

자기 흡인식 부상 원리에 기초한 비접촉식 서피스 액추에이터의 초정밀 범용 스테이지에의 적용 가능성

정광석[†] · 이상현* · 백윤수**

(2001년 5월 15일 접수, 2001년 12월 17일 심사완료)

Feasibility Study of General-purpose Precision Stage Using A Novel Contact-Free Surface Actuator Based on Magnetic Suspension Technology

Kwang Suk Jung, Sang Heon Lee and Yoon Su Baek

Key Words : Surface actuator(서피스 액추에이터), Magnetic Suspension(자기 지지), Precision Stage(정밀 스테이지), Exposure equipment(노광 장비)

Abstract

The precision stage using a novel contact-free planar actuator based on magnetic forces, magnetized force and Lorentz force, is suggested. In the promising magnetic structure, the mover is driven directly without any transmission mechanism, and doesn't need any auxiliary driver for its posture calibration. Then it is estimated that the proposed operating principle is very suitable for work requiring high accuracy and cleanness, or general-purpose nano-stage. In this paper, we discuss a driving principle of the planar system including the magnetic force generation mechanism, a framework for the force model, governing characteristics of the levitated plate, and a planar motion control of the constructed prototype. And experimental results are given to verify the derived theoretical model and a feasibility of the system.

1. 서 론

반도체 웨이퍼 위에 전자 회로를 생성하거나 액정 표시 장치(liquid crystal display) 기판 위에 전자 회로를 생성 시키기 위해서는 전자 회로를 새긴 패턴이 필요한데 이러한 패턴이 새겨져 있는 유리 원판을 레티클(reticle)이라 한다. 레티클 상의 패턴을 웨이퍼 위나 액정 표시 장치 기판 위에 새기는 장치인 노광 장비에서는 레티클이나 웨이퍼를 각각의 스테이지의 원하는 위치에 얼마나 정확하게 위치시킬 수 있는가가 대단히 중요하다.⁽¹⁻³⁾ 근자에 들어 수십 나노 미터 이하의 회로 선폭을 갖는 반도체 공정 기술이 개발되고 있고 일괄 공정의 효율성 증대를 위해 웨이퍼 사이즈의 크기는

12 인치에 육박하고 있다. 따라서 웨이퍼 표면 가공 오차나 광원의 왜곡 그리고 공정 상의 결함에 의한 오차 등은 차치하더라도 나노 선폭에 대응하기 위해 웨이퍼 스테퍼 스테이지나 마스크 스테이지에서 요구되는 정렬 정확도(alignment accuracy)나 중첩 정확도는 훨씬 더 엄격해지고 있다. 따라서 조미동(coarse and fine motion) 각도 보정 장치가 필수적으로 추가되기 때문에 그러한 장비는 고정도의 평면 운동 뿐만 아니라 스테이지 자체의 자세 보정을 위해 다 자유도의 복잡한 메커니즘을 갖는 구동기를 필요로 한다.^(4,5) 본 연구에서는 이러한 성능 요구에 부합하기 위해 자기 지지(magnetic suspension)에 기초한 새로운 형태의 비접촉식 서피스(surface) 액추에이터를 이용한 정밀 스테이지에 대해 논한다.

본 연구에서 개발된 시스템은 반도체 칩의 고정밀화에 기인하는 고정밀도와 초정밀이라는 엄격한 성능 요구에 부합하기 위해 가동부와 고정단의 기계적인 마찰을 배제하고 웨어 입자의 발생을 억제하기 위해 가동부를 고정단으로부터 분리 시

[†] 책임저자, 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

E-mail : jungks88@hanmail.net

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

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 연세대학교 기계전자공학부

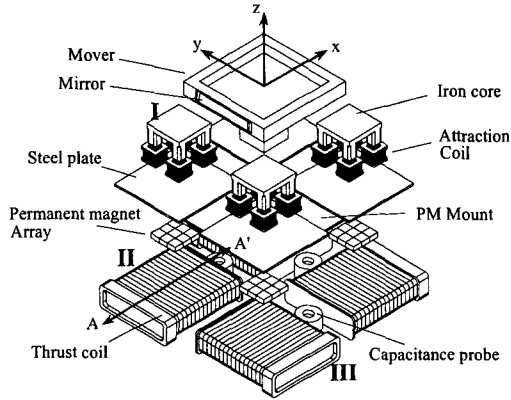


Fig. 1 Perspective layout of the suggested surface actuator

켰으며 부상용 구동기를 이용하여 가동부의 자세를 보정할 수 있는 일체화된 구동 원리를 갖는다. 제안된 시스템의 원형이 비록 제한된 정밀도와 대역폭을 제공하지만 자기 지지 기술을 이용하는 시스템의 성능 한계는 대개 적용하는 측정 기구와 제어 기법에 달려있기 때문에 그 시스템의 분해능 한계는 이론적으로 존재하지 않는다.^(6,7) 즉, 제안된 시스템의 성능은 서보 의존(servomotor dependent) 특성을 갖으므로 이후 고정도 서보 장비의 장착에 의해 성능이 더욱 향상 될 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 제안된 시스템의 구동 원리는 수 밀리 내지 수 센티의 작업 영역을 갖는 그리고 자세 보정을 위한 별도의 구동기가 필요 없는 범용 나노 스테이지 구현에 적합한 방식인 것으로 판단된다. 본 논문에서는 제안된 시스템의 추력 발생 메커니즘과 구동력 모델링을 포함하여 가동부의 공간 운동을 묘사하는 작동 원리와 시스템의 지배 방정식이 논의된다. 또한 유도된 모델의 검증과 구축된 시스템의 성능 평가를 위한 시험 결과가 제시된다.

2. 시스템 구동 원리

비접촉식 평면 액추에이터는 기본적으로 연결 메커니즘이나 변환 메커니즘을 사용하지 않고 가동부와 고정 단이 마주 보고 있는 접합면에서 모든 부상력과 추력을 만들어 내기 때문에 구조가 대단히 단순해 질 수 있다.^(8,9) 특히 가동부는 고정단에 놓인 능동 자기 요소로부터 다이렉트로 구동되는 즉, 단일 서보 방식에 의해 제어되기 때문에 아래 서술되어있는 것과 같은 이중 구동기가 갖는 일반적인 단점을 극복할 수 있다. 즉 이중 구동기는 내재된 조동(coarse) 구동기와 미동(fine) 구동기 사이의 전이 시간으로 인해 전체 시스템 대역폭에

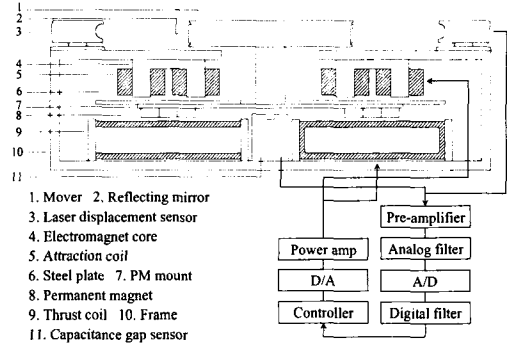


Fig. 2 Cross-sectional configuration of the entire system including hardware setup

제한이 따르며 압전 소자로 대변되는 미동 구동기의 성능 저하를 야기시킨다. 또한 지나친 제작비와 보정 시험의 난이함 그리고 복잡한 제어기 구조를 갖는다.⁽¹⁰⁾ 따라서 컴팩트한 구조와 위에 언급된 이중 구동기의 단점 극복은 직접 구동 평면 액추에이터가 범용 나노 스테이지의 구동 원리로서 상당한 장점을 갖는 것을 간접적으로 시사한다.

2.1 비접촉식 평면 액추에이터 개념 설계 및 하드웨어 구성

제안된 비접촉식 평면 구동기를 이용한 정밀 스테이지의 부상력, 추력 발생 메커니즘을 설명하는 간략화 한 사영 개념도를 Fig. 1 에 그리고 단면도를 서보 장비 구성과 함께 Fig. 2 에 나타낸다. 고정단의 맨 아래에 면내(in-plane, i.e. x, y) 운동을 위한 사각 공심(air-core) 코일이 놓여 있고 그 코일과 상호 작용하는 배열 형태의 영구 자석이 그 위에 그리고 영구 자석이 부착 되어있는 평판과 결합되어있는 강자성 평판이 그 위에 있고 이 평판과 조합하여 면외(out-of-plane, i.e. z, α, β) 운동을 위한 흡인력을 발생시키는 전자석이 상부 고정단에 부착되어있다. 수동 자기 소자인 영구 자석을 포함하는 평판과 강자성 평판은 상부의 가동부 즉 스테이지와 지지 프레임으로 연결되어있다. 따라서 스테이지의 평면 이동 범위(planar workspace)는 스테이지의 지지 프레임이 상단 철심 전자석들과 간섭을 일으키지 않으면서 이동할 수 있는 거리이며 큰 파워를 갖는 소자 선택에 의해 이러한 범위는 더욱 증가될 수 있다. 실제로 구축된 원형은 x, y 축으로 약 60mm의 구동 범위를 갖고 있으며 z 축 방향으로는 약 1.5mm의 범위를 갖는다. 자기적으로 부상되어 움직이는 평판의 공극(air-gap)을 포함한 평판 면외 운동은 고정단에 놓여 있는 세 개의 커패시턴스(capacitance) 타입 갭 센

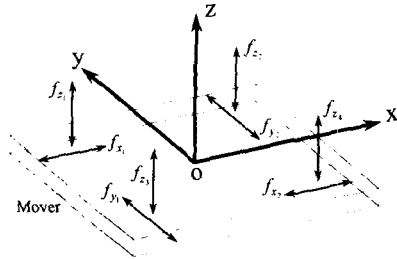


Fig. 3 Direction of primary force acting on mover

서를 통해 검출하고 면내 운동은 평판에 부착된 거울에 반사되는 레이저를 위치 민감 기구 (position sensitive detectors)에 조사 시켜 검출한다. 따라서 평판은 고정 단으로부터 파워 또는 변환기 (transducer)와의 와이어 연결 없이 완전히 분리되어 운동하는 것이 가능하다. 또한 제안된 시스템은 스테이지의 평면 운동에 상관없이 법선 방향 운동 소자의 상호 조건이 동일하고 평면 운동을 위해 직접 구동 방식의 직류 공심 코일과 영구 자석간의 상호 작용을 이용하기 때문에 자기 포화 현상등이 존재치 않으며 자기 상호 작용의 모델링이 다상 코일 구동 방식에 비해 대단히 간단하다. 따라서 일반적으로 자기 현상에 수반되는 시스템의 불확실성이 아주 적기 때문에 정밀 구동 운동을 제한하는 이론적인 한계가 존재하지 않는다.

2.2 구동력 발생 메커니즘

타입 I, II, III 코일에 전류를 인가하면 평판에는 Fig. 3 에 보이는 화살표 방향으로 자기력이 작용한다. Fig. 1 에서 자기 대우(magnetic pair)간의 상대 자세를 통해 알 수 있는 것처럼 타입 I 즉, z 축 방향의 서스펜션 힘은 자성체들간의 흡인력을 이용한 자화력(magnetized force)이고 타입 II 와 III 에 의한 추력은 영구 자석에 의해 생성되는 자기장과 코일에 유기된 전류와의 상관 관계를 이용한 로렌츠 힘(Lorentz force)이라는 것을 알 수 있다. 따라서 상부 고정 단의 네 모서리에 놓여 있는 타입 I 의 전자석을 통해 별도의 구동기 없이 스테이지의 미세한 자세 보정이 가능하다. 이러한 세 축 방향 힘의 조합을 통해 공간상에서 스테이지의 부상된 평면 운동, 즉 6 자유도 운동이 구현된다.

3. 구동력 모델링

전장에서 언급한 것처럼 제안된 정밀 스테이지에서는 가동부의 무게를 보상하고 자기 요소들간

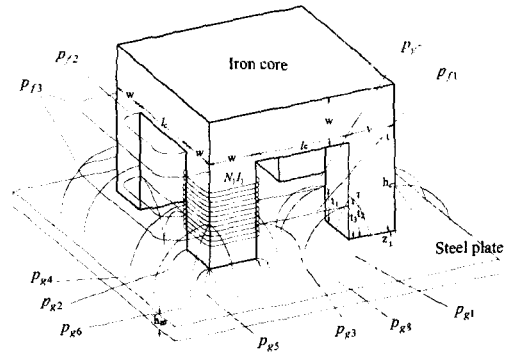


Fig. 4 Magnetic flux path and its permeance description for suspension force element

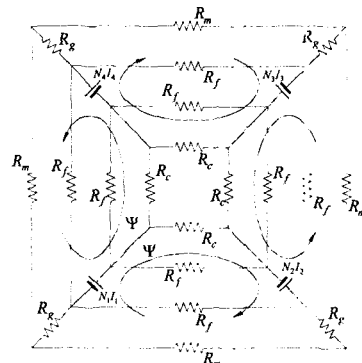


Fig. 5 Equivalent magnetic circuit for Fig. 4

의 공극을 조절하기 위해 철심 전자석과 강자성체 사이의 흡인력을 이용한다. 이러한 자기 조합의 경우 가동부의 평면 운동에 상관없이 공극이 일정하게 유지되기 때문에 자기 요소들이 동일한 상대 조건과 상대 자세를 취한다는 장점이 있으며 비접촉식 시스템의 가장 중요한 동특성이 가동부의 안정성 유지라는 측면에서 판단하면 이러한 자기 요소의 조합은 바람직하다 할 수 있다. 즉 강자성 평판의 크기는 평면 작업 영역을 커버하기 때문에 공극이 일정하게 유지되면 자기 요소간의 상대 자세에 변화가 존재하지 않으므로 그 흡인력에 변함이 없다. 또한 가동부의 추진 운동을 위해서는 사각 단면의 중첩된 공심 코일과 영구 자석과의 상호 작용을 이용한다. 여기에서는 이러한 자기력의 모델링 작업을 자기 회로(magnetic circuit) 방법과 중첩(superposition) 원리를 이용하여 수행한다.

3.1 자기 회로를 이용한 흡인력 모델

Fig. 4 는 흡인력을 위한 철심 전자석과 강자성 평판 사이의 기자력(magnetomotive force)에 의한

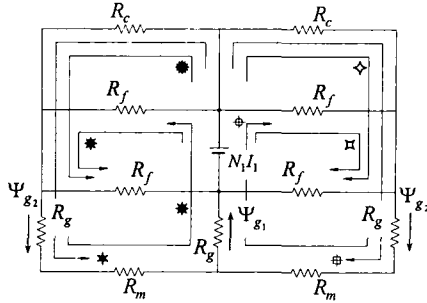


Fig. 6 Eight closed circuits by magnetomotive force N_1I_1

프린징(fringing), 리키지(leakage) 또는 누설 요소를 모두 포함한 자속 경로 또는 자로(magnetic flux path)를 도시한 것이다. 이러한 부류의 자기 상호 작용을 정량화 하기 위해 자기 회로 방법을 이용 하면 Fig. 4는 결국 Fig. 5와 같은 등가 회로로 간략화 할 수 있다. 단, Fig. 4에서는 복잡함을 피하기 위해 기자력 N_1I_1 만이 표시되어 있다. 우선 Fig. 4의 각 방향 자로의 자기 퍼미언스(magnetic permeance)를 구하면⁽¹¹⁾

$$\begin{aligned}
 p_{g_1} &= \frac{\mu_0 w^2}{2}, \quad p_{g_2} = 2 \times 0.26 \mu_0 w, \\
 p_{g_3} &= \frac{2\mu_0 w}{\pi} \ln \frac{z+t_1}{z} \quad (\text{here, } t_1 = \frac{l_c}{\pi} - z), \\
 p_{g_4} &= \frac{2\mu_0 w}{\pi} \ln \frac{z+t_2}{z}, \quad p_{g_5} = 0.308 \mu_0 z, \\
 p_{g_6} &= 0.5 \mu_0 t_2, \quad p_{g_7} = 0.5 \mu_0 t_1, \quad p_{g_8} = 0.5 \mu_0 t_3 \\
 p_{f_1} &= \frac{\mu_0 (h_c - t_1) w}{l_c}, \quad p_{f_2} = 0.26 \mu_0 (h_c - t_1), \\
 p_{f_3} &= \frac{\mu_0 (h_c - t_1) \ln \frac{l_c + 2w}{l_c}}{\pi} \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기에서 μ_0 는 자유 공간의 투자율이다. 따라서 각 자로의 퍼미언스 (1)을 고려하면 전체 공극 자기 저항(magnetic reluctance)과 누설 자기 저항은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 R_g &= \frac{1}{p_{g_1} + 4p_{g_2} + 2p_{g_3} + 2p_{g_4} + 4p_{g_5} + p_{g_6} + p_{g_7} + 2p_{g_8}} \\
 R_f &= \frac{1}{p_{f_1} + p_{f_2} + p_{f_3}} \quad (2)
 \end{aligned}$$

또한 앞서 언급한 누설 요소는 철심의 자기 투자율을 한정시키대 기인하므로 Fig. 5에 묘사되어 있는 것처럼 철심과 강자성 평판의 퍼미언스를 구하면

$$p_c = \frac{\mu_0 \mu_c w^2}{2h_c + l_c + w}, \quad p_m = \frac{\mu_0 \mu_m w h_m}{l_c + w} \quad (3)$$

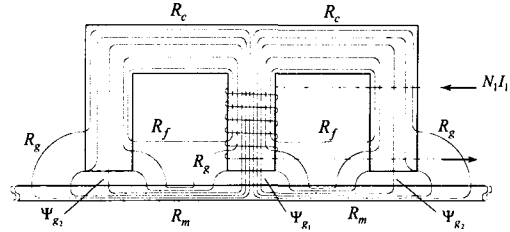


Fig. 7 Visualized magnetic flux pattern by N_1I_1

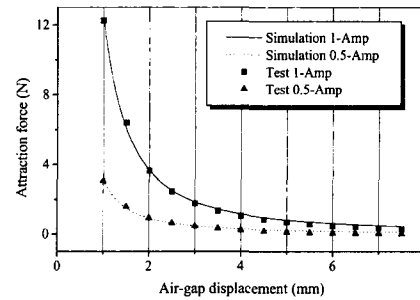


Fig. 8 Comparison result of theoretical model for the suspension force with experiment

여기에서 μ_c 와 μ_m 은 철심과 강자성 평판의 자기 투자율을 나타낸다. 기자력 N_1I_1 에 대해서만 자기 회로를 구성하면 Fig. 6과 같고 실제 자속 형상은 Fig. 7에 묘사된 것과 같이 간략화 할 수 있다. Fig. 6에서 N_1I_1 에 기인하는 8개의 폐회로에 회로 법칙을 이용하여 각 공극에서의 자속을 구하면 다음과 같다.

$$\Psi_{g_1} = 2\Psi_{g_2} = \frac{2NI(R_c + R_f)}{R_f(3R_g + R_m) + R_c(R_f + 6R_g + 2R_m)} \quad (4)$$

따라서 기자력 N_1I_1 에 기인하는 흡인력은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$F_t = \frac{\partial W_t}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{3}{4} \Psi_{g_1}^2 R_g \right) = \frac{3}{4} (2\Psi_{g_1} R_g \frac{\partial \Psi_{g_1}}{\partial z} + \Psi_{g_1}^2 \frac{\partial R_g}{\partial z}) \quad (5)$$

Fig. 4에 주어진 철심은 서로 연결되어 있는 N_1I_1 와 같은 기자력 소스를 네 개 갖고 있으며 동시에 네 개의 폴을 갖고 있으므로 전체 힘은 (5)에 주어진 크기의 네 배에 해당한다. 위의 유도 식과 실제 실험값을 비교한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

3.2 중첩 원리를 이용한 추력 모델

추력을 위한 자기 요소들간의 상대 자세를 통

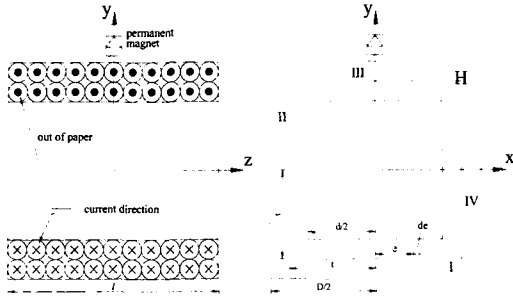


Fig. 9 Base coordinate frame of thrust force element

해 추론 할 수 있는 것처럼 결국 추력은 Fig. 9 에서와 같이 코일의 축과 서로 직교 상태에 놓여있는 영구 자석에 작용하는 힘으로 집약될 수 있다. 이때 사용된 영구 자석은 강한 응집력(coercive force)과 보자력(residual strength)을 갖는 네오뉘(Neodymium-Boron-Iron) 계열의 영구 자석이므로 코일의 자기장 변화에 의한 영구 자석의 비자화 효과(demagnetization effect)를 고려할 필요가 없으므로 영구 자석을 자기 쌍극자 모멘트(magnetic dipole moment)로 가정하면 자기 대우간에 발생하는 힘은 다음과 같이 로렌쯔 법칙의 변형된 형태에 의해 구하는 것이 가능하다.⁽¹²⁾

$$\mathbf{F} = \mathbf{m} \cdot \nabla \mathbf{B} \quad (6)$$

여기에서 m 은 자기 쌍극자 모멘트를 나타낸다. 그러므로 추력의 모델링은 코일이 만들어 내는 자기장 구배(magnetic field gradient)의 정확한 정량화에 달려있는 것을 알 수 있다.

구동기를 구성하는 추진 코일의 기준 좌표계를 묘사하는 Fig. 9 는 사영도 Fig. 1 에 도시된 추진 코일의 AA' 단면도를 나타내는데, 강자성체에 의해 야기되는 비선형 특성을 배제하기 위해 구동 코일은 모두 공심 형태를 취한다. 고정자에 놓여있는 다중 겹 공심 코일은 모두 Fig. 9 에서처럼 정사각 고리 H 의 중첩된 형태로 가정할 수 있으므로 하나의 고리에 의해 발생하는 자기장을 코일의 감은 수 N 만큼 중첩시켜 비교적 정확한 근사해를 얻을 수 있다.⁽¹³⁾

우선 전류 I 가 인가된 고리 H 의 선소 de 에 의해 (x, y, z) 에 발생하는 자기장 B_e 의 값은

$$\mathbf{B}_e(x, y, z) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_S \frac{d\mathbf{e} \times \mathbf{S}}{S^3} \quad (7)$$

여기에서 S 는 원점으로부터 측정 점까지의 벡터를 나타낸다. 실제로 고리 H 의 각 면 I, II, III,

IV 에 대해 S 의 요소를 각각 대입하면 각 면에 의한 자기장의 값은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$B_I = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-t}^t \frac{-de\hat{x} \times [(x-e)\hat{x} + (y+t)\hat{y} + z\hat{z}]}{\sqrt{(x-e)^2 + (y+t)^2 + z^2}^3}$$

$$B_{II} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-t}^t \frac{de\hat{y} \times [(x+t)\hat{x} + (y-e)\hat{y} + z\hat{z}]}{\sqrt{(x+t)^2 + (y-e)^2 + z^2}^3}$$

$$B_{III} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-t}^t \frac{de\hat{x} \times [(x-e)\hat{x} + (y-t)\hat{y} + z\hat{z}]}{\sqrt{(x-e)^2 + (y-t)^2 + z^2}^3}$$

$$B_{IV} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_t^{-t} \frac{-de\hat{y} \times [(x-t)\hat{x} + (y-e)\hat{y} + z\hat{z}]}{\sqrt{(x-t)^2 + (y-e)^2 + z^2}^3}$$

위에 주어진 식들의 적분을 수행하고 네 요소의 합을 구하면 다음과 같이 고리 H 에 의한 자기장의 각 방향 성분을 얻는 것이 가능하다.⁽¹⁴⁾

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j-1} \frac{z}{z^2 + f_i^2} \cdot \frac{g_j}{\sqrt{z^2 + f_i^2 + g_j^2}} \quad (8)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j-1} \frac{z}{z^2 + g_j^2} \cdot \frac{f_i}{\sqrt{z^2 + f_i^2 + g_j^2}} \quad (9)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \left[\left(\frac{1}{z^2 + f_i^2} + \frac{1}{z^2 + g_j^2} \right) \cdot \frac{f_i \cdot g_j}{\sqrt{z^2 + f_i^2 + g_j^2}} \right] \quad (10)$$

여기에서 f_1, f_2, g_1, g_2 는 각각 $(x+t), (x-t), (y+t), (y-t)$ 를 의미한다. 위의 개념을 확장하여 고정자에 놓여있는 코일에 의해 임의의 위치에 생성되는 자기장의 값을 구할 수 있다. 즉 (8), (9), (10)에 주어진 자기장을 가로 방향, 길이 방향으로 적분하고 그 평균값을 구한 후에 전체 코일의 감은 수를 곱해주면 (11)과 같은 전체 자기장의 값을 구할 수 있는데 코일 감은수가 상당히 크기 때문에 적절한 가정이라 할 수 있다.

$$B_k(x, y, z) = \frac{\mu_0 NI}{2\pi(D-d)l} \int_{z-1/2}^{z+1/2} \int_{d/2}^{D/2} B_k|_h dt dz \quad (11)$$

여기에서 k 는 x, y, z 를 나타낸다. 자기 쌍극자가 y 방향으로 놓여 있다고 가정하고 (11)을 (6)에 대입하면 자기력은 폐형해가 복잡하지만 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$F_k(x, y, z) = \frac{\mu_0 m_y NI}{2\pi(D-d)l} \int_{z-1/2}^{z+1/2} \int_{d/2}^{D/2} \frac{\partial}{\partial y} [B_k|_H] dt dz \quad (12)$$

코일에 전류를 인가하면 위에서 유도된 힘이 영구 자석을 포함하는 평판에 작용한다. 그러나 Fig. 9 와 (12)에서 알 수 있듯이 영구 자석이 이동

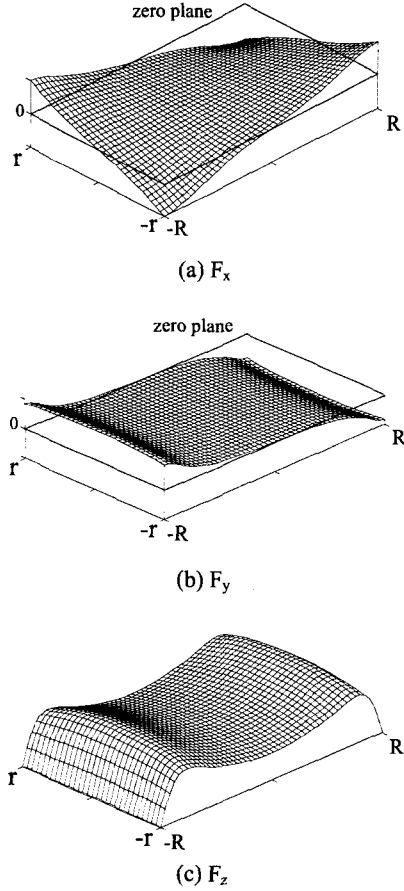


Fig. 10 Three-dimensional distributions of thrust force and forces accompanying it for a planar movement of the levitated stage

함에 따라 대칭성이 깨지기 때문에 추력 코일에 의해 발생하는 자기장과 영구 자석간의 상호 작용에 의해 부수적으로 영구 자석에 자기 저항력 (magnetic reluctance force)이 존재한다. 그러한 힘의 폐형해는 위의 식을 적분하여 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F_x &= m_y \frac{\partial B_x}{\partial y} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{j-1} \tanh^{-1} \left(\frac{\sqrt{2} \sqrt{f_i^2 + g_j^2 + z^2}}{f_i + (-1)^{i+j} g_j} \right) \\
 F_y &= m_y \frac{\partial B_y}{\partial y} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 [(-1)^{j-1} \tanh^{-1} \frac{\sqrt{f_i^2 + g_j^2 + z^2}}{f_i} \\
 &\quad + \frac{(-1)^j}{\sqrt{2}} \tanh^{-1} \frac{\sqrt{2} \sqrt{f_i^2 + g_j^2 + z^2}}{f_i + (-1)^{i+j} g_j}]
 \end{aligned} \tag{13}$$

위의 식 (12)와 (13)을 이용하여 영구 자석의 이동에 따른 자기력의 3 차원 분포를 Fig. 10에 나타내었다. 예상할 수 있는 것처럼 자기력은 모두 축대칭인 것을 알 수 있다.

4. 부상 평판의 동특성 모델

Fig. 1 과 2 에 주어진 개발된 시스템의 완전한 특성 확립은 평판의 동특성 동정(identification) 과정을 필요로 한다. 여기에서는 앞서 유도된 단일 요소 조합에 대한 흡인력, 추력 모델링을 기초로 평판의 지배 방정식이 모델링 된다. 이 때 평판과 고정자 사이의 공극을 통한 공기 마찰과 고정자에 놓인 코일의 자기장 변화에 의해 도전체인 평판에 유기되는 유도 전류(induced current)에 의한 뎀핑 효과는 무시할 수 있다고 가정한다.

앞서 언급한 것처럼 구축된 비접촉식 평면 시스템은 부상 운동과 추진 운동을 위해 별도의 구동 요소를 갖고 있다. 따라서 부상되어 움직이는 평판의 동특성은 부상과 추진 각각에 따라 다르다. 그러나 평판은 고정단과 아무런 와이어 연결 없이 공간상에 부상되어있기 때문에 하나의 강체로 모델링하는 것이 가능하다. 따라서 동적 모델링 과정이 매우 간단하다.

먼저 부상 운동의 경우 공칭 위치 주변의 작은 구간에서 네 개의 강자성 평판에 작용하는 힘의 변분을 선형화하고 평판의 무게를 공칭 입력에 의해 소거 시킨 후에 최종 식에서 δ 를 제거하면 공칭 위치 주변에서 동특성은 다음과 같은 지배 방정식으로 표현할 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$\mathbf{M}^o \ddot{\mathbf{p}}^o + \mathbf{K}^o \mathbf{p}^o = \mathbf{Q}^o \mathbf{G}^o \mathbf{i}^o \tag{14}$$

여기에서 상 첨자 o 는 평판의 법선 방향 운동 즉, 면의 운동을 위한 인덱스를 나타낸다. $\mathbf{M}^o = \text{diag}[m, I_{xx}, I_{yy}]$ 는 관성 행렬을 그리고 $\mathbf{K}^o = \text{diag}[4k, -4k\tau^2, -4k\tau^2]$ 는 강성 행렬을 나타내며 $\mathbf{p}^o = [z, \alpha, \beta]^T$ 는 위치 벡터를 그리고 $\mathbf{i}^o = [i_{z1}, i_{z2}, i_{z3}, i_{z4}]^T$ 는 인가 전류 벡터를 의미한다. 실제로 강성 계수 k 는 식 (12)의 부상력 F_z 를 공극의 법선 방향 좌표계 z 에 대해 테일러 급수 전개하여 얻어진 값이다. 힘 인가 위치 행렬 \mathbf{Q}^o 는 Fig. 11의 힘 도식을 통하여 유도된다.

$$\mathbf{Q}^o = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ \tau & \tau & -\tau & -\tau \\ \tau & -\tau & \tau & -\tau \end{bmatrix} \tag{15}$$

또한 부상 운동용 자기 요소에 대한 전체 전압 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$\mathbf{L}^o \dot{\mathbf{i}}^o + \mathbf{R}^o \mathbf{i}^o = \mathbf{u}^o - \mathbf{G}_s^o \mathbf{Q}^{oT} \mathbf{p}^o \tag{16}$$

여기에서 \mathbf{L}^o 는 코일의 자기 인덕턴스 행렬을 그

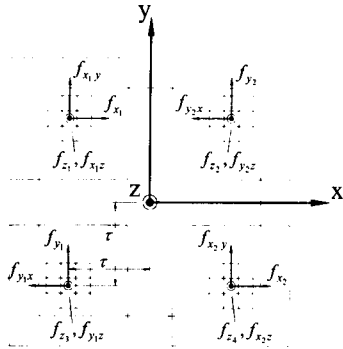


Fig. 11 Force driving location diagram

리고 R^0 는 저항 행렬을 나타낸다. 또한 u^0 는 제어 입력 벡터를 의미하고 G_b^0 는 역기전력 상수 행렬을 나타내는데 역기전력 상수는 직류 모터의 해석에서와 같이 힘 상수와 동일하다고 가정한다.

흡인력과 달리 추력에는 스프링 특성이 존재하지 않으므로 공칭 전류는 제로이다. 따라서 면내 운동에 대한 선형화 된 지배 방정식은

$$M^i \ddot{p}^i = Q^i G^i i^i \tag{17}$$

$$L^i i^i + R^i i^i = u^i - G_b^i Q^{iT} \dot{p}^i \tag{18}$$

여기에서 상첨자 i 는 평판에 평행한 운동에 대한 인덱스를 나타내고 $M^i = \text{diag}[m, m, I_{zz}]$ 는 관성 행렬을 그리고 $p^i = [x, y, \psi]^T$ 는 위치 벡터를 그리고 $i^i = [i_{x1}, i_{x2}, i_{y1}, i_{y2}]^T$ 는 인가 전류 벡터를 나타낸다. 또한 힘 인가 위치 행렬 Q^i 는 다음과 같이 표현된다. (Fig. 11)

$$Q^i = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ -\tau & \tau & -\tau & \tau \end{bmatrix} \tag{19}$$

5. 하드웨어 구축 및 시험 결과

제안된 비접촉식 평면 시스템을 이용한 정밀 스테이지의 가능성을 확인하기 위하여 구축된 원형에 대한 실험이 수행되었다. Fig. 2에 묘사되어 있는 것처럼 스테이지의 공극 정보는 커패시턴스 갭 센서 S600-2(Micro-Epsilon)로 측정되고 평판의 이동량은 평판 위에 설치된 거울을 통하여 PSD S1352(Hamamatsu co.)에 조사되는 675nm 레이저 다이오드의 스폿(spot) 위치를 측정하여 계산된다. 이러한 변위 신호는 약 100Hz의 차단 주파수(cut

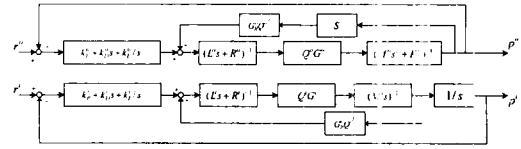


Fig. 12 Decoupled overall control block diagram

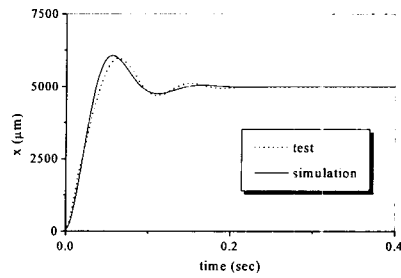


Fig. 13 Verification of the derived thrust model (5000 μm step input in x-axis direction)

off frequency)를 갖는 저대역(low bandwidth) 통과 필터를 거쳐 100KHz 16-bit PCL-816 아날로그-디지털 변환기(Advantech co.)에서 디지털 신호로 변환된 후 변환기의 정량 오차를 보상하기 위해 Chebyshev 디지털 필터에서 처리된다. 최종 신호는 제어 루프로 되먹임 되고 계산된 제어 입력이 12-bit PCL-726 디지털-아날로그 변환기(Advantech co.)를 통해 아날로그 신호로 변환된 후 아날로그 신호에 해당하는 전류가 선형 서보 증폭기 Glentek GA455P를 통해 각 코일에 인가된다.

전장에 유도된 부상, 추진 운동에 대한 선형 동적 방정식과 전압 방정식 그리고 전통적인 비례, 미분, 적분 제어기를 이용한 제어 기법을 포함한 전체 제어 블록 다이어그램이 Fig. 12에 나타나 있다. 유도된 지배 방정식에서 볼 수 있듯이 제안된 시스템은 부상, 추진 운동이 독립적인 구동 원리를 갖고 있기 때문에 각각의 운동에 대해 별도의 제어기 구조를 갖는다. 이러한 구조가 시스템 자유도간에 아무런 연성이 존재하지 않는다는 것을 의미하지는 않는다.

앞서 Fig. 8에서 묘사된 자기 흡인력에 대한 이론 모델 검증 시험에 추가하여 추력 모델에 대한 검증 작업을 위한 동특성 시험이 수행되었다. Fig. 13은 3, 4장에서 유도된 평판의 추진 운동에 대한 동특성 시험과 시뮬레이션과의 비교 결과이며 면내 운동 측정을 위한 서보 장비의 위치 분해능에 해당하는 약 500nm의 정상 상태 오차를 갖는다. 검증 결과

의 타당성 여부를 논하기 앞서 이중 구동기에서 조동 기구의 역할과 마찬가지로 단일 서보 방식으로 이러한 계단 운동을 구현 할 수 있다는 점이 대단히 중요하다. 특히 제안된 시스템은 약 750Hz 인 파워 증폭기의 제한된 대역폭으로 인해 약간의 지연 시간이 존재하지만 전체 작업 영역에 걸쳐 이러한 계단 운동을 하는 것이 가능하다. 따라서 리니어 모터와 같은 직접 구동기가 갖는 빠른 응답 특성과 높은 속도 구현의 성질을 서피스 모터에서도 마찬가지로 얻을 수 있다. 어쨌든 추력 등

특성에 대한 시험 결과는 만족스러운 것으로 판단 된다.

Fig. 14 는 스테이지의 대변위 일정 속도 시험 결과이다. 앞서 언급한 것처럼 제안된 시스템의 스테이지는 x, y 축으로 약 60mm 의 이송 능력을 갖는다. 따라서 이러한 넓은 영역에 걸쳐 구동기의 특정점의 추종(tracking) 성능이 매우 중요하기 때문에 속도 프로파일 추종 시험은 의미를 갖지만 이에 더해 전체 영역에 걸쳐 스테이지가 동일한 동특성을 갖는 것도 시스템 성능에 지대한 영향을 끼친다. 제안된 시스템에서 부상 운동은 전 영역에 걸쳐 동일한 간극의 경우 흡인력의 변화가 존재하지 않아 단지 지배 방정식에서 모멘트 압의 변화만 고려하면 되지만 추진 운동의 경우 직류 구동 방식이기 때문에 제어기 성능에 상관 없이 동특성의 변화는 어느 정도 불가결하다. 따라서 다상 코일에 의한 구동 방법이 그 대안으로서 연구되고 있다.

Fig. 15 는 Fig. 12 에 기초한 x 축으로의 10000 μm 조화 운동에 대한 제어 시험 결과와 다른 자유도로의 연성 시험(couple test) 결과이다. 앞서 논의된 것처럼 제안된 시스템의 부상 운동과 추진 운동 각각은 이론적으로 연성 요소가 존재하지 않는 것처럼 모델링 했지만 스테이지의 어느 특정 방향으로의 운동에 대해 다른 나머지 자유도 운동이 물리적으로 구속되어있지 않기 때문에 두 운동을 완전히 분리하는 것은 불가능하다. 그러나 공칭 위치에서 조절되는 모드에 대해 가상 스프링(virtual spring)이 있다고 가정하고 적절한 제어에 의해 강성 계수를 크게 하면 연성 효과를 만족스러운 정도로 축약 시키는 것이 가능하다. 그러나 이러한 능동적인 방법과는 별도로 시스템 자체의 배치 정밀도 역시 대단히 중요하다. 즉, 센서 프레임과 자기 요소 프레임의 배치 오차는 성능에 가장 크게 영향을 미치는 인자들이며 특히 기준 좌표계에 대한 센서 프레임 오차는 초기 시스템 구축 단계에서 반드시 보정 되어야 한다. 그러나 제안된 시스템과 같은 비접촉식 구동기는 이러한 보정 시험이 초기에 단지 한번만 수행되어도 기계적인 오차가 누적되지 않는 특징을 갖는다. Fig. 15 에 주어진 연성 수준은 서보 시스템의 전자 잡음이나 정량 오차(quantization error)를 고려하지 않았음에도 불구하고 아날로그-디지털 변환기의 최소 카운트 당 정량 레벨이 제한되기 때문에 만족스러운 것으로 판단된다. 아래에 주어진 시험 결과의 당위성을 논하기 위하여 위치 측정 기구의 분해능을 먼저 고려할 필요가 있다. 즉 구축된 시스템에서 공극, 즉 z 축으로의 반복 정밀도는 160nm 이고

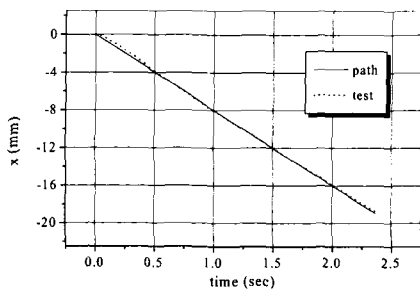
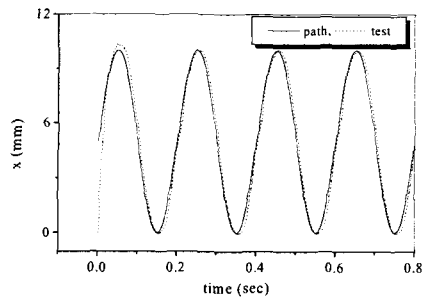
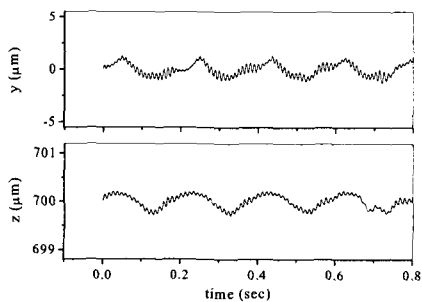


Fig. 14 Large displacement test (constant velocity profile)



(a) x



(b) y & z

Fig. 15 Sinusoidal tracking test in x -axis and its coupling effects into another d.o.f

PSD S1352의 위치 분해능 성능에 해당하는 x 와 y 축으로의 반복 정밀도는 약 $500nm$ 이다. 따라서 제안된 제어 기법으로도 스테이지의 원활한 성능이 구현되는 것을 알 수 있다.

6. 결론

자기 흡인식 부상 원리를 이용한 비접촉식 서피스 액추에이터가 제안되었다. 제안된 시스템에서 스테이지는 자성체 사이의 자화력을 통해 부상되고 코일과 영구 자석 사이의 로렌츠 힘을 통해 추진력을 얻어 고정 단으로부터 기계적으로 완전히 분리되어 공간상에서 구동된다. 따라서 구축된 스테이지는 다음과 같은 특징들로 인해 범용성 있는 나노 스테이지의 구동 원리에 적합한 것으로 판단된다.

(1) 평면 이동의 나노 분해능 구현에 이론적인 한계가 존재하지 않으며 스테이지 자체의 자세 보정을 위해 별도의 지그(jig)가 필요 없는 일체화된 구동 원리를 갖는다.

(2) 조동 기구없이 단일 서보 방식으로 큰 동적 범위(dynamic range)를 구현할 수 있다.

(3) 기계적인 마찰을 배제하여 웨어 입자 발생 가능성이 상대적으로 작기 때문에 초정정 환경에 적합하다.

(4) 스테이지는 전달 메커니즘 없이 직접 구동되기 때문에 스테이지 자체의 강성을 높여 시스템 대역폭을 향상시키는 것이 용이하다.

(5) 평행 구조이기 때문에 오차가 누적되지 않으며 기계 가공 오차에 시스템의 성능이 좌우되지 않는다.

(6) 구동력 모두 박형 간극을 통해 직접적으로 전달되기 때문에 그 구조가 매우 콤팩트해질 수 있다.

본 논문에서는 제안된 시스템의 구동 원리를 포함한 작동 원리에 대한 논의와 더불어 스테이지의 지배 동특성이 자기 요소들간의 자기력 정량화 작업을 바탕으로 모델링되었다. 또한 구축된 시스템의 성능 평가를 위해 다양한 시험이 수행되었으며 구축된 서보 시스템의 한계에 해당하는 만족스러운 결과가 얻어졌다. 따라서 이후 고정도 서보 장비의 장착을 통해 별다른 어려움 없이 더욱 진보된 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2000년도 한국과학재단 목적 기초

연구 과제(2000-1-30400-009-3)의 연구비 지원에 의한 연구 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, W. J. and Trumper, D. L., 1998, "High-Precision Magnetic Levitation Stage for Photolithography," *Precision Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 66~77.
- (2) 김홍록, 1998, "평면 스텝 모터를 이용한 노광 장비 스테이지의 미소 각도 보정 장치 및 그 방법," 대한민국 특허 등록번호 : 특 0136427.
- (3) 박정규, 정수화, 이항부, 2000, "PDP 용 수직형 구조의 근접 노광장치 개발," 대한기계학회 논문집, 제 24 권, 제 9 호, pp. 2371~2380.
- (4) 이종현, 장원익, 권진혁, 이용일, 김도훈, 최부연, 남병호, 1994, "웨이퍼 스텝퍼의 정렬정확도 측정에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제 11 권, 제 1 호, pp. 150~156.
- (5) 송기무, 1990, "초정밀 X-ray 노광장치 원리 및 개발동향(上)," 한국정밀공학회지, 제 7 권, 제 2 호, pp. 7~13.
- (6) Tomita, Y. and Koyanagawa, Y., 1998, "Study on a Surface Motor Driven Precise Positioning System," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 3, No. 2, pp. 113~119.
- (7) Mittal, S. and Meng, C., 1997, "Precision Motion Control of a Magnetic Suspension Actuator using a Robust Nonlinear Compensation Scheme," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 2, No. 4, pp. 268~280.
- (8) Ebihara, D. and Watada, M., 1989, "Study of a Basic Structure of Surface Actuator," *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 25, No. 5, pp. 3916~3918.
- (9) Ohtsuka, H., Tsuchiya, J., Shimizu, T., and Kimura, G., 1996, "Stator Design of Revolvable Surface Motor," *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 634-637.
- (10) Awabdy, B. A., Shin, W., and Auslander, D. M., 1998, "Nanometer Positioning of a Linear Motion Stage under Static Loads," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 3, No. 2, pp. 113~119.
- (11) Rotors, H. C., 1941, *Electromagnetic Devices*, 1st ed London : John Siley & Sons.
- (12) Wangsness, R. K., 1979, *Electromagnetic Fields*, John Wiley & Sons.
- (13) 정광석, 백윤수, 2000, "자기 부상 방식 미세 운동 기구의 동적 모델링," 대한기계학회 논문집, 제 24 권, 제 5 호, pp. 1166~1174.
- (14) Jung K. S. and Baek Y. S., 2001, "Contact-Free Electromagnetic Planar Motion System for High Precision Manipulating in Super Clean Environments," *Proceedings of the 32nd ISR(International Symposium on Robotics)*, April, pp. 1099~1104.