〈 논문 〉

Switched Reluctance 추진 원리에 기초한 자기 부상형 위치결정기구

이 상 헌*

(2005 년 7 월 1 일 접수, 2006 년 4 월 12 일 심사완료)

A Magnetic Suspension Stage Based on the Switched Reluctance Propulsion Principle

SangHeon Lee

Key Words : Magnetic Suspension(흡인식 자기부상), Switched Reluctance Motor(스위치드 릴럭턴스 모터), Surface Actuator(평면구동기), Positioning Device(위치결정기구)

Abstract

This paper is about the magnetic suspension stage based on the Switched Reluctance propulsion principle. Because the previous studies on contact-free stage adopted the Lorentz force for main force generation mechanism, they have suffered from thermal problem deteriorating the precision. Thus, the magnetic suspension stage adopting SR principle which can achieve high force density is proposed. The main operating principle and structure for achieving high resolution and long travel range are represented. The magnetic force analysis of each actuator, providing back data for dynamic modeling and controller design are carried out. By conducting basic experiments, the feasibility of the proposed system is shown. In addition the problems which should be improved and their solutions are represented.

1. 서 론

급속히 발달하는 전자 회로의 집적화와 엄격한 허용가공오차를 요구하는 반도체 및 TFT-LCD, PDP 등의 제조, 검사공정에서 적용되는 기기는 기계적인 전달 메커니즘의 비선형성, 높은 관성, 백래쉬, 마찰과 같은 문제로 기존의 기구적인 구동방법으로는 한계를 나타내었다. 또한 나노 미터의 정밀도에 대응하기 위한 웨이퍼 스테퍼나 포토 마스크 스테이지에서 요구되는 정렬 정밀도(align accuracy)나 중첩 정밀도(overlay accuracy)는 더욱 엄격해지고 있다.[1] 따라서 생산공정에 있어서 고정밀도의 유지와 넓은 동적영역의 요구를 동시에 만족시키기 위해서 조/미동 각도 보정 장치가 반드시 필요하기 때문에 스테이지 자체가 다자유도의 복잡한 메커니즘을 갖는 구동기를 필요로 하게 되었다. 뿐만 아니라, 현장에서의 정밀 공정들은 초청정 환경에서 이루어지기 때문에 공정에 적용되는 모든 장치는 기계적 마찰로 인한 분진의 발생, 윤활로 인한 오염, 구동원에 따른 열팽창 등 어떠한 오염의 원인을 배제하여야 한다.[2,3] 이러한 공정의 요구조건에 따라서 산업계의 초청정 작업환경에 적합하며, 넓은 동적 범위를 유지하면서 초정밀 운동 및 자세 보정이 가능한 구동기에 대한 요구는 날로 증가하고 있다.[4] 이러한 성능 목표를 이루기 위해서, 기존의 구동기는 조/미동(course/fine motion)장치가 결합된 이중구조의 형태로 연구되어 왔으나, 스테이지의 구조와 구동을 위한 제어기 구조의 단순화를 위하여 단일 구조형태의 구동기가 연구되어 오고 있다. 특히나, 위치결정기구 장치의 정밀도와 정확도에 가장 큰 영향을 미치는 마찰의 영향을 없애기 위해서 비접촉방식의 구동기가 소개되었는데, Sawyer 와 Tomita 는 공압 부상을 이용하여 각각 VR (variable reluctance)원리에 기초한 리니어모터의 조합과 영구자석형 리니어모터의 조합을 이용하여 공작기기와 웨이퍼 스테퍼의 개발을 위한 비접촉 방식의 평면 구동시스템을 개발하였다.[5,6] 그러나, 공압의 경우, 앞서 언급한 대부분의 공정이 높은

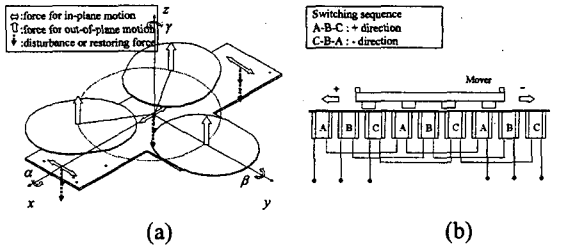
* 회원, 안동대학교 기계공학부
E-mail : shlee@andong.ac.kr
TEL : (054)820-5908 FAX : (054)820-5167

진공 상태의 클린룸에서 이루어지고 있는 추세이기 때문에 향후 적용성이 떨어질 것으로 예상되며, 공압의 늦은 응답성이 정밀위치 제어시스템의 적용에 단점이 되기도 한다. 반면, W.J. KIM 은 웨이퍼 스테퍼의 개발을 목표로 동기형 리니어모터에서 발생하는 부상력과 추진력을 동시에 사용하여 자기부상형 위치결정기구를 개발하였다.[4] 그리고, 정광석은 영구자석과 평면형 공심솔레노이드의 조합에 의한 자기요소의 정렬을 이용하여 자기부상형 위치결정기구를 개발하였다.[7] 그러나, W.J.KIM 과 정광석에 의해 개발된 시스템은 영구자석과 평면형 공심솔레노이드 사이에 발생하는 로렌쯔힘을 이용하기 때문에 높은 자기력을 얻기 위해서 높은 전류의 인가를 필요로 하고, 이로 인한 솔레노이드에서의 높은 열 발생이라는 불가피한 단점이 있다. 또한 넓은 구동영역의 확장을 위해서는 솔레노이드의 크기가 증가해야 하는데, 이로 인한 코일 권선량의 증가, 솔레노이드 자체의 저항과 인덕턴스의 증가는 시스템성능을 저하시킬 수 있다. 그리하여, 본 연구에서는 열 발생문제를 해결하기 위해 높은 자기력을 발생시키는 자기흡인식 부상시스템과 SR(switched reluctance)원리에 기초한 선형구동기의 조합을 이용한 자기부상형 스테이지를 제안한다. 2 장에서는 구동원리와 구조에 대해서 설명하고, 3 장에서는 부상부와 추진부의 자기력해석을 다루고, 이 결과를 바탕으로 4 장에서는 운동방정식을 유도하고 제어기의 구조에 대해서 설명한다. 그리고, 성능향상을 위한 스위칭 방식과 이를 적용한 실험결과를 바탕으로 제안된 시스템을 평가한다.

2. 구동원리 및 구조

2.1 구동원리

제안된 자기부상형 위치결정기구는 평면형 자기베어링에 의해서 부상이 되고, 변형된 SR 형 선형구동기에 의해서 평면운동을 한다. Fig. 1 에서 이동자를 구동시키는 힘과 원리를 나타내는데, 수직방향으로의 부상은 전자석과 평판형 철심사이에서 발생하는 자화력에 의해 이루어져, 수평변위와는 관계없이 항상 일정한 부상력을 발생시켜준다. 즉, 동일한 평면(x-y)내에서는 일정한 부상력의 확보가 가능하다. 따라서 이동자의 무게중심이 각 부상력의 작용점이 이루는 힘의 다각형의 내부에만 있으면 면외 운동은 안정화될 수 있으며, 평면(x-y)상의 구동영역은 이 다각형의 크기에 의해서 한정된다. 면내 운동은 H 형태로 배치된 하부고정자의 전자석과 이동자 하부의 철심으로 이루어지는 3 개의 SR 형 선형구동기로 이루어진다. 이동자에 부착된 철심은 돌출부가 없기 때문에 철심배열의 횡방향으로만 추진력이 발생한다. 제작된 SR 형 선형구동기는 3 상으로 결선이 되며, 개략적인 구조는 Fig. 1(b)에 나타내었다. 구동원리는 일반적인 SR 형 선형구동기와 마찬가지로 이동자의 이동방향과 위치에 따라서 스위칭을 하는 방식으로 Fig. 1(b)에서 A-B-C 순으로 전류가 인가되면 이동자는 좌측으로 이동한다. 스위칭에 대한 자세한 내용은 3 장의 제어기부분에서 다루기로 한다.



(a) (b)

Fig. 1 Operating principle (a) acting forces (b) propulsion unit and driving principle

부상방향으로의 힘은 전자석과 철판사이의 자화력 즉, 흡인력을 이용하기 때문에 부상방향으로는 음의 강성을 가진다. 따라서 안정된 면외운동을 위해서는 피드백제어가 반드시 이루어져야 한다. 한편, 일반 흡인식 부상시스템에서 부상방향으로의 복원력은 단지 자중만이 작용하기 때문에 시스템의 강성이 낮아질 수 있으나, 본 시스템에서는 추진용 전자석에 의한 추진력과 동반하는 수직방향으로의 흡인력은 일종의 예압으로 작용하기 때문에 시스템의 강성을 높일 수 있는 구조적 장점이 있다. 그러나, 추진용 전자석에 의한 수직력은 외란으로도 작용할 수 있는 양면성을 지니기 때문에, 추진을 위한 스위칭 알고리즘에 의해서 추진력에 동반된 수직력을 예상하여, 면외운동 보상기로 외란으로 작용하는 특성을 줄일 수 있다.

2.2 구조

높은 정밀도를 확보하기 위해서 이동자는 외부로부터의 간섭을 최대한 적게 받도록 설계되어야 한다. 따라서 제안된 시스템의 개략적인 구조를 나타내는 Fig. 2 에서 이동자는 외부와의 결선이 요구되는 능동자기요소는 배제되고, 수동자기요소만으로 이루어져 있다. 제안된 시스템에서 얻을 수 있는 정밀도는 이론적으로는 제한이 없지만, 실제 정밀도는 일반적인 자기부상시스템에서와 같이 센서와 같은 서보장치의 성능에 의해 결정된다. 이동자에 부상력과 추진력이 동시에 작용하여야 하기 때문에 부상력 발생을 위한 부상용 전자석과 추진을 위한

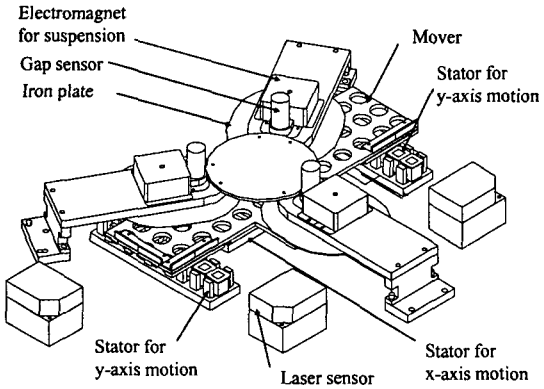


Fig. 2 Schematic of the developed system

하부 추진용 전자석 사이에 이동자가 위치하고, 부상력 발생을 위한 평면형 철판과 추진력 발생을 위한 막대형 철심이 이동자의 상, 하면에 각각 부착된다. 부상용 전자석은 3 자유도 면외운동(z, α, β)을 제어하기 위한 최소의 조합으로서 총 3 개로 구성되고, 각 전자석은 부상력 최대화를 위해 4 개의 폴을 가지도록 설계된다. 추진용 전자석은 앞서 서술하였듯이 H 형태로 배치되어 이동자 아래면의 철심과 함께 3 개의 비접촉형 선형구동기를 구성한다. 각 선형구동기의 횡방향으로의 운동은 이동자의 철심이 돌출극이 없는 형태로 구속되지 않는다. 즉, 3 개의 선형구동기의 축 방향운동만으로 3 자유도 면내운동이 구속된다. 이동자의 위치를 측정하는 센서는 모두 비접촉 방식의 센서가 사용되고, 면외운동을 위한 전자석과 센서는 기구학적 오차를 줄이기 위해서, 동일축 상에 위치하도록 설계되었다. 설계된 SR 형 선형구동기의 주요치수는 Fig. 3 과 Table 1 에 각각 정의하였다.

3. 자기력 해석

3.1 부상력 해석

부상용 전자석은 부상력을 향상시키기 위해 Fig. 4(a)처럼 4 개의 폴을 가지도록 설계하였다. 따라서 하나의 전자석은 4 개의 코일이 직렬 연결된 형태이다. 전자석에서의 자속은 코일의 감은 방향에 따라서 Fig. 4(a)처럼 표현이 되고, Fig. 4(b)와 같은 등가자기회로로 구할 수 있다. 여기서 4 개의 자속루프(A,B,C,D)가 형성되는데, 이론적으로 각 루프에서의 자속은 모두 똑같기 때문에 하나의 루프에 대한 결과를 중첩의 원리를 이용하여 최종결과로 얻을 수 있다. Fig. 4(c)는 Fig. 4(b)에서의 한 루프로서, 앙페르의 주회법칙(Ampere's circuital law)을 적용하여 다음과 같이 자속과 기자력간의 관계식을 구할

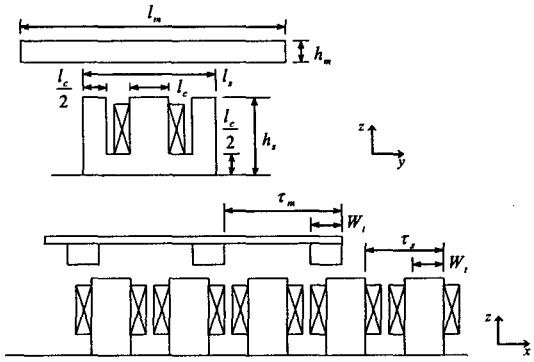


Fig. 3 Specification of propulsion unit

Table 1 Chief dimension of basic magnetic elements

Item	DESCRIPTION	Property
Suspensi on unit	Number of coil turns	335, AWG25
	Pole size	10×10 ㎟
Propulsi on unit	Number of coil turns	300, AWG25
	Length (l_m, l_s, l_c)	80, 35, 10mm
	Height (h_m, h_s)	5, 25mm
	Width (W_t)	10 mm
	PITCH (τ_m, τ_s)	30, 20mm

수 있다.

$$\oint Hdl = \phi_s \Re_s + 2\phi_t \Re_t + 2\phi_g \Re_g + \phi_m \Re_m = 2\Im \qquad (1)$$

여기서, $H, \phi, \Re, \Im$는 각각 자기강도, 자속, 자기저항, 기자력을 나타내며, 아래첨자 s, m, t, g 는 각각 고정자, 이동자, 폴과 공극부분을 나타낸다. 자속의 누설은 공극에서만 일어난다는 가정하에 누설자속 ϕ_l과 각 요소를 지나는 자속은 아래와 같은 관계를 가진다.

$$\phi_l = \phi_t - \phi_g, \quad \phi_m = \phi_g/2, \quad \phi_s = \phi_t/2 \qquad (2)$$

또한 각 요소에서의 자기 저항은 다음과 같이 각각 정의된다.

$$\Re_g = \frac{l_g}{\mu_0 S_g}, \quad \Re_s = \frac{l_s}{\mu_0 \mu_{rs} S_s}, \qquad (3)$$

$$\Re_m = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_{rm} S_m}, \quad \Re_l = \frac{l_l}{\mu_0 \mu_{rl} S_l}, \quad \Re_t = \frac{l_t}{\mu_0 \mu_{rt} S_t}$$

여기서, μ_0, μ_r은 각각 공극에서의 투자율과

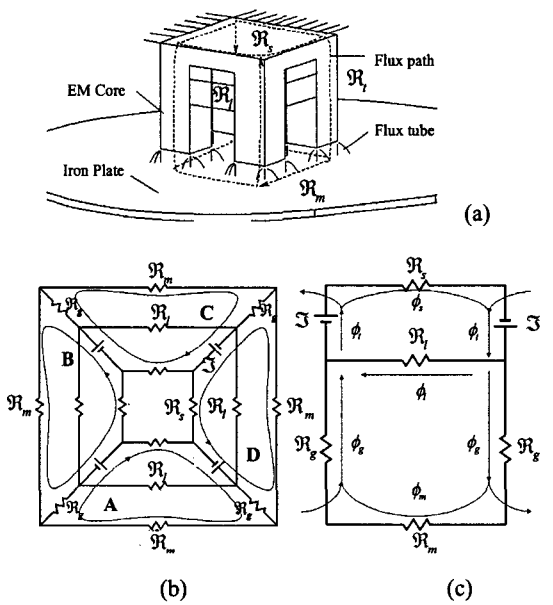


Fig. 4 Electromagnet for vertical motion (a) Hardware configuration, (b) Equivalent magnetic circuits of total loop, and (c) loop D

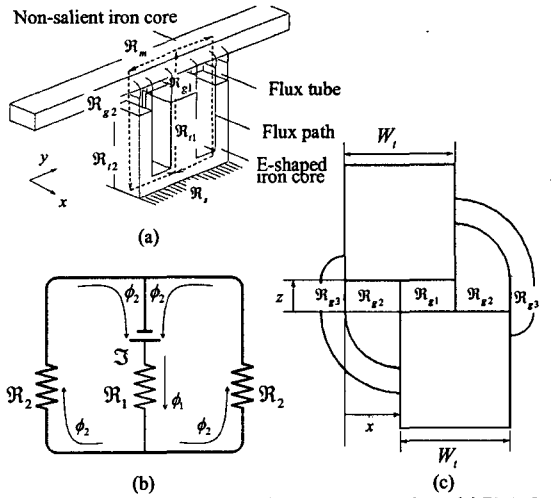


Fig. 5 Electromagnet for horizontal motion (a)EM for propulsion, (b) equivalent magnetic circuit, and (c) flux pattern in the air gap

자기요소에서의 상대투자율을 나타내고, l과 S는 자속경로의 길이와 단면적을 의미한다. 공극의 자기저항($\Re_g$)에서 자속경로 길이(l_g)는 공극의 크기(z)와 같기 때문에, 공극을 통과하는 자속은 식 (1)-(3)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_g = \frac{2\Im - \phi_l(\Re_s/2 - 2\Re_t - \Re_l)}{2\Re_g + \Re_m/2 + \Re_s/2 + 2\Re_t} \tag{4}$$

여기서, $\phi_l = 0.0239\mu_0 i$로 계산되고,[8] 공극에 저장되는 자기에너지($W_m = \phi_g^2 \Re_g$)와 함께 고려대상이 선형계라는 가정하에 가상 일의 원리를 적용하여 다음과 같이 자기력을 구할 수 있다.

$$f_v = -\frac{\partial W_m}{\partial z} = \frac{(k_a z + k_b) i^2}{(4z + k_c)^3} \tag{5}$$

여기서, 상수 k_a, k_b, k_c는 아래와 같이 정리된다.

$$k_a = 16\mu_0(2N - \mu_0(0.0239\Re_l + 0.01195\Re_s + 0.0478\Re_t))^2 S_g$$

$$k_b = -4\mu_0^2(2N - \mu_0(0.0239\Re_l + 0.01195\Re_s + 0.0478\Re_t))^2 (\Re_m + \Re_s + 4\Re_t) S_g^2$$

$$k_c = \mu_0(\Re_m + \Re_s + 4\Re_t) S_g \tag{6}$$

여기서, N과 i는 각각 코일의 감은 수와 인가전류를 나타내고, 이 두 값의 곱은 기자력을 정의한다. 식 (5)는 Fig. 4(b)에서의 한 루프에 대한 결과로 총 부상력은 식 (5)의 4 배 값을 가진다.

3.2 추진력 해석

하부 고정자에 부착된 추진용 전자석에서는 앞 절에서 유도한 부상용 전자석과는 달리 수직력과 수평력이 동시에 발생한다. 추진력에 동반된 수직력은 부상방향으로 강성을 높이기 위한 예압으로 사용할 수 있는 동시에 부상방향으로의 외란으로 작용할 수도 있다. 그러므로, 이동자의 위치에 따라 일정한 수직력을 유지하는 것이 제어측면에서 유리하다고 볼 수 있다. 추진용 전자석과 공극에서의 자속 경로를 나타낸 Fig. 5(a)를 보면, y 축 방향으로 자기저항이 일정하기 때문에 복원력이 작용하지 않음을 알 수 있다. Fig. 5(b)의 등가자기회로를 통해 앞 절에서와 동일한 방법으로 폐회로식을 구할 수 있다.

$$\oint Hdl = 2H \cdot l_g = 2\phi_1 \Re_1 = 2Ni \tag{7}$$

여기서, 자기저항 $\Re_1$는 고정자와 이동자 극간의 상대변위 x와 z에 대한 함수로 나타나므로, 수평력과 수직력을 식 (5)와 같이 가상 일의 원리를 적용하여 구할 수 있다. 자기저항 $\Re_1$을 구하기 위해, 공극에서의 자속을 Fig. 5(c)와 같이 모델링하여 각 자속 흐름에 대한 자기저항을 구한 뒤 이를 병렬연결하여 전체 자기저항을 구할 수 있다. 각 자기저항은 다음과 같이 정리된다.[8]

$$\Re_{g1}=\frac{z}{\mu_0 h(W_t-x)}$$

$$\Re_{g2}=\frac{\pi}{2\mu_0 h\log(1+\pi x/2z)} \tag{8}$$

$$\Re_{g3}=\frac{\pi}{\mu_0 h}\left(\log\left(\frac{\pi W_t-\pi x/2+z}{\pi x/2+2}\right)\right)^{-1}$$

그리고 공극에서의 자기저항은 식 (8)의 자기저항의 병렬연결로 다음과 같이 구해진다.

$$\Re_1=\left(\frac{1}{\Re_{g1}}+\frac{2}{\Re_{g2}}+\frac{2}{\Re_{g3}}\right)^{-1} \tag{9}$$

이때, 공극에 저장되는 자기에너지는 다음과 같이 정리되고,

$$W_m=\frac{1}{2}Li^2=\frac{1}{2}\phi_1^2\Re_1+\frac{1}{2}\phi_2^2\Re_2+\frac{1}{2}\phi_2^2\Re_2 \tag{10}$$

식 (9)과 (10)을 가상일의 원리에 적용하여 추진력과 이에 동반되는 수직력을 다음과 같은 형태로 구할 수 있다.

$$f_h=-\frac{\partial W_m}{\partial x} \tag{11}$$

$$f_{vd}=-\frac{\partial W_m}{\partial z} \tag{12}$$

4. 동적 모델 및 제어기

4.1 동적 모델

제안된 시스템의 동적 모델은 면외운동과 면내운동으로 나누어 유도되며, 전기방정식도 마찬가지로 면외, 면내용 전자석에 대해 각각 구할 수 있다. 우선, 면내 운동방정식을 간단하게 나타내기 위해 추진용 전자석에서의 인덕턴스는 x 와 z 축 방향으로는 일정한 것으로 가정하여 추진력은 인가전류만의 함수로 가정하고, 3 상 구동시 완벽한 스위칭으로 인한 단상구동으로 가정한다. 이와 같은 조건으로 섭동법을 이용하여 공칭점을 기준으로 다음과 같이 선형운동방정식을 구할 수 있다.

$$\mathbf{M}^o\ddot{\mathbf{p}}^o+\mathbf{k}^o\mathbf{p}^o=\mathbf{Q}^o\mathbf{G}^o\mathbf{I}^o+\mathbf{Q}^d\mathbf{G}^i\mathbf{I}^i\ , \tag{13}$$

$$\mathbf{M}^i\ddot{\mathbf{p}}^i=\mathbf{Q}^i\mathbf{G}^i\mathbf{I}^i, \tag{14}$$

여기서, 우선 위첨자 o 와 i 는 각각 면외, 면내운동을 의미하고, $\mathbf{p}^o=[z\ \ \alpha\ \ \beta]^T$, $\mathbf{p}^i=[x\ \ y\ \ \gamma]^T$는 각

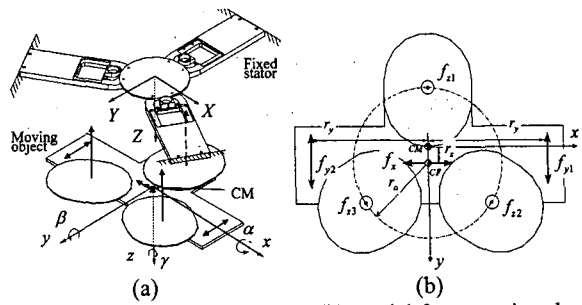


Fig. 6 (a) coordinate system, (b) model for actuating the mover

상태변수를, $\mathbf{M}^o=diag(m\,I_x\,I_y)$, $\mathbf{M}^i=diag(m\,m\,I_z)$ 는 관성행렬을 나타낸다. $\mathbf{I}^o=[i_{z1}\,i_{z2}\,i_{z3}]^T$, $\mathbf{I}^i=[i_{x1}\,i_{y2}\,i_{y3}]^T$ 는 각각 입력전류벡터로서 부상용, 추진용 전자석에 가해지는 전류를 나타낸다. k^o 는 면외운동으로의 스프링 상수로 부상높이에 대한 부상력의 구배값으로 구해진다. $\mathbf{Q}$는 좌표변환행렬로 Fig. 8 의 블록선도에 나타난 것처럼 전자석의 배열과 Fig. 6(a)에 정의된 좌표계와의 관계를 나타내며 다음과 같이 정리된다.

$$\mathbf{Q}^o=\begin{bmatrix}-1 & -1 & -1\\ (r_a-y_c) & -(r_a/2+y_c) & -(r_a/2+y_c)\\ -x_c & \sqrt{3}r_a/2-x_c & \sqrt{3}r_a/2+x_c\end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Q}^i=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 1\\ -r_x & r_{y1} & r_{y2}\end{bmatrix},\ \mathbf{Q}^d=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ -r_x & \tau_m & \tau_m\\ \tau_m & r_{y1} & -r_{y2}\end{bmatrix}, \tag{15}$$

여기서, r_a 는 부상력의 중심으로부터 작용점까지의 거리를 나타내고, x_c 와 y_c 는 부상력 작용점이 이루는 다각형의 중심과 부상체의 무게 중심간의 거리를 나타낸다. 그 외의 요소들은 Fig. 6(b)에 자세히 나타내었다. 그리고 $\mathbf{Q}^d$ 는 추진용 전자석에 의해 동반되는 수직방향으로의 힘을 고려하기 위한 좌표변환으로서 면외운동과 면내운동의 연성을 관계를 나타낸다. $\mathbf{G}$ 는 자기력과 관련된 전류상수행렬을 나타내며, 아래와 같이 정의된다.

$$\mathbf{G}^o=\begin{bmatrix}k_{z1} & 0 & 0\\ 0 & k_{z1} & 0\\ 0 & 0 & k_{z1}\end{bmatrix},\mathbf{G}^i=\begin{bmatrix}k_{x1} & 0 & 0\\ 0 & k_{y1} & 0\\ 0 & 0 & k_{y1}\end{bmatrix} \tag{16}$$

여기서 k 는 각 전자석의 전류상수를 나타낸다. 운동방정식과 같이 전기방정식도 면외, 면내용 전자석을 구분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{L}^o\dot{\mathbf{I}}^o+\mathbf{R}^o\mathbf{I}^o=\mathbf{u}^o, \tag{17}$$

$$\mathbf{L}^i\dot{\mathbf{I}}^i + \mathbf{R}^i\mathbf{I}^i = \mathbf{u}^i \ , \qquad (18)$$

여기서 $\mathbf{L}$, $\mathbf{R}$은 각 전자석의 인덕턴스와 저항을 나타내고, $\mathbf{u}$는 입력전압을 나타낸다.

4.2 제어기

본 연구에서는 제안된 시스템의 가능성 타진에 중점을 두었기 때문에 성능향상을 위한 고품위 제어이론의 적용보다는 안정된 구동을 위한 제어의 기본 구조에 대해서 다루고, 특히나 SR 형 선형구동기에서 문제가 되는 추진력의 요동현상과 수직방향으로의 힘의 보상에 자세히 다룬다.

앞서 서술한 바와 같이 흡인력을 사용하는 부상시스템은 시스템 자체가 불안정하기 때문에 시스템의 안정화가 최우선이라고 할 수 있다. 부상방향으로의 자기력은 비선형의 특성을 지니기 때문에 피드백에 의한 선형화를 통해서 선형제어기 비례-적분-미분 제어기가 사용될 수도 있으며, 앞서 유도된 선형 운동방정식을 이용하여 제어기를 설계할 수도 있다. 본 연구에서는 후자의 방법을 선택하였다.

면내방향으로의 운동방정식을 유도할 때, 추진력은 인가전류의 함수만으로 가정하였기 때문에 실제 구동시에도 완벽한 스위칭을 통해서 이동자의 위치에 관계없이 일정한 추진력을 얻을 수 있도록 하여야 한다. 따라서, 면내방향의 제어기에는 일정한 추진력을 보장해주는 스위칭 알고리즘이 포함되어야 한다. 여기서 스위칭 알고리즘은 브러쉬리스(Brushless) 모터에서의 회전자의 위치에 따른 스위칭 형태와 비슷한 형태를 가지나, 폴의 끝단에서 발생하는 추진력의 요동(ripple)을 줄임과 동시에 부상력을 일정하게 하기 위한 이동구간별 추진력의 분배라는 점에서 기존의 스위칭과는 차이가 있다.

펄스형태의 급격한 스위칭이 일어나는 경우, 추진력의 요동이 커지기 때문에 Fig. 7(a)에서 보는 것과 같이 구간별 보간을 통해 스위칭을 이룰 수 있는데, 본 연구에서는 추진력을 sigmoid 함수형태의 분배 함수를 이용한 보간법을 사용하였다. Sigmoid 함수는 곡선의 기울기와 전이구간이 두 개의 파라메터에 의해 결정되기 때문에 체계적으로 분배함수를 작성할 수 있는 장점이 있다. 식 (19)는 sigmoid 함수의 기본 형태를 나타낸다.

$$F_x(x) = \frac{1}{1+e^{ax-b}} \qquad (19)$$

여기서, a 와 b 는 각각 기울기와 전이구간에 관련된 파라메터이다. Fig. 7(b)는 힘분포함수와 추진력에 동반된 수직력의 총합을 각 파라메터값의 변화에 따라서 나타내는데, 파라메터 b 가 고정된 상태에서 파라메터 a 가 증가하면 상변화구간에서 함수의 기울기가 증가하고 파라메터 a 가 고정된 상태에서 파라메터 b 가 증가하면 수직력은 증가한다. 이 결과로부터 작은 a 와 b 의 값이 유리해 보이나, 함수의 연속성을 유지하기 위해서 a, b 의 값은 한정된 영역 내에서 선택되어야 한다. 따라서 다음과 같은 최적화를 통해서 각 파라메터의 값을 정하였다.

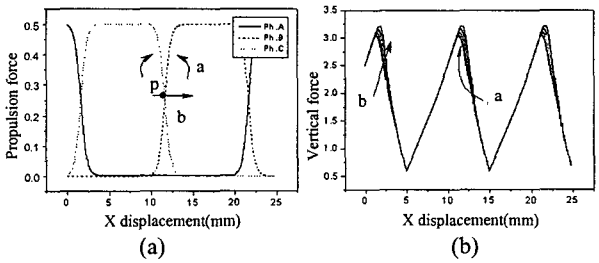
$$\text{Min. } \Phi(a,b) = \int_0^{pp} F_{zsum}(x)dx, \qquad (20)$$

s.t.

$$g_1 = -F_{zsum} < 0, \quad g_2 = \left|\frac{\Delta F_{xa}}{\Delta x}\right| - \varepsilon < 0,$$

$$g_3 = \left|\frac{\Delta F_{xb}}{\Delta x}\right| - \varepsilon < 0, \quad g_4 = \left|\frac{\Delta F_{xc}}{\Delta x}\right| - \varepsilon < 0$$

여기서, F_{zsum}는 이동자의 위치에 따른 a, b, c 상에서의 수직력의 총합을 나타낸다. 그리고 분배함수가 불연속일 경우, 함수의 구배가 큰 값으로 변하기 때문에 연속성확보를 위해 분배함수의 구배를 일정값이 넘어가지 않도록 구속조건을 두었다. Fig. 8 은 구성된 전체 제어시스템의 블록선도로 면내/면외방향의 제어기로 각각 구성되며, 면내방향에서의 제어력은 구간별 추진력분배와 스위칭에 의해서 발생된다. 그리고, 추진력에 동반되는 수직력은 면외 운동 제어기에 의해서 보상된다.



(a) (b)

Fig. 7 (a) phase forces ,(b) the total vertical force of all phases

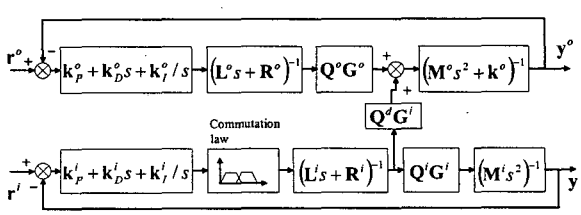


Fig. 8 Overall block diagram of closed-loop control system

5. 하드웨어 구성

Fig. 9 는 시스템 구성을 위해서 사용된 하드웨어 구성을 나타낸다. 이동자의 위치와 자세 측정을 위해 총 6 개의 변위센서가 사용되는데, 상부 고정자에는 3 개의 정전용량형 미소변위센서(S600-2, Micro-Epsilon, range: 2mm, res.:0.4 ㎛)가 설치되어 면외 방향 운동(z, α, β)을 측정하고, 외부 측면에는 3 개의 레이저 변위센서(PSD, Hamamatsu, range: 35mm, res.:3 ㎛)가 설치되어 면내 방향 운동(x, y, γ)을 측정한다. 제어를 위한 장치로는 PC 가 사용되었으며, 제어명령의 출력과 궤환 제어를 위한 입력 신호의 변환은 각각의 D/A(PCL-726,12bit, Advantech), A/D(PCL-817, 100KHz 16-bit, Advantech)보드를 이용하였다. 그리고 3 채널의 선형 파워증폭기(GA455P, Glentek)를 사용하여 부상용 전자석을 구동하고, 각 선형구동기마다 3 채널의 직류 전원이 사용되어 총 12 채널의 선형 파워증폭기가 사용되었다. 제작된 시스템의 사양과 서보장치는 Table 2 에 다시 정리하였다.

6. 실험 결과

제안된 시스템의 안정된 부상과 위치결정기구로의 가능성을 타진하기 위해 기초 실험을 수행하였다. 첫 번째로 SR 형 직선 대변위 운동기구로서의 가능성 타진을 위해 정속 직선운동실험을 수행하였다. Fig. 10 은 이에 대한 실험결과를 나타내는데, 일반 SR 형 구동기에서의 이동변위에 따라 주기적으로 발생하는 추진력의 요동(ripple)에 의한 영향이 수평변위와 수직변위에서 모두 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 이는 제안된 스위칭방식이 효과적으로 작용함을 의미한다. 그러나, Fig. 10(a)에서 원으로 확대된 특정부분을 보면 요동에 의한 영향이 아직 남아 있음을 확인할 수 있다. 그리고, Fig. 10(b)의 수직변위에서도 동일한 지점에서의 큰 요동을 여러 번의 실험을 통해 확인할 수 있었는데, 이는 주기적 성질보다 특정부분에서만 발생하는 것으로 확인되었다. 따라서, 이 특정부분에서의 요동현상은 스위칭시 전기적 위상과 기계적 위상간의 미스매치(mismatch)된 스위칭에 의한 것으로 확인되었다. 실제 Fig. 11 은 미스매치된 스위칭에 의한 결과를 나타내는데, Fig. 11(a)에서 이동자의 수평변위를 보면, 레이저 센서를 통해서 들어오는 위치정보와 실제 폴의 상대 위치가 불일치하여 이동자가 역방향으로 이동하다가, 제어기의 게인에 의한 영향으로 다시 순방향으로 진행하는 것을 확인할 수 있다. 또한

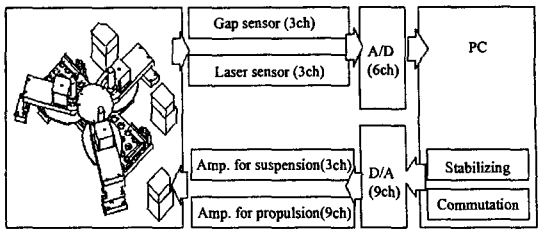


Fig. 9 Hardware setup of the magnetic suspension stage

Table 2 Specifications of the system including servo equipment

Item	Description	Specification
Mover	Mass Mass Moment of inertia	1.98kg I_{xx} : 0.48 $\times 10^{-2}$ kg m^2 I_{yy} : 0.11 $\times 10^{-2}$ kg m^2 I_{zz} : 0.16$\times 10^{-2}$ kg m^2
Force Mechanism	Suspension Propulsion	Attractive force Reluctance force
Work range	In-plane Out-of-plane	x-40, y-35mm z-1.0mm
Servo Equipment	Position feedback Power amplifier Data acquisition Digital filter	PSD S 1352 Micron-Epsilon S600-2 Glentek GA455P 16bit PCL-816 (A/D) 12bit PCL-726 (D/A) Chebychev I type

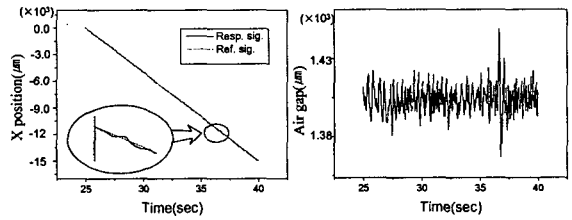


Fig. 10 Experimental results of constant velocity motion. (a) Horizontal displacement, (b) Air gap

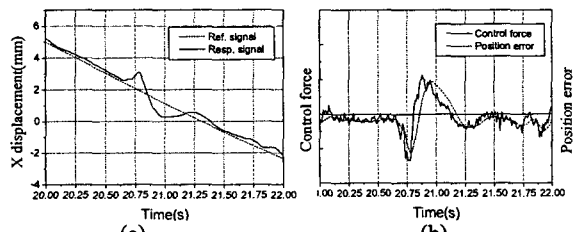


Fig. 11 Effects of mismatched switching, (a) Horizontal displacement, (b) control force and position error

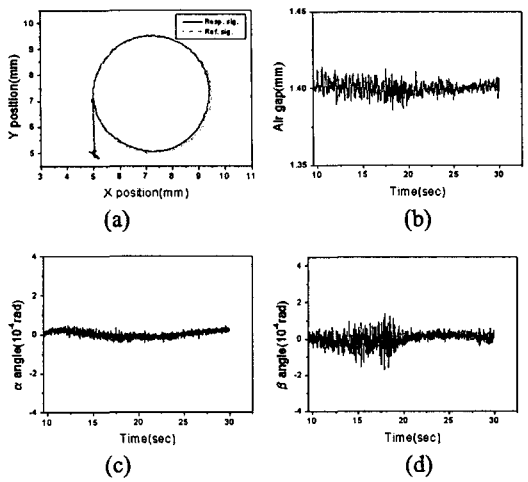


Fig. 12 Experimental results of 4.5mm diameter circle motion. (a) x, y positions, (b) Air gap, (c) α response, (d) β response

Fig. 11(b)에서의 센서를 통한 위치 오차와 제어입력에서도 극단적인 상황으로 위치오차와 제어입력의 부호가 상반되는 것을 확인할 수 있다.

미스매치 스위칭의 원인은 외부 센서 좌표계와 이동자 좌표계의 불일치와 전자석에서 폴 가공에서의 기계적 가공오차로 정리할 수 있다. 이중, 첫 번째 원인은 여러 보정작업을 통한 실험을 수행하였기 배제할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서의 미스매치 스위칭은 기계 가공오차에 의한 것으로 파악되었다. 실제로 자기특성을 향상시키기 위해 규소강판을 적층하여 전자석을 제작하였는데, 이 전자석 폴의 폭과 간격이 일정하지 않은 것으로 확인되었다. 따라서, 향후 시스템 성능 개선시 전자석 가공오차 향상을 통해서 미스매치 스위칭을 방지할 수 있을 것으로 기대된다.

두 번째로 평면위치결정기구로서의 가능성타진을 위해 평면운동(x-y)실험을 수행하였다. 평면위치결정기구에서의 위치결정성능은 각 자유도간의 연성(cross-talk)을 줄이는 것이 관건인데, 특히나 자기부상시스템에서는 부상되는 이동자가 어떠한 기구에 의해서도 구속되지 않기 때문에 자유도간의 연성이 줄이는 것이 기구학적 설계와 제어측면에서 더욱 중요하다. Fig. 12 는 제작된 시스템을 이용하여 원궤적 운동을 수행한 결과로서, 자유도간 연성측면에서 설계된 부상용전자석과 추진용 전자석의 형태가 효율적임을 알 수 있다. 이 실험에서는 미스매치 스위칭이 일어나는 영역을 피해 실험을 하였기 때문에 앞 서와 같은 큰 요동은 피할 수 있었다. 하지만 궤적추종성능에 있어서 최대 50 ㎛의 오차를 나타냈는데, 오차가 크게 나타난 이유는 본 연구에서 제안하는 SR 형 자기부상시스템에서는 이동자와 고정자의 상대위치에 의해 스위칭이 발생하기 때문에 3 ㎛라는 변위센서의 분해능이 완벽한 스위칭을 보장하기엔 충분하지 않을 수 있으며, 또한 앞서 지적된 가공오차의 누적, 그리고 선형제어기의 성능한계를 원인으로 둘 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안하는 SR 형 추진원리를 기반으로 하는 자기부상시스템에서는 이동자와 고정자간의 정밀한 상대위치의 확보가 우선되어야 한다.

7. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 향 후 초정밀 가공공정에 적용 가능한 위치결정기구의 개발을 위하여 낮은 열발생율과 높은 추진력의 확보가 가능한 SR 추진원리에 기초한 자기부상형 위치결정기구를 개발하였다. SR 형 구동기에서 단점으로 지적되는 추진력의 요동문제를 해결하기 위해 sigmoid 함수형태의 힘분배함수를 제시하였고, 시스템 구축을 통해서 직선구동기와 평면위치결정기구의 적용가능성을 타진하였다.

향후 성능개선을 위해 진행되어야 할 사항으로는 미스매치 스위칭 방지를 위한 이동자와 고정자간의 정밀한 상대위치 확보, 동적강성을 높이기 위한 방안으로 현 단계에서는 외란으로 취급된 추진력에 동반된 수직력의 활용, 외란에 대해 더욱 강건하고 자기요소의 비선형을 보상할 수 있는 제어기의 적용이 고려된다.

후 기

이 논문은 2005 년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-042-D00019)

참고문헌

(1) Toriumi, M., 1991, "Positioning Techniques in Semiconductor Manufacturing Equipment," *JSPE*, Vol. 57, pp.24~28.

(2) Jin, J. and Higuchi, T., 1997, "Direct Electrostatic Levitation and Propulsion," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 44, No. 2, pp. 234~239.

(3) Jin, J., Yih, C., Higuchi, T. and Jeon, J. U., 1998, "Direct Electrostatic Levitation and Propulsion of Silicon Wafer," *IEEE Trans Indust. Applications*, Vol. 34 No. 5, pp. 975~984.

(4) Kim, W. J. and Trumper, D. L., 1998, "High-Precision Magnetic Levitation Stage for Photolithography," Precision Eng., Vol. 22, No. 2 , pp. 66~77.

(5) Sawyer, B. A., Dec. 24. 1974, "Actuating System," U.S. Patent 3 857 078.
(6) Tomita, Y. and Koyanagawa, Y., 1998, "Study on a Surface Motor Driven Precise Positioning System," *J. Dyn. Syst., Meas. Contr.*, Vol. 3, No. 2, pp. 113~119.
(7) Jung, K. S., Lee, S.H. and Baek, Y. S., 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. 267, No. 3, pp. 452~460.
(8) Roters, H. C., 1951, Electromagnetic Devices, John Wiley & Sons, Inc.