

## 4 자유도 비접촉 자기 서스펜션 기구의 설계 및 제어

이 상 헌<sup>†</sup> · 백 윤 수<sup>\*</sup>

(2002년 4월 11일 접수, 2003년 4월 9일 심사완료)

### The Design and Control of Contact-free Magnetic Suspension System with Four Degrees of Freedom

Sang Heon Lee and Yoon Su Baek

**Key Words :** Magnetic Suspension(자기 서스펜션), Magnetic Circuit(자기회로), Alignment Apparatus(위치 정렬 기구)

#### Abstract

With the development of micro -technology, the demand for micro actuating device is increasing. But, it is difficult to achieve high resolution and wide bandwidth with the conventional contact systems. So, the contact-free systems which are suspended or levitated by magnetic force or air bearing were proposed. These systems can be applied to high precision stages and alignment apparatuses. This paper describes a magnetically suspended system with four degrees of freedom which are composed of three rotations (roll, pitch, yaw), and one translation (z). The operating principle and the structure of the system are similar to variable reluctance type electric machines. In this study, the force analysis is executed using magnetic circuit and virtual work principle, and the equations that describe the dynamics of the system are presented. The multivariable PID controller is adapted to the system and the experiment is executed.

#### 기호설명

$\phi$	: 자속
$R$	: 릴럭턴스
$\lambda$	: 자속 쇄교
$L$	: 인덕턴스
$\mu_0$	: 자유공간에서의 투자율
$\alpha, \beta, \gamma$	: 각 축에 대한 회전변위
$m$	: 부상체의 질량
$I_x, I_y, I_z$	: 각 축에 대한 회전관성 모멘트
$g$	: 중력가속도
$F_z$	: 부상력의 총합
$M_x, M_y, M_z$	: 각 축에 대한 외부 모멘트

#### 1. 서론

반도체 산업의 발달과 더불어 초미세 가공, 즉 정등 마이크로 기술에 대한 관심의 증대로 인하여 초정밀 기구의 설계 및 마이크로 구동기술에 관한 연구가 활발해지고 있다. 현재 마이크로 구동기술로는 압전소자나 형상기억합금등의 기능성소재를 이용한 방법과 정전기력이나 전자기력을 이용하는 방법이 있다. 이 중 기능성소재를 이용하는 방법은 미소 변위의 운동구현에는 우수한 성능을 발휘하지만, 기계요소들의 접촉으로 인해서 전체시스템의 구조가 복잡해질 수 있다. 이에 반해 전자기력을 이용한 비접촉 시스템의 경우는 센서기반의 정밀도를 얻을 수 있으며, 직접구동방식으로 기어, 베어링등에 의한 기계적접촉을 배제시켜 기구의 성능을 향상시키고 가공비를 절감할 수 있다.

비접촉 자기시스템에 관한 연구는 꾸준히 연구가 진행되고 있는데, 정광석과 이상헌등은 자기 서스펜션과 평면운동이 가능한 비접촉식 평면 액

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과 대학원

E-mail : shlee1@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-4407 FAX : (02)362-2736

<sup>\*</sup> 회원, 연세대학교 기계전자공학부

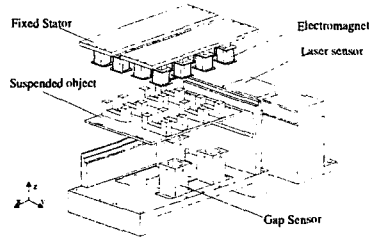


Fig. 1 Schematic diagram of the developed system

추에이터를 이용하여 범용 초정밀 스테이지를 개발하였으며,<sup>(1,2)</sup> Won-jong K.과 Trumper 는 4 개의 리니어모터를 이용하여 부상력과 추진력을 동시 제어하는 평면 액추에이터를 개발하였으며, 현재 SPM (scanning probe microscopy)용 플랫폼으로의 적용되고 있다.<sup>(3,4)</sup> 또한 Daniel Galburt 는 반도체 제조공정의 노광장치에서의 웨이퍼 정렬장치를 개발하였다.<sup>(5)</sup>

전자기력을 이용한 비접촉 시스템은 그 구현 방법에 따라 여러 가지로 분류가 될 수 있으나,<sup>(6)</sup> 본 연구에서는 작용력의 종류에 따라 반발력에 의한 자기부상(magnetic levitation)과 흡인력에 의한 자기 서스펜션(magnetic suspension)으로 구분한다. 후자의 경우는 보통 자성체간의 자화력을 이용하기 때문에 에너지효율이 전자보다 높기 때문에 부상체의 질량이 큰 경우에 유리하며, 또한 열 발생 문제로부터 자유롭다. 그리하여 본 연구에서는 흡인력에 의한 부상 방식을 채택하였다. 기존의 위치 정렬 기구는 부상축에 대한 회전을 구현하기 위해서 회전방향으로의 부가적인 구동기를 설치하였으나, 본 연구에서는 동일 평면에 작용하는 부상력만을 이용하여 부상축에 대한 회전을 구현하였다. 이러한 구조는 차후 운동자유도의 확장측면에서 유리한 구조이기 때문에 대변위 평면운동기구로의 확장이 용이하다. 반도체제조공정에서 요구되는 구동기는 약  $0.3\mu\text{m}$  과  $0.3 \times 10^{-3}^\circ$  의 직선, 회전 분해능과  $1\text{mm}$ ,  $1^\circ$  정도의 이동량이 요구되는데,<sup>(7)</sup> 위와 같은 성능을 만족하기 위해서는 서보장치들의 성능 또한 뒷받침이 되어야 하기 때문에 본 연구에서는 사용된 서보장치들의 최대성능을 만족하는 것을 목표로 한다. 이를 위하여, 시스템의 설계를 위한 전자기력의 유도 및 제어기에 대한 설계에 관하여 연구한다. 2 장에서는 제안된 시스템의 구조와 작동원리에 대해서 설명하고, 3 장에서는 솔레노이드간에 발생하는 힘을 자기회로 이론과 가상 힘의 원리를 이용하여 유도한다. 4 장에서는 운동방정식과 제어기설계에 관해서 다루며,

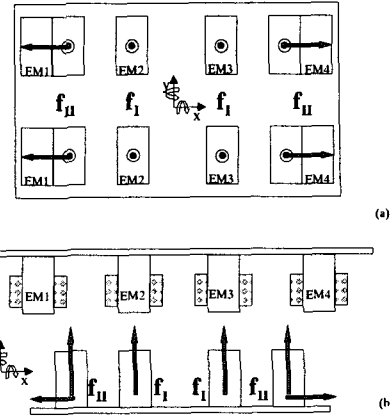


Fig. 2 Structure and principle of operation

5 장에서는 실험장치와 실험결과에 대해서 다룬다.

## 2. 구조 및 작동원리

### 2.1 구조

본 연구에서 개발된 4 자유도 자기 서스펜션 시스템은 ‘C’형 전자석에 의해서 구동이 되는데, Fig. 1 은 그 구조를 나타낸다. 부상체에는 8 개의 철심이 부착되고, 상부고정자에는 이와 짝을 이루어 8 개의 ‘C’형 전자석이 부착된다. 본 시스템은 수직 모드 변위( $z, \alpha, \beta$ )와 수평모드 회전변위( $\gamma$ )가 구현이 가능한데, 각 모드의 변위를 측정하기 위해서 하부에 3 개의 미소변위센서와 측면에 2 개의 변위센서가 부착된다.

### 2.2 작동원리

앞서 구조에서 언급한 것처럼 전자기력이 발생 되는 전자석은 총 8 개가 있다. Fig. 2 는 본 시스템에서의 힘 작용과 구동원리를 나타내는데, Fig. 2(b)에서 중앙에 있는 두개의 전자석(EM2, EM3)은 부상체의 철심과 일렬로 정렬된 상태이므로, 수직력만 작용한다. 그러나, 좌우 끝단의 전자석(EM1, EM4)은 부상체의 철심과 중심이 벗어난 상태로 수직력과 수평력이 동시에 작용한다. 이와 같이 각 전자석에 의해 발생하는 힘을  $f_I$  (수직력),  $f_{II}$  (수직/수평력)로 나누어 고려한다. 이들 힘,  $f_I$  와  $f_{II}$  의 조합에 의해서 4 자유도의 운동이 가능한데, 수직모드 변위는 Fig. 2(a)에서의 네 개의  $f_I$  를 이용하고, 수평 모드 회전변위는 나머지 네 개의  $f_{II}$  를 이용한다.  $f_{II}$  는 수직/수평력이 서로 결합되어 있으나, 적절한 설계를 통해서 수직력을 최소화시킬 수 있다. 부상체의 수평모드 직선변위( $x, y$ )

운동은 전자석(EM2, EM3)의 끝 단에 작용하는 복원력에 의해서 수동적으로 보정이 된다. 이 복원력은  $f_I$ 와  $f_{II}$ 보다 상대적으로 크기가 작기 때문에 다른 자유도에 미치는 영향이 적으며, VR(variable reluctance)타입의 전자기 부상 시스템에서는 가이드 힘으로 작용하여 시스템의 안정도를 높여주는 역할을 하기도 한다.

### 3. 힘해석

부상체에 작용하는 전자기력은 연속적인 전자기현상으로 이해가 될 수 있으나, 본 연구에서는 VR 타입의 시스템에 주로 적용되는 자기회로이론과 가상일의 원리를 이용하여 구한다.

#### 3.1 자기회로

Fig. 3(a)는 본 연구에서 사용된 부상체의 철심과 고정자의 철심을 나타낸다. 이 한 쌍의 전자석은 Fig. 3(b)와 같이 등가 자기회로로 나타낼 수 있다. 여기서,  $R_m, R_s, R_{ml}, R_{sl}$ 는 각각 부상체와 고정자의 철심 릴럭턴스와 누설 릴럭턴스(leakage reluctance)를 나타내고,  $R_g$ 는 공극(air-gap)에서의 릴럭턴스를 의미하는데, 이 값은 다음 절에서 다룰 자속 패턴(flux pattern)을 통해서 다시 설명이 된다. 회로 전체의 릴럭턴스는 각 자기요소의 병렬 또는 직렬 결합을 통해 구해진다. 본 연구에서는 회로의 해석을 간단히 하기 위해서 회로내의 철심의 상대 자기투자율(relative permeability)은 아주 크고,  $y$  축 방향으로의 누설자속(leakage flux)은 무시할 정도인 것으로 가정한다. 그리고, 입력전류는 철심의 자기포화가 발생되지 않는 범위로 한정한다. 이러한 가정에 의해서, 자기회로에서의 주요 변수는 공극에서의 릴럭턴스로 정의될 수 있다.

#### 3.2 전자기력

공극에서의 릴럭턴스는 그 정의에 따라서 구할 수 있는데, 정확한 수치를 얻기 위해서는 공극에서의 자속의 흐름을 나타내는 자속패턴이 구해져야 한다. Fig. 4는 Fig. 3에서 정의된 전자석의 공극에서의 자속 패턴을 두 자극의 상대위치에 따라 나타낸다. Fig. 4(a)는 두 자극이 완전히 일치한 상태이고, Fig. 4(b)는 부분적으로 일치한 상태이다.

자속 패턴은 세 개의 자속 튜브(flux tube)로 이루어 지는데, 각 튜브에 대해서 릴럭턴스( $R_1, R_2, R_3$ )를 구하여, 병렬 결합하면 전체 릴럭턴스를 구할 수 있다. 각 튜브의 릴럭턴스는 아래와

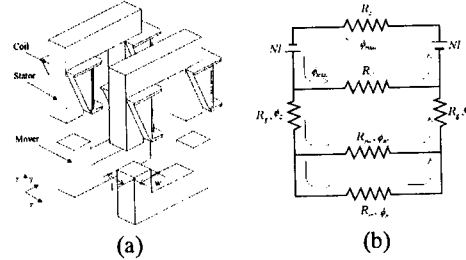


Fig. 3 (a) stator and mover poles, and (b) magnetic circuit equivalent to figure (a)

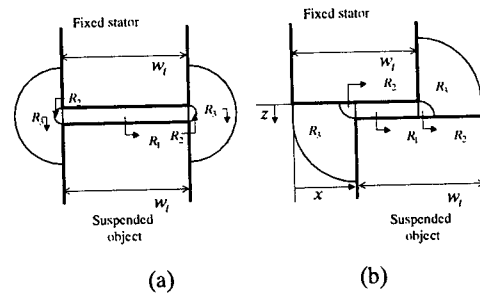


Fig. 4 Magnetic flux pattern between two poles (a) completely aligned, and (b) partially aligned

같이 구해진다.<sup>(8)</sup>

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

$$R_2 = \frac{1}{0.54\mu_0l_t} \quad (2)$$

$$R_3 = \frac{\pi}{2\mu_0l_t \log_e(1 + \frac{2x}{z})} \quad (3)$$

위 식을 이용하여 공극에서의 릴럭턴스는 다음과 같이 구해진다.

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

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 자기 회로내의 인덕턴스를 아래와 같이 구할 수 있다.

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

인덕턴스는 두 자극의 상대 위치( $x, z$ )와 형상에 대한 함수로 나타나며, 가상일의 원리를 적용하여 각 위치에서의 전자기력을 폐형해의 형태로 나타낼 수 있다. 그리하여 실제 제어시 필요한 임의의 위치에서의 힘을 구할 수 있다.

우선, 공극에 저장된 자기에너지는 다음과 같으며,

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

식 (7)에 가상일의 원리를 적용하여 수평, 수직력을 구할 수 있다.<sup>(9)</sup>

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

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

Fig. 5(a)와 (b)는 유도한 전자기력을 Fig. 2에서와 같이 부상체의 철심이 전자석과 일치될 때와 일치되지 않았을 때를 고려하여, 자극의 상대변위에 따라서 구한 결과를 나타낸다.

먼저, 전자석이 일치되었을 때인  $\mathbf{f}_I$ 는 수직력만이 나타나고, 두 자극이 어긋난 경우인  $\mathbf{f}_{II}$ 는 예상대로 수직력과 수평력이 동시에 나타난다. 그러나,  $\mathbf{f}_{II}$ 의 경우 수직력에 대한 수평력이 최대인  $x$  값이 존재하는데, 설계시 이 값을 자극의 간격(pitch)으로 설정하면 동작원리에서 말한 결과를 얻을 수가 있다. 그리고 이 때의  $\mathbf{f}_I$ 의 값은  $\mathbf{f}_{II}$ 의 수직력에 비해 크므로, 수직 모드 운동에 있어서 주역할을 할 수 있다.

앞서 서술한 것처럼 전자기력은 자극간의 상대 위치 및 자극의 형상에 따라서 결정되기 때문에  $\mathbf{f}_{II}$ 의 수직/수평력의 비는 두 가지 설계방안으로서 조절할 수 있다. 본 연구에서는 자극간의 상대 위치에 초점을 두고 설계하여, Fig. 2에서의 전자석(EM1, EM4)이 부상체의 자극과 자극의 폭만큼 어긋나도록 하였다.

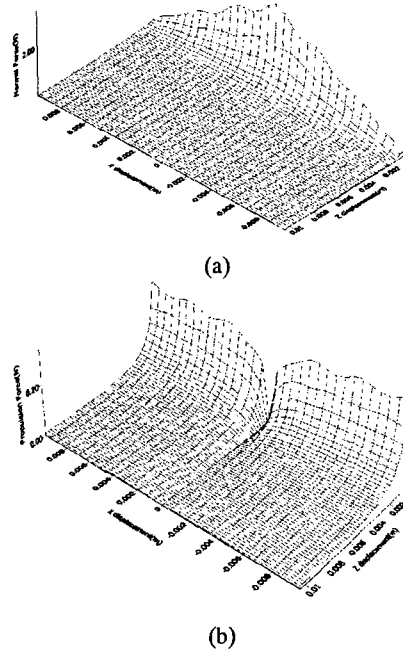


Fig. 5 (a) Normal force( $f_z$ ), and (b) propulsive force( $f_x$ ) w.r.t.  $x$  and  $z$  position

#### 4. 운동방정식 및 제어기 설계

##### 4.1 운동방정식

부상체의 운동방정식을 구하기 위해서 Fig. 6에서와 같이 부상체의 중앙에 이동 좌표계( $x, y, z$ )를 설정하고, 상단의 고정자의 중앙에 고정 좌표계( $X, Y, Z$ )를 설정하였다. 두 좌표계간의 관계를 오일러 각(Euler angle)을 이용하여 정리하여, 미소한 회전변위와 각속도의 곱이 작다는 가정하에 운동방정식을 아래와 같이 나타낼 수 있다.<sup>(10)</sup>

$$\begin{bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \\ \ddot{\gamma} \end{bmatrix} = \mathbf{M} \times \begin{bmatrix} F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} + \mathbf{B}g \quad (10)$$

여기서,  $\mathbf{M} = \text{diag}[-1/m \quad 1/I_x \quad 1/I_y \quad 1/I_z]$ ,  $\mathbf{B} = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$ 이다.

전자기력은 자기장에 의한 분포력의 형태로 나타나지만, 앞서 구한 것처럼 등가 집중력으로 구할 수 있다. 그리하여, 식 (10)의 힘과 모멘트의 합은 다음과 같이 정리된다.

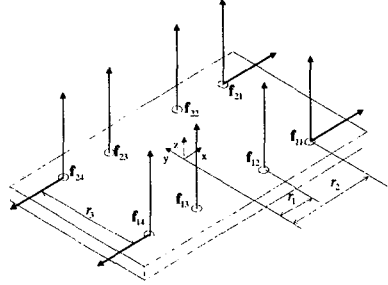


Fig. 6 Distribution of forces on suspended object

$$F_z = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^4 f_{ijz} \quad (11)$$

$$M_x = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^4 \frac{(-1)^j}{2} r_3 f_{ijz} \quad (12)$$

$$M_y = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=2,3} (-1)^{i-1} r_1 f_{ijz} + \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1,4} (-1)^i r_2 f_{ijz} \quad (13)$$

$$M_z = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1,4} (-1)^{i+j} r_3 f_{ijx} \quad (14)$$

유도된 전자기력은 변위  $x, z$  와 전류  $i$  의 함수이므로, 테일러 급수 전개법에 의해서 평형점을 기준으로 선형화하여 미소변위  $\delta x, \delta z$  와 미소전류  $\delta i$  의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta \mathbf{F} = \left. \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial z} \right|_{\mathbf{v}=\mathbf{v}_0} \delta z + \left. \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} \right|_{\mathbf{v}=\mathbf{v}_0} \delta x + \left. \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial i} \right|_{\mathbf{v}=\mathbf{v}_0} \delta i \quad (15)$$

여기서,  $\mathbf{v}_0 = [z_0 \ x_0 \ i_0]^T$  는 평형점의 좌표와 전류값을 나타낸다. 그런데,  $\mathbf{f}_1$  의 경우는  $x$  축 변위가 거의 발생하지 않으므로,  $x$  에 대한 미소변위값은 무시할 수 있다. 그리하여 식(15)는 아래와 같이 간단해진다.

$$\delta \mathbf{F} = \left. \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial z} \right|_{\mathbf{v}=\mathbf{v}_0} \delta z + \left. \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial i} \right|_{\mathbf{v}=\mathbf{v}_0} \delta i \quad (16)$$

식 (15)와 (16)을 식 (11)~(14)에 대입하면, 선형화된 힘방정식을 구할 수 있다. 식 (10)은 이동 좌표계에 대한 식으로서 고정 좌표계로 좌표변환이 필요하다. 오일러 좌표변환을 통한 힘과 모멘트식을 식 (10)에 대입하여 최종적으로 운동방정식을 구하면 식 (17)과 같이 정리가 된다.

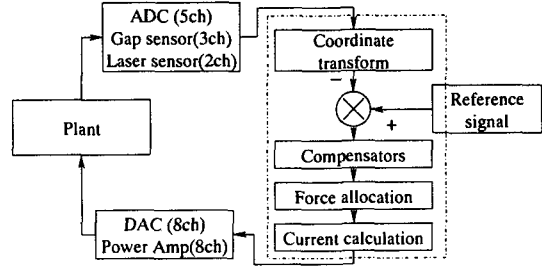


Fig. 7 Control loop of the system

$$\begin{bmatrix} \ddot{Z} \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \\ \ddot{\gamma} \end{bmatrix} = \mathbf{M} \times \mathbf{K}'_i \times \mathbf{i} + \mathbf{M} \times \mathbf{K}'_z \times \mathbf{T}^{-1} \times \begin{bmatrix} Z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서,  $\mathbf{K}'_i, \mathbf{K}'_z$  는 각각 고정 좌표계로 변환된 합력에 대한 힘 상수와 강성행렬을 나타내며,  $\mathbf{T}, \mathbf{i}$  는 각각 센서좌표계에서 고정좌표계로의 변환행렬과 입력 전류벡터를 의미한다. 앞서 서술한 것처럼  $\mathbf{f}_{11}$  는 수평, 수직력이 동시에 작용하기 때문에 운동방정식에 각 자유도가 결합된 형태로 나타난다. 그러나,  $\mathbf{f}_{11}$  의 경우 수평력이 최대일 때를 선택하기 때문에 이 때의 수직력은 무시할 수 있다. 그러므로, 결합된 자유도의 상수들은 무시할 수 있다.

#### 4.2 제어기 설계

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

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (18)$$

전행적인 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,  $\mathbf{x} = [Z \ \alpha \ \beta \ \gamma]$  를 나타내며,  $\mathbf{x}_d$  는 명령값을 의미한다. 그리고,  $\mathbf{k}_p, \mathbf{k}_d, \mathbf{k}_i$  는 각각 비례, 적분, 미분 게인행렬을 나타낸다.

Fig. 7 은 본 시스템에 적용된 제어루프를 나타낸다. 센서값은 좌표변환을 통해 상태변수로 계산이 되며 제어기에 의해 제어입력이 구해진다. 그리고, 힘 분배를 통해서 실제 입력 전류치를 계산

하여 시스템에 적용이 된다. 본 시스템은 여자유도 시스템이기 때문에 힘의 분배 절차가 반드시 필요한데, 각 모드의 운동을 원활하게 하기 위해서,  $f_x$ 와  $f_y$ 의 비가 3:1의 분포를 가지도록 설계하였다. 그러나 더욱 안정된 제어를 위해서 최적화 기법을 통한 힘의 분배가 적용될 수도 있다.

### 5. 실험

#### 5.1 실험 장치

본 연구에서는 부상체의 변위측정을 위하여, 모두 5개의 변위센서가 사용되었다. 부상체의 하부에는 3개의 정전용량형 미소변위센서(S600-2, Micro-Epsilon,  $0.4\mu m$ )가 설치되어 수직모드 변위( $z, \alpha, \beta$ )를 측정하고, 측면에는 2개의 레이저 변위센서(ILD1400-100, Micro-Epsilon,  $100\mu m$ )가 설치되어 수평모드 회전 변위( $\gamma$ )를 측정한다. 제어를 위한 장치로는 셀러론 PC를 사용하였으며, 제어 명령의 출력과 폐환 제어를 위한 입력 신호의 변환은 각각의 D/A(PCL-726, 12bit, Advantech), A/D(PCL-817, 100KHz 16-bit, Advantech co.) 보드를 이용하였다. 그리고, 8채널의 직류 파워증폭기(GA455P, Glentek)를 사용하여 전자석을 구동하였다. Fig. 8은 본 연구에서 제작된 실험장치를 나타낸다. 표. 1은 본 연구에서 제작된 시스템의 주요 치수를 나타내는데, 고정자와 부상체의 철심의 단면크기는 같게 하였고, 자극의 간격도 같게 하였다. 코일을 감는 보빈(bobbin)은 시중에서 쉽게 구할 수 있는 규격품( $10 \times 10 \times 15$ )을 사용하였다.

#### 5.2 실험결과

본 시스템에서의 부상체의 작동영역은 수직 방향으로의 직선운동은  $1mm$ 이며, 회전 운동은  $x, y, z$  각 축에 대해서 각각  $\pm 0.0015rad$ ,  $\pm 0.0015rad$ ,  $\pm 0.0010rad$  정도이다. 이 작동영역은 현재 시스템의 구조적인 면에서 제한되므로, 개선

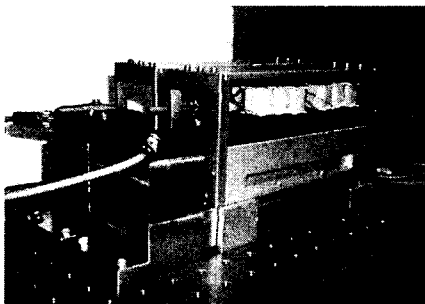


Fig. 8 Experimental setup

된 모델에서는 더욱 넓은 작업영역이 가능할 것이다. 앞서 제시한 제어방정식과 시스템의 성능을 확인하기 위해서 실험을 수행하였다. 우선 자기부상에 대한 안정도 실험으로서 부상체를 수직방향으로  $400\mu m$  만큼 부상과 동시에 각 회전에 대해서  $\alpha_d = 0.001rad$ ,  $\beta_d = 0.001rad$ ,  $\gamma_d = 0.001rad$ 의 최종목표점으로 움직이도록 하였다. Fig. 9(a)는 이때의  $z$  축 방향으로의 응답을 나타내고, 다른 그림은 나머지 자유도에 대한 응답을 나타낸다. 그림에서 보면 약간의 과도응답구간이 지나고 난 뒤, 부상체가 안정됨을 알 수 있다. Fig. 10은 안정화된 후 위치오차를 나타낸다. 수직방향으로의 위치오차는 약  $\pm 1\mu m$  정도이며, 각 회전에 대한 위치오차는 각각  $\pm 10\mu rad$ ,  $\pm 10\mu rad$ ,  $\pm 400\mu rad$ 임을 알 수 있다. 이는 사용된 센서의 최고 성능에 근접함을 알 수 있다. Fig. 10(d)는  $z$  축에 대한 회전변

Table 1 Specifications of designed system

Item		Symbol	Value
Fixed Stator	Pole width	$w_p$	10 (mm)
	Pole thickness	$l_p$	10 (mm)
	Pole pitch	$\tau$	10 (mm)
	Winding	$N$	335 (turns)
Suspended object	Pole width	$w_p$	10 (mm)
	Pole thickness	$l_p$	10 (mm)
	Pole pitch 1	$r_1$	20 (mm)
	Pole pitch 2	$r_2$	50 (mm)
	Pole pitch 3	$r_3$	70 (mm)
	Pole height	$h_p$	20 (mm)
	Mass of mover	$m$	0.52 (Kg)
	Moment of Inertia	$I_x$	$7.58E-4$ (Kg m <sup>2</sup> )
	$I_y$	$7.68E-4$ (Kg m <sup>2</sup> )	
	$I_z$	$1.51E-3$ (Kg m <sup>2</sup> )	

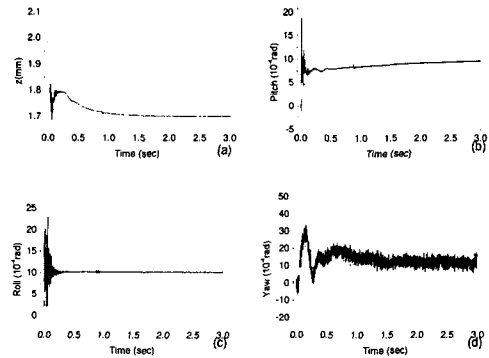


Fig. 9 Experimental results (a) z direction air-gap, (b) pitch, (c) roll, and (d) yaw angle

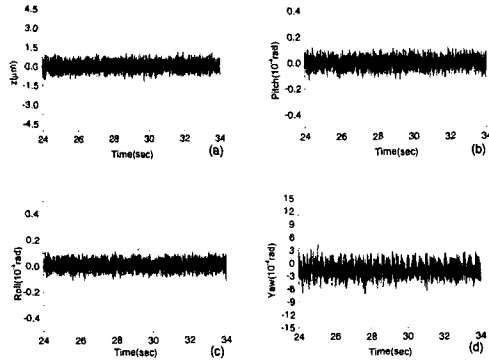


Fig. 10 Steady state error (a) z direction air-gap, (b) pitch, (c) roll, and (d) yaw angle

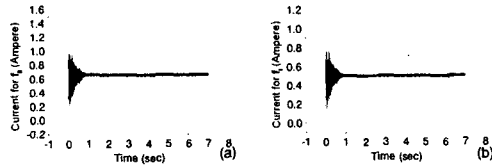


Fig. 11 Current inputs for electromagnets (a) EM for  $f_{II}$ , (b) EM for  $f_I$

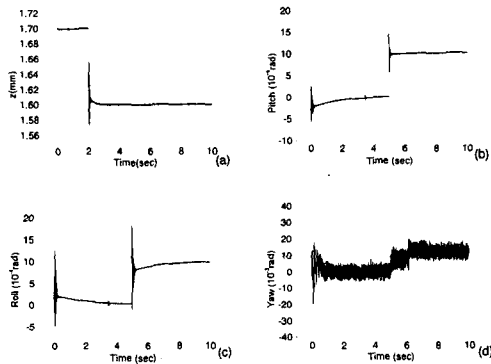


Fig. 12 Step responses (a) z direction air-gap, (b) pitch, (c) roll, and (d) yaw angle

위( $\gamma$ )로서 수직모드변위에 해당하는 ( $\alpha, \beta$ )에 비해서 상대적으로 오차가 큼을 알 수 있다. 이는 수평변위측정을 위한 레이저 센서가 수직변위측정을 위한 정전용량형 센서에 비해 상대적으로 분해능이 떨어지기 때문에 유발됨을 예상할 수 있다.

Fig. 11 은 Fig. 9 의 실험에서 전자석에 인가된 전류를 나타내는데,  $f_I, f_{II}$  를 위한 평균 입력값이 0.6 과 0.7 암페어를 넘지 않는다. 이 사실은 자기 요소의 포화를 줄일 수 있다는 점에서 이상적인 결과이다.

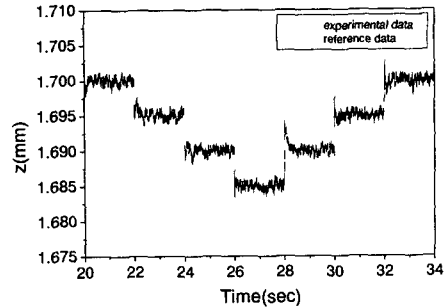


Fig. 13  $5\mu\text{m}$  steps in z direction

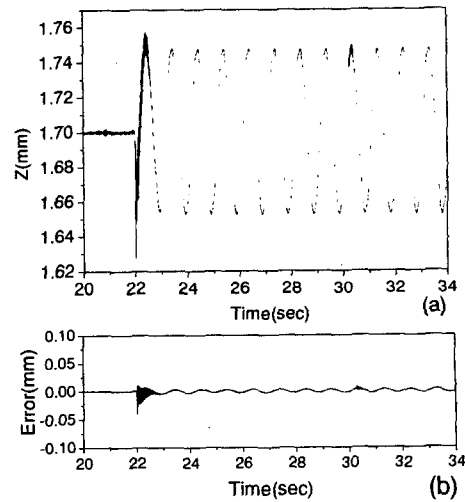


Fig. 14 Z axis tracking control (a) sinusoidal response of z direction (b) tracking error

Fig. 12 는 각 자유도에 대한 계단입력에 대한 응답을 나타낸다. Fig. 12(a)는 z 축 방향으로의 결과로서 응답시간(peak time)은 약 10ms 이며, 오버슈트는 약 30%정도로 나타났다. 다른 자유도에서도 비슷한 결과를 나타낸다. 하지만 z 축에 대한 회전( $\gamma$ )의 경우에는 앞서 설명한 바와 같이 만족스러운 결과가 나타나지 않음을 알 수 있다.

Fig. 13 은 z 축 방향으로의  $5\mu\text{m}$  크기의 복수 계단입력에 대한 실험결과를 보여준다. 다른 자유도에서도 동일한 결과를 볼 수 있다. Fig. 14 는 본 z 축 방향으로의 조화함수입력에 대한 실험결과로서 초기에 오버슈트가 발생하지만 전체적으로 만족스러운 결과를 나타내준다.

본 연구에서는  $f_{II}$  에서의 수직력을 최소화하려고 했으나, y 축 회전에 이 힘에 대한 영향이 나타났다. 이 영향을 줄이기 위해서 향후 연구에서는

자극의 배치문제와 더불어 자극의 형상문제도 함께 고려되어야 할 것이다. 또한 다중 스텝의 경우에는 구동기의 정밀도가 좀 떨어지는 것으로 나타났는데, 이것은 비선형제어기의 도입으로 향상될 것으로 예상된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 마이크로 오토메이션 및 초정밀 위치결정기구에 적용될 비접촉 자기 서스펜션 기구를 제안하였다. 개발된 시스템은 비접촉 방식 기기의 여러 장점을 지니고 있으며, 강자성체를 이용한 흡인력으로 부상되어 높은 에너지 효율을 가진다. 동일 평면상의 부상력만으로 부상축에 대한 회전이 포함된 4 자유도 운동이 가능하기 때문에 구조가 간단하며, 향후 자유도 확장측면에서의 비접촉식 평면구동기구의 적용도 용이하다. 본 연구에서는 제안된 시스템의 작동원리를 설명하였으며, 이 결과를 바탕으로 설계시 고려해야 할 사항을 제시하였다. 또한 전자기해석이론을 이용하여 시스템의 작용력을 해석하였으며, 미소범위에서 적용 가능한 선형화 해석기법을 이용하여 부상체의 운동방정식을 구하였다. 그리고, 비례-적분-미분 제어기를 이용한 실험을 통하여 만족할 만한 결과를 얻었다.

## 후 기

본 연구는 2001년도 한국과학재단 목적 기초 연구 과제(R01-2000-00304)의 연구비 지원에 의한 연구 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Jung Kwang Suk and Baek Yoon Su, 2001, "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.
- (2) Jung Kwang Suk, Lee Sang Heon, and Baek Yoon Su, 2002, "Feasibility Study of General-purpose Precision Stage Using A Novel Contact-Free Surface Actuator Based on Magnetic Suspension Technology," *Trans. of KSME A*, Vol. 26, No. 3, pp. 452~460.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Daniel Galburt, Mar. 19. 1985, "Electro-Magnetic Apparatus," U.S. Patent 4,506,204.
- (6) B. V. Jayawant, 1981, *Electromagnetic levitation and suspension techniques*, Edward Arnold Ltd.
- (7) Kyihwan Park, Kee-Bong Choi, Soo-Hyun Kim, and Yoon Keun Kwak, 1996, "Magnetic Levitated High Precision Positioning System Based on Antagonistic Mechanism," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 32, No. 1, pp. 208~219.
- (8) Herbert C.R., 1951, *Electromagnetic Devices*, John Wiley & Sons., Inc.
- (9) Nasar S.A., and Unnewehr L.E., 1983, *Electromechanics and Electric Machines*, John Wiley & Sons, Inc.
- (10) Craig J.J., 1989, *Introduction to robotics mechanic and control*, Addison-Wesley Publishing Company.