

유한요소 해석을 이용한 자동차 압력 용기 밸브용 과류 방지 장치의 설계

†이효렬 · 권대환 · 신진오*

한국가스안전공사 가스안전연구원, *영도산업(주)
(2021년 8월 11일 접수, 2021년 10월 20일 수정, 2021년 10월 21일 채택)

Design of Excess Flow Device for Automotive Cylinder Valve Based on Finite Element Analysis

Hyo-Ryeol Lee · Dae-Hwan Kwon · Jin-Oh Shin

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation, Chungcheongbuk-do 27738, Korea

**R&D Division, YOUNGDO IND CO, LTD., Busan 46241, Korea*

(Received August 11, 2021; Revised October 20, 2021; Accepted October 21, 2021)

요약

기후변화에 대응하기 위해 세계적으로 이산화탄소 및 대기오염 물질 배출 규제가 점차 강화됨에 따라 내연 기관 자동차를 친환경 자동차로 전환하려는 추세이다. 이는 정부의 수소 에너지 활성화 정책에 따른 충전 인프라 구축, 충전 설비 핵심 부품의 국산화 지원으로 가속화되고 있다. 본 연구에서는 유한 요소 해석을 통해 수소 연료 전지 자동차 용기 밸브의 과류 방지 장치를 설계하고, 시험을 통해 성능을 평가하였다. 주요 시험 항목인 정수압, 연속 작동, 압력 임펄스, 누설, 작동 시험을 ISO 12619-2, ISO 12619-11의 시험 방법에 따라 수행한 결과 요구 조건을 만족함을 확인하였다.

Abstract - Due to the climate changing, the world's countries are tightening regulations on CO2 and air pollutants emission to solve them. In addition, eco friendly vehicles is increasing to replace automobiles in internal combustion engine. Recently, the government is supporting the expansion of hydrogen refueling infrastructure and localization of core equipment in refueling facilities according to the hydrogen economy road map. In this study, design of the Excess flow limiting device in FCEV cylinder valve using by finite element analysis and performed performance tests on prototype. Major test results as hydrostatic strength, continued operation, operation, pressure impulse, leakage showed that the excess flow limiting device meets the performance requirements according to ISO 12619-2 and ISO 12619-11.

Key words : cylinder valve, excess flow limiting device, fuel cell electric vehicle, finite element analysis

I. 서론

세계적으로 내연 기관 자동차에 대한 규제가 점차 강화되면서 노후 경유차의 배출 저감 장치 설치, 조기폐차 지원금 지급, 운행제한 등의 조치를 시행하였다. 대다수 지자체에서는 압축 천연 가스

버스를 전기, 수소 전기 버스와 같은 친환경 버스로 점차적으로 대체하고 있어 수송 분야에서 발생하는 이산화탄소와 미세먼지 발생량을 저감시키고자 노력하고 있다. 동시에 개인이 친환경차 구매 시 세제혜택, 보조금 지원 등 각종 혜택을 제공하여 공공부문과 민간에 걸친 전 영역에서 친환경 자동차로의 전환에 앞장서고 있다[1, 2].

대표적인 친환경 자동차 중 수소 연료 전지차는 완충 시 609 km의 주행거리를 확보하고 있으며, 19

†Corresponding author: hrlee@kgs.or.kr
Copyright © 2021 by The Korean Institute of Gas

년 수소 경제 활성화 로드맵 발표와 맞물려 2021년 3월 기준 1만 2400여대가 등록되어 시장 점유율이 점차 상승세로 접어들고 있다[3]. 다만, 주행거리 확보를 위해 수소를 70 MPa의 고압으로 압축하여 저장하는 만큼 연료 저장 및 공급 계통의 안전성 확보가 무엇보다 중요하다. 특히, 수소의 흐름제어, 이상 상태 발생 시 수소 배출, 화재 시 용기 폭발 예방 등의 핵심 역할을 하는 용기 밸브와 고압 튜브의 과열 등 사고로 발생하는 과류를 차단하여 2차 사고를 예방하는 과류 방지 장치 등의 안전장치 설계와 성능인증이 중요하다[4].

과류 방지 장치는 수소 연료전지 자동차의 압력 용기 뿐만 아니라 LPG 용기, 매물 배관 등 가스 사고 예방을 위해 다양한 분야에 활용되고 있다. Kim et al.은 실험적 연구를 통해 LPG 용기용 밸브의 차단성능을 결정하는 주요 변수를 규명하였으며, 형상에 따른 최적의 유량 차단 범위를 제시하였다. [5] Lee et al.과 Jang et al.은 LPG 집단 공급시설 매물 배관의 안전성 확보를 위해 과류 차단 장치를 개발하고, 성능 시험 절차와 시험 설비를 구축하여 국산화에 이바지 하였다. [6, 7] Park et al.은 AHF ISO Tank에서 발생하는 누출 사고 예방을 위해 탱크 구조와 사고 사례를 분석하고, AHF ISO 탱크와 구조, 작업 절차가 유사한 염소 탱크의 과류 차단 장치를 도입할 것을 제안하였다.[8] 이렇듯 가스 시설의 안전성 확보를 과류 방지 장치와 관련된 선행 연구를 살펴보면 실험적 연구가 대부분을 차지하였으며, 설계 단계에서 유한요소 해석을 적용한 연구는 미비한 실정이다. 특히 수소 자동차 압력 용기 밸브 처럼 70 MPa 정도의 고압 환경에서 사용되는 과류 방지 장치에 대한 국내 연구 사례는 찾아보기 드물다. 본 논문에서는 유한 요소 해석을 이용하여 수소 연료 전지차 용기밸브용 과류 방지 장치의 정상상태, 차단 시의 유동 특성과 고압 환경에서의 구조 건전성을 분석하였으며, 방지 장치의 주요 성능을 인증 기준에 따른 시험을 통해 검증하였다.

II. 내압 용기 밸브 및 과류 방지 장치의 구조

2.1. 내압 용기 밸브의 구조

수소 연료 전지차에 설치되는 전기 작동식 용기 밸브는 과류 방지 기능을 포함하고 있으며, Fig. 1에 용기 밸브 구성품을 도식화하여 나타내었다. 용기 밸브는 바디, 솔레노이드, 매뉴얼 밸브, 체크 밸브, 온도 감응형 압력 해제장치(PRD : Pressure Relief Device), 과류 방지 장치(EFD : Excess Flow limiting

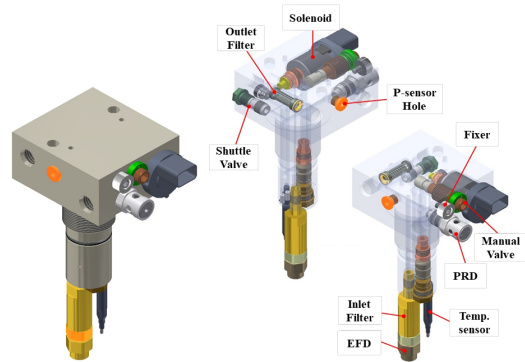


Fig. 1. Construction of cylinder valve for FCEV.

Device), 온도 센서 등으로 구성된다. 솔레노이드와 매뉴얼 밸브는 내압 용기에서 연료전지로 연결되는 유로를 개폐하며 둘 중 하나라도 동작하지 않으면 수소는 공급되지 않는다. 온도 감응형 압력 해제 장치는 사고 등 외부 요인으로 인한 화재 발생 시 용기의 과도한 압력 상승으로 인한 폭발을 방지하기 위해 내부의 수소를 외부로 배출시키는 장치이다. [4]

2.2. 과류 방지 장치의 구조

일반적으로 과류 방지 장치는 내장형, 외장형, 차단식, 유동 제한식으로 나눌 수 있다. 내·외장형은 내압 용기 또는 용기밸브의 내부, 외부와 같이 설치 위치에 따라 분류된다. 차단식은 과류 발생 시 이를 완전히 정지시켜 차단하며, 유동 제한식은 과류 발생 시 유량을 제한하였다가 과류 조건 해제 시 자동적으로 리셋 되는 방식이다[9, 10]. 본 연구에서 제안하는 과류 방지 장치는 용기 밸브 내부에 장착되는 내장형·유량 제한식 과류 방지 장치이며, 그 구조와 동작 원리를 Fig. 2에 나타내었다. 장치의 구성은 과류 발생 시 유로를 차단하여 급격한 유량 증가를 억제하는 포핏(Poppet), 포핏의 동작 활성화 조건 설정과 초기 위치로의 복귀를 담당하는 스프링, 포핏의 이동 방향과 변위를 구속하는 바디와 캡으로 구성된다. 포핏에 가해지는 항력과 자중의 합이 스프링의 예하중보다 작은 정상 상태는 Fig. 2의 좌측과 같이 수소가 포핏 측면을 통과하여 연료전지 스택으로 공급되며, 자중과 항력이 스프링의 예하중보다 커지는 과류 조건에서는 우측과 같이 포핏이 유로를 차단하고 포핏의 상단부에 위치한 오리피스를 통해 미세 유량만 빠져나가도록 제한한다. 이후 과류 발생 요인이 제거되면 입구단과 출구단의 차압이 점차 감소되며, 이때 압

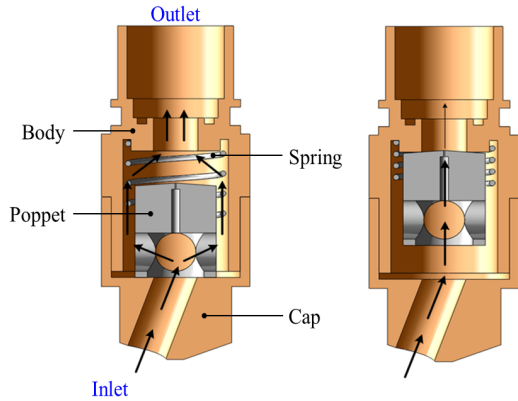


Fig. 2. Schematics of heat transfer for solenoid.

축된 스프링의 탄성력에 의해 포핏은 초기 위치로 복귀하게 된다.

III. 과류 방지 장치의 설계

3.1. 과류 방지 장치의 이론적 배경

앞서 기술한바와 같이 과류 발생 시 포핏이 유로를 차단하는 조건은 포핏에 가해지는 항력, 포핏의 무게, 부력, 스프링의 탄성력을 활용하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_d + \rho_f V_p g > \rho_p V_p g + kx \quad (1)$$

여기서 F_d 는 항력, ρ_f 는 수소의 밀도, V_p 는 포핏의 체적, g 는 중력가속도, ρ_p 는 포핏의 밀도, k 는 스프링의 탄성계수, x 는 스프링의 압축량을 나타낸다. 항력은 다시 식(2)와 같이 표시할 수 있다.

$$F_d = C_d A_p \rho_f \frac{u_m^2}{2} \quad (2)$$

C_d 는 항력계수이며 이는 레이놀즈수의 함수로 유체의 점성과 관련이 있다. A_p 는 수소가 유입되는 포핏 하단부의 면적, u_m 은 포핏 주변 유체의 평균 속도이다. 식(2)를 식(1)에 대입하여 u_m 에 대해 정리하면 아래와 같다.

$$u_m > \sqrt{\frac{2V_p g(\rho_p - \rho_f) + 2kx}{C_d A_p \rho_f}} \quad (3)$$

이 조건에서 유로는 차단되고 오리피스를 통해

빠져나가는 유량 Q 는 작동 유체가 밀도 변화가 없고 비압축성 유체라 가정하면 다음 식으로 계산할 수 있다[11].

$$Q = \frac{\pi d_o^2}{4} u_o \quad (4)$$

d_o 는 오리피스의 직경을, u_o 는 오리피스 출구단에서 유체속도를 나타낸 것이며 이는 식(5)와 같이 베르누이 방정식으로 계산할 수 있다. P_1 , z_1 과 P_2 , z_2 는 오리피스 전단과 후단의 압력과 변위를 각각 나타낸 것이다[12].

$$u_o = \sqrt{\frac{2}{\rho_f} (P_1 - P_2) + 2g(z_1 - z_2) + u_m^2} \quad (5)$$

3.2. 과류 방지 장치 시험 기준 및 방법

수소 연료전지 자동차 용기 밸브용 과류 방지 장치의 설계 시 성능 요구 조건을 반영하기 위해 관련 국제 표준인 ISO 12619-2, ISO 12619-11의 시험 항목 및 방법을 조사하였다. 표준의 내용을 정리하여 나타낸 Table 2에 따르면 시험 항목으로는 누출, 과토크 저항, 굽힘 모멘트, 산소·오존·열 에이징 등이 있으며, 이 중 작동성과 내구성에 관계된 항목으로는 정수압 강도, 작동, 연속 작동, 압력충격 시험이 있다. 시험항목에 대한 성능을 만족시키기 위해 설계 시 시험 목적과 방법에 대한 내용을 충분히 고려해야 하며, 아래에 작동, 작동반복 시험, 압력반복 시험 방법을 각각 나타내었다.

(1) 정수압 강도의 시험목적은 하우징의 강도를 확인하는 것으로 다음 시험 절차를 실시할 때 과열로 보이는 증거를 보여서는 안 된다. 내장형 또는 외장형 과류 방지 밸브에 대하여, 구성 부품의 출구를 막고 밸브 시트 또는 내부 블록은 개방된 위치로 하여 사용 압력의 2.5배의 정수압을 구성 부품의 입구에 적어도 3분 동안 가한다.

(2) 작동 시험은 과류 방지 장치가 활성화되었을 때 활성화 유동 또는 차압과 과류 방지 밸브 유동을 측정한다. 제조사가 제시한 조건을 적용하여 시험하였을 때, 측정된 유량과 압력은 제조사가 규정한 값을 만족해야한다.

(3) 연속 작동 시험은 사용압력과 동일한 차압에서 20회 반복 작동 시킨다. 동일 시료로 누설 및 작동 시험 후 정수압 시험을 실시하여 요구사항을 만족하는지 확인한다.

(4) 압력 충격 시험은 과류 방지 밸브의 입·출구

Table 2. Applicable tests of excess flow valve [14]

Test	Applicable	Test Procedure
Hydrostatic strength	○	ISO 12619-2 / ISO 12619-11
Leakage	○	
Excess torque resistance	○	
Bending moment	○	
Continued operation	○	
Corrosion resistance	○	ISO 12619-2
Oxygen ageing	○	
Ozone ageing	○	
Heat ageing	○	
Automotive fluid (External excess flow valve)	○	
Non-metallic material immersion	○	
Vibration resistance	○	
Brass material compatibility	○	
Operation	○	
Pressure impulse	○	

를 대기압상태로 조절하고 순간적으로 부품 압력 등급을 순간적으로 밸브 입구에 가하는 것을 1회로 보고 100회 반복한다. 동일한 방법으로 역방향에 대해 시험을 실시 후 연속 동작 시험을 수행한다.[13, 14]

3.3. 구조 해석을 통한 과류 방지 장치의 안전성 검토

시험 기준에 따른 동작 성능과 안전성을 확보하기 위해 유한요소 상용 소프트웨어인 ANSYS Workbench 및 CFX를 활용하여 과류 방지 장치의 구성품을 설계·검증하였다. 우선, 구조해석을 이용하여 정수압 강도 시험과 압력 충격 시험을 각각 만족하는 과류 방지 장치의 바디와 캡, 포핏을 설계하였고, 유동해석을 이용하여 작동 시험 시 제조사가 제시해야하는 과류 방지 장치가 작동하였을 때의 유량을 산출하였다. 또한, 작동 성능 확보를 위해 과류 및 해제 조건에서 포핏이 받는 항력을 계산하여 스프링 탄성계수와 압축량을 산정하였다.

Fig. 3은 정수압 강도 시험 압력인 175 MPa가

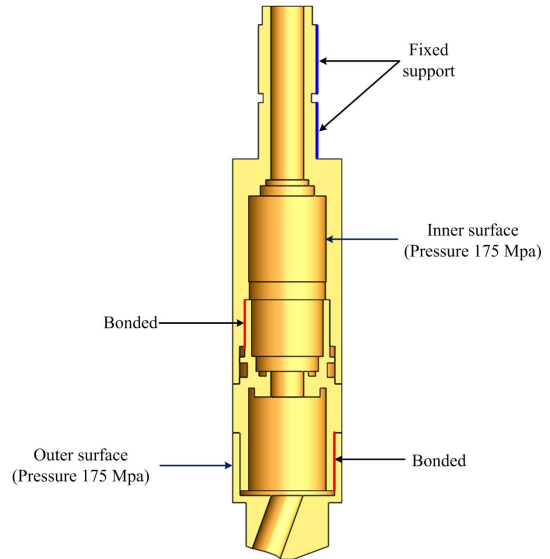


Fig. 3. 3D model and boundary conditions for FEA.

Table 3. Material of EFD components

No.	Description	Material
1	Body	C38000
2	Cap	
3	Poppet	PEEK 1000
4	Spring	STS 316L

과류 방지 장치의 바디와 캡에 가해졌을 때 파단 여부를 확인하기 위한 해석 모델 및 조건을 나타낸 것이다. 구조해석은 소요 시간 절약을 위해 대칭면을 기준으로 1/2을 절단한 모델로 진행하였다. 구속 조건으로는 과류 방지 장치의 구성품 사이에 나사로 체결되는 면에 접합(Bonded) 조건을 설정하였고, 용기 밸브와 과류 방지 장치를 연결하는 커넥터의 상단면에 고정 조건(Fixed support)으로 두어 실제 장착 환경을 구현하였다. 하중 조건으로는 정수압 강도 시험 시 압력 가해지는 과류 방지 장치의 내·외면에 Pressure 조건을 주어 0 ~ 175 MPa까지 점차 증가시키면서 인가하였다.

Table 3은 과류 방지 장치에 사용된 재질을 나타낸 것이며, 바디와 캡은 가공성과 강도, 황동 소재 호환성이 확보된 C38000을 사용하였고, 포핏은 내

Table 4. Mechanical properties of EFD materials

Material	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio	Yield strength [MPa]
C38000	96	0.32	320
PEEK	4.34	0.4	115

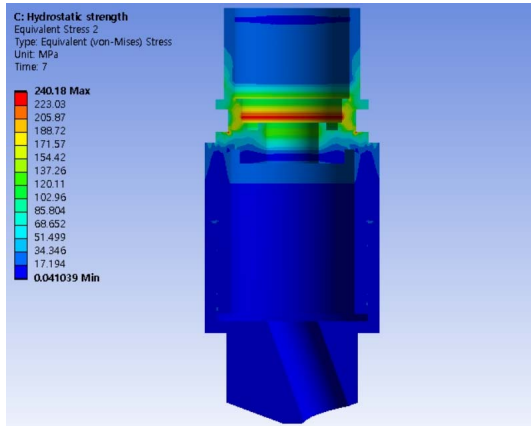


Fig. 4. Stress contour according to hydrostatic pressure.

부 기밀 확보 및 비금속 재료 침지 시험 항목을 만족하는 PEEK 1000을 적용하였다. 스프링의 재질은 비교적 내수소취성이 좋다고 평가된 STS 316L을 사용하였다.[15]

Table 4는 구조 해석에 사용된 재료의 기계적 물성치를 나타낸 것이며, 해석에는 충분한 격자의 품질을 확보하기 위해 사면체 격자와 육면체 격자를 혼합 구성하여 총 격자 수 288,174개, 총 노드 수 462,728개를 생성하였다.

Fig. 4는 정수압 인가에 따른 응력 분포 해석 결과를 나타낸 것이다. 해석결과 취약부에 발생하는 최대 등가 응력은 약 240 MPa로 나타났으며 안전율은 1.33으로 파열이 발생하지 않는다고 볼 수 있다.

Fig. 5는 압력 임펄스 시험 압력 등급인 70 MPa가 정방향 및 역방향으로 포핏에 가해질 때 구조 안전성을 평가하기 위한 해석모델과 조건을 도식화 하여 나타낸 것이다. 하우징 부분은 70 MPa보다 높은 정수압 조건으로 해석하였을 때 파열이 발생하지 않았으므로 해석 시간의 단축과 구속 조건을 용이하게 부여하기 위해 포핏에 접촉하는 캡과 바디 부분을 단순화하고 Symmetry 조건을 부여한 1/4 절단 모델로 해석을 수행하였다. 정방향으로 가

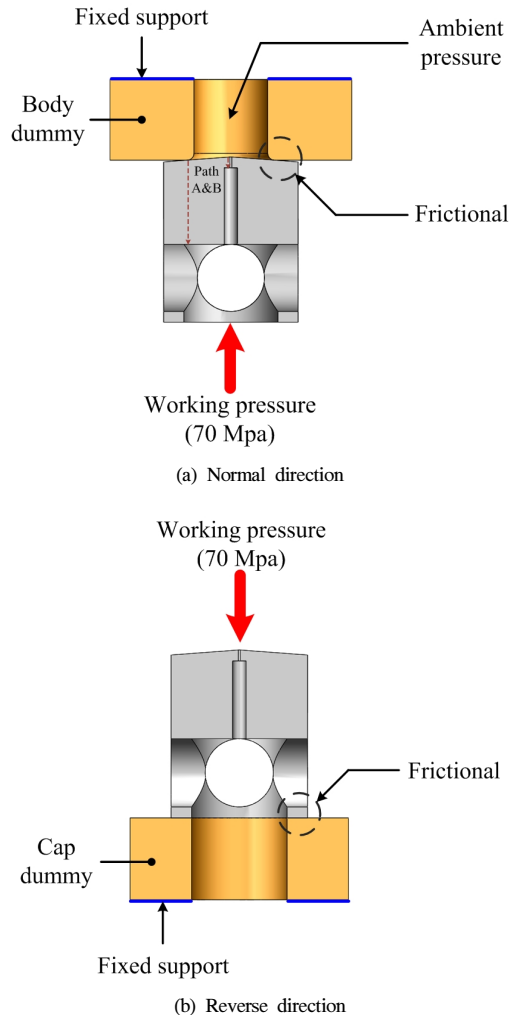
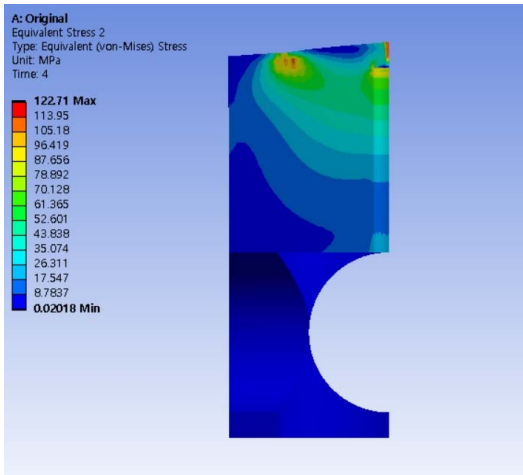


Fig. 5. Boundary conditions according to flow direction for structural safety evaluation.

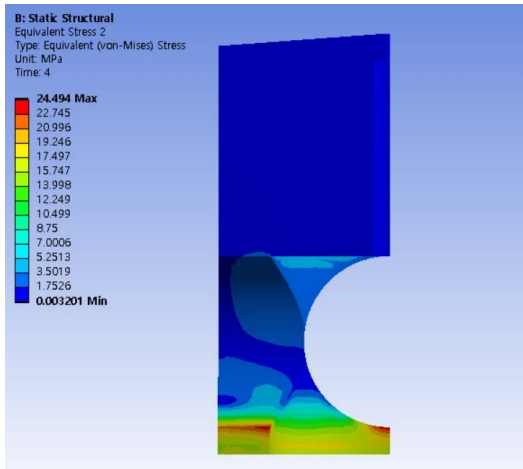
압할 때 바디 더미의 상단면을 고정으로 두고 더미와 포핏이 접촉하는 부분을 Frictional, 마찰계수 0.32로 설정하였다. 반대로 역방향으로 가압할 때는 캡 더미의 하단면을 고정으로 두고 캡과 포핏이 접촉하는 부분을 Frictional로 설정하고 마찰계수는 동일하게 유지하였다. 하중 조건은 포핏에 순간적으로 압력이 가해지면 순간적으로 유로가 차단되고, 바디와 접촉부분을 기준으로 압력이 인가되는 면과 대기에 노출되는 면에 압력차가 발생하게 된다. 이때 각 면을 분할하여 가압되는 면에는 70 MPa를 대기에 노출되는 면에는 0 MPa로 설정하였

Table 5. Analysis results of stress component following S.C.L

Path	PL (MPa)	PB (MPa)	PL + PB (MPa)
A	22.5	43.8	66.3
B	53.8	44.3	98.1



(a) Normal direction



(b) Reverse direction

Fig. 6. Stress contours according to flow direction.

다. 반대로 역방향으로 가압할 때에는 포핏 전체가

대기에 노출되었다가 가압되기 때문에 차압이 발생하지 않으며, 가압되는 면에 70 MPa를 인가하였다. 해석에는 육면체 격자 사용하였으며, 생성된 격자 수는 36,265개 노드 수는 144,096개 이다.

Fig. 6의 (a), (b)는 가압 방향에 따른 해석 결과를 나타낸 것이다. 정방향의 경우 차압이 크게 발생하여 최대 등가 응력이 약 123 MPa로 나타나 국부적으로 항복 응력을 초과하였으며, 역방향의 경우 최대 등가 응력이 24.5 MPa로 항복 응력 미만의 값을 나타내었으며 안전율은 4.5로 나타났다. 국부적으로 항복 응력이 초과되는 지점의 안전성을 ASME code secVII div3 평가 기준으로 분석하기 위해 Fig. 5 (a) Path A&B와 같이 오리피스 주변과 더미와 포핏이 접촉하는 지점에서 두께 방향으로 응력 분류선(Stress classification line)을 설정하고 응력을 성분별로 분류하여 비교하였다. 비교 기준은 1차 일반 막응력(P_M : General primary membrane stress)은 허용 응력 이하, 1차 굽힘 응력(P_B : Primary bending stress)과 1차 국부 막응력(P_L : Local primary bending stress)의 합이 허용 응력의 1.5배 이하를 만족하는지 확인하였으며, 각 성분별 수치를 Table 5에 나타내었다. 여기서 허용 응력은 크리프 온도 이하에서는 항복 응력의 2/3, 크리프 온도 구간에서는 10만 시간의 크리프 파단강도를 의미한다. 응력 분류선을 설정한 구간에서 구조적 불연속 부분이 없으므로 1차 국부 막응력이 1차 일반 막응력과 같다고 가정할 수 있으며, 이때 Path A, B의 1차 국부 막응력, 1차 국부 막응력과 굽힘 응력의 합이 허용 응력의 2/3인 76.7 MPa와 1.5배인 115 MPa 이하를 만족함을 확인하였다.[16]

3.4. 유동해석을 이용한 과류 방지 장치 작동부 설계

작동 시험 기준에 따르면 과류 방지 장치의 활성화를 결정하는 작동 유량 또는 차압과 과류 방지 밸브가 작동될 때 유량 값을 제조사가 제시하도록 명시하고 있다. 본 연구에서는 차압 조건이 0.1 MPa일 때, 포핏과 바디 사이의 이격 거리에 따라 유량 변화를 해석하여 경향성을 분석하였다. 또한, 차압 발생하는 시점에서 부터 압력이 점차 해제되어 감에 따라 포핏에 가해지는 항력 변화를 산출하고, 앞서 얻어진 유량의 경향성을 고려하여 스프링의 셋팅 길이와 예하중을 선정하였다.

Fig. 3의 3D 모델을 유동해석에 사용하기에는 과류 방지 장치 전후에 충분한 여유거리가 확보되지 않아 유동이 완전히 발달되지 않을 우려가 있다. 따라서 충분한 유동 발달을 위해 과류 방지 장치 전

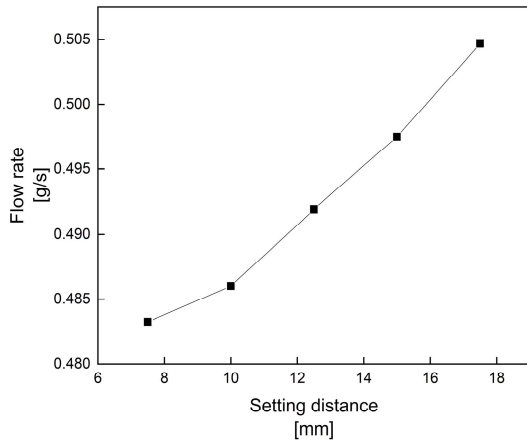


Fig. 7. Flow rate distribution depending on the setting distance

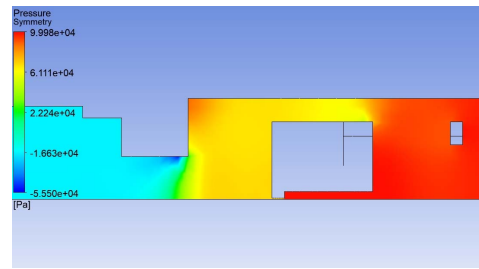
· 후단의 길이를 각각 1 m 연장하여 여유 길이를 두었으며 포핏이 중심축 방향으로 대칭인 형상이므로 symmetry 조건을 주어 1/4 모델만 활용하였다. 해석은 차압 조건에서 포핏의 오리피스스를 통해 빠져나가는 유량을 확인하기 위해 Steady state 기법을 활용하였으며, 작동 유체는 압축성 수소 기체를 사용하였다.

해석 격자는 육면체 격자를 활용하였으며, 최소 격자 크기는 1 μm , 최대 크기는 0.6 mm, 곡률 법선 각도는 10°로 조밀하게 생성하여 내부 유로의 왜곡을 최소화하였으며, 생성된 노드 수는 810,934개, 격자 수는 187,136개 이다.

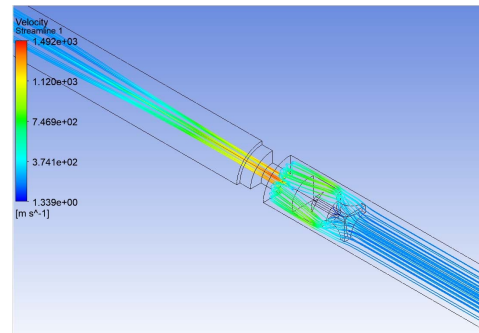
난류 모델은 정상난류 유동 예측과 역 압력 구배에 의한 벽면 근처 유동 박리의 시작점 예측에 높은 정확도를 보이는 SST 모델을 사용하였으며, 유체의 초기 온도는 25 $^{\circ}\text{C}$, 유로 표면에는 smooth wall, non-slip 조건을 설정하였다. 수소가 유입되는 유로에는 Inlet, Total pressure 조건에 차압 0.1 MPa를 인가하였으며, 오리피스 후단의 출구에는 Outlet, 대기압 조건으로 설정하고 해석을 진행하였다.

Fig. 7은 차압 0.1 MPa로 동일한 조건에서 포핏과 바디 사이의 이격 거리와 유량 사이의 상관관계를 나타낸 것이며, Fig. 8은 포핏 주변의 압력과 속도 분포를 나타낸 것이다. 이격 거리가 증가함에 따라 과류 방지 장치의 활성화에 필요한 유량도 함께 증가하는 경향을 보이므로, 유체에 의한 항력과 초기 위치 복귀에 필요한 스프링 예하중을 고려하여 적절한 값을 선택해야 한다.

Fig. 9는 차압이 점차적으로 감소됨에 따라 포핏의 항력 변화를 해석한 결과이다. 차압이 0.1 MPa



(a) Pressure contour



(b) Velocity streamline

Fig. 8. Pressure & Velocity distribution at differential pressure 0.1 MPa

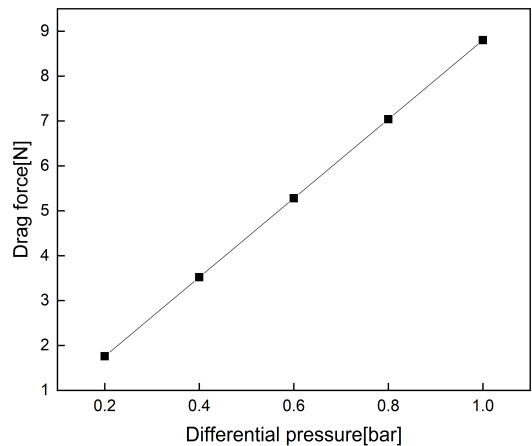


Fig. 9. A variation of drag force as pressure relieving

일 때 포핏에 가해지는 항력은 8.8 N, 0.01 MPa 일 때 0.88 N으로 선형적으로 감소한다. 주행 안정성 확보와 응답성 개선을 위해 차압이 0.01 MPa 이하

Table 6. The specifications of compression spring

Parameter	Value
Wire diameter	0.7 mm
Outer diameter	12.4 mm
Free length	12 mm
Setting length	10 mm
Number of active spring turns	2
Total spring turns	4
Spring constant	0.65 N/mm
Pre load	1.3 N
Maximum load	3.8 N

가 될 때 포켓을 초기 위치로 복귀시키도록 스프링 탄성계수를 선정하였다. 차압 발생 시 과류 방지를 위해서는 스프링의 셋팅 하중이 포켓의 자중을 포함하여 8.82 N 미만이어야하고, 차압 해제 시 포켓의 복귀를 위해 필요한 탄성력은 설계 여유를 20%로 두었을 때 1.08 N 이상이 요구된다. Table 6은 요구 조건을 만족시키는 스프링 설계 결과를 표로 정리하여 나타낸 것이다.

구조해석과 유동해석을 통해 과류 방지 장치의 구조 건전성 검토, 구성품 설계 및 시험에 필요한 유량 데이터를 획득하였고 다음의 성능 실험을 통해 해석 결과의 타당성을 확인하고자 한다.

IV. 과류 방지 장치 성능 시험

4.1. 연속 작동 시험

유한요소 해석을 활용하여 설계한 과류 방지 장치의 구조 건전성, 동작성을 확인하기 위해 성능 시험을 수행하였다. ISO 12619-11의 시험 방법에 따라 사용 압력과 동일한 압력으로 20사이클을 작동시키며, 한 사이클은 1회 열림과 1회 닫음으로 구성하였다. 시험 온도는 20±5 °C, 압력은 최대 ±5% 이내의 공차 범위에서 3개의 시료를 활용하여 연속 작동 시험 후 작동 및 누설 시험을 실시하였다.

Fig. 10은 작동 시험에 사용된 장치를 도식화하여 나타낸 것이다. 시험 장치는 시험 압력을 생성하는 수소 봄베, 설정 압력으로 감압하는 압력 조정기, 시험 유체인 수소의 압력과 온도 측정을 위한 압력게이지, 서모미터, 과류 방지 장치를 통과하

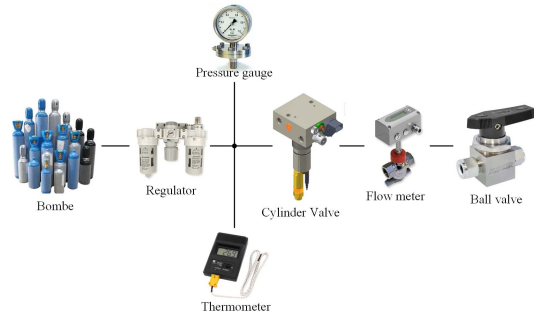


Fig. 10. Test equipment configuration for operation test

Table 7. The results of operation test according to difference pressure at 0.1 MPa

No.	EFD disabled		EFD activated	
	Pressure [MPa]	Flow rate [g/s]	Pressure [MPa]	Flow rate [g/s]
Sample 1	0.101	0.557	0.101	0.0176
Sample 2	0.1	0.543	0.1	0.0176
Sample 3	0.099	0.558	0.102	0.0176
Average	0.1	0.553	0.101	0.0176

는 유량 측정을 위한 유량계, 유체의 흐름을 조정하기 위한 볼밸브로 구성되며, 장치 간 연결은 가압원에 적절한 피팅과 튜브를 사용하였다. 레귤레이터 후단에서 용기밸브, 용기 밸브에서 유량계로 연결되는 튜브의 길이를 최소 1 m 이상으로 유지하여 시험기준의 제시요건을 만족하도록 하였다.[5]

Table 7은 3개 시료의 작동시험 결과를 정리하여 나타낸 것이다. 차압 조건이 0.1 MPa 일 때 과류 방지 장치가 활성화되기 전 최대 수소 유량의 평균은 0.553 g/s이며, 과류 방지 장치 활성화 후 수소 유량의 평균은 0.0176 g/s로 측정되었다. 시험조건과 동일한 스프링 셋팅 길이 10 mm에서 유량 해석 결과인 0.486 g/s와 비교하였을 때 약 12%의 오차가 발생하였으며, 오차 요인으로는 해석에 사용된 수소의 물성과 실제 가스의 물성 차이, 해석 모델과 실제 시험에 사용된 용기 밸브와의 구조적 차이, 난류 강도 등이 작용했으리라 사료된다.

Fig. 11과 Table 8은 작동 시험 후 누설 시험을 위한 장치와 온도 조건을 나타낸 것이다. 시험은 측정 결과가 온도변화와 무관한 헬륨 추적 방식으

Table 8. Test temperature and pressure for leakage test

Temperature [°C]	Pressure	
	Factor × working pressure(WP)	
	First test	Second test
-40 or -20 as applicable	0.6 × WP	Activation pressure
20	Activation pressure	1.2 × WP
85 or 120		

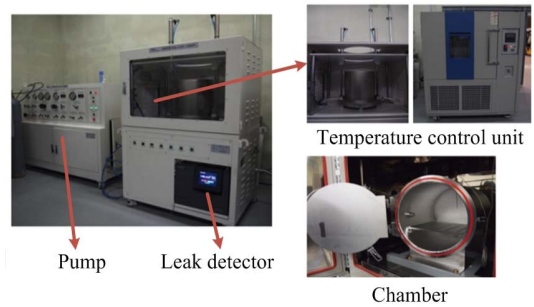


Fig. 11. The leakage test device for cylinder valve

Table 9. The results of operation test following the pressure impulse test

No.	EFD disabled		EFD activated	
	Pressure [MPa]	Flow rate [g/s]	Pressure [MPa]	Flow rate [g/s]
Sample 4	0.103	0.557	0.101	0.0176
Sample 5	0.1	0.549	0.1	0.0163
Sample 6	0.1	0.556	0.102	0.0176
Average	0.1	0.554	0.101	0.0172

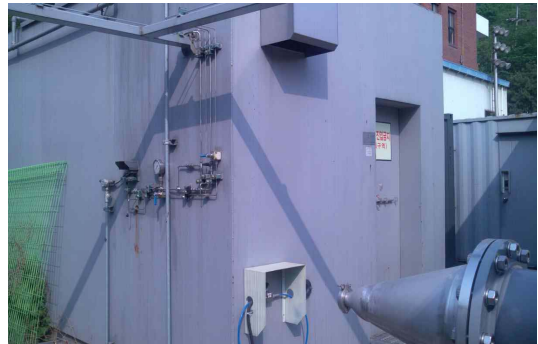


Fig. 12. The hydrostatic strength test facility for cylinder valve

로 용기 밸브를 챔버 안에 위치시킨 후 일정한 농도로 혼합된 헬륨과 공기를 챔버에 넣고, 헬륨을 시험 압력으로 용기 밸브로 가압하여 일정 시간이 지난 후 챔버 내부의 기체의 헬륨 농도 변화를 측정하여 기밀 여부와 누설량을 분석하였다. -40, 20, 85 °C 조건에서 1차, 2차 누설 시험 결과 누설이 발생하지 않았음을 확인하였다.

누설 시험이 완료된 시료를 압력 용기와 동일한 설비에 연결하여 정수압 시험을 실시하였으며, 시험 설비의 전체적인 모습을 Fig. 12에 나타내었다. 정수압 시험은 용기 밸브 출구를 막고 매뉴얼 밸브와 솔레노이드를 동작시켜 유로를 개방된 위치로 셋팅하고 사용 압력의 2.5배인 175 MPa의 수압을 3분 동안 가해 파열의 징후를 관찰하였다. 3개의 시료 모두 용기 밸브 외부와 내부 구성품의 파열 징후가 관찰되지 않았음을 확인하였다.

4.2. 압력 임펄스 시험

Fig.13은 압력 임펄스 시험 장비를 나타낸 것이며, 장비는 크게 유압 펌프, 서보밸브 등을 포함하는 유압 시스템, 비례제어 밸브, 솔레노이드 밸브, 압력계 등으로 구성 되어 시험 절차에 따라 작동 순서를 제어하고 반복 횟수를 관리하는 제어 장치



Fig. 13. The pressure impulse test system for EFD

로 구성된다. 시험방법은 과류 방지 장치가 포함된 용기 밸브를 시험장비에 체결하고, 1 m 이상의 고압 튜브를 출구에 연결한다. 이때 입구와 출구의 양단의 압력은 대기압 상태를 유지하고 사용 압력을 순간적으로 가한다음 양단의 압력이 대기압 상

테로 낮아질 때까지 충분한 시간동안 벤트 시키는 과정을 100회 반복수행 후 역류 방향에 대해 동일한 방법으로 100회 반복하여 압력 임펄스 시험을 수행한다. 시험이 완료된 시료는 작동시험을 실시하며, 그 결과를 Table 9에 정리하여 나타내었다. 과류 방지 장치에 대해 자체 성능 시험결과 인증 규격에서 요구하는 사항을 만족하였으며, 향후 시험 결과를 인증 시 제조사에서 제시해야하는 값으로 활용하고자 한다.

V. 결론

수소연료전지 자동차 용기 밸브의 안전 장치 중 하나인 과류 방지 장치의 설계와 시험에 대한 연구를 수행하였다. 인증 규격에서 명시하고 있는 시험 방법과 요구 조건을 분석하고 유한요소 해석을 활용하여 목표치를 충족하도록 과류 방지 장치를 설계하였다. 자체 시험을 통해 설계 검증 및 인증 시험 시 제시 자료를 확보하였으며, 연구 결과를 다음과 같이 요약하였다.

(1) 수소 연료 전지 자동차 용기 밸브용 과류 방지 장치의 성능 시험 기준은 ISO 12619-2, ISO 12619-11에 명시되어 있으며, 작동성 및 내구성과 관련된 주요 시험 항목으로 정수압 강도, 작동, 연속작동, 압력 충격 시험이 있다. 유한 요소 해석을 통해 과류 방지 장치의 정수압 강도 시험 압력인 175 MPa를 인가하였을 때의 안전율은 1.33으로 나타났다으며, 자체 시험 시 파열 징후가 나타나지 않아 요구 조건을 만족하였다.

(2) 압력 임펄스 시험 압력 인 70 MPa를 과류 방지 장치에 인가하였을 때 구조 안전성을 평가하기 위해 정방향, 역방향으로 압력을 인가하여 구조해석을 수행하고, ASME code sec VII div3 평가 기준으로 응력을 분석한 결과 허용 응력을 만족함을 확인하였다. 설계된 과류 방지 장치를 시험 설비에 체결하여 압력 임펄스 시험과 작동 시험 결과 정상 동작함을 확인하였다.

(3) 작동성능 확보를 위해 유동 해석을 이용하여 포핏과 바다 사이의 이격 거리 변화에 따른 유량, 차압에 따른 항력변화를 해석하여 스프링을 설계하였으며, 작동 시험에서 차압이 0.1 MPa일 때 동작성과 유량을 측정 후 누설 시험을 진행하였다. 시험에서 얻은 유량값과 해석 결과를 비교하였을 때 약 12%의 오차가 발생하였고, 누설은 발생하지 않아 시험기준에서 요구하는 조건을 만족하였다.

본 연구에서는 유한 요소 해석을 활용하여 수소 연료 전지 자동차 용기 밸브용 과류 방지 장치를 설계하고, 자체 실험을 통해 인증 시험 시 필요한 데이터를 확보하였다. 최근 수소 경제 활성화 로드맵에서 제시한 수소 충전 인프라 구축 목표를 달성하기 위해 충전소 설치가 가속화되고 있다. 본 연구 결과를 활용하여 수소 충전소용 과류 방지 밸브 개발 및 성능 개선에 관한 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “자동차산업기술개발 수소전기트램 실증사업”(수소전기트램 실주행 환경 실증 및 운영기술 개발 (P0018648, 2021))으로 수행된 연구결과입니다.

REFERENCES

- [1] Bae, C. S., Park, H. W., "Particulate Matter and Automobile", *Auto Journal : Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, **41**(9), 38-43, (2019)
- [2] Shin, W. S., "Economics Approach on Validity of CNG Bus Promotion Policy", *Journal of the Korean Institute of Gas*, **22**(5), 114-123, (2018)
- [3] 2020년 자동차 신규 등록현황 보고서, 한국자동차산업협회,(2021)
- [4] Lee, H. R., Ahn, J. H., Shin, J. O., and Kim, H. Y., "Safety Evaluation Based on Structural Analysis of Cylinder Valves for Fuel Cell Vehicles", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, **25**(3), 189-197, (2016)
- [5] Kim, J. G., Noh, G. J., Hur, M. W., Lee, S. I., Lim, J. G., and Lee, I. C., "A Experiment Study of Cut-off Capability for LP Gas Cylinder Cut-off Type Over-flow Valve", *Proceedings of the Korea Safety Management&Science 2004 Autumn Annual Meeting*, 53-60, (2004)
- [6] Lee, U., Joo, Y. K., and Lee, J. H., "Excess Flow Valves for Underground Gas Pipeline and their Performance Testing Equipment Development", *Journal of the Korean Institute of Gas*, **22**(4), 74-81, (2018)
- [7] Jang, C. Y., Lee, U., and Lee, J. H., "Development of Performance Test Procedure for the Excess Flow Valve for Buried Piping for the Domestic LPG Mass Supply System", *Journal of*

- the Korean Institute of Gas*, **22**(6), 16-27, (2018)
- [8] Park, S. B., and Lee, C. J., "A Study on the System for Improving the Safety Device of the Hydrogen Fluoride ISO Tank", *Journal of the Korean Institute of Gas*, **24**(3), 54-62, (2020)
- [9] 압축수소가스 내압 용기 장착 검사 세부기준, 설치방법 및 검사방법, 국토교통부고시 제2018-176호
- [10] 도로차량 - 압축천연가스(CNG) 연료장치 구성 부품 - 제14부:과류 방지 밸브, 한국산업표준 KS R ISO 15500-14 : 2012
- [11] Kim, C. S., Jang, T. I., and Kim, C. H., "An Experimental Study on the Effects of EFV of LPG Engine on Automobiles Acceleration Performance ", *Journal of the Korean Society of Marine Engineers*, **28**(7), 1072-1081, (2004)
- [12] Lim, J. G. and Lee, I. C., "Development of Excess Flow Valve for LPG cylinder", *Proceedings of the Korean Society of Safety* 2002
- Spring Annual Meeting*, 105-109, (2002)
- [13] International Standard ISO 12619-2 : 2014, "Road vehicle Compressed gaseous hydrogen(CGH2) and hydrogen / natural gas blends fuel system components - Part 2 : Performance and general test methods"
- [14] International Standard ISO 12619-11 : 2017, "Road vehicle Compressed gaseous hydrogen(CGH2) and hydrogen / natural gas blends fuel system components - Part 11 : Excess flow valve"
- [15] American Society of Mechanical Engineers ASME B31.12 : 2019, "Hydrogen Piping & Pipelines"
- [16] Kim, H. S., Hong, S. H., Seo, H. S., and Yang, Y. C., "Design concept investigation for corner protection of LNG storage tank by ASME section VIII Div. 2", *Journal of the Korean Institute of Gas*, **5**(3), 73-79, (2001)