

다구찌 실험법을 이용한 고압 용기 밀봉구조물의 최적화

조승현¹ · 김청균¹ · 김영규²

¹홍익대학교 기계시스템디자인공학과

²한국가스안전공사 가스안전시험연구원

Optimized Design of Sealing Structure for High Pressure Vessel using Taguchi Method

Seung Hyun Cho¹ · Chung Kyun Kim¹ · Young Gyu Kim²

¹Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University

²Institute of Gas Safety Technology, Korea Gas Safety Corporation

1. 서론

압력용기는 내부온도 1,000℃와 2,000bar 내외의 가스압이 가해지는 중·소규모 뿐만 아니라 2,000℃이상, 3,000bar(45,000psi) 이상의 대형 장비에서 고품질의 항공부품, 의료제품, 세라믹 제품, 전자, 정밀 구조와 파우더 금속제품을 다양하게 생산하는 등 산업 전분야에서 폭넓은 파급효과가 있는 장치산업이다. 그러나 국내에서는 Cho. S.H etc.이 압력용기의 기계적 안전성에 관한 연구를 발표한 바 있고,[1] 몇몇 중소기업을 중심으로 압력용기를 생산하고 있으나 독자적인 기술 개발에는 아직 미치지 못하고 있는 실정이다.

이와 같이 산업에 미치는 파급효과가 큰 압력용기의 국산화를 위해서 가장 시급한 기술이 초고압하의 밀봉기술인데 일반적으로 고압하의 밀봉은 메탈오링이나 특수소재로 제작된 에너지이저 시일 등을 사용한다. 그러나 이러한 시일제품들 역시 2,000bar 이상의 초고압하에서 밀봉력을 유지하기는 쉬운 일이 아니며 밀봉이 가능하다고 하더라도 제품 가격이 매우 높기 때문에 상용화에는 많은 어려움이 있다.

따라서 저렴한 비용으로 초고압하에서 밀봉력을 담보할 수 있는 부품 개발의 필요성이 대두되었다. 본 논문에서는 초고압 압력용기의 밀봉기술을 확보하기 위하여 다구찌법과 유한요소법을 이용한 초고압용 메탈시일을 연구하게 되었다.

2. 본론

2.1 해석조건 및 해석모델

Fig. 1은 압력용기의 밀봉 해석에 적용되는 고온과 고압의 조건을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 압력용기의 1회 사용동안 총 10시간의 시간이 소요되는데 작업 후 약 3시간이 경과하면 온도와 압력은 각각 1,500℃, 2,000bar로 최대가 되고 약 2시간동안 최대치를 유지한 후 0~11℃/min.의 속도로 냉각을 하며, 0~22.2bar/min의 속도로 강압을 한다.[2]

Fig. 2(a), (b)는 본 해석에 사용된 원통형상의 압력용기와 밀봉을 위한 메탈시일의 해석모델을 보여주는 그림이다. 압력용기의 실린더는 일체형으로 이루어져 있고, 원통형 실린더 상부에 플랜지가 덮개 역할을 한다. 압력용기에 대한 안전설계는 일본의 JIS와 미국의 ASME Sec. VIII Div. 2에서 제시한 기준에 의거 해석적으로 수행하였다. 효율적인 유한요소 해석을 위하여 Fig. 1의 점선으로 표시한 부분을 Fig. 1(b)와 같이 모델링하여 해석하였다.

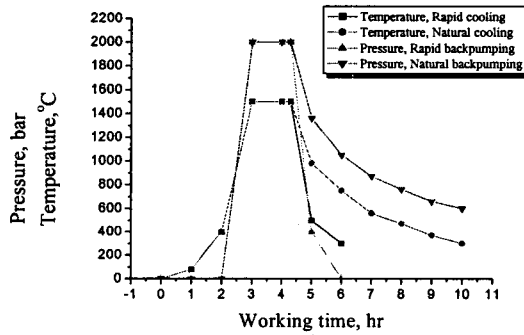
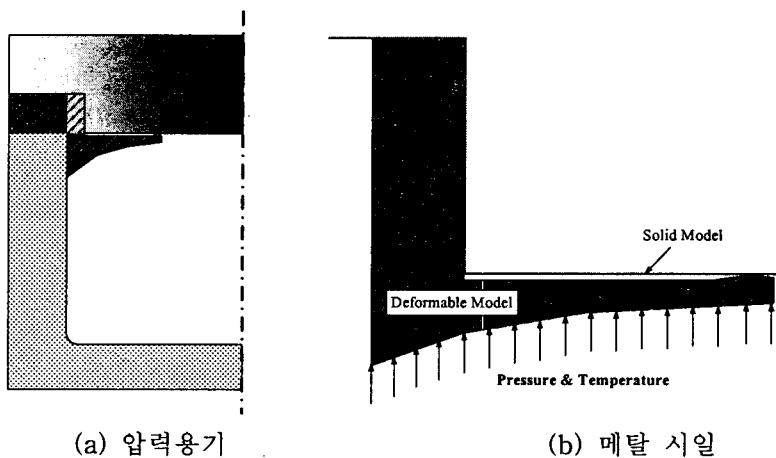


Fig. 1 온도, 압력 조건



(a) 압력용기

(b) 메탈 시일

Fig. 2 압력용기 해석모델

본 논문에서는 메탈시일의 형상설계를 최적화하는데 목적이 있기 때문에 상부의 플랜지는 관심의 대상이 아니다. 따라서 플랜지는 솔리드모델로 단순화한 접촉모델로 해석을 하였고 메탈시일의 밀봉력을 예측하기 위해 접촉응력을 계산하였다. 메탈시일의 접촉응력을 계산하기 위해서 모델링과 계산은 접촉문제에 관하여 범용적으로 사용되고 있는 MSC/Mentat와 MSC/MARC7.3 프로그램을 사용하여 해석하였다.[3]

메탈시일의 소재는 알루미늄을 채택함으로써 고압과 고온에 의해 알루미늄이 밴딩과 팽창이 발생하여 플랜지의 아랫부분과 접촉하여 밀봉을 담당하도록 설계하였다. AI강의 항복강도가 315MPa임을 고려한다면 메탈시일의 에지부에서 발생하는 접촉응력은 항복강도를 넘어서지 않아야 하고, 또한 내부의 가스압의 누설을 방지하기 위해서는 가스압보다 높은 접촉응력이 발생해야만 한다. 따라서 본 논문에서는 항복응력값보다 낮고 내부 가스압인 2,000bar(200MPa)보다 높은 250MPa으로 목표값을 정하였다.

한편 AI의 기계적-열적 특성값은 Table 1과 같다.

Table 1 Mechanical and thermal properties of 9% Ni steel

Properties	Value	Properties	Value
Elasticity module [GPa]	79	Thermal expansion coefficient [$\mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K}$]	21
Density [kg/m^3]	2,680	Thermal conductivity [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]	138
Poisson's ratio	0.34	Specific heat [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$]	850
Yield strength [MPa]	315		

2.2 다구찌 방법

Fig. 2(b)에서 보여주는 바와 같이 메탈시일의 하단부에 고온과 고압의 압력이 가해지면 메탈시일이 윗방향으로 밴딩과 팽창이 발생하여 상단부의 플랜지와 접촉함으로써 밀봉이 되는데 지나치게 밴딩이 발생하여 메탈시일의 에지(Edge)에서 과도한 접촉응력이 발생하게 되면 메탈시일에 손상이 발생하기 때문에 메탈시일의 밴딩과 팽창이 적절하게 발생하도록 하단부 설계가 매우 중요하다.

따라서 본 논문에서는 다구찌 기법을 이용하여 Fig. 3과 같이 메탈시일의 하단부의 형상을 5개의 파라미터로 나누어 최적설계를 수행하였다.

다구찌 법의 핵심은 파라미터 설계인데 제품의 성능특성이 잡음(Noise)에 둔감하도록 제품설계나 공정설계를 하는 것이다. 다구찌 법은 실험과 설계의 최적조

건을 결정하는 기준을 특성치의 산포로 정하는데 특성치의 산포가 가장 적은 실험조건을 최적조건으로 결정한다. 특성치의 산포는 SN(Signal to Noise ratio)값에 의해 알 수 있고 SN값은 특성치의 성질에 따라 다음과 같이 정의한다.

- ◆ 망목특성(특정한 목표치가 주어져 있는 경우) : 길이, 무게 등과 같이 지정된 목표치 m 이 있는 경우이다.
- ◆ 망소특성(작을수록 좋은 경우) : 마모, 진동, 불량률 등과 같이 작을수록 좋은 경우이다.
- ◆ 망대특성(클수록 좋은 경우) : 강도, 수명, 연료효율 등과 같이 클수록 좋은 경우이다.

본 논문에서는 망소특성, 즉 특성치의 값이 적을수록 좋은 경우의 SN값을 사용하고 정의는 다음과 같다. 망소특성을 채택한 이유는 본 논문에서 메탈시일의 설계목표치를 250MPa로 설정하였는데 해석을 선행해 본 결과 에지에서 발생하는 접촉응력이 설계목표치인 250MPa를 훨씬 초과하기 때문에 소재의 항복강도를 고려하여 망소특성을 사용한 것이다.

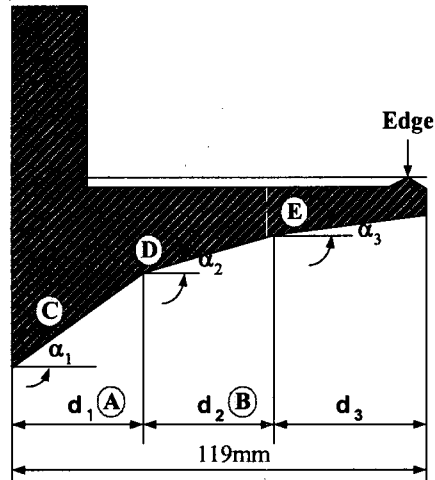


Fig. 3 메탈시일의 하단부 설계를 위한 파라메타

$$SN = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

식 (1)에서 SN 값이 큰 경우가 그때의 설계 파라메타들이 접촉응력을 줄이는데 효과적임을 의미한다. 본 논문에서는 각 해석번호에 대한 SN값으로부터 각 파라메타들의 에지에서 발생한 접촉응력에 대한 효과를 간이분석법을 통하여 분석하였고, 각 파라메타들이 특성값에 미치는 기여율을 계산하였다.[4,5,6,7,8]

2.3 설계 파라메타와 직교배열표

본 논문의 해석에 사용된 파라메타와 각 파라메타의 수준을 Table 2에 나타내었다. Fig. 3의 d_1 은 20~50mm, d_2 는 30~60mm로 하여 d_3 는 전체길이 119mm와 (d_1+d_2) 의 차이에 의해 결정되도록 하였고, α_1 은 20~14°, α_2 는 12~6°, α_3 은 7~1°범위로 하였다. 이와 같이 총 5개의 파라메타를 4수준으로 나누어 4수준계 직교배열표인 $L_{16}(4^5)$ 형을 사용하였으며 Table 3에서 나타내었다.

Table 2. Factors and levels for Taguchi method

	Factors					
		A : d_1 [mm]	B : d_2 [mm]	C : α_1 [degree]	D : α_2 [degree]	E : α_3 [degree]
Level	1	20	30	20	12	7
	2	30	40	18	10	5
	3	40	50	16	8	3
	4	50	60	14	6	1

Table 3. Experimental layout of orthogonal array table of $L_{16}(4^5)$

Experiment No.	Factors				
	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

3. 해석 결과

Table 4는 Tabel 3의 직교배열표에 의한 16개의 해석을 통해 메탈시일의 에지부에서 접촉응력으로서 von Mises 응력과 SN비를 나타낸 표이다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 해석 모델 16개에서 발생한 접촉응력이 모두 300MPa이 넘게 발생하였다. 이것은 설계목표치인 250MPa을 훨씬 넘어서는 수치로서 메탈시일의 에지에서 발생할 수 있는 과도 접촉력에 의한 손상을 고려한다면 에지부에서의 망소특성으로서의 SN를 계산하는 것이 합리적이다. 해석 결과에 의해 SN비가 -49.76683959로 계산된 16번째 해석 모델이 가장 적합하다고 할 수 있다. 즉, d_1 은 50mm, d_2 는 60mm, α_1 은 20°, α_2 는 8°, α_3 은 5°인 경우가 해당된다.

Table 4에서 구한 SN비의 값을 가지고 메탈시일의 에지부에서 발생하는 접촉응력에 영향을 미치는 파라메타들의 수준 합과 기여율을 간이분석법을 이용하여 계산하여 Table 5와 같이 정리하였다. 수준의 범위는 각 파라메타의 수준 합계 중에서 가장 큰 수와 가장 작은 수와의 차이이고, 기여율은 수준의 범위의 합에 대한 각 파라메타 수준 범위의 백분율이다. 결과에 의하면 각 파라메타의 수준합은 약 -999db로서 일정하며 수준범위의 합은 0.8179db이다.

Table 5의 결과로부터 메탈시일의 에지부에서 발생하는 접촉응력에 영향을 미치는 기여율을 살펴보면 “D” 파라메타인 α_2 가 약 35.65%로 가장 크며, “B” 파라메타인 d_2 가 약 10.51%로 가장 낮은 것을 알 수 있다. 따라서 메탈시일의 에지부를 설계함에 있어서 α_2 , d_1 , α_3 , α_1 , d_2 의 순서대로 고려하는 것이 바람직함을 알 수 있다

Table 4. Experimental results and S/N ratios for contact stress at edge

Exp. No.	Stress [MPa]	SN ratio [db]	Exp. No.	Stress [MPa]	SN ratio [db]
1	314.805	-49.96083243	9	315.013	-49.96656953
2	315.019	-49.96673497	10	311.449	-49.86773882
3	315.017	-49.96667983	11	314.712	-49.95826606
4	315.016	-49.96665225	12	311.994	-49.88282484
5	315.018	-49.96670740	13	315.017	-49.96667983
6	315.017	-49.96667983	14	314.726	-49.95865244
7	314.819	-49.96121870	15	314.762	-49.95964592
8	314.809	-49.96094280	16	307.852	-49.76683959

Table 5. Factors affecting the contact stress of edge

		A	B	C	D	E	Sum
Levels	1	-199.8609	-199.8608	-199.6526	-199.7636	-199.7492	-998.8871
	2	-199.8555	-199.7598	-199.7760	-199.8526	-199.6614	-998.9054
	3	-199.6755	-199.8458	-199.8528	-199.5680	-199.7830	-998.7251
	4	-199.6518	-199.5774	-199.7623	-199.8595	-199.8503	-998.7013
Difference of level		0.2091	0.0860	0.1097	0.2916	0.1216	0.8179
Affecting ratio [%]		25.5619	10.5147	13.4083	35.6483	14.8668	100

4. 결론

본 논문에서는 초고압 내부압력의 완벽한 밀봉을 위한 장치로서 메탈시일을 설계하기 위해서 다구찌 법을 사용하였다. 다구찌 법에 의한 최적설계는 다양한 분야에서 적용되고 검증된 설계기법으로서 엔지니어가 적은 비용과 시간으로 효과적인 설계를 할 수 있도록 도와 준다. 실제 본 논문에서 채택한 5개의 파라메타와 4개의 수준을 모두 해석하거나 실험하기 위해서는 1024번의 해석을 수행해야 하지만 단 16번의 해석을 통해 1024번의 해석중에서 목적값에 맞는 최적조합을 찾을 수 있었다. 향후 메탈시일 에지부의 경사각과 폭, 에지부의 개수 등 에지부 상단부의 형상도 최적화해야 하지만 다구찌 법을 사용하여 설계하게 되면 최적의 설계변수를 찾을 수 있을 것이다.

5. 참고문헌

- [1] 조승현 외, "가스압력용기의 밀봉시스템에 관한 수치적 연구", 2002 추계학술발표회 논문집, 한국가스학회, pp. 119-128, 2002.
- [2] Anders Traff, "HIP Equipment Safety-Reability-Cost Efficiency", Proceeding of the international conference on Hot Isostatic Pressing, pp. 528-535, 1993.
- [3] "MARC user's manual," Version K6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.
- [4] 안주양, 김대은, 최진용, 신경호, "다구찌 실험계획법을 이용한 탄소코팅 초박막의 마찰 특성," 한국정밀공학회, vol.20, No. 4, pp. 143-150, April 2003.

- [5] 박경진, "자동차 분야에서의 최적설계기술의 응용," 월간 기계설계, pp. 82-89, September, 2002.
- [6] 김석우, "다구찌 방법을 이용한 효율적인 샤시시스템 설계방법에 관한 연구," 국민대학교 자동차공학과 석사논문, 1999.
- [7] 송서일, 실험계획법, 한경사, June, 2001.
- [8] Seong Jin Kim, Kwang Seok Kim, Ho Jang, "Optimization of manufacturing parameter for a brake lining using Taguchi method," Journal of material processing technology 136, pp. 202-208, 2003.