

다구찌법을 이용한 LPG용기용 밸브 구조물의 강도 안전성 및 최적설계에 관한 연구

오경석, 김청균

홍익대학교 기계시스템디자인공학과

A Taguchi Method Applied Study on Strength Safety and Optimized Design of a Valve Body for a LPG Gas Cylinder

Kyoung Seok Oh, Chung Kyun Kim

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University

1. 서론

LPG를 안전하게 저장하고, LPG를 효과적으로 방출하기 위해 LPG 용기의 상단부 중앙에는 나사의 작동으로 LPG의 연료 유동율을 제어하거나, 외부누출을 적극적으로 차단하는 역할을 한다. LPG 용기에 설치된 차단밸브는 LPG의 저장압력, 설계압력 등을 모두 만족하도록 LPG 용기 구조물에 대한 안전성 해석을 담당하고, LPG의 공급압력 또는 설계압력에 적합한 가스압력을 충분히 전달 수 있도록 안전성을 우선적으로 고려하여 제작되어야 한다.

본 논문에서는 LPG 용기용 밸브에 가해질 수 있는 최대 압력을 LPG 밸브 구조물에 적용하여 LPG 저장탱크의 내압에 대해 충분한 강도 안전성을 확보하면서 저렴하게 제작할 수 있는 밸브의 강도 안전성을 유지할 수 있도록 구조해석 프로그램인 MARC를 사용하여 LPG 용기용 밸브의 강도 안전성을 점검하고, 최고압력에 적합한 LPG 용기용 밸브의 형상설계를 수행하였다. LPG 용기용 밸브의 소재로 사용되는 황동은 타 금속과 비교하여 밀도가 크고, 가격 또한 고가이기 때문에 과도한 안전성의 유지는 경제적 측면에서 손실을 가져올 수 있다. 따라서 본 논문에서는 다구찌 실험법을 이용한 최적설계를 수행하여, 소재의 양은 줄이지만 강도 안전성은 높게 유지하는 LPG 용기용 밸브의 형상설계에 대한 연구를 수행하였다.

2. LPG 용기용 밸브와 해석모델

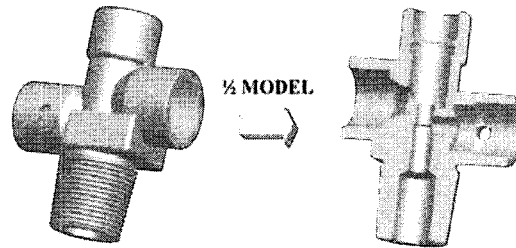
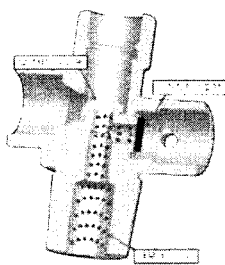


Fig. 1 The body of LPG valve



Properties	Brass
Modulus of elasticity, GPa	97
Density, kg/m ³	8490
Poisson's ratio	0.31
Yield strength, MPa	124

Fig. 2 Boundary Condition and Material Properties

2-1. LPG 용기용 밸브와 해석모델

LPG용기용 밸브는 LPG용기의 밸브 연결부에 부착되어 가스의 유로를 개폐하는 중요한 역할을 하는 것으로 주로 단조용 황동봉을 단조후 가공하여 제조한다. 밸브는 밸브몸통, 안전장치, 핸들, 스피들(Spindle), 스템(Stem), 스톱퍼(Stopper) 또는 그랜드너트(Gland nut), 오링, 밸브시트(Valve seat) 등으로 구성되어 있다. Fig. 1은 LPG용기용 밸브의 3D모델로 왼쪽 그림은 밸브의 외관을 나타내고, 오른쪽 그림은 밸브의 내부구조를 나타낸다.

Fig. 2는 해석모델에 대한 경계조건을 나타낸 것이다. 1/2모델로 간략화하였고, 가스는 그림에 나타난 밀봉장치로 완벽하게 밀봉되어 누설이 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 따라서 가스압은 그림과 같이 내부에만 균일하게 가해진다.

2-2. 해석조건

LPG용기용 밸브의 강도를 파악하기 위해 연결부를 통해 가스가 올라와서 밸브의 내부에 가압되도록 하였다. 밸브시트와 안전장치가 모든 입구를 밀봉한 조건에서 관내에 일정하게 가스압이 작용하는 것으로 가정하였다.

실제 작동상태에서의 가스압은 18kgf/cm²이지만, 해석에 적용한 가스압은 용기용밸브의 내압시험압력 중 가장 큰 31kgf/cm²으로 정하였다. 또한 황동과 같은 연성재료에 대한 안전계수의 범주 중 하중이 가해지는 이론적 해석의 범주에서 대표적인 시스템에 대한 대략적인 모델의 경우 안전계수를 3으로 정할 것을 권

장하고 있다. 따라서 이 안전계수를 다시 고려하여 최종적으로 밸브 내부에 가해지는 가스압은 $91\text{kgf/cm}^2(9.114\text{MPa})$ 으로 적용하였다.[1]

2-3 Taguchi Method

다구찌법은 특성치의 산포를 통해 설계와 실험의 최적조건을 결정하는 기준을 정한다. 이 때 특성치의 산포가 가장 적은 조건을 최적조건으로 결정하게 되며, 특성치의 산포는 SN비를 통해 알 수 있다. 본 연구에서는 O-링에서 발생하는 cauchy응력, 변형률과 같이 특성치 값이 작으면 좋은 경우의 SN비를 사용하는 망소특성과 접촉수직응력과 같이 클수록 좋은 밀봉성능을 나타내는 경우의 망대특성을 적용하였다. SN비는 큰 경우가 그 때의 파라미터들이 응력과 변형률에서 안정되고, 우수한 밀봉성능에 효과적임을 의미한다. 또한 SN비를 사용하여 설계 파라미터들이 최적설계에 미치는 영향을 간이분석법을 통해 관찰하였고, 각 파라미터들이 특성치에 미치는 기여율을 계산하였다.[3]

2-4 설계 파라미터와 직교배열표

Fig. 3에 인자의 위치와 각 수준을 나타내었다. A는 아랫부분 관의 반경을 나타내며 B는 아랫부분 관의 축 방향 길이로서 기준점은 밸브의 하단을 기준으로 하였다. 표의 C는 다구찌 설계과정에서 나타는 오차항이다. 아랫부분 관에서 윗부분 관으로 연결되는 부분에 테이퍼 부분이 존재하는데, 이 곳의 각도를 다구찌 인자의 D로 선정하였다. 오차항을 포함하여 인자는 모두 4개이며, 각각 3개의 수준을 가지므로 4인자 3수준의 직교배열표를 적용하여 총 9개의 모델을 해석하였으며 Table 1은 적용된 직교배열표를 보여준다.

		Variation Factors			
		A:r(mm)	B:L(mm)	C(error)	D:θ(°)
level	1	7	23	-	33.7
	2	8	32	-	45
	3	9	35	-	60

Fig. 3 Factors and levels for Taguchi Method

Table 1. Analysis layout of orthogonal array table of $L_9(3^4)$

Model No. \ Factors	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

3. 해석 결과 및 고찰

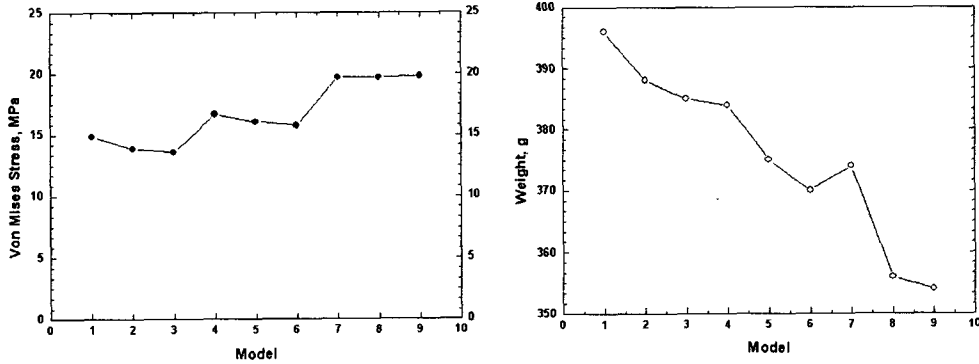


Fig. 4 Von Mises Stress of LPG valve at $P=91\text{kgf/cm}^2$ and Wight of LPG Valve

3-1. Von Mises 응력과 무게

가스의 압력이 가해지면 LPG 용기용 밸브의 내부에 응력이 발생하기 시작하며, 용기용 밸브 내부의 4개 지점을 지정하여 발생하는 응력을 관찰하였다. 4개 관측점으로부터 얻어진 응력값 중, 가장 큰 값을 해당모델에서 발생한 최대 응력으로 보았으며 이는 Fig. 4의 왼쪽 그래프에서 보여주고 있다. 황동의 항복응력은 124MPa로 안전계수를 고려한 해석임에도 불구하고 관측된 응력의 크기는 사용된 소재의 항복응력에 11%~16%정도에 불과하다. Fig. 5에서는 응력 측정 지점과 총 9개의 모델 중 대표적인 3개 모델의 응력 분포를 나타낸 그림을 보여준다.

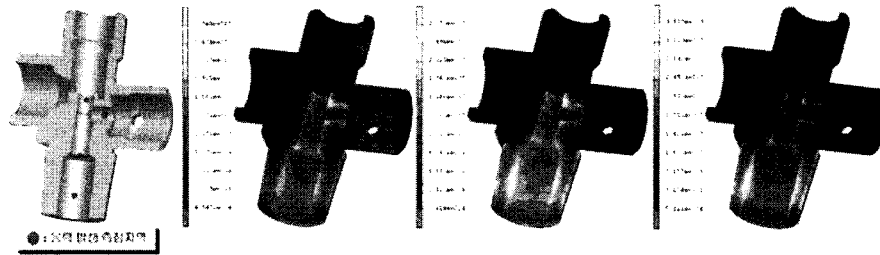


Fig. 5 Inspection Region and Von Mises Stress Distribution at P=91kgf/cm²

Fig. 4의 오른쪽 그래프는 9개의 모델들에 대한 무게를 나타내고 있다. 모델 번호가 증가할수록 무게가 감소하는 것을 알 수 있다. 원래의 밸브 형상인 1번 모델의 경우 396g이고, 가장 긴 아랫부분 관의 반경과 길이를 갖고 있는 9번 모델은 354g이므로 그 차이는 42g이다. Fig. 4 왼쪽의 그래프로부터 알 수 있듯이 모든 모델에 대해 항복응력을 넘지 않으므로 무게가 가장 가벼운 모델을 선정하는 것이 무게 측면에서는 가장 유리하다.

3-2. SN비와 기여율

Table 2는 9개 모델에 대한 응력과 무게의 SN비를 나타낸 것이다. SN비가 클수록 우수한 모델의 의미한다. 응력을 보면 3번 모델이 SN비가 가장 크기 때문에 우수한 모델이다. 그리고 무게 측면에서는 가장 가벼운 9번 모델이 가장 우수하다. 그러나 Fig. 4의 왼쪽 그래프에서 볼 수 있듯이 모든 모델이 항복응력을 넘지 않는 응력을 보여주고 있기 때문에 무게가 가벼울수록 우수한 모델이라고 할 수 있을 것이다. 따라서 가장 가벼운 9번 모델이 가장 우수하다고 할 수 있다.

Table 3은 각 인자들의 기여율을 나타낸 것이다. 응력과 무게의 경우 아랫부분 관의 반경과 길이가 미치는 영향이 각각 91.5%, 86.4%로서 LPG 용기용 밸브의 설계 시에 많은 고려를 해야 할 부분으로 볼 수 있다.

Table 2. S/N Ratios for Von Mises Stress, Weight of LPG valve

Model No.	Von Mises Stress	Wight	Model No.	Von Mises Stress	Weight
1	-23.4637	-51.9539	6	-23.9314	-51.3640
2	-22.8602	-51.7766	7	-25.8893	-51.4574
3	-22.6707	-51.7092	8	-25.8893	-51.0289
4	-24.4543	-51.6866	9	-25.9330	-50.9800
5	-24.1365	-51.4806	-	-	-

Table 3. Affecting ratio in LPG valve

Affecting ratio, %	A:r(mm)	B:L(mm)	C:(error)	D:θ(°)	sum
Von Mises Stress	80.205	11.318	5.793	2.684	100
Weight	56.516	29.920	8.602	4.962	100

4. 결 론

과도한 안전성을 목표로 설계된 LPG 밸브의 형상 유지는 경제적으로 볼 때 불필요한 사회비용을 유발할 수 있기 때문에, 본 논문에서는 LPG 용기용 밸브 구조물의 강도 안전성 및 최적설계에 관련하여 유한요소법과 다구찌법을 통해 접근해 보았다.

해석결과에 근거하여보면 LPG 용기용 밸브의 내측 구조에 가장 영향을 많이 미치는 인자는 아랫부분 관의 반경과 길이라는 것을 알 수 있었으며 이를 바탕으로 내부에 걸리는 응력의 크기가 소재의 항복강도를 넘지 않으면서 무게가 줄어들게 되는 9번 모델을 제시할 수 있다.

다만, 무게가 가장 줄어든 9번 모델의 경우에도 그 감소율이 원래 모델에 비해 10.6% 정도 수준에 그치고 있으므로 경량화가 목적이라면 황동을 대체할 수 있는 다른 소재의 적용도 고려해볼 수 있다.

설계 파라미터를 더욱 다양하게 선정하여 경량화를 꾀할 수도 있겠으나 이러한 경우 가공의 어려움을 고려해야 할 것이다. 그러나 이 9번 모델에 걸리는 응력의 크기는 황동의 항복응력의 약 16%에 불과하다. 그렇지만 그대로 황동을 유지하는 것도 경제적인 측면에서 필요 이상의 사회적 비용을 유발할 수 있기 때문에 LPG 용기용 밸브의 경량화와 최적 설계에 관련된 더욱 다양한 연구가 이루어져야 할 것이다.

5. 참고문헌

1. R. L. Norton, 정태형, 한병기 외 4인 공역, 기계설계, Prentice Hall ,pp.3-22 (2002)
2. MARC Analysis Version K7.3 (1999)
3. 박성현, 현대실험계획법, 민영사, pp.459-462, pp.631-638, (2003)
4. 이상순, 민동균 외 7인 공역, 재료역학, SciTech, pp.43-66, (2000)
5. 이상복, MINITAB을 이용한 다구찌 기법 활용, 이레테크, pp.36-38, (2001)