

유한요소법을 이용한 극저온 실링의 오정렬 특성 및 누설 위험성 평가 Evaluation of Misalignment Characteristics and Leakage Risks of Cryogenic Seals Using Finite Element Method

전혜리* · 김준영*** · 이재민*.*†

Hye-Ri Jeon*, June-Young Kim*** and Jae-Min Lee*.*†

(Received 17 January 2026, Revision received 31 March 2026, Accepted 02 April 2026)

초록 : 액화수소(LH₂) 병커링 및 자동화 로딩암 시스템의 보급이 확대됨에 따라, 극저온 환경에서의 실링 건전성 확보는 핵심적인 안전 요구사항이 되고 있다. 액화수소는 분자 크기가 매우 작아 플랜지 연결부의 미세한 오정렬만으로도 심각한 누설 위험을 초래할 수 있다. 본 연구에서는 유한요소해석(FEA)을 통해 액화수소 로딩암에 사용되는 PCTFE O-링의 접촉 면압 분포에 병진 및 각도 오정렬이 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해 -253℃에서의 PCTFE O-링과 SUS304 플랜지의 재료 물성을 고려한 3차원 수치 해석 모델을 구축하였다. 해석 케이스는 0~2 mm의 병진 오차와 0~0.5°의 각도 오차를 포함하였다. 해석 결과, 병진 오정렬은 실링 성능에 미치는 영향이 비교적 미미한 반면, 각도 오정렬은 상당한 압력 비대칭과 국부적인 접촉 손실을 유발하여 잠재적인 누설 경로를 형성함을 확인하였다. 본 연구의 결과는 자동화 극저온 로딩 시스템의 안전성 평가 체계 구축 및 AI 기반 정렬 모니터링 로직 설계를 위한 물리적 근거 데이터로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

키워드 : 액화수소, 로딩암, 극저온 실링, 오정렬, 유한요소해석

Abstract : As liquid hydrogen (LH₂) bunkering and automated loading-arm systems expand, ensuring sealing integrity at cryogenic temperatures becomes a critical safety requirement. Due to the extremely small molecular size of LH₂, even minor misalignments in flange connections can lead to significant leakage risks. This study evaluates the effects of translational and angular misalignments on the contact-pressure distribution of PCTFE O-rings used in LH₂ loading arms through finite element analysis (FEA). A three-dimensional model was developed considering the material properties of PCTFE O-rings and SUS304 flanges at -253℃. The simulation cases included translational offsets (0~2 mm) and angular misalignments (0~0.5°). The results demonstrate that while translational misalignment has a relatively minor effect on the sealing performance, angular misalignment causes substantial pressure asymmetry and localized contact loss,

*† 이재민(<https://orcid.org/0000-0002-1781-4380>) : 조교수,
국립부경대학교 기계시스템공학전공

E-mail : jae27v@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6191

**부교수, 전남대학교 조선해양공학과

*전혜리(<https://orcid.org/0009-0006-7504-9695>) : 석사과정, 국립
부경대학교 기계시스템공학전공.

***김준영(<https://orcid.org/0000-0003-4047-8263>) : 선임연구원,
한국산업기술시험원 산업융합기술센터

*† Jae-Min Lee(<https://orcid.org/0000-0002-1781-4380>) : Assistant
Professor, Major of Mechanical System Engineering, Pukyong
National University.

E-mail : jae27v@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6191

**Associate Professor, Department of Naval Architecture and
Ocean Engineering, Chonnam National University.

*Hye-Ri Jeon(<https://orcid.org/0009-0006-7504-9695>) : Master's
student, Major of Mechanical System Engineering, Pukyong
National University.

***June-Young Kim(<https://orcid.org/0000-0003-4047-8263>) :
Researcher, Industrial Convergence Technology Center, Korea
Testing Laboratory(KTL).

potentially creating leakage paths. These findings provide a physical basis for establishing safety evaluation frameworks and AI-based alignment monitoring logic for automated cryogenic loading systems.

Key Words : Liquid Hydrogen, Loading Arm, Cryogenic Seal, Misalignment, Finite Element Analysis

1. 서 론

액화 수소(LH₂)는 탄소중립 사회 실현을 위한 핵심적인 차세대 에너지 매체로 주목받고 있으며, 이에 따라 해상 운송 및 수소 병커링을 포함한 수소 공급망 전반에서 안전하고 신뢰성 높은 이송 기술 확보가 필수적인 과제로 부상하고 있다.¹⁾ 액화 수소는 -253℃라는 극저온 조건에서 저장 및 이송되며, 분자 크기가 매우 작고 확산 계수가 커 극미소 누설만으로도 화재 및 폭발로 이어질 수 있는 잠재적 위험성을 내포하고 있다. 이러한 특성으로 인해 액화수소 취급 설비는 기존 액화천연가스(LNG) 설비^{2,3)}보다 훨씬 엄격한 기밀성 및 구조적 안정성이 요구된다. 특히 선박과 육상 설비 간 극저온 유체를 이송하는 로딩암>Loading Arm)은 파도, 조류, 선체 운동에 의한 외란 조건에서도 안정적인 연결 상태를 유지하며 높은 기밀성을 확보해야 하는 핵심 안전 설비이다. 최근 액화 수소 로딩암 시스템은 운용 환경의 제약으로 인해 인체 접근이 제한됨에 따라 전동식 구동 방식과 센서·비전 기반의 자동 커플링 기술 도입이 적극적으로 추진되고 있다. 더 나아가 로딩암의 위치 인식 및 체결 제어 과정에 AI 기반 알고리즘이 적용되면서 시스템의 자동화 수준은 지속적으로 고도화되고 있다. 그러나 AI 기반 자동화 기술의 도입은 기존 안전성 평가 체계로는 다루기 어려운 새로운 유형의 위험 요소를 발생시킨다. 기존 국제 및 국내 규정은 주로 구조 설계 및 재료 물성에 초점을 맞추고 있어, AI가 수행하는 인식 및 판단 과정에서 발생할 수 있는 허용 오차 초과 여부에 대해서는 명확한 평가 기준을 제시하지 못하고 있다.⁴⁾ 특히 자동 커플링 과정에서 발생하는 정렬 오차(Misalignment)가 체결부의 실링 성능에 미치는 정량적인 영향 분석은 여전히 부족한 상황이다. 본 연구에서는 탄성 해석 기반

유한요소해석(FEA)을 수행하여 액화수소 로딩암의 자동화 체결부에서 발생하는 정렬 오차가 극저온 실링용 O-링의 접촉 압력 분포에 미치는 영향을 고찰함으로써, 면압 저하에 따른 잠재적인 누설 가능성을 간접적으로 평가하고자 한다. 이를 위해 병진 정렬 오차(Translational misalignment)와 각도 정렬 오차(Angular misalignment)를 주요 변수로 설정하여 체결부의 접촉 거동을 수치적으로 분석하였다. 이러한 구조해석 기반의 정량적 분석 결과는 향후 AI 기반 정렬 감지 시스템의 안전 판단 근거가 되는 물리 기반 기준 데이터를 제공하고, 안전한 급속 연결·해지 장치(QC/DC, Quick Connect / Disconnect) 설계 및 자동화 로딩암의 안전성 평가 체계 구축을 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

2. 연구 내용 및 방법

본 연구의 수치 해석 모델 구성 및 해석 조건에 대하여 기술한다. 본 연구에서는 실제 로딩암 체결 과정에서 빈번하게 발생하는 플랜지 간의 병진 오차 및 각도 오차 사례(Fig. 1)를 기반으로 수치 해석 모델을 구축하였다. 이러한 정렬 오차는 실링 인터페이스의 불균일한 압착을 유발하여 기밀 성능을 저하시키는 주요 원인이 된다.

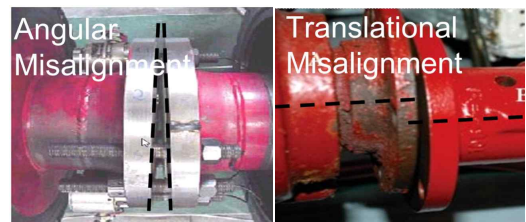


Fig. 1 Typical misalignment cases in loading arm flanges during assembly

자동화 액화 수소(LH₂) 로딩암 체결부의 오정렬이 실링 건전성에 미치는 영향을 규명하기 위해 상·하부 플랜지와 극저온 실링용 O-링으로 구성된 3차원 유한요소 모델을 구축하였다. 체결부의 기하학적 형상은 실제 로딩암의 QC/DC 인터페이스 중 실링 성능에 지배적인 영향을 미치는 플랜지 접촉면과 그루브 형상을 추출하여 단순화 모델링(Fig. 2)하였으며, 해석의 수치적 엄밀성을 위해 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS를 사용하였다. 특히, 복잡한 커플러 구조를 단순화하는 과정에서 실링부의 접촉 거동을 정밀하게 모사하기 위해 인터페이스 부근의 격자 밀도를 국부적으로 조밀하게 구성하여 해석의 신뢰성을 확보하였다. 정적 해석의 지배 방정식은 식 (1)과 같은 평형 방정식을 기반으로 하며, 재료의 변형 거동은 식 (2)와 같은 훅의 법칙(Hooke's law)을 따르는 선형 탄성 모델로 근사하였다.

$$\nabla \cdot \sigma + f = 0 \quad (1)$$

$$\sigma = D\epsilon \quad (2)$$

식 (1)의 평형 방정식에서 $\nabla \cdot \sigma$ 는 응력 텐서의 발산을 의미하며, f 는 단위 체적당 작용하는 외력(Body force)을 나타낸다. 본 해석에서는 자중을 포함한 외부 하중 조건이 평형을 이루는 정적 상태를 가정한다. 식 (2)의 구성 방정식에서 σ 는 응력(Stress), ϵ 는 변형률(Strain)을 의미하며, D 는

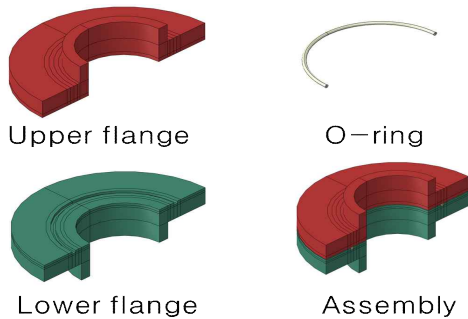


Fig. 2 Finite Element Model Components and Assembled Seal Configuration

Table 1 Dimensions and material properties

Part	Geometry / Dimensions	Material
Upper flange	Flange thickness: 20 mm Flange diameter: 190 mm Pipe inner diameter: 82 mm Pipe thickness: 10 mm	SUS304 Elastic Modulus(E): 200.0Gpa Poisson's ratio(ν): 0.30
Lower flange	Identical to Upper flange Groove width for O-ring seating: 4.0 mm Groove depth for O-ring seating: 2.8 mm	
O-ring	Cross-section: circular ($\varnothing = 3.5$ mm) Mean radius: 60 mm	PCTFE E = 1.0Gpa $\nu = 0.46$

재료의 탄성 계수와 포아송 비에 의해 결정되는 강성 행렬(Stiffness matrix)이다.

상·하부 플랜지의 재질은 극저온 환경에서 우수한 기계적 성질을 유지하는 SUS304 스테인리스강을 적용하였으며, O-링은 극저온용 실링 재료인 PCTFE(Polychlorotrifluoroethylene)를 선정하였다.^{5,6)} 각 파트별 적용된 재료의 물성치는 Table 1과 같다.

O-링과 플랜지 그루브 간의 복잡한 비선형 접촉 거동을 모사하기 위해 Penalty 접촉 공식을 적용하였다. 접촉 압력(P)은 두 표면 사이의 침투량(h)과 접촉 강성(K_p)의 관계로 정의되는 식 (3)에 의해 산출된다.

$$P = \begin{cases} K_p \cdot h, & h > 0 \\ 0, & h \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

격자 구성은 총 163,316개의 요소를 사용하였으며, 특히 압력 구배가 급격한 O-링 접촉부에는 국부 격자 조밀화(Local refinement)를 수행하였다(Fig. 3). O-링에는 비압착성 거동을 고려한 하이브리드 육면체 요소(C3D8H)를, 플랜지 구조물에는 감축 적분 육면체 요소(C3D8R)를 배치하여 해석의 효율성과 정확도를 동시에 확보하였다.

실제 로딩암의 체결 프로세스를 모사하기 위해 하부 플랜지의 하단을 완전히 고정하고, 상부 플랜지에 0.7 mm의 수직 폐쇄 변위(Vertical closure displacement)를 인가하여 O-링의 압축 거동을 유도하였다(Fig. 4). 마찰 거동은 쿨롱 마찰 모델을

적용하였으며, 마찰 계수(μ)는 0.1로 설정하였다.

본 해석에서 적용된 0.7 mm의 수직 폐쇄 변위 (Vertical closure displacement)는 O-링 단면 직경 (3.5mm) 대비 약 20%의 압축률(Squeeze rate)에 해당한다. 이는 AS568 규격⁷⁾ 및 Parker O-Ring Handbook⁸⁾ 등에서 권고하는 정적 실링의 표준 압축률 범위(15~30%)를 충족하는 수치이다. 특히 극저온 환경에서는 열수축에 의한 실링 성능 저하를 방지하기 위해 충분한 초기 압착이 필요하며, 본 연구에서는 이를 반영하여 실제 로딩압 QC/DC 커플러의 설계 체결력을 대표할 수 있는 변위 조건을 설정하였다.

자동화 로딩암의 체결 과정에서 발생 가능한 오정렬 특성을 평가하기 위해 병진 정렬 오차와 이스를 정의하였다. CASE 1은 완전 정렬 상태를 나타내며, CASE 9는 최대 복합 오차 조건을 의미한다. 상세한 케이스 분류는 Table 2와 같다.

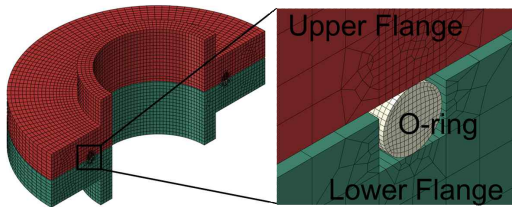


Fig. 3 Overall finite element mesh and local refinement near the O-ring groove

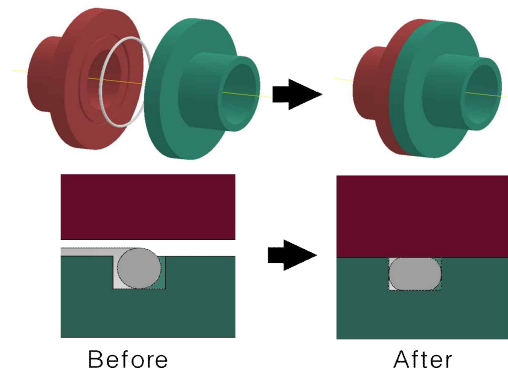


Fig. 4 Shape change of the O-ring before and after flange assembly

Table 2 Definition of translational and angular misalignment cases

CASE	Angular offset	Translational offset
CASE1	0°	0 mm
CASE2	0.5°	0 mm
CASE3	0°	1 mm
CASE4	0.25°	0 mm
CASE5	0°	2 mm
CASE6	0.25°	1 mm
CASE7	0.25°	2 mm
CASE8	0.5°	1 mm
CASE9	0.5°	2 mm

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 본격적인 접촉 면압 분석에 앞서, 유한요소해석을 통해 구현된 정렬 오차의 기하학적 양상을 변위 컨투어(U, Magnitude)를 통해서 시각적으로 확인하였다. Fig. 5는 로딩암 체결부의 초기 상태(Initial Condition)를 나타내며, Fig. 6은 정렬이 완벽히 이루어진 상태(CASE 1)에서의 체결 거동을 보여 준다. 정렬 상태에서는 상·하부 플랜지가 평행하게 접촉하며 변위가 대칭적으로 분포하는 것을 확인할 수 있다. 반면, 최대 오정렬 조건인 CASE 9(Fig. 7)에서는 각도 오차와 병진 오차의 복합적인 영향으로 인해 플랜지 사이의 간극이 비대칭적으로 형성되며, 변위 컨투어 또한 한쪽으로 편향되어 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 기하학적 불균형은 실링 인터페이스 전반의 물리적 거동에 직접적인 영향을 미친다.

본 연구에서는 자동화 액화수소 로딩암의 체결 과정에서 발생할 수 있는 정렬 오차가 실링 인터페이스의 기밀 유지에 미치는 영향을 규명하기 위해, 9가지 해석 케이스별로 O-링 원주 방향 각도(0°~180°)에 따른 접촉 압력 분포 특성을 분석하였다.

먼저, 이상적인 체결 상태인 CASE 1의 결과를 분석한 결과, Fig. 8(a)에서와 같이 O-링의 모든 접촉 면에서 약 322.3 MPa의 매우 균일한 접촉 압

력이 형성되는 것을 확인하였다. 이는 설계 의도에 따라 O-링이 균일하게 압착되어 유체 누설을 방지할 수 있는 최적의 기밀 성능을 확보하고 있음을 시사한다. 그러나 최대 복합 오정렬 조건인 CASE 9의 경우, Fig. 8(b)에서 관찰되듯이 원주 방향을 따라 압력 분포가 불균형하게 형성되었으며, 최대 압력이 338.8 MPa까지 상승하는 반면 반대편 구간에서는 압력이 급격히 하락하는 비대칭적 양상을 보였다.

오정렬의 유형에 따른 실링 건전성 민감도를 파악하기 위해 병진 오차와 각도 오차를 분리하여 분석하였다. Fig. 9에 나타난 병진 오차 지배

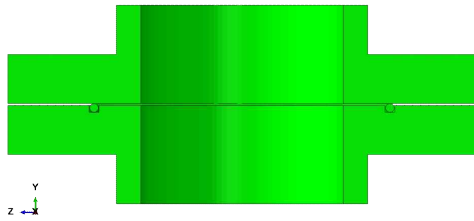


Fig. 5 Comparison of displacement contours: Initial condition

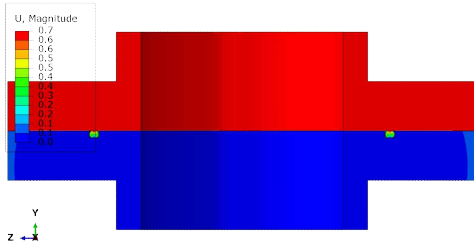


Fig. 6 Comparison of displacement contours: CASE 1

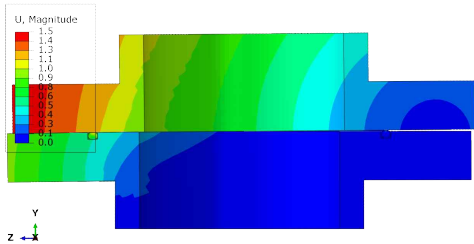


Fig. 7 Comparison of displacement contours: CASE 9

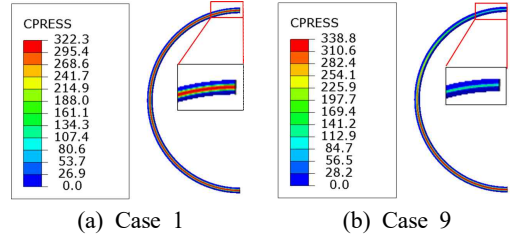


Fig. 8 Seal contact pressure distribution for CASE 1 and CASE 9

케이스(CASE 3, 5)들의 압력 분포 곡선을 살펴보면, 오차 거리가 1 mm에서 2 mm까지 증가함에도 불구하고 접촉 압력은 약 318~322 MPa 범위를 유지하며 기준 상태인 CASE 1과 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 로딩암 체결 시 발생하는 단순한 수평 위치 오차는 PCTFE 재질 O-링의 탄성 변형에 의해 상당 부분 흡수 가능하며, 단독 발생 시에는 실링 성능에 치명적인 영향을 미치지 않음을 의미한다. Fig. 9에서 관찰되는 원주 방향 90~180° 구간의 미세한 접촉 압력 증감은 정렬 오차에 의한 플랜지 간극의 비대칭성에서 기인한다. 이는 오정렬로 인해 O-링이 원주 방향을 따라 불균일하게 압착되면서 발생하는 기하학적 편심 하중 (Eccentric loading)의 영향으로 판단된다.

반면, 각도 정렬 오차가 포함된 케이스들에서는 매우 극명한 압력 변동이 관찰되었다. Fig. 10에서 0.5°의 각도 오차가 적용된 CASE 2, 8, 9의 결과를 보면, 원주 각도가 커짐에 따라 접촉 압력이

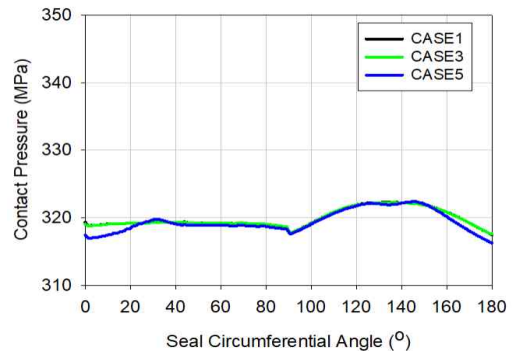


Fig. 9 Effect of translational misalignment on seal contact pressure

약 130 MPa 수준까지 급격히 감소하는 구간이 형성되었다. 본 연구에서 관찰된 130 MPa의 최소 접촉 면압은 이상적 체결 상태(322.3 MPa) 대비 약 60% 이상의 면압 손실이 발생한 수치이다. 이는 ASME BPVC Section VIII⁹⁾ 등 국제 설계 규격에서 제시하는 경질 폴리머 실링의 최소 설계 면압 및 선행 연구의 기밀 유지 임계 범위를 고려할 때, 설계 마진(Design margin)을 충분히 확보하지 못한 수준으로 판단된다. 특히 분자 크기가 극히 작은 액화수소의 특성상, 이러한 급격한 면압 저하는 국부적인 접촉 손실 구간(Contact-loss zone)을 형성하여 잠재적인 미세 누설 경로로 작용할 가능성이 매우 높음을 시사한다. 다만, 본 결과는 선행 해석에 기반한 상대적 민감도 비교이므로, 실제 누설 여부에 대한 최종 판정보다는 AI 기반 자동화 시스템의 안전 제어를 위한 물리적 임계치(Threshold) 가이드라인으로 활용되는 것이 타당하다. 각도 오차가 0.25°인 그룹(Fig. 11) 역시 최소 압력이 약 230 MPa 수준으로 저하되며 유사한 경향성을 보였으나, 0.5° 조건에 비해 면압 저하 폭은 완만하게 나타났다. 반면, Fig. 10과 11에서 원주 각도 약 100° 이후 접촉 면압이 일정하게 유지되는 현상이 관찰되었다. 이는 해당 오정렬 조건에서 O-링의 변형이 한계치에 도달하여 플랜지 그루브(Groove) 내부에 완전히 안착(Seating)됨에 따라, 추가적인 각도 변화에도 불구하고 실링 인터페이스에서의 상대 변위가 억제되었기 때문으로 분석된다.

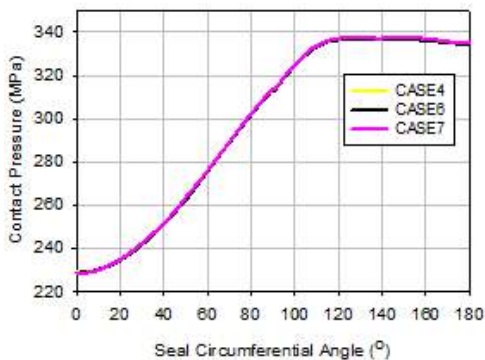


Fig. 10 Seal contact pressure under 0.5° angular misalignment

종합적으로 정렬 오차의 상호 작용을 분석한 Fig. 12를 보면, 동일한 각도 오차 내에서도 병진 오차가 결합될수록 압력 분포의 기울기가 더욱 가팔라지며 최소 접촉 압력치가 추가적으로 소폭 하락하는 비선형적 거동을 확인할 수 있다. 이는 자동화 로딩암 시스템의 제어 알고리즘 설계 시, 병진 위치 정밀도보다 각도 정렬 정밀도를 확보하는 것이 실링 무결성 유지의 핵심임을 시사한다. 본 연구를 통해 도출된 접촉 압력 분포의 수치적 하한치와 오차 민감도 데이터는 향후 AI 기반 정렬 감지 시스템이 체결 성공 여부를 물리 기반으로 판단하는 임계치(Threshold) 데이터로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

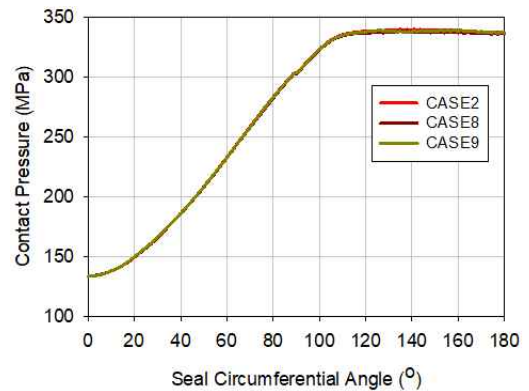


Fig. 11 Seal contact pressure under 0.25° angular misalignment

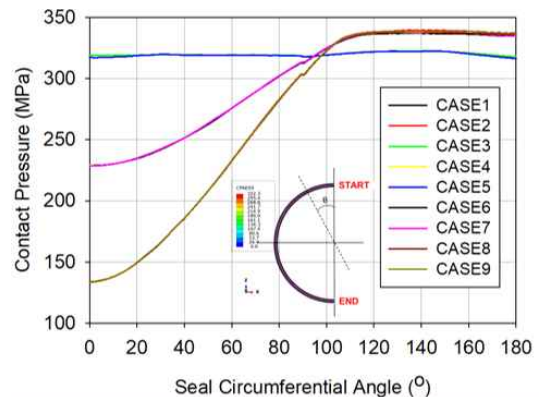


Fig. 12 Overall contact pressure distributions for all nine analysis cases

4. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석을 통해 자동화 액화수소 로딩암 체결부의 정렬 오차가 극저온 실링 무결성에 미치는 영향을 상대적 민감도 관점에서 규명하였다. 도출된 분석 결과는 특정 수치에 의한 절대적인 안전성 판단 기준을 제시하기 보다는, 각도 오정렬이 실링 건전성에 미치는 지배적인 영향력을 정량적으로 확인하고 추후 고도화된 정렬 감지 시스템의 제어 우선순위를 결정하는 물리적 근거를 마련하였다는 점에 학술적 의의가 있다. 우선 실제 현장에서 발생하는 플랜지 오정렬 사례를 기반으로 3차원 유한요소 모델을 구축하여 체결 거동을 분석한 결과, 완전 정렬 상태인 CASE 1에서는 원주 방향을 따라 약 322.3 MPa의 균일한 접촉 압력이 형성되어 안정적인 기밀 성능이 확보됨을 확인하였다.

오정렬 유형에 따른 민감도 분석에서는 병진 정렬 오차가 2 mm인 조건에서도 접촉 압력 변동이 미미하여 실링 건전성에 미치는 영향이 제한적인 반면, 각도 정렬 오차는 실링 무결성을 결정짓는 지배적인 인자로 작용하여 0.5° 오차 시 최소 접촉 압력이 약 130 MPa까지 급격히 하락하는 접촉 손실 구간(Contact-loss zone)을 형성함을 규명하였다. 특히 복합 오차 조건에서는 각도 오차에 의한 비대칭성이 병진 오차와 결합하여 압력 분포의 기울기를 더욱 가파르게 형성하는 비선형적 거동을 보였으며, 이는 자동화 시스템 제어 시 각도 정렬 정밀도 확보가 최우선임을 시사한다.

다만 본 연구는 선형 탄성 해석을 기반으로 정렬 오차가 면압 분포에 미치는 상대적인 민감도를 규명하는 데 초점을 두었으나, 액체 수소의 극저온 환경에서 발생하는 실제 물리적 거동을 반영하는 데에는 다음과 같은 한계가 있다. 특히 실링 재질인 PCTFE는 극저온 환경에서 재료 강성이 급격히 변화할 뿐만 아니라, 하중 유지 시간에 따라 면압이 완화된 비선형 점탄성(Viscoelastic) 및 크리프(Creep) 거동을 수반한다. 이러한 시간 의존적 변형 특성은 장기 운전 시 접촉 면압의 추가적인 저하를 유발하여 잠재적인 누설 위험을

가속화할 수 있는 핵심 요인이다. 따라서 향후 연구에서는 이러한 재료 비선형성과 내부 유체 압력에 의한 구조적 상호작용(FSI)을 통합적으로 고려하여 해석 모델을 고도화하고, 이를 바탕으로 실제 현장에 적용 가능한 정량적인 누설 임계치(Leakage threshold) 기준을 수립할 예정이다.

Acknowledgement

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Climate, Energy & Environment(MCEE) of the Republic of Korea (No. 2410014042). This study was financially supported by Chonnam National University(Grant Number: 2024-1124-01)

Author contributions

H. R Jeon: Formal analysis, software, data curation, writing-original draft preparation, visualization. J. Y Kim: Formal analysis, data curation, data collected and analyzed, writing-review and editing. J. M Lee: Conceptualization, supervision, project administration, writing-review and editing.

References

1. S. J. Cha et al., 2025, "Experimental Analysis of Vacuum Technology for the Application of Insulation Systems in Liquid Hydrogen Tanks", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 62(4), 231-237.
(<https://doi.org/10.3744/STNAK.2025.62.4.231>)
2. S. H. Kim et al., 2023, "Prediction of Boil-Off Gas Generation according to Liquefied Natural Gas Precooling System Design of Hydrogen Liquefaction Process", Journal of Power System Engineering, 27(4), 26-35.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2023.27.4.026>)

3. J. H. Kim et al., 2022, “A Study on Dynamic Simulation of Emergency Release Coupling for LNG”, *Journal of Power System Engineering*, 26(5) 44-52.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2022.26.5.044>)
4. ISO 21013-3, 2016, “Cryogenic vessels - Part 3: Sizing and capacity determination”, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
5. NIST, 2018, “Cryogenic Material Properties of SUS304 and PCTFE”, NIST Technical Publication 1201, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA.
6. L. He et al., 2024, “Fabrication and Film-Forming Mechanism of PCTFE Films with Exceptional Water-Vapor Barrier and Mechanical Properties via Solvent-Assisted Method”, *Polymer*, 292, 126633.
(<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126633>)
7. SAE International, 2014, “Aerospace Size Standard for O-Rings”, SAE AS568D, Warrendale, PA, USA.
8. Parker Hannifin Corporation, 2007, “Parker O-Ring Handbook (ORD 5700)”, Parker Seal Group, Cleveland, OH, USA.
9. ASME, 2023, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessels”, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA.