



66 Layer 다층단열재를 적용한 액화수소 저장탱크에 대한 단열 성능 분석 연구

차승주^{1,2} · 황병관^{1,2} · 김희태¹ · 이경훈¹ · 이종필³ · 김정현^{1,2} · 이제명^{1,2†}
부산대학교 조선해양공학과¹
부산대학교 수소선박기술센터²
삼우엠씨피(주) 기술연구소³

A Study on the Insulation Performance Analysis of Liquid Hydrogen Storage Tank with 66-layer Multi-layer Insulation

Seung-Joo Cha^{1,2} · Byeong-Kwan Hwang^{1,2} · Hee-Tae Kim¹ · Gyung-Hun Lee¹ · Jong-Pil Lee³ · Jeong-Hyeon Kim^{1,2}, Jae-Myung Lee^{1,2†}
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University¹
Hydrogen Ship Technology Center, Pusan National University²
Technical Research Center, Samwoo MCP Co.,Ltd³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The purpose of this study is to evaluate a vacuum composite insulation system for liquefied hydrogen tank application by building a structural unit insulation performance evaluation equipment and conducting experimental research on boil-off gas generation inside the tank. As a cornerstone study for future experimental research on MLI of high vacuum insulation system, the insulation performance is evaluated according to the heat flow rate, effective thermal conductivity, and boil-off rate derived from the experimental results. In particular, in the case of MLI, it is important to secure experimental data reliability of structural unit insulation performance because the material performance of standard materials and laboratory units may differ from that of structural units. Therefore, as a cornerstone study to secure experimental data reliability, this study developed a structural unit testbed in the form of a double tank capable of cryogenic cargo transportation, and obtained and analyzed insulation performance results in a soft vacuum.

Keywords : Vacuum composite insulation system(진공 복합 단열시스템), MLI(다층단열재), Heat flow rate(열전달율), Effective thermal conductivity(유효열전도도), Boil-Off Rate(BOR, 자연기화가스발생율)

1. 서론

대기 중 온실가스(Greenhouse Gas, GHG) 농도의 증가로 인해 기후 변화에 대한 우려가 커지고 있다. 기후 변화를 완화하고 온실가스 배출을 줄이기 위해서는 화석 연료에서 탄소중립 연료로의 전환이 필수적이다. 석탄, 석유, 천연가스를 포함한 화석 연료는 오랫동안 주요 에너지원이었으며, 지구 온난화와 환경 악화에 크게 영향을 미쳐왔다. 이에, 친환경 연료에 대한 사용이 제한되며, 수소, 바이오 연료 등과 같은 탄소중립 연료가 온실가스 배출량을 대폭 줄일 수 있는 잠재력을 지닌 지속 가능한 대안으로 제안되고 있다. 이들 연료는 각각 고유한 장점을 가지고 있다. 예

를 들어, 바이오디젤은 재생 가능하고 생분해성이 있어 배출 오염 문제를 발생시키는 디젤 엔진의 대안이 될 수 있고, 바이오매스에서 추출되는 에탄올은 휘발유와 혼합하면 일산화탄소 및 질소산화물 배출량을 줄일 수 있다.

특히, 수소는 연료로 사용하면 부산물로 물만 생성되므로 전 세계적으로 친환경 연료로서의 활용성이 주목받고 있다 (Stančin et al., 2020). 수소에너지 시장에 대한 경제적 가치는 2023년에 2022년 대비 70%까지 증가하고, 수소저장탱크의 가치는 2021년도부터 2031년까지 기하급수적으로 증가할 것으로 보고되고 있다. 차량용 및 해양산업에서의 소형저장탱크에 대해서도 시장점유율이 2021년도에 비해 2028년도에 소폭 상승할 것으로 예측된

다 (Statista, 2023). 또한, 해양 산업에서는 기존 해양 연료에 대한 실행 가능한 대안으로 액체 수소를 고려하고 있다. 주된 이유는 CO₂ 배출 및 기타 오염 물질을 크게 줄일 수 있는 잠재력 때문이다. 액체수소는 에너지 밀도가 높아 잦은 급유 없이 장거리 항해에 적합하며, 저장 및 취급 기술의 발전이 동반된다면 해상 응용 분야에 더욱 실용적인 선택이 될 것이라는 연구결과가 보고되기도 했다 (Aziz, 2021). 액체 수소의 채택은 2008년 수준에 비해 2050년까지 탄소중립을 이행하겠다는 국제해사기구(IMO)의 목표에 충족하는 연료로 제안된다 (Atilhan et al., 2021).

하지만, 액체수소는 비등점이 매우 낮고(-253°C) 밀도가 매우 낮기 때문에 효과적인 저장이 매우 중요하다. 열 손실을 최소화하기 위한 단열 시스템을 갖춘 극저온 탱크가 필요하며, 이를 위해 글라스버블(glass bubble), 펄라이트(perlite), 스프레이폼(spray foam), 에어로겔(aerogel), 유리섬유(glassfiber), 폴리우레탄 폼(polyurethane foam), 진공단열패널(vacuum insulation panel), 다층 단열재(multilayer insulation) 등을 포함한 다양한 단열재가 진공기술과 함께 단열시스템 후보군으로 거론된다. 각 재료는 극저온 저장 탱크의 적합한 단열 시스템을 선택하는 데 중요한 요소이며, 적용에 따라 다양한 수준의 열전도도, 부피 밀도 및 형태를 가진다 (James, 2021). 특히, 액체수소탱크에 적용되는 단열재료 후보군 중 다층단열재(Multilayer Insulation, MLI)가 가장 뛰어난 열적성능을 가지며, 이러한 MLI 시스템은 여러 층의 반사 재료와 낮은 열전도도를 가진 충전재료를 통합하여, 복사열전달을 획기적으로 줄여 기존 단열재에 비해 열전도율을 크게 낮추는 특징을 가진다. 특히 MLI는 고진공에서 열전도율이 매우 낮기 때문에, 진공유지가 중요하며, 이를 통해 액체수소의 저장에 필요한 저온을 유지하는 데 매우 효과적이라고 알려져 있다 (Lv et al., 2024).

MLI 단열시스템 물성은 설치, 운용 등에 큰 영향을 받기 때문에, 구조 단위 물성에 대한 영향성 평가가 필수적으로 요구된다 (Augustynowicz et al., 1999). 하지만, MLI에 대한 단열성능 평가의 경우, 업체에서 이상적으로 평가된 물성, 소재단위 실험에서 나온 물성, 구조단위 실험에서 나온 물성이 상이한 경우가 많다. 이러한 이유로 MLI 시스템의 단열성능을 평가하려면 실제 운용 용량의 탱크에 대한 단열 성능을 시험하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 요구를 충족하기 위해 상용차나 소형어선용으로 많이 언급되고 있는 700L 용량의 구조단위 테스트베드에 대한 단열성능 평가시험을 진행함으로써, 실 운용용량을 고려한 데이터를 실험적으로 제공하고자 한다. 이를 수행하기 위해 소형 선박 및 상용차에 사용되는 700L 용량의 구조 단위 실험 테스트 베드에 대한 구축 개발 연구를 수행하였고, 중진공에서의 MLI에 대한 구조단위 단열 성능 평가를 기반으로 구조 단위 단열 성능 평가에 대한 데이터를 획득 및 분석하였다.

2. 시험 준비

2.1 시험 장비

Fig. 1은 IGC Code를 기반으로 설계된 탱크로, 실제 소형 탱크나 상용차에 적용되는 내부 탱크 용적을 700L로 산정하고,

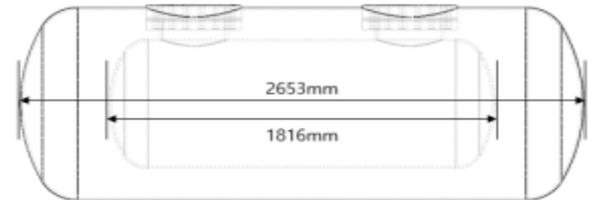


Fig. 1 Shape and dimensions of the insulation test equipment

200mm 공간에 다양한 단열재를 실험하기 위해 제작되었다. 탱크는 경판과 동판으로 이루어져 있으며 경판의 형상은 접시타원형 형상으로 되어 있다. 내부 탱크의 설계 압력은 9bar이며, 탱크 두께는 6mm이다 (IMO, 2016). 탱크 재료는 극저온 탱크에 많이 사용되는 스테인리스 300시리즈를 활용하였으며, 외부탱크 STS 304L, 내부 탱크 STS 316L을 사용하였다. 블랭킷 소재, 고체 단열재 등의 다양한 단열재 시험 수행이 가능하도록 하기 위해 단열재 교체가 가능한 장비 핸들링과 시공 편리성에 초점을 맞추었다. 본 시험 장비는 탱크 내외부 공간이 진공 챔버 역할을 하게 되며, 내부 탱크와 외부 탱크의 분리 및 체결이 쉽도록 기계적 결합 형태로 매달려 있는 설계를 바탕으로 시험 장비를 제작하였다. 다만, 탱크 내외부가 매달려 있는 형태로 제작되기 때문에 접촉되는 부분에 대한 열전도의 영향이 있을 수 있어, 이를 감소하기 위해, 테프론(Polytetrafluoroethylene, PTFE) 시트를 사용하여 가스켓 형태로 탱크 내외부를 결합하였다. 이외의 진공 실링은 NBR(Nitrile butadiene rubber) O-ring을 사용하였다.

2.2 시험 시편

개발 장비를 이용하여, 소형탱크에 적용될 수 있는 유력 단열재인 MLI를 평가하기 위한 시험편을 준비하였다. MLI는 단열 성능이 매우 우수하여 초단열재(super insulation)이라고도 불린다. 여러층의 복사 반사용 금속박막(shield) 사이에 스페이스(spacer)를 삽입한 샌드위치 구조로 낮은 방사율과 열전도율, 높은 방사율을 가진 소재들로 구성된다 (Wu and Tan, 2023). 본 연구에서 채택한 시험편은 66 layer로, 내부 탱크를 감싼 형태로 시공을 진행했으며, 이를 수행하기 위해 1m 롤형태의 MLI를 재단하여, 부분적으로 겹치는 형태로 진행하였다. 단열재 시공 시 필요한 고정은 알루미늄 테이프를 이용하였다. 단열재의 층밀도는 66 layer 경판 기준으로, 상부는 자중에 의해 많이 압축되어 있는 상태로 두께가 20mm이며, 하부 및 탱크 형상의 굴곡이 있는 부분의 두께는 35mm이다. 종합적으로, 본 실험에 사용된 시험편의 층 밀도는 1.8~3.3 layer/mm의 범위를 가지도록 시공하였다.

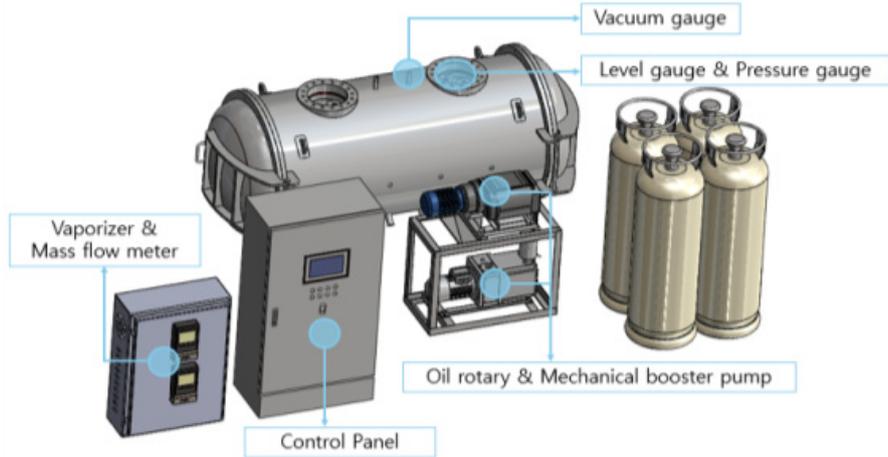


Fig. 2 Test Instrument for data acquisition

2.3 시험 설비

Fig. 2에 진공 실험과 자연 기화율(boil-off rate) 계측에 관한 실험을 수행하기 위한 장비와 진공 구현 및 정밀 계측을 위해 필요한 장비들을 나타내었다. 우선, 진공 실험을 수행하기 위해 오일 로터리 펌프(oil rotary pump)와 기계식 부스터 펌프(mechanical booster pump)를 설치하였다. 오일 로터리 펌프는 오일을 이용해 흡입-고립-압축-배기의 순서로 압력이 낮은 곳에서 높은 곳으로 이동시켜주는 원리로 작동되며, 1차 펌프로서 중진공까지 도달할 때 활용된다. 또한, 기계식 부스터 펌프는 1차 펌프의 보조적인 역할을 수행하며, 별도로 윤활유 없이 실린더와 아주 작은 틈을 유지하고 있어 윤활유 없이 진공 배기를 수행하여 배기 시간 단축이 가능하다는 특징이 있다. 기계식 부스터 펌프와 오일 로터리 펌프를 함께 사용함으로써, 약 1400L 이상의 진공 공간에 있는 공기의 효율적 배기가 가능하다. 또한, 중저진공의 진공도를 효율적으로 계측하기 위해 피라니 게이지(Pirani Gauge)를 사용하였다. 피라니 게이지는 가열된 필라멘트가 기체 분자와 충돌하여 열을 빼앗겨 온도 변화를 일으켜 필라멘트 저항 변화를 발생시키는 원리로 계측된다.

Fig. 3에 탱크 높이별 계측센서 부착 위치를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 탱크 높이의 25%가 되는 위치에 온도 게이지를 부착하였고, 탱크 내부에 적재된 유체의 상을 확인하여 탱크 안전성 확보를 위해 내부 압력 게이지를 설치하였다. 또한, 내부 유체의 적재 높이를 확인하기 위한 레벨게이지와 외부 온도 확인을 위한 온도 센서를 설치하였다. 25% 높이별로 부착되는 온도 게이지는 K-type의 열전대(Fig. 4)를 사용하고, -200°C 부터 상온 범위까지 계측이 가능하다. 레벨게이지는 TDR(Time Domain Reflectometry) 종류로, 레이더파와 시간 이동 원리를 활용한 장비이다. 레벨게이지의 프로브가 빛의 속도로 공간에서 전파되는 고주파 펄스를 방출하고 펄스가 표면에 부딪히면 미터기에서 수신기에 의해 반사되어 수신되고, 거리 신호는 레벨 신호로 변환된다. 그리고, 탱크 내부의 극저온 유체가 기화되는 양을 확인하기

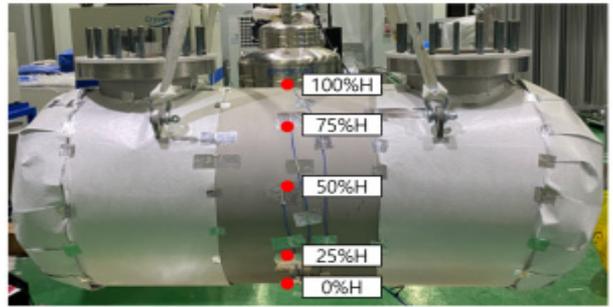


Fig. 3 Location of temperature sensor according to height

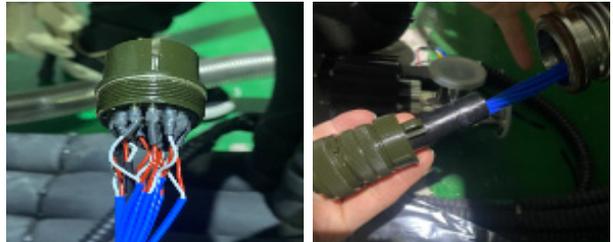


Fig. 4 K-type thermocouple and feedthrough

위하여 기화기와 유량계를 별도로 설치하였다. 가스 유량은 최대 20L/min의 유량을 계측하는 질소 가스용 유량계 2개로 계측하였다. 진공 실험과 BOR 실험데이터를 실시간으로 확인하고, 부분적으로 배관라인을 On/Off를 위한 솔레노이드 밸브, 진공 펌프를 자동 및 수동으로 조작하기 위해 컨트롤패널을 구축하였다.

3. 시험 결과 및 분석

3.1 진공 실험 결과

본 연구의 진공 실험은 장비 및 MLI 실험에 대한 연구로, E-2 torr의 중진공에서 실험이 진행되었으며, 중진공 실험 환경 조건을

Table 1 Base Pressure for 3 cycle test

Cycle	Base pressure (torr)
1	0.038
2	0.036
3	0.034

충족하기 위하여, 오일 로터리 펌프를 가동하여, 760torr에서 5torr 이하로 진공도를 낮추고, 부스터 펌프를 활용하여, E-2 torr 까지 진공도 도달 속도를 증가시켰다. 탱크 내외부의 진공 공간에는 초기에 공기로 퍼징하여, 진공 사이클 3회 수행하였으며, 최저 진공도(base Pressure)는 0.034torr로 진공도로 유지하여, 실험을 수행하였다. Table 1에 진공 사이클을 수행하는 동안 계측한 진공도를 나타내었다.

3.2 자연 기화(Boil-off rate) 실험 결과

자연기화실험은 극저온 유체를 탱크에 주입하여, 기화되는 가스의 유량을 계측하는 실험이다. 극저온 유체를 주입하기 전 시스템의 온도를 감소시키기 위해 극저온 환경을 사전에 조성하였다. 우선, 모든 밸브를 열어 저온의 질소 가스를 주입하여 탱크 내부 환경을 저온으로 조성한 이후, 내부의 온도가 -100도에 도달하면 액체질소를 주입하는 방식으로 진행했다. 극저온 유체를 목표하는 높이까지 도달할 때까지 극저온 유체 주입 및 배출 라인의 밸브는 모두 열어 급격한 기화 가스 발생에 따른 탱크 내압 상승이 발생하지 않도록 조치하였다. 이러한 절차에 따라, 내부 탱크 전체 온도가 극저온에 도달하기 위하여, 기체, 기액 혼상, 액체의 순으로 장비 내에 극저온 유체를 적재하였다. 적재가 완료되면, 극저온 유체가 주입되었던 밸브를 잠그고, 극저온 유체가 기화되는 양을 유량계로 계측하였다. 본 연구에서는 약 8시간 (43001sec~74742sec) 동안 내부 탱크의 온도를 극저온 환경으로 조성하였다. 탱크에 극저온 유체 주입 시 배출부를 열어두었으며, 8시간 이후 배출부를 잠금고 유량계로 데이터 계측을 수행하였다. 진공실험과 극저온 유체 주입을 통해 자연기화실험을 수행하였으며, 실험 결과 데이터로, 온도/레벨 게이지/압력/진공도/가스 유량에 대한 데이터를 실시간으로 획득하였다. 레벨게이지와 유량의 결과를 온도/압력 데이터와 비교하여, 나타내었고 이를 통해 극저온 유체가 적재된 높이를 예측하고자 하였다. 온도/레벨게이지/압력 데이터를 바탕으로, 내부 극저온 유체의 높이를 예측할 수 있었다. 탱크 높이별 온도와 내부 압력을 비교하여, 높이별 극저온 유체의 온도 분포를 확인하였고, 레벨게이지 데이터와 비교하여, 데이터의 신뢰성을 확보하였다.

Fig. 5는 시간에 탱크 높이별 온도를 나타낸 그래프이다. 시간에 따른 적재 높이 별 온도구배를 확인 할 수 있으며, 온도 데이터와 레벨게이지 데이터를 비교하여, 온도 데이터에 대한 신뢰성을 확보하였다.

탱크 내부에 적재된 극저온 유체는 대기압에서 포화온도인 -196도에 도달할 때, 초기에 자유표면에서 온도 상승과 함께 증발되는 자연적인 대류 비등이 발생하게 되고, 기포가 형성되는 핵비등, 상당부분 액체에 비해 증기의 낮은 열전도율로 인해 단

열재 역할을 하는 증기 필름으로 덮여지는 천이 비등, 뜨거운 벽 표면의 액체 방울이 증기 위해 떠있는 라이덴프로스트(laidenfrost) 지점을 확인하는 막필름으로 비등이 발생하게 된다 (Hartwig et al., 2015).

이러한 비등 변화에 따라, 일정 적재 높이 이상, 즉 자유표면에서 자연대류 비등이 발생과 핵비등에 따른 온도 상승이 발생하게 된다. 그리고 천이 비등 영역에서 온도 기울기가 변화하게 되고, 막비등의 형태로 온도 구배가 선형적으로 상승하였다.

Fig. 6에서는 시간에 따른 열전대를 통한 계측 온도와 내부 압력 결과를 도시한 것으로, 액체 질소 주입에 따른 급격한 BOG 발생으로 인해, 내부 압력이 크게 증가하다가 압력이 대기압으로 안정화되는 경향을 확인할 수 있었다. 내부 압력과 높이별 온도 데이터를 상평형 다이어그램을 기반으로 분석하였을 때, 극저온 유체 주입 초기에 75% 적재 높이까지 극저온 유체가 적재되었으나, 기체와 액체의 경계면으로 바로 기화가 발생하였고, 50% 적재 높이와 25% 적재 높이에서 물리적 상태가 액체임을 알 수 있었다. 또한, 온도 구배 분석 결과, 50% 적재 높이에서 약 11시간 온도 유지, 25% 높이에서 약 5일 온도 유지 하였음을 확인하였다. 이러한 내용을 기반으로 단열성능 평가는 극저온 유체가 적재되어 있는 구간인 50% 적재 높이와 25% 적재 높이를 기준으로 데이터를 발췌하여 현상학적으로 분석하였다.

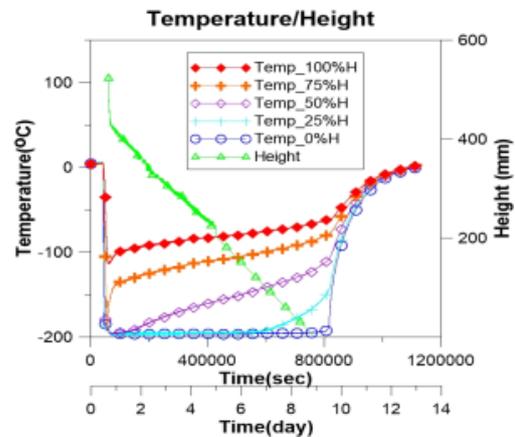


Fig. 5 Time versus Temperature/Height graph

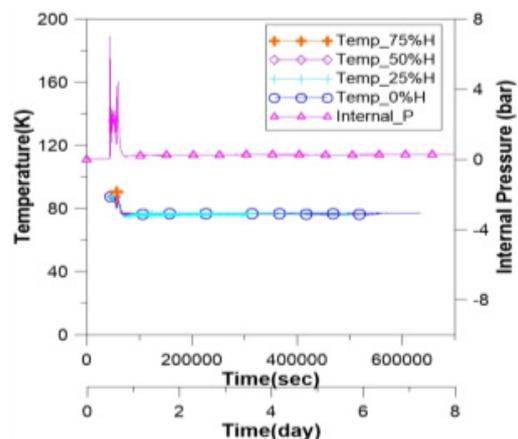


Fig. 6 Time versus temperature/internal pressure distribution

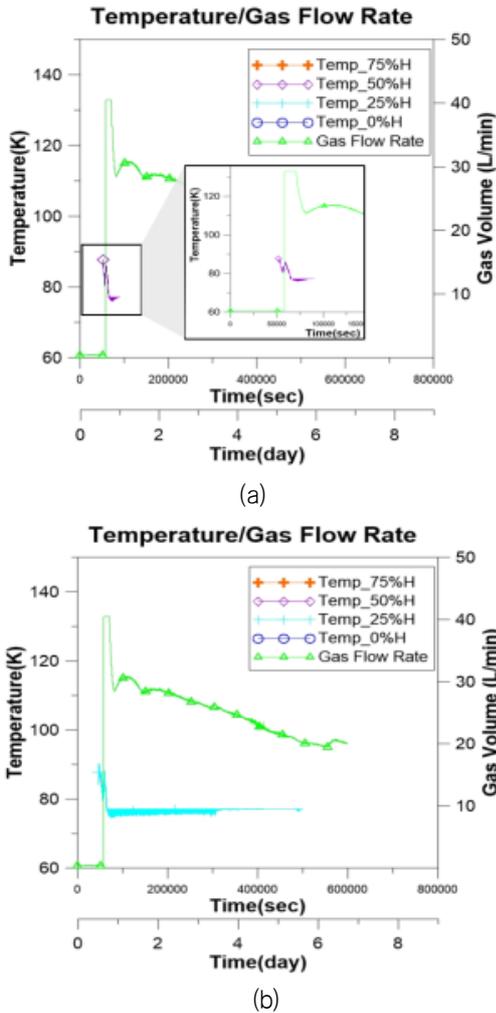


Fig. 7 Temperature and gas flow rate distribution graph (a)50% filling height, (b)25% filling height

Fig. 7은 50% 적재 높이와 25% 적재 높이의 가스 유량 실험 데이터 결과를 도시한 것으로, 해당 적재 높이에서, 시간에 따라 일정하게 가스 유량이 감소하는 구간을 나타내었다. 샘플링된 50% 적재 높이와 25% 적재 높이를 기준으로 단열성능 평가를 수행하였으며, 50% 적재 높이에서의 가스유량에 비해 25% 적재 높이에서의 가스 유량이 완만한 기울기를 가지고 있는 것을 기반으로, 적재 높이가 낮을수록 열 유량이 감소하는 경향을 보였다. 이는 내부의 자연적으로 발생하는 비등 시간이 증가됨에 따라 50% 적재 높이에 비해 25% 적재 높이에서, 온도가 안정화되기 때문에 기화되는 양도 50%에 비해 25%에서 감소하기 때문으로 판단된다.

단열성능평가는 ASTM C1774 (ASTM, 2019)과 구조-극저온 단열 관련 NASA report (Bush, 1965)에 따라, 단열시스템의 열전도도 및 자연 기화 발생율 (BOR; boil-off rate)을 기준으로 수행하였다. 단열시스템의 열전도도는 유체의 자연 기화가 완료되는 동안의 자연 기화 가스 유량, 유체의 전체 부피, 내부 탱크 벽면의 온도로 결정되며, 실험 과정 동안의 자연 기화 발생율에 대한 계산은 전도를 통해 탱크 내부로 전달되는 열의 양과 해당 압

력에서 탱크 내의 극저온 유체의 양이 기화하는데 필요한 잠열의 비를 통해 계산된다.

$$BOR = \frac{\sum Q_i}{\rho \times V \times H} \times 3600 \times 24 \times 100 \quad (1)$$

여기서, Q 는 탱크외부에서 내부로 유입되는 전체 열유입량, ρ 는 극저온 유체 밀도, V 는 극저온 유체 부피, H 는 극저온 유체 잠열을 의미한다. 극저온 유체에 대한 전체 열전달률은 하기식과 같다.

$$Q = \dot{m} h_{fg} = \dot{V} \rho_G h_{fg} \quad (2)$$

여기서, \dot{m} 은 질량유량, ρ_G 는 가스밀도, \dot{V} 는 부피유량이며, 질량유량은 유량계에 지나가는 가스 밀도와 부피 유량으로부터 결정된다. 극저온 유체의 증발 잠열은 유체의 물성치를 따르며, 본 연구에서는 60% 적재높이에서 시간에 따라 일정하게 감소하는 질소 가스의 유량 데이터를 바탕으로 계산을 수행하였다. 그 결과, 식 (1), (2)에 따라, 7%/day의 BOR 값이 도출되었다. 본 연구에서의 수행한 구조단위 단열성능평가는 재료 단위와 달리 다양한 위치에 계측 센서와 부품 결합으로 이루어져 있는 만큼 시스템에 영향을 주는 주 열원에 대한 영향성 분석이 필수적으로 요구되며, 테스트 베드에서 주열원이 될 것으로 예측되는 요소를 파악하고 분석하는 연구를 추가적으로 수행하였다.

4. 돔 시공 단열재 제안

본 논문에서는 액화수소탱크용 단열재에 대한 단열성능평가를 수행하기 위해, 탱크 단위 단열성능평가 테스트 베드 구축부터 단열성능평가를 수행하였다. 단열성능평가를 수행하는 과정에서, 테스트 베드의 추가 보완점을 확인하였고, 이를 개선하기 위해 추가 해석연구를 수행하였다.

본 시험 장비는 액화수소에 적용되는 다양한 단열재료를 대상으로 실험을 수행하기 위해, 탱크 내외부가 기계적으로 결합되어, 매달려 있는 형태로 설계하였다. 이에, 열전도도가 낮고, 진공 가스켓 역할을 하는 PTFE Sheet를 사용하여, 결합하였다. 하지만, 기계적 결합구조가 없는 이상적인 모델에 비해 전도 열전달에 의한 열유입량이 많을 것으로 판단하여, 실험 테스트 베드에 대한 보강 연구를 진행하였다.

글라스울(glasswool)과 에어로겔 블랭킷(aerogel blanket)을 후보군으로 선정한 이유는 본 장비에서 전도열전달의 영향이 클 것이라고 판단되는 부분에 대한 보강을 위해 돔부분을 시공하고자 하였다. 돔부분의 경우, 굴곡진 형태를 가져, 시공 및 고정에 어려움을 가지는 문제가 있었고, 이를 해결하기 위해, 형상에 구애받지 않고 시공이 가능하며, 상온에서 열적 성능이 우수한 재료를 선정하고자 하였다. 따라서, 본 연구에서는 이를 충족하는 후보군으로 글라스울 (Açikkalp and Yerel Kandemir, 2018), 에어로겔 블랭킷 (Fesmire, 2006)을 대상으로 평가하였다.

다만, 글라스울의 경우 수분의 흡수에 따라 물과 동등한 수준으로 단열능성이 저하되기 때문에, 이를 추가적으로 고려하였다. 이러한 부분을 종합하여 탱크 돔 부분의 시공을 위한 후보 재료에 대한 상대비교를 위해 해석을 수행하였다. Table 2는 해석 시나리오를 나타낸 것이며, Table 3은 글라스울과 에어로겔의 열전도 물성을 정리한 표이다 (Bae, 2018; Fesmire, 2015).

상기 해석 시나리오에 따라 유한요소모델을 작성하여, 정상상태 열전달 해석을 수행하였다. Pre-process로 Solidworks, Hypermesh 프로그램을 사용하여, Geometry와 Mesh를 작성하였다. 그리고, Post-process로 ABAQUS를 활용하여, 열전달해석을 수행하였으며, Fig. 8에서 작성한 Mesh 크기와 유형은 20mm 이내, DC3D8(An 8-node linear heat transfer brick)으로 해석을 수행하였다.

Fig. 9에서 나타난 열전달 해석을 통한 온도 분포/열유량 결과는 돔 시공 소재 후보군들에 대한 상대 비교를 위한 것으로, 돔 시공부인 돔부분에서 지배적으로 영향을 미치는 열전도 열전달을 고려하여, 유한요소해석을 진행하였다.

수치해석에 사용된 지배방정식은 에너지 보존 방정식, 전도 열전달 방정식을 통해 계산된다. 식 (2)는 열확산 방정식을 나타낸 것으로, 여기서, k 는 열전도도, c_p 는 비열용량, ρ 는 밀도, T 는 온도 차이이다 (Lee et al., 2021).

$$\frac{\delta}{\delta x}(k \frac{\delta T}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y}(k \frac{\delta T}{\delta y}) + \frac{\delta}{\delta z}(k \frac{\delta T}{\delta z}) = \rho c_p \frac{\delta T}{\delta t} \quad (1)$$

Table 2 Analysis scenarios

Case	Scenarios
1	Model with inlet and outlet
2	Model with inlet and outlet + GW
3	Model with inlet and outlet + Aerogel
4	Model with inlet and outlet + GW + Water

Table 3 Thermal conductivity for insulation

	Thermal conductivity (W/m-K)
Glasswool	0.03
Aerogel	0.01
Glasswool + Water	0.54



Fig. 8 Left: Ideal model, Right: Model with inlet and outlet

해석 수행 결과(Fig. 9), 돔부분에서 대부분의 열유출입이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 글라스울과 에어로겔을 시공했을 때, Case1을 기준으로, 각각 약 36.9%, 37.6% 열유량이 감소하는 결과를 확인하였다. 내부 탱크에 극저온 유체를 넣을 때, 대기 중의 수분이 응결되어 얼음이 생겼다가 내부 탱크의 극저온 유체가 기화하면서 얼음이 녹게되고, 이로인해 글라스울이 수분을 흡수하게 되는 현상을 고려하였을 때, Case1을 기준으로, 약 22.8% 열유량이 감소하는 것을 확인하였다. 따라서, 수분의 영향이 없다면, 두 재료 모두 활용이 가능하나, BOR 실험으로 인한 수분에 대한 영향성을 배제할 수 없어, 에어로겔이 탱크 돔부분 시공 재료로 적합하다고 판단된다.

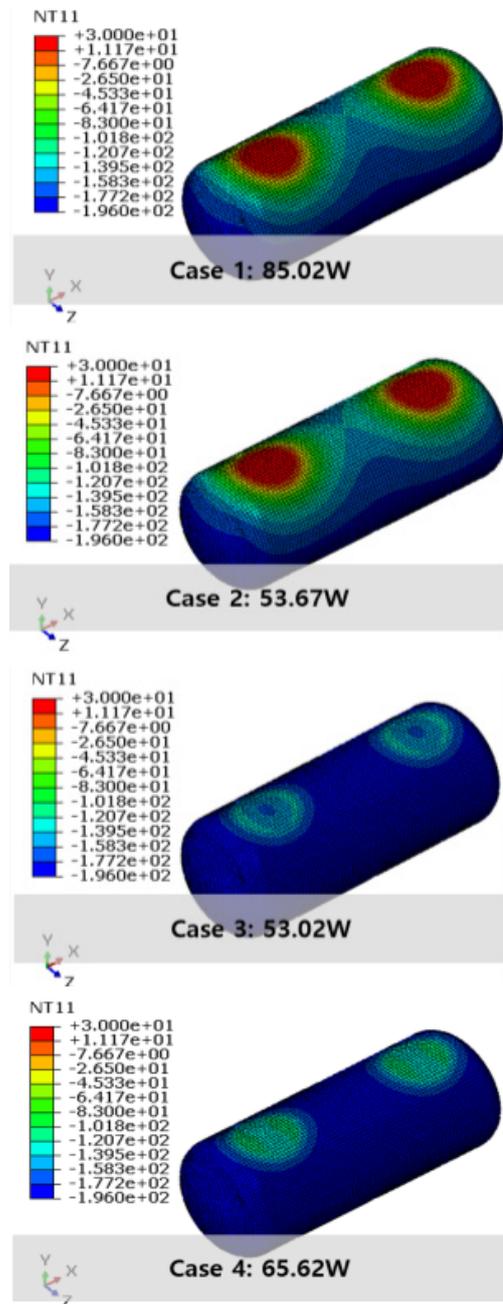


Fig. 9 Heat transfer analysis results

본 연구에서 돔 시공 재료 평가를 제시한 이유는 테스트 베드에서 발생하는 열침입량 중 대부분을 차지하는 부분이 돔부분이라고 판단하였다. 따라서, 이를 보강하여 시험하는 것이 시험 장비의 신뢰성을 확보하는 방안이라고 판단하였고, 돔 시공 후보군을 시험 장비 운용 특성 상 발생하는 수분의 영향과 열유입 방지를 기준으로 평가하여, 에어로겔 블랭킷으로 돔을 시공하여 단열 성능을 최종적으로 평가하였다.

5. 결론

본 논문은 액화수소 운송 및 저장탱크 단열재 성능검증을 위한 테스트베드 구축 및 MLI 평가에 관한 연구이며, 본 연구를 통해 획득한 결과를 하기에 요약하였다.

- 액화가스 주입에 의한 기화가스 발생으로 탱크 내부 압력이 증가하고, 탱크 높이(0%, 25%, 50%, 75%)에 의존하여 온도구배가 형성되었다. 초기 75% 적재높이에서 액체 상태에서 상부 가스의 흐름이 자연대류로 전이 되면서, 상부층은 기열되어 바로 기화되었다. 따라서, 적재높이가 높을수록 긴 안정화 시간이 요구됨을 확인하였다.
- 적재높이가 낮을수록 기화가스 발생 시간이 많이 소요되었다. 온도구배와 내부 압력을 기반으로 유체의 물리적 상태를 분석한 결과, 액화상태로 11시간 동안 탱크의 50%를 유지했고, 5일 동안 25% 적재높이가 지속되었다.
- 자연적인 비등시간이 길어지면서 탱크 내부 온도가 안정화되어, 적재율이 낮아질수록 가스유량이 선형적으로 감소하였다. 적재높이 50%에 비해 적재높이 25%에서 열유량이 약 25% 이상 감소하는 경향을 보였다.
- 구조단위 테스트 베드 주 열원인 탱크 돔 부분의 구조 보강이 추가로 필요하다고 판단되어, 열유입이 많은 돔 부위에 단열 보강을 위한 해석을 수행하였고, 에어로겔 블랭킷에 의한 단열성능 보전이 가장 적합한 것으로 확인하였다.

본 연구에서는 테스트 베드의 구조 건전성 및 단열성능평가 절차 정립을 위해 액화질소를 사용하여, 77K 온도를 기준으로 단열성능 평가 결과를 획득하였다.

액화질소가 아닌 액화 수소를 사용하여 시험할 경우, 액화질소에 비해 낮은 동점도(kinematic viscosity)와 낮은 표면장력, 50도 이상 낮은 온도를 가진다는 차이에 의해 탱크 내부 극저온 유체의 증발 및 비등에 영향 미쳐 유량과 온도분포 결과가 달라질 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 테스트 베드의 건전성과 77K 온도 기준 단열성능 평가 데이터 확보가 목적이고, 본 연구를 초석 연구로, 실제 액화수소 탱크 적용을 위해 20K에 대한 데이터 확보 연구도 필요하다고 판단된다.

또한, 본 연구의 후속 연구로, 샘플링 시간 및 데이터 범위 확장을 통해 고진공에서의 단열성능평가에 대한 실험데이터의 비교 분석 연구를 수행할 예정이다. 아울러, 해석연구를 통해 제안된 단열재료를 활용하여 탱크 돔 시공을 통한 재현성 검증 연구를 수행 한다면 액체수소용기의 단열재에 대한 구조단위 열성능 평가기준 장비로서 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음

References

- Açikkalp, E. and Yerel Kandemir, S. 2018. Optimum insulation thickness of the piping system with combined economic and environmental method. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 40(23), pp. 2876-2885.
- Augustynowicz, S.D., Fesmire, J.E. and Wikstrom, J.P., 1999. Cryogenic insulation systems. *20th International Congress of Refrigeration*, Sydney, Australia, 19-24 September 1999.
- ASTM, 2019. Standard Guide for Thermal Performance Testing of Cryogenic Insulation Systems(ASTM C1774). *ASTM International*.
- Atilhan, S., Park, S., El-Halwagi, M.M., Atilhan, M., Moore, M. and Nielsen, R.B., 2021. Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 31, pp.100668.
- Aziz, M., 2021. Liquid hydrogen: A review on liquefaction, storage, transportation, and safety. *Energies*, 14(18), pp.5917.
- Bae, J.H., Oh, J.H., Byun, J.S. and Lee, J.M., 2018. Experimental study of thermal conductivity for glass wool by inserted dissimilar materials based on structural Composites. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(5), pp.448-455.
- Bush, O.J. and Hannah, R.G., 1965. *Design techniques for structure-cryogenic insulation integration* NASA report No. NASA-CR-61038.
- Fesmire, J.E., 2015. Standardization in cryogenic insulation systems testing and performance data. *Physics Procedia*, 67, pp.1089-1097.
- Fesmire, J.E. (2006). Aerogel insulation systems for space launch applications. *Cryogenics*, 46(2-3), 111-117.
- Hartwig, J., Hu, H., Styborski, J. and Chung, J. N., 2015. Comparison of cryogenic flow boiling in liquid nitrogen and liquid hydrogen chilldown experiments. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88, pp.662-673.
- International Maritime Organization (IMO), 2016. International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gasses in Bulk (IGC Code). *IMO Publishing*.
- James, E.F., 2021. *Thermal Insulation Systems for Liquid Hydrogen Storage*. Cryogenic Society of America, Inc.

Lee, D.H., Cha, S.J., Kim, J.D., Kim, J.H., Kim, S.K. and Lee, J.M. 2021. Practical prediction of the boil-off rate of independent-type storage tanks. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1), p.36.

Lv, H., Zhang, Z., Chen, L., Zhang, Z., Chen, S. and Hou, Y., 2024. Thermodynamic analysis of vapor-cooled shield with para-to-ortho hydrogen conversion in composite multilayer insulation structure for liquid hydrogen tank. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, pp.1448–1462.

Stančin, H., Mikulčić, H., Wang, X. and Duić, N., 2020. A review on alternative fuels in future energy system. *Renewable and sustainable energy reviews*, 128, pp.109927.

Statista, 2023. *Hydrogen industry worldwide*, <https://www.statista.com/study/102263/global-hydrogen-industry/> [Accessed 02 July 2024].

Wu, H. and Tan, H., 2023. Inversion of Interlayer Pressure in High-Vacuum Multilayer Insulation Structures for Cryogen Storage Using Extreme Learning Machine. *Applied Sciences*, 13(9), pp.5779.

