Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 6, 2025, pp. 615~624
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.6.615

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

극저온 온도 센서를 활용한 액체 수소의 실제 수위 측정에 관한 연구

서영민 · 노현우 · 구태형 · 서원준 · 하동우 · 고락길†

한국전기연구원 전기모빌리티연구단 수소전기연구팀

A Study on Measuring the Actual Level of Liquid Hydrogen Using Cryogenic Temperature Sensor

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

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

†Corresponding author : rkko@keri.re.kr

Received 25 September, 2025
Revised 3 November, 2025
Accepted 3 November, 2025

Abstract >> This study proposes a method for liquid hydrogen (LH_2) level measurement using cryogenic temperature sensors and validates its feasibility in a small-scale liquefaction system. The sensors showed unstable signals in gaseous hydrogen (GH_2) but stable responses in the liquid phase, enabling clear identification of the gas–liquid interface. By detecting the submersion points of sensors, the liquid level was tracked stepwise without the need for complex level sensors. The estimated LH_2 production from sensor data agreed well with values calculated from integrated GH_2 supply. The difference between DT-2 and DT-3 corresponded to about 8,999 L of GH_2, consistent with theoretical LH_2 production after density conversion. When the 0.5 L hold-up volume of the heat exchanger was considered, the error was reduced to within 2%. These results confirm that cryogenic temperature sensors provide a reliable and practical approach for accurate LH_2 level measurement.

Key words : Liquid hydrogen(액체 수소), Water level(수위), Temperature sensor (온도 센서), Mass accumulation(질량 적산량), Volume(체적)

1. 서 론

수소는 탄소중립 사회로 전환하기 위한 핵심 에너지 매개체로 주목받고 있으며, 특히 액체수소는 기체수소에 비해 부피당 저장 밀도가 약 800배 이상 높아 대규모 저장 및 장거리 운송에 적합하다는 장점을 지니고 있다[1-3]. 이러한 특성으로 인해 액체수소는 항공우주 추진체, 대형 수송 선박, 상용차용 연료탱크 등 다양한 분야에서 활용 가능성이 확대되고 있다[4-5]. 그러나 액체수소는 약 20 K의 극저온 환경에서 다뤄져야 하기 때문에 저장 및 운송 과정에서 열적 안정성 확보, 기화 손실(boil-off gas, BOG) 최소화, 그리고 안전성 검증을 위한 계측 기술 확보가 반드시 필요하다[6-7]. 최근까지 진행된 여러 연구에서는 액체수소의

열역학적 물성, 저장 안정성, BOG 발생 특성, 안전 밸브 성능 평가 등 다양한 주제가 다루어져 왔으며, 이를 통해 액체수소 인프라 구축 과정에서 정밀한 계측 기술의 중요성이 더욱 부각되고 있다[8-10].

액체수소 저장 및 활용에서 가장 핵심적인 요소 중 하나는 저장 용기의 수위(level) 측정이다. 정확한 수위 측정은 생산 과정에서 액체수소의 수율을 평가하고, 저장 과정에서 기화 손실을 관리하며, 충전 및 이송 과정에서 안전한 운용을 보장하는 데 필수적이다[11-12]. 그러나 극저온 환경에서 신뢰성 있게 작동할 수 있는 수위 측정 기술은 여전히 기술적 난제가 많다. 기존에 활용되어 왔던 온도 센서는 일정한 성능을 제공하나, 구조적 복잡성, 장기 신뢰성 저하, 센서 손상 가능성 등의 한계로 인해 상용 대형 저장 시스템에 적용하는 데 어려움이 존재한다. 따라서 보다 단순하면서도 정확성이 확보된 계측 방법이 요구되며, 특히 극저온 온도 센서를 활용한 수위 측정 연구는 설치 용이성과 운용 안정성 측면에서 새로운 대안이 될 수 있다[13-14].

극저온 환경에서 활용 가능한 다양한 계측 기술 중 온도 센서는 비교적 구조가 단순하면서도 높은 신뢰성과 민감도를 제공하는 장치로 널리 사용되고 있다. 특히 실리콘 다이오드나 백금 저항 온도계와 같은 극저온 전용 센서는 20 K 부근에서도 안정적인 응답 특성을 나타내어 액체수소 저장용기 내부의 열적 상태를 정밀하게 모니터링할 수 있다[15]. 수위 측정은 이러한 온도 센서를 저장 용기 내부 벽면 또는 프로브 형태로 수직 배열하여 수행할 수 있으며, 액체와 기체가 공존하는 경계면에서는 뚜렷한 온도 구배가 나타나기 때문에 센서 위치별 온도 응답을 통해 실제 액면의 위치를 추정할 수 있다[16]. 이러한 방법은 전기적 신호 해석이 단순하고, 기존 센서 계측망과 연계가 용이하며, 무엇보다도 저장 용기 내부 구조를 크게 변경하지 않고도 적용할 수 있다는 장점이 있다. 또한 다른 방식의 레벨 센서에 비해 내구성과 안정성이 높아 장기 운용이 요구되는 액체수소 저장 시스템에도 적합하다.

액체수소 저장용기의 수위를 계측하기 위해 다양한 센서 기술이 제안되어 왔다. 대표적으로 용량식(capacitance) 센서[17], 초전도식(superconducting) 센서[18], 차압식(differential pressure) 센서[19] 등이 있으며, 이들 기술은 각각 특정 조건에서 우수한 성능을 보인 바 있다. Matsumoto 등[17]은 액체수소 저장용기를 대상으로 한 용량식 액면계의 원리와 적용 가능성을 실험적으로 검증하여 극저온 환경에서의 수위 측정 성능을 제시하였다. Kajikawa 등[18]은 MgB_2 선재를 이용한 액체수소용 초전도 레벨 센서의 기본 특성을 실험적으로 조사하여 극저온 수위 계측 기술의 가능성을 제시하였다. Zhou 등[19]은 차압식 센서를 활용하여 압력 제어 특성에 대한 실험적 검증을 수행하고, 극저온 저장 시스템에서의 안정적 운용을 위한 압력 관리 방법을 분석하였다.

그러나 실제 대형 저장 시스템이나 상용차 연료탱크에 적용하기에는 여러 한계가 존재한다. 용량식 센서는 전극 표면 상태나 응축 현상에 민감하고, 초전도식 센서는 복잡한 저온 유지 장치가 필요하며, 차압식 센서는 장기적으로 신뢰성 있는 교정 유지가 어렵다. 이러한 문제로 인해 극저온 환경에서 장기간 안정적으로 운용 가능한 수위 측정 기술에 대한 요구가 지속적으로 제기되고 있다. 본 연구는 이러한 기존 한계를 극복하기 위해 극저온 온도 센서를 활용한 액체수소 수위 계측 방법을 실험적으로 검증하고자 한다. 온도 센서 기반 계측은 단순한 구조와 높은 내구성을 바탕으로 기존 시스템과의 호환성이 뛰어나며, 실제 운용 과정에서 발생하는 액체–기체 경계의 온도 구배를 효과적으로 활용할 수 있다. 따라서 본 연구는 액체수소 저장 및 운용 과정에서 안전성과 효율성을 동시에 확보할 수 있는 새로운 수위 측정 접근법을 제시하며, 향후 수소 인프라 구축과 수소 모빌리티 분야에 기여할 수 있는 중요한 기술적 기반을 마련하는 데 그 의의가 있다.

2. 액체수소 수위 평가 방법

Fig. 1은 극저온 환경에서 활용되는 대표적인 온도 센서 패키지의 다양한 형태를 보여준다. 각 센서

는 기본적으로 실리콘 다이오드 칩을 기반으로 하며, 센서의 열적 응답 특성과 기계적 내구성을 보장하기 위해 황동 또는 구리 하우징에 삽입되어 제작된다. 그림에서 볼 수 있듯이 MT (Metric thread), ET (Extended thread), LR (Lug ring), SD (Silicon diode), BO (Bolt-on), CY (Cylindrical), CU (Cup), DI (Disc) 등 여러 형식으로 구분되며, 이는 설치 환경과 실험 목적에 따라 선택된다. MT와 ET 형식은 나사 체결 구조를 통해 금속 블록이나 배관 벽면에 직접 장착할 수 있으며, LR과 BO 형식은 평면 표면에 밀착 고정하여 열전달 특성을 향상시킨다. 또한 CY와 CU 타입은 곡면 또는 원형 부품에 적합하며, DI타입은 얇은 구조물에 부착하기 용이하다. 모든 형태의 센서는 동전과 눈금자와의 비교를 통해 알 수 있듯이 소형으로 제작되어, 액체수소 저장탱크, 배관, 열교환기 등의 제한된 공간에서도 손쉽게 설치할 수 있다. 이러한 다양한 패키징 옵션은 극저온 실험에서 요구되는 빠른 열응답성, 높은 신뢰성, 그리고 장기간 운용 안정성을 달성하는 데 기여한다. 본 연구에서 사용한 온도 센서는 DT-670 Silicon Diodes CU type 모델 (Lakeshore, Kirkland, WA, USA)을 활용하였으며, 해당 모델을 실리콘 다이오드 중 가장 넓은 온도 범위(1.4 K~500 K)에서 높은 정확도를 보유하였으며, 반복적인 열 사이클을 견디고 센서 발열을 최소화하도록 설계되었다.

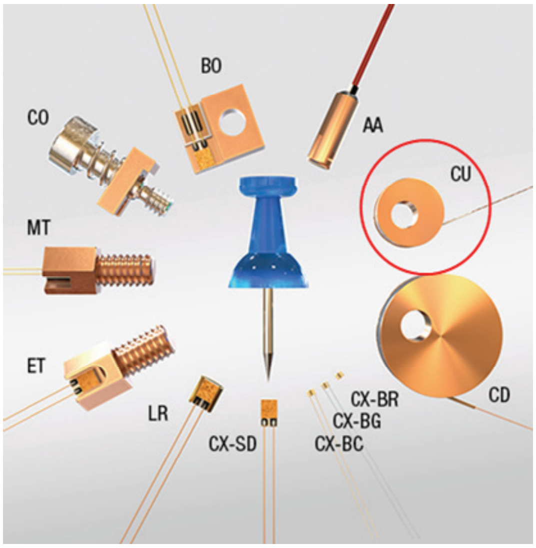


Fig. 1. Cryogenic temperature sensors

Fig. 2는 본 연구에서 고려한 액체 수소의 수위 예측을 위한 흐름도를 보여준다. 액체수소 생산량을 예측하기 위해서는 우선 공급되는 기체수소의 유량을 정확히 측정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 질량유량계를 사용하여 일정 시간 동안 공급된 수소의 누적 유량을 적산하였다. 이를 통해 시스템에 투입된 기체수소의 총량을 정량적으로 파악할 수 있으며, 안정적인 압력 조건 하에서는 이 기체가 모두 액화되었다고 가정하였다. 공급 과정에서 압력이 상승하는 경우에는 일부 기체가 압축에 기여할 수 있으므로, 모두 액화라는 가정은 압력 변동이 크지 않은 조건에서 적용하는 것이 타당하다고 판단하였다.

측정된 기체수소 누적량은 밀도 변환을 통해 액체수소 생산량으로 환산된다. 기체수소와 액체수소의 밀도 차이는 약 800배에 달하므로, 공급된 기체수소의 질량 혹은 부피를 액체 상태의 밀도로 변환함으

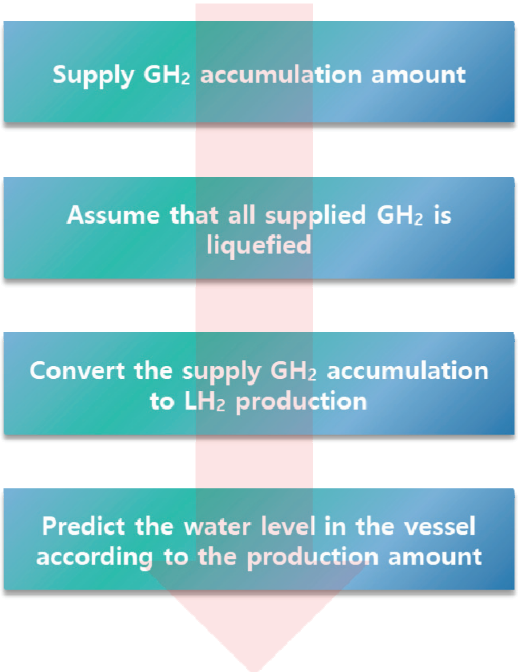


Fig. 2. Flow chart for prediction of the water level of liquid hydrogen

로써 생산된 액체수소의 양을 추정할 수 있다. 이를 바탕으로 저장 용기의 내부 체적과 비교하면 특정 시점의 수위를 예측할 수 있으며, 온도 센서 부착 위치와 비교하면 센서가 액상에 잠겼는지 여부를 확인할 수도 있다. 이러한 방법은 액체수소 생산 실험에서 직접적인 수위 계측이 어려운 경우 유량 기반 간접 추정 기법으로 유용하게 활용될 수 있다.

Fig. 3은 압력 변화에 따라 액체수소의 밀도와 체적 특성이 크게 달라짐을 보여준다. 압력이 증가할수록 액체수소의 밀도는 감소하는 반면, 동일 질량 기준 체적은 증가하는 경향을 나타낸다. 저압 영역에서는 높은 밀도가 유지되지만 압력이 상승할수록 밀도가 급격히 낮아져 단위 부피당 저장 효율이 저하된다. 이는 곧 액체수소 생산량 및 저장량을 단순히 공급된 기체수소의 양만으로 환산할 수 없음을 의미하며, 실제 운전 조건에서의 압력 효과를 반드시 고려해야 한다는 점을 시사한다. 따라서 액체수소 시스템의 생산량 예측, 저장 용기의 수위 산정, 그리고 안전 운전 범위 설정에 있어 압력에 따른 밀도 변화는 필수적으로 반영되어야 하며, 이를 통해 보다 정밀하고 신뢰성 있는 계측이 가능하다.

Fig. 4는 절대압력에 따른 액체수소, 액체질소, 그리고 물의 부피 변화를 비교한 결과를 나타낸다. 물과 액체질소의 경우 압력이 증가해도 단위 질량당 부피 변화가 미미한 반면, 액체수소는 압력이 상승함에 따라 부피가 급격히 증가하는 경향을 보인다. 예를 들어 1 bar에서 약 14 L/kg이던 액체수소의 부피는 12 bar에서 24 L/kg에 달하며, 이는 동일한 압력 범위에서 물이나 액체질소의 변화량과 비교할 때 현저히 큰 값이다. 1 bar에서의 부피를 기준으로 상대적인 증가율에서 물과 액체질소는 약 100–115% 범위 내에서 완만한 증가를 보이지만, 액체수소는 압력 상승과 함께 170% 이상까지 증가하여 비선형적이고 뚜렷한 압력 의존성을 드러낸다. 이는 액체수소가 다른 극저온 액체나 일반 액체에 비해 압축성 효과가 크다는 것을 의미하며, 실제 저장 및 운용 과정에서 압력 조건에 따라 저장 밀도와 부피 특성이 크게 달라질 수 있음을 보여준다. 따라서 액체수소 시스템의 설계와 해석에서는 압력에 따른 부피 변화를 반드시 고려해야 하며, 단순한 상온 액체와 동일한 방식으로 접근해서는 안 된다.

Fig. 5는 수소 액화 과정에서 온도 센서가 기체 상

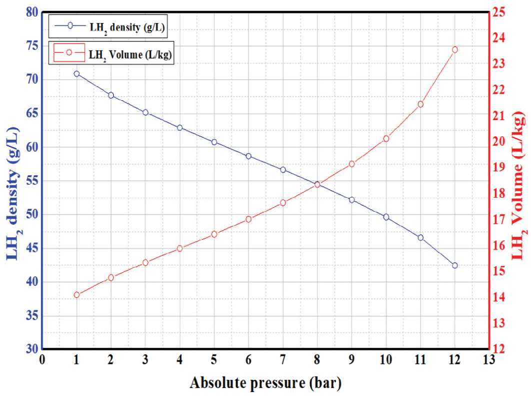
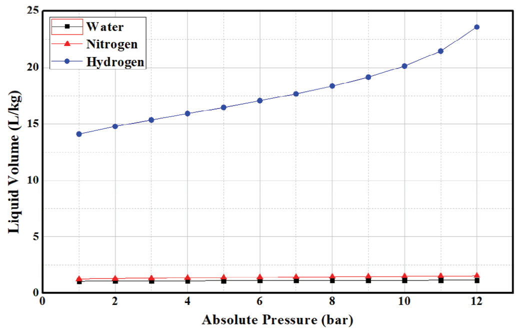
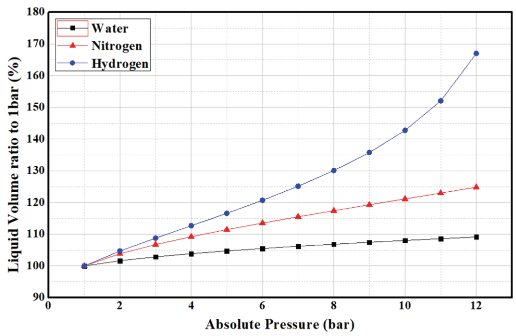


Fig. 3. Density and volume variations of liquid hydrogen for the absolute pressure



(a) Volume



(b) Volume ratio

Fig. 4. Comparison of volume of liquid hydrogen for the absolute pressure

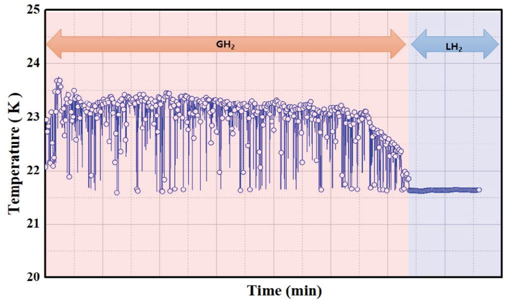


Fig. 5. Characteristics of temperature sensor between gas and liquid states

태와 액체 상태에 놓였을 때 나타나는 일반적인 신호 특성을 보여준다. 기체수소 영역에서는 열전달 특성이 불안정하고 대류 영향이 크기 때문에 온도 측정값이 지속적으로 진동하며, 이는 그래프에서 관찰되는 높은 수준의 노이즈로 나타난다. 반면 액체수소 영역에서는 열전달이 안정적이고 열용량이 크기 때문에 측정값이 거의 변동하지 않고 일정하게 유지된다. 이러한 차이는 센서가 위치한 환경이 기체 영역인지 액체 영역인지를 명확히 구분할 수 있게 해주며, 결과적으로 단순한 온도 측정 신호만으로도 액체수소 저장 용기 내부의 실제 수위를 추정할 수 있음을 시사한다. 따라서 극저온 온도 센서를 다중 배치하여 각 위치의 신호 변동 특성을 분석하면, 직접적인 레벨 센서 없이도 신뢰성 있는 수위 계측이 가능하다.

3. 실험 적용 모델

Fig. 6은 액체수소 수위를 측정하기 위해 설계된 소형 액화기의 개략도를 나타낸 것이다. 내부 시스템은 직경 452 mm, 높이 1,436 mm, 총 용적 230.42 L의 크라이오스탯(Cryostat)으로 구성되며, 용기 내부에는 다층단열재(MLI), LN2 차폐판(LN2 shield)이 설치되어 있다. 상부에는 프리쿨러(Pre-cooler)와 크라이오쿨러(Cryo-cooler)가 2대 장착되어, 기체 수소의 예냉 및 극저온 냉각을 통해 액체 수소를 생산한다. 중심부에는 히트파이프(Heat pipe)가 배치되어

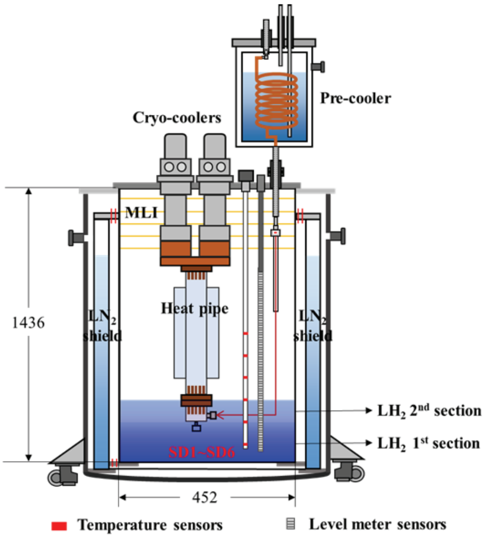


Fig. 6. Schematic of small-scale hydrogen liquefaction system for measuring the water level of liquid hydrogen

냉각 효율을 높였다.

용기 내부에는 총 6개의 온도센서(SD1~SD6)가 설치되어 있으며, 이는 액체 수소의 수위를 간접적으로 측정하기 위함이다. 센서는 바닥으로부터 첫 번째 센서 높이 98.97 mm에서 시작하여, 69.7 mm 간격으로 배열되어 있다. 따라서 각 센서가 액체수소에 잠기기 위해서는 약 11.187 L의 액체수소 충전이 필요하다. 이 특성을 이용하면, 센서 신호가 기체 상태에서 나타나는 불안정한 온도 노이즈와 액체 상태에서의 안정적인 온도 응답 차이를 통해 액체수소의 액면 위치를 단계적으로 추정할 수 있다. 즉, 특정 센서가 액체에 잠길 때마다 수위가 약 69.7 mm 상승하며, 이때 대응되는 액체수소 충전량은 11.187 L로 계산된다.

본 시스템은 별도의 복잡한 레벨 센서를 사용하지 않고, 단순한 극저온 온도센서 배열을 활용하여 액체수소 수위를 계측할 수 있는 것이 특징이다. 이는 극저온 환경에서 레벨센서의 구조적 취약성, 신뢰성 저하 문제를 해결하는 효과적인 방법으로, 특히 소형 액화기 및 연구용 실험 장치에서 유용하다. 또한 크라이오쿨러 기반의 직접 냉각 방식과 다중 온도센서 배열을 결합함으로써, 액체수소의 생산 과정과

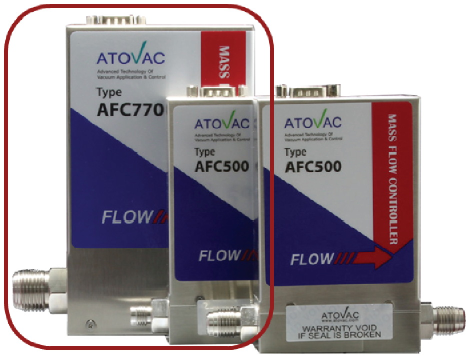


Fig. 7. Mass flow meter

저장 특성을 동시에 분석할 수 있다.

Fig. 7은 본 연구에서 활용한 질량유량계(Mass flow contorller, MFC)를 보여준다. 본 연구에서는 기체 수소(GH_2)의 공급량을 정밀하게 계측하기 위해 AFC770 질량유량계(ATOVAC, Gyeong-gido, South Korea)를 사용하였다. 해당 장비는 최대 100 SLM 범위까지 측정이 가능하며, 표준 조건(0 ℃, 1 bar) 기준의 부피 유량을 질량 기준으로 변환하여 제공한다. 이는 단순한 체적 유량계와 달리 기체의 압력 및 온도 변화를 자동 보정할 수 있어, 극저온 실험과 같이 유동 조건이 변동하기 쉬운 환경에서도 안정적인 계측 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서 공급된 수소는 압력 1 bar, 온도 300 K 조건의 정상 수소(Normal Hydrogen)로 설정하였다. AFC770을 통해 계측된 실시간 유량은 시간 적분을 통해 총 공급 기체 수소량(누적 유량)으로 환산될 수 있다. 이 적산값은 액화 과정에서 생산되는 액체수소의 이론적 생산량을 산출하는 데 직접적으로 사용된다. 기체 수소가 모두 액화된다고 가정할 경우, MFM을 통해 측정된 누적 기체 유량에 기체수소와 액체수소의 밀도 비(약 1:800)를 적용함으로써, 실제 액체수소 생산량을 추정할 수 있다. 따라서 AFC770 질량유량계는 단순 유량 측정을 넘어 액체수소 생산 효율 분석 및 수위 예측의 기초 데이터를 제공하는 핵심 장비라 할 수 있다. 본 연구에서 고려한 용기 및 공급 가스 정보는 Table 1에 자세히 나와있다.

Table 1. Deatil information for vessel, supply gas and MFC

Vessel information			
Diameter [mm]	Height [mm]	Total volume [L]	Volume per 1cm [L/cm]
452	1436	230.42	1.605
Property of supply GH_2			
State		Pressure [bar]	Temperatrue [K]
Normal hydrogen		1	300
MFC information			
Supply mass		Accumulation	
Volume [L]	Mass [g]	Volume [L]	Mass [g]
40	3.23084	9571	773.06

4. 결과 및 고찰

Fig. 8은 다중 온도센서를 활용하여 액체수소 수위를 계측한 결과를 보여준다. 본 연구에서 DT-1 센서가 분석에서 제외된 이유는 기체와 액체 상태의 신호 차이가 충분히 뚜렷하게 나타나지 않아, 잠김 시점을 명확히 구분하기 어려웠기 때문이다. 따라서 DT-2와 DT-3의 결과가 대표적으로 제시되었다. 기체 상태에서는 온도 신호가 불안정하게 변동하지만, 센서가 액체수소에 잠기면 약 21 K 부근에서 안정적인 값을 나타내어 액체와 기체 상태를 명확히 구분할 수 있었다. 실제로 DT-2 센서는 약 431.0 min에서 잠김이 확인되었으며, 이때의 기체수소 적산량

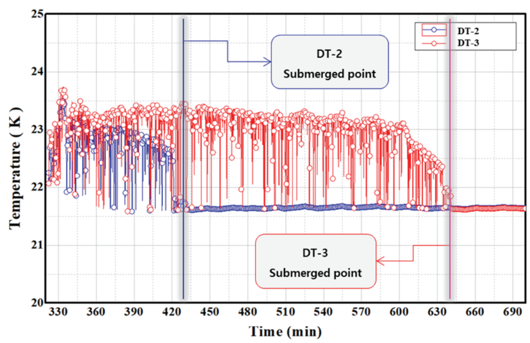
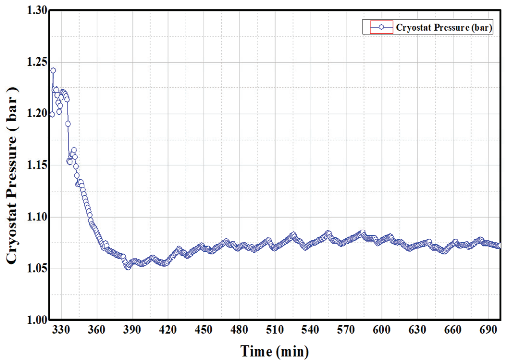


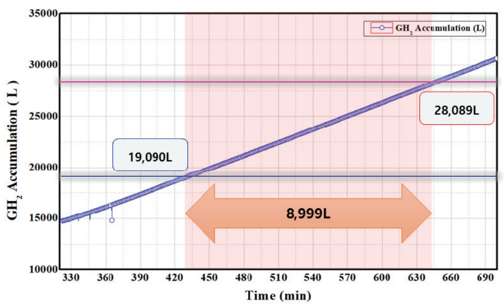
Fig. 8. Temperature results for measuring the water level of liquid hydrogen

은 약 19,090 L, 압력은 1.18 bar였다. 이후 약 210 min이 경과한 시점인 640.83 min에서 DT-3 센서가 잠겼고, 기체수소 적산량은 28,089 L로 증가하였다. 두 센서의 잠김 시점 간 공급된 기체수소의 차이는 약 8,999 L로 계산되었으며, 이 과정에서 압력 변화는 0.01 bar에 불과하여, 압력 조건은 거의 일정하게 유지되었음을 알 수 있다.

Fig. 9는 액체수소 수위 계측 실험에서 압력 변화와 기체수소 적산량의 거동을 나타낸 결과이다. 먼저, 크라이오스탯 내부 압력은 약 1.25 bar에서 시작하여 초기 냉각 구간을 거치면서 빠르게 감소한 뒤, 약 1.05–1.10 bar 범위에서 안정적으로 유지되었다. 특히 DT-2 및 DT-3 센서가 각각 액체수소에 잠기는 구간 동안 압력 변화는 0.01 bar 수준에 불과하였으며, 이는 압력 변동이 수위 판단에 미치는 영향이 매우 제한적임을 보여준다.



(a) Pressure



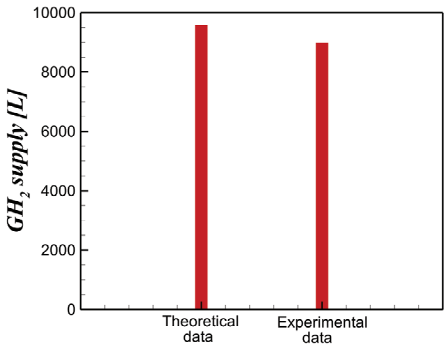
(b) Accumulation

Fig. 9. Pressure and GH_2 accumulation results for measuring the water level of liquid hydrogen

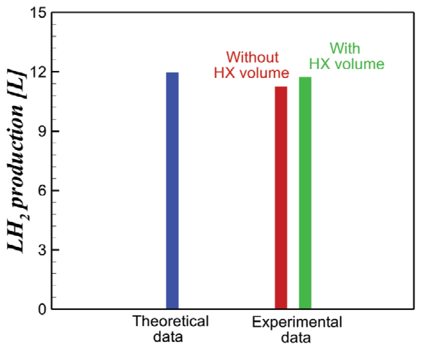
시간에 따른 기체수소의 누적 공급량의 경우, 수위 상승을 직접적으로 뒷받침하는 정량적 근거를 제공한다. DT-2 센서가 잠겼을 때는 약 19,090 L, DT-3 센서가 잠겼을 때는 약 28,089 L의 기체수소가 공급되었고, 두 시점 사이의 차이는 약 8,999 L로 계산되었다. 이는 센서 간 간격에 해당하는 수위 상승을 위해 필요한 기체수소 공급량을 의미한다. 이와 같이 센서 간 간격인 69.7 mm에 대응하는 수위 상승을 위해 필요한 기체수소의 공급량을 직접적으로 산출할 수 있었으며, 이는 온도센서 배열을 활용한 수위 계측 방법의 타당성을 실험적으로 입증한 결과이다. 즉, 복잡한 전용 레벨 센서를 사용하지 않고도 단순한 극저온 온도센서의 응답 특성만으로 액체수소의 수위를 정량적으로 추정할 수 있음을 보여준다.

Fig. 10은 온도센서 잠김에 따른 수위 계측이 질량 적산량과 정합됨을 정량적으로 비교한 결과를 보여준다. 질량유량계로 적분한 이론상의 기체수소 공급량과 DT-2와 DT-3 사이 수위 상승에 대응하는 실험상 기체수소 필요량을 비교했을 때 각각 약 9,571 L 및 약 8,999L 수준으로 서로 근접함을 확인할 수 있다. 이는 해당 구간의 압력이 거의 일정했기 때문에 압력의 영향이 미미하므로 질량 적산값과 수위 변화가 일관되게 대응했음을 보여준다.

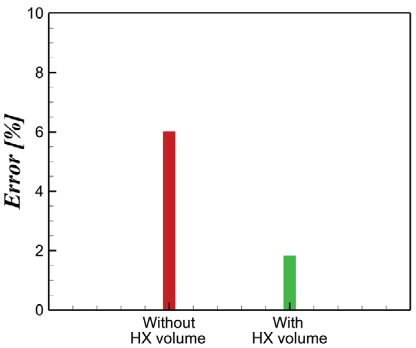
기체수소를 REFPROP (NIST, Gaithersburg, MD, USA)의 밀도로 환산해 얻은 액체수소 생산량을 비교한 경우, 기준(이론) 약 11.96 L와 비교하여 열교환기(HX) 내부 부피를 고려하지 않으면 실험치는 11.24 L로 그보다 작게 계산되었다. 반면 HX 부피 0.5 L를 보정하면 11.74 L로 실험치가 이론에 근접해짐을 알 수 있다. 이를 오차율로 정리하면, HX 부피 미고려 시 약 6.02%, 0.5 L의 열교환기 부피 반영 시 1.84% 이하로 감소하였다. 따라서, 액체 수소의 밀도 및 압력 등의 물리량과 열교환기 부피 등과 같은 용기 내 환경 요인을 반영하면, 극저온 온도센서 배열로 추정한 수위와 액체수소 생산량이 질량 적산량 기반 이론값과 오차범위내에서 잘 일치함을 확인할 수 있다. 결과적으로 해당 방식은 액체수소 수위 계측 연구뿐 아니라, 향후 대형 저장탱크나 수소 모



(a) GH_2 supply



(b) LH_2 production



(c) Errors

Fig. 10. Comparison between theoretical and experimental data

빌리티 연료탱크의 계측 기술로 확장 및 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 극저온 온도 센서를 활용하여 액체 수소 저장용기의 수위를 계측할 수 있는 방법을 제시하고, 소형 액화 시스템에서 그 타당성을 검증하였다. 실험 결과, 온도센서는 기체 상태에서는 불안정한 신호 변동을 나타내고 액체 상태에서는 안정적인 온도를 유지하여, 기체 및 액체 경계면을 명확히 식별할 수 있었다. 특히 센서가 액체에 잠기는 시점을 통해 수위 상승을 단계적으로 추적할 수 있었으며, 이는 복잡한 전용 레벨 센서 없이도 단순한 온도 계측으로 수위를 정량적으로 평가할 수 있음을 입증하였다.

또한 기체수소 적산량을 기반으로 한 환산값과 센서 계측을 통해 추정된 액체수소 생산량을 비교한 결과, 두 방법 간의 정합성이 높게 나타났다. DT-2와 DT-3 센서 간 수위 차이에 대응하는 기체수소 공급량은 약 8,999 L였으며, 이를 밀도변환을 통해 얻은 액체수소 생산량은 이론 계산치와 잘 일치하였다. 더불어 열교환기 내부에 체류하는 부피 약 0.5 L를 보정하면, 이론값 대비 오차율은 2% 이내로 감소하였다. 이는 수소의 물리적 특성과 용기 내 환경 요인을 반영할 경우, 극저온 온도센서를 이용한 수위 계측법의 신뢰성이 매우 높음을 보여준다.

향후 연구에서는 본 연구에서 제시한 방법을 대형 액체수소 저장탱크 및 수소 모빌리티용 연료탱크에 확대 적용할 계획이다. 이를 위해 센서 배열 최적화, 장시간 운용에 따른 신뢰성 평가, 그리고 실제 충전 및 방출 과정에서의 동적 수위 변화를 반영하는 정밀 모델 개발이 필요하다. 또한 열교환기, 배관 및 내부 구조물에 의한 체류 용량 효과를 더욱 정교하게 반영하여, 다양한 운전 조건에서 수위 계측의 정확도를 높이는 것이 향후 연구의 중요한 과제가 될 것이다.

후 기

이 연구는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 기본 사업임(No. 25A01048). 본 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술

기획평가원(Korea Planning & Evaluation Institute of Industrial Technology) 연구비 지원에 의한 연구임 (No. 25A02069).

References

1. Z. Liu, Y. Li, and G. Zhou, “Study on thermal stratification in liquid hydrogen tank under different gravity levels”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 43, No. 19, 2018, pp. 9369-9378, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.001.
2. Z. Liu, G. Zhou, Y. Li, and P. Gao, “Thermal performance of liquid hydrogen tank in reduced gravity”, Advances in Space Research, Vol. 62, No. 5, 2018, pp. 957-966, doi: https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.06.006.
3. 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.
4. Z. Liu and Y. Li, “Thermal physical performance in liquid hydrogen tank under constant wall temperature”, Renewable Energy, Vol. 130, 2019, pp. 601-612, doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.023.
5. G. M. Jeon, J. C. Park, J. W. Kim, Y. B. Lee, D. S. Kim, D. E. Kang, S. B. Lee, S. W. Lee, and M. C. Ryu, “Experimental and numerical investigation of change in boil-off gas and thermodynamic characteristics according to filling ratio in a C-type cryogenic liquid fuel tank”, Energy, Vol. 255, 2022, pp. 124530, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124530.
6. H. R. Wang, B. Wang, Q. W. Pan, Y. Z. Wu, L. Jiang, Z. H. Wang, and Z. H. Gan, “Modeling and thermodynamic analysis of thermal performance in self-pressurized liquid hydrogen tanks”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 47, No. 71, 2022, pp. 30530-30545, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.027.
7. J. H. Lee, S. Y. Hwang, S. J. Lee, and J. H. Lee, “Numerial study of heat flux and BOG in C-type liquefied hydrogen tank under sloshing excitation at the saturated state”, Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 35, No. 5, 2022, pp. 299-308, doi: https://doi.org/10.7734/COSEIK.2022.35.5.299.
8. S. J. Oh, J. Y. Kwon, and J. H. Yoon, “A study on the effect of evaporation of liquid hydrogen tank related to horizontal sinewave”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 2, 2023, pp. 155-161, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.2.155.
9. H. Lv, L. Chen, Z. Zhang, S. Chen, and Y. hou, “Numerical study on thermodynamic characteristics of large-scale liquid hydrogen tank with baffles under sloshing conditions”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 57, 2024, pp. 562-574, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.182.
10. Z. Wang and W. Mérida, “Thermal performance of cylindrical and spherical liquid hydrogen tanks”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 53, 2024, pp. 667-683, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.287.
11. Y. M. Seo, H. W. Noh, T. H. Koo, D. W. Ha, and R. K. Ko, “Development of 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.
12. D. W. Ha, H. W. Noh, Y. M. Seo, T. H. Koo, and R. K. Ko, “Development of LabVIEW-based data storage and monitoring program for a condensed hydrogen liquefaction system”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 5, 2023, pp. 456-464, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.5.456.
13. 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.
14. 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.
15. M. Takeda, H. Nara, K. Maekawa, S. Fujikawa, Y. Matsuno, T. Kuroda, and H. Kumakura, “Simulation of liquid level, temperature and pressure inside a 2000 liter liquid hydrogen tank during truck transportation”, Physics Procedia, Vol. 67, 2015, pp. 208-214, doi: https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.06.036.
16. Z. Li, J. Wu, C. Lv, and M. He, “Analysis and experiment of internal temperature distribution and cooling performance of the liquid hydrogen pump”, Journal of Energy Storage, Vol. 111, 2025, pp. 115365, doi: https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115365.
17. K. Matsumoto, M. Sobue, K. Asamoto, Y. Nishimura, S. Abe, and T. Numazawa, “Capacitive level meter for liquid hydrogen”, Cryogenics, Vol. 51, No. 2, 2011, pp. 114-115, doi: https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.11.005.

18. K. Kajikawa, K. Tomachi, N. Maema, M. Matsuo, S. Sato, K. Funaki, H. Kumakura, K. Tanaka, M. Okada, N. Nakamichi, Y. Kihara, T. Kamiya, and I. Aoki, "Fundamental investigation of a superconducting level sensor for liquid hydrogen with MgB_2 wire", Journal of Physics: Conference Series, Vol. 97, 2008, pp. 012140, doi: https://doi.org/10.1088/1742-6596/97/1/012140.

19. Z. Zhou, J. Wu, S. Zhang, M. Gong, and X. Liu, "Experimental investigation on pressre-control characteristics of liquid hydrogen tank based on active and passive thermodynamic venting system technology", Processes, Vol. 11, No. 6, 2023, pp. 1831, doi: https://doi.org/10.3390/pr11061831.