야 한다.

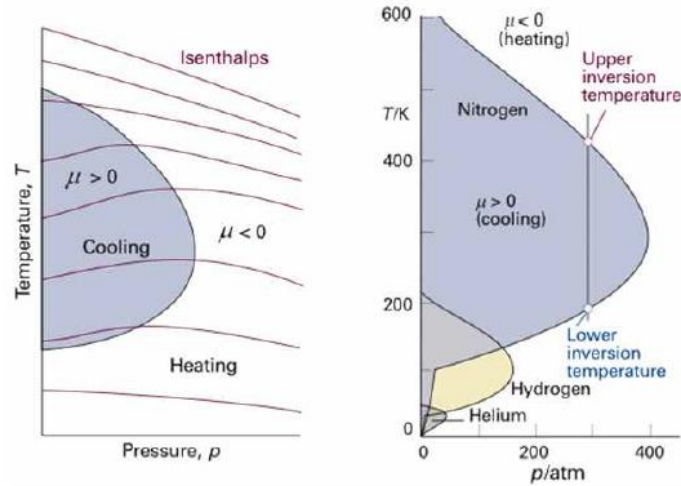


그림 4. 역전 곡선 (Inversion curve: Joule-Thomson expansion)

- 수소는 상온에서 포화온도까지 현열(Sensible Heat)이 포화온도에서 잠열 (latent heat)보다 훨씬 크다. 수소의 액화에 필요한 단위질량당 에너지는 a) 300K에서 20.3K로 온도강하에 수소 1kg당 4,000kJ의 현열 (sensible heat) 제거 b) 20.3K에서 기체수소에서 액체수소로 상변환시 수소 1kg당 450kJ의 잠열 (latent heat) 제거, c) 20.3K에서 올소(ortho)-파라(para) 수소변환에 1kg당 703kJ의 열에너지 제거가 발생하며, 총 수소 1kg당 5,153kJ의 에너지가 제거된다 (그림 5).

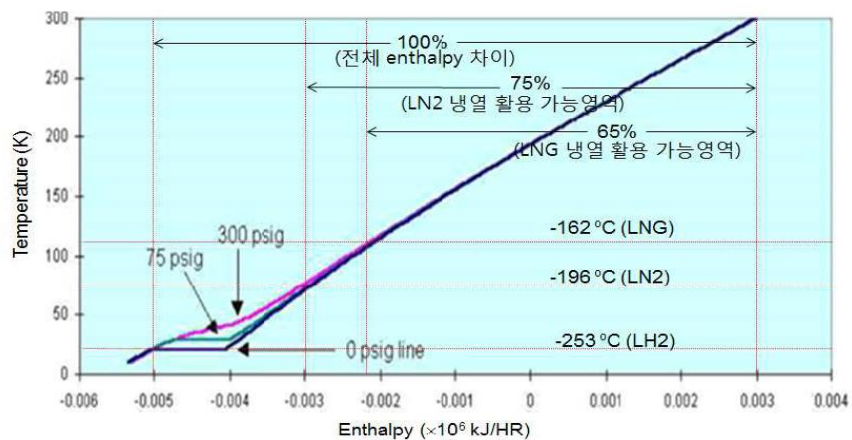


그림 5. 수소 가스의 온도-엔탈피 (T-h) 선도

(2) 수소의 액화 기술동향

- 주요 상용 수소액화플랜트 제조사인 Air Product & Chemicals (미국), Praxair (미국), Linde (독일), Air Liquide (프랑스) 등에서 적용하고 있는 수소액화법은 주로 Precooled 수소 Claude 사이클과 Precooled 헬륨 Brayton 사이클에 기반한 것이다. 용량은 0.5-54 ton/day이고, 수소액화 플랜트의 소요전력은 10~15 kWh/kgLH₂ 수준이다.
- 미국의 Praxair사는 6-35 ton/day의 액체 수소 생산용량을 가지는 수소액화 플랜트를 5기 이상 설치·운영하고 있고, 수소액화 플랜트의 소요전력은 12.5-15 kWh/kgLH₂ 수준이다. 수소액화 사이클은 주로 Precooled Claude 사이클에 기반한 공정으로 3개의 열교환기가 있는데, 첫 번째 열교환기는 기체질소와 외부 냉동기에 의한 냉각, 두 번째 열교환기는 액체질소와 수소가스에 의해 냉각, 세 번째 열교환기는 팽창기와 Joule-Thompson 밸브에 의해 팽창되는 수소 Claude 사이클에 의한 냉각이 진행된다. Air Product & Chemicals사는 30-35 ton/day 액체수소 생산용량을 갖는 4기 이상의 액화플랜트를 기반으로 액체수소 사업을 진행하고 있다.
- 프랑스의 Air Liquide사는 10 ton/day 액체수소 생산용량의 수소액화플랜트(소요전력: 10 kWh/kgLH₂)를 운영하고 있고, 액체질소를 예냉용으로 사용하는 수소 냉매 Claude 사이클과 He Turbo Brayton Cycle을 주로 사용한다.
- 독일의 Linde사는 활발히 수소액화플랜트를 건설하고 있고, 액체수소 생산용량은 약 4.4~5.0 ton/day로 Precooled Claude 사이클을 사용하고 있다. 또한, 수소차용 9.4 ton/day 용량의 수소액화플랜트를 운용하며, 선박 등 다양한 수송 분야에서 액체수소를 확대 적용 중이다 (그림 6).



그림 6. 독일의 수소액화 플랜트

- 일본에서는 신에너지·산업기술융합개발기구 (NEDO)와 미쓰비시 중공업, 일본 Air Liquide 및 일본산소 등 회사를 중심으로 수소이용 국제 그린에너지 시스템 기술(WE-NET) 프로젝트(The World Energy NETwork (WE-NET) project)를 진행하고 있다. 수소액화플랜트의 액체수소 생산용량은 세계 최대인 약 300 ton/day를 목표로 하고 있고, 액체질소 Precooled Claude 사이클에 기반한 액화수소 생산을 추진하고 있다 (그림 7).



Sakai, Osaka
(3,000L/h×2)



Suuunan, Yamaguchi
(3,000L/h×1)



Ichihara, Chiba
(3,000L/h×1)

그림 7. 수소액화 플랜트 (일본)

- 국내의 경우, 한국기계연구원에서 헬륨냉각공정을 적용한 300Nm³/hr급 수소액화 공정기술을 연구했고, 한국과학기술연구원 (KIST)과 하이리움산업에서 G-M (Gifford-McMahon) 극저온냉동기를 이용한 소형 수소액화시스템 (1.5~10kg/day) 개발을 진행했고, 현재 기업과 연구소를 중심으로 액체수소 개발이 활발히 진행되고 있다.

(3) 수소의 액화 통한 액체수소 제조

- 수소는 -253 °C에서 액화되므로 초저온 냉동기술이 필요하다. 이를 위해 냉매 압축을 통해 고온 냉각후, 고온고압의 기체수소를 J-T (Joule-Thomson) Valve 팽창 통해 온도를 낮춰 저온 흡열과정을 수행 통한 액화가 필요하다. 수소는 최대 역전온도 (Inversion Temperature)가 상온보다 낮으므로 액체질소, LNG 등을 이용한 역전온도 이하로 예냉과 냉매(수소 또는 헬륨)를 압축 팽창시켜 추가 냉각시키는 과정이 필요하다. 이러한 과정을 Precooled Cycle이라 부르며, 대표공정으로 Precooled Hydrogen Claude Cycle, Precooled Helium Brayton Cycle 등이 있다.

- 냉각공정시 수소, 네온, 헬륨, 복합 냉매 등을 사용하고, 상용급 수소액화 플랜트에서는 주로 수소와 헬륨이 사용된다. 냉각시 수소의 액화용량에 따라 다양한 액화사이클이 사용될 수 있고, 2 tons/day 정도의 소용량 경우 줄톰슨 밸브와 액체질소 예냉기를 사용하며, 수소의 액화온도 이하에서 일정 냉동용량을 갖는 상용 극저온 냉동기(Gifford-McMahon냉동기, 맥동관냉동기, 스텔링 냉동기 등)를 저온조(cryostat) 내에 장착해 액화하고 있다. 대용량 액화의 경우, 터보팽창기와 별도의 액체질소 예냉용 냉동기, 다단의 수소압축기와 다중 열교환기를 장착한 복잡한 형태의 액화 사이클 (Linde-Hampton, Claude, Collins 및 Turbo-Brayton 등)이 사용된다.

① Joule-Thomson 효과

- 기체수소의 액화를 위해서 '임계온도' 이하에서 압력을 가해야 한다. 수소의 임계온도는 -240°C 이므로, 단열팽창 시 온도가 떨어지는 '줄-톰슨 효과 (Joule-Thomson effect)'를 이용해 온도를 낮춰야 하고, 이때 줄톰슨 밸브 (JT 밸브)가 주로 사용된다.

② 린데-햄턴 사이클 (Linde-Hampton Cycle)

- 린데-햄턴 사이클(Linde-Hampton Cycle)은 최종 JT 밸브에 의한 팽창 및 플래시 가스와의 열교환을 위한 열 교환기로 이루어진다 (그림 8). 수소는 역전온도 이하에서 JT 팽창해야만 온도가 떨어지므로 이 사이클에서는 팽창전 예냉을 하지 않으면 수소의 액화는 불가능하다. 통상 액체질소(LN₂) 또는 LNG로 예냉후 팽창하여 액화를 수행하며, 액화 효율이 높지 않다.

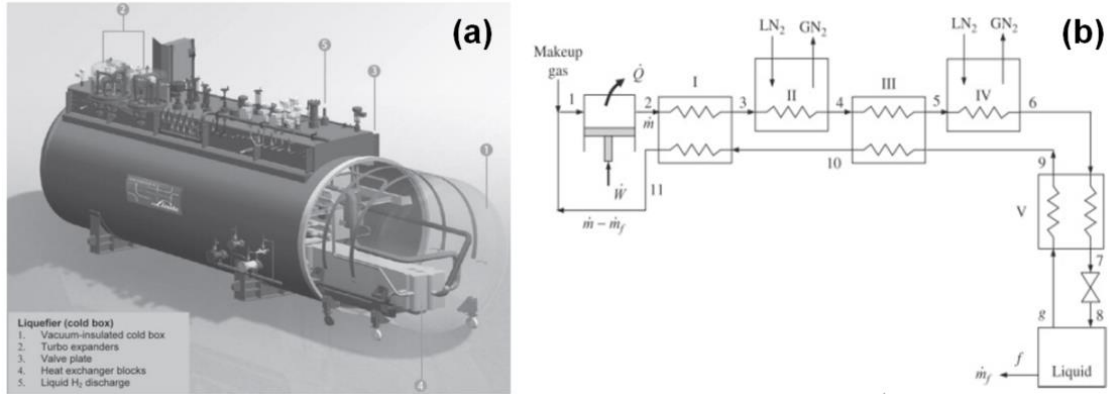


그림 8. (a) 린데 수소액화기, (b) Linde-Hampton Cycle.

③ 클로드 액화 사이클 (Claude Cycle)

- 클로드 사이클에서 JT 밸브에 의한 팽창은 등엔탈피 팽창이나 팽창기에 의한 단열팽창은 그과정에서 에너지 손실을 수반하므로 등엔트로피 과정에 가까워 더 큰 온도 강하를 얻을 수 있고 줄 톨슨 팽창계수와 관계없이 온도가 감소한다. 또한, 팽창기의 적용으로 LN₂, LNG에 의한 예냉없이도 수소액화가 가능하다. 따라서 본 클로드 액화사이클의 적용으로 수소액화 효율을 린데-햄턴 사이클에 비해 크게 증가시킬 수 있다 (그림 9).

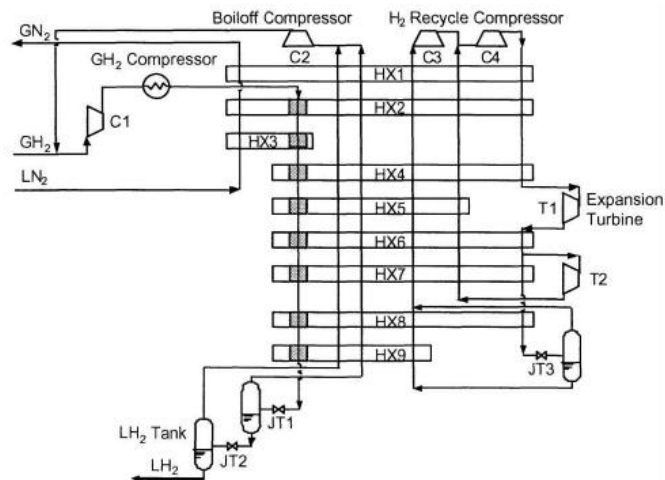


그림 9. 액체질소 예냉 수소 Claude 액화공정 (Claude 사이클/질소 재액화 냉동사이클).

④ 콜린스 액화 사이클 (Collins Cycle)

- 클로드 사이클의 변형으로 2개 이상의 팽창기 적용으로 액화효율을 증가시킬 수 있는데 이를 콜린스 사이클이라고 한다 (그림 10). 다수의 팽창기 적용에 의해 열교환기 수 및 시스템의 복잡도는 증가한다. 일반적으로 헬륨가스의 액화에 사용되는 액화공정이다.

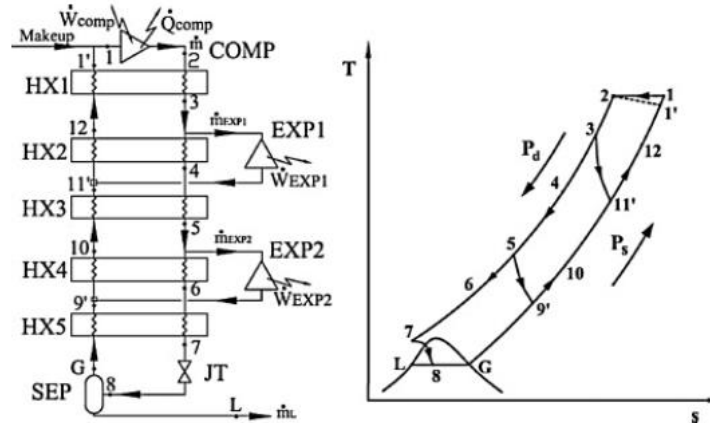


그림 10. 콜린스 사이클 (Collins Cycle).

⑤ 터보-브레이튼 액화 사이클 (Turbo-Brayton Cycle)

- 대형 수소 액화플랜트 경우 대부분 클로드 사이클 또는 터보-브레이튼 사이클을 적용해 경제적인 액화공정을 구현한다. 터보-브레이튼 사이클 경우 (그림 11), 수소 또는 헬륨을 냉매로 사용하고 터보팽창기로 팽창시키는 역브레이튼 사이클을 이용해 극저온 냉동시스템을 구성하고 수소액화는 이와 분리된 가압 기체수소 스트림을 열교환기에 연속 통과시켜 냉각 및 액화를 수행한다.

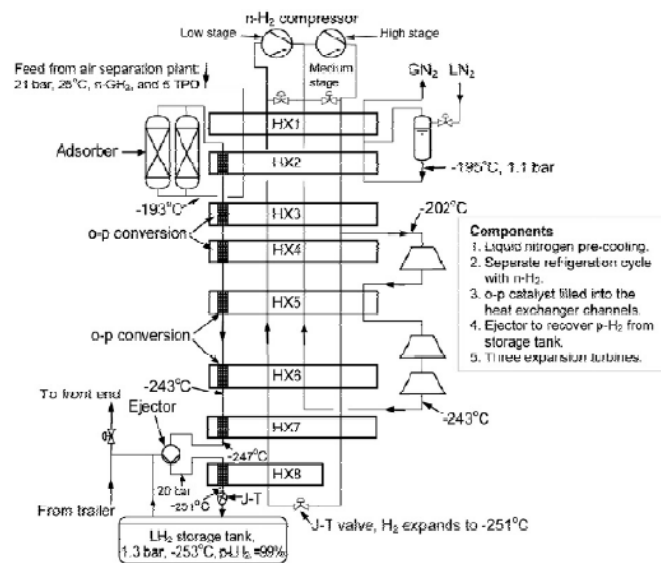


그림 11. 터보-브레이튼 사이클 (Turbo-Brayton Cycle).

⑥ Ortho-para 수소 변환공정

- 수소의 액화공정은 Ortho-Para 수소의 촉매를 통한 변환 통해 완성된다. 수소는 온도에 따라 Ortho 수소(ortho-hydrogen)와 Para 수소(para-hydrogen)의 구성비가 다르며 온도가 낮아질수록 Para 수소의 비중이 더욱 커진다. 상온의 수소분자는 수소원자들의 스핀방향이 같은 ortho 수소와 스핀방향이 반대인 Para 수소로 이뤄져 있고 그 비율은 3:1이다. 이러한 수소가 액화기를 통해 액체로 변환돼 저장탱크 내에 저장되면 액체수소상태(20K)의 평형비인 약 99.8% Para 수소로 서서히 변화하며 큰 변환열이 발생한다 (그림 12). 즉, 상온 수소를 단시간에 20K으로 냉각·액화하면 75%의 Ortho 수소가 열역학적 평형상태를 이루기 위해 Para 수소로 변환하며, 이때, ortho-para 변환열이 발생하는데, 이는 액화수소의 증발열보다 크다. 이 변환열은 이미 액화된 수소를 저장탱크 내에서 기체상태로 증발시키므로 (액화수소가 손실되므로), 액화과정 중 변환촉매(산화철 iron oxide)나 니켈실리케이트(nickel silicate))를 이용한 Para 수소 변환으로 변환 및 수반열을 제거해야 한다.

- 이를 위해 수소액화에서 수소의 고유물성인 오토-파라 (ortho-para) 수소변환이 필요하고, 추가적인 장치인 오토-파라 수소변환기가 필요하다. 액화를 위해 통과하는 열교환기 및 저장탱크에 O-P변환을 위한 산화철 (Fe_2O_3) 촉매층을 설치해 이 변환이 공정상에서 적절히 이루어질 수 있도록 하는 것이 중요하다.

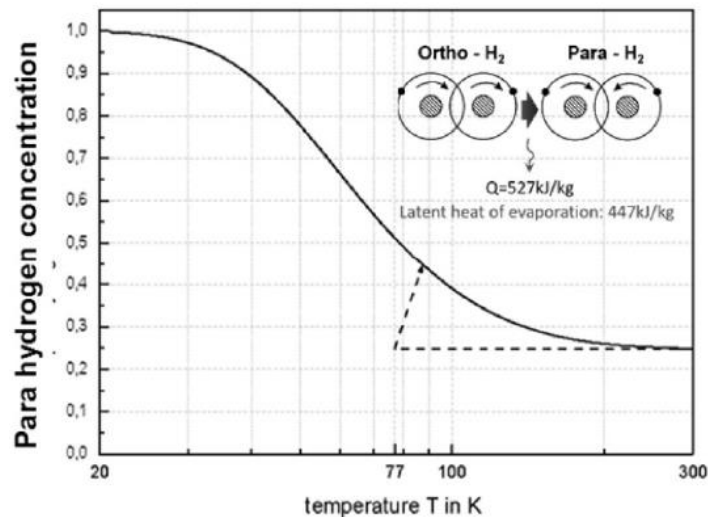


그림 12. 온도에 따른 Ortho-Para 수소 변환.

⑥ LNG 활용 고효율 수소액화

- 액체수소의 제조는 액화시 단순 압축저장방식에 대비 많은 에너지를 필요로 하며, 수소액화 공정의 효율은 예냉과정에서 냉열을 무상으로 공급받을 수 있다면 기체 압축 공정(700 bar)과 비슷한 수준의 효율을 기대할 수 있으므로 수소액화 소요 에너지비용 절감을 위해 액화천연가스

(Liquefied Natural Gas, LNG)의 기화시 발생하는 냉열을 활용한 수소액화공정과 이에 기반한 액체 수소 생산이 주목받고 있다.

- 구체적으로, 수소액화시 소요 에너지 비용 절감을 위해, LNG 상온화 과정에서 바다로 버려지고 있는 극저온(-160°C)의 냉열에너지를 수소 액화 공정에 활용해 수소를 저장·공급할 수 있는 1차 냉각을 하면 액화 비용을 크게 줄일 수 있다. 즉, LNG의 기화과정에서 SMR에 메탄을 공급해 기체수소를 생산하고, 이때 발생하는 냉열을 수소액화공정에 활용하는 경제성 있는 수소공급 모델을 활용할 수 있다. 비등점이 낮고 체적당의 증발 잠열이 작기 때문에 증발하기 쉽고 저장 및 수송 시 단열성능이 우수한 용기가 필요하여, 사용·확산을 위한 기술개발이 진행되고 있다. 아래 그림 13은 LNG를 활용한 고효율 수소 액화 공정의 개념도이다.

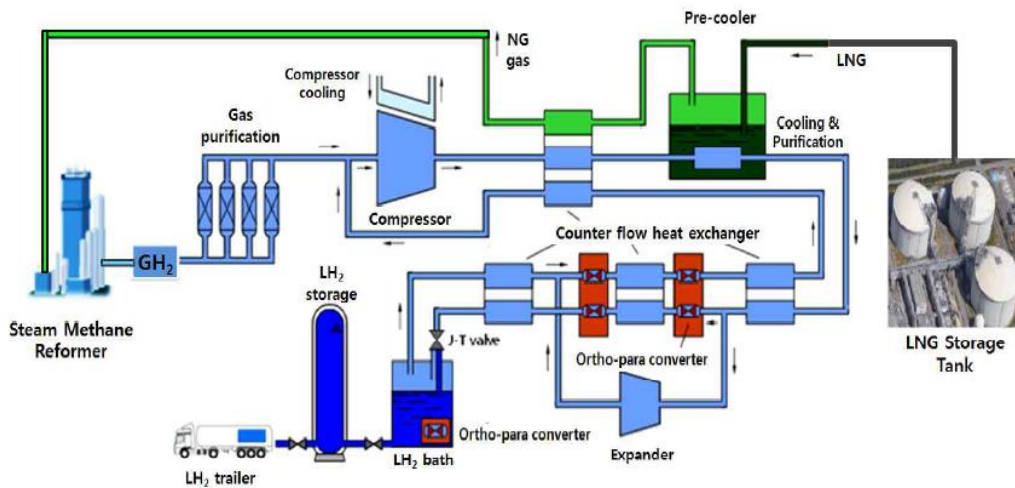


그림 13. LNG 활용 고효율 수소액화 공정 개념도.

⑦ 수소액화 플랜트의 효율

- 상술한 바와 같이 수소액화사이클의 효율적인 적용을 위해서는 공정해석을 위한 사이클 매칭 기술, 열교환기 설계 기술, 압축기 및 팽창기 설계 기술, 초저온 단열 이송, 저장 기술, 촉매 기술 등이 확보되고 효율적으로 적용되어야 한다.

- 1 bar, 300K Feed 수소의 입력조건에서 상용급 수소액화 플랜트의 소요전력 및 FOM(Figure of Merit)은 아래 그림 14와 같고, 현재 세계최고 효율수준의 상용 수소액화 플랜트는 ~10 kWh/kgLH₂이다.

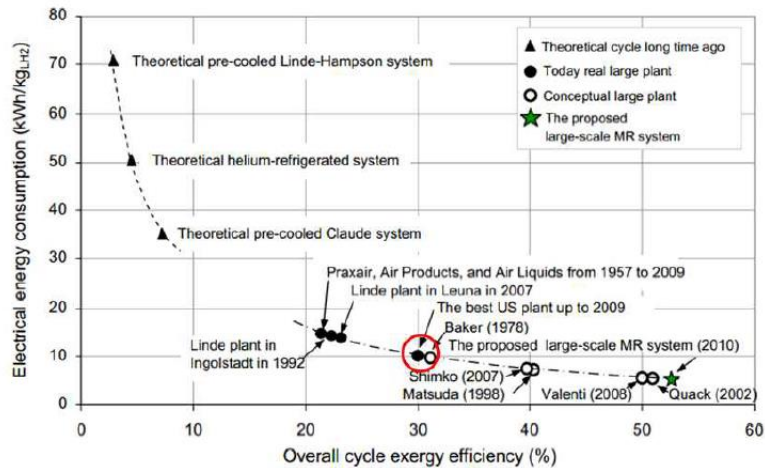


그림 14. 수소액화플랜트의 효율 비교

<참고문헌>

1. 김서영, "수도권에 대규모 수소 공급...액화수소가 효율적이다", NEWSTOF, 2019.
2. 김수현, "수소 보급 활성화를 위한 저장 및 운송 기술 동향", Auto Journal, 25-26, 2019.
3. 국토교통부·국토교통과학기술진흥원, "상용급 액체수소 플랜트 핵심기술 개발 사업", 기획보고서, 2-53.
4. 이종수, "걸음마 수준 '액화수소' 핵심기술 개발 나선다", 월간수소경제, 2019.
5. 오인환, "액화수소 제조 및 저장 기술", i가스저널, 2012.
6. 이의정, "이제 수소경제다. 수소경제 발맞춰 액체수소플랜트 부상 ③", 환경경찰뉴스, 2019.
7. 과학기술정보통신부 외, 수소 기술개발 로드맵, 2019.
8. 산업통상자원부, 「수소경제 활성화 로드맵」 발표, 2019.
9. 최준호, "수소 액체로 바꾸면 효율 좋은데... 영하 253도까지 내리는 게 숙제", 중앙일보, 2017.
10. 상용급 액체수소 플랜트 핵심기술 개발 사업, 국토교통부, 국토교통과학기술진흥원,
11. Thomas M. Flynn, Cryogenic Engineering, Marcel Dekker, Inc., 1997.
12. 김서영, 최동규, 수소 액화, 저장기술 및 응용, 공업화학 전망, 제21권 제3호, 2018.
13. 액화수소(LH₂) 저장 탱크 및 안전 기준 개발, 초전도와 저온공학, 22, 2020.