

실증 조건에서 액화수소 밸브의 테스트 방법에 대한 실험적 연구

최 혁 · 최지원 · 정창우 · 김상민[†]

피케이밸브엔지니어링 기술연구소

Experimental Study on the Test Method for Liquefied Hydrogen Valves Under Demonstration Conditions

HYEOK CHOI, JI-WON CHOI, CHANG-WOO JUNG, SANG-MIN KIM[†]

R&BD Center, PK Valve & Engineering Co., Ltd. 80 Gongdan-ro Seongsan-gu, Changwon-si 51567, Korea

[†]Corresponding author :
smkim@pkvne.com

Received 18 June, 2026

Revised 14 July, 2026

Accepted 16 July, 2026

Abstract >> Liquefied hydrogen (LH₂) service near 20 K can cause boil-off gas generation, pressure rise, and seat leakage in cryogenic valves under heat ingress. Liquid nitrogen testing at 77 K cannot fully represent LH₂ conditions, while direct cryogen testing is limited by cost, system complexity, and safety requirements. This study developed a cryogen-free test method for LH₂ globe valves using a Gifford-McMahon cryocooler, vacuum-insulated chamber, copper-block conduction cooling, helium pressurization, and helium leak detection. A NPS 2 (DN50) Class 150 globe valve was evaluated through room-temperature verification, Liquefied nitrogen (LN₂) testing, 20 K indirect cooling, and post-test recovery verification. The full sequence was repeated three times, and uncertainty was analyzed for helium leak detector-based seat leakage data. The system provided stable 20 K-class conditions and quantitative micro-leakage assessment without direct LH₂ handling.

Key words : Liquefied Hydrogen(액화수소), Liquefied Hydrogen Valve(액화수소 밸브), G-M cryocooler(G-M 냉동기), Seat Leakage(시트누설), Hydrogen Safety(수소 안전성), Valve Test(밸브 시험)

1. 서 론

수소는 탄소중립 사회로의 전환 과정에서 저장 및 활용 확대 가능성이 높은 에너지 자원으로 주목받고 있으며, 국내외적으로 수소 생산, 저장, 운송, 활용 기술 확보를 위한 정책과 기술개발이 활발히 진행되

고 있다¹⁾. 특히 액화수소는 기체수소 대비 높은 체적 밀도를 확보할 수 있어 대용량 저장 및 장거리 운송에 유리하다. 그러나 액화수소는 20 K (-253°C) 부근의 극저온에서 유지되어야 하므로 고도의 단열 기술과 정밀한 온도 제어가 요구된다. 또한 외부 열침입에 의해 발생하는 증발가스(Boil-Off Gas, BOG)는

시스템 효율 저하와 압력 상승의 원인이 되므로 최근에는 극저온 냉동기와 자동제어 기술을 이용한 액화수소 장기 저장 및 zero boil-off 연구가 수행되고 있다²⁾.

이러한 액화수소 시스템에서 밸브는 유체의 차단, 개방, 유량 제어를 담당하는 핵심 기자재이며, 밸브의 기밀 성능은 배관 시스템의 안정성과 운전 효율에 직접적인 영향을 미친다. 특히 시트부에서 발생하는 미세 누설은 BOG 발생량을 증가시켜 시스템의 효율과 성능을 저하시킬 수 있다. 극저온 조건에서는 금속 부품과 비금속 시트 재료의 열 수축 차이, 시트 접촉 압력 변화, 패킹 및 가스켓 물성 변화가 발생하므로 상온 시험만으로는 실제 운전 상태의 기밀 성능을 충분히 판단하기 어렵다. Meng 등³⁾은 액화수소 글로브 밸브의 soft-seal 구조와 Polychlorotrifluoroethylene (PCTFE) 및 Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM)과 같은 비금속 시트 재료의 저온 기밀 특성을 유한요소 해석과 실험을 통해 평가하였다. 또한 액체헬륨을 이용한 내부 냉각 방식의 시험 플랫폼을 구축하여 액화수소 밸브의 누설 특성을 검토하였다. 다만 해당 연구는 Soft-seal 구조의 설계 최적화와 액체헬륨 기반 시험 플랫폼에 중점을 두고 있어, G-M 냉동기 (Gifford-McMahon cryocooler)를 이용한 간접 냉각 방식으로 밸브 완제품의 20 K급 시트 누설을 평가하는 절차에 대해서는 추가적인 검토가 필요하다.

일반적인 극저온 밸브 성능 평가는 액체질소를 이용한 77 K (-196°C)의 온도에서 수행된다. 액체질소 시험은 장치 구성이 비교적 간단하고 안정성이 높지만 실제 액화수소 운전 온도인 20 K와는 큰 온도 차이가 있어 재료 수축, 시트 접촉 상태, 미세 누설 거동을 충분히 재현하기 어렵다. 반면 액체수소, 액체헬륨과 같은 극저온 유체를 직접 사용하는 시험은 실제 운전 온도에 가까운 조건을 구현할 수 있으나 냉매 비용, 기화에 따른 압력 상승, 진공 단열, 안전 관리 문제로 인해 실용적 적용에 제약이 크다.

이러한 한계를 보완하기 위해 Lyu 등⁴⁾은 G-M 냉동기 (Gifford-McMahon Cryocooler)를 이용한 20 K Cryogen-free 밸브 누설 검출 시스템을 개발하고 헬

륨 질량 분석식 누설 검출기를 이용하여 극저온 밸브의 내·외부 누설 평가 가능성을 제시하였다. 다만 해당 연구는 소형의 고압 솔레노이드 밸브와 다수 시편의 순차 시험 시스템에 중점을 두고 있어 액화수소 배관에 사용되는 밸브의 시트 기밀 평가 절차로 적용하기 위해서는 추가적인 검증이 요구된다. 또한 국내에서는 G-M 냉동기를 이용한 수소 예냉 시스템의 실험 및 Computational Fluid Dynamics (CFD) 연구가 수행되었으나^{5,6)}, 이는 수소 가스의 냉각 성능 검증에 초점을 둔 것으로 액화수소 밸브의 20 K 기밀 시험 방법을 직접적으로 다루지는 않았다.

이에 본 논문에서는 G-M 냉동기를 이용한 간접 냉각식 시험 방법을 적용하여 액화수소 글로브 밸브의 20 K 극저온 성능 평가 방법을 제시하였다. 제안된 시험 방법은 시험 밸브를 진공 단열 챔버(Chamber) 내부에 설치하고 G-M 냉동기에서 생성된 극저온 열원에 의해 밸브의 바디 및 시트를 냉각함으로써 실제 액화수소 운전 온도에 근접한 환경을 구현한다. 또한 시험 유체로 헬륨 가스를 사용하고, 20 K 시험에서는 헬륨 누설 검출기를 적용함으로써 액화수소를 직접 사용하지 않고도 밸브 시트부의 미세 누설 특성을 정량적으로 평가하였다. 본 논문은 기존 77 K 액체질소 시험으로는 확인하기 어려운 20 K 조건의 시트 기밀 특성을 평가하기 위하여 동일 시험 절차를 반복 수행하고, 헬륨 누설 검출기 기반 누설 데이터의 불확도 분석을 통해 제안된 시험 방법의 재현성과 적용 가능성을 검토하는 데 목적이 있다.

2. 시험 방법

본 연구에서는 액화수소 글로브 밸브의 극저온 특성을 평가하기 위하여, G-M 냉동기를 이용한 진공 단열 시험 시스템을 구축하였다. 이 방식은 밸브를 진공 단열 챔버 내부에 설치하고 저온으로 냉각된 냉동기 냉각 헤드(Cooler head)와 시험 밸브 사이의 온도 구배로 인해 열전도가 발생하도록 하여 시험 밸브의 열 에너지를 감소시킨다. 이를 통해 시험 밸브를 20 K급으로 냉각시키는 방식이다. 이러한 방식은 안전성과

재현성을 동시에 확보할 수 있다는 장점이 있다.

2.1 시험 장치

시험 장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었으며, 크게 냉각부, 단열부, 제어 및 계측부로 구성되어 있다.

냉각부는 Fig. 1-(3)과 같이 2개의 G-M 냉동기가 장착되어 있다. 본 연구에서 사용한 냉동기는 RSC50T (ULVAC Cryogenics Inc.)로 헬륨 가스를 작동 유체로 사용하는 20 K 급(50 W @20 K, 60 Hz) G-M 냉동기이다. G-M 냉동기와 연결된 압축기[Compressor, Fig. 1-(5)]에서 고압으로 압축된 헬륨을 냉동기로 공급하고 공급된 헬륨 가스를 압축-팽창시키는 반복 사이클 과정을 수행한다. 이때 헬륨이 팽창하는 과정에서 열을 흡수하여 냉각 헤드를 냉각하는 방식으로 극저온 온도를 생성한다. 그리고 칠러[Chiller, Fig. 1-(6)]를 통해 압축기에서 발생한 열을 제거하여 헬륨 순환과 냉동 성능을 안정화한다. 밸브의 냉각은 냉각 헤드, 구리 블록[Fig. 1-(4)], 밸브 바디로 이어지는 전도 열전달 경로에 의해 이루어진다. 전도 열전달량은 Fourier 열전도 법칙에 따라 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다⁷⁾.

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

여기서 q_x 는 전도 열전달률(Heat transfer rate), k 는 재료의 열전도율(Thermal conductivity), A 는 열전달 단면적, dT/dx 는 온도 구배를 의미한다. 또한 구리 블록과 밸브 바디 사이의 전도 및 접촉 열저항을 등가 열저항 R_{th} 로 단순화하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다⁷⁾.

$$q_x = \frac{T_v - T_c}{R_{th}} \quad (2)$$

여기서 T_v 는 밸브 바디부 온도, T_c 는 냉각 헤드 온도이며 R_{th} 는 냉각 헤드-구리블록-밸브바디 사이의 전도 열저항과 접촉 열저항을 포함한 등가 열저항이다. 따라서 구리 블록의 열전도율, 접촉 면적, 체결 상태는 시트부의 냉각 속도와 최종 도달 온도에 직접적인 영향을 미치며, 이를 통해 시트가 위치한 밸브 바디 영역을 20 K급으로 안정적으로 냉각할 수 있다.

단열부는 Fig. 2와 같이 진공 단열 챔버에 시험 밸브가 설치되며 챔버 내부는 로터리 펌프[Rotary pump, Fig. 1-(9)]와 터보 분자 펌프[Turbo molecular pump, Fig. 1-(10)]를 이용하여 1.33×10^{-5} MPa 이하의 진공 상태로 조성하였다. 초기 배기 단계에서는 로터리 펌프를 사용하여 챔버 내부 압력을 저진공 영역까지

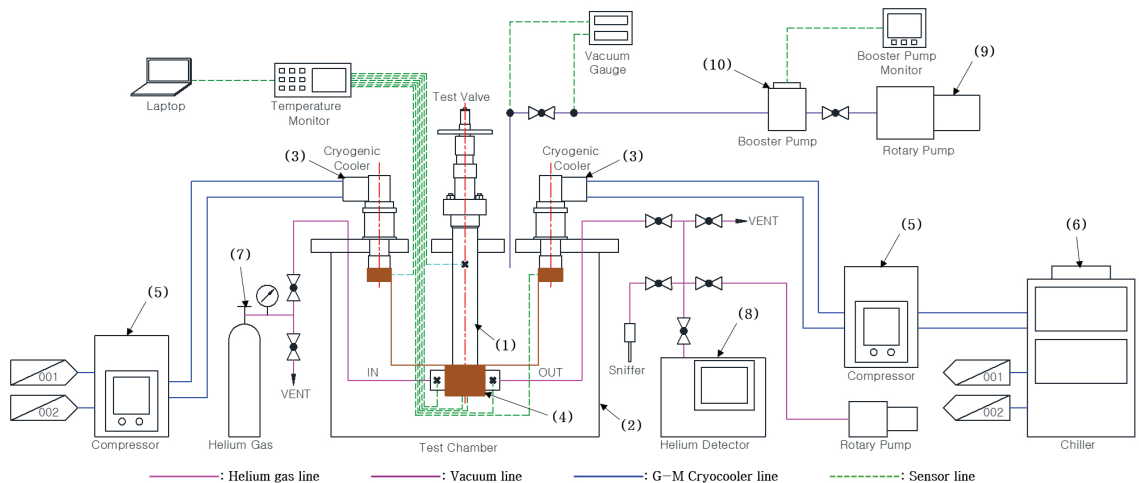


Fig. 1. Schematic diagram of the indirect cooling test apparatus using G-M cryocooler: (1) Test valve, (2) Test chamber, (3) G-M cryocooler, (4) Copper Block, (5) Compressor, (6) Chiller, (7) He gas, (8) Helium leak detector, (9) Rotary pump, (10) Turbo molecular pump

감압하였고, 이후 터보 분자 펌프를 이용하여 잔류 기체를 추가 배기함으로써 목표 진공도를 달성하였다. 이러한 단계적 배기 방식은 고진공 펌프의 안정적인 운전 조건을 확보하고, 시험 중 챔버 내부의 대류 열전달 및 외부 환경 영향을 최소화하기 위한 것이다. 진공 도달 후에는 설정 압력 조건을 유지한 상태에서 성능 평가를 수행하였다.

제어 및 계측부는 진공 단열 챔버 내부에 설치된 시험 밸브의 온도 변화를 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 7개의 실리콘 다이오드(Silicon diodes) 온도 센서를 사용하였으며, 부착 위치는 Table 1에 나타내었다. 온도 센서의 측정 범위는 1.4 K-325 K이며 센서의 신호는 온도 모니터(Temperature monitor)를 통해 모니터링하여 시험 중 밸브 주요 부위의 온도 분포와 열적 안정화 과정을 평가하였다. 또한 밸브 시트부의 누설 성능 평가는 Fig. 1-(7)과 같이 헬륨 가스를 이용하여 수행하였으며 미세 누설 검출을 위해 헬륨 누설 검출기(Helium leak detector)를 사용하여

다. 그리고 시험 유체를 독립된 공급 라인을 통해 압력을 조절할 수 있도록 구성하였다. 이러한 시험 구성은 진공 단열 환경에서 밸브의 온도 응답 특성 및 시트 기밀 성능을 정량적으로 평가하기 위한 것이다.

2.2 시험 절차

본 논문의 시험 절차는 ISO 28921-1, MSS SP-134^{8,9)}와 같은 기존 극저온 밸브 시험에서 일반적으로 적용되는 상온 검증 → 극저온 노출 시험 → 상온 복귀 후 재검증의 순서를 기반으로 구성하였다. 여기에 액화수소 밸브의 실제 운전 온도 조건을 모사하기 위하여 G-M 냉동기를 이용한 20 K 간접 냉각 시험 단계를 추가하였다. 전체 시험은 동일한 시험 압력, 유지 시간, 작동 조건 및 계측 절차를 적용하여 3회 반



Fig. 2. The liquid hydrogen valve within the vacuum chamber

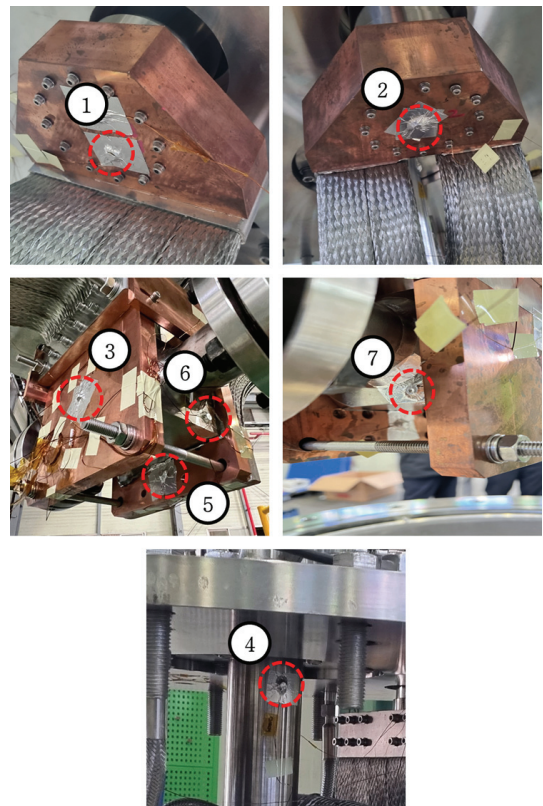


Fig. 3. Detailed view of temperature sensor locations on the test valve

복 수행하였다. 이를 통해 단순히 밸브의 누설 여부를 확인하는 데 그치지 않고, 온도 저하에 따른 시트 기밀 특성 변화, 극저온 노출 후 기밀 성능의 회복 여부, 그리고 제안된 시험 시스템의 냉각 안정성 및 누설 계측 재현성을 함께 평가하고자 하였다.

전체 시험은 Table 2와 같은 사양의 동일한 시험 밸브를 대상으로 상온 초기 검증, 액체 질소 기반 77 K 극저온 시험, G-M 냉동기 기반 20 K 극저온 시험, 상온 복귀 후 재검증의 4단계로 수행하였다. 각 단계에서는 Shell pressure test, Closure seat Test, Operation Test를 수행하였으며, 시험 조건은 Table 3에 나타내었다.

Shell pressure test에서는 시험 밸브를 오픈하여 내부에 헬륨 가스를 가압한 후 Helium leak detector에 스니퍼(Sniffer)를 연결하여 챔버 상부에 노출된 Bonnet flange와 Sealing부의 외부 누설을 확인하였다. 또한 챔버 내부의 밸브 본체, 용접부, 시험 치구에서 누설이 발생할 경우 사전에 형성한 진공 상태가 유지되지 않으므로 챔버 내부 진공도 변화를 함

Table 3. Valve leakage and operation test conditions

No.	Procedure	Test pressure	Detection method
1	Shell pressure test	2.9 MPa (5 min)	Sniffer mode/ Vacuum monitoring
2	Closure (seat) test: Low pressure	0.5 MPa (3 min)	Mass Cylinder, Flowmeter or Helium leak detector
3	Operation test	1.2 MPa (10 cycles)	Functional check
4	Closure (seat) test: High pressure	1.2 MPa (3 min)	Mass Cylinder, Flowmeter or Helium leak detector

게 관찰하여 누설 여부를 판단하였다. Closure seat test의 경우 초기 상온 시험, 77 K 시험 및 상온 복귀 후 재검증 시험에서는 기존 극저온 밸브 시험(ISO 28921-1, MSS SP-134)에서 통용되는 Mass Cylinder와 Flowmeter 방식을 적용하여 누설 여부를 판정하였고, 20 K 시험 전 상온 조건과 20 K 냉각 조건에서는 Helium leak detector를 이용하여 시트부 미세 누설량을 정량적으로 측정하였다.

Table 1. Temperature sensing points

No.	Sensing points
1	#1 Cooler head
2	#2 Cooler head
3	#1 Cooler Valve Body
4	Valve Extension
5	#2 Cooler Valve Body
6	Inlet
7	Outlet

Table 2. Test valve specification

Description	Globe
Class	Class 150
Size	NPS 2 (DN50)
Material	Shell
	Stem
	Disc seat
	Body seat
	A182-F316L
	316L
	PCTFE
	316L

2.2.1 초기 검증 시험(상온)

가장 먼저 상온 조건에서 시험 밸브의 초기 상태를 검증하였다. 시험 전 밸브 외관 손상, 조립 상태, 작동 이상 여부 및 시트 기밀 상태를 확인하였으며, 이후 밸브 내부에 헬륨 가스를 주입하여 Table 3의 조건에 따라 누설 평가를 수행하였다. 초기 검증 시험에서 수행한 Closure seat test는 기존 극저온 밸브 시험에서 통용되는 Mass Cylinder 및 Flowmeter 방식을 적용하여 수행하였다. 따라서 본 단계의 결과는 Helium leak detector 수준의 미세 누설률 정량값이 아니라, 해당 시험방법의 검출 범위 내에서 누설 여부를 판정하기 위한 코드 기반 검증 결과로 해석하였다.

2.2.2 1차 극저온 시험(77 K)

두 번째 단계에서는 액체 질소를 냉매로 사용하여 77 K 조건에서 밸브의 기본 극저온 거동을 평가하였다. Fig. 4와 같이 시험 밸브를 액체 질소에 액침시킨

후, 밸브 본체와 시트부가 충분히 냉각되어 열적 안정 상태에 도달한 것을 확인한 뒤 헬륨 가스를 주입하였다. 77 K 시험에서도 초기 검증 시험과 동일하게 Mass Cylinder 및 Flowmeter 방식을 적용하였으

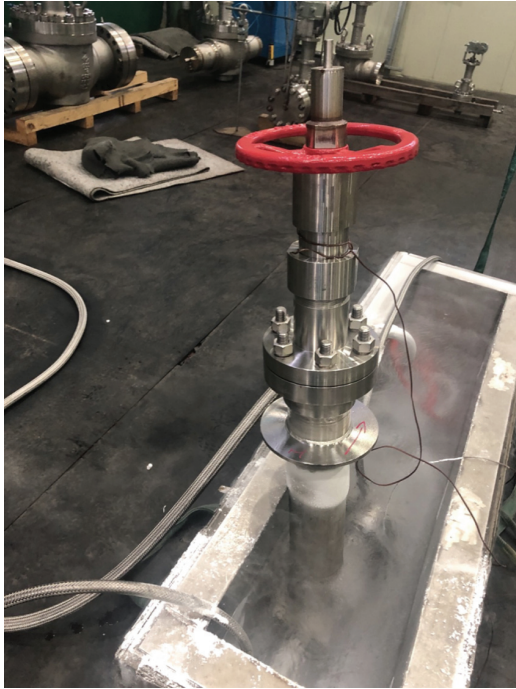


Fig. 4. Cryogenic valve test using liquid nitrogen

며, 이는 액체질소 온도 조건에서 밸브의 기본적인 극저온 기밀 성능을 확인하기 위한 단계이다. 따라서 77 K 시험 결과는 이후 20 K 시험에서 Helium leak detector로 측정한 미세 누설률과 직접 비교하기보다는 기존 극저온 시험 절차에 따른 합부 판정 결과로 활용하였다.

2.2.3 2차 극저온 시험(20 K)

세 번째 단계에서는 실제 액화수소 작동 온도 조건을 모사하기 위하여 G-M 냉동기 기반 간접 냉각식 시험을 수행하였으며, 그 구성은 Fig. 5에 나타내었다. 시험 밸브와 G-M 냉동기를 진공 단열 챔버 내부에 설치 후 밸브 바디와 냉각 헤드를 열적으로 연결하였다. 챔버 내부를 진공 상태로 조성하기 전, 밸브 내부의 잔류 공기를 헬륨으로 치환한 뒤 약 0.2-0.3 MPa의 헬륨 가스를 가압하고 밸브 양단을 차단하였다. 이는 냉각 과정에서 외부 공기 유입을 억제하고 밸브 내부를 헬륨 분위기로 유지함으로써 수분 응결 및 결빙 가능성을 최소화하기 위한 전처리 절차이다.

이후 로터리 펌프와 터보 분자 펌프를 이용하여 챔버 내부를 1.33×10^{-5} MPa 이하의 진공 상태로 유지하였다. 진공 상태가 형성된 후 G-M 냉동기를 작

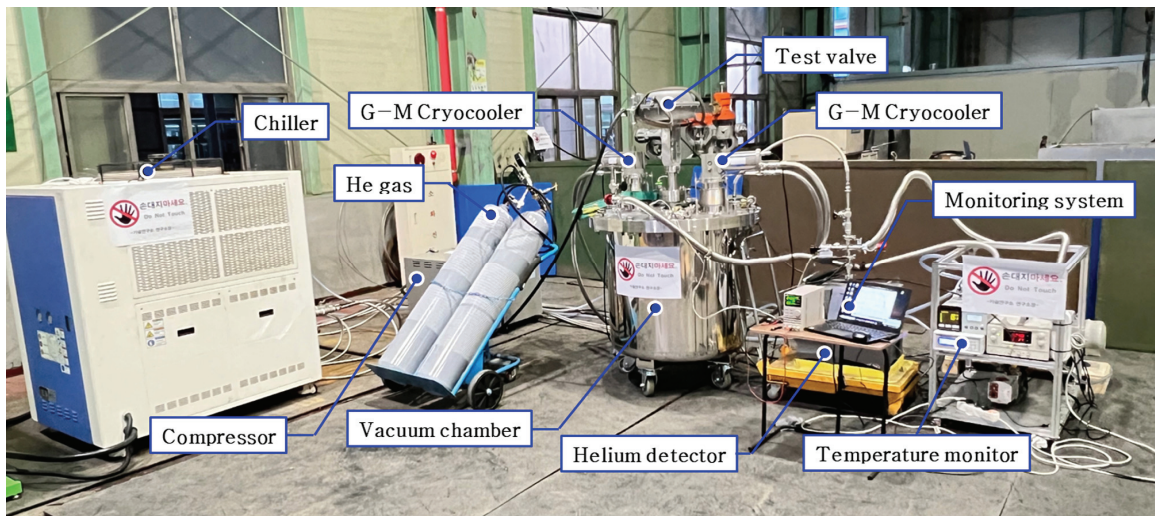


Fig. 5. Test equipment for LH₂ valve demonstration

동시켜 냉각 헤드, 구리 블록, 밸브 바디로 이어지는 전도 열전달 경로를 통해 시트가 위치한 밸브 바디 영역을 20 K급으로 냉각하였다. 시험 중에는 밸브에 부착된 온도 센서를 이용하여 냉각 속도, 온도 분포, 열적 안정화 과정을 함께 확인하였다.

목표 온도 도달 후에는 Table 3의 조건에 따라 Shell pressure test, Closure seat test, Operation test를 수행하였다. 20 K 시험에서는 기존 Mass Cylinder 및 Flowmeter 방식으로는 극저온 조건에서 발생할 수 있는 미세 시트 누설을 정밀하게 정량화하는 데 한계가 있으므로, Helium leak detector를 이용하여 시트 누설률을 $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 단위로 측정하였다. 이때 20 K 냉각 전 상온 상태에서 동일한 Helium leak detector 방식으로 시트 누설률을 먼저 측정하였으며, 이 결과는 Initial proving test와 같은 코드 기반 합부 판정값이 아니라, 20 K 냉각 전후의 미세 누설 변화량을 비교하기 위한 기준값으로 활용하였다. 또한 Helium leak detector를 이용한 누설 측정에서는 시험 유체 주입 후 밸브 온도와 누설 검출기 신호가 안정화된 이후 데이터를 취득하였다. 최종 누설률은 동일 조건에서 3회 반복 측정된 결과를 이용하여 평균값, 표준편차 및 변동계수를 계산하였다. 이를 통해 본 논문에서 제안한 시험 시스템이 액화수소를 직접 사용하지 않고 고도 20 K 극저온 조건에서 밸브 시트 기밀 특성을 정량적으로 평가할 수 있는지를 검증하였다.

2.2.4 상온 복귀 및 재검증 시험(상온)

20 K 시험 종료 후에는 급격한 온도 변화로 밸브 구성품의 열응력 및 변형 손상을 방지하기 위해 밸브를 자연 승온 방식으로 서서히 상온까지 복귀시켰다. 상온 도달 후에는 초기 상온 시험과 동일하게 Mass Cylinder와 Flowmeter 방식으로 누설 여부를 판정하고, 작동 시험을 수행하였다. 따라서 초기 검증 시험과 동일하게 기존 코드 기반 시험 방법의 검출 범위 내에서 누설 여부 확인 결과로 활용하였다. 이는 20 K 시험 전후에 Helium leak detector로 측정한 미세 누설률과 계측 목적 및 검출 민감도가 다른 결과로 구분하여 해석하였다. 이를 통해 극저온 노출 이

후 밸브의 기밀 성능이 영구적으로 저하되었는지 여부를 확인하여 극저온 조건에서의 일시적인 누설 특성뿐만 아니라 극저온 열사이클 이후 밸브의 구조적·기밀적 건전성을 함께 평가할 수 있도록 구성하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

본 논문에서 제안한 G-M 냉동기 기반 극저온 시험 시스템을 이용하여 액화수소용 밸브의 20 K 극저온 시험 가능성을 평가하였다. 시험 결과는 시험 시스템의 20 K급 온도 구현 및 안정성, 시험 유체 주입 후 열적 회복 특성, 반복시험에 따른 누설 계측 재현성, 그리고 Helium leak detector 기반 시트 누설률의 불확도를 중심으로 분석하였다.

3.1 냉각 성능 및 온도 안정성

Fig. 6은 측정한 시험 밸브 바디부의 온도 변화를 나타낸다. G-M 냉동기 기반 시험 시스템은 모든 반복시험에서 시험 밸브의 시트가 위치한 바디 영역을 20 K급 온도 영역까지 냉각할 수 있었다. 20 K급 온도 도달 시간은 Table 4와 같이 평균 16.3 h, 표준편차 1.31 h로 나타났으며, 안정화 이후의 온도 편차는 평균 0.27 K 이내로 유지되었다. 이는 G-M 냉동기, 구리 블록 및 시험 밸브 사이의 전도 열전달 경로가

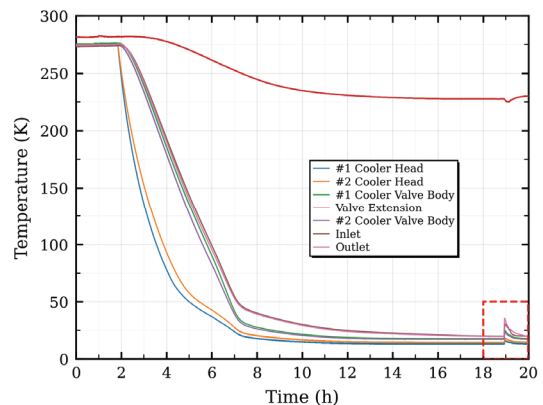
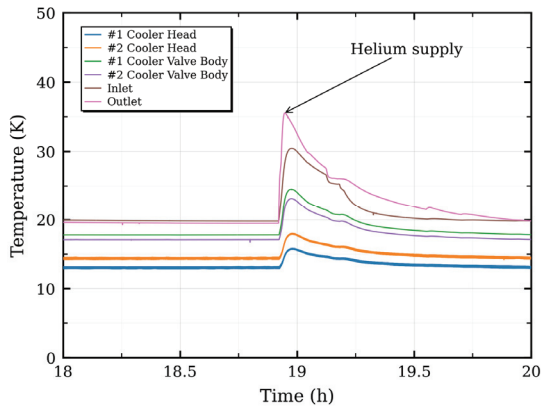


Fig. 6. Temperature-time graph of the test valve

Table 4. Repeatability of cool-down performance

Test No.	Time to reach 20 K-class	Stabilized temperature	Temperature deviation
1	14.8 h	19.4 K	0.20 K
2	17.1 h	20.8 K	0.18 K
3	17.0 h	20.8 K	0.42 K
Mean $\pm$ SD	16.3 $\pm$ 1.31 h	20.3 $\pm$ 0.79 K	0.27 $\pm$ 0.14 K

**Fig. 7.** Temperature-time graph during helium gas supply

반복시험에서도 안정적으로 20 K급 시험 조건을 구현할 수 있음을 의미한다.

3.2 시험 유체 주입에 따른 열적 응답

Fig. 7은 20 K 조건에서 누설 측정을 위해 헬륨 가스를 주입했을 때의 온도 응답을 나타낸다. 헬륨 가

Table 5. Repeatability of thermal response after helium gas supply

Test No.	Initial stabilized temperature	Peak temperature after He supply	Re-stabilization time
1	19.6 K	32.5 K	42.9 min
2	20.5 K	34.2 K	44.0 min
3	20.5 K	36.8 K	48.2 min
Mean $\pm$ SD	20.2 $\pm$ 0.48 K	34.5 $\pm$ 2.15 K	45.0 $\pm$ 2.84 min

스 주입 직후 밸브 온도는 일시적으로 상승하였으나, 3회 반복시험 모두에서 일정 시간 이후 다시 20 K급 시험 온도 영역으로 복귀하였다. 재안정화 시간은 Table 5와 같이 평균 45.0 min, 표준편차 2.84 min으로 확인되었다. 따라서 20 K 조건에서 Helium leak detector를 이용한 누설 측정은 시험 유체 주입 후 열적 안정화가 확보된 이후 수행하는 것이 타당하다.

3.3 누설 및 작동시험 결과

Table 6은 동일 시험 절차를 3회 반복 수행한 누설 및 작동시험 결과를 나타낸다. Initial proving test, 77 K cryogenic test, Recovery test에서는 기존 극저온 밸브 시험에서 통용되는 Mass Cylinder와 Flowmeter 방식을 이용하여 누설 여부를 판정하였으며, 모든 반복시험에서 누설은 확인되지 않았다. 또한 Operation test는 모든 단계에서 정상적으로 수행되었다. 한편 20 K 시험 전 상온 조건과 20 K 냉각 조건에서는 Helium leak detector를 이용하여 시트부 미세 누설

Table 6. Leakage and operation test results

Time step	Detection method	Test 1	Test 2	Test 3	Evaluation
Initial Proving Test @ Ambient Temp.	See Table 3	No leakage/ Good	No leakage/ Good	No leakage/ Good	Pass
Cryogenic Test @ 77 K	See Table 3	No leakage/ Good	No leakage/ Good	No leakage/ Good	Pass
20 K Test @ Ambient Temp.	See Table 3	See Table 7	See Table 7	See Table 7	Quantitative
20 K Test @ 20 K	See Table 3	See Table 7	See Table 7	See Table 7	Quantitative
Recovery Test @ Ambient Temp.	See Table 3	No leakage/ Good	No leakage/ Good	No leakage/ Good	Pass

Table 7. Uncertainty analysis of repeated seat leakage measurements using helium leak detector (Unit: Pa·m³/s, except CV)

Condition	Pressure condition	Test 1	Test 2	Test 3	Mean $\bar{Q}$	s	CV	u_A	u_B	u_c	U
Pre-20 K @ Ambient temp.	Low	0.9 $\times 10^{-6}$	6.2 $\times 10^{-5}$	1.8 $\times 10^{-4}$	8.1 $\times 10^{-5}$	9.1 $\times 10^{-5}$	112%	5.3 $\times 10^{-5}$	2.0 $\times 10^{-9}$	5.3 $\times 10^{-5}$	± 1.1 $\times 10^{-4}$
	High	4.7 $\times 10^{-6}$	5.8 $\times 10^{-5}$	1.9 $\times 10^{-4}$	8.4 $\times 10^{-5}$	9.5 $\times 10^{-5}$	113%	5.5 $\times 10^{-5}$	2.0 $\times 10^{-9}$	5.5 $\times 10^{-5}$	± 1.1 $\times 10^{-4}$
20 K @ 20 K	Low	0.8 $\times 10^{-5}$	3.3 $\times 10^{-5}$	3.0 $\times 10^{-3}$	1.0 $\times 10^{-3}$	1.7 $\times 10^{-3}$	170%	9.9 $\times 10^{-4}$	2.0 $\times 10^{-9}$	9.9 $\times 10^{-4}$	± 2.0 $\times 10^{-3}$
	High	1.4 $\times 10^{-5}$	2.4 $\times 10^{-4}$	2.1 $\times 10^{-2}$	7.1 $\times 10^{-3}$	1.2 $\times 10^{-3}$	170%	7.0 $\times 10^{-3}$	2.0 $\times 10^{-9}$	7.0 $\times 10^{-3}$	± 1.4 $\times 10^{-2}$

를 정량적으로 측정하였으며, 해당 결과는 이후 Table 7에 별도로 정리하였다.

3.4 20 K 시험에서의 시트 누설률 및 불확도 분석

20 K 시험 전 상온 조건과 20 K 냉각 조건에서는 Helium leak detector를 이용하여 시트부 미세 누설률을 정량적으로 측정하였다. 이는 기존 Mass Cylinder 및 Flowmeter 방식으로는 20 K 극저온 조건에서 발생할 수 있는 미세 시트 누설을 정밀하게 정량화하는 데 한계가 있기 때문이다. 본 연구에서는 동일 조건에서 3회 반복 측정한 결과를 이용하여 평균 누설률, 표준편차, 변동계수 및 측정 불확도를 산정하였다. 각 조건에서 측정된 누설률의 평균값 $\bar{Q}$, 표준편차 s , 변동계수 CV는 다음과 같이 산정하였다.

$$\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \quad (3)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n-1}} \quad (4)$$

$$CV = \frac{s}{\bar{Q}} \times 100 \quad (5)$$

여기서 Q_i 는 각 반복시험에서 측정된 누설률이며, n 은 반복시험 횟수이다. 본 연구에서는 동일 조건에

서 3회 반복시험을 수행하였으므로 $n=3$ 으로 하였다. 반복 측정에 따른 Type A 표준불확도 u_A 는 다음과 같이 산정하였다.

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

Type B 표준불확도는 Helium leak detector의 교정 성적서를 통해 산정하였다. 교정성적서에서 기준값과 측정값은 각각 1.7×10^{-8} Pa·m³/s 및 1.7×10^{-8} Pa·m³/s로 동일하게 나타나 별도의 보정은 적용하지 않았다. 또한 교정성적서에 제시된 측정불확도는 4.0×10^{-9} Pa·m³/s이고 포함인자 $k=2$ 이므로, Type B 표준불확도 u_B 는 다음과 같이 산정하였다.

$$u_B = \frac{4.0 \times 10^{-9}}{2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \quad (7)$$

Type A 및 Type B 표준불확도를 독립적인 불확도 성분으로 가정하고, 합성표준불확도 u_c 와 확장불확도 U 는 다음과 같이 계산하였다.

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (8)$$

$$U = 2u_c \quad (9)$$

따라서 Helium leak detector로 측정된 시트 누설률은 다음과 같이 평균값과 확장불확도로 표현하였다.

$$Q = \bar{Q} \pm U \quad (10)$$

Table 7은 20 K 시험 전 상온 조건과 20 K 냉각 조건에서 Helium leak detector로 측정된 시트 누설률의 반복시험 결과와 불확도 분석 결과를 나타낸다. Fig. 8은 Table 7의 평균 누설률과 확장불확도를 그래프로 나타낸 것이다. 3회 반복 측정 결과, 각 조건의 평균 시트 누설률은 $8.1 \times 10^{-5} \sim 7.1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 로 나타났다. 반복 측정값의 변동계수는 112~170%로 비교적 크게 나타났으며, 이는 반복 측정값의 상대산포가 평균값보다 크다는 것을 의미한다. 특히 누설률과 같이 매우 작은 값을 측정하는 경우에는 시트 접촉 상태, 20 K 조건에서의 열적 안정화 정도에 따른 미세한 절대 편차도 상대적으로 크게 반영될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 변동계수만으로 반복성을 판단하지 않고 Type A, B 불확도를 합성한 확장 불확도와 허용 기준 대비 여유도를 함께 고려하여 평가하였다.

Type B 표준불확도는 교정성적서에 근거하여 $2.0 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 로 산정되었으나, 반복시험에 따른 Type A 표준불확도에 비해 매우 작았다. 따라서 본 연구의 합성 표준불확도와 확장불확도는 주로 반복시험 간 누설률 산포에 의해 결정되었다. 20 K 냉각 조건에서 Low pressure 및 High pressure 조건의 평균 누설률은 각각

$1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 및 $7.1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 로 나타났으며, 확장불확도는 각각 $\pm 2.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 및 $\pm 1.4 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 로 산정되었다.

확장불확도를 고려한 최대 누설률($\bar{Q} + U$)은 20 K Low pressure 조건에서 $3.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 20 K High pressure 조건에서 $2.1 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 로 확인되었다. 이는 ISO 28921-1의 Closure seat leakage 허용 기준인 $2.5 \times 10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 보다 낮은 수준이다. 따라서 본 시험 밸브는 계측 불확도를 고려하더라도 20 K급 극저온 조건에서 양호한 시트 기밀 성능을 유지하는 것으로 판단된다. 이 결과는 20 K 극저온 환경에서 밸브 시트부의 미세 누설 변화를 정량적으로 검출할 수 있음을 보여주며, 이를 통해 본 시험 시스템이 온도 조건 변화에 따른 누설 특성 차이를 확인하는 데 활용될 수 있음을 확인하였다.

3.5 Recovery test 결과

20 K 시험 후 밸브를 상온으로 복귀시킨 뒤 수행한 Recovery test에서도 Mass Cylinder와 Flowmeter 방식의 검출 범위 내에서 Seat leakage는 확인되지 않았으며, Operation test도 정상으로 확인되었다. 여기서 Recovery test의 No leakage는 Helium leak detector 기준의 누설률이 0임을 의미하는 것이 아니라, 기존 극저온 밸브 시험에서 통용되는 Mass Cylinder와 Flowmeter 방식에서 누설이 확인되지 않았음을 의미한다. 반면 20 K 시험 전 상온 조건 및 20 K 냉각 조건에서의 Helium leak detector 측정값은 미세 시트 누설률을 정량적으로 평가하기 위한 결과이다. 따라서 두 결과는 계측 목적과 검출 민감도가 다른 시험 결과로 구분하여 해석하는 것이 타당하다. 이를 통해 시험 밸브는 20 K 냉각 조건에서 미세 누설 특성이 정량적으로 측정되었으나, 상온 복귀 후 기존 시험방법 기준의 영구적인 기밀 성능 저하는 확인되지 않았다.

4. 결 론

본 논문에서는 액화수소 밸브의 20 K 극저온 성

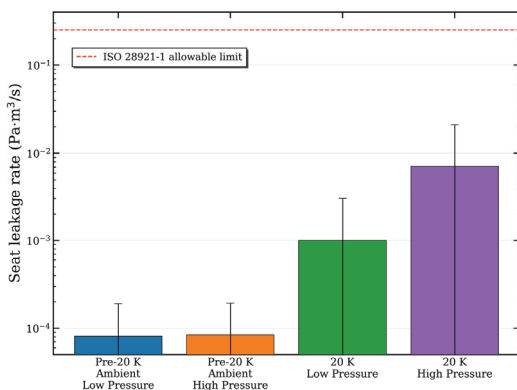


Fig. 8. Mean seat leakage rates and expanded uncertainties measured using a helium leak detector under pre-20 K ambient and 20 K conditions

능을 평가하기 위한 G-M 냉동기 기반 간접 냉각식 시험 방법을 제안하였다. 제안된 시험 시스템은 진공 단열 챔버 내부에 시험 밸브를 설치하고 G-M 냉동기에서 생성된 극저온 열원에 의해 시트가 위치한 밸브 바디 영역을 냉각함으로써 실제 액화수소 운전 온도에 근접한 시험 환경을 구현하는 방식이다. 또한 제안 시험방법의 재현성을 검토하기 위하여 동일 시험 절차를 3회 반복 수행하고, Helium leak detector로 측정된 시트 누설률에 대해 불확도 분석을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) G-M 냉동기 기반 시험 시스템은 시험 밸브의 시트가 위치한 바디 영역을 20 K급으로 냉각할 수 있었으며, 냉각 후에도 목표 온도 영역을 안정적으로 유지하였다. 이를 통해 제안된 시험 방법이 액화수소 밸브의 20 K급 극저온 시험 환경을 반복적으로 구현하는 데 적용 가능함을 확인하였다.
- 2) 20 K 조건에서 상온 헬륨 가스 주입 시 밸브 온도가 일시적으로 상승하였으나, 열적 안정화 이후 다시 시험 온도 영역으로 복귀하였다. 따라서 Helium leak detector를 이용한 20 K 누설 측정에서는 시험 유체 주입 후 열적 안정화 시간을 확보하는 것이 필요함을 확인하였다.
- 3) 20 K 시험 전 상온 조건과 20 K 냉각 조건에서는 Helium leak detector를 이용하여 시트부 미세 누설률을 정량적으로 측정하였다. 20 K 냉각 조건에서 Low pressure 및 High pressure 조건의 평균 누설률은 각각 $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 및 $7.1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 로 나타났으며, 확장불확도는 각각 $\pm 2.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 및 $\pm 1.4 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 로 산정되었다. 확장불확도를 고려한 경우에도 측정 누설률은 ISO 28921-1의 Closure seat leakage 허용 기준보다 낮은 수준으로 확인되었다. 이를 통해 제안된 시험 방법이 20 K 극저온 조건에서 시트부 미세 누설을 구분하여 평가하는데 활용 가능함을 확인하였다.
- 4) 20 K 극저온 시험 후 상온 복귀 재검증 시험에

서는 Mass Cylinder와 Flowmeter 방식의 검출 범위 내에서 Seat leakage는 확인되지 않았다. Recovery test의 No leakage는 Helium leak detector 기준의 누설률이 0임을 의미하는 것이 아니라, 기존 극저온 밸브 시험에서 통용되는 Mass Cylinder와 Flowmeter 방식에서 누설이 확인되지 않았음을 의미한다. 따라서 본 시험 밸브는 20 K 극저온 노출 이후에도 기존 시험방법 기준의 영구적인 기밀 성능 저하를 보이지 않았으며, 동시에 제안된 시험 절차가 극저온 노출 전·중·후의 밸브 상태 변화를 연속적으로 평가하는 데 적합함을 보여준다.

결과적으로 본 논문에서 제안한 시험 시스템은 액화수소를 직접 사용하지 않고도 20 K 극저온 환경을 구현할 수 있으며, Helium leak detector를 이용하여 기존 Mass Cylinder 및 Flowmeter 방식으로 확인하기 어려운 시트부 미세 누설 특성을 정량적으로 평가할 수 있음을 확인하였다. 또한 반복시험과 누설 측정 불확도 분석을 통해 제안된 시험 절차의 재현성과 계측 신뢰성을 검토하였다. 향후에는 다양한 밸브 형식과 크기에 대한 반복 Thermal cycle 시험, CAE 열전달 해석과의 비교, 그리고 Helium leak detector 기반 누설 측정의 표준화된 데이터 처리 절차에 대한 추가 연구가 필요하다.

후 기

이 연구는 2025년 산업통상부의 재원으로 한국산업기술기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구이다(25458023, 액화수소 이송용 75 m³/hr급 통합제어 분배모듈 및 모듈 내장형 밸브 부품화 기술 개발).

본 연구는 국토교통부(MOLIT)/국토교통과학기술진흥원(KAIA)의 “액체수소 저장탱크 및 적하역 시스템 기술개발(R&D) 사업”의 지원을 받아 수행된 연구이다(RS-2026-25516430).

이 논문은 2026년 5월 22일 한국수소및신에너지학회 춘계학술대회에 발표된 논문이다.

References

1. C. H. Kim, G. W. Kim, and H. S. Kim, "Analysis of domestic and foreign policy and technology trends for hydrogen industry development", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 2, 2023, pp. 122-131, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.2.122>.
2. 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>.
3. Z. Meng, S. Jin, M. Yu, and F. Li, "Research and testing on the performance of soft-seal structures in liquid hydrogen globe valves", *Processes*, Vol. 13, No. 12, 2025, 3858, doi: <https://doi.org/10.3390/pr13123858>.
4. B. Lyu, D. Xu, L. Li, A. Nishimura, H. Liu, H. Zhang, T. Wang, R. Huang, and C. Huang, "A 20 K cryogen-free leak detection system for cryogenic valves by using a GM cryocooler", *Cryogenics*, Vol. 117, 2021, pp. 103332, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2021.103332>.
5. D. W. Ha, H. W. Noh, Y. M. Seo, T. H. Koo, and R. K. Ko, "Study on validity of pre-cooling system for hydrogen gas using cryocooler Part I: Experimental investigation and theoretical analysis", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 4, 2023, pp. 350-357, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.4.350>.
6. Y. M. Seo, H. W. Noh, D. W. Ha, T. H. Koo, and R. K. Ko, "Study on validity of pre-cooling system for hydrogen gas using cryocooler Part II: CFD simulation", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 5, 2023, pp. 439-446, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.5.439>.
7. F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, "Principles of heat and mass transfer", 8th ed., John Wiley & Sons, USA, 2017, pp. 100-121.
8. International Organization for Standardization (ISO), "Industrial valves – Isolating valves for low-temperature applications – Part 1: Design, manufacturing and production testing", ISO 28921-1:2022, ISO, Geneva, Switzerland, 2022, Retrieved from <https://www.iso.org/standard/78445.html>.
9. Manufacturers Standardization Society of the Valve and Fittings Industry (MSS), "Valves for cryogenic service, including requirements for body/bonnet extensions", ANSI/MSS SP-134-2025, MSS, USA, 2025, Retrieved from <https://webstore.ansi.org/standards/mss/ansimssp1342025>.