

크리깅 근사모델을 이용한 마이크로 자이로스코프의 구조설계

김종규*, 이권희#

A Structural Design of Microgyroscope Using Kriging Approximation Model

Jong-Kyu Kim*, Kwon-Hee Lee#

ABSTRACT

The concept of robust design was introduced by Dr. G. Taguchi in the late 1940s, and his technique has become commonly known as the Taguchi method or the robust design. In this research, a robust design procedure for microgyroscope is suggested based on the kriging and optimization approaches. The kriging interpolation method is introduced to obtain the surrogate approximation model of true function. Robustness is calculated by the kriging model to reduce real function calculations. For this, objective function is represented by the probability of success, thus facilitating robust optimization. The statistics such as mean and variance are obtained based on the reliable kriging model and the second-order statistical approximation method.

Key Words : Robust design(강건설계), Microgyroscope(마이크로 자이로스코프), Probability of success(성공확률), Kriging(크리깅)

1. 서 론

마이크로 자이로스코프는 부피가 크고 제작비용이 많이 들었던 과거의 자이로스코프의 단점을 극복할 수 있는 센서 부품으로 인식되고 있다. 이는 소비재의 소형화에 대한 시장의 요구에 따라 일본의 무라다(Murata)사와 토킨(Tokin)사가 압전재료를 이용한 소형 진동형 자이로스코프를 개발하면서 사용범위가 확대되고 있다^[1,2]. 90년대 이후부터 관성체의 각속도

를 검출하기 위한 각속도 센서인 자이로스코프는 반도체 제작기술을 이용한 가공방식으로 제작되는 실리콘 진동형 마이크로자이로스코프가 등장하였다^[1,2]. 이러한 실리콘 진동형 마이크로자이로스코프를 만들기 위해서는 래핑(lapping) 공정^[1,2]을 거치게 된다. 그러나 이 공정에서의 가공오차는 구조물의 형상 치수에 비해 상당히 크다. 또한 구조 패턴 공정의 사진식각 작업에 의한 에칭 시 구조물이 두께 방향으로 깎여 나가는 현상이 발생한다. 공정 중의 이러한 현상은 잡음인자로 간주하여 구조설계 시 반드시 고려해야 한다.

구조물 치수의 불확실성은 진동형 자이로스코프가 반드시 유지해야 하는 설계요구사항(design requirement)

* 동아대학교 대학원 기계공학과

교신저자 : 동아대학교 기계공학부

E-mail : leekh@donga.ac.kr

의 만족을 어렵게 한다. 즉, 설계 치수의 불확실성은 진동형 자이로스코프의 설계요구사항 중인 하나인 가진방향 및 측정방향의 두 고유주파수에 대한 목표값을 유지할 수 없게 한다. 또한 간섭을 발생시키는 원인이 되며 두 모드의 고유주파수의 차이가 큰 변동을 갖게 된다. 이러한 현상들은 실리콘 진동형 자이로스코프의 주요 기능을 무력화 시켜 생산 시 자이로스코프의 수율(yield)을 감소시킨다.

참고문헌 [1]에서는 설계공리(axiomatic design) 및 다구찌법을 적용하여 실리콘 진동형 마이크로자이로스코프 설계를 구현하였다. 그러나 이는 몇 개의 실험으로부터 구해진 해로서 최적해라고 말 할 수는 없다. 또한 참고문헌 [3]에서는 고유진동수의 평균 및 분산에 대한 크리깅 모델을 이용하여 최적해를 구하려는 시도를 하였으나 평균 및 분산의 모델에 큰 오차가 발생하였다. 본 연구에서는 참고문헌 [1], [3]의 단점을 보완하기 위하여 다음과 같은 방법을 제안한다.

먼저 가진모드와 측정모드의 고유진동수에 대한 크리깅 근사모델을 생성한다. 그 다음, 각 고유진동수의 평균 및 분산을 고유진동수 크리깅모델의 해석적 민감도를 이용하여 근사화시킨다^[4]. 이때 보다 정확한 통계량을 산출하기 위하여 각 고유진동수의 이계미분을 이용한다. 각 통계량이 산출되면 마이크로자이로스코프의 설계 성공확률을 정의할 수 있다. 이것을 목적함수로 설정하고 고유진동수의 목표값에 대한 제한조건을 부여함으로써 강건설계를 위한 정식화를 정의할 수 있게 된다.

이 정식화는 설계변수의 함수로 표시된 수학적 명시함수로서 민감도기반 최적화알고리즘이나 전역적 최적화 알고리즘을 모두 이용할 수 있다. 본 연구에서는 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘을 이용하였다. 또한 고유진동수를 구하기 위하여 상용프로그램인 GENESIS를 이용하였고 크리깅 근사모델 구성 시 최적파라미터를 결정하기 위하여 DOT를 이용하였다.

2. 강건설계의 구현

2.1 크리깅 근사모델

실제 함수를 대치 할 수 있는 크리깅 근사 모델의

생성에 관한 자세한 내용은 참고문헌 [5-8]에 수록되어 있다. 변수 \mathbf{x} 로 표시되는 함수 $f(\mathbf{x})$ 의 크리깅 근사 모델은 다음과 같이 표시된다.

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

여기서 \mathbf{y} 는 n_s 개의 표본점에서의 $f(\mathbf{x})$ 값이고, \mathbf{q} 는 단위 벡터, $\hat{\beta}$ 는 상수, \wedge 는 추정치를 의미한다. 그리고 상관행렬 \mathbf{R} 및 상관벡터 \mathbf{r} 은 다음과 같이 정의된다.

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

$$\mathbf{r}(\mathbf{x}) = [R(\mathbf{x}, \mathbf{x}^{(1)}), R(\mathbf{x}, \mathbf{x}^{(2)}), \dots, R(\mathbf{x}, \mathbf{x}^{(n_s)})]^T \quad (3)$$

식 (2)의 파라미터 θ_i 는 다음으로부터 구해진다.

$$\text{maximize} \quad -\frac{[n_s \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln|\mathbf{R}|]}{2}, \quad (\theta_i > 0) \quad (4)$$

본 연구에서는 식 (4)를 풀기 위해 DOT의 순차이차계획법을 이용하였다. 식 (1)로 구해진 근사모델을 평가하기 위해서 다음 세 개의 평가지수를 계산하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} (f_i - \hat{f}_i)^2} \quad (5)$$

$$MAXERR = \text{MAX}[|f_i - \hat{f}_i|, i=1, 2, \dots, n_t] \quad (6)$$

$$\text{Ave. \% error} = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} \left| \frac{\hat{f}_i - f_i}{f_i} \right| \times 100 \quad (7)$$

여기서 n_t 는 실험점의 수이다.

2.2 강건설계^[9]

반응치 함수 $f(\mathbf{x})$ 는 설계변수 \mathbf{b} 와 파라미터 \mathbf{p} 의 불확실성으로 인해 분포를 갖는다. 즉 $\mathbf{x}=\mathbf{b}$ 또는 $\mathbf{x}=[\mathbf{b} \ \mathbf{p}]$ 이다. 설계파라미터의 불확실성이 존재 하지 않는 문제의 분포를 Fig. 1과 같다고 가정해 보자. 이 때 설

계점 b_{12} 가 b_{11} 보다 더 강건한 설계점이라고 볼 수 있다. 본 연구에서는 마이크로 자이로스코프 구조설계에서 이러한 점을 찾는 것이 목적이다. 즉, 주어진 설계요구조건을 만족시키면서 강건성을 최대화 하는 설계점을 찾는 것이다.

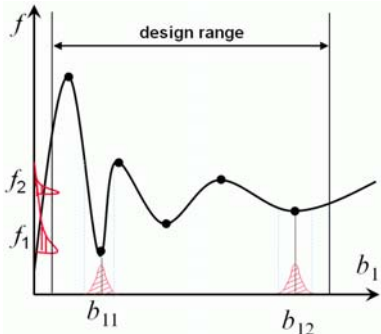


Fig. 1 Distribution of multi-modal function

강건성은 반응치 함수 $f(\mathbf{x})$ 의 평균 μ_f 및 분산 σ_f^2 의 통계량으로 측정할 수 있다. 최적설계의 관점에서는 다음과 같은 다중목적함수로 표현 할 수 있다.

$$\text{Minimize } [(\mu_f - m_f)^2, \sigma_f^2] \quad (8)$$

$$\text{Subject to } \mathbf{b}_L - \Delta \mathbf{b} / 2 \leq \mathbf{b} \leq \mathbf{b}_U + \Delta \mathbf{b} / 2 \quad (9)$$

여기서 m_f 는 반응치의 목표값, \mathbf{b}_L 은 설계하한값, \mathbf{b}_U 는 설계상한값, $\Delta \mathbf{b}$ 는 공차를 표시한다. 식 (1)의 m_f 는 망대특성(larger-the-better type characteristics)에서는 ∞ , 망소특성(smaller-the-better type characteristics)에서는 $-\infty$ 에 해당한다.

2.3 성공확률의 정의^[9]

본 연구에서는 설계 성공확률을 정의함으로써 강건성을 직접 측정하고자 하였다. 성능함수가 정규분포라고 가정하였을 경우, 성공확률은 식 (10)과 같이 표시할 수 있다.

$$P_s = \int_{f_L}^{f_U} \frac{1}{\sigma_f \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(f - \mu_f)^2}{2\sigma_f^2}\right] df \quad (10)$$

여기서 f_L 및 f_U 는 각각 반응치의 허용하한값 및 허

용상한값을 표시한다. 따라서 망대특성에서는 f_U 는 ∞ , 망소특성에서는 f_L 이 $-\infty$ 가 된다. 반면에 반응치의 목표값이 있는 문제에서 $f_U - f_L$ 는 설계 허용범위에 해당된다. 확률밀도함수에서 평균 μ_f 및 분산 σ_f^2 은 크리깅 근사모델로 대체될 것이다.

식 (10)은 오차함수로 표시하면 식 (11)과 같다.

$$P_s = \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{f_U - \mu_f}{\sigma_f \sqrt{2}}\right) - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{f_L - \mu_f}{\sigma_f \sqrt{2}}\right) \quad (11)$$

본 연구에서는 식 (11)을 이용하여 성공확률을 계산하였다. 즉, 식 (8)의 다중목적함수 대신에 식 (11) 또는 식(11)로 표시되는 성공확률을 최대화함으로써 강건설계를 구현할 수 있다.

2.4 크리깅 근사모델을 이용한 강건설계^[9]

식 (10) 또는 식 (11)에 포함된 μ_f 및 σ_f^2 를 직접 구하는 것은 일반적으로 불가능하므로 반응함수 f 의 근사모델을 가지고 산출한다. 대부분의 연구에서는 반응치의 분산을 다음과 같이 근사화시키고 있다.

$$\sigma_f^2 \cong \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_x^2 \sigma_{x_i}^2 \quad (12)$$

여기서 n 은 변수의 수, $\bar{\mathbf{x}}$ 은 변수벡터의 평균, $\sigma_{x_i}^2$ 은 변수 x_i 의 분산을 표시한다. 그러나 이식을 이용하면 Fig. 1과 같은 반응함수에서는 문제점이 발생한다. 즉, Fig.1에서 점으로 표시된 모든 설계점은 식 (12)에 의하면 모두 0의 분산을 갖는다. 그러나 b_{11} 이 Fig. 1과 같은 분포를 갖는다면 실제로는 b_{12} 가 가장 작은 분산 σ_f^2 을 갖고 있다.

본 연구에서는 식 (12)의 단점을 보완하고자 통계량 μ_f 및 σ_f^2 에 대한 근사식 계산 시, 테일러급수의 2차항 까지를 고려하였다. 즉, 다음과 같다.

$$\mu_f \cong f(\mathbf{x})_x + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_j^2}\right)_x \sigma_{x_j}^2 \quad (13)$$

$$\sigma_f^2 \cong \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_x^2 \sigma_{x_i}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}\right)_x (\sigma_{x_j}^2)(\sigma_{x_i}^2) \quad (14)$$

여기서 반응함수 $f(\mathbf{x})$ 는 크리깅 모델로 대체될 경우, 식 (13), (14)의 계산은 큰 부담이 되지 않는다.

반응함수의 일계미분 및 이계미분 값은 크리깅 근사모델에 대해 다음과 같이 결정된다^{4,9)}.

$$\frac{\partial \hat{f}(\mathbf{x})}{\partial x_i} = \frac{\partial \mathbf{r}^T(\mathbf{x})}{\partial x_i} \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{f} - \hat{\beta} \mathbf{q}), \quad i = 1, \dots, m \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 \hat{f}(\mathbf{x})}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial^2 \mathbf{r}^T(\mathbf{x})}{\partial x_i \partial x_j} \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{f} - \hat{\beta} \mathbf{q}), \quad i, j = 1, \dots, m \quad (16)$$

여기서

$$\frac{\partial \mathbf{r}^T(\mathbf{x})}{\partial x_i} = [-2\theta_i(x_i - x_i^1)A^1, -2\theta_i(x_i - x_i^2)A^2, \dots, -2\theta_i(x_i - x_i^{ms})A^{ms}] \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{r}^T(\mathbf{x})}{\partial x_i \partial x_j} = [(-2\theta_i(x_i - x_i^1))(-2\theta_j(x_j - x_j^1))A^1, \dots, (-2\theta_i(x_i - x_i^{ms}))(-2\theta_j(x_j - x_j^{ms}))A^{ms}] \quad (i \neq j) \quad (18)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{r}^T(\mathbf{x})}{\partial x_i^2} = [-2\theta_i A^1(1 + 2\theta_i(x_i - x_i^1)^2), -2\theta_i A^2(1 + 2\theta_i(x_i - x_i^2)^2), \dots, -2\theta_i A^{ms}(1 + 2\theta_i(x_i - x_i^{ms})^2)] \quad (i = j) \quad (19)$$

$$A^k = \text{Exp}[-\theta_1((x_1 - x_1^k)^2) - \dots - \theta_m((x_m - x_m^k)^2)] \quad (20)$$

크리깅 근사모델을 기초로 하여 식 (13), (14)의 통

계량을 계산할 수 있고 이 값들에 의해 설계성공확률 식 (11)을 구할 수 있다.

3. 마이크로 자이로스코프의 강건설계

3.1 강건설계 정식화

진동형 자이로스코프의 자세한 원리는 참고문헌 [1]~[3]에 수록되어 있다. 구조적으로 마이크로자이로스코프는 가진방향(Fig. 2(a)에서 x방향으로의 병진운동)과 측정방향(Fig. 2(a)에서 짐벌의 x방향 회전운동)의 두 방향을 분리하도록 설계되었다. 구조설계시 마이크로 자이로스코프는 분리된 두 고유진동수를 근접시키는 것이 유리하지만 두 고유진동수의 모드가 서로 바뀌어서는 안 된다는 제약이 있다.

실리콘형 마이크로 자이로스코프는 저압화학기상증착(LPCVD: Low Pressure Chemical Vapor Deposition) 폴리실리콘을 이용한 역표면미세 가공기술이 사용된다. 이 공정 중에 래핑과 연마가 포함되어 있는데 이 과정 중에 특히 두께 방향으로의 큰 치수 변화가 생긴다. 이 크기는 대략 -7.5~2.5%의 치수변화를 가져온다. 또한 에칭공정의 오차는 Fig. 2(a)의 xy 평면상에서 -8.3~0.0%의 치수변화를 가져 오게 한다. 이들로 인해 가진주파수와 측정 주파수에 큰 변동이 발생하여 수율을 떨어뜨린다. 따라서 이러한 마이크로자이로스코프의 구조설계는 전형적인 강건설계 문제로 볼 수 있다. 즉, 공정오차를 잡음으로 대치시켜 생각할 수 있다.

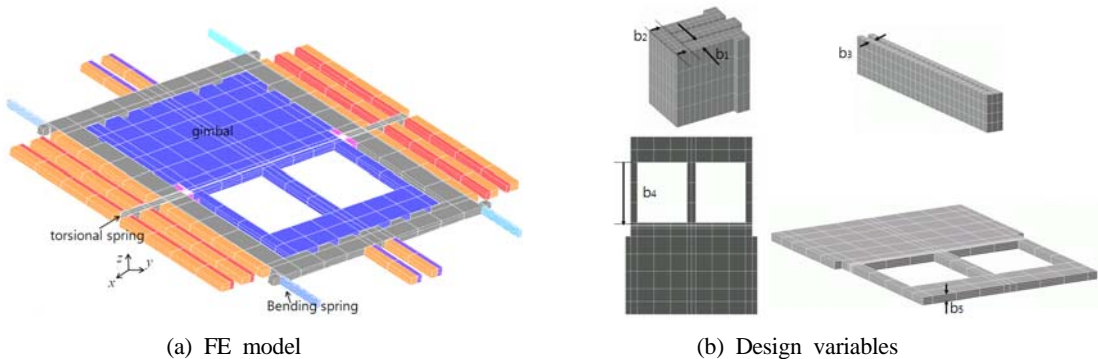


Fig. 2 Microgyroscope

설계목적은 에칭 시 발생하는 언더컷 등을 고려한 제작오차에 대하여 제2차 고유진동수인 비틀림 진동수(측정모드의 고유진동수) ω_a 와 첫번째 고유진동수인 굽힘진동수(가진모드의 고유진동수) ω_b 의 차이가 강건해야하는 것이다. 제한조건으로는 첫번째 고유진동수인 굽힘진동수와 두번째 고유진동수인 비틀림진동수가 서로 뒤바뀌어서는 안 된다는 것이다. 또한 그들의 주파수가 특정 범위 안에 들어와야 한다는 것이다.

식 (11)의 성공확률은 식 (21)과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$P_s = \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{z_u - \mu_z}{\sigma_z \sqrt{2}} \right] - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{z_l - \mu_z}{\sigma_z \sqrt{2}} \right] \quad (21)$$

여기서 새로운 확률변수 $z = \omega_l - \omega_b$ 이고 z_u 는 두 고유진동수 차이의 상한허용값, z_l 은 하한허용값이다. 따라서 $\mu_z = \mu_{\omega_l} - \mu_{\omega_b}$ 이고 $\sigma_z^2 = \sigma_{\omega_l}^2 + \sigma_{\omega_b}^2$ 이 된다. 식 (21)을 목적함수로 설정하면 강건설계를 위한 정식화는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\text{Find } \mathbf{b} = [b_1, b_2, b_3, b_4, b_5] \quad (22)$$

$$\text{Maximize } P_s = \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{z_u - \mu_z}{\sigma_z \sqrt{2}} \right] - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{z_l - \mu_z}{\sigma_z \sqrt{2}} \right] \quad (23)$$

$$\text{Subject to } \bar{\omega}_l \leq \omega_l \leq \bar{\omega}_m \quad (24)$$

여기서 ω_l , ω_m 는 각각 비틀림 고유진동수의 하한값 및 상한값이다.

설계변수는 Fig. 2(b)와 같이 5개로 설정하였다. 설계변수 b_1 , b_2 는 비틀림스프링의 강성을, b_3 는 굽힘스프링의 강성을 조정하는 역할을 한다. 각 설계변수의 하한값 및 상한값을 Table 1에 정리하였다. 여기서 C_i 는 i 번째 설계변수의 초기설계 값이다.

3.2 고유진동수의 크리깅 모델

본 연구에서는 표본점을 생성하기 위하여 식 (25)와 같은 라틴하이퍼큐브 방법을 이용하였다.

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^{n_s} \sum_{j=i+1}^{n_s} \frac{1}{d_{ij}} \quad (25)$$

여기서 d_{ij} 는 두 설계점 i, j 사이의 거리를 나타내고, n_s 는 표본점의 수로 100으로서 설정하였다. Table 2는 굽힘진동수 ω_b 및 비틀림진동수 ω_t 에 대한 크리깅 모델의 최적파라미터 값들을 정리한 것이다. 또한 임의의 시험점 $n_t=100$ 개를 갖고 각 크리깅 근사모델에 대한 평가를 Table 3에 표시하였다. 굽힘진동수 ω_b 및 비틀림진동수 ω_t 가 kHz 단위를 갖기 때문에 각 오차는 매우 작음을 알 수 있다. 즉, 구해진 크리깅 근사모델은 매우 신뢰도가 높다고 할 수 있다.

두 고유진동수에 대한 크리깅 근사모델이 구해지면 각 고유진동수의 평균 및 분산을 식 (13)과 식 (14)에 의해 구할 수 있다. 따라서 새로운 확률변수 $z = \omega_l - \omega_b$ 의 평균 및 분산을 추정할 수 있다. 확률변수 z 의 평균과 분산이 크리깅모델을 기초로 구해지면 정식화 식 (22)-(24)를 풀 수 있다.

Table 1 Lower limit and upper limit of design variables(μ m)

D.V.	lower limit	upper limit
b_1	$C_1-1.0$	$C_1+1.0$
b_2	$C_2-1.5$	$C_2+1.0$
b_3	$C_3-1.0$	$C_3+1.0$
b_4	$C_4-100.0$	$C_4+100.0$
b_5	$C_5-1.0$	$C_5-3.0$

Table 2 Optimum parameters of β and Θ ($\times 10^{-3}$)

freq	β	Θ_1	Θ_2	Θ_3	Θ_4	Θ_5
ω_b	5639.3	0.0001	0.0001	974.686	2.046	1.766
ω_t	8718.2	23.731	0.0001	14.117	11.652	0.289

Table 3 Validations of kriging models (Hz)

frequency	RMSE	MAXERR	Ave.% error
ω_b	0.702	3.496	0.011
ω_t	0.739	2.146	0.012

Table 4 Optimum design variables(μ m)

D.V.	optimum value
b_1	$C_1-0.353$
b_2	$C_2-1.5$
b_3	$C_3-0.185$
b_4	$C_4+100.0$
b_5	$C_5+1.0$

Table 5 Improvement of probability of success

design	ω_b				ω_t				ω_z				Ps	
	$\hat{\mu}_{\omega_b}$	μ_{ω_b}	$\hat{\sigma}_{\omega_b}$	σ_{ω_b}	$\hat{\mu}_{\omega_t}$	μ_{ω_t}	$\hat{\sigma}_{\omega_t}$	σ_{ω_t}	$\hat{\mu}_{\omega_z}$	μ_{ω_z}	$\hat{\sigma}_{\omega_z}$	σ_{ω_z}	\hat{P}_s	Ps
current	4954.9	4955.2	104.4	104.4	5186.0	5187.2	84.3	83.6	231.1	232.0	134.2	129.1	35.1	34.8
optimum	5389.5	5389.5	104.9	105.2	5500.0	5500.5	82.2	84.2	110.5	111.0	133.3	132.4	50.0	49.4

본 연구에서는 이 정식화를 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘을 이용하여 해결하였다. Table 5는 초기설계 및 최적설계점에서 각 반응치의 평균과 표준편차의 추정치와 실제값을 비교한 것이다. 실제값은 500회의 몬테칼로 시뮬레이션을 이용하여 구해졌다. 각 통계량의 추정치가 매우 정확하게 예측됨을 알 수 있다. 이는 굽힘 고유진동수와 비틀림 고유진동수의 크리깅 근사모델이 매우 정확하게 예측되어 나타난 결과라고 볼 수 있다. 또한 최적해에서의 성공확률은 초기설계 대비 약 14.6% 향상된 결과를 보여주고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 실리콘 마이크로 자이로스코프의 구조설계를 위하여 크리깅 근사모델에 기초한 성공확률을 도입하였다. 이것을 기초로 강건설계를 수행하였으며 초기설계 대비 약 14.6%의 수율을 증가시키는 결과를 산출하였다.

이 연구는 굽힘 및 비틀림 고유진동수의 분포가 정규분포라는 가정 하에서 전개되었다. 이는 몬테칼로 시뮬레이션을 통하여 정당한 가정이 입증되었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지정 지역혁신센터사업(RIC) 고기능성 밸브 기술지원센터 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Hwang, K.H., Lee, K.H., Park,G.J., Lee, B.L., Cho, Y.C., Lee ,S.H., "Robust Design of a Vibratory

Gyroscope with an Unbalanced Inner Torsion Gimbal Using Axiomatic Design," J. of Micromechanics and Microengineering, Vol. 13, No. 1, pp. 8-17, 2003.

2. 황광현, 이권희, 박경진, 이병렬, 조용철, 이석한, "공리적설계를 이용한 비대칭 내부 짐벌을 가진 진동형 자이로스코프의 강건설계," 대한기계학회 논문집 A권, 제26권, 제5호, pp. 914-923, 2003.

3. Lee,K.H., Park,G.J., "A Global Robust Optimization Using Kriging Based Approximation Model," JSME International J., Series C, Vol. 49, No. 3, Sep., pp. 779-788, 2006

4. Lee, K.H., Kang, D.H., "A Robust Optimization Using the Statistics Based on Kriging Metamodel," J. of Mechanical Science and Technology, Vol. 20, No. 8, pp. 1169-1182, 2006.

5. 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.

6. Guinta, A. and Watson, L., " A Comparison of Approximation Modeling Techniques: Polynomial Versus Interpolating Models," Proceedingsofthe7th AIAA/USAF/NASA/ISSMOSymposiumonMultidisciplinaryAnalysisandOptimization,St.Louis,MO,AIAA,Vol. 2, Sept. 2-4, pp. 392-440(AIAA-98-4758), 1998.

7. Fang, Kai-Tai, Li, Runze and Sudjianto, Agus, Design and Modeling for Computer Experiments, Computer Science and Data Anaysis Series, 2006.

8. Jin, R., Chen, W. and Sudjianto, A., "On Sequential Sampling for Global Metamodeling in Engineering Design," DAC-34092, Proceedings of the 2002 ASMEIDETC Conferences, Montreal, Quebec, Canada, Sep.29-Oct.2., 2002.

9. 송병철, 이권희, "근사모델 및 성공확률을 이용한 강건설계," 한국기계가공학회지, 제 7권, 제 3호, pp. 3-10. 2008.