

전자기력 조합에 기초한 평면 구동기를 이용한 자기 부상 방식 초정밀 스테이지

정 광 석[†], 백 윤 수^{*}

(2001년 5월 4일 접수, 2001년 9월 5일 심사완료)

Precision Stage Using A Novel Contact-Free Planar Actuator Based on Combination of Electromagnetic forces

Kwang Suk Jung and Yoon Su Baek

Key Words : Planar Actuator(평면 구동기), Magnetic Levitation(자기 부상), Superposed Solution(중첩해), Precision Stage(정밀 스테이지)

Abstract

In this paper, we suggest the precision stage using a novel non-contact planar actuator that utilizes an interaction between an array type of air-core solenoids and permanent magnets. The former with axes arranged in the mutually orthogonal direction is fixed on the stator and the latter with the same polar direction is attached below the stage. The promising magnetic structure has little uncertainty such as hysteresis loss caused by ferromagnetic material, then it is simple to quantify the magnetic phenomenon. And all the magnetic forces are transmitted through narrow air-gap between the coil and the permanent magnet, therefore the structure can be highly compacted. Furthermore, the stage or plate can be perfectly isolated from the stator without any wire connection, leading to diminish the generating possibility of wear particles due to mechanical contact. Then, it is estimated that the proposed operating principle is very suitable for work requiring high accuracy and cleanness, or general-purpose nano stage. The main issues related to the plate driving are discussed here.

1. 서 론

반도체 제조, 검사 공정에서 요구되는 엄격한 정밀도와 분해능은 기계적인 전달 메커니즘의 비선형성, 높은 관성, 백래쉬(backlash) 등과 같은 문제로 인해 기존의 구동 방법으로 달성하는 것이 매우 어렵다. 또한 반도체 칩의 고집적화는 공정 정밀도 뿐만 아니라 작업 환경에서도 매우 엄격한 제약을 받고 있으며 일괄 공정의 효율성 증대를 위해 웨이퍼(wafer) 사이즈의 크기는 12 인치에 육박하고 있다. 따라서 이처럼 큰 동적 범위를 갖으면서 초정밀 운동이 가능한 그리고 초청정 환경에 적합한 구동기의 요구가 날로 증가하고 있다. 이

러한 성능 목표는 기존 구동기 관점에서 보면 서로 모순된 성능이며 따라서 대부분의 연구자들은 볼스크류, 리니어 가이드 조합의 조동 기구 위에 압전 소자로 대변되는 기능 소자를 탑재 시킨 형태의 이중 구동기를 이용해왔다.⁽¹⁾ 또한 전달 메커니즘을 배제한 회전 모터를 펼쳐놓은 형태인 리니어 모터 또는 평면 액추에이터 등의 직접 구동기들이 파워 효율의 증가로 각광 받고 있다.

평면 구동기 또는 서피스(surface) 액추에이터는 리니어 모터를 평면으로 확장한 형태를 갖는다. 즉 평면상에서 두 축 방향으로의 선형 운동 또는 추가로 요잉(yawing) 운동이 가능한 구동기이다.⁽²⁾ 본 논문에서는 자기 부상에 기초한 새로운 형태의 평면 구동기를 이용한 정밀 스테이지에 대해 논한다. 제안된 시스템의 원형이 비록 제한된 정밀도와 대역폭을 제공하지만 일반적으로 자기 지지 기술을 이용하는 시스템의 성능 한계는 적용하는 측정 기구와 제어 기법에 달려있기 때문에 시스템의

[†] 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과 대학원
E-mail : jungks88@hanmail.net
TEL : (02)2123-4407 FAX : (02)362-2736
^{*} 회원, 연세대학교 기계전자 공학부

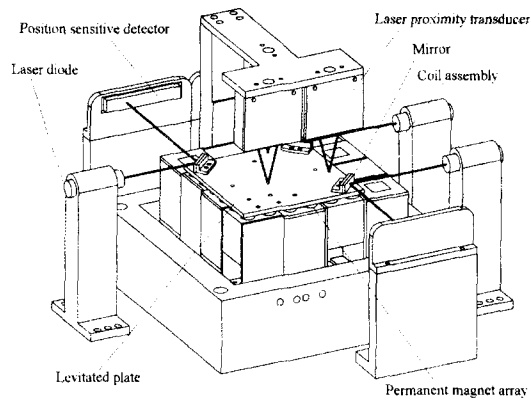


Fig. 1 The entire configuration of the suggested system

분해능 한계는 이론적으로 존재하지 않는다. 즉 이것은 제안된 시스템의 성능이 이후 고정도 서보(servo) 장비의 장착에 의해 더욱 향상될 수 있다는 것을 의미한다. 또한 제안된 시스템은 직류 구동 방식의 공심(air-core) 코일을 이용하기 때문에 일반적으로 전자기 시스템에 수반되는 불확실성이 상대적으로 적어 모델링하는 것이 대단히 간단하다. 따라서 제안된 시스템의 구동 원리는 수 밀리 내지 수 센티의 작업 영역을 갖는 범용 나노 스테이지 구현에 적합한 방식인 것으로 판단된다. 본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2 절에서는 부상력과 추력을 박형 간극(narrow gap)의 접합면에서 모두 구현하는 새로운 방식의 비접촉식 평면 액추에이터의 개념 설계를 제시하고 3 절에서는 힘 발생 자기 요소의 구동력 모델링 과정이 서술된다. 기본 자기 요소의 조합을 기초로 가동부의 공간 상에서의 운동을 설명하는 작동 원리가 4 절에서 논의되고 또한 시스템의 지배 방정식이 유도된다. 구축된 시스템의 성능 평가를 비롯한 시험 결과와 5 절에서 논의되고 6 절에서 결론을 맺는다.

2. 전체 시스템 레이아웃(layout)

2.1 평면 구동기의 개발 현황과 제안된 시스템의 기본 구조

기존의 서피스 액추에이터는 고정자(스테이터)와 가동부 또는 평판 사이의 다양한 자기 상호 작용을 이용하여 구동력을 발생시킨다. 즉 구동부와 가동부가 서로 박형 간극을 사이에 두고 마주보고 있는 구조를 취하며 따라서 기존에 이러한 평면 운동을 구현해 왔던 시스템에 비해 대단히 컴팩트한 구조를 갖는다. 초기의 서피스 모터 연구는 1960년대 후반 소요(sawyer) 모터로 거슬러 올라

갈 수 있다.⁽³⁾ 이 시스템은 평판 또는 가동부를 공기 베어링을 써서 공간상에 부상시키고 접하는 자기 요소 사이의 자기 저항(reluctance) 변화를 이용하여 추진력을 얻었다. 그 후 1980년대 전자 현미경의 개발 이래로 시편의 정밀한 평면 이송을 위해 전자기력을 이용한 서피스 액추에이터가 개발되어왔다.^(4,5) 또한 이와는 별도로 일정한 스텝씩 가동부를 구동 시키는 평면 스텝퍼(stepper) 형태의 서피스 액추에이터가 제어기 무장착의 장점을 살려 활발히 연구되어왔다.⁽⁶⁾ 기존의 개발된 시스템들은 대부분 가동부와 고정 단 사이의 얇은 간극에 미끄러운 판을 끼워넣고 가동부의 구름 이송을 이용하거나 가동부 자체를 보조 가이드를 통하여 지지하는 접촉형태를 취했다. 그러나 앞서 언급한 것처럼 반도체 칩의 고집적화에 기인하는 엄격한 성능 요구에 부합하기 위해 가동부와 고정 단의 기계적인 마찰을 배제하고 웨어 입자의 발생을 억제하기 위해 가동부를 고정 단으로부터 분리시키는 것이 필요했기 때문에 이와 관련한 비접촉식 평면 액추에이터가 연구되고 있다.⁽⁷⁾

본 논문에서 제안된 구동부와 가동부의 접평면에서 모든 구동력을 발생시키는 새로운 방식의 비접촉식 평면 시스템의 전체 형상은 Fig. 1과 같다. 상호 직교하는 직접 구동 방식의 다중 겹 직류 코일이 배열 형태로 고정 프레임 위에 놓여있고 각각의 코일들과 반응하는 영구 자석들이 부상되어 움직이는 평판 아래에 부착되어 있다. 자기적으로 부상되어 움직이는 평판의 공극(air-gap)을 포함한 평판 법선 방향 운동(out-of-plane motion)은 비접촉식 레이저 변위계를 통해 검출하고 평판에 평행한 운동(in-plane motion)은 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 직접 구동 방식의 직류 공심 코일과 영구 자석간의 상호 작용을 이용하기 때문에 철심에 의한 와전류 손실이나 자기 포화 현상등이 존재치 않으며 자기 상호 작용의 모델링이 다상 코일(multi-phase coil) 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 개념 설계, 힘 발생 메커니즘 및 작동 원리
시스템의 추력 발생 메커니즘을 설명하는 간략화한 개념도가 Fig. 2에 주어졌다. 앞서 언급한

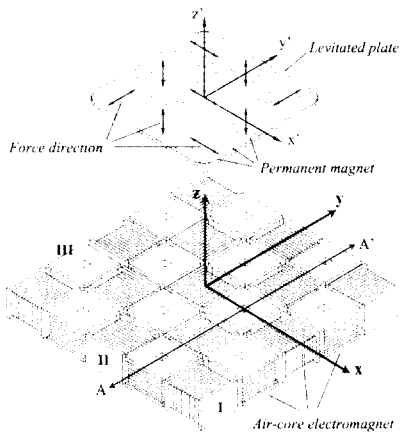


Fig. 2 Simplified perspective layout describing a force generation mechanism

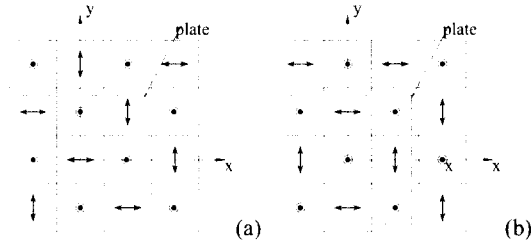


Fig. 3 Force combination diagram for the plate overall motion (a) the proposed system (b) other case

것처럼 x , y , z 축의 각 방향과 평행하게 배치되어 있는 타입 I, II, III의 중심 코일이 평판에 부착된 영구 자석과 상호 작용을 한다. 평판의 운동에 상관없이 자기 상호 작용의 동일한 조건을 부과하기 위해 부착된 영구 자석들의 극성은 모두 동일 하며 이러한 특성이 코일의 추가 배치에 의해 가동부의 평면 이송 범위를 더욱 확장 시킬 수 있는 가능성을 제공한다.

타입 I, II, III 코일에 각각 전류를 인가하면 Fig. 2의 부상 평판에 보이는 화살표 방향으로 자기력이 작용한다. Fig. 2에서 자기 대우(magnetic pair)간의 상대 자세를 통해 알 수 있는 것처럼 타입 III 즉, z 방향의 부상력은 자기 대우들간의 극성 반발을 이용한 자화력(magnetized force)이고 타입 I 과 II 에 의한 추력은 영구 자석에 의해 생성되는 자기장과 코일에 유기된 전류와의 상관 관계를 이용한 로렌쯔 힘(Lorentz force)이라는 것을 알 수 있다. Fig. 3(a)는 평판 아래 부착된 영구 자석의 자화 방향이 모두 z 축을 가리키고 있을 때 점선으로 표시된 평판과 그 아래의 고정자 쪽에 놓여있는 전류가 유기된 코일에 의해 평판에 작용하는 자기

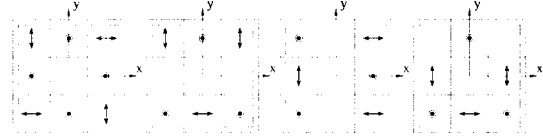


Fig. 4 Another combination examples for only six d.o.f motion of the plate

력의 방향을 도식한다. 이러한 세 방향 힘의 조합을 통해 공간상에서 평판의 부상된 평면 운동, 즉 6 자유도 운동이 구현된다. 따라서 평판이 공간상에서 안정되게 부상하기 위해서 평판과 대응하는 고정자 쪽의 코일 9 개에 동시에 전류가 인가되며 평판이 이동해 감에 따라 각 코일의 전류 공급이 전환(switching)된다. 이러한 자기 대우들을 통해 평판의 전체 운동을 만들어 내기 위해서 본 연구에서 채택된 Fig. 3(a)의 조합 외에 Fig. 3(b)를 포함하여 다양한 형태가 존재한다. 또한 단순히 평판의 6 자유도 운동을 만들어 내기 위해서는 Fig. 4에서처럼 구동기의 여자유도를 줄인 형태 또한 가능하다. 그러나 Fig. 3 과 4 에서 평판의 무게 중심이 평판 프레임의 원점과 일치한다고 가정하면 평판의 x , y 방향 이동에 상관없이 무게 중심이 z 축 부상력의 작용점을 연결한 다각형 안에 항상 존재한다는 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 반발력을 이용한 자기 부상 시스템의 양의 강성(positive stiffness) 특성과 결부하여 시스템의 안정된 부상을 보장하는 필요 조건이다.⁽⁸⁾

3. 자기 대우간의 상호 작용 모델링

제안된 평면 구동기의 자기력 발생 메커니즘은 전장에서 언급한 것처럼 사각 단면의 중첩된 중심 코일과 영구 자석과의 상호 작용을 이용한다. 여기에서는 이러한 자기력의 모델링 작업에 관하여 서술한다.

Fig. 2의 자기 대우들간의 상대 자세를 통해 추론 할 수 있는 것처럼 결국 자기력은 Fig. 5에서와 같이 코일과 축이 서로 평행하게 놓여 있는 영구 자석 vm 에 작용하는 또는 서로 직교 상태에 놓여있는 영구 자석 hm 에 작용하는 힘으로 요약될 수 있다. 이때 사용된 영구 자석은 강한 보자력(coercive force)과 잔류 강도(residual strength)를 갖는 네오뉘(neodymium) 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 형태

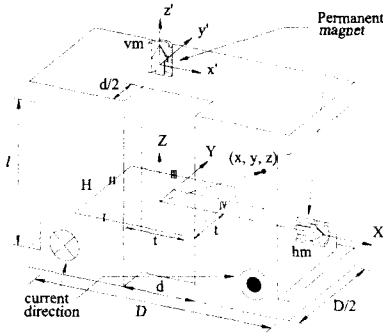


Fig. 5 One current loop, multi-layer air-core square coil, and permanent magnet coordinate frames

에 의해 구하는 것이 가능하다.⁽⁹⁾

$$F = m \cdot \nabla B \quad (1)$$

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

3.1 코일에 의한 자기장

Fig. 5 는 구동기를 구성하는 코일의 기준 좌표계를 묘사하는 단면도를 나타낸다. 전술한 것처럼 강자성체의 비선형 특성을 배제하기 위해 구동 코일은 공심 형태를 취하는 것을 알 수 있다. 고정자에 놓여있는 다중 겹 공심 코일은 모두 Fig. 5 에서처럼 정사각 고리의 중첩된 형태로 가정할 수 있으므로 하나의 고리에 의해 발생하는 자기장을 코일의 감은 수 N 만큼 중첩시켜 비교적 정확한 근사 해를 얻을 수 있다.

우선 전류 I 가 인가된 고리 H 의 선소(line element)에 의해 (x, y, z) 에 발생하는 자기장을 구하는 과정을 정사각 고리의 네 면에 모두 적용하고 그 합을 구하면 다음과 같이 고리 H 에 의한 자기장의 각 방향 성분을 얻는 것이 가능하다.⁽¹⁰⁾

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

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j-1} \frac{z}{z^2 + g_j^2} \cdot \frac{f_i}{\sqrt{z^2 + f_i^2 + g_j^2}} \quad (3)$$

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

여기에서 μ_0 는 자유 공간의 투자율(permeability)이며 f_1, f_2, g_1, g_2 는 각각 $(x+t), (x-t), (y+t), (y-t)$ 의

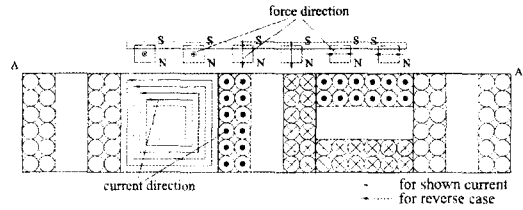


Fig. 6 Cross-sectional view of entire configuration describing force generation mechanism

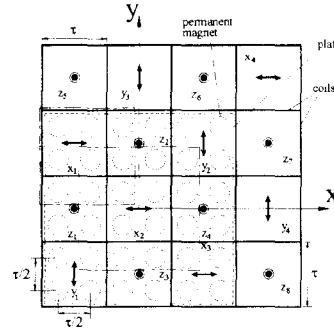


Fig. 7 Force driving location and its frame including permanent magnet arrangement

미한다. 위의 개념을 확장하여 고정자에 놓여 있는 코일에 의해 임의의 위치에 생성되는 자기장의 값을 구할 수 있다. 즉 (2), (3), (4)에 주어진 자기장을 가로 방향, 길이 방향으로 적분하고 그 평균값을 구한 후에 전체 코일의 감은 수를 곱해주면 전체 자기장의 값을 구할 수 있는데 코일 감은수가 상당히 크기 때문에 적절한 가정이라 할 수 있다.⁽¹⁰⁾ 자기 쌍극자가 z 방향으로 놓여 있다고 가정하고 중첩에 의한 전체 자기장의 값을 (1)에 대입하면 자기력은 폐형해가 복잡하지만 (5)과 같이 표현할 수 있다.

$$F_k(x, y, z) = \frac{\mu_0 m_z N I}{2\pi(D-d)l} \int_{-D/2}^{D/2} [B_k|_H(z+l/2) - B_k|_H(z-l/2)] dt \quad (5)$$

여기에서 k 는 x, y, z 를 나타낸다.

3.2 힘 특성과 보정 시험

코일에 전류를 인가하면 위에서 유도된 힘이 영구 자석을 포함하는 평판에 작용한다. 그러나 Fig. 5 와 (5)에서 자기 대우 사이의 축 오프셋(axis offset)으로 인해 vm 에는 자화력 뿐만 아니라 횡방향으로 불안정 힘이 존재한다. 추력의 경우에는 추력 코일에 의해 발생하는 자기장과 영구 자석간의 상호 작용에 의해 부수적으로 hm 에 자기 저항

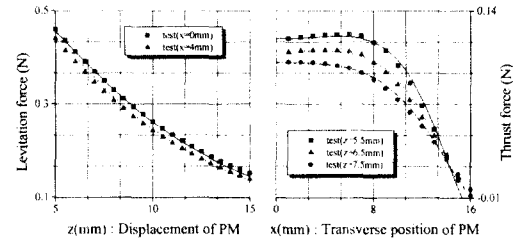
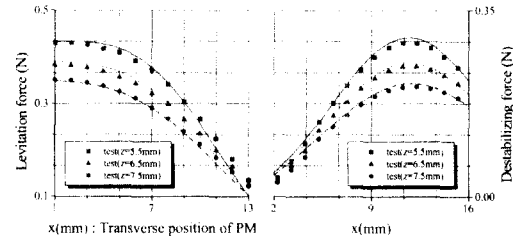
Table 1 Chief parameter specifications of the constructed prototype

Item	Specification
Levitation coil	32(14) mm × 32(14) mm × 45 mm AWG 24 1470 winding turns no.
Thrust coil	32(8) mm × 32(8) mm × 28 mm AWG 24 1240 winding turns no.
Permanent magnet	NeFeB 5 (radius) mm × 5 (length) mm 867,000 A/m (Magnetization strength)
Plate	173 g 93 (L) mm × 93 (W) mm × 3 (H) mm τ (period) : 32 mm

력(reluctance force)이 존재한다. 그러나 코일에 의해 생성되는 자기장은 영구자석에 의한 것과 비교해서 매우 적기 때문에 본 연구에서는 추력 코일에 의한 자기 저항력은 무시하고 부상력에 수반되는 힘만을 고려한다.

Fig. 6은 Fig. 2의 AA'의 단면도를 나타낸다. 앞서 언급한 것처럼 동일한 극성을 갖는 영구 자석들과 세 축 방향으로 정렬된 코일간의 상호 작용에 의해 평판에는 전류의 방향이 그림과 같을 때 닫힌 끝단을 갖는 화살표의 방향으로 자기력이 작용한다. 전류의 방향이 반대일 때는 열린 끝단을 갖는 화살표의 방향으로 힘이 작용한다.

Fig. 7은 구축된 평판에서 영구 자석의 배치와 힘 구동 위치 그리고 등가 힘 방향을 나타낸다. 36개의 영구 자석이 평판 아래에 부착되어있으므로 네 개의 영구 자석이 하나의 코일과 직접적으로 반응한다. 이런 경우 (1)에 의해 각 영구 자석에 작용하는 힘을 독립적으로 계산하고 영구 자석의 주기를 고려하면 Fig. 7에서 사각형에 의해 묘사되어있는 것처럼 평판의 활당된 영역에 작용하는 등가의 값을 얻는 것이 가능하다. 어떤 코일과 직접적으로 상호 작용하는 영구 자석 외에 이웃하는 영구 자석의 영향을 고려하여 하나의 코일의 영향 하에 놓여있는 범위를 2τ 이내로 정한다. 예로 Fig. 7에서 그 영역은 x_1 과 x_2 에 대해 일점 쇄선 사각형으로 나타나 있다. 이 영역 밖에 존재하는 영구 자석에 작용하는 힘은 전체 등가 값의 2% 이하이다. 이러한 특성은 영구 자석과 코일의 축 오프셋에 따른 자기력의 변화가 오프셋의 자승에 반비례하기 때문이며 실제로 식(1)을 이용하여 하나의 자기 요소에 대해 이론 값을 도출해 보면 Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 부상력은 거의 0에 육박한다. 그러므로 Fig. 7에서 화살표에 의해 표현된 힘은 다음과 같이 계산될 수 있다.

**Fig. 8** Comparison of levitation and thrust force for each axis**Fig. 9** Levitation force and destabilizing force, accompanying thrust force, for x-variation

$$F_n = \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^4 F_k \left(x + \frac{\tau}{4}(2i-5), y + \frac{\tau}{4}(2j-5), z \right) \Big|_{k=x,y,z} \quad (6)$$

여기에서 n 은 x_1, \dots, z_4 이고 (x, y, z) 는 평판 프레임과 고정자 프레임 사이의 오프셋이며 F_k 는 식(5)에 주어진 값을 의미한다.

유도된 이론 모델을 검증하기 위해 보정(calibration) 시험이 수행되었다. 이후의 유용성을 위해 자기장에 대한 보정 시험 대신에 자기력에 대한 검증 작업이 수행되었다. 보정 시험은 Table 1에 주어진 제작된 시스템의 자기 요소들을 기초로 공극 변화와 축 오프셋(offset)과 같은 다양한 조건의 변화 아래서 수행되었다. 마이크로 스테이지와 연동하는 6 축 힘/토크 센서의 헤드 끝단에 영구 자석을 포함한 하우징(housing)을 장착하고 고정 단 쪽에는 타입 I, II, III의 코일을 배치시켜 위치 변화와 인가 전류 변화에 따른 자기력을 측정하였다. Fig. 8, 9는 유도된 모델이 시험 결과와 잘 일치하는 것을 보여준다. 그림에서 인덱스들은 Fig. 5의 기준 좌표계에 기초한다.

4. 평판의 동특성 모델

Fig. 1에 주어진 개발된 시스템의 완전한 특성 확립은 평판의 동특성 동정(dynamic characteristic

identification) 과정을 필요로 한다.

여기에서는 앞서 유도된 부상, 추진 운동을 위한 영구 자석 vm 과 hm 에 대한 모델링을 기초로 부상 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.

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 부상되어 있기 때문에 하나의 강체로 모델링하는 것이 가능하기 때문에 동적 모델링 과정이 매우 간단하다. 먼저 평판의 운동 특성은 다음과 같은 지배 방정식으로 표현할 수 있다.

$$M\ddot{p} = QF(p, i) - W \quad (7)$$

여기에서 M , Q , F , W 는 각각 관성 행렬, 힘 인가 위치 행렬, 자기력 벡터 그리고 평판의 무게 벡터를 나타낸다.

부상 운동의 경우 자기 대우간에 작용하는 자기력은 복원력의 특성을 띠고 있기 때문에 공칭 위치 주변의 작은 구간에서 위의 $F(p, i)$ 의 일차 변분은 (8)과 같은 선형 방정식을 이용하여 표현하는 것이 가능하다.

$$\begin{aligned} \delta F(p, i) &= \delta F_0 \Big|_{p=p_0, i=i_0} + \frac{\partial F}{\partial p} \Big|_{p=p_0, i=i_0} \delta p + \frac{\partial F}{\partial i} \Big|_{p=p_0} \delta i \\ &= \delta F_0 - K\delta p + G\delta i \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서 K , G 는 강성 계수와 힘 상수를 의미한다. 따라서 (7)의 일차 변분식에서 δF 대신에 (8)을 대입하고 평판의 무게를 공칭 입력에 의해 소거 시킨 후에 최종 식에서 δ 를 제거하면 공칭 위치 주변에서 부상 운동의 동특성은 다음처럼 표시할 수 있다.

$$M^o \ddot{p}^o + K^o p^o = Q^o G^o i^o \quad (9)$$

여기에서 상첨자 o 는 평판의 법선 방향 운동에 대한 인덱스를 나타내고 $M^o = \text{diag}[m, I_{xx}, I_{yy}]$ 는 관성 행렬을 그리고 $K^o = \text{diag}[4k, 2k\tau^2, 2k\tau^2]$ 는 강성 행렬을 그리고 $p^o = [z, \alpha, \beta]^T$ 는 위치 벡터를 $i^o = [i_{z1}, i_{z2}, i_{z3}, i_{z4}]^T$ 는 인가 전류 벡터를 나타낸다. 힘 인가 위치 행렬 Q^o 는 Fig. 7의 힘 도식을 통하여 유도

된다.

$$Q^o = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & \tau & -\tau & 0 \\ \tau & 0 & 0 & -\tau \end{bmatrix} \quad (10)$$

또한 시스템을 구성하는 임의의 자기 대우간의 전압 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi_c + d\Psi_{vm}}{dt} = L \frac{di}{dt} + \frac{\partial \Psi_{vm}}{\partial p} \frac{dp}{dt} = u - Ri \quad (11)$$

여기에서 Ψ_c 와 Ψ_{vm} 은 각각 코일 전류와 영구 자석에 의한 자속(magnetic flux)을 의미하며 $\partial \Psi_{vm} / \partial p$ 은 역기전력 상수, L 은 코일의 자기 인덕턴스, u 는 제어 입력, 그리고 R 은 코일의 저항을 나타낸다. Ψ_{vm} 은 쌍극자 모멘트로 가정된 영구 자석에 의한 벡터 포텐셜(vector potential) 'A'를 사용하여 다음과 같이 유도할 수 있다(Fig. 5).

$$\begin{aligned} \Psi_{vm} &= \int \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = \int (A_x \hat{x} + A_y \hat{y}) \cdot d\mathbf{l} \\ &= \int \frac{\mu_0 m_z}{4\pi(x'^2 + y'^2 + z'^2)^{3/2}} (-y' \hat{x} + x' \hat{y}) \cdot d\mathbf{l} \end{aligned} \quad (12)$$

앞서 구한 자기장의 유도 과정과 동일하게 하나의 사각 코일 루프 H의 네 면에 위의 과정을 적용하고 각 선소를 대입하여 합을 구하면 영구 자석에 의해 루프 H에 유기되는 자속을 구하는 것이 가능하다. z 축 방향을 향한 영구 자석에 의해 생성되는 자속은

$$\Psi_{vm} = \frac{\mu_0 m_z}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \left[\left(\frac{1}{z^2 + f_i^2} + \frac{1}{z^2 + g_j^2} \right) \cdot \frac{f_i \cdot g_j}{\sqrt{z^2 + f_i^2 + g_j^2}} \right] \quad (13)$$

위의 과정을 코일의 길이 방향, 폭 방향으로 모두 적용하면 전체 자속을 구할 수 있다. 위의 식 (13)은 m_z 를 I 로 대체하면 앞서 구한 코일 루프에 의한 자기장의 z 축 방향 성분 (4)와 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 일반적인 직류 모터의 해석에서와 같이 (10)의 힘 상수와 (13)의 역기전력 상수가 동일한 것을 알 수 있다. 위의 내용을 부상 코일 전부에 적용하면 평면의 법선 방향 운동용 자기 요소에 대한 전압 방정식(voltage equation)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L^o \dot{i}^o + \mathbf{R}^o i^o = \mathbf{u}^o - \mathbf{G}_B^o Q^{oT} p^o \quad (14)$$

여기에서 G_B^o 는 역기전력 상수 행렬을 나타낸다.

부상력과 달리 추력은 복원력이 아니며 공칭 전류는 제로이다. 그것은 추력에 스프링 특성이 존재하지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 수평 방향 운동에 대한 선형화 된 지배 방정식은

$$\mathbf{M}^i \ddot{\mathbf{p}}^i = \mathbf{Q}^i \mathbf{G}^i \mathbf{i}^i \quad (15)$$

$$\mathbf{L}^i \dot{\mathbf{i}}^i + \mathbf{R}^i \mathbf{i}^i = \mathbf{u}^i - \mathbf{G}_B^i \mathbf{Q}^{iT} \dot{\mathbf{p}}^i \quad (16)$$

여기에서 상첨자 i 는 평판의 수평 방향 운동을 나타내고 $\mathbf{M}^i = \text{diag}[m, m, I_{zz}]$ 는 관성 행렬을 그리고 $\mathbf{p}^i = [x, y, \gamma]^T$ 는 위치 벡터를 그리고 $\mathbf{i}^i = [i_{x1}, i_{x2}, i_{x3}, i_{y1}, i_{y2}]^T$ 는 인가 전류 벡터를 나타낸다. 또한 힘 인가 위치 행렬 \mathbf{Q}^i 는 다음과 같이 표현된다. (Fig. 7)

$$\mathbf{Q}^i = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ -\tau & 0 & \tau & -\tau & \tau \end{bmatrix} \quad (17)$$

비접촉식 평판 구동기는 기본적으로 세 축 방향 힘의 조합에 의해 평판의 공간상의 운동을 만들어 내기 때문에 각 자유도 사이에 연성이 존재한다. 따라서 설계 단계에서 이러한 문제들에 대한 기본적인 고찰이 필요하다. 그러나 본 시스템의 경우 힘 인가 행렬 (10)과 (17)에서 확인할 수 있듯이 대칭의 힘 배치 구조를 갖는다. 따라서 이론적으로는 각각의 운동에 연성이 존재하지 않는다. 이런 특성을 부상 운동의 경우에 대해 주파수 해석을 통해 살펴보자. 우선 제어기 입력 u 는 일반적인 비례-미분 제어기가 사용된다고 가정하고 앞서 유도한 부상 운동에 대한 동특성 방정식과 전압 방정식에 대해 라플라스 변환을 취하면 다음과 같다.

$$s^2 \mathbf{M} \mathbf{p} + \mathbf{K} \mathbf{p} = \mathbf{Q} \mathbf{G} \mathbf{I} \quad (18)$$

$$s \mathbf{L} \mathbf{I} + \mathbf{R} \mathbf{I} = [\mathbf{Q} \mathbf{G}]^T [s \mathbf{K}_d + \mathbf{K}_p] [\mathbf{p}_d - \mathbf{p}] - s \mathbf{G} \mathbf{Q}^T \mathbf{p} \quad (19)$$

여기에서 p_d 는 디자인 값을 의미한다. 위식을 p

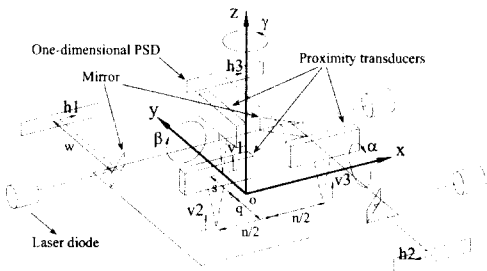


Fig. 10 Plate coordinate frame and sensor measurement frame

와 p_d 에 대해 정리하면 다음과 같은 식을 얻는다. 여기에서 p_d 는 디자인 값을 의미한다. 위식을 p 와 p_d 에 대해 정리하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} & [s^2 \mathbf{M} + \mathbf{K} + \mathbf{Q} \mathbf{G} [s \mathbf{L} + \mathbf{R}]^{-1} ([\mathbf{Q} \mathbf{G}]^T [s \mathbf{K}_d + \mathbf{K}_p] + s \mathbf{G} \mathbf{Q}^T)] \mathbf{p} \\ & = \mathbf{Q} \mathbf{G} [s \mathbf{L} + \mathbf{R}]^{-1} ([\mathbf{Q} \mathbf{G}]^T [s \mathbf{K}_d + \mathbf{K}_p] \mathbf{p}_d \end{aligned} \quad (20)$$

위식은 비대각 항들이 모두 제로이며 다음의 값들을 대각 값으로 갖는 대각 행렬이다.

$$\frac{\mathbf{K}_p^i + 4\mathbf{K}^i [R + sL] + s[\mathbf{K}^i f^2/k + \mathbf{K}_d^i + s\mathbf{M}^i R + s^2 \mathbf{M}^i L]}{R + sL}$$

$$\frac{\mathbf{K}_p^i + s\mathbf{K}_d^i}{R + sL}$$

따라서 비대각 값이 존재하지 않으므로 자유도 간의 연성은 이론적으로 존재하지 않는다. 추진 운동에 대해서도 마찬가지로의 결과를 얻을 수 있다. 그러나 부상 운동과 추진 운동 사이에는 앞서 논의된 결과와는 달리 여러 가지 인자가 존재하며 이러한 연성 항들에 대한 실험결과는 다음 장에 주어져 있다.

2 절에 언급한 것처럼 평판의 위치 벡터 p^i 와 p^o 는 레이저 변위계와 포토 셀에 의해 얻어진다. 평판의 자세 각 변화가 평판 운동량에 비해 대단히 작기 때문에 센서 프레임과 평판 프레임 사이의 변환 관계는 평판의 법선 방향 위치와 수평 방향 위치를 비연성화 시키고 고차 항을 무시하면 다음과 같이 유도될 수 있다. (Fig. 10)

$$\mathbf{p}^i = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/2 & 1/2 \\ -1/2 & 0 & 1/2 \\ -1/4w & -1/4w & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{p}^o = \begin{bmatrix} z \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q+y & n(s-y) + 2x(q-s+2y) & n(s-y) + 2x(q-s+2y) \\ q+s & 2n(q+s) & 2n(q+s) \\ 1 & -n+4x & -n-4x \\ q+s & 2n(q+s) & 2n(q+s) \\ 0 & \frac{1}{n} & -\frac{1}{n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

5. 원형 메커니즘의 실험 결과

이장에서는 앞서 주어진 이론 모델을 검증하고 시스템을 성공적으로 장착하기 위하여 평판의 동특성을 고려한 제어 로직(logic)과 개루프 동특성 검증 시험 그리고 자유도 간의 연성 시험 결과가 주어져 있다. 그러나 주어진 결과는 시스템의 물리적 범주 안에서 이해되어야 한다. 즉, 위치 되력

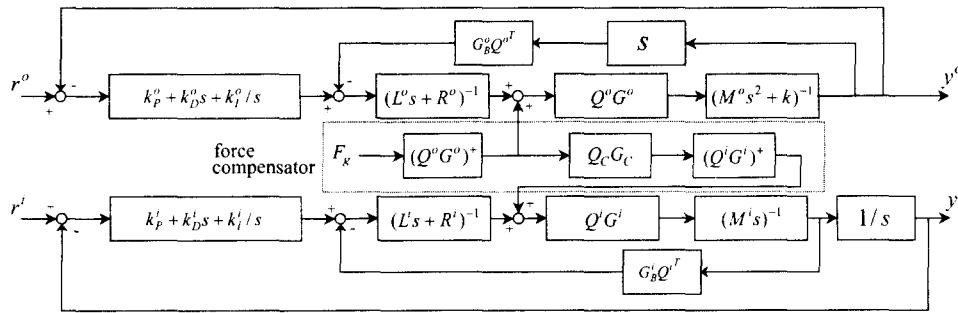


Fig. 11 Overall control block diagram considering plate dynamics and force compensator

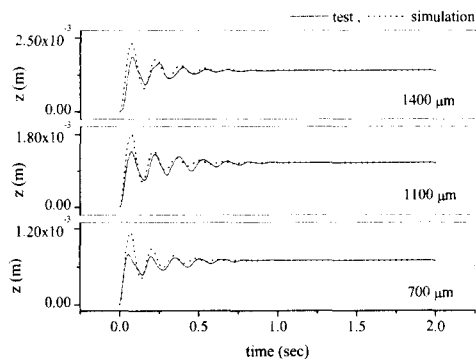


Fig. 12 Open-loop dynamic characteristic test result compared with simulation

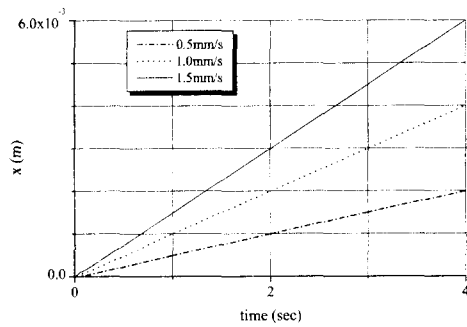


Fig. 13 Constant velocity profile-following test

입을 위한 광 센서와 서보 장비들은 구축된 시스템으로부터 구현할 수 있는 최대 정밀도와 대역폭을 구축하는 제한된 정밀도와 대역폭을 제공한다.

5.1 힘 보상기를 포함한 제어기 설계

3 절에 언급된 것처럼 평판의 무게를 보상하기 위해 부상 코일에 인가되는 공칭 전류에 의해 대응하는 영구 자석에는 부상력과 별도로 횡 방향으

로 불안정 힘이 존재한다. 따라서 이러한 힘을 보상하기 위해 추진 코일에는 다음과 같은 공칭 전류가 인가되어야 한다.

$$i_n^* = (Q^i G^i)^+ (Q_c G_c) (Q^o G^o)^+ F_g \tag{23}$$

여기에서 $F_g = [mg, 0, 0]^T$ 는 평판의 무게 벡터를 의미하고 g 는 중력 가속도를 나타낸다. 또한 상첨자 +는 의사 역행렬을, G_c 는 불안정 힘 상수 행렬을 그리고 Q_c 는 불안정 힘의 인가 위치 행렬을 나타낸다. 실제로 G_c 와 Q_c 는

$$G_c = \begin{bmatrix} f_z|_{x_1} & f_z|_{y_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_z|_{x_2} & f_z|_{y_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & f_z|_{x_3} & f_z|_{y_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_z|_{x_4} & f_z|_{y_4} \end{bmatrix}^T \tag{24}$$

$$Q_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -\tau & -\tau & 0 & \tau & 0 & 0 & \tau \end{bmatrix} \tag{25}$$

전장에 유도된 구간별 선형 동적 방정식과 전통적인 비례, 미분, 적분 제어를 이용한 제어 기법 그리고 위의 추가 보상기를 포함한 전체 제어 블록 다이어그램이 Fig. 11 에 나타나 있다.

5.2 모델 검증 및 시험 결과

Fig. 12 는 전장에 유도된 평판의 부상 운동에 대한 개루프 동특성의 시험 결과이다. 제안된 시스템의 부상 운동의 경우 개루프 안정 상태를 갖기 때문에 단지 수평 방향 운동만을 제어한 상태에서 공칭 입력이 주어진 부상 코일에 의한 부상 운동의 동특성이 시험되었다. 시뮬레이션 결과와 시험 결과와의 약간의 차이는 주로 도체인 평판 그리고 코일의 보빈(bobbin)에 유기되는 유도 전류에 의한 댐핑 효과와 공극을 통한 공기 마찰을 고

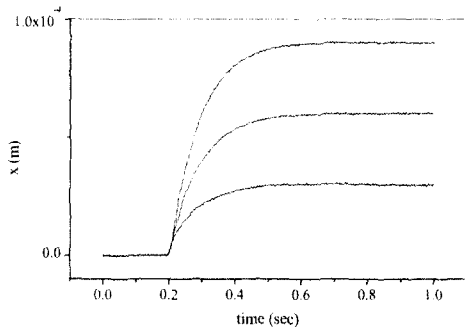


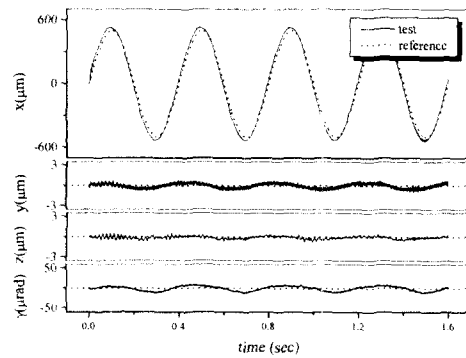
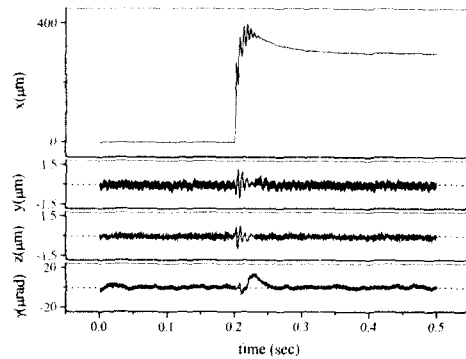
Fig. 14 Various step input test results

려하지 않아서 생긴 결과인 것으로 판단된다. 어쨌든 개루프 동특성에 대한 시험 결과는 만족스러운 것으로 판단된다.

구축된 시스템의 성공적인 정착을 위해 다양한 실험이 수행되었다. 아래에 주어진 시험 결과의 당위성을 논하기 위하여 위치 측정 기구의 분해능을 먼저 고려할 필요가 있다. 즉 구축된 시스템에서 x 와 y 축으로의 이론적인 반복 정밀도는 약 500nm 이다. 이러한 값은 광 센서의 활성 영역 34mm 과 아날로그-디지털 변환 보드의 변환 능력 16 비트를 고려하면 쉽게 얻어질 수 있다.

Fig. 13 은 스테이지의 대변위 일정 속도 시험 결과이다. 그리고 Fig. 14 는 $30, 60, 90\mu\text{m}$ 에 대한 계단 입력 시험 결과를 나타낸다. 평판은 초기에 고정자 위에 접촉된 상태로 놓여있기 때문에 우선 법선 방향 운동을 통해 공칭 위치에 도달한다. 시험 결과들은 모두 이 위치를 초기 위치로 하여 얻어진 결과이다. 초기의 자기 지지 기술을 이용한 시스템들은 제어 문제가 디자인 위치에서 유지 (regulating) 하는 것인 박형 기구의 예들인 자기 베어링이나 자기 부상 시스템으로 거슬러 올라갈 수 있다. 그러나 현재의 기술들은 같은 박형 간극 원리에 기초하고 있으나 제어 문제가 구동기의 특정 점의 추적(tracking) 성능을 중요시 여기므로 이러한 속도 제적 추종 시험과 계단 입력 시험은 중요한 의미를 지닌다.

Fig. 15, 16 은 Fig. 11 에 기초한 x 축으로의 $500\mu\text{m}$ 조화 운동과 $300\mu\text{m}$ 계단 운동에 대한 제어 시험 결과와 다른 자유도로의 연성 시험 결과이다. 전장에서 논의 된 것처럼 제안된 시스템의 부상 운동과 추진 운동 각각은 이론적으로 연성 요소가 존재하지 않는다. 그러나 시험 결과에서 확인할 수 있는 것처럼 구축된 원형 메커니즘은 다양한 원인들에 의해 연성이 완전히 축약되지 않

Fig. 15 $500\mu\text{m}$ x -sinusoidal motion and its couple effects into another d.o.fFig. 16 $300\mu\text{m}$ x -step motion and its couple effects into another d.o.f

는다. 그 구성 요소는 다음과 같은 이유로 요약될 수 있을 것으로 판단된다. 먼저 평판의 무게와 소거되는 부상 코일에 의한 부상력에 수반하는 부수적인 자기력이 존재하며 제어기의 앞먹임 루프에서 일정 기간이 지난 후에야 완전히 보상된다. 또한 이웃하는 자기 요소간에 모델링 되지 않은 상호 작용이 존재하며 그리고 구동력 작용 평면과 평판 무게 중심간에 오프셋이 존재한다. 그리고 센서 프레임과 자기력 프레임의 배치 오차가 존재하기 때문에 일시적인 효과가 나타난 것으로 판단된다.

그러나 최소 카운트당 정량 레벨(quantization level)이 제한되기 때문에 Fig. 15, 16 에 주어진 연성 수준은 서보 시스템의 전자 잡음(electronic noise)이나 정량 오차를 고려하지 않았음에도 불구하고 만족스러운 것으로 판단된다. 따라서 제안된 제어 로직으로 평판의 원활한 성능이 구현되는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

이중 구동기가 갖는 단점을 극복하기 위한 대안의 하나로서 싱글 서보 방식의 새로운 비접촉식 평면 액추에이터가 제안되었다. 제안된 시스템은 고정단에 놓인 직류 공심 코일과 평판에 부착된 영구 자석의 자기 상호 작용을 통해 공간상에서 평판의 부상, 추진 등 모든 운동을 구현한다. 자기 상호 작용의 동일한 조건을 부가하기 위해 영구 자석의 자화 방향은 모두 동일하며 공심 코일 역시 자세만 바뀐 채로, 배열 형태로 놓여있다. 이러한 특성이 평판의 크기 증가 없이 코일의 추가 장착에 의해 가동 영역을 더욱 확장시킬 수 있는 가능성을 제공한다. 또한 이러한 부상력과 추력 모두 박형 간극을 통해 평판 아래 장착된 영구 자석에 직접적으로 전달 되기 때문에 그 구조가 매우 컴팩트해질 수 있으며 앞서 언급한 것처럼 모델 불확실성이 적은 직류 공심 코일을 이용하기 때문에 자기력 모델링 작업이 매우 간단하다. 따라서 제안된 구동 원리는 큰 동적 범위를 갖는 고정도, 초정정을 필요로 하는 작업에 적합한 또는 범용 나노 스테이지의 구현에 적합한 것으로 판단된다.

본 논문에서는 제안된 시스템의 구동 원리를 포함한 작동 원리에 대한 논의와 더불어 평판의 지배 동특성이 자기 요소간의 자기력 정량화 작업을 바탕으로 모델링 되었다. 또한 구축된 시스템의 성능 평가를 위해 다양한 시험이 수행되었으며 구축된 서보 시스템의 한계에 해당하는 만족스러운 결과가 얻어졌다. 직접 구동 방식의 채택에 의해 발생하는 변위에 따른 자기력의 변화는 코일에 가해지는 공칭 입력에 의해 보상될 수 있으며 부상 시스템에 필요 불가결 하게 존재하는 연성은 자기 상호 작용의 정확한 모델링과 대칭의 추진 구조에 의하여 저감 될 수 있음을 보였다. 따라서 이후 고정도 서보 장비의 장착을 통해 별다른 어려움 없이 더욱 진보된 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

앞서 언급한 것처럼 이러한 형태의 평면 구동 시스템은 자기 요소의 단순한 크기 증대에 의해 작업 영역을 더욱 확대시키는 것이 가능하다. 그러나 본 연구에서 제안된 시스템은 이에 더해 동

일한 극성의 영구 자석과 배열 형태의 코일을 이용하기 때문에 고정단에 놓인 코일의 단순한 추가 배치에 의해 평판의 크기 증대 없이 평판의 작업 영역을 더욱 확대시킬 수 있는 가능성을 제공한다.

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) 김승우, 이형석, 오정석, 이창우, 1995, "초정밀 위치 결정을 위한 이중 서보 제어용 미세 구동 메커니즘," 대한기계학회논문집, 제 19 권, 제 11 호, pp. 2875~2884.
- (2) Ohtsuka, H., Tsuchiya, J., Shimizu, T. and Kimura, G., 1996, "Stator Design of Revolvable Surface Motor," *Proceedings of the IEEE Inter. Conf. on Industrial Technology*, pp. 634~637.
- (3) Sawyer, B. A., 1974, "Actuating System," U.S. Patent No. 3,857,078, Dec.
- (4) Corb, B. W., Ringger, M. and Guntherodt, H. J., 1985, "An Electromagnetic Microscopic Positioning Device for the Scanning Tunneling Microscope," *J. of Apply Physics*, Vol. 58, No. 11, pp. 3947~3953.
- (5) Smith, D. P. and Elrod, S. A., 1985, "Magnetically Driven Micropositioners," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 56, No. 10, pp. 1970~1971.
- (6) Ebihara, D. and Watada, M., 1989, "Study of a Basic Structure of Surface Actuator," *IEEE Transaction on Magnetism*, Vol. 25, No. 5, pp. 3916~3918.
- (7) Kim, W. J. and Trumper, D. L., 1998, "High-Precision Magnetic Levitation Stage for Photolithography," *Precision Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 66~77.
- (8) Jayawant, B. V., 1981, *Electromagnetic Levitation and Suspension Techniques*, London : Edward Arnold
- (9) Purcell, E. M., 1994, *Electricity and Magnetism*, McGraw-Hill, pp. 397~442.
- (10) 정광석, 백윤수, 2000, "자기 부상 방식 미세 운동 기구의 동적 모델링," 대한기계학회논문집, 제 24 권, 제 5 호, pp. 1166~1174.