

선박용 벨로우즈의 형상최적화에 관한 연구

김종필*(동아대 대학원 기계공학과), 김현수(동아대 기계공학과),
김형준(동아대 대학원 기계공학과), 조우석((주)디엔디이), 제승봉((주)디엔디이)

A study on the shape optimization of ship's bellows

J. P. Kim(Mech. Eng. Dept., DAU), H. S. Kim(Mech. Eng. Dept., HKU)
H. J. Kim(Mech. Eng. Dept., DAU), W. S. Cho(DNDE, Ltd), S. B. Jeh(DNDE, Ltd)

ABSTRACT

The mechanical properties of bellows, such as the extensibility and the strength can be changed depending on the shape. For the shipbuilding material, it is favorable that the fatigue life is long due to the elastic property and the reduction of thermal stress in piping system. Nowadays, the domestic production and design of bellows are based on the E.J.M.A Code. Therefore, the design standard is in need because of much errors and lack of detailed analysis.

In this study, it is attempted to find out the optimal shape of U-type bellows using the finite element method. The effective factors, mountain height, length, thickness, and number of mountains and the length of joint are considered and the proper values are chosen for the simulation.

The results shows that if the number of mountains are reduced, the volume decreases while the stress increases. However, the number of mountains are increased, 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 volume and stress are decreasing at a certain lower value region.

Key Words : Shipbuilding, Bellows, E.J.M.A.(Expansion Joint Manufacturers Association), U type bellows, Piping system, Optimal shape

1. 서론

벨로우즈는 배관 계에서 축방향의 열팽창 등을 흡수하는 기능을 수행하는 것으로 형상자체에 유연성이 있는 배관요소이다. 또한 설치 및 유지보수가 쉽고, 파이프가 사용되는 모든 경우 사용이 가능하기 때문에 자동차, 항공기, 선박의 배관시스템의 설계 시 열, 고압에 의한 변형방지, 배기계의 진동 흡수 등을 위해 널리 이용되고 있다.

벨로우즈는 그 형상에 따라 신축성이나 강도 등의 특징을 달리하며 쓰이는 환경도 다르다. 이제까지 벨로우즈는 주로 자동차 배기계의 강성에 관한 연구가 대부분이었다. 하지만, 조선기자재에서는 진동에 의한 영향보다는 배관에서 발생하는 열팽창에 의한 열응력 완화와 이러한 신축작용에 의한 피로수명이 큰 것을 선호한다.

현재 벨로우즈의 생산 및 설계에 있어서 국내에서는 E.J.M.A Code를 기준으로 하고 있다. E.J.M.A Code는 형상을 단순화시킨 수식을 이용하여 설계에 반영함으로써 실제로 많은 설계오차를 포함하고 있으나, 자세한 해석과정이 나오지 않아 특별한 설계기준이 부족한 실정이다.

벨로우즈에는 U type, Omega type, S type, 다중겹 type 등이 있는데 그 중 U type 벨로우즈가 뛰어난 신축성과, 제작 및 적용의 용이성으로 인해 가장 널리 쓰이고 있다.

따라서 본 연구에서는 U type 벨로우즈의 형상에 영향을 미치는 인자들 즉, 산 높이, 전 길이, 판재 두께, 산의 개수를 설계변수로 선택하여 벨로우즈에 발생하는 최대응력을 최소화하는 최적의 형상을 구하고자 하였다.

2. 유한요소모델

2.1 벨로우즈 모델

본 연구에서는 실제 선박에 사용되고 있는 벨로우즈의 형상을 기준으로 모델링하였고, 이것을 Fig.1에 나타내었다. 벨로우즈 산의 개수는 7개를 기준으로 하였고, 1/2 대칭 모델로 해석을 수행하였다. 최적화를 위하여 Parametric하게 모델링하였고, 모델링과 최적화에는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS ver.8.1을 사용하였다.

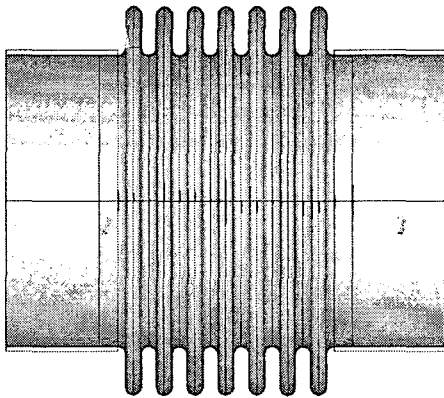


Fig. 1 Geometric model of U type bellows

2.2 파라미터 모델

벨로우즈 모델의 최적화를 위한 design parameter는 Table. 1에 나타내었다. 각각의 parameter는 벨로우즈의 두께, 벨로우즈 산의 곡률 반지름, 산과 골의 중심간 거리, 산의 개수 4가지로 하였다. 여기서 산의 개수는 항상 정수이므로 6, 7, 8개의 3가지 경우로 하였다. 따라서 형상 최적화에 반영된 설계변수는 Tb, Rm, HH 이다.

Table. 1 Design Parameters and initial values

Design parameters	Initial Value
Tb (Bellows thickness)	0.8 (mm)
Rm (Radius)	25 (mm)
HH (Height)	25 (mm)
NN (Convolution number)	7

2.3 경계 및 하중조건

본 연구에서 경계조건 및 하중조건 적용은

E.J.M.A. Code 집을 참고하였다.

경계조건은 Fig. 1에서 벨로우즈의 축 방향을 x축으로 하였을 때, 파이프와 벨로우즈의 이음부를 y축과 z축 방향에 대하여 완전 고정하였고, 파이프 부분은 z축만을 완전 고정하였다.

각각의 하중조건을 Table. 2에 나타내었다. 벨로우즈의 내압을 2 kg/cm², 내부온도를 220℃, x축 방향 인장 및 압축을 각각 28mm, y축 방향으로 4mm로 하였다. 벨로우즈의 허용응력은 E.J.M.A Code집을 참고로 하여 135.29로 하였다.

벨로우즈가 운동하는 환경특성상 압축뿐만 아니라 연신도 함께 하므로, 하중조건을 부여함에 있어 두 가지 경우를 나누어 고려하였다. 첫 번째로는 x축 방향으로 28mm의 연신과, y-z 축 방향으로 4mm의 변위가 발생하는 경우를, 두 번째로는 x축 방향으로 28mm의 압축과 y-z 축 방향으로 4mm의 변위 kg/mm²위가 발생하는 경우를 고려하였다.

Table. 2 Load conditions of U type bellows

Standard of design life cycle		6000 (cycle)
Fixed design variable	Design pressure	0.2(MPa)
	Temperature	220(℃)
	Cylinder diameter (IN/OUT)	154/165 (mm)
	Tc (Pipe thickness)	5.5(mm)
Displacement load	Axial compression	-28(mm)
	Axial extension	28(mm)
	Lateral Y/Z	4/4(mm)

3. 벨로우즈의 최적설계

3.1 최적설계 정식화

Minimize :

$$f(x) = 2\pi NHH(HH + 2A)$$

$$\left[\int_0^{Rm+Tb} (1 + \sqrt{(Rm+Tb)^2 - x^2}) dx \right. \\ \left. - \int_0^{Rm} (1 + \sqrt{Rm^2 - x^2}) dx \right]$$

여기서
 $f(x)$ =벨로우즈의 부피
 N =나사산 수
 $A = Db + Tb + Rm$
 Db =축에서 끝까지 벨로우즈반경

Subject to ;

$$\frac{Rm}{Rm_{mi}} - 1 \leq 0 \quad (2)$$

$$\frac{HH}{HH_{mi}} - 1 \leq 0 \quad (3)$$

$$\frac{Tb}{Tb_{mi}} - 1 \leq 0 \quad (4)$$

Table. 3 Range of design variables

Range D.V.	Initial	Lower	Upper
Rm (mm)	6.25	5.5	7.0
HH (mm)	25	22	28
Tb (mm)	0.8	0.6	1.0

Table. 3에서는 각 설계변수의 최적설계 시 초기 값과 상한, 하한값을 나타내었다.

벨로우즈의 체적(VTOT)은 모델의 초기 체적값(Initial value)을 기준으로 하여 산의 개수가 많아질수록 무한히 벨로우즈가 커지지 않도록 하였다. 따라서 체적은 기준모델보다 작아지면서 응력을 최소화하고자 한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 결과

벨로우즈 초기모델을 유한요소 해석한 결과 부피는 135530 mm³, 최대응력은 632 MPa로 나타났다. 최대응력은 벨로우즈 양 끝단의 산에서 발생하였다. 이는 실제 벨로우즈의 파손이 산의 양 끝단에서 일어나는 현상과 일치하는 결과를 보였다. Table 4에서는 각각의 설계변수에 대한 최적화된 치수를 보여주고 있다. 벨로우즈 산의 개수는 정수로 이루어진 설계변수이므로 각각 3가지 경우의 개수로 분류하였고, 벨로우즈의 부피는 초기모델의 부피를 기준부피로 하여 기준부피보다 작아지게 하였다.

산의 개수가 6개인 경우 체적의 감소는 기준모델의 15.4%로 가장 컸으나 가장 적은 폭의 응력 감소폭을 보여 최대응력은 5.2% 감소하였고, 산의 개수가 8개인 경우는 최적화된 경우 체적이 9.5%로 다

소 증가하였으나 응력은 36.4%로 큰 폭으로 감소하였다. 기준이 된 산의 개수가 7개인 경우는 부피는 소폭 감소하였으나 응력은 21.4% 감소하였다. 또한, 각각의 설계변수에서 산의 개수가 많아질수록 Rm과 HH는 크기가 증가하고, Tb는 크기가 작아지는 경향을 보였다.

Table 4 Result of size optimization

D.V. and OBJ	Convolution number		
	NN=6	NN=7	NN=8
Rm (mm)	6.62	6.78	6.99
HH (mm)	26.39	26.06	27.97
Tb (mm)	0.63	0.64	0.6
VTOT (mm)	114660	130930	148530
Volume of Reduction (%)	15.4	3.4	-9.5
Maximum stress (MPa)	599.54	497.95	402.28
Stress of Reduction (%)	5.2	21.3	36.4

4.2 고찰

최적화된 결과를 이용하여 설계변수의 변화에 따른 목적함수와 제약조건의 변화를 알아보았다. 세로축은 응력과 부피에 대해 가로축은 정규화 된 설계변수의 변화를 나타내고 있다.

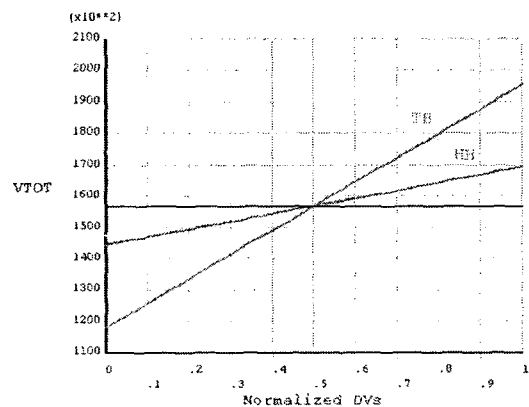


Fig. 2 Sensitivity analysis of volume in optimize

Fig. 2와 Fig. 3은 산의 개수에 따른 설계변수의 변화 경향이 유사하였으므로, 벨로우즈의 산의 개수가 8개인 경우만을 도시하였다. 그래프에서 벨로우

즈의 부피와 응력은 설계변수 T_b 가 작아질수록 응력이 감소하고 이 설계변수가 벨로우즈의 가장 민감한 변수임을 알 수 있었다. 또한, HH와 Rm 은 각각 값이 커질수록 응력이 감소함을 알 수 있었고, 두 설계변수의 민감도는 유사한 경향을 보였다.

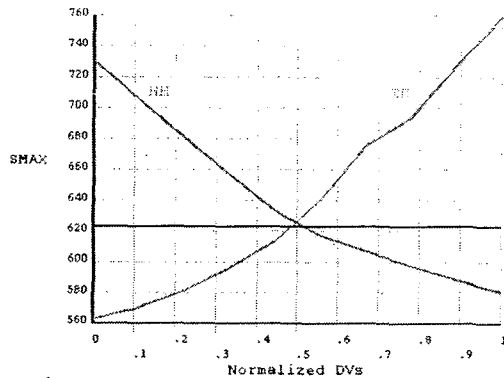


Fig. 3 Sensitivity analysis of stress in optimize

4. 결론

선박용 벨로우즈의 세 가지 설계변수에 관하여 최대 응력을 감소시키기 위한 최적화를 수행하였고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 벨로우즈의 산의 개수가 7개인 경우의 설계변수 치수와 부피, 응력 값을 기준으로 하여 최적화시킨 결과 산의 개수가 줄어들면 전체 부피는 감소하나 응력이 증가하였고, 산의 개수가 늘어나면 응력은 현저히 감소하나 부피가 기준부피보다 늘어나는 결과를 보였다.

(2) 두 설계변수 Rm 과 HH 는 값이 증가할수록 응력은 줄어드나 부피가 늘어나는 단점이 있으므로 사용용도에 따라 설계자가 이를 설계 시 고려해야 할 것으로 보인다.

(3) 벨로우즈의 두께 T_b 는 설계 시 매우 큰 영향을 미치며, 일정두께까지 감소하면서 응력과 부피를 모두 감소시켰다. 따라서 벨로우즈의 설계 시 유용한 설계변수 이므로 향후 벨로우즈 두께의 설계에 관한 자세한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. M. Radhakrishna, C. Kameswara Rao., "Axial vibrations of U-shaped bellows with elastically

restrained end conditions," thin-walled structures 42, pp.415-426, 2004.

2. S.W.Lee: "study on the forming parameters of the metal bellows." journal of materials processing Technology(130-131). pp.47-53. 2002.

3. Lu Zhiming, Tong Shuiguang, Qin yi, Fang Deming, Gao Zengliang. "In-plane instability tests of bellows subjected to internal pressure and deformation load.", International Journal of Pressure Vessels and Piping 79, pp.245-247. 2002

4. Satoshi Igi, Hiroshi Katayama, Masanori Kawahara, "Evaluation of mechanical behavior of new type bellows with two-directional convolutions." Nuclear Engineering and Design 197, pp.107-114, 2000.

5. 조항영, "일반적인 형상을 갖는 벨로우즈의 유한요소해석 및 형상최적설계" 한양대학교 석사학위논문, 1995.

6. 고병갑, 박경진, "벨로우즈에 대한 유한요소해석 프로그램 및 간편식의 개발과 형상최적설계", 대한기계학회논문집(A) 제 21권 8호, pp. 1195-1208, 1997.

7. 고병갑, 서용진, 박경진, "U형 벨로우즈의 유한요소해석과 특정강성을 위한 형상최적설계.", 한국자동차공학회논문집 제3권 제6호, pp. 96-111, 1995.