Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 6, 2025, pp. 682~689
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.6.682

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

# 다층 단열재 적용에 따른 액체수소 저장 용기의 단열 성능 분석을 위한 해석적 연구

임영찬[1†] · 최진[2]

[1]영남이공대학교 스마트 e-자동차과, [2]공주대학교 기계공학과 대학원

# Numerical Analysis of the Thermal Insulation Performance of a Liquid Hydrogen Storage Vessel with Multi-Layer Insulation

YOUNG CHAN LIM[1†], JIN CHOI[2]

[1]Department of Smart e-Automobile, Yeungnam University College., 170, Hyeonchung-ro, Nam-gu, Daegu, Korea
[2]Graduate School of Mechanical Engineering, Kongju National University, 1223-24 Cheonan Daero, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungnam 331-717, Korea

†Corresponding author :
yclim@ync.ac.kr

Received 22 September, 2025
Revised 13 November, 2025
Accepted 14 November, 2025

Abstract >> In this study, the thermal insulation performance of a liquid hydrogen ($LH_2$) storage vessel equipped with multi-layer insulation (MLI) was numerically investigated. The effects of MLI thickness and the number of layers on the temperature distribution, temperature variation in the head and cylindrical regions, boil-off rate (BOR), and overall heat transfer rate were analyzed. As the MLI thickness increased, a more distinct temperature distribution and a wider temperature gradient layer were observed. The presence of MLI also reduced the effective thermal conductivity, resulting in a milder temperature gradient and smaller temperature variation inside the $LH_2$ storage vessel. Under the MLI 20-layer condition, the BOR of Case 1 (5.35%/day) showed an approximately 30% reduction compared to that of Case 2 (7.63%/day). Furthermore, under the MLI 40-layer condition, the BOR of Case 3 (5.23%/day) showed more than a threefold reduction compared to that of Case 4 (15.77%/day).

Key words : BOR(증발률), Heat transfer(열전달), Liquid hydrogen(액체수소), MLI (다층 단열재), Thermal insulation performance(단열 성능)

## 1. 서 론

탄소중립을 위한 수소 에너지 기술은 에너지 저장, 장거리 운송, 산업 공정의 탈 산소화, 탄소 배출 저감 기술 등 다양한 기술 형태로 화석연료 에너지를 대체하기 위해 주목받고 있다. 특히, 액체수소(Liquid hydrogen, $LH_2$)는 기체수소 대비 부피를 약 1/800로 감소시켜 대용량 저장에 따른 에너지 밀도 증가로 장거리 운송에 유리한 고밀도 에너지 저장 특성을 갖는 에너지원으로 보고된 바 있다[1]. 이러한

장점은 수소 모빌리티, 항공 우주, 철도 등 다양한 산업 분야에서 액체수소의 활용 가능성을 확장시키고 있다. 하지만, 액체수소는 –253°C의 초극저온 상태에서 저장되어야 하기 때문에 장기 보관 시 발생하는 열 손실과 증발가스를 최소화할 수 있는 고성능 단열 기술 확보가 반드시 필요하다[2-4].

극저온 저장 용기의 대표적인 단열 방식은 진공 단열 및 다층 단열재(Multi-layer insulation, MLI)를 동시 적용하여 전도와 대류, 복사열을 최소화시키는 방법으로 연구·적용되고 있다[4]. 다층 단열재는 내조와 외조 사이의 진공층에 반사층과 스페이서층을 교차적으로 배치하여 복사열 전달을 효과적으로 억제하는 대표적인 기술이다. 특히, 다층 MLI에 스프레이폼을 적용한 복합 단열재는 단일 MLI 대비 20% 이상의 열유속 감소 효과와 MLI의 층수(Layer) 증가 및 진공 수준의 질적인 향상이 열전달 억제에 긍정적인 영향을 미친다는 결과가 보고된 바 있다[5]. 또한, MLI의 각 구간 별 층 밀도(Layer density)를 다르게 적용하고 증기 냉각 차폐막(Vapor-cooled shield, VCS)을 동시 사용할 경우 최대 열유입을 약 9% 저감 가능한 연구 결과가 보고되었다[6].

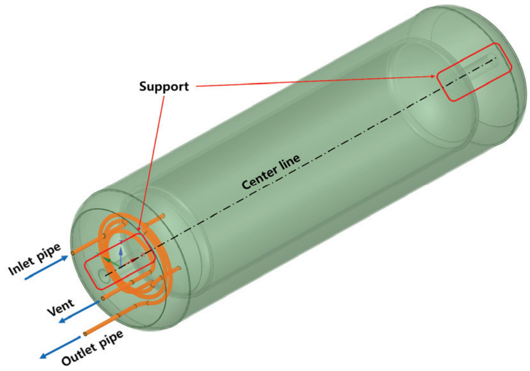
이와 같이, MLI 관련 선행된 연구에서 Layer 구조, 소재, 복합 설계 등 실제 실험 연구를 통한 분석 결과들을 제시하지만 변수 최적화, 최적 설계, 성능 비교 등 다양한 연구 조건을 고려하기 위한 반복적 실험 연구 수행에 있어 시간적, 비용적 어려움이 반드시 따른다. 이를 위해 실험적 제약에서 벗어나 다양한 테스트 케이스별 비교·분석, 최적 설계 및 성능 예측을 위한 수치해석적 연구가 활발하게 수행되고 있다[5-8]. 이렇듯, 액체수소 에너지 사용과 이를 극대화 하기 위한 액체수소 저장 기술은 미래 동력 에너지원으로 반드시 필요한 핵심 기술임을 확인할 수 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 수소연료전지 기술이 접목된 150L급 자동차용 액체수소 저장 용기[9]의 다층 단열재를 적용한 저장 용기 단열 성능을 비교·분석하기 위해 수치해석적 연구를 수행하였다.

따라서, 본 연구에서는 다층 단열재를 적용한 액체수소 저장 용기의 단열 성능 분석을 위해 기존 우주·항공용 액체수소 극저온 단열 기술 개발을 목적으로 수행된 선행 연구 결과[4]를 기반으로 150L급 액체수소 저장 용기에서 나타나는 액체수소 용기의 온도 분포, 경판부 및 원통부의 온도 변화 분석, 열전달률 및 증발률 등의 수치해석적 결과를 각각 정리하여 비교 분석하였다. 이러한 결과들을 바탕으로 다층 단열재의 두께 및 층수 변화에 따라 나타나는 액체수소 저장 용기의 단열 특성을 분석하여, 향후 자동차용 액체수소 저장 용기 설계 및 최적화에 필요한 기초 데이터를 제공하고자 한다.

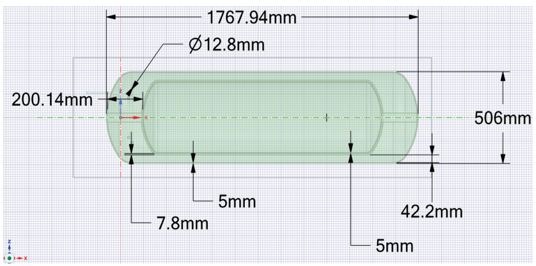
## 2. 수치해석적 연구 방법

### 2.1 수치해석 대상 및 설계 조건

본 연구는 선행 연구[9]를 참고하여 상용차에 적용된 고압수소 용기의 크기를 고려한 자동차용 액체수소 용기 크기를 선정하고, MLI 변화에 따른 단열 성




(a) 3D Modeling of liquid hydrogen storage vessel




(b) Dimension of liquid hydrogen storage vessel

**Fig. 1.** Geometry of the liquid hydrogen storage vessel

능 분석 연구를 수치해석적 기법을 활용하여 수행하였다. 150 L급 저장 용기는 Fig. 1과 같이 외조 저장 용기 내 액체수소를 저장하는 내조 저장 용기, 단열재 MLI, 내·외조 저장 용기를 지지하는 용기 중앙부의 GFRP 소재 기반 서포트(Support), 액체수소 충전 및 배출을 위한 용기 좌측의 입·출구 파이프와 증발된 액체수소 가스를 배출하기 위해 벤트(Vent) 파이프를 각각 고려하여 설계하였다. MLI 두께 및 층수 조건에 따라 적용된 열전도도는 선행 연구 결과[4]를 참고하였으며, 본 해석 연구에 적용된 상세한 해석 조건은 Table. 1, 2와 같다.

또한, 열전달 성능 분석을 위해 단열 성능에 주요한 영향을 미치는 경판부(Head)의 입·출구 및 벤트 파이프 형상을 고려하여 Fig. 2와 같이 Poly-hedra mesh를 적용하였다. 수치해석 결과의 신뢰성 검증 및 MLI 적용에 따른 열전달 성능 비교는 진공 단열재만으로 적용된 해석 Case를 바탕으로 선행 연구 결과와 비교 분석하였다. 해석 결과, 선행 연구 및 본 해석 연구의 검증 Case에서 나타나는 열유속 결과가 각각 88.6 W/m$^2$, 83.97 W/m$^2$으로 오차율 5.2%를 보이며 수치해석 결과의 신뢰성을 확인하였다.

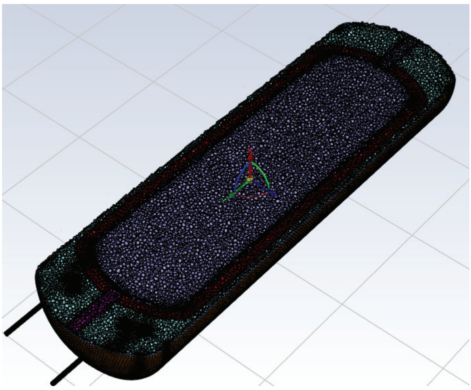


Fig. 2. Mesh of the liquid hydrogen storage vessel

Table 1. Analysis conditions

| Content | Conditions |
|---|---|
| Viscous model | Laminar |
| Working fluid | Liquid Hydrogen |
| Initial Temperature (Fluid) | 20K |
| Heat transfer coefficient | 5 W/m$^2$K |
| Vessel | STS 316 |
| Pipe | STS 316 |
| Support | GFRP |

Table 2. Simulation cases

| Case | $k_{eff}$ | x | n | z |
|---|---|---|---|---|
| | mW/mK | mm | - | lyrs/mm |
| Case 1 | 0.074 | 39 | 20 | 0.5 |
| Case 2 | 0.025 | 8 | 20 | 2.5 |
| Case 3 | 0.073 | 43 | 40 | 0.9 |
| Case 4 | 0.095 | 8 | 40 | 5.1 |

## 2.2 지배방정식

본 연구에서는 자연대류의 영향을 확인하기 위해 액체수소의 밀도 변화와 저장 용기의 열전도도는 선행 연구[10,11]를 참고하여 온도 변화에 따른 물성 인자 값으로 해석 조건으로 적용하였다. 또한, 저장 용기 내부의 유동 특성 및 외부 온도 분석을 위해 외조 외곽 부분을 외부에 노출된 상태로 선행 연구[12] 및 참고 문헌[13]을 참고하여 자연대류 열전달 계수를 본 해석 연구에 적용하였으며, 내부 강제대류 없이 열전달에 의한 자연대류 현상을 모사하기 위해 점성 모델을 층류 모델로 선정하였다.

액체수소 저장 용기의 열유동 특성 분석을 위해 층류(Laminar) 모델을 적용하였다. 층류 모델은 연속 방정식, 운동 방정식과 에너지 방정식으로 계산이 되며, 식 (1)~(4)와 같다. 이때, $\rho$는 밀도, $p$는 정압, $\overline{\overline{\tau}}$는 응력 텐서, $k_{eff}$는 유효 열전도도를 나타낸다[14].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v})+\nabla \cdot (\rho \vec{v}\vec{v}) = -\nabla p+\nabla \cdot (\overline{\overline{\tau}})+\rho \vec{g}+\vec{F} \quad (2)$$

$$\overline{\overline{\tau}} = \mu[(\nabla \vec{v}+\nabla \vec{v}^T)-\frac{2}{3}\nabla \cdot \vec{v} I] \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\left(e+\frac{v^2}{2}\right)\right)+\nabla\left(\rho v\left(h+\frac{v^2}{2}\right)\right) = \nabla\left(k_{eff}\nabla T-\sum_j h_j \vec{J}_j+\bar{\bar{\tau}}\cdot\vec{v}\right)+S_h \tag{4}$$

또한, 액체수소 저장 용기의 충전 과정 중 발생하는 열손실을 방지하기 위해 수소가 충전되는 공간 외부는 단열 목적의 진공 공간으로 형성하였다. 진공 공간에서 열전달은 복사를 통해 이루어지는 특성이 있어, 이를 고려하기 위한 진공의 유효 열전도도($k_{eff}$; Effective thermal conductivity)를 적용하였다.

## 3. 수치해석적 결과

### 3.1 액체수소 저장 용기 온도 분포

액체수소 용기 온도 분포는 MLI의 층수 및 두께 변화가 액체수소 저장 용기의 단열 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 4가지 Case에 대한 온도 분포 결과를 비교 분석하였다. Fig. 3은 액체수소 저장 용기 전체에 대한 정상상태(Steady state) 온도 분포도를 나타낸 결과이다. 모든 해석 결과에서 공통적으로 내조 용기는 액체수소의 비등점인 20 K, 외조 용기의 경우 상온 조건인 약 300 K로 유지되며 MLI 조건 변화에 따라 계단식 온도 분포 특성을 보이는 것으로 나타났다. MLI 층수 변화에 따른 온도 분포의 분석 결과, MLI 40 층수 적용 조건(Case 3, 4)은 MLI 20 층수 적용 조건(Case 1, 2)과 비교하여 전반적인 영역에서 MLI로 인한 온도 구배(Thermal gradient) 층이 상대적으로 넓게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 이는 MLI 층수가 증가함에 따라 복사열을 차단하는 단열 경계면이 증가하여 복사열 유입이 감소하기 때문에 단계적으로 온도가 감소하는 경향성이 상대적으로 넓게 나타난 것으로 사료된다[5]. 특히, MLI 두께에 따른 온도 분포 결과에서 동일한 층수 조건일 때 MLI 두께가 증가할수록 내조 용기와 외조 용기 사이의 단열층으로 인한 뚜렷한 온도 구배 결과를 확인 가능하다. MLI 40 층수의 경우, MLI 두께가 8 mm에서 43 mm로 증가하였을 때, 외조 용기 내

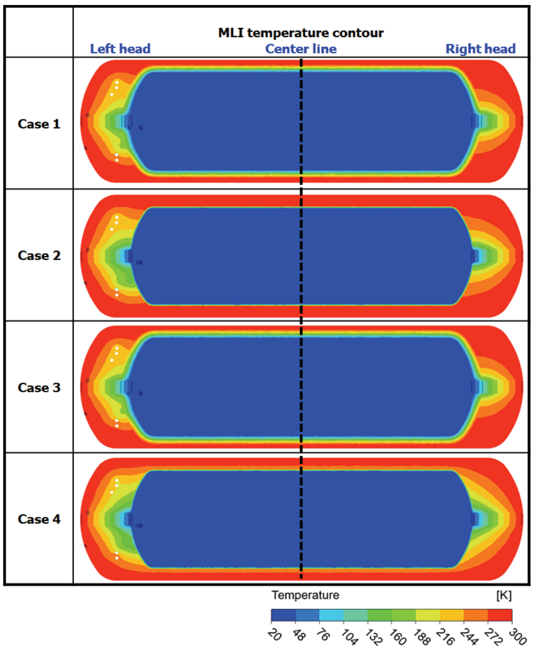



Fig. 3. Results of temperature distributions in the liquid hydrogen storage vessel for cases 1-4

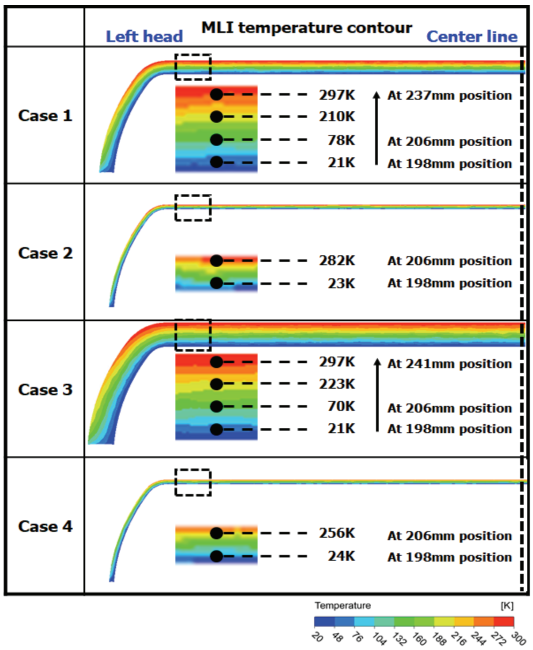



Fig. 4. Results of MLI temperature distributions in the liquid hydrogen storage vessel for cases 1-4

온단부에서 발생하는 열전달이 MLI를 통해 점진적으로 감소하여 나타난 현상으로 판단된다.

또한, 좌측 경판부에서 내조 용기와 외조 용기에 구조적으로 설계된 파이프 및 서포트의 열전도로 인해 열교(Thermal bridge) 현상이 발생하고, MLI를 통한 단열 효과를 분산시키는 온도 분포 결과를 보였다. 이를 통해 액체수소 저장 용기의 단열 성능 저감으로 증발률(BOR) 수치 변화에 영향을 끼칠 수 있을 것으로 사료된다. 따라서, 향후 후속 연구를 통해 액체수소 저장 용기의 파이프 및 서포트가 BOR 결과에 미치는 영향을 분석하고, 이를 바탕으로 단열 성능 최적화 연구가 반드시 필요한 것으로 판단된다[5,6,15].

Fig. 4는 액체수소 저장 용기의 MLI 온도 분포를 나타낸 결과이다. MLI는 복사층과 낮은 열전도도 스페이서 층이 다수의 단열층으로 구성되어 복사열에 대한 높은 열저항 및 복사 차폐층(Radiation shield) 역할을 수행한다[4,5]. 이에 따라, 모든 해석 결과에서 MLI 두께 및 층수가 증가함에 따라 동일 지점의 온도 차이가 감소하고, 급격한 온도 변화 결과가 아닌 전체적인 온도 구배가 완만하게 형성되는 경향을 수치적으로 확인 가능하다. 이는 MLI를 통해 외조 용기로부터 열의 이동이 층별로 감소되고, 열전달 메커니즘에 의해 MLI 내부 위치의 각 지점 별 온도 감소율 및 유효 열전도도가 감소하기 때문에 나타난 결과로 사료된다[5,6]. 이러한 결과로 인해 MLI 동일 층수 조건일 때 MLI 두께가 가장 두꺼운 Case 1과 Case 3의 온도 분포 결과에서 뚜렷한 계단식 온도 강하 특성을 보이는 것으로 판단되며, 동일한 MLI 층수 조건에서 상대적으로 두꺼운 MLI가 액체수소 저장 용기의 높은 단열 성능 효과를 야기할 수 있을 것으로 사료된다.

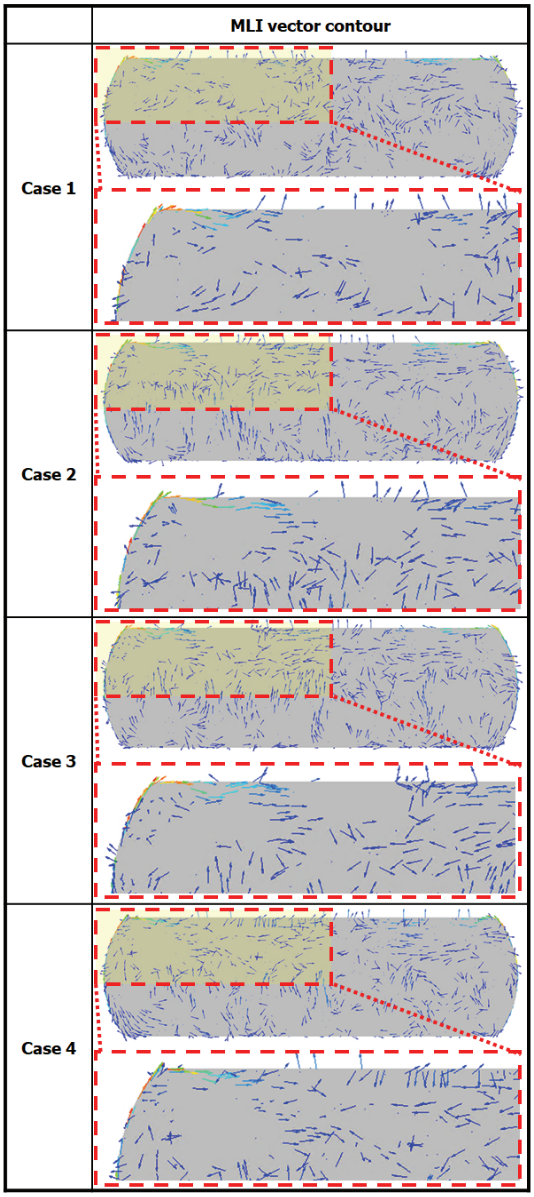



**Fig. 5.** Results of velocity vector contours in the liquid hydrogen storage vessel for cases 1-4

### 3.2 내조 용기 내 액체수소 유동 특성

Fig. 5는 액체수소 저장 용기의 내조 용기 내부 속도 벡터를 나타낸 결과이다. 해석 결과, 액체수소 내부 유동은 MLI 조건 변화에 따라 발생하는 특정 대류 현상이 없이 열교환이 일어나는 벽면에서 상대적으로 빠른 유속 변화를 보였으나, 모든 Case에서 나타나는 전반적인 유동 특성은 비슷한 유동 분포를 보이는 매우 약한 자연대류로 확인되었다. 본 연구에서는 층류 해석 중점으로 수치해석 연구가 수행되었기 때문에 모든 해석 Case에서 용기 내부 액체수소의 대류 유동 현상이 강하지 않고, 뚜렷한 일정 패

턴을 갖는 유동 특성이 아닌 전반적으로 매우 약한 자연대류 경향을 보이는 것으로 사료된다. 열전달의 관점에서 자연대류는 밀도 구배에 의해 발생하는 부력(Buoyancy force)이 유체 점성에 의한 마찰력(Vicous force)보다 클 때 형성된다[13]. 액체수소가 저장된 내조 용기 벽면에서 레이놀즈 수(Reynolz number, Re) 1 미만, 그라스호프 수(Grashof number, Gr) 약 852~944 범위 결과를 보였기 때문에 대류 유동이 매우 미미한 것으로 사료된다. 또한, MLI와 진공 단열 시스템이 외부로부터 열유입을 억제하기 때문에 용기 내부 액체수소의 온도 변화가 매우 작아 밀도 불균형(Density stratification) 최소화로 강제대류 현상이 발생하지 않고[16,17], 이와 같은 결과들을 통해 용기 내 액체수소의 열전달은 대류보다 정지 상태의 유체에서 전도 형태의 열전달이 지배적인 것으로 판단된다[16].

## 3.3 경판부 및 원통부 온도 변화 결과

Fig. 6과 Fig. 7은 액체수소 저장 용기의 벤트, 입·출구 파이프가 설계된 좌측 경판부에서 동일한 위치의 우측 경판부의 외조 및 내조 용기 사이의 거리별 온도 결과를 정리한 그래프이다. 경판부에서 나타나는 온도 결과는 MLI 조건에 따라 발생하는 온도 강하 차이를 확인 가능하다. 특히, Fig. 3의 MLI 내부 온도 분포 결과와 마찬가지로 MLI 두께가 증가할수록 계단식 온도 강하 특성이 발생하는 MLI 영역에서동일 층수 조건일 때 MLI 두께가 얇은 Case 2와 Case 4보다 Case 1과 Case 3의 온도 감소가 완만하게 나타나는 것으로 확인되었다. 이는 제한된 공간에서 MLI 두께가 증가할수록 MLI 밀도는 반대로 감소하기 때문에 MLI 층간 접촉으로 발생하는 고체 전도가 감소하여 층간 복사열 저감 효과의 영향으로 전체 유효 열전도도가 감소하여 나타난 결과로 사료된다[4-6]. 하지만, MLI 8 mm 두께 조건일 때 MLI 영역이 시작되는 온도 감소 지점까지 40 층수 Case 4의 온도 변화가 급격하게 나타나는 것으로 확인되었다. 이는 해석 초기 조건으로 적용된 유효 열전도도 모사 수치가 가장 높았기 때문에 진공 영역이 넓은 경판부에서 온도

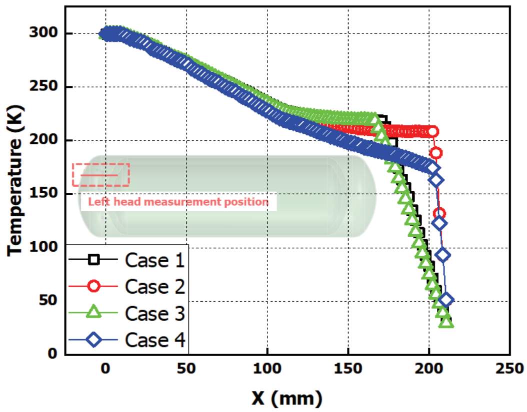



Fig. 6. The results of left-head temperature distribution at various distances in the MLI for cases 1-4

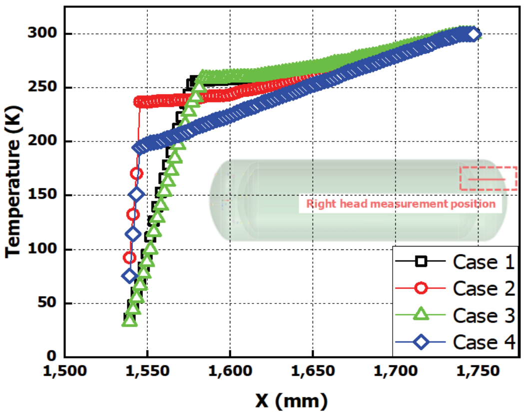



Fig. 7. The results of right-head temperature distribution at various distances in the MLI for cases 1-4

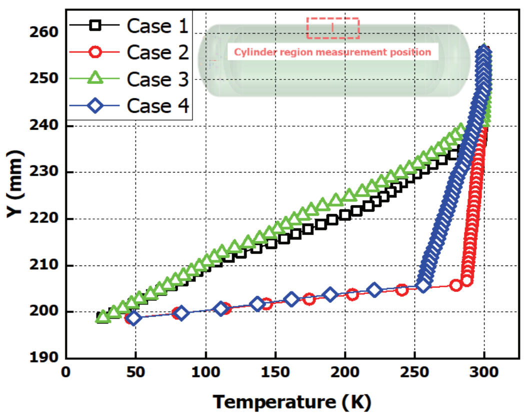



Fig. 8. The temperature of cylinder region according to distance in the MLI for cases 1-4

수렴에 따라 발생된 수치해석적 결과로 사료된다.

Fig. 8은 액체수소 저장 용기의 내조 용기 중심부에서 외조 용기까지 원통부(Cylinder) 중심선 상의 수직 거리 변화에 따른 온도 결과이다. Fig. 8을 통해 진공 영역이 상대적으로 좁은 원통부에서 MLI 조건 변화에 따른 온도 구배 특성을 자세히 확인 가능하다. Fig. 3, 4에서 언급한 MLI 두께 증가에 따라 넓게 분포하는 온도 구배 층이 MLI를 통해 계단식 온도 변화를 보이며, 완만한 온도 강하 특성을 갖는 것으로 나타났다. 이는 MLI 단열 효과로 인해 외조 용기 벽면의 온단부에서 지배적인 복사 열전달이 MLI를 구성하는 중간부와 내조 용기 벽면 영역의 냉단부에서 잔류 기체 및 고체 전도의 지배적인 작용으로 복사 열유속을 감소시키기 때문에 완만한 온도 변화 특성을 보이는 것으로 사료된다[4,6]. 하지만, MLI 층수 변화에 따른 온도 변화 경향성은 MLI 두께 변화 효과보다 미비한 결과를 보였기 때문에 향후 상세한 분석을 위해 MLI 적층 밀도 변화를 다양화하여 유효 열전도도 및 온도 강하 특성의 정량적 분석 및 설계 최적화를 위한 후속 연구 수행이 필요한 것으로 판단된다.

### 3.4 증발률 및 열전달률 결과 분석

Fig. 9는 MLI 20 층수 적용 조건(Case 1, 2) 및 MLI 40 층수 적용 조건(Case 3, 4)에서 나타나는 액체수소 저장 용기의 증발률 및 열전달률을 정리한 결과이다. 이를 통해 MLI 적용에 따른 액체수소 저장 용기의 단열 성능을 비교 분석하였다. 해석 결과, MLI 두께 8 mm 및 40 층수 조건인 Case 4의 BOR (15.77%/day) 결과 대비 동일한 층수 조건일 때 MLI 두께 43 mm 조건인 Case 3 BOR (5.23%/day) 결과가 3배 이상 감소한 것으로 나타났다. 앞서 언급한 바와 같이, MLI 두께가 증가할수록 열유속이 감소하고 이에 따라 열전달률 또한 감소하기 때문에 단열층 두께 증가 효과로 가장 낮은 BOR 결과를 보인 것으로 사료된다. MLI 20 층수 조건에서는 MLI 두께 39 mm 조건인 Case 1 (5.35%/day)이 MLI 두께 8 mm 조건인 Case 2 (7.63%/day)보다 BOR 수치가 약 30% 감소된 결과를 보였다. 하지만, MLI 동일 두께 8 mm

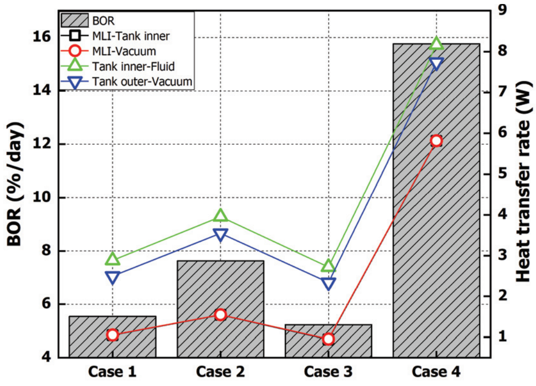



**Fig. 9.** Comparison of the BOR and heat transfer results in the liquid hydrogen storage vessel for cases 1-4

조건에서 20 층수 Case 2 BOR (7.63%/day) 결과가 40 층수 Case 4 BOR (15.77%/day)보다 낮은 BOR 수치 결과를 보였다. 이는 경판부 및 원통부 온도 변화 결과에서 확인한 바와 같이, MLI 영역에서 나타나는 온도 변화는 유사하지만 MLI 두께가 얇고 높은 유효 열전도도에 의해 MLI와 외조 용기 사이의 진공 역에서 상대적으로 온도 변화량이 많은 Case 4에서 BOR 결과가 높게 나타난 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 MLI 적용에 따른 액체수소 저장 용기의 단열 성능 분석을 위해 MLI 층수 및 두께 변화에 따른 액체수소 저장 용기의 온도 분포, 경판부 및 원통부의 온도 변화, 증발률 및 열전달률 결과를 수치해석적으로 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. MLI 두께가 증가할수록 온단부에서 발생하는 열전달이 점진적으로 감소하여 뚜렷한 온도 분포 변화 및 온도 구배 층이 상대적으로 넓게 나타났다.
2. MLI 두께 및 층수가 증가함에 따라 MLI 내부의 동일 지점에서 온도 감소율 및 유효 열전도도가 감소하여 용기 내부 위치 변화에 따른 온도 변화 폭이 작은 완만한 온도 구배 특성을 보였다.

3. 액체수소 저장 용기 내 대류 유동은 속도 벡터 분포 결과를 통해 유동이 강하지 않고 특정한 패턴이 없는 미미한 자연대류 경향을 보이는 것으로 나타났다.
4. 경판부 및 원통부의 위치 별 온도 변화 결과, 한정된 공간 내 두꺼운 MLI의 적용으로 MLI 밀도가 작은 Case 1과 Case 3에서 뚜렷한 계단식 온도 변화 및 온도 강하 특성을 확인할 수 있었다.
5. MLI 20 층수 조건에서 Case 1 BOR (5.35%/day) 결과가 Case 2 BOR (7.63%/day) 대비 약 30% 감소하였으며, MLI 40 층수 조건에서는 Case 4 BOR (15.77%/day) 대비 Case 3 BOR (5.23%/day) 결과가 3배 이상 감소한 것으로 나타났다.

## References


1. International Energy Agency, "The Future of Hydrogen", Report prepared by the IEA for the G20, Japan, 2019.
2. R. Hatakenaka, T. Miyakita, H. Sugita, M. Saitoh, and T. Hirai, "Development and testing of a zero stitch MLI blanket using plastic pins for space use", Cryogenics, Vol. 64, 2014, pp. 121-134, doi: https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2014.02.018.
3. J. E. Fesmire, "Standardization in cryogenic insulation systems testing and performance data", Physics Procedia, Vol. 67, 2015, pp. 1089-1097, doi: https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.06.205.
4. J. E. Fesmire and W. L. Johnson, "Cylindrical cryogenic calorimeter testing of six types of multilayer insulation systems", Cryogenics, Vol. 89, 2018, pp. 58-75, doi: https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2017.11.004.
5. Y. Ding, D. Shao, S. Jin, M. Yu, Y. Wang, and L. Jiang, "Numerical Study on Composite Multilayer Insulation Material for Liquid Hydrogen Storage", Coatings, Vol. 14, No. 11, 2024, pp. 1417, doi: https://doi.org/10.3390/coatings14111417.
6. Z. Cai, Z. Qu, Z. Ma, H. Liu, W. Liang, and L. Cai, "Co-optimization of variable-density multi-layer insulation and vapor-cooled shield for liquid hydrogen storage tank", Applied Thermal Engineering, Vol. 279, 2025, pp. 127995, doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127995.
7. M. Kanda, K. Matsumoto, and S. Yamaguchi, "Heat transfer through multi-layer insulation (MLI)", Physica C: Superconductivity and its Applications, Vol. 583, 2021, pp. 1353799, doi: https://doi.org/10.1016/j.physc.2020.1353799.
8. D. Camplese, G.E. Scarponi, C. Chianese, A. Hajhariri, R. Eberwein, F. Otremba, and V. Cozzani, "Modeling the performance of multilayer insulation in cryogenic tanks undergoing external fire scenarios", Process Safety and Environmental Protection, Vol. 186, 2024, pp. 1169-1182, doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.04.061.
9. H. K. Shin and S. K. Ha, "A review on the cost analysis of hydrogen gas storage tanks for fuel cell vehicles", Energies, Vol. 16, No. 13, 2023, pp. 5233, doi: https://doi.org/10.3390/en16135233.
10. KAERI, Liquid Hydrogen Properties, KAERI/TR-2723/2004, Korea Atomic Energy Research Institute, 2004.
11. H. Tummescheit, K. Tuszynski, and P. Arnold, "Simulation of peak stresses and bowing phenomena during the cool down of a cryogenic transfer system", Proceedings of the 6th International Modelica Conference, Modelica Association, 2008, pp. 693-700, Retrieved from https://api.semanticscholar.org/CorpusID:56567050.
12. X. Ge, M. Given, and B.G. Stewart, "FEA simulation studies of accelerated aging of power cables in water tanks", 2020 Electrical Insulation Conference (EIC), IEEE, Virtual Event, 2020, pp. 465-468, doi: https://doi.org/10.1109/EIC47619.2020.9158746.
13. Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, "Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications", 6th Edition, McGraw-Hill Education, 2020.
14. Ansys Inc. "Ansys fluent theory guide", 2025.
15. H. S. Seo, Y. Lee, D. Kim, and C. Park, "Insulation Performance and BOR of Pressurized Large-capacity Liquid Hydrogen Storage Tank", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 6, 2023, pp. 650-656, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.650.
16. Y. Zhu, Y. Bu, W. Gao, F. Xie, W. Guo, and Y. Li, "Numerical study on thermodynamic coupling characteristics of fluid sloshing in a liquid hydrogen tank for heavy-duty trucks", Energies, Vol. 16, No. 4, 2023, pp. 1851, doi: https://doi.org/10.3390/en16041851.
17. Y. A. Cengel and J. M. Cimbala, "Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications", 4th Edition, McGraw-Hill Education, 2017.