

수소액화 플랜트 기술 개발 현황 및
방향

박 성 제 한국기계연구원 극한에너지기계연구실 책임연구원	e-mail : sjpark@kimm.re.kr
최 병 일 한국기계연구원 극한에너지기계연구실 책임연구원	e-mail : cbisey@kimm.re.kr
도 규 형 한국기계연구원 극한에너지기계연구실 선임연구원	e-mail : kyudo@kimm.re.kr
이 재 훈 가스안전공사 가스안전연구원 차장	e-mail : sasimi@kgs.or.kr

이 글에서는 글로벌 수소산업 주도권 확보를 위해 핵심인프라 기술인 수소액화 플랜트 기술에 대해서 소개하고자 한다.

환경문제가 인류의 생존문제로까지 부각되면서 전 세계적으로 지구 온난화 문제 해결 및 대기환경 개선을 위한 노력을 경주하고 있다. 이에 각국은 온실가스를 감축하기 위해 국제기구의 온실가스 정책목표를 지향하거나 자체적으로 감축 목표를 내놓고 있으며 지속 성장에 필요한 에너지원 마련을 위하여 대체에너지 개발 전략을 수립·운영 중에 있다. 이러한 환경문제를 해결하고 규제에 대응하기 위한 방안으로 청정에너지원인 수소에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다.

수소는 2차 에너지원으로써 에너지 발생 시의 환경오염이 적고, 수송 및 저장이 가능하다는 등 많은 장점을 가지고 있다. 그리고 수소는 미래의 수송수단의 중요한 에너지원으로써 1980년 이후 특히 2000년부터는 많은 연구가 이루어지고 있다. 또한 최근에 고체 고분자형 연료전지(fuel cell)의 실용화가 급속히 진전되어 수소에너지의 중요성이 재인식되고 있다. 특히 화석연료의 연소에 의해 배출되는 이산화탄소, 이산화황 등이 온실효과와 산성비 등의 환경오염의 원인이 되어 1997년 12월 주요 선진국들은 2012년까지 이산화탄소 배출량을 1990년 대비 EU 회원국은 8%,

미국은 7%, 일본은 6%를 삭감할 것을 내용으로 교토 의정서를 채택하였고, 이에 부응하기 위해 탄소기반의 에너지 시스템으로부터 지속가능한 에너지원로의 전환을 위한 노력이 경주되고 있다.

에너지원으로써의 수소는 석탄, 원자력, 신재생 에너지 등 다양한 국내 자원으로부터의 생산 가능하고, 고효율 연료전지, 연소터빈, 엔진 등과 복합 적용할 수 있으며, 수송, 전력, 산업, 가정 등 사회 전 분야로의 활용이 가능한 많은 장점을 지니고 있다.

수소의 수송 및 배급 측면에서 고압기체수소 공급과 액체수소 공급으로 분류할 수 있다. 동일한 무게의 수소를 트레일러를 이용하여 수소용합스테인션 또는 저장소로 이송하기 위해서는 약 7배의 운송비용이 소모되므로 미래 수소에너지 사회의 수소 저장 및 수송 형태의 현실적인 대안으로 액체수소가 각광 받고 있다.

액체수소(LH₂)는 끓는 점이 -252.8℃인 무색의 액체로, 액체로 저장되었을 때 상온의 기체수소(GH₂)에 비해 865배의 저장밀도를 가지며, 고압수소가스(350기압)에 비해서도 2.8배의 높은 에너지 함량을 보유하고 있어, 표 1에서 알 수 있는 바와 같이 대량수소 수송에 적합하여, 액체수소는 고압수소가스와 더불어

표 1 수소온도에 따른 엔탈피

Temperature (K) or Phase (liquid/gas)	Enthalpy (kJ/kg)
300	4,226
77	1,321
20 (gas)	716.8
20 (liquid)	271

*Heat of ortho-para conversion : 527.1 kJ/kg

수소를 액화하는 기술은 크게 수소의 온도를 액체 온도인 $-252.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 냉각하는 기술, ortho 수소($o\text{-H}_2$)를 para 수소($p\text{-H}_2$)로 변환하는 기술, 수소를 정제하는 기술로 크게 구분할 수 있다. 2원자 분자인 수소는 $o\text{-H}_2$ 와 $p\text{-H}_2$ 수소로 구분되며, 수소분자의 두 원자의 스핀이 같은 방향이면 $o\text{-H}_2$, 반대방향이면 $p\text{-H}_2$ 수소로 구분된다. 상온의 수소는 평형상태에서 25%의

$p\text{-H}_2$, 75%의 $o\text{-H}_2$ 로 구성되나, 끓는점(20K)에서는 평형상태에서 99.8%의 $p\text{-H}_2$ 로 구성된다. $o\text{-H}_2$ 가 $p\text{-H}_2$ 로 변화하는 과정은 670kJ/kg 의 열이 발생하는 전환속도가 느린 발열 과정으로, 이때 발생하는 열은 증발잠열(448.7kJ/kg)보다 커 액화를 통해 얻은 액체수소 증발의 원인으로 작용하기 때문에 안정상태의 액체수소를 얻기 위해서는 액화공정 중에 $o\text{-H}_2$ 를 $p\text{-H}_2$ 로 변환하는 수소변환을 수행하여야 한다. 액화된 액체수소는 주위로부터의 열 침입을 최소화하기 위해 2중구조로 내부용기와 외부용기 사이가 단열된 저장용기에 저장되어야 한다.

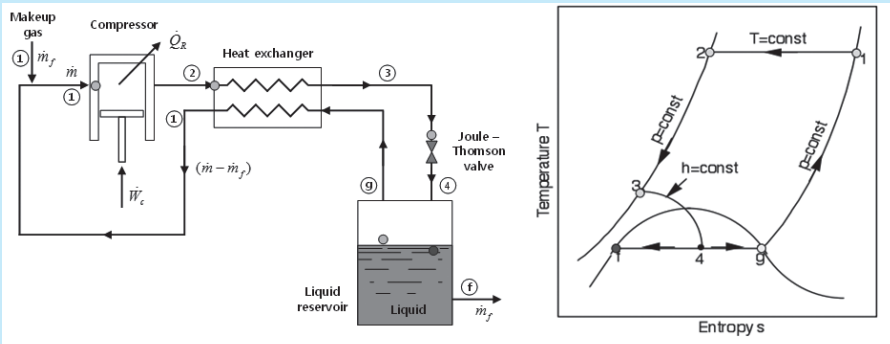


그림 1 Linde-Hampson 액화 사이클 개략도

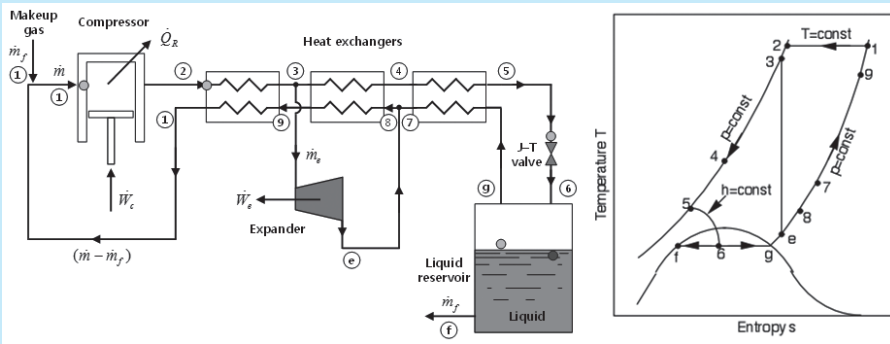


그림 2 Claude 액화 사이클 개략도

어 수소를 생산지에서 에너지 다소비지역으로 경제적으로 저장 및 공급할 수 있는 에너지매체로 각광받고 있다. 대체로 수소에너지 비용은 수소의 이송과 저장 비용에 의해 결정되므로 고밀도 저장, 이송이 가능한 액체수소 생산기술에 대한 중요성이 크게 대두되고 있다. 이에 따라 수소 경제를 활성화하기 위해서는 좀 더 높은 효율의 액체수소 생산기술의 개발이 선행되어야 한다.

이 글에서는 수소 생산, 저장, 이송에 대한 기술현황을 개괄하고, 수소액화기술의 기술개발 현황 및 기술 개발 방향을 제시하고자 한다.

수소액화 플랜트

액체 수소의 제조 프로세스는 원료 수소의 정제 프로세스, 오르토-파라(ortho-para) 전환 프로세스와 수소 액화프로세스로 구성되며, 액체 수소 온도에서는

헬륨 이외의 원료 수소 중의 불순물이 고화하여 설비 내에서 폐쇄를 일으킬 가능성이 있고, 또한 제품 순도 저하의 원인이 되기 때문에 정제 프로세스에서 수소 순도를 99.9999% 이상까지 높이고 있다.

수소의 액화 프로세스는 한냉(寒冷)을 발생시키는 방법에 의해 분류할 수 있으며, 헬륨냉동기에 의해 수소 응축 온도를 생성하여 수소를 액화시키는 헬륨 브레이크 사이클, 수소팽창 터빈과 줄-톰슨 효과와의 조합에 의해 액화하는 수소 클라우드 사이클 등이 있다.

대형 수소액화 플랜트는 1960년대 미국에서 아폴로 우주계획의 지원을 위해 건설이 시작되었으며, 최근에는 원활한 대용량의 고순도 수소를 원거리의 소비지로 공급하기 위한 인프라설비로 주목받고 있다. 1980년대 중반 독일에서 수소 기술개발계획이 시작된 후 1990년대 미국, 1993년 일본이 대규모 수소에너지 개발프로그램(WE-NET, World Energy Network)을 시작하면서 대규모의 수소액화 플랜트에 대한 개발이 진행되었다.

수소액화 플랜트는 수소 및 가스압축기/팽창기, 열교환기, 콜드박스(cold box, 저온용기), 밸브 등의 핵심요소기기로 구성되며, 수소의 액화를 위해 다양한 형태의 액화 사이클이 적용되어 왔으며, 2ton/day급의 소형의 경우 액체질소에 의한 예냉을 통한 단순 줄톰슨 사이클, 5ton/day급에는 복잡한 형태의 복합 줄톰슨 사이클, 대형에는 다단의 질소 예냉을 통한 터보팽창기가 사용되어진다.

미국의 APCI사, Praxair사, 독일의 Linde사, 프랑스의 Air Liquide사, 일본 Iwatani사, 중국의 CALT 등은 tons/day 이상 급의 수소액화 플랜트를 개발/운영 중이며, 헬륨 클라우드(Claude) 냉동사이클 냉동 또는 수소 클라우드 냉동사이클을 이용한 수소액화 플랜트를 개발하였다.

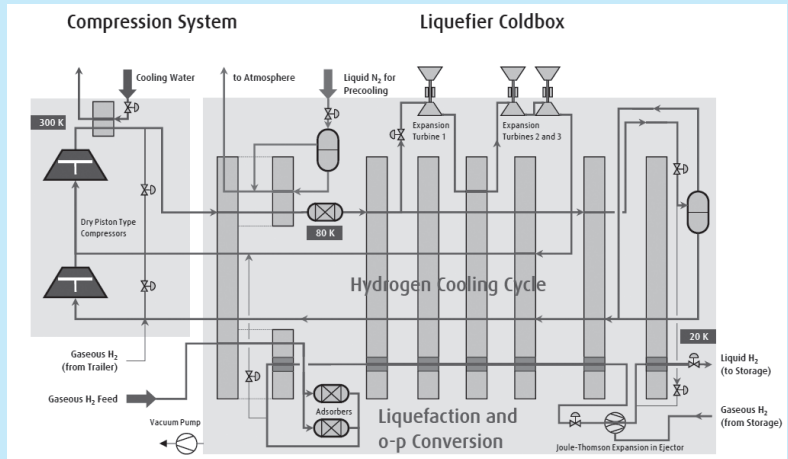


그림 3 독일 Linde 수소액화 플랜트 Process Diagram

그림 3은 실제로 운영 중인 독일 Linde의 수소액화 플랜트에 대한 SPD(Simplified Process Diagram)를 보여주고 있다.

수소액화 플랜트 개발 방향

일본에서는 3단계 육성 전략 수립을 통해 2040년 탄소중립 수소경제 실현 목표 제시하였으며, 해외의 미이용 자원(갈탄) 및 염가의 재생에너지를 통해 수소를 제조·액화하고 액체수소선을 통해 수소 수요지에 수송하여 공급하는 「CO₂ 프리 수소 체인」 구상을 제시하고 기술을 개발하고 있다.(그림 4)

한편 최근에는 LNG 인수기지에서 버려지는 -162℃의 냉열을 활용하기 위한 방안이 모색되고 있다. 표 1에서와 같이 수소는 20K에서의 증발잠열이 445.8kJ/kg이며, 300~20K 구간의 현열 차이는 3,509kJ/kg이고, 300~77K 구간의 엔탈피 차이는 3,905kJ/kg으로 300~20K 구간의 총 엔탈피 차이인 3,509kJ/kg의 약 83%를 차지한다. 따라서 비교적 저렴하고 간단하게 구성할 수 있는 예냉 공정을 사용하여 300~77K 구간을 예냉시킨다면 20K에서의 액화를 담당하는 수소 액화 공정의 부하를 현저히 감소시킬 수 있다. 이는 수소액화 시스템이 내재하고 있는 낮은 효율의 단점을 보완하여,

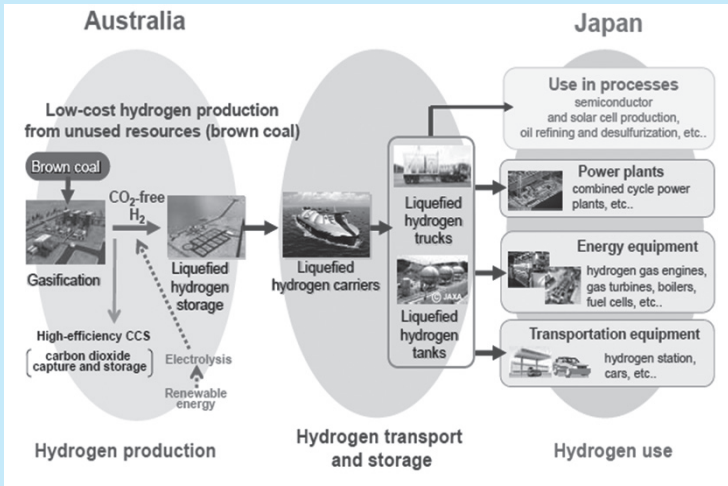


그림 4 수소 프리 체인의 타당성 연구 (Kawasaki Heavy Industries, Ltd., 2012)

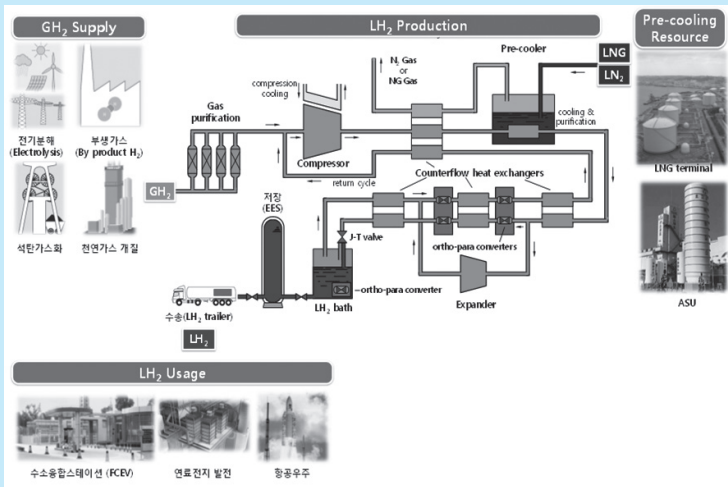


그림 5 경제성을 고려한 병열 활용 수소액화 플랜트 및 연계 인프라 구축 개요

동차 용·복합충전소, 압축도시가스, 액화석유가스 및 전기 자동차 복합충전소에 관한 「용·복합 및 패키지형 자동차충전소 시설기준 등에 관한 특례기준」을 제정 고시하였다. 수소를 활용한 산업용성 관점에서 수소와 연관된 모든 기술의 기술체계를 고려하여 “미래 수소사회 대비를 위한 고효율 수소액화 플랜트 및 액화수소 연계 수소 인프라 상용화 기술개발 전략 도출”에 필요한 기술트리를 그림 5에 나타내었다.

최근에 수소액화 플랜트를 중심으로 한 시장이 확대되고 있음에도 불구하고, 국내에서는 기본설계, 핵심요소기기, 시스템 엔지니어링, 운영기술 등의 원천기술의 부족으로 주로 주변기술 또는 유틸리티 중심의 부분적인 참여만이 가능한 실정이다. 현재와 같은 추세를 그대로 이어간다면 미래의 수소사회에 모든 수소관련 인프라를 해외에 의존해야 하는 실정에 이를 수 있다. 해외 선진국의 수출금지 품목 설정, 수소사회 인프라 구축을 위한 수소공급체인 구축 등을 고려하면, 국내에서도 미래 수소사회 시장 진입과 국가 정책의 실현을 위한 고효율 수소액화 플랜트 기술 개발 및 상용화 노력이 시급히 요구된다.

수소액화 플랜트의 고효율화를 달성할 수 있다.

또한 액화수소를 기존 에너지 인프라와 연계시킬 수 있는 기술적 방안이 필요하다. 현재 FCEV, Fuel Cell 발전에는 주로 기체 수소가 사용되고 있으므로, 기존의 기체수소 공급 인프라와 더불어 액화수소 공급의 연계 인프라 구축이 도안되어야 한다.

국내에서는 수소를 기존 에너지 인프라와 연계를 통한 수소산업의 글로벌 주도권 확보를 위하여 용·복합 및 패키지형 자동차 충전소, 수소, 압축도시가스 및 전기 자동차 용·복합충전소, 수소, 유류 및 전기 자

참고문헌

박성제, “고효율 수소제조 및 수소저장장치 기술 개발 동향”, Save Energy, pp.78-82, 2011.
 박성제, 홍용주, 염한길, 고준석, 김효봉, 고득용, “수소 액화 기술”, 한국초전도·저온공학회, 제 12권 2호, pp.33-43, 2010.
 홍용주, 박성제, 이공훈, 고준석, 염한길, 고득용, “수소액화플랜트”, 기계와 재료, 21권, 1호, pp.58-67, 2009.