

액화수소(LH2) 저장 탱크 및 안전 기준 개발

장대준, 김정욱, 박현준
한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

수소 경제의 성장은 필연적으로 액화수소(LH2: Liquefied Hydrogen)의 대규모 생산, 저장, 수송 및 활용을 수반한다. 천연가스 및 LNG 산업의 역사를 살펴보면, 이러한 액화기체의 도입은 필수적이었다. 천연가스가 사용되는 초기에는 천연가스가 기체 상태로 배관이나 저장용기 등을 사용하여 활용되었다가, 점차 그 자리를 LNG가 대체하고 있다. 예를 들어, 나날이 증가하고 있는 대륙간 천연가스 수송에서도 LNG 비중이 매년 증가하고 있으며, 선박이나 대형 차량의 연료 탱크는 LNG를 저장한 후 필요에 따라 기화하여 천연가스를 공급하고 있다[1].

본 고에서는 LH2 저장탱크 및 관련 안전 기준에 대해서 살펴본다. 이해를 돕기 위해서 LNG를 비교 대상으로 삼았다. LNG는 가장 많이 사용되는 초저온 액화기체이며, 관련된 저장 기술 및 안전 기준들도 잘 발달되어 있다. 앞으로 LH2 저장 탱크 및 관련 안전 기준들도 많은 부분 LNG 분야를 참고하여 이루어질 것이다. 하지만, LH2는 LNG와 근본적으로 다른 측면도 있어, LNG 관련 기술을 직접적으로 연장해서 활용하는 것은 제한적이다. 이 부분에 대해서도 논의한다.

2. 초저온 저장 탱크 기술

초저온 탱크의 구성 요소는 저장탱크, 단열층, 배관, 전계장, 지지체 등이다. 이 중에서 가장 중요한 부분이 저장탱크와 단열층이다.

단열이 되어 있더라도 초저온 탱크로 열침투는 피할 수 없다. 열침투는 증발가스(BOG: Boil-Off Gas)를 발생시킨다. 증발가스를 처리하는 방식은 크게 탱크 내부에 보관하는 방식과 외부로 방출시켜 별도로 처리하는 방식으로 나뉘어진다. 전자의 경우에는

는 압력탱크가 필수적으로 필요하며 후자의 경우에는 비압력탱크를 채용하는 것도 가능하다. 하지만, 후자의 경우에는 증발가스 처리(재액화, 연소, 대기 방출 등)에 별도의 시스템과 비용이 필요하다. 따라서, 증발가스 처리의 선택은 탱크를 넘어서 전체 시스템의 설계, 안전, 그리고 경제성에 매우 중요하다[2].

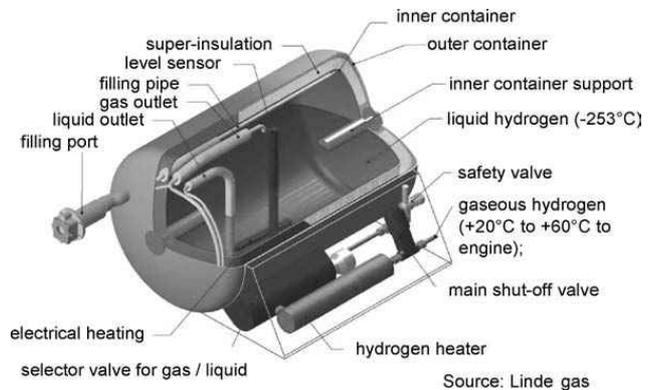


그림 1. 액체수소 저장탱크의 구성요소[3]

이러한 관점에서 보면, 탱크를 압력식과 비압력식으로 분류하면 편리하다. 비압력식 탱크는 하중이 상대적으로 작아 다양한 형상으로 제작이 가능하다. 하지만, 압력식 탱크는 압력 하중을 견디어야 하므로, 실린더와 이중실린더와 같은 전통적인 곡면 탱크들이 사용되어 왔다. 근래 들어, 자유 형상의 압력탱크인 격자형압력탱크(LPV: Lattice Pressure Vessel)이 국내 기술로 개발되어 압력 탱크의 새로운 장을 열고 있다[4].

단열 시스템의 초저온 탱크의 매우 중요한 요소이다. LNG는 저장 온도가 -160°C 이상이며 공기의 액화점보다 높다. 이러한 특징 때문에 진공식 단열과 비진공식 단열 모두 LNG 저장 탱크에 사용 가능하다. 소형 탱크의 경우에는 경제성을 고려하여 단열방식을 선택하면 되지만, 대형 탱크의 경우에는 진공 단열이 쉽지 않다. 산업적으로 가장

널리 사용되는 대형 LNG 탱크의 비진공식 단열재는 폴리우레탄이며, 좀 더 성능이 좋은 에어로졸은 상대적으로 가격이 높다[5].

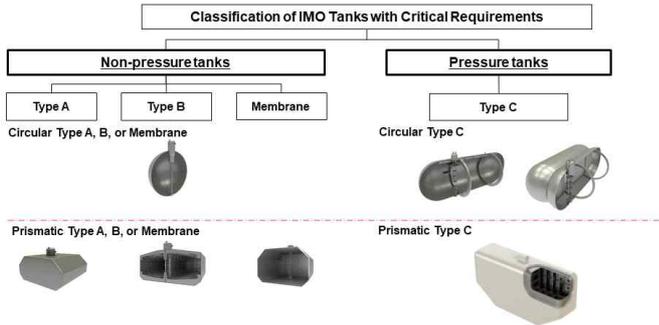


그림 2. IMO의 Tank 분류

선박의 경우에는 극한 환경 조건을 견디어야 하므로, 선박에 장착되는 탱크에 대해서는 엄밀한 구분이 존재한다. 대양을 항해하는 선박은 국제 기준을 만족해야 하며, 이러한 기준은 UN 산하의 국제해사기구(IMO: International Maritime Organization)에서 결정된다. IMO에서 발간하는 가장 중요한 규정으로 SOLAS, IGC Code, IGF Code 등이 있다. 이들 규정에서는 선박의 탱크를 Type A, Type B, Type C, Membrane 탱크 등으로 나눈다. Type C가 흔히 말하는 압력탱크이다. 선박에서는 누출이 발생하는 화재나 폭발 이외에 초저온 취하(Cryogenic Embrittlement)로 인해 선체 손상이 발생할 수 있으므로, 누출 여부가 탱크를 구분하는 매우 중요한 기준이다. Type C만이 누출이 없이 강건하게 설계 및 제작되었다고 간주되며, 다른 탱크들은 모두 누출이 발생하며 이를 위해서 2차 방벽을 설치해야 한다[6].

3. LH2 저장 탱크의 요구 조건

LH2의 저장 온도는 $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이상이다. 질소의 상압 액화점이 약 $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 임을 고려하며, LH2 저장 탱크 표면에서는 질소나 산소가 액화 혹은 고체화 될 수 있다. 따라서, LH2 저장탱크의 단열시스템은 일반적으로 진공방식이다. 물론, LH2 온도조건에서 기체상태를 유지하는 기체(예: 헬륨)로 단열시스템을 채우는 경우에도 비진공방식도

가능하지만, 온도에 따른 기체의 수축과 팽창, 기체에 의한 열전도 증가 등을 고려하며 구현하기가 쉽지 않다[7].

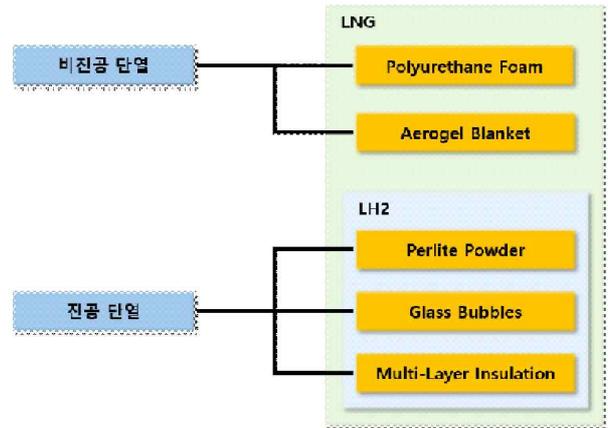


그림 3. 극저온 단열 시스템의 분류

진공 단열은 탱크에 최소한 1기압의 하중을 전달하게 되며, LH2 저장 탱크는 진공 단열의 1기압의 하중과 자체 증기압 및 수두압을 견디는 압력 탱크여야 한다. 결론적으로 LH2 저장 탱크는 진공 단열 시스템을 장착한 압력 탱크여야 한다[8].

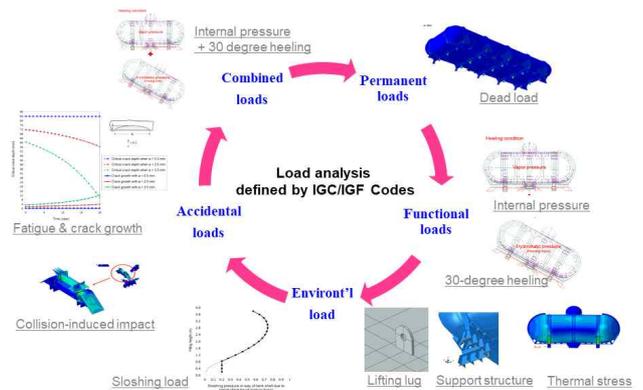


그림 4. 선박용 탱크의 하중 조건

이러한 요구 조건은 대규모 LH2 저장 탱크에 큰 도전 과제이다. 첫 번째 도전 과제로 대형 압력 탱크를 만드는 것이 쉽지 않다. 실린더 압력 탱크의 경우, 부피 증가에 따라 벽면 두께가 증가하게 되어, 특정 크기 이상이 되면 제작이 어려워진다. 둘째 도전 과제는 대형 탱크용 진공 단열 시스템이다. 특히 탱크가 커지면, 단열 유지용 외부 탱크의 무게가 내부 압력 탱크의 무게와 비슷해

지며, 누출에 의한 진공 파괴의 가능성도 증가한다.

LH2 용도 및 운전 방식에 따라 적절한 하중을 추가 고려해야 한다. 예를 들어, 선박이나 차량에 탑재되는 경우, 지지체의 운동(충돌 포함)에 의한 추가 하중, 잦은 재충진이나 내부 유체 파동에 의한 압력 변화가 유발하는 피로 하중, 탱크 내부의 온도 차이가 유발하는 열적 하중 등이 고려되어야 한다[6].

LH2 저장탱크를 위한 재질도 중요한 요구 조건 중의 하나이다. 일단 초저온이므로, 저온 취성이 없는 연성 재질(SUS, 9% 니켈강, 알루미늄 등)을 사용해야 한다. 다음으로 수소취성에 대한 고려가 필요하다. 수소 취성을 위해서는 적절한 수소 증기압, 집중된 스트레스, 그리고 재질의 결함이 필요하므로, LH2 저장 조건에서는 수소 취성의 위험은 매우 낮은 것으로 알려져 있다. 그럼에도 불구하고, 대부분의 LH2 저장 용기는 SUS316L로 제작된다[9,10].

수소는 핵스핀의 회전 방향에 따라 Ortho 및 Para Hydrogen으로 구분된다. 온도에 따라 평형 분율이 달라지며, 열을 수반하는 전이(Conversion)이 발생한다. 이러한 Ortho-Para Conversion은 열침투량에 의한 압력 상승 계산시 반드시 고려해야 한다 [11, 12].

4. 대형 LH2 저장 탱크의 기술 개발 현황

대형 LH2 저장 탱크는 수소경제의 성장을 위해서 필요 불가결한 핵심 기술이다. 현재까지 알려진 가장 큰 LH2 저장 탱크는 NASA에 설치된 약 3,000 m³ 탱크인데, LNG 터미널에 설치되는 단일 탱크 용량이 약 300,000 m³임을 감안하며 1/100 수준이다. 달리 말하자면, 수소경제가 천연가스 경제로 성장하기 위해서는 저장 탱크 측면에서 약 100배의 확대가 필요하다[13]. LH2 저장탱크가 진공단열된 압력탱크이어야 함을 고려하면 이러한 규모의 확대는 쉽지 않은 도전과제이다. 특히 대양 LH2 운반선은 분리된 수소경제를 연결하는 가장 중요한 도전 중 하나이다[14, 15]

다행스럽게도 이러한 도전 과제를 해결하

기 위한 시도가 국내에서 이루어지고 있다. 자유형상의 압력탱크인 격자형압력탱크(LPV)를 LNG 분야에서 상용화한 한국과학기술원과 래티스테크놀로지는 (주)에이원 및 한국가스안전공사와 함께 본 기술을 LH2 저장 탱크용으로 개발하고 있다. 격자형압력탱크의 중요한 장점 중의 하나는 탱크 크기가 증가하더라도 구조 부재의 두께가 증가하지 않아, 실제적으로 무한한 대형화가 가능하다.

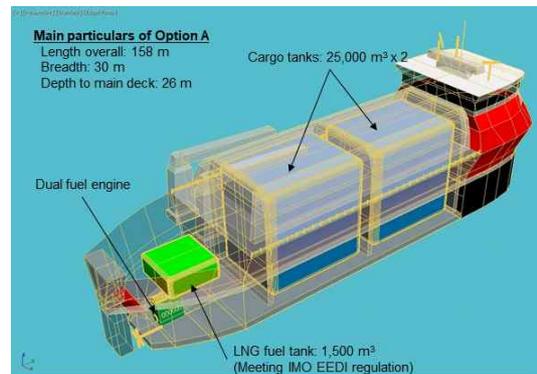


그림 5. LH2 수송선용 대형 LPV형 LH2 화물 탱크

대형 탱크의 진공 단열을 위해서도 본 연구팀은 특별한 진공 단열 시스템을 개발하고 있다. 기존의 단열시스템이 내부 압력 탱크에 외피 단열 탱크를 장착하는 방식이었지만, 본 연구팀은 이와는 완전히 다른 개념의 단열 시스템을 특허 출원하고 설계 및 시험을 수행하고 있다.

5. LH2 저장 탱크 관련 안전 기준

안전 기준은 국가별로 그리고 산업별로 상이하다는 점을 유념해야 한다. 예를 들어, 선박 화물 탱크용은 IGC Code를, 연료 탱크용은 IGF Code를 국제적으로 준용해야 한다[16, 17]. 수소스테이션의 경우에는 국가별 안전기준이 별도로 존재한다. 이들 안전기준은 특정 안전 시스템에 대한 특정한 요구 조건일 수도 있으며, 안전 설계 과정에 대한 요구 조건일 수도 있다. 예를 들어, HAZID나 HAZOP, 그리고 기타 정량적 사고 분석을 요구할 수도 있다. LH2에 대한 안전기준은 현재 정립 과정에 있으며, LH2 산업의 성장과 더불어 제정 및 수정 과정을 통해 확정될 것이다.

미국항공우주국 (NASA)의 경우 1950년 대부터 로켓의 연료로 LH2를 사용해왔다. 이에 LH2의 생산, 저장, 운송, 활용 등 전반적인 LH2 시스템에 자체적인 안전 규정집을 발간하였다[18]. 또한, LH2의 공급회사인 Air product의 경우에도 안전 규정집인 'Safetygrams'를 발간 및 수소 안전 교육 프로그램을 개발하였다[19].

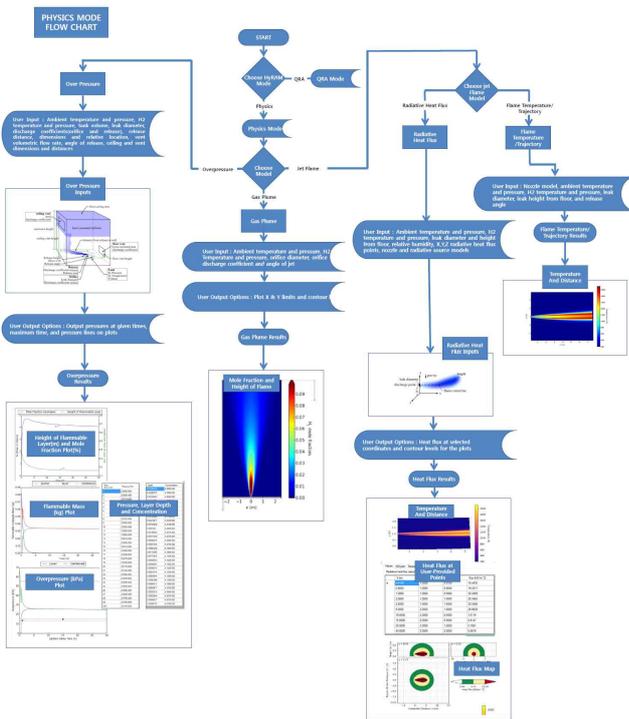


그림 6. 액체수소 저장탱크 위험성 평가 알고리즘 [20]

LNG는 트럭이나 선박에서 화물이나 연료 형태로 저장, 수송, 사용되고 있으며, 이를 위한 실례와 안전규정들이 잘 발달해 있다. LH2도 유사한 경로를 통하여 활용이 확대 될 것으로 보인다.

다음과 같이 LH2가 유발할 수 있는 사고는 LNG의 경우와 크게 다르지 않다.

- ◆ 단열 성능 저하에 의한 열침투 증가 및 이로 인해 탱크 압력 상승
- ◆ 누출된 LH2 구조물의 초저온 취성
- ◆ LH2가 증발하여 기화수소에 의한 화재 및 폭발
- ◆ 기타

이러한 사고 위험도를 낮추기 위하여 다양

한 안전시스템이 장착되어야 한다. 안전시스템은 사고를 미연에 방지하는 방지안전시스템(Preventive Safety System)과 사고의 피해 규모를 줄이는 경감안전시스템(Mitigating Safety System)으로 나뉘어진다. 이러한 안전시스템들은 LH2가 유발하는 사고 시나리오와 이에 따른 물리적 현상을 합리적으로 고려하여 적절하게 설계되어야 한다. 예를 들어, 수소 화염의 경우 가시광선에 의한 방식으로는 감지가 어려우므로, 다른 방식을 선정해야 한다. 이러한 관점에서 LNG에 적용된 안전시스템들이 LH2에 적용 가능한지에 대해 기본적으로 검토해야 한다[21].

6. 결 론

본 고에서 언급된 내용을 정리하면 다음과 같다.

- ◆ LH2 저장탱크의 단열시스템은 진공 단열이 일반적이어야 한다.
- ◆ LH2 저장탱크는 단열시스템의 하중(1기압)과 액체수소의 증기압과 수두압을 최소한 견딜 수 있는 압력탱크여야 한다. 선박이나 차량의 경우, 동적 하중이 별도로 고려되어야 하며, 온도 분포에 의한 열적 응력도 포함되어야 한다.
- ◆ 진공 단열과 압력 탱크의 두 조건을 만족하는 대형 LH2 저장 탱크의 개발은 현 단계에서 가장 중요한 도전 과제이다.
- ◆ LH2 저장 탱크에 대한 안전기준은 산업별 및 국가별로 상이할 수 있으며, 현재 제정 및 수정 과정에 있다. LNG에 대한 안전기준이 시발점이 될 수는 있으나, LH2에 대한 적합성을 고려해야 한다.

참고문헌

[1] Sangick Lee, Suwon Seo and Daejun Chang, "Fire comparison of fuel gas supply systems for LNG fuelled ships", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 27, part 3, pp 1788-1795, 2015

[2] Bongsik Chu, Daejun Chang and Hyun Chung, "Optimum liquefaction fraction for boil-off gas reliquefaction system of semi-pressurized liquid CO2 carriers

- based on economic evaluation”, International Journal of Greenhouse Gas Control Vol. 10, pp 46-55, 2012
- [3] Al-Hallaj S., Kiszynski K., “Hydrogen Production, Storage and Fuel Cells” Hybrid Hydrogen Systems. Green Energy and Technology, London, 2011
- [4] Junkeon Ahn, Younseok Choi, Choonghee Jo, Younghee Cho, Daejun Chang, Hyun Chung and Pål G. Bergan, “Design of a prismatic pressure vessel with internal X-beam structures for application in ships”, Ships and Offshore Structures, Vol. 12, No. 6, pp 781-792, 2017
- [5] Zhiming Shi, Junhui Dong and Wen Ma, “Progress in Materials and Processes”, Trans Tech Publications, GuangZhou, 2013
- [6] IGF code, “ADOPTION OF THE INTERNATIONAL CODE OF SAFETY FOR SHIPS USING GASES OR OTHER LOW-FLASHPOINT FUELS”, 2015
- [7] A Krenn1, S Starr, R Youngquist, M Nurge, J Sass, J Fesmire, C Cariker and A Bhattacharya, “The safe removal of frozen air from the annulus of an LH2 storage tank”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015
- [8] U.Petersen, G.Würsig and R.Krapp, “Design and safety considerations for large-scale sea-borne hydrogen transport”, Vol. 19, Issue 7, pp 597-604, 1994
- [9] Tokio Ohta and T. Nejat Veziroglu, “Energy Carriers And Conversion Systems With Emphasis On Hydrogen - Volume I”, EOLSS Publications, Paris, 2009
- [10] Shigeki Kikukawaa, Hirotada Mitsuhashia and Atsumi Miyakeb, “Risk assessment for liquid hydrogen fueling stations”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp 1135-1141, 2009
- [11] Buntkowsky G, Walaszek B, Adamczyk A, Xu Y, Limbach HH and Chaudret B, “Mechanism of nuclear spin initiated para-H2 to ortho-H2 conversion”, Phys Chem Chem Phys. Vol. 8, pp 1929 - 1935, 2006
- [12] Peng JK and Ahluwalia RK, “Enhanced dormancy due to para-to-ortho hydrogen conversion in insulated cryogenic pressure vessels for automotive applications” International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 38, pp 13664 - 13672, 2013
- [13] A. Krenn and D. Desenberg, “Return to service of a liquid hydrogen storage sphere”, NASA, 2019
- [14] Abe A, NakamuraM, Sato I, Uetani H and Fujitani T, “Studies of the large-scale sea transportation of liquid hydrogen” International Journal of Hydrogen Energy, Vol 23, pp 115 - 121, 1998
- [15] Giacomazzi G and Gretz J, “Euro-Quebec hydro-hydrogen project (EQHHPP): a challenge to cryogenic technology” Cryogenics., Vol. 33, pp 767 - 771, 1993
- [16] IMO, “IGC Code”, Available at <http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Cargoes/CargoesInBulk/Pages/IGC-Code.aspx>
- [17] IMO “International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels (IGF Code)”, Available at <http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/SafetyTopics/Pages/IGF-Code.aspx>
- [18] Frederick D. Gregory, “Safety Standard for Hydrogen and Systems”, NASA, 1997
- [19] Air product, “Safetygram 9: Liquid hydrogen”, 2014
- [20] 한국가스안전공사, “액체수소 저장탱크 위험성 평가 알고리즘”, 2019
- [21] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, “Current Safe Operating Practices”, DOE

저자이력

장대준 (張大俊)

-1987-1997년 한국과학기술원

화학공학과, 학사, 석사, 박사

-1997-2009 현대중공업 산업기술연구소

-현재 한국과학기술원 기계공학부 교수

