Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 5, 2025, pp. 510~519
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.5.510

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

# 다양한 용기 압력에 따른 극저온 냉동기를 활용한 액체 수소 생산 효율에 관한 이론적 분석

서원준 · 노현우 · 구태형 · 하동우 · 고락길 · 서영민†

한국전기연구원 전기모빌리티연구단 수소전기연구팀

# Theoretical Analysis on the Efficiency of Liquid Hydrogen Production Using a Cryogenic Refrigerator under Varying Vessel Pressure

WON JUN SEO, HYUN WOO NOH, TAE HYUNG KOO, DONG WOO HA, ROCK KIL KO, YOUNG MIN SEO†

Hydrogen Electric Research Team, Electric Mobility Research Division, Korea Electrotechnology Research Institute, 12 Jeongiui-gil, Seongsan-gu, Changwon 51543, Korea

†Corresponding author :
ymseo@keri.re.kr

Received 25 September, 2025
Revised 25 September, 2025
Accepted 10 October, 2025

**Abstract >>** In this study, a theoretical analysis was conducted on the efficiency of liquid hydrogen production by utilizing the characteristics of cryo-coolers and the thermodynamic properties of gaseous and liquid hydrogen. In particular, by considering the enthalpy difference under varying pressures at the same cooling capacity, the efficiency of liquid hydrogen production was evaluated under different geometric vessel configurations. The theoretical analysis revealed that as pressure increases, the latent heat of liquid hydrogen decreases, allowing more liquid hydrogen to be produced with the same cooling capacity. Compared to 1 bar, the production efficiency improved by approximately 22% at 10 bar, while the volumetric production yield increased by about 75%. It was also found that larger vessel diameters and heights led to reductions in charging rate and liquid hydrogen level. As the production time increased, the charging rate was grew linearly, with the production enhancement effect being more pronounced under higher pressure conditions.

**Key words :** Cryo-cooler(극저온 냉동기), Liquid hydrogen(액체 수소), Production efficiency(생산 효율), Filling level(충전량), Vessel pressure(용기 압력)

## 1. 서 론

수소는 청정에너지 사회로의 전환을 위한 핵심 에너지원으로 각광받고 있다. 특히 액체 수소는 부피 대비 높은 에너지 밀도를 바탕으로 높은 저장 효율성을 보이기 때문에 유망한 수소 저장 및 운송 방법으로 주목받고 있다[1,2]. 하지만, 액체 수소는 대기압 조건에서 끓는점이 20 K으로 매우 낮기 때문에 외부로부터의 미세한 열침입에도 쉽게 기화하여 boil-off gas (BOG)가 발생하는 단점이 존재한다[3-5]. BOG는

저장 탱크 내부의 압력을 급격히 상승시켜 저장 용기의 파열과 같은 심각한 안전 문제를 야기할 수 있다[6,7]. 따라서, 액체 수소 생산 및 저장 시스템의 안전하고 효율적인 설계 및 운용을 위해서는 BOG 발생량 예측은 필수적이며, 이에 앞서 다양한 용기의 형상 및 압력 조건에서 생산량, 충전량에 대한 예측이 선행적으로 고려되어야 한다.

최근 액체 수소 저장 용기 내부 열침입으로 인한 BOG 문제를 정량적으로 분석하기 위해 많은 연구가 이루어지고 있다[8,9]. 또한, 액체 수소 생산 시스템 효율 향상[10-12], 저장 및 이송 효율 향상[13-15], 장기 저장을 위한 zero-boil off (ZBO) 기술 검증[16,17] 등 다양한 방면에서의 접근이 이루어지고 있다. Tani 등[18]은 액체 수소 탱크에서 감압 실험을 수행하였다. 압력이 초기에는 급격히 떨어진 후 액체 계면에서의 증발로 인해 압력이 다시 상승하는 현상을 확인하였으며, 결과적으로 충전율과 초기 조건에 따라 압력 상승 속도가 달라짐을 검증하였다. Li 등[19]은 액체 수소 탱크 가압 과정에서의 열전달을 2차원 CFD 모델로 해석하여, 가압 기체의 주입 온도와 유량이 압력 상승 속도와 가스 소비 효율에 큰 영향을 미친다는 결과를 제시하였다. Seo 등[20]은 액체 수소 저장 용기에서 발생하는 BOG의 안전 압력 유지 및 제어를 위한 극저온 용기를 구축하고 전산 수치 해석 모델 개발 연구를 수행하였다. 결과적으로 액체 수소 저장 탱크 내부의 액체 수소 충전량이 고압 환경에 도달하는 시간에 큰 영향을 미친다는 사실을 확인하였다. Ha 등[21]은 자동제어 기반의 ZBO 기술이 적용된 소규모 수소 액화 시스템을 제작하였으며, 액체 수소 생산량이 냉동기 사이클 시간에 큰 영향을 받는다는 사실을 검증하였다.

액체 수소에 관한 연구는 주로 저장 탱크 내 열침입에 따른 BOG 거동, 압력 제어, 생산 효율 향상 및 장기 저장을 위한 ZBO 기술 개발에 중점을 두고 있다. 하지만, 액체 수소 생산 과정에서 용기의 형상과 압력 조건이 생산 효율에 미치는 영향을 분석한 연구는 미비한 실정이다. BOG 발생량은 저장 용기의 단위 체적당 표면적 및 액체 수소 충전량과 밀접하게 연관되어 있으며, 이는 액체 수소의 저장 안정성에 영향을 미친다. 또한, 액체 수소 액화기의 경우 상부를 제외한 벽면은 외조와 내조 사이의 진공 단열에 의해 외부로부터 유입되는 열침입이 매우 작다. 하지만, 상부로부터 유입되는 열침입에 대해서는 상대적으로 취약하다. 이러한 열침입은 용기 내부에서 BOG 발생을 야기할 수 있다. 따라서, 액체 수소 액화기 설계에 있어 직경 및 높이와 같은 기하학적 형상 조건과 운전 시간을 반영한 수위 예측이 중요하며, 특히 운용 압력에 따른 생산 효율과 충전 특성을 고려하여 용기 용량을 결정하는 과정은 시스템의 안전성과 효율성을 동시에 확보하는데 필수적이다. 이에 본 연구에서는 극저온 냉동기를 활용한 액체 수소 생산 시스템을 대상으로 용기의 직경과 높이 및 압력 조건이 액체 수소 생산율에 미치는 영향을 이론적으로 분석하고자 하였다.

## 2. 이론적 분석 방법

액체 수소 생산 효율을 이론적으로 분석하기 위해 액체 수소 생산 시스템의 개념 설계를 진행하였다. Fig. 1은 본 연구에서 이론적 해석 대상으로 고려한 액체 수소 액화기 시스템의 개략도이다. 액화기 상부 플랜지에는 Cryomech의 AL 630 냉동기 1대와 AL 330 2대가 장착되어 있다고 가정하였다. 기체

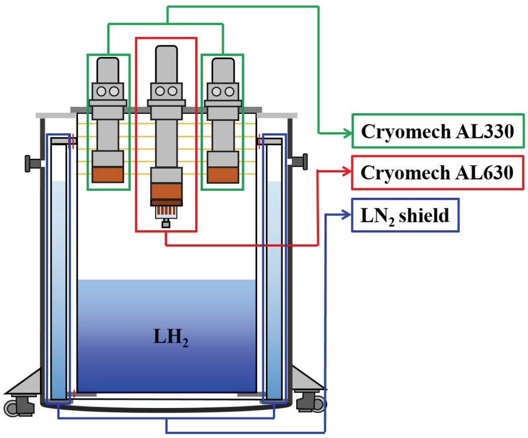



**Fig. 1.** Schematic diagram of the $LH_2$ liquefier and cryocooler configuration

수소는 예냉기를 통해 80 K으로 냉각되어 액화기 내부로 유입된 후 극저온 냉동기를 통해 액화된다. 생산된 액체 수소는 저장 용기에 저장된다. 저장 용기는 크게 내조와 외조로 구분할 수 있다. 액체 수소는 내조 공간에 저장되며, 외부로부터의 열침입을 최소화하기 위해 내조와 외조 사이는 multi-layer insulation (MLI)와 진공 단열 구조로 이루어져 있다. 또한, 상부 플랜지로부터의 전도, 벽면을 통해 외부로부터의 복사 열전달을 최소화하기 위해 $LN_2$ shield가 설치되어있다.

Fig. 2는 Cryomech의 AL 630과 AL 330의 형상을 나타낸 것이다. Fig. 3은 해당 극저온 냉동기의 냉각 성능 곡선을 나타낸 것이다. AL 630은 20 K에서 약 100W, AL 630은 20 K에서 40 W의 냉각 성능을 제공하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 AL 630 한 대와 AL 330 두 대를 조합하여, 20 K 구간에서 충분한 냉각 성능을 확보하도록 설정하였다.

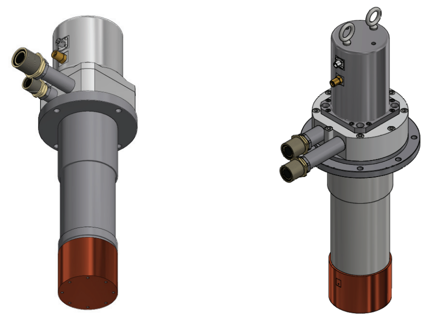



**Fig. 2.** 3D models of cryo-coolers

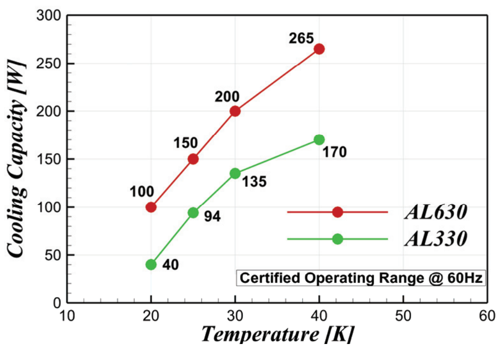



**Fig. 3.** Cooling capacity curves of cryo-coolers

Table 1은 본 연구에서 고려한 극저온 냉동기의 냉각 용량에 영향을 미치는 주요 파라미터를 정리한 것이다. 극저온 냉동기는 AL 630 한 대와 AL 330 두 대를 조합하여 20 K에서 총 냉각 용량은 180 W로 설정하였으며, 냉동기 효율은 90%라 가정하였다. 외부로부터 열침입으로 인한 손실은 MLI와 진공 단열 및 $LN_2$ shield를 통한 효과를 고려하여 20 W로 가정하였다. 이러한 손실과 효율을 고려했을 때 유효 냉각 용량은 142 W로 설정하였다.

본 연구에서는 압력 및 용기의 기하학적 형상 변수에 따른 액체 수소 생산 효율 및 수위 예측을 위해 계산과정을 3단계로 구분하여 세부적으로 계산을 수행하였다. 1단계에서는 극저온 냉동기를 활용하여 액체 수소를 생산하기 위해 기체 수소에서 제거해야 할 열량을 선행적으로 계산하였다. 본 연구에서는 REFPROP 프로그램(Version 10)을 참고하여 압력 및 온도에 따른 액체 및 기체 수소의 엔탈피 및 밀도 등의 물성치 데이터를 활용하였다. 2단계에서는 1단계를 통해 계산된 열량과 극저온 냉동기의 냉각 성능을 바탕으로 압력에 따른 액체 수소 생산량을 질량 및 부피 기준으로 나눠 계산하였다. 3단계에서는 액체 수소 생산 시간에 따른 생산량 및 용기의 기하학적 형상 변수에 따라 다양한 용기에서의 액체 수소 충전율 및 수위를 예측하였다.

**Table 1.** Parameters of cryo-coolers

| Cryo-cooler | Power [W] | Total Power [W] | Heat load [W] | Efficiency [%] | Cooling Capacity [W] |
|---|---|---|---|---|---|
| AL 630 | 100 | 180 | 20 | 90 | 142 |
| AL 330 | 40 | | | | |
| AL 330 | 40 | | | | |

액체 수소 생산을 위해 기체 수소에서 제거해야할 열량 즉, 전열(total heat)을 계산하기 위해 사용된 수식은 다음과 같다.

$$q_{sen} = h_{GH2,80K} - h_{GH2,sat} \tag{1}$$

$$q_{tot} = q_{sen} + q_{lat} \tag{2}$$

여기서, $q_{sen}$, $h_{GH2,80K}$, $h_{GH2,sat}$, $q_{tot}$ 및 $q_{lat}$는 각각 수소의 현열(sensible heat), 예냉 온도(80 K)에서의 엔탈피, 포화온도에서의 엔탈피, 전열 및 잠열(latent heat)을 나타낸다.

본 연구에서 질량 및 부피 기준으로 액체 수소 생산량을 계산하기 위해 사용된 수식은 다음과 같다.

$$\dot{m}_{LH2} = q_{tot} / Q_c \tag{3}$$

$$\dot{V}_{LH2} = \dot{m}_{LH2} / \rho_{LH2} \tag{4}$$

$$m_{LH2} = \dot{m}_{LH2} / t \tag{5}$$

$$V_{LH2} = \dot{V}_{LH2} / t \tag{6}$$

$$\phi = (V_{LH2} / V_{tank}) \times 100 \tag{7}$$

여기서, $\dot{m}_{LH2}$, $Q_c$, $\dot{V}_{LH2}$, $\rho_{LH2}$, $m_{LH2}$, $t$, $V_{LH2}$, $\phi$ 및 $V_{tank}$는 각각 질량 기준 액체 수소 생산량, 극저온 냉동기 냉각 용량, 부피 기준 액체 수소 생산량, 액체 수소 밀도, 액체 수소 질량, 액체 수소 생산 시간, 액체 수소 부피, 액체 수소 충전율 및 액체 수소 용기의 체적을 나타낸다.

**Table 2.** Thermodynamic properties of hydrogen at different tank pressure

| Cryostat & Tank Pressure @ 1 bar | |
|---|---|
| $LH_2$ Temperature | 20.4 K |
| Sensible heat | 650.6 J/g |
| Latent heat | 448.5 J/g |
| Total heat | 1099 J/g |
| **Cryostat & Tank Pressure @ 10 bar** | |
| $LH_2$ Temperature | 31.13 K |
| Sensible heat | 661.2 J/g |
| Latent heat | 234.2 J/g |
| Total heat | 895.5 J/g |

Table 2는 용기 압력 1 bar, 10 bar의 기체 수소에서 액체 수소 생산을 위해 제거해야 할 현열, 잠열 및 전열을 나타낸 것이다. 1 bar 조건에서 액체 수소의 포화온도는 20.4 K이며 전열은 1099 J/g으로 계산되었다. 10 bar 조건의 경우 포화온도는 31.13 K로 증가하였으나, 잠열은 234.2 J/g으로 감소하여 전열이 895.5 J/g으로 줄어드는 것을 확인하였다. 이는 생산 및 저장 압력이 높을수록 액체 수소 생산에 필요한 전열이 감소함을 의미한다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 용기 압력에 따른 액체 수소 생산 효율 분석

Fig. 4는 압력을 1-12 bar까지 1 bar 간격으로 증가시켰을 때, 액체 수소의 생산량을 질량 기준으로 나타낸 것이다. 동일한 냉동기 성능에서 압력이 증가함에 따라 액체 수소 생산량 또한 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 액체 수소 생산량은 12 bar에서 603.39 g/hour로 가장 높게 나타났으며, 1 bar 조건에서는 465.14 g/hour로 가장 낮게 나타났다. 1, 12 bar에서 수소의 끓는점은 각각 20.4, 32.54 K이며, 이때 계산되는 잠열은 각각 448.5, 146.3 J/g이다. 따라서, 압력이 높아짐에 따라 수소의 잠열이 감소하면서 동일한 냉동기 냉각 용량에서도 더 많은 질량의 수소가 액화될 수 있음을 의미하며, 상대적 고압 조건일수록 액체 수소 생산 효율이 높아짐을 확인하였다.

Fig. 5는 압력 변화에 따른 액체 수소의 부피 기준 생산량을 나타낸 것이다. 1 bar 조건에서 생산량은 6.56 L/hour로 가장 낮게 계산되었으며, 압력이 증가함에 따라 12 bar 조건에서는 14.15 L/hour로 계산되었다. 또한, 액체 수소의 밀도는 1 bar에서 70.879 g/L, 12 bar에서 42.435 g/L로 압력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 따라서, 액체 수소의 질량 기준 생산량을 액체 수소 밀도를 통해 부피 기준으로 환산할 경우 부피 기준 생산량이 질량 기준 생산량보다 더 큰 증가 폭을 보이며 압력 변화에 민감하게 반응하는 경향을 보인다.

Fig. 6은 1 bar 조건을 기준으로 액체 수소 생산 효율을 질량 및 부피 기준으로 나타낸 것이다. 질량 기준 효율은 압력 증가에 따라 완만하게 상승하여 12 bar에서 약 130%까지 증가하였다. 부피 기준 효율의 경우, 압력 변화에 민감하게 반응하여 12 bar에서 약 215%까지 증가하였다. 이는 앞선 결과에서 확인한 바와 같이 압력 증가 시 잠열 감소와 액체 수소 밀도 감소에 따른 결과로 판단된다. 이러한 결과는 액체 수소 생산 시스템에서 용기 내부 압력은 액체 수소 생산 효율에 직접적인 영향을 미치므로 시스템 설계 시 냉동기 성능과 내부 압력 조건을 함께 고려해야 함을 의미한다. 따라서 액체 수소 생산 시스템을 최적화하기 위해서는 냉동기의 성능과 운용 압력 조건을 함께 고려하는 것이 필수적이다.

### 3.2 주요 변수가 액체 수소 수위에 미치는 영향 분석

Fig. 7은 용기 직경 변화에 따른 액체 수소 충전률을 나타낸 것이다. 용기의 높이는 1500 mm, 액화기 운전 시간은 300 분으로 고정하고 용기의 직경은 250-450 mm까지 50 mm 간격으로 증가시켰다. 모든 압력 조건에서 액체 수소 생산 용기의 직경이 증가함에 따라 충전율은 감소하는 경향을 보였다. 직경 250 mm의 경우, 액체 수소의 충전율은 1 bar 조건에서는 44.57%, 10 bar 조건에서는 78.2%로 높은 충전율을 보였다. 하지만 직경이 증가함에 따라 450 mm 조건에서는 충전율은 각각 13.75%, 24.14%로 감소하였다. 이는 직경이 커질수록 용기의 부피가 커져 액체 수소가 상대적으로 더 넓은 단면적에 분산되기 때문이다. 또한 압력 조건에 따른 충전량 차이도 명확하게 확인된다. 모든 직경 조건에서 10 bar 조건이 1 bar 조건보다 높은 충전율을 보였다. 이는

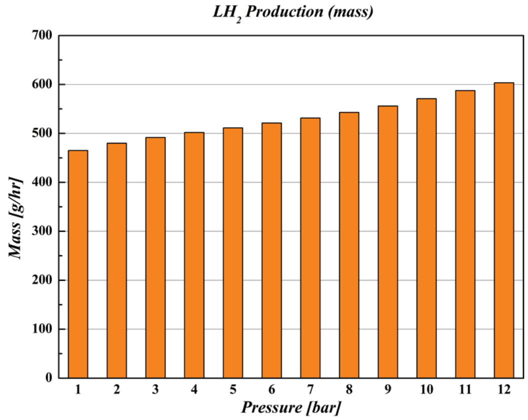



Fig. 4. $LH_2$ production rate(mass) according to cryostat and tank pressure

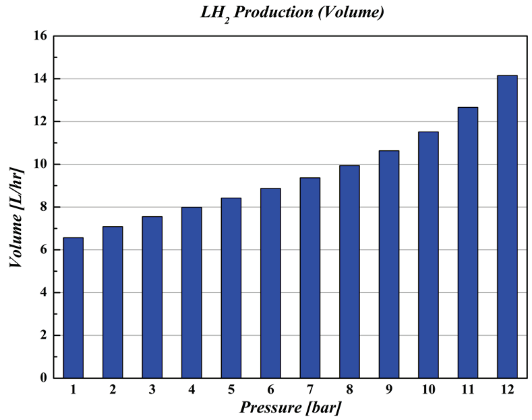



Fig. 5. $LH_2$ production rate(volume) according to cryostat and tank pressure

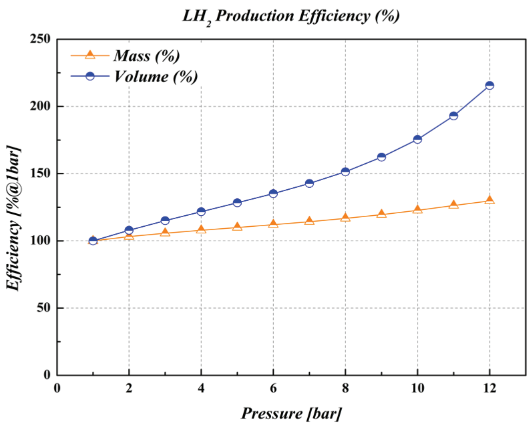



Fig. 6. $LH_2$ production efficiency according to pressure referenced to 1bar condition

상대적으로 고압 조건에서 액체 수소 생산량 증가에 따른 결과로 판단된다. 하지만 직경이 증가함에 따라 용기 내부 충전량의 압력 의존성은 줄어드는 경향을 확인하였다. 상대적으로 부피가 작은 직경 250 mm 인 용기의 경우 압력 증가에 따른 액체 수소 생산량의 증가 효과가 충전율에 크게 영향을 미쳐 1 bar와 10 bar 사이에 33.63% 차이를 보이며, 직경 450 mm의 경우 액체 수소가 더 넓은 단면적에 분산되기 때문에 7.39%의 작은 차이를 보인다.

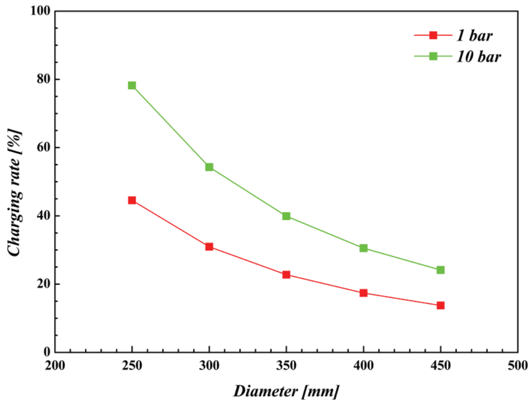
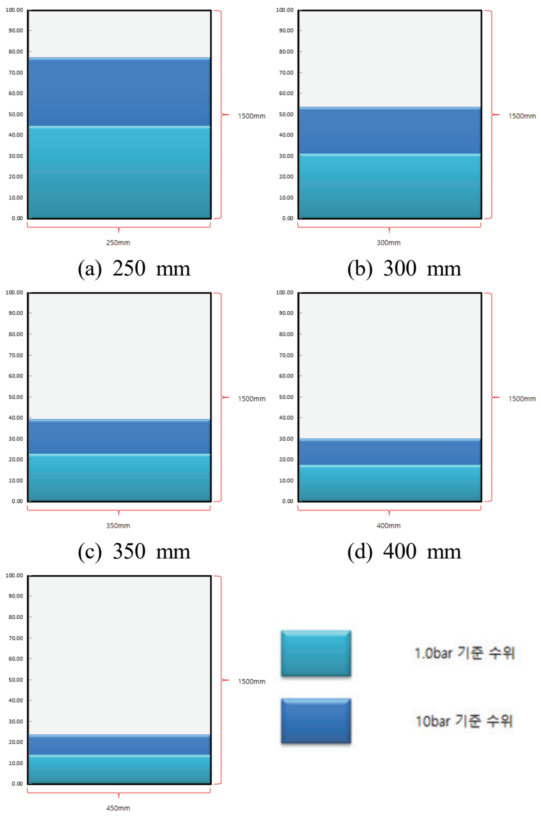



**Fig. 7.** $LH_2$ charging rate according to tank diameter




(a) 250 mm (b) 300 mm (c) 350 mm (d) 400 mm (e) 450 mm

**Fig. 8.** LH2 level visualization according to tank diameters

Fig. 8은 직경별 액체수소 충전 수위를 시각적으로 표현한 것이다. 직경이 증가할수록 동일한 운전 시간 내에서 수위가 점차 낮아지는 경향을 보였다. 액체 수소는 운전 시간 300 분 동안 직경 250 mm 용기에서는 1 bar 조건에서 2,252.7 g(32.81 L)이 생산되어 수위는 약 670 mm까지 상승했으며, 10 bar 조건에서는 약 2,855.4 g(57.58 L)이 생산되어 수위는 1,170 mm에 도달하였다. 직경이 450 mm로 증가한 경우, 넓은 단면적에 액체 수소가 분포하면서 수위는 각각 200, 360 mm 수준을 보였다. 따라서 직경이 상대적으로 큰 용기에서는 압력에 따른 생산량 증가 효과가 액체 수소 수위에 크게 영향을 미치지 못하는 결과를 확인하였다.

Fig. 9는 용기의 높이 변화에 따른 액체 수소 충전률을 나타낸 것이다. 용기의 직경은 300 mm, 액화기 운전 시간은 300 분으로 고정하고, 용기의 높이 1100-1900 mm까지 200 mm 간격으로 증가시켰다. 직경에 따른 결과와 동일하게 모든 압력 조건에서 용기의 높이가 증가함에 따라 충전율은 점차 감소하는 경향을 보였다. 용기의 높이가 1100 mm인 경우 액체 수소 충전율은 1 bar 조건에서 41.7%, 10 bar 조건에서는 74.05%를 보였다. 용기의 높이가 높아질수록 액체 수소 충전율은 점차 감소하여 1, 10 bar 조건에서 각각 13.73%, 42.87%를 보였다. 이는 동일한 양의 액체 수소가 충전되더라도 용기 높이가 높아질수록 용기의 체적이 증가하여 충전율이 감소하는 결과로 판단된다. 또한 모든 높이 조건에서 10 bar 조건이 1 bar 조건보다 높은 충전율을 보였다. 이는 상대적으로 고압 조건에서 액체 수소 생산량이 증가한 결과로 해석된다. 용기의 높이가 높아질수록 압력 상승에 따른 충전율 증가 효과는 감소하는 경향을 보였다. 상대적으로 체적이 작은 1100 mm 용기의 경우 압력 증가에 따른 충전율 차이는 32.35%를 보였으며,

1900 mm의 경우 29.14%로 감소하였다.

Fig. 10은 용기 높이에 따른 액체 수소 충전 수위를 시각적으로 나타낸 것이다. 높이가 높아질수록 동일 액체 수소 생산량 대비 수위가 감소하는 경향을 보였다. 직경 300 mm, 높이 1100 mm인 용기의 경우 체적은 약 78.6 L로 1 bar 조건에서는 액체 수소 수위가 464 mm, 10 bar 조건에서는 액체 수소 생산량의 증가로 인해 815 mm에 도달할 것으로 계산된다. 높이 1900 mm의 경우 용기의 체적은 134.3 L로 액체 수소의 수위는 각각 464, 815 mm로 계산된다. 이를 통해, 동일한 양의 액체 수소가 충전되더라도 용기의 높이가 커질수록 상대적인 충전율은 감소하는 경향을 확인하였으며, 액체 수소 저장 용기의 설계에 있어 압력 조건뿐만 아니라 직경 및 높이와 같은 기하학적 형상 조건이 충전 특성에 중요한 영향을 미친다는 사실을 확인하였다.

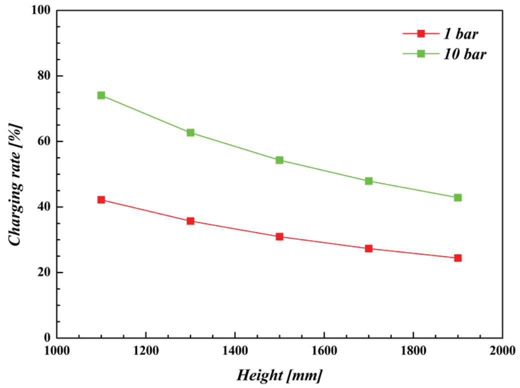



Fig. 9. $LH_2$ charging rate according to tank height

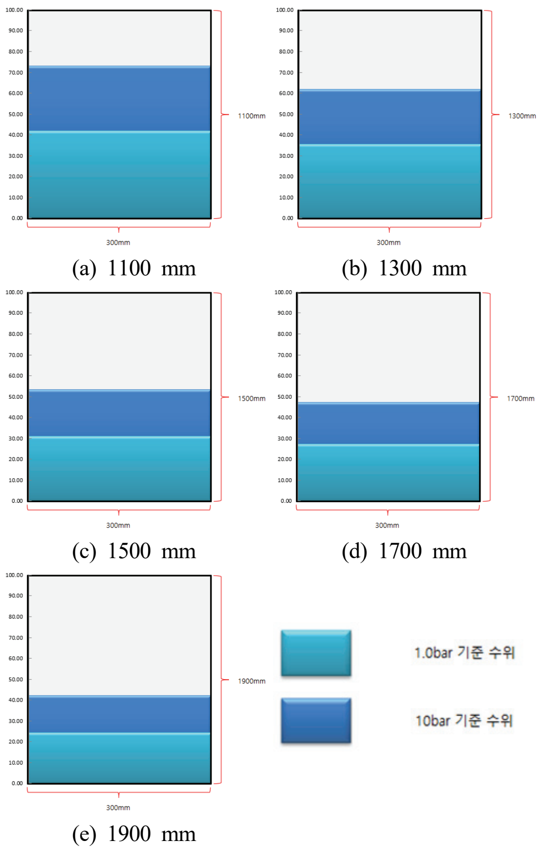



Fig. 10. $LH_2$ level visualization according to tank height

Fig. 11은 액화기 운전 시간 즉, 생산 시간이 증가함에 따라 액체 수소의 충전율을 나타낸 것이다. 액화기 형상 조건은 직경 300 mm, 높이 1500 mm 조건이며, 생산 시간은 200-400 분까지 50 분 간격으로 증가시켰다. 생산 시간이 길어질수록 충전율은 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 시간이 증가함에 따라 누적 생산량이 증가하는 동시에 상대적으로 고압 조건인 10 bar에서 액화 효율 향상된 결과를 확인하였다.

Fig. 12는 생산 시간에 따른 액체 수소 수위를 시각적으로 표현한 것으로, 시간이 지남에 따라 수위가 점차 상승하는 것을 확인할 수 있다. 200 분 운전 시 1 bar 조건에서는 1,920.9 g(38.96 L), 충전율 32.40%, 10 bar 조건에서는 2,855.4 g(57.58 L), 54.31%로 보인다. 400 분 운전 시 1 bar 조건에서 3,100.9 g(45.91 L), 충전율 42.26%, 10 bar 조건에서는 3,805.9 g(76.27 L), 72.41%까지 증가하였다. 이러한 결과는 생산 시간이 길어질수록 충전율이 지속적으로 증가함을 보여준다.

## 3.3 주요 변수 영향도 분석

직경, 높이 및 운전 시간에 따른 개별적인 분석 결과를 바탕으로 본 연구에서는 이러한 주요 변수들의 상대적인 영향도를 비교하였다. Fig. 13은 액체 수소 충전율에 영향을 미치는 주요 변수인 용기 직경, 높이 및 운전 시간을 비교하여 나타낸 것이다. 용기 직

경 변화에 따른 충전율의 경우, 250 mm 용기는 1 bar에서 44.57%, 10 bar에서 78.2%를 보였다. 직경이 450 mm로 증가하면 각각 13.75%, 24.14%로 크게 감소하는 결과를 보였다. 용기 높이 변화의 경우,

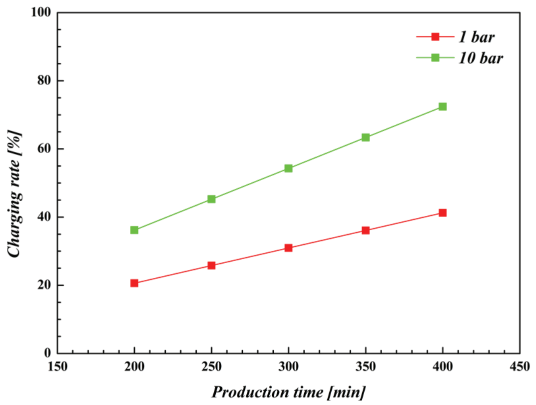



**Fig. 11.** $LH_2$ charging rate according to production time

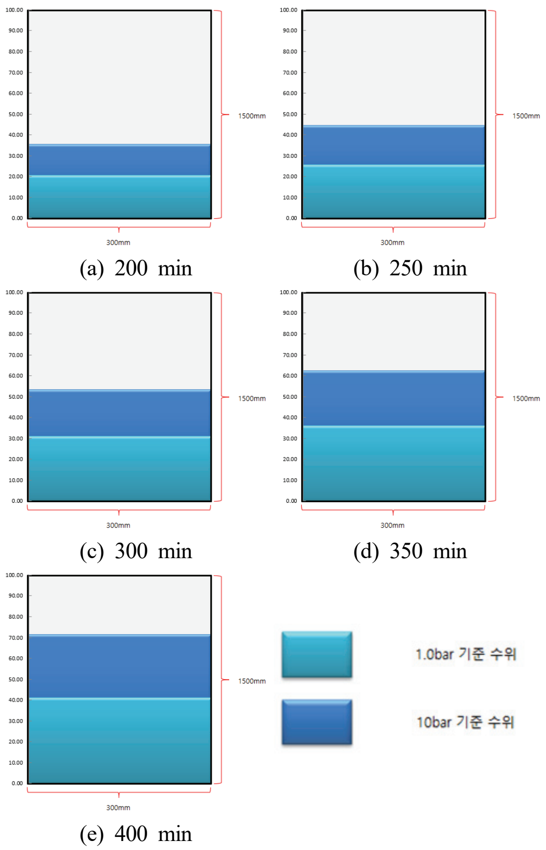



**Fig. 12.** $LH_2$ level visualization according to production time

1100 mm 조건에서 각각 41.7%, 74.05%를 보였으며, 1900 mm로 증가했을 때 13.73%, 42.87%로 충전율이 감소하는 경향을 보였다. 동일한 압력 조건에서 직경 증가보다 높이 증가가 충전율 감소폭이 더 크게 나타났다. 이는 원통형 용기 체적 계산을 고려했을 때, 직경의 변화가 높이의 변화보다 더 큰 체적 변화를 유발하기 때문에 결과적으로 액체 수소 충전율 감소에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 운전 시간의 경우, 200 분에서 400 분으로 증가할 때 충전율은 1 bar 조건에서 20.8%에서 41.7%까지 증가하며, 10 bar 조건에서 36.5%에서 72.41%까지 증가하는 경향을 보였다. 이는 운전 시간이 길어질수록 누적 생산량이 증가하여 충전율이 선형적으로 증가함을 보여준다. 본 연구를 통해, 액체 수소 충전 특성은 압력 조건뿐만 아니라 용기의 형상 변수와 운전 시간에 의해 크게 달라지며, 특히 용기 직경의 변화는 액체 수소 충전율에 가장 지배적인 영향을 미친다는 점을 이론적으로 확인하였다. 따라서, 액체 수소 생산 및 저장 용기의 설계 최적화를 위해서는 직경, 높이, 운전 시간 및 압력 조건을 복합적으로 고려하는 것이 중요하다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 극저온 냉동기를 활용한 액체 수소 액화기 시스템을 대상으로 용기 압력 및 형상 조건

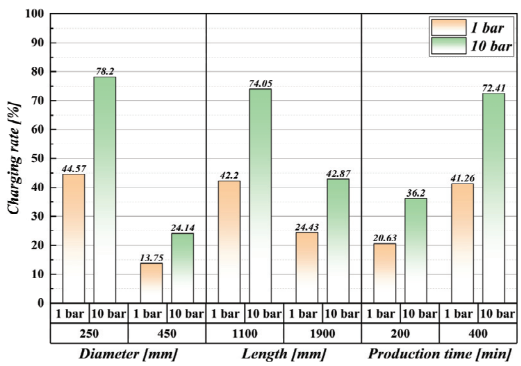



**Fig. 13.** Comparison of $LH_2$ charging rate according to diameter, height, and production time at different pressure

에 따른 액체 수소 생산 효율을 이론적으로 분석하였다. 이론적 분석 결과, 압력이 증가할수록 수소의 잠열이 감소하여 동일 냉동기 성능에서도 더 많은 액체 수소가 생산됨을 확인하였다. 또한, 용기의 직경과 높이가 증가함에 따라 충전률과 수위가 감소하는 결과를 보였으며, 특히 동일한 압력 조건에서 직경 변화가 높이 변화보다 충전 특성에 더 큰 영향을 미쳤다. 액체 수소 생산 시간이 길어질수록 충전량은 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 본 연구를 통해, 액체 수소 액화기의 압력 조건, 용기 형상 및 운전 시간이 액체 수소 생산 및 충전 특성에 결정적인 영향을 미친다는 사실을 알 수 있었다. 따라서, 액화기 시스템 설계에 있어 냉동기 성능과 함께 압력, 직경, 높이 및 운전 시간을 종합적으로 고려하는 것이 생산 효율과 충전 특성을 최적화하는데 필수적임을 확인하였다.

## 후 기

이 연구는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 기본 사업임(No. 25A01048). 이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(25A02129, 액화수소 인수기지 저장탱크 등 핵심 설비 단열성능 평가 기술/안전기준 개발).

## References

1. Z. Yanxing, G. Maoqiong, Z. Yuan, D. Xueqiang, and S. Jun, “Thermodynamics analysis of hydrogen storage based on compressed gaseous hydrogen, liquid hydrogen and cryo-compressed hydrogen”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 44, No. 31, 2019, pp. 16833-16840, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.207.
2. G. Petitpas, S. M. Aceves, and N. Gupta, “Vehicle refueling with liquid hydrogen thermal compression”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 37, No. 15, 2012, pp. 11448-11457, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.04.137.
3. H. Wang, B. Wang, T. Xu, X. Shen, Y. He, W. Zhou, J. Pfotenhauer, T. Jin, and Z. Gan, “Thermal models for self-pressurization prediction of liquid hydrogen tanks: formulation, validation, assessment, and prospects”, Fuel, Vol. 365, 2024, pp. 131247, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131247.
4. W. Haoren, W. Bo, L. Ruize, S. Xian, W. Yingzhe, P. Quanwen, H. Yuanxin, Z. Weiming, and G. Zhihua, “Theoretical investigation on heat leakage distribution between vapor and liquid in liquid hydrogen tanks”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 48, No. 45, 2023, pp. 17187-17201, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.140.
5. D. W. Ha, H. W. Noh, Y. M. Seo, T. H. Koo, and R. K. Ko, “A theoretical study on boil-off gas generated from cooling process for cryogenic components using liquid hydrogen”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 6, 2023, pp. 615-622, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.615.
6. H. Hwang, H. Lee, and S. Han, “Estimation of boil-off gas in liquid hydrogen storage vessel by using phase change model based on intermolecular interactions”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 1, 2025, pp. 31-41, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.1.31.
7. W. G. Houf and W. S. Winters, “Simulation of high-pressure liquid hydrogen releases”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, No. 19, 2013, pp. 8092-8099, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.052.
8. E. Salzano, M. Carboni, and G. Pio, “The effects of low-temperature phenomena on rapid phase transition of liquid hydrogen”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 45, No. 56, 2020, pp. 32676-32685, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.140.
9. J. Li and G. Liang, “Simulation of mass and heat transfer in liquid hydrogen tanks during pressurizing”, Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 32, No. 9, 2019, pp. 2068-2084, doi: https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.05.008.
10. D. W. Ha, H. W. Noh, Y. M. Seo, T. H. Koo, and R. K. Ko, “Development of a condensing-type hydrogen liquefaction system for improving cooling efficiency and long-term storage”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 49, 2024, pp. 1558-1571, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.181.
11. L. Zhou, Y. Zhou, and Y. Sun, “Enhanced storage of hydrogen at the temperature of liquid nitrogen”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 29, No. 3, 2004, pp. 319-322, doi: https://doi.org/10.1016/S0360-3199(03)00155-1.
12. M. G. Bae, D. W. Ha, H. W. Noh, S. B. Woo, K. Heo, and Y. M. Seo, “Study on hydrogen pre-cooling temperature and heat exchanger area of pre-cooling system for production of liquid hydrogen”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 3, 2024, pp. 290-299, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.3.290.

13. R. Zhou, W. Zhu, Z. Hu, S. Wang, H. Xie, and X. Zhang, “Simulations on effects of rated ullage pressure on the evaporation rate of liquid hydrogen tank”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 134, 2019, pp. 842-851, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.091.
14. A. Gil-Esmendia, R. J. Flores, and J. Brouwer, “Modeling and improving liquid hydrogen transfer processes”, Applied Energy, Vol. 390, No. 15, 2025, pp. 125779, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125779.
15. J. J. Shuang and Y. W. Liu, “Efficiency analysis of depressurization process and pressure control strategies for liquid hydrogen storage system in microgravity”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 44, No. 30, 2019, pp. 15949-15961, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.213.
16. W. Lei, L. Yanzhong, Z. Feini, and M. Yuan, “Performance analysis of no-vent fill process for liquid hydrogen tank in terrestrial and on-orbit environments”, Cryogenics, Vol. 72, 2015, pp. 161-171, doi: https://dx.doi.org/10.1016/j.cryogenics.2015.10.001.
17. C. Wan, S. Zhu, C. Shi, S. Bao, X. Zhi, L. Qiu, and K. Wang, “Numerical simulation on pressure evolution process of liquid hydrogen storage tank with active cryogenic cooling”, International Journal of Refrigeration, Vol. 150, 2023, pp. 47-58, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.01.012.
18. K. Tani, T. Himeno, Y. Sakuma, T. Watanabe, H. Kobayashi, T. Toge, S. Unno, S. Kamiya, O. Muragishi, and K. Kanbe, “Pressure recovery during pressure reduction experiment with large-scale liquid hydrogen tank”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 46, No. 57, 2021, pp. 29583-29596, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.184.
19. J. Li, G. Liang, P. Zhu, and X. Wang, “Numerical investigation of the operating process of the liquid hydrogen tank under gaseous hydrogen pressurization”, Aerospace Science and Technology, Vol. 93, 2019, pp. 105327, doi: https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105327.
20. Y. M. Seo, H. W. Noh, T. H. Koo, D. W. Ha, and R. K. Ko, “Development on numerical analysis model on cryogenic vessel for safety pressure maintenance and control of liquid hydrogen BOG”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 3, 2024, pp. 280-289, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.3.280.
21. D. W. Ha, H. W. Noh, T. H. Koo, R. K. Ko, and Y. M. Seo, “Experimental study on the liquid hydrogen zero boil-off in a liquefaction system with an automatic control technology”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 83, 2024, pp. 933-945, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.167.