

# 면외 방향의 자기력을 이용한 자기 서스펜션 시스템의 위치결정기구로의 적용 가능성

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

(2003년 5월 15일 접수, 2003년 8월 26일 심사완료)

## Feasibility Study of Positioning Device Using Magnetic Suspension System of Out of Plane Direction Forces

Sang Heon Lee and Yoon Su Baek

**Key Words :** Positioning Device(위치결정기구), Magnetic Suspension(자기 서스펜션), Contact-Free System(비접촉 시스템)

### Abstract

This paper is about feasibility study of positioning device using magnetic suspension system which uses only vertical magnetic forces. The proposed system has inherited advantages from contact-free system, simple structure, and high expansibility in operating range different from conventional positioning devices. In this paper, the structure and operating principle are described and the linearized magnetic force and dynamic model are obtained. With the linear control theory, the experiments are executed. Finally, the experimental results are shown.

### 기호설명

- $\mathfrak{R}_s, \mathfrak{R}_l$  : 고정자와 누설자속에서의 자기저항
- $\mathfrak{R}_m, \mathfrak{R}_g$  : 구동자와 공극에서의 자기저항
- $\phi_g, \phi$  : 공극에서의 자속과 누설자속
- $\mu_0, \mu_r$  : 공기의 투자율, 비투자율
- $\mathfrak{S}$  : 기자력
- $N$  : 코일의 턴수
- $H$  : 자기장의 세기
- $S$  : 자속 경로의 단면크기
- $l$  : 자속 경로의 길이

### 1. 서론

전기/전자 및 기계 부품의 소형화는 가공공정의 정밀도를 요하게 됨과 동시에 기존의 기계적인 가공방법을 벗어나 광학적, 화학적인 특수가공법을 요구하게 되었다. 산업계의 이러한 급속한 발달은 앞서 언급한 가공법의 기반기술로서 초정밀 위치결정기술에 대한 요구도 더불어 증가시켰다. 일련의 특수가공법에 적용되기 위한 위치결정기술로 여러 방식이 시도되었는데, 이중 비접촉 방식은 기계적 마찰을 배제하여 높은 정밀도를 얻을 수 있으며, 윤활의 필요성이 없기 때문에 비윤활면에서 장점이 있다. 또한 마찰로 인한 분진의 발생이나 윤활유에 의한 오염이 없기 때문에 청정환경을 요구하는 곳에 적합한 장점 때문에 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(1-3)</sup>

위치결정기구로서의 비접촉 방식 구동기로는 sawyer가 고안한 sawyer모터가 있다.<sup>(4)</sup> 이 모터는 공기베어링에 의한 부상 방식으로 리니어 펄스모터에 의해서 평면운동을 구현한다. 자기 부상

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : buildream@empal.com  
TEL : (02)2123-4407 FAX : (02)362-2736

<sup>\*</sup> 회원, 연세대학교 기계공학부

의한 비접촉식 구동기로는 Wonjong Kim, Trumper에 의해서 평면 부상기가 발표되었으며, 이 시스템은 네 개의 리니어모터를 이용하였다.<sup>(5)</sup> 국내에서는 정광석, 이상현, 백운수는 공심슬레노이드와 영구자석을 이용하여 반발식 부상에 의한 비접촉식 평면구동시스템을 개발하였으며, 또한 부상력과 추진력이 분리된 형태의 흡인식 부상에 의한 비접촉식 평면구동시스템을 개발하였다.<sup>(6,7)</sup>

앞서의 연구들은 정밀구동을 위한 위치결정기구로서 만족스러운 성능을 보여주었으나, 작업영역의 확장을 위해서는 추진을 위한 추가적인 자기요소의 배치가 필요하다. 이러한 자기요소의 추가배치는 서보장치의 증가를 요구하여 시스템 구축의 비용을 증대시킨다. 또한 부상과 추진을 위한 요소가 동일 평면에 있지 않은 경우에는 시스템 자체의 구조가 복잡해지는 단점이 있다. 그리하여, 본 연구에서는 최소한의 자기요소를 이용한 비접촉식 평면구동시스템을 구축하기 위해, 3 개의 면 외방향으로의 전자석과 철판을 이용한 평면구동기를 제안하고, 위치결정시스템으로의 적용가능성에 대해서 논한다. 본 논문의 구성은 다음과 같이 이루어진다. 2 장에서는 본 연구에서 제안된 시스템의 구조와 구동원리에 대해서 설명하고, 3 장에서는 선형화된 전자기력을 바탕으로 구동기의 운동방정식을 유도하고, 4 장에서는 이를 바탕으로 제어기를 설계하고 실험을 통해서 제안된 시스템의 가능성을 타진한다.

## 2. 구조 및 구동원리

### 2.1 구조

Fig. 1 은 본 연구에서 제안된 시스템의 개략적인 구성도를 나타낸다. 고정된 상판에는 구동자의 부상을 위한 세 개의 전자석이 부착되어 있고, 면 외 운동의 측정을 위한 세 개의 비접촉 변위센서도 부착되어 있다. 여기서, 세 개의 전자석은 면 외 운동을 제어하기 위한 최소의 개수이다. 이 때, 전자석은 부상력을 증대시키기 위하여 네 개의 극을 가지도록 설계하였다. 여기에 대한 자세한 설명은 전자기력을 유도하면서 다루도록 하겠다. 구동자는 상판의 철심 슬레노이드와 상호작용하기 위한 세 개의 철판과 수평변위측정을 위한 타겟과 중간 평판으로 이루어져 있다. 수평변위측정을 위한 센서는 각각 측면에 위치하여, 구동자는 외부환경과의 아무런 접촉이 없는 완전한 자기 부상을 이룰 수 있다.

### 2.2 구동원리

앞서 구조에서 보았듯이 제안된 시스템에서의 부상은 전자석과 철판사이의 흡인력에 의해서 가능하다. 이 때 전자석과 철판사이에는 오직 수직력만 작용하며, 수평방향으로는 복원력이 작용하지 않는다. 그리하여 부상시스템을 Fig. 2(a)에서처럼 슬라이딩 접촉을 하는 2 차원 기계요소로 나타낼 수 있다. 이 때 전자기력은 선형화에 의해서 스프링요소와 전류에 의한 제어력으로 나타낼 수 있지만, 평형상태로 가정하여 스프링요소만을 나타내었다. Fig. 2(a)에서 양 끝단에 작용하는 수직력은 구동자의 무게 중심이 편심되어 있기 때문에 동일하지 않다. 그러나, 수직, 수평방향에 대해서 시스템은 평형상태를 이루기 때문에 구동자는 정지해 있다. 한편, Fig. 2(b)에서처럼 외부에서 힘이 작용하거나 양 끝단의 제어력이 변하게 되는 경우에는 수직방향의 평형이 깨어질 수 있으나, 수직력이 구동자의 무게와 동일하게 되면 평형상태를 이루게 된다. 그러나, 회전이 일어나면서 구동자는 수평 이동을 하게 된다. 이와 같이 수평방향으로의 변위를 회전각의 함수로 변환하는 방식을 이용하여 구동자의 수평방향으로의 구동이 가능하다.

Fig. 2 는 2 차원으로 한정된 경우이지만, 전자석을 하나 더 추가하여 슬라이더 요소를 3 차원 면 접촉을 하는 등가요소로 나타내면, 평면구동으로의 확장이 가능하다. 본 시스템에서 안정된 부상과 평면이동을 위한 만족 조건으로는 구동자의 6 자유도 운동은 센서를 통해서 계속 측정되는 것과 구동자의 무게중심은 항상 부상용 전자석이 이루는 힘의 다각형내에 존재하여야 하는 것이다. 그러므로, 평면에서의 구동영역은 부상력이 이루는 다각형의 크기로 한정되어진다. 반면, 본 시스템에서 적용한 구동자와 고정자의 조합을 바꾼 형태로

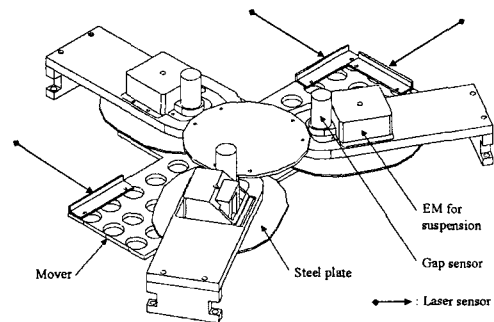


Fig. 1 Structure of the proposed system

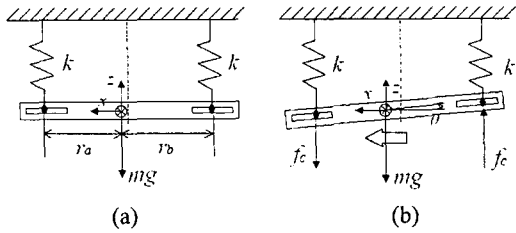


Fig. 2 Operating principle (a) equilibrium state (b) disequilibria state in x direction

구동자에 전자석이 설치되는 경우에는 구동자의 무게중심이 부상력의 다각형내에 항상 존재하기 때문에 구동영역의 무한한 확장이 가능하다.

3. 동역학 모델

3.1 비선형 운동방정식

Fig. 3 은 구동자에 작용하는 힘과 본 연구에서 설정된 좌표계를 나타낸다. 고정좌표계는 상부 고정자의 중심에 잡혀 있으며, 이동 좌표계는 구동자의 무게 중심에 잡혀 있다. 여기서 이동자의 무게 중심과 세 개의 전자석이 이루는 부상력의 다각형의 중심은 일치할 하지 않는다. 전자석에 의한 부상력은 실제로는 분포력의 형태로 나타나지만, 전자석 네 극의 중심을 기준으로 집중력으로 등가시킨다.

부상체를 강체로 가정하고, 미소 변위 운동을 가정하면, 면의 방향으로의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(8)</sup>

$$m\ddot{z} = f_1 + f_2 + f_3 - mg \tag{1a}$$

$$I_x\ddot{\alpha} = f_1(r_a - y_c) - (r_a/2 + y_c)(f_2 + f_3) \tag{1b}$$

$$I_y\ddot{\beta} = f_1x_c - f_2(\sqrt{3}r_a/2 - x_c) + f_3(\sqrt{3}r_a/2 + x_c) \tag{1c}$$

여기서,  $m, I_x, I_y$  는 각각 부상체의 질량과 회전 관성모멘트를 나타낸다.  $f_1, f_2, f_3$  은 각각 전자석에 의한 부상력을 나타내며,  $r_a$  는 부상력의 중심으로부터 작용점까지의 거리를 나타낸다.  $x_c$  와  $y_c$  는 부상력이 이루는 힘의 다각형의 중심과 부상체의 무게 중심간의 거리를 나타낸다.

식 (1)은 다시 다음과 같은 벡터의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{T}_a\mathbf{F} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{F}_g \tag{2}$$

여기서,  $\mathbf{r} = [z \ \alpha \ \beta]^T, \mathbf{M} = \text{diag}(m \ I_x \ I_y)$ ,

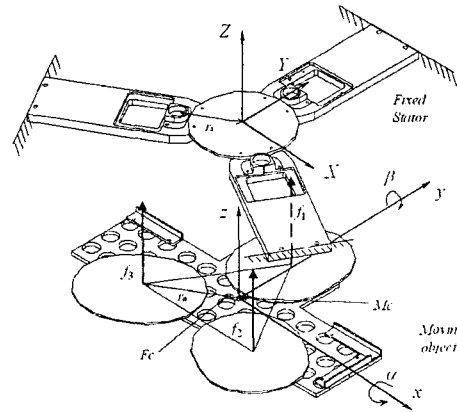


Fig. 3 Force distribution and coordinate system

$\mathbf{F} = [f_1 \ f_2 \ f_3]^T, \mathbf{F}_g = [-mg \ 0 \ 0]^T$  는 각각 상태 변수, 관성, 자기력과 중력의 행렬과 벡터를 나타내며,  $\mathbf{T}_a$  는 좌표변환행렬로서 아래와 같이 정의된다.

$$\mathbf{T}_a = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ (r_a - y_c) & -(r_a/2 + y_c) & -(r_a/2 + y_c) \\ x_c & -(\sqrt{3}r_a/2 - x_c) & (\sqrt{3}r_a/2 + x_c) \end{bmatrix} \tag{3}$$

3.2 전자기력

부상력을 발생시키는 전자석은 자기력을 항상시키기 위해서 총 네 개의 다리를 가지도록 설계하였다. 그래서, 한 개의 전자석에는 총 네 개의 코일이 사용된다. Fig. 4(a)는 연구에서 사용된 전자석에 동등한 자기회로를 나타낸다. 이와 같이 자기 시스템은 전기회로와 동등한 자기회로로 변환하여 해석과 설계가 가능하다. Fig. 4(a)에서 각 전자석이 이루는 자속의 루프는 총 네 개로 이루어진다. 이론적으로 각각의 루프에서 자속은 동일하기 때문에 하나의 루프에 대한 결과를 구한 후, 이 결과를 중첩의 원리에 적용하여, 총루프에 대한 결과를 얻을 수 있다. Fig. 4(b)는 한 개의 루프를 나타낸다.

앙페르의 주회 법칙(Ampere's circuital law)에 의해서 아래와 같은 식이 성립한다.<sup>(9)</sup>

$$\oint \mathbf{H}d\mathbf{l} = \phi_g \mathfrak{R}_g + 2\phi_s \mathfrak{R}_s + \phi_l \mathfrak{R}_l + 2\phi_g \mathfrak{R}_g + \phi_m \mathfrak{R}_m = 2\mathfrak{I} \tag{4}$$

Fig. 4(b)에서 각 자속의 관계는 아래와 같이 정리가 된다.

$$\phi_m = \phi_g/2, \phi_s = \phi_l/2, \phi_l = \phi_l - \phi_g \tag{5}$$

여기서, 아래 첨자  $m, g, s, t$  는 각각 Fig. 4(a)에서 이동자, 공극, 고정자, 고정자의 다리를 의미한다. 자속 경로에서의 자기 저항은 자기저항의 정의에 따라서 다음과 같이 각각 표현이 가능하다.

$$\mathfrak{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 S_p}, \mathfrak{R}_s = \frac{l_s}{\mu_0 \mu_r S_s},$$

$$\mathfrak{R}_m = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r S_m}, \mathfrak{R}_t = \frac{l_t}{\mu_0 S_t}, \mathfrak{R}_i = \frac{l_i}{\mu_0 \mu_r S_i} \quad (6)$$

공극에서의 자기저항 ( $\mathfrak{R}_g$ )에서 자속경로 길이 ( $l_g$ )는 공극의 크기( $z$ )와 같다. 그래서, 공극을 통과하는 자속은 식 (4)-(6)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_g = \frac{2\mathfrak{I} - \phi_i (\mathfrak{R}_s / 2 - 2\mathfrak{R}_t - \mathfrak{R}_i)}{2\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_m / 2 + \mathfrak{R}_s / 2 + 2\mathfrak{R}_t} \quad (7)$$

여기서  $\phi_i = 0.0239\mu_0 i$  로 계산된다. 식 (8)의 에너지 보존의 법칙에 의하면, 운동에너지는 자기에너지의 변화로부터 유발되기 때문에 가상일의 원리를 적용하여 자기력을 유도할 수 있다.<sup>(10)</sup>

$$f dx + v dt = dW_m \quad (8)$$

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

$$W_m = \frac{1}{2} Li^2 \quad (9)$$

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

$$f_v = -\frac{\partial W_m}{\partial z} = \frac{(k_a z + k_b) i^2}{(4z + k_c)^3} \quad (10)$$

여기서, 상수  $k_a, k_b, k_c$  는 각각 아래와 같이 정의된다.

$$k_a = 16\mu_0 (2N + \mu_0 (0.0239\mathfrak{R}_t - 0.01195\mathfrak{R}_s + 0.0478\mathfrak{R}_i))^2 S_g$$

$$k_b = -4\mu_0^2 (2N + \mu_0 (0.0239\mathfrak{R}_t - 0.01195\mathfrak{R}_s + 0.0478\mathfrak{R}_i))^2 (\mathfrak{R}_m + \mathfrak{R}_s + 4\mathfrak{R}_t) S_g^2$$

$$k_c = \mu_0 (\mathfrak{R}_m + \mathfrak{R}_s + 4\mathfrak{R}_t) S_g$$

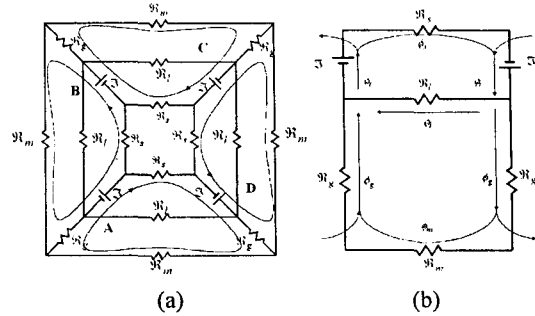


Fig. 4 Equivalent magnetic circuits (a) total loop (b) loop A

식 (10)은 Fig. 4(b)에서의 한 루프에 대한 결과로서 총 부상력은 다음과 같이 정리된다.

$$f = \sum_{i=1}^4 f_{v_i} \quad (11)$$

### 3.3 선형 운동방정식

비선형방정식은 미소변위운동을 가정하여 공칭점을 기준으로 선형화될 수 있다. 그리하여, 식 (10)에서의 자기력은 아래와 같이 선형화될 수 있다.

$$f_0 + \delta f = k_z (d_0 + \delta d) + k_i (i_0 + \delta i) \quad (12a)$$

이 때, 각 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$k_z = \left. \frac{\Delta f}{\Delta z} \right|_{d_0, i_0}, \quad k_i = \left. \frac{\Delta f}{\Delta i} \right|_{d_0, i_0} \quad (12b)$$

위 식을 식 (1)에 대입하여 식 (11)이 만족하도록 초기값을 정하면, 선형화된 힘방정식을 구할 수 있다.

$$f_0 = k_z d_0 + k_i i_0 - 1/3 mg = 0 \quad (13)$$

$$\delta f = k_z \delta d + k_i \delta i \quad (14)$$

식 (14)를 식 (2)에 대입하여 최종적으로 선형화된 운동방정식을 구할 수 있다.

$$M \ddot{r} = k_z M^{-1} T_d T_d \delta r + k_i M^{-1} T_d \delta i \quad (15)$$

여기서,  $k_z = k_{1z} = k_{2z} = k_{3z}$ ,  $k_i = k_{1i} = k_{2i} = k_{3i}$  이므로 항의 앞으로 나오며,  $T_d$  는 상태변수의 전자석에서의 공극으로의 변환행렬을 나타내며, 정의는 아

래와 같다.

$$T_d = \begin{bmatrix} 1 & (r_a - y_c) & 0 \\ 1 & -(r_a/2 - y_c) & -(\sqrt{3}r_a/2 - x_c) \\ 1 & -(r_a/2 + y_c) & (\sqrt{3}r_a/2 + x_c) \end{bmatrix} \quad (16)$$

식 (15)를 통해서 본 시스템의 게루프 특성은 불안정하므로, 폐환 제어가 필요함을 알 수 있다.

#### 4. 제어기 설계 및 실험

##### 4.1 안정화 제어기

제안된 시스템의 안정된 구동을 위해서는 우선 구동자의 안정된 부상이 이루어져야 한다. 그래서, 앞장에서 구한 선형화된 운동방정식을 바탕으로 선형 제어이론을 적용한다. 제어입력은 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_r = -(k_p r + k_D \dot{r} + k_I \int r dt) \quad (17)$$

여기서,  $k_p$ ,  $k_D$ ,  $k_I$ 는 각각 각 자유도에 대한 비례, 미분, 적분 제어상수 행렬을 나타낸다. 식 (17)은 상태변수를 기준으로 구한 값이므로, 좌표 변환을 통해서 다음과 같이 전자석 기준의 입력값으로 변환이 가능하다.

$$i_d = T_i i_r \quad (18)$$

식 (18)을 식 (15)에 대입하면, 아래와 같이 나타난다. 여기서, 기호  $\delta$ 는 편의상 생략하도록 한다.

$$\delta \ddot{r} + k_i M^{-1} T_a T_i k_D \dot{r} + (M^{-1} T_a T_i k_p - k_z M^{-1} T_a) r + k_i M^{-1} T_a T_i k_I \int r dt = 0 \quad (19)$$

식 (19)에서 적절한 제어 상수값과  $T_a T_i$ 의 선택으로 시스템이 안정해질 수 있다. Fig. 5는 되먹임 제어기를 포함한 제어블럭선도를 나타내는데, 점선안의 부분이 안정화제어블록을 나타낸다. 실제 제어상에서는 각 전자석을 기준으로 한 제어가 용이하므로, 식 (17)은 좌표변환을 통해서 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$i_d = -T_i (k_p T_s^{-1} d_s + k_D T_s^{-1} \dot{d}_s + k_I T_s^{-1} \int d_s dt) \quad (20)$$

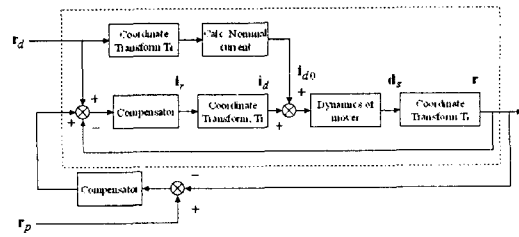


Fig. 5 Block diagram of closed-loop control system

Table 1 Specifications of designed system

Item		Symbol	Value
Fixed Stator	Pole width	$w_l$	10 (mm)
	Pole length	$l$	10 (mm)
	Winding	$N$	335 (turns)
Mover	Plate thickness	$t$	1.5 (mm)
	Centroid	$x_c$	1.15(mm)
		$y_c$	2.15(mm)
	Mass of mover	$m$	1.28 (Kg)
	Moment of Inertia	$I_x$	0.48E-2(Kg m <sup>2</sup> )
		$I_y$	0.11E-1(Kg m <sup>2</sup> )
$I_z$		0.16E-1(Kg m <sup>2</sup> )	

여기서,  $d_s = [d_{1s} \ d_{2s} \ d_{3s}]$ 는 변위센서를 통해 측정된 값이며,  $T_s$ 는 변위센서에서 상태변수로의 변환행렬로서 아래와 같이 정의된다.

$$T_s = \begin{bmatrix} 1 & (r_s - y_c) & 0 \\ 1 & -(r_s/2 - y_c) & -(\sqrt{3}r_s/2 - x_c) \\ 1 & -(r_s/2 + y_c) & (\sqrt{3}r_s/2 + x_c) \end{bmatrix} \quad (21)$$

여기서,  $r_s$ 는 세 센서의 부착된 위치가 이루는 원의 반지름을 의미한다.

##### 4.3 위치결정 제어기

평면방향으로의 추진은 2장에서 보았듯이 회전 에 의한 결과로 나타나기 때문에 회전과 선형 변위간의 관계를 이용하도록 한다. 그리하여, 제어입력은 식 (22)와 같이 변위로의 입력을 회전으로 변환하여 사용하였다.

$$U_p = -(k_{p2} e_p + k_{D2} \dot{e}_p + k_{I2} \int e_p dt) \quad (22)$$

여기서,  $U_p = [\alpha \ \beta]^T$ ,  $e_p = r_{pd} - r_p$ ,  $r_{pd}$ ,  $r_p = [x \ y]^T$ 는 각각 제어입력과 상태변수의 오차, 목표치, 및 상태변수의 벡터를 나타내며,

$k_{p2}$ ,  $k_{D2}$ ,  $k_{D2}$  는 각각 면내운동방향으로의 비례, 미분, 적분 제어상수 행렬을 나타낸다.

4.4 실험 장치

본 연구에서는 부상체의 변위측정을 위하여, 모두 6 개의 변위센서가 사용되었다. 상부 고정자에는 3 개의 정전 용량형 미소변위센서(S600-2, Micro-Epsilon,  $0.4\mu m$ )가 설치되어 면의 방향 운동 ( $z, \alpha, \beta$ )을 측정하고, 측면에는 3 개의 레이저 변위센서(ILD1400-100, Micro-Epsilon,  $100\mu m$ )가 설치되어 면내 방향 운동( $x, y, \gamma$ )을 측정한다. 제어를 위한 장치로는 셀러론 PC 를 사용하였으며, 제어 명령의 출력과 궤환 제어를 위한 입력 신호의 변환은 각각의 D/A(PCL-726, 12bit, Advantech), A/D(PCL-817, 100KHz 16-bit, Advantech co.)보드를 이용하였다. 그리고, 3 채널의 직류 파워증폭기(GA455P, Glentek)를 사용하여 전자석을 구동하였다. Fig. 6 은 본 연구에서 구성된 실험장치의 구성과 제어흐름도를 나타내며, Fig. 7 은 실제 제작된 실험장치를 나타낸다. 표. 1 은 본 연구에서 제작된 시스템의 주요 치수를 나타내는데, 본 연구의 목적이 일련의 선행연구로서 성능측면에서는 개선의 여지가 많다.

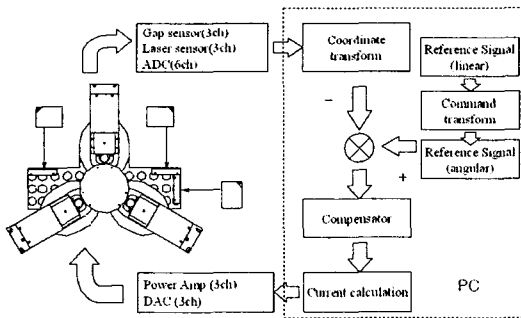


Fig. 6 Block diagram of control system

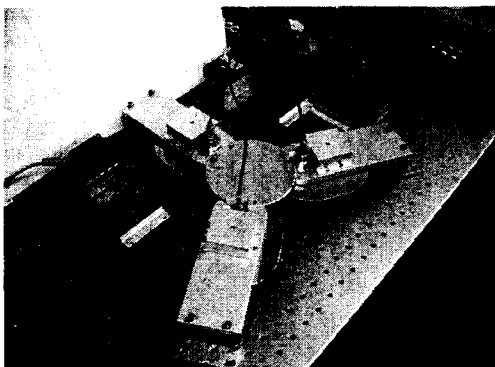


Fig. 7 Photograph of developed system

4.4 실험 결과

우선 구동자의 부상 실험을 수행하였다. Fig. 8 은 부상 실험결과를 나타내는데, 평면방향으로의 운동은 제어하지 않은 상태로 면외운동만을 제어한 결과이다. 이 때, 부상 높이는  $500\mu m$ 이며,  $x, y$  축으로의 회전은 0 으로 설정하였다. 결과를 통해서 안정된 부상이 이루어짐을 알 수 있다. Fig. 8 에서 각 전자석으로의 입력 전류는 서로 동일하지 않음을 알 수 있는데, 이는 부상력 다각형의 중심과 구동자의 무게중심이 일치하지 않기 때문에 나타나는 현상이다. 실제로 구동자의 무게중심이 이동좌표계의 1 사분면에 있기 때문에 전류 1 과 2

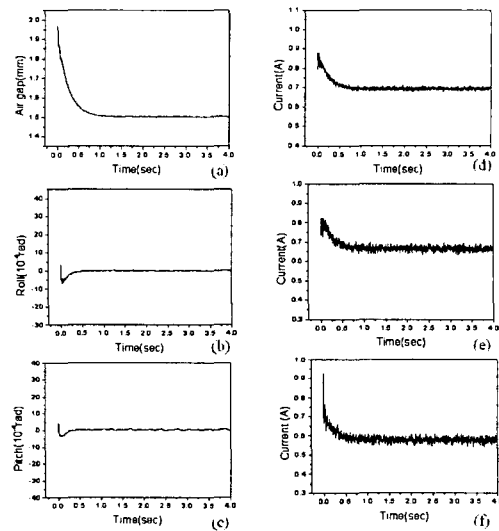


Fig. 8 Results of Suspension experiment (a) air gap, (b) roll, (c) pitch, (d) current for EM1, (e) current for EM2, (f) current for EM3

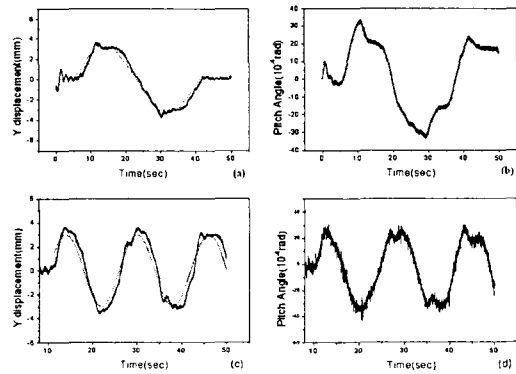


Fig. 9 Experimental results trapezoidal motion and sinusoidal: (a) y displacement, (b) Input angle, (c) y displacement, (d) Input angle

의 값이 3보다 크음을 알 수 있다.

안정된 부상을 기반으로 평면상에서의 위치제어를 수행하였다. 구동자가 부상을 하기 전인 초기 위치에서의 공극의 크기는 2mm로 설계가 되었기 때문에 큰 회전각의 경우에는 구동자가 베이스부분과 간섭을 일으킬 수 있다. 그래서, 최대 회전각의 크기를  $\pm 400 \mu\text{rad}$ 로 설정하였다. 한편, 구동자의 이동범위는 구동자의 무게중심이 부상력의 다각형내에 존재하는 범위로 정의되나, 부상력은 한 점에서의 집중력이 아닌 네 개의 폴에서 발생하는 분포력의 형태로 나타나기 때문에 이론적인 값보다 적게 나타났다.

Fig. 9는 실제 구동실험을 통한 결과를 나타내는데, (a)와 (b)는 사다리꼴 입력에 대해 각각 이동변위와 이때 명령으로 내려진 회전각을 나타내며, (c)와 (d)는 정현파 입력에 대한 각각의 결과를 나타낸다. 시스템이 명령치를 근사하게 추종함을 확인할 수 있으나, 앞서 언급한 것처럼 본 연구에서 제안하는 시스템은 수평방향으로의 부가적인 구동기가 없이 구동자 자체의 관성만을 이용하기 때문에 응답성 측면에서는 높은 성능을 얻기에는 한계가 있다. Fig. 9(a)와 (c)에서 부상이 시작하는 지점에서 진동이 많이 발생하는데, 이것은 부상과 동시에  $z$  축에 대한 회전이 발생하기 때문이다.  $z$  축에 대한 회전은 구동자의 무게중심이 편심되어 있고 수평방향으로의 복원력이 존재하지 않기 때문에 어느 정도 예견이 되었다. 이러한 결과로  $y$  축 방향으로 원점에 도달했을 때도 입력각은 오프셋이 존재함을 알 수 있다. 본 연구에서는 면외운동을 제어하기 위해서 최소의 전자석만을 사용하였지만, 추가적인 부상용 전자석의 배치를 통해서  $z$  축 회전에 대한 여유를 가지게 될 것이다. 한편 직선 운동을 요구하는 시스템에 적용될 경우에는 평판의 철판 대신 레일을 사용하여 횡 방향으로의 자기력을 이용하여  $z$  축 방향의 회전을 지지할 수 있기 때문에 앞서의 문제점은 제거할 수 있다.<sup>(11)</sup> 성능적인 측면에서 본 시스템을 초정밀 위치결정 시스템으로 적용하기에는 한계가 있지만, 초정정 작업환경에서의 이송수단이나 부상시스템에서의 위치 보정 장치로서 적용이 가능할 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 면외 방향으로의 부상력만을 이용한 위치결정기구의 가능성에 대해서 연구하였다. 논문에서는 자기회로를 이용하여 전자석과 철판사

이의 전자기력을 해석하였으며, 이를 바탕으로 선형화된 운동방정식을 유도하였다. 사용된 제어이론은 자기 서스펜션 시스템이 비선형 시스템이기 때문에 고도의 비선형 제어이론이 적용되어야 하나, 부상방향으로의 작동영역이 아주 미세하기 때문에 선형화된 제어이론을 사용할 수 있었다. 또한 구동원리 자체가 간단하여, 전체적으로 제어기의 구조가 간단하다. 실험을 통해서, 구동자의 회전단을 이용하여 수평운동을 구현하였다. 본 연구에서 제안하는 방식의 장점으로 부상력만을 이용하기 때문에 기존의 시스템보다 구조가 간단하며, 구동자에 전자석을 설치할 경우에는 수동자기 요소의 추가적인 배치만으로 구동영역을 쉽게 확장할 수 있다. 현재, 성능면에서 초정밀 위치결정 장치로 적용하기에는 많은 개선의 여지가 남아 있으나, 비접촉 이송수단이나 밸런싱기구 또는 서스펜션 기구에서의 위치 보정 장치로서의 적용이 가능하다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- (1) Wang I. A., Li S.H., and Vishniac I.M., 1991, "A Magnetic Levitation Transport Path," *IEEE Trans Semiconductor Manufacturing*, Vol. 4, No. 2, pp. 145~154.
- (2) Jin J, Yih T.C., Higuchi T., and Jeon J.P., 1998, "Direct Electrostatic Levitation and Propulsion of Silicon Wafer," *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 34, No. 5, pp. 975~985.
- (3) Holmes M., Hocken P., and Trumper D., 2000, "The Long-Range Scanning Stage: a Novel Platform for Scanned-Probe Microscopy," *Precision Engineering*, Vol. 24, pp. 191~209.
- (4) Sawyer B.A., 1974, "Actuating System," *U.S. Patent 3 857 078*.
- (5) Kim W.J., Trumper D., and Jeffrey H.L., 1998, "Modeling and Vector Control of Planar Magnetic Levitator," *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 34, No. 6, pp. 1254~1262.
- (6) Jung Kwang Suk and Baek Yoon Su, 2002, "Study on a Novel Contact-Free Planar Moving System Using Electromagnet and Permanent magnet," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol. 7, No.1, pp.35~43.
- (7) Jung Kwang Suk, Lee Sang Heon, and Baek Yoon

- Su, 2002, "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.
- (8) Bernard Etkin, 1972, *Dynamics of Atmospheric Flight*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 121~195.
- (9) Griffiths David J., 1989, *Introduction to electrodynamics*, Gyo hak sa, Seoul, pp. 227~250.
- (10) Nasar S.A., and Unnewehr L.E., 1983, *Electromechanics and Electric Machines*, John Wiley & Sons, Inc.
- (11) Lee S.H., and Baek Y.S., 2003, "Modeling and Analysis of Electromagnets for Magnetic Suspension System," *Journal of the KSPE*, Vol. 20, No. 5, pp. 180~188.