Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 5, 2025, pp. 552~561
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.5.552

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

누설방지를 위한 극저온용 파일럿형 안전릴리프 밸브의 금속 디스크 형상 설계

강수정[1] · 조은진[1] · 한승호[1†] · 민경범[2]

[1]동아대학교 기계공학과, [2](주)썬프리시즌

Shape Design of Metal Disc in Cryogenic Pilot-Operated Safety Relif Valve for Leak-Tightness

SUJUNG KANG[1], EUNJIN JO[1], SEUNGHO HAN[1†],GYEONGBEOM MIN[2]

[1]Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, 37 Nakdong-daero 550beon-gil, Saha-gu, Busan 49315, Korea
[2]SUNPRECISION CO.,LTD, 105, Daejeo-jungang-ro 286beon-gil, Gangseo-gu, Busan 46702, Korea

[†]Corresponding author :
shhan85@dau.ac.kr

Received 1 September, 2025
Revised 19 October, 2025
Accepted 20 October, 2025

Abstract >> The contact pressure distribution and effective contact area at the metal-to-metal contact surface between the seat and disc of a cryogenic pilot-operated safety relief valve (POSRV) were rigorously quantified through finite element structural analysis. The investigation revealed that the establishment of a fully continuous, uniform contact pressure profile—corresponding to a 100% angular contact pressure ratio along a defined circumferential radius—is a necessary criterion for eliminating uninterrupted non-contact pathways, thereby ensuring leak-tightness. In circumstances where such continuous contact cannot be sustained under cryogenic operating conditions, a parametric case study was conducted to assess the influence of disc geometry modifications on the resultant contact characteristics. On the basis of these findings, an disc geometry was proposed, capable of maintaining reliable sealing integrity under cryogenic environments, thereby providing a viable design strategy for enhancing the leakage resistance of POSRVs in advanced cryogenic applications.

Key words : Angular contact pressure ratio(접촉 압력 각도비), Cryogenic environment(초저온 환경), Leak-tightness(누설방지), Metal disc(금속 디스크), Metal-to-metal contact(금속간 접촉), Pilot-operated safety relief valve (파일럿형 안전릴리프 밸브), Shape design(형상설계)

1. 서 론

수소는 상온에서 기체 상태로 존재하며 밀도가 낮고 부피가 크므로, 대용량의 저장 및 운송을 위하여 고압으로 압축하거나 -253℃ 이하의 극저온 환경에서 액화시켜야 한다[1]. 그러나 극저온용 저장용기 및

배관에 열침투가 발생하는 경우 액체수소는 기화되어 증발 가스(boil-off gas)가 발생하며, 이는 저장용기 및 배관의 압력 상승으로 폭발 사고를 야기할 수 있다[2]. 따라서, 저장용기 및 배관 내의 적절한 압력을 유지하기 위한 안전릴리프 밸브의 설치가 필수적이며[3], 특히 수소 저장용기에 설치되는 안전릴리프 밸브의 경우 -253℃의 환경에서 작동되므로 극저온 환경을 고려한 설계가 이루어져야 한다. 안전릴리프 밸브는 시트와 디스크의 접촉을 통해 기밀이 이루어지며, 일반적으로 탄성력이 우수한 고무나 플라스틱이 시트 소재로 사용된다[4]. 그러나, 극저온 환경에서는 소재 수축과 경화로 접촉 거동이 변화하여 누설이 발생할 수 있어, 이를 방지하기 위하여 물성 변화가 작고 내구성이 우수한 금속 시트(metal seat)가 활용된다.

금속 시트의 접촉 거동은 금속 간 접촉(metal-to-metal contact)으로 인하여 접촉면에 불균일한 접촉 압력을 유발하여 누설 방지에 취약한 단점이 있고, 특히 액체수소의 증발가스가 누설되면 경제적 손실은 물론 안전사고를 야기하므로 금속 시트 및 디스크 간의 접촉 성능 향상을 통한 누설방지에 대한 연구가 수행되고 있다. Lee 등[5]은 저장탱크에 저장된 액화 암모니아가 냉각시스템의 이상으로 안전밸브를 통해 고압의 암모니아 가스가 누출되는 경우 냄새의 역치 및 농도 수준에 따른 확산 유동을 정량적으로 평가하였다. 암모니아 가스의 누출을 유동해석으로 구현함으로써, 초기 확산 양상부터 공기와의 희석 과정까지의 전반적 흐름을 분석하여 누출 사고 발생 시의 안전관리 및 대피 대응 방안을 제시하였다. Lee 등[6]은 고압 가스 유량 제어용 글로브 밸브를 대상으로 금속 시트와 디스크 간의 접촉 거동을 구조해석으로 평가하여 누설의 발생 여부를 판단하였다. 고압 가스의 누설방지를 위하여 금속 시트에 홈을 가공하여 디스크 접촉 시, 시트의 수직방향 변형을 유도함으로써 충분한 금속 간 접촉면적 확보가 가능한 형상설계를 수행하였으며, 홈의 개수 및 형상을 설계변수화한 최적화를 통하여 균일한 접촉 면적 확보가 가능한 금속 시트 형상을 제안하였다. Ahn 등[7]은 상온 및 극저온 환경에서 버터플라이 밸브를 대상으로 순압력 및 역압력이 작용할 때의 금속 시트와 디스크 간의 접촉 압력을 분석하였다. 극저온 환경에서 불균일한 열 수축으로 인해 금속 시트 및 디스크 간 접촉부 중앙에 간극이 발생하며, 이는 누설의 직접적인 원인이 된다는 것을 수치해석으로 입증하였다. 아울러 누설 시험을 통해 시험 기준을 만족하는 상온 대비 극저온에서는 압력 증가에 따라 누설율이 증가함을 확인하였다.

상기 연구 사례는 밸브 금속 시트의 형상에 따른 접촉 압력 변화만을 고려하여 고압 가스의 누설 기준 충족 여부를 평가한 것으로, 금속 시트 및 디스크 형상과 극저온 환경은 물론 누설에 직접적인 영향을 미치는 접촉면적을 모두 고려한 연구는 여전히 부족한 실정이다.

본 연구에서는 극저온용 파일럿형 압력안전 밸브의 차폐 시 금속 시트와 디스크의 금속 간 접촉부의 압력 및 면적을 구조해석을 통해 수치적으로 산출하였다. 또한, Perrson 등[8]의 Percolation 이론 및 Kazeminia 등[9]의 연구에서 제시한 동심 원기둥 모델(concentric cylinders model)에 기반하여 상온 및 극저온에서 동일반경 내 접촉면에 작동압력을 초과하는 균일한 접촉면적이 발생하지 않을 시, 누설이 발생한다는 새로운 누설 방지 조건을 제시하였다. 아울러 극저온 환경에서 누설방지를 위해 필요한 접촉면적의 확보가 불가한 경우, 이를 개선하기 위하여 금속 디스크(metal disc)의 형상 변경에 따른 접촉 면적의 변화를 고려한 사례 연구를 수행하였으며, 이를 통해 극저온의 환경에서도 누설방지가 가능한 금속 디스크의 형상을 제안하였다.

2. 대상체 및 누설 방지 조건

2.1 파일럿형 안전릴리프 밸브

파일럿형 안전릴리프 밸브(pilot-operated safety relief valve, 이하 POSRV)는 배관 또는 저장용기 내부의 압력을 일정하게 유지시켜, 과도한 압력 상승에 의한 위험으로부터 설비 및 인명을 보호할 목적으로

사용된다[10].

Fig. 1은 POSRV가 적용된 저장용기 시스템의 모식도로서, 주로 LNG 추진 선박 및 터미널 등의 저장용기에 사용되고 있다. POSRV는 Fig. 2의 단면도와 같이 크게 메인 밸브와 파일럿 밸브로 구성되어 있으며, 이 중 메인 밸브는 유체 차단 및 방출 기능을 직접 수행하며 배관 및 저장용기의 과압을 제어하는 핵심 요소이다. 메인 밸브는 바디(body), 시트(seat), 디스크(disc), 디스크 홀더(disc holder), 가이드(guide) 및 리턴 스프링(return spring) 등으로 이루어져 있으며, 입구 측 작동유체의 압력에 직접 반응하여 개폐 작동을 수행한다. 한편, 파일럿 밸브는 메인 밸브의 작동을 보조 제어하는 장치로 바디(body), 상부 및 하부 시트(upper and lower seat), 파일럿 디스크(pilot disc), 스템(stem), 블로우다운 조절기(blowdown adjuster) 및 파일럿 스프링(pilot spring) 등으로 구성된다.

메인 밸브는 입구 측 작동유체의 압력에 의한 개방력과 바디 및 디스크 홀더 사이의 공간인 디스크 홀더 챔버(disc holder chamber) 내 압력에 의한 폐쇄력에 의해 개폐가 이루어지며, 파일럿 밸브는 압력 작동 보조 장치로써 메인 밸브의 개폐를 제어한다[11]. 메인 밸브의 입구 측 압력이 상승하면 파일럿 밸브에 연결된 튜빙(tubing)에 의해 파일럿 밸브 내부는 물론 디스크 홀더 챔버까지 동일 압력이 공급되어 파일럿 상부 시트에 안착된 상태의 파일럿 디스크 하부에 설정 압력(set pressure)을 초과하는 과도한 압력이 작용하기 시작한다. 작용 압력이 설정 압력을 초과할 시, 파일럿 디스크의 개방과 함께 벤트로 유체 방출이 이루어지고 메인 밸브의 디스크 홀더 챔버 내부 압력은 대기압 수준으로 감소한다. 이에 따라 메인 밸브에서는 폐쇄력 대비 유압에 의한 개방력이 상대적으로 증가하게 되고, 시트에 안착된 상태를 유지하고 있던 메인 밸브의 디스크가 최종적으로 개방되며 압력 해소가 이루어진다[12].

POSRV는 설정 압력 이하의 정상 압력 상태의 경우 기존의 스프링 구동 압력방출 밸브에 비해 큰 밀폐력을 가지고 있으며[13] 설정 압력의 최대 98%까지

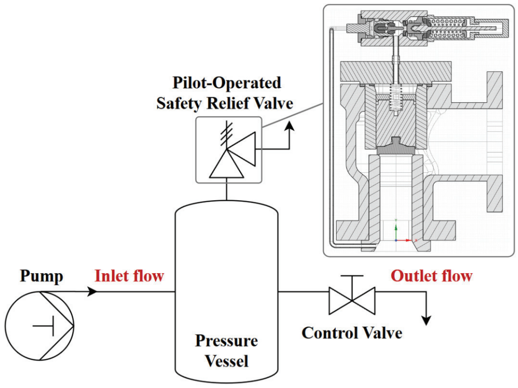


Fig. 1. Schematic illustration of storage vessel system equipped with POSRV

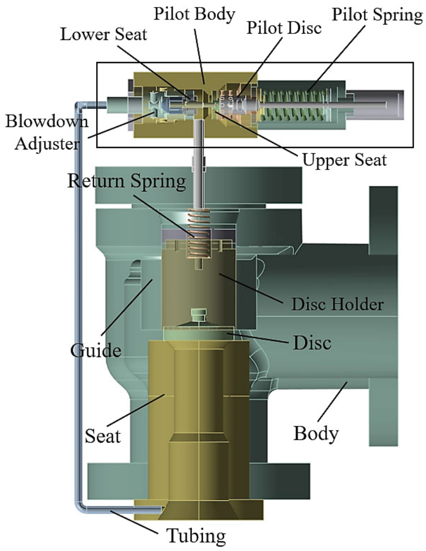


Fig. 2. Cross-sectional view of POSRV

시트 및 디스크 간의 기밀성을 확보할 수 있으나[14], 극저온 환경에서는 소재 수축 및 경화로 인한 접촉 거동의 변화로 디스크와 시트 간의 접촉 압력이 감소하고, 밀폐력의 감소에 따른 누설이 발생할 수 있다. 따라서, 상온뿐만 아니라 극저온에서도 디스크와 시트의 접촉면에 작동압력을 초과하는 접촉 압력 및 균일한 접촉면적이 발생하여 누설이 발생하지 않도록 하는 설계가 필요하다.

2.2 누설 방지 및 평가 기준

POSRV의 메인 밸브 시트 및 디스크 간 기밀성을 확보하기 위해서는 평균 접촉 압력뿐만 아니라 접촉 면적의 분포 및 연속성 또한 함께 고려되어야 한다. 실제 누설은 미시적 관점에서 시트와 디스크 간의 비접촉 영역이 연속된 경로를 형성할 경우 발생하게 된다. 이를 이론적으로 설명한 모델로는 Persson 등의 Percolation 이론[8]이 있으며, 유체의 압력을 초과하는 접촉 응력이 발생하는 접촉 표면이 전체 접촉 표면의 40%를 초과할 시 충분한 누설 방지가 이루어지며 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{A(\zeta_c)}{A_0} \approx 0.4 \tag{1}$$

여기서 $A(\zeta_c)$는 임계 관찰 스케일 ζ_c에서의 실제 접촉 면적을, 그리고 A_0는 접촉하고 있다고 가정한 전체 면적을 의미한다. Percolation 이론에서는 전체 접촉률이 60%를 초과하더라도, 나머지 40%의 비접촉 영역이 연속적인 경로(percolation path)를 형성할 경우 유체가 이를 따라 관통함으로써 누설이 발생할 수 있다고 설명한다. 즉, 식 (1)의 조건을 만족하더라도, 비접촉 영역이 연결되어 연속적인 통로를 형성하는 경우에는 여전히 유체의 누설 가능성이 존재함을 제시하였다.

아울러, Kazeminia 등의 연구[9]에서는 접촉 구조를 동심원상의 미세 채널들의 집합으로 모델링하여 누설 유량을 정량적으로 분석하였다. 해당 연구에서는 서로 다른 반경의 접촉면을 가지는 패킹 링 구조에 대해 동심 원기둥 모델(concentric cylinders model)을 제시하였으며, 각 동심원 채널 간극에서의 유체 유동이 전체 누설 유량에 영향을 미친다는 점을 이론적으로 설명하였다. 특히, 동일 반경 상에서의 연속된 비접촉 아크가 차지하는 등가 원주 길이 및 간극 높이와 누설 유량 간의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{cc} \propto \varkappa(r) \cdot h(r) \tag{2}$$

여기서 L_{cc}는 채널을 통해 흐르는 질량 유량, $\varkappa$는 동심 원기둥 채널 상의 연속된 비접촉 아크가 형성된 등가 원주 길이, h는 채널 간 간극, 즉 높이이다. 이때, r은 동일 반경 내에서의 값을 의미하며, $\varkappa$는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\varkappa = \frac{1}{2}[N_{cc}(2R_{P,i} + W_p) - W_p] \tag{3}$$

여기서 N_{cc}는 연속적 비접촉 아크 경로가 형성된 동심 원기둥 채널의 개수, $R_{P,i}$는 내부 패킹 링의 반경, 그리고 W_p는 패킹링의 폭이다. 이때, $2R_{P,i} + W_p$은 각 채널이 차지하는 평균 원주의 길이를 의미하며, W_p는 마지막 원통의 외곽 부분에 해당하는 폭을 보정하기 위한 항을 나타낸다.

동심 원기둥 모델은 특정 반경에서 비접촉 상태가 형성될 경우 해당 채널을 통해 누설 경로가 발생할 수 있음을 시사하며, 이는 미시적 관점에서의 누설이 채널 단위로 발생함을 설명한다. 아울러, 연속적 비접촉 채널의 개수가 전체 누설 유량에 영향을 미침을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 Percolation 이론 및 동심 원기둥 모델을 고려한 누설 평가 기준을 제시하기 위하여, 접촉 압력 각도비(angular contact-pressure ratio, ACR) 개념을 제안하였다. ACR의 계산을 위하여 금속 디스크 및 시트 간의 접촉면을 기준으로, 원주 방향을 1° 간격으로 정수화하여 각 각도에서의 최대 접촉 압력을 추출하였다. 해당 압력이 작동 압력을 초과하지 못하는 경우 그 구간에서 누설이 발생한다고 가정하였으며, 동일 반경 내 접촉면에서의 ACR이 100% 미만인 경우 누설이 발생한다고 판단하였다. 이와 같은 누설 판단 기준은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{Count_r[P_{contact}(r,\theta) \geq P_{fluid}]}{360} \times 100\,(\%) \tag{4}$$

여기서 r은 접촉 압력 평가가 이루어지는 동일 반경의 위치를, θ는 원주 방향 각도(°)를 나타내며, P_{fluid}는 유체의 작동 압력을 의미한다. $P_{contact}(r,\theta)$

는 반경 r과 각도 θ에서의 접촉 압력으로 정의되며, $Count_r$는 해당 반경 r에서 조건을 만족하는 각도 구간의 개수를 나타낸다.

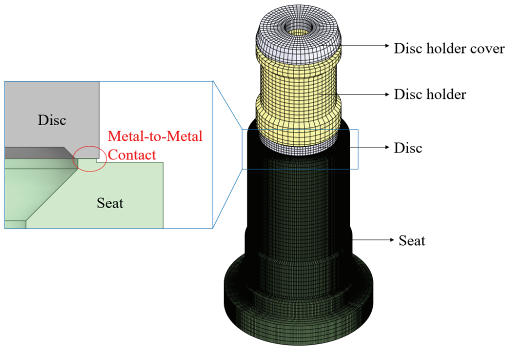
Percolation 이론에서는 60% 이상의 접촉률을 초과해도 비접촉 영역이 연속적인 경로를 형성하면 누설이 발생할 수 있음을 강조하며, 동심 원기둥 모델은 특정 채널(반경)에서의 연속된 비접촉 상태가 누설 경로를 형성할 수 있으며 누설 경로가 형성된 채널의 수가 많을수록 전체 누설 유량이 증가함을 시사한다. 따라서, 특정 동일 반경 상의 균일하고 불연속이 없는 ACR 100%의 접촉 분포를 확보함으로써, 연속된 비접촉 경로의 형성을 차단하는 것이 누설방지의 필수 조건임을 제시하였다.

3. 금속 간 접촉부의 접촉 압력 평가

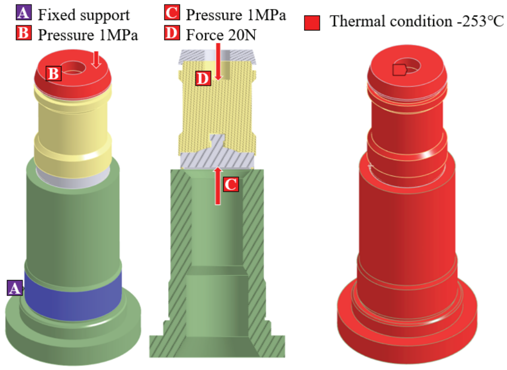
3.1 구조해석 전처리 및 해석기법의 검증

POSRV의 메인 밸브 금속 시트와 디스크의 금속 간 접촉부의 접촉 압력 분포를 분석하여 누설방지 조건의 충족 여부를 평가하기 위하여 상용 해석 프로그램인 ANSYS Workbench 2024 R2를 활용하여 구조해석을 수행하였다[15].

해석 시간의 단축을 위하여 누설이 발생하는 금속 간 접촉부인 디스크 및 시트, 그리고, 유체의 압력이 작용하는 디스크 홀더, 디스크 홀더 커버만을 대상으로 3차원 모델링 작업하였으며, 격자의 구성과 해석을 위한 하중 및 경계조건은 Fig. 3과 같다. 적용된 격자는 해석의 정확도를 높이기 위하여 육면체 요소가 사용되었으며, 노드 및 요소 수는 각각 983,421개 및 212,367개이다. 경계조건으로 바디와 결합되는 시트의 측면부에 Fixed Support를 적용하여 모든 자유도를 구속하였으며, 수소 안전밸브의 누설 시험 조건인 작동 압력 1 MPa을 하중조건으로 하여 유체와 접하는 부위인 홀더 커버 상부, 디스크 홀더 홈부 및 디스크 하부에 적용하였다. 디스크 홀더의 홈에는 리턴 스프링의 초기 장력인 20 N을 부과하고, POSRV 부품의 온도를 액체수소 증발 가스의 온도



(a) Grid generation



(b) Loads and boundary conditions

Fig. 3. Pre-processing of structural analysis

인 –253°C로 적용하였다. 접촉부에 마찰 조건을 고려하였으며, 사용 소재인 SUS316의 마찰 계수인 0.3[16]을 부여하였다.

금속 시트 및 디스크 간 접촉 특성을 구조해석을 통해 예측함에 있어, 해석 방법의 타당성 검증을 위해 본 연구에서 적용한 하중, 경계 조건과 유사한 Yang 등[17]의 연구결과를 벤치마킹 대상으로 선정하였다. Yang 등은 접촉 압력을 수치해석으로 구하고 실험을 통해 얻어진 누설량 간의 상대적 경향성을 비교하였다. 해당 문헌에서 제시한 형상 및 수치해석 조건을 기반으로 구조해석을 수행하였으며, 얻어진 결과는 Table 1과 같다. 작동 압력이 0.6∼2.2 MPa인 4가지 조건에서 구조해석으로 얻어진 최대 접촉 압력은 Yang 등이 구한 결과와의 비교를 통하여 최대 1.54%의 오차율로 나타나 서로 일치하는 것을 확인하였다.

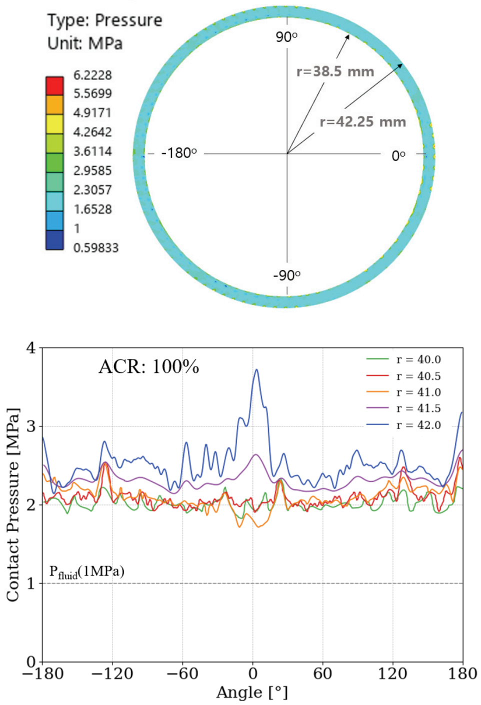
Table 1. Contact pressures obtained from the structural analysis in comparison with benchmarking data[17] for validation of the analysis method

Load Conditions [MPa]	Contact Pressure [MPa]		Error
	Benchmark [Yang et al.]	Simulation	
0.6	351.8	357.3	1.54%
1.4	667.8	670.1	0.34%
1.8	786.2	793.2	0.89%
2.2	886.2	890.1	0.43%

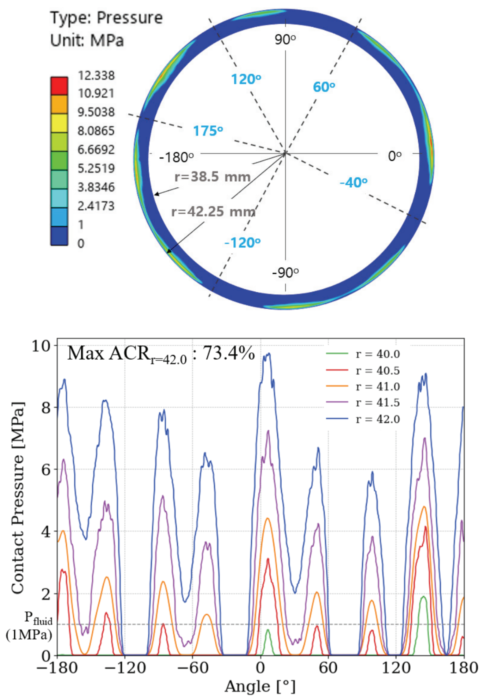
3.2 구조해석 결과

Fig. 4는 상온 및 –253℃에서 수행한 구조해석으로 얻어진 금속 시트와 디스크의 접촉면에서 반경별 원주방향 각도에 따른 접촉 압력 분포를 나타낸 것이다. 구조해석 결과로부터 접촉면을 기준으로 식 (4)를 통해 ACR이 판단되며, ACR이 가장 큰 반경의 ACR이 100% 미만인 경우 누설이 발생한다고 판단하였다.

Fig. 4(a)는 상온에서의 접촉 압력을 나타낸 것으로, 이를 접촉면의 반경 40 mm부터 42 mm 까지 0.5 mm 간격으로 도식하였다. 접촉 압력이 원주 방향에 대해 균일하게 분포함과 동시에 모든 동일 반경 r에서 전체 각도에 걸쳐 ACR은 100%로 도출되어 작동 압력인 1MPa을 초과하는 충분한 접촉 압력이 형성되었다. 반면, 극저온에서는 Fig. 4(b)와 같이 소재의 불균일한 열수축으로 인해 접촉 압력이 접촉면의 반경 r에서 원주 방향 각도 θ에 따라 큰 폭으로 변화하며 불규칙한 분포를 보여주고 있다. 특히, 원주 방향의 각도가 -120°, -40°, 60°, 120° 및 175° 인 경우 모든 반경에서 접촉 압력이 나타나지 않아 국부적인 비접촉 채널이 형성되고, 해당 구간에서 누설 발생 위험이 존재하는 것으로 나타났다. ACR이 가장 큰 반경 r은 42 mm이며, 이때 ACR은 73.4%로서 국부적인 미접촉으로 인해 금속 시트와 디스크 접촉부에서 누설방지가 불가능하다. 따라서 POSRV의 누설방지를 위하여 극저온 환경에서 금속 시트와 디스크 접촉면 원주 방향으로 균일한 접촉 압력의 분포가 나타



(a) Room temperature



(b) Cryogenic temperature

Fig. 4. Contact pressures at contact region of metal seat and disc in POSRV

나게 하기 위한 금속 디스크 형상설계가 요구된다.

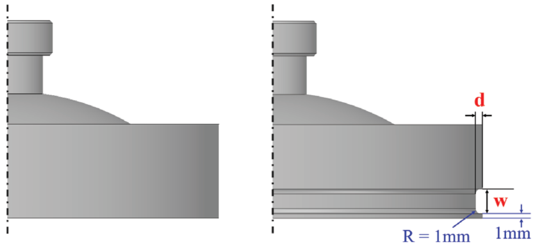
4. 금속 디스크의 형상설계

극저온 환경에서 POSRV의 금속 시트와 디스크 접촉면에 균일하게 발생하는 접촉 압력의 확보를 위하여 누설방지가 가능한 금속 디스크의 형상설계를 수행하였다. Fig. 5는 사례 연구를 수행하기 위하여 매개변수화한 금속 디스크의 형상이다. 기존 POSRV의 디스크 형상은 Fig. 5(a)와 같고, 디스크 측면 하부에 모깍기 R이 1 mm인 홈을 가공하여 접촉면에 수직 방향의 변형으로 인한 균일한 접촉 압력이 형성되도록 Fig. 5(b)와 같이 형상을 변경하였다[6]. 변경된 형상 중 홈의 깊이 d와 너비 w를 매개변수로 지정하였으며, 이때 d와 w의 초기 값은 각각 2 mm 및 7 mm이다.

d와 w가 각각 2 mm 및 7 mm인 금속 디스크에 대하여 극저온 상태에서 3절과 동일한 하중 및 경계조건으로 구조해석을 수행하여 금속 시트와 디스크 간의 접촉 압력 분포를 구하였으며, 얻어진 결과는 Fig. 6과 같다. 동일 반경 내 ACR이 가장 큰 반경 r은 40.5 mm이며, 전체 접촉각에 대한 ACR은 95.8%로 기존 금속 디스크의 73.4% 대비 향상된 접촉 특성이 나타났다. 그러나 접촉면의 원주 방향 각도 θ가 90° 부근에서 접촉 압력이 작동 압력인 1MPa 미만으로 해당 위치에서 누설 발생의 위험성이 있다.

동일 반경 내의 ACR이 100%에 도달할 수 있는 경우를 찾기 위한 사례 연구를 위하여 w를 7 mm로 고정하고 d를 1, 2, 3, 4 및 5 mm로 그리고 d를 2 mm로 고정하고 w를 3, 5, 7, 9 및 11 mm로 변화시키는 매개변수 조합을 고려하였다. 각 사례별로 구조해석을 수행하여 금속 시트와 디스크 간의 접촉 압력 분포를 구하였다.

Fig. 7은 ACR이 가장 큰 반경 r에서 얻어진 사례 연구의 결과로서, Fig. 7(a)와 같이 w를 7mm로 고정하고 d를 변화시킨 사례에서 d가 커짐에 따라 접촉 압력은 뚜렷하게 증가하였으며, d가 5 mm인 경우 가장 균일한 접촉 압력의 분포가 나타났다. 전체 접



(a) Previous geometry (b) Modified geometry

Fig. 5. Geometry of metal disc and design variables used to case study for shape design

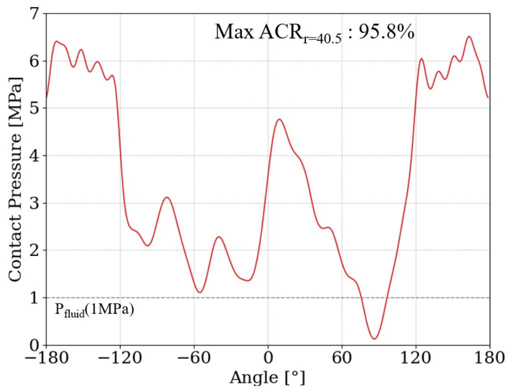


Fig. 6. Contact pressures at contact region of metal seat and disc with d=2 mm and w=7 mm at cryogenic temperature

촉각에 대한 ACR은 d가 1 mm 및 2 mm에서 88.4% 및 95.8%로 누설 조건을 충족하지 못하였으며, 그 외의 사례에서는 100% ACR을 보여주었다. 한편 Fig. 7(b)는 d를 2 mm로 고정하고 w를 변화시킨 사례로서, w의 변화에 따라 접촉 압력의 변화가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 전체 접촉각에 대한 ACR이 w가 3 mm 및 5 mm에서 100%로 나타나 누설 방지가 가능할 것으로 예상된다. 그러나 w가 7 mm 이상의 사례에서는 90° 부근에서 작동압력을 초과하지 못하는 접촉 압력이 발생하였으며, 이에 따라 ACR이 100%에 도달하지 못하여 누설 조건을 충족하지 못하였다.

극저온 환경에서 누설이 발생하는 POSRV 금속 디스크의 측면 하부에 모깍기 R=1 mm인 홈을 가공하고, 홈의 깊이 d와 너비 w를 변경하는 사례 연구

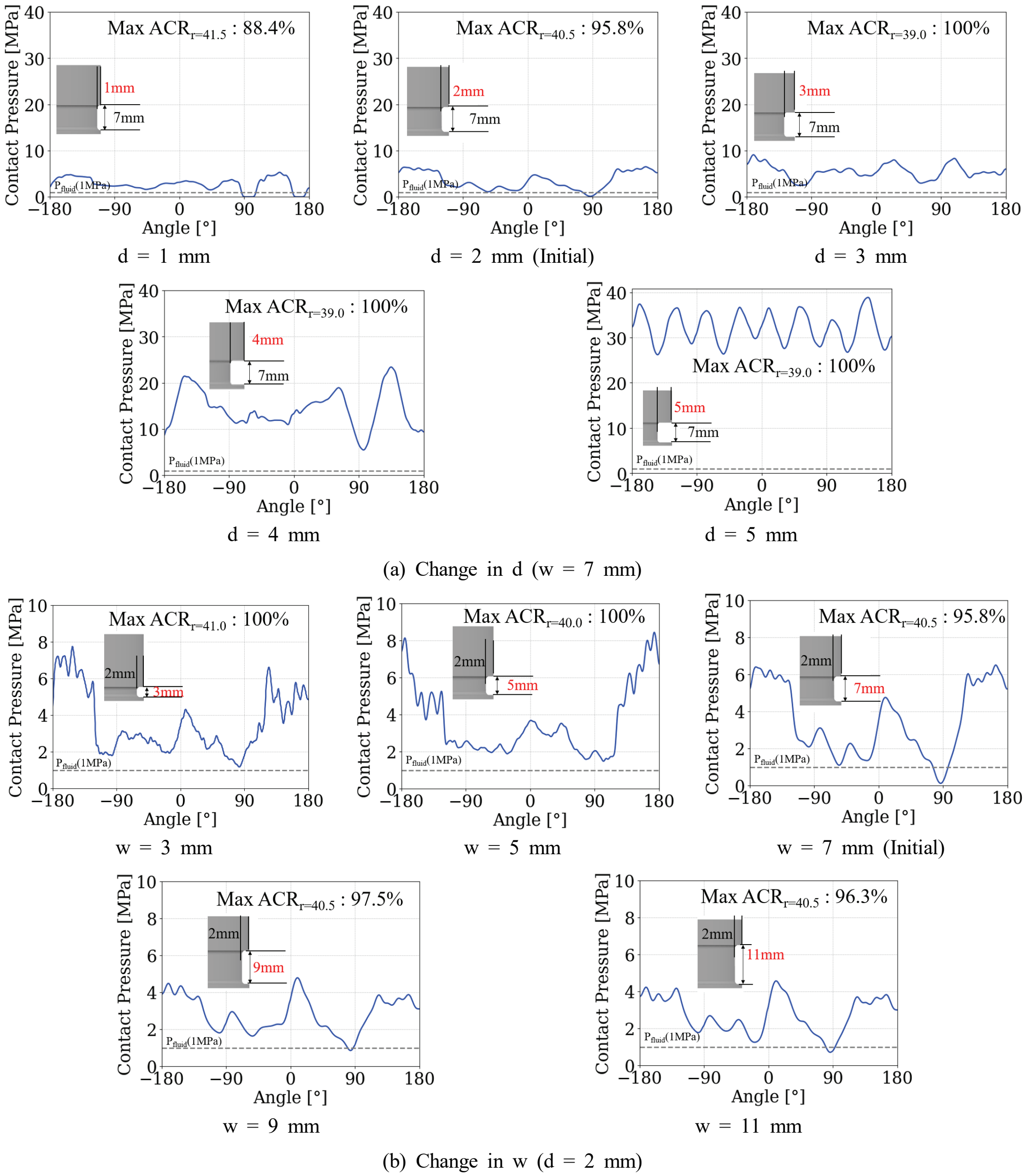


Fig. 7. Contact pressures obtained from case study due to change in w and d at cryogenic temperature

를 통하여 금속 시트와 디스크 접촉면의 반경 r=39 mm에서 전체 접촉각에 대한 ACR 100%를 만족하며 균일한 접촉 압력을 가지는 d와 w는 각각 5 mm 및 7 mm로 얻어졌다.

현재 참여 기업과 협업하여, Fig. 8과 같은 극저온용 파일럿형 안전릴리프 밸브의 시제품을 제작하였으며 API 527[18] 시험 규격에서 따라 헬륨을 이용한 누설시험을 수행하여 구조해석의 결과를 검증할 예정이다.

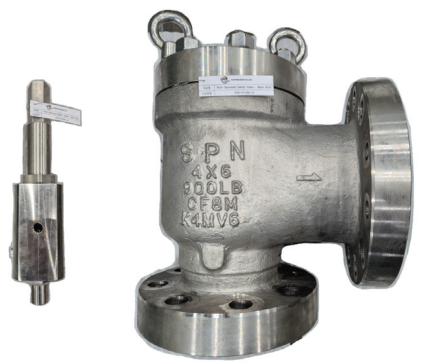


Fig. 8. Prototypes of pilot valve and main valve of POSRV

5. 결 론

본 연구에서는 극저온용 파일럿형 압력안전밸브(POSRV)의 금속 시트와 디스크의 금속 간 접촉부에 발생하는 접촉 압력을 고려한 누설 방지 조건을 제시하였다. POSRV의 금속 디스크 형상 설계를 위한 사례 연구를 통하여 극저온 환경에서 금속 시트와 디스크 접촉면에 일정한 접촉 압력이 나타나는 것은 물론 누설 방지 조건을 만족하는 형상을 탐색하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) Percolation 이론과 동심 원기둥 모델을 기반으로, 동일 반경 내 접촉면에서의 ACR이 100%인 경우 누설 방지가 가능하다는 누설 방지 조건을 제시하였다.
2) 상온 환경에서 구조해석으로 얻어진 POSRV의 금속 시트와 디스크의 접촉면 모든 반경에서 ACR이 100%로 나타나 누설이 일어나지 않음을 확인하였다.
3) 극저온(–253℃) 환경에서 소재의 불균일한 열수축으로 인해 접촉 압력이 큰 폭으로 변화하며, 불규칙한 분포가 나타났다. ACR이 가장 큰 반경 r이 42 mm에서 ACR은 73.4%로 누설이 발생할 것으로 예상되었다.
4) 극저온 환경에서 누설이 발생하는 POSRV 금속 디스크의 측면 하부에 모깍기 R=1 mm인 홈을 가공하고, 홈의 깊이 d와 너비 w 를 변경하는 사례 연구를 통하여 접촉면의 반경 r=39 mm에서 ACR 100%를 만족하는 d와 w는 각각 5 mm 및 7 mm로 계산되었으며, 이를 통하여 접촉 압력을 고려한 누설 방지 설계 조건을 제시하였다.

후 기

본 논문은 2025년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임 [00442554].

References

1. A. Ciancia, G. Pede, M. Brighigna, and V. Perrone, “Compressed hydrogen fuelled vehicles: reasons of a choice and developments in ENEA”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 21, No. 5, 1996, pp. 397-406, doi: https://doi.org/10.1016/0360-3199(95)00093-3.
2. R. von Helmolt and U. Eberle, “Fuel cell vehicles: status 2007”, Journal of Power Sources, Vol. 165, No. 2, 2007, pp. 833-843, doi: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.12.073.
3. F. Amaseder and G. Krainz, “Liquid Hydrogen Storage Systems Developed and Manufactured for the First Time for Customer Cars”, SAE Technical Paper 2006-01-0432, doi: https://doi.org/10.4271/2006-01-0432.
4. S. W. Karng, N. Garceau, C. M. Lim, J. H. Baik, S. Y. Kim, and I. H. Oh, “Performance of a 5 L Liquid Hydrogen Storage Vessel”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 26, No. 3, 2015. pp. 234-240, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2015.26.3.234.
5. C. W. Lee and S. H. Jung, “Quantitative risk assessment of release accident in pressure safety valve of ammonia storage tank”, Transactions of the Korean Journal of Hazardous Materials, Vol. 13, No. 1, 2025, pp. 37-48, doi: https://doi.org/10.31333/kihm.2025.4.1.37.
6. J. H. Lee, G. A. Kang, and J. S. Kwak, “Valve seat design for full contact effect using grey relational analysis”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 4, 2018, pp. 17-22, doi: https://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.4.017.
7. J. T. Ahn, K. C. Lee, K. H. Lee, and S. H. Han, “Investigation of the mechanical behavior of a flexible solid metal seal for a cryogenic butterfly valve”, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 25, No. 9, 2011, pp. 2393-2400, doi: https://doi.org/10.1007/s12206-011-0534-5.
8. B. N. J. Persson and C. Yang, “Theory of the leak-rate of seals”, Journal of Physics: Condensed Matter, Vol. 20, No. 31, 2008,

pp. 315011, doi: https://doi.org/10.1088/0953-8984/20/31/315011.
9. M. Kazeminia and A.H. Bouzid, "Leak prediction through porous compressed packing rings: a comparison study", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 166, 2018, pp. 1-8, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2018.07.012.
10. S. H. Kang, Y. C. Park, J. J. Choi, H. G. Song, and J. H. Park, "Prediction of the disc of pilot-operated safety valve with dynamics model", Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference (KSPE), 2011, pp. 1257-1258, Retrieved from https://koreascience.kr/article/CFKO201130533380675.page.
11. S. C. Jang, "A study on the control of a pilot operated pressure relief device", Master's Thesis, Dong-A University, 2015, Retrieved from https://www.riss.kr/search/detail/DetailView.do?p_mat_type=be54d9b8bc7cdb09&control_no=23336fd6c902a23dffe0bdc3ef48d419&outLink=K.
12. S. M. Kim, J. S. Kim, Y. J. Cho, S. W. Yang, and M. S. Shin, "A numerical study on the opening characteristics of high-pressure hydrogen valves", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 6, 2023, pp. 689-697, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.689.
13. W. S. Jung, "Thermal strain analysis on the sealing surface of pilot operated valve(POSRV) using simple 3-D modeling", Master's Thesis, Pusan National University, 2022, doi: https://doi.org/10.23172/pusan.000000154078.21016.0000164.
14. Valve Manufactures Association, "Fundamental Operation of Pilot-Operated Safety Relief Valves", 2024, Retrieved from https://www.valvemagazine.com/articles/fundamental-operation-of-pilot-operated-safety-relief-valves. (Accessed July 16)
15. N. Bu, N. Ueno, and O. Fukuda, "Finite element analysis of contact stress in a full-metallic pipe joint for hydrogen pipelines", WSEAS International Conference. Proceedings. Mechanical Engineering Series. No. 5. World Scientific and Engineering Academy and Society, 2010, pp. 184-189, doi: https://dl.acm.org/doi/proceedings/10.5555/1807906.
16. E. M. Fujiwara, T. Okumura, and T. Yamasaki, "Frictional and wear behavior of commercially pure Ti, Ti-6Al-7Nb, and SUS316L stainless steel in artificial saliva at 310 K", Materials Transactions, Vol. 56, No. 10, 2015, pp. 1648-1657, doi: https://doi.org/10.2320/matertrans.M2015094.
17. Q. Yang and Y. Wu, "Investigation of Contact Characteristics and Sealing Performance of Metal Seals in All-Metal Angle Valves", Process, Vol. 13, No. 4, 2025, pp. 968, doi: https://doi.org/10.3390/pr13040968.
18. API STANDARD 527, "Seat Tightness of Pressure Relief Valves, Fifth Edition", 2020, Retrieved from https://www.psvshop.ir/wp-content/uploads/2022/03/API-527.pdf.