

Simulation of level change in a 7 m³ hydrogen ZBO storage tank with a gas helium circulation cooling system

Youngjun Choi^a, Dongmin Kim^b, Jiho Park^b, Keuntae Lee^b, and Seokho Kim^{*,a}

^a Changwon National University, Korea

^b Korea Institute of Machinery & Materials, Korea

(Received 2 November 2024; revised or reviewed 24 December 2024; accepted 25 December 2024)

Abstract

In order to store liquid hydrogen that has recently drawn attention as an eco-friendly energy source, a vacuum-insulated tank is required. However, even if a vacuum-insulated structure is applied, evaporation occurs due to heat leak by room temperature and it increases the pressure of the tank. In general, the pressure is relieved through a vent for stable storage. This method has problems of economic loss and explosion of flammable hydrogen. Therefore, zero boil-off operation is required to re-liquefy the evaporated gas. Zero boil-off (ZBO) operation in large-capacity storage tank is possible using a gas helium circulation cooling system and a condensation pipe. In this paper, the condensation pipe of a 7m³ ZBO liquid hydrogen storage tank combined with a gas helium circulation cooling system was designed and the simulation of the level change of the storage tank according to the operation condition of the gas helium circulation cooling system was performed using the cryogenic thermal fluid program, Thermal Desktop.

Keywords: condenser, gas helium circulation cooling system, liquid hydrogen, thermal desktop, zero boil off

1. 서론

최근 수소는 세계적으로 친환경 에너지원으로써 각광 받고 있다. 산업 전반에 수소 활용을 견인하기 위해서는 많은 양의 필요 수소를 안정적으로 이송하고 저장하는 기술이 필요하다 [1-3]. 액체수소는 기체수소보다 높은 에너지밀도를 가지므로 대용량 운송 및 저장에 유리하다.

액체수소를 저장하는 탱크는 상온으로부터 들어오는 열침입을 최소화하기 위해 진공 단열 구조를 적용한다. 진공 단열 구조에도 불구하고 상온으로부터 복사열전달, 지지대와 배관으로부터 전도열전달로 인해 저장된 액체수소는 시간이 지남에 따라 증발하고 탱크의 압력은 높아진다.

탱크는 액체수소의 안정적인 저장을 위해 과도하게 높아진 압력을 해소 해야한다. 일반적으로 벤트를 통해 탱크의 적절한 압력을 유지한다. 그러나 벤트는 탱크 내부에 저장된 수소를 대기로 배출하기 때문에 경제적으로 손실이며 가연성 수소가스로 인한 위험성이 있다. 벤트를 하지않고 액체수소를 안정적으로 저장하기 위해서는 증발하는 수소가스를 재액화하는 Zero boil-off (ZBO) 기술이 필요하다 [4].

ZBO 운전을 위해서는 별도의 냉각이 필요하다. 작은 용량의 저장탱크는 상온으로부터 들어오는 열침입이 작으므로 내부 탱크 상단에 극저온 냉동기를 설치하는 것으로 ZBO 운전이 가능하다. 그러나 탱크의 용량이 커지면 외부 열침입이 증가하므로 극저온 냉동기 하나로 간단히 구성하기 어려울 뿐만 아니라 충분한 열전달 면적을 확보하기 어렵다. 대용량 저장탱크의 ZBO 운전을 위해서는 Fig. 1과 같이 충분한 냉각용량 확보가 가능한 기체 헬륨 순환 냉각시스템과 탱크 내부 응축배관이 필요하다.

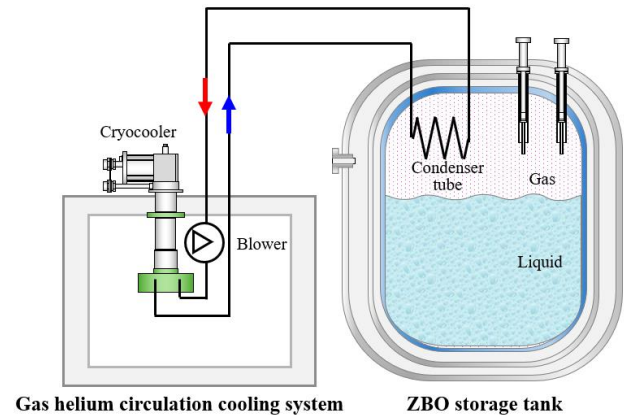


Fig. 1. Schematic of ZBO storage tank with gas helium circulation cooling system.

기체헬륨 순환 냉각 시스템은 크게 헬륨을 순환하기 위한 블로워, 냉각대상을 냉각하고 뜨거운 헬륨을 냉각하는 극저온 냉동기로 구성된다. 냉동기를 다단으로 장착할 수 있기 때문에 냉각용량 증가가 용이하고 블로워 조절을 통해 유동적인 냉각성능 변화가 가능하다. 또한, 기체 헬륨 냉각시스템과 연결된 탱크 내 응축배관은 병렬 구성을 통해 ZBO 운전에 필요한 열전달면적을 확보하기 용이하다.

본 논문은 기체 헬륨 냉각시스템의 성능을 고려하여 7m³ 액체수소 저장탱크의 ZBO 운전을 위한 탱크 내 응축배관을 설계하고 유동해석과 공정해석을 통해 검증하였다. 또한, 상용 극저온 열-유체 해석 프로그램인 THERMAL DESKTOP을 통해 기체 헬륨 순환 냉각시스템 운전에 따라 저장탱크의 수위변화를 해석하였다 [5].

* Corresponding author: seokho@changwon.ac.kr

2. 7m³ ZBO 액체수소 저장탱크의 응축배관 설계

2.1. 기체 헬륨 순환 냉각시스템이 적용된 ZBO 저장탱크

Fig.2는 7m³ 액체수소 저장탱크의 개략도이다. 높이가 높은 수직형 저장탱크는 정수압을 이용하여 내부탱크 하단의 라인으로 액체수소를 공급하기에 유리하며 제한된 면적 내에 설치 가능한 장점이 있으나, 운송의 용이성과 유지보수의 작업성을 위해 수평형 저장탱크로 설계되었다.

기체헬륨 순환 냉각시스템과 응축배관을 연결하기 위해 열손실과 누설이 최소화되는 베이오넷 구조의 연결구조를 적용하였다. 응축배관은 충분한 열전달 면적을 확보하기 위한 병렬 구조로 25mm 매니폴드와 1/4 inch 응축튜브로 구성된다. 저장탱크로 액체수소를 충전하는 상단부 배관과 액체수소를 응용기기로 공급하는 하단부 배관은 열손실을 최소화하기 위해 이중 진공 배관을 사용하였다.

액체수소 저장탱크의 Boil Off Rate(BOR)는 1%/day로 가정하였으며 이를 식 (1)에 따라 액체수소의 잠열을 고려하여 열전달량으로 환산하면 26 W이다. ZBO 운전을 위해서는 기체 헬륨 순환 냉각시스템이 26 W를 냉각해야 한다.

$$Q_{boil-off} = h_{fg} \times \dot{m}_{boil-off} \quad (1)$$

여기서 $Q_{boil-off}$, h_{fg} , $\dot{m}_{boil-off}$ 는 필요 냉각량, 잠열, 증발량이다.

2.2. 응축배관의 열전달 및 압력강하 계산

응축배관의 열전달량을 계산하기 위해 배관 내부를 흐르는 기체헬륨의 열전달계수와 외벽에서 발생하는 수소의 응축열전달계수를 계산한다 [6]. 식 (2)을 통해 매끈한 관을 흐르는 난류 유동의 열전달계수를 계산할 수 있다. 식 (3)은 응축열전달계수를 계산하기 위한 수정 증발 잠열식이며 식 (4)은 수평관 외벽에서 발생하는 막응축에 대한 평균 열전달계수이다.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} = h_i \frac{D_i}{k_v} \quad (2)$$

$$h^*_{fg} = h_{fg} + 0.68 C_{p,l} (T_{sat} - T_s) \quad (3)$$

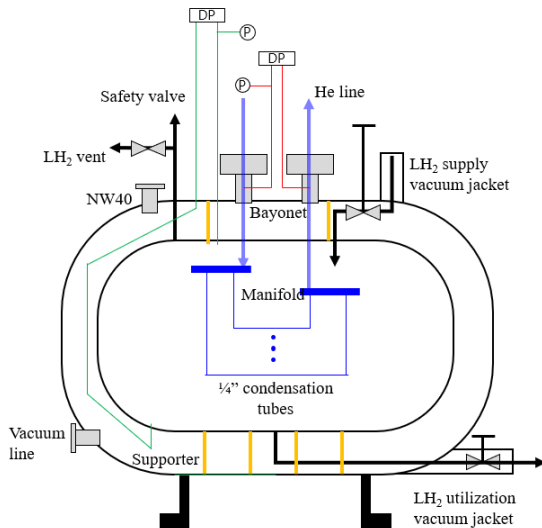


Fig. 2. Schematic of the 7 m³ ZBO hydrogen storage tank.

$$h_o = 0.729 \left[\frac{g p_l (p_l - p_v) h^*_{fg} k_l^3}{\mu_l (T_{sat} - T_s) D_o} \right] \quad (4)$$

여기에서 Nu, Re, Pr, h_i, D_i, k 는 각 누셀 수, 레이놀즈 수, 프란틀 수, 배관 내 열전달계수, 관 내경과 기체 헬륨의 열전달 계수이다. $h^*_{fg}, h_{fg}, C_{p,l}, T_{sat}, T_s$ 는 각 수정 증발 잠열, 증발잠열, 평균 막 온도에서 액체의 비열, 수소 포화 온도, 응축기 평균 온도이다. $h_o, g, p_l, p_v, k_l, \mu_l, D_o$ 는 각 배관 바깥면의 응축열전달계수, 중력가속도, 포화 액체수소 밀도, 포화 기체수소 밀도, 포화 액체수소 열전도도, 포화 액체수소 점성계수, 관 외경이다.

식 (5)는 식(2), (4)에서 계산된 열전달계수와 관의 전도열전달을 고려한 열관류율이다. 필요 응축배관 길이는 식(6)를 이용하여 계산한다.

$$\frac{1}{U A_s} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{h_o A_o} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2 \pi k L} \quad (5)$$

$$Q = U (\pi D_o L) \Delta T_{lm} \quad (6)$$

여기에서 U, A_s, A_i, A_o, k, L 은 각 열관류율, 관의 열전달 면적, 안쪽 면적, 바깥쪽 면적, 열전도도와 길이이다. ΔT_{lm} 는 관 입출구 온도차를 이용하여 계산한 대수 평균온도차이다.

계산된 필요 응축배관 길이에 따른 압력강하는 식 (7)의 매끈한 관의 난류유동에서 발생하는 마찰계수를 적용하여 식 (8)와 같이 계산한다 [7].

$$f = 0.3164 Re^{-0.25} \quad (4,000 < Re < 10^5) \quad (7)$$

$$\Delta P = f \frac{L \dot{m}^2}{D_h 2 \rho A^2} \quad (8)$$

여기에서 $f, \Delta P, \dot{m}^2, D_h, \rho$ 는 마찰계수, 압력강하, 헬륨 질량유량, 수력직경과 기체헬륨의 밀도이다.

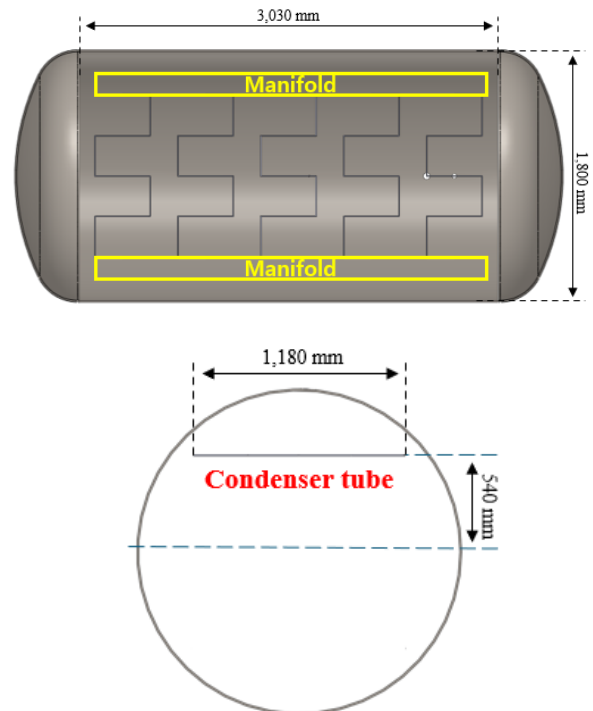


Fig. 3. Geometry of condenser tube.

TABLE 1
COOLING CAPACITY AND PRESSURE DROP ACCORDING TO CONDENSER CONFIGURATION.

Parameter	Length per tube (m)	Mass flow per tube (g/s)	Cooling capacity per tube (W) @ 1 bar, sat.	Pressure drop (Pa)
Optimal single tube	1.4	4.5	26	5,559
Long single tube	2.4	4.5	48	9,944
3 distribution tube	2.4	1.5	32	1,454
5 distribution tube	2.4	0.9	25	595

2.3. 저장탱크 내 응축배관 구성

대용량 저장탱크 내 설치될 기체부의 응축배관은 충분히 넓은 열전달 면적을 확보해야하나 긴 길이의 배관은 과도한 압력강하와 블로워의 열부하 증가를 야기한다. 응축배관의 열전달 및 압력강하 계산을 통해 stainless steel 재질의 1/4" 튜브와 25 mm 직경의 매니폴드를 고려하였다.

Table.1은 응축배관 구성 및 길이에 따른 열전달량 및 압력강하이다. 응축배관의 입구조건은 10 bar, 18 K이고 출구온도는 19 K이며 수소는 1 bar의 포화온도를 적용하였다. 26 W를 냉각하기 위한 최적 단일 유로 길이는 헬륨 유량 4.5 g/s에서 이론적으로 1.4 m 이나, 실제 환경에서는 충분한 열전달 면적을 확보할 수 없기 때문에 국부적인 온도변화가 발생하여 냉각이 지연될 수 있다. 단일 유로를 2.4 m 로 증가시켜도 여전히 열전달 면적이 부족할 뿐만 아니라 블로워의 압력상승 성능을 넘는 과도한 압력강하가 발생한다.

선행연구의 냉각시스템을 고려하여 AL630 냉동기의 20 K에서 냉각용량은 100 W이며, Noordenwind 블로워의 목표유량에서 압력 상승 성능은 최대 약 2400 Pa이다 [9].

충분한 열전달 면적 확보와 압력강하를 줄이기 위해 병렬 구성의 응축배관을 고려하였다. 응축배관을 병렬로 구성하게되면 열전달 면적을 충분히 확보할 수 있고 압력강하도 크게 줄일 수 있다. 본 ZBO 저장탱크는 Fig.3과 같이 5개 응축배관 병렬구성하여 탱크 전방에 걸쳐 열전달 면적을 확보하였다.

3. 해석을 통한 응축배관 검증

3.1. 응축배관 내 헬륨 분배 유동해석

ZBO 운전을 하게 되면 5개의 병렬 응축배관을 통해 차가운 기체헬륨이 분배되어 순환하여 수소를 응축한다. 그러나 적절하지 못한 매니폴드의 크기는 불균일한 유량 분배로 인해

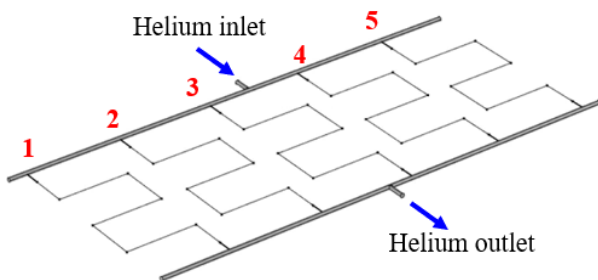


Fig. 4. Simulation model for helium distribution in condenser tube.

큰 압력강하와 불충분한 열전달 성능을 야기한다.

COMSOL의 Turbulence flow와 pipe flow 물리모델을 통해 유동해석을 수행하여 분배특성과 압력강하를 분석하였다. Fig.4는 헬륨 분배 유동해석 모델이며 경계조건으로 입구에 10 bar, 20 K, 4.5 g/s를 설정하였다.

표 2는 헬륨 분배 유동해석 결과이다. 배관시스템의 공정설계에 관한 기술지침에 따라 부식, 마모 및 진동 방지를 위해 제한되는 속도는 식(9)과 같이 제안된다 [8].

$$V_{limit} = \frac{25}{\sqrt{\rho_g}} \quad (9)$$

여기서 V_{limit} , ρ_g 는 제한속도, 기체의 밀도이다. 운전조건에서 헬륨의 밀도는 약 24 kg/m³ 이므로 제한속도는 약 5 m/s 이다

유동 속도는 응축배관에서 최대 3 m/s로 진동 문제를 일으키지 않는 속도이며 병렬배관과 매니폴드에서 균일하게 압력강하 발생한다. 기체헬륨은 0.9 g/s 씩 응축배관에 균일하게 분배되며 응축배관의 압력강하는 600 Pa, 매니폴드를 고려한 입출구 압력강하는 800 Pa로 충분히 작은 압력강하임을 확인하였다.

3.2. 기체 헬륨 순환 냉각시스템 공정해석

선행연구에서 수행했던 기체헬륨 순환 냉각시스템의 HYSYS 공정해석모델을 활용하여 분배 응축배관 적용에 따른 응축배관 입출구 온도와 압력강하를 분석하였다 [9]. Fig.5은 선행연구의 HYSYS 공정해석 모델이며 Cryomech AL630 극저온 냉동기,

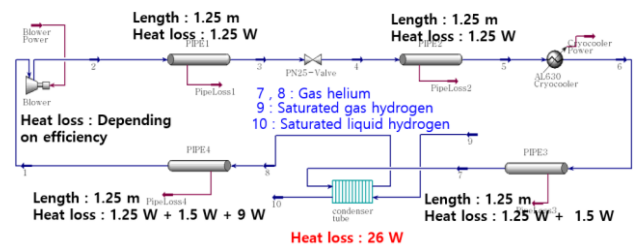


Fig. 5. Process simulation model of gas helium circulation system for 7 m³ ZBO storage tank.

TABLE 2
SIMULATION RESULT OF HELIUM DISTRIBUTION

Parameter	Value
Mass flow rate of each tube (g/s)	0.9
Pressure drop of each tube (Pa)	600
Total pressure drop (Pa)	800

RSC40T 용 열교환기, Cryozone Noordenwind 헬륨 블로워를 적용하였다. 냉동기의 냉각곡선에 따라 응축배관으로 들어가는 헬륨의 온도가 결정되고 26 W를 냉각하여 출구온도가 계산된다.

Fig.6은 병렬 응축배관을 고려한 공정해석 결과이다. 유량이 증가할수록 응축배관의 입출구 온도차는 줄어들고 압력강하가 증가한다. 증가한 압력강하를 보상하면서 유량을 순환시키기 위해서는 더 큰 동력이 요구되고 선행연구의 기체헬륨 블로워 효율에 따라 손실이 증가하여 응축배관 입구온도는 증가한다 [9]. 응축배관에서 발생하는 압력강하는 수계산을 통해 도출한 압력강하와 같은 것을 확인하였다.

4. 기체 헬륨 순환 냉각시스템 운전에 따른 수위 변화 해석

4.1. ZBO 저장탱크 수위 변화 해석 모델

Fig.7은 차가운 기체헬륨이 응축배관을 흐르며 기체수소와 응축열전달하는 ZBO 저장탱크의 Thermal desktop 해석모델 개략도이다. 각 하나의 덩어리로 대표되는 저장탱크 내 액체와 기체는 동일한 압력으로 가정하였고 계면을 통해 열전달하여 증발 및 응축된다. 5개의 병렬 응축배관을 모두 모델링하면 해석시간이 늘어나기 때문에, 하나의 응축배관을 모델링하고 경계조건 헬륨 유량의 1/5이 공급되고 수소와 열전달은 1:5 비율로 적용되도록 복제하였다. 식(1)~(4)에 따라 배관 내 열전달계수와 배관 바깥 열전달계수는 각각 $922 \text{ W/m}^2\text{K}$ 과 $2,391 \text{ W/m}^2\text{K}$ 이며 열관류율은 $409 \text{ W/m}^2\text{K}$ 으로 설정하였다.

응축배관의 보수적인 설계를 위해 기초설계에서 포화온도가 낮은 1 bar를 가정하였다. 해석모델에서는 실제 운전조건에 가까운 3 bar를 설정하였고 탱크로 들어오는 열침입은 26 W를 설정하였다. 기체헬륨은 10 bar, 18 K으로 설정하였으며 탱크의 수위와 기체헬륨 유량에 따른 해석을 수행하였다.

4.2. 냉각시스템 운전에 따른 수위 변화 결과

Fig.8, 9는 냉각시스템 운전에 따른 해석결과이다. 수위 20% 해석에서 ZBO 운전이 없을 경우, 5시간 동안 열침입에 의해 수위는 감소하고 압력 약 0.1 bar 증가와 기체, 액체 수소 온도 증가하였다. ZBO 운전을 위해 기체헬륨을 공급하면 탱크의 수위는 증가하고 압력은 감소하며 수소는 압력에 따라

포화온도로 저장된다. 응축배관의 출구온도는 유량이 증가함에 따라 출구온도는 감소하고 시간이 지남에 따라 저장된 수소의 온도 감소에 의해 열전달량이 감소하므로 온도가 낮아진다.

수위 80% 해석에서 ZBO 운전이 없을 경우, 5시간 동안 열침입에 의해 압력 약 0.05 bar 증가와 기체, 액체 수소 온도 증가하고 수위도 증가하였다. 일반적으로 열부하로 인해

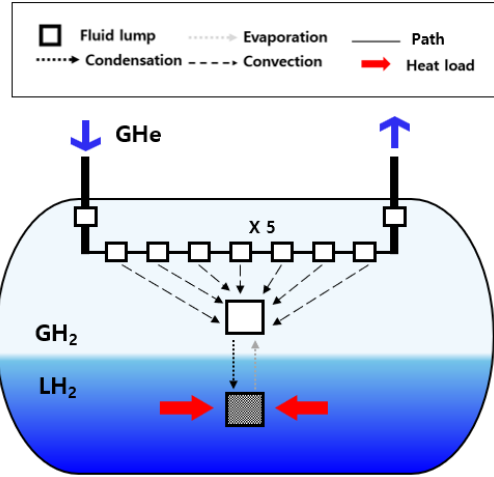


Fig. 7. Simulation model for level change by operating conditions of gas helium circulation system.

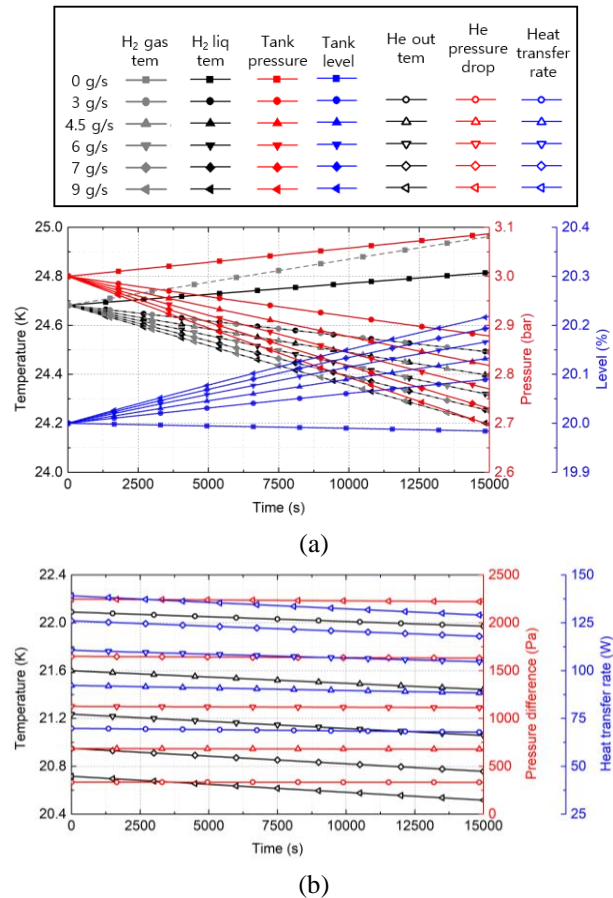


Fig. 8. ZBO operating result by gas helium circulation cooling system at 20% low level (a) tank, (b) helium line.

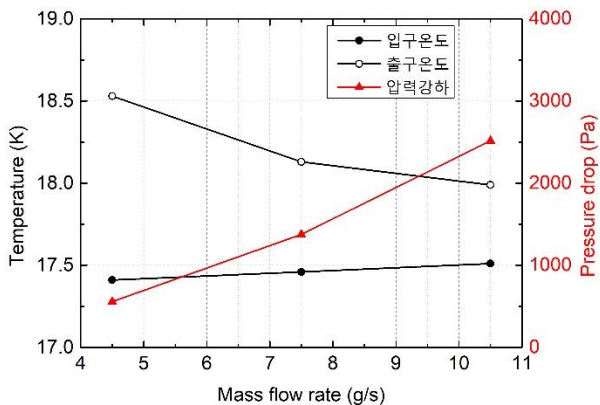


Fig. 6. Operating result of gas helium circulation cooling system.

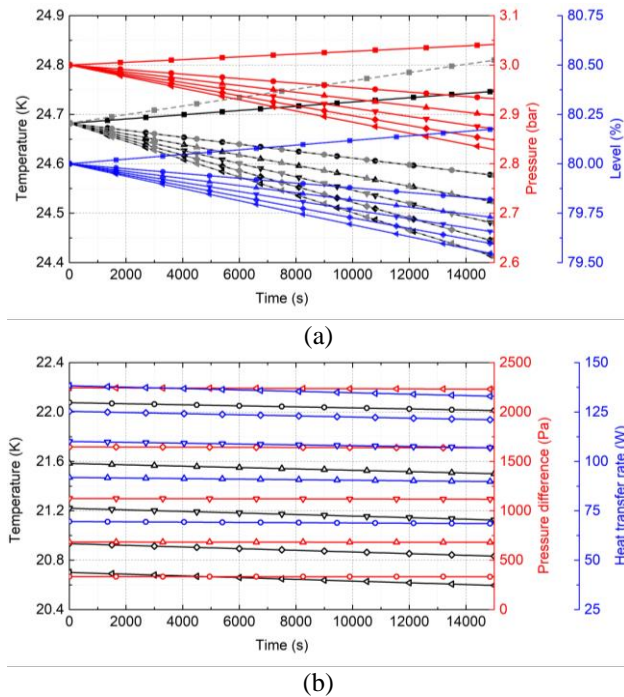


Fig. 9. ZBO operating result by gas helium circulation cooling system at 80% high level (a) tank, (b) helium line.

기체가 증발하여 수위가 감소하지만 수위가 높은 경우, 액체의 열팽창이 더욱 우수하여 수위가 증가할 수 있다. 이러한 특성은 P-v 곡선상에서 기체와 액체의 비체적 변화를 통해 분석할 수 있다. ZBO 운전을 위해 기체헬륨을 공급하면 탱크의 수위와 압력은 감소하며 수소는 압력에 따라 포화온도로 저장된다.

과도한 냉각은 탱크 압력을 감소시켜 음압을 만들 수 있다. 따라서 실제 운전에서는 탱크 압력을 기준으로 PID 제어를 사용하여 블로워 rpm을 조절해 약 2.5 g/s로 운전된다.

5. 결론

본 연구는 기체헬륨 순환 냉각시스템이 부착된 대용량 액체수소 저장탱크의 안정적인 ZBO 운전을 위해 응축배관을 설계하고, 이를 검증하기 위해 유동해석과 공정해석을

수행하였다.

액체수소 저장탱크의 열-유체 해석을 통해 ZBO 운전이 없을 경우 열침입으로 인해 저장탱크 압력과 온도가 증가하는 것을 확인하였다. 반면, 기체헬륨 순환 냉각시스템을 통한 ZBO 운전 시 탱크의 수위가 안정적으로 제어됨을 보여주었다. 해석 결과는 시스템 성능 향상과 함께 대규모 액체수소 저장탱크의 효율적 운영 가능성을 보여주며, 향후 친환경 에너지 저장 분야에 기여할 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Basic Research Program funded by the Korea Institute of Machinery and Materials (grant number : NK237B).

REFERENCES

- [1] Muhammad. Aziz, "Liquid hydrogen: A review on liquefaction, storage, transportation, and safety," *Energies*, vol. 14, no. 18, pp. 5917, 2021.
- [2] Hyungna Oh, Inkee Hong, and Ilyoung Oh, "South Korea's 2050 Carbon Neutrality Policy," *East Asian Policy*, vol. 13, no. 01, pp. 33-46, 2021.
- [3] David Berstad, et al., "Liquid hydrogen as prospective energy carrier: A brief review and discussion of underlying assumptions applied in value chain analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 154, pp. 111772, 2022.
- [4] D. W. Plachta, et al., "Passive ZBO storage of liquid hydrogen and liquid oxygen applied to space science mission concepts," *Cryogenics*, vol. 46, no. 2-3, pp. 89-97, 2006.
- [5] CRtech, Accessed: Dec. 23, 2024, [Online]. Available: <https://www.crtech.com/products/thermal-desktop>.
- [6] Yunus A. Cengel and J. Ghajar Afshin, "Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications," 6th ed., NY: McGraw-Hill Professional, New York, pp. 438-602, 2021.
- [7] Frank M. White, "Fluid Mechanics," 8th ed., NY: McGraw-Hill Professional, New York, 2015.
- [8] Korea Occupational Safety & Health Agency, "D-52-2013," 2013.
- [9] Jangdon Kim, et al., "Characteristic analysis and condenser design of gas helium circulation system for zero-boil-off storage tank," *Progress in Superconductivity and Cryogenics*, vol. 25, no. 4, pp. 65-69, 2023.