

구조해석을 이용한 수소 연료전지 자동차 압력용기 밸브의 안전성 평가

이효렬^a, 안중환^a, 신진오^b, 김화영^{c*}Safety Evaluation Based on Structural Analysis of Cylinder Valves
for Fuel Cell VehiclesHyo Ryeol Lee^a, Jung Hwan Ahn^a, Jin Oh Shin^b, Hwa Young Kim^{c*}^a School of Mechanical Engineering, Pusan National University,
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea^b R&D Center, Youngdo Industrial Co., Ltd.,

22, Noksansaneopjung-ro, Gangseo-gu, Busan 46751, Korea

^c Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University,
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	19	February	2016
Revised	9	May	2016
Accepted	24	May	2016

Keywords:

Fuel cell vehicle
Cylinder valve
Safety evaluation
Structural analysis

ABSTRACT

Green vehicles include electric vehicles, natural gas vehicles, and fuel cell vehicles (FCVs). In FCVs, pressure vessels have cylinder valves to control hydrogen flow. These valves should be of high quality in terms of safety because hydrogen is stored at ultra-high pressure in pressure vessels. Hence, safety evaluation of these valves is necessary to secure the safety of the FCV. A structural analysis of the cylinder valve was conducted in this study by using a commercial finite element analysis code. The results showed that the safety factor of valve component ranged 1.06-186.44. After categorizing, the stress components at critical points of the cylinder valve parts were evaluated using the corresponding allowable design criteria in the ASME code. The pressurization cycle test was performed as per the regulation to evaluate the safety of the valve.

1. 서론

1980년대에 들어오면서 대기 중의 온실 가스에 의한 지구 온난화 문제가 전 세계적으로 이슈화되기 시작하면서 국제적인 환경회의 및 기후 변화 협약에 의하여 화석에너지 사용이 규제되기 시작하였다. 이러한 규제는 해가 거듭될수록 점차 강도가 더해져 최근 국제 무역 규제까지 이어지고 있다^[1].

온실 가스 배출 감소를 위해 자동차의 연료를 천연가스, 전기, 클린 디젤, 연료전지와 같은 친환경 에너지로 대체하려는 연구 개

발이 활발히 추진되고 있다. 특히 내연기관과 달리 연소 과정이나 기계적 일 없이 수소 및 산소가 가지고 있는 화학에너지를 전기 화학 반응에 의해 곧바로 전기에너지로 변환시켜주는 발전 방식을 이용하는 수소 연료전지 자동차가 실용화 단계에 접어들었다. 연료 전지는 수소가 가지고 있는 자유에너지를 직접 이용하기 때문에 에너지 손실이 적어 발전 효율이 40-60%정도로 매우 높고, 터빈과 같은 로터가 없기 때문에 소음이 매우 적다^[2]. 하지만 수소 저장 용량의 제약으로 1회 충전 시 주행할 수 있는 거리가 제한적이었으나, 최근 수소 압축 저장시스템의 기술 개발로 인해 저장 압력

* Corresponding author. Tel.: +82-051-510-2861

Fax: +82-051-581-3087

E-mail address: hyokim@pusan.ac.kr (Hwa Young Kim).

350 bar에서 700 bar로 상승됨에 따라 1회 충전 주행거리 300 km 이상을 확보하였다. 저장 압력 상승과 사용자와 인접한 거리에 설치되는 압력용기와 용기에 부착되어 유로를 개폐하는 용기 밸브의 안전성 확보가 매우 중요하다³⁾.

본 연구에서는 구조해석을 이용하여 초고압 조건에서 사용되는 용기 밸브의 구조 안전성을 분석하고, 시험인증규격에 의거한 성능 시험을 수행하여 안전성을 확인하였다.

2. 압력용기 밸브의 구조

Fig. 1은 수소 연료전지 자동차 압력용기 밸브의 구조를 도식화하여 나타낸 것이다. 용기 밸브는 밸브 바디, 솔레노이드 밸브, 매뉴얼 밸브, 체크 밸브, 솔레노이드 체크 밸브, 온도감응형 압력 해제장치(PRD: pressure relief device), 과류 차단장치(EFLD: excess flow limiting device), 예비 수소 배출장치(bleed valve), 온도 센서, 압력 센서 장착부(P-port) 등으로 구성된다.

솔레노이드 밸브와 매뉴얼 밸브는 압력용기에서 연료전지로 연결되는 유로를 개폐하며 두 장치 중 어느 하나라도 동작하지 않으면 유로는 개방되지 않는다. 온도감응형 압력 해제장치는 압력용기에 화재가 발생하였을 때 압력 상승으로 인한 용기의 폭발을 방지하기 위해 내부의 수소를 외부로 배출시키는 장치이다. 과류 차단장치는 고압 배관의 과열로 인해 용기 내부의 수소가 한꺼번에 배출되는 것을 예방하는 장치이다. 예비 수소 배출장치는 용기 밸브가 동작하지 않거나 자동차 수리, 점검 등의 이유로 압력용기 내부의 수소를 외부로 배출시키는데 사용하는 장치이다. 체크 밸브와 솔레노이드 체크 밸브는 수소의 충전과 사용 시 유동방향을 조절한다.

연료전지로 이어지는 유로 개폐와 용기 내부 압력 해제 등의 안전장치 역할을 하는 용기 밸브 설계에는 다음과 같은 사항이 중점적으로 고려되어야 한다. 용기 밸브는 사용자가 빈번히 이용하는 운송 수단인 자동차에 설치되는 만큼 구조 안전성이 우선적으로 고려되어야 한다. 다음으로 용기 밸브 바디에 체결되어 다양한 역할을 하는 각 구성품을 이어주는 유로 구성 및 체결 부위에서 수소의 누설을 방지하는 기밀 성능이 고려되어야 한다. 마지막으로 사

용 조건에서 연료전지로 이어지는 유로 개폐가 가능하도록 초고압 조건에서 매뉴얼 밸브와 솔레노이드 밸브의 동작성이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 구조해석을 이용한 용기 밸브의 구조 안전성 분석에 대해 중점적으로 기술하고자 한다.

3. 압력용기 밸브의 구조해석 조건

압력용기 밸브의 경우 구조가 복잡하고 구성품의 수가 많아 구조 해석에 소요되는 시간과 자원을 고려하여 용기 밸브 전체 모델이 아닌 주요 구성품 각각을 분리하여 구조해석을 진행하였다. 구조해석에서는 부품간의 접촉 조건, 구속 조건, 하중 조건의 설정이 매우 중요하며 해석 조건을 다음과 같이 설정하였다.

용기 밸브의 구성품 간의 접촉 조건을 다음과 같이 세 가지로 분류하여 설정하였다. 나사로 체결되는 면에 bonded 조건을, 나사에 의해 체결되지 않는 고정면에는 no separation 조건을, 마지막으로 단순 접촉면에는 frictional 조건으로 설정하고 마찰계수는 0.1로 가정하였다.

구속 조건으로는 용기 밸브가 압력용기에 체결된 상태에서 수소의 압력에 의한 구조적 안전성을 분석하므로 용기 밸브가 압력용기에 체결되는 면과 주요 구성품이 용기 밸브 바디에 체결되는 면을 fixed로 설정하였다. 하중 조건은 유럽에서 수소 연료전지 자동차 용으로 제시된 최초의 규격인 EU 406/2010 Annex IV의 사용 조건을 참고하여 설정하였다. 수소에 의한 압력이 용기 밸브에 가해지는 면에 pressure 조건을 설정하고 규격에 명시된 정격 사용 압력인 700 bar와 최대 허용 압력인 875 bar를 순차적으로 인가하였다⁴⁾.

Table 1은 구조해석에 사용된 용기 밸브 구성품의 재질 및 기계적 물성치를 정리하여 나타낸 것이다. Al6061-T6, STS316L 재질은 인장시험을 통해 물성치를 확보하였으며, 이를 제외한 재질의 물성치는 제조사에서 제공하는 물성치와 일반적으로 적용되는 물성치를 이용하였다⁵⁻⁸⁾.

해석에 사용된 격자는 밸브의 형상이 복잡하여 사면체 격자

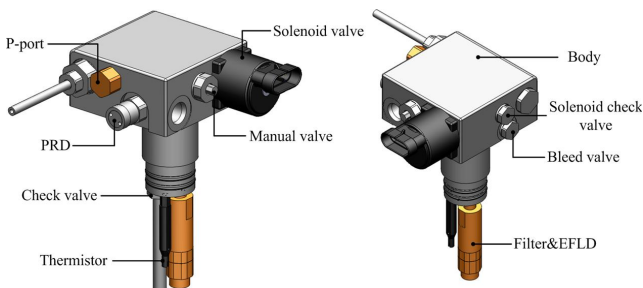


Fig. 1 Schematic of cylinder valve

Table 1 Material property of cylinder valve components

	Young's modulus	Poisson's ratio	Tensile yield strength
Al6061-T6	144 GPa	0.33	350 MPa
C38000	96 GPa	0.32	320 MPa
C95800	117 GPa	0.34	262 MPa
PEEK1000	4.4 GPa	0.4	110 MPa
STS316L	200 GPa	0.30	286 MPa
STS430FR	205 GPa	0.29	310 MPa
Glass	75 GPa	0.25	.

Table 2 Mesh statistics of cylinder valve components

Components	Number of elements	Number of nodes
Cylinder valve body	106,998	158,701
Solenoid valve	67,126	235,299
Manual valve	59,477	92,263
Solenoid check valve	144,944	216,905
Bleed valve	321,485	460,839
PRD	714,609	995,363
Check valve	185,645	274,542
EFLD & Filter	165,316	257,784

(tetra)를 사용하였으며 생성된 격자 수와 노드 수를 Table 2에 주요 구성품별로 정리하여 나타내었다.

4. 입력용기 밸브의 구조해석 결과

4.1 용기 밸브 바디 구조해석 결과

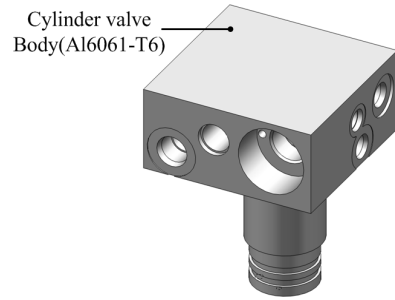
용기 밸브 바디는 수소의 충전, 사용 시 수소의 유동 및 솔레노이드 밸브, 매뉴얼 밸브, 온도감응형 압력 해제장치 등 주요 구성품 동작을 위한 유로가 구성되어 있다. 용기 밸브가 압력용기에 체결되는 면에 fixed 조건을, 압력용기 내부에 저장된 수소의 압력이 가해지는 면에 pressure 조건을 설정하였으며 해석 조건과 등가응력 해석결과를 Fig. 2에 나타내었다.

4.2 과류 차단장치 구조해석 결과

과류 차단장치는 용기 밸브에서 수소가 제일 먼저 유입되는 구성품으로 불순물 제거와 고압 배관 파손 시 용기 내부의 수소가 한꺼번에 배출되는 것을 방지하기 위해 설치된다. 과류 발생 시 유로를 차단하는 포핏과 포핏의 복귀를 위한 스프링, 필터를 고정시키고 과류 차단장치의 동작 범위를 제한하는 커넥터와 캡, 로드로 구성된다. 과류 차단장치가 용기 밸브 바디에 체결되는 면에 fixed 조건을, 압력이 가해지는 면에 pressure 조건을 설정하였으며 해석 조건과 등가응력 해석결과를 Fig. 3에 나타내었다.

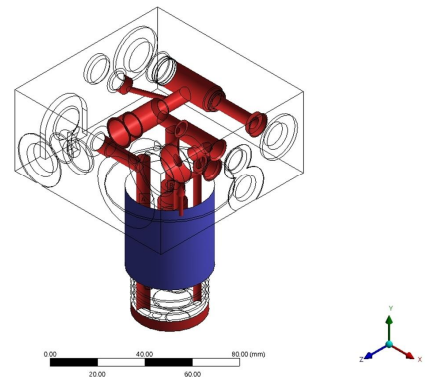
4.3 솔레노이드 밸브 구조해석 결과

솔레노이드 밸브는 전기에너지에 의해 유로를 개폐하며, 크게 전자기장 형성을 위한 코일, 자기 회로를 구성하는 디스크와 케이스, 코일의 전자장에 의해 자화되어 플런저를 흡인하는 코어, 기계적 운동으로 유로를 개폐하는 플런저 A·B, 플런저를 복원시키는 스프링, 초고압 조건에서 기밀 유지를 위한 오링 등으로 구성된다. 구조해석에 소요되는 시간을 절약하기 위해 압력용기 내부의 압력이



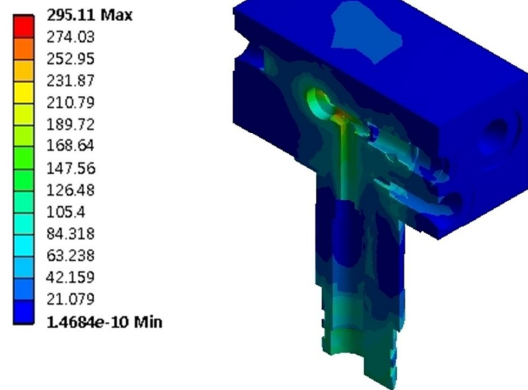
(a) Schematic of valve body

A: Static Structural
Pressure
Time: 5. s
A Fixed Support
B Pressure: 87.5 MPa



(b) Constraint condition

A: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 5



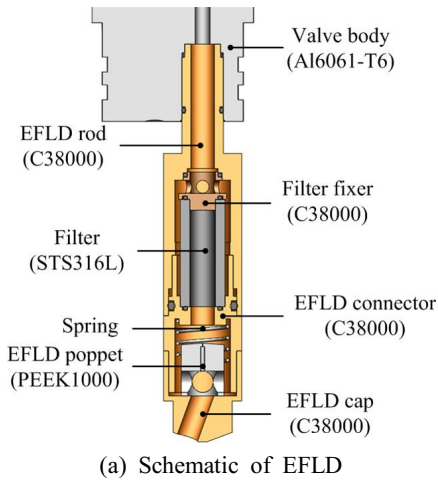
(c) Equivalent stress

Fig. 2 Results of structure analysis (Cylinder valve body)

인가되는 가이드, 플런저 A·B, 코어, 시트를 제외한 구성품을 제거하였다. 솔레노이드 밸브가 용기 밸브 바디에 체결되는 면에 fixed 조건을, 유로 개방으로 압력이 인가되는 면에 pressure 조건을 설정하였으며 해석 조건과 등가응력 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

4.4 매뉴얼 밸브 구조해석 결과

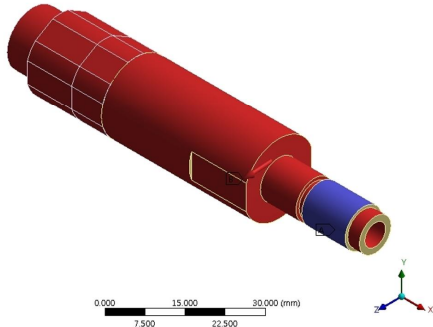
매뉴얼 밸브는 수동 조작에 의해 유로를 개폐하는 스프링과



(a) Schematic of EFLD

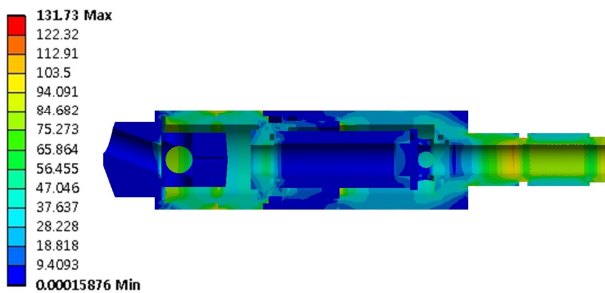
J: EFV(Finish)
Pressure
Time: 5. s

- A Fixed Support
- B Pressure: 87.5 MPa



(b) Constraint condition

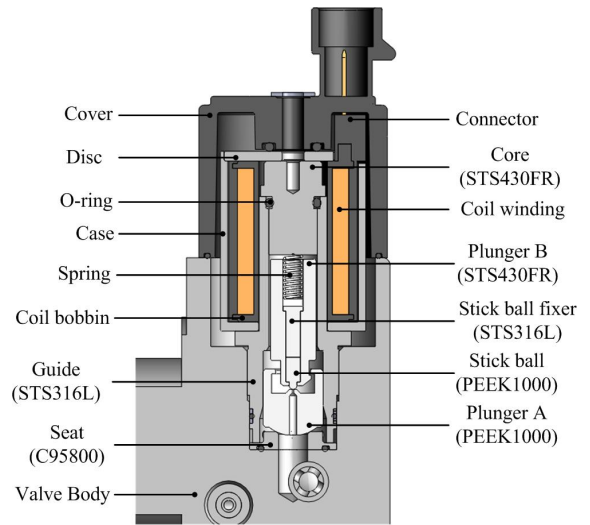
J: EFV(Finish)
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 5



(c) Equivalent stress

Fig. 3 Results of structure analysis (EFLD)

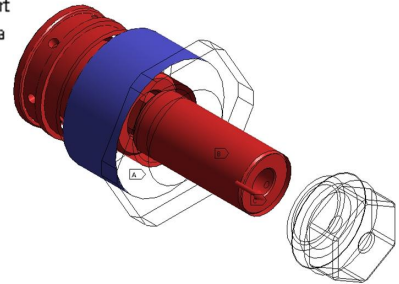
스핀들의 동작을 안내하는 너트로 구성된다. 매뉴얼 밸브가 용기 밸브 바디에 체결되는 면에 fixed 조건을, 매뉴얼 밸브의 동작으로 유로가 개방되어 압력이 인가되는 면에 pressure 조건을 설정하였으며 해석 조건과 등가응력 해석결과를 Fig. 5에 나타내었다.



(a) Schematic of solenoid valve

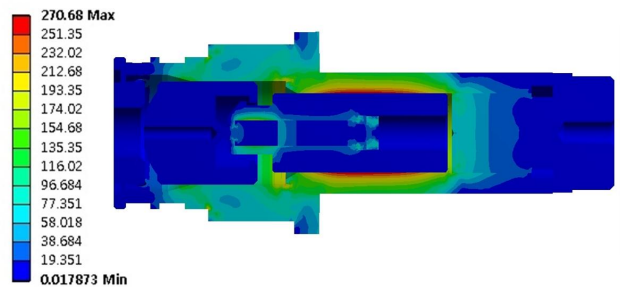
B: Sol assy
Static Structural
Time: 5. s

- A Fixed Support
- B Frictionless Support
- C Pressure: 87.5 MPa



(b) Constraint condition

B: Sol assy
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 5

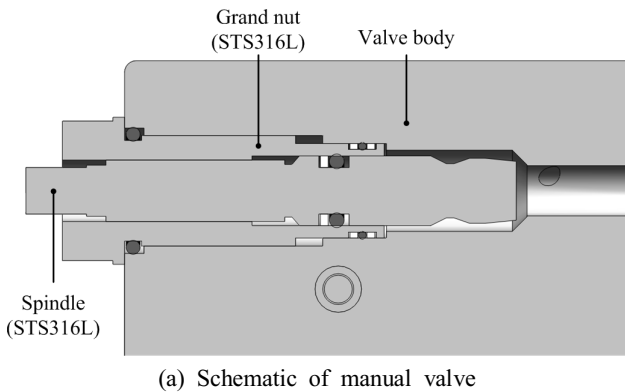


(c) Equivalent stress

Fig. 4 Results of structure analysis (Solenoid valve)

4.5 솔레노이드 체크밸브 구조해석 결과

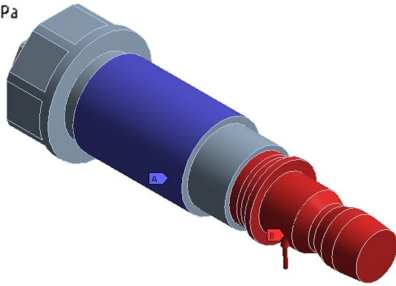
솔레노이드 체크 밸브는 수소 충전 시 솔레노이드로 유입되는 유로를 차단하여 수소가 압력용기로 유입되도록 한다. 솔레노이드 체크 밸브는 수소의 유동 방향을 제어하는 체크 유닛과 체크



(a) Schematic of manual valve

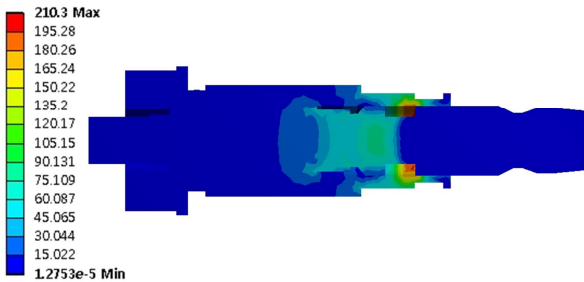
D: Manual valve(Finish)
Pressure
Time: 5. s

- Fixed Support
- Pressure: 87.5 MPa



(b) Constraint condition

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 5



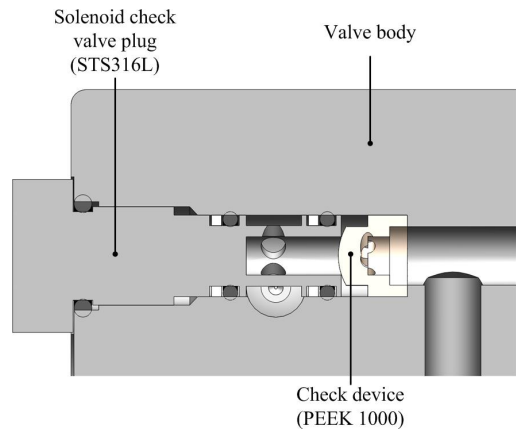
(c) Equivalent stress

Fig. 5 Results of structure analysis (Manual valve)

유닛의 동작 범위를 제한하는 플러그로 구성된다. 용기 밸브 바디에 체결되는 면에 fixed 조건을, 압력이 인가되는 면에 pressure 조건을 설정하였으며 해석 조건과 등가응력 해석결과를 Fig. 6에 나타내었다.

4.6 체크 밸브 구조해석 결과

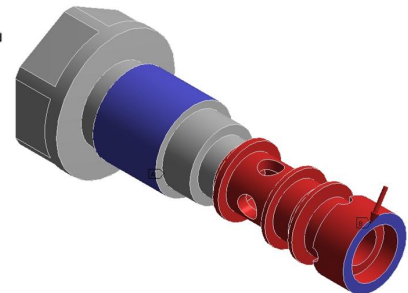
체크 밸브는 솔레노이드 체크 밸브와 마찬가지로 수소의 충전, 사용 시 수소의 유동 방향을 제어하기 위해 설치되며, 유동방향을 제어하는 체크 유닛, 체크 유닛의 위치를 복원하는 스프링, 체크



(a) Schematic of solenoid check valve

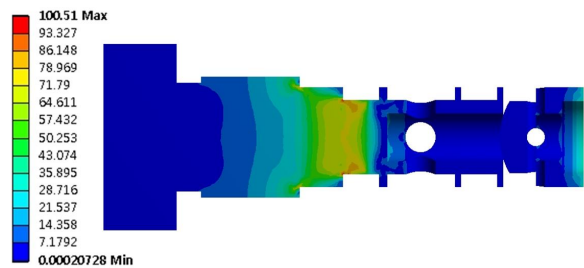
F: Sol check valve(Finish)
Pressure
Time: 5. s

- Fixed Support
- Pressure: 87.5 MPa



(b) Constraint condition

F: Sol check valve(Finish)
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 5



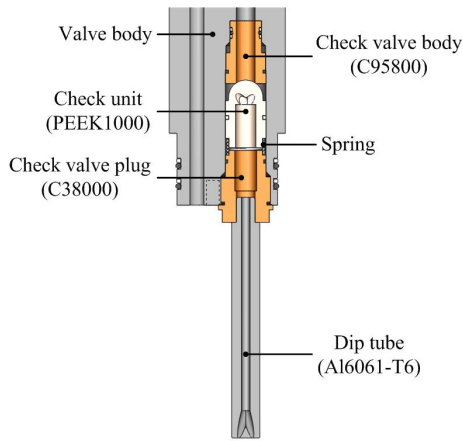
(d) Equivalent stress

Fig. 6 Results of structure analysis (Solenoid check valve)

유닛의 이동을 안내하고 동작 범위를 제한하는 바디와 플러그로 구성된다. 체크 밸브가 용기 밸브 바디에 체결되는 면에 fixed 조건을, 압력이 인가되는 면에 pressure 조건을 설정하였으며 해석 조건과 등가응력 해석결과를 Fig. 7에 나타내었다.

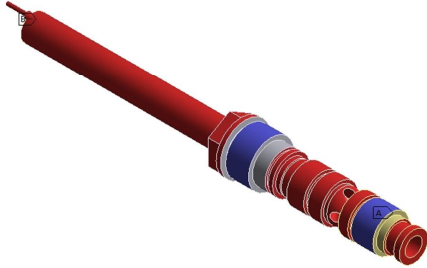
4.7 온도감응형 압력 해제장치 구조해석 결과

온도감응형 압력 해제장치는 자동차에 화재가 발생하여 설정 온도인 110°C±5 %에 이르면 동작하여 압력용기 내부의 수소를 의



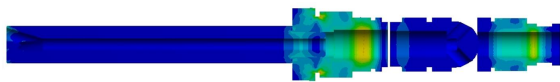
(a) Schematic of check valve

I: Check valve(Finish)
Pressure
Time: 5. s
A Fixed Support
B Pressure: 87.5 MPa



(b) Constraint condition

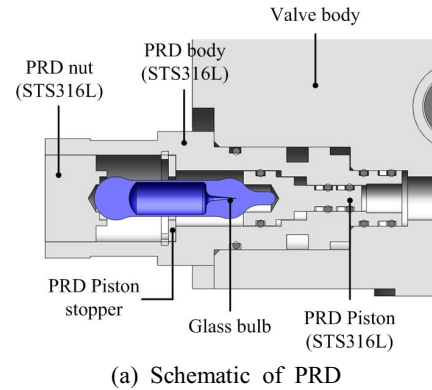
I: Check valve(Finish)
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 5
246.73 Max
229.11
211.49
193.86
176.24
158.62
140.99
123.37
105.74
88.12
70.496
52.872
35.249
17.625
0.0011083 Min



(c) Equivalent stress

Fig. 7 Results of structure analysis (Check valve)

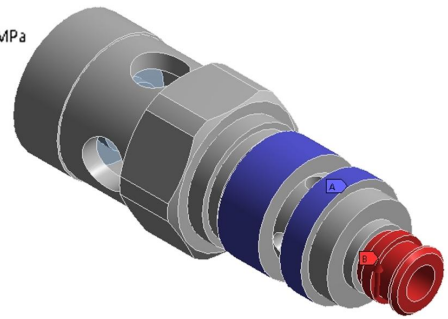
부로 배출시키는 역할을 한다. 압력 해제장치는 온도 변화를 감응하여 설정 온도에서 과열되는 액체 봉입식 유리벌브(glass bulb)와 유리벌브 과열 시 수소를 외부로 배출하는 유로를 개방하는 피스톤, 피스톤의 이동을 제한하는 스톱퍼, 유리벌브의 지지 및 교체에 필요한 너트, 압력 해제장치 바디로 구성된다. 압력 해제장치가 용기 밸브에 체결되는 면에 fixed 조건을, 압력이 인가되는 면에 pressure 조건을 설정하였으며 해석 조건과 등가응력 해석결과를 Fig. 8에 나타내었다.



(a) Schematic of PRD

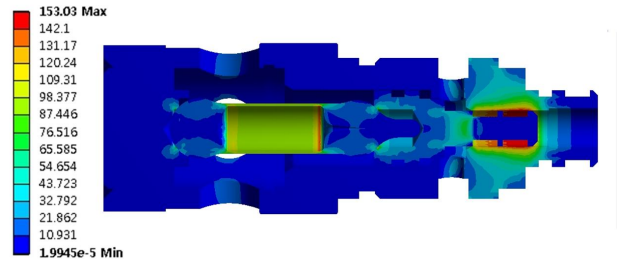
D: PRD edit
Pressure
Time: 5. s

A Fixed Support
B Pressure: 87.5 MPa



(b) Constraint condition

D: PRD edit
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 5

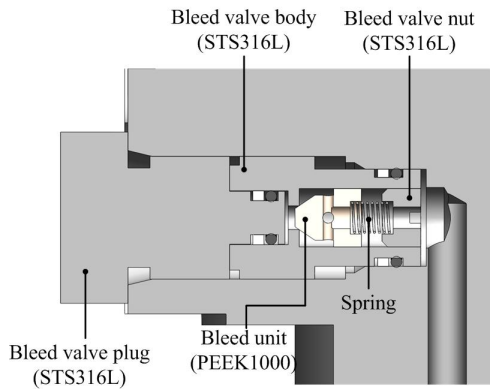


(c) Equivalent stress

Fig. 8 Results of structure analysis (PRD)

4.8 예비 수소 배출장치 구조해석 결과

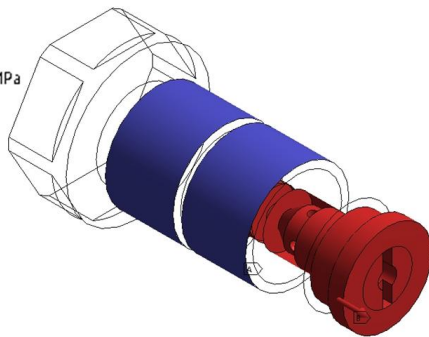
예비 수소 배출장치는 용기 밸브의 동작에 문제가 있거나 자동차 유지 보수 시 압력용기 내부 수소의 배출을 위해 설치된다. 배출장치는 수소를 배출하는 배출 유닛, 배출 유닛을 복귀시키는 스프링, 배출 유닛의 동작 범위를 제한하는 너트와 바디, 누설 방지를 위한 플러그로 구성된다. 배출장치가 용기 밸브 바디에 체결되는 면에 fixed 조건을, 압력이 인가되는 면에 pressure 조건을 설정하였으며 해석 조건과 등가응력 해석결과를 Fig. 9에 나타내었다.



(a) Schematic of bleed valve

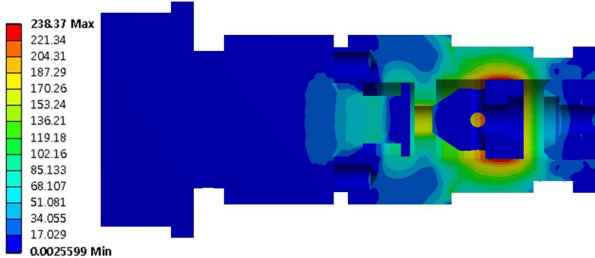
K: Bleed valve edit
Pressure
Time: 5. s

A Fixed Support
B Pressure: 87.5 MPa



(b) Constraint condition

K: Bleed valve edit
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 5



(c) Equivalent stress

Fig. 9 Results of structure analysis (Bleed valve)

4.9 용기 밸브의 등가응력 해석결과 및 평가

Table 3은 용기 밸브의 정격 압력과 최대 허용 압력에서 용기 밸브 구성품의 최대 등가응력 값을 정리하여 나타낸 것이다. 최대 허용 압력에서 구성품의 안전율 최소값은 솔레노이드 밸브 가이드에서 1.06, 최대값은 과류 차단장치 포핏에서 186.44이며, 정격 압력에서 안전율의 최소값은 용기 밸브 바디에서 1.25, 최대값은 과류 차단장치 포핏에서 250으로 나타났다.

용기 밸브 구성품별 안전율을 분석한 결과 용기 밸브 바디, 솔레노이드 밸브 가이드, 매뉴얼 밸브 너트, 예비 수소 배출장치 바디,

Table 3 Max. equivalent stress of cylinder valve components

Components	Yield strength (MPa)	Max. equivalent stress		
		700 bar	875 bar	
Cylinder valve body	350	279.27	295.11	
Solenoid valve	Guide	286	216.55	270.68
	Core	310	157.31	196.28
	Seat	262	5.85	7.29
	Plunger A	110	55.17	68.96
	Plunger B	310	94.88	116.23
	Stick ball	110	47.56	59.43
	Stick ball fixer	286	73.29	91.61
Manual valve	Spindle	286	67.24	84.05
	Grand nut	286	168.24	210.3
Solenoid check valve	Check unit	110	52.46	65.57
	Plug	286	80.41	100.51
Bleed valve	Valve body	286	190.69	238.37
	Valve nut	286	36.98	46.22
	Plug	286	83.24	104.05
	bleed unit	110	31.58	40.57
PRD	Body	286	122.42	153.03
	Piston	286	105.32	132.34
	Glass bulb	-	118.67	148.33
	Nut	286	68.76	87.61
Check valve	Valve fixer	262	133.73	167.16
	Check unit	110	48.55	60.69
	Plug	320	206.69	246.73
	Dip tube	350	66.03	82.65
EFLD & filter	Cap	320	84.80	106.01
	Connector	320	95.34	119.17
	Poppet	110	0.44	0.59
	Filter	286	24.35	30.44
	Filter fixer	320	48.05	60.02
Rod	320	105.27	131.73	

체크 밸브 플러그를 제외한 용기 밸브 구성품의 안전율이 정격압력에서 2, 최대 허용 압력에서 1.5 이상을 만족하였다. 최대 허용 압력에서 안전율 1.5를 만족하지 못하는 구성품의 최대 응력은 내압을 받는 표면에서 발생하며, 표면에서 두께 방향의 내부로 갈수록 응력은 감소하여 안전율이 증가한다. 표면에서 발생하는 최대 응력을 기준으로 안전율을 산출할 경우 두께 전체 영역 걸친 안전율을 반영하지 못하기 때문에 정확한 안전성 분석이 어렵다. 보다 정확한 분석을 하기 위해 최대 응력이 발생하는 부위에 두께 방향으로 응력 분류선(stress classification line)을 생성하여 응력을 선형화하였다.

Table 4 The results of stress evaluation at critical parts

Components	Component stress [MPa]			Allowable stress [MPa]
	P_m	P_b	P_L+P_b	
Cylinder valve body	186.87	112.19	292.4	233.3
Solenoid valve (Guide)	176.3	74.45	267.57	190.7
Manual valve (Grand nut)	143.73	62.45	192.1	190.7
Bleed valve (Valve body)	155.11	68.95	235.34	190.7
Check valve (Plug)	47.34	50.64	128.99	190.7

두께 방향으로 응력을 선형화하면 단면의 두께를 따라서 분포되어 있는 응력의 평균치인 1차 일반 막응력(P_m : general primary membrane stress), 구조물의 불연속부에서 국부적으로 발생하는 1차 국부 막응력(P_L : local primary membrane stress), 수직응력 중 두께를 따라 선형적으로 변하는 응력으로 단면의 도심으로부터의 거리에 비례하는 특성을 가진 1차 굽힘응력(P_b : primary bending stress)으로 분류할 수 있다. 특히 1차 일반 막응력은 가장 엄격한 제한을 받는 응력으로 항복이 발생하면 파손으로 이어질 위험성이 높은 응력이며, 1차 국부 막응력은 주위의 구속을 받는 한 자율성이 있으나 응력 재분배로 하중을 주위에 전달하는 동안 과도한 변형이 발생 가능한 응력이다.

각 응력 성분 값을 ASME Code sec. VIII, Div.2을 기준으로 분석하였으며, 코드에 의하면 응력 성분의 제한은 1차 일반 막응력은 허용응력 이하를 만족해야하며, 1차 국부 막응력과 1차 굽힘응력의 합은 허용응력 1.5배 이하를 만족해야 한다. 여기서 허용응력은 크리프 온도 이하에서는 항복응력의 2/3, 크리프 온도 구간에서는 10만 시간의 크리프 파단강도를 허용응력으로 규정하고 있다⁹⁾. Table 4는 응력 선형화에 따른 각 응력 성분(P_m , P_b , P_L+P_b) 값을 정리하여 나타낸 것이며, 응력 평가 결과 전체 구성품에서 1차 일반 막응력은 허용응력 이하이며, 1차 국부 막응력과 1차 굽힘응력의 합 역시 허용응력 1.5배 이하를 만족함을 확인하였다. 이와 같이 안전성을 분석함에 있어서 표면에서 발생하는 최대 응력은 두께 전체 영역을 반영하지 못하는 반면 응력 선형화를 통한 응력 성분 값은 두께 전체 영역을 반영하기 때문에 보다 정확한 분석이 가능하다.

온도감응형 압력 해제장치에 사용되는 유리밸브의 경우 항복점이 없는 취성 재질이라 구조해석에서 얻은 결과의 신뢰성을 검증하기에 한계가 있다. 하지만 유리밸브가 온도가 아닌 외부 하중에 의해 파열되는 하중의 평균값은 5.5 kN이며, 875 bar의 압력 조건에서 피스톤에 의해 유리밸브로 가해지는 하중은 841 N으로 설계는 타당하다고 사료된다¹⁰⁾.



Fig. 10 Test equipment and installation status for cylinder valve

5. 입력용기 밸브의 시험

용기 밸브 설계에 대한 안전성을 검증하기 위해 수소 연료전지 자동차 용기 밸브의 시험인증규격인 EU 406/2010 Annex IV에 의거한 가압 시험을 실시하였다. 가압 시험은 용기 밸브 시제품 3개를 제작하여 다음과 같은 절차로 진행하였다. 먼저 상온에서 용기 밸브를 시험장치에 체결하고 최대 허용 압력인 875 bar의 수압을 1회 인가 한다. 그 다음 20 bar에서 875 bar까지 수압을 인가하는 것을 한 사이클로 하고, 분당 6사이클 이하의 속도로 15,000 사이클을 반복한 후 시험장치에서 용기 밸브를 분리한다. 분리된 용기 밸브를 검사하였을 때 영구적인 변형이 없어야 한다.

Fig. 10은 고압부품 시험장비와 가압 시험을 위해 용기 밸브가 설치된 상태를 나타낸 것이다. 15,000 사이클의 가압 시험 후 각각의 용기 밸브에 대해 영구변형 발생 여부를 확인하였으며, 검사 결과 영구변형이 발생하지 않아 구조적으로 안전함을 확인하였다.

6. 결론

본 연구에서는 수소 연료전지 자동차에서 초고압으로 수소를 저장하는 압력용기에 체결되어 연료전지 스택으로의 유로 개폐와 압력 해제 등의 역할을 하는 용기 밸브의 안전성을 구조해석을 이용하여 분석하고 가압 시험을 통해 확인하였다. 용기 밸브 인증 시험 규격에 명시된 최대 허용 압력인 875 bar 조건에서 구조 안전성을 분석하기 위해 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 ANSYS WORKBENCH V15를 이용하여 구조해석을 수행하였으며, 구조 해석 결과 안전율의 최소값은 1.06, 최대값은 186.44로 나타났다.

1.5 이하의 안전율을 가지는 구성품의 보다 정확한 구조 안전성 분석을 위해 두께 방향으로 응력 분포를 선형화 하고 각 응력 성분 별 허용응력 기준을 ASME Code sec. VIII, Div.2를 이용하여 분석하였다. 분석 결과 허용응력 기준을 만족함을 확인하였으며 응력 선형화 기법이 두께 전체 영역을 반영하기 때문에 보다 효과적인 안전성 분석이 가능함을 입증하였다.

용기 밸브의 안전성을 최종적으로 확인하기 위해 용기 밸브의

시험인증규격에 의거한 가압 시험을 수행하였다. 가압 시험 후 용기 밸브 시제품 각각에 대해 영구변형 발생 여부를 검사하였으며, 밸브의 파단이나 영구변형이 발생하지 않음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2013년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구 결과임 (No. 2013032233).

References

- [1] Kim, H. G., Nah, S. C., Kang, Y. W., Yang, G. E., Lee, H. K., Choi, M. C., 2004, A Study on the Dynamic Analysis in the Shaft of Turbo-blower for Fuel Cell, KSMTE, 13:1 81-87.
- [2] Kim, H. G., Kang, S. S., Kwac, L. K., Song, H. Y., Kang, Y. W., 2007, A Study on the Performance Analysis and Design of Cathode in Fuel Cells, KSMTE, 16:1 75-79.
- [3] Suh, H. C., Jang, S. W., Cho, Y. J., Park, K. S., 2011, Study on Characteristics by Hydrogen Reacting of Hydrogen Sensor for Fuel Cell Electric Vehicle, Proceedings of the KSAE 2011 Spring Annual Meeting, 2136-2139.
- [4] Commission Regulation(European Union), 2010, No 406/2010 of 26 April 2010 implementing Regulation (EC) No 79/2009 of the European Parliament and of the Council on Type-approval of Hydrogen-powered Motor Vehicles - ANNEX IV : Requirements for Hydrogen Components and Systems Designed to use Compressed (gaseous) Hydrogen and their Installation on Hydrogen Powered Vehicles, EU NO 406/2010 - 1:107, European Union.
- [5] Matweb, LLC., viewed 5 Jan. 2016, Material Property Data <<http://www.matweb.com/>>.
- [6] Quadrant Engineering Plastic Products, viewed 5 Jan. 2016, KETRON® PEEK-1000 Data sheet <http://www.theplasticshop.co.uk/plastic_technical_data_sheets/peek_1000_technical_data_sheet.pdf>.
- [7] AZO NETWORK, viewed 5 Jan. 2016, Nickel Aluminum Bronze - Copper Casting Alloy UNS C95800 <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6517>>.
- [8] TOKAI BUSSAN, viewed 5 Jan. 2016, Technical Infos-Material C3604 <http://www.tokai-mmc.co.jp/e/insertnut/in_tec_material.html>.
- [9] Kim, T. W., 2002, Analysis of Structural Design Criteria of Pressure Vessels Based on ASME SECTION VIII, Proceedings of the KSME 2002 Autumn Annual Meeting, 98-107.
- [10] JOB Group, viewed 5 Jan. 2016, JOB Thermo bulbs <https://www.job-group.de/fileadmin/Media/Mediathek/Flyer/JOB_Ther_Bulb_Fly_alt_0914f1.pdf>.