

전자기력을 이용한 3 자유도 정밀 위치결정기구에 관한 연구

이 기 하*, 최 기 봉**, 박 기 환***, 김 수 현**, 곽 윤 근**

A Study on Three Degree-of-Freedom Fine Positioning Device Based on Electromagnetic Force

Ki-Ha Lee*, Kee-Bong Choi**, Kyihwan Park***, Soo Hyun Kim** and Yoon Keun Kwak**

ABSTRACT

This paper presents the design and the control of three degree-of-freedom(DOF) fine positioning device based on an electro-magnetic force. The device is designed by use of a magnetic circuit theory and it is capable of fine motion due to the electro-magnetic force. The device consists of permanent magnets, yokes and coils. The magnetic fluxes generated from the permanent magnets constitute magnetic paths through steel, whereas the coils are arranged into the gap between two surfaces of the yokes. Therefore, by supplying current to the coils, the coils are capable of some motions due to Lorentz forces. For the optimal design of the actuating system, the system parameters are defined and investigated under the given constraints. From the system modeling in small displacement, three decoupled equations of motion are obtained. To get better performance of the system, a PID controller is implemented. Experimental results are presented in terms of time response and accuracy.

Key Words : Electromagnetic force (전자기력), Positioning device (위치결정기구), Magnetic circuit (자기회로), Permanent magnet (영구자석), Yoke (요크), Coil (코일), Lorentz force (로렌츠 힘)

1. 서 론

최근 정밀 기계산업 및 반도체 공정의 검사장비 등에서 고정밀 위치결정기구의 필요성이 크게 대두되고 있다. 이들 위치결정기구는 작업의 특성에 따라 2자유도 이상을 갖는 다자유도 형태로 많이 개발되어 오고 있다. 기존의 다자유도 형태의 위치결정기구는 주로 1 자유도를 갖는

기구 위에 또 다른 1 자유도의 기구를 연속적으로 결합시키는 직렬형 기구(serial manipulator)가 주로 연구되어 왔으나, 최근들어 병렬형 기구(parallel manipulator)에 관심을 기울이기 시작했다. 전자는 1 자유도의 기구들이 계속해서 결합되기 때문에 각 기구의 선단(end-effector)에서 생기는 위치오차가 누적되어 결과적으로 최종기구의 선단에서 큰 오차가 발생된다. 또한 각 기구

* LG 산전 요소기술 연구실
** 한국과학기술원 기계공학과
*** 광주과학기술원 기전공학과

들은 그 전단계의 기구에 하중으로 작용하기 때문에 기저 부분에 있는 기구는 큰 용량의 구동기(actuator)를 필요로 한다. 반면 후자는 연성운동(coupled motion)에 의한 제어의 복잡성 및 난이성이 존재하나, 전자에서 발생하는 위치오차의 누적현상을 제거할 수 있고, 동일한 용량의 구동기로 구동할 수 있기 때문에 고정밀 위치결정기구의 개발에 많이 선호되고 있다.

다자유도 정밀 위치결정기구의 구동원으로는 주로 압전 소자⁽¹⁾, 형상기억합금⁽²⁾, 정전기력⁽³⁾ 및 전자기력⁽⁴⁻¹⁰⁾ 등이 이용되고 있다. 이들 중 전자기력을 이용한 위치결정기구는 높은 분해능과 구현의 용이성으로 인하여 선호되어 오고 있다. Choi^(4,5)는 슬레노이드 형태의 코일과 영구자석을 이용하여 자기부상에 의한 6 자유도 미소 위치결정기구를 개발하였다. 이 기구는 상반구조(antagonistic structure)를 채택하여 시스템의 안정성을 크게 향상시켰다. Hollis^(6,7)는 코일과 영구자석을 조합시켜 로렌츠 힘(Lorentz force)를 발생시키는 구동기를 개발하였으며 이 구동기를 육각형 형태로 배치시켜 자기부상식 손목기구(wrist mechanism)를 개발하였다. Jeong⁽⁸⁾은 자기부상식 마이크로 매니플레이터를 개발하였다. 이 시스템은 6개의 공심 슬레노이드와 3각형 형태의 매니플레이터에 부착된 영구자석에 의해 구동되며 4자유도의 운동이 가능하다. Ohnuki⁽⁹⁾는 광 디스크 헤드 운동을 위해 전자기력과 현가 스프링의 조합에 의한 선형 구동기를 개발하였다. 이 시스템은 자로(magnetic flux path)에 이송코일을 배치하여 선형운동이 가능하게 하였다. Wagner⁽¹⁰⁾는 영구자석과 코일에 의해 구동되는 하드 디스크용 구동기의 설계에 있어 매개변수 변화에 의한 구동기의 성능변화를 분석하여 구동성능을 향상시켰다. 이 들 연구를 고찰해 보면 자기부상에 의해 이동부가 고정부와 완전 분리되어 운동하는 시스템과 현가 스프링에 의해 이동부가 고정부와 연결되어 운동하는 시스템으로 구분할 수 있다. 전자는 마찰이 제거되기 때문에 먼지입자를 발생시키지 않아 청정환경에서 사용할 수 있으나, 개회로 시스템이 불안정하여 시스템의 안정화를 위한 제어기 설계가 필수적이다. 반면 후자는 안전한 개회로 시스템을 이루나 현가 장치에 의해 발생하는 힘을 상쇄시키기 위해 좀 더 큰 전류입력이 요구되는 단점을 가지고 있다.

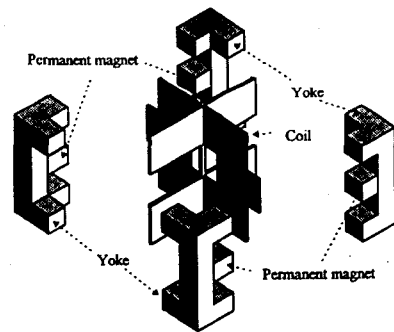
본 연구에서는 시스템의 마찰로 인한 문제점을 최대한 줄이고, 동역학적 안정성을 확보하기 위해 이동부와 고정부 사이에 현가 스프링이 부착된 3 자유도 선형 정밀 위치결정기구를 개발한다. 이 위치결정기구는 이동부가 고

정부에 대해 강체로 작동하는 병렬형 기구로 개발한다. 이 위치결정기구의 기구부 설계에 있어서 기구의 구속조건과 매개변수들을 제시하고, 모의실험을 통하여 구동성능을 향상시키기 위한 방안을 제시한다. 개발된 위치결정기구의 구동성능 향상을 위해 이산 PID 제어기를 구현하고, 위치제어 실험에 의해 구동성능을 고찰한다. 이 위치결정기구의 구동범위는 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 이고 각 축의 정밀도는 $1\mu\text{m}$ 이하를 목표로 한다.

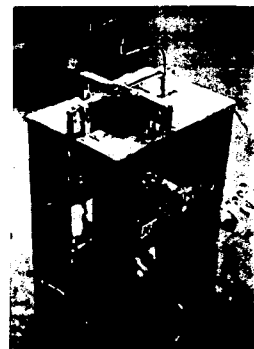
2. 전자기력을 이용한 위치결정기구의 기구부 구조

영구자석과 코일을 이용하여 구동하는 전자기력 작동기는 운동을 하는 이동부에 영구자석이 부착된 이동자석형(moving magnet type)과 이동부에 코일이 부착된 이동코일형(moving coil type)으로 나눌 수 있다. 이동코일형은 이동자석형에 비해 이동부의 질량이 가볍고 가감속 성능이 뛰어나기 때문에 본 연구에서는 이동코일형 구조를 채택하여 위치결정기구의 기구부를 개발한다.

Fig.1은 본 연구에 의해 개발될 위치결정기구의 구조를



(a) Disassembled system



(a) Assembled system

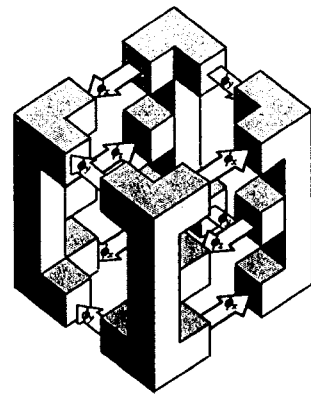
Fig. 1 Configuration of the electro-magnetic positioning device

보여준다. 이 위치결정기구는 고정부, 이동부 및 이동부를 고정부에 연결하는 현가장치로 구성되어 있다. 고정부는 4개의 영구자석과 4개의 요크(yoke)로 구성되어 있으며, 각 요크의 중앙에 영구자석이 부착되어 있다. 이동부는 코일이 지지대에 부착되어 있는 형태로 이루어져 있으며 고정부의 중앙에 배치된다. 코일은 2개의 알루미늄 판 사이에 코어를 삽입한 후 그 사이에 구리선을 감은 것으로 샌드위치 형태로 되어있다. 영구자석은 자속(magnetic flux)을 발생시키며, 이것은 요크를 따라 폐회로의 자로(magnetic flux path)를 형성한다. 자속 안에 코일이 놓여 있을 때 코일에 작용하는 로렌츠 힘 F 는 다음 식과 같다.

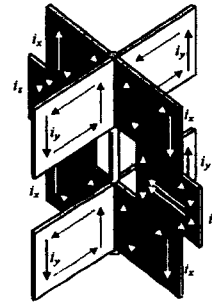
$$F = n \int i(dr \times dB) \quad (1)$$

여기서 n 은 코일의 권선수이고, i 는 코일에 흐르는 전류이며, r 과 B 는 각각 전류의 방향과 주어진 자속밀도를 나타낸다. 식 (1)로부터 알 수 있듯이 코일에 작용하는 힘의 방향은 코일에 흐르는 전류의 방향과 자속의 방향에 서로 수직인 방향으로 발생한다. 그러므로 3자유도의 운동을 얻기 위해서는 서로 직각으로 교차하는 3 쌍의 자속과 전류가 필요하다. 이것을 구현하기 위하여 Fig.2와 같은 구조의 자기회로를 설계하였다. 즉 Fig.2(a)와 같이 영구자석에서 발생한 자속은 요크를 따라 흐르며 그림의 화살표의 방향으로 자로가 형성된다. 이 때 Fig.2(b)의 코일은 Fig.2(a)에 있는 요크의 공극 사이에 배치되며, 그림의 화살표 방향으로 코일에 전류를 가하면 로렌츠 힘이 코일에 작용하여 이동부가 운동을 하게 된다. 여기서, 자속 ϕ_x, ϕ_y 및 ϕ_z 는 각각 전류 i_x, i_y 및 i_z 에 수직하며 식 (1)에 의해 각각 x, y 및 z 축 방향의 로렌츠 힘이 유도된다.

고정부에 사용된 영구자석은 Nd-Fe-B(N-33H)이다. 이 영구자석의 잔류 자속밀도 B_r 은 1.18 T이고, 리코일 투자율(recoil permeability) $\mu_m \mu_0$ 은 3×10^{-6} 이다. 요크는 투자율이 우수한 재질을 사용하여 영구자석의 자속이 자로를 통하여 잘 전달될 수 있도록 해야한다. 요크의 재료로는 상대투자율(공기의 투자율 μ_0 에 대한 재료의 투자율의 비) μ_r 이 4000인 순철을 사용하였다. 이동부에 사용된 코일은 로렌츠 힘의 배가를 위해 각 방향으로 각각 4개씩의 코일이 사용되었다. 각각 2개씩의 x 와 y 방향 코일은 코일 프레임의 상부에, 나머지 2개씩의 코일은 코일 프레임의 하부에 배치되었으며, 중앙에는 z 방향의 코



(a) Magnetic flux path



(b) Current flow

Fig. 2 Magnetic flux path and current flow of the electromagnetic positioning device

일이 배치되었다. 동일한 방향용 코일은 서로 병렬로 연결되어 있으며, 3 개의 전류원에 의해 각각 독립된 3 방향의 위치제어가 가능하다.

이동부에 사용된 코일은 단면이 원형인 구리선이다. 지름이 작은 구리선은 열 발생에 의한 코일의 피복손상과 온도상승에 따른 자기력의 손실 및 코일의 권선수 증가에 따른 인덕턴스(inductance) 증가를 초래하며 이에 의한 시스템 전달함수의 모델링 오차를 발생시킨다⁽¹¹⁾. 지름이 큰 구리선은 큰 힘을 발생시키기 위해 큰 인가 전류를 필요로 하며 이에 따른 전류 증폭기의 포화 문제를 발생시킬 우려가 있다.

본 연구에서는 전류증폭기의 용량과 코일의 구동력 및 열 발생 문제 등을 고려하여 지름 0.3 mm의 구리선을 사용하였다.

현가장치는 고정부와 이동부를 연결시키고 이동부의 운동방향을 안내하는 역할을 한다. 본 연구에서는 현가장치로 고무 스프링을 사용하였다. 이는 고무 스프링은 마찰

이 작고 여러 방향의 변위에 대해 비교적 균등한 성질을 지니고 있기 때문이다.

3. 자기회로(magnetic circuit)에 의한 기구부의 설계 및 해석

전자기력을 이용한 구동계는 자기회로(magnetic circuit)에 의해 모델링함으로써 수학적 해석이 가능하게 된다. Fig.3은 각 변의 길이를 정의하기 위한 영구자석이 부착된 1개의 요크 형상이다. 요크와 영구자석의 단면은 한변의 길이가 a 인 정사각형이며, l_x, l_y, l_m 및 l_0 는 Fig.3에서 정의된 각 변의 길이이다. 또한 요크 및 영구자석 사이에 있는 공극의 크기는 l_g 이며, 코일의 두께는 l_c 로 가정한다. 따라서 각 방향의 최대 구동범위는 l_a 는

$$l_a = l_g - l_c \quad (2)$$

이다. 여기서 각 방향의 최대 구동범위는 각각 2 mm로 결정하였다.

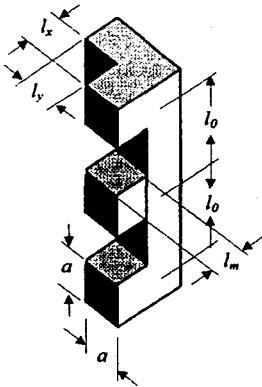


Fig. 3 Size of the each part of yoke and permanent magnet

자기회로는 전자회로의 유추로서 자기력 S , 자속 ϕ 및 자기저항 \mathfrak{R} 은 전압 V , 전류 I 및 저항 R 에 각각 대응된다. 영구자석이 부착된 요크에서 자기회로를 구성하기 위해 다음 두가지의 가정이 고려되었다. 첫째, 요크의 투자율에 비해 공기의 투자율은 무시할 수 있을 정도로 작으므로 자속누출은 공극과 공극 주위에서만 발생한다. 둘째, 두 영구자석 사이에서의 자속누출은 공극면에서만 존재하며, 공극 주위에서는 자위차가 매우 작으므로 자속누출은 무시할 수 있다⁽¹²⁾. 영구자석 및 요크에서의 자기저항은 다음식으로 표현된다.

$$\mathfrak{R}_m = \frac{l_m}{\mu_m \mu_0 a^2} \quad (3)$$

$$\mathfrak{R}_0 = \frac{l_0}{\mu_0 \mu_r a^2} \quad (4)$$

$$\mathfrak{R}_x = \frac{l_x}{\mu_0 \mu_r a^2} \quad (5)$$

$$\mathfrak{R}_y = \frac{l_y}{\mu_0 \mu_r a^2} \quad (6)$$

여기서 \mathfrak{R}_m 은 영구자석의 자기저항이고, $\mathfrak{R}_0, \mathfrak{R}_x$ 및 \mathfrak{R}_y 은 Fig.3에서 정의된 요크의 l_0, l_x 및 l_y 부분의 자기저항이다. 공극과 공극의 주변에서 자기저항은 여러 형태가 존재(13)하며, 이들 중 공극면 사이의 자기저항 \mathfrak{R}_{g0} 는

$$\mathfrak{R}_{g0} = \frac{l_g}{\mu_0 a^2} \quad (7)$$

이고, 요크와 공극면 사이의 모서리에서 자기저항 \mathfrak{R}_{g1} 은

$$\mathfrak{R}_{g1} = \frac{l_g}{1.40 \mu_0 a} \quad (8)$$

이며, 요크와 공극면 사이의 주변에서 자기저항 \mathfrak{R}_{g2} 는

$$\mathfrak{R}_{g2} = \frac{1}{127 \mu_0 a \ln \left(1 + \frac{2l_m}{l_g} \right)} \quad (9)$$

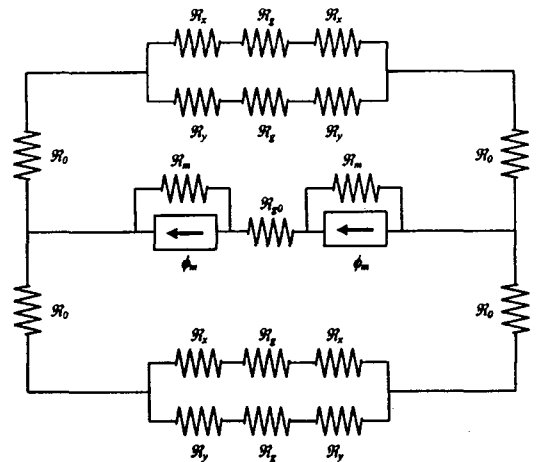


Fig. 4 Magnetic circuit for system modeling

이다. 따라서 한 공극에서의 총 자기저항 \mathfrak{R}_g 는 식 (7)~(9)을 병렬로 연결하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathfrak{R}_g = \frac{\mathfrak{R}_{g0}\mathfrak{R}_{g1}\mathfrak{R}_{g2}}{\mathfrak{R}_{g0} + \mathfrak{R}_{g1} + \mathfrak{R}_{g2}} \quad (10)$$

각 공극에서 발생하는 자속밀도를 구하기 위하여 고정부에 대한 자기회로를 Fig.4와 같이 구성한다. 이 때 고정부는 좌우 대칭인 구조로 되어있기 때문에 한쪽에 대해서만 자기회로를 구성하였다. 영구자석의 자속 ϕ_m 이 잔류자속밀도 B_r 에 의해

$$\phi_m = a^2 B_r \quad (11)$$

로 표현되며, 이 때 각 공극에 흐르는 자속은 다음과 같다.

$$\phi_z = \frac{2\mathfrak{R}_m}{2\mathfrak{R}_m + \mathfrak{R}_{g0} + \mathfrak{R}_z} \phi_m \quad (12)$$

$$\phi_x = \frac{1}{4} \frac{\mathfrak{R}_y + \mathfrak{R}_g}{\mathfrak{R}_x + \mathfrak{R}_y + \mathfrak{R}_g} \phi_z \quad (13)$$

$$\phi_y = \frac{1}{4} \frac{2\mathfrak{R}_x + \mathfrak{R}_g}{\mathfrak{R}_x + \mathfrak{R}_y + \mathfrak{R}_g} \phi_z \quad (14)$$

여기서

$$\mathfrak{R}_z = \frac{1}{4}(4\mathfrak{R}_0 + 2\mathfrak{R}_x + \mathfrak{R}_g). \quad (15)$$

각 공극에서의 자속밀도는 자속과 공극의 단면적 비로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_x = \frac{\phi_x}{a^2}, \quad B_y = \frac{\phi_y}{a^2}, \quad B_z = \frac{\phi_z}{a^2}. \quad (16)$$

기구의 이동부에는 x 및 y 방향으로 각각 4 개소의 힘 발생요소가 있고, z 방향으로 2 개소의 힘 발생 요소가 있다. 각 방향으로 작용하는 힘은 식 (1)과 식 (16)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_x = 4n_x B_x i_x L_x \quad (17)$$

$$F_y = 4n_y B_y i_y L_y \quad (18)$$

$$F_z = 2n_z B_z i_z L_z, \quad (19)$$

여기서 n_x, n_y 및 n_z 는 각 방향의 코일 권선수이고, i_x, i_y 및 i_z 는 각 방향에서 코일에 인가한 전류이며, L_x, L_y 및 L_z 는 각 방향에서 코일의 유효길이를 의미한다. 또한 좌우 대칭성을 위하여 n_x 와 n_y 그리고 L_x 와 L_y 는 각각 동일한 값을 취한다. 이동부의 질량은 코일과 알루미늄 판 및 지지부의 질량을 합한 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m = \rho_c l_c (15a^2 + 4al_x + 8al_y + 8al_m) + 0.1\rho_a (5a^2 + 4al_y + 2al_g + al_m) \quad (20)$$

여기서 ρ_c 및 ρ_a 는 각각 구리와 알루미늄의 밀도이다.

기구의 고정부 각변의 길이 결정을 위해서는 개략적인 크기를 미리 정한 후, 각 변의 길이 변화에 따른 목적함수 변화의 추이를 고려하여 결정해야 한다. 본 연구에서는 a, l_m 및 l_c 가 가장 민감한 매개변수라 가정한다. 여기서 코일의 두께 l_c 는 식 (2)로부터 구동범위가 2 mm로 정해졌으므로 공극의 두께에 비례하는 값을 알 수 있다. 단위 전류에서 발생하는 z 방향의 힘과 질량의 비를 다음과 같이 표현된다.

$$K_z = \frac{F_z}{m} \quad (21)$$

이때 매개변수의 변화에 의한 K_z 의 변화를 Fig.5에 모의 실험을 통해 도시하였다.

Fig.5(a)에서는 l_c 와 a 의 변화에 따른 K_z 의 변화를, Fig.5(b)에서는 l_c 와 l_m 의 변화에 따른 K_z 의 변화를, 그리고 Fig.5(c)에서는 a 와 l_m 의 변화에 따른 K_z 의 변화를 각각 도시하였다. 그림으로부터 코일의 두께가 2~3 mm 사이에서 가장 큰 K_z 를 보였다. 즉, 코일 두께의 증가는 공극의 길이 증가를 의미한다. 따라서 코일 두께의 증가에 따라 권선수가 증가되며 이로 인한 로렌츠 힘은 증가되지만, 어느 이상이 되면 공극에서의 자기저항 증가가 자속밀도를 더욱 감소시켜 로렌츠 힘이 감소됨을 알 수 있다. 또한 그림으로부터 a 와 l_m 의 증가에 따라 K_z 도 함께 증가함을 알 수 있다.

이 것은 영구자석 단면적과 길이의 증가가 자속밀도를 증가시키며 이로 인한 힘의 증가를 가져옴을 알 수 있다. 하지만 영구자석의 단면적과 길이는 고정부의 전체적 크기에 의해 제한을 받기 때문에 고정부의 크기를 고려하여 선정하였다. Table 1에서는 본 연구에 의해 결정된 기구부의 각 부분별 크기를 제시하였다.

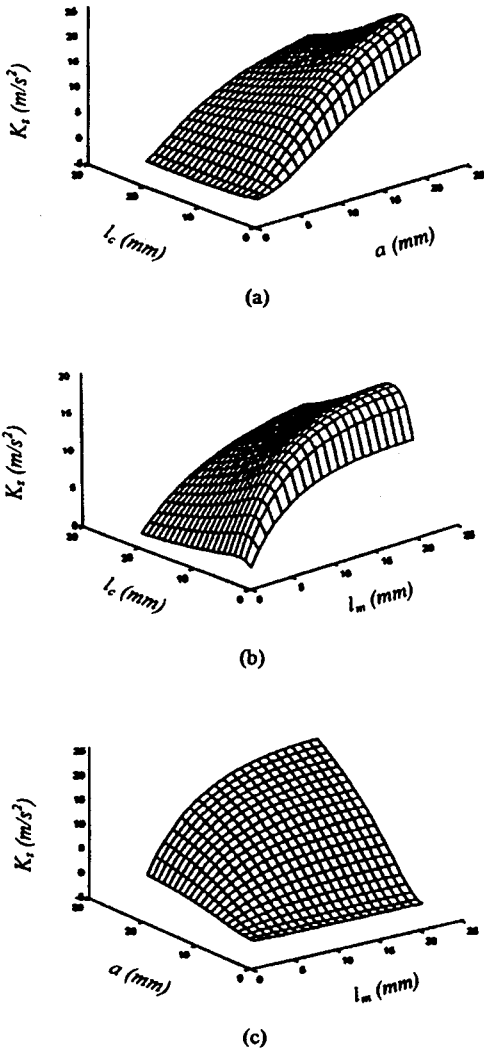


Fig. 5 Variation of K_2 with respect to l_c , a and l_m

Table 1 Parameters of the electromagnetic positioning device

Parameter	Value	Description
$a \times a$	14 mm × 14 mm	Sectional area of permanent magnet
l_m	17 mm	Length of permanent magnet
l_c	22 mm	Effective length of yoke for x axis
l_y	11 mm	Effective length of yoke for y axis
l_z	35 mm	Effective length of yoke for z axis
l_g	6 mm	Length of air gap
l_c	2 mm	Thickness of coil
m_x	139 g	Mass of moving part

4. 위치결정기구의 수학적 모델링 및 제어

전자기력을 이용한 구동기를 구동시키기 위해서는 코일에 전류를 인가할 수 있는 구동용 앰프(amplifier)가 필요하다. 본 연구에서는 코일에 흐르는 역기전력에 의한 전류 변화를 보상할 수 있는 정전류 구동용 전류 앰프(current amplifier)를 사용하였다(14). 이동부의 변위 측정센서로는 선형변위 측정에 적합한 2차원PSD(Position Sensitive Device)를 이용하였으며, Fig.6와 같이 2개의 LED는 이동부에 부착하고 2개의 PSD는 외부에 고정시켜 3방향의 위치를 측정하였다. 또한 이것을 제어하기 위한 제어기로는 PC(Personal Computer)에 장착된 DSP(Digital Signal Processor) 보드를 이용하였으며, 각 3자유도의 구동용 제어기를 구성하였다.

기구의 이동부의 운동은 각 구동기의 한방향 로렌츠 힘에 의해 제어되며, 이동부가 미소영역 내에서 미소운동을 한다고 가정할 때 공칭위치(nominal position)에서의 시스템 모델링은 각 축간의 상호 간섭이 없는 독립적인 운동을 하는 것으로 가정할 수 있다. 이 때 각 축은 다음 식과 같은 2차 미분방정식 형태의 운동방정식을 가진다.

$$\ddot{\xi} + 2\zeta\omega_n\dot{\xi} + \omega_n^2\xi = K_F i_{\xi} \quad (22)$$

여기서 ξ 는 x, y 및 z 축을 의미하고, ζ 와 ω_n 은 각각 댐핑계수와 공진주파수를 의미한다. ζ, ω_n 및 K_F 는 실험적으로 구할 수 있는 값이며, 이들 값을 구하기 위해 개회로에서 각 축에 계단입력을 입력한 후 이 것의 응답특성

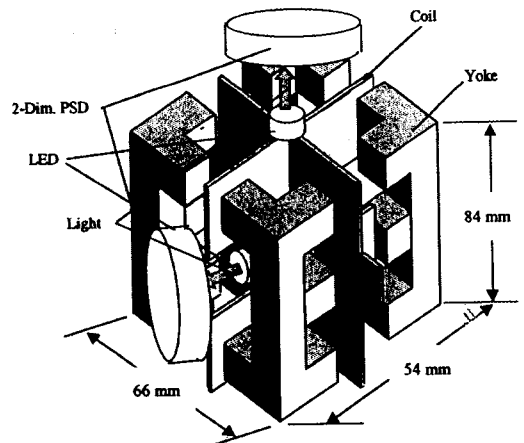
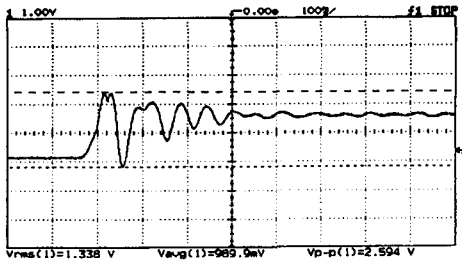
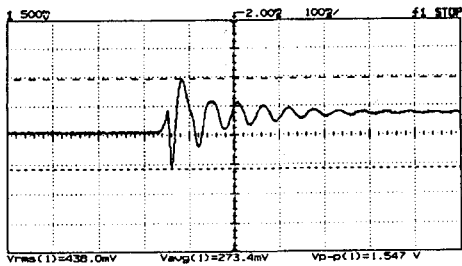


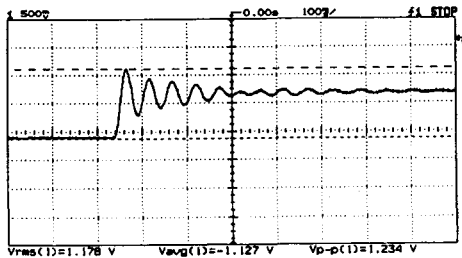
Fig. 6 Configuration of the mechanical system



(a) x axis



(b) y axis



(c) z axis

Fig. 7 Open-loop responses

을 구했다. Fig.8은 단위 계단입력에 대한 개회로 시스템에서의 시간응답이다. 이 그림으로부터 각 축의 오버슈트(overshoot)는 0.8~0.9 %의 값을 가지고, 상승시간(rising time)은 약 3.2 ms이며, 정착시간(settling time)은 1.3~1.5 s임을 관찰할 수 있다. 또한 댐핑계수는 0.036~0.046 사이의 값을 가지며, 감쇠고유진동수는 모두 50.8 rad/s를 가진다. 이들의 값은 Table 2에 제시하였다.

Table 2에 제시된 값에 의해 시스템의 개회로 전달함수를 다음과 같이 구할 수 있다.

Table 2 System characteristics

Symbol	x axis	y axis	z axis	Unit	Description
ζ	0.0457	0.0368	0.0399		Damping coefficient
ω_d	50.8	51.2	50.3	rad/s	Damped natural frequency
P.O.	0.872	0.895	0.887	%	Percent overshoot
t_r	0.318	0.315	0.310	s	Rising time
t_s	1.29	1.60	1.48	s	Settling time

$$G_x(s) = \frac{1884.9}{s^2 + 4.65s + 2589.9} \quad (23)$$

$$G_y(s) = \frac{1884.9}{s^2 + 3.75s + 2589.9} \quad (24)$$

$$G_z(s) = \frac{8201.4}{s^2 + 3.93s + 2589.9} \quad (25)$$

시스템의 개회로 응답특성에서는 큰 스프링 상수와 낮은 감쇠비로 인하여 Fig.7과 같이 긴 정착시간 및 정상상태 오차 등이 나타났다. 이러한 응답은 제어기를 사용하여 개선할 필요가 있다. 본 연구에서는 PID 제어기를 사용하여 시스템의 응답특성을 개선하였다. PID 제어기의 이득 K_p , K_i 및 K_d 는 각 축에서 가장 좋은 동적성능을 발생시킬 수 있도록 실험적으로 결정하였다. 이득값들은 Table 3과 같다.

Fig.8은 제안된 PID 제어기에 의해 보상된 폐회로 시스템의 단위 계단응답의 실험결과이다. 실험결과로부터 각 축의 정착시간은 0.15 s를 보였다. 위치정밀도는 정상상태의 위치오차에 대한 표준편차로서 구할 수 있으며, x, y, z 축에서 각각 0.402, 0.442, 0.501 μm 의 위치정밀도를 보였다. 또한 각축의 반복정밀도를 구하기 위해 임의의 위치에 대한 각 축당 100회의 반복 위치결정을 수행한 결과 Fig.9와 같이 히스토그램(histogram)을 구

Table 3 Control gains

Axis	K_p	K_i	K_d
x	3.0	80.0	0.04
y	3.2	75.0	0.04
z	2.0	15.0	0.03

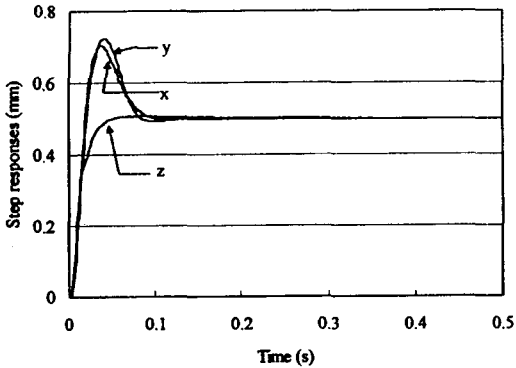


Fig. 8 Step responses

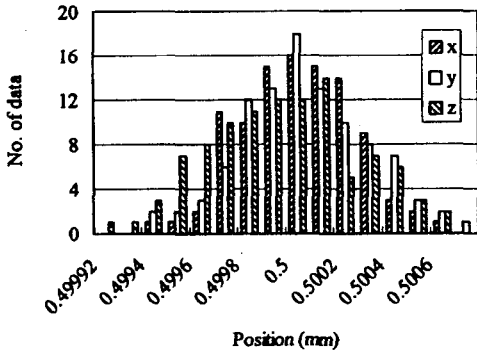


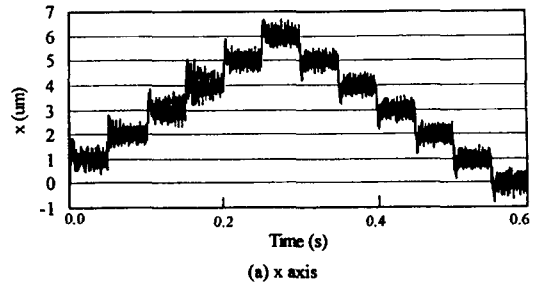
Fig. 9 Histograms

했으며, 각각 1.5 μm 의 반복정밀도를 보였다. Fig.10은 각 축의 위치분해능을 보이기 위한 실험결과이다.

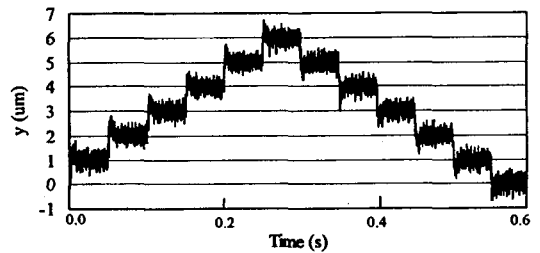
5. 결 론

본 연구에서는 전자기력을 이용한 정밀 3자유도 위치결정기구를 개발하였다. 이 기구는 요크와 영구자석으로 이루어진 고정부와 코일로 이루어진 이동부, 그리고 이들을 상호 연결시켜주는 현가장치로 이루어져 있다. 이 기구는 코일에 흐르는 역기전력에 의한 전류변화를 보상할 수 있는 정전류 구동법을 채택하였다. 정밀 위치를 측정하기 위한 센서로는 2차원 PSD를 이용하였고, DSP 보드에 의한 제어를 구현하였다.

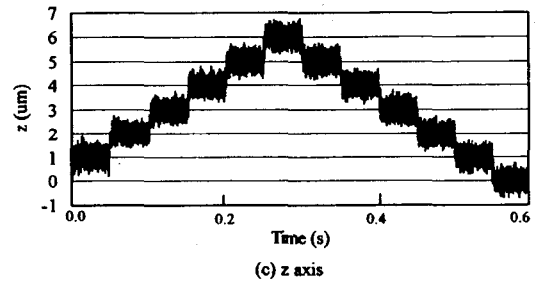
기구부의 설계를 위해서 자기회로를 이용하였고, 힘의 변화에 가장 민감한 매개변수를 선정하여 모의실험에 의해 각 부분의 크기를 결정하였다. 모의실험에 의하면, 코일의 두께가 2~3 mm 부근일 때 가장 큰 힘이 발생되며 이에 따른 공극의 길이가 결정된다. 또한 영구자석의 길



(a) x axis



(b) y axis



(c) z axis

Fig. 10 Resolution of each axis

이 및 단면적의 증가는 힘의 발생을 증가시키나 전체적인 고정부의 크기에 의해 제한을 받는다.

시스템의 모델링은 각 축이 상호 독립적인 2차 미분방정식 형태의 운동방정식을 갖는다는 가정하에서 개회로 시간응답에 의해 실험적으로 방정식의 매개변수를 구하였다. 개회로 응답특성을 개선하기 위해 PID 제어를 설계하였고, 실험에 의해 0.15 s의 각축 정착시간을 얻었다. 또한 실험을 통하여 각축에서 0.5 μm 의 위치정밀도와 1.5 μm 의 반복정밀도를 구했다.

본 연구에서 제안된 정밀 위치결정기구는 사용목적에 따라 크기 및 형상을 변화시키면 광 픽업 장치 및 정밀 위치제어 또는 정밀 힘 제어가 필요한 기기에 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Umetani Y. and Suzuki H., "Piezo-electric Micro Manipulator in Multi-Degree-of-Freedom with Tactile Sensibility," 10th International Symp. on Industrial Robots, pp. 571~579, 1980.
2. Kuribayashi K., "Micro Actuator Using Shape Memory Alloy for Micro Robot," International Conf. on Advanced Mechatronics, pp. 109~114, 1989.
3. Fujita H. and Omodaka A., "Electrostatic Actuators for Micromechatronics," IEEE Micro Robots and Teleoperators Workshop, Hyannis, MA, 1987.
4. Park K., Choi K.-B., Kim S.-H. and Kwak Y.K., "Magnetic Levitated High Precision Positioning system Based on Antagonistic mechanism," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 32, No. 1, pp. 208~219, 1996.
5. 최기봉, 박기환, 김수현, 박윤근, "자기력을 이용한 비접촉 6자유도 미소위치결정기구의 개발 - 설계, 모델링 및 제어 -, 대한기계학회논문집(A), Vol. 20, No. 4, pp. 1164~1176, 1996.
6. Hollis R.L., "A Fine Positioning Device for Enhancing Robot Precision," Proc. Of Robotics Conf., pp. 628~636, 1985.
7. Hollis R.L., Salcudean S.E. and Allan A.P., "A Six-Degree-of-Freedom Magnetically Levitated Variable Compliance Fine Motion Wrist : Design, Modeling and Control," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 3, pp. 320~332, 1991.
8. Jeong M.C. and Busch-Vishniac I.J., "A Submicron Accuracy Magnetic levitation Micromachine with Endpoint Friction," Sensors and Actuators, A, Vol. 29, pp. 225~234, 1991.
9. Ohnuki H.O., Fukuki Y., Ohnuki N. and Inoue, "Three dimensional Actuator for Optical Head," SPIE Optical Disc Technology, pp. 103~108, 1982.
10. Wagner J.A., "Access Time Minimization of a Moving Coil Actuator with Volumetric Magnetic and Current Constraints," IEEE Trans. on Magnetics, pp. 148~155.
11. Cooper E. S., "Minimizing Power Dissipation in a disk File Actuator," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 24, No. 3, pp. 2081~2091, 1988.
12. Slemon G.R. and Straghen A., Electric Machines, Addison Wesley, London
13. Leupold H.A., "Approaches to Permanent Magnetic Circuit Design," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 29, No. 6, pp. 2341~2346, 1993.
14. Brown C.J. and Ma J.T., "Time Optimal Control of a Moving Coil Linear Actuator," IBM. Res., pp. 372~379, 1967.