

수소충전소용 고압 릴리프밸브 국산화 기술 개발

김민우¹ · 이정환¹ · 강춘명¹ · 방영준¹ · 강부민¹ · 김호영¹ · 장덕호² · 임경민² · 왕학민^{2,†}

¹창원산업진흥원, ²범한산업(주)

Development of Locally Manufactured High-pressure Relief Valves for Hydrogen Stations

MIN WOO KIM¹, JUNG HWAN LEE¹, CHUN MYEONG KANG¹, YOUNG-JUN BANG¹, BOO MIN KANG¹, HO YOUNG KIM¹, DEOK-HO JANG², KYUNG MIN IM², HAK-MIN WANG^{2,†}

¹Changwon Industry Promotion Agency, 46 Changwon-daero 18beon-gil, Uichang-gu, Changwon 51395, Korea

²Bumhan Industry, 62 Jayumyeok 4-gil, Masanhoewon-gu, Changwon 51343, Korea

†Corresponding author :
hmwang@bumhan.com

Received 24 July, 2025
Revised 31 July, 2025
Accepted 4 August, 2025

Abstract >> The high-pressure relief valve used in hydrogen refueling stations is a critical component that mitigates excessive pressure, ensuring the safe and proper operation of the station. However, the domestic supply of this component is entirely dependent on imports. To address this issue, the present study aimed to develop and localize a high-pressure relief valve specifically designed for hydrogen refueling stations. The Changwon Industry Promotion Agency, which operates nine hydrogen refueling stations, conducted an analysis of the materials and structural characteristics of imported high-pressure relief valves to identify the root causes of failures under actual operating conditions. Based on this analysis, efforts were made to localize the valves by optimizing materials and improving the structural design to enhance their strength and durability. Validation tests of the newly developed product's high-pressure relief valve demonstrated a 29% reduction in maximum stress compared to existing imported models, confirming improved structural stability. Furthermore, through appropriate materials and structural design tailored to real-world hydrogen station operating conditions, the feasibility of domestic production and commercialization was successfully demonstrated.

Key words : Domestic production(국산화), Relief valve(릴리프밸브), Ultra high pressure (초고압), Hydrogen refueling system(수소 충전 시스템)

1. 서론

1.1 국내외 수소에너지 전환 도입

무분별한 화석연료 사용과 전 세계적으로 발생한 팬데믹(COVID-19) 이후 기후 위기의 심각성 인식이 크게 증가하였다. 이에 따라 세계 주요국에서는 구체적인 탄소중립 정책을 단계적으로 발표하여 빠른 속도로 기후 위기 대응 체제에 돌입하고 있다¹⁾.

이 중 수소에너지는 기후 위기 대응에 필요한 미래의 청정 에너지원으로 부각되고 있으며 세계 주요국에서는 탄소경제에서 수소를 주 에너지원으로 사용하는 수소경제(hydrogen economy)^{2,3)} 시대로 전환을 추진하고 있다.

국내에서도 2020년 4월 수소산업 발전을 위한 중장기 로드맵을 발표하는 등 수소 모빌리티를 포함한 수소경제 활성화를 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 특히 수소 모빌리티 분야에서 수소전기차 및 수소충전소 보급은 해마다 증가하고 있으며 정부는 2030년까지 660기, 2040년까지 1,200기의 수소충전소(충전 인프라) 보급을 목표로 하고 있다⁴⁾.

국내뿐만 아니라 세계 주요국에서도 수소 모빌리티 확충 계획을 수립하고 있다. Table 1은 연도별 세계 주요국의 수소충전소 보급 계획을 나타내고 있다⁵⁾. 이를 보면 국내와 마찬가지로 세계 주요국에서도 수소경제 시대로의 전환을 추진하고 있음을 확인할 수 있다.

1.2. 수소충전소 현황 및 국산화율

성공적인 수소 모빌리티로의 전환을 위해서는 수소충전소와 같은 수소 인프라의 선제적 구축이 필수

적이다.

특히 수소충전소는 수소 생산에서부터 최종 수요자에게 공급되기까지의 과정 전반에서 연료 청정성을 유지하는 역할을 하며 기존의 화석연료 기반 인프라를 대체하는 핵심 기반 시설로 정부가 제시한 수소산업 로드맵에서 중요한 역할을 차지하고 있다.

그러나 수소충전소의 보급은 정부 계획에 비해 지연되고 있는 실정이다. 이와 같은 인프라 구축의 지연은 수소전기차 이용자에게 충전 편의성과 접근성 측면에서 불편을 초래하고 있으며 이는 수소 기차의 구매를 고려하는 잠재적 소비자에게 심리적 장벽으로 작용하고 있다. 이로 인하여 수소전기차의 실제 보급은 기대에 미치지 못하고 있으며 수소 경제 확산에도 부정적인 영향을 미치고 있다.

Table 2는 정부가 제시한 연도별 수소충전소 보급 계획과 실제 구축 현황을 비교한 것이다. 최근 3년간 충전소 보급률은 89.3%로 계획 대비 구축 실적이 미진한 수준임을 확인할 수 있다.

수소충전소 구축 지연의 주요 원인으로는 핵심 부품에 대한 국내 원천 기술 부재가 지적된다. 현재 수소충전소 핵심 구성 요소 중 고압밸브, 레귤레이터, 수소 저장 용기 등은 전량 해외에서 수입되고 있으며 이에 따라 충전소 부품의 전체 국산화율은 40%에 불과하다는 조사 결과가 보고된 바 있다⁵⁻⁷⁾.

이러한 점은 단순한 수입 의존 문제를 넘어 충전 인프라의 공급 안정성과 기술 주권 확보 측면에서도 심각한 위협 요인이다. 특히 글로벌 공급망 변동성이 커지는 가운데 국산화를 제고는 수소경제 자립의 핵심 사항으로 볼 수 있다.

Table 3은 연도별 수소충전소 핵심 부품 국산화율

Table 1. Deployment plans for hydrogen refueling stations in major countries worldwide (unit: EA)

Year	Japan	China	Germany
2022	160	100	400
2030	900	1,000	1,000

Table 2. Hydrogen refueling station construction status by year

Year	Plans (unit: EA)	Actual (unit: EA)	Result (unit: %)
2022	229	200	87.3
2023	274	267	97.4
2024	385	321	83.3
Deployment rate over the past three years			89.3

Table 3. Domestic production status of major core parts for hydrogen stations

Year	Com-pressor	Chiller-system	Storage tank	Dispenser	Valve
2020	×	×	×	×	×
2021	△	×	×	×	×
2022	○	△	×	×	△
2023	○	○	△	△	△
2024	○	○	△	△	△

을 정리한 것이다. 2024년 기준 수소충전소 핵심 부품 5종 중 압축기 및 냉동기의 국산화는 완료된 반면 고압밸브, 디스펜서 수소 저장 용기 등의 부품은 아직 국산화 진행 중에 있다. 이를 통해 향후 수소충전소의 안정적인 구축 및 운영을 위해서는 국산화가 완료되지 않은 핵심 부품의 국산화 추진이 시급하다는 점을 확인할 수 있다.

창원산업진흥원은 기체 수소충전소 9개소를 운영하고 있는 기관으로 실제 운전 환경에서의 부품 유지 보수 및 성능 이력 데이터를 추적하고 있다. 실제 이력 분석 결과에 따르면 고압 릴리프밸브는 체크밸브나 유량 조절 밸브 등 타 고압밸브에 비해 고장 발생 빈도가 높고 파손의 심각성도 상대적으로 크게 나타났다.

이에 따라 본 논문에서는 고압 릴리프밸브를 국산화 우선 대상 부품으로 선정하고 해당 부품의 내구성 향상 및 국산화를 위한 기술 개발을 추진하고자 한다.

2. 해외 선진사 고압 릴리프밸브

2.1 밸브 역할 및 설치된 제품의 문제점

수소충전소에 사용되는 릴리프밸브는 배관 내 압력이 설정된 한계값을 초과하지 않도록 과도한 압력을 방출하여 시스템을 보호하는 역할을 수행하며⁸⁾ 인적, 물적 피해를 예방하는 핵심 안전 부품이다^{9,10)}.

그러나 실제 수소충전소 운영 과정 중 초고압¹¹⁾에서 해외 선진사 릴리프밸브의 파손으로 작동 불능

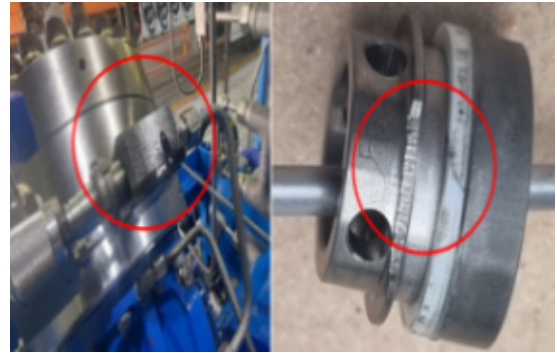


Fig. 1. Damage patterns in foreign products

사례가 발생하여 충전소 운영이 중단되는 등 안전성 및 신뢰성 확보에 어려움이 있었다. 이에 따라 해당 부품의 성능적 취약성 개선과 기술적 대안 마련의 필요성이 제기되고 있다.

Fig. 1은 실제 수소충전소에 설치된 해외 선진사 릴리프밸브의 설치 사진과 파손 부위를 보여준다.

본 논문에서는 해당 제품의 설계 구조와 재료 특성을 분석하고 구조 해석을 통해 취약 부위를 도출함으로써 개선된 릴리프밸브의 개발을 목표로 연구를 수행하였다

2.2 기존 제품의 구조 해석 및 소재 분석

Fig. 2는 실제 수소충전소에 설치된 비교 대상 제품인 릴리프밸브의 3D 형상을, Fig. 3은 해당 밸브에

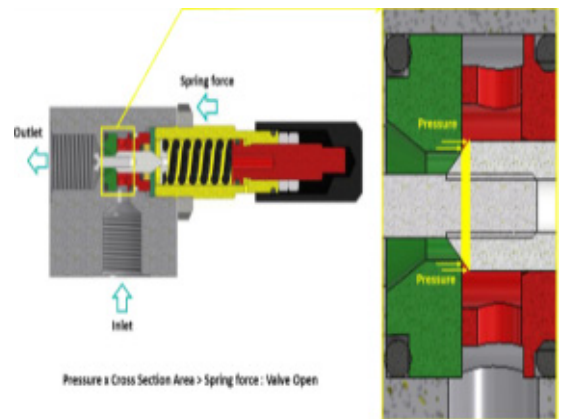


Fig. 2. 3D modeling of foreign products

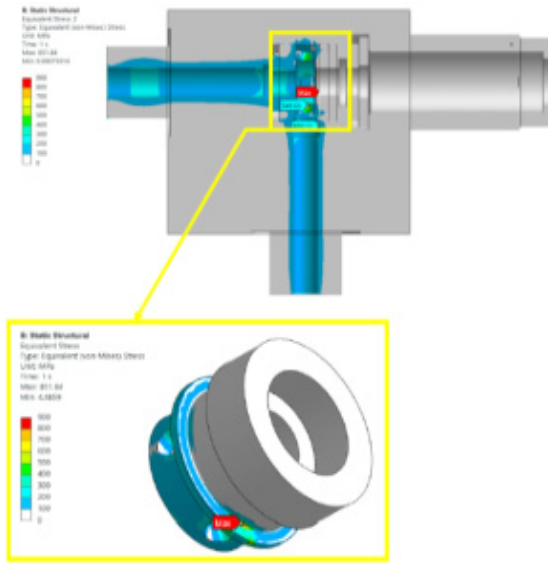


Fig. 3. Structural analysis results of foreign products

대한 구조 해석 결과를 나타낸 것이다.

구조 해석은 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS Mechanical (Ansys, Canonsburg, PA, USA)을 활용하여 수행되었으며 해석 조건은 밸브 릴리프 설정 압력인 105 MPa로 설정하였다.

해석 결과 밸브 몸체에서는 내부 압력에 의해 발생하는 최대 응력이 약 400 MPa 미만으로 분석되어 구조적으로 비교적 안정적인 것으로 판단되었다. 그러나 밸브 콘의 가이드 역할을 하는 부품에서 최대 851.8 MPa의 응력이 발생하였으며 이는 실제 현장에서 파손이 발생한 부품 및 위치가 일치하는 것으로 확인되었다.

해당 부품은 밸브 핸들 측으로 오일이 누설되지 않도록 O-ring이 설치되는 부분으로 얇은 rib 형태로 되어 있다. 반복적인 고압 유동이 O-ring 측으로 전달됨에 따라 응력 집중이 발생되어 파손의 위험이 높은 구조적 취약 지점으로 분석되었다. 재료의 기계적 강도 차이에 따라 수명 차이가 발생할 수 있으나 초고압 운전 조건에서 반복 하중이 가해지는 수소 충전 시스템 특성상 해당 부품의 내구성 확보는 필수적이다.

초기에는 해당 제품이 일반 탄소강 계열 재질로

Table 4. Component analysis of foreign products

Component	Fe	Cr	Ni	C
Ratio (Wt%)	65.99	17.81	7.2	1.31

제작되었을 것으로 추정하고 내구성 개선을 위한 재료 변경을 고려하였으나 Table 4에 제시된 성분 분석 결과에 따르면 비교 대상 제품은 Cr 약 18%, Ni 약 7%, C 약 1.3%의 조성을 가지는 것으로 확인되었다. 이는 높은 내마모성 및 피로 수명을 확보한 고성능 소재임에도 불구하고 구조적 취약부에서 파손이 발생한 사례로 단순한 재료 보강만으로는 근본적인 내구성 문제 해결에 한계가 있음 시사하고 있다.

따라서 본 논문에서는 구조적으로 응력 집중을 최소화하고 반복 하중에 대한 저항성을 높일 수 있는 최적화 설계 방향을 채택하였다.

3. 시제품 제작 및 내구성 개선

3.1 구조 설계 및 모델링

본 논문에서는 해외 제품 대비 내구성 향상을 목표로 압력 1,000 bar, 사용 온도 -40°C에서 85°C의 조건을 만족하는 수소 충전 시스템에 적합한 고압 릴리프밸브를 설계하였다. 밸브의 주요 재료는 크롬-몰리브덴 강인 SCM440을 적용하였으며 이를 통해 밸브 본체의 기계적 신뢰성과 내구성을 확보하고자 하였다. 또한 해외 선진사 제품에서 응력 집중 문제가 확인된 유동 구간의 구조를 개선하고자 밸브 콘의 작동 메커니즘을 변경하였다.

기존 해외 제품은 플러그 가이드의 외측에 O-ring을 설치하는 방식으로 누설을 방지를 위한 rib 구조를 포함하고 있으나 해당 구조는 고압 환경에서 반복 작동 시 구조적 안정성이 낮은 것으로 분석되었다. 이에 본 연구에서는 구조적 취약부인 플러그 가이드를 제거하고 볼 체크밸브 구조를 채택하여 단순화된 설계를 적용하였다. 이를 통해 O-ring 설치에 따른 누설 발생 가능성을 최소화하고 밸브 전체의 내구성과 신뢰성을 향상시키고자 하였다.

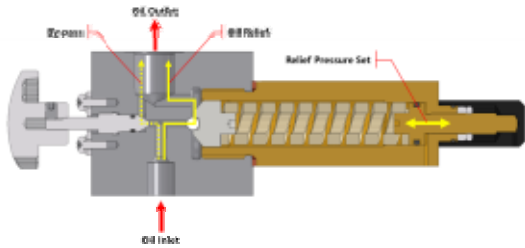


Fig. 4. 3D modeling of developed products

Fig. 4는 설계된 시제품의 3D 모델링 형상을 제시한 것이다.

3.2 시제품 현장 설치 및 구조 해석 결과

Fig. 5는 제작된 릴리프밸브 시제품의 구조적 성능을 평가하기 위하여 구조 해석을 수행한 결과이다. 해석 조건은 비교 대상인 해외 선진사 제품과 동일하게 밸브 내부 오일의 릴리프 설정 압력 105 MPa로 설정하였다.

시제품에서는 최대 응력이 602 MPa로 나타났으며 일부 좁은 면적이 집중된 replace seat 부위에서 발생하였다. 사용된 SCM440 소재의 최소 항복 강도가 834 MPa임을 고려할 때 해당 부품은 응력 허용 범위 내에서 안정적으로 작동할 수 있으며 약 1.38의 안전율(safety factor)을 확보하였다.

또한 동일한 조건에서 구조 해석한 해외 선진사 제품과 비교하였을 때 시제품은 최대 응력이 약 29% 감소한 것으로 나타났다. 이는 기존 제품의 구조적 취약부를 분석하여 설계를 개선한 결과이며 구조적 안정성 확보에 효과적임을 구조 해석 결과로 확인하였다.

아울러 제작된 릴리프밸브 시제품의 작동 및 이상 유무를 확인하기 위하여 실제 수소충전소 현장에 시제품을 적용하였으며 Fig. 6은 수소충전소 현장에 적용된 사진이다. 실제 수소충전소 고압 환경에서의 성능 검증을 통해 고압 릴리프 밸브의 국산화 가능성 확인하였다.

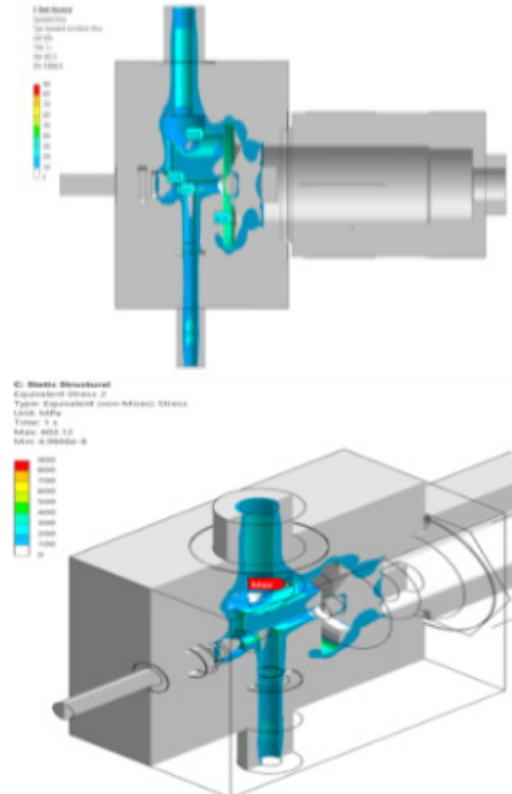


Fig. 5. Structural analysis results of developed products

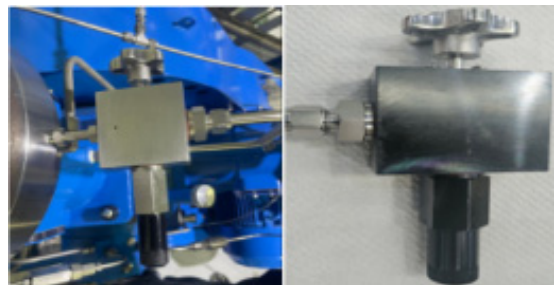


Fig. 6. Field application of developed products

4. 결론

본 논문에서는 국내 수소충전소 환경에 적용 가능한 고압 릴리프밸브의 국산화 및 상용화를 목표로 연구 개발을 수행하였으며 주요 성과는 다음과 같다.

- 1) 상용 수소충전소에서 사용되고 있는 해외 선진

사 제품의 모델링 및 구조 해석을 통해 문제점을 확인하고 이를 개선하기 위하여 시제품 제작 시 소재 변경 및 유동 구간 내 구조 변경을 실시하였다.

- 2) 비교 대상인 해외 선진사 제품의 구조 해석 결과 실제 제품에서 파손이 발생한 위치에서 약 851 MPa이 발생하는 것을 확인하였으며 이는 소재의 허용 응력을 초과하고 있어 파손이 발생할 수 있음을 확인하였다.
- 3) 비교 대상인 해외 선진사 제품의 파손 원인을 분석하여 구조적으로 취약한 부위 설계 보완을 통해 취약부를 개선하여 시제품을 설계하였다. 설계된 시제품에 대한 구조 해석 결과 비교 대상인 해외 선진사 제품 대비 약 29% 응력을 감소시켜 작동 압력에 대한 구조적 안정성을 확보하였다.
- 4) 본 연구는 해외 수입에 의존하던 고압 릴리프밸브의 국산화 가능성을 실증적으로 제시하였으며 향후 수입 대체 효과와 더불어 수소충전소 인프라 보급 확대에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제로 감사의 말씀을 드립니다.

References

1. A. J. Jeong, D. K. Jung, and C. S. Lee, "A study on Hyundai Motor global competitiveness strategies - development of fuel cell electric vehicles and internal organization reform", *International Commerce and Information Review*, Vol. 21, No. 4, 2019, pp. 151-170, doi: <http://doi.org/10.15798/kaici.2019.21.4.151>.
2. Y. Chung, "Role of fuel cell power plant in hydrogen economy", *Korean Management Science Review*, Vol. 38, No. 1, 2021, pp. 15-29, doi: <https://doi.org/10.7737/KMSR.2021.38.1.015>.
3. K. Y. Koo, H. B. Im, D. Song, and U. Jung, "Status of COx-free hydrogen production technology development using ammonia", *Journal of Energy & Climate Change*, Vol. 14, No. 1, 2019, pp. 34-42, doi: <https://doi.org/10.22728/jecc.2019.14.1.034>.
4. D. S. Lee, J. S. Park, and Y. S. Sim, "A study on the construction of fuel cell electric vehicle and hydrogen charging station supply activation (mainly in Gyeongsangbuk-do)", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 44, No. 12, 2022, pp. 560-568, doi: <https://doi.org/10.4491/KSEE.2022.44.12.560>.
5. Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), "Construction of hydrogen infrastructure and charging station", MOTIE, 2019. Retrieved from <https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCL3f49a5a8c/162215/view>.
6. C. W. Nam, R. M. Kim, and H. H. Kim, "A numerical study of flow control valve to flow characteristics by pressure difference for hydrogen station", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 25, No. 2, 2021, pp. 28-33, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2021.25.2.28>.
7. Z. Jin, F. Chen, J. Qian, M. Zhang, L. Chen, F. Wang, and Y. Fei, "Numerical analysis of flow and temperature characteristics in a high multi-stage pressure reducing valve for hydrogen refueling station", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 12, 2016, pp. 5559-5570, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.013>.
8. J. A. Choi, S. W. Ji, and J. S. Jang, "A study on design of ultra-high-pressure ball valve for hydrogen station", *Journal of Drive and Control*, Vol. 18, No. 3, 2021, pp. 23-29, doi: <https://doi.org/10.7839/ksfc.2021.18.3.023>.
9. S. B. Park, G. B. Kim, C. H. Jeon, S. N. Yun, and B. S. Kewon, "A study on the relief valve modeling and performance analysis of hydrogen compressor", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 20, No. 3, 2009, pp. 179-187. Retrieved from <https://www.koreascience.kr/article/JAKO200925265918471.page>.
10. Korean Standards Association, "Gaseous hydrogen-fueling stations-part 3: valves (KS B ISO 19880-3)", Korean Standards Association, 2019, pp. 7-11. Retrieved from <https://www.kssn.net/search/stdtdetail.do?itemNo=K001010124717>.
11. H. J. Ryu and S. H. Han, "A study on structure design of a ultra high pressurerelease valve for hydrogen station", *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 24, No. 5, 2022, pp. 871-879, doi: <https://doi.org/10.17958/Ksmt.24.5.202210.871>.