



LPG 용기용 밸브 구조물의 강도안전성에 관한 연구

†김청균

홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터
(2014년 11월 25일 접수, 2014년 12월 22일 수정, 2014년 12월 23일 채택)

A Study on the Strength Safety of Valve Structure for LPG Cylinder

†Chung Kyun Kim

Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy Technology
Hongik University, Seoul 121-791, Korea

(Received November 25, 2014; Revised December 22, 2014; Accepted December 23, 2014)

요 약

본 연구에서는 LP가스 용기용 밸브에서 취약할 것으로 예상되는 Part 1, Part 2, Part 3 지역에 대한 강도안전성을 FEM으로 해석하였다. 밸브의 두께가 1.5mm이고, LPG 압력이 3.5MPa일 때 밸브의 Part 1 모서리 부분에서 27.5MPa의 Von Mises 최대응력이 걸리는 것으로 나타났다. 또한, 밸브의 두께가 1.5mm이고, LPG 압력 3.5MPa이 밸브에 작용할 때 Von Mises 최대응력은 Part 2에서 41.5MPa, 그리고 Part 3에서 46.5MPa으로 나타났다. 이러한 FEM 해석결과는 밸브의 Part 1, Part 2, Part 3에 작용하는 Von Mises 최대응력 모두가 황동소재 C3604의 항복강도 대비 9.2~15.5% 수준으로 대단히 낮은 값을 나타내고 있다. 이것은 기존의 LP가스 용기용 밸브의 두께가 지나치게 과도한 설계를 하였다는 것을 의미한다. 따라서, 밸브의 Part 1과 Part 2 지역의 두께는 황동밸브의 경량화 차원에서 얇게 설계하는 것이 바람직하다. 반면에 Part 3 지역의 두께는 기존의 밸브 두께처럼 두껍게 설계하여 높은 체결토크에도 안전한 강도를 유지하는 것이 좋다.

Abstract - This paper presents a study on the strength safety of the weak parts at Part 1, Part 2 and Part 3 in the valve structure for LPG cylinder by using the finite element method. The maximum Von Mises stress of 27.5MPa was occurred at the corner edge of a valve Part 1 for the valve thickness of 1.5mm and LPG pressure of 3.5MPa. And the maximum Von Mises stresses for the valve thickness of 1.5mm and LPG pressure of 3.5MPa were 41.5MPa at Part 2 and 46.5MPa at Part 3. The FEM computed results show that the maximum Von Mises stresses at Part 1, Part 2 and Part 3 are very low value of 9.2~15.5% compared with the yield strength of a copper alloy, C3604. This means that the valve thickness for LPG cylinder is so over designed for the conventional valve. Thus, this paper recommends that the thickness at Part 1 and Part 2 is reduced for a light weight of a copper valve. But, the thickness at Part 3 may be better for a thick valve as a conventional valve for high torque strength.

Key words : Strength Safety, Valve, LPG Cylinder, Valve Thickness, FEM

†Corresponding author: cckim_hongik@naver.com

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

LPG 용기용 밸브(valve)는 고압가스 압력용기에 액화석유가스를 충전하거나, 또는 저장된 LP가스를 외부로 방출하기 위한 차단형의 안전장치이다. 밸브는 ON-OFF 기능을 통해 취사용의 가스레인지나 난방용의 보일러와 같은 연소기기에 안전하게 공급할 수 있고, LP가스의 공급을 임의로 차단할 수 있다.

LPG 용기용 밸브는 구조가 단순하여 작동 신뢰성이 높고, 조작이 용이하다. LP가스 용기에는 1MPa 전후로 충전하여 사용하지만, 외부의 충격하중이나 내압상승으로 인한 용기의 파열, 밸브를 통한 가스 누출 등으로 인한 가스폭발 및 화재 위험성 때문에 밸브를 두껍게 제작하여 강도안전성을 확보하는 경우가 많다.

밸브는 가스용품에서 가장 오래된 제품으로 그동안 안전하게 사용해왔기 때문에 신기술개발을 위한 기초연구가 진행된 사례가 거의 없다[1,2]. 따라서 밸브 제조업체에서는 옛날에 개발한 설계도면을 기반으로 생산하기 때문에 국내 밸브의 대부분은 내구성이나 품질안전 등에서 큰 차이가 없으므로 저가형 밸브를 선호한다. 최근에는 가격에 의존한 밸브 구매패턴으로 품질안전 및 내구성이 떨어지면서 가스 누출에 대한 우려의 목소리가 높아지고 있다.

따라서 본 연구에서는 LPG 용기용 밸브로 널리 사용하는 밸브 모델을 대상으로 응력강도 안전성을 FEM으로 해석하고자 한다. 밸브 구조물의 강도안전성 해석에서 가해지는 하중은 LP가스 압력이고, 밸브의 두께 변화에 따라 달라지는 응력강도 안전성을 FEM으로 해석하여 밸브의 최적화 설계 데이터로 활용하고자 한다.

II. 해석모델 및 해석조건

2.1. 해석모델

Fig. 1에서 보여준 LPG 용기용 밸브는 국내에서만 사용하는 차단기능형 밸브로 좌측 체결구에는 고압용 호스가 연결되고, 우측에는 안전변, 그리고 하단부에는 용기의 네크링에 체결하기 위한 PT 나사부가 각각 형성되어 있다.

Fig. 2는 Fig. 1에서 보여준 LP가스용 밸브의 절개 단면도를 보여준 구조물이다. 이 그림에서 수직 축 방향의 하단부에는 관통구를 설치한 수나사 체결부, 횡방향의 우측에는 안전변, 좌측에는 LP가스의 충전과 방출을 위한 유출입구를 각각 보여준다. 또한, Fig. 2에서 보여준 상하좌우의 연결구에서는 상대적으로 높은 응력이 걸릴 것으로 예상되기 때문에 이

들 3곳의 위치인 Part 1, Part 2, Part 3에 대한 응력강도를 FEM으로 해석하고자 한다. 이들 Part 1, Part 2, Part 3의 모서리 지역을 중심으로 밸브의 두께를 1.5~3mm로 변경하면서 밸브 구조물에 작용하는 강도안전성을 고찰하였다.

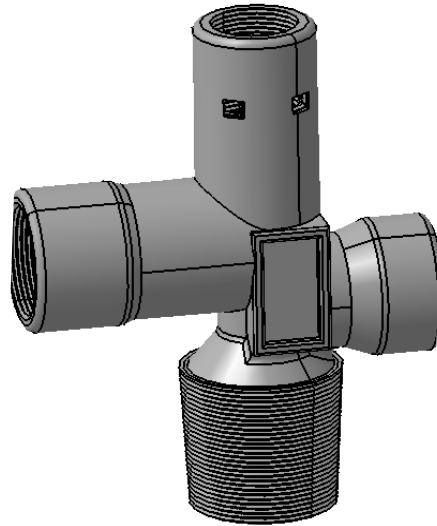


Fig. 1. Typical valve for LPG cylinder.

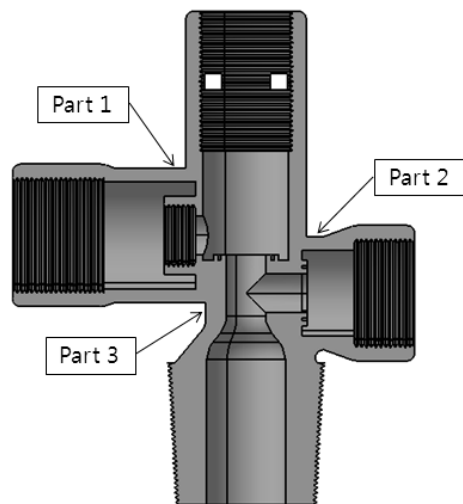


Fig. 2. Cross section of valve for LPG cylinder.

Table 1. Material properties of brass by KS D5101 C3604

Material properties	Values
Yield strength, MPa	300
Tensile strength, MPa	450
E, kN/mm ²	96
Poisson's ratio	0.32
Specific gravity	8.5

2.2. 해석조건

밸브에서 응력 집중도가 높을 것으로 예상되는 Part 1, Part 2, Part 3의 모서리 지역을 중심으로 FEM 응력해석을 수행하였다. 밸브 제조에 사용된 황동소재는 탄성과 연신율이 우수하고, 비중이 8.96g/cm³으로 높다는 특징을 갖는다.

밸브 구조물의 강도안전성에 대한 FEM 해석에서 내부에는 LP가스 압력이 균일하게 작용한다고 가정하였고, 최대응력이 작용할 것으로 예상되는 밸브의 모서리 지역을 중심으로 강도안전성을 고찰하였다.

용기용 밸브에 작용하는 LP가스 압력은 KGS Code의 기밀 및 내압 안전성 검사기준[3,4]을 사용하였다. 즉, 밸브에 대한 LP가스 누출 검사압력은 1.82MPa, 내압은 2.9MPa로 각각 규정되어 있다. 따라서 본 연구에서는 밸브에 대한 응력강도 안전성을 해석하기 위한 LP가스 압력은 1.5~3.5MPa이 밸브에 작용한다고 가정하고 FEM 강도안전성 해석을 수행하였다.

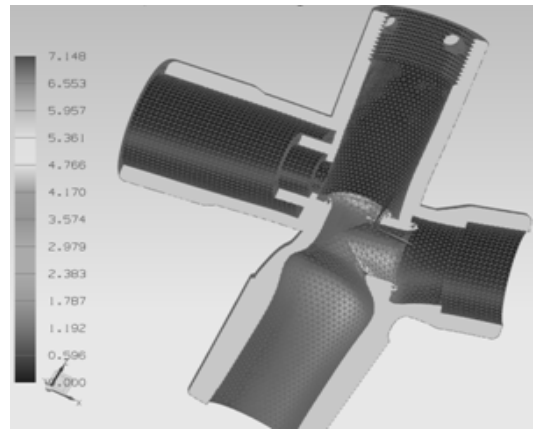
2.3. 사용소재

Fig. 1은 LPG 용기용 밸브 구조물의 강도안전성을 해석하기 위한 FEM 해석모델로 황동소재를 사용하여 제작하였다. 황동소재에 대한 물성치는 KS D5101 C3604[5]에서 다음과 같이 제시하고 있다.

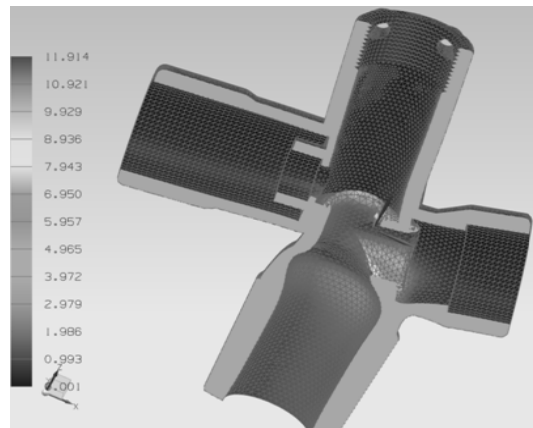
III. 해석결과 및 고찰

Fig. 1과 같은 해석모델에 가해진 LP가스 압력은 1.5~3.5MPa로 밸브 구조물의 내경부 모두에 고르게 작용한다고 가정한다. LPG 용기로부터 유입된 가스 압력으로 인해 밸브 구조물에 작용하는 응력은 밸브의 소재특성, 밸브의 두께, 내부공간을 구성하는 구조물의 형상 등에 의해 달라진다.

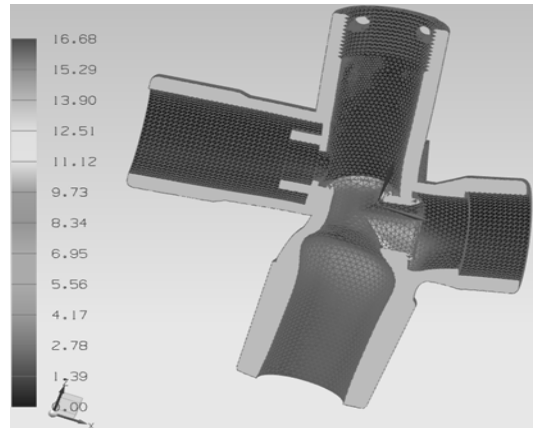
밸브제조에 사용한 소재는 단조용 황동 C3604이고, 동일한 형상구조를 갖는 밸브라도 취약부는 Fig. 2에서 표시한 Part 1, Part 2, Part 3이 될 것이다. 이



(a) Gas pressure, 1.5MPa



(b) Gas pressure, 2.5MPa



(c) Gas pressure, 3.5MPa

Fig. 3. Von Mises stress distribution of LPG cylinder valve for valve thickness, 2.5mm.

들 3개 모서리 지역의 최소두께를 1.5~3mm로 변화시켰을 때 밸브에 작용하는 응력은 서로 다르게 나타날 것으로 예상된다. 따라서 Part 1, Part 2, Part 3의 모서리 지역 두께를 바꾸어가면서 LP가스 압력을 공급하였을 때 이들 취약부에 대한 Von Mises 응력해석을 통해 밸브 구조물의 강도안전성을 고찰할 수 있다.

Fig. 3(a)는 두께가 2.5mm인 밸브에 LP가스 압력을 1.5MPa 공급하였을 때 형성된 Von Mises 응력 분포도를 보여주고 있다. 여기서 밸브 구조물에 작용하는 Von Mises 최대응력은 밸브의 수직구멍과 안전편이 연결되는 에지부분에서 7.1MPa이 발생하였다. 이 값은 황동소재의 항복강도인 300MPa에 비해 2.4%에 불과한 대단히 낮은 응력수준이다.

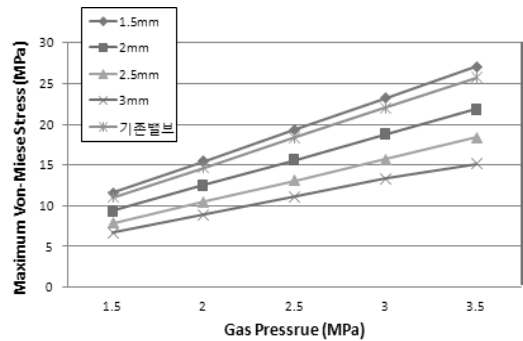
Fig. 3(b)에서는 밸브의 두께가 2.5mm로 동일한 Fig. 2의 해석모델에 LP가스 압력을 2.5MPa로 더 높게 작용시켰을 때 밸브 구조물에 걸리는 Von Mises 응력분포도를 보여주고 있다. 여기서 밸브 구조물에 작용하는 Von Mises 최대응력 11.9MPa은 Fig. 3(a)와 동일한 지역에서 1.68배나 높게 발생하였지만, 황동소재의 항복강도에 비해 4%의 낮은 수준으로 안전한 데이터이다.

Fig. 3(c)에서는 밸브의 두께가 2.5mm인 Fig. 2의 해석모델에 3.5MPa의 LP가스 압력을 공급하였을 때 밸브 구조물에 형성되는 Von Mises 응력분포도를 보여준 결과이다. 여기서 밸브 구조물에 작용하는 Von Mises 최대응력은 16.7MPa로 황동소재의 항복강도 대비 5.6% 수준으로 충분히 안전하다 할 수 있다.

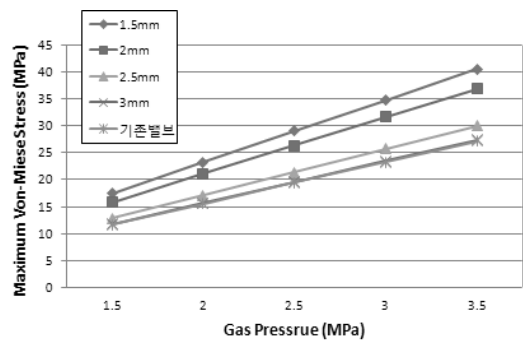
Fig. 4는 밸브 구조물의 취약부라 할 수 있는 Part 1, Part 2, Part 3의 두께를 1.5~3mm로 다르게 설계하고, 이 밸브에 1.5~3.5MPa 정도의 LP가스 압력을 공급하였을 때 밸브의 각 취약부에서 발생한 Von Mises 최대응력 해석결과를 보여주고 있다.

Part 1은 Fig. 2에서 수직방향의 밸브몸체와 좌측 방향으로 돌출하여 충전구와 배출구 기능을 갖는 구조물이 서로 교차하는 모서리 지역을 나타낸다. Fig. 4(a)는 밸브의 두께를 1.5mm로 가장 얇게 설계한 Part 1 지역에 3.5MPa의 LP가스를 공급하였을 때 밸브 구조물에 작용하는 Von Mises 최대응력 27.5MPa은 황동소재의 항복강도 대비 9.2% 수준으로 충분히 안전하다 할 수 있다. 이 결과는 Part 1 지역의 밸브 두께가 1.5mm로 얇아도 내부의 유출입구에 또 다른 원형 구조물이 이층으로 형성되어 있기 때문으로 판단되고, 기존 밸브에 대한 FEM 해석결과도 안전성 측면에서 우수한 것으로 나타났다.

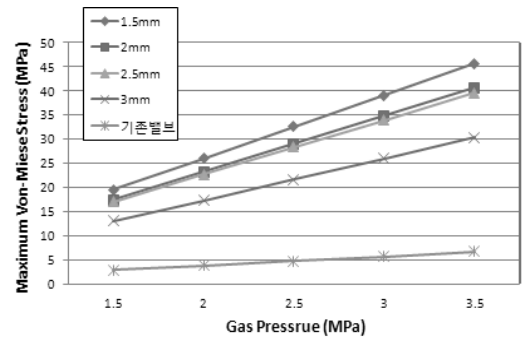
Fig. 4(a)에서 제시한 응력강도는 밸브 구조물의 소재 두께만으로 결정되는 것이 아니고 Part 1 인근



(a) At Part 1



(b) At Part 2



(c) At Part 3

Fig. 4. Maximum Von Mises stress of the weak positions, Part 1, Part 2 and Part 3 for various gas pressures.

의 형상구조와 소재의 균일한 분포도 등에 의해 결정되기 때문으로 판단된다.

Part 2의 모서리 지역은 수직방향의 밸브몸체와 우측방향으로 돌출된 안전편이 서로 만나는 부분이다. Part 2 지역에 대한 FEM 해석결과를 제시한 Fig. 4(b)에 의하면, 두께를 1.5mm로 가장 얇게 설계한

밸브에 3.5MPa의 고압가스를 공급할 경우 밸브 구조물에 걸리는 Von Mises 최대응력은 41.5MPa로 Part 1 지역보다는 51%나 높게 나타났다. 이 값은 황동소재의 항복강도 대비 13.8% 수준으로 충분히 안전하다 할 수 있다. 또한, 기존 밸브에서 Part 2 지역의 밸브 두께를 1.5mm로 설계하였을 때, 밸브에 작용하는 Von Mises 최대응력 11.7MPa는 Fig. 2에서 제시한 해석모델에 비해 상대적으로 과도한 설계라 할 수 있다.

Part 3의 모서리 지역은 수직방향의 밸브몸체에 형성된 PT나사의 끝부분과, 우측방향에는 안전변, 좌측방향에는 LP가스의 유출입구가 서로 교차하는 부분이다. Part 3 지역에 대한 Fig. 4(c)의 FEM 해석결과에 의하면, 밸브의 두께를 1.5mm로 가장 얇게 설계한 밸브에 3.5MPa의 LP가스 압력을 공급할 경우 밸브 구조물에 걸리는 Von Mises 최대응력은 46.5MPa로 나타났다. 이 값은 황동소재의 항복강도 대비 15.5% 수준으로 대단히 안전한 설계라 할 수 있다.

Part 3 지역의 밸브 두께를 1.5mm로 설계하였을 때, Fig. 4(c)에서 보여준 해석결과처럼 기존 밸브에 작용하는 Von Mises 최대응력은 6.5MPa로 Part 1과 Part 2의 다른 지역에 비해 지나치게 높은 강도안전성을 확보하고 있다. 그러나 Part 3의 모서리 지역은 밸브를 용기의 네크링(neck ring)에 체결할 때, 규정 토크보다 높은 값으로 Part 3 지역을 잡아서 돌리기 때문에 이 지역이 종종 파손되는 경우가 발생한다. 따라서 밸브를 설계할 때 LP가스 압력에 의한 강도안전성보다는 토크 강도를 더 많이 고려하지만 경량설계의 필요성이 늘 제기된다.

Fig. 4에서 제시한 FEM 해석결과에 의하면, 밸브의 두께를 1.5mm보다 2mm로 두껍게 하거나, 2mm 두께를 3mm로 늘려서 설계하면 밸브에 작용하는 응력강도 내구안전성은 크게 향상된다. 그러나 밸브 제조원가의 대부분을 차지하는 황동소재가 고가라는 점을 감안하면 최소두께로 설계하는 것이 바람직하다.

IV. 결 론

본 연구에서는 LP가스 용기용 밸브에서 취약할

것으로 예상되는 Part 1, Part 2, Part 3 지역에 대한 응력강도 안전성을 FEM으로 해석하였다.

밸브의 두께가 1.5mm이고, 공급된 LP가스 압력이 3.5MPa일 때 밸브몸체와 LP가스의 유출입구가 연결되는 Part 1의 모서리 부분에서는 27.5MPa의 Von Mises 최대응력이 걸리는 것으로 나타났다. 또한, 밸브몸체의 우측으로 연결되는 안전변의 Part 2의 모서리 부분에서는 41.5MPa, 그리고 Part 3의 모서리 부분에서는 46.5MPa의 높은 Von Mises 최대응력이 각각 작용하는 것으로 예측되었다, 그러나 기존의 밸브모델에 대한 해석결과는 6.5MPa로 대단히 낮아 과도한 설계로 간주된다.

여기서 계산된 Von Mises 최대응력 모두는 황동소재의 항복강도 대비 9.2~15.5%로 대단히 낮은 값을 나타내고 있다. 이 결과는 밸브의 강도안전성을 유지하면서 경량 구조로 제작하기 위해서는 유출입구의 Part 1과 안전변이 장착된 Part 2 부분에서는 두께를 더 얇게, Part 3의 하단부 지역에는 밸브를 LP가스 용기에 안전하게 체결할 수 있도록 두껍게 설계하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2014학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

REFERENCES

- [1] C.K. Kim and T.W. Kim, "A Study on the Stress and Deformation Behavior of an Alarm Valve using Finite Element Method," J. of KIGAS, Vol. 16, No. 2, pp.14-17, 2012.
- [2] Chung Kyun Kim, "Experimental Study on the Safety of a Valve for a Special Gas Cylinder," J. of KIGAS, Vol. 17, No. 3, pp. 14~19, 2013.
- [3] KGS Code AA311, (2009)
- [4] KGS Code AA316, (2009)
- [5] KS D5101, "Copper and Copper Alloy Rod," (2009)