Check for updates
Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 33, No. 3, 2022, pp. 240~246
DOI: https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.3.240
KHNES
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

수소 충전소용 유량제어밸브(FCV)의 구조 및 피로해석을 통한 내구 성능 평가

최인호[1] · 하태일[2] · 김한상[1†]

[1]가천대학교 기계공학과, [2]㈜ 하이플럭스

Durability Assessment by Structural and Fatigue Analysis of Flow Control Valves (FCVs) for Hydrogen Refueling Stations

INHO CHOI[1], TAE IL HA[2], HAN SANG KIM[1†]

[1]Department of Mechanical Engineering, Gachon University, 1342 Seongnam-daero, Sujeong-gu, Seongnam 13120, Korea
[2]HIFLUX, 361-23 Gapcheon-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34037, Korea

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

Received 20 June, 2022
Revised 24 June, 2022
Accepted 27 June, 2022

Abstract >> This study was conducted to develop a domestic product for a flow control valve for a hydrogen refueling station, and a domestic prototype was manufactured and the durability performance evaluation was conducted through comparison with an imported products. The stress generated by the internal pressure was checked and safety was confirmed using a commercial structural analysis program, ABAQUS, in accordance with the withstand pressure test standards. In addition, after identifying the weak areas the fatigue life was predicted through a commercial software, fe-safe. This fatigue analysis showed that the hydrogen gas repeated test criteria were satisfied.

Key words : Hydrogen refueling stations(수소충전소), Test product(시제품), Flow control valve(유량제어밸브), Structural analysis(구조해석), Fatigue analysis(피로해석)

1. 서 론

화석연료를 이용한 기술의 발전은 인간의 삶을 풍요롭게 만들어 주었지만, 지나친 사용으로 인하여 지구온난화와 같은 기후 변화가 초래되었다. 이렇게 변화하는 환경으로부터 삶의 터전을 보호하기 위하여 UN 기후정상회의에서는 121개 국가가 기후 목표로 2050년까지 탄소배출량을 0%로 줄이는 정책을 발표하였다. 해당 정책을 실현하기 위한 방법으로 신-재생 에너지의 기술 발전과 연구가 지속되고 있으며, 그중 수소에너지의 활용에 대한 연구가 가장 활발하게 이루어지고 있다[1]. 수소 에너지에 대한 관심이 커지고, 수소차의 수요가 증가하면서 수소충전소의 확충에 대한 필요성도 급증하고 있는 가운데 국내 충전소 연간 구축 목표는 충족하지 못하고 있다. 그 이유 중 하나로 비싼 구축비용을 들 수 있다[2]. 현재 수소 충전소 핵심부품의 국산화율이 42%로 해외 의존도가 높으며, 이는 곧 구축비용 증가의 원인으로 이

2022 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

어진다. 만약 모든 부품과 기술의 국산화가 이루어진다면 구축비용이 70% 절감될 것으로 예상된다[3].

수소충전소의 충전 과정은 크게 압축기, 고압용기, 디스펜서로 이루어져 있고, 이 중 통로를 개폐하여 유체를 흐르게 하거나 제어 및 차단할 수 있는 장치인 밸브의 역할이 중요하다[4].

본 연구에서는 압력 조정기의 후단에 설치되어 가스의 유량을 제어하기 위한 유량제어밸브의 국산화를 위해 구조 및 피로해석을 통하여 선진사 제품 대비 시제품의 압력에 의해 발생한 응력값에 의한 내구성을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다.

먼저, 국내 수소 충전소에 주로 사용되고 있는 해외 선진사의 제품을 분석하였고, 시제품은 해외의 선진사 제품에 대비하여 향상된 조건을 적용하여 설계하였다. 상용 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 밸브 시험 기준에 만족함을 확인하였다. 이러한 구조해석 결과를 통해 해외 선진사 제품 대비하여 국내 시제품의 내압에 의한 내구성을 확인하였다. 또한, 취약 부위의 수명 예측을 위해 FE-SAFE 프로그램을 통해 최대 피로 수명 사이클을 도출하여 결과를 확인함으로써 반복 시험 기준을 만족하였다.

2. 해외 선진사 유량제어밸브

2.1 선정 및 분석

국내 시제품과 비교를 위해 현재 국내 수소충전소에 주로 사용되고 있는 해외 선진사 제품 중 하나의 유량제어밸브를 선정하여 분석하였다.

해당 선진사의 제품은 유량제어밸브와 관련된 특허 출원에서 상위권을 차지하고 있는 회사의 제품으로, 초고압 수소 가스에 대한 정밀한 유량제어가 가능하여 국내 수소충전소에 사용 중인 제품이다. 설계 압력은 999 bar이고[5], 설계 사양은 Table 1에 나타내었다.

구조해석을 통하여 시험 기준에 따른 결과를 얻기 위해 Fig. 1과 같이 모델링 하였으며, 상용 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 모델링 및 해석을 진행하였다.

Table 1. Design specifications (example)[5]

Design pressure	99.9 MPa
Design temperature	85°C
Fluid temperature	-10°C to 85°C

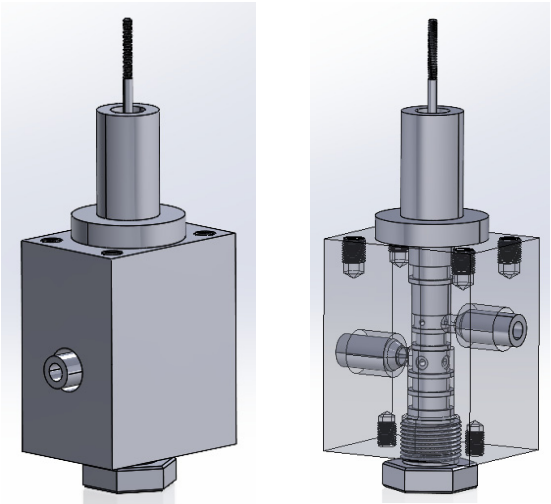


Fig. 1. Flow control valve model (example)

Table 2. Pressure test conditions[6]

Pressure	1,500 bar
Test time	10 min
Valve condition	Open
Exit condition	Close

2.2 시험조건

유량제어밸브의 시험 평가 해석 조건은 '수소 가스 충전소 밸브 KS B ISO 19880-3'[6]의 내압 시험(Table 2) 기준에 만족하도록 적용하였다.

시험은 다음과 같이 진행된다. 밸브의 입구는 필요한 시험 압력을 공급할 수 있는 장치에 연결해야 하며, 시험 매체는 액체를 사용하는 것으로 정의되어 있다. 또한 밸브가 열려있는 상태에서 출구를 밀폐시키고, 밸브 시트 또는 내부 블록이 열린 상태로 설정한다. 압력은 부품 압력 등급의 150%까지 서서히 증가시켜 10분 동안 압력을 유지한 후 시험 중인 장치에 누출 여부를 확인했을 때 밸브에서 누출이 발생

하지 않아야 한다.

2.3 구조해석 결과

효율적인 해석을 위해 유동구간에 포함되지 않고, 구조적으로 영향이 없는 밸브의 고정을 위한 나사산 부위를 생략하였으며, 사용한 재료는 STS316L[7,8]이고, 상세한 재료 물성은 Table 3과 같다.

격자의 종류는 Fig. 2와 같이 유체의 영향을 직접 받는 유동구간의 경우 3D상에 8개의 node와 1개의 적분 점으로 구성되어 있는 C3D8R 요소를 적용하였고, 요소의 개수는 총 437,352개이다(Fig. 3).

구성 부품 간의 접촉이 발생하는 면은 모두 접촉 조건을 부여하였고, 접촉이 일어나는 모든 면에 마찰 조건이 부여되도록 general contact 조건을 부여하였고, 부품간 완전하게 체결되어 분리가 발생하지 않은 면은 영구 접합과 같은 tie constraint 조건을 적용하였다.

유동구간의 부품 압력 등급의 150%인 내부압력 1,500 bar를 부여하였으며, 출구를 밀폐하여 10분 동안 압력을 유지하는 것으로 가정하여 모든 유동 면에 동일한 압력을 부여하였다. Fig. 4에 나타난 결과와 같이 최대 Von Mises stress는 377.9 MPa은 replace seat의 내압에 의한 변형이 body와의 접촉 발생으로 판단하였다. 또한, 해당 재료인 STS316L의 항복 강도인 472 MPa[7,8]을 초과하지 않아 파손이 일어나지 않을 것으로 예상되었다.[9]

Table 3. Material properties of STS316L[7,8]

E (Young's modulus)	165 GPa
Density	8.00E+03 kg/m^3
ν (Poisson's ratio)	0.3
Yield strength	472 MPa

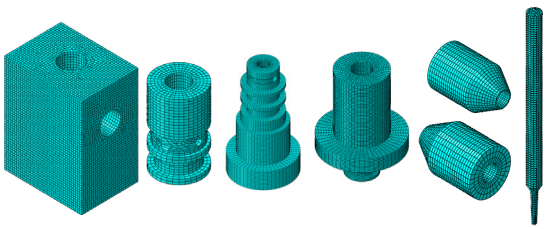


Fig. 2. Mesh type of parts

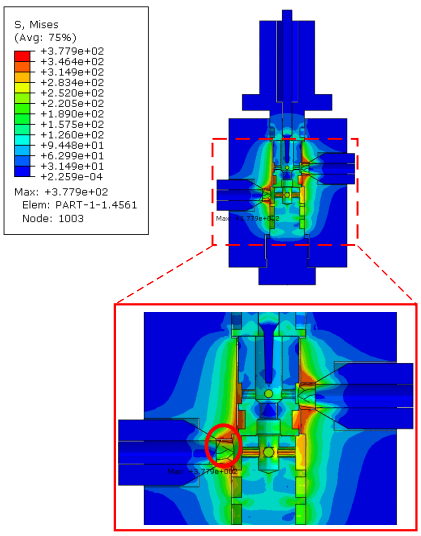
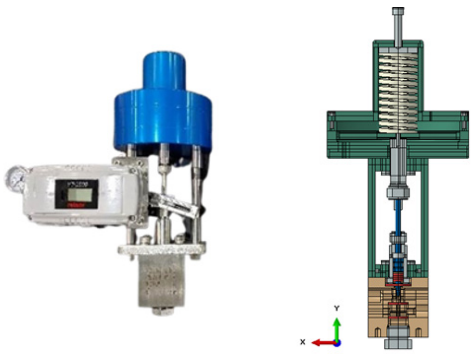


Fig. 3. Analysis result of flow control valve

3. 국내 시제품 유량제어밸브

3.1 설계 사양

본 연구에서 선진사 제품 대비하여 향상시키고자



(a) (b)

Fig. 4. Flow control valve (HIFLUX®). (a) Test product. (b) Assembly.

Table 4. Design specifications

Design temperature	Design pressure	Mass flow
-40°C to 85°C	1,000 bar	120 g/s

하는 설계 사양인 온도, 압력과 질량 유량값을 Table 4에 나타내었다. 개발품의 전체적인 형상은 Fig. 4와 같다. 또한, 수소의 취성과 밸브의 작동 온도에 적합한 재료를 사용하였으며, 내압시험 기준에 따라 압력에 의해 발생한 응력을 선진사 제품과 비교하여 내구성을 확인하기 위해 시제품 제작과 설계 및 해석을 진행하였다.

3.2 설계 및 모델링

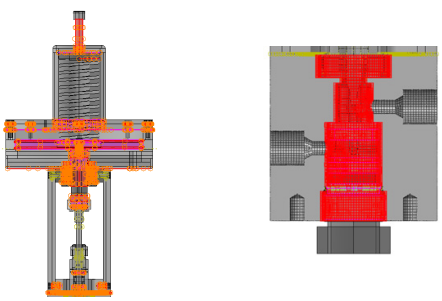
제작한 시제품의 수소충전소용 유량제어밸브는 설계 압력 1,000 bar, 사용온도 -40°C to 85°C 질량유량(수소) 120 g/s에 적합하도록 설계되었다. 사용된 재료로는 수소 취성에 대해 검증된 STS316L[7]을 사용하여 제작하였으며, 기밀(sealing)의 역할을 하는 오링(O-ring)은 테프론(teflon) 대신 저온에서의 특성이 뛰어난 polyvinylidene fluoride (PVDF)[10]의 재료로 변경하여 사용하였다. 또한, 유체를 흐르게 하거나 제어하기 위한 stem의 경우 내식성과 가공성이 좋으며 광범위한 사용온도 특성을 지니고 있는 STS304[11] 재료를 사용하였다. 해당 물성은 Table 5에 나타내었다.

구성 부품의 실제 체결 상태[12]를 고려하여 일반적인 접촉일 경우 general contact 조건을 부여하였고, 끼워 맞춤과 용접으로 완전하게 체결되는 부품은 tie constraint 조건을 적용하여 해석을 진행하였다. 이는 Fig. 5에 나타내었다.

격자의 타입은 앞서 해외 제품과 동일하게 진행하였으며, 유체의 영향을 직접적으로 받는 대표적으로 body, replace seat, O-ring, stem을 C3D8R로 적용하였다. 그 외 영향이 적고, 접촉 조건의 영향이 없는 부품의 경우 C3D10으로 생성하였다. 결과적으로 C3D8R은 846,434개 C3D10 29,627개를 생성하였다(Fig. 6).

Table 5. Material properties of PVDF[10], STS304[11]

Material properties of PVDF	
E (Young's Modulus)	1 GPa
Density	1.78E+03 kg/m^3
ν (Poisson's Ratio)	0.35
Material properties of STS304	
E (Young's modulus)	210 GPa
Density	1.78E+03 kg/m^3
ν (Poisson's ratio)	0.3
Yield stress	398.83 MPa



(a) (b)

Fig. 5. Contact conditions. (a) Tie constraint. (b) General contact.

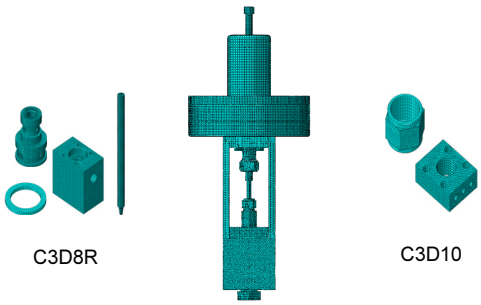


Fig. 6. Element type of assembly (test product)

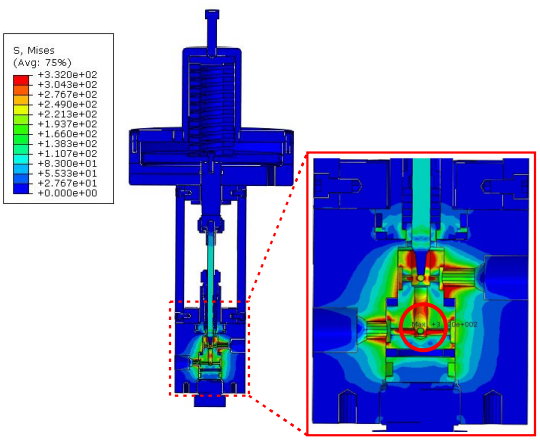


Fig. 7. Structural analysis of flow control valve (test product)

3.4 구조해석 결과

결과적으로 유량제어밸브 국내 시제품의 유동구간의 내압에 의해 발생한 최대 Von Mises stress는 332 MPa이 주변 영역에 비해 좁은 면적이 포함되어 있는 replace seat에서 발생하였다. 해당 재료인 STS316L의 항복 강도 472 MPa[7,8]을 초과하지 않아 파손이 없음을 예측할 수 있었고, 항복 강도에 따른 안전율은 약 1.42로 확인할 수 있었다(Fig. 7).

또한, 선진사 제품 대비하여 동일한 내압에 의해 발생한 응력이 약 12% 감소하였다.

3.5 피로해석 프로세스 및 결과

내압시험 기준에 따른 구조해석 결과 가장 큰 응력이 발생한 replace seat을 취약부위로 판단되어 fe-safe 프로그램을 이용하여 해당 부품의 최대 수명이 수소가스 압력 반복 시험 기준[13]에 따른 102,000회의 반복에 손상이 없는지 해석을 통해 확인하였다.[14]

구조해석 결과를 통해 피로 및 수명 알고리즘을 적용하여 결과를 도출하는 프로세스로 진행하였다[15]. 해석을 진행하기 위해 주로 금속재료에 사용하며, 최대 전단 변형률과 변형률 진폭의 함수식으로 정의되어있으며, 상수 1.65와 1.75는 재료 파괴가 최대 전단 변형률의 평면에서 시작됨을 가정하는 다음의 Brown Miller-Morrow 알고리즘[16]을 사용하였다.

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2}+\frac{\Delta\epsilon_n}{2}=1.65\frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^b+1.75\epsilon'_f(2N_f)^c$$

σ'_f : 피로강도계수 $2N_f$: 재료파괴까지의반복수
ϵ'_f : 연성계수 b : 피로강도
c : 피로연성지수

탄성 응력 해석 결과를 하중 이력과 중첩하여 소성 변형률로 변환하며, 각 요소에서 발생하는 손상도를 계산하였다. 취약 부위의 피로물성은 Table 6에 나타내었다[17].

해석 결과로 취약 부위인 replace seat의 최소 반복수명은 약 130,607회임을 확인할 수 있었다. 이는 반복 시험 기준인 102,000회 이상을 만족함을 확인하는 결과이다(Fig. 8).

Table 6. Fatigue properties of STS316L[17]

Fatigue properties of STS316L			
σ'_f	660 MPa	b	-0.079
ϵ'_f	0.341	c	-0.453
$2N_f$	2E+07		
Ultimate tensile strength		580 MPa	

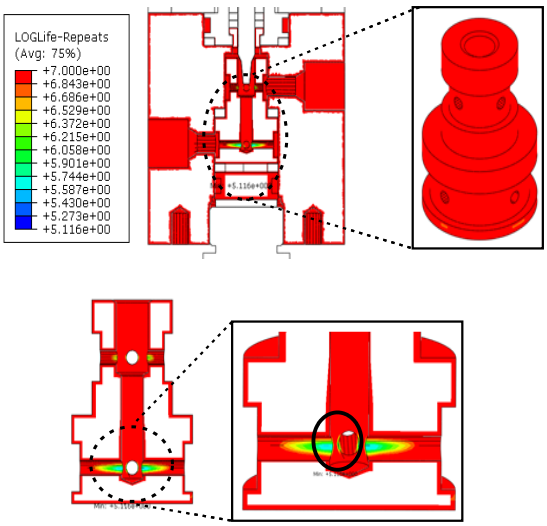


Fig. 8. Fatigue analysis of flow control valve

4. 결 론

본 연구에서는 수소충전소용 유량제어밸브의 국산화 개발을 위해 수소 충전소 밸브 시험 중 내압 시험 기준에 만족하도록 유량제어밸브의 설계 및 해석을 진행하였으며, 연구 결과는 다음과 같다.

1) 국내 수소충전소에 사용되고 있는 해외 선진사 제품을 선정하기 위한 조사를 진행하여 모델을 선정하였고, 이를 해석적으로 시제품과 비교하기 위해 역설계를 진행하였다. 이후 상용 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 내압 시험 기준[6]에 따른 구조해석을 진행하였다.

해석 결과로 내압에 의해 최대 Von Mises stress가 body에서 377.9 MPa이 발생하였으며, replace seat의

내압에 의한 변형이 body와의 접촉 발생으로 판단하였다. 그리고 응력은 항복 강도를 초과하지 않는 수준으로 파손이 일어나지 않을 것을 예상할 수 있었다.

2) 선진사 제품을 분석하여 압력에 의한 내구성이 향상되도록 국내 시제품을 설계 및 제작하였고, 이를 해석적으로 선진사 제품과 비교하기 위해 동일한 시험조건에 따라 구조해석을 진행하였다.

내압에 의해 발생한 최대 Von Mises stress는 replace seat에서 332.0 MPa이 발생하였다. 주변 영역에 비해 상대적으로 면적이 좁은 부분의 응력이 높게 나타났다고 판단하였으며, 선진사 제품 대비 최대 발생 응력이 12% 감소되었다.

3) 최대 응력이 발생한 replace seat을 취약 부위로 판단하여 해당 부품이 수소가스 압력 반복 시험기준[13]에 대한 만족 여부를 확인하기 위하여 피로해석에 구조해석 결과를 적용하고 Brown Miller-Morrow 알고리즘을 사용하여 FE-SAFE 프로그램을 통해 진행하였다.

해당 부품의 최소 반복 수명은 약 130,607회로 시험 기준인 102,000회를 만족함을 확인하였다.

4) 해당 제품은 1차 시제품으로 이후 시험을 진행하여 본 연구의 해석 결과와 비교 분석을 통한 연구를 진행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2019년도 가천대학교 교내연구비 지원에 의한 결과이다(GCU-2019-0710).

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 연구한 과제이다(No. 20203010040010).

References

1. S. H. Kang, S. J. Choi, and J. W. Kim, “Analysis of the world energy status and hydrogen energy technology R&D of foreign countries”, Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 18, No. 2, 2007, pp. 216-223. Retrieved from http://manu.hydrogen.or.kr/archive/archiveViewContents.php.
2. B. W. Kang. T. H. Kim, T. H. Lee, “Analysis of costs for a hydrogen refueling station in Korea”, Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 27, No. 3, 2016, pp. 256-263, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2016.27.3.256.
3. Ministry of Trade, Industry and Energy, “Joint by related ministries,「Hydrogen infrastructure and charging station construction plan」announced”, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019. Retrieved from http://www.motie.go.kr/motie/gov_info/gov_openinfo/sajun/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=162215&bbs_cd_n=81.
4. C. K. Kim, S. M. Lee, and C. M. Jang, “Numerical evaluation of flow nature at the downstream of a ball valve used for gas pipelines with valve opening rates”, Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 29, No. 4, 2018, pp. 370-377, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.4.370.
5. Fujikin Carp Group, “Valves & fittings for ultra high-pressure hydrogen gas”, Fujikin Carp Group, 2020, pp. 4-26. Retrieved from https://www.fujikin.co.jp/support/pdf/100-03_hyd_eng.pdf.
6. Ministry of Trade, Industry and Energy, “Gaseous hydrogen –fueling stations- part3: valves. KS B ISO 19880-3”, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2018, pp. 7. Retrieved from https://e-ks.kr/streamdocs/view/sd;streamdocsId=72059206369487874.
7. A. Unt, H. Piili, M. Hirvimäki, M. Manninen, and A. Salminen, “Laser scribing of stainless steel with and without work media”, ICALEO, 2010, pp. 1012-1021, doi: https://doi.org/10.2351/1.5061932.
8. P. Eriksson, “Evaluation of mechanical and microstructural properties for laser powder-bed fusion 316L”, Uppsala Universitet, 2018, pp. 3-34, 2018. Retrieved from https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1231504/FULLTEXT01.pdf.
9. S. Y. Kim and K. W. Nam, “Failure criterion of straight pipe with outer local wall thinning under internal pressure” Journal of Power Systems Engineering, Vol. 18, No. 1, 2014, pp. 76-83, doi: https://doi.org/10.9726/kspse.2014.18.1.076.
10. Y. Shu, L. Ke, J. Su, and F. Shen. “Experimental studies on fretting wear behavior of PVDF piezoelectric thin films”, Materials, Vol. 14, No. 4, 2021, pp. 734, doi: https://doi.org/10.3390/ma14040734.
11. I. M. G. Karohika, I. N. G. Antara, and I. M. D. Budiana,“Influence of dies type for gasket forming shape”, Mater. Sci. Eng., Vol. 539, 2019. pp. 012019, doi: https://doi.org/10.1088/1757-899X/539/1/012019.
12. HIFLUX, “High pressure valves & fittings”, pp. 36-55. Retrieved from http://m.hiflux.com/pdf/tube_nipple_kr.pdf.
13. KS B ISO 19880-3, “Gaseous hydrogen –fueling stations-part3:valves”, pp. 13-14, 2018. Retrieved from https://e-ks.kr/streamdocs/view/sd;streamdocsId=72059206369487874.
14. M. A. A. Khan and A. K. Sheikh, “Simulation-based mould design, life prediction and reliability assessment of a valve

body", Int. J. Simul. Modelling, Vol. 20, No. 2, 2021, pp. 219-230, doi: https://doi.org/10.2507/IJSIMM20-2-543.

15. X. Hong, G. Xiao, W. Haoyu, L. Xing, and W. Sixing, "Fatigue damage analysis and life prediction of e-clip in railway fasteners based on ABAQUS and FE-SAFE", Advances in Mechanical Engineering, Vol. 10, No. 3, 2018, pp. 1-12, doi: https://doi.org/10.1177/1687814018767249.
16. Dassault Systèmes Simulia Corp, "fe-safe 2021 fe-safe USER GUIDE", Dassault Systèmes Simulia Corp, 2021. Retrieved from https://www.caecis.com/wp-content/uploads/2020/12/FesafeUser.pdf.
17. Z. Zhang, A. Li, Y. Wang, Q. Lin, and X. Chen, "Low-cycle fatigue behavior and life prediction of fine-grained 316LN austenitic stainless steel", Journal of Materials Research, Vol. 35, 2020, pp. 3180-3191, doi: https://doi.org/10.1557/jmr.2020.322.