Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 37, No. 5, 2026, pp. 571~580
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2026.37.5.571

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

20 K급 액화수소 모사 조건에서 3종 밸브의 기밀 성능 및 긴급차단밸브 작동 검증

최지원[1] · 최혁[1] · 정창우[1] · 김상민[1] · 이진광[2†]

[1]피케이밸브앤엔지니어링, [2]경상국립대학교

Verification of Leakage Performance of Three Valve Types and Functional Performance of an Emergency Shut-Off Valve Under 20 K-Class Simulated Liquefied Hydrogen Conditions

JI-WON CHOI[1], HYEOK CHOI[1], CHANG-WOO JUNG[1], SANG-MIN KIM[1], JIN-KWANG LEE[2†]

[1]R&BD Center, PK Valve & Engineering Co., Ltd. 80 Gongdan-ro Seongsan-gu, Changwon-si 51567, Korea
[2]Professor, Gyeongsang National University, 48-54 Charyong-ro, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 51391, Korea

[†]Corresponding author :
jklee1@gnu.ac.kr

Received 31 August, 2026
Revised 21 September, 2026
Accepted 28 September, 2026

© The Korean Hydrogen and New Energy Society

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits non-commercial use, sharing, adaptation, distribution, and reproduction in any medium or format, provided the original work is properly cited.

Abstract >> Liquefied hydrogen (LH2) service near 20 K imposes severe sealing requirements on valves, while conventional cryogenic valve standards are generally limited to temperatures down to approximately 77 K. This study applies a previously developed cryogen-free test methodology to three valve types: an emergency shut-off valve, a manual valve, and a check valve. A vacuum-insulated test system using Gifford-McMahon cryocoolers, copper conduction blocks, temperature sensors, helium gas, and a helium mass-spectrometer leak detector was used to reproduce 20 K-class conditions without direct liquid-hydrogen handling. Each valve was evaluated under ambient and 20 K-class conditions for shell and seat leakage, while an operation test was additionally performed for the emergency shut-off valve. Leakage performance was assessed using leakage acceptance criteria adopted from ISO 28921-1:2022. All three valve types satisfied the adopted leakage criteria under both ambient and 20 K-class conditions, and the emergency shut-off valve maintained normal operation under 20 K-class conditions. These results demonstrate the applicability of the cryogen-free 20 K-class test method to the three tested 2-inch valve types.

Key words : Liquefied hydrogen(액화수소), Cryogenic valve(극저온 밸브), Emergency shut-off valve(긴급차단 밸브), Manual valve(수동 밸브), Check valve(체크 밸브), Helium leak detection(헬륨 누설 감지)

2026 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

1. 서 론

수소는 탄소중립 사회로의 전환 과정에서 저장 및 운송 효율을 향상시키기 위한 핵심 에너지원으로 주목받고 있으며, 액화수소는 기체수소에 비해 높은 체적 밀도를 확보할 수 있어 대용량 저장 및 장거리 운송에 유리하다[1,2]. 그러나 액화수소는 약 20 K (-253°C)의 극저온 상태로 유지되어야 하므로 배관 및 기자재에는 큰 온도 구배와 열수축이 발생하며, 이에 따라 밸브의 기밀성과 기능적 건전성에 대한 검증이 요구된다. 특히 밸브는 유체 차단, 비상 시 계통 격리 및 역류 방지 등 적용 목적에 따라 서로 다른 기능을 수행한다.

현재 대표적인 극저온 밸브 규격인 ISO 28921-1:2022[7]는 gate, globe, ball/plug, butterfly 및 check valve를 대상으로 재료, 설계 및 생산시험 요건을 규정하고 있으나 적용 저온 범위는 -50°C에서 -196°C까지이다. 따라서 액화수소의 실제 운전온도인 약 -253°C와는 약 57°C의 온도 차이가 존재한다. ANSI/MSS SP-134-2025 역시 극저온용 금속 밸브의 재료, 설계, 제작 및 압력시험 요건을 제시하고 있으나, 20 K급 액화수소 환경에서의 밸브 성능을 직접적으로 검증하기에는 한계가 있다[7,8]. 따라서 액화수소 배관 시스템에 적용되는 밸브의 신뢰성을 확보하기 위해서는 실제 운전온도에 근접한 조건에서 기밀성과 필요한 기능을 실험적으로 검증할 필요가 있다.

20 K급 밸브 시험에 관한 선행연구로 Lyu 등[3]은 G-M 냉동기와 헬륨 질량분석식 누설검출기를 이용한 cryogen-free 시스템을 구축하고 고압 솔레노이드 밸브의 내·외부 누설을 평가하였다. Meng 등[4]은 액체헬륨 기반 시험 플랫폼을 이용하여 액화수소 글로브 밸브의 soft-seal 구조와 기밀특성을 평가하였으며, Seo 등[5]은 실제 액화수소 생산 및 BOG 환경에서 안전밸브의 반복 작동 특성을 실험적으로 검토하였다. 또한 Veenstra 등[6]은 50 K의 극저온 조건에서 체크밸브의 역누설 및 반복수명 특성을 검토하였다. 그러나 액화수소 배관에 적용되는 서로 다른 기능의 밸브를 동일한 20 K급 시험 플랫폼에서 시험하고, 기밀 성능을 비교·검증한 연구는 제한적이다.

본 연구에서는 선행연구[9]에서 구축한 G-M 냉동기 기반 간접 냉각식 시험 시스템을 공통 플랫폼으로 적용하여 긴급차단밸브(emergency shut-off valve), 수동밸브(manual valve) 및 체크밸브(check valve)의 20 K급 기밀 성능을 실험적으로 검증하였다. 세 종류의 밸브에 공통으로 적용한 20 K급 간접 냉각식 시험 시스템의 개념도는 Fig. 1에 나타내었다. 기존 단일 글로브 밸브 연구가 20 K급 시험방법의 적용 가능성과 미세 누설 계측에 중점을 두었다면, 본 연구에서는 서로 다른 기능과 구조를 갖는 세 종류의 밸브에 동일한 열적·기밀 시험조건을 적용하여 상온 및 20 K급 조건에서의 외부누설과 시트누설 성능을 평가하였다. 또한 긴급차단밸브에 대해서는 20 K급 조건에서의 작동시험을 추가로 수행하여 극저온 환경에서의 차단기능을 함께 검증하였다.

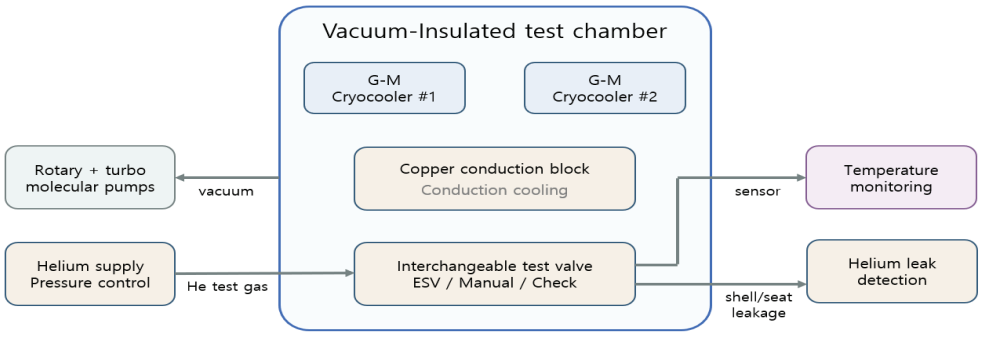


Fig. 1. Schematic of the common 20 K-class cryogenic test system for three valve types

2. 시험 장치 및 방법

2.1 시험시스템

본 연구에서는 선행연구[9]에서 구축한 G-M 냉동기 기반 간접 냉각식 시험 시스템을 적용하였으며, 시험 시스템의 전체 구성은 Fig. 2에 나타내었다. 시험 시스템은 냉각부, 진공 단열부, 시험유체 공급부, 누설 계측부 및 데이터 취득부로 구성되며, 냉각부에는 20 K급 G-M 냉동기(RSC50T) 2기를 사용하였다. 냉각 헤드와 시험 밸브 사이에는 고열전도 구리 블록을 설치하여 전도 열전달 경로를 형성하였으며, 시험 밸브는 진공 단열 챔버 내부에 설치하여 외부 열유입을 최소화하였다. 이를 통해 액화수소를 직접 사용하지 않고 밸브 본체 및 시트 영역을 약 20 K의 극저온 조건으로 냉각하였다.

시험 중 밸브 본체, 유입·유출부 및 냉각 헤드의 온도를 실리콘 다이오드 센서를 이용하여 연속 측정하였다. 온도센서의 배치 및 측정위치는 선행연구[9]에서 적용한 계측 구성을 기준으로 하였으며, 센서의 상세 배치 및 측정위치는 선행연구[9]의 Fig. 3 및 Table 1에 제시되어 있다. 시험유체로는 헬륨 가스를 사용하였으며, 20 K급 조건에서의 미세 시트 누설은 헬륨 누설검출기를 이용하여 정량적으로 측정하였다.

챔버 내부는 로터리 펌프와 터보 분자 펌프를 이용하여 진공 상태로 유지함으로써 외부로부터의 대류 열전달 영향을 최소화하였다. 각 시험에서는 목표 온도에 도달한 후 밸브 주요 측정 위치의 온도 변화와 누설 검출 신호가 안정화된 것을 확인한 뒤 성능 평가를 수행하였다. 또한 서로 다른 밸브 형식에 대해서도 동일한 냉각 및 계측 조건을 적용함으로써 시험 대상에 따른 열적 경계조건의 차이를 최소화하고 시험 결과의 비교 가능성을 확보하고자 하였다.

본 연구에서는 기존 시험 시스템을 긴급차단밸브, 수동밸브 및 체크밸브에 적용할 수 있도록 밸브 형식별 시험 치구와 유체 공급 배관을 구성하였다. 세 종류의 밸브에 동일한 냉각 및 누설 계측 절차를 적용하였으며, 긴급차단밸브에 대해서는 극저온 조건에서의 차단기능을 확인하기 위한 작동시험을 추가로 수행하였다.

이와 같은 공통 시험 구성은 밸브 형식에 따른 구조적 차이에도 불구하고 동일한 열적 및 계측 조건에서 성능을 평가할 수 있도록 하였으며, 각 시험결과의 일관성과 비교 가능성을 확보하는 데 활용되었다.

본 시험방법은 실제 액화수소를 시험유체로 사용하지 않고 G-M 냉동기를 이용한 전도냉각을 통해



Fig. 2. Overall configuration of the 20 K-class cryogenic valve test system



Fig. 3. Emergency shut-off valve, manual valve, and check valve, from left to right

Table 1. Test valve types and primary functions

Valve type	Valve size	Primary function
Emergency shut-off valve	2 inch	Emergency isolation by remote/automatic actuation
Manual valve	2 inch	Operator-controlled isolation
Check valve	2 inch	Passive prevention of reverse flow

밸브를 20 K급 극저온 조건으로 냉각한 후, 헬륨 가스를 이용하여 기밀 및 작동 성능을 평가하는 방법이다. 따라서 실제 액화수소가 밸브 내부와 직접 접촉할 때 발생할 수 있는 대류 및 비등 열전달, 2상 유동 및 유체 물성에 따른 유동 특성까지 재현하는 시험은 아니다. 본 연구에서의 모사 범위는 20 K급 극저온 열적 노출 조건에서 밸브의 기밀 및 작동 성능을 평가하는 데 있으며, 실제 액화수소 유동환경을 완전히 대체하는 시험으로 해석하기에는 한계가 있다. 향후 실제 액화수소 조건과의 비교시험을 통해 본 시험방법의 적용범위를 추가적으로 검증할 필요가 있다.

2.2 시험 대상 밸브 및 평가 개념

시험 대상은 액화수소 계통에서 서로 다른 기능을 수행하는 긴급차단밸브, 수동밸브 및 체크밸브의 세 종류로 구성하였다. 본 연구에 사용된 각 밸브의 종류와 주요 기능은 Table 1에 정리하였고, 시험 밸브의 형상은 Fig. 3에 나타내었다. 세 밸브는 각각 비상차단, 수동 차단 및 역류 방지 기능을 대표하도록 선정하였다. 시험 시스템의 구성과 기본 시험조건은 선행연구[9]에서 검증한 방법을 기준으로 동일하게 적용하였으며, 밸브 형식에 따라 필요한 시험 치구와 배관 구성만 조정하였다. 세 종류의 밸브에는 동일한 20 K급 시험 플랫폼을 적용하여 상온 및 20 K급 조건에서 외부누설과 시트누설 성능을 평가하였으며, 긴급차단밸브에 대해서는 추가적으로 작동시험을 수행하였다.

수동밸브의 기본 구조와 시험대상의 사양은 선행연구[9]에 제시된 것과 동일하다. 본 연구의 시험대상 밸브에는 비금속 시트 재료인 PCTFE가 적용되었으며, 긴급차단밸브 및 체크밸브는 액화수소용 개발품으로 세부 내부구조 및 시트 형상은 개발 설계정보에 해당하므로 상세한 구조정보의 제시는 제한하였다.

2.3 시험 절차

본 연구의 전체 시험절차는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 상온 초기 검증시험과 G-M 냉동기를 이용한 20 K급 극저온 시험의 두 단계로 구성하였다. 상온 초기 검증시험에서는 시험 전 각 밸브의 기본 상태를 확인한 후 외부누설 및 시트누설 시험을 수행하였으며, 긴급차단밸브에 대해서는 추가적으로 작동시험을 수행하였다.

상온시험 완료 후 시험 밸브를 진공 단열 챔버 내

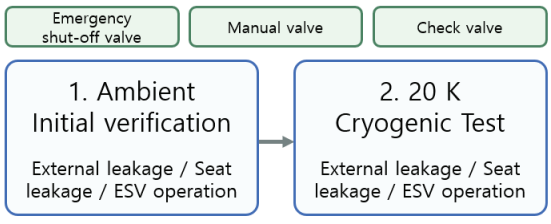


Fig. 4. Test sequence for the three types of LH2 valves

부에 설치하고, 밸브 및 시험배관 내부의 잔류 공기를 고순도 헬륨으로 치환하였다. 이후 챔버 내부를 진공 상태로 유지하면서 G-M 냉동기를 운전하여 냉각 헤드, 구리 블록 및 밸브 본체로 이어지는 전도 열전달 경로를 통해 시험체를 냉각하였다. 밸브 본체 및 시트 인접부의 온도가 20 K급 목표 온도 영역에 도달하고 안정적으로 유지되는 것을 확인한 후 극저온 시험을 수행하였다.

본 연구에서 20 K급 시험조건은 액화수소의 운전 온도인 약 −253°C를 목표온도로 설정하였으며, ISO 28921-1:2022에서 제시하는 시험 중 온도변동 허용기준을 참고하여 온도 안정화 여부를 판단하였다. 온도센서는 선행연구[9]의 계측 구성을 기준으로 냉각 헤드, 밸브 본체, 유입부, 유출부 및 밸브 익스텐션에 부착하였다. 각 측정위치에서는 냉각 경로에 따른 온도 차이가 나타날 수 있으므로, 밸브의 시트가 위치한 본체 영역이 약 20 K의 목표온도에 도달하고 안정적으로 유지되는 것을 확인한 후 누설 및 작동시험을 수행하였다.

20 K급 시험에서는 상온시험과 동일하게 외부누설 및 시트누설 성능을 평가하였다. 시험유체인 헬륨 가스 공급으로 인해 밸브 온도가 일시적으로 상승하는 경우에는 온도와 누설 검출 신호가 다시 안정화된 후 측정값을 취득하였다. 긴급차단밸브에 대해서는 20 K급 조건에서 반복 개폐시험을 추가로 수행하여 극저온 환경에서도 정상적인 구동 및 차단기능이 유지되는지를 확인하였다. 체크밸브의 시트누설시험은 정상 유동방향과 반대 방향으로 시험압력을 적용하는 역압 조건에서 수행하였으며, 상온 및 20 K급 조건에서 동일한 방법으로 시트누설량을 측정하였다. 수동밸브 및 체크밸브에 대해서는 본 연구에서 별도의 작동시험을 수행하지 않았으며, 상온 및 20 K급 조건에서의 기밀 성능을 중심으로 평가하였다.

2.4 시험 합격 기준

본 연구에서 수행한 외부누설 및 시트누설 시험의 합격 여부는 ISO 28921-1:2022[7]의 저온 밸브 시험에서 제시하는 누설 허용기준을 준용하여 평가하였다. 다만 ISO 28921-1의 적용 저온범위는 -50°C에서 -196°C이며, 본 연구의 20 K급 시험온도는 이에 포함되지 않는다. 따라서 본 연구에서는 ISO 28921-1의 기준을 20 K급 액화수소 조건에 대한 직접적인 규격 적합성 판정기준으로 적용하지 않고, 시험 밸브의 기밀 성능을 평가하기 위한 합격기준으로 준용하였다.

외부누설의 경우 ISO 28921-1:2022[7]의 저온 시험에서 제시하는 허용기준을 준용하였다. Stem 부위의 허용 누설률은 stem 직경 1 mm당 1.78×10^{-7} Pa·m³/s 이하이며, bonnet 또는 body joint 부위의 누설은 50 ppmv 이하이다. 또한 시험 중 측정된 누설이 해당 허용값을 10초 이상 초과하지 않는 경우 Pass로 판정하였다.

시트누설의 경우 시험유체로 헬륨을 사용하였으며, ISO 28921-1:2022[7] Table A.1의 Class 150 허용 누설률을 평가기준으로 준용하였다. 일반 차단밸브 계열의 허용 누설률은 50 mm³/s × DN, 체크밸브는 250 mm³/s × DN이다. 따라서 본 연구의 DN50, Class 150 시험밸브에 대하여 긴급차단밸브 및 수동밸브의 최대 허용 시트누설률은 2,500 mm³/s(약 2.5×10^{-1} Pa·m³/s), 체크밸브의 최대 허용 시트누설률은 12,500 mm³/s (약 1.25 Pa·m³/s)로 설정하였다.

작동시험은 긴급차단밸브에 대해서만 수행하였다. 상온 및 20 K급 조건에서 설정된 시험압력 하에 반복 개폐가 정상적으로 이루어지고, 시험 중 비정상적인 걸림이나 구동 이상 없이 요구되는 차단기능이 수행된 경우 Pass로 판정하였다. 수동밸브 및 체크밸브는 본 연구에서 별도의 작동시험을 수행하지 않았으므로 해당 항목은 평가 대상에서 제외하였다.

이와 같이 상온 및 20 K급 시험에 동일한 누설 판정기준을 적용함으로써 온도조건 변화에 따른 각 밸브의 기밀 성능을 일관된 기준으로 평가하고자 하였다. 또한 작동시험의 경우 실제 시험을 수행한 긴급차단밸브에 한정하여 평가함으로써 시험범위와 성능판정항목을 명확히 구분하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

선행연구[9]에서는 G-M 냉동기 기반 간접 냉각식 시험 시스템의 20 K급 냉각 성능과 온도 안정성을 평가하고, 헬륨 가스 공급에 따른 시험체의 온도 상승 및 재안정화 특성을 반복시험을 통해 검토하였다. 이를 통해 액화수소를 직접 사용하지 않고도 밸브 시험체를 20 K급 극저온 상태로 냉각하고, 헬륨 가스를 이용하여 누설 성능을 평가할 수 있는 시험방법의 적용 가능성을 확인하였다.

따라서 본 연구에서는 시험 시스템 자체의 냉각 성능이나 시험유체 공급에 따른 열적 응답에 대한 별도의 정량적 분석보다는, 선행연구[9]에서 검증한 시험방법을 서로 다른 밸브 형식에 확대 적용하는 데 중점을 두었다. 각 시험에서는 밸브가 20 K급 목표 온도 영역에 도달하고, 헬륨 가스 공급에 따른 온도 변화가 안정화된 것을 확인한 후 성능시험을 수행하였다.

긴급차단밸브, 수동밸브 및 체크밸브에는 동일한 냉각 및 누설시험 절차를 적용하였으며, 각 밸브의 냉각 과정과 헬륨 가스 공급에 따른 온도 변화를 확인하여 시험조건의 형성 여부를 검토하였다. 이후 상온 및 20 K급 조건에서 기밀 성능을 평가하였으며, 긴급차단밸브에 대해서는 추가적으로 반복 작동시험을 수행하여 극저온 환경에서의 차단기능을 확인하였다.

3.1 긴급차단밸브 시험의 온도 변화

Fig. 5는 긴급차단밸브의 냉각 과정에서 측정한 온도 변화를 나타낸다. G-M 냉동기를 이용한 간접 냉각을 통해 밸브 본체 및 시트 인접부가 20 K급 목표 온도 영역에 도달하였으며, 누설 및 작동시험을 수행하기 위한 열적 안정상태가 확보되는 것을 확인하였다. 밸브의 냉각시간과 안정화 특성에 대한 별도의 성능 평가는 수행하지 않았으며, 본 온도 이력은 20 K급 시험조건이 정상적으로 형성되었음을 확인하기 위한 자료로 활용하였다. 이를 통해 간접 냉각 방식으로 목표 극저온 시험조건을 안정적으로 구현할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 6은 20 K급으로 냉각된 긴급차단밸브에 시험유체인 헬륨 가스를 공급하였을 때의 온도 변화를 나타낸다. 헬륨 가스 공급에 따라 밸브 온도가 일시적으로 상승한 후 다시 20 K급 시험온도 영역으로 안정화되는 것을 확인하였다. 이러한 시험유체 공급에 따른 열적 응답은 선행연구[9]에서 상세히 검토된 바 있으며, 본 연구에서는 온도 변화가 안정화된 이후 누설 및 작동시험을 수행하였다. 그래프 후반부의 온도 상승은 시험 종료 후 승온 과정에 해당한다.

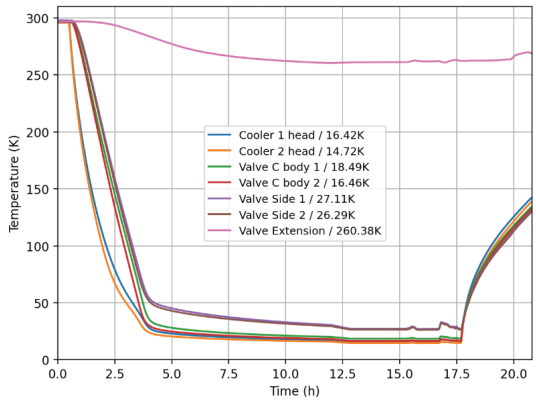


Fig. 5. ESV temperature during cryogenic test

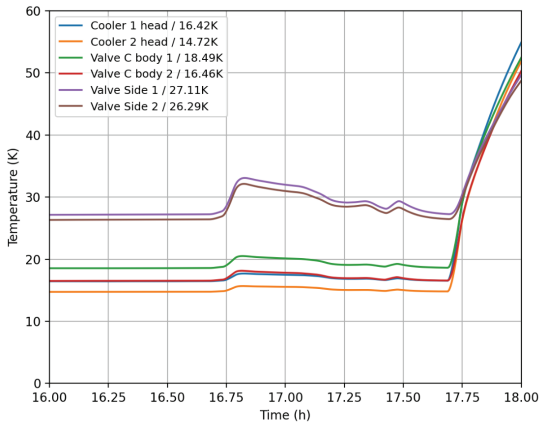


Fig. 6. ESV temperature during helium supply

3.2 수동밸브 시험의 온도 변화

Fig. 7은 수동밸브의 냉각 과정에서 측정한 온도 변화를 나타낸다. 긴급차단밸브와 동일한 G-M 냉동기 기반 간접 냉각방식을 적용하였으며, 시험체가 20 K급 목표 온도 영역에 도달하는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 밸브 형식 간 냉각시간을 직접 비교하기보다 각 시험체의 목표 극저온 조건 도달 여부를 확인하였다.

Fig. 8은 20 K급 조건에서 수동밸브에 헬륨 가스를 공급하였을 때의 온도 변화를 나타낸다. 헬륨 가스 공급 직후 온도가 일시적으로 상승하였으나 이후 다시 시험온도 영역으로 안정화되었으며, 안정화 이후 누설시험을 수행하였다. 그래프 후반부의 온도 상승은 시험 종료 후 승온 과정에 해당한다.

3.3 체크밸브 시험의 온도 변화

Fig. 9는 체크밸브의 냉각 과정에서 측정한 온도 변화를 나타낸다. 동일한 G-M 냉동기 기반 간접 냉각방식을 적용하였으며, 밸브 본체 및 시트 인접부가 20 K급 목표 온도 영역에 도달하는 것을 확인하였다. 체크밸브는 내부 disc와 시트의 접촉상태가 기밀성능에 직접적인 영향을 미치므로, 충분한 극저온 조건에 노출된 상태에서 누설시험을 수행하였다.

Fig. 10은 20 K급으로 냉각된 체크밸브에 헬륨 가스를 공급하였을 때의 온도 변화를 나타낸다. 헬륨 가스 공급 직후 온도가 일시적으로 상승하였으나 이후 다시 시험온도 영역으로 안정화되었으며, 안정화 이후 누설시험을 수행하였다. 그래프 후반부의 온도

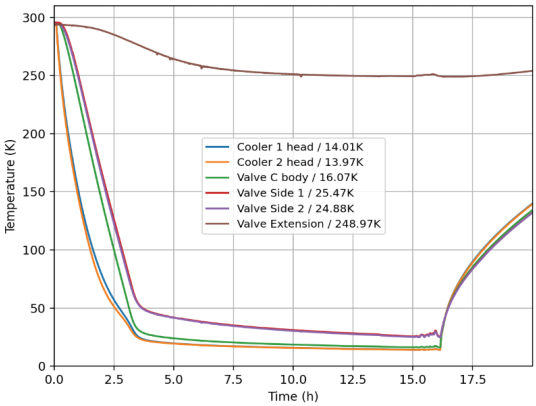


Fig. 7. Manual valve temperature during cryogenic test

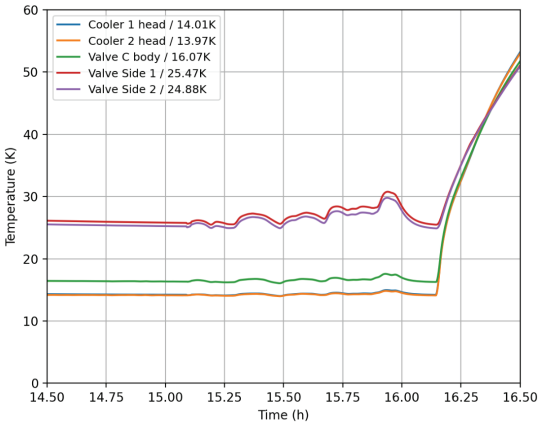


Fig. 8. Manual valve temperature during helium supply

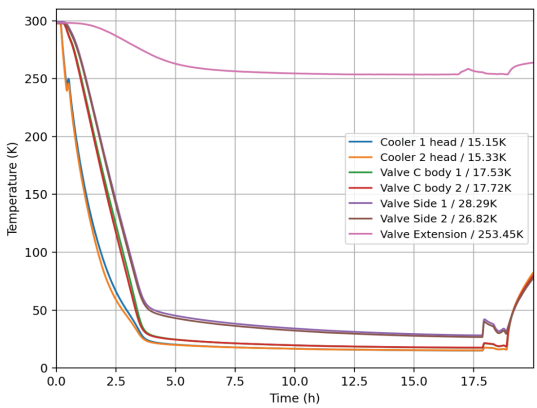


Fig. 9. Check valve temperature during cryogenic test

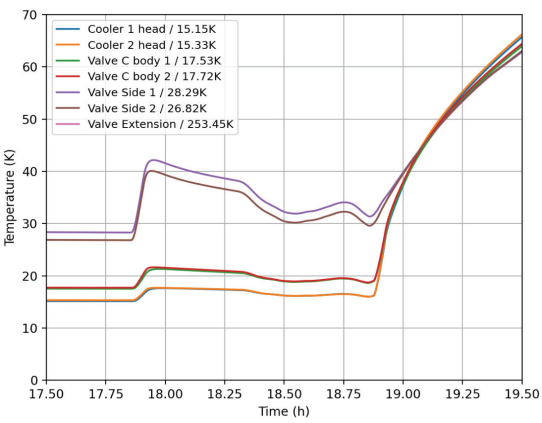


Fig. 10. Check valve temperature during helium supply

상승은 시험 종료 후 승온 과정에 해당한다.

3.4 누설 및 작동시험 결과 및 고찰

각 시험의 합격 여부는 2.4절에서 제시한 ISO 28921-1:2022[7]의 누설 허용기준을 준용하여 평가하였다. 각 시험의 시험조건은 Table 2에, 긴급차단밸브, 수동밸브 및 체크밸브의 상온 및 20 K급 시험결과는 Table 3에 종합하여 나타내었다. 본 연구의 시험압력은 액화수소 밸브의 한국선급(KR) 인증시험에 적용한 검사·시험 절차를 기반으로 선정하였다. 해당 절차는 ISO 28921-1을 주요 기준으로 하며, 시험대상 밸브의 압력등급 및 긴급차단밸브의 작동 차압조건을 고려하여 외부누설시험, 시트누설시험 및 작동시험의 압력조건을 설정하였다. 본 연구에서는 Class 150, 2 inch 밸브를 시험대상으로 하였으며, 상기 기준에 따라 Table 2의 시험압력을 적용하였다. 또한 Table 2는 각 시험항목의 시험조건을 정리한 것으로, 표의 배열순서는 실제 시험 수행순서를 의미하지 않으며 실제 시험절차는 Fig. 4에 나타내었다. Table 3에는 외부누설 시험결과와 함께 헬륨 누설검출기를 이용하여 측정한 저압 및 고압 조건의 시트 누설량을 정량적으로 제시하였다.

긴급차단밸브의 외부누설은 상온 및 20 K급 조건에서 모두 검출되지 않았다. 상온에서 측정된 시트누설량은 저압 및 고압 조건에서 각각 0.7×10^{-6} Pa·m³/s와 3.7×10^{-6} Pa·m³/s였으며, 20 K급 조건에서는 각각 0.9×10^{-5} Pa·m³/s와 2.4×10^{-5} Pa·m³/s로 측정되었다. 20 K급 조건에서 상온 대비 시트누설량이 증가하는 경향이 나타났으나, 모든 측정값은 상기 준용 평가기준보다 충분히 낮은 수준으로 확인되었다. 또한 반복 작동시험에서도 정상적인 개폐 및 완전 폐쇄가 확인되어 극저온 조건에서 요구되는 차단기능이 유지됨을 확인하였다.

수동밸브 역시 상온 및 20 K급 조건에서 외부누설이 확인되지 않았다. 시트누설량은 상온에서 저압 1.5×10^{-5} Pa·m³/s, 고압 5.9×10^{-5} Pa·m³/s였으며, 20 K급 조건에서는 각각 3.1×10^{-5} Pa·m³/s와 1.4×10^{-4} Pa·m³/s로 측정되었다. 긴급차단밸브와 마찬가지로 20 K급 조건에서 시트누설량이 증가하였으나, 상기 준용 평가기준 이내로 확인되어 기밀 성능을 만족하였다. 수동밸브에 대해서는 별도의 작동시험을 수행하지 않았으므로 해당 항목은 N/A로 평가하였다.

Table 2. Valve leakage and operation test conditions

Procedure	Test pressure	Holding time/cycles	Detection method
Shell pressure test	2.9 MPa	5 min	Sniffer mode/ Vacuum monitoring
Operation test (ESV only)	1.2 MPa	10 cycles	Functional check
Closure (seat) test: Low pressure	0.5 MPa	3 min	Helium leak detector
Closure (seat) test: High pressure	1.2 MPa	3 min	Helium leak detector

Note: Check valve seat leakage was evaluated under reverse-pressure conditions.

Table 3. Leakage and operation test results under ambient and 20 K conditions (seat leakage unit: Pa·m³/s)

Valve type	Test condition	Shell test	Seat test (low)	Seat test (high)	Operation test	Overall evaluation
Emergency shut-off valve	Ambient	Not detected	0.7×10^{-6}	3.7×10^{-6}	Pass	Pass
	20 K	Not detected	0.9×10^{-5}	2.4×10^{-5}	Pass	Pass
Manual valve	Ambient	Not detected	1.5×10^{-5}	5.9×10^{-5}	N/A	Pass
	20 K	Not detected	3.1×10^{-5}	1.4×10^{-4}	N/A	Pass
Check valve	Ambient	Not detected	1.1×10^{-5}	6.4×10^{-5}	N/A	Pass
	20 K	Not detected	4.0×10^{-4}	6.1×10^{-4}	N/A	Pass

Note: “Not detected” indicates that no external leakage was detected within the detection capability of the applied test method.

체크밸브의 경우에도 상온 및 20 K급 조건에서 외부누설은 확인되지 않았다. 상온에서의 시트누설량은 저압 및 고압 조건에서 각각 1.1×10^{-5} Pa·m³/s와 6.4×10^{-5} Pa·m³/s였으며, 20 K급 조건에서는 각각 4.0×10^{-4} Pa·m³/s와 6.1×10^{-4} Pa·m³/s로 측정되었다. 세 밸브 중 체크밸브에서 상대적으로 높은 시트누설량이 측정되었으나, 체크밸브에 적용한 준용 평가기준 이내로 확인되었다. 따라서 20 K급 극저온 조건에서도 역방향 압력조건에서 요구되는 시트 기밀 성능이 유지됨을 확인하였다.

이상의 결과로부터 세 종류의 밸브 모두 상온 및 20 K급 조건에서 외부누설이 검출되지 않았으며, 시트누설량은 20 K급 조건에서 상온 대비 증가하는 경향을 나타냈으나 모두 준용한 평가기준을 만족하였다. 특히 실제 측정된 누설량을 통해 본 연구에서 시험한 서로 다른 구조와 기능의 3종 밸브에 대해서도 선행연구[9]의 20 K급 간접 냉각식 시험방법을 이용한 정량적 기밀 성능 평가가 가능함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 액화수소 시스템에 적용되는 긴급차단밸브, 수동밸브 및 체크밸브를 대상으로 G-M 냉동기 기반 20 K급 간접 냉각 시험방법을 적용하여 상온 및 20 K급 조건에서의 기밀 성능을 평가하였으며, 긴급차단밸브에 대해서는 추가적으로 작동 성능을 검증하였다. 특히 선행연구[9]에서 단일 밸브를 대상으로 검증한 시험방법을 서로 다른 구조와 기능을 갖는 세 종류의 밸브에 확대 적용하고, 동일한 시험환경 및 평가기준을 적용하여 20 K급 조건에서의 성능을 비교·검토하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

1) G-M 냉동기, 진공 단열 챔버, 전도 냉각 블록 및 헬륨 누설 계측으로 구성된 간접 냉각식 시험 시스템을 긴급차단밸브, 수동밸브 및 체크밸브에 적용하였으며, 세 종류의 시험체 모두 20 K급 목표 온도 영역에 안정적으로 도달함을 확인하였다.
2) 긴급차단밸브, 수동밸브 및 체크밸브는 상온 및 20 K급 조건에서 수행한 기밀시험에서 ISO 28921-1:2022[7]의 누설 허용기준을 준용한 평가기준을 모두 만족하였다. 20 K급 조건에서 시트누설량은 상온 대비 증가하였으나, 준용 평가기준 이내의 기밀 성능을 유지하였다.
3) 긴급차단밸브는 상온 및 20 K급 조건에서 수행한 반복 작동시험에서 정상적인 개폐와 완전 폐쇄가 확인되었으며, 20 K급 극저온 환경에서도 구동 이상이나 기계적 간섭 없이 요구되는 차단기능을 유지하였다.
4) 선행연구[9]에서 단일 글로브 밸브를 대상으로 검증한 20 K급 간접 냉각식 시험방법을 2 inch 긴급차단밸브, 수동밸브 및 체크밸브에 확대 적용하였으며, 서로 다른 기능을 갖는 3종 밸브에 동일한 20 K급 시험방법을 적용할 수 있음을 확인하였다. 또한 동일한 시험 플랫폼에서 각 밸브의 기밀 성능을 일관된 조건으로 평가할 수 있음을 확인하였다.

향후에는 20 K급 환경에서 금속 시트 및 다양한 비금속 시트를 적용한 밸브를 대상으로 시트 재질 및 디스크-시트 구조에 따른 누설 특성을 비교·검토하고, 반복 열·작동 사이클에 따른 기밀 성능 변화를 평가할 예정이다. 또한 다른 사이즈 및 구조의 밸브로 시험대상을 확대하여 본 시험방법의 적용범위를 추가로 검증할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업통상부(MOTIR)/한국산업기술기획평가원(KEIT)의 “액화수소 이송용 75 m³/hr급 통합제어 분배모듈 및 모듈 내장형 밸브 부품화 기술 개발” 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-25458023).

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

References

1. C. Kim, G. Kim, and H. 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. 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.
4. 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, pp. 3858, doi: https://doi.org/10.3390/pr13123858.
5. Y. M. Seo, H. W. Noh, T. H. Koo, D. W. Ha, and R. K. Ko, “Experimental study on the operation of pressure safety valve in the liquid hydrogen environment”, Results in Engineering, Vol. 28, 2025, pp. 107328, doi: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107328.
6. T. T. Veenstra, G. C. F. Venhorst, J. F. Burger, H. J. Holland, H. J. M. ter Brake, A. Sirbi, and H. Rogalla, “Development of a stainless steel check valve for cryogenic applications”, Cryogenics, Vol. 47, No. 2, 2007, pp. 121-126, doi: https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2006.10.004.
7. 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.
8. 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, Alexandria, VA, USA, 2025, Retrieved from https://webstore.ansi.org/standards/mss/ansimsssp1342025.
9. H. Choi, J. W. Choi, C. W. Jung, and S. M. Kim, “Experimental study on the test method for liquefied hydrogen valves under demonstration conditions”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 37, No. 4, 2026, pp. 314-325, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2026.37.4.314.