

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 3, 2025, pp. 224-238 DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.3.224

유한요소해석을 활용한 수소 배관용 접속재 안전성 평가

김건우1·김혜원1·박한민1·강세진1·조경석1·박범수1·원용희2·이재익2·박영훈2·김봉석2·이종환2·김한상1

¹가천대학교 기계공학과, ²LS전선

Safety Assessment of Hydrogen Piping Connectors Using Finite Element Analysis

GUNWOO KIM¹, HYEWON KIM¹, HANMIN PARK¹, SEJIN KANG¹, GYEONGSEOK CHO¹, BEOMSOO PARK¹, YONGHEE WON², JAEIK LEE², YOUNGHUN PARK², BONGSUK KIM², JONGHWAN LEE², HANSANG KIM^{1†}

¹Department of Mechanical Engineering, Gachon University, 1342 Seongnam-daero, Sujeong-gu, Seongnam 13120, Korea ²LS Cable & System, 27 Gongdan-ro 140 beon-gil, Gunpo 15845, Korea

[†]Corresponding author : hskim70@gachon.ac.kr

Received17 April, 2025Revised1 May, 2025Accepted2 June, 2025

Abstract >> This study performed finite element analysis on flexible, non-metallic end and mid connectors for hydrogen piping, focusing on structural integrity and sealing performance. Boundary conditions were varied to identify stress concentrations in the collet, fiber reinforced plastic layer, and elastomers (e.g., ethylene-propylene diene monomer), while examining design variables such as removing outer pipes or resizing sealing materials. The results show that modifying connector geometry and material parameters can mitigate local stress peaks and maintain sufficient contact pressure, enhancing overall stability and sealing reliability. These findings offer key insights for future design improvements and the safe, efficient development of hydrogen piping connectors.

Key words : Hydrogen pipe(수소 배관), Finite element analysis(유한요소해석), Connector(접속재), Structural integrity(구조 안전성), Sealing performance(기밀 성능)

1. 서 론

유럽, 미국, 일본 등 주요 선진국은 최근 수소 활 용을 급속도로 확대하기 위하여 대규모이면서도 저 비용으로 수소를 생산하고 이를 산업 전반에 걸쳐 활용할 수 있도록 전 주기에 걸친 인프라 구축에 주 력하고 있다. 구체적으로는 수요 창출, 공급망 확충, 도로 운송 인프라 구축, 기술적, 제도적 지원 등 다양 한 분야에 대한 종합적인 투자를 통해 탄소중립 기 조를 뒷받침하고 있다. 대한민국 역시 2050 탄소중 립 범부처 전략회의를 통해 수소 경제를 미래의 유 망 산업으로 육성하고 도시와 국토의 탄소중립 전환 을 가속화하여야 한다는 전략적 중요성이 한층 강조 되는 추세이다¹. 이러한 정책적, 산업적 흐름 속에서

수소의 안정적이고 지속 가능한 활용을 달성하려면 무엇보다 생산 방식별 중장기 공급 인프라 구축 방 안을 면밀히 수립하여야 한다. 특히 주거 지역이나 인구 밀집 지역에서 효율적으로 수소를 공급하기 위 해서는 배관에 의한 직접 공급이 가능하도록 하는 기술적 대안이 요구되고 있다. 이에 따라 기존 강관 에 비해 탄력적이고 유연한 형태로 설치가 가능한 비금속 flexible 배관의 도입이 주목받고 있다. 비금 속 flexible 배관은 접속 개소가 크게 줄어들어 시공 시간과 비용을 절감할 수 있고 향후 유지 보수 작업 도 간소화할 수 있다는 장점이 존재한다. 그러나 이 러한 장점에도 불구하고 배관 균열이나 손상으로 인 해 수소가 누출될 경우 폭발 가능성과 같은 안전 문 제가 발생할 수 있으므로 접속재의 구조적 안정성과 신뢰성 확보가 필수적이다. 특히 수소는 분자 크기가 작아 누출 위험이 상대적으로 더 클 뿐 아니라 압력 이나 온도 등 사용 환경에 따라 재질 변화나 취성 문 제가 발생할 수 있으므로²⁾ 접속재의 구조적 안정성 과 내구성을 과학적이고 객관적으로 검증하는 과정 이 중요하다³⁾. 이를 위해서는 실제 환경을 재현한 실 험뿐만 아니라 시뮬레이션 기법을 통해 다양한 시나 리오에서의 응력 상태와 결합 특성을 예측하고 분석 할 수 있는 기술이 뒷받침되어야 한다. 그동안 다양 한 배관 접합부 및 결합 구조에 대한 구조 안전성 및 기밀성 분석이 다수 수행되어 왔다. glass fiber reinforced plastic (GFRP) 파이프 커플러에 대하여 파 괴역학 기반으로 구조 안전성을 평가한 연구⁴⁾, GFRP 플랜지 조인트의 강도 및 누설 특성을 유한요소해석 (finite element analysis, FEA)으로 분석한 연구⁵⁾, 대 구경 볼트 플랜지 접합부에 내압 조건을 부여하여 기계적 응력 및 실링 성능을 평가한 연구⁰, 다중 물 리장 결합 환경에서 복합재 라이너 기반 파이프 구 조의 민감도 해석을 수행한 연구") 등이 있다. 이들 연구는 주로 섬유 강화 복합재 기반의 구조적 거동 과 기계적 신뢰성을 중심으로 진행되었으며 내압 조 건이나 누설 가능성 및 응력 집중 등의 정적 해석에 초점이 맞춰져 있었다. 그러나 이러한 기존 연구들은 수소가스라는 특수한 유체 특성과 고압 환경을 고려 한 조건에서는 제한적인 적용성을 지니며 수소에 특 화된 접속재의 기밀성 및 구조적 안전성 확보를 위 한 체계적인 접근은 부족하다. 이에 본 연구에서는 수소가스를 사용하는 환경에서의 접속재 안전성 확 보를 위한 FEA 기반의 프로세스를 구축하고 실제 사용 조건에서 발생할 수 있는 하중 및 환경적 요인 을 고려하여 구조적 안전성을 종합적으로 검토하고 자 한다. 이를 위해 기존 접속재를 모델링하여 응력 집중, 변형 양상, 파손 모드 등을 해석하여 규명함으 로써 향후 시험뿐 아니라 조립 및 사용 조건에서도 적용 가능한 해석 기반의 설계 지침을 마련하는 것 을 목표로 하고자 한다.

2. 모델 분석

일반적으로 접속재는 배관 내부의 유체를 안전하 고 효율적으로 이송하기 위해 배관-배관 혹은 배관-기기(밸브, 압력기, 안전장치 등)를 연결하는 핵심 부 품이다. 이러한 접속재는 설치 위치와 기능에 따라 종단 접속재(end fitting)과 중간 접속재(mid-line fitting)로 구분된다. 종단 접속재는 보통 배관 말단부 (ends)에 설치되어 다른 장치와 연결하거나 배관을 밀폐(cap)하는 역할을 수행한다. 종단 접속재는 배관 을 연장하거나 분기(tee, elbow, reducer 등)하기 위하 여 가스가 흐르는 중간 라인에 주로 설치된다. 본 연 구에서 선정한 수소 배관용 접속재는 내부 유체가 수소이므로 전송 과정에서 고압 환경을 요구하는 경 우가 많다. 이러한 고압 환경에서 가스 누출 없이 기 밀을 유지하려면 접속재의 체결부와 밀봉부 설계를 정밀하게 수행하여야만 한다. 특히 수소 분자는 크기 가 작아 기존 천연가스용 접속재에 비해 훨씬 높은 수준의 기밀성을 확보하여야 하며 이를 위해 신규 가스켓(gasket) 재질 및 오링(O-ring) 구조⁸⁾ 등이 지 속적으로 연구 개발되고 있다. 또한 수소는 금속 결 정 내부로 침투하여 재질을 약화시키는 수소 취성 (hydrogen embrittlement, HE) 현상을 발현시킨다. 따 라서 이를 줄이고자 내수소성 합금강이나 스테인리 스강, 니켈 합금, 티타늄 합금 등과 같은 재질의 적용 방법이 검토되고 있으며 접속재 표면을 보호하기 위 한 코팅 및 처리 기술도 개발되고 있다. 이에 본 연구 에서는 반복적인 고압 및 저압 환경 변화에서도 접 속재 체결부가 풀리지 않고 구조적 안정성을 유지할 수 있는 소재, 접합 방법 및 시험 방법 등을 종합적으 로 조사하였다.

2.1 접합 방법

일반적으로 수소 배관을 접합할 때는 기밀성, 내 압성, HE 방지, 관련 표준 및 인증 요건을 중점적으 로 고려한다. 이러한 요구 사항을 충족하기 위하여 기존에 나사산 플랜지나 테이퍼-테이퍼 접착 접합, 적층형 접합 등 다양한 방식이 연구되었으나 실제 산업 현장에서는 크게 세 가지 접합 방식과 전기 융 착 피팅이 널리 적용되고 있다. 첫 번째 방식은 용접 (welded joint)과 플랜지 볼트 체결(flange joint)이다. 용접 접합은 배관 및 피팅을 용접해 일체화하는 방 식으로 기밀성과 구조적 강도가 우수하나 HE를 줄 이기 위해서는 후열처리(stress relief)나 저탄소 합금 강 사용 등 추가 공정이 필수적으로 요구된다. 반면

Table 1. Features of various pipe jointing methods

플랜지 볼트 체결 방식은 플랜지와 나사산을 결합해 설치와 분리가 용이하다는 장점이 있으나 나사산 부 위에서 기밀을 유지하기가 상대적으로 까다로울 수 있다. 두 번째 방식인 스웨이징(swaging)과 같은 기 계적 피팅(mechanical fitting)은 금속 배관의 끝단을 피팅 내부에서 기계적으로 압착 체결하여 밀봉하는 방법이다. 용접을 사용하지 않아 현장 시공이 신속하 며 비교적 재조립도 용이하나 배관 지름이 큰 경우 에는 내압성 및 내수소성에 대한 추가 검증이 필수 적이다. 세 번째로 전기 융착 피팅(electrofusion fitting)은 플라스틱 배관 양단에 전기히터 코일이 삽입 된 커플링을 활용하여 융착 및 접합하는 방식이다. 높은 수준의 기밀성을 확보하면서 설치 시간과 인력 을 절감할 수 있지만 전용 장비를 사용하여야 하며 특정 종류의 배관 재질에만 적용 가능하다는 점이 한계로 지적된다. 이 외의 접합 방법에 대한 특징은 Table 1과 같다.

2.2 시험 방법

수소 배관용 접속재(중간부, 종단부)는 기밀성, 내

Method	Features
Thread fitting	 Convenient installation and maintenance (no welding required - easy to handle) Minimal thermal impact (no welding - no change in material properties) Limited use in high-temperature/high-pressure environments (requires reliable sealing at threaded section)
Taper-taper adhesive joint	 Excellent stress distribution (increased bonding area on the tapered surface - reduced local stress) Lightweight and high-strength design (less weight and improved performance compared to mechanical fastening) Complex manufacturing process (requires precise machining, adhesive application, and strict condition control)
Laminated joint	 Easy fabrication and repair (simple joint surface geometry, no need for extensive machining) Minimal damage to the components (no cutting or overlapping of existing parts, ensures structural integrity) Increased thickness and surface treatment issues (possible flatness issues, additional post-processing required)
Rubber seal or key lock joint	 Simple construction and maintenance (no extra process required - easy disassembly and reassembly) Cost-effective (lower material and installation costs than welding or flangeed joints) Potential deterioration and limited service life (hardening or cracking of rubber material)
Socket and spigot joint	 Easy Installation (sealing by inserting spigot into socket, minimal tools needed) Flexible connection (rubber gasket acts as an elastic medium, absorbing impact, vibration, etc.) Limited application for high-pressure/high-temp (risk of hardening or cracking potential degradation over time)
Bolt joint	 Adjustable strength and fastening force (controllable torque - ensuring tension/shear strength) Minimal damage and reusability (little damage to the components upon disassembly) Risk of loosening at fastening points (bolts/nuts may loosen under vibration or impact)

압성, HE 안전성을 종합적으로 검증하기 위하여 여러 가지 시험 절차를 거친다. 먼저 내압 시험(pressure test)으로는 수압 시험(hydrostaic test)과 기밀 시험 (pneumatic test)이 있으며 수압 시험은 접합부(플랜 지, 용접부 등)를 포함한 전체 배관에 물을 채워 설계 압력의 약 1.3-1.5배 수준으로 가압한 뒤 누출이나 변형 및 파손 등이 발생하는지를 확인한다. 기밀 시 험은 공기나 질소 등의 가스를 이용하여 일정 압력 을 가한 상태에서 누출 여부를 측정한다⁹. 기밀성 시 험(leak test) 방식으로는 헬륨 누출 시험(helium leak test)과 비눗물 시험(soap bubble test)이 대표적이다. 헬륨 누출 시험은 헬륨과 검출에 용이한 가스를 배 관 내부에 주입한 후 헬륨 누출 감지기를 사용해 플 랜지나 나사 연결부 등에서 발생할 수 있는 미세 누 출을 검사한다. 비눗물 시험은 주로 저압 단계나 초 도 테스트 시에 접합부 겉면에 비눗물(거품 용액)을 발라 거품 발생 여부로 누출을 확인하는 간단한 방 법이다. 이 외에도 HE와 내구성을 평가하기 위해 인 장 및 충격 시험 전후에 수소가 누출되는지를 확인 하는 시험을 수행하기도 하며 반복 압력 사이클 시 험(pressure cycling test)을 통해 실제 사용 환경에서 반복적인 압력 변동으로 인하여 피로 파괴나 밀봉 손상이 일어나는지를 평가한다. 이와 같은 시험을 종 합적으로 실시함으로써 수소 배관용 접속재가 실제 운전 조건에서 안정적으로 작동할 수 있는지를 검증 하게 된다.

2.3 기밀 소재

수소는 분자 크기가 매우 작아 고압 상태에서 고 무(elastomer) 내부로 쉽게 침투(permeation)하며 압력 이 급격하게 변화하는 과정에서 탈착(decompression) 으로 인한 미세 균열이 발생하기 쉽다. 이에 따라 수 소 환경 조건에서 사용되는 부품 혹은 설비에서는 투과도와 내구성이 검증된 기밀 소재를 선택하는 것 이 핵심 과제이다. 일반적으로 이러한 환경에서 사용 되는 기밀부 소재는 크게 nitrile butadiene rubber (NBR), ethylene propylene diene monomer (EPDM),

fluoroelastomers (FKM), polytetrafluoroethylene (PTFE) 등으로 분류할 수 있다. NBR은 가격이 저렴하고 천 연가스 설비 등에서 오랫동안 활용되어 왔으나 수소 환경에서는 소재 팽윤과 장기간 노출 시 경화가 일 어날 수 있어 주의가 필요하다. EPDM은 내오존성, 내노화성, 내열성이 우수하여 상온 및 고온 환경에서 다양하게 사용된다. 다만 수소 노출 시 팽윤과 물성 변화가 보고되었으며 장기 내구성에 관한 공개 자료 는 아직 많지 않아 이에 대한 추가 검증이 권장된다. Fluoro rubber, Vition 등의 FKM은 내열성, 내화학성 이 뛰어나 극한 환경용 소재로 자주 거론된다. 일부 수소 설비 부품에서 사용 사례가 있고 상대적으로 낮은 수소 투과도를 보여 팽윤이 크지 않으나 제품 별 편차가 존재하기에 표준화된 내구성 데이터 확보 가 필요하다. Kalrez 등의 perfluoroelastomer는 FKM 보다도 높은 내열성 및 내화학성을 갖춘 소재로 반 도체, 화학 공정 등 극한 환경에서 주로 사용된다. 수 소 투과도가 매우 낮으나 가격이 높아 대형 배관보 다는 핵심 소규모 부품에 제한적으로 적용되는 사례 가 많다. 마지막 소재인 PTFE는 고무가 아닌 플라스 틱 계열로 수소 투과도가 낮고 대다수 화학물질에 내성이 뛰어나 밸브 시트나 가스켓 등에 사용된다. 그러나 탄성과 복원력이 낮아 고압 사이클에서 누설 가능성이 비교적 크며 미세 접합면 대응성이 떨어진 다는 한계가 있다.

3. 유한요소해석 모델

3.1 모델 구성

본 연구에서는 비금속 flexible 배관용 접속재의 안전성을 평가하기 위해 선진사 모델을 기본 모델로 하여 FEA 모델을 구성하였다. 이 중 종단 접속재는 배관, cover, collet 등 총 16개 파트로 구성하였으며 중간 접속재는 배관, cover, inner core 등 총 8개 파 트로 구성하였다. 각 접속재의 구조는 Figs. 1, 2과 Tables 2, 3에 제시하였다.



Fig. 1. FEA model of end fitting connector



Fig. 2. FEA model of mid-line fitting connector

본 연구에서 구축한 FEA 모델은 중간 및 중간 접 속재의 물성치가 완전히 확보되지 않은 관계로 참조 물성을 기반하여 선정하였다. 종단 접속재에 적용되 는 고무(기밀 소재)는 본래 두 가지로 구성되어 있었 으나 우레탄(urethane)은 고압 수소 환경에서 수소 투 과도가 높고 급속 가스 감압(rapid gas decompression) 에 취약하며 실제 고무 물성(Ogden 3차 함수식)¹⁰⁾의 부재로 인하여 경도값을 탄성계수로 근사화해야 하 는 제약이 존재하였다. 이는 해석 신뢰도를 낮출 우 려가 있으므로 두 개의 고무 소재 모두 EPDM (경도 90)의 물성을 동일하게 적용하였다. 또한 fiber re-

No.	Part name	Material
1	Inner pipe	HDPE
2	Outer pipe	GFRP
3	End coupler cover	AL2024
4	End coupler inner core	S45C
5	Elastomer 1	EPDM
6	Elastomer 2	UR
7	Gap spacer 1	AL2024
8	Gap spacer 2	AL2024
9	Gap spacer 3	AL2024
10	Elastomer 3	UR
11	Elastomer 4	EPDM
12	Collet	AL2024
13	End coupler inner	AL2024
14	End coupler body	AL2024
15	Washer	SCM435
16	Bolt	SCM435

Table 2. Parts of end fitting connector and materials

Table 3. Parts of mid-line fitting connector and materials

No.	Part name	Material
1	Inner pipe	HDPE
2	Outer pipe	GFRP
3	Mid coupler cover	AL2024
4	Collet	AL2024
5	Elastomer 1	EPDM
6	Elastomer 2	EPDM
7	Elastomer 3	EPDM
8	Mid coupler inner core	AL2024

inforced plastic (FRP) 물성 역시 섬유 배치각, 두께 등 배관 구조를 특정할 수 없었기에 복합 재료의 1방향 (섬유 방향) 강도를 기준으로 등방성 및 균질성 물성 으로 설정하였다. 이는 실제 제조 시 연속 섬유(continuous fiber)를 사용하여 적층하기에 2방향(섬유 수직 방향) 과 3방향(섬유 두께 방향)이 각 적층된 1방향 강도에 의하여 보강될 것으로 판단되었고 파손 유무 또한 1방향 파손 유무에 따라 예측될 것으로 판단되었기 때문에 1방향 강도를 활용하여 FRP를 등방성 및 균질성 물 성으로 가정하여 설정하였다. 이 외 종단 접속재의 inner core 및 inner의 중간 홀은 실제 시험에서 유체 주입구로 사용하기 위하여 설계됨에 따라 본 연구에 서는 해석용 물성을 Table 4와 같이 선정하였고 불필 요한 형상들을 제거하고 Figs. 3, 4와 Tables 5, 6과 같이 다시 모델링을 수행하였다.

3.2 경계 조건(boundary conditions)

본 연구에서는 배관용 접속재의 경계 조건(boundary conditions, BC)을 조립 조건과 사용 조건을 모두 고 려하여 다음과 같이 구성하였다. 종단 접속재의 해석 단계는 크게 두 가지로 구분되며 1단계(step 1)는 조 립 조건(볼트 체결), 2단계(step 2)는 사용 조건(내압 부여)으로 구분하였다. 조립 조건을 모사하기 위하여 pre-tension 기능¹¹⁾을 활용하여 body-cover, inner coreinner 간의 볼트 체결을 구현하였고 이때의 체결 하 중인 7,720 kgf를 뉴턴(N) 단위로 환산하여 75,656 N 으로 적용하였다. 또한 각 파트 간의 접촉을 표현하 고자 general contact 조건을 부여하였으며 이때 hard contact 방식을 적용하여 접촉면이 서로 관통되거나 겹치는 것을 방지하고 접촉이 발생할 경우 법선 방 향으로 강한 반력이 발생함에 따라 관입이 0에 가깝

Table 4. Material properties of connector

Al2024-T4			
Young's modulus	73,100 MPa		
Poisson's ratio	0.33		
S4	ISC		
Young's modulus	205,000 MPa		
Poisson's ratio	0.33		
GFRP			
Young's modulus	36,500 MPa		
Poisson's ratio	0.24		
HI	DPE		
Young's modulus	600 MPa		
Poisson's ratio	0.42		
SCM435			
Young's modulus	210,000 MPa		
Poisson's ratio	0.3		



Fig. 3. Re-model of end fitting connector



Fig. 4. Re-model of mid-line fitting connector

Table 5. Parts of re-end fitting connector and materials

No.	Part name	Material
1	Inner pipe	HDPE
2	Fiber reinforced plastic	GFRP
3	Outer pipe	HDPE
4	Cover	AL2024
5	Collet	AL2024
6	Inner core	S45C
7	Elastomer (top/bottom)	EPDM
8	Inner	AL2024
9	Body	AL2024

Table 6. Parts of re-mid line fitting connector and materials

No.	Part name	Material
1	Inner pipe	HDPE
2	Fiber reinforced plastic	GFRP
3	Outer pipe	HDPE
4	Mid coupler cover	AL2024
5	Collet	AL2024
6	Elastomer	EPDM
7	Mid coupler inner core	AL2024

도록 하였다. 즉 압축력은 정상적으로 전달하되 접촉 면 사이에 인장력이 걸리는 상황에서는 실제 물리적 접촉이 끊어진다고 가정하여 인장응력은 전달되지 않 도록 설정하였다. 이때의 마찰계수(friction coefficient) 는 일반적인 값인 0.1을 사용하였다. 구속 조건은 배 관이 충분히 길다고 가정하여 원격단(배관 끝단면) 에서의 변위 및 회전이 매우 작아 무시할 수 있다고 판단되어 6 자유도를 모두 고정하였다. 본래 2D 축 대칭 모델로 단순화함으로써 해석의 시간을 감소시 키고자 하였으나 outer bolts와 inner bolts의 위치로 인하여 완전 축 대칭을 구현할 수 없었기에 180° 모 델링을 적용하고 XY 평면을 기준으로 대칭 조건을 부여하였다. 사용 조건에서는 수소 배관의 사용 압력 인 7 MPa (70 bar)을 inner core와 배관에 가압하였 으며 이 외의 접촉 조건과 구속 조건은 조립 조건과 동일하게 유지하였다. 이러한 BC를 종합적으로 부여 한 종단 접속재의 해석 모델 형상은 Fig. 5와 같다.

중간 접속재의 FEA 모델은 종단 접속재와 달리 볼트 위치에 따른 제약이 없기에 해석 시간을 단축 시키고자 2D 축 대칭 모델링을 적용하였다. 해석 단 계는 총 4단계로 구성하였으며 이는 다음과 같다. 1단계인 O-ring 체결 조건에서는 단순 체결 조건이 기에 별도의 하중을 부여하지 않았고 접촉 조건은 종단 접속재와 동일하게 hard contact 및 마찰계수 0.1을 고려한 general contact을 적용하였다. 또한 O-ring의 억지 끼워 맞춤(interference fit) 조건¹²⁾을 부여하여 실제 기밀부의 체결 상태를 모사하였다. 2단계인 조립 조건은 설계 체결력의 부재로 인하여 cover에 4 mm 변위를 임의로 부여하였고 접촉 조건 과 구속 조건은 이전 단계와 동일하게 적용하였다. 3단계인 사용 조건은 실제 사용 압력인 7 MPa을 배 관 내부에 가압하였으며 접촉 조건 및 구속 조건의 변화는 없다. 4단계인 O-ring 내압 부여 조건은 중간 접속재 파트 간(기밀부) 계면으로 내압이 침투하는 상황⁹⁾을 가정하여 침투 시의 O-ring의 거동과 기밀 성능 변화를 분석하고자 하는 단계로 내압 7 MPa을 동일하게 부여하고 surface-to-surface 접촉 조건을 적 용하였으며 구속 조건은 이전 단계와 동일하게 부여 하였다. 이때 첫 번째 기밀 소재에서 계면 침투로 인 한 기밀 성능이 기준 이하로 저하되는 경우 중간 접 속재의 전체 기밀 성능이 확보되지 않는다고 가정하 여 첫 번째 기밀 소재에만 계면 침투 조건을 부여하 였고 해당 소재의 기밀 성능을 집중적으로 평가하였 다. 또한 축 대칭 모델 외 상단과 하단의 형상이 동일 하다는 점을 이용하여 배관 축 방향(X 방향)에 대해 서도 대칭 조건을 적용함으로써 해석 시간을 추가로 절감하였다. 이에 대한 형상은 Fig. 6과 같다.



Fig. 5. BCs of end fitting connector



Fig. 6. BCs of mid-line fitting connector

4. 유한요소해석 결과 분석

4.1 종단 접속재

종단 접속재에 대한 구조 해석 결과 collet에서 최 대 폰 미제스 응력(Von-mises stress) 357.3 MPa이 발생한 것을 확인하였다. 이는 body-cover 간 볼트를 체결할 때 원주 방향으로 압축력이 형성되고 내압에 의해 inner core가 축 방향으로 상승하며 기밀 소재 가 압축된 상태에서 원주 방향으로 팽창함에 따라 해당 부위에서 배관을 밀어냄으로써 collet 부위에서 가장 큰 압축 응력이 집중되어 최대 응력이 나타난 것으로 판단된다. 종단 접속재의 전체 및 파트별 응 력 결과는 Fig. 7과 Table 7에 나타내었다.

접촉 압력(contact pressure)의 경우 내압보다 높은 값을 나타내면 기밀이 유지된다고 가정하였으며 구 조 해석 결과 각 기밀 소재에서 46.05, 39.35, 39.96, 43.06 MPa의 접촉 압력이 확인되어 모두 7 MPa을



Fig. 7. Results of end connector (Von-mises stress)

Table 7. Results of end connetor by parts (Von-mises stress)

No.	Part name	Maximum stress (MPa)
1	Inner pipe	26.3
2	FRP	338.0
3	Outer pipe	48.3
4	Cover	324.4
5	Collet	357.3
6	Inner core	267.9
7	Elastomer (T/B)	3.4
8	Inner	169.8
9	Body	326.9



Fig. 8. Results of end connector (contact pressure)

Table 8. Results of end connector elastomer (contact pressure)

No.	Part name	Maximum pressure (MPa)
1	Elastomer 1 (top)	46.0
2	Elastomer 2 (mid top)	39.3
3	Elastomer 3 (mid bottom)	39.9
4	Elastomer 4 (bottom)	43.0

초과함에 따라 기밀이 유지된 것으로 판단하였고 실 사용 조건에서도 충분한 기밀 성능을 확보할 수 있 을 것으로 판단된다. 기밀 소재별 접촉 압력 결과는 Fig. 8 및 Table 8과 같다.

4.2 중간 접속재

중간 접속재의 구조 해석 결과 Fig. 9 및 Table 9 와 같이 mid coupler cover에서 최대 폰 미제스 응력 138.8 MPa이 발생한 것을 확인하였다. 이는 종단 접 속재와 유사하게 cover가 체결될 때 원주 방향 압력 으로 압축력이 형성되고 이후 내압 작용으로 배관이 원주 방향으로 인장됨에 따라 collet에서 강한 압축 력이 발생한 것으로 판단된다. 다만 내압 적용 후 배 관이 늘어나는(인장력) 영향으로 최종적으로 mid coupler cover에서 가장 높은 응력이 발생한 것으로 판단 된다. 중간 접속재의 기밀 성능은 종단 접속재와 동 일하게 판단하였으며 해석 결과 Fig. 10 및 Table 10 과 같이 기밀 소재가 11.97 MPa의 접촉 압력을 보임 에 따라 실사용 조건에서도 충분한 기밀 성능이 확 보된다는 것을 판단할 수 있었다.



Fig. 9. Results of mid-line connector (Von-mises stress)

No.	Part name	Maximum stress (MPa)
1	Inner pipe	8.2
2	FEP	8.7
3	Outer pipe	22.5
4	Mid coupler cover	138.8
5	Collet	112.0
6	Elastomer	5.4
7	Mid coupler inner core	102.3

Table 9. Parts of mid line fitting connector by parts (Von-mises stress)



Fig. 10. Results of mid-line connector (contact pressure)

 Table 10. Results of mid-line connector elastomer (contact pressure)

No.	Part name	Maximum pressure (MPa)
1	Elastomer 1	11.9
2	Elastomer 2	5.7
3	Elastomer 3	5.8

5. 설계 변수별 영향 분석

5.1 변수 선정

앞서 도출된 종단 및 중간 접속재의 구조 해석 결 과를 토대로 본 연구에서는 다음과 같은 설계 변수 를 선정하고 이에 따른 영향을 분석하였다.

종단 접속재의 설계 변수로써 총 6가지를 다음과

같이 선정하였다. Inner 파트의 bolt 접촉 조건으로 tie 조건을 부여한 변수는 볼트 체결 후 내압이 가해 질 때 고무의 탄성으로 인하여 볼트가 풀리는 현상 을 방지하기 위해 선정하였다(5.2.1.1절). Outer pipe 제거 변수의 경우 outer pipe를 제거할 시 조립성이 향상될 수 있으나 collet 체결에 의하여 배관이 손상 될 가능성이 높아지기에 유무에 따른 구조적 및 기 밀적 영향을 비교하고자 하였다(5.2.1.2절). 기밀 소 재의 위치 변경 변수의 경우 기밀 소재의 위치를 바 꿔 collet 끝단 부근에서 발생하는 응력을 완화할 수 있는지 확인하기 위하여 선정하였다(5.2.1.3절). 기밀 소재의 횡 방향 길이 증대 변수의 경우 기밀 소재의 두께(폭)를 늘릴 경우 조립성은 다소 떨어지나 기밀 성능이 향상될 것으로 기대되어 해당 변수를 선정하 였고(5.2.1.4절) inner core의 기밀 소재 홈(groove) 생 성 변수의 경우 기밀 소재가 담당하는 축 방향 하중 을 줄여 구조적 안전성을 높이기 위해 선정하였다 (5.2.1.5절). Body 및 inner를 단일 파트로 구성한 변 수의 경우 볼트 개수를 감소시킴에 따라 축 방향 하 중을 감소시키는 효과를 분석하기 위하여 선정하였 다(5.2.1.6절).

중간 접속재의 설계 변수는 총 2가지를 선정하였으며 이는 다음과 같다. 첫 번째 변수인 cover 체결력 변경 항목의 경우 체결력 수준에 따라 기밀 소재가 제공하는 기밀 성능이 변화될 수 있기에 이에 대한 영향을 분석하고자 선정하였고(5.2.2.1절) 두 번째 변 수인 기밀 소재의 두께(직경)를 변경하는 항목은 기 밀 소재의 두께 변화가 기밀 성능에 미치는 영향을 검증하고자 선정하였다(5.2.2.2절).

5.2 변수별 유한요소해석 결과

5.2.1 종단 접속재

5.2.1.1 Inner의 볼트 접촉 조건 변경(tie)

본 연구에서 선정한 종단 접속재의 첫 번째 설계 변수 적용 시 Fig. 11 및 Table 11과 같이 collet에서 최대 폰 미제스 응력이 336.5 MPa로 나타났다. 이는 outer 볼트 체결로 인한 cover의 원주 방향 압축과 inner 볼트 체결로 인한 축 방향 압축이 중첩되어 기밀 소재가 팽창함에 따라 collet에 높은 압축력이 작용 하였기 때문으로 판단된다. Tie를 적용하자 inner가 받는 응력이 약 22% 증가한 반면 다른 부품들의 응 력은 1% 이하로 소폭 감소하였다. 접촉 압력도 소폭 하락하였으나 여전히 7 MPa 이상을 유지하여 기밀 성능에는 큰 영향이 없는 것으로 판단된다. Tie가 없 는 모델에서는 내압이 가해진 후 볼트 하단 면의 접 촉 압력이 감소하면서 볼트가 약간 상승하였으나 tie 가 적용된 모델은 이러한 볼트 풀림 현상이 억제되 어 구조적 안전성과 기밀 성능을 유지하기에 유리한 조건이라는 것을 판단할 수 있었다.



Fig. 11. Results of end connector (parameter 1)

No.	Part name	Maximum value (MPa)	
		OG	P1
1	Inner pipe	26.3	26.3
2	FRP	338.0	336.5
3	Outer pipe	48.3	47.9
4	Cover	324.4	324.4
5	Collet	357.3	356.6
6	Inner core	267.9	252.5
7	Elastomer (T/B)	3.4	3.4
8	Inner	169.8	219.2
9	Body	326.9	326.9
10	Elastomer 1	46.0	45.6
11	Elastomer 2	39.3	39.1
12	Elastomer 3	39.9	38.9
13	Elastomer 4	43.0	41.8

 Table 11. Results of end connector by parts (parameter 1)

5.2.1.2 Outer pipe 제거

앞서 첫 번째 설계 변수를 제외한 다른 모델은 모 두 inner에 tie를 적용한 기존 모델과 비교하였다. 두 번째 설계 변수의 구조 해석 결과 Fig. 12 및 Table 12 와 같이 FRP에서는 기존 대비 약 4.3% 증가한 351.8 MPa의 최대 폰 미제스 응력이 발생하였고 cover는 약 7.9% 감소한 298.8 MPa, collet은 약 2.5% 감소한 247.6 MPa을 보였다. 이는 outer 파이프가 없을 시 cover 체결에 따른 원주 방향 압축력을 FRP가 대신 받으면서 응력이 증가한 것으로 해석된다. 반면 cover와 collet은 파이프가 제거되어 체결 시 이동 가능 한 공간이 늘어나 상대적으로 압축 하중이 감소한 것으로 판단된다. 이를 통해 cover 및 collet의 응력은 감소하나 FRP에 더 큰 응력이 집중되어 레진 파괴나



Fig. 12. Results of end connector (parameter 2)

Table 12. Results of end connector by parts (parameter 2)

Na	Part name	Maximum value (MPa)	
NO.		OG	P2
1	Inner pipe	26.3	22.2
2	FRP	336.5	351.8
3	Outer pipe	47.9	-
4	Cover	324.4	298.8
5	Collet	356.6	347.6
6	Inner core	252.5	262.0
7	Elastomer (T/B)	3.4	3.1
8	Inner	219.2	219.9
9	Body	326.9	326.9
10	Elastomer 1	45.6	42.6
11	Elastomer 2	39.1	36.5
12	Elastomer 3	38.9	39.0
13	Elastomer 4	41.8	41.8

권선(섬유) 붕괴 가능성이 높아질 수 있으며 이로 인 한 피로 수명 단축도 우려되기에 향후 설계 시 이러 한 영향을 종합적으로 고려할 필요가 있다. 이외의 접촉 압력과 다른 파트의 응력 변화는 미미한 수준 이었다.

5.2.1.3 기밀 소재 위치 변경

세 번째 설계 변수에 대한 모델의 구조 해석 결과 Fig. 13 및 Table 13과 같이 collet에서 최대 폰 미제 스 응력으로 346.2 MPa이 확인되었다. 이는 하단 기 밀 소재가 축 방향으로 올라감에 따라 본래 collet 끝 단에 집중되던 축 방향 하중이 두께가 두꺼운 중간 부로 분산되면서 응력이 다소 감소한 것으로 판단된



Fig. 13. Results of end connector (parameter 3)

	Part name	Maximum value (MPa)				
No.		OG	P3			
			10 mm	20 mm	30 mm	
1	Inner pipe	26.3	22.5	21.7	27.7	
2	FRP	336.5	311.6	307.0	297.9	
3	Outer pipe	47.9	39.8	40.1	41.6	
4	Cover	324.4	324.8	325.0	324.9	
5	Collet	356.6	342.6	343.0	346.2	
6	Inner core	252.5	254.5	254.7	254.3	
7	Elastomer (T/B)	3.4	2.7	2.3	2.2	
8	Inner	219.2	220.3	219.7	219.2	
9	Body	326.9	327.0	327.1	327.1	
10	Elastomer 1	45.6	44.8	44.7	44.8	
11	Elastomer 2	39.1	39.1	39.1	39.2	
12	Elastomer 3	38.9	40.2	39.6	38.4	
13	Elastomer 4	41.8	43.0	43.5	41.3	

 Table 13. Results of end connector by parts (parameter 3)

다. 또한 cover 체결로 collet 끝단이 원주 방향으로 압축을 받던 상황에서 기밀 소재가 상부로 이동함으 로써 기밀 소재가 전달받는 힘이 분포 하중 형태로 바뀌고 접촉면이 넓어져 기밀 소재와 주변 부품에 걸리는 응력이 전반적으로 감소한 것을 알 수 있었 다. 이외에는 이전과 동일하게 접촉 압력 및 다른 파 트들의 응력 변화는 미미한 수준으로 나타났다.

5.2.1.4 기밀 소재 횡 방향 길이 증대

네 번째 설계 변수에 대한 모델의 구조 해석 결과 Fig. 14 및 Table 14와 같이 collet에서 최대 폰 미제 스 응력으로 362.1 MPa, 기밀 소재에서 약 2.395 MPa (29.89% 감소)이 확인되었다. 이는 cover 체결로 인 한 원주 방향 압축과 inner 볼트의 축 방향 압축이 중



Fig. 14. Results of end connector (parameter 4)

Table 14. Results of end connector by parts (parameter 4)

No.	Destaura	Maximum value (MPa)		
	Part name	OG	P4	
1	Inner pipe	26.3	25.9	
2	FRP	336.5	349.3	
3	Outer pipe	47.9	51.2	
4	Cover	324.4	324.4	
5	Collet	356.6	262.1	
6	Inner core	252.5	253.0	
7	Elastomer (T/B)	3.4	2.3	
8	Inner	219.2	220.1	
9	Body	326.9	326.9	
10	Elastomer 1	45.6	45.6	
11	Elastomer 2	39.1	39.8	
12	Elastomer 3	38.9	35.7	
13	Elastomer 4	41.8	69.7	

첩되면서 collet 끝단에 응력이 집중되었기 때문이다. 또한 기밀 소재 폭이 증가함에 따라 collet을 더 많이 압축하게 되어 collet 끝단 응력은 약 1.51%, FRP는 3.66%, outer 파이프는 6.54% 각각 증가하였다. 반면 기밀 소재의 응력이 낮아진 사유로 기밀 소재와 inner 파이프 사이에 초기 간격이 없는 억지 끼워 맞춤 상태에서 압축 변형이 선행되어 선압축(pre-compression) 및 선응력(pre-stress)이 형성되었기 때문이다. 이로 인하여 추가 하중이 가해져도 소재 중앙부 혹은 특 정 부위로 응력이 집중되지 않고 하중이 균등하게 분산되면서 기밀 소재 내부 응력이 낮아진 것으로 판단된다. 최종적으로 접촉 압력은 기존 대비 약 40% 향상되어 횡 방향 길이 증대에 따른 압축 효과가 크 게 증가하였음을 확인할 수 있었다.

5.2.1.5 기밀 소재 홈 생성

다섯 번째 설계 변수로 inner core에 기밀 소재의 홈을 추가한 결과 Fig. 15 및 Table 15와 같이 inner core에서 최대 폰 미제스 응력인 359.5 MPa이 발생 한 것을 확인하였다. 이는 기존과 달리 접속재와 배 관의 축 방향 압축 하중을 기밀 소재나 gap spacer 대 신 inner core가 주로 부담하게 되면서 기밀 소재의 원주 방향이 줄어든 데에서 기인한다. 이에 따라 collet이 아닌 inner core에서 최대 응력이 발생하고 FRP, outer 파이프, collet, 기밀 소재 등의 응력은 모 두 낮아진 것을 확인하였다. 접촉 압력 역시 기밀 소 재의 압축량이 감소함에 따라 기존 대비 전반적으로 감소한 것으로 판단된다.



		Maximum value (MPa)			
No.	Part name	OG	Р5		
			Single ring	Double ring	
1	Inner pipe	26.3	28.4	25.3	
2	FRP	336.5	292.2	315.2	
3	Outer pipe	47.9	28.7	37.4	
4	Cover	324.4	325.6	327.1	
5	Collet	356.6	330.3	339.6	
6	Inner core	252.5	334.7	359.5	
7	Elastomer (T/B)	3.4	1.5	1.4	
8	Inner	219.2	246.3	259.3	
9	Body	326.9	326.6	326.4	
10	Elastomer 1	45.6	47.6	47.6	
11	Elastomer 2	39.1	41.7	41.4	
12	Elastomer 3	38.9	11.8	21.1	
13	Elastomer 4	41.8	13.3	6.2	

5.2.1.6 Body-inner 단일 파트 변경

마지막 종단 접속재의 설계 변수로 body와 inner 를 단일 파트로 제작하고 inner 볼트를 제거한 구조 해석 결과 Fig. 16 및 Table 16과 같이 collet 부위에 서 최대 폰 미제스 응력인 334.4 MPa이 확인되었다. 이는 cover 체결에 따른 원주 방향 압축과 내압에 의 한 인장력이 해당 부위에 집중된 것으로 판단된다. 반면 inner 볼트가 제거되면서 축 방향 하중이 감소 하여 cover와 inner 파이프를 제외한 타 파트들의 응 력은 전반적으로 줄어들었다. 또한 접촉 압력은 기존 대비 약 30% 감소하였으나 여전히 7 MPa 이상을 유 지하여 충분한 기밀 성능을 확보할 수 있다는 것으 로 판단된다. 한편 body와 inner를 단일화할 경우 제



Fig. 15. Results of end connector (parameter 5)



Fig. 16. Results of end connector (parameter 6)

No.	Dart name	Maximum value (MPa)		
	ran name	OG	P6	
1	Inner pipe	26.3	26.9	
2	FRP	336.5	306.1	
3	Outer pipe	47.9	30.8	
4	Cover	324.4	325.4	
5	Collet	356.6	334.4	
6	Inner core	252.5	185.0	
7	Elastomer (T/B)	3.4	1.0	
8	Inner	219.2	-	
9	Body	326.9	326.8	
10	Elastomer 1	45.6	13.9	
11	Elastomer 2	39.1	14.2	
12	Elastomer 3	38.9	12.7	
13	Elastomer 4	41.8	13.7	

 Table 16. Results of end connector by parts (parameter 6)

작 공정이 늘어 비용이 증가할 수 있으나 inner 볼트 제거로 인한 제작 비용 절감 효과와 볼트 돌출 문제 해소 이점도 기대된다.

5.2.2 중간 접속재

5.2.2.1 Cover 체결력 변경

첫 번째 설계 변수에 대한 중간 접속재 구조 해석 결과 Fig. 17 및 Table 17과 같이 3 mm 체결 조건에 서 mid coupler cover가 107.4 MPa의 최대 폰 미제스 응력을 보였다. 이는 내압 적용 이후 원주 방향 인장 력이 추가되어 mid coupler cover 부위에 응력이 집 중되기 때문이라고 판단하였다. 또한 기밀 소재를 제 외한 타 파트들은 체결력이 증가함에 따라 cover의 원주 방향 압축력도 증가하여 응력이 전반적으로 상



Fig. 17. Results of mid-line connector (parameter 1)

Table 17. Results of mid-line connector by parts	(parameter 1)
--------------------------------------------------	---------------

	Part name	Maximum value (MPa)				
No.		OG	P1			
		4 mm	1 mm	2 mm	3 mm	
1	Inner pipe	8.2	6.4	6.4	6.4	
2	FEP	8.7	37.4	45.1	63.6	
3	Outer pipe	22.5	8.3	13.2	17.7	
4	Mid coupler cover	138.8	47.8	76.1	107.4	
5	Collet	112.0	22.3	51.4	82.9	
6	Elastomer	5.4	5.4	5.4	5.4	
7	Mid coupler inner core	102.3	34.1	35.1	79.2	
8	Elastomer 1	11.9	11.7	11.8	11.9	
9	Elastomer 2	5.7	5.4	5.5	5.6	
10	Elastomer 3	5.8	5.4	5.5	5.7	

승하였으나 기밀 소재는 홈 깊이 및 폭이나 직경이 변하지 않은 이상 응력 및 접촉 압력이 큰 차이를 보 이지 않는 것으로 판단된다.

5.2.2.2 기밀 소재 직경 변경

두 번째 설계 변수로 O-ring 직경을 변경한 결과 Fig. 18 및 Table 18과 같이 mid coupler cover에서 최대 폰 미제스 응력으로 138.9 MPa이 발생한 것을 확인하였다. 이는 기존 모델 및 첫 번째 설계 변수에 서와 유사한 거동으로 인하여 발생한 것으로 판단된 다. 타 부품들에서는 큰 응력 변화가 없었으나 O-ring 직경이 2.1 mm일 때 응력이 상당히 증가한 것을 확 인하였다. 일반적으로 O-ring의 기밀 성능은 차지율 (gland fill)과 압축비(compression ratio)로 평가된다. 차지율은 O-ring 단면적이 홈 단면적에서 차지하는 비율(일반적으로 65-85% 권장)이며 압축비는 O-ring 이 축 방향(또는 반경 방향)으로 변형된 비율(일반적 으로 5-30% 권장)을 의미한다. 차지율이 65% 미만 일 경우 변형 후 밀봉력이 부족해지고 85%를 초과하 면 온도 변화나 내부 유체 팽창 시 O-ring이 더 이상 변형할 공간이 없어 과도한 응력이 발생한다. 압축비 가 5% 미만일 경우 밀봉력이 부족하고 30% 초과 시 내부 응력이 급증하여 조기 손상 위험성이 커진다. 본 연구에서의 직경 2.1 mm인 O-ring은 압축비 16.7%로



Fig. 18. Results of mid-line connector (parameter 2)

		Maximum value (MPa)					
No.	Part name	OG	P2				
		2.00	1.90	1.95	2.05	2.10	
1	Inner pipe	8.2	8.1	8.2	8.2	8.2	
2	FEP	87.7	87.7	87.7	87.7	87.7	
3	Outer pipe	22.5	22.5	22.5	22.6	22.6	
4	Mid coupler cover	138.8	138.9	138.9	138.8	138.9	
5	Collet	112.0	112.0	112.0	112.0	112.0	
6	Elastomer	5.4	5.8	5.5	5.3	7.5	
7	Mid coupler inner core	102.3	102.4	102.3	102.2	102.1	
8	Elastomer 1	11.9	11.7	11.5	12.5	12.4	
9	Elastomer 2	5.7	4.2	5.0	6.4	8.0	
10	Elastomer 3	5.8	4.3	5.1	6.6	8.2	
Gland fill (%)		81.6	73.6	77.6	85.7	90.0	
Compression ratio (%)		12.5	7.9	10.3	14.6	16.7	

Table 18. Results of mid-line connector by parts (parameter 2)

적합한 수준이나 차지율이 90%에 달해 변형할 여유 가 없어 과도한 응력이 누적되었다. 반면 직경 1.90-2.05 mm 구간은 차지율(66-85%)과 압축비(7.0-14.6%) 모두 권장 범위를 만족하면서 내압 대비 충분히 높 은 접촉 압력을 유지하였다. 이에 따라 직경 2.1 mm 도 기밀 성능은 확보할 수 있으나 수명 저하 우려가 크기 때문에 최대 차지율 85%와 최대 압축비 14.6% 를 만족하는 2.05 mm O-ring을 사용하는 것이 가장 안전한 선택이라는 것을 판단하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 수소 배관용 종단 및 중간 접속재 에 대한 FEA 모델을 구축하고 구조 안전성과 기밀 성능을 종합적으로 검토하였다. 이를 기반으로 각 설 계 변수를 선정하여 구조 해석을 통해 취약점을 분 석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 종단 및 중간 접속재에 대한 FEA 프로세스를 확 립하고 이를 기반으로 구조 해석을 수행함에 따 라 구조적 안전성 및 기밀 성능 평가가 가능함을 확인하였다. 또한 해석 모델 내에서 볼트 체결과 내압 조건 등과 같은 실사용 조건을 단계별로 적 용함으로써 실제 사용 환경에 가까운 응력 및 변 형 거동을 모사할 수 있음을 검증하였다.
- 2) 종단 접속재에서의 inner bolt 접촉 조건 적용, outer 파이프 제거, 기밀 소재 위치 변경, 기밀 소재 횡 방향 길이 증대, inner core 홈 생성, body-inner 단일화 등과 같은 변수를 해석한 결과 collet 또는 FRP에 집중되는 응력을 줄이거나 기밀 소재의 접촉 압력을 높여 기밀 성능을 개선할 수 있는 설 계안을 도출하였다. 그리고 중간 접속재에서의 cover 체결력과 기밀 소재의 직경 변화를 통해 밀 봉 성능과 응력 변화를 분석한 결과 차지율과 압 축비의 적절한 범위를 만족하는 O-ring을 선정함 으로써 내압 조건에서도 안정적인 기밀 성능을 확보할 수 있는 결과를 도출하였다.
- 3) 본 연구 결과는 수소 배관 접속재의 설계 및 FEA 를 위한 기초 자료로 활용될 수 있으며 주요 부품 에서 발생하는 응력 및 접촉 압력 특성을 반영하 여 안전 설계를 진행할 수 있는 기반을 제공하였 다. 추후 최적화 기법을 활용하여 설계 변수별 최 적의 값을 도출하는 연구와 실제 시험(수압·기밀 시험, 반복 압력 사이클 시험 등)을 통해 해석 모 델의 신뢰도를 검증하고 보다 정확한 물성을 확 보함으로써 구조적 안전성을 향상시킨 접속재를 개발할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기 술평가원(KETEP)의 "신재생에너지핵심기술개발(R&D)" 의 지원(No. RS-2024-00449107)과 산업통상자원부 (MOTIE)와 한국산업기술평가원(KEIT)의 "자동차산 업기술개발(R&D)"의 지원(No. RS-2024-00507688)을 받아 작성되었습니다.

References

- 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/JHN E.2023.34.2.122.
- W. S. Kim and J. I, Jang, "The effect of hydrogen on mechanical properties of gas pipeline material: I tensile property", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 15, No. 3, 2011, pp. 67-73, doi: https://doi.org/10.7842/kigas.2011.15.3.067.
- 3. W. S. Kim, "A review of piping materials for hydrogen supply", Journal of the KSME, Vol. 51, No. 11, 2011, pp. 37-41. Retrieved from https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrch Article.do?cn=JAKO201109649105692.
- G. Huysmans, I. Verpoest, and G. De Roeck, "Structural analysis of GRP pipe couplers by using a fracture mechanical approach", Composites Part B: Engineering, Vol. 29, No. 4, 1998, pp. 477-487, doi: https://doi.org/10.1016/S1359-8368 (97)00035-8.
- H. Estrada and I. D. Parsons, "Strength and leakage finite element analysis of a GFRP flange joint", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 76, No. 8, 1999, pp. 543-550, doi: https://doi.org/10.1016/S0308-0161(99)00021-6.
- 6. A. Muramatsu, K. Sato, M. U. Khan, and T. Sawa, "FEM stress analysis and the sealing performance evaluation of bolted pipe flange connections with large nominal diameter subjected to internal pressure", In: ASME 2016 Pressure Vessels and Pi-

ping Conference; 2016 Jul 17–21; Vancouver, Canada, pp. V002T02A008, doi: https://doi.org/10.1115/PVP2016-63407.

- K. Yang, B. Xue, H. Fang, X. Du, B. Li, and J. Chen, "Mechanical sensitivity analysis of pipe-liner composite structure under multi-field coupling", Structures, Vol. 29, 2021, pp. 484-493, doi: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.036.
- J. Yamabe, S. Nishimura, and A. Koga, "A study on sealing behavior of rubber o-ring in high pressure hydrogen gas", SAE International Journal of Materials and Manufacturing, Vol. 2, No. 1, 2009, pp. 452-460. Retrieved from: http://www.jstor. org/stable/26282777.
- W. Kim, W. Kim, D. Kim, C. Woo, and H. Lee, "Mechanical testing and nonlinear material properties for finite element analysis of rubber components", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol. 28, No. 6, 2004, pp. 848-859, doi: https://doi.org/10.3795/ksme-a.2004.28.6.848.
- G. Kim, H. Kim, H. Park, J. Lee, S. Yoon, H. Lee, J. Kim, S. Lee, G. Yoo, Y. Youn, and H. Kim, "A study on the structural safety analysis of neck mount block of type 4 hydrogen storage vessel by finite element method", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 2, 2024, pp. 195-204, doi: https:// doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.2.195.
- I. Pack, H. Rhee, and S. Lee, "A finite element analysis of elastomeric O-ring performance and structure when subjected to foreign objects", Journal of Aerospace System Engineering, Vol. 11, No. 1, 2017. pp. 28-34, doi: https://doi.org/10.20910 /JASE.2017.11.1.28.
- J. B. Wu, L. Li, and P. J. Wang, "Effect of stress relaxation on the sealing performance of O-rings in deep-sea hydraulic systems: a numerical investigation", Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol. 51, 2024, pp. 101 654, doi: https://doi.org/10.1016/j.jestch.2024.101654.