

## 반응표면법을 이용한 벨로우즈의 최적형상에 관한 연구

김형준\*(동아대 CANSMC), 김현수(동아대 기계공학과), 박준홍(동아대 CANSMC)  
 김종필((주)동명중공업), 김효겸(동아대 기계공학과 대학원), 이재섭(동아대 기계공학과 대학원)

### A Study on The Optimum Shape of Bellows Using Response Surface Method

H. J. Kim(CANSMC, DAU), H. S. Kim(Mech. Eng. Dept., DAU), J. H. Park(CANSMC, DAU),  
 J. P. Kim(TongMyung Heavy Ind. co., LTD.), H. G. Kim, J. S. Lee (Graduate School of Mech. Eng., DAU)

#### ABSTRACT

It is attempted to find out the optimal shape of U-type bellows using the finite element analysis. The design factors, mountain height, length, thickness, and the number of convolutions are considered and the proper values are chosen for the simulation.

The results show that as the number of convolutions reduces, the volume decreases while the stress increases. However, as the number of convolutions increases, the volume increases above the standard volume and the stress obviously increases. In addition, the effect of the thickness of bellows on the stress is very large. Both of the mass and stress are decreasing at a certain lower value region. Also, we investigated shape optimization with considering maximum stress distribution tendency.

Key Words : Design of experiment 실험계획법, Shape Optimization 형상 최적화, Bellows 벨로우즈, Design Factor 설계 인자, Level 수준, Fatigue Life 피로 수명, RSM 반응표면법

#### 1. 서론

선박에 설치된 파이프는 사용용도에 따라 다양한 형태의 열과 압력, 진동을 받으며, 그로 인해 팽창과 수축을 반복하게 되는데, 이러한 운동의 완충 역할을 하는 장치가 벨로우즈(신축관)이다.

현재 국내에서는 E.J.M.A. Code가 벨로우즈 설계의 기준이 되고 있다. 그러나, E.J.M.A. Code는 형상을 단순화시킨 수식을 설계에 반영함으로써 과도한 안전율과 많은 설계오차를 포함하고 있다. 이런 문제점의 보완을 위하여 사용 환경의 특성을 고려한 벨로우즈 설계에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다.

벨로우즈는 일반적으로 형상에 따라서, U형(U-type), Ω형(Ω-type), S형(S-type)으로 나누어진다. 이 중 U형 벨로우즈는 뛰어난 신축성과 제작 및 적용의 용이성으로 인해 가장 널리 쓰이고 있다.

본 연구에서는 이전의 연구결과를 토대로 반응표면법의 한 기법인 Box-Behnken design 방법을 사용하여 벨로우즈의 구조최적화를 위해 선정된 인자가 응력에 미치는 영향과 수식화된 최적해를 도출하고자 하였다.

#### 2. 이론적 배경

벨로우즈의 기초 설계 시, 일반적으로 기준이 되는 것이 E.J.M.A. (Standards of the Expansion Joint

Manufacturers Association, inc) Code 이다.

E.J.M.A. code는 형상을 단순화하여 벨로우즈의 거동과 그에 의한 응력, 피로수명을 실제로 많은 실험들과 경험에 의해 수식화한 것이다.

Fig. 1에서는 단순화 된 U형 벨로우즈의 형상과 설계인자들을 도시하였다.

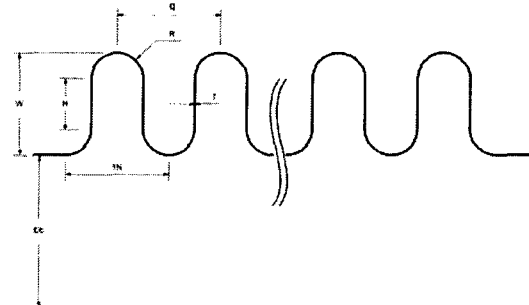


Fig. 1 Design variables of bellows

Table 1에서는 연구에 사용된 설계 인자와 하중 조건을 나타내었다. 위의 조건 이외에도 벨로우즈의 산의 개수는 7개, 벨로우즈의 두께는 0.8mm, 파이프의 두께는 5.5mm, 파이프와 벨로우즈 연결부위의 길이는 20mm로 하였다.

Table 1 Design parameters and loading conditions

Design parameters		
Cylinder diameter (in/out)	(mm)	154/165
Rl (lower radius of convolutions)	(mm)	8.3
Rh (upper radius of convolutions)	(mm)	8.3
H (height)	(mm)	25
Loading conditions		
Disign pressure	(MPa)	0.2
Temperature	(℃)	220
Axial compression	(mm)	-28
Axial extension	(mm)	28
Lateral Y	(mm)	4
Standard of design life cycle	(cycle)	6000

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 유한요소모델

벨로우즈는 파이프의 열에 의한 인장 및 압축변위를 감소시키는 역할을 하므로 큰 변위를 소화하기 위해, 길이에 비해 두께가 매우 작은 박판이 사용되고 있다. 벨로우즈는 내압, 열 하중, 축 방향변위 외에도 축 직각방향변위를 받기 때문에 2차원 유한요소해석은 불가능하여 3차원 모델링과 해석을 수행하였다.

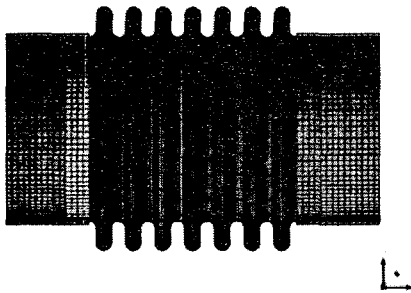


Fig. 2 U-type bellows FE model

### 4. 해석결과

#### 4.2 응력분포를 고려한 형상 최적화

이전의 연구에서 벨로우즈의 최대응력이 발생하는 부분을 분석한 결과 모든 경우 벨로우즈의 양쪽 끝단 부근에서 생성되었으며 중심부로 갈수록 응력의 크기는 감소하는 경향을 보였다. 이러한 현상을 고려하여 본 논문에서는 양쪽 끝단에 집중되는 응력을 줄일 수 있는 최적의 형상을 알아보았다.

Table 2의 우측에는 해석 결과를 나타내고 있다. 이 중에서 목적함수를 만족하는 것은 2, 3번 결과이고, 3번의 수준이 질량과 응력에서 더 우수한 값을 보였다.

또한, 위 결과로 도출한 피로수명증가를 위한 이차 회귀방정식은 다음 식과 같다.

$$\hat{Y} = 952.72 + 172.806x_1 - 31.3338x_2 - 23.8475x_3 + 17.175x_1^2 - 4.65x_2^2 - 6.5025x_3^2 - 5.76x_1x_2 - 8.9225x_1x_3 - 5.8125x_2x_3$$

Table 2 FEA Data of Box-Behnken design for RSM

실험번호	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Mass	Von-Mises stress
1	0	1	-1	0.51476	940.62
2	0	-1	1	0.52315	954.14
3	1	-1	0	0.52155	1174.8
4	0	1	1	0.49953	880.16
5	1	0	1	0.50198	1104.5
6	1	0	-1	0.51737	1168.9
7	-1	0	-1	0.53652	804.44
8	0	-1	-1	0.53926	991.35
9	1	1	0	0.49794	1100.3
10	0	0	0	0.51897	952.72
11	-1	0	1	0.52057	775.73
12	-1	-1	0	0.54086	818.67
13	-1	1	0	0.51637	767.21
14	0	0	0	0.51897	952.72
15	0	0	0	0.51897	952.72

위 식을 바탕으로 최적해를 구한 결과,  $Rl$ 은 17.8mm에서,  $Rh$ 는 11.96mm에서,  $H$ 는 7.5mm에서 최적해가 도출되었다. 이 때 추정된 회귀모형의 정도를 판단하기 위하여  $R^2$ 판정법을 사용하여 계산한 결과 약 99%의 신뢰도를 가졌다.

### 4. 결론

벨로우즈에 발생하는 응력은 양쪽 끝부분에서 가장 큰 응력이 발생하는데, 첫 회선의 형상 변환만으로도 기존의 20%가량의 응력감소를 유도할 수 있었다. 반응표면분석의 경향은 벨로우즈의 첫 산 형상 변화의 실험과 흡사하였지만 제조가능한 치수가 제한되어 있어 설계에 반영하기에는 적절한 수정이 요구된다.

### 참고문헌

1. S. W. Lee, "Study on the forming parameters of the metal bellows.", Journal of materials processing technology(130-131), pp.47-53, 2002.
2. 이상욱, "정밀 금속 벨로우즈 성형 및 스프링백 해석", 한국소성가공학회지 제11권 제3호, 2002.
3. 박종천, 김경모, 안홍일, "반응표면분석법을 이용한 사출성형품의 힘의 강건설계", 한국소성가공학회지 제10권 제6호, 2001