

자기 흡인력에 의한 비접촉식 SR 형 선형 구동기

이상현#, 정광석*, 백윤수**

Switched Reluctance Contact-Free Linear Actuator Using Attractive Magnetic Forces

Sang Heon Lee[#], Kwang Suk Jung^{*} and Yoon Su Baek^{**}

ABSTRACT

In the development of positioning device for precision manufacturing and measuring, the friction from mechanical contact causes serious decrease of performance. In this study, we studied about variable reluctance type contact-free linear actuator to overcome drawbacks from friction. In the view of electromagnetics, we analyzed and derived theoretical magnetic force equation and designed structure for generating suspension and propulsion force simultaneously. In the view of dynamics, we derived equation of motion and identified the stability of the system. Finally, we verified the feasibility of the proposed system.

Key Words : Switched reluctance (스위치드 릴럭턴스), Magnetic suspension (자기부상), Contact-free (비접촉), Linear actuator (선형 구동기)

1. 서론

반도체 제조산업으로 대표되는 마이크로 기술의 급속한 발달로 말미암아 산업계에서 요구되는 정밀도의 수준은 점차적으로 증가하고 있다. 이러한 기술적 요구를 만족시키기 위하여 미소변위구동을 위한 액추에이터의 개발이 활발히 진행되고 있다. 직선운동을 위한 기존의 구동 방법으로는 볼스크류, 랙/피니언 등의 힘 변환장치에 의한 간접 구동방식이나 리니어가이드에 의한 구속에 의한 구동 방식이 이용되었다. 그러나, 높은 정밀도가 요구될수록 백래쉬(back lash)나 마찰로 인한 문제

는 시스템의 성능저하를 초래하게 되었다. 그래서 성능저하의 단점을 극복하기 위해서 비접촉식에 의한 직접구동방식 구동기에 관한 연구가 진행되고 있다. 비접촉식의 경우, 기계적 접촉을 제거하여 마찰로 인한 문제인 윤활, 분진의 발생등을 해결할 수 있으며, 구동기의 제작시 접촉면의 후처리 가공공정을 제거하여 구동기의 제작비를 낮출 수 있는 장점이 있다. 비접촉을 구현하기 위한 방법으로는 자기부상과 공기부상에 의한 방식이 있는데, 후자의 경우에는 공기의 유동과 압축기로부터의 오염발생 때문에 진공상태에 가까운 초청정실의 작업환경에는 적당하지 않다. 반면에 전자기

접수일: 2003년 4월 9일; 게재승인일: 2003년 7월 11일

교신저자: 연세대학교 기계공학과
E-mail: buildream@empal.com, Tel: (02) 2123-4407
* 국립충주대학교 기계공학과
** 연세대학교 기계공학부

력을 이용한 자기부상의 경우에는 어떠한 오염원을 포함하지 않기 때문에 현재 산업계의 요구를 충분히 만족시킬 것으로 기대된다.

최초의 비접촉식 구동기는 공기베어링에 의한 부상상태에서 평면운동을 하는 sawyer 모터이다. 이 시스템은 현재 공작기계의 공구대나 이송장치에 적용되고 있으며, 성능 향상을 위한 연구도 진행중이다.¹ 자기부상에 의한 비접촉 구동기에 대한 연구는 Trumper² 등에 의해서 진행되었다. 이들은 여러 개의 선형모터를 조합하여, 구동영역이 평면에서 $50 \times 50\text{mm}$, 수직으로 $\pm 200 \mu\text{m}$, 각 축에 대해 $\pm 600 \mu\text{rad}$ 의 회전이 가능한 비접촉 정밀 스테이지를 개발하였다. 그리고, 국내에서는 Jung^{3,4}에 의해서 흡인식 부상과 반발식 부상에 의한 비접촉 평면 구동기가 연구되었다. 한편, 비접촉식 선형 구동기에 관한 연구로는 Chung⁵에 의해서 자기부상열차를 위한 스위치드 릴럭턴스 (switched reluctance, SR)형태의 선형구동기가 진행되었고, 정전기력을 이용한 비자성체의 부상과 선형이동에 관한 연구가 Higuchi⁶에 의해서 진행되었다. 그러나, 이들 연구들은 초정밀 구동보다는 이송시스템에 연구 목적을 두었다.

본 연구에서는 5 자유도 운동과 동시에 대변위 수평 직선운동이 가능한 비접촉식 선형 구동기를 제안한다. 본 논문의 2 장에서는 전자기학적인 측면에서 자기력을 모델링 및 해석하며 이 결과를 바탕으로 3 장에서는 제안된 시스템의 구동원리와 설계에 대해서 다룬다. 그리고, 4 장에서는 기계운동학적 측면에서 운동방정식을 유도하여 실험을 수행한다. 5 장에서는 본 연구에서 행하여진 결과를 요약하고, 향후 연구과제에 대해서 다룬다.

2. 자기력 해석

자기력을 발생시키는 주요한 원리로는 로렌츠의 원리와 가변 자기저항 원리(Variable Reluctance, VR)가 있다.⁷ 로렌츠 원리에 의한 자기력은 영역에서의 자기장의 크기와 도선을 따라 흐르는 전류의 크기에 비례하여 높은 자화력을 가지는 네오뎀계열(NdFeB)의 영구자석이 많이 사용되고 있다. 그러나 큰 자기력이 요구되는 경우는 과전류로 인한 열발생이 문제가 될 수 있다. 반면, VR 원리에 의한 자기력은 자성체의 투자율이 높은 편이므로 열발생문제로부터 자유로울 수 있다. 하지만, 오직

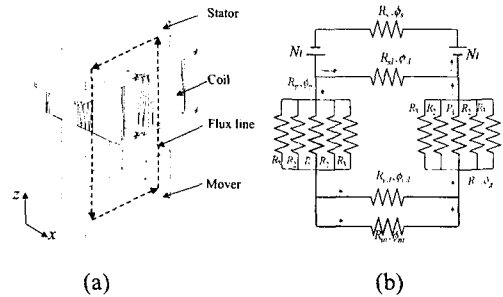


Fig. 1 Magnetic elements (a) Electromagnet and iron core (b) Equivalent magnetic circuit

흡인력만을 발생 시키기 때문에 구동기 구성시 자유도의 여유가 떨어지는 단점이 있다. 이러한 특성상 설계자는 적용될 시스템의 특성과 용도에 따라서 적절한 구동방식을 선택하여야 한다. 본 연구에서는 진공상태의 작업환경에 적용될 위치결정 기구에 관한 연구로서 열발생율이 적은 VR 원리를 바탕으로 한 SR 형을 채택하였다. 본 절에서는 자기회로이론을 이용하여 전자기력을 해석한다.

2.1 자기력

Fig. 1(a)는 제안된 시스템에서 사용된 자기요소로서 한 쌍의 전자석을 나타내며 Fig. 1(b)와 같이 등가 자기회로로 나타낼 수 있다. 자기회로에서는 앙페르의 폐회로법칙을 이용하여 전기회로에서의 키르히호프의 폐회로법칙에 등가한 식을 유도할 수 있다. 자기회로에서는 전기회로와 대우관계를 가지나, 자속의 프린징(fringing)효과와 누설(leakage)이 존재하기 때문에 전기회로와는 차이가 있다. 회로를 구성하면서 이러한 점을 고려하여야 한다. 자기회로를 구성하기 위한 방법으로 퍼미언스법을 이용하여, Fig. 1(a)의 공극에서의 자속은 앞서 말한 프린징효과를 고려하여, 자기저항이 병렬 결합된 형태로 표현이 된다. 또한 고정자와 이동자에서의 자기요소도 Fig. 1(b)와 같이 나타낼 수 있다. 앞서 말한 앙페르의 폐회로법칙은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_f \tag{1}$$

여기서, \mathbf{H} 는 자기장의 세기를 l 은 자속이 흐르는 경로를 말하며, I_f 는 앙페르의 고리를 통과하는 전류의 총합을 의미한다. 식(1)의 우변은 Fig.

1(b)의 회로에 대해서 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} &= H_m l_m + H_s l_s + H_g l_g + H_{ml} l_{ml} + H_{sl} l_{sl} \\ &= \phi_m \mathfrak{R}_m + \phi_s \mathfrak{R}_s + \phi_g \mathfrak{R}_g + \phi_{ml} \mathfrak{R}_{ml} + \phi_{sl} \mathfrak{R}_{sl} \\ &= \mathfrak{I}_m + \mathfrak{I}_s + \mathfrak{I}_g + \mathfrak{I}_{ml} + \mathfrak{I}_{sl} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\mathfrak{I}, \mathfrak{R}, \phi$ 는 각각 기자력, 자기저항, 자속을 의미하며, 아래첨자 m, s, g, l 은 이동자, 고정자, 공극, 누설경로를 나타낸다. 여기서 자기저항의 정의는 아래와 같이 나타낸다.

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S} \quad (3)$$

식(3)에서 S 는 자속이 흐르는 단면의 크기를 μ_0 와 μ_r 는 공기중에서의 투자율과 상대투자율을 나타낸다. 그런데, 철심의 경우에는 μ_r 는 아주 크다고 가정할 수 있기 때문에 철심에서의 자기저항은 무시할 수 있다. 그리고, 누설자속은 무시할 정도로 가정한다면 식(2)를 식(1)에 대입하여, 다음과 같이 폐회로식을 구할 수 있다.

$$\mathfrak{I}_g - \sum_{n=1}^2 N_n i_n = 0 \quad (4)$$

여기서 N, i 는 각각 코일 감은 수, 입력전류를 나타내며, 공극에서의 기자력만이 우리의 관심사가 됨을 알 수 있다.

식(4)에서의 공극에서의 기자력 \mathfrak{I}_g 은 공극을 지나는 자속과 공극에서의 자기저항의 관계로 나타낸다. 이 때 자기저항은 프링징효과를 고려하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathfrak{R}_g = \frac{\mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_2 \mathfrak{R}_3}{\mathfrak{R}_2 \mathfrak{R}_3 + 2\mathfrak{R}_3 \mathfrak{R}_1 + 2\mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_2} \quad (5)$$

여기서, 각 요소는 퍼미언스법에 의해 아래와 같이 정리된다.

$$\mathfrak{R}_1 = \frac{z}{\mu_0 (w_t - x) l_t} \quad (5.1)$$

$$\mathfrak{R}_2 = \frac{1}{0.54 \mu_0 l_t} \quad (5.2)$$

$$\mathfrak{R}_3 = \frac{\pi}{2\mu_0 l_t \log(1 + \frac{2x}{z})} \quad (5.3)$$

에너지 보존 법칙에 의하면 자기력에 의한 일은 결국 자기에너지의 변화와 동일하기 때문에 선형시스템에서의 자기력은 다음과 같이 자기에너지의 변분으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} f_z(x, z, i) &= -\frac{\partial W_m}{\partial z} \\ &= -\mu_0 N^2 i^2 h \left(\frac{x-l}{z^2} + \frac{8(1 - (\pi x + 2z)/2z)}{\pi(\pi x + 2z)} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$f_x(x, z, i) = -\frac{\partial W_m}{\partial x} = -\mu_0 N^2 i^2 h \left(\frac{4}{\pi x + 2z} \right) \quad (7)$$

여기서, W_m 는 자기에너지를 나타내며, $(1/2)Li^2$ 로 계산된다. 식(6)과 (7)에서 보듯이 자기력은 극간의 상대위치와 전류의 함수로 나타남을 알 수 있다. Fig. 2 는 수평력과 수직력의 x 축과 z 축 변위에 따른 값을 나타낸다. Fig. 2 에서 x 축 변위에 대해서는 수직력과 수평력이 고정자와 이동자의 극이 완전히 정렬된 상태를 중심으로 서로

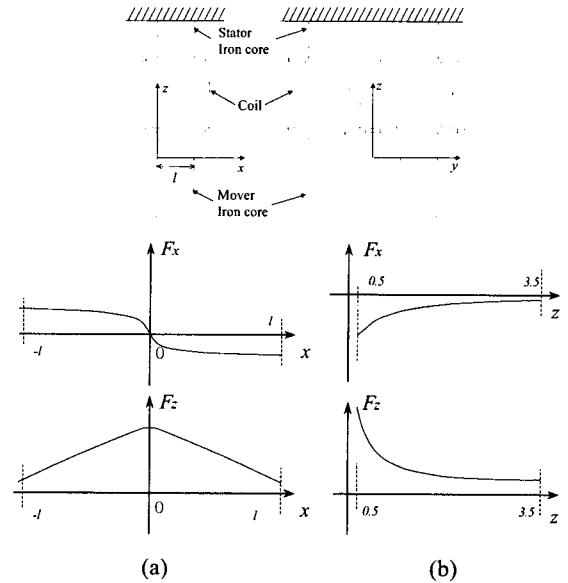


Fig. 2 Force characteristics in a electromagnet and iron core system. (a) Horizontal force (b) Normal force

대칭적으로 나타나며, z 축 변위에 대해서는 변위가 증가할수록 자기력은 감소하고, 변위가 감소할수록 자기력은 무한대로 증가한다. 또한 식(6)에서 보면 수직력은 z 축 변위에 대해서 자승곱에 반비례하므로 공극의 크기에 가장 민감함을 알 수 있다. 그러므로, 본 연구에서 제시된 자기요소의 조합에 의해서 자기부상이 이루어질 때는 일정한 공극의 제어가 안정된 부상을 가능케 함을 예상할 수 있다. x 축 방향으로의 수평력은 음의 강성을 가지므로, 두 극이 정렬된 상태에서는 수평력을 만들어 낼 수 없다. 그러므로, 수평력을 발생시키기 위해서는 두 극이 어긋난 상태와 정렬된 상태가 조합된 구조로 이루어져야 한다. 한편, y 축 방향으로의 수평력도 x 축 방향으로의 수평력과 동일한 특성을 가지는데, 두 극이 y 축 방향으로 어긋나게 되는 경우, 복원력이 작용하여 일정한 평형점을 유지할 수 있다.

3. 설계

본 연구는 제안된 시스템의 가능성 타진에 목표를 두고 있기 때문에 시스템의 설계에 있어서 안정된 부상과 주진을 위한 기본적 설계기준을 따랐다.⁵

3.1 구동원리

제안된 시스템은 총 6 자유도 시스템으로서 5 자유도는 능동적으로 제어가 가능하며, y 축 방향으로의 병진운동은 수동적으로 안정화 된다. Fig. 3(a)는 x 축 방향으로 정지 상태에서의 이동자에 작용하는 힘을 나타내는데, 이동자의 x 축 위치에 따라서 작용력을 수직력만 작용하는 경우(f_I)와 수직력과 수평력이 동시에 작용하는 경우(f_{II})로 나눌 수 있다. 고정자와 이동자의 극을 f_I, f_{II} 가 모두 작용하도록 Fig. 2(b)와 같이 배치하였으며, 이 때 고정자와 이동자의 폭은 모두 동일하게 하였다. 이동자의 3 자유도의 면외운동은 f_I 와 f_{II} 의 조합에 의해서 이루어지며, 2 자유도의 면내운동은 f_{II} 에 의해서 이루어진다. x 축 방향으로의 대변위 운동은 VR 타입의 리니어모터와 구동원리가 비슷하다.

일반 리니어모터는 LM 가이드에 의해서 지지가 되는데, 이 때 과도한 수직력은 가이드의 파손과 성능의 저하를 유발할 수 있기 때문에, 수직력

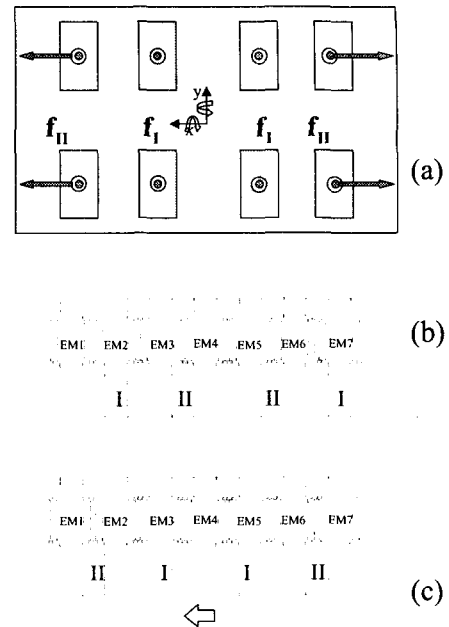


Fig. 3 Operating principle (a) Force direction in steady state (b) Initial position (c) Moved position

을 줄이는 것이 원활한 운동을 위한 관건이다. 하지만, 제안된 모델은 수직력이 부상력으로 이용되기 때문에 수직력의 작용점을 적절히 배치하는 것이 아주 중요하다. 그러나, 힘 f_{II} 는 수직력과 수평력이 결합된 형태로서 수직력이 수평력의 약 3.5 배인데, 이러한 상태에서는 수직방향으로의 안정도를 유지하면서 높은 추력을 얻기는 힘들다. 추력과 관련된 문제를 해결하기 위해서는 자기력이 극의 형상과 연관이 있기 때문에 극의 형상변화를 통해 추력을 높일 수 있는 방법과 수직방향으로 상반구조를 형성하여 이동자에 양방향 흡인력이 작용하도록 하여 수직방향의 안정도를 높여 추진력을 높일 수 있다. 극의 형상변화를 통한 방법으로 단면이 사각형인 경우에 비해서 썩기형태로 채택한 경우, 수직력을 수평력의 2.1 배 가량으로 줄일 수 있었다.⁸ Fig. 3(b)와 (c)는 x 축 방향으로의 구동원리를 나타내는데, 이동자 I 에는 부상력만이 작용하고, II 에는 부상력과 추진력이 동시에 작용하여 고정자의 전자석 3, 5 번의 전류가 증가되면 이동자는 Fig. 3(b)의 상태에서 Fig. 3(c)의 상태로 이동한다. 이와 같은 전류의 교번에 의해 이동자는 수평운동이 가능하다.

3.2 구조

Fig. 4 는 제안된 흡인식 자기부상에 의한 비접촉 선형구동기의 구조를 나타낸다. 고정자에는 14 개의 전자석이 배치되며, 이동자의 변위는 5 개의 비접촉 변위센서에 의해서 측정이 된다. 본 시스템에서 이동자는 수동 자기요소만으로 이루어지기 때문에 주위와 완전히 분리된 자기부상을 이룰 수 있다. 또 다른 설계 방안으로 이동자에 능동자기요소를 배치하는 방법이 있는데, 구동영역의 확장에 있어서는 앞서의 방법보다는 뛰어나지만, 이동자의 무게증가와 외부와의 배선으로 인한 문제발생의 여지가 있다. Table 1 은 시스템의 세부설계치수를 나타낸다. 고정자 및 이동자의 극의 폭과 두께는 각각 10mm 로 하여 정사각형의 단면을 가지며, 고정자의 피치는 10mm 이며, x 축 방향으로의 구동거리는 10mm 로 한정하였다. 사용된 철심의 재료는 SS-41 로서 탄소의 함유량이 0.23% 이하이다. 탄소 함유량이 적을수록 자기적 성질이 뛰어나지만, 기계가공성이 떨어지는 단점이 있다.

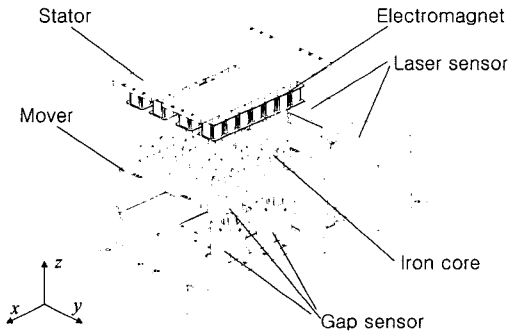


Fig. 4 Schematic diagram of proposed system

4. 동역학적 모델링

4.1 운동방정식

2 장에서 구한 자기력은 고정자와 이동자 자극 간의 상대변위와 입력전류의 함수로 나타난다. 운동방정식을 구하기 위하여, 공칭점에 대해서 다음과 같이 선형화 할 수 있다.

$$f_z = K_{zx}x + K_{zz}z + K_{zi}i \tag{8}$$

$$f_x = K_{xx}x + K_{xz}z + K_{xi}i \tag{9}$$

여기서,

$$K_{xx} = \left. \frac{\Delta f_x}{\Delta x} \right|_{x_0, z_0, i_0}, \quad K_{zx} = \left. \frac{\Delta f_z}{\Delta x} \right|_{x_0, z_0, i_0},$$

$$K_{xz} = \left. \frac{\Delta f_x}{\Delta z} \right|_{x_0, z_0, i_0}, \quad K_{zz} = \left. \frac{\Delta f_z}{\Delta z} \right|_{x_0, z_0, i_0},$$

$$K_{xi} = \left. \frac{\Delta f_x}{\Delta i} \right|_{x_0, z_0, i_0}, \quad K_{zi} = \left. \frac{\Delta f_z}{\Delta i} \right|_{x_0, z_0, i_0},$$

를 나타낸다.

Table 1 Main Parameters of the Tested Linear Actuator

Item		Value	
Stator	Pole Area	100 (mm ²)	
	Pole pitch (p)	10 (mm)	
	Winding	335 (turns)	
Mover	Pole Area	100 (mm ²)	
	Pole pitch 1(r ₁)	20 (mm)	
	Pole pitch 2(r ₂)	50 (mm)	
	Pole pitch 3(r ₃)	70 (mm)	
	Mass of mover	0.46 (Kg)	
	Moment of inertia (I _x , I _y , I _z)		7.58E-4(Kg m ²)
			7.68E-4(Kg m ²)
		1.51E-3(Kg m ²)	

이제 부상체의 운동방정식을 구하기 위해서 Fig. 5 에서와 같이 부상체의 무게 중심에 이동 좌표계(x, y, z)를 설정하고, 상단 고정자의 중앙에 고정 좌표계 (X, Y, Z)를 설정하였다. 두 좌표계간의 관계를 오일러 각(Euler angle)을 이용하여 미소 회전변위와 각속도의 곱이 작다는 가정하에 각 자유도에 대해서 식(10)과 같이 운동 방정식을 구할 수 있다.⁹

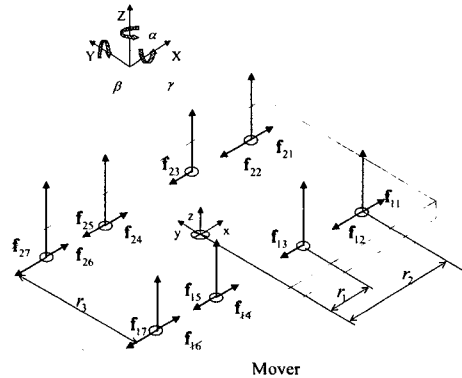


Fig. 5 Free body diagram of mover

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{F} \quad (10)$$

여기서, $\mathbf{M} = \text{diag}[m \ m \ I_x \ I_y \ I_z]$, $\ddot{\mathbf{q}} = [\ddot{z} \ \ddot{x} \ \ddot{\alpha} \ \ddot{\beta} \ \ddot{y}]^T$ 이며, 우변 항은 각각 힘과 모멘트의 합을 나타내는데, 다음과 같이 정리가 된다.

$$F_z = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^7 f_{ijz} \quad (11)$$

$$F_x = \sum_{i=1}^2 \left(\sum_{j=1,4,6} f_{ijx} - \sum_{j=2,3,5,7} f_{ijx} \right) \quad (12)$$

$$M_x = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^7 \frac{(-1)^i}{2} r_3 f_{ijz} \quad (13)$$

$$M_y = \sum_{i=1}^2 r_1 (-f_{i3z} + f_{i4z} - f_{i5z}) - \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1,2} r_2 f_{ijz} + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=6,7} r_2 f_{ijz} \quad (14)$$

$$M_z = r_3 \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} (-f_{i1x} + f_{i2x} + f_{i3x} - f_{i4x} + f_{i5x} - f_{i6x} + f_{i7x}) \quad (15)$$

앞서 설명한 것과 같이 자기력은 모두 변위와 전류에 대한 함수로서 이동좌표계에서의 변위를 고정좌표계로 변환하여 자기력을 구할 수 있다. 그리하여, 고정좌표계에 관한 최종 운동방정식을 아래와 같이 구할 수 있다.

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

여기서, 강성행렬 \mathbf{K} 는 식 (17)과 같이 나타나며, 식(17)에서의 위첨자 a, b, c 는 이동자와 고정자의 극의 상대위치를 나타내는데, a 는 고정자가 앞선 경우, b 는 이동자가 앞선 경우, c 는 이동자와 고정자가 정렬된 경우를 나타낸다. 제안된 시스템은 여자자유도 시스템으로서 식(16)에서 제어력에 해당되는 \mathbf{F}_c 는 여러 가지가 존재하나 안정된 부상과 구동을 위하여, 이동자의 위치에 따라서 함수의 형태로 나타낼 수 있다. 다음 장에서 이에 대해 언급을 하겠다. 좌표변환을 통해 얻은 변위

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 4K^{zz} & 4K^{zx} & 0 & 0 & 0 \\ 4K^{zx} & 4K^{xx} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4r_3K^{zz} & 0 & -4r_3K^{zx} \\ 0 & 0 & 0 & 4K^\beta & 0 \\ 0 & 0 & -4r_3(K_{xz}^a + K_{xz}^b) & 0 & 4r_3K^{xx} \end{bmatrix}$$

여기서,

$$\begin{aligned} K^{zz} &= (K_{zz}^a + K_{zz}^b + K_{zz}^c) \\ K^{zx} &= (K_{zx}^a + K_{zx}^b + K_{zx}^c) \\ K^{xz} &= (K_{xz}^a + K_{xz}^b + K_{xz}^c) \\ K^{xx} &= (K_{xx}^a + K_{xx}^b + K_{xx}^c) \\ K^b &= (-r_{1m}r_{1s}K_{zz}^c + r_{2m}r_{3s}K_{zz}^a + r_{2m}r_{2s}K_{zz}^b) \end{aligned} \quad (17)$$

를 대입하여 자기력을 확인하면, 앞서 2 장에서 보았듯이 VR 원리에 의한 구동기는 수직력과 수평력이 결합되어 있다. 시스템의 제어 측면에서는 자유도별 각 힘이 분리되어 독립적인 제어가 가능한 경우가 가장 이상적이거나 채택된 구동원리에서는 구조적으로 자유도간 연성을 피할 수 없는 문제이다. 그러므로, 제안된 시스템에서 깊이 고려되어야 할 부분은 연성의 정도를 얼마나 줄일 수 있는냐로 볼 수 있다. 그러나, 본 논문에서는 타당성 파악에 목적을 두기 때문에 자유도간의 연성에 관한 연구는 향후 시스템의 성능향상을 위해서 필히 다루어야 할 부분이다.

5. 시뮬레이션 및 실험

본 연구에서 제안된 시스템에서 x 축으로의 이동거리를 확장하기 위해서는 추가적인 전자석의 배치가 필요하다. 그런데, 본 연구에서 제안한 시스템은 기존의 VR 원리의 구동기처럼 힘의 분포가 주기적으로 반복되기 때문에 한 주기에 대한 부상력의 분포를 확인하여 전체 이동거리에 대하여 안정된 부상과 추진이 이루어짐을 파악할 수 있다.

Fig. 6 은 한 주기에 대하여 x 축 변위에 따른 각 전자석에 의해 발생하는 부상력을 나타낸다.

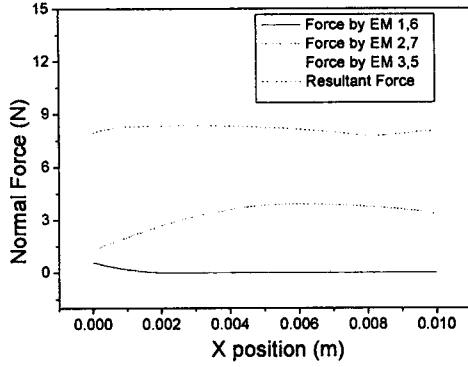


Fig. 6 Force distribution during one pitch

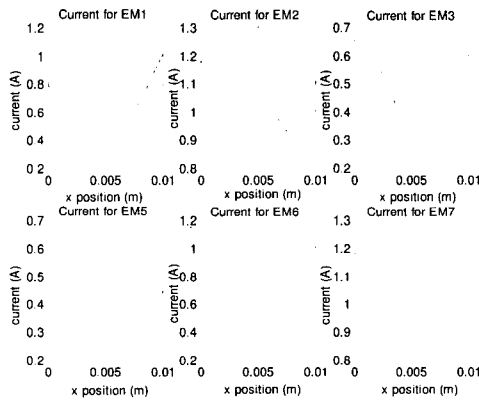


Fig. 7 Sinusoidal currents for smooth normal force

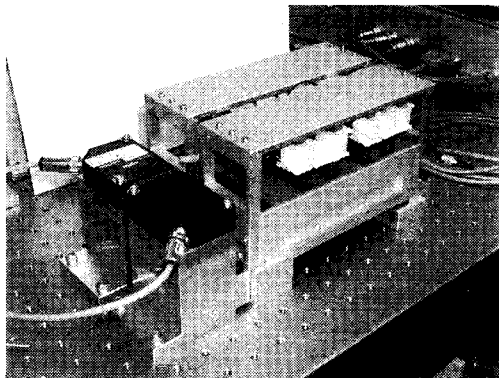


Fig. 8 Photograph of experiment set up

이동자의 중심을 기준으로 작용하는 전자석은 서로 대칭을 이루기 때문에 그림에서는 대칭되는 부분의 전자석은 생략하였다. 일정한 전류값에 대한 각 전자석에서의 부상력은 Fig. 2 와 같이 나타나

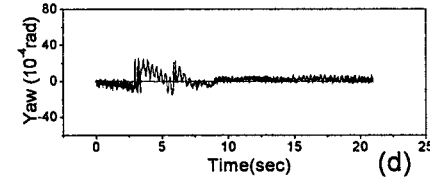
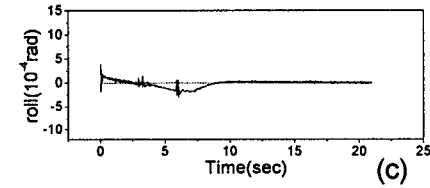
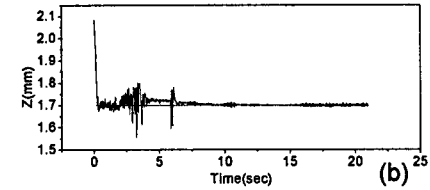
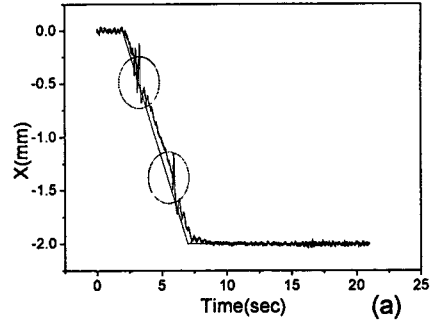


Fig. 9 Experimental results of driving (a) x (b) z (c) roll (d) yaw

지만 변위에 따라 변하는 전류에 대해서는 Fig. 6 과 같이 나타난다. 각 전자석에서의 발생하는 부상력은 전류가 일정할 때와 동일하게 변위에 영향을 받지만, 이동자에 미치는 부상력의 총합은 변위와 무관하게 일정하게 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 제안된 시스템은 이동구간에서 안정된 부상을 위한 가능성을 볼 수 있으며, 실제 구동시에는 궤환 제어에 의해 안정화가 이루어진다. Fig. 7 은 이 때 각 전자석에 인가되는 전류를 나타내는데, 이들은 변위에 따른 함수의 형태로 나타난다. Fig. 8 은 공칭높이 1.7mm 로 부상한 상태에서 x 축으로의 이동결과를 나타낸다. 이때 사용된 제어기로는 앞 절에서 구한 운동방정식을 바탕으로 선형 비례-미분-적분 제어기

가 사용이 되었으며, 이동에 따른 안정된 부상을 위하여, 각 전자석에 의한 자기력의 배분을 변위에 따라서 아래와 같이 하였다.

$$q_{ij} = a_{ij} + \frac{b_{ij}}{p} \times x \quad (i=1,2, j=1,2,\dots,6) \quad (18)$$

여기서, p 는 고정자의 피치를 나타내며, 계수 a 와 b 는 이동자의 폴에 1:3:3:1 의 자기력 분포를 가지도록 다음과 같이 정의된다.

$$a = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 1.5 & 1.5 & 0 & 0.5 \\ 0.5 & 0 & 1.5 & 1.5 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} -0.5 & 1.5 & -1.0 & -1.5 & 0.5 & 1.0 \\ -0.5 & 1.5 & -1.0 & -1.5 & 0.5 & 1.0 \end{bmatrix}$$

식(18)로 이루어지는 분배행렬 Q 에 따라서 운동방정식은 아래와 같이 되며

$$M\ddot{q} + Kq = QF_c' \quad (19)$$

이 때의 제어입력은 선형 제어기에 의해서 정해진다.

제안된 시스템의 가능성을 타진하기 위하여 실험을 수행하였다. Fig. 8 은 사용된 실험장치를 나타낸다.

Fig. 9(a)는 부상한 상태에서의 직선운동을 한 결과를 나타내는데, x 축으로의 이동시 전자석 끝단에서의 불규칙적인 자기력의 변화를 통해서 원으로 표시한 부분에서 진동이 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 현상 즉 리플(ripple)현상은 Fig. 9(b),(c),(d)를 통해서 다른 자유도에도 영향을 미침을 확인할 수 있다. 리플현상은 전자석의 최적설계나 최적제어이론의 적용을 통해서 해결되어야 할 문제다. 이동자가 목표지에 도달한 후에도 안정된 부상이 유지됨을 Fig. 9 를 통해서 확인할 수 있었다. 이와 같은 특성으로 본 시스템은 초정밀 구동기술 방식 중 반복스텝방식(step and repeat)에 적용이 가능한 것으로 판단이 된다. 본 실험에서 각 자유도에서의 오차는 각각 x 축 방향으로는 약 $\pm 25 \mu\text{m}$, z 축 방향으로는 $\pm 5 \mu\text{m}$ 이며 각 회전에 대해서 각각 $\pm 0.05\text{mrad}$, $\pm 0.5\text{mrad}$ 으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 초정밀 스테이지의 개발을 위한 자기 흡인식 부상에 의한 비접촉식 리니어 액추에이터를 제안하였다. 제안된 시스템은 동일한 평면에 부상력과 자기력이 작용하기 때문에 기존의 폐쇄적 구조형태의 구동기 보다 구조가 간단하며 확장성이 높다. 전자기학적인 측면에서 힘의 특성을 이론적으로 파악하여 VR 원리에 의한 전자기시스템의 안정된 부상을 위한 설계에 관한 사항을 다루었으며, 동시에 이 결과를 바탕으로 자기 흡인식 부상 시스템이 성공적으로 설계되었다. 본 논문은 가능성 타진쪽에 비중을 둔 연구로서 성능면에서는 개선할 부분이 많지만 제작된 시제품을 이용한 실험을 통해서 초정밀 구동기술 방식의 하나인 반복 스텝 방식에 적용 가능할만한 결과를 나타내었다. 또한 제안된 선형구동기는 추가적인 전자석의 배치를 통해 비접촉 평면구동기의 확장 가능성도 보였다.

향후 성능 향상을 위해서는 각 자유도간의 연성에 관한 깊은 연구와 이를 줄일 수 있는 방법에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

후 기

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

참고문헌

1. Michael, A., Soltz, Y., Lawrence Yao and Jehuda Ish-Shalom, "Investigation of a 2-D Planar Motor based Machine Tool Motion System," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 39, Issue 7, pp. 1157-1169, 1999.
2. Kim, Won-Jong, David, L. T. and Jeffrey, H. L., "Modeling and Vector Control of Planar Magnetic Levitator," IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 34, No. 6, pp. 1254-1262, 1998.
3. Jung Kwang Suk and Baek Yoon Su, "Precision Stage Using a Novel Contact-Free Planar Actuator Based on Combination of Electromagnetic Forces,"

- Trans. of KSME A, Vol. 25, No. 11, pp. 1863-1872, 2001.
4. 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.
 5. Cheng-Tsung Liu and Nywen Sheu, "Optimal Pole Arrangement Design of a Linear Switched-Reluctance Machine for Magnetic Levitation and Propulsion System," IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 32, No. 5, pp. 5067-5069, 1996.
 6. Ju Jin and Toshiro Higuchi, "Direct Electrostatic Levitation and Propulsion," IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 44, No. 2, pp. 234-239, 1997.
 7. Nasar, S. A. and Unnewehr, L. E., Electromechanics and Electric Machines, John Wiley & Sons, Inc., 1983.
 8. Lee, S. H., Jung, K. S. and Baek, Y. S., "Vibration Suppressing Method of Variable Reluctance Type Actuator," Proceedings of the fourth Korea-Japan Symposium of Frontiers in Vibration Science and Technology, pp. 38-39, 2001.
 9. Craig, J. J., Introduction to Robotics Mechanic and Control, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.