技術論文 한국정밀공학회지 제13권 제10호 (1996년 10월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 13. No 10. OCTOBER. 1996.

반응표면 분석법을 이용한 기구의 강건설계

한 형 석*, 박 태 원**

Robust Design of Mechanisms Using the Response Surface Analysis

Hyung-Suk Han*, Tae-Won Park**

ABSTRACT

In this study a method for a robust design of mechanisms is proposed. The method used in the experimental analysis and quality engineering is applied for mechanisms design. A mathematical model for a mechanism is estimated by the response surface analysis and the estimated model is used in minimization of the variance. Using this result, robust design can be carried out. The method can be applied for general mechanisms. Furthermore because the method can be used in the design stage using the computer model, improved quality and lower cost of the product is achieved even in the design stage.

Key Words: Robust design(강건설계), Response surface analysis(반응표면 분석법), Mechanisms(기구)

1. 서 론

일반적으로 제품의 성능은 설계 시의 목표 성능에서 성능 변동을 가진다. 성능 변동이 작은 제품일수록 품질이 좋다고 할 수 있는데 Taguchi는 성능 변동의 요인을 크게 제조 오차, 제품 열화(product deterioration) 및 제품의 사용 환경 조건 등으로 분류하였다.[1] 이 변동의 요인을 잡음 인자(noise factor)라고 하며 강건설계 혹은 인자설계(parameter design)는 그러한 잡음 인자들에 대하여 둔감한 설계를 함으로써 제품의 성능 변동을 줄이는 것을 말한다. 기구에 있어서도 잡음 인자들에 의하여 기구를 구성하는 링크들의 길이나 힘 요소 등이 변하여 위치,속도, 가속도, 힘 등이 설계 값에 대하여 어떤 변동을 가지게 될 것이다. 그러므로 기구의 설계 시에 강건성을 고려하여 설계하면 기구의 품질을 높일 수 있을 것이다. 특히 정밀기계에서는 강건설계가 중요하다고 할 수 있다. 강건설계에 대한 일반적인 연구는 주로 Taguchi에 의하여 발전되고 공정 설계와 전기 제품에 널리 응용되어 왔다.[2] Taguchi는 직교 배열 표와 신호 대 잡음의 비율(signal-to-noise ratio)을 이용하여 상대적으로 가장 강건한 조합을 구하였다. 이 방법은 다양한 분야에서 이용되어 왔다. 또한 민감도를 최소화하는 연구가 기구의 부품에 응용되었다. 이 연구는 민감도를 최소화하는 최적화 기법을 이용함으로써 강건성을 부여하였다.[3,4] 그런데 이 방법은 시스템에 대한 명확한 함수식이 정의 되어야 적용이 가능하다고 할 수 있다.

* 아주대학교 대학원
** 아주대학교 기계산업공학부

그 이외에 반응표면 분석법(response surface analysis)을 이용한 연구가 있으나 널리 적용되지는 못하였다. 반응표면 분석법은 설계 변수, 잡음 인자들과 성능 사이의 관계를 실험에 의하여 구한 후 얻어진 함수를 이용하여 강건한 설계를 수행하는 것이다.[6-8] 이상 여러 가지 연구가 진행되고 기구의 단 품에 대하여는 적용되어 왔지만 기구의 최종 성능에 관계된 시스템적인 강건설계 연구는 부족하다고 할 수 있다. 그 이유는 기구의 특성상 공정이나 전기 제품에 비하여 실험하기가 어렵고 기구에 대한 수학적 모델을 세우기 어렵기 때문이라고 생각된다.

본 논문에서는 강건설계를 일반적인 기구에 쉽게 적용할 수 있는 방법을 제시하고자 하는데 목적이 있다. 본 논문에서는 반응표면 분석법에 기초를 두고 분산(variance)을 최소화하는 방법을 채택하였다. 일반적으로 기구는 비선형이고 기구에 있어서 설계 변수와 성능과의 관계를 명시적으로 구하는 것이 곤란한 경우가 많다. 그러나 현재 이용되고 있는 범용 기구 동역학 해석 프로그램을 이용하면 기구를 신뢰성 있게 모델링할 수 있다. 때문에 이 컴퓨터 모델과 반응표면 분석법을 이용하면 강건설계 방법을 쉽게 적용할 수 있다. 본 논문에서 제시한 방법을 이용하여 기구의 설계 단계에서 강건성을 고려함으로써 품질향상과 개발비용을 줄일 수 있을 것으로 기대된다

2. 이론 전개

2.1 강건설계 기초 이론

강건설계는 성능이 잡음 요인에 대하여 강건 혹은 둔감하도록 설계하는 것인데 Fig.1을 보면 잘 이해할 수 있다. 성능 P가 변수 A,B 에 의해서 결정된다고 하고 만일 A를 A_x로 B는 B_x로 설계하였다면 그 때의 이상적인 성능은 P_x가 될 것이다. 그런데 실제 사용 중에는 A_x는 잡음 인자에 의해서 I과 같은 산포를 가지게 될 것이고 따라서 B가 B_x로 고정되었다고 가정하면 성능 P_x는 II와 같은 산포를 가지게 될 것이다. 여기서 성능이 변수 A의 변동에 강건하게 하기 위해서 A에 대한 P의 기울기가 상대적으로 작은 A_z로 설계하였다면 성능은 P_z가 될 것이고 마찬가지로 A_z가 III과 같은 산포를 가질 때 P_z는 IV와 같은 산포를 가지게 될 것이다. 산포 II와 IV를 비교할 때 분산은 IV가 작은 것을 볼 수 있다. 결과적으로 A를 A_x보다는 A_z로 설계할 때 A의 변동에 대하여 성능 P의 변동이 적게 된다. 즉 A가 잡음 인자들에 의하여 변하더라도 성능 P가 좀더 강건하게 되는 것을 알 수 있다. 여기서 최종 성능 목표치가 P_0라면 다른 변수 B를 B_z로 조절하여 P_0를 얻을 수 있으며 결과적으로 강건설계를 달성할 수 있다.

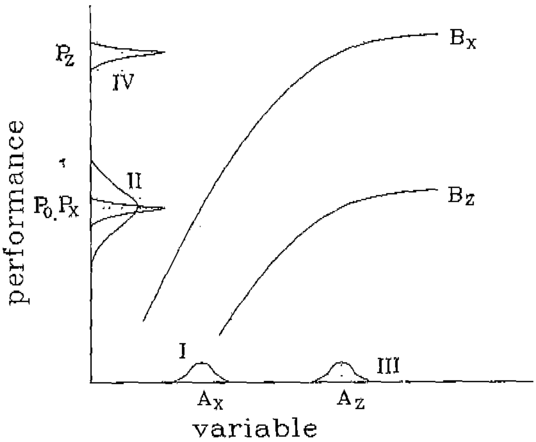

Fig.1 Robust design

2.2 반응표면 분석법

기구에 대한 강건설계를 하려면 변수와 성능과의 관계를 정의해야 한다. 그런데 실제적으로 기구에 있어서 변수와 성능과의 관계를 명시적으로 구하는 것이 어려울 때가 많다. 기구계는 일반적으로 비 선형성을 가지며 복잡하기 때문에 해석적으로 표현하기 어려울 경우가 대부분이다. 그런데 현재 개발되어 있는 기구 해석 프로그램들을 이용하면 기구를 신뢰성 있게 해석할 수 있다. 때문에 실제로 기구를 제작하여 실험하지 않고도 컴퓨터 모델로써 실험할 수 있는 것이 가능하게 되었다. 이러한 특성을 이용하여 해석적이지 않지만 실험적으로 변수와 성능과의 관계를 추정해 주는 반응표면 분석법을 적용하였다. 반응표면 분석법은 실험에 의해서 독립 변수와 종속 변수와의 관계를 추정하는 것이다. 만일 독립 변수가 $\xi = [\xi_1, \xi_2, \ldots, \xi_k]^T$ 이고 종속 변수가 η 라면 ξ 와 η 의 관계를 식(1)과 같이 표시할 수 있다.[9]

$$\eta = F(\xi_1, \xi_2, \ldots, \xi_k) \qquad (1)$$

식(1)에서 F를 명확하게 알기가 어렵고 복잡한 경우가 많다. 반응표면 분석법을 이용하면 F를 다항식으로 근사시킬 수 있다. 2차 다항식을 이용하여 구하는 경우 식(1)을 식(2)와 같이 표시할 수 있다.

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i \xi_i + \sum_{i \le j}^{k} \beta_{ij} \xi_i \xi_j \tag{2}$$

기구는 일반적으로 비 선형성을 가지기 때문에 1차 함수보다는 2차 함수가 적합하다고 판단되어 본 논문에서는 2차 다항식을 택하였다. 여기서 차후 실험을 위하여 ξ_i 을 $x_i = (\xi_i - \xi_{i0})/c_i$ 로 선형 변환시킨다. ξ_{i0}는 ξ_i 의 평균값이고 c_i는 상수로서 일반적으로 x_i가 $+1, -1$ 이 되도록 선정한다. 그리고 η 를 y 라 하면 독립변수와 종속변수의 관계를 식(3)과 같이 표시할 수 있다.

$$y = F(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i \le j}^{k} \beta_{ij} x_i x_j \tag{3}$$

식(3)에서 β는 각 변수가 종속 변수에 미치는 영향의 크기라고 해석할 수 있다. 미지수 β를 구하기 위하여는 적절한 실험을 하여야 하는데 최소의 실험으로 β를 추정하는 것이 중심 합성 계획법이다. 중심합성 계획법은 처음으로 Box와 Wilson이 제안하였고 많은 연구자들에 의하여 발전되었다.[9] 예를 들어 설계 변수가 3개인 경우 중심 합성 계획법에 의한 실험 조건은 Table 1과 같다.[9] 중심합성 계획법의 특징은 2^k 배치 법에 중심점과 축 점을 배치시킴으로써 최소의 실험으로 곡면 특성을 추정하는 실험 계획이다. Table 1에서 1-8 행은 2^k 요인 실험점이고 9행은 중심 점 그리고 10-15행은 축 점을 나타낸다.[9] Table 1에서 α 는 식(3)에서 β_{ij}들간의 공분산(covariance)이 0가 되도록 선택한 값으로 독립 변수와 중심점의 수에 따라 다른 값을 가진다.[9]

Table 1 Experimental array

Run	x_1	x_2	x_3	y
1	-1	-1	-1	y_1
2	-1	-1	+1	y_2
3	-1	+1	-1	y_3
4	-1	+1	+1	y_4
5	+1	-1	-1	y_5
6	+1	-1	+1	y_6
7	+1	+1	-1	y_7
8	+1	+1	+1	y_8
9	0	0	0	y_9
10	$-\alpha$	0	0	y_{10}
11	$+\alpha$	0	0	y_{11}
12	0	$-\alpha$	0	y_{12}
13	0	$+\alpha$	0	y_{13}
14	0	0	$-\alpha$	y_{14}
15	0	0	$+\alpha$	y_{15}

α=1.216

Table 1에서 0은 각 ξ_i 의 평균값이고 +1,-1은 실험에서 고려하는 범위로써 +1은 ξ_i 의 평균값에 변화 범위를 더한 것이 되고 -1은 뺀 것이 되는 것이다. Table 1의 결과를 이용하여 식(3)의 β 를 구하는 식은 식(4)와 같으며 최소 자승법을 이용하고 있다.[9]

$$\boldsymbol{\beta} = (\boldsymbol{X}^T \boldsymbol{X})^{-1} \boldsymbol{X}^T \boldsymbol{y} \tag{4}$$

식(4)에서 $\boldsymbol{X}, \boldsymbol{y}$는 설계 변수가 3개인 경우 식(5),(6)과 같다.

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} 1 x_{11} x_{21} & x_{31} x_{11}^2 x_{21}^2 x_{31}^2 & x_{11}x_{21} & x_{11}x_{31} & x_{21}x_{31} \\ 1 x_{12} x_{22} & x_{32} x_{12}^2 x_{22}^2 x_{32}^2 & x_{12}x_{22} & x_{12}x_{32} & x_{22}x_{32} \\ \cdots & \cdots & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 x_{1n} x_{2n} & x_{3n} x_{1n}^2 x_{2n}^2 x_{3n}^2 & x_{1n}x_{2n} & x_{1n}x_{3n} & x_{2n}x_{3n} \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix} \tag{6}$$

결과적으로 $y=F(x)$가 결정됨으로써 이 모델 함수를 강건설계에 이용할 수 있게 된다. 여기서 실험은 컴퓨터 해석이나 실제 실험을 하면 되는데 본 연구에서는 범용 기구 동력학 해석 프로그램인 DADS를 이용하여 기구의 해석을 수행하였다.[10]

2.3 강건설계 문제 정의

강건설계를 최적화 기법을 이용하여 수행하려면 목적함수와 구속 조건이 잘 정의되어야만 한다. 만일 성능 y가 설계 변수 x_1, x_2, x_3에 의하여 결정된다면 식(7)과 같이 표시할 수 있다.

$$y = F(x_1,\ x_2,\ x_2) \tag{7}$$

식(7)에서 x_1, x_2, x_3가 공칭 값들에 대하여 변동을 가지기 때문에 y는 랜덤 변수(random variable)이다. 그리고 y에 대한 기대 평균값 $E(y) = \mu_y$ 와 분산 $Var(y) = \sigma^2_y$ 는 x_1, x_2, x_3의 공칭 값의 함수이다. 강건설계는 σ^2_y를 최소화하면서 μ_y를 목표 치와 같도록 하는 것이다. E(y)와 Var(y) 를 추정하는 방법에는 여러가지가 있으나 Tayler Series를 이용하는 것이 많이 이용된다.[11] 식(7)을 x_1, x_2, x_3 의 공칭 값 μ_{x_1}, μ_{x_2}, μ_{x_3}에 대하여 Tayler Series를 이용하여 E(y)와 Var(y)를 구하는 식은 식(8), (9)와 같다.

$$\mu_y \cong F(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \mu_{x_3}) + \frac{1}{2}[(\frac{\partial^2 y}{\partial x_1^2})\sigma^2_{x_1} + \frac{\partial^2 y}{\partial x_2^2})\sigma^2_{x_2} + \tag{8}$$

$$(\frac{\partial^2 y}{\partial x_3^2})\sigma^2_{x_3}] \Big|_{x_1=\mu_{x_1}, x_2=\mu_{x_2}, x_3=\mu_{x_3}} + [(\frac{\partial^2 y}{\partial x_1 \partial x_2})Cov(x_1,x_2) +$$

$$(\frac{\partial^2 y}{\partial x_1 \partial x_3})Cov(x_1,x_3) + (\frac{\partial^2 y}{\partial x_2 \partial x_3})Cov(x_2,x_3)] \Big|_{x_1=\mu_{x_1}, x_2=\mu_{x_2}, x_3=\mu_{x_3}}$$

$$\sigma^2_y \cong [(\frac{\partial y}{\partial x_1})^2\sigma^2_{x_1} + (\frac{\partial y}{\partial x_2})^2\sigma^2_{x_2} + (\frac{\partial y}{\partial x_3})^2\sigma^2_{x_3}] \Big|_{x_1=\mu_{x_1}, x_2=\mu_{x_2}, x_3=\mu_{x_3}}$$

$$+ 2[(\frac{\partial y}{\partial x_1})(\frac{\partial y}{\partial x_2})Cov(x_1,x_2) + (\frac{\partial y}{\partial x_1})(\frac{\partial y}{\partial x_3})Cov(x_1,x_3) + \tag{9}$$

$$(\frac{\partial y}{\partial x_2})(\frac{\partial y}{\partial x_3})Cov(x_2,x_3)] \Big|_{x_1=\mu_{x_1}, x_2=\mu_{x_2}, x_3=\mu_{x_3}}$$

식(9)에서 Cov는 두 랜덤 변수들간의 공분산(covariance)을 나타낸다. 일반적으로 기대 평균 μ_y는 각 변수의 표준편차 σ_{x_i}이 작기 때문에 식(8)에서 우변의 첫 항만을 많이 이용한다. 만일 두 번째 항의 값이 무시할 수 없을 경우에는 두 번째 항도 포함시켜야 할 것이다. 또한 기대 분산 σ^2_y의 추정은 식(9)에서 우변의 첫 항을 취하여 구할 수 있다. 이는 설계 변수들이 독립이면 공분산 Cov이 모두 0이기 때문이다. 반응표면 분석법과 식(8), (9)를 이용하면 강건설계 문제를 정의할 수 있다. 반응표면 분석법에 의하여 추정된 *y=F(x)*는 평균 추정식으로 대치할 수 있고 분산 추정은 식(9)에 *y=F(x)*를 대입하면 구할 수 있다. 결과적으로 강건설계 문제를 식(10)과 같이 정의할 수 있다.

$$Minimze \;\; f(x) = \sigma^2_y = \sum_{i=1}^{k} (\frac{\partial F(x)}{\partial x_i})^2 \sigma^2_{x_i}$$

$$Subject \;\; to \; | \; \mu_y = F(x) - P_0 \; | = 0$$

$$x_{li} \le x_i \le x_{ui}, \;\; i = 1, \cdots, k \tag{10}$$

식(10)에서 성능에 대한 분산 σ^2_y를 목적 함수로서 정의하며 σ^2_y를 최소화하면 강건설계를 할 수 있게 된다. 구속 조건은 σ^2_y를 최소화하면서도 평균이 목표 성능 P_0를 만족해야 한다. 즉 $| \; \mu_y = F(x) - P_0 \; | = 0$ 로써 정의되고 x_{li},x_{ui}는 x_i의 상, 하 경계치이다. 식(10)에 대한 해는 일반적인 최적화 알고리즘을 이용할 수 있다.

2.4 강건설계 흐름도

이상에서 제시한 이론을 이용한 기구의 강건설계 과정은 Fig.2와 같다.

Define variables and target performance

↓

Define of experimental array

↓

Experiments with DADS

↓

Obtain estimated function

↓

Define optimal design problem

↓

Optimization

↓

Verify the results

Fig.2 Robust design process

3. 응 용

2장에서 제시한 기법을 이용하여 리벳 기구의 강건설계를 실시하였다. Fig.3은 리벳 기구를 보여 주고 있으며 Table 2는 리벳 기구에 대한 사양이 나타나 있다.

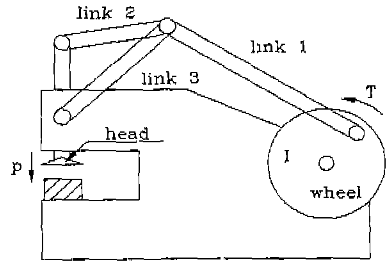

Fig.3 Rivet mechanism

Table 2 Specification of a rivet mechanism

Items		Values
Inertia of the wheel ($kg \cdot mm^2$)		5000
Applied Torque ($N \cdot mm$)		133
Link 1	length ξ_1 (mm)	374.6
	standard deviation (σ_{ξ_1})	0.3745
	low-cost tolerance (mm)	±1.1235
Link 2	length ξ_2 (mm)	220
	standard deviation (σ_{ξ_2})	0.22
	low-cost tolerance (mm)	±0.66
Link 3	length ξ_3 (mm)	275
	standard deviation (σ_{ξ_3})	0.275
	low-cost tolerance (mm)	0.825
Stiffness of a product (N / mm)		30
Damping coefficient of a product ($N \cdot sec$ / mm)		1
Compression force of the head Po (N)		75.632

리벳 기구는 휠에 입력 토크 T를 받아서 공작물을 압착하게 되는데 압착력 P를 정확하게 유지하고 싶다고 가정한다. 설계 시에 P가 정확히 목표 값에 도달하도록 설계할 수 있지만 실제 사용상에 있어서는 잡음 인자들에 의하여 기구를 구성하는 요소, 예를 들어 링크들의 길이가 변화되어 P가 변동을 가지게 될 것이다. 그러므로 잡음 인자들에 될 수 있는 한 강건한 설계를 함으로써 P의 변동이 작도록 하여 기구의 품질을 향상시키고자 한다.

3.1 모형 함수 추정

반응표면 분석법을 이용하여 이 기구에 대한 모형 함수를 추정하였다. 설계 변수는 링크 1, 링크 2, 링크 3의 길이로 선정하였다. 성능 즉 종속변수는 P이다. Table 3에는 각 설계 변수의 초기 설계 값과 실험을 하기 위한 변화량을 나타내 주고 있다.

Table 3에서 변화량은 변경 가능한 범위를 택하면 되

Table 3 Design variables and experimental regions

Design variables	Initial values	Experimental regions
$\xi_1(x_1)$	374.63	7.49
$\xi_2(x_2)$	220	4.4
$\xi_3(x_3)$	275	5.5

는데 변화량 범위가 클수록 모형 함수의 신뢰도가 떨어지는 특성을 가진다. Table 3의 변수들에 대하여 Table 1의 실험 표에 따른 실험 결과 값은 식(11)과 같다.

$$\boldsymbol{y} = [65.585,\ 52.237,\ 89.206,\ 68.083,\ 84.484,\ 66.616,\ 121.335,\ 86.856,\ 75.642,\ 65.163,\ 88.205,\ 64.134,\ 90.710,\ 89.048,\ 65.474]^T \tag{11}$$

Table 1에 따른 실험은 DADS 프로그램을 이용하였다. 실험 결과인 식(11)과 식(5),식(4)를 이용하면 모형 함수의 계수 β를 구할 수 있는데 그 결과는 식(12)와 같다.

$$\boldsymbol{\beta} = [\beta_0,\ \beta_1,\ \beta_2,\ \beta_3,\ \beta_{11},\ \beta_{22},\ \beta_{33},\ \beta_{12},\ \beta_{13},\ \beta_{23}]^T = [75.274,\ 10.23,\ 11.752,\ -10.530,\ 1.035,\ 1.534,\ 1.425,\ 2.215,\ -2.247,\ -3.061]^T \tag{12}$$

식(12)를 이용하면 모형 함수 식(3)을 식(13)과 같이 구할 수 있다.

$$y = F(\boldsymbol{x}) = 75.274 + 10.23x_1 + 11.752x_2 - 10.530x_3 + 1.035{x_1}^2 + 1.534x_2^2 + 1.425{x_3}^2 + 2.215x_1x_2 - 2.247x_1x_3 - 3.061x_2x_3 \tag{13}$$

즉 Fig.3과 같은 리벳 기구의 링크들의 길이와 압축력 P의 관계를 식(13)으로 대치할 수 있다. 식(13)의 신뢰도는 ANOVA Table에 의하여 검토할 수 있는데 참고문헌 (9)를 참조하길 바란다. 식(13)이 구해졌으므로 식(13)을 이용하여 강건설계를 실시 할 수 있겠다.

3.2 강건설계

모형 함수 $y=F(x)$가 구해지면 강건설계 문제인 식(10)을 정의할 수 있다. 즉 목적 함수 f는 식(13)을 편미분하여 식(14)와 같이 구할 수 있다.

$$f(\boldsymbol{x}) = {\sigma_y}^2 = \sum_{i=1}^{k} \left(\frac{\partial F(\boldsymbol{x})}{\partial x_i}\right)^2 \sigma^2_{x_i} \tag{14}$$

$$= (\beta_1 + 2\beta_{11}x_1 + \beta_{12}x_2 + \beta_{13}x_3)^2 \sigma^2_{x_1} + (\beta_2 + 2\beta_{22}x_1 + \beta_{12}x_1 + \beta_{23}x_3)^2 \sigma^2_{x_2} + (\beta_3 + 2\beta_{33}x_1 + \beta_{13}x_1 + \beta_{23}x_2)^2 \sigma^2_{x_3}$$

여기서

$$\sigma_{x_1} = \frac{\sigma_{\xi_1}}{7.49},\ \sigma_{x_2} = \frac{\sigma_{\xi_2}}{4.4},\ \sigma_{x_3} = \frac{\sigma_{\xi_3}}{5.5}$$

구속 조건은 식(15)와 같이 정의할 수 있다.

$$\left|\mu_y = F(x) - P_0\right| = 0 \qquad (15)$$
$$-1 \le x_i \le 1$$

그러면 식(14)와 식(15)를 합하여 최적화 문제를 정의할 수 있다. 식(14),식(15)의 해는 일반 최적화 알고리즘을 이용하여 해를 구할 수 있는데 본 논문에서는 MMFD(Modified Method of Feasible Directions) 알고리즘을 이용하였다. 그 결과 Table4와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Table 4 Results

Item	Initial design	Robust design	Difference
ξ_1	374.63	373.46	1.17
ξ_2	220	223.26	3.26
ξ_3	275	280.5	5.5
P	75.642	75.638	0.004
σ^2_y	0.884	0.73	0.154

Table 4에서 볼 수 있듯이 $\sigma^2{}_y$의 값에 있어서 강건설계의 $\sigma^2{}_y$의 값이 초기 설계에 비하여 상대적으로 적은 것을 알 수 있다. 그러므로 강건성을 고려한 설계가 각 변수의 변동에 대하여 성능의 변동이 작을 것으로 예측할 수 있는 것이다. 결과적으로 기구의 품질향상을 기대할 수 있게 된다. 여기서 만일 $\sigma^2{}_y$의 목표치가 정해져 있고 각 변수에 대한 $\sigma^2_{x_i}$에서 목표치를 얻을 수 없다면 각 $\sigma^2_{x_i}$를 감소시킴으로써 목표 $\sigma^2{}_y$를 얻을 수 있는데 이를 공차설계라 하며 강건설계 후에 행해져야 할 과정이다.

4. 결 론

품질 공학에서 주로 발전한 강건설계를 기구에 적용하여 기구의 강건성을 고려한 설계 법을 제시하였다. 기구에 있어서 설계 변수와 성능과의 관계를 추정하기 위하여 반응표면 분석법과 범용 기구 해석 프로그램을 이용하였다. 추정된 모형 함수를 이용하여 각 변수에 대한 민감도를 최소화함으로써 강건설계를 수행하였고 그 결과를 분산 분석을 통하여 강건성 향상을 확인하였다. 이를 통하여 일반적인 기구에 대한 강건설계가 가능하리라 기대된다. 특히 설계 변수와 성능과의 관계를 명확하게 표현하기 어려운 기구와 정밀기계에 응용이 가능하리라고 생각된다. 기구에 강건성을 설계 시에 부여함으로써 잡음 인자에 강건한 즉 향상된 품질의 기구를 얻을 수 있고 개발 비용과 시간을 줄일 수도 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Kackar,R.N., "Off-line Quality Control, Parameter Design, and the Taguchi Method," J.of Qual. Technol., Vol. 171, No. 4, 1985.
2. Phake,M.S., "Quality Engineering Using Robust Design," Prentice-Hall,Englewood Cliffs,N.J,1989.
3. A. Parkinson,C.Sorensen, N.Pourhassan, "A General Approach for Robust Optimal Design," Transactions of the ASME, Vol. 115, 1993.
4. A.D.Belegundu, Shenghua Zhang, "Robustness of Design Through Minimum Sensitivity," J. of Mechanical Design, Vol. 114, 1992.
5. 이권희,엄인섭,박경진,이완익, "제한 조건이 없는 최적화 문제의 강건설계에 관한 연구," 대한기계학회논문집 제 18권 제 11호, 1994.
6. John S.Lawson and J.L. Madrigal, "Robust Design through Optimization Techniques," Quality Engineering, Vol. 6, No. 4, 1994.
7. T.N.Goh, "Taguchi Methods:Some Technical, Cultural and Pedagogical Perspectives," John Wiley & Sons, Ltd., 1993.
8. James M.Lucas, "How to Achieve a Robust Process Using Response Surface Methodology," Journal of Quality Technology, Vol.26, No.4, 1994.
9. 박성현, "현대실험계획법," 민영사.
10. DADS User's Manual,Computer Aided Design Software, Inc.
11. Papoulis, A., "Probability, Random Variables, and Stochastic Processes," McGraw-Hill, New York, 1991.