

비접촉 평면구동기를 위한 자기 서스펜션방식 직선구동기

이상헌* · 정광석* · 백윤수**

A Study on the Magnetic Suspension Type Linear Actuator for a Non-contact Surface Actuator

Sang Heon Lee, Kwang Suk Jung and Yoon Su Baek

Key Words : Magnetic levitation(자기부상), Non-contact surface actuator(비접촉 평면구동기), Non-contact linear actuator(비접촉 직선구동기), Magnetic circuit(자기회로)

Abstract

With the development of micro-technology, the demand for micro actuator is increasing. But, it is difficult to achieve high resolution and long travel range simultaneously with the conventional actuators. So, the non-contact surface actuator was proposed. This actuator can realize high dynamic range and the planar motion without complex cross-axis linear slides. This paper describes a magnetically suspended linear actuator for developing a non-contact surface actuator. The operating principle and the structure of the proposed linear actuator are similar to switched reluctance motor, but the proposed linear actuator utilizes normal force and propulsion force simultaneously. With this characteristic, the system can be simpler than other non-contact surface actuator.

1. 서 론

반도체 산업의 발달과 더불어 초미세 가공, 즉 정등 마이크로 테크놀로지에 대한 관심의 증대로 인하여 초정밀 기기의 설계 및 마이크로 구동기술에 관한 연구가 활발해지고 있다. 현재 마이크로 구동기술로는 압전소자나 형상기억합금등의 기능성소재를 이용한 방법과 정전기나 전자기를 이용하는 방법이 있다. 이 중 기능성소재를 이용하는 방법은 작은 범위의 운동을 구현하기 위해서는 적당하지만, 넓은 범위의 운동을 구현하기 위해서는 이중 서보의 형태를 취하기 때문에 구동기의 성능저하 및 제어의 어려움을 유발할 수 있다. 이에 반해 전자기를 이용한 부상시스템의 경우는 센서 기반의 정밀도를 얻을 수 있으며, 직접구동방식으로 기어, 베어링등에 의한 기계적접촉을 배제시켜 기기의 성능을 향상시키고 가공비를 절감할 수 있다. 또한 전자에 비해서 넓은 동적범위(dynamic

range)를 얻을 수 있기 때문에 반도체 가공공정에서의 웨이퍼스테퍼(wafer stepper), STM(scanning tunneling microscope), SEM(scanning electron microscope)등 각종 정밀 기기의 스테이지에 현재 적용되고 있다.

특히, 스테이지로 적용하기 위해서 평면운동이 가능한 형태로 연구가 되고 있는데, 이에 대한 연구는 Sawyer가 개발한 구동기를 기반으로 다양하게 시도가 되고 있다.^(1,2) 평면구동기는 형태별로 접촉식과 비접촉식으로 나누어 지는데, 접촉식의 경우에는 마이크로 운동을 구현하는데 한계가 있기 때문에 비접촉식이 유리하다. 비접촉식에 대한 연구로는 Yoshiyuki가 평면구동기를 이용하여 초정밀 스테이지를 발표하였는데 공압에 의한 부상시스템이기 때문에 구조가 복잡한 단점이 있다.⁽³⁾ 그리고, Won-jong K.과 Trumper는 4개의 리니어모터를 이용하여 부상력과 추진력을 동시에 제어하는 평면구동기를 개발하였으며 현재 SPM(scanning probe microscopy)용 플랫폼에 적용된 사례가 보고되었다.^(4,5) 또한, 정광석은 직류형 솔레노이드를 이용하여 평면구동기를 개발하였다.⁽⁶⁾

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 연세대학교 기전공학부

본 논문은 비접촉식 평면구동기를 구현하기 위한 선행연구로서 전자기력을 이용한 비접촉식 직선구동기에 관한 것이다. 2장에서는 제안된 시스템의 구조와 작동원리에 대해서 설명하고, 3장에서는 솔레노이드간에 발생하는 힘을 자기회로이론과 가상힘의 원리를 이용하여 유도한다. 마지막으로 4장에서는 모델링과 모의 실험에 대해서 다룬다.

2. 구조 및 작동원리

회전형 스위치드 릴럭턴스 모터(Rotary Switched Reluctance motor)에서 고정자(stator)와 회전자(rotor) 사이에는 수평력과 수직력이 발생된다. 수평력은 회전자를 구동시키는 반면에, 수직력은 축 대칭구조의 모터구조에 의해서 서로 상쇄된다. 이와 같이 고정자와 회전자 사이에 발생하는 수직력과 수평력을 이용하여, 자기부상형 직선 구동기를 개발할 수 있다.

2.1 구조

Fig.1은 본 연구에서 제안하는 비접촉식 선형 구동기의 구성도로서 기본 구조는 가변 릴럭턴스 리니어모터(Variable Reluctance Linear Motor)와 비슷하다. 상부 고정자는 여러 개의 솔레노이드로 이루어져 있으며, 하부 이동자(mover)는 네 개의 철심으로 이루어져 있다. 이동자는 리니어모터와는 달리 가이드 없이 부상한 상태로 직선운동을 하게 된다. 이동자의 위치는 프레임에 부착된 네 개의 홀센서를 통하여 측정된다.

2.2 작동원리

본 연구에서 제안된 구동기의 작동원리는 가변 릴럭턴스를 이용하는 기존의 모터들과 유사하다.

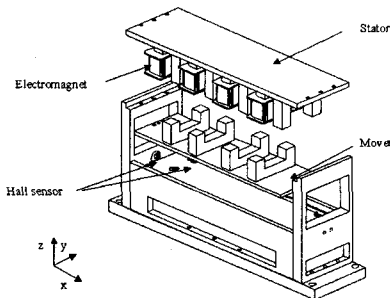


Fig. 1 Schematic diagram of proposed model

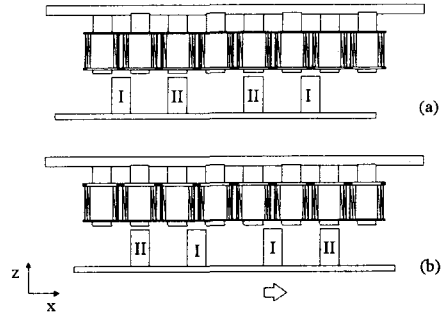


Fig. 2 Principle of operation (a) mover in steady state, and (b) mover after one step motion

Fig. 2는 작동원리를 나타내는데, Fig. 2(a)에서는 이동자가 정지된 상태로서 이동자의 II 자극(pole)은 고정자의 자극과 일직선상에 있어서 수직 방향으로만 힘이 존재하여 이동자를 부상시킨다. I 자극은 고정자의 자극과 어긋나있기 때문에 추진력이 발생된다. 그러므로 이동자의 이동방향은 I 자극과 상호 작용하는 고정자의 자극에 따라서 정해지게 된다. Fig. 2(a)에서 I 자극의 오른쪽에 위치한 고정자의 자극에 전류가 인가되면 Fig. 2(b)와 같이 이동하게 되고 이동자의 자극 I와 II는 서로 교번하게 된다. 고정자의 확장을 통하여 무한한 작업 영역을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 비접촉식 선형 구동기의 가능성에 중점을 두었기 때문에 이동자의 이동거리에 제한을 두고 구동기를 설계하였다.

3. 힘 해석

이동자에 작용하는 전자기력은 연속적인 전자 기현상을 전기회로와 같은 분산시스템으로 가정하여 해석하는 자기회로이론을 이용하여 구한다. 자기회로이론은 인덕턴스계산과 모터설계등에 많이 적용되고 있다.

3.1 자기회로

Fig. 3(a)는 한 쌍의 이동자와 고정자의 자극을 나타내며, 이는 Fig. 3(b)와 같이 동등한 자기회로로 나타낼 수 있다. 여기서, R_m, R_s, R_{ml}, R_{sl} 는 각각 이동자와 고정자의 철심내에서의 릴럭턴스(reluctance)와 누설릴럭턴스(leakage reluctance)를 나타낸다. 그리고, R_g 는 공극(air-gap)에서의 릴럭턴스인데, 이 값은 다음 절에서 다룰 자속 패턴을 통해서 설명하기로 한다. 회로전체의 릴럭턴스는 각 자기요소를 병렬 또는 직렬 결합하여 구할 수

있다. 주어진 회로의 해석을 간단히 하기 위해서 회로에 포함되어 있는 철심의 상대 자기투자율이 아주 크고, 자기포화가 되지 않는다고 가정한다. 또한, y 축 방향으로의 누설자속(leakage flux)은 무시할 정도로 한다. 이 가정에 따라서, 회로에서의 자속을 구하기 위해서는 공극에서의 릴럭턴스만을 고려하면 된다.

3.2 전자기력

공극에서의 릴럭턴스는 Fig. 4 와 같은 자속 패턴을 이용하여 구할 수 있다. 그림에 나타난 자속 패턴은 공극에서의 자속 패턴의 전형적인 형상으로 수치해석적 방법에 의해서도 구할 수 있다.

Fig. 4 에서 자속 패턴은 세 개의 자속 튜브로 이루어 지는데, 각 튜브에 대해서 릴럭턴스(R_1, R_2, R_3)을 구하여, 병렬 결합하면 전체 릴럭턴스를 구할 수 있다. 각 튜브의 릴럭턴스는 아래와 같이 구해진다.⁽⁷⁾

$$R_1 = \frac{z}{\mu_0(w_l - x)l_t} \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{1}{0.54\mu_0 l_t} \quad (2)$$

$$R_3 = \frac{\pi}{2\mu_0 l_t \log_e(1 + \frac{2x}{z})} \quad (3)$$

여기서, μ_0 는 자유공간에서의 투자율이다. 공극에서의 릴럭턴스는 다음과 같다.

$$R_g(x, z) = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_2} + \frac{2}{R_3} \right)^{-1} \quad (4)$$

회로에는 두개의 공극이 직렬로 연결되어

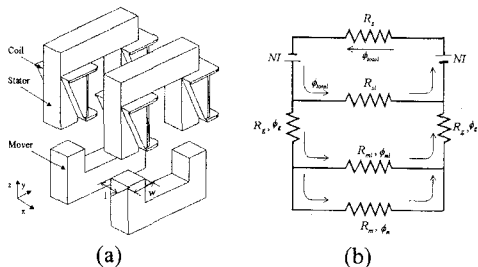


Fig. 3 (a) stator and mover poles, and (b) magnetic circuit equivalent to figure (a).

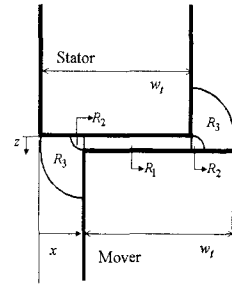


Fig. 4 Magnetic flux pattern between two poles

있으므로 전체 릴럭턴스는 공극에서의 릴럭턴스의 두배가 된다. 공극을 통과하는 자속은 $\phi = \frac{Ni}{R_g(x, z)}$

로 구할 수 있고, 총 자속쇄교(flux linkage)는 자속에 코일의 턴수를 곱한 것으로 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = N\phi = Li \quad (5)$$

위 식으로부터 회로에서의 인덕턴스는 아래와 같이 된다.

$$L(x, z) = \frac{N^2}{R_g} \quad (6)$$

인덕턴스는 자극의 위치(x, z)에 대한 함수로 나타나며, 가상일의 원리를 적용하여 각 위치에서의 수평, 수직력을 폐형해로 나타낼 수 있다. 그리하여 실제 제어시 필요한 해를 임의의 위치에서 구할 수 있다.

공극에 저장된 자기에너지는 아래와 같으며,

$$W_m(x, z, i) = \frac{1}{2} Li^2 \quad (7)$$

이를 가상일의 원리에 의해서 수평, 수직력은 아래와 같이 구해진다.⁽⁸⁾

$$f_x(x, z, i) = -\frac{\partial W_m}{\partial x} \quad (8)$$

$$f_z(x, z, i) = -\frac{\partial W_m}{\partial z} \quad (9)$$

Fig. 5(a)와 (b)는 앞에서 유도한 전자기력을

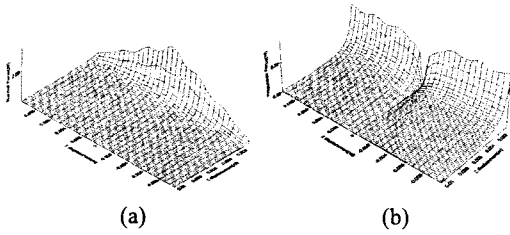


Fig. 5 (a) Normal force(f_z), and (b) propulsive force(f_x) w.r.t. x and z position.

자극의 위치(x, z)에 따라 구한 것이다. 수직력, 수평력은 모두 x 축에 대칭으로 나타난다. x 값이 영일 때 수직력은 최대인 반면에 수평력은 최소임을 알 수 있다. Fig. 2 에서 보듯이 이동자의 자극이 II 일 때 수직력이 최고이며, 자극이 I 일 때 수평력이 최고이므로 자극 II는 부상력, 자극 I는 추진력 위주로 작동하게 된다. 수직력과 수평력의 크기비에 따라서 자극 I, II의 변화가 일어나는 최적의 위치가 존재함을 예상할 수 있는데 이 문제는 구동기 설계 시 최적화 기법을 도입하여 해결할 수 있다. 수직력은 z 축 위치가 작을수록 변화율이 크기 때문에 공칭위치를 정할 때 너무 작은 값을 가지게 되면 시스템이 불안정해질 가능성이 커지므로 설계 시 이러한 사항을 고려하여야 한다.

4. 모델링 및 모의 실험

4.1 운동방정식

부상된 이동자의 동역학을 이해하기 위하여 Fig. 6 에서와 같이 고정자의 중앙에 고정좌표계 (X, Y, Z)를 설정하고, 이동자의 중앙에 이동좌표계 (x, y, z)를 두었다. 그리고 오일러 각(Euler angle)을 이용하여 두좌표계간의 관계를 정리하였다.⁽⁹⁾ 이동자의 힘 평형 방정식을 미소항의 관계식으로 나타내면 다음과 같다.

$$m\ddot{\alpha} = \delta F_z \quad (10)$$

$$m\ddot{\alpha} = \delta F_x \quad (11)$$

$$I_y \ddot{\theta} = \delta T_y \quad (12)$$

여기서, m, I_y 는 각각 이동자의 질량과 주관성모멘트를 나타내며, 우변 항은 고정자와 이동자 사이에서 발생하는 전자기력과 중력에 의한 영향으

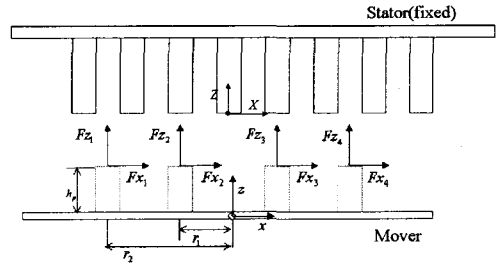


Fig. 6 Forces acting on the mover.

로 나타낼 수 있다. Fig. 6 은 이동자에 작용하는 모든 힘을 나타내는데, 이 힘들은 철심의 가공시 발생하는 오차를 무시하여 각 축에서의 편심요소가 없는 것으로 가정한다. 그래서 z 축에 대한 회전은 고려하지 않는다. 또한, 이동자는 x 축에 대해 대칭 구조를 이루기 때문에 x 축에 대한 회전 영향은 무시할 수 있다.

식(10)~(12)의 우변항의 F_z, F_x, T_y 는 Fig. 6 의 정의에 의해 이동좌표계에서 일반좌표계로 변환이 가능하다. 앞 장에서 유도한 것처럼 전자기력은 변위 X, Z 와 전류 i 의 함수이므로, 힘의 일차 변분은 다음과 같이 정리된다.

$$\delta F_z = \left. \frac{\partial F_z}{\partial Z} \right|_{v=v_0} \delta Z + \left. \frac{\partial F_z}{\partial X} \right|_{v=v_0} \delta X + \left. \frac{\partial F_z}{\partial i} \right|_{v=v_0} \delta i \quad (13)$$

$$\delta F_x = \left. \frac{\partial F_x}{\partial Z} \right|_{v=v_0} \delta Z + \left. \frac{\partial F_x}{\partial X} \right|_{v=v_0} \delta X + \left. \frac{\partial F_x}{\partial i} \right|_{v=v_0} \delta i \quad (14)$$

여기서, $v_0 = [z_0 \ x_0 \ i_0]^T$ 는 공칭위치의 좌표와 공칭전류값을 나타낸다. 그리고 스프링 상수와 힘 상수는 다음과 같이 정리된다.

$$k_{zx} = \left. \frac{\partial F_z}{\partial X} \right|_{v=v_0} \quad k_{zz} = \left. \frac{\partial F_z}{\partial Z} \right|_{v=v_0} \quad k_{zi} = \left. \frac{\partial F_z}{\partial i} \right|_{v=v_0}$$

$$k_{xx} = \left. \frac{\partial F_x}{\partial X} \right|_{v=v_0} \quad k_{xz} = \left. \frac{\partial F_x}{\partial Z} \right|_{v=v_0} \quad k_{xi} = \left. \frac{\partial F_x}{\partial i} \right|_{v=v_0} \quad (15)$$

Fig. 6 을 보면 F_2, F_3 은 고정자와 이동자의 자극이 완전히 일치된 상태에서 발생하는 것이고, F_1, F_4 는 자극이 오프셋된 상태이므로, 위에서 구한 스프링 상수와 힘 상수는 자극의 위치에 따라서 세 개가 존재한다.

모델링된 힘과 모멘트를 식(10) ~ (12)에 대입하

여 미소회전 변위에 의한 고차항을 무시하고, 편위상 δ 기호를 생략하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} m\ddot{Z} &= K_{zx}X + K_{zz}Z + K_{z\theta}\theta + \sum_{n=1}^r k_{nzi}i_n \\ m\ddot{X} &= K_{xx}X + 4K_{xz}Z + K_{x\theta}\theta + \sum_{n=1}^4 k_{nxi}i_n \\ I_y\ddot{\theta} &= K_{\theta\theta}\theta + K_{\theta x}X + K_{\theta z}Z + \sum_{n=1}^4 K_{n\theta}i_n \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, $K_{zx}, K_{xx}, K_{x\theta}, K_{zz}, K_{xz}, K_{z\theta}, K_{\theta x}, K_{\theta z}, K_{\theta\theta}$ 는 식 (15)의 상수들로 이루어지는 또 다른 상수로서 아래와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} K_{zx} &= k_{1zx} + k_{2zx} + k_{3zx} + k_{4zx} \\ K_{xx} &= k_{1xx} + k_{2xx} + k_{3xx} + k_{4xx} \\ K_{x\theta} &= -r_2k_{1xz} - r_1k_{2xz} + r_1k_{3xz} + r_2k_{4xz} \\ K_{zz} &= k_{1zz} + k_{2zz} + k_{3zz} + k_{4zz} \\ K_{zx} &= k_{1zx} + k_{2zx} + k_{3zx} + k_{4zx} \\ K_{z\theta} &= -r_2k_{1zz} - r_1k_{2zz} + r_1k_{3zz} + r_2k_{4zz} \\ K_{\theta x} &= r_2k_{4zx} - r_2k_{1zx} + h_pK_{xx} \\ K_{\theta z} &= r_2k_{4zz} - r_2k_{1zz} + K_{xz} \\ K_{\theta\theta} &= r_1^2k_{3zz} + r_1^2k_{2zz} + r_2^2k_{4zz} + r_2^2k_{1zz} + h_pK_{x\theta} \end{aligned} \quad (17)$$

4.2 제어기 설계

다변수 시스템의 제어기 설계를 위하여 앞 절에서 구한 운동방정식을 바탕으로 다음과 같은 상태공간 모델식을 생각할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax}(t) + \mathbf{Bu}(t) \quad (18)$$

전형적인 비례-적분-미분제어 기법을 이용하면, 제어입력은 아래와 같이 된다.

$$\mathbf{u} = -\mathbf{k}_p(\mathbf{x}_d - \mathbf{x}) - \mathbf{k}_d(\dot{\mathbf{x}}_d - \dot{\mathbf{x}}) - \mathbf{k}_i \int (\mathbf{x}_d - \mathbf{x}) dt \quad (19)$$

여기서, $\mathbf{x}_d, \dot{\mathbf{x}}_d$ 는 기준 입력값, $\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}$ 는 상태변수를 각각 나타내며, $\mathbf{k}_p, \mathbf{k}_d, \mathbf{k}_i$ 는 각각 비례, 적분, 미분 게인값을 나타낸다. 본 시스템은 여자유도 시스템이기 때문에 적절한 힘의 배분을 통해서 결합된 시스템을 비결합시킬 수 있다. 다음 절에서는

Table 1 The simulation parameters.

	Item	Symbol	Value
Stator	Pole width	W_t	10 (mm)
	Pole thickness	L	10 (mm)
	Pole pitch	τ	10 (mm)
	Winding	N	335 (turns)
Mover	Pole width	W_t	10 (mm)
	Pole thickness	L	10 (mm)
	Pole pitch 1	r_1	20 (mm)
	Pole pitch 2	r_2	50 (mm)
	Pole height	h_p	20 (mm)
	Mass of mover	m	0.24 (Kg)
	Moment of Inertia	I_y	$3.9E-4$ (Kg m ²)

1 자유도 운동에 대한 모의실험결과를 다룬다.

4.3 모의 실험

Table 1 은 모의실험에 사용된 변수들을 나타내며, 모의실험결과를 통해서 앞 절에서의 선형제어 이론을 이용하여 우리가 유도한 수학적모델이 타당함을 알 수 있다.

Fig. 7 은 이동자의 1 자유도 운동을 모의 실험한 결과로서 기준입력을 $z_d = 0.0005m$, $x_d = 0mm$, $\theta_d = 0rad$ 로 한 경우이다. Fig. 8 는 이동자의 기준 위치를 시간에 대한 조화함수 $z_d = 0.0025\sin(5\pi)$ 로 한 경우이다.

모의 실험결과를 보면 이동자를 원하는 위치로 고정할 수 있고 원하는 경로를 추종할 수 있음을

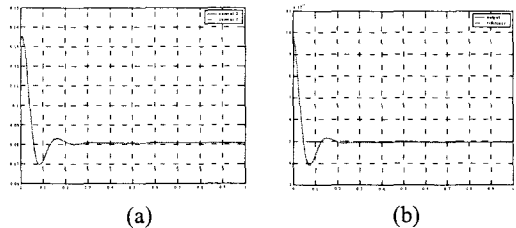


Fig. 7 Simulation results of the desired position (a) input currents, and (b) position response.

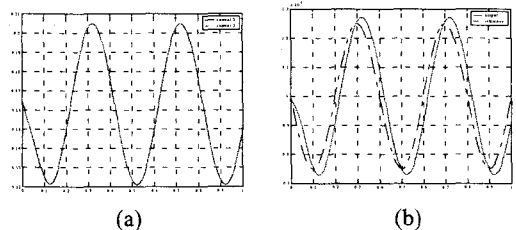


Fig. 8 Simulation results of the desired position (a) input currents, and (b) position response.

알 수 있다. Fig. 6 에서 보듯이 수직력은 무게중심에 대하여 대칭으로 작용하기 때문에 z 방향 운동에서는 Fig. 7(a), 8(a)에서 보면 각 자극으로의 입력전류가 서로 동일함을 알 수 있다. 또한, z 축 모드 운동에 대해서 여자유도를 가지기 때문에 고정자의 솔레노이드 4 개를 모두 이용하여 이동자를 부상시킬 수 있다. Fig. 7 과 Fig. 8 의 경우에는 두 개의 솔레노이드만을 사용하였다. 솔레노이드에 전류에 인가할 때, 홀수개의 솔레노이드를 이용하면 y 축에 대한 모멘트의 균형이 깨어지기 때문에 이러한 제어 방법은 가급적 피해야 한다. 제안된 구동기는 고정자가 확장될 때에도 솔레노이드는 항상 쌍을 이루어 작용하여야 하므로 다상(multi-phase)시스템으로의 확장이 용이하다.

5. 결 론

본 연구에서는 마이크로 오토메이션 및 초정밀 위치결정기구에 적용될 비접촉 평면 구동기 개발을 위하여 서스펜션 타입의 비접촉식 직선 구동기를 제안하였다. 본 구동기의 특징으로는 힘을 발생시키는 메커니즘이 부상력과 추진력이 결합된 형태이기 때문에 시스템 구조가 간단하다는 것이다. 구동기의 작동원리를 설명하면서 설계시 고려해야 할 사항들에 대하여 언급하였으며, 자기해석 이론으로 자기회로이론을 이용하여 전자기력을 해석하였으며 적은 작동범위를 갖는 기기에 적용되는 선형화 해석 기법들을 이용하여 강체에 대한 운동방정식을 구하였다. 그리고, 선형제어기를 이용하여 1 자유도에 대한 모의 실험을 행하여 그 가능성을 보였다.

후 기

본 연구는 2000 년도 한국과학재단 목적 기초 연구 과제(2000-1-30400-009-3)의 연구비 지원에 의한 연구 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) B. A. Sawyer, 1968, "Magnetic positioning device," U.S. Patent 3,376,578.
- (2) Hemant M., and Farshad K., 1999, "Closed-loop Control of a Base XY stage with Rotational Degree-of-Freedom for a High-Speed Ultra-Accurate

- Manufacturing System," 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.1812~1817.
- (3) Yoshiyuki T., and Yasushi K., 1995, "Study on a Surface-Motor Driven Precise Positioning System," *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.1, pp.311~319.
- (4) Won-jong K., David L. T., and Jeffrey H.L., 1998, "Modeling and Vector Control of Planar Magnetic Levitator," *IEEE Trans. On Industry Applications*, Vol. 34, No. 6, pp.1254~1262
- (5) Holmes M.L, Hocken R., and Trumper D., 2000, "The long-range scanning stage: a novel platform for scanned-probe microscopy," *J. of the Int'l Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, Vol.24, pp.191~209.
- (6) 정광석, 백윤수, 2001, "비접촉 평면 구동기의 자기력 조합 방식 구동원리," 한국정밀공학회지, 제 18 권, 제 3 호, pp.115~121.
- (7) Herbert C.R., 1951, *Electromagnetic Devices*, John Wiley & Sons., Inc.
- (8) Nasar S.A., and Unnewehr L.E., 1983, *Electromechanics and Electric Machines*, John Wiley & Sons, Inc.
- (9) Craig J.J., 1989, *Introduction to robotics mechanic and control*, Addison-Wesley Publishing Company.