<학술논문> **DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2011.35.9.1007** ISSN 1226-4873

순차적 실험계획법을 적용한 다층관 벨로우즈 형상 최적설계§

오상균*†· 이광기**· 서창희*· 정윤철*· 김영석***
* 대구기계부품연구원 , ** 브이피코리아㈜ , *** 경북대학교 기계공학부

Shape Optimization of Multilayer Bellows by Using Sequential Experimental Design

Sang Kyun Oh*†, Kwang Ki Lee**, Chang Hee Suh*, Yun-Chul Jung* and Young Suk Kim***
* Daegu Mechatronics & Materials Institute,
** Consulting Division, VP Korea,
*** Dept. of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.,

(Received December 15, 2010 ; Revised June 29, 2011 ; Accepted July 5, 2011)

Key Words : Multi-layer bellows(다층관 벨로우즈), Flexibility(신축성), Design of experiment(실험계획법), Kriging(크리깅), D-Optimal method(D-Optimal 방법)

초록: 상용차용 다층관 벨로우즈는 우수한 유연성과 내구성이 요구되므로 단층으로 제조되는 승용차용 벨로우즈와는 다르게 다층의 형태로 제작된다. 단층 벨로우즈의 유한요소해석과 최적화에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으나, 층과 층사이에 갭이 존재하는 다층형 벨로우즈의 유한요소해석과 최적화 연구는 미진하다. 따라서 본 연구에서는 해석의 신뢰성 향상을 위해 다층형 벨로우즈에 적합한 유한요소 모델을 제시하였으며, 다층관 벨로우즈의 형상 최적화를 위해 실험계획법과 D-Optimal 방법에 기반을 둔 순차적 실험계획에 의한 크리깅 메타모델을 적용하였다.

Abstract: Because of their high flexibility and durability, multilayer bellows are manufactured for use in commercial vehicles, while single-layer bellows are manufactured for use in passenger vehicles. A study based on the finite element method (FEM) and shape optimization for the single-layer bellows has been actively performed; however, until now, a study based on the FEM has rarely been performed for the multilayer bellows with gaps between the layers. This paper presents a finite-element modeling scheme for the multilayer bellows to improve simulation reliability during the evaluation of stress and flexibility. For performing shape optimization for the multilayer bellows, DOE (design of experiment) and the Kriging metamodel followed by the D-optimal method are used.

1. 서 론

자동차용 배기계(exhaust system)에 사용되는 벨로우즈(bellows)는 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. 다층관(multi layer) 벨로우즈는 차량의 가감속, 급정지, 급가속 및 배기계의 열에 의해 주로 발생하는 변형인 축 방향의 인장/압축 변위를 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

§ 이 논문은 대한기계학회 2010 년도 추계학술대회(2010. 11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

† Corresponding Author, osk@dmi.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

형 벨로우즈에 대한 유한요소를 개발하고 설계 최적화에 관한 연구가 있다.[1~3] 또한 설계 최적화에 대한 연구로 해석 시간을 줄이기 위하여 실험계획법 및 다구찌(Taguchi) 직교배열을 적용하여 최적 설계를 수행하였다.[4,5] 그러나 기존에 다층관 벨로우즈의 강성을 평가하기 위한 유한요소모델은 두 겹 이상의 적층 구조물로 되어 있는 벨로우즈를 한 겹으로 가정하는 등가의 해석모델을 적용하므로 해석결과와 실제 제품의 신축성 실험결과와 일치하지 않는 문제점이 있다. 본 연구에서는 상용 차용으로 개발된 S 형 다층관 벨로우즈의 강성예측에 유효한 유한요소 모델을 제시하고 벨로우즈의 신축성과 피로 내구성을 향상시키기 위한 최적의 형상 설계변수를 예측하고자 하였다. 이를 위해 다구찌기법과 D-Optimal 방법에 기반을 둔 순차적 실험계획법을 적용하였으며, 각 설계변수에 따른 목적함수의 변화를 크리깅 메타모델을 적용하여 표현하였다.

2. 모델링 및 메타모델 구성

2.1 벨로우즈 형상 및 설계변수

본 연구에 모델로 선정된 상용차용 S 형 다층관 벨로우즈는 두께가 0.25 mm 인 STS304 박판을 롤포밍 성형하여 제작 하였으며, Fig. 1 에 기하학적 형상을 나타내었다.

벨로우즈의 신축성과 내구성에 영향을 미치는 주요 인자는 주름부의 형상이며, 주름부 형상이 U 형에서 S 형으로 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.

2.2 벨로우즈 유한요소 모델 및 경계조건

본 연구에서는 박판을 사용하는 적층구조물의 해석결과의 정확성을 높이기 위해 기존의 등가일체형 해석모델과 비교하여 n 장의 두께 t 가 붙어 있지 않고 각각 독립된 역할을 하며 끝 부분에서만 서로 구속조건을 갖는 형태로 구성되어 있다고 가정한 분리형 유한요소 모델링기법을 적용하여 구조해석을 수행하였으며, Fig. 2 에 유한요소모델을 나타내었다. 등가일체형 해석모델은 네 겹의 벨로우즈가 한 겹의 판재형태 구조물로 유한요소 모델링되어 있고 박판 사이의 공간이 없이 절점(node)으로 연결되어 있으며, 분리형 유한요소 모델은 네 겹의 박판 사이에 미세한 공간이 존재하고 각 판재의 절점과 이웃한 다른 판재의 절점이 독립적이며 해석에서는 변형시 층간의 자체 접촉은 발생하지 않았다. 실제 벨로우즈의 형상은 나선(spiral)의 다층관 구조이나 모델을 간략화하기 위해 나선형상은 고려하지 않고 축 대칭 모델을 구성하였으며, 탄성과 소성을 고려한 탄소성해석을 수행하였다. 해석에 사용된 재료물성은 탄성계수 210 GPa, 푸아송비 0.3, 항복강도는 286 MPa 이다. 유한요소해석은 상용 탄소성해석 프로그램인 MARC 2008 로 수행하였으며, 인장시험에서 얻어진 원소재의 유동곡선(Fig. 3)을 사용하여 해석하였다.

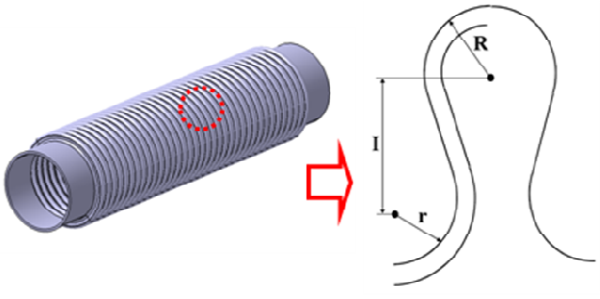

Fig. 1 Shape and design variable of bellows investigated in the present study

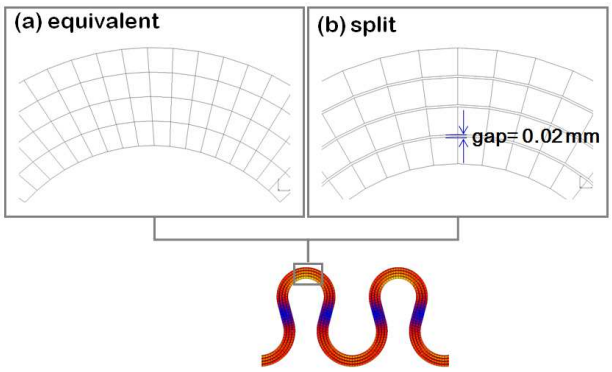

Fig. 2 FE-model of multi-layer bellows used in the present study

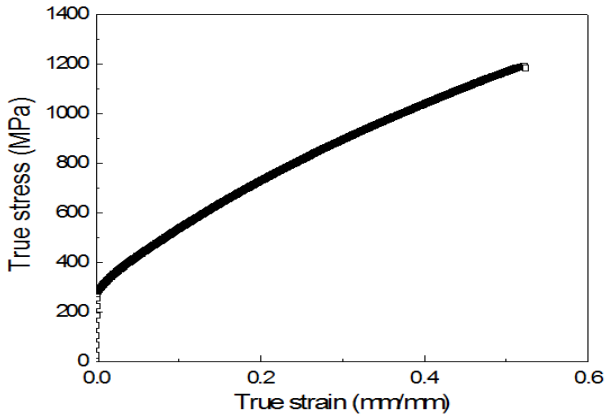

Fig. 3 Flow curve of the material (STS304)

경계조건은 벨로우즈 왼쪽 끝 부분의 각 절점들을 완전 구속 시키고 오른 쪽 끝 부분의 절점들에 축 방향으로 압축변위 15 mm 를 가하였다. 압축변위 부여 조건은 다층관 벨로우즈의 신축성 실험조건과 동일하다.

2.3 실험인자 및 1 차 실험계획

본 연구에서는 벨로우즈의 신축성과 성능을 향상시키기 위한 최적의 형상 설계변수를 예측하기 위하여 1 차적으로 가장 적은 실험계획을 제공해 주는 다구찌 직교배열을 적용하였다. Table 1 은 제어인자로서 유한요소해석에 적용된 설계변수와 각각의 인자에 대해 3 개의 수준으로 나타내었다. 여기서, Level 1 은 낮은 수준, Level 2 는 중간 수준, Level 3 는 높은 수준을 나타낸다. 실험에 사용된 제어인자로서의 설계변수는 산의 높이(I)와 곡률반경(R, r) 인데, 수준은 실제 제품 개발 시 적용하고 있는 현재 설계 치수인 Level 2 를 기준으로 하여 설계자와의 협의를 통하여 설정하였으며, 최종적으로 실험에 적용된 3 수준 3 인자 직교배열표를 Table 2 에 나타내었다.

2.4 크리깅 메타모델

본 연구는 직교배열에 기반한 다층관 벨로우즈의 유한요소 해석 결과를 바탕으로 각 설계변수에 따른 목적함수의 변화를 크리깅 메타모델을 적용하여 표현하고자 한다. 크리깅 메타모델은 기존의 유한요소 해석 결과 값들의 가중 선형조합을 통하여 유한요소 해석 값 주위에 있는 결과 값을 예측하는 기법이다.[6,7]

Table 1 First 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)	2.05	2.25	2.45

Table 2 Orthogonal array of Taguchi $L_9(3^3)$

Simulation No.	I(mm)	R(mm)	r(mm)
1	3.4	2.55	2.05
2	3.4	2.75	2.25
3	3.4	2.95	2.45
4	3.6	2.55	2.25
5	3.6	2.75	2.45
6	3.6	2.95	2.05
7	4.0	2.55	2.45
8	4.0	2.75	2.05
9	4.0	2.95	2.25

전역적 근사화 모델인 크리깅 모델은 다음 식 (1)과 같이 구성된다.

$$y(x) = f(x) + Z(x) \tag{1}$$

여기서, *f(x)*는 주어진 전산해석 값을 이용하여 구할 수 있는 전역 모델을 의미하며, 계산의 편리성을 위하여 일반적으로 상수항으로 처리한다. *Z(x)*는 일반적으로 평균이 0 이고 분산이 σ^2인 정규분포를 따르는 것으로 가정하며, 크리깅 모델이 주어진 전산해석 값들을 예측할 수 있도록 국소적인 변동을 만들어내는 부분으로 응답 모델의 불확실성을 표현한다. 정규분포를 따르는 *Z(x)*의 공분산은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$Cov\left[Z(x^i), Z(x^j)\right] = \sigma^2 \underline{R} = \left[R(x^i, x^j)\right] \tag{2}$$

여기서 $\underline{R}$ 는 상관행렬을 의미한다. $R(x^i, x^j)$는 임의의 두 점 사이의 상관함수를 나타내며 본 연구에서는 상관함수로 가장 많이 사용되는 식 (3)의 지수함수를 적용한다.

$$R(x^i, x^j) = \exp\left[-\sum_{k=1}^{n} \theta_k \left(x_k^i - x_k^j\right)^2\right] \tag{3}$$

상관함수가 정의되면 크리깅 모델의 예측값은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$y = \beta + \gamma^T(x)\underline{R}^{-1}\left(y - \underline{f}\hat{\beta}\right) \tag{4}$$

여기서, y는 응답을 나타내는 열백터이고, $\gamma^T, \hat{\beta}$ 는 다음 식 (5)로 표현된다.

$$\gamma^T(x) = \left[R(x, x^1), R(x, x^2), \ldots, R(x, x^n)\right]^T$$
$$\hat{\beta} = \left(\underline{f}^T \underline{R}^{-1} \underline{f}\right)^{-1} \underline{f}^T \underline{R}^{-1} \underline{y} \tag{5}$$

3. 결과 및 고찰

3.1 유한요소해석 모델의 검증

등가 일체형의 해석모델을 이용해 네 겹의 벨로우즈를 한 겹으로 모델링하여 해석한 결과를 Fig. 4(a)에 나타내었다. 벨로우즈 산 부분의 중앙부에 최대 응력이 발생하였으며, 축방향에 대한 Mises 최대응력은 304.4 MPa 로서 소재의 항복강도를 초과하여 소성변형이 발생하였다. Fig. 4(b)는 분리형 유한요소 모델링에 대한 유한요소 해석을 수행한 결과이다. 분리형 모델의 경우 벨로우즈 네 겹의 판재 각각의 응력분포가 비교적 균일하며 축방향에 대한 Von Mises 최대응력이 186 MPa 로서 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 모델링을 하기 때문에 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.

다층관 벨로우즈의 유한요소 모델에 대한 유효성을 검증하기 위하여 유한요소 해석과 실제 제작된 제품의 신축성 비교실험을 하였으며, 그 결과를 Fig. 5 에 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. 분리형 모델이 실제품의 강성 예측에 유효하나 신축성 실험결과와 일치하지 않는 이유는 실제품에서 발생하는 층간의 자체접촉을 고려하지 않기 때문으로 사료된다. 그러나, 자체 접촉을 고려하지 않아서 발생되는 오차보다는 등가 모델로 두었을 경우에 오차가 훨씬 크다. 따라서, 본 연구에서는 벨로우즈의 형상에 따라서 변하는 응력분포를 실제 실험과 근접한 경향을 나타내는 분리형 모델을 이용하여 다층관 벨로우즈의 형상 최적설계를 수행하였다.

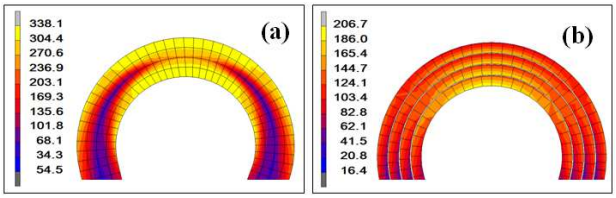

Fig. 4 FE analysis results of multi layer bellows; (a) equivalent model (b) split model

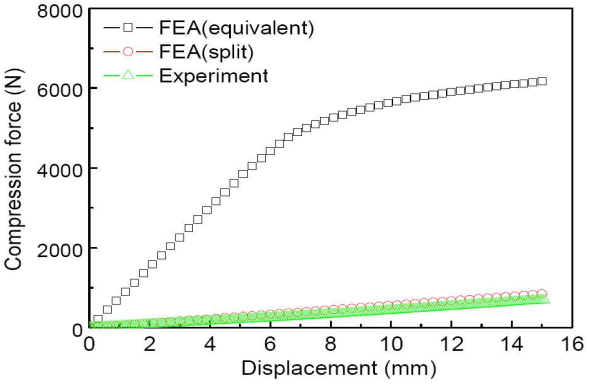

Fig. 5 Flexibility experiment and results

3.2 1 차 최적해

벨로우즈의 신축성과 내구성 향상을 위한 목적함수인 Von Mises 응력과 강성(Stiffness)은 작을 수록 벨로우즈의 특성이 향상되므로 모두 망소특성을 고려하여 기하평균을 구해주는 만족도함수(Desirability Function)를 적용하여 최적해를 예측하였다.[8] 유한요소 해석은 3.1 절에서 유효성이 있다고 판단된 분리형 모델을 사용하였으며, 인자의 최적해는 만족도함수가 최대가 되는 설계변수의 값이다.

$$D = \left(\prod_{i=1}^{n} d_i \right)^{1/n} \tag{6}$$

여기서, d 는 목적함수 각각에 대한 만족도를 나타내며, n 은 목적함수의 갯수를 나타낸다.

본 연구에서는 목적함수인 Von Mises 최대응력과 강성에 대한 크리깅 메타모델에 만족도함수를 적용하여 Fig. 5 와 같이 최적해를 구했으며 만족도함수를 통하여 예측된 최적해에서의 주효과를 나타낸다.[9]

만족도함수는 0.90(90%)를 나타내며, 설계변수 I(산의 높이), R(곡률반경), r(곡률반경)이 4, 2.95, 2.26 일 때, 목적함수 MS(Von Mises 최대응력)와 ST(강성)이 각각 166.8 MPa, 43.3 N/mm 를 나타내어 초기값 258 MPa, 73.26 N/mm 과 비교하여 35%, 41%가 향상되었다.

벨로우즈에 적용된 크리깅 메타모델의 또 다른 장점은 두 가지 목적함수인 Von Mises 응력과 강성이 등고선도로 동시에 표현이 가능하다는 것이다. 크리깅 메타모델의 등고선도를 통하여 두 가지 목적함수인 MS(Von Mises 응력)와 ST(강성)의 상한값이 각각 170 MPa 과 45 N/mm 인 경우에, Fig. 7 과 같이 설계자는 목적함수를 만족하는 가능한

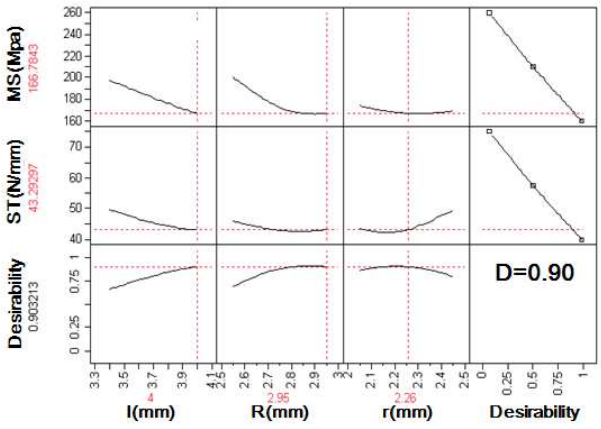

Fig. 6 Main effect for Mises stress and Stiffness

Table 3 Difference between FEA and Kriging

Response	Kriging	FEA	Diff(%)
MS[MPa]	166.8	166.8	-
ST[N/mm]	43.3	43.1	0.46

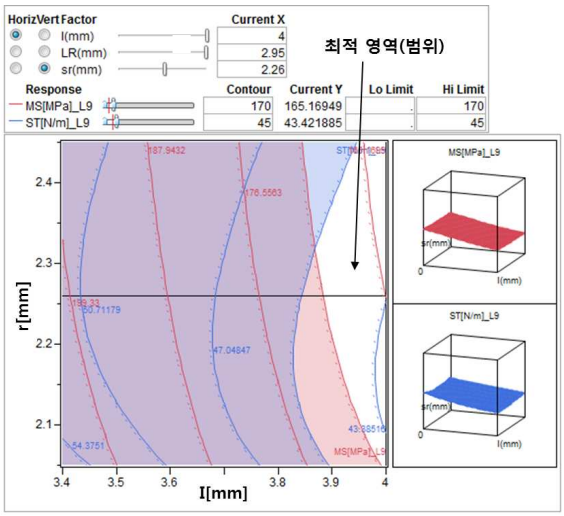

Fig. 7 Contour plot for Mises stress and Stiffness

설계 범위 I 와 r 의 선정이 가능하다. 본 연구에서 크리깅 메타모델을 통하여 예측된 1 차 최적해의 예측값을 실제 유한요소해석 결과와 비교한 결과는 Table 3 과 같다. 최대 오차를 보이는 ST(강성)인 경우에도 오차가 0.46%로 크리깅 메타모델의 예측값이 정확하게 유한요소해석의 실제값을 반영한다는 것을 보여준다.

3.3 2 차 실험계획

3.2 절 Fig. 6 의 1 차 최적해를 살펴보면 설계변수 I 와 R 의 최적값은 4 mm 와 2.95 mm 로 모두 설계 상한 값을 갖는다는 것을 알 수 있으며, 이것은 설계변수 I 와 R 의 설계 상한을 좀 더 최적해가 예측되는 영역으로 확대 이동할 필요가 있다는 것을 의미한다. 일반적인 실험계획법에서는 설계 영역이 이동되는 경우에는 이전의 실험계획을 버리고 새로운 실험계획을 실시하는 Steepest Ascent 나 Steepest Descent 를 추천한다.[10] 하지만 유한요소 해석과 같이 해석 비용과 시간이 많이 소요되는 경우에는 가능하다면 전에 생성했던 실험점들을 버리지 않고 해석에 같이 적용하는 방법이 해석 비용과 시간을 최소화할 수 있다. 3.2 절의 Table 1 과 같이 이미 9 회의 실험을 실행한 경우에 기존의 9 회 실험설계에 추가로 실험점을 생성하려면, 일반적인 실험계획이 아닌 최적설계 기법을

Table 4 Second design variable and levels

Variables	Level 1	Level 2	Level 3
I (mm)	3.4	4.0	4.4
R (mm)	2.55	2.85	3.15
r (mm)	2.05	2.25	2.45

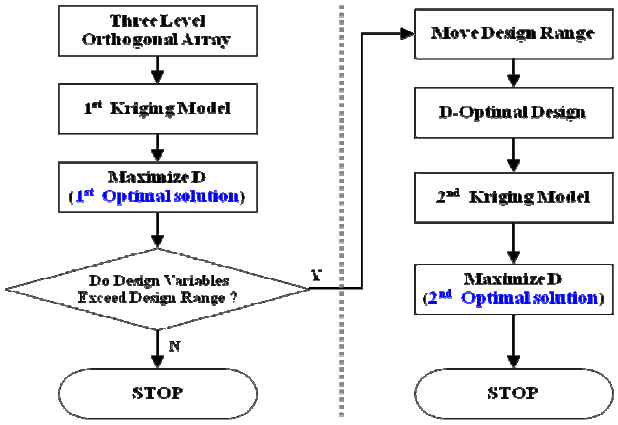

Fig. 8 Flow chart of D-optimal design

적용한 D-Optimal 방법을 적용하여 기존의 실험설계에 원하는 실험점을 순차적으로 추가할 수 있다. D-Optimal 방법은 중회귀모형의 일반화분산(Generalized variance)을 최소화하기 위하여 설계변수로만 구성된 행렬식(Determinant) $|X^TX|$를 최대화하는 실험점들을 자동적으로 생성해주는 방법으로, 일반적으로 Fedorov 의 교환 알고리즘을 적용한다.[11] 여기서 상첨자 L 과 U 는 각각 설계 변수의 하한값과 상한값을 나타낸다.

$$\begin{aligned} &Max. \quad \left|\mathbf{X}^T\mathbf{X}\right| \\ &subj.to \quad x_i^L < x_i < x_i^U \;, i = 1,2,\cdots,n \end{aligned} \tag{7}$$

본 연구에 적용된 D-optimal 최적설계 과정을 Fig. 8 에 도식적으로 나타내었다. 2 차 실험에서 확대 적용된 설계변수의 수준 및 범위는 설계 가능한 최대 범위를 고려하여 Table 4 와 같이 선정했으며, 7 회의 실험점이 추가된 총 17 회의 D-Optimal 실험점은 Table 5 와 같다.

3.4 2 차 최적해

본 연구에서는 7 회의 실험점이 추가된 총 17 회의 D-Optimal 실험점을 사용하여, 벨로우즈의 목적함수인 Von Mises 응력과 강성에 대한 크리깅 메타모델을 생성하였다. 생성된 크리깅 메타모델에 식 (6)의 만족도함수를 적용하여 최적설계를 실시한 결과는 다음 Fig. 9 과 같다.

Table 5 D-Optimal design

Simulation No.	I(mm)	R(mm)	r(mm)
1	3.4	2.55	2.05
2	3.4	2.75	2.25
3	3.4	2.95	2.45
4	3.6	2.55	2.25
5	3.6	2.75	2.45
6	3.6	2.95	2.05
7	4.0	2.55	2.45
8	4.0	2.75	2.05
9	4.0	2.95	2.25
10	4.0	2.95	2.26
11	4.3	3.15	2.05
12	4.3	2.55	2.05
13	3.85	3.15	2.45
14	3.4	3.15	2.25
15	4.3	2.85	2.45
16	4.3	2.829	2.25

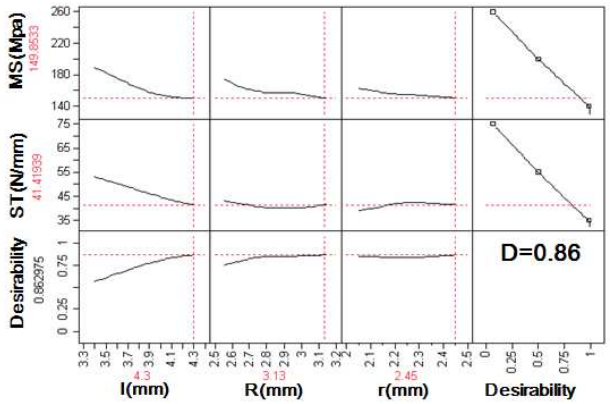

Fig. 9 Main effect after optimizing desirability function

최적설계 결과로 만족도함수(D)는 0.86(86%)를 나타내며, 설계변수 I(산의 높이), R(곡률반경), r(곡률반경)이 4.3 mm, 3.13 mm, 2.45 mm 일 때, MS(Von Mises 최대응력)과 ST(강성)이 각각 149.9 MPa, 41.4 N/mm 를 나타내어 초기값 258 MPa, 73.3 N/mm 과 비교하여 42%, 44%가 향상되었으며, 3 수준 3 인자 직교배열표를 적용한 1 차 최적해인 166.8 MPa, 43.3 N/mm 과 비교하여도 10%, 4%가 향상되었다.

설계변수인 R(곡률반경)과 r(곡률반경)을 고려했을 경우의 다목적함수 MS(Von Mises 최대응력)와 강성(ST)의 최적 영역을 Fig. 10 에 표시하였다. Von Mises 최대응력이 150MPa 보다 작고 강성이 41.4 N/m 보다 작은 경우에 동일한 설계변수를 고려하였을 경우에 MS(Von Mises 최대응력) 때문에 ST(강성)를 더 낮추는 것이 불가능하다는 것을 의미한다. 즉 Von Mises 최대응력의 최적 영역이 강성의 최적 영역이 아닌 준 최적 영역에 위치하기 때문에 강성을 최적 영역으로 선정하는 것이 불가능하다는 것을 표면도를 통해 알 수 있다.

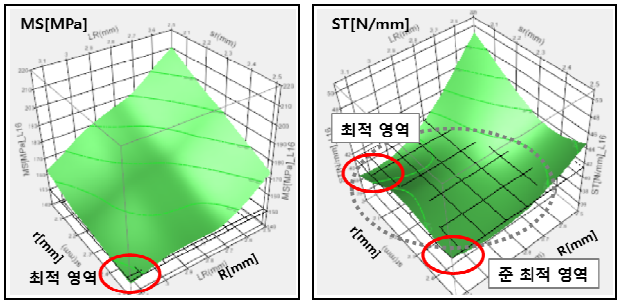

Fig. 10 Multi-objective optimal range of R and r

4. 결 론

본 연구에서는 상용차용 다층관 벨로우즈의 형상 최적설계를 실시하고자 유한요소해석과 실험계획법인 D-Optimal 방법에 기반을 둔 크리깅 메타모델을 적용하였다.

(1) 다층관 벨로우즈의 강성평가에서 분리형 유한요소모델의 유효성이 높아 최적설계에 적용이 가능한 것으로 확인되었다.

(2) 다구찌 직교배열에 기반을 둔 크리깅 메타모델에 의한 1 차 최적해를 구한 결과, I 와 R 의 최적값은 모두 설계 상한 값을 갖기 때문에, 설계변수 I 와 R 의 설계 상한을 좀 더 최적해가 예측되는 영역으로 확대 이동할 필요가 있다는 것을 알 수 있었다.

(3) D-Optimal 방법에 기반을 둔 순차적 실험계획의한 2 차 최적해를 구한 결과, 1 차 최적해와 비교하여 Von Mises 최대응력은 10%, 강성은 4%가 추가로 향상되었다.

(4) Von Mises 최대응력과 강성에 대하여 만족도함수(D)를 최대로 하는 설계변수는 I= 4.3 mm, R= 3.13 mm, r= 2.45 mm 로써 초기 값과 비교하여 Von Mises 최대응력은 42%, 강성은 44% 향상되었다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 “중소기업기술혁신개발사업” 및 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 “대학중점연구소 지원사업(2010-0020089)”으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Koh, B. K. and Park, G. J., 1997, “Development of Finite Element Analysis Program and Simplified

Formulas of Bellows and Shape Optimization," *Trans. Of the KSME(A)*, Vol. 21, pp. 1195~1208.

(2) Younsheng, L., 1990, "Strength Analysis and Structural Optimization of U-Shaped Bellows," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 42, pp. 33~46.

(3) Lee, S. H., Sim, D. S. and Oh, S. G., 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) Kim, H. S., H Kim,. J., Kim, H. G. and Lee, J. S., 2007, "Shape Optimum Design of Ship's Bellows Using Statistical Method," *J. of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 21, pp. 55~60

(5) Oh, S. K., Suh, C. H., Jung, Y-C., Kim, D. B., Sung, J. H. and Kim, Y. S., 2008, "Optimization of Design Variables of the Multi Layer Bellows Using FE-Simulation and Design of Experiment," *Fall Conference of KSTP*, pp. 277~280.

(6) Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J. and H. P., 1989, Design and Analysis of Computer Experiments, Statistical Science, Vol. 4, No. 4, pp. 409~423

(7) Oh, S. K., Lee, K. K., Suh, C. H., Park, C. W., Jung, M. H. and Kim, Y. S., 2010, "Optimization of Unified Molding Process Using the Kriging meta-model," *Spring Conference of KSME*, pp.118~122.

(8) Lee, K. K. and Han, S. H., 2010, "Development of Computational Orthogonal Array based Fatigue Life Prediction Model for Shape Optimization of Turbine Blade," *Trans. Of the KSME(A)*, Vol. 34, No. 3, pp. 611~617.

(9) SAS Institute Inc., 2009, JMP User's Guide.

(10) Montgomery, M., 1995, Response Surface Methodology – Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons.

(11) Nguyen, N. K. and Miller, F. L., 1992, "A Review of Some Exchange Algorithms for Constructing Discrete D-optimal Design," *Computational Statistics & Data Analysis*, Vol. 14, Issue 4, pp. 489~498.