

가압식 대용량 액체수소 저장탱크의 단열 성능과 BOR

서흥석[†] · 이영범 · 김동혁 · 박창원

한국가스공사 가스연구원

Insulation Performance and BOR of Pressurized Large-capacity Liquid Hydrogen Storage Tank

HEUNG SEOK SEO[†], YEONGBUM LEE, DONGHYUK KIM, CHANGWON PARK

KOGAS research Institute, Korea Gas Corporation, 960 Incheonsinhang-daero, Yeonsu-gu, Incheon 21993, Korea

[†]Corresponding author :

heungseok.seo@kogas.or.kr

Received 25 October, 2023

Revised 22 November, 2023

Accepted 24 November, 2023

Abstract >> In order to efficiently control boil-off rate of a liquefied hydrogen tank, the important thing is to maintain an appropriate vacuum level. however, compared to small and medium-sized storage tank, it is very difficult to create and maintain vacuum in large-capacity storage tanks. In this study, we aim to determine the target level of future large-capacity storage tank technology development and secure basic data on performance test methods by analyzing the correlation between evaporation gas and thermal conductivity of liquefied hydrogen storage tanks.

Key words : Liquefied hydrogen(액화수소), Pressurized tank(가압식 탱크), Boil off gas(증발가스), Large-capacity(대용량), Thermal conductivity(열전도도)

1. 서론

수소가 점차 주요 에너지원으로 부상하고 있는 가운데 기존 에너지원인 석유, 석탄, 천연가스의 사례를 되돌아보면 최종적으로는 대량의 에너지원 확보와 공급을 통해 경제성을 확대하는 것이 중요한 포인트라는 것을 알 수 있다. 천연가스(liquefied natural gas, LNG)를 대량으로 공급하기 위하여 파이프라인이나 액화를 통한 운송 등이 사용되었고 이는 수소의 경우에도 동일하게 적용된다. 수소의 대용량 운송에는 여러 가지 방안들이 제시되고 있으나 국내 환

경을 고려하면 최종 단계에서는 LNG와 마찬가지로 액화수소를 통한 운송 방법이 적용될 것이라는 것에 많은 전문가들이 동의하고 있다. 그러나 액화수소의 경제성을 확보하기 위해서는 설비의 대용량화가 필수인데, 아직까지 전 세계적으로 최대 용량 저장탱크는 5,000 m³급을 넘지 못하고 있는 실정이다. 가압식 저장탱크의 대용량화가 어려운 이유는 여러 가지가 있지만 진공을 적절하게 생성하기가 어려운 것도 이유 중 하나이다. 본 연구에서는 저장탱크의 대용량화를 위해서 저장탱크의 진공도에 따른 열전도도와 증발가스 발생률(boil off rate, BOR)의 상관관계 분석

을 통해 대용량 저장탱크의 목표 열전도도 수준을 분석해 보고자 한다. 본 연구에서는 진공 단열을 적용한 모델을 기준으로 분석하였으나 향후 저장탱크 기술 개발에서는 열전도도를 중점으로 다양한 단열재를 적용한 모델을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 가압식 저장탱크 BOR 해석 모델

2.1 해석 조건

미국 CB&I에서 발표한 자료에 따르면 대용량화가 가능한 수준의 가압식 액체수소 저장탱크를 최대 40,000 m³급으로 평가하고 있다¹⁾. 따라서 본 논문에서는 기존 최대 용량인 5,000 m³급과 40,000 m³급의 두 가지 케이스에 대해 평가하고자 한다. 저장탱크의 초기 압력 3.5 barg를 적용하였고, 유체온도는 포화온도를 적용하고 대기온도는 상온을 적용한 단일 조건에 대해서만 평가하였다. 대류 및 복사 열전달을 해석에 반영하였으며, 해석을 위하여 Thermal desktop (C&R Technologies, Boulder, CO, USA)을 사용하였다. 해석을 위하여 저장탱크의 액위와 열전도도를 변수로 사용하였다. 저장탱크의 액위를 10%, 50%, 90% 조건으로 변동하여 평가하였고, 열전도도는 0-10 mW/mK 구간에서 7단계로 해석을 수행하였다²⁾.

2.2 해석 모델

본 논문에서 사용한 해석 모델의 형상은 기존 액체수소 저장탱크에 일반적으로 적용한 구형 타입으로, 각각의 액위에 적합하게 vapor, liquid, liquid core로 상구분하여 해석 모델을 구성하였다. 이것은 기체와 액체 사이의 응축과 기화가 발생하는 현상이 전체 증발가스 발생량 해석 결과에 반영될 수 있도록 구현하기 위함으로 이를 도식적으로 Fig. 1에 표현하였다³⁾.

해석에 사용한 프로그램은 1차원 유동 해석 프로그램으로 저장탱크의 경우 Fig. 1에서와 같이 액체 영역에 해당하는 lump 1개, 기체 영역에 해당하는

lump 1개로 구성된다. 이때 액체 영역의 lump가 1개로 구성되기 때문에 액체 전체의 평균 온도가 기화 온도까지 상승해야 기화가 발생할 수 있다. 이를 보완하기 위하여 Fig. 2와 같이 경계 조건과 액체 영역 코어(core)를 분리하여 경계 영역부터 기화가 발생할 수 있도록 구성하였다⁴⁾. 액체 영역 전체를 100%로 볼 때 경계 영역은 10%, 코어 영역은 90%를 사용하였다.

Multi layer insulation (MLI)과 진공을 적용한 저장탱크의 단면은 Fig. 3과 같다. 저장탱크 내외부 강판은 스테인리스 304 계열을 적용하였으며, MLI는 특정 제품을 적용하기보다는 일반적인 물성치를 가정하여 적용하였다⁵⁾.

저장탱크 전체 모델에서 내부 탱크와 외부 탱크를 연결하는 지지부(support)는 직접 해석 모델은 구성

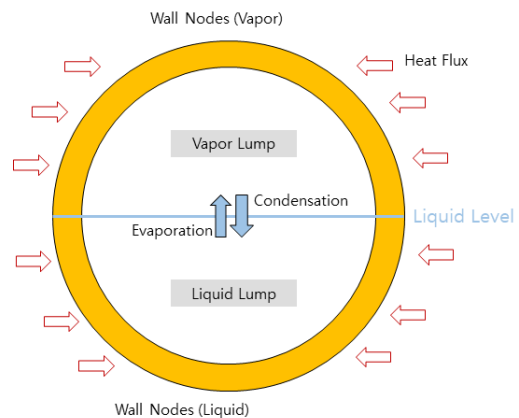


Fig. 1. Schematic analysis model of a pressurized storage tank

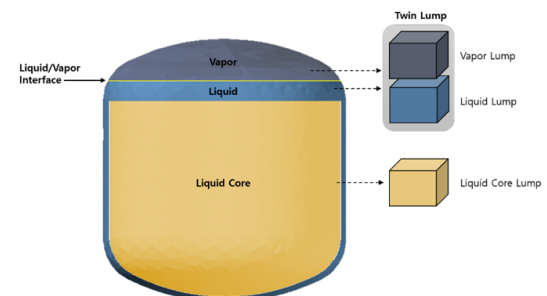


Fig. 2. Vapor/liquid/liquid core area of analysis model

하기보다는 각 지점에 유입되는 열하중(heat load)을 경계 조건으로 입력하여 해석을 수행하였다(Fig. 4).

진공 단열에 대한 열전도도를 적용하기 위하여 외부 탱크와 MLI를 contactor로 연결하는 방식으로 모델을 구성하였다. 본 논문이 가압식 탱크 자체의 성능보다는 열전도도 변화에 따른 BOR 변화에 초점을 맞추었기 때문에 탱크와 MLI 구조에 대해서는 큰 의미를 부여하지 않았다.

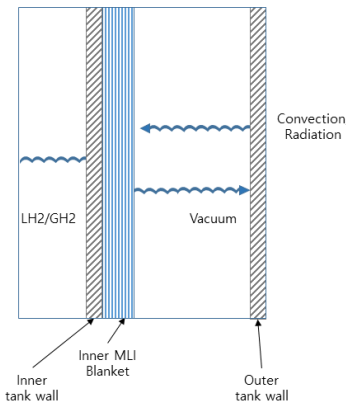


Fig. 3. Cross-sectional view of a pressurized storage tank for analysis

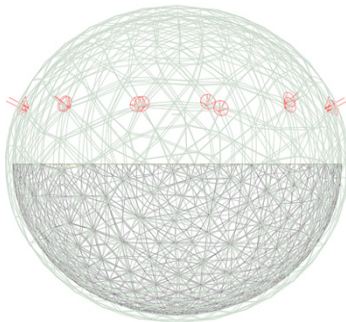


Fig. 4. Analysis model and support of pressurized storage tank

3. BOR 해석 결과 및 고찰

3.1 BOR 해석 결과

3.1.1 BOR 성능시험 방법

대용량 액체수소 저장탱크의 증발가스 발생량을 측정하는 방법은 아직까지 국내의 기준 또는 기술 표준으로 규정되지 않은 사항이다. 따라서 기존의 LNG 저장탱크 성능시험을 참조하여 실시하였다. LNG 저장탱크의 경우 최대로 액체를 채운 상태에서 별도의 압력 조절 없이 24시간 경과 후 액위를 측정하여 증발가스 발생량을 계산하는 방식을 사용한다. 보통 LNG를 채우고 안정화되기까지 2-3일 정도의 시간이 필요하다고 보고 있으며, 액위가 20 mm 내외로 감소했을 때를 초기 상태로 보고 수행하는 것이 일반적이다. 해석상에서는 안정화 기간이 필요하지 않기 때문에 별도의 지연 시간 없이 해석을 수행하였고, 액위에 따른 증발가스 발생량의 변화를 살펴보기 위하여 50%와 10% 액위에 대해서도 해석을 수행하고 결과를 평가하였다.

본 논문의 BOR 성능시험에서 사용한 케이스는 Table 1과 같다.

3.1.2 해석 결과(밀도 변화)

5,000 m³급을 기준으로 초기 상태에서 24시간 경과까지 저장탱크의 압력이 증가하고 온도는 동일한 경향으로 증가하며 가스 밀도는 감소하는 현상이 모든 케이스에서 관찰된다. 가스의 체적은 증가하고 액체의 체적은 감소하며, 가스의 질량은 증가하고 액체의 질량은 감소하나 전체 질량은 동일하게 유지된다.

Table 1. Thermal conductivity for BOR analysis

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Conductivity (mW/mK)	0	0.5	1	2.5
Case	Case 5	Case 7	Case 7	
Conductivity (mW/mK)	5	7.5	10	

가장 특이한 경향을 보이는 것은 Fig. 5의 액체 밀도 변화이다. 모든 케이스에서 초기 30분 동안 조금 빠른 밀도 감소가 발생한 후 단열 성능이 가장 좋은 case 1의 경우 완만히 감소하는 경향을 보이거나 단열 성능이 가장 나쁜 case 7의 경우에는 14시간 경과 후 오히려 밀도가 증가하는 경향을 보인다.

액체수소 액위가 50% 이상인 경우와 40,000 m³급 저장탱크인 경우에는 이러한 경향이 발생하지 않고 전 case에서 일정하게 감소하는 경향을 보인다(Figs. 6, 7). 이 현상은 용량이 상대적으로 작은 5,000 m³급 저장탱크의 10% 액위에서 체적의 감소 속도 대비 질량의 감소 속도 차이에 따른 현상으로 단열 성능이 낮은 탱크의 저액위에서 체적이 너무 빠르게 감소되어 오히려 밀도가 증가하는 것으로 관찰되는 현상이다.

3.1.3 해석 결과(조건별 BOR 변화)

액체수소 저장탱크의 액위가 낮을 경우에 발생하는 boil off gas (BOG)가 많아지는데 이것은 표면적 대비 체적의 비율 때문이다. 저장탱크의 운영에 있어서 최대 액위보다는 중액위 또는 저액위 상태가 상대적으로 중요한 구간이며, 이 경우의 발생 BOG 처리 및 관리 방안이 기지 설계의 핵심이다. Table 2와 같이 용량이 상대적으로 작은 5,000 m³급 저장탱크의 BOR은 최대 액위인 90%에서 단열 성능 최대인 경우 0.083까지 구현되며 단열 성능이 낮은 경우와 비교하여 약 2.4배의 성능이 향상되는 것으로 보였다. 액위가 낮아지는 10% 경우에는 17배, 50% 경우에는 3.7배의 BOG가 발생하는 것으로 나타났는데 이러한 결과를 통해 복수의 저장탱크가 장기간 운영될 경우 발생 BOG를 최소화하기 위해 어떤 방식으로 탱크를 운영해야 하는지에 대한 지침이 될 수 있다.

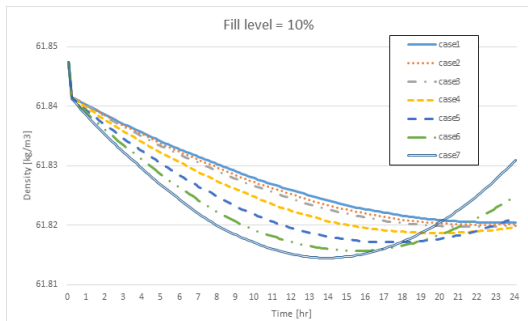


Fig. 5. Liquid density change result of 5,000 m³ tank (10% level)

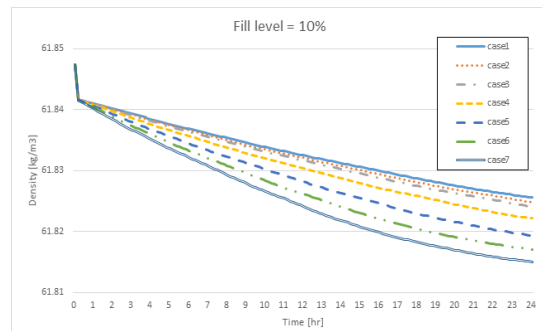


Fig. 7. Liquid density change result of 40,000 m³ tank (10% level)

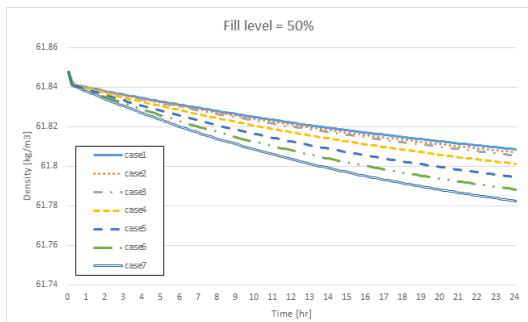


Fig. 6. Liquid density change result of 5,000 m³ tank (50% level)

Table 2. BOR due to changes in liquid level and thermal conductivity of storage tanks (5,000 m³)

Liquid level	10%	50%	90%
Case 1	1.411	0.308	0.083
Case 2	1.512	0.329	0.089
Case 3	1.614	0.350	0.094
Case 4	1.927	0.415	0.110
Case 5	2.468	0.527	0.139
Case 6	3.028	0.642	0.168
Case 7	3.604	0.760	0.197

40,000 m³급 저장탱크의 경우에도 Table 3과 같은 BOR 결과를 보였는데 중간 단계인 case 3의 경우로 보면 50%에서 3.8배, 10%에서 15.2배의 BOG가 추가로 발생하는 것을 알 수 있다. 단열 성능에 따른 차이는 약 2.5배로 5,000 m³급 저장탱크의 2.4배와 유사하다고 볼 수 있다.

3.1.4 해석 결과(BOR 성능시험)

LNG 저장탱크와 동일한 기준을 적용하여 최대 액위(90%)에서 BOR 성능시험을 해석적으로 구현하면 Figs. 8, 9와 같다.

5시간 또는 12시간의 초기 상태에서 BOG가 발생하지 않는 구간이 보이는 것은 저장탱크의 압력, 기체와 액체수소의 온도, 외부 열유입 수준 등에 의한 임계점을 의미한다. 이 구간은 저장탱크의 용량이 커질수록 비례하여 커지게 될 것이므로 향후 액체수소

Table 3. BOR due to changes in liquid level and thermal conductivity of storage tanks (40,000 m³)

Liquid level	10%	50%	90%
Case 1	0.441	0.112	0.029
Case 2	0.472	0.119	0.031
Case 3	0.502	0.126	0.033
Case 4	0.596	0.147	0.040
Case 5	0.761	0.184	0.051
Case 6	0.934	0.222	0.062
Case 7	1.114	0.262	0.073

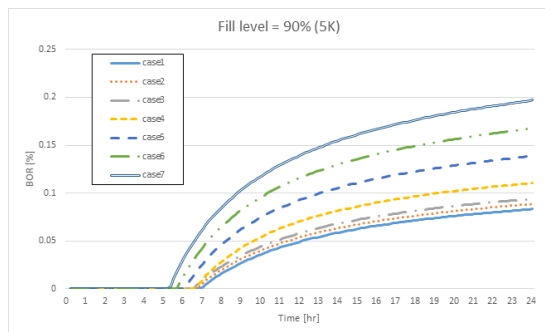


Fig. 8. Analysis result of BOR performance test of storage tank (5,000 m³)

저장탱크의 성능을 판단하는 중요한 시험인 BOR 성능시험에 반드시 고려해야 할 인자로 판단된다⁶⁾.

진공도에 따라 결정되는 열전도도를 고려한 case 1-7의 차이는 매우 일정하게 변화한다고 볼 수 있다. BOG가 발생하는 초기 구간부터 안정화가 이루어지는 구간 이전까지를 제외하고는 각 구간에서의 간격이 매우 일정하고 저장탱크의 용량 변화에도 큰 차이가 없는 것으로 보인다.

3.1.5 해석 결과(확장형 BOR 성능시험)

앞선 해석 결과에 따르면 24시간의 BOR 성능시험을 액체수소 저장탱크에 적용하는 것이 적절한지에 대해 의문을 가질 수밖에 없다. 따라서 기간을 30일까지 확장하여 결과를 고찰해 보고자 하였다. Fig. 10과 Fig. 11은 각 용량의 저장탱크에 대해 BOR 성능시험 조건을 30일까지 확장해 해석한 결과이다. 여

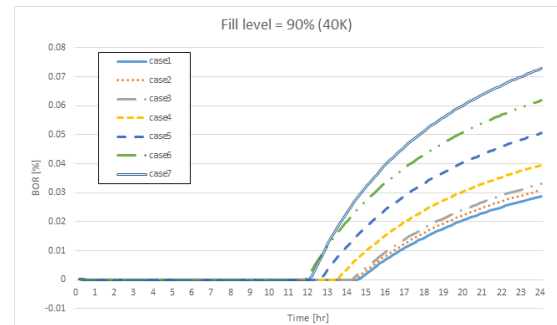


Fig. 9. Analysis result of BOR performance test of storage tank (40,000 m³)

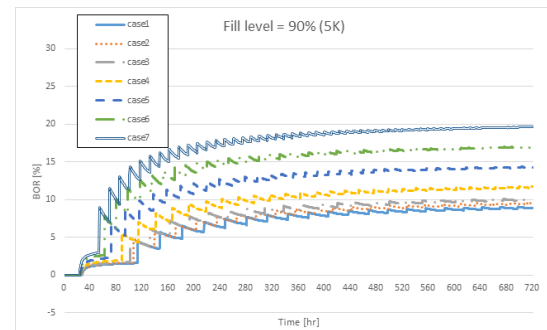


Fig. 10. Analysis result of BOR performance test of storage tank for 30 days (5,000 m³)

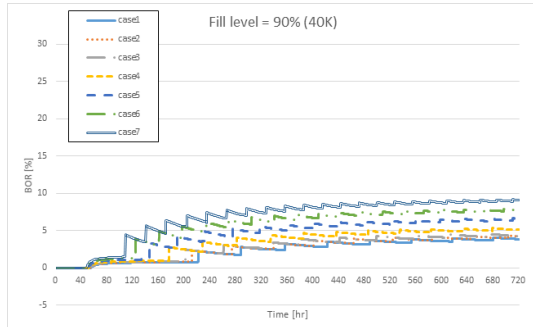


Fig. 11. Analysis result of BOR performance test of storage tank for 30 days (40,000 m³)

기서 저장탱크의 압력은 초기 3.5 barg에서 설계압으로 설정한 5 barg까지 상승시킨 후 방출을 통해 4.5 barg까지 낮추고 다시 이를 반복하는 개념으로 해석을 진행하였다. 이 부분에 대해서는 향후 다양한 케이스의 해석 결과를 통해 운전압과 설계압 등을 재정립할 필요가 있을 것이다.

이 조건에 따른 30일 후의 BOR 결과는 단열 성능이 낮을 경우 8.8%, 높을 경우 19.6%라는 매우 큰 수치를 보였다. 이것은 액체수소 저장탱크의 압력을 조절하더라도 장기적인 저장을 하는 것은 매우 어렵다는 것을 뜻한다. 특히 단열 성능이 매우 좋은 case 1에서조차 8.8%라는 수치를 보였는데, 이는 액체수소의 대용량 저장에서 매우 중요한 부분이다.

저장탱크의 용량이 클 경우에는 BOR 상승치가 상대적으로 작게 느껴지는 수준인 3.8-9.0%를 나타냈다. 그러나 실제 대용량 저장탱크에 적용 가능한 단열 수준을 case 5라고 평가하면 이때의 BOR은 6.5%인데, 이 값도 액체수소의 장기 저장 개념에 도입하기에는 매우 큰 값임은 분명하다.

3.2 BOR 해석 결과에 대한 고찰

본 논문에서는 LNG 저장탱크에 적용한 BOR 성능시험을 기반으로 가압식 대용량 액체수소 저장탱크의 성능시험 방법을 검토하고 단열 성능 조건인 열전도도 수준을 검토해 보고자 하였으나 해석 과정에 몇 가지 중요한 개념을 인지할 수 있었다.

1) 액체수소의 저장 개념 여부: 장기간 저장의 필요 여부 등 인수 기지 운영 개념을 정립하고 이를 저장탱크의 설계 개념에 반영하여야 한다.

2) 최적 설계압/운영압: 운영 개념이 정립되면 최적 운전에 적합한 설계압과 운전압을 설정할 필요가 있고, 자연 환경 및 기지 운영 조건 등 다양한 환경 조건에 맞춰 수시로 최적 조건이 변경될 수 있음을 감안해야 한다.

3) 다양한 상황을 가정한 BOR 성능 검토 필요: 본 논문에서 검토한 수준은 기초적인 것으로 실제 기지 또는 저장탱크 설계에서는 가정할 수 있는 모든 운전 조건에서의 BOR 성능을 검토하여 최적 운전이 될 수 있도록 고려해야 한다.

4. 결론

가압식 액체수소 저장탱크의 다양한 단열 성능 조건에서의 BOR 해석을 실시하고 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 저장탱크의 압력 및 용량 조건에 따라 BOR 성능시험 초기에는 BOG가 발생하지 않으며, 일정 시간이 지난 후에는 설계 압력에 이를 때까지 BOG 양이 증가한다.

2) 단열 성능과 저장 용량에 따라 BOR은 큰 차이를 보였으며, 단열 성능이 0 mW/mK인 대용량에서도 30일 후의 BOR이 최소 3.8% 이상으로 매우 높은 값을 보였다.

3) 단열 성능을 극도로 높인 0 mW/mK 조건과 실제 구현이 가능한 5 mW/mK 조건 사이의 차이가 크지 않음에 따라 BOG를 감소시키기 위해서 단열 성능을 극도로 높이기보다는 발생하는 BOG를 적절한 시간 내에 빠르게 처리하는 것이 효율적인 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제

입니다(No.20213030040460).

References

1. McDermott International, Ltd., “McDermott’s CB&I storage solutions wins second EPC contract for Philippines LNG import and regasification terminal”, McDermott International, Ltd., 2021. Retrieved from <https://www.mcdermott-investors.com/news/press-release-details/2021/McDermotts-CBI-Storage-Solutions-Wins-Second-EPC-Contract-for-Philippines-LNG-Import-and-Regasification-Terminal/default.aspx>.
2. D. Kim, Y. Lee, H. Seo, Y. Mo, and C. Lee, “Analysis of LH2 tank behavior through computational simulation of C-type LH2 carrier on voyage and unloading process”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 33, No. 6, 2022, pp. 827-837, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.6.827>.
3. S. G. Noh, “An Optimization study on the reliquefaction of boil-off gas from liquefied petroleum gas storage tank”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 30, No. 5, 2019, pp. 395-400, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.5.395>.
4. G. M. Jeon, J. C. Park, and S. Choi, “Multiphase-thermal simulation on BOG/BOR estimation due to phase change in cryogenic liquid storage tanks”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 184, 2021, pp. 116264, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116264>.
5. N. T van Dresar, M. M. Hasan, and C. S. Lin, “Self-pressurization of a flightweight liquid hydrogen tank: effects of fill level at low wall heat flux”, NASA, 1991. Retrieved from <https://ntrs.nasa.gov/citations/19920009200>.
6. J. Wang, “Pressure and boil-off gas management of liquid hydrogen storage onboard maritime carriers for export”, Monash University, 2023. Retrieved from <https://indico.cern.ch/event/1168385/contributions/5355617/attachments/2680878/4650406/C2PoB-07.pdf>.