

# 신축이음용 벨로우즈의 설계 최적화에 관한 연구

## A Study on the Design Optimization of Bellows for Expansion Joints

정두형\* · 김병탁\*\*\*

Doo-Hyung Jeong\* and Byung-Tak Kim\*\*\*

(Received 05 February 2022, Revision received 13 April 2022, Accepted 14 April 2022)

**Abstract :** The main function of expansion joints used in various industrial fields is to compensate for movements in pipe systems, machines and equipment. The movements to be compensated are relative motions between two parts of a system, caused by temperature differences, misalignment during installation, vibration, etc. There are many types of expansion joints, but bellows type expansion joints are most widely used that can absorb movements in any directions, require no maintenance, and take up less space than others. In this study, in order to determine the optimal dimensions of the bellows for expansion joints, the response surface optimization was performed to minimize the maximum stress and volume. The height of corrugations, the pitch of corrugations, and the thickness of the bellows were selected as design variables for optimization. The stress and volume of the optimization model decreased by 11.6% and 30.1%, respectively, compared to the basic model.

**Key Words :** Bellows, Expansion joint, Response surface, Design optimization, ANSYS workbench

### 1. 서 론

다양한 산업 분야에 적용되는 신축이음은 배관 계나 기계 및 장비의 온도 변화, 설치 중의 정렬 불량, 관성력 또는 기초 침하 등으로 인해 발생하는 두 지점 간의 상대적 움직임을 보상해 주기 위하여 사용된다.<sup>1,2)</sup> 특히 신축이음은 고온의 유체 수송 배관계에서 공간을 절약해 줄 뿐만 아니라 엔진이나 터빈, 압축기, 펌프 등에서 발생한 진동이나 소음을 다른 부분으로 전달되는 것을 차단

해 주는 역할도 한다. 배관 시스템에 가장 일반적으로 사용되는 신축이음의 유형은 파이프 확장 루프(pipe expansion loops), 슬립형 조인트(slip-type joints), 벨로우즈형 신축이음(bellows type expansion joints) 등이 있다. 그러나 파이프 확장 루프는 공간을 많이 차지하고, 슬립형 조인트는 축방향 움직임만 수용 가능할 뿐 아니라 패킹 재료를 정기적으로 교체해야 하는 단점이 있어, 벨로우즈형 신축이음이 가장 구성 가능한 유형으로 평가받고 있다. 벨로우즈형 신축이음은 주름 형태의 벨로우

\*\*\* 김병탁(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-4403-171X) : 교수, 부경대학교 기계공학부  
E-mail : btkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6161  
\*정두형(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3117-8111) : 매니저, 경동나비엔 부품개발팀

\*\*\* Byung-Tak Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-4403-171X) : Professor, School of Mechanical Engineering, Pukyong National University.  
E-mail : btkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6161  
\*Doo-Hyung Jeong(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3117-8111) : Manager, Component Research Team, Kyungdong Navien.

즈를 포함하고 있어 어떤 방향의 열적, 기계적 또는 지진 운동도 흡수할 수 있으며 유지 관리가 불필요하고 공간을 적게 차지한다는 장점이 있다. 신축이음용 벨로우즈는 그 형상에 따라 U형, Ω형, S형 벨로우즈 등으로 나눌 수 있으며, 일반적으로 축직각 방향 변위와 각변위가 크지 않은 경우에는 제작의 용이성과 뛰어난 신축성으로 인해 U형이 가장 널리 사용되고 있다.<sup>3)</sup>

현재까지 벨로우즈에 대한 설계는 1955년에 제정된 EJMA(Expansion Joint Manufacturers Association) 기준<sup>4)</sup>에 근거하여 진행되어 왔으나, 그 설계식이 복잡하고 방대하여 많은 시간이 소요될 뿐 아니라 단순 형상에 대한 설계식의 적용으로 인해 설계 오차도 상당 부분 발생하여 이를 보완하기 위한 개정 노력이 현재에도 계속되고 있다. 한편으로는 복잡한 형상에 대한 구조해석 기법의 발달과 다양한 분야에 대한 프로그램의 개발로 인해 제조사의 지식과 경험에 근거한 EJMA 기준과는 별도로 다양한 형태의 벨로우즈의 거동특성에 대한 해석적 연구<sup>5-8)</sup>들이 활발히 진행되고 있다. 그러나 이들 연구는 주로 특정 목적을 가진 벨로우즈에 대한 구조해석, 강도해석, 진동 해석 등에 국한되어 있으며, 주어진 조건 하에서 설계 치수를 최적화하기 위한 연구<sup>9-11)</sup>는 상당히 부족한 실정이다.

본 연구에서는 신축이음용 벨로우즈의 피로수명에 큰 영향을 미치는 응력 수준과 재료 절감을 위한 부피의 최소화를 목적으로 벨로우즈 제조사의 실제 치수에 대한 형상 최적화 연구를 수행하였다. 형상 최적화를 위해 사용된 방법은 실험 계획법의 일종인 반응 표면법(response surface method)이며, 정확도가 높으면서 시간이 적게 소요되는 스파스 그리드 기법(sparse grid method)을 사용하여 반응표면을 생성하였다. 또한 목적 함수가 응력과 부피이므로 다중 목적 함수를 동시에 최적화하기 위해 다목적 유전자 알고리즘(MOGA, multi-objective genetic algorithm) 기법을 적용하였다. 최적화의 설계 변수로는 주름부 산 높이, 주름의 피치, 벨로우즈 두께를 선정하였으며, 최적화 모델의 재해석을 통해 반응표면 최적화로 도출된 결과와 실제 해석 사이의 오차를 비교하여 최적화 결과의 타당성을 검토하였다.

## 2. 해석 조건 및 방법

### 2.1 해석 모델

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 U형 벨로우즈의 단면 형상을 도시한 것이며, Table 1은 벨로우즈의 기초 모델에 대한 해당 치수를 나타낸 것이다. 이 치수는 국내 제작용체의 제품 중 100A를 참고하였으며, 주름의 수는 많을수록 변위에 대한 응력 감소의 효과는 있으나 너무 길이가 길어질 경우 내부 압력에 대한 좌굴이 발생할 수 있으므로 일반적으로 사용되는 6개로 선정하였다.

Fig. 2는 해석에 사용된 벨로우즈의 기초 형상에 대한 유한 요소 모델을 나타낸 것이며, 주름부와 같이 형상이 급격하게 변화하는 영역은 상대적으로 조밀하게 격자를 구성하였다. 해석에는 시간과 해의 정확도를 고려하여 4각형 쉘(shell) 요소를 사용하였으며, 형상은 축대칭이나 가로방향(lateral direction) 변위가 발생하므로 전체의 1/2 모델을 사용하여 해석을 진행하였다.

해석에 사용된 재료는 내부식성과 내열성이 뛰어나 벨로우즈의 재료로 가장 널리 사용되고 있는 스테인리스강(STS304)이며, 기초 모델에 대한 해석을 진행한 후 그 모델에 대한 최적 치수를 결정

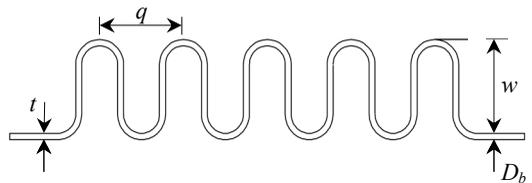


Fig. 1 Cross-sectional shape of the U-shaped bellows

Table 1 Dimensions of the basic bellows

| Specification              | Value | Unit |
|----------------------------|-------|------|
| Inner diameter, $D_b$      | 114   | mm   |
| Height of convolution, $w$ | 24    | mm   |
| Pitch, $q$                 | 23    | mm   |
| Thickness, $t$             | 0.6   | mm   |
| Number of convolutions     | 6     |      |

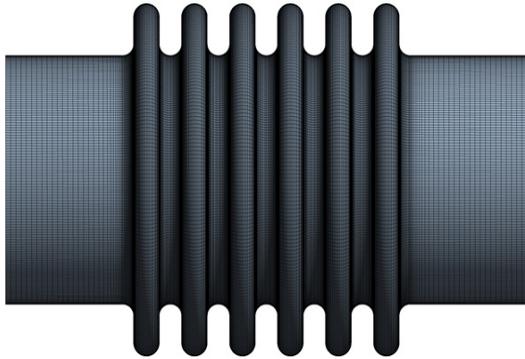


Fig. 2 Finite element model of the basic bellows

하기 위하여 ANSYS workbench 17.2를 사용한 선형 해석을 수행하였다.

### 2.2 경계 조건

신축이음용 벨로우즈는 주로 양 끝단을 파이프에 직접 용접하거나 플랜지에 용접하여 배관계의 필요한 위치에 설치하여 사용한다. 이때 벨로우즈 양 끝단 사이에는 운전 환경에 따라 축방향 및 가로 방향의 상대 운동뿐만 아니라 회전 운동도 발생할 수 있으며, 배관계의 경우에는 대부분 그 내부에서 유체로부터 압력을 받고 있다.

Fig. 3은 내부에서 유체 압력을 받고 있는 벨로우즈에 축방향 및 가로 방향으로 상대 변위가 발생한 경우에 대한 경계조건을 나타낸 것이다. 본 해석에는 1/2 모델을 사용하였으므로, 대칭면에는 수직 방향의 이동과 두 접선 방향의 회전이 각각 구속된다. 또한 벨로우즈 오른쪽 끝단은 다른 부품에 용접된 것으로 가정하여 이동과 회전 모두를 구속하였고, 좌측 끝단은 열팽창이나 진동 등에 의해 강제 변위가 발생하는 조건을 부여하였다. 상대 변위의 크기는 제조업체의 적용 값을 참고하여 가로 방향으로 3.8 mm, 축방향으로 21 mm로 선정하였으며, 내부 압력은 치수 100A에 대한 최대 사용 압력이 0.5 MPa이나 KS에서 사용 압력의 1.5배 이상에 대한 시험 조건을 명시하고 있으므로 최대 0.8 MPa의 압력을 하중 조건으로 사용하였다.

### 2.3 설계 최적화

벨로우즈의 최적화 목표는 주어진 강제 변위와 압력 조건하에서 발생 응력과 부피를 최소화할 수 있는 치수를 결정하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 목적함수를 벨로우즈의 부피와 최대응력으로 선택하고, 최적화의 설계 인자로는 주름부산 높이, 주름의 피치, 벨로우즈 두께를 선정하였다. 형상 최적화를 위해 먼저 기초 모델에 대한 해석을 수행한 후 스페스 그리드 기법에 의한 실험계획표를 사용하여 반응표면을 생성하였다. 또한 목적 함수가 2개이므로 생성된 반응표면을 최적화하기 위해 다목적 유전자 알고리즘 기법을 적용하였다.

식 (1)은 반응표면 최적화를 위한 목적함수를 나타낸 것으로  $V$ 는 부피,  $S_t$ 는 최대 응력을 의미하며, 각 치수는 Fig. 1에 표시되어 있다. 주어진 각 치수에 대한 제한 조건은 반응 표면을 생성하기 전에 프로그램에 입력되며, 체적  $V$ 는 각 모델에 대한 벨로우즈의 단면 정보를 사용하여 프로그램 내에서 자동적으로 계산된다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } V \geq 0 \\
 & \quad S_t \geq 0 \\
 & \text{subject to } 20 \leq w \leq 30 \\
 & \quad 20 \leq q \leq 28 \\
 & \quad 0.2 \leq t \leq 1
 \end{aligned} \tag{1}$$

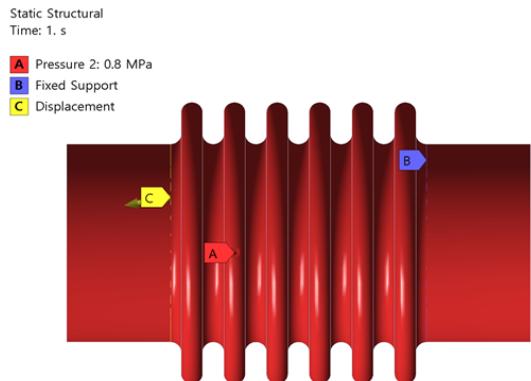


Fig. 3 Boundary conditions applied to the bellows

### 3. 해석 결과 및 고찰

#### 3.1 기초 모델의 유한요소해석

Fig. 4는 기초 모델에 내부 압력이 0.8 MPa, 가로방향과 축방향 변위가 각각 3.8 mm, 21 mm 작용할 때 발생하는 응력분포를 도시한 것이다. 이 그림을 살펴보면, 가로방향 변위로 인하여 응력은 반 대칭적인 분포를 나타내며, 가로방향 변위에 기인한 굽힘 모멘트로 인하여 응력이 양단에서 상대적으로 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 최대 응력은 축방향 변위에 의한 인장 응력과 굽힘 모멘트에 의한 굽힘 응력이 중첩되어 오른쪽 상부에서 발생하였으며, 그 값은 1113 MPa로 나타났다. Fig. 5는 상단 주름부의 경로를 따라 발생

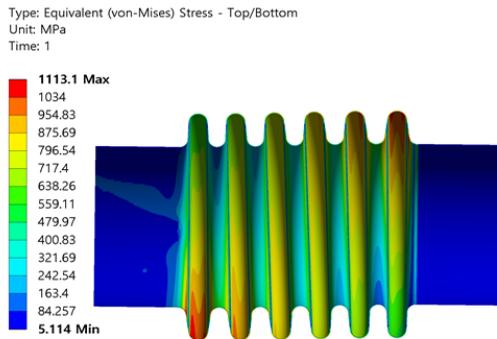


Fig. 4 Stress distribution of the basic model

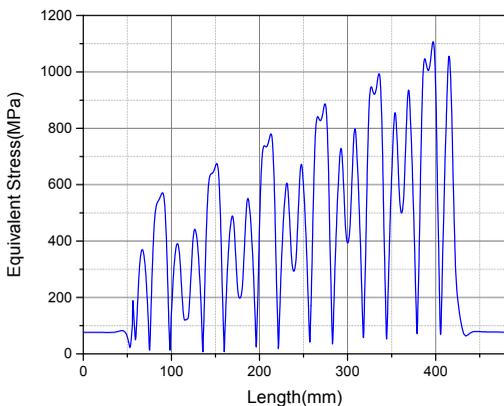


Fig. 5 Stress variation of the basic model along the top path of the convolutions

하는 응력 변화를 나타낸 그래프이며, 주름부의 급격한 형상 변화로 응력의 크기 또한 큰 차이를 나타내지만 각 주름에 발생하는 응력 분포의 양상은 유사함을 알 수 있다. 또한 왼쪽 주름의 응력은 축방향 인장응력과 굽힘에 의한 압축 응력이 서로 상쇄되어 상대적으로 작게 나타나고, 오른쪽으로 이동할수록 두 응력이 중첩되어 최대응력은 오른쪽 마지막 주름의 산 부근(대칭면)에서 발생함을 관찰할 수 있다.

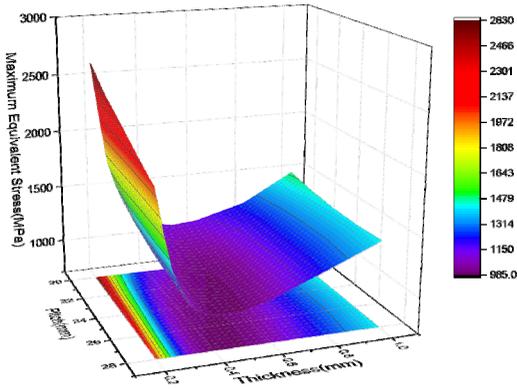
#### 3.2 모델의 설계 최적화

본 해석에 적용된 설계 최적화 방법은 반응표면 최적화법(response surface optimization)이며, 먼저 식 (1)의 요구조건을 만족하는 조건 하에서 스파스 그리드 기법에 의해 생성된 초기 실험계획표를 Table 2에 나타내었다. 이 표의 설계점(design point)은 설계 변수의 주어진 범위 내에서 양 끝값과 중간값의 조합으로 구성되어 있으며, 스파스 그리드 기법은 몇 개의 설계점을 샘플링하고 설계공간에서 가장 불확실한 영역에서 적응적으로 추가 설계점을 샘플링함으로써 오차가 적어질 때까지 격자를 개선하여 반응 표면을 생성하게 된다.

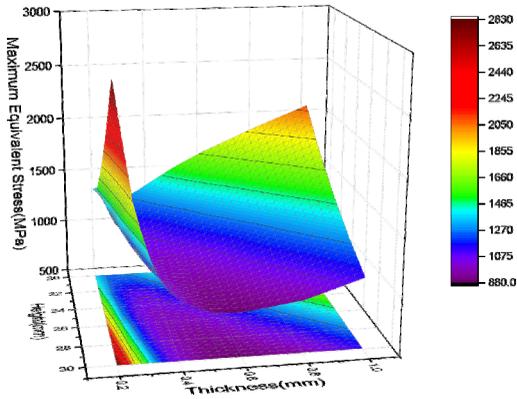
본 해석의 경우, 상대 오차의 범위를 최대 5%로 제한하여 반응표면을 생성한 결과, 92개의 반응점(response point)이 추가되었으며, 이 반응표면에 다목적 유전자 알고리즘을 사용한 최적화 과정을 적용하여 최종적으로 벨로우즈의 산 높이가 26 mm, 피치 28 mm, 두께 0.4 mm의 값을 얻을 수 있었다.

Table 2 Table of design experiments

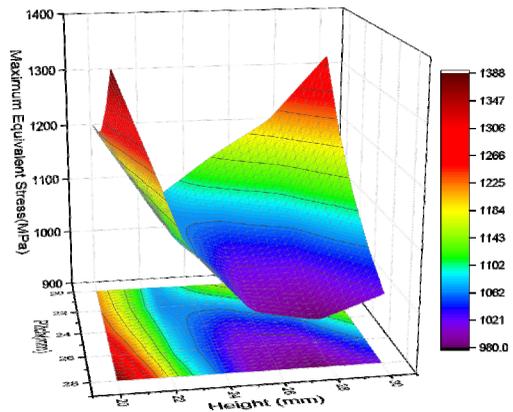
| Height (mm) | Pitch (mm) | Thickness (mm) | Maximum stress(MPa) | Volume (mm <sup>3</sup> ) |
|-------------|------------|----------------|---------------------|---------------------------|
| 25          | 24         | 0.6            | 1052.6              | 61458                     |
| 20          | 24         | 0.6            | 1566.5              | 52080                     |
| 30          | 24         | 0.6            | 945.72              | 71402                     |
| 25          | 20         | 0.6            | 1148.4              | 62242                     |
| 25          | 28         | 0.6            | 1111                | 60674                     |
| 25          | 24         | 0.2            | 2124.8              | 20486                     |
| 25          | 24         | 1              | 1510.9              | 102430                    |



(a) Response surface according to thickness and pitch (height : 26 mm)



(b) Response surface according to thickness and height (pitch : 28 mm)



(c) Response surface according to height and pitch (thickness : 0.4 mm)

Fig. 6 Response Surfaces according to design variables

Fig. 6은 최적 설계점에서 각 설계변수의 영향을 살펴보기 위하여 생성된 반응표면을 최대 등가응력에 대하여 도시한 것이며, 반응표면이 3개의 설계변수의 함수이므로 1개의 변수는 고정하고 두 개의 변수에 대한 응력의 변화를 3차원 곡면 형태로 나타내었다. 이 그림을 살펴보면, 두께 변화에 대한 최대응력은 두께가 증가함에 따라 급격히 감소하여 0.4~0.5 mm에서 최저가 되었다가 다시 증가하는 경향을 나타내며, 피치는 증가할수록 최대응력은 감소하는 효과가 있음을 알 수 있다. 또한 산의 높이에 따른 최대응력은 높이가 증가함에 따라 완만하게 감소하다가 26~28 mm에서 최소가 되며, 그 이후에는 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 그림으로 표시하지 않았으나 체적에 대한 각 설계변수의 영향은 산 높이와 두께가 증가하면 체적은 증가하며, 반대로 피치가 증가하면 체적은 감소하는 것으로 나타났다.

### 3.3 기초 모델과 최적 모델의 비교

Table 3은 반응표면 최적화를 통해 결정된 최적 모델과 기초 모델의 결과를 비교하여 나타낸 것이며, 최적 모델에 대한 재해석을 수행한 결과도 동시에 나타내었다. 이는 생성된 반응표면의 정확도에 따라 도출된 최적해는 실제의 거동과 약간의 차이가 있을 수 있으므로 최적 모델의 재해석은 최적해의 검증에 위해서도 필요하다고 볼 수 있다. 이 표에서 알 수 있듯이 최적 모델의 산 높

Table 3 Comparison of basic and optimal models

|                           | Basic model | Optimal model    |              |
|---------------------------|-------------|------------------|--------------|
|                           |             | Response surface | Verification |
| Height (mm)               | 24          | 26               | 26           |
| Pitch (mm)                | 23          | 28               | 28           |
| Thickness (mm)            | 0.6         | 0.4              | 0.4          |
| Max. stress (MPa)         | 1113        | 992              | 983          |
| Volume (mm <sup>3</sup> ) | 59736       | 41765            | 41754        |

이와 피치는 기초 모델의 해당 치수보다 각각 2 mm, 5 mm 증가하였으며, 두께는 0.2 mm 감소하는 결과로 나타났다. 이 최적 모델에 대한 유한요소 해석을 재수행해 본 결과, 최대응력은 983 MPa로서 기초 모델보다 11.6% 감소하였으며, 부피는 41754 mm<sup>3</sup>로서 기초 모델보다 30.1% 감소하는 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 반응 표면 최적화를 통해 얻은 최대응력과 부피는 검증해석의 결과와 약 1% 미만의 오차를 나타내므로 반응표면이 비교적 정확하게 생성되었음을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 최적 모델의 재해석을 통해 얻은 벨로우즈의 응력분포를 도시한 것이며, 전체적인 응력 분포의 양상은 예상대로 Fig. 4의 기초 모델에 대한 결과와 거의 동일함을 알 수 있다. 이 경우에도 최대응력은 굽힘에 의한 인장응력과 축방향 변위에 의한 인장응력이 합해지는 오른쪽 상단과 왼쪽 하단에서 거의 같은 크기로 발생하였으며, 이를 확인하기 위해 상단 주름부의 경로를 따라 발생하는 응력 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 이 그림을 Fig. 5와 비교해 보면, 경로 왼쪽에서 오른쪽으로 진행할수록 응력이 증가하는 것은 동일하나 응력 증가의 기울기가 상대적으로 완만하게 나타나며, 1개의 산의 정점을 기준으로 그 좌우의 응력 차이도 기초 모델보다 감소함을 알 수 있다. 따라서 본 해석에 적용된 하중 조건 하에서 도출된 최적 모델은 최대응력을 감소시킬 뿐만 아니

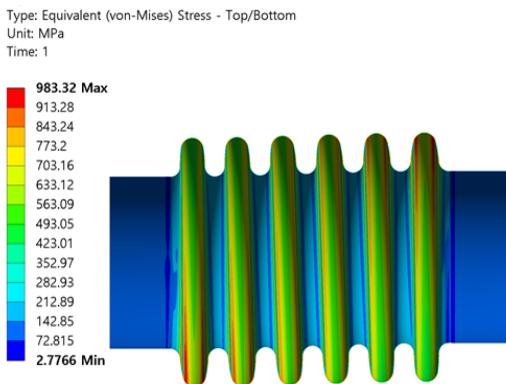


Fig. 7 Stress distribution of the optimal model

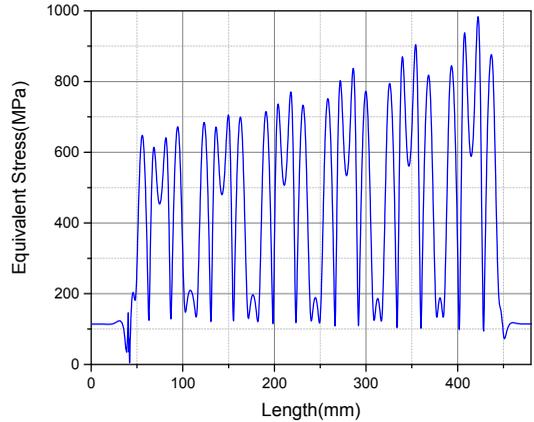


Fig. 8 Stress variation of the optimal model along the top path of the convolutions

라 전 길이에 걸쳐 응력이 비교적 골고루 분포되는 효과도 있어 벨로우즈의 피로수명에도 긍정적인 효과가 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 신축이음용 벨로우즈를 대상으로 스페이스 그리드 기법으로 반응표면을 생성하고, 이를 최적화하는 연구를 수행하였다. 설계 변수로 산의 높이, 피치, 두께를 선정하고, 축방향 및 가로방향 상대 변위가 각각 21 mm, 3.8 mm, 내압이 0.8 MPa의 조건 하에서 최대응력 및 체적을 최소화시키는 반응표면 최적화 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 산 높이 24 mm, 피치 23 mm, 두께 0.6 mm 인 기초 모델을 최적화하여 산 높이 26 mm, 피치 28 mm, 두께 0.4 mm의 설계 치수를 얻을 수 있었다.
- 2) 최적 모델의 최대 응력은 983 MPa로서 기초 모델보다 11.6% 감소하였으며, 부피는 41754 mm<sup>3</sup>로서 기초 모델보다 30.1% 감소하는 효과가 있는 것으로 나타났다.
- 3) 반응 표면 최적화를 통해 얻은 최대응력과 부피는 검증해석의 결과와 약 1% 미만의 오차를 나타내어 반응 표면이 비교적 정확하게 생성되었음을 확인할 수 있었다.

4) 최적 모델은 주어진 하중조건 하에서 최대응력을 감소시킬 뿐만 아니라 전 길이에 걸쳐 응력이 비교적 골고루 분포되는 효과도 있는 것으로 나타났다.

## 후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2021년)에 의하여 연구되었음.

## Author contributions

D. H. Jeong; Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Writing-original draft.  
B. T. Kim; Supervision, Writing-review & editing.

## References

1. I. S. Shon, 2019, "Fluid-structural Interaction Analysis and Seismic Evaluation of Bellows Type Expansion Joints", Journal of Power System Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 11-18. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2019.23.6.011>)
2. M. S. Han, J. H. Ahn and C. H. Yang, 2013, "Study on Optimum Shape of Expansion Joint", Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 21, No. 2, pp. 154-158. (<https://doi.org/10.7467/ksae.2013.21.2.154>)
3. H. J. Kim, J. H. Park, H. S. Kim, J. H. Sung, H. G. Kim and J. S. Lee, 2006, "A Study on Design of U-type Bellows", Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers Conference, pp. 319-324.
4. Expansion Joint Manufacturers Association, Inc., 2019, Standards of the Expansion Joint Manufacturers Association, 10th Edition.
5. J. P. Hwang, J. K. Kim and Y. K. Park, 2008, "A Study on Dynamic Characteristics of Curved Bellows", Journal of Power System Engineering, Vol. 12, No. 2, pp. 29-34.
6. S. W. Lee and C. H. Yang, 2014, "Automated Modeling and Structure Analysis of Bellows", Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers. Vol. 22, No. 7, pp. 152-157. (<https://doi.org/10.7467/ksae.2014.22.7.152>)
7. D. H. Jeong, D. H. Chin and B. T. Kim, 2020, "A Study on the Behavioral Characteristics of Bellows for Expansion Joints", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 10, pp. 52-58. (<https://doi.org/10.14775/ksmpe.2020.19.10.052>)
8. J. G. Kim and J. Y. Kim, 2007, "Dynamic Characteristics and Experimental Verification of Curved Bellows", Proceedings of the Korean Society for Power System Engineering Conference, pp. 224-229.
9. H. J. Kim, H. S. Kim, J. P. Kim, J. H. Park and M. J. Yun, 2006, "Shape Optimization for Performance Improvement of Ship's U-type Bellows", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 20, No. 6, pp. 123-129.
10. D. H. Jeong, 2018, "A Study on the Structural Analysis and the Optimization of Bellows for Expansion Joints", MS thesis, Pukyong National University, Busan, Korea.
11. B. G. Ko, Y. J. Suh and K. J. Park, 1995, "A Finite Element Analysis and Shape Optimal Design with Specified Stiffness for U-typed Bellows", Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers Vol. 3, No. 6, pp. 96-111.