

유한요소해석과 실험계획법을 활용한 다층관 벨로우즈의 설계변수 최적화

오상균^{#1}, 서창희¹, 정윤철¹, 김동배¹, 성지현¹, 김영석²

Optimization of design variables of the multi layer bellows using FE-simulation and design of experiment

S. K. Oh, C. H. Suh, Y-C. Jung, D. B. Kim, J. H. Sung and Y. S. Kim

Abstract

Multi layer bellows are being manufactured for commercial vehicle because of the characteristic of high durability compared with single layer bellows used to passenger vehicle. Finite Element Method (FEM) study and optimization about single layer bellows are actively progressed, but FEM study about multi layer bellows which have gap between layer is rarely processed. Therefore, this article presents finite element modeling of multi layer bellows for the improvement of simulation reliability. For the shape optimization of multi layer bellows, design of experiment and Taguchi method are used.

Key Words : Multi-layer bellows(다층관 벨로우즈), Flexibility(신축성), Design variable(설계변수), Finite element simulation(유한요소해석), Design of experiment(실험계획법), Taguchi method(다구찌기법)

1. 서론

벨로우즈(bellows)는 자동차용 배기계(exhaust system)에 사용되며, 엔진으로부터의 진동 및 소음을 흡수함과 동시에 외부의 진동이 엔진으로 전달되는 것을 방지하고, 고온의 배기가스에 의한 배기 파이프의 변형을 흡수한다. 또한, 자동차 배기계의 정적 및 동적 특성에 영향을 미치는 주요 부품인 벨로우즈는 배기계의 요구기능 및 내구성과 밀접한 관계를 지니고 있다. 벨로우즈는 자동차의 주행시 다양한 진동을 흡수할 수 있도록 적당한 신축성과 강성(stiffness)을 지녀야 하며, 반복되는 진동 및 배기가스의 열적 구배 등에 의한 파손을 방지하고 수명을 향상하기 위한 설계기술의 확립이 중요하다.

벨로우즈는 차량의 가감속, 급정지, 급가속 및 배기계의 열에 의해 주로 발생하는 변형인 축 방

향의 변위(extension 및 compression)를 감소시키는 역할을 하므로 박판을 여러 겹 사용하여 큰 변위로 신축하는 구조로 되어 있다. 이러한 벨로우즈의 신축성은 강성에 의해 결정된다.

기존의 벨로우즈의 강성평가 및 설계변수에 대한 연구로는 유한요소법을 활용하여 배기계의 구조적 특성에 관한 연구가 있고, 모델의 크기를 줄이고자 등가응력을 활용하여 두 겹 이상의 벨로우즈를 등가의 한 겹으로 가정하여 해석하였으며, 주로 U 형 벨로우즈에 대한 유한요소를 개발하고 설계 최적화에 관한 연구가 있다[1~3]. 기존에 다층관(multi layer) 벨로우즈의 강성을 평가하기 위한 유한요소모델은 두 겹 이상의 적층구조물로 되어 있는 벨로우즈를 한 겹으로 가정하는 등가의 해석모델을 적용하므로 해석결과와 실제 제품의 신축성 실험결과와 일치하지 않는 문제점이 있다.

1. 대구기계부품연구원 기계부품소재시험평가센터
2. 경북대학교 기계공학부
E-mail:osk@dmi.re.kr

따라서 본 연구에서는 상용차용으로 개발된 S형의 다층관 벨로우즈의 유한요소 해석결과의 정확성을 높이기 위해 새로운 유한요소 모델을 제시하였으며, 제시된 모델에 근거하여 벨로우즈의 신축성과 피로 내구성을 향상시키기 위해 최적의 형상 설계변수를 예측하고자 실험계획법 및 다구찌기법(Taguchi method)을 적용하였다[4, 5]. 설정된 형상 설계변수에 의해 제작된 벨로우즈의 신축성 실험을 통하여 유한요소해석결과와 다구찌기법에 의해 예측된 설계변수의 유효성을 검증하였다

2. 실험방법

2.1 벨로우즈 형상 및 설계변수

본 연구에 모델로 선정된 상용차용 S형 다층관 벨로우즈는 두께가 0.25 mm인 STS304 박판을 풀포밍 성형하여 제작 하였으며, Fig.1에 기하학적 형상을 나타내었다.

벨로우즈의 형상과 내구성에 영향을 미치는 주요 인자는 주름부의 형상이며, 주름부 형상이 U형에서 S형으로 변할수록 응력의 분산효과로 내구성을 향상시키게 된다. 본 연구에서 개발된 벨로우즈의 피치(P)와 두께는 일정하며, 산의 높이(I)와 곡률반경(R, r)을 설계변수로 설정하여 최적 형상을 도출하였다.

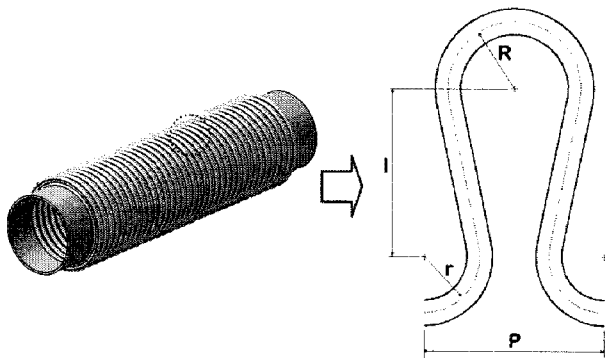


Fig. 1 Shape and design variable of bellows investigated in the present study

2.2 유한요소 모델 및 경계조건

본 연구에에서는 박판을 사용하는 적층구조물의 해석결과의 정확성을 높이기 위해 기존의 등가일체형 해석모델과 비교하여 n장의 두께 t가 붙어 있지 않고 각각 독립된 역할을 하며 끝 부분에서만 서로 구속조건을 갖는 형태로 구성되어

있다고 가정한 분리형 유한요소 모델링기법을 적용하여 구조해석을 수행하였으며, Fig.2에 유한요소모델을 나타내었다. 등가일체형 해석모델은 네 접의 벨로우즈가 한 접의 판재형태 구조물로 유한요소 모델링 되어 있고 박판 사이의 공간이 없이 절점(node)으로 연결되어 있으며, 분리형 유한요소 모델은 네 접의 박판 사이에 미세한 공간이 존재하고 각 판재의 절점과 이웃한 다른 판재의 절점이 독립적이다.

실제 벨로우즈의 형상은 나선(spiral)의 다층관 구조이나 모델을 간략화하기 위해 나선형상은 고려하지 않고 축 대칭 모델을 구성하였고, 탄성과 소성을 고려한 탄소성해석을 수행하였다. 해석에 사용된 재료물성은 탄성계수 210 GPa, 프와송비 0.3, 항복강도는 286 MPa이다. 유한요소해석은 상용 탄소성해석 프로그램인 MARC 2007로 수행하였으며, 인장시험에서 얻어진 원소재의 유동곡선을 사용하여 해석하였다.

경계조건은 벨로우즈 왼쪽 끝 부분의 각 절점들을 완전 구속 시키고 오른쪽 끝 부분의 절점들에 축 방향으로 압축변위 15 mm를 가하였다.

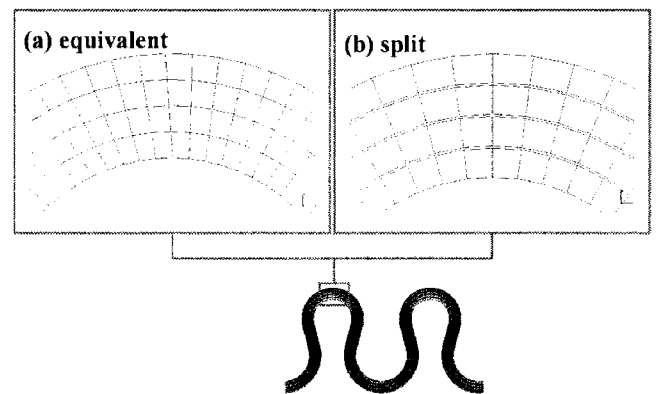


Fig. 2 FE-model of multi layer bellows used in the present study

2.3 실험인자 및 직교배열표

벨로우즈의 신축성과 성능을 향상시키기 위한 최적의 형상 설계변수를 예측하고자 실험계획법 및 다구찌기법(Taguchi method)를 적용하였다. Table 1은 제어인자로서 유한요소해석에 적용된 설계변수와 각각의 인자에 대해 3개의 수준으로 나타내었다. 여기서, Level 1은 낮은수준, Level 2는 중간수준, Level 3는 높은 수준을 나타냈다. 실험에 사용된 제어인자로서의 설계변수는 산의

높이(I)와 곡률반경(R, r) 인데, 수준은 실제 제품 개발시 적용하고 있는 치수를 기준으로 설정하였으며, 실험에 적용된 직교배열표를 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Design variable and levels

Variables	Level 1	Level 2	Level 3
I (mm)	3.4	3.6	4.0
R (mm)	2.55	2.75	2.95
r (mm)	2.58	2.78	2.98

Table 2 Orthogonal array of Taguchi L₉(3³)

Simulation No.	R	r	I
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

3. 결과 및 고찰

3.1 유한요소해석 모델의 타당성

등가 일체형의 해석모델을 이용해 네 겹의 벨로우즈를 한 겹으로 모델링하여 해석한 결과를 Fig.3(a)에 나타내었다. 벨로우즈 산 부분의 중앙부에 최대 응력이 발생하였으며, 축방향에 대한 Mises 최대응력은 304.4 MPa로서 소재의 항복강도를 초과하여 소성변형이 발생하였다. Fig.3(b)는 분리형 유한요소 모델링에 대한 유한요소 해석을 수행한 결과이다. 분리형 모델의 경우 벨로우즈 네 겹의 판재 각각의 응력분포가 비교적 균일하며 축방향에 대한 Mises 최대응력이 186.0 MPa로서 등가 일체형 모델과는 상이한 결과를 나타내었다.

등가 일체형의 모델과 분리형 모델의 유한요소 해석결과의 차이는 등가 일체형 모델의 경우 네 겹의 판재를 하나의 일체화된 판재로 가정하여 모델링하므로 요소 사이의 절점이 결합되어 있으므로 분리형 모델 보다 강성이 매우 높게 평가되는 것에 기인하는 것으로 판단되며, 분리형 모델은 판재 사이가 떨어져 있어 판재의 표면에 존재하는 절점들의 이동이 자유롭고 층간의 구속이 없으므로 응력이 감소된 것으로 생각된다.

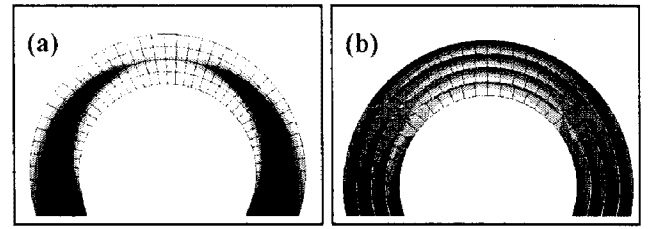


Fig. 3 FE analysis results of multi layer bellows; (a) equivalent model (b) split model

다층관 벨로우즈의 유한요소 모델에 대한 유효성을 검증하기 위하여 유한요소 해석과 실제 제작된 제품의 신축성 비교실험을 하였으며, 그 결과를 Fig.4에 나타내었다. 신축성 비교에서 등가 일체형 모델은 실제 제품보다 강성이 매우 높게 평가되었으며, 분리형 모델은 실제 제품에 근접하는 결과를 나타내었다. 이 결과는 네 겹의 다층관 벨로우즈의 강성평가에서 분리형 유한요소모델의 유효성이 보다 높은 것을 나타낸다.

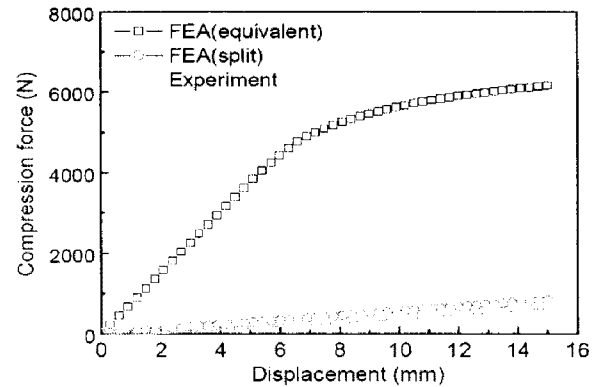


Fig. 4 Flexibility experiment and results

3.2 다구찌기법의 적용

벨로우즈의 신축성과 내구성 향상을 위한 목적 함수인 Mises 응력과 강성(Stiffness)은 작을 수록 좋은 특성을 나타내므로 식 (1)의 다구찌기법 망소특성인 손실함수를 적용하여 SN(signal-to-noise) 비를 비교하여 최적의 수준을 예측하였다.

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

여기서, y는 해석 결과 값, n은 해석 횟수를 나타낸다.

Table 3은 벨로우즈의 유한요소해석 및 다구찌기법을 적용한 결과를 나타낸다. 유한요소 해석은 3.1절에서 유효성이 있다고 판단된 분리형 모델을

사용하였으며, 인자의 최적수준은 SN 비가 최대인 수준이다. Fig.5는 Mises 최대응력에 대한 수준별 요인 효과도를 나타내었다. 벨로우즈 산과 골의 곡률반경(R, r) 및 산의 높이(I)가 3수준으로 갈수록 Mises 최대응력과 강성이 감소하였다. 설계변수의 영향의 크기는 3개의 인자가 고르게 분포함을 알 수 있고, 산의 곡률 반경(R)이 다른 변수에 비해 상대적으로 영향도가 높게 나타났다. Mises 최대응력과 강성에 대해 SN비가 최대인 설계변수는 I=4.0 mm, R=2.95 mm, r=2.98 mm 로써 최적의 조건으로 판단되었다. 향후 피로 내구실험을 통하여 최적 조건으로 예측된 설계 변수의 검증이 필요하다고 판단된다.

Table 3 Comparison of SN ratio for von-Mises stress & stiffness

Simulation No.	Mises Stress (MPa)	SN ratio for stress	Stiffness (N/m)	SN ratio for stiffness
1	258.0	-48.2324	73.262	-37.2976
2	206.7	-46.3068	54.140	-34.6704
3	199.6	-46.0032	52.269	-34.3649
4	223.2	-46.9739	54.770	-34.7709
5	186.2	-45.3996	49.873	-33.9573
6	192.9	-45.7066	50.342	-34.0386
7	183.4	-45.268	46.271	-33.3062
8	190.6	-45.6025	47.305	-33.4981
9	165.2	-44.3602	43.359	-32.7416

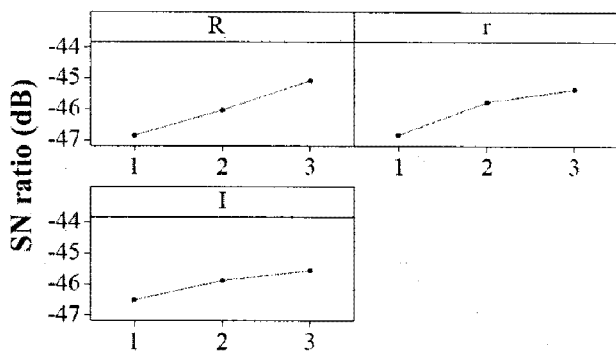


Fig. 5 The SN ratio for Mises stress

4. 결론

본 연구에서는 상용차용 S 형 다층관 벨로우즈 개발품의 성능향상을 위한 최적의 형상 설계변수

를 예측하고자 새로운 유한요소모델 제시에 따른 유한요소해석과 실험계획법의 직교배열표에 의한 다구찌기법을 적용하였다.

(1) S 형 다층관 벨로우즈 개발품의 탄소성 유한요소해석결과 기존의 등가 일체형 모델과 새로 제시된 분리형 모델의 응력분포와 최대응력은 큰 차이를 나타냈다.

(2) 다층관 벨로우즈의 강성평가에서 분리형 유한요소모델의 유효성이 높은 것으로 확인되었다.

(3) 다구찌기법을 적용한 결과 설계변수의 영향은 3 개 인자가 고르게 분포하였지만, 산의 곡률 반경(R)이 다른 변수에 비해 영향도가 높았다.

(4) Mises 최대응력과 강성에 대해 SN 비가 최대인 설계변수는 I=4.0 mm, R=2.95 mm, r=2.98 mm 로써 최적의 조건이라고 판단된다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 중소기업기술혁신개발 사업으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] B. K. Koh and G. J. Park, 1997, Development of Finite Element Analysis Program and Simplified Formulas of Bellows and Shape Optimization, KSME(A), Vol. 21, pp.1195-1208.
- [2] L. Younsheng, 1990, Strength analysis and structural optimization of U-shaped bellows, Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 42, pp.33-46.
- [3] S. H. Lee, D .S. Sim and S. G. Oh, 2005, A Numerical Analysis Study on Evaluation of the Reliability for Bellows in the Vehicle Exhaust System, J. of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 9, pp.77-82.
- [4] H. S. Kim, H. J. Kim, H. G. Kim and J. S. Lee, 2007, Shape Optimum Design of Ship's Bellows Using Statistical Method, J. of Ocean Engineering and Technology, Vol. 21, pp.55-60
- [5] S. W. Lee, 2002, Study on the forming of the metal bellows, J. of Materials Processing Technology, pp.130-131.