

능동 자기 베어링을 이용한 비접촉식 선형 구동기

이상현[#], 백윤수^{*}

Contact-free Linear Actuator Using Active Magnetic Bearing

Sang Heon Lee[#] and Yoon Su Baek^{*}

ABSTRACT

In the field of precision manufacturing demanding high positioning performance, the mechanical friction in positioning device deteriorates the quality of the product and increases the cost of production for positioning devices. Therefore, we propose a contact-free linear actuator using active magnetic bearing. The structure and operating principle of the proposed system are explained, and the magnetic forces are analyzed by magnetic circuit theory to design magnetic bearings and linear actuator. With the derived equation of motion, the stability is identified. Experimental results are presented to show the feasibility.

Key Words : Active magnetic bearing (능동자기베어링), Contact-free linear actuator (비접촉 선형구동기), Magnetic circuit (자기회로), Magnetic suspension (자기 서스펜션)

기호설명

H = magnetic field intensity
 N = number of coil turns
 L = inductance
 R = reluctance
 S = cross sectional area of pole
 W_m = stored magnetic energy
 μ_0 = permeability of air
 ϕ = magnetic flux

1. 서론

반도체 제조공정이나 초박막 액정표시장치, 플라즈마 표시장치등의 초정밀 제품의 제조공정에서

는 작업환경의 영향에 따라서 생산 제품의 성능이 많은 영향을 받는다. 그리하여, 공정 중의 어떠한 작업도 초정밀의 작업환경이 요구된다. 그러나 기존의 벨트식 컨베이어나 관절로봇등의 구동기는 기계요소의 접촉으로 인한 기계적 마찰의 발생으로 인하여 미세한 먼지입자를 발생시키고, 또한 윤활을 위한 윤활유의 사용도 작업환경에 오염원이 될 수 있다. 이러한 이유로 기계적 접촉을 배제한 비접촉식 구동기에 관한 연구가 진행되었다¹⁻³. 비접촉을 구현하기 위한 부상 방법으로는 공기베어링 같은 유체의 유동에 의한 방식과 자기력에 의한 방식이 있다. 유체의 유동에 의한 방식은 유동자체가 또 다른 외란의 원인이 될 수 있기 때문에 초정밀 구동과 높은 진공상태의 작업환경이 요구되는 분야에서는 자기력에 의한

[#] 접수일: 2002년 11월 28일; 게재승인일: 2003년 4월 14일
 교신저자: 연세대학교 기계공학과
 Email: shlee34@hotmail.com, Tel: (02) 2123-4407
^{*} 연세대학교 기계공학부

부상방식이 선호되고 있다. 자기부상에 의한 방식은 현재 회전축을 비접촉으로 지지하기 위한 자기베어링, 자기부상열차, 방진을 위한 구동기등에 적용되고 있다^{4,5}. 자기력을 발생시키는 주요원리는 일정한 자기장을 통과하는 전하에는 자기력이 작용한다는 로렌츠의 힘(Lorentz force)원리와 자성체 내에서의 자속의 흐름은 자기저항이 최소가 되는 방향으로 진행된다는 가변자기저항(Variable reluctance)의 원리로 나눌 수 있다. 전자의 경우는 자기장과 전하의 크기에 비례하여 힘이 증가하는데 자기장의 크기는 현재 나와 있는 영구자석의 한계로 제한되기 때문에 큰 힘을 얻기 위해서는 높은 전류가 요구된다. 그리하여, 비교적 에너지 소모가 많으며, 정밀 구동기로의 적용 시에는 열로 인한 문제가 발생할 수 있다. 반면 후자의 경우는 보통 철심이 포함되기 때문에 철심의 높은 비투자율로 인해 낮은 전류에도 큰 힘을 얻을 수 있는 장점이 있다. 한편, Jayawant 는 앞서 말한 자기원리와 자기재료의 조합에 의해서 자기부상을 이루기 위한 방법을 9 가지로 분류하였는데, 본 논문에서는 가변자기저항의 원리에 의한 자기 흡인식 부상(Magnetic suspension)시스템을 채택하였다⁶.

본 연구에서는 부상을 위한 자기베어링은 변위에 관계없이 일정한 자기력을 작용할 수 있도록 추진용 전자석과 분리하였으며, 추진용 전자석은 부상용 전자석과 서로 상반구조의 형태를 가지게 하여 제어기 설계시 안정도를 향상시킬 수 있도록 하였다. 본 연구에서 제안된 시스템은 4 자유도가 능동제어되며 나머지 2 자유도는 수동적으로 제어된다. 본 논문은 제안된 시스템의 가능성에 중점을 두기 때문에 앞서 2 자유도에 대한 설명은 깊이 다루지 않겠다. 하지만, 제안된 시스템을 이용한 평면구동기를 개발할 때는 6 자유도가 모두 능동제어가 가능한 형태로 설계가 가능하다.

본 논문은 자기베어링을 이용한 비접촉식 선형구동기에 대한 연구로서, 2 장에서는 제안된 시스템의 구조와 구동원리에 대해서 설명하며, 3 장에서는 시스템을 설계하기 위하여 전자기학적인 측면에서 각 전자석에 대해서 자기력을 해석한다. 4 장에서는 이 결과를 바탕으로 운동방정식을 유도하며 시스템을 동정하여, 최종적으로 결론을 내린다.

2. 구조와 구동원리

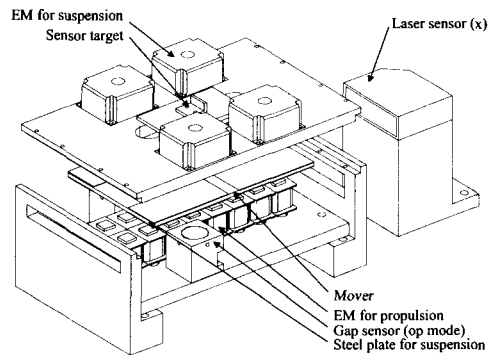
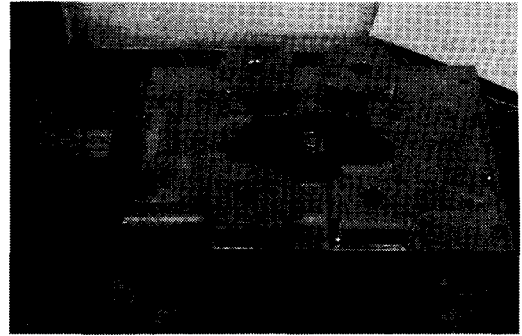


Fig. 1 Photograph and schematic diagram of the proposed system

2.1 구조

제안된 시스템의 구조는 Fig. 1 과 같다. 상부 고정자에는 네 개의 전자석이 부착되어 이동자의 철판과 상호 작용하여 부상력을 발생시킨다. 하부 고정자에는 추진을 위한 전자석이 배치되어 있으며, 이동자 하부에 돌출된 극들과의 상호 작용에 의하여 추진력을 발생시킨다. 또한 세 개의 정전용량형 비접촉 변위센서가 부착되어 면외운동(out of plane motion)을 측정한다. 수평 변위는 비교적 측정 영역이 큰 측면의 레이저 변위센서를 통해 측정된다. 이동자는 수동요소만으로 이루어져 외부와는 완전히 분리된다.

2.2 구동원리

Fig. 2 는 본 연구에서 제안된 비접촉 선형구동기에서 이동자에 작용하는 힘과 구동원리를 나타낸다. Fig. 2(a)에서 상부 고정자의 네 개의 전자석은 수직력만을 발생시켜 3 자유도 면외운동의 제어가 가능하며, Fig. 2(b)에서 하부 고정자의 전자석 의해서는 1 자유도의 직선운동이 제어가 가능

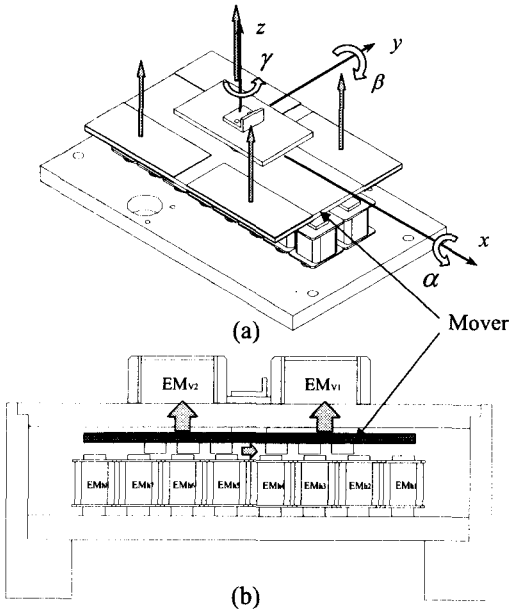


Fig. 2 Operating principle of the proposed system (a) isotropic view (b) side view

하다. 나머지 2 자유도의 면내운동 (in plane motion) 은 하부 고정자의 전자석이 이동자 무게 중심축 상에 배치되기 때문에 z 축에 대한 회전력은 발생 하지 않는다. 그리고, y 축 방향으로 병진운동은 이동자 하부의 돌출극과 하부 고정자의 전자석간의 지지력에 의해서 수동적으로 제어된다. 그러나, y 축 방향으로의 외란이 지지력을 넘어서는 경우에는 부가적인 전자석의 배치가 필요하다. 이에 대해서는 다음 장에서 전자기력의 해석을 통해서 설명하도록 한다. x 축 방향으로의 이동은 스위칭에 의한 가변 자기저항식 리니어모터의 구동법과 비슷하다. Fig. 2(b)는 초기위치를 나타내는데, 여기서 전자석 EM_{h1} , EM_{h2} 에 순차적으로 전류가 인가되면 이동자는 우측방향으로 이동하게 된다. 이 때 추진용 전자석에서는 수평력과 수직력이 동시에 발생하는데, 수직력은 스위칭의 순서에 따라서 예상 이 가능하므로 상부고정자의 전자석에 의해서 제거될 수 있다.

3. 자기력 해석 및 설계

부상용 전자석과 추진용 전자석을 설계하기 앞서 각 전자석에서 발생하는 자기력에 대한 해석

을 수행한다. 전자기현상은 연속적인 자연현상이지만 적절한 가정에 의해서 분산 파라미터 시스템으로 변환시켜 해석할 수 있다. 본 논문에서는 이와 같은 원리에 의한 자기회로이론을 이용하여 자기장을 해석하고, 최종적으로 자기력을 유도한다.

3.1 자기베어링

Fig. 3 은 제안된 구동기에서의 각 전자석 모델에서의 자속의 흐름과 등가 자기회로를 나타낸다. Fig. 3(a)는 부상용 자기베어링을 위한 전자석의 모델로서 E 형 코어를 이용하였다. 여기서는 부상력만을 발생시키기 위하여 구동자는 돌출극이 없는 평판을 이용하였다. 등가자기회로를 구함에 있어서 전자석의 코어와 구동자 평판의 비투자율이 아주 높다고 가정하여, 철심과 평판에서의 자기저항(reluctance)는 무시하였다. 그리하여 자기회로에서는 공극에서의 자기저항만이 고려된다.

앙페르의 주회 법칙(Ampere's circuital law)에 의해서 아래와 같은 식이 성립한다⁷.

$$\oint Hdl = H \cdot l_{g1} + 2H \cdot l_{g2} = \phi_1 R_1 + 2\phi_2 R_2 = Ni \quad (1)$$

여기서,

$$\phi_2 = \phi_1 / 2 \quad (1.a)$$

$$R_1 = \frac{l_{g1}}{\mu_0 S_1}, R_2 = \frac{l_{g2}}{\mu_0 S_2} \quad (1.b)$$

를 나타내며, 위의 식들을 이용하여 공극에서

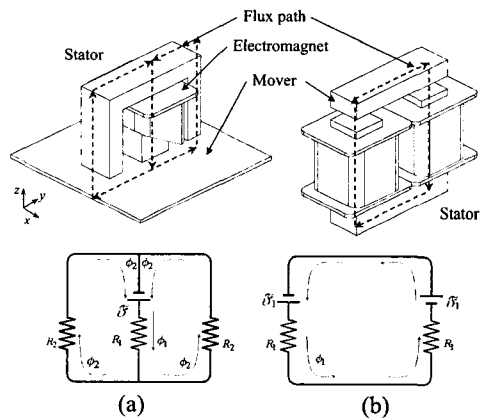


Fig. 3 Electromagnets and equivalent magnetic circuits (a) suspension magnet (b) propulsion magnet

의 자속을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_1 = \frac{Ni}{R_1 + R_2} = \frac{\mu_0 Ni S_1 S_2}{z(S_1 + S_2)} = 2\phi_2 \quad (2)$$

여기서, $z = l_{g1} = l_{g2}$ 로서 공극의 크기를 나타낸다.

식(3)의 에너지 보존의 법칙에 의하면, 운동에너지는 자기에너지의 변화로부터 유발되기 때문에 가상일의 원리를 적용하여 자기력을 유도할 수 있다⁸.

$$Fdx + vidt = dW_m \quad (3)$$

여기서, F, v, i 는 각각 힘, 전압, 전류를 의미하고, 회로내의 자기요소에서 포화현상이 발생하지 않는다면, 저장된 자기에너지는 아래와 같이 정의된다.

$$W_m = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} \phi_1^2 R_1 + \frac{1}{2} \phi_2^2 R_2 + \frac{1}{2} \phi_2^2 R_2 \quad (4)$$

식(2)를 식(4)에 대입하면 아래와 같이 자기에너지를 정리할 수 있다.

$$W_m = \frac{3}{4} \phi_1^2 (R_1 + R_2) = \frac{3\mu_0 S_1 S_2}{4(S_1 + S_2)} N^2 i^2 \quad (5)$$

그리고, 선형시스템이라는 가정하에 위의 식에 가상일의 원리를 적용하여 다음과 같이 자기력을 구할 수 있다.

$$f_v = -\frac{\partial W_m}{\partial z} = k_v \frac{i^2}{z^2} \quad (6)$$

여기서, $k_v = \frac{3\mu_0 S_1 S_2}{4(S_1 + S_2)} N^2$ 를 나타낸다.

3.2 추진용 전자석

하부 고정자에 부착된 추진용 전자석에서는 앞 절에서 유도한 자기베어링용 전자석과는 달리 수직력과 수평력이 동시에 작용한다. 수직력은 부상에 관계하여 외란으로 작용하기 때문에 최대한 작게 하는 것이 좋다. 수평력의 경우는 x 축 방향으로의 추진력과 y 축 방향으로의 지지력으로 작용한다.

Fig. 3(b)는 자속의 흐름과 등가자기회로를 나타낸다. 이 자기회로에 대하여 앞 절에서의 식(1)과 같이 회로식을 구하면 아래와 같다.

$$\oint Hdl = 2H \cdot l_g = 2\phi_1 R_1 = 2Ni \quad (7)$$

그러면, 회로내의 자기에너지는 다음과 같이 정리가 가능하다.

$$W_{m2} = \frac{(Ni)^2}{2R_1} \quad (8)$$

그런데, 여기서 자기저항 R_1 는 고정자와 이동자 극간의 상대변위 x 와 z 에 대한 함수로 나타내므로, 수평력과 수직력을 식(6)과 같이 가상일의 원리를 적용하여 구할 수 있다. 공극에서의 자기저항 R_1 을 구하기 위해, 공극에서의 자속을 Fig.4 와 같이 모델링하여 각 자속 흐름에 대한 자기저항을 구한 뒤 이를 병렬 연결하여 전체 자기저항을 구할 수 있다. 각 요소에서의 자기저항은 아래와 같다⁹.

$$R_{g1} = \frac{z}{\mu_0 h (W_l - x)} \quad (9)$$

$$R_{g2} = \frac{\pi}{2\mu_0 h \log(1 + \pi x / 2z)} \quad (10)$$

$$R_{g3} = \frac{\pi}{\mu_0 h} \left(\log \left(\frac{\pi W_l - \pi x / 2 + z}{\pi x / 2 + z} \right) \right)^{-1} \quad (11)$$

그리고, 공극에서의 자기저항은 식(12)와 같다.

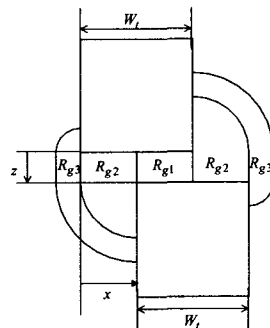


Fig. 4 Flux pattern in the air gap

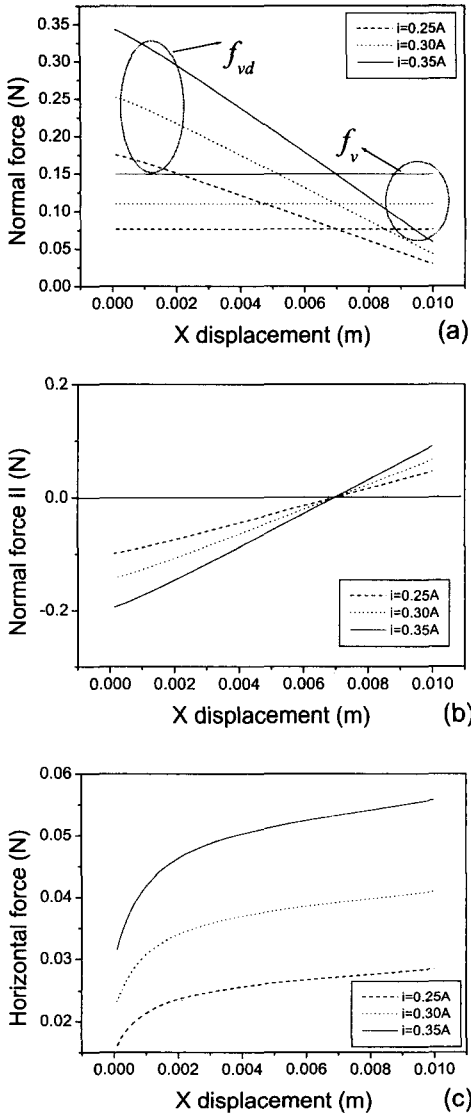


Fig. 5 Magnetic forces with respect to x displacement (a) normal forces (b) $f_v - f_{vd}$ (c) horizontal forces

$$R_1 = \left(\frac{1}{R_{g1}} + \frac{2}{R_{g2}} + \frac{2}{R_{g3}} \right)^{-1} \quad (12)$$

식(12)를 식(8)에 대입하여, 아래와 같이 최종적으로 수평력과 수직력을 구할 수 있다.

$$f_h = -\frac{\partial W_{m2}}{\partial x} \quad (13)$$

$$f_{vd} = -\frac{\partial W_{m2}}{\partial z} \quad (14)$$

Fig. 5는 식(6), (13), (14)를 각 전류입력에 대하여 x 축의 변위에 따라서 구한 결과를 나타낸다. Fig. 5(a)에서 보면 상부고정자에 의한 부상력은 x 변위에 관계없이 일정하게 나타난다. 그리고, 동일한 전류값에 대해서 하부고정자에 의한 힘이 상부고정자에 의한 힘보다 큰 경우가 있는데, 이러한 경우에는 이동자가 부상이 될 수 없다. 실제 제어시에는 상부와 하부 전자석의 입력전류가 다르기 때문에 이러한 경우는 발생하지 않으나, 시스템의 설계에 있어서는 이러한 사항을 고려하여야 한다. Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)에서의 차이값을 나타낸다. Fig. 5(c)는 하부 고정자에 의한 추진력을 나타내는데, 입력 전류와 x 변위에 비례하여 증가한다. Fig. 5(b)와 (c)로부터 하부 고정자와 이동자의 초기 옵셋이 증가할수록 높은 추진력과 부상력을 얻을 수 있음을 알 수 있다. Table 1은 실험에서 사용된 전자석과 철심의 사양을 나타낸다.

4. 모델링

자기 부상시스템은 앞장에서 유도된 자기력에 서 보았듯이 비선형 시스템이다. 그러나, 공칭점을 기준으로 미소변위의 가정하에 선형화될 수 있다.

본 장에서는 선형화된 힘의 방정식을 유도한 후, 이동자에 작용하는 힘을 구하여 최종적으로 운동방정식을 구한다.

Table 1 Specifications of electromagnet and cores

Description	Values
Number of coil turns, N	335
Pole cross sectional dimension, S_1	10×10mm
Pole cross sectional dimension, S_2	5×10mm
Pole length, W_t	10mm
Pole width, h	10mm
Core material, I	Silicon steel plate(4%)
Core material, II	SS-41
Coil	AWG 25
Air gap, z_0	1.7mm

우선, 앞 장에서 구한 자기베어링에서의 부상력과 하부 고정자의 전자석에 의한 추진력과 흡인력을 공칭점을 기준으로 다음과 같이 일반화시켜 나타낼 수 있다.

$$F_v = K_{vz}z + K_{vi}i \quad (15.a)$$

$$F_h = -K_{hx}x + K_{hz}z + K_{hi}i \quad (15.b)$$

$$F_{vd} = -K_{vdx}x + K_{vdz}z + K_{vdi}i \quad (15.c)$$

여기서,

$$K_{vz} = \left. \frac{\Delta f_v}{\Delta x} \right|_{z_0, i_0}, \quad K_{vi} = \left. \frac{\Delta f_v}{\Delta i} \right|_{z_0, i_0}$$

$$K_{hx} = \left. \frac{\Delta f_h}{\Delta x} \right|_{x_0, z_0, i_0}, \quad K_{vdx} = \left. \frac{\Delta f_{vd}}{\Delta x} \right|_{x_0, z_0, i_0}$$

$$K_{hz} = \left. \frac{\Delta f_h}{\Delta z} \right|_{x_0, z_0, i_0}, \quad K_{vdz} = \left. \frac{\Delta f_{vd}}{\Delta z} \right|_{x_0, z_0, i_0}$$

$$K_{hi} = \left. \frac{\Delta f_h}{\Delta i} \right|_{x_0, z_0, i_0}, \quad K_{vdi} = \left. \frac{\Delta f_{vd}}{\Delta i} \right|_{x_0, z_0, i_0}$$

를 나타낸다.

시스템의 운동방정식을 유도하기 위해서 Fig. 6에서처럼 상부 고정자의 중심에 고정좌표계 (X, Y, Z)를 설정하고, 이동자의 무게 중심에 이동 좌표계(x, y, z)를 설정한다. 두 좌표계간의 관계는 오일러 각(Euler angles)을 이용하여 미소 회전변위와 각속도의 곱이 작다는 가정과 함께 각 자유도의 운동방정식을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{F} \quad (16)$$

여기서, $\mathbf{M} = \text{diag}[m \ m \ I_x \ I_y]$ 로서 질량행렬을 나타내며 $\ddot{\mathbf{q}} = [\ddot{x} \ \ddot{z} \ \ddot{\alpha} \ \ddot{\beta}]^T$ 를 나타낸다. 우변은 $\mathbf{F} = [F_x \ F_z \ M_x \ M_y]^T$ 를 나타내는데, 각 성분은 힘과 모멘트의 합을 나타내며 다음과 같이 정리 가능하다.

$$F_x = f_{h1} + f_{h2} \quad (17)$$

$$F_z = \sum_{i=1}^4 f_{vi} - \sum_{i=1}^2 f_{vdi} \quad (18)$$

$$M_x = b \sum_{i=1}^2 (f_{vi} - f_{v(i+2)}) \quad (19)$$

$$M_y = a \sum_{i=1}^4 (-1)^i f_{vdi} + c \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} f_{vdi} \quad (20)$$

이동좌표계에서의 변위를 고정좌표계로 변환하여 식(15)에 대입하면 고정좌표계에서의 작용력을 구할 수 있다. 이 값을 식(17)-(20)에 대입하여 최종 운동방정식을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{F}_c \quad (21)$$

여기서,

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 2K_{hx} & -2K_{vdz} & 0 & 0 \\ 2K_{vdx} & 2K_{vdz} - 4K_{vz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4K_{vz}b^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2K_{vdz}c^2 - 4K_{vz}a^2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{F}_c = \begin{bmatrix} K_{hi}(i_{h1} + i_{h2}) \\ K_{vi} \sum_{j=1}^4 i_j - K_{vdi}(i_{h1} + i_{h2}) \\ bK_{vi}(i_1 + i_2 - i_3 - i_4) \\ aK_{vi} \sum_{j=1}^4 (-1)^j i_{vj} + cK_{vdi}(i_{h1} - i_{h2}) + 2cc_0K_{vdx} \end{bmatrix} \quad (23)$$

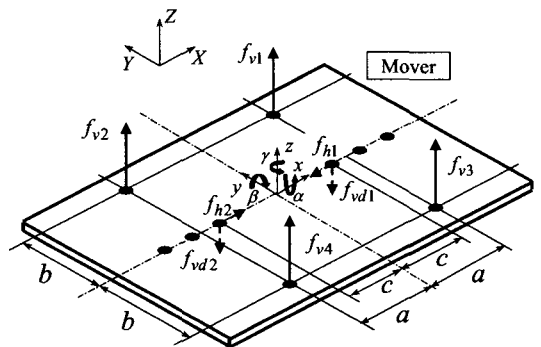


Fig. 6 The forces acting on the mover

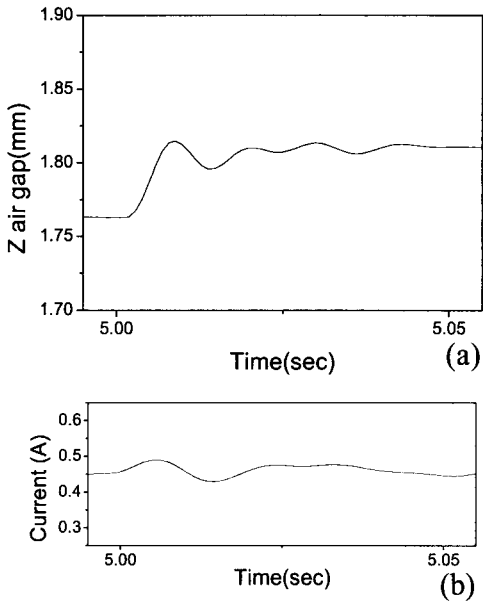


Fig. 7 Experimental results: (a) step response to vertical direction and (b) input current.

를 나타내며, c_0 는 하부고정자와 이동자의 극간의 x 축 방향으로의 초기 변위를 나타낸다. 식(22)와 식(23)에서 보면 각 축에 대한 직선운동의 경우 x 축과 z 축사이의 연성이 존재함을 확인할 수 있다. 이 연성은 적절한 설계에 의해서 배제될 수 있다¹⁰. 본 구조에서는 자기력이 상반구조의 형 태를 가지고 있으나, 상반구조가 아닌 경우에는 면외운동의 경우는 모두 내부적으로 불안정하다.

그러나, 식 (22)을 보면 제안된 시스템은 면내운동(x)으로는 시스템이 내부적으로 안정하나, 면외운동(z, α, β)으로는 α 를 제외한 다른 자유도는 안정한계(marginally stable)에 있음을 알 수 있다. 한편, 안정된 운동을 위해서는 면외 운동으로의 궤환 제어가 필요하다.

Fig. 7(a)는 z 축 방향으로의 계단입력에 따른 실험 결과를 나타내는데, 이 때 사용된 제어기는 비례-미분제어기를 사용하였고, 이득값은 각각 4000, 50 으로 설정하였다. 적분제어기를 사용하지 않아서 정상상태오차는 발생하였으나, 안정된 부상상태에 대해서 얻은 결과로서는 만족스러웠다. 8%정도의 오버슈트가 발생했으며, 상승시간이 약 6ms 가 걸렸다. Fig. 7(b)는 이 때 공급된 제어입력을 나타낸다. Fig. 8 은 각각 회전운동과 수평

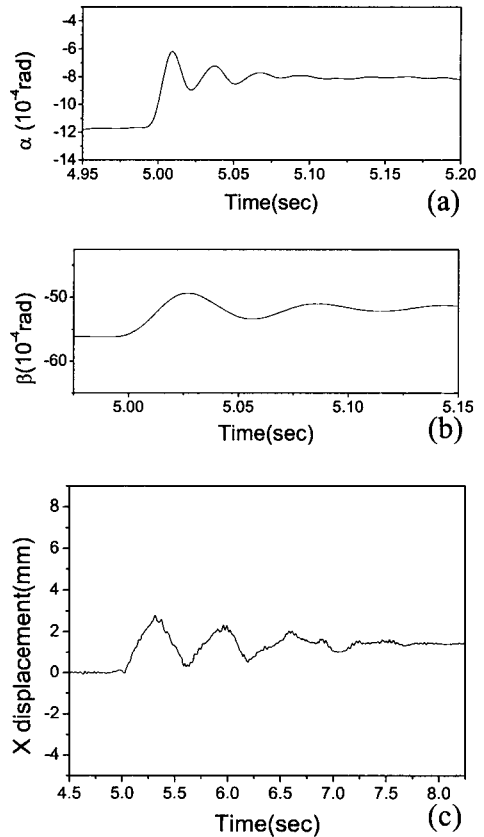


Fig. 8 Experimental results of step input : (a) response of α , (b) response of β , and (c) response of x

병진운동에서의 계단입력의 응답결과를 나타낸다. 회전운동의 경우, 각각의 오버슈트는 약 8%정도가 일어났으며, 정착시간은 약 60ms 로 나타났다. Fig.8(c)는 병진에 대한 결과로서 면외운동의 성능보다는 떨어지게 나타났다. x 축으로의 정착시간은 약 2.5s 로서 이 정도의 성능으로는 초정밀 위치 결정기구로의 적용으로는 약간의 무리가 있지만, 웨이퍼 이송장치와 같이 먼지발생이 없는 이송장치로의 적용에서는 본 연구에서 제안된 시스템으로의 성능으로는 적용하기에 큰 무리가 없을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 자기베어링을 이용한 비접촉식 선형 구동기를 제안하였다. 부상측면에서 안정도

를 향상시키기 위하여 부상을 위한 자기베어링과 추진용 전자석을 상반구조로 배치하였다. 그리고, 안정된 부상을 위하여 이동자의 변위에 관계없이 일정한 부상력을 얻을 수 있는 자기베어링을 설계하였다. 부상력과 추진력은 이동자의 변위에 따라서 자기회로이론을 이용하여 유도하였으며, 운동방정식을 통하여 제안된 시스템의 안정도를 파악할 수 있었다. 수평방향으로의 응답속도는 다른 자유도의 응답성에 비해 떨어졌으나, 향후 개선된 제어기를 이용하여 성능의 향상이 예상되며, 제안된 시스템에서의 추진용 전자석의 확장을 통하여 평면구동시스템으로의 적용이 가능할 것이다.

후 기

본 연구는 2002 년도 한국과학재단 목적 기초 연구 과제(R01-2000-000-00304-0, 2002)의 연구비 지원에 의한 연구 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Youngwook Son and Kyihwan Park, "Magnetically Levitated Transport System for a Controller-Free Carrier," Trans. of KSME A, Vol. 21, No. 12, pp. 2196-2208, 1997.
2. Jung Kwang Suk, Lee Sang Heon and Baek Yoon Su, "Feasibility Study of General-purpose Precision Stage Using A Novel Contac-Free Surface Actuator Based on Magnetic Suspension Technology," Trans. of KSME A, Vol. 26, No. 3, pp. 452-460, 2002.
3. Won-Jong Kim, Trumper, D. L. and Lang, J. H., "Modeling and vector control of planar magnetic levitator," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 34, Issue. 6, pp. 1254-1262, 1998.
4. Vischer, D., Bleuler, H., "Self-sensing active magnetic levitation," IEEE Trans. Magn., Vol. 29, pp. 1276-1281, 1993.
5. Nagaya, K., Ishikawa, M., "A noncontact permanent magnet levitation table with electromagnetic control and its vibration isolation method using direct disturbance cancellation combining optimal regulators," IEEE Trans. Magn., Vol. 31, Issue. 1, Part: 1 , pp. 885-896, 1995.
6. Jayawant, B. V., Electromagnetic levitation and suspension technique, Edward Arnold, pp. 1-19, 1981.
7. Leander W. Matsch, Capacitors, magnetic circuits, and transformars, PRENTICE-HALL, INC., pp. 97-105, 1964.
8. Nasar, S. A., Unnewehr, L. E., Electromechanics and electric machines, John Wiley & Sons, pp. 124-139, 1979.
9. Herbert C. Roters, Electromagnetic devices, John Wiley & Sons, pp.116-150, 1941.
10. Lee Sang Heon, Baek Yoon Su, "Modeling and Analysis of Electromagnets for Magnetic Suspension System," Journal of the KSPE, Vol. 20, No. 5, pp. 180-188, 2003.