

직교배열표와 크리깅모델을 이용한 게이트밸브의 최적설계

강진*, 이종문*, 강정호**, 박영철#, 박희천***

Optimization of a Gate Valve using Orthogonal Array and Kriging Model

Jin Kang*, Jong Mun Lee*, Jung Ho Kang**, Young Chul Park# and Hee Chun Park***

ABSTRACT

Kriging model is widely used as design DACE(analysis and computer experiments) model in the field of engineering design to accomplish computationally feasible design optimization. In this paper, the optimization of gate valve was performed using Kriging based approximation model. The DACE modeling, known as the one of Kriging interpolation, is introduced to obtain the surrogate approximation model of the function. In addition, we describe the definition, the prediction function and the algorithm of Kriging method and examine the accuracy of Kriging by using validation method.

Key Words : Orthogonal Array(직교배열표), Kriging Model(크리깅 모델), Design and Analysis of Computer Experiments (DACE, 전산실험계획법), Gate Valve(게이트 밸브)

기호설명

- x = design variable
- y(x) = response
- \hat{y} = predicted response
- $\hat{\beta}$ = global model
- Z = localized model
- R = correlation function
- r = correlation vector
- θ_k = correlation factor

1. 서론

최근의 설계문제에서는 제품의 기능성, 설계

기간의 단축, 해석시 드는 시간적 수치적 비용이 증가함에 따라 근사화 된 모델의 사용이 증가하고 있는 추세이다. 유한요소해석과 같은 컴퓨터 해석을 통해 실제의 응답모델을 구하는 것이 비용적, 시간적 측면에서 많은 제약이 있는 경우에는 실험 및 공정의 최적설계를 위하여 통계적 방법론인 실험계획법(design of experiments)^{1,2} 및 전산실험계획법(design and analysis of computer experiments: DACE)^{3,4}을 이용한 근사화 모델링 기법들이 많이 적용되고 있다. 이러한 통계적인 방법을 이용하여 시뮬레이션 모델을 다시 근사화하여 얻는 모델이 메타모델(meta-model)이다.

접수일: 2005년 11월 28일; 게재승인일: 2006년 6월 16일
 * 동아대학교 대학원 기계공학과
 ** 동아대학교 기계공학과
 # 교신저자: 동아대학교 기계공학과
 E-mail parkyc67@dau.ac.kr Tel. (051) 200-7652
 *** (주)KSP

본 논문에서는 실험계획법 중 실험횟수를 적게 할 수 있는 직교배열표(orthogonal array)와 비선형성이 강한 모델이나 설계 변수가 많은 문제에서도 비교적 정확한 근사가 가능한 크리깅 모델(Kriging model)^{5,9}을 최적설계에 적용하였다. 또한, 그 최적해를 이용하여 실제의 응답모델을 검토함으로써 최적설계 방법의 유용성을 검증하였다. 이러한 방법을 적용한 최적설계 대상은 게이트 밸브(gate valve)¹⁰이다. 이 밸브는 반도체 제조공정 장비의 오동작 방지 및 제조공정에 필수적인 진공상태의 유지에 이상 발생 시 신속하게 차단하여 안전성과 효율을 높이는 부품이다.

기존의 게이트 밸브는 몸통부위와 포어라인(fores line) 입구 부분을 용접하는 공법으로 제작을 하였는데 이러한 공법은 판재성형, 기계적 가공, 용접부 크랙 등에 따른 소재낭비 및 용접부 부식 등의 문제점을 가진다. 따라서 본 연구에서는 우수한 기계적 성질을 보장할 수 있는 단조공법을 이용하여 게이트밸브를 설계하였다.

본 논문의 단조공법을 이용한 게이트 밸브의 가장 큰 단점은 경량화 문제이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 직교배열표와 크리깅 모델을 이용한 최적설계 방법을 제시하였다. 목적함수는 중량 최소화이고, 구조 안전성에 영향을 미치는 처짐 및 고유진동수를 제한조건으로 설정하여 최적설계를 수행하였다. 최적 설계변수를 적용한 모델의 해석을 수행하여 초기 모델과 비교함으로써 설계의 유용성을 검토하고, 통계적 분석방법을 이용하여 최적설계 방법의 신뢰성을 평가하였다.

2. 크리깅 기법

크리깅(Kriging)은 관심 있는 지점에서 특성치를 알기 위해 이미 값을 알고 있는 주위의 값들의 가중 선형조합으로 그 값을 예측하는 방법이다. Danny Krige⁴가 이 기법을 광산에 적용하고 그 후에 Sacks 등에 의하여 크리깅 기법이 공학 분야에 적용되어 사용되었다. 기존의 크리깅 모델을 전산 실험에 적합하도록 통계적, 수학적으로 정립하여 새로운 형태의 크리깅 모델을 제시하였는데 이것이 바로 현재 최적설계분야에서 사용되고 있는 크리깅 메타모델 즉, 전산실험계획법(design and analysis of computer experiments: DACE) 모델이다.

DACE 모델에서는 전역적 근사화 모델이 다음

과 같이 구성된다.

$$y(x) = g(x) + z(x) \quad (1)$$

여기서 x 는 설계변수 b 와 설계파라미터 p 의 모든 성분을 가질 수 있는 벡터이다. 그리고, $g(x)$ 는 알고 있는 함수이며, $z(x)$ 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르는 확률변수이다. 이때 $g(x)$ 는 아래의 식 (2)와 같이 상수 β 로 대체할 수 있다.

$$y(x) = \beta + Z(x) \quad (2)$$

여기에서, β 는 n_s 개의 관측된 반응값에 기초되어 추정되어지는 미지의 상수이고, $Z(x)$ 는 전역적 모형으로부터 생성된 지역적 편의(local deviation)을 나타내며, 이로 인하여 크리깅 모형이 n_s 개의 데이터를 보간(interpolation)하게 된다.

$Z(x)$ 의 공분산 행렬(covariance matrix)은 아래의 식 (3)과 같이 표현될 수 있으며, 이때 R 은 상관행렬이고, $R(x^i, x^j)$ 은 n_s 개의 샘플링 된 데이터 x^i 와 x^j 사이에서의 상관함수이다.

$$Cov[Z(x^i), Z(x^j)] = \sigma^2 R[R(x^i, x^j)] \quad (3)$$

$$(i = 1, \dots, n_s)$$

$\hat{y}(x)$ 를 근사모델이라고 하면, $y(x)$ 와 $\hat{y}(x)$ 의 평균제곱오차(mean squared error)가 최소가 되도록 하는 $\hat{y}(x)$ 는 다음과 같이 예측된다.

$$\hat{y}(x) = \hat{\beta} + r^T(x)R^{-1}(y - \hat{\beta}q) \quad (4)$$

여기서 $\hat{\beta}$ 는 β 의 추정치, R^{-1} 은 상관행렬 R 의 역행렬, r 은 상관벡터, y 는 n_s 개의 표본데이터 벡터이고, q 는 n_s 개 성분을 갖는 단위벡터이다.

상관행렬 및 상관벡터는 다음과식과 같다.

$$R(x^j, x^k) = \text{Exp} \left[- \sum_{i=1}^n \theta_i |x_i^j - x_i^k|^2 \right] \quad (5)$$

$$(j = 1, \dots, n_s), (k = 1, \dots, n_s)$$

$$r(x) = [R(x, x^{(1)}), R(x, x^{(2)}), \dots, R(x, x^{(n_s)})]^T \quad (6)$$

여기서 θ_i 는 i 번째 설계변수에 대응하는 i 번째 모수(parameter)이다. 이때, 우도함수(likelihood function) L 은 다음과 같이 정의된다.

$$L(y; \theta, \beta, \sigma^2) = \frac{(2\pi\sigma^2)^{-n_s/2}}{\sqrt{|R|}} \cdot \text{Exp} \left[-\frac{(y - \beta q)^T R^{-1} (y - \beta q)}{2\sigma^2} \right] \quad (7)$$

식(6)으로부터 로그우도함수를 β 및 σ 에 대해 미분하고 '0'으로 놓으면, β 와 σ^2 의 최대우도추정치는 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{\beta} = (q^T R^{-1} q)^{-1} q^T R^{-1} y \quad (8)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(y - \hat{\beta} q)^T R^{-1} (y - \hat{\beta} q)}{n_s} \quad (9)$$

그리고 미지의 모수 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 는 다음 식(10)으로부터 구해진다.

$$\text{maximize} \quad -\frac{[n_s \cdot \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln|R|]}{2} \quad (10)$$

여기서 $\theta_i (i=1, 2, \dots, n) > 0$ 이다.

3. 게이트밸브 최적 설계

본 연구는 용접공법을 이용하여 생산하던 게이트밸브를 단조공법을 이용하여 생산함에 있어 형상을 최적화하는데 있다. 이를 위하여 제안하는 최적 설계 과정은 아래와 같으며, Fig. 1은 제시된 설계 과정을 나타낸 것이다.

- Step 1: 용접공법을 이용하여 생산된 제품의 구조 해석을 통한 경계조건 도출
- Step 2: 단조품 초기모델의 구조해석
- Step 3: 설계변수 및 수준수를 선정하여 직교배열표 작성
- Step 4: 크리깅 모델을 이용하여 단조품의 최적 설계
- Step 5: 최적해를 이용한 단조품의 구조해석
- Step 6: 통계적 방법을 이용한 최적해의 검증

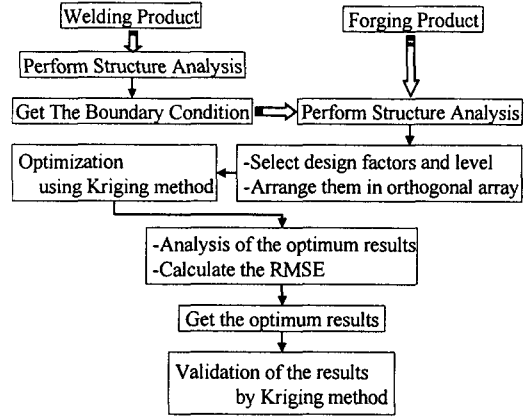


Fig. 1 Process of application design optimization

기존의 용접공법에서 제작한 게이트 밸브를 단조품에 적용하기 위해서는 경계조건 및 하중조건이 검토가 필요하다. 이 결과를 이용해서 표준 직교배열표 $L_9(3^4)$ 을 이용하여 근사모델을 작성하여 최적 설계를 수행하였다. 다음절에 그 과정을 설명한다.

3.1 용접품의 구조해석

실제 사용 환경에서 게이트 밸브는 중력방향으로 0.2mm 이상의 처짐이 발생하지 않아야 한다. 그러나 0.2mm 이내의 처짐량을 만족하는 최대 작용 하중의 크기를 알지 못하므로 안전성이 만족한다고 가정되는 기존 용접품의 구조해석^{11,12}을 통하여 최대 작용 하중을 구하였다.

구조해석은 밸브 체결 환경을 고려해서 끝단 면을 완전 구속하였다. 또한 밸브와 배관이 체결되는 면은 중력 방향으로 일정한 힘을 받으므로 체결 면에서 임의의 일정거리 떨어진 한 점에서 Remote force로 체결 면 전체에 정확히 일정한 힘을 부여하였다.

Fig 2는 CATIA 프로그램을 이용한 용접제품 형상을 나타내며 이를 ANSYS Workbench에 불러와서

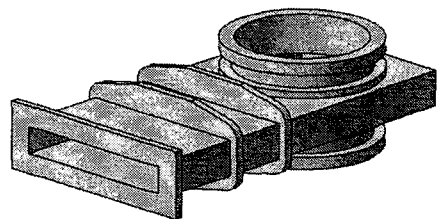


Fig. 2 Gate valve using welding method

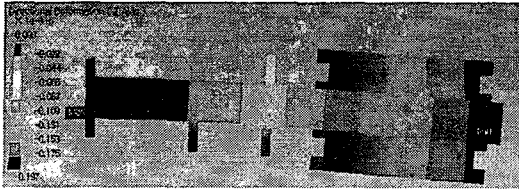


Fig. 3 Deformation of welding product

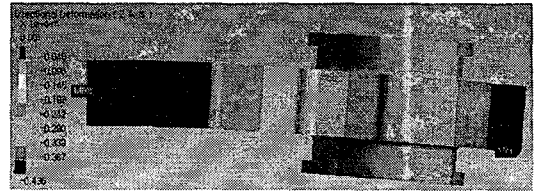


Fig. 5 Deformation of forging product

Table 1 Results of each remote force

Remote force (N)	2000	1500	1000	1100	1050	1020
Deformation (mm)	0.394	0.295	0.197	0.216	0.207	0.201

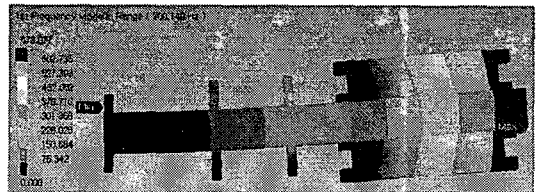


Fig. 6 Frequency of welding product

Hex-dominate 격자를 이용하여 6면체 요소를 생성하였다. Remote force를 변화시키며 해석을 반복 수행한 결과, 0.2mm 처짐의 제한을 만족하는 최대하중은 1000N이었다.

Fig 3은 이때의 구조해석 결과를 나타낸다. 최대하중을 구하기 위하여 그 값을 변화하여 해석한 결과는 Table 1에 정리하였다.

3.2 단조품 초기 모델의 구조해석

용접품의 해석으로 구한 최대 작용하중인 1000N을 적용하여 초기 단조품 모델의 구조해석을 수행하였다. 구속조건 및 해석방법은 용접품과 같이 배관과의 체결 면은 완전 구속을 부여하고, 체결 면에서 수직 방향으로 0.06m 떨어진 한 점에서 Remote force로 1000N을 부여하였다.

Fig 4는 단조품 초기 모델의 형상을 나타낸 것이고, 그 해석 결과는 Fig 5와 같다. 처짐량은 0.0436mm로써 요구조건인 0.2mm에 대하여 21.8% 정도 수준이므로 매우 과다설계 되었음을 알 수 있다. 따라서 단조품의 최적설계가 요구된다.

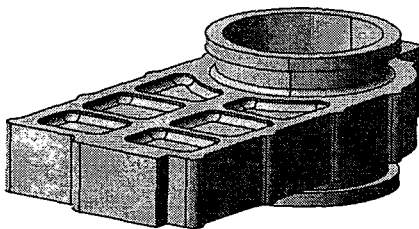


Fig. 4 Gate valve shape using forging method

3.3 게이트밸브 최적 설계

3.3.1 설계의 정식화

본 연구에서 개발하는 게이트 밸브는 구조적 안전성을 만족하는 동시에 경량화 되어야 하므로 중량을 목적함수로 설정하였다. 일반적으로 구조적 안전성을 평가할 때 응력과 고유진동수를 고려하지만 본 연구의 게이트 밸브는 응력보다는 처짐량이 더 중요시되므로, 이를 첫 번째 제한 조건으로 설정하였다. 또한 밸브의 실제 사용 조건을 고려해보면 외팔보의 거동과 거의 흡사하므로 1차 고유진동수를 고려하였다.

기존의 용접품은 처짐량이 0.2mm 이하를 만족하여야 하였지만 단조의 경우에는 가공단계에서의 안전성을 고려하여야 하므로 40%의 안전율을 부과하여 0.08mm 이하를 만족시키도록 처짐량(δ)을 선정하였다. 또한 최대 작용 하중이 작용할 때 구조 안전성을 만족하는 고유진동수를 제한조건으로 설정하였다.

Fig. 6은 고유진동수 해석결과로 그 값은 200.15Hz이다. 제작오차를 고려하여 220Hz 이상을 만족하도록 하고 하중조건을 고려한 최대 처짐량을 제한조건으로 설정하였다. 이상의 조건들에 대한 최적설계 정식화하면 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimize} && \text{Weight} \\
 &\text{Subject to} && \delta \leq 0.08\text{mm} \\
 &&& \text{Frequency} \geq 220\text{Hz}
 \end{aligned} \tag{11}$$

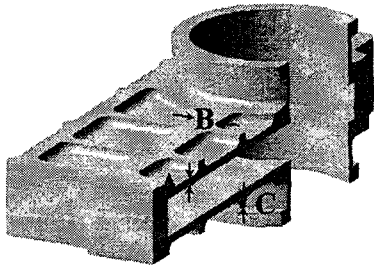


Fig. 7 Design variables for gate valve

Table 2 Design variables and level

Level	D. V.	A (mm)	B (mm)	C (mm)
1		3	5	6
2		5	12.5	8
3		7	20	10

Table 3 Analysis results according to orthogonal array

Exp	Design variables				Experiment condition	Weight (Kg)	Def. (mm)	Freq. (Hz)
	A	B	C	e				
1	1	1	1	1	A ₀ B ₀ C ₀	12.545	0.099	217.3
2	1	2	2	2	A ₀ B ₁ C ₁	13.639	0.082	229.9
3	1	2	3	3	A ₀ B ₂ C ₂	14.764	0.068	246.0
4	2	1	2	3	A ₁ B ₀ C ₂	15.189	0.061	257.1
5	2	2	3	1	A ₁ B ₁ C ₀	14.327	0.067	253.9
6	2	3	1	2	A ₁ B ₂ C ₁	15.456	0.057	265.6
7	3	1	3	2	A ₂ B ₀ C ₁	16.825	0.046	287.1
8	3	2	1	3	A ₂ B ₁ C ₂	17.978	0.040	298.6
9	3	3	2	1	A ₂ B ₂ C ₀	16.109	0.049	287.0

3.3.2 최적설계

게이트 밸브는 설계 규격에 의하여 설계되므로, 설계 규격에 정의되지 않았으나 경량화 및 안전성에 영향을 미치는 곳을 설계 변수로 설정하여 Fig. 7에 나타내었다. 실험은 L₉(3⁴) 직교배열표로 배치하였다. 각각의 설계변수는 3 ≤ A ≤ 7, 5 ≤ B ≤ 20, 6 ≤ C ≤ 10의 제한범위 내에서 3수준을 정하여 구조해석을 수행하였다.

Table 2는 3개의 설계변수에 따른 3개의 수준수를 나타낸다. 구조해석을 통하여 얻은 처짐량 및 고유진동수는 Table 3에 나타내었다.

게이트 밸브의 최적설계를 위하여 구조해석으로

Table 4 Comparison optimum to initial model

Exp.	Weight (Kg)	Deformation (mm)	Frequency (Hz)
Initial model	17.14	0.044	294.8
Optimum model	13.439	0.08	260.3

구한 각 실험점에서의 해를 DACE 모델에 적용하여 최적의 설계변수 값을 찾았다. DACE 모델의 수식 계산은 엑셀(Excel) 프로그램을 이용하였다.

DACE 모델인 $\hat{y}(x)$ 는 상관행렬 R에 대한 함수이고, $R(x^j, x^k) = \text{Exp} \left[- \sum_{i=1}^n \theta_i |x_i^j - x_i^k|^2 \right]$ 이므로, θ_i 를 구해야 한다.⁶ 이 값은 MLE(maximum likelihood estimator) 과정을 통하여 결정되는데, 위에서 언급된 식 (10)을 최대화(maximization)하는 θ^* 를 구하는 과정이며 구하는 방법은 아래와 같다.

Step 1: 초기값 θ_i 를 가정하고, 상관행렬 R을 구한다.

Step 2: R^{-1} 와 |R|을 구한다.

Step 3: 상관벡터 r과 전역모델 $\hat{\beta}$ 를 구한다.

Step 4: $\hat{\sigma}^2$ 을 구하여 목적함수를 구성한다.

이와 같은 과정에 의하여 중량, 처짐량, 고유진동수 각각에 대한 θ^* 값을 얻어서 DACE 모델이 구성된다. 그리고 구해진 각각의 DACE 모델을 엑셀 프로그램의 해 찾기(Excel solver) 기능을 이용하여 최적해를 구하였다.

최적화 결과 제한조건을 만족하는 최적의 설계변수는 A = 3.39mm, B = 16.39mm, C = 6mm 이며, 이때의 중량은 13.439kg, 변위는 0.08mm, 고유진동수는 260.3Hz 이다.

Table 4는 최적설계 결과를 초기 모델과 비교한 것이다. 최적화된 모델은 중량의 21.6% 감소하고도 처짐량과 고유진동수의 제한조건을 모두 만족하였다.

4. 최적해의 신뢰성 검증

4.1 재해석

크리깅 모델에 의하여 얻은 게이트 밸브 설계변수의 최적 해를 이용하여 구조해석을 수행하였다.

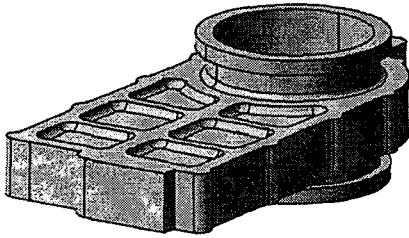


Fig. 8 Shape of optimized design

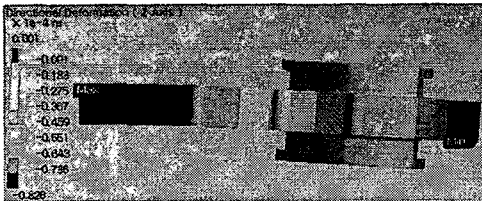


Fig. 9 Deformation of optimized design

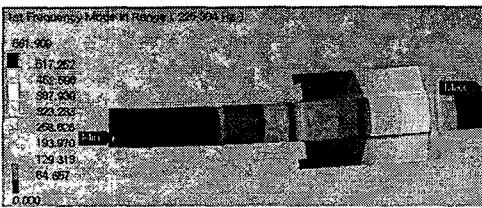


Fig. 10 Frequency of optimized design

Fig 8은 최적 해를 실제 모델에 적용한 형상을 나타낸다.

Fig 9와 Fig 10은 이 모델의 구조해석 결과로 얻은 처짐량과 고유진동수를 각각 나타낸다. 해석결과 중량은 12.89Kg, 처짐량은 0.083mm 이며, 고유진동수는 225.Hz 로써 크리깅 모델에 의하여 계산된 값과 거의 일치함을 알 수 있다.

4.2 수식에 의한 검증

크리깅의 근사화된 모델의 타당성은 RMSE(root mean square error)의 식 (12) 또는 MAXAE(maximum absolute error)의 식 (13)로 평가할 수 있다.^{13,14,15}

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (12)$$

$$MAXAE = \max [|y_i - \hat{y}_i|] \quad (i = 1, \dots, n_s) \quad (13)$$

Table 5 Experiment array for validation

Exp.	Design Variables		
	A (mm)	B (mm)	C (mm)
1	3	5	10
2	5	12.5	8
3	7	5	6
4	3	20	6
5	5	20	10
6	7	12.5	8

Table 6 Results of validation

Exp.	Weight (Kg)		Deformation (mm)		Frequency (Hz)	
	y_i	\hat{y}_i	y_i	\hat{y}_i	y_i	\hat{y}_i
1	14.444	13.581	0.075	0.081	233.8	229.5
2	15.322	15.250	0.059	0.061	261.6	260.7
3	15.911	15.89	0.021	0.023	281.1	278.7
4	14.613	13.523	0.071	0.079	240.0	236.4
5	16.465	16.158	0.050	0.054	275.3	270.2
6	16.959	17.361	0.045	0.042	291.3	295.9
MAX AE	1.090		0.0008		5.1	
RMS E	0.4938		0.0038		3.0766	

크리깅 모델을 평가하기 위하여 직교배열표 실험값 이외에 임의로 6개의 실험값을 지정하여 Table 5에 나타내었다. 이 값을 적용하여 모델링한 새로운 형상으로 구조해석을 수행한 결과를 식 (11), 식 (12)에 대입하여 계산함으로써 타당성을 평가하였다. 구조해석과 크리깅 모델에 의한 결과와 식에 의하여 구한 RMSE 값과 MAXAE 값은 Table 6에 정리하였다.

4.3 교차검증

교차검증(cross validation)은 크리깅을 통하여 예측된 자료만을 이용하여 본래의 자료 값을 다시 예측함으로써 크리깅 기법의 타당성을 검증하는 기술이다. 교차검증이 잘 된 경우에는 그 산점도가 직선 주위에 대칭적이고 고르게 분포한다.

크리깅 모델에 대한 검증은 참값과 예측 값의 기울기가 1인 직선상에서 벗어나는 정도를 보고 평가하였다. Fig. 11~13은 중량, 처짐량, 고유진동수

각각의 특성치에 대한 교차검증의 결과를 도시한

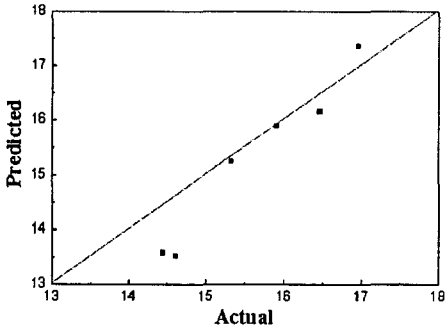


Fig. 11 Cross validation for weight

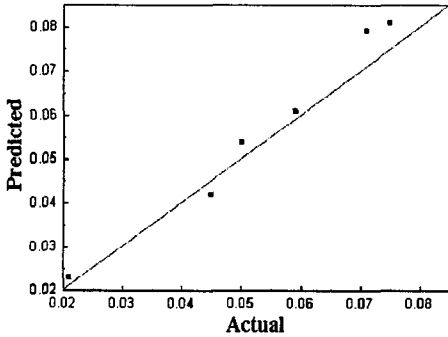


Fig. 12 Cross validation for deformation

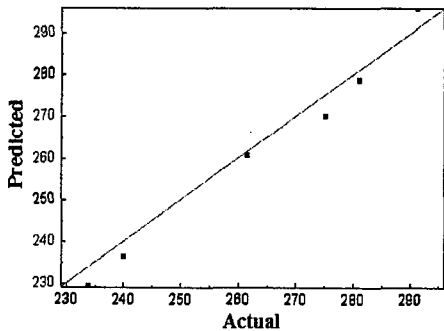


Fig. 13 Cross validation for frequency

것으로 주어진 자료의 참값과 예측 값이 기울기가 1인 직선의 양편에 고르게 존재하며 작은 분산을 가짐을 알 수 있다. 즉, 그래프를 통하여 크리깅 모델 방법의 타당성이 검증되었다.

5. 결론

본 연구에서는 기존에 용접 공법으로 생산되던 게이트밸브를 단조 공법으로 생산하기 위한 최적설계를 수행하였다. 이를 위하여 직교배열표를 이용하여 실험을 계획한 후, 전산실험을 수행하고 이를 크리깅 기법을 이용하여 근사적으로 정의하여 최적설계를 수행하였다. 또한, 이렇게 구한 최적해를 전산실험 및 수식에 의하여 검증함으로써 크리깅 기법의 유용성 및 신뢰성을 확인하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 게이트밸브 최적화 문제에 크리깅 기법을 적용하여 효율적인 최적화 수행이 가능함을 확인하였으며, 초기모델과 비교하여 약 21.6%의 중량 감소율을 얻으면서 변위와 고유진동수는 요구된 제한 조건을 만족하였다.

(2) 크리깅 기법에 의한 최적화 결과, 예측된 설계변수 $A = 3.39\text{mm}$, $B = 16.39\text{mm}$, $C = 6\text{mm}$ 이며 이때 교차검증을 이용하여 타당성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Park, S. H., "Modern Design of Experiments," Minyoung-sa, pp. 377-435, 2004.
2. Park, S. H., "Application Design of Experiments," Youngji-sa, pp. 233-235, 1990.
3. Yi, J. W., Park, J. S., Lee, K. H. and Park, G. J., "Development of an Optimization Algorithm Using Orthogonal Arrays in Discrete Space," Journal of KSME, Vol. 25, No. 10, pp. 1621-1626, 2001.
4. Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J. and Wynn, H. P., "Design and Analysis of Computer Experiments," Statistical Science, Vol. 4, No. 4, pp. 409-435, 1989.
5. Baek, S. H., Cho, S. S., Kim, H. S. and Joo, W. S., "Trade-off Analysis in Multi-objective Optimization Using Chebyshev Orthogonal Polynomials," Journal of Mechanical Science and

- Technology, Vol. 20, No. 3, pp. 366-375, 2006.
6. Lee, K. H., "Optimization of a Driver-Side Airbag Using Kriging Based Approximation Model," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 1, pp. 116-126, 2005.
 7. Guinta, A. and Watson, L., "A Comparison of Approximation Modeling Techniques: Polynomial Versus Interpolation Models," *Proceedings of the 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, St. Louis, MO, AIAA, Vol. 2, No. 2-4, pp. 392-440, 1998.
 8. Ryu, J. S., Kim, M. S., Cha, K. J., Lee, T. H. and Choi, D. H., "Kriging Interpolation Methods in Geostatistics and DACE Model," *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 5, pp. 619-632, 2002.
 9. Martin, J. and Simpson, T., "Use of Adaptive Metamodeling for Design Optimization," *Proceedings of the 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, Atlanta, Georgia, AIAA, pp. 2167-2175, 2002.
 10. Kang, J. H., Kang, J. and Park, Y. C., "Optimization of a Gate Valve using Design of Experiments and the Kriging Based Approximation Model," *Journal of Korean Society of Machine Tool Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 125-131, 2005.
 11. Choi, J. S. and Park, Y. C., "A Study on the Optimization of a Devided Ball Valve using Characteristic Function," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 8, pp. 108-117, 2005.
 12. Bae, I. H., Lee, D. H. and Park, Y. C., "Mutli-objective Optimization of Butterfly Valve using the Coupled-Field Analysis and the Statistical Method," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 9, pp. 127-134, 2005.
 13. Guinta, A. and Watson, L., "A Comparison of Approximation Modeling Techniques: Polynomial Versus Interpolating Models," *Proceedings of the 7th AIAA/USAF/NASA/ ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, St. Louis, MO, AIAA, Vol. 2, pp. 392-440, 1998.
 14. Simpson, T., Korte, J., Mauery, T. and Mistree, F., "Comparison of Response Surface and Kriging Models for Multidisciplinary Design Optimization," *Proceedings of the 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, St. Louis, MO, AIAA, Vol. 2, pp. 381-391, 1998.
 15. Martin, J. and Simpson, T., "Use of Adaptive Metamodeling for Design Optimization," *Proceedings of the 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, Atlanta, Georgia, AIAA, pp. 2167-2175, 2002.