

〈논 문〉

차량진동에 대한 안정거울장치의 성능향상을 위한 강건설계 및 공차할당

이증원* · 정호섭** · 손석만***

(1996년 12월 16일 접수)

Robust Design and Tolerancing for the Performance Improvement of Stabilized Mirror System under Vehicle Vibration

Chong-Won Lee, Ho-Seop Jeong and Seok-Man Sohn

Key Words: Sensitivity Analysis(민감도 해석), Robust Design(강건설계), Tolerancing(공차할당), Stabilized Mirror(안정거울)

Abstract

In this paper, the robust design and tolerancing of the stabilized mirror is performed to increase its stabilization performance under vehicle vibration. Based on the sensitivity analysis, the seven important control factors are first identified, and then the optimal as well as robust values in the sense of Taguchi method are obtained. Finally, the tolerances associated with each design variables are determined based on a successive sensitivity analysis of the simulated system response so that the deviation in the response from the target value meets the specification requirements. The proposed tolerancing method features that it is a robust but conservative design method and that the computational effort is much less than the Monte Carlo simulation method.

1. 서 론

제품의 성능 특성(characteristic reponse)은 제조과정에서 발생하는 여러가지 잡음(noise)의 영향으로 목표치를 일관성있게 유지하지 못하고 산포하기 마련이다.^(1,2) 일반적으로 이러한 잡음은 주로 가공오차에 기인하며, 가공오차의 허용량인 공차에 따라 제품 품질과 제조단가가 달라진다. 공차를 줄이면 성능특성의 변동이 줄어들어 제품의 품질이 향상되지만 제조단가가 상승하게 되고 공차를 크

게 하면 제조비용은 감소하지만 품질이 나빠지게 된다. 또한, 제품의 성능특성에 대한 각 설계인자의 영향이 다르므로, 각 설계인자의 공차에 따라서 제품의 성능특성에 대한 영향이 다르게 된다. 따라서 공차를 결정하기 위해 고려대상이 되는 것은 대개의 경우는 품질, 제조단가, 신뢰도이다. 일반적으로 공차와 제조단가와와의 관계를 수식화하거나 이를 정확히 알아내는 것은 매우 힘들며 특히 설계인자가 많을 때 각 설계인자와 비용의 관계를 알아내는 것은 거의 불가능한 반면 품질의 경우에 다구찌(Taguchi)방법의 민감도 해석(sensitivity analysis)을 통하여 공차의 관계를 알아낼 수 있어 성능특성이 주어지면 이에 맞는 공차를 민감도 해석을 통하여 구할 수 있다. 그러므로, 공차값을 잡음인

*회원, 한국과학기술원 기계공학과

**삼성전기(주) 종합연구소

***한국전력공사 전력연구원

자로 고려하여 잡음에 둔감한 설계값을 찾는 강건 설계(robust design)와 동시에 이런 공차값에 대한 재해석을 통한 공차할당(tolerancing)이 필요하다.

신동길,⁽³⁾ Lee와 Woo⁽⁴⁾는 기존의 공차설계방법으로써 신뢰도와 제조단가의 비교를 통하여 신뢰도를 제한조건으로 하고, 총 가격을 줄이는 것을 목표로 하여 공차를 결정하였다. 이 방법은 가격합수를 가정하여 실제 계와는 차이가 있고 공차를 결정할 때 몬테카를로실험을 통하여 신뢰도를 계산하기 때문에 많은 계산량을 필요로 한다. 다구찌방법을 이용한 공차설계는 유한개 공차의 선택에 있어서 제조단가의 손실을 비교하여 공차를 결정하고,⁽⁵⁾ 제조단가를 모르는 경우에는 설계인자의 기능 한계시의 손실을 이용하여 공차를 결정하였다.⁽⁶⁾ Phadke는 공차를 직접 구하지 않고 다만 민감도 해석을 통하여 민감한 설계인자만을 알아내고 구체적인 공차의 결정은 제조 기술자에게 맡겨두고 있다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 정확한 위치를 추적하는 안정거울 시스템의 개선시 요구되는 것은 공칭설계값에서의 위치제어 성능향상뿐만 아니라, 가공오차 범위내에서의 정확도를 확보하는 강건함을 동시에 필요로 한다. 따라서 강건한 위치제어 성능향상을 위한 최적 설계치를 찾음과 동시에 가공오차 범위내에서도 설계자가 원하는 정확도를 만족하도록 적절한 가공오차를 할당하는 것이 필요로 한다. 강건한 설계치를 찾기 위해서는 잡음인자를 고려하므로 강건한 최적치를 찾는 장점이 있는 강건설계기법⁽⁸⁾을 이용하고 적절한 공차를 할당하기 위해서는 계산량이 적고 미분값을 필요로 하지 않는 공차설계 알고리즘을 개발하여 안정거울 장치에 적용하였다. 이를 위해 안정화 장치에 대한 3차원 운동방정식을 유도하고 시뮬레이션을 통해 19개의 인자중에서 강건설계를 위해 민감도 해석으로 7개의 주요한 인자를 추출하였고 그 인자에 대한 강건설계를 통하여 속도 RMS값은 0.1 mil/sec 감소하였고, S/N비는 2 dB 증가하였다. 마지막으로 개발된 공차할당 알고리즘을 통해 허용공차를 19개의 인자에 분배하였다.

2. S/N비와 분산분석

다구찌방법은 기본적으로 S/N비와 분산분석을 이용하여 설계인자가 설계값에 미치는 영향을 분석

한다. 다구찌는 품질을 제품이 출하되어 사용되어질 때 야기되는 사회적 손실로 정의하고 특성치가 목표치에 멀어질수록 손실의 비중을 더주자는 의미에서 특성치의 목적특성에 따라 2차식으로 근사화한 손실함수를 토대로 S/N비를 다음과 같이 정의하여 S/N비가 클수록 손실이 작아지도록 하였다.⁽⁹⁾

$$\begin{aligned} \eta_{\text{smaller-the-better}} &= -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \\ \eta_{\text{larger-the-better}} &= -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \\ \eta_{\text{nominal-the-best}} &= 10 \log \left(\frac{\mu^2}{\sigma^2} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, y_i 는 각 실험에서의 특성치, n 은 실험 횟수, μ 는 평균값, σ^2 는 분산이다. 식 (1)에서 정의된 S/N비를 이용하여 실험에 필요한 인자들과 교호작용의 유무와 그들 각각의 수준을 결정한다. 다음 여기에 알맞은 직교배열을 선택한다. 그리고 직교배열에 따라 실험을 한 후 얻어진 결과들을 가지고 최적조건을 찾아내기 위한 분산분석이 행하여진다. 이 단계에서 각각의 인자들이 전체 결과에 어떤 영향을 얼마만큼 미치는지를 결정하고 이를 이용하여 인자들이 가져야 할 최적조건을 결정할 수 있다. 분산분석을 위하여 총 자승합(total sum of squares)을 계산하여야 하는데, 이것은 다음과 같이 정의된다.

$$S_T = \sum_{i=1}^n (\eta_i - \mu)^2 \quad (2)$$

여기서, n 은 특성치의 갯수이며, η_i 는 특성치이다. 그리고 각 인자에 의한 자승합(sem of squares)은 그 인자의 수준별 평균값과 전체 평균값 사이의 편차를 제곱하여 합한 것으로 다음과 같이 정의된다.

$$S_{x_j} = \sum_{k=1}^{M_{x_j}} M_{x_j} (\mu_{x_j} - \mu)^2 \quad (3)$$

여기서, M_{x_j} 는 인자 x_j 의 총 수준이고, μ_{x_j} 는 인자 x_j 의 수준별 평균치이다.

오차의 자승합은 총 자승합에서 각인자의 자승합을 뺀 값으로 나타내며 다음과 같다.

$$S_e = S_T - \sum_{j=1}^I S_{x_j} \quad (4)$$

또한 가산 모델의 개념으로부터 실험치에 대한 인자 수준의 자유도를 정의할 수 있는데, 이것은 인자의 자승평균(mean square)을 구하기 위하여

필요하며, 일반적으로 인자의 총 수준보다 1이 적은 값이 된다. 여기서, 각 인자의 자승평균은 그 인자에 의한 자승합을 자유도로 나눈 값으로 정의되며, 다음과 같다.

$$V_{x_j} = \frac{S_{x_j}}{\phi_{x_j}} = \frac{S_{x_j}}{M_{x_j} - 1} \quad (5)$$

여기서, ϕ_{x_j} 는 인자 x_j 의 자유도이다.

오차의 자승평균에 대한 인자 영향의 상대적인 크기를 나타내기 위하여 F -비의 개념을 사용한다. F -비는 각 인자의 자승평균과 오차의 자승평균의 비로 정의되며 다음과 같다.

$$F_{x_j} = \frac{V_{x_j}}{V_e} \quad (6)$$

3. 강건설계 및 공차할당

잡음에 둔감한 최적설계값을 찾는 강건설계와 강건설계값에 대해 특성치의 허용차를 만족하는 적절한 공차로 할당하는 알고리즘을 개발하고자 한다. 강건설계 및 공차할당의 전체적인 구성을 Fig. 1과 같다. 설계변수와 잡음인자에 대한 데이터 및 목적

함수와 제한조건에 대한 정보를 입력하고 비구속 최적화 문제로 전환한 후 강건설계와 공차할당을 하도록 하였다.

3.1 강건설계

강건설계는 직교배열표상에 제어인자와 잡음인자를 동시에 고려하여 S/N비를 최대화하는 제어인자의 조건, 즉 잡음하에서도 성능특성치의 분산이 작고 평균이 목표치에 접근하는 제어인자의 조건을 찾아내는 것이다.⁽⁸⁾ 그 알고리즘은 Fig. 2와 같이 주어진 설계변수(제어인자), 잡음인자, 목적함수와 제한조건에 대한 다구찌방법에 의해 시뮬레이션을 수행한 후 분산분석을 통하여 최적 수준을 결정한다. 각 인자에 대한 F 값이 1보다 크고 최적의 인자 수준값이 하한치와 상한치를 위배하지 않았다면 S/N비를 증가시키는 방향으로 수준값을 변경하고, 그렇지 않으면 그 인자의 수준값을 현 수준값으로 하여 최적화 과정을 계속한다. 만약 S/N비의 증가가 허용값 이하이면 특성치가 망목 또는 표목 특성인 경우에는 조정인자를 결정하여 평균치를 조정한 후 설계값을 출력하고 특성치가 망소 및 망대 특성인 경우에는 설계값을 그대로 출력한다.

3.2 공차할당

공차를 잡음인자로 고려했을 때 강건설계치에 대한 제품의 허용차가 주어진 경우에 대해 공차를 할

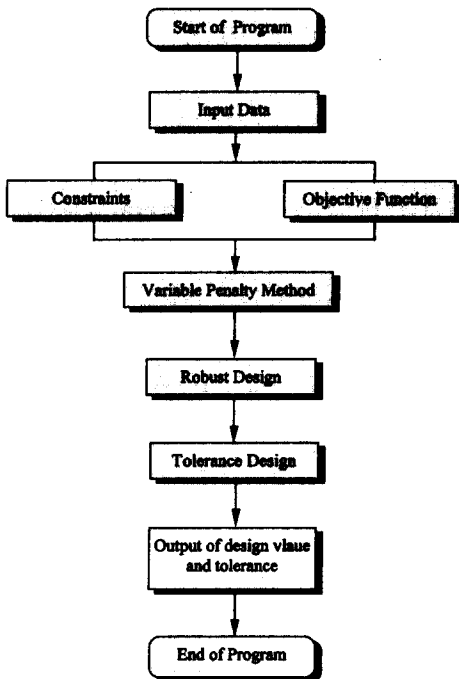


Fig. 1 Basic scheme for robust design and tolerancing

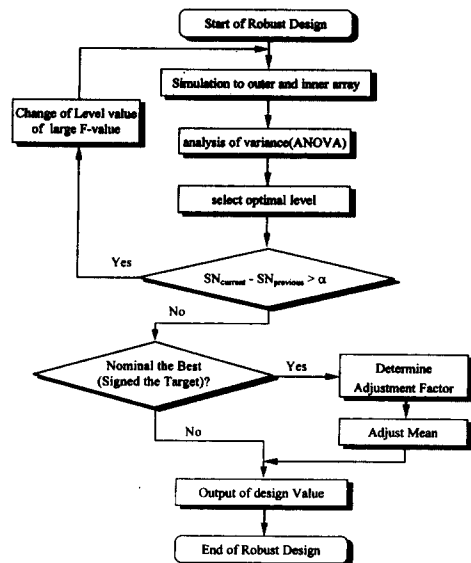


Fig. 2 Basic scheme for robust design

당하고자 한다. 여기서, 각 설계변수의 공차에 따른 제조단가의 변화가 동일하다고 가정한다. 공차 할당을 성능특성치에 규격이 정해지면 그 규격에 맞는 각 설계인자의 최대한의 공차를 구하는 문제로 정하였다. y 가 특성치이고, Δ_0 가 특성치의 허용차일 때, 이에 대한 규격이

$$\begin{aligned} \text{망목특성} &: |y - m_0| < \Delta_0 \\ \text{망소특성} &: y < \Delta_0 \\ \text{망대특성} &: y > \Delta_0 \end{aligned} \quad (7)$$

로 주어질 때, 공차설계 문제를 수식화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\text{Maximize } \Delta_i \\ &\text{Subject to } \text{망목특성} : |y - m_0| < \Delta_0 \\ &\quad \text{망소특성} : y < \Delta_0 \\ &\quad \text{망대특성} : y > \Delta_0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, Δ_i 는 인자 x_i 의 공차이다. 망목특성인 경우에 제품의 특성치에 허용차가 주어졌을 때 특성치에 영향을 주는 설계인자의 설계치에 대하여 공차를 다음과 같이 구할 수 있다. 설계변수가 m 개 있을 때 i 번째 설계변수의 값을 x_i 라 하고 x_i 가 단위량 변화했을 때 특성치 y 에 미치는 영향을 b_i 라고 하면 y 와 x_i 의 관계는 다음과 같다.

$$y = m_0 + \sum_{i=1}^m b_i(x_i - \bar{x}_i) \quad (9)$$

여기서, \bar{x}_i 는 설계인자 x_i 의 설계치이다. 식 (9)를 식 (8)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$|y - m_0| = \Delta_0 = \sum_{i=1}^m |b_i(x_i - \bar{x}_i)| = \sum_{i=1}^m |b_i| \Delta_i \quad (10)$$

각 설계변수의 공차에 따른 제조단가의 변화가 동일하다면 각 변수마다 같이 허용차를 배분하여 각 변수의 공차를 구하면 다음과 같다.

$$\Delta_i = \frac{\Delta_0/m}{|b_i|} \quad (11)$$

위 수식을 만족하기 위한 알고리즘을 설명하면 다음과 같다.

(1) 초기의 공차를 할당하여 직교배열표에 의한 모의실험후 민감도 해석을 통하여 다음과 같은 가법모델을 만든다.

$$y = \mu + \sum_{i=1}^n b_i^+(x_i - \bar{x}_i), \text{ if } x_i > \bar{x}_i$$

$$y = \mu + \sum_{i=1}^n b_i^-(x_i - \bar{x}_i), \text{ if } x_i < \bar{x}_i \quad (12)$$

여기서, \bar{x}_i 는 설계변수 x_i 의 설계치이며, b_i^+ 는 x_i 가 \bar{x}_i 보다 클때 가법 모델에서의 기울기이고, b_i^- 는 x_i 가 \bar{x}_i 보다 작을때 가법 모델에서의 기울기이다.

(2) 식 (12)으로부터 구한 성능특성치의 허용차와 가법모델을 가지고 Fig. 3과 같이 새공차를 만

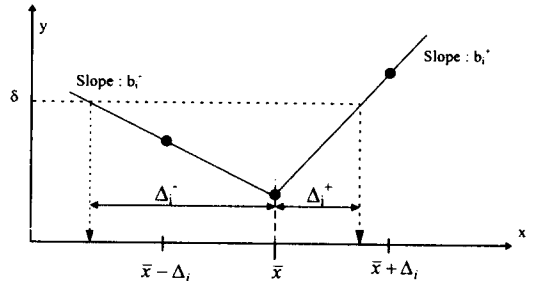


Fig. 3 Tolerance determination

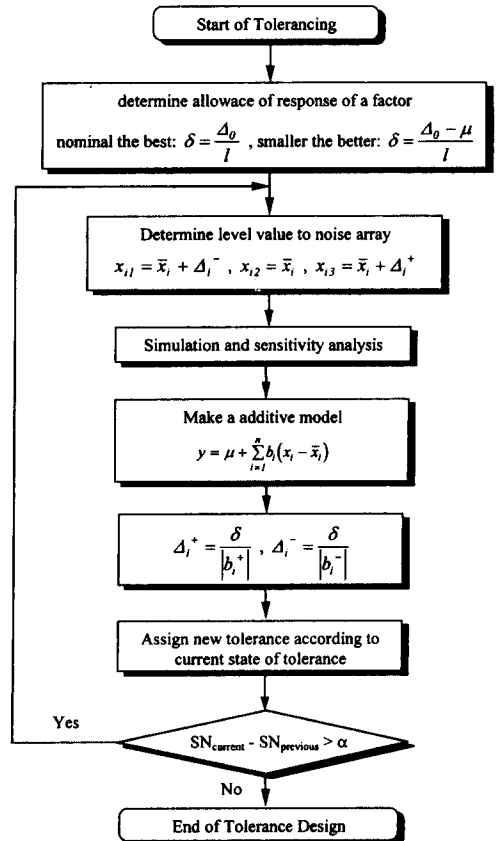


Fig. 4 Basic scheme for tolerancing

든다.

$$\text{망목특성} : \delta = \frac{\Delta_0}{l}$$

$$\text{망소특성} : \delta = \frac{\Delta_0 - \mu}{l}$$

$$\Delta_i^+ = \frac{\delta}{|b_i^+|}, \quad \Delta_i^- = \frac{\delta}{|b_i^-|} \quad (13)$$

여기서, Δ_i^+ 는 설계변수 x_i 의 상한공차이고, Δ_i^- 는 설계변수 x_i 의 하한공차이다.

(3) 새로운 공차로 다시 민감도 해석을 행하여 새 공차를 구하는 방법으로 규격을 만족할 때까지 축차적으로 위의 과정을 반복한다. 위의 알고리즘을 흐름도로 표시하면 Fig. 4와 같다.

4. 안정거울장치의 모형화

4.1 시스템

안정거울(stabilized mirror) 시스템은 전차의 포수가 목표물을 조준하기 위해서 필요로 하는 것으로 외란에 관계없이 포수가 목표물을 정확히 조준하기 위한 것이다. 이 시스템은 Fig. 5와 같이 지지대, 짐벌(gimbal), 플랫폼(platform), 안정거울 및 평형기(balancer), 외란을 감지하는 방위각과 고저각 자이로 구성되며, 방위각과 고저각방향에서 안정화를 이루기 위해 제어기를 필요하다. 안정거울 시스템을 3차원으로 모형화하고, 식 (14)와 같은 라그랑지방정식을 이용하여 운동방정식을 유도하였다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = F_i \quad (14)$$

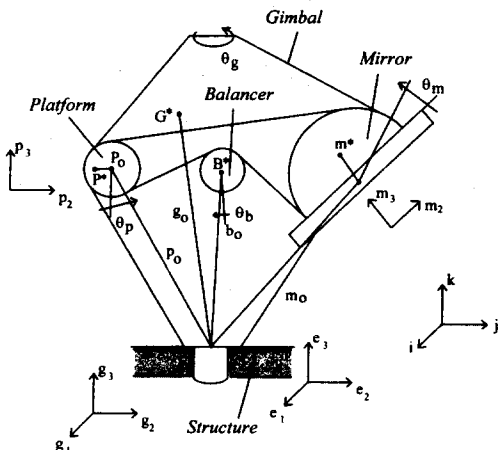
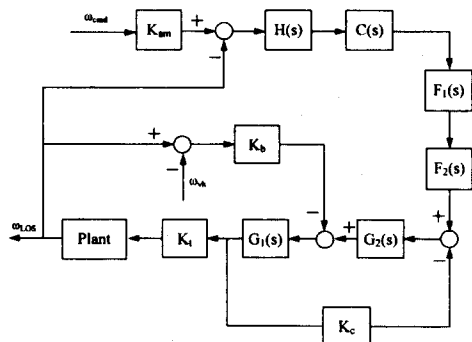


Fig. 5 Modeling of the stabilized mirror

여기서, L 는 라그랑지에너지이고, F_i 는 일반화된 힘이며, $q_i(\theta_m, \theta_p, \theta_b, \theta_g)$ 는 일반화된 좌표계이다. 유도된 운동방정식과 자세한 모형은 본 논문의 특성상 생략하였으며, 참고문헌^(9,10)에 나타나 있다.

4.2 제어기

지지대에서 외란이 발생하면 마찰력을 통해서 안정거울에 전달되고 안정거울이 진동하고 안정거울을 통해 들어오는 신호가 흐트러진다. 안정거울은 지지대에서 들어오는 외란이 있더라도 정확한 추적을 할 수 있도록 하는 안정화 기능이 필수적이다. 그러므로 구동명령이나 외란으로 인하여 LOS(line of sight)가 이동할 경우에 안정거울을 방위각 방향의 이동에 대해서는 이동하고자 하는 LOS 이동각만큼 회전해야 하고 고저각방향의 이동에 대해서는 기하학적 이유로 1/2배 만큼 회전해야 한다. 안정화를 위해서 제어기는 입력명령과 외란에 대한 시스템이 안정되고 정상상태 오차를 최소화 하도록 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기는 Fig. 6과 같다. 본 연구는 외란에 강인한 제어기를 설계하는 것이 아니라 주어진 제어기에 대해 시스템의 각 설계인자가 안정화 성능에 미치는 영향을 보는 것이



- $H(s)$: Gyro dynamics
- $C(s)$: Compensator
- $F_1(s)$ and $F_2(s)$: Notch filter
- $G_1(s)$: Motor dynamics
- $G_2(s)$: Motor controller
- K_c : Current feedback gain
- K_t : Torque constant
- K_b : Back emf
- ω_{cmd} : Command angular velocity
- ω_{th} : Angular velocity of vehicle
- ω_{LOS} : Angular velocity of LOS

Fig. 6 Control loop for stabilized mirror system

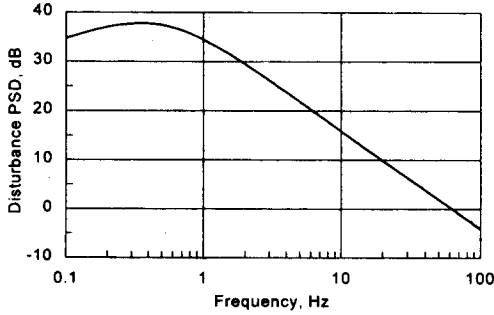


Fig. 7 Power spectral density function of dynamic disturbance

므로 제어기에 대한 자세한 설명은 생략되었다. 안정화 루프는 크게 방위각과 고저각방향의 외란을 측정하는 DTG(dynamically tuned gyro), 자이로의 출력이 입력명령을 추종하게 하는 보상기, 구조물의 공진주파수를 피하는 노치필터(notch filter), 모터가 제어입력을 잘 추적하도록 PI제어기를 포함하는 모터구동부로 나뉜다.

4.3 목적함수

동적 안정화의 정확도는 식 (15)로 표현되는 Fig. 7과 같은 동적 외란이 0.25~50 Hz의 주파수 영역에서 83 mil/sec(rms) 크기를 가지고 시스템에 가해졌을 때 각축의 안정화 오차가 1 mil/sec(rms)를 초과하지 않아야 한다.

$$PSD = \frac{31.2 \times 10^3 f}{(1+4f^2)^{3/2}} \left[\frac{(\text{mil/sec})^2}{\text{Hz}} \right] \quad (15)$$

안정거울의 동적 안정화는 방위각과 고저각방향으로 나뉘어지지만 방위각방향에 대한 영향은 고저각에 비해 무시할 정도로 작으므로 본 연구에서는 고저각방향의 외란만을 고려한다. 따라서 목적함수는 식 (15)와 같은 외란이 고저각방향으로 들어올 때 안정화 오차의 RMS값으로 다음과 같이 정의하였다.

$$err_i = \omega_M - \frac{1}{2} \phi_E, \quad RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N err_i^2} \quad (16)$$

여기서, ω_M 는 안정거울의 각속도, ϕ_E 는 지지대 고저각방향의 각속도 외란을 말한다.

5. 안정거울장치의 강건설계 및 공차할당

안정거울 시스템의 시뮬레이션은 많은 시간을 필

요로 함과 동시에 설계변수가 매우 많아서, 이를 모두 최적화하는 것은 매우 어렵고 많은 시간을 요하는 작업이므로 먼저 민감도 해석을 통하여 중요한 인자를 추출하고, 이 인자에 대해 강건설계를 통하여 강건한 설계값을 구한후 규격에 맞는 공차할당을 한다. 규격은 오차의 RMS값이 정해진 규격보다 작게 하도록 하였다. 그리고 민감도 해석, 강건설계, 공차할당은 실험실에서 개발한 CARD/T^(11, 12) 소프트웨어에 의해 수행되어졌다.

5.1 설계인자의 설정

설계인자의 설정은 먼저 기하학적 모형을 참조하여 Fig. 5에서 보는 바와 같이 2차원 평면상의 변수만 고려하고, 안정거울, 플랫폼과 평형기의 기하학적 조건때문에 식 (17)의 제한조건이 주어진다.

$$r_M = 2r_P$$

$$I_{B11} = \frac{I_{M11}}{r_M/r_B(r_M/r_B+2)} \quad (17)$$

여기서, r_P , r_M , r_B 는 각각 플랫폼, 안정거울과 평형기의 반경이고, I_{M11} , I_{B11} 는 각각 안정거울과 평형기의 주극관성모멘트이다. 또한 회전관성모멘트는 질량과 반경의 영향을 받으므로 이를 인자로 고려하지 않았으며, 제어기의 이득은 고려하지 않았다. 고려된 인자는 총 19개로서 다음과 같다.

- 무게중심위치 : 짐벌(g_2, g_3), 플랫폼(p_2, p_3), 평형기(b_2, b_3), 안정거울(m_2, m_3)
- 질량 : 안정거울질량(m_M), 짐벌질량(m_G), 플랫폼질량(m_P), 평형기 질량(m_B)
- 강성 : 플랫폼과 안정거울 사이의 강성(K_{PM}), 안정거울과 평형기 사이의 강성(K_{MB}), 플랫폼과 평형기의 강성(K_{PB})
- 불균형 편심 : 안정거울의 불균형량(m), 플랫폼의 불균형량(p)
- 반경 : 플랫폼의 반경(r_P), 평형기의 반경(r_B)

위의 인자중 제어할 수 없는 인자인 m , p , g_2 , g_3 를 제외한 나머지 15개 인자로서 설계인자를 잡았다. 15개의 설계인자를 제어인자로 놓고 m , p , g_2 , g_3 를 포함한 19개의 인자의 허용차 또는 공차를 잡음인자로 놓아서 강건설계를 하려면 매우 많은 실험이 필요하므로 먼저 민감도 해석을 통하여

제어인자와 잡음인자를 구하였다. 제어인자를 구하기 위한 민감도 해석을 위하여 $L_{81}(3^{40})$ 직교배열표에 15개의 설계인자를 배열하였다. 교호작용(interaction)을 피하고 교호작용의 영향을 알아보기 위하여 Table 1과 같이 배열하였다. Table 2는 민감도 해석결과이며, F검정치는 정량적인 유의차를 밝히는 것이 아니라 각 설계인자의 변화율(gradient)이 유의한지를 밝히는 것이다. 또한 여기에서 고려하지 못한 인자들의 영향이 나타날 수 있으므로 F검정치가 1이상인 인자를 선택함으로써 보수적인 설계가 되도록 하였다. 따라서 제어인자로 $m_M, m_P, m_B, r_P, r_B, p_3, b_3$ 를 선택하였다. 잡음인자를 위한 민감도 해석에서는 Table 3과 같이 19개의 인자의 공차를 각 수준값으로 하여 $L_{81}(3^{40})$ 직교배열표에 배열하였다. 이의 결과인 Table 4를 보면 인자의 수준별 성능치가 거의 비슷하므로 이를 토대로 한 잡음인자의 색출이 어려우며 또한 강건설계시 설계치의 변화에 따라 잡음인자의 중요도가 변하므로 강건설계시의 잡음인자

로는 선정된 7개의 제어인자 $m_M, m_P, m_B, r_P, r_B, p_3, b_3$ 의 공차를 잡았다.

5.2 강건설계

강건설계를 위하여 위에서 제어인자로 7개의 인자를 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 의 직교배열표를 이용하여 7개의 인자를 3수준으로 할당하였고, 각 인자의 수준 간격과 상한치, 하한치는 Table 5와 같다. 잡음 인자는 Table 6에 보는 바와 같이 제어인자의 공차를 2수준으로 $L_8(2^7)$ 에 하한공차와 상한공차를 각각 수준 1과 수준 2에 넣었다. 이를 토대로 6번의 축차반복과정을 통하여 강건설계를 하였고, 그 결과는 Table 7과 같다. 표에서 보는 바와 같이 플랫폼과 평형기의 반경이 초기값으로부터 많이 변하고 나머지 값은 초기값과 같거나 약간 변화하였다. Fig. 8은 강건설계 전후의 안정거울 시스템의 외란에 대한 응답특성을 보여준다. 그림에서 보는 것처럼 초기설계값이 최적치에 가까워 응답의 차이가

Table 1 Assignment of level values for sensitivity analysis to select control factors : ($L_{81}3^{40}$)

Factor	Column#	Level 1	Level 2	Level3
m_M	5	1.2	1.5	1.8
m_P	10	0.4	0.5	0.6
m_B	12	0.3	0.4	0.5
m_G	13	4.0	5.0	6.0
r_P	14	45	55	65
r_B	19	27	37	47
K_{PM}	21	40	50	60
K_{MB}	22	80	100	120
K_{PB}	25	20	30	40
m_2	31	-45	-40	-35
m_3	33	90	100	110
p_2	34	55	60	65
p_3	35	110	115	120
b_2	37	25	30	35
b_3	38	70	75	80

Table 2 Results of sensitivity analysis to select control factors

Factor	Sum of square	F Ratio
m_M	81.8	*2.6
m_P	93.2	*2.9
m_B	46.2	*1.5
m_G	17.9	0.6
r_P	174.1	*5.4
r_B	61.5	*1.9
K_{PM}	9.7	0.3
K_{MB}	8.8	0.3
K_{PB}	23.7	0.7
m_2	6.8	0.2
m_3	12.6	0.4
p_2	4.8	0.2
p_3	41.9	*1.3
b_2	15.6	0.5
b_3	47.4	*1.5

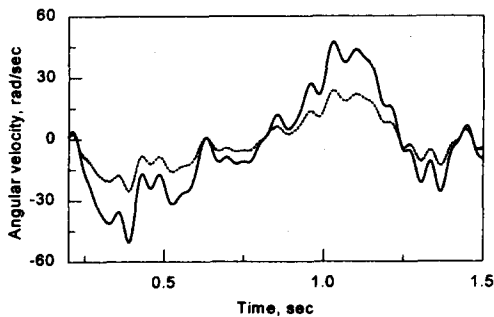
(* : Indicates the significant factors chosen for robust design)

Table 3 Assignment of level values for sensitivity analysis to select noise factors : ($L_{81}3^{40}$)

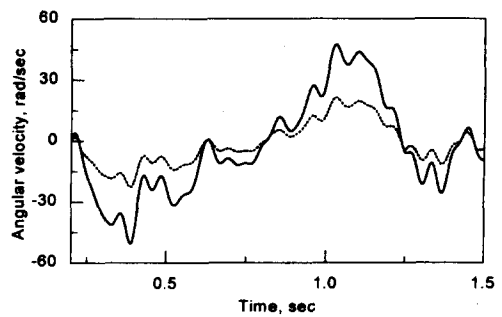
Factor	Column#	Level 1	Level 2	Level 3
g_2	1	-0.26	-0.25	-0.24
g_3	2	118	119	120
m_M	5	1.2	1.5	1.8
m_P	10	0.4	0.5	0.6
m_B	12	0.3	0.4	0.5
m_C	13	4.0	5.0	6.0
r_P	14	54.5	55	55.5
r_B	19	36.5	37	37.5
K_{PM}	21	40	50	60
K_{MB}	22	80	100	120
K_{PB}	25	24	30	36
m	27	0.0	0.2	0.4
p	29	0.0	0.2	0.4
m_2	31	-40.5	-40	-39.5
m_3	33	99.5	100	100.5
p_2	34	59.5	60	60.5
p_3	35	114.5	115	115.5
b_2	37	29.5	30	30.5
b_3	38	74.5	75	75.5

Table 4 Results of sensitivity analysis to select noise factors

Factor	Average response by level			Sum of square ($\times 10^{-9}$)
	Level 1	Level 2	Level 3	
g_2	1.06	1.05	1.05	1.07
g_3	1.06	1.05	1.05	0.45
m_M	1.05	1.05	1.06	2.17
m_P	1.12	1.05	1.00	219.41
m_B	1.05	1.06	1.05	3.38
m_C	1.06	1.05	1.05	1.16
r_P	1.11	1.05	1.01	130.24
r_B	1.06	1.05	1.05	3.32
K_{PM}	1.07	1.05	1.04	18.41
K_{MB}	1.06	1.06	1.04	695.04
K_{PB}	1.11	1.04	1.02	109.69
m	1.06	1.06	1.05	0.51
p	1.07	1.06	1.04	11.29
m_2	1.06	1.05	1.06	1.70
m_3	1.06	1.04	1.06	5.33
p_2	1.05	1.05	1.07	10.20
p_3	1.05	1.06	1.05	0.36
b_2	1.05	1.06	1.06	1.43
b_3	1.05	1.06	1.05	1.60



(a) Initial design



(b) After robust design

Fig. 8 Time response for dynamic disturbance : — Platform, - - - Stabilized mirror

Table 5 Level value of design variables for inner orthogonal array

Factor	Lower limit	Upper limit	Level interval
m_M	1.2	1.8	0.05
m_P	0.4	0.6	0.05
m_B	0.3	0.4	0.05
r_P	45	65	0.5
r_B	27	47	0.5
p_3	110	120	0.5
b_3	70	80	0.5

Table 6 Level value of design variables for outer orthogonal array

Factor	Level 1	Level 2
m_M	-5%	5%
m_P	-5%	5%
m_B	-5%	5%
r_P	-0.5	0.5
r_B	-0.5	0.5
p_3	-0.5	0.5
b_3	-0.5	0.5

Table 7 Robust design values of GPTTS

Factor	Initial value	Robust value
m_M	1.5	1.4
m_P	0.5	0.5
m_B	0.4	0.4
r_P	55.0	61.5
r_B	37.0	46.0
p_3	115.0	115.0
b_3	75.0	77.2
RMS(mil/sec)	1.0	0.9
S/N ratio(dB)	60	62

별로 없음을 알 수 있다. 그러나 안정화 오차를 보인 Fig. 9에 의하면 약간의 안정화 오차가 감소하는 것을 알 수 있다. 이런 설계값의 변화로 S/N비 값의 변화는 초기 60 dB에서 강건설계 후에는 62 dB로 2 dB 증가하였고, RMS값은 1.0 mil/sec (rms)에서 0.9mil/sec(rms)로 감소하였다.

5.3 공차할당

Table 8의 초기공차에 대한 민감도 해석에서 풀링하지 않은 인자수, 즉 특성치 값에 영향을 미치는 인자가 10개이고, 허용차가 1.0 mil/sec이므로 각속도오차의 RMS값의 감소의 허용값(δ)은 식 (13)에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\delta = \frac{(1.0 - 0.9)}{10} \tag{18}$$

3번의 축차반복과정을 통하여 공차를 구한 결과는 Table 8과 같다. 표에서 보는 바와 같이 초기에 강한 영향을 주는 m_M 의 공차를 줄여야 함을 알 수 있다. m_B, K_{MB}, p_3, b_3 의 공차는 매우 느슨하게 주어도 RMS 값에 영향을 거의 미치지 않는다. $m_C, m_P, r_P, r_B, K_{PB}, m_2, m_3, g_2, g_3$ 의 하한 공차는 현재대로 하고, 상한공차는 느슨하게 주어도 되며, K_{PM}, p_2, b_2 의 상한공차는 현재대로 하고 하한 공차는 느슨하게 주어도 됨을 알 수 있다. 최종 설계치는 Table 9에 나타난 바와 같다. 공차할당을 통해 구한 공차값의 타당성을 보기 위

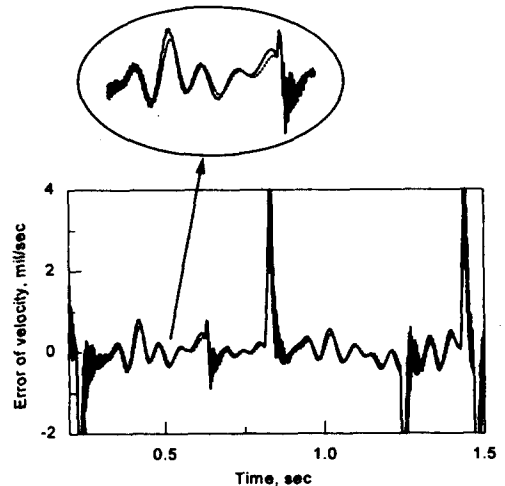


Fig. 9 Tracking error on dynamic disturbance : — Initial design ; Robust design

Table 8 Tolerance of GPTTS

Factor	Initial tolerance		After tolerancing	
	Low tol.	High tol.	Low tol.	High tol.
g_2	-0.01	0.01	•	0.011
g_3	-0.5	0.5	-0.51	•
m_M	-5%	5%	-2.21%	6.00%
m_P	-5%	5%	-5.01%	•
m_B	-5%	5%	•	•
m_G	-5%	5%	-10.5%	•
r_P	-0.5	0.5	-0.54	•
r_B	-0.5	0.5	-1.23	•
K_{PM}	-5%	5%	•	5.04%
K_{MB}	-5%	5%	•	•
K_{PB}	-5%	5%	-5.15%	•
m	...	0.4	...	•
p	...	0.4	...	1.01
m_2	-0.5	0.5	-0.52	•
m_3	-0.5	0.5	-0.52	•
p_2	-0.5	0.5	•	0.52
p_3	-0.5	0.5	•	•
b_2	-0.5	0.5	•	0.53
b_3	-0.5	0.5	•	•

(• : the factor whose tolerance is applied wide)

Table 9 Final designed values

Factor	Final designed value
g_2 [mm]	$-0.5^{+0.01}$
g_3 [mm]	$-119^{+0.51}$
m_M [kg]	$1.4^{+0.08}_{-0.03}$
m_P [kg]	$0.5_{-0.03}$
m_B [kg]	0.4
m_G [kg]	$5.0_{-0.54}$
r_P [mm]	$61.5_{-0.54}$
r_B [mm]	$46.0_{-1.23}$
K_{PM} [kN/m]	$50^{+2.46}$
K_{MB} [kN/m]	100
K_{PB} [kN/m]	$30_{-1.68}$
m [μ m]	0.0
p [μ m]	0.0
m_2 [mm]	$-40_{-0.52}$
m_3 [mm]	$100_{-0.52}$
p_2 [mm]	$60^{+0.52}$
p_3 [mm]	115
b_2 [mm]	$31.4^{+0.53}$
b_3 [mm]	77.2

- : Variable with both tolerances
- : Variable with upper tolerance
- : Variable with lower tolerance
- : No tolerance specifications

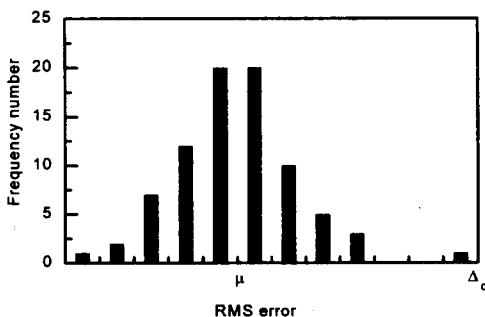


Fig. 10 Result of inner orthogonal array simulation after tolerance design for stabilized head mirror unit : $\mu=0.88$ mil/sec, $\Delta_0=1.0$ mil/sec

해 강건설계값에 할당된 공차값을 3수준으로 L_{81} (3^4) 직교배열표에서 시뮬레이션을 행하였다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 공차할당후 모든 시뮬레이션의 안정화 오차는 허용차 안에 존재하고 그 평균값도 0.88 mil/sec로 상당히 낮아짐을 알 수 있다.

6. 결 론

특성치의 허용차가 주어지고 각 설계변수의 공차에 따른 제조단가의 변화가 동일하다는 가정하에 공차를 할당하는 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘을 이용하여 안정거울 시스템의 민감도 해

석, 강건설계 및 공차설계를 행하였다. 민감도 해석을 통해 안정거울 시스템의 안정화 성능에 크게 영향을 미치는 7개의 중요한 설계변수를 추출하였고 강건설계기법을 이용하여 잡음에 강건한 최적치를 구하였다. 각 설계인자는 초기값이 강건설계값 근처에 존재하며, 설계값의 변화로 S/N비값은 2 dB 증가하였고, RMS값은 0.1 mil/sec(rms) 감소하였다. 그리고 실제 제작시에 문제가 되는 공차설계를 통해 작은 공차 범위를 가져야 할 설계변수를 도출하였다. m_M 이 안정화 성능에 가장 크게 영향을 주므로 그 공차범위를 줄여야 하며 m_B , K_{MB} , b_3 , b_3 는 공차범위가 크게 안정화 성능에 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 기타의 변수들은 각각 하한공차 및 상한공차로 주어졌다.

후 기

본 연구는 1994년도 국방과학연구소의 연구개발 과제의 연구비 지원에 의한 결과로서 이에 감사의 뜻을 포함합니다.

참고문헌

- (1) 이종원, 1989, "Taguchi방법에 의한 실험계획," 자동차공학회지, Vol. 11, No. 6.
- (2) 염봉진, 서순근, 1993, "실험계획 및 분석: 다구찌방법과 직교배열의 활용," 한국과학기술원.
- (3) 신동길, 1994, "Monte Carlo Simulation과 다구찌방법을 이용한 치차의 공차할당," 석사학위논문, 한국과학기술원
- (4) Lee, W. J. and Woo, T. C., 1989, "Optimum Selection of Discrete Tolerances," *ASME Journal of Mechanism, Transmission, and Automation in Design*, Vol. 111, pp. 243~251.
- (5) Phadke, M. S., 1989, *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice-Hall.
- (6) 田口玄一, 1991, 품질공학 사례집-일본편 일반, 한국공업표준협회.
- (7) Phadke, M. S., 1989, "Design Optimization Case Studies," *AT&T Technical Journal*, Vol. 65, No. 2, pp. 51~68.
- (8) 이종원, 김추호, 1994, "다구찌 방법을 이용한 컴퓨터 원용 강건설계 기법의 개발," 대한기계학회논문집, 제18권, 제2호, pp. 278~291.
- (9) 이종원, 1992, "조준경 안정화장치의 동적구조 해석 I," 국방과학연구소 연구보고서.
- (10) 이종원, 김문언, 1993, "조준경 안정화장치의 동적구조 해석 II," 국방과학연구소 연구보고서.
- (11) 손석만, 1995, "동력학계의 강건설계 및 공차할당," 석사학위논문, 한국과학기술원.
- (12) 이종원, 1995, "CARD/T for Windows 사용 설명서—컴퓨터 원용 강건설계 및 공차할당 Version 2.0," 한국과학기술원 소음 및 진동제어 연구센터.