

반응표면법을 이용한 안전밸브의 최적화

Optimal Design of the Safety Valve by Response Surface Method

이 상 우* 신 대 영* 변 철 웅*

Lee, Sang-Woo Shin, Dae-Young Byun, Cheol-Woong

(논문접수일 : 2007년 4월 5일 ; 심사종료일 : 2007년 7월 5일)

요 지

소화시스템에 사용되는 고압의 소화가스 저장용기에는 저장용기의 파손을 막아주는 안전밸브가 있다. 이러한 안전밸브의 내부에는 원형 박판의 파열 판이 들어 있는데, 저장용기의 내압이 위험수준에 도달하면 파열 판이 파손하여 내압을 배출하는 역할을 한다. 안전밸브의 설계인자는 파열 판의 두께, 안전밸브의 유로 직경, 플라스틱 패킹 링의 내부 직경 그리고 파열 판을 고정하는 볼트 안쪽의 필렛 반경이 있다. 이 중에서 파열 판의 두께는 0.2mm로 고정을 하였다. 요인배치법을 사용하여 주효과를 결정하였고 회귀방정식을 유도하였다. 이러한 회귀방정식은 추후 안전밸브의 설계에 있어서 기초 설계 자료로서 활용할 수 있도록 실험 결과와 비교하여 검증하였다. 검증실험 및 회귀방정식에 의한 결과의 오차는 약 2~5%정도 인 것을 확인하였다. 그리고 반응표면법을 사용하여 기밀테스트 압력인 25MPa에서 파열할 수 있는 안전밸브의 최적 모델을 결정하였다.

핵심용어 : 파열 압력, 소성변형, 요인배치법, 반응표면법, 회귀분석

Abstract

High pressure storage of the agent gas in fire suppression system was composed of tank, main valve and safety valve, which prevents the fracture of the high pressure storage. The safety valve has circular thin plate as fracture plate that was destroyed over fracture pressure. When inner pressure of the storage is reached the fracture pressure, the safety valve discharges gas and degrades simultaneously the inner pressure of the storage. There are design variables such as flow path diameter, inner diameter of the plastic packing ring, thickness of plate and fillet radius. In this variables, thickness of plate is set to be a value of 0.2mm. The main effect of variables on the inner pressure, has been decided using factorial design and statistical analysis. Therefore, the relation of the variables are expressed by regression equation. It is disclosed results that the difference of fracture pressures between the equation and experiment has 2~5%. Finally, using response surface method, the optimal design of the safety valve could be decided with safety pressure of 25MPa, where the fracture occurs on circular thin plate.

Keywords : Fracture pressure, plastic deformation, factorial design, response surface method, regression analysis

1. 서 론

고압의 저장용기에는 과도한 압력에 의한 파손을 방지하기 위해서 안전밸브가 설치되어 있다. 이러한 안전밸브는 내부의 파열 판이 지정 압력에서 파열하여 과도한 내압을 방지하는 구조로 되어있다. 이러한 파열 판은 미세한 크랙을 가공하여 응력집중을 유발하며 원하는 압력에서 파열 판의 중앙

부위가 파열을 할 수 있도록 한다. 그러나 이러한 미세한 크랙의 가공은 가공 정밀도, 가공공정의 추가 그리고 공정의 추가로 인한 비용 상승의 문제로 적용하기 어렵다. 하지만 크랙의 가공이 없이 설계하여 제작하면 파열 판에서 파열이 발생하는 위치가 불안정해진다. 이러한 불안정한 파열 위치는 정확한 압력에서 안전밸브가 기능을 수행하는데 어려운 점이 된다. 그런데 이러한 안전밸브를 설계하는데 있어서 정

* 책임저자, 정회원 · 한국생산기술연구원 연구원
Tel: 032-850-0275 ; Fax: 032-850-0276
E-mail: victor@kitech.re.kr

* 한국생산기술연구원 수석 연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 12월 31일까지 본 학회에 보내주
시면 2008년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

확한 설계지침과 참고자료 및 문헌이 부족하여 없어서 반복적인 실험으로 설계를 하였다. 그러므로 본 논문에서는 안전밸브를 설계하는데 있어서 기초 자료로 활용할 수 있는 방법을 제안하고 검증하였다. 안전밸브의 개략적인 구조는 그림 1, 그림 2와 같다. 그림 1에서 보면 원형박판의 두께 t , 유로반경 $D/2$, 패킹 링의 내부 반경 $d/2$ 그리고 고정 볼트의 모서리 필렛 반경 r 이 설계인자가 된다. 이중에서 원형 박판의 두께 t 는 0.2mm로 고정하였으며, 고정 볼트는 3922.65 N·m의 일정한 토크를 사용하여 고정시켰다(박재춘 등, 1998). 본 연구에서는 실험결과와 비교하여 경계조건을 결정하였다. 그리고 실험계획법에 따라서 해석을 수행하고 회귀분석을 통해서 회귀방정식을 유도하였다(윤상운 등, 2001). 또한 방정식과 해석의 결과를 실험 결과와 비교하여 검증하였다. 그리고 반응표면법(이레테크, 2004; 편성돈 등, 2000; Belegundu 등, 1999; Raymond 등, 1995)을 사용하여 현재 기밀시험을 할 때 사용되는 내압 25 MPa(250bar)에 맞는 안전밸브를 설계하였다. 구조해석을 수행할 때는 파열 판과 플라스틱 패킹 링 그리고 고정 볼트 사이의 접촉해석을 고려하였다. 또한 압력을 받으면서 발생하게 되는 파열 판의 소성변형 또한 고려하였다. 그리고 대변형 문제를 풀기 위해서 개량된 대변형 방정식을 적용하였다(Stephen P. Timosenko 등, 1959). 그리고 유한요소해석에는 비선형해석과 접촉해석(Young T. Keum, 1993)을 하기 위해서 상용해석 프로그램인 MSC.MARC를 사용하였다.

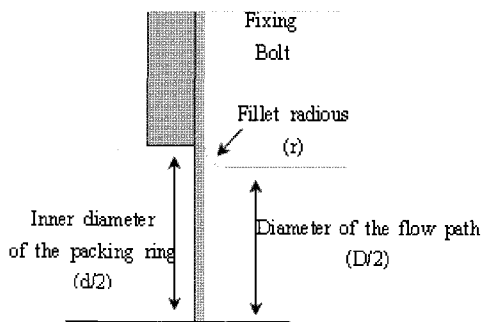


그림 1 Design variables of the safety valve

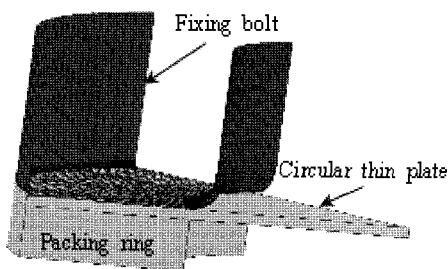


그림 2 Schematic figure of the safety valve

2. 안전밸브의 파열 실험

2.1 실험 장비 및 실험조건

파열 판의 파열에 대한 실험은 자체 제작한 실험 장비를 사용하여 실시하였다. 수압을 이용하며 파열 실험에서 $60 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 온도 조건을 유지하였다. 유로직경인 D 와 두께 t 에 따라서 실험 결과를 분류하였으며 실험 결과는 안전밸브 내부의 플라스틱 패킹 링의 탄성계수를 유추하고 결정하는데 사용하였다. 또한 해석과 회귀방정식의 결과를 검증하는데 사용하였다. 다음의 그림 3은 파열 실험에 사용한 실험 장비이며 그림 4는 파열 실험 후에 실제 파열이 된 원형 박판의 모습이다. 그림 4(a)와 같이 박판의 중앙부위에서 파열이 발생할 경우 반복된 실험에서도 설정되어 있는 일정한 압력에서 파열이 발생한다.

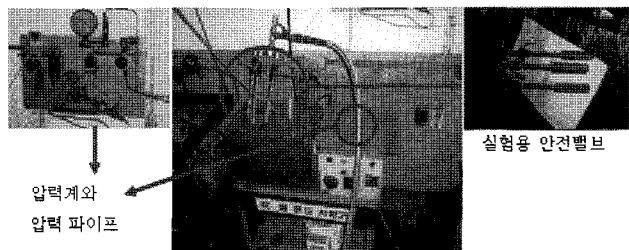
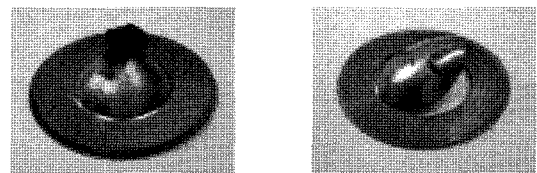


그림 3 Equipment for experiment



(a) Fracture at center (b) Fracture at edge

그림 4 The shape of the fracture

2.2 파열 판의 물성치

원형 박판은 동합금으로 만들어져 있으며 물성치는 ISO 6892에 따른 인장시험을 통하여 구하였다. 그림 5는 인장시험을 통하여 얻은 0.2mm두께 원형 박판의 S-S곡선이다. 이렇게 구한 물성치에 대한 S-S곡선은 소성 변형을 고려한 해석에 사용하였다. 항복점은 0.2% 오프셋을 사용하여 결정하였다. 원형 박판은 압연가공을 하므로 방향성을 가지게 된다. 그러나 원형으로 가공되어 사용하므로 방향성은 배제하였다. 인장시험과 식 (1)과 식(2)을 사용하여 진응력과 진변형률에 대한 데이터를 계산하였다.

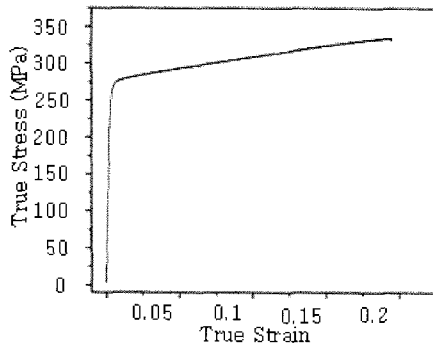


그림 5 S-S curve of the circular thin plate

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \epsilon_{nom}) \quad (1)$$

$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_{nom}) \quad (2)$$

위의 방법으로 계산된 파열 판의 탄성계수는 87.89GPa, 0.2%오프셋으로 결정한 항복응력은 259MPa 그리고 인장강도는 323.4MPa가 된다.

3. 유한요소 해석을 위한 경계조건의 설정

3.1 해석을 위한 모델

안전밸브는 축대칭 구조이며 내압으로 인한 파열이 발생하므로 쉘 요소로 모델링을 할 경우 압력에 의한 굽힘 현상을 제대로 표현하기 어렵다(허훈 등, 1993). 따라서 x축을 회전축으로 하는 2차원의 축대칭 모델을 사용하여 해석을 하였다. Quad4요소를 사용하였으며 접촉과 소성변형을 고려하였다. 접촉해석을 하기 위해서 패킹 링과 원형 박판은 변형이 가능한 deformable body로 설정하였고, 고정 볼트는 rigid body로 설정하였다. 그림 6은 해석을 위한 축대칭 모델을 보여준다.

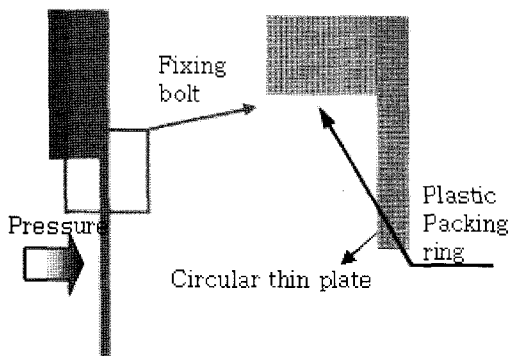


그림 6 Boundary condition and FEM model

3.2 패킹 링의 물성치 결정

패킹 링은 플라스틱 제품으로서 정확하게 결정되어 있는 물성치가 없다. 따라서 실제 안전밸브에 사용되는 패킹 링의 물성치를 결정하기 위해서 해석 결과와 실제 실험의 결과를 비교하였다.

패킹 링의 물성치는 해석 결과를 보면 원형 박판의 파열 부위에 영향을 미치므로 신중하게 결정해야 하는데, 탄성계수가 많이 무르면 고정 볼트를 사용하여 원형 박판을 고정시킬 때 모서리 부분에서 많은 양의 변형으로 인한 잔류응력이 발생하기 때문이다. 다음의 그림 7과 8은 원형 박판의 모서리와 중앙부분에서 파괴가 발생했을 경우 응력의 변화를 보여 준다. 그림 7은 모서리에서 파괴가 발생한 경우이다. 그림 8의 고정시키는 단계를 비교하면 그림 7의 경우가 그림 8보다 응력이 더 크게 발생한다. 그리고 압력을 계속 가하면 지속적으로 응력이 점점 커지지만 그림 7에서 보여주듯이 고정시키는 초기에 발생한 모서리 부분의 응력을 중앙부위에서 발생하는 응력이 넘어서지 못한다.

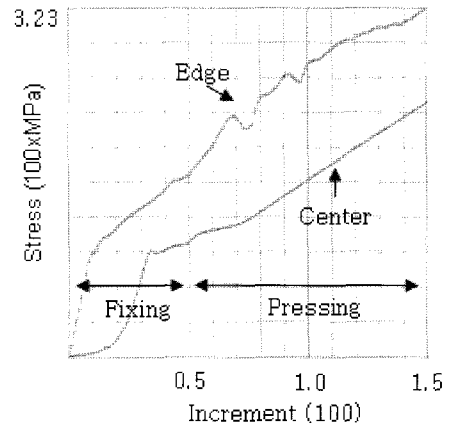


그림 7 Stress distribution at the edge

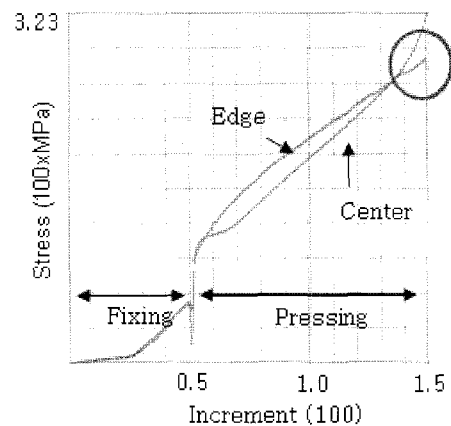


그림 8 stress distribution at the center

반복실험의 방법으로 조건을 변경하면서 해석을 하고 실험 결과와 비교하여 패킹 링의 탄성계수는 3110.25MPa로 결정하였다.

3. 회귀분석과 회귀방정식

3.1 회귀방정식

회귀분석을 하기 위해서 단순 회귀 모형을 사용하였으며 실험계획법을 사용하여 주효과를 결정하였다. 다음의 그림 8은 설계인자로 결정한 유로 직경, 패킹 링의 직경 그리고 고정 볼트의 필렛 반경에 대한 주효과를 보여준다.

패킹 링의 반경이 가장 영향이 적으며 영향이 가장 큰 것은 유로 직경이다. 유로 직경이 커질수록 안전밸브의 파열 압력은 낮아지는 경향을 보이고 있다. 즉, 유로 직경이 커질수록 낮은 압력에서 안전밸브 내의 원형 박판이 파괴되는 것을 의미한다. 그러나 필렛 반경의 경우, 유로 직경과 반대의 양상을 보이고 있다. 이는 응력집중계수가 필렛 반경이 작아질수록 커지기 때문에 과도한 응력 집중으로 원형 박판이 파괴되는 것을 의미한다. 그러나 유로 직경에 비해서 파열 압력에 미치는 영향은 상대적으로 훨씬 작게 나타난다. 그리고 패킹 링의 내부직경의 경우 내부직경이 변화하여도 파열 압력은 거의 변화가 없다. 그러므로 유로 직경이 주효과이며 가장 큰 영향을 미친다. 따라서 유로직경을 변수로 회귀 방정식을 유도하였다.

설계변수가 유로 직경과 고정 볼트의 필렛 반경이므로 다중 회귀모형을 사용하였다. 다음의 식 (3)이 다중 회귀모형을 사용한 회귀방정식이다.

$$P = 43.4 - 2.79D - 4.59r \quad (3)$$

위의 식 (3)의 신뢰도는 93.2%이며 추정 된 회귀방정식이 얼마나 정확하게 y 를 추측하는지 점검하기 위해서 결정

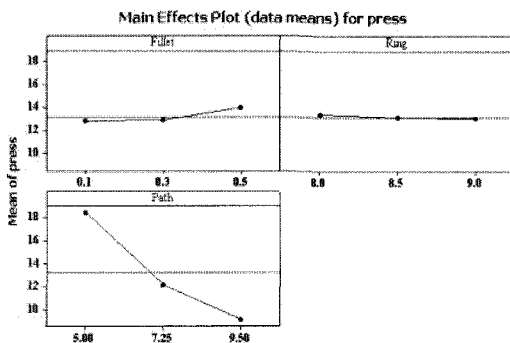


그림 9 Main effect of the design variables

계수를 사용하였다. 결정계수는 종속변수 y 의 변동량이 독립변수 x 를 변화시키면서 몇 %나 반영되는지 점검하는 것으로 추정된 모형과 종속 변수 y 가 어느 정도 밀접한 관계 인지를 나타내주는 척도가 된다. 이러한 결정계수는 식 (4)로 표현이 되는데, 이 중에서 SSR은 회귀제곱합이라고 하며 회귀방정식에 의한 각 변동량의 값과 평균의 차를 제곱하여 전부 더한 값이된다. SSTO는 총제곱합으로서 각 변동량과 평균의 차를 제곱하여 더한 값이 된다. SSE는 잔차제곱합으로서 SSE와 SSR의 합이 SSTO가 된다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SSTO} = 1 - \frac{SSE}{SSTO} \quad (4)$$

따라서 식 (4)에 의해서 회귀방정식의 결정계수는 $R^2 = 0.976$ 이 된다. 즉, 위에서 구한 회귀방정식의 경우 y 와 x 가 거의 직선 관계를 이루고 있으며 상당히 정확하게 y 의 값을 추정할 수 있다고 할 수 있다. 다음의 표 1은 회귀방정식에 의한 결과와 실험에 의한 결과를 비교하였다. 전체 오차는 약 5%이하로 나타난다.

표 1 Comparison between equation and experiment results

D × r × t(mm)	Fracture pressure(MPa)	
	Experiment	Equation
7.3×0.3×0.2	23.5	21.6
7.3×0.4×0.2	23	21.2
6.5×0.2×0.2	24.5	24.3
8.2×0.3×0.2	20.22	19.1

4. 반응표면법을 이용한 최적값 모델

4.1 반응표면법

반응표면법은 하나 또는 그 이상의 반응변수와 정량적인 실험변수 또는 인자 집합관계를 규명하는데 사용하는 실험설계방법이다. 반응표면법은 목적 값, 최대값 또는 최소값을 가지는 인자의 조건을 찾는데 목적을 둔다. 따라서 안전밸브의 경우 요인배치법을 사용해서 주요인자를 결정하고 반응표면법을 사용하여 요구되는 압력에서 파열할 수 있는 모델을 결정하였다.

4.2 중심합성법

본 논문에서는 반응표면법 중 중심점을 이용하는 중심합성법을 이용하였다. 중심합성법은 직교 및 회전 가능성이 공

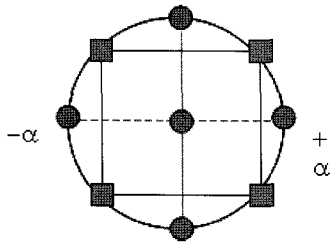


그림 10 Center composite model

표 2 Analysis results by response surface method

RunOrder	PtType	Flow path	Fillet	Pressure
1	1	5	0.1	32
2	1	9.5	0.1	10.09
3	1	5	0.5	33
4	1	9.5	0.5	11
5	-1	5	0.3	33
6	-1	9.5	0.3	11
7	-1	7.25	0.1	23
8	-1	7.25	0.5	24.3
9	0	7.25	0.3	23
10	0	7.25	0.3	23
11	0	7.25	0.3	23
12	0	7.25	0.3	23
13	0	7.25	0.3	23

간 적용 범위가 우수하다. 본 논문에서 최적 모델을 결정하기 위해서 외접 모형을 사용하였으며 다음의 그림 10은 중심합성법 중 외접모형이다.

α 는 0에서 축점까지의 거리이며 2인자일 경우 1.414를 기본 값으로 사용한다. 그러므로 본 논문에서는 유로 직경과 필렛의 반경을 인자로 결정하였으므로 α 는 1.414를 사용하였다. 다음의 표 2는 반응표면법을 사용한 실험계획과 각 인자의 값에 따른 파열 압력을 표시하였다. 식 (5)는 반응표면법의 결과를 회귀분석을 통하여 구한 방정식이다. 이 방정식의 신뢰도는 통계분석 프로그램인 Minitab을 사용한 결과 99.8%의 신뢰도를 가지는 것으로 나타난다.

$$P = 23.15 - 10.98D + 0.53r - 1.54D^2 + 0.11r^2 - 0.02Dr \quad (5)$$

4.3 반응표면법을 이용한 최적 모델

다음의 그림 11은 위의 표 2를 분석하여 얻은 수식인 식 (5)를 목적함수로 사용하여 필렛의 반경과 유로 직경에 따른 파열 압력을 등고선으로 표시하였다. 유로 직경이 작아지면서 안전밸브 내의 파열 판의 파열 압력은 점차 높아진다. 그리고 등고선의 양상을 보면 필렛 반경은 파열 판의 파열 압

Contour Plot of 파열압력 vs 필렛, 유로직경

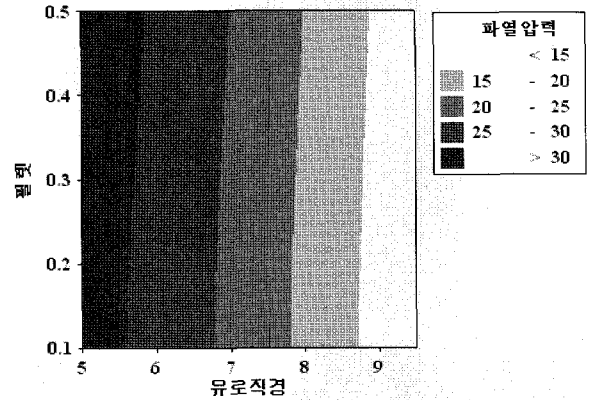


그림 11 Contour of the fracture pressure

Surface Plot of 파열압력 vs 필렛, 유로직경

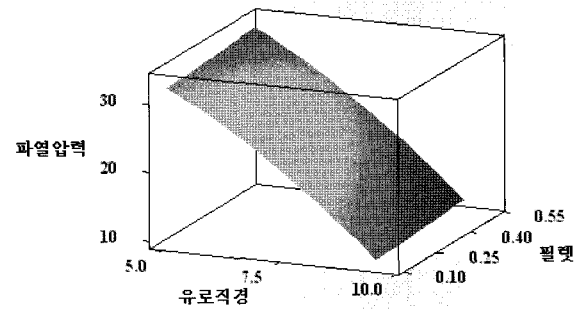


그림 12 Surface plot of the fracture pressure about fillet radius and diameter of the flow path

력에 큰 영향을 미치고 있지 않다.

그림 12는 파열 압력범위 20~30MPa에서 각 유로 직경과 필렛 반경의 변화에 따른 파열 압력의 변화를 surface plot의 형태로 표현하였다.

식 (5)을 목적함수로 하고 첫 번째 경계조건은 실제 안전밸브를 사용하는 소화설비의 수압테스트 압력인 25MPa를 목적 값으로 하고, 최소와 최대의 범위는 20~30MPa로 하였다. 그리고 다른 하나의 경계조건은 파열 판의 파열 위치로서 파열 위치인 모서리와 중앙부위를 각 1과 2로 표현하여 경계조건으로 하였다. 위의 결과들을 종합하여 고압 저장용기의 기밀시험을 위한 안전밸브의 최적화 모델을 계산하면 유로직경은 7mm가 되며 필렛 반경은 0.5mm가 된다.

4.4 최적 모델의 검증

위의 반응표면법을 사용하여 계산한 안전밸브의 최적 모델을 유한요소해석과 실험의 결과를 서로 비교하였다. 유한요소해석을 위한 모델은 기존과 같은 방법을 사용하였으며 식

표 3 Comparison of the results

	실험결과	해석 결과	방정식 사용
파열 압력 (MPa)	24.85	23.8	24

(3)의 결과와 비교하였다.

오차는 약 3.5%에서 4%정도로 나타난다. 이정도 오차는 허용할 수 있다고 여겨지며 고압 저장용기의 기밀시험에 유로직경 7mm, 필렛 반경이 0.5mm인 안전밸브를 사용할 수 있다.

8. 결 론

본 연구에서는 고압의 저장용기에 사용하는 안전밸브의 기초설계자료 및 기밀시험에서 사용할 수 있는 최적 모델을 계산하였다. 기초 설계자료를 만들기 위해서 실험계획법과 회귀분석을 통해서 회귀방정식을 유도하였다. 유도한 회귀방정식은 93.2%의 신뢰도를 가지고 있으며 실험결과와 비교하였을 때 약 3%정도의 오차를 가지고 있다. 이러한 오차는 정밀 설계에서는 문제가 발생할 수도 있으나 기초 설계자료로서 사용하기에는 충분히 허용할 수 있다고 판단 되어진다. 그리고 기밀시험에 사용하기 위한 안전밸브는 파열 압력은 25MPa로 하고, 파열 위치는 중앙부위라는 목표 값을 기준으로 반응표면법을 사용하여 구한 목적함수에서 최적 모델을 계산하였다. 최적 모델은 목표 값인 25MPa와는 오차가 약 5%정도가 발생하였다.

이러한 결과는 안전밸브의 설계에 있어서 기존의 실험을 반복하는 방법에서 벗어나 유한요소해석 방법과 회귀방정식을 사용하여 설계인자의 근사값을 추정하고 설계를 시작할

수 있는 방법을 제시해 줄 수 있다. 그리고 실제 실험 결과와 비교하여 유한요소법을 사용한 해석 결과와 회귀방정식의 결과가 실제 사용가능 한지 여부를 검증하였다.

참 고 문 헌

- 박재춘, 정재천, 송지복, 남궁재관 (1998) 기계요소설계, 청문각, 서울, p.825.
- 이레테크 미니랩 사업팀 (2004) 새 Minitab실무완성, 이레테크, 군포시, p.674.
- 윤상운, 이태섭 (2001) 실용통계학 개정판, 자유아카데미, 파주, p.712.
- 편성돈, 이상범, 임홍재 (2000) 박판보 구조물의 최적설계 시스템 개발에 관한 연구, 한국자동차공학회논문집 8(6), pp.238~246.
- 허 훈, 한수식, 양동열 (1993) 유한 요소 박판 성형 해석에 있어서의 굽힘의 영향, 대한기계학회 춘추학술대회, 1(1), pp.799~802.
- Belegundu, A.D., Chandrupatla, T.R (1999) Optimization Concepts and Application in Engineering, Prentice-Hall Inc. New Jersey, p.432.
- Raymond, H.M., Douglas, C.M. (1995) Response Surface Methodology, John Willey & Sons Inc, New York, p.700.
- Stephen P. Timoshenko, S. Krieger (1959) Theory of plates and shells, McGRAW-HILL, New York, p.579.
- Young T. Keum (1993) Friction Contact Model for Finite Analysis of Sheet-Metal Forming Process, KSME, 17(9), pp.2242~2251.