

< 논문 >

변위증폭기를 이용한 마이크로 매니플레이터의 공리적 설계

한석영* · 윤상준* · 황준성* · 김민수* · 박재용* · 이병주** · 김선정***
(2006년 7월 3일 접수, 2006년 11월 9일 심사완료)

Axiomatic Design of a Micromanipulator using Displacement Amplifier

Seog-young Han, Sang-jun Yoon, Jun-seong Hwang, Min-sue Kim,
Jae-yong Park, Byung-ju Yi and Seon-jung Kim

Key Words: Axiomatic Design(공리적 설계), Workspace(작업공간), Natural Frequency(고유진동수), Displacement Amplifier(변위증폭기), Micromanipulator(마이크로 매니플레이터)

Abstract

Micromanipulator is a device that manipulates an object with high precision. Generally, a parallel-type robot has inherently higher precision than a serial-type robot. In most cases, the use of flexure hinge mechanisms is the most appropriate approach to micromanipulators. The micromanipulator is basically required that have high natural frequency and sufficient workspace. However, previous designs are hard to satisfy the required workspace and natural frequency, simultaneously, because the previous micromanipulators are coupled designs. Therefore, this paper suggests a new design parameter as displacement amplifier and new design procedure based on semi-coupled design in axiomatic design. As a consequence, the spatial 3-DOF micromanipulator which is chosen as an exemplary device has natural frequency of 500Hz and workspace of $-0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. To investigate the effectiveness of the displacement amplifier, simulation and experiment are performed.

1. 서론

마이크로 매니플레이터는 말단에서 수 마이크로미터의 정밀도를 가지고 작업 대상 물체를 조작할 수 있는 기구를 의미한다. 일반적으로 직렬형(serial-type) 로봇에 비하여 병렬형(parallel-type) 로봇이 더 높은 정밀도를 가지고 있으므로, 병렬

형 마이크로 매니플레이터에 대한 연구가 더욱 활발히 수행되었다. 개발된 기구의 중요한 특징은 여러 기계적 관절이 기구적인 조립으로 연결되지 않고, 각 관절을 대체하는 힌지(hinge)를 적용하여 일체형(monolithic)으로 가공된 점이다.⁽¹⁻⁵⁾

이러한 구조는 여러 개의 링크(link)와 관절을 연결함으로써 인해 야기되는 부정확성과 백래쉬(backlash)를 최소화 할 수 있는 형태이다. 마이크로 매니플레이터는 응답특성이 빠르고, 분해능(resolution)이 우수하며, 구동력이 좋은 압전구동기(piezoelectric actuator)에 의해 구동된다. 하지만 최대 변위가 자신의 길이의 0.1%에 불과하여 요구되는 작업공간을 확보하기 힘들다.⁽³⁻⁵⁾

마이크로 매니플레이터가 가져야 할 조건은 충

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : syhan@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0456 FAX : (02)2298-4634

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 한양대학교 전자컴퓨터공학부

*** 한양대학교 전기제어생체공학부

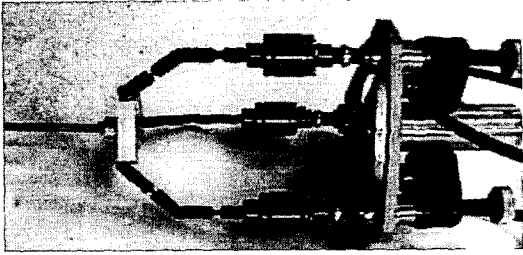


Fig. 1 Spatial 3-DOF Micro manipulator⁽⁵⁾

분한 작업공간(workspace)과 서브마이크론 단위의 정밀도를 유지하기 위한 높은 고유진동수(natural frequency)이다. 하지만 기존 설계의 경우 고유진동수와 작업공간이 서로 연성되어 있는 설계로 인하여, 설계자가 요구하는 고유진동수와 작업공간을 동시에 만족시키기 어려웠다.^(2,3)

그러므로 본 논문에서는 기존의 연구를 공리적 설계(axiomatic design) 관점에서 분석하여 설계자가 원하는 작업공간과 고유진동수를 동시에 만족하는 공간형 3자유도 마이크로매니플레이터의 새로운 설계안과 설계순서를 개발하였다.

요구조건은 500Hz의 고유진동수와 $-0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 의 작업공간을 가지도록 설정하였으며, 이를 만족하는 새로운 공간형 3자유도 마이크로 매니플레이터와 새로운 설계안인 변위 증폭기에 대한 연구를 수행하고, 설계 결과의 타당성을 확인하기 위하여 유한요소법 해석과 변위증폭기의 실험을 수행하였다.

2. 공간형 3자유도 매니플레이터

2.1 기구 구조

본 논문에서는 Fig. 1과 같은 기존에 제작되었던 기구를 최적화 모델로 선정하였다. 이 기구는 공간상에서 α, β, z 방향으로 공간형 3자유도를 구현하는 기구이다. 본 모델은 3개의 직렬체인이 상판(upper plate)에 연결되는 병렬형 구조이다. 각각의 직렬 체인은 2축 탄성힌지(spherical joint), 1축 탄성힌지(revolute joint), 그리고 프리즈메틱 조인트(prismatic joint)의 역할을 하는 압전구동기가 하나의 모듈(one-module)로 제작되었다. 모델링의 편의상 기본 좌표계는 Fig. 1에서 3개의 직렬체인을 연결하는 하판(lower plate) 가운데 위치시켰다. 각

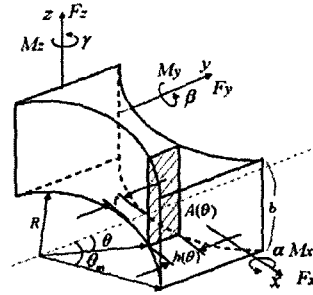


Fig. 2 Revolute flexure hinge⁽⁴⁾

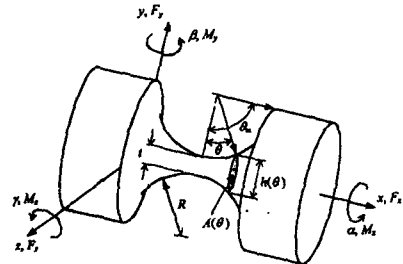


Fig. 3 Spherical flexure hinge⁽⁵⁾

각의 직렬 체인에 연결된 부스터에 의해서, 상판(upper plate)은 공간형 3자유도를 구현하게 된다.

Fig. 2와 3은 각각 1축 탄성힌지(revolute flexure hinge)와 2축 탄성힌지(spherical flexure hinge)의 구조를 보여주고 있다. 노치(notch)를 이용한 힌지는 회전관절(revolute joint) 역할을 하며, 이 기구에서는 회전 스프링으로 간주한다.

2.1.1 역기구학 해석

Fig. 4와 5는 각각 관절의 모델 방식과 기구의 좌표계를 보여준다. Fig. 4에서 R 과 r 은 각각 가상하판과 상판의 반경이며, H_i 는 압전구동기에 연결된 부스터의 길이변화를 나타낸다. 1축 탄성힌지와 2축 탄성힌지는 각각 1자유도와 3자유도를 구현하며, 2축 탄성힌지의 경우 3개의 회전관절로 구성된 것으로 모델링하였다. \vec{P}_{bi} 는 기본 좌표계에 대한 상판 중심의 위치 벡터(position vector)이다. 상판의 지역 좌표계에 대한 기본 좌표계로의 변환 행렬(transformation matrix)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_i^b \cong \begin{bmatrix} n_1 & o_1 & a_1 & x \\ n_2 & o_2 & a_2 & y \\ n_3 & o_3 & a_3 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

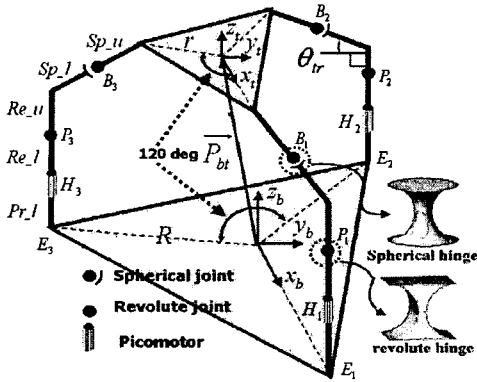


Fig. 4 Modeling of micromanipulator⁽⁵⁾

기구의 상판 출력벡터(output vector) \underline{u} 는 x, y, z 와 x - y - z 오일러 각도(Euler angles) α, β, γ 로 표현될 수 있다. 본 기구는 3자유도를 구현하므로, 독립 출력벡터(independent output vector) \underline{u}_{ind} 를 α, β, z 로 표현하였으며, 나머지 요소들은 종속 출력벡터(dependent output vector) \underline{u}_{dep} 로 정의하였다. i 번째 직렬체인의 입력벡터(input vector) ${}^i\phi$ 는 다음과 같이 표현된다.

$${}^i\phi = \begin{bmatrix} H_i \theta_2 \theta_3 \theta_4 \theta_5 \\ \phi_1 \phi_2 \phi_3 \phi_4 \phi_5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

역기구학은 독립 출력벡터 $\underline{u}_{ind} = [\alpha \beta z]^T$ 가 주어졌을 때, 각 체인의 입력 벡터 ${}^i\phi$ 를 구하는 것이다. P_i 는 기본 좌표계에 대한 i 번째 직렬체인의 P_i 의 위치벡터를 나타낸다. \underline{b}_i 는 상판 지역 좌표계에 대한 점 B_i 의 위치벡터이며, 식 (3) 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \underline{b}_1 &= [b_{1x}, 0, -b_{1z}], \\ \underline{b}_2 &= \left[-\frac{1}{2}b_{1x}, \frac{\sqrt{3}}{2}b_{1x}, -b_{1z}\right], \\ \underline{b}_3 &= \left[-\frac{1}{2}b_{1x}, -\frac{\sqrt{3}}{2}b_{1x}, -b_{1z}\right]. \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $b_{1x} = r + Sp_u \cos \theta_{lr}$ 와 $b_{1z} = Sp_u \sin \theta_{lr}$ 이며, θ_{lr} 은 45°의 값을 가진다. \underline{b}_i 는 다음과 같이 기본 좌표계에 대한 표현이 가능하다.

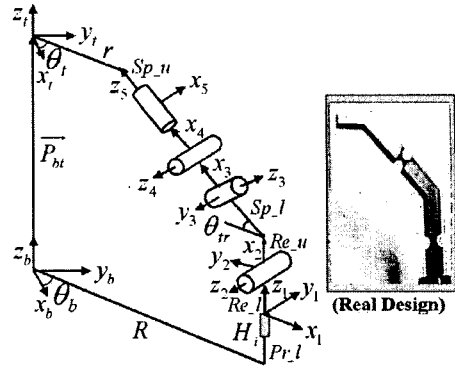


Fig. 5 Modeling of the serial chain⁽⁵⁾

$$\begin{bmatrix} B_i \\ 1 \end{bmatrix} = [T_i^b] \begin{bmatrix} b_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad i=1, 2, 3. \quad (4)$$

식 (4)를 사용하여 점 B_i 를 기본 좌표계에 대하여 표현하였다. 링크 $\overline{B_1P_1}, \overline{B_2P_2}$ 과 $\overline{B_3P_3}$ 는 $Y=0, Y=-\sqrt{3}X$ 와 $Y=\sqrt{3}X$ 평면상에서 움직이는 1축 탄성힌지에 의해 구속되며, 구속방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_c &= -n_2 b_{1x} + a_2 b_{1z}, \\ n_2 &= o_1, \\ x_c &= -\frac{1}{2}(o_1 b_{1x} - n_1 b_{1x} - 2a_1 b_{1z}). \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)를 x - y - z 오일러 각도를 사용하여 표현하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} n_1 &= \cos \beta \cos \gamma, \\ n_2 &= \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma, \\ n_3 &= -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma, \\ o_1 &= -\cos \beta \sin \gamma, \\ o_2 &= -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma, \\ o_3 &= \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma, \\ a_1 &= \sin \beta, \\ a_2 &= -\sin \alpha \cos \beta, \\ a_3 &= \cos \alpha \cos \beta \end{aligned} \quad (6)$$

식 (3)으로부터 식 (6)을 이용하여 z 축에 대한 오일러 각도 γ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\gamma = \tan^{-1} \left(-\frac{\sin\alpha \sin\beta}{\cos\alpha + \cos\beta} \right) \quad (7)$$

주어진 α 와 β 그리고 γ 를 식 (6)에 대입하면 T_i^b 의 모든 값들을 얻을 수 있으며, 이 값들은 식 (5)를 이용하여 x_c 와 y_c 값을 계산할 수 있다. 그러므로 B_i 는 식 (3)에 의해 구해지며, 각 체인의 $\overline{B_i P_i}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\overline{B_i P_i} = \left\{ (B_{ix} - P_{ix})^2 + (B_{iy} - P_{iy})^2 + (B_{iz} - P_{iz})^2 \right\}^{0.5} \quad (8)$$

여기서 B_{ix} , B_{iy} , B_{iz} , P_{ix} , P_{iy} , 그리고 P_{iz} 는 점 B_i 와 P_i 의 기본 좌표계에 대한 위치벡터이다. 그러므로 부스터의 이동거리 H_i 는 다음 식 (9)로부터 얻을 수 있다.

$$H_i = B_{iz} - Pr_l - Re_l - \left\{ \overline{B_i P_i}^2 - (B_{ix} - P_{ix})^2 - (B_{iy} - P_{iy})^2 \right\}^{0.5} \quad (9)$$

i 번째 직렬체인의 1축 탄성힌지의 회전각 ${}^i\theta_2$ 은 Fig. 6에서 기구학적으로 다음과 같이 구해진다.

$${}^i\theta_2 = \pi/2 - {}^i\theta_d - {}^i\theta \quad (10)$$

i 번째 직렬체인의 2축 탄성힌지의 회전각 ${}^i\theta_3$, ${}^i\theta_4$ 그리고 ${}^i\theta_5$ 는 식 (11)로부터 구할 수 있다.

$${}^i[T_1^2] {}^i[T_b^1] {}^i[T_1^b] {}^i[T_5^t] = {}^i[T_3^2] {}^i[T_4^3] {}^i[T_5^4] \quad (11)$$

여기서 ${}^i[T_j^k]$ 는 i 번째 직렬체인의 j 번째 좌표계를 k 번째 좌표계로 변환시켜 주는 행렬이다. 식 (11)의 왼쪽 항은 주어진 값이며, 오른쪽 항은 ${}^i\theta_3$, ${}^i\theta_4$ 그리고 ${}^i\theta_5$ 의 함수로 구성되어 있다. 왼쪽 항은 다음 식 (12)와 같이 정의된다.

$${}^i[T_1^2] {}^i[T_b^1] {}^i[T_1^b] {}^i[T_5^t] \cong \begin{bmatrix} e_1 & f_1 & g_1 & i_1 \\ e_2 & f_2 & g_2 & i_2 \\ e_3 & f_3 & g_3 & i_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

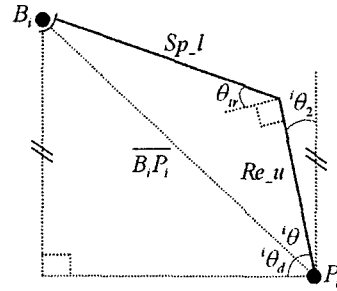


Fig. 6 Geometric solution of ${}^i\theta_2^{(5)}$

따라서 2축 탄성힌지의 회전각은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} {}^i\theta_3 &= \tan^{-1} \left(\frac{g_3}{g_3 \cos\theta_{tr} + g_2 \sin\theta_{tr}} \right), \\ {}^i\theta_4 &= \tan^{-1} \left(\frac{g_1 \cos\theta_{tr} + g_2 \sin\theta_{tr}}{g_3 \cos^2\theta_3 (g_2 \cos\theta_{tr} - g_1 \sin\theta_{tr})} \right), \\ {}^i\theta_5 &= \tan^{-1} \left(\frac{e_2 - e_1}{f_2 - f_1} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

3. 공리적 설계

3.1 공리적 설계

공리적 설계⁽⁶⁾에서의 공리는 독립공리(independence axiom)와 정보공리(information axiom)로 이루어진다. 독립공리는 기능적 영역의 기능적 요구(Functional Requirement; FR)로부터 물리적 영역의 설계 파라미터(Design Parameter; DP)로 진행되는 사상과정을 정의할 때에, DP와 FR이 일대일로 대응되기를 추천한다.

일반적으로 독립공리는 설계가 올바른가를 판별하고, 정보공리는 독립공리를 만족하는 설계안 중에서 가장 좋은 설계를 판별하는데 사용된다. 실제 설계에서는 독립공리를 만족하는 여러 개의 설계안을 찾아내기 어렵기 때문에 정보공리를 사용하기가 힘들다.⁽⁷⁾ 따라서 본 연구에서는 독립공리만을 사용하였다.

독립 공리를 설명하기 위해서 식 (14)의 설계방정식을 사용한다.

$$\{FR\} = [A]\{DP\} \quad (14)$$

여기서 {FR}은 기능적 요구벡터이고, {DP}는 설계 파라미터벡터, [A]는 {FR}과 {DP}와의 관계를 설명하는 설계행렬(design matrix)이다. 일반적으로 설계행렬은 다음과 같은 세 가지 형태를 가진다.

연성 설계(coupled design)

$$\begin{Bmatrix} \text{FR1} \\ \text{FR2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{DP1} \\ \text{DP2} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

비연성화 설계(decoupled design)

$$\begin{Bmatrix} \text{FR1} \\ \text{FR2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{DP1} \\ \text{DP2} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

비연성 설계(uncoupled design)

$$\begin{Bmatrix} \text{FR1} \\ \text{FR2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O \\ O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{DP1} \\ \text{DP2} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

여기서 X는 FR과 DP가 관련이 있음을 의미하고, O는 관련이 없음을 의미한다. 식 (15)의 연성 설계는 FR1을 만족시키기 위해 DP1, DP2를 동시에 결정해야 하는 경우이다. 이 경우, FR1을 만족하기 위해 DP1, DP2를 결정하더라도 이 결정이 FR2도 만족한다는 보장은 없다. 마찬가지로 FR2를 만족하는 DP1, DP2를 결정하더라도 이 결정이 FR1도 만족한다는 보장은 없다. 따라서 주어진 FRs를 만족하기 위해서는 시행착오를 반복하여 DP를 결정해야 한다.

식 (16)의 비연성화 설계는 순차적 설계를 보여준다. FR1을 만족하는 DP1을 결정한 후, FR2를 만족시켜주는 DP2를 추가적으로 결정하면 된다.

식 (17)는 각각의 FR과 DP가 일대일의 대응관계를 이루며, 설계 순서에 무관하다.

만약 어떠한 기구의 설계방정식이 식 (15)과 같은 연성 설계라면, 설계자는 FR이나 DP를 다시 설정하여 독립공리를 만족하는 비연성 설계가 되도록 해야 하며, 차선책으로 비연성화 설계가 되도록 하여야 한다.

3.2 독립공리를 만족하는 기구 설계

초정밀 위치결정 기구가 가져야 할 가장 중요한 기능은 충분한 작업공간 확보와 높은 고유진동수를 가지는 것이다. 따라서 본 연구에서는 초정밀 기구의 FRs를 다음과 같이 정의하였다.

- FR1 : 높은 고유진동수 확보
- FR2 : 충분한 작업공간 확보

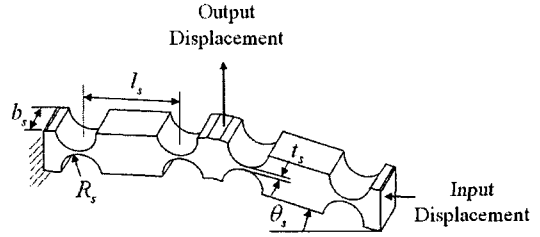


Fig. 7 Schematic of a displacement amplifier

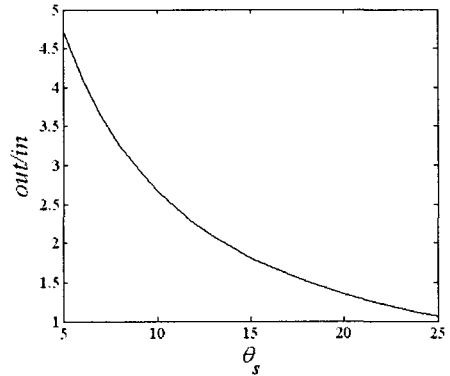


Fig. 8 Amplification rate about \$\theta_s\$

본 연구에서는 FRs를 만족시키기 위한 DP는 다음과 같이 새롭게 정의하였다.

- DP1 : 기구 질량의 감소
- DP2 : 변위증폭기의 사용

Fig. 7은 변위증폭기(displacement amplifier)의 구조를 나타내며, 4개의 회전관절과 5개의 링크로 이루어진 탄성 스프링(spring)이다. 입력변위(input displacement)는 압전구동기의 변위를 나타내고 출력변위(output displacement)는 변위증폭기를 통해 증폭된 변위를 나타내며, 기구의 구동변위로 사용된다. 여기서 입력변위와 출력변위의 관계는 다음과 같다.

$$\text{Output} = \frac{\sqrt{L_s^2 - (L_s \times \cos \theta_s - \text{Input})^2} - L_s \times \sin \theta_s}{2} \quad (18)$$

변위증폭기의 경우 기울기(\$\theta_s\$)에 따라 증폭비가 좌우되며, Fig. 8과 같은 결과를 얻을 수 있다.

Table 1 Results of optimization⁽⁶⁾

Design Variables (mm)	Previous and optimal values		
	Previous	Optimum	Design
r	15	5	5
Sp_u	11.87	15	15
Sp_l	16.27	15	15
Re_u	11.88	15	15
Re_l	30	30	30
Sp_r	1.5	2.7060	2.71
Re_r	1.65	2.3056	2.31
Sp_t	1	0.5412	0.55
Re_t	0.7	0.3128	0.32
Re_b	4	5	5

Table 2 Constants used for amplifier design

Design Variables	l_s	t_s	b_s	R_s
Values(mm)	11.68	0.32	5	2.34

변위증폭기를 사용하게 되면 출력변위에 비례하여 입력변위에서 큰 힘을 발생시켜 주어야 한다. 압전구동기는 최대길이 변화가 작은 반면에 큰 힘을 발생시킨다. 이러한 특성 때문에 변위증폭기를 사용하여 출력변위를 늘리더라도 시스템에 큰 영향을 주지 않는다. 새로운 DP2를 제안함으로써 기존의 연성 설계를 식 (16)과 같은 비연성 설계로 만들었다. 설계자는 기구를 설계할 때 요구되는 FR1을 만족하는 DP1을 결정하고, FR2를 만족하는 DP2를 순서적으로 결정하면 FR1과 FR2를 모두 만족시켜주는 설계를 손쉽게 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 요구되는 고유진동수를 만족하는 기구를 설계하고, 요구되는 작업공간에 맞추어 변위증폭기를 설계하는 순서에 따라 기구를 설계하였다.

4. 기구 설계

4.1 마이크로 매니플레이터의 최적설계

설계순서에 맞추어 먼저 고유진동수를 만족시

키는 설계를 수행하였다. 기구가 가져야 하는 고유진동수는 500Hz로 설정하였다. 최적설계 과정에서는 목적함수를 기구의 질량 최소화로 설정하여 수행하였다. 기구의 고유진동수는 각 직렬체인 링크길이, 폭, 한지의 반경, 높이, 두께에 의해서 결정되기 때문에 이들을 설계변수로 설정하였으며, 시스템은 대칭구조로 이루어졌기 때문에 1개의 직렬체인에 대하여 최적설계를 수행하였다.

최적화 문제의 해를 얻기 위하여 SQP(Sequential Quadratic Programming) 알고리즘을 사용했으며, 수치해석 프로그램인 MATLAB을 이용하여 Table 1과 같은 최적해를 얻었다. 하지만 제작의 기술적 한계로 설계변수가 제한조건을 만족하는 방향으로 설계값을 조정하였다.

4.2 변위증폭기의 설계

설계순서에 따라 고유진동수를 만족시키는 설계 후 작업공간을 만족시키는 변위증폭기의 기울기를 결정하여야 한다. 기구의 요구하는 작업공간을 만족시키기 위해서는 첫 번째 직렬체인 첫 번째 관절에서 135.4 μ m의 길이변화가 필요하다. 4.6cm길이의 압전구동기를 사용할 경우 최대 45 μ m의 변위를 얻을 수 있으며, Fig. 8로부터 증폭비 3.01을 가지는 변위증폭기의 기울기 $\theta_s=8.7^\circ$ 를 가지는 스프링을 설계할 수 있다. 하지만 스프링의 오차를 생각하여 $\theta_s=8.2^\circ$ 로 정하여 증폭비 3.25를 가지는 스프링을 설계하였다.

5. 시뮬레이션

본 연구에서는 유한요소법을 이용한 시뮬레이션만 수행하였으며, 사용된 프로그램은 ANSYS이다. 기존의 연구에서 공간형 3자유도 기구의 고유진동수와 허용응력에 대한 시뮬레이션은 이미 수행하였으므로 새롭게 제안된 설계안에 대해서만 시뮬레이션을 수행하였다.⁽⁸⁾

증폭비 3.25를 가지는 변위증폭기의 변위를 확인하기 위한 시뮬레이션은 Fig. 8로부터 구한 θ_s 와 Table 2의 파라미터를 이용하였다. 모델링하는 과정에서 변위증폭기의 링크 부분은 강체, 단성 힌지는 회전힌지로 가정하였기 때문에 링크 부분과 힌지에 각각 비교적 큰 격자(coarse mesh)와 미세한 격자(fine mesh)를 적용하였다.

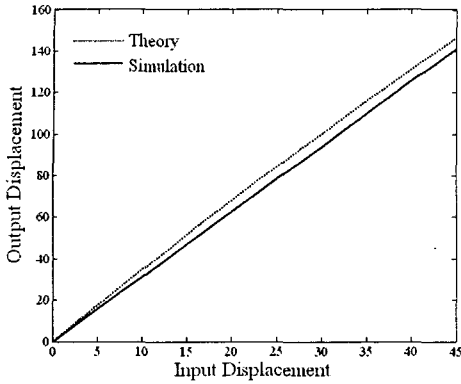


Fig. 9 Simulation results

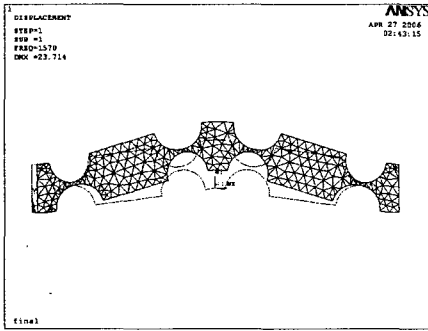


Fig. 10 Natural frequency of the amplifier

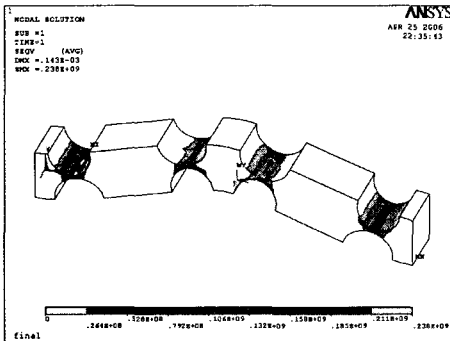


Fig. 11 Maximum stress in the amplifier

Fig. 9는 입력변위를 0부터 45 μm 까지 변화시킬 때 출력변위의 변화를 나타낸 것으로 식 (18)에서 얻은 이론값과 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

시뮬레이션은 3.13배로 변위가 증폭되었고 이론적인 증폭치와 비교하면 3.8%의 오차를 보였다.

Fig. 10과 11은 스프링에 대한 고유진동수 및 최대응력에 관한 시뮬레이션 결과로 각각 1570Hz

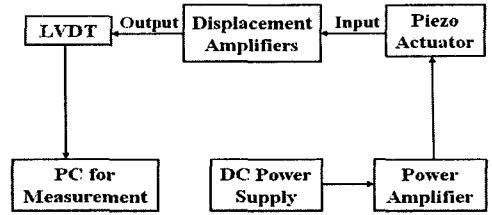


Fig. 12 Schematic experiment setup

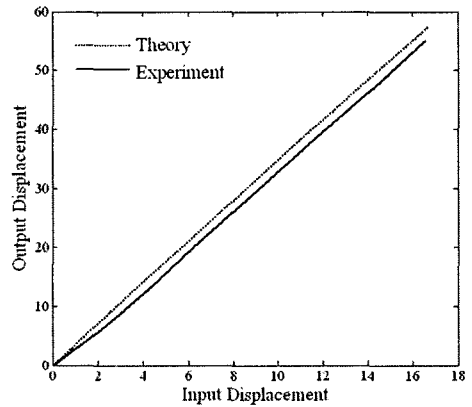


Fig. 13 Experiment result

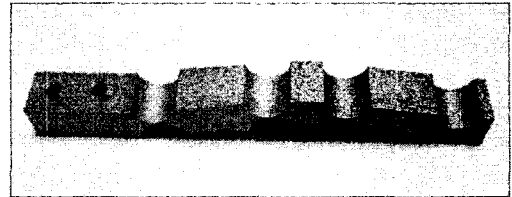


Fig. 14 Displacement amplifier

와 238MPa으로 나타났다. 결론적으로 스프링은 요구되는 고유진동수와 허용응력을 만족하는 설계임을 확인할 수 있었다.

6. 실험

Fig. 12은 변위증폭기의 실험 구성을 도시화한 것이다. 전압증폭기(power amplifier)에 의해 증폭된 직류전압공급기(DC power supply)는 압전구동기의 구동에 필요한 전력을 공급한다. 출력변위의 경우 분해능이 0.61 μm 인 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 이용하여 측정하였다.

Fig. 13은 압전구동기가 0~16.7 μm 로 변할 때

변위증폭기의 출력변위를 측정된 것으로 이론적인 값과 비교하였다. 개발된 변위증폭기의 경우 Fig. 14와 같다. 실험결과 이론적인 증폭치와 비교할 경우 3.83%의 오차를 보였으며, 이는 시뮬레이션 결과와 거의 일치한다.

7. 결론

본 연구에서는 공리적 설계 관점에서 기존 설계를 분석하고 공리 설계를 만족시키는 설계를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 설계자가 요구하는 작업공간과 고유진동수를 동시에 만족하는 새로운 설계안과 설계순서를 개발하여 비연성화 설계를 실현하였다.

(2) 공간형 3자유도 마이크로 매니플레이터의 최적설계를 수행하였으며, 시뮬레이션을 통하여 요구하는 작업공간과 고유진동수를 만족함을 확인하였다.

(3) 변위증폭기의 시뮬레이션 및 실험을 통하여 변위증폭기의 효율성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2005-000-10238-0)와 2006년도 2단계 두뇌한국21사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

(1) Freeman, R. A. and Tesar, D., 1988, "Dynamic Modeling of Serial and Parallel Mechanisms/Robotics

Systems, Part I-Methodology, Part II-Applications," *Proc. of 20th ASME Mechanisms Conference*, Orlando, FL, DE-Vol. 15, No 3, pp. 7~27.

(2) Ryu, J. W., 1997, "6-Axis Ultra Precision Positioning Mechanism Design and Positioning Control," Ph.D. dissertation, Department of Mechanical Engineering, KAIST.

(3) Gao, P., Swei, S. M. and Yuan, Z., 1999, "A New Piezodriven Precision Micropositioning Stage Utilizing Flexure Hinges," *Nano-technology*, Vol. 10, pp. 394~398.

(4) Chung, G. B., Yi, B. J., Suh, I. H., Kim, W. K. and Chung, W. K., 2001, "Design and Analysis of a Spatial 3-DOF Micro Manipulator for Teleoperation," *Intelligent Robots and Systems, Proc. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Maui, pp. 337~342.

(5) Yi, B. J., Chung, G. B., Kim, W. K. and Suh, I. H., 2003, "Design and Experiment of a 3-DOF Parallel Micromechanism Utilizing Flexure Hinges," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 4, pp. 604~612.

(6) Suh, N. P., 2001, *Axiomatic Design*, Oxford University Press, New York.

(7) Bae, S. W., 2001, "Axiomatic Design of Independent Automotive Suspension Systems," Ph.D.'s thesis, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University.

(8) Kim, J. O., 2003, "Optimization of a Ultra-Precision Positioning Manipulator Using Axiomatic Design" *Master's thesis*, Department of Automotive Engineering, Hanyang University.