한국정밀공학회지 제 20 권 제 4 호 (2003 년 4 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 20, No. 4, April 2003.

평면 스테이지의 이동자 접촉 배제를 위한 반발식/흡인식 자기 부상

정광석#, 이상헌*, 백윤수**

Repulsive & Attractive Type Magnetic Levitation for Mechanical Isolation of the Planar Stage Mover

Kwang Suk Jung#, Sang Heon Lee* and Yoon Su Baek**

ABSTRACT

To cope with stringent performance targets requested in many fields spanning the whole range of industry, the driver is necessary to realize large dynamic range as well as nano resolution, manipulate the mover orientation without additional driver, and be suitable for clean environment. As one of those purposes, authors have developed the planar precision stages with the integrated operating principle of levitation and propel. In this paper, we discuss potential of magnetic suspension technology by comparing various features of non-contact planar stages, that is, repulsive type of surface actuator and attractive type of surface actuator.

Key Words : Surface actuator(서피스 액추에이터), Planar stage(평면 스테이지), Repulsive levitation(반발 부상), Attractive levitation(흡인 부상)

1. 서론

구동기의 마이크로/나노 정밀도를 경계 짓는 중요한 물리적인 요소의 하나는 기계적인 마찰이다. 마이크로 레벨에서 일반적으로 무시되어 왔던 마찰이라는 요소는 나노 레벨을 구현하기 위해 반드시 극복해야 하는 인자이며 이러한 마찰을 극복하기 위해 이동자를 고정자로부터 부상시켜 인위적으로 기계적인 마찰을 제거하거나[1-5] 기능성 소자(functional element)와 같이 전달 메커니즘 없이 소자 자체의 변형을 이용해 정밀한 운동을 구현하는 연구들이 다양하게 수행되어왔다[6]. 이와는 별도로 마찰의 물리적인 특성을 정확하게 모델링하여 볼나사의 나노 정밀도를 구현한 예도 있으며[7] 벨트의 구름 접촉을 이용한 마찰 구동기(friction driver) 등도 나노 정밀도를 구현할 수 있는 구동 방법으로 활발히 연구되고 있다[8].

일반적으로 이동자의 기계적인 마찰을 배제하기 위해 이동자와 고정자 사이의 안내부에 공기를 주입하는 공기 베어링이 많이 이용되고 있으며 이동자의 하부를 직접 부상 시키는 목적으로도 공압이 많이 이용되고 있다[9]. 공기 부상과는 별도로

2002 년 10 월 8 일 접수
교신저자, 국립 충주대학교 기계공학과
Email ksjung@chungju.ac.kr Tel. (043) 841-5135
* 연세대학교 기계공학과 대학원
** 연세대학교 기계전자공학부

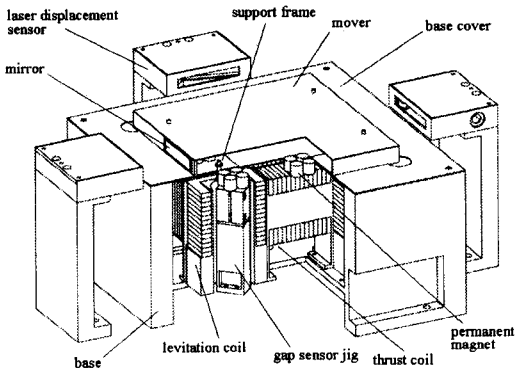

Fig. 1 Overall system layout of RSA

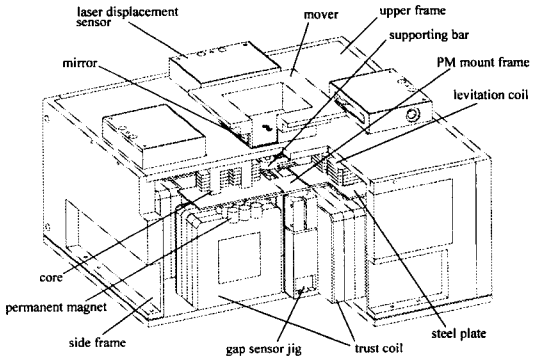

Fig. 3 Overall system layout of ASA

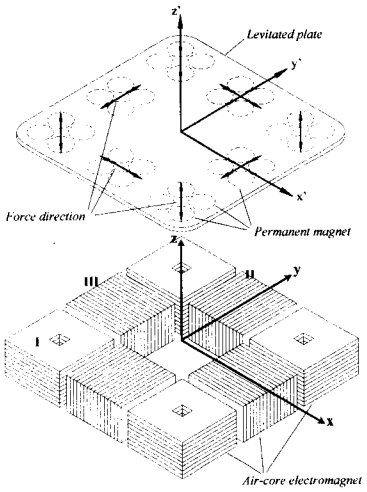

Fig. 2 Perspective concept diagram of force generation

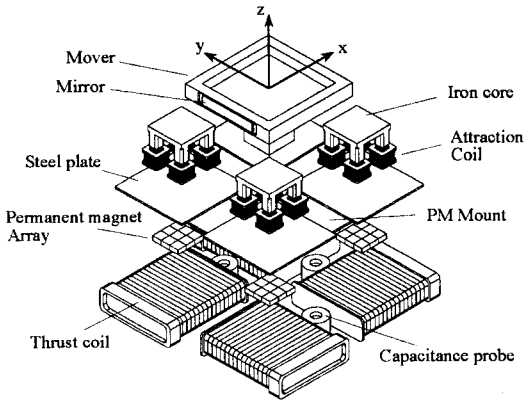

Fig. 4 Perspective force diagram of ASA

본 논문에서는 기 개발된 초정밀 평면 스테이지에서 이동자를 고정자로부터 분리시켜 공간상에 고립시키기 위해 적용된 반발식 자기 부상과 흡인식 자기 부상 방법의 다양한 특성 비교를 통해 자기력을 초정밀 스테이지의 구동 방법에 적용했을 경우의 문제점들을 예측하고자 한다.

2. 힘 발생 메커니즘을 포함한 시스템 구동 원리

본 논문에서 비교 대상이 되는 초정밀 평면 스테이지들은 구동 원리로 서피스 모터 방식을 채택하고 있으며 추진 운동과 별도로 이동자의 접촉 배제를 동시에 구현해야 하기 때문에 추진 운동과 부상 운동을 위한 구동 요소가 통합되어있는 형태를 취하고 있다. 본 장에서는 기 개발된 반발식 부상에 기초한 스테이지(RSA, Repulsive type of Surface Actuator)[10-12] 그리고 흡인식 부상에 기초한 스테이지(ASA, Attractive type of Surface Actuator)의 간략한 작동 원리를 서술한다[13,14].

RSA 의 전체 시스템 레이아웃을 Fig. 1 에 그리고 시스템의 추력 발생 메커니즘을 설명하는 간략화 한 개념도를 Fig. 2 에 나타내었다. 각각의 중심축이 x, y, z 축과 평행하게 정렬되어있는 타입 I, II, III 의 공심 코일이 스테이지 아래에 부착된 자화방향이 z 축을 가리키는 배열 형태의 영구 자석과 상호 작용을 한다. 따라서 타입 I, II, III 코일에 전류를 인가하면 Fig. 2 의 스테이지에 보이는 화살표 방향으로 자기력이 작용하며 타입 I 에 의한 z

축 방향 부상력은 극성 반발을 이용한 자화력이고 타입 II, III 에 의한 추력은 로렌쯔 힘이라는 것을 알 수 있다.

흡인식 부상을 이용하는 ASA 의 전체 시스템 외관을 Fig. 3 에 그리고 구동 원리를 묘사하는 사영 개념도를 Fig. 4 에 나타내었다. 고정단(stator)의 맨 아래에 면내 운동을 위한 사각 공심 코일이 놓여 있고 그 코일과 상호 작용하는 배열 형태의 영구 자석이 그 위에 놓여있다. 또한 영구 자석이 부착 되어있는 평판과 결합되어있는 강자성 평판과 조합하여 면외 운동을 위한 흡인력을 발생시키는 전자석이 상부 고정단에 부착되어 있다. 수동 자기 소자인 영구 자석을 포함하는 평판과 강자성 평판은 상부의 스테이지와 지지 프레임으로 연결되어있으므로 스테이지는 전체적으로 I 프레임 형상을 갖는다. 따라서 RSA 와 ASA 모두 부상력과 추력 발생 메커니즘이 통합되어 있는 구동 원리를 갖으므로 동일한 운동을 구현하는 타 시스템에 비해 대단히 컴팩트한 구조를 취한다.

3. 단위 구동원 조합과 정량화

기 구축된 RSA 와 ASA 의 힘 발생 메커니즘의 근간이 되는 자기 요소는 Fig. 5 와 같이 영구 자석과 공심 코일 그리고 전자석과 강자성 평판 사이의 상관 관계로 요약될 수 있다. 특히 앞서 언급한 것처럼 영구 자석과 사각 공심 코일에 있어 두 요소의 중심 축은 항상 일치하는 것은 아니며 축 벡터간의 내적이 0 이 될 때는 로렌쯔 힘이 발생하고 그 외의 경우에는 자화력이 발생하게 된다. 로렌쯔 힘은 스테이지의 추력을 위한 구동원으로 이용되며 동시에 공간상에서의 부상을 위해서는 자화력이 이용된다. ASA 에서도 추력을 위한 자기 요소들은 RSA 와 동일한 형태를 취한다.

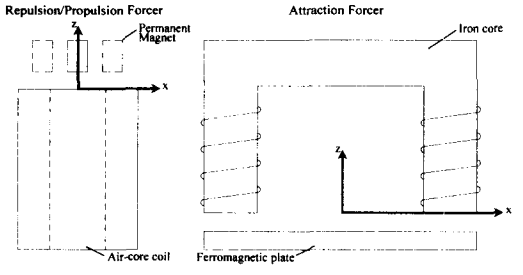

Fig. 5 Basic forcer elements of RSA & ASA

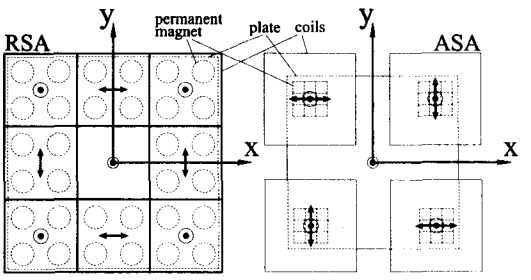

Fig. 6 Forcer combinations of RSA & ASA

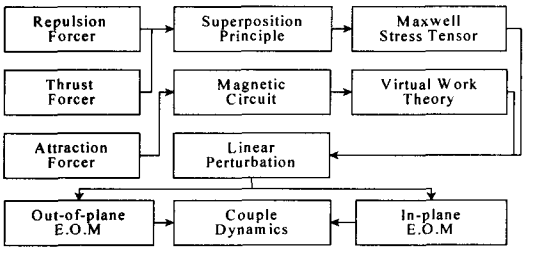

Fig. 7 Entire process of governing equation derivation based on basic forcer modeling

본 장에서는 이러한 힘 발생 요소들의 조합과 모델링 과정에 대해서 기술한다.

3.1 구동원 배치 구조

하나의 강체가 공간상에서 안정하게 부상되어 구동 되기 위해서는 강체가 공간에서 갖는 자유도를 보상하기 위해서 기본적으로 6 축 방향의 힘이 필요하다. 이러한 힘을 발생시키기 위해서 RSA 와 ASA 는 6 축 힘을 위한 별도의 구동원이 존재하는 것이 아니라 모두 Fig. 6 에서처럼 면내 운동을 위한 3 축 힘과 면외 운동을 위한 3 축 힘의 조합에 의해 스테이지가 구동 되는 형태를 취한다(ASA 의 경우 RSA 에서처럼 모든 힘들이 동일 평면상에 있는 것이 아니라 면내 구동력과 면외 구동력은 z 축 방향으로 옵셋을 갖는다). 이 때 부상력을 연결하는 다각형 안에 스테이지의 무게 중심이 놓여 있어야 안정된 부상이 가능하다. 이러한 제한 조건 하에서는 Fig. 6 에 제시된 여자유도를 갖는 조합 이외에도 무수히 많은 형태의 조합이 가능하다[10].

3.2 구동원 정량화 과정

고정자와 이동자라 불리는 자기 요소 사이의

공극을 통한 자기 포텐셜은 에너지 변환 과정을 통해 결국 이동자의 기계적인 운동을 만들어 낸다. 이러한 변환 과정은 독특한 것이 아니며 따라서 정량화 과정은 경우에 따라 다르게 적용된다.

우선 RSA 의 부상력/추력과 ASA 의 추력을 위한 자기 요소에 대해서는 두 시스템의 지배 방정식 모델링 과정을 묘사하는 Fig. 7 에서 알 수 있듯이 중첩 원리를 이용한다. 즉 사각 공심 코일을 구성하는 하나의 단위 코일이 공간상의 임의의 점에 만드는 자기장의 값을 코일의 반경 방향, 길이 방향으로 중첩 원리를 적용시키면 공심 코일에 의한 자기장의 값을 구하는 것이 가능하다[10, 12]. 이때 작은 전류 고리로 가정된 영구 자석에 의한 자기장과의 상호 작용을 정량화 하기 위해서 맥스웰 응력 텐서를 이용하면 영구 자석의 하면에 작용하는 자기력을 얻는 것이 가능하다.

$$T_{ij} = \mu H_i H_j - \frac{\mu}{2}\delta_{ij} H_k H_k \qquad (1)$$

여기에서 δ_{ij}는 크로넥커 델타(i=j→1, i≠j→0)이고 μ 는 자기 투자율을 나타내며 응력 T 의 하첨자 ij 는 j 면에 작용하는 i 방향의 힘을 의미한다. 또한 H 는 경계면에서의 자기 강도(magnetic intensity)를 의미한다. 흡인력의 경우 전자석과 강자성 평판 사이에 자기 회로 이론을 적용하면 두 요소 사이의 공극에서의 자속을 얻을 수 있으며 여기에 가상 일의 원리를 적용하면 다음과 같이 평판에 가해지는 자화력의 값을 얻는다[14].

$$F_t = \frac{\partial W_t}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{3}{4}\Psi_g^2 R_g\right) \qquad (2)$$

위 식에서 W 와 Ψ_g는 공극 사이의 가상 일과 자속을 의미하며 R_g 는 두 자기 요소 사이의 전체 자기 저항을 나타낸다. 이러한 과정을 통해 얻어진 자기력들은 두 시스템 모두 공칭 공극 위치에서 선형화 과정을 거쳐 면내 운동과 면외 운동 각각에 대해 (3)과 같은 형태의 지배 방정식 형태로 유도된다[10, 13].

$$\begin{aligned} \mathbf{M}^r\ddot{\mathbf{p}}^r + [\mathbf{K}^r\mathbf{p}^r] &= \mathbf{Q}^r\mathbf{G}^r\mathbf{i}^r \\ \mathbf{L}^r\dot{\mathbf{i}}^r + \mathbf{R}^r\mathbf{i}^r &= \mathbf{u}^r - \mathbf{G}_B^r\mathbf{Q}^{rT}\dot{\mathbf{p}}^r \end{aligned} \qquad (3)$$

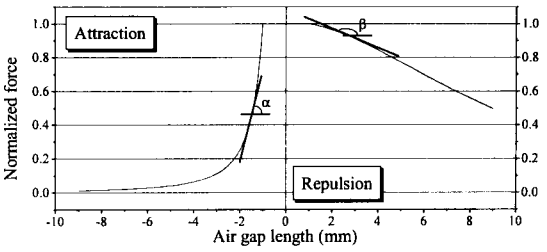

Fig. 8 Variation of normalized levitation force for air-gap length and its derivative

여기서 상첨자 r 은 면내, 면외 운동을 나타내는 인덱스를 의미하며 []안의 강성 항은 면외 운동에만 적용된다. 또한 위식에서 **M**, **K**, **L**, **R**, **Q**, **G**, $\mathbf{G_B}$ 는 각각 관성, 강성, 자기 인덕턴스, 저항, 힘 인가 위치, 힘 게인, 역기전력 상수 행렬을 의미하며 **p**, **u**, **i** 는 위치, 제어 입력, 전류 벡터를 나타낸다. 이때 면내, 면외 운동은 독립적으로 모델링 되었지만 후술하는 여러 인자들에 의해 두 운동 사이에는 불가피한 연성 효과가 발생한다.

4. 박형 간극에서의 물리적인 내재 특성

앞서 언급한 것처럼 자기 요소간의 자기 포텐셜에 의해 발생하는 자기력은 결국 박형 간극을 통해 이동자에 전달된다. 이러한 부상에 관련된 자기력은 RSA 와 ASA 의 경우 독특한 특성을 갖으며 결국 시스템의 안정성 측면에 지대한 영향을 끼친다. 우선 Fig. 5 에 묘사되어있는 두 조합에 의해 발생하는 반발력과 흡인력의 공극 변화에 따른 정규화 된 값을 Fig. 8 에 나타내었다. 우선 근본적으로 흡인력과 반발력의 방향은 이동자를 기준으로 서로 반대를 가리키고 있는 것을 알 수 있으며 이러한 특성은 힘의 강성 측면에서 판단하면 흡인력은 음의 강성을 그리고 반발력은 양의 강성을 갖게 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 반발력의 경우 동축 방향으로는 위치 되먹임 없이 안정된 부상을 하는 것이 가능하나 흡인력의 경우는 동축 방향으로는 되먹임 없이는 안정된 부상이 불가능하다. 그러나 Fig. 5 에서 z 축 방향을 제외하면 흡인력의 경우 나머지 5 축에 대해 안정성을 갖는 것을 알 수 있으며 마찬가지로 반발력의 경우에는 동축을 제외한 나머지 축에 대해서는 불안정성을

갖는다. 또한 Fig. 8 에서 공극 변화에 따른 힘의 변화 α, β는 흡인력이 반발력에 비해 훨씬 정도가 심한 것을 알 수 있다. 따라서 약간의 외란 섭동에도 흡인력의 경우에는 더욱 큰 입력 값이 필요하므로 안정성 측면에서 판단해 보면 반발력의 경우 더욱 큰 장점을 갖는 것으로 판단되나 흡인력의 경우 절대값 자체로는 강자성체의 도입으로 인해 반발력보다 훨씬 큰 크기를 얻는 것이 가능하기 때문에 이러한 힘의 구배 정도가 RSA 와 ASA 의 우열을 논하는 데 결정적인 인자가 되지는 않는다.

공극 변화에 따른 흡인력 구배, 즉 α는 공극의 자승에 반비례하는 특성을 취하므로 비선형성이 지배적이지만 반발력의 구배 β는 공칭 공극 위치 주변에서는 공극 변화에 상관없이 거의 일정한 것을 알 수 있다. 따라서 반발력은 공칭 공극 주변에서는 선형화 하는 것이 무리가 없으나 흡인력의 경우는 이러한 가정을 적용하는 것이 다소 무리가 있다. 그러나 제안된 평면 스테이지에서 공극은 단지 스테이지의 기계적인 고립을 위해서 존재하며 따라서 공극은 항상 일정한 수준에서 유지된다. 그러므로 ASA 의 경우에도 부상력을 공칭 공극 위치에서 선형화 하는 데에 큰 무리가 없는 것을 알 수 있다.

5. 이동 스테이지의 동특성

전장에서 논의 되었던 공극의 법선 방향으로의 힘은 스테이지 구동 측면에서 보면 단지 지지를 위한 수단이다. 따라서 본 장에서는 부상력에 더해 스테이지의 구동에 따른 다양한 동특성 변화에 대한 비교를 수행하고자 한다.

5.1 평면 운동에 따른 자기력 특성

Fig. 1 과 Fig. 3 에 주어진 RSA 와 ASA 의 구동원 제원을 Table 1 에 나타내었다. 테이블에 주어진 값을 이용하여 RSA 를 구성하는 단일 자기 요소간의 부상력과 추력 변화를 영구 자석 배열의 이동에 대해 정량화 하면 Fig. 9 와 같다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 RSA 의 경우 부상력/추력 모두 영구 자석의 횡방향 운동에 대해 비선형성이 지배적인 것을 알 수 있다. 그러나 그림 내의 점선으로 묘사된 평균 값을 힘 게인의 대표 값으로 선택했을 경우 힘의 변화량은 부상력에 대해 평균값을

Table 1 Specifications of basic magnetic elements comprising RSA & ASA

Item		Description	Spec.
RSA	Levitation coil	L/W/H	60(40)/60(40)/80mm
		Coil dia.	AWG 24
		Turns no.	1420
		Resistance	16.2Ω
	Thrust coil	L/W/H	60(30)/60(30)/56mm
		Coil dia.	AWG 24
		Turns no.	1590
		Resistance	16.5Ω
	PM	Dimension	10(D)×10(*l*)
		Magnetization	867,000(A/m)
ASA	Suspension coil	L/W/H	30(14)/30(14)/10mm
		Coil dia.	AWG 25
		Turns no.	245
		Resistance	8.6Ω
	Thrust coil	L/W/H	80(50)/80(50)/80mm
		Coil dia.	AWG 22
		Turns no.	1747
		Resistance	20.3Ω
	Iron core		10×20×15mm
	PM	Dimension	10(D)×10(*l*)
		Magnetization	867,000(A/m)

기준으로 3% 안에 존재한다. 또한 추력의 경우에는 약 5% 안에 존재한다. 이러한 변화 정도는 RSA 와 ASA 의 부상력을 정규화해서 묘사한 Fig. 10 을 통해 더욱 명확히 알 수 있다. 그러나 흡인력의 경우에는 상판 아래 놓여있는 전자석과 스테이지와 연동해 움직이는 강자성 평판과의 대향 면적이 스테이지 움직임에 관계없이 일정하기 때문에 공극이 일정하게 유지되면 그 크기는 Fig. 10 에서와 같이 일정하게 유지된다. 따라서 ASA 의 경우 동특성 지배 방정식에서 흡인력의 모멘트 암만을 고려하면 선형 제어가 무리 없이 수행될 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 RSA 의 경우에도 약 5% 내외의 부상력 변화는 제어기의 게인 여유만으로도 충분히 감당해 낼 수 있다. 특히 두 시스템 모두 스테이지의 횡 방향으로의 입출력 관계는 주파수 영역에서 강성이 배제된 이중 적분기 $1/s^2$ 의 동특성을 지니기 때문에 이러한 추력의 변화가 시스템 성능에 큰 영향을 끼치지는 않는다.

5.2 공극 강성을 포함한 응답 특성

두 시스템의 구동원을 나타내는 Fig. 5 를 고려하면 수동 자기 요소인 영구 자석과 강자성체 모두 복원력은 단지 중력에만 의존하는 것을 알 수

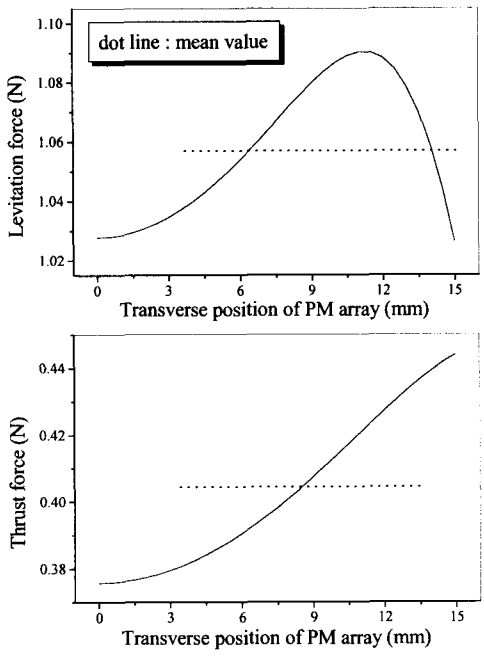

Fig. 9 Variation of magnetic force for planar movement of PM array

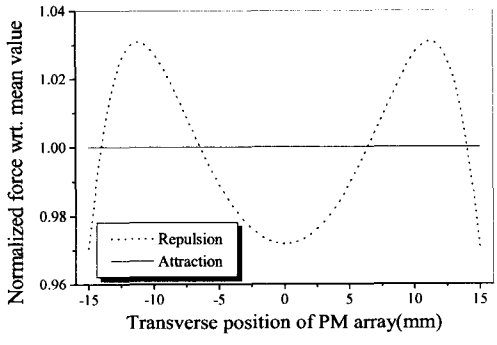

Fig. 10 Variation of normalized levitation forces for RSA & ASA

있다. 특히 앞서 언급한 것처럼 두 시스템의 횡방향 운동은 강성이 전혀 존재하지 않는 강체 운동이며 따라서 이러한 물리적인 특성이 시스템의 대역폭을 제한하는 결정적인 원인이 된다. 또한 서보 의존 (servo-dependent) 특성을 갖는 운동 특성상 이러한 복원력의 부재는 구동원에 인가되는 제한된 입력과 더불어 시스템이 갖는 고정밀의 운동 분해능에 반하는 요소가 되므로 부상 운동에 예압을 주어 시스템 강성을 확대 시키려는 시도들이 보고되고 있다.

6. 성능 평가

반발력 또는 흡인력 방식의 자기 부상을 이용하는 시스템에 내재되어있는 고유한 특성 비교에 추가하여 본 장에서는 개발된 RSA 와 ASA 에 국한된 성능, 즉 두 시스템의 작동 범위와 위치 분해능 그리고 외란 대항 능력 및 자유도간의 연성 특성을 비교한다.

우선 Fig. 2 의 자기 조합에서 확인할 수 있듯이 RSA 의 경우 스테이지의 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. 즉 Fig. 11 에 도시 되어있는 것처럼 스테이지 크기는 일정하게 유지되며 중심 축만이 서로 직교하는 단위 코일을 추가로 배치하여 스테이지의 이동 범위는 확장 될 수 있다. 물론 스테이지의 위치에 관계없이 부상력의 작동 점을 연결하는 다각형 안에 스테이지의 무게 중심이 반드시 놓여있도록 코일의 조합이 구성되어야 한다. 그러나 ASA 의 경우에는 고정되어있는 상판 전자석으로 인해 스테이지의 작동 영역을 확장하기 위해서는 하부 코일뿐만 아니라 스테이지의 크기도 연동해서 확장되어야만 전체 영역에 걸쳐 스테이지 하부의 강자성 평판이 전자석의 고른 자기장 분포를

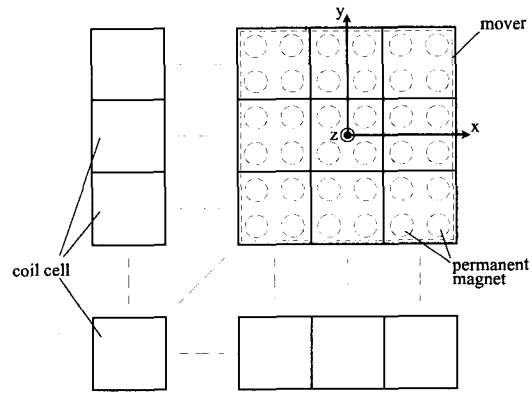

Fig. 11 Expansion of the stage operating range with its size fixed for RSA

받게 된다. 작동 범위에 추가하여 두 시스템의 위치 분해능을 고려하면 무엇보다 강한 비선형성의 특성을 지닌 강자성체가 존재하지 않는 RSA 가 ASA 에 비해 더욱 우수하다. 그러나 근본적으로 두 시스템의 스테이지는 모두 고정자로부터 기계적인 접촉이 없이 구동 되는 비접촉 시스템이므로 위치 분해능은 되먹임 루프 안에서는 모두 측정 기구와 제어 논리에 의존하는 특성을 갖는다. 따라서 이러한 비선형성의 유무가 시스템의 성능에 결정적인 영향을 주지는 않는다. 이러한 강자성체의 도입은 성능 측면보다는 시스템의 모델링 측면에서 논의하는 것이 바람직하며 따라서 자기 포화 현상등을 수반하는 강자성체의 비선형 모델링이 그렇지 않은 경우에 비해 더욱 난이 하다고 할 수 있다. 그러나 강자성체의 도입은 일반적으로 알려져 있는 높은 상대 투자율의 영향으로 공극의 에너지 밀도를 공심에 비해 배가 시킨다. 따라서 외란 대항 능력에서 판단해보면 ASA 가 RSA 에 비해 동일한 입력 전원 하에서는 훨씬 우수한 것을 알 수 있으며 평면 운동 방향으로 아무런 제약이 존재하지 않는 서피스 모터의 구조상 ASA 의 우수한 외란 대항 능력과 5 자유도(공극 방향 제외)에 걸친 양의 강성 특성은 ASA 가 RSA 에 비해 범용성을 갖을 수 있다는 것을 시사한다.

부상되어 움직이는 평면 스테이지는 앞서 언급한 것처럼 스테이지 아래에서 작용하는 6 축 힘에 의해 공간상에서 안정되게 구동 된다. 그러나 이러한 힘이 작용하는 평면과 스테이지의 무게 중심은 어느 정도의 옵셋을 갖는 것이 불가피하며 그러한 특성은 자유도 사이의 연성이라는 현상을 낳는다. 이러한 불필요한 과도 운동 특성은 공간상에서 움직이는 강체의 특성상 앞서 언급한 옵셋에 추가하여 다른 여러 이유들이 존재할 수 있으며 가능한 한 이러한 요소들을 줄이는 설계가 바람직하다. 이러한 연성의 예가 Fig. 12 에 나타나

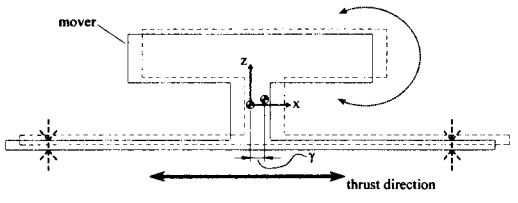

Fig. 12 Representative example of couple effects accompanied a motion of the stage for ASA

있다. 즉 스테이지의 좌우 운동에 의해 y 축을 회전축으로 하는 회전 연성 효과가 발생하며 또한 좌우 운동으로 인한 무게 중심의 이송량 γ는 양단의 흡인력에 영향을 주며 따라서 모멘트 암의 변화를 보상해 주어야만 원하는 운동을 구현할 수 있다. 그러나 ASA 에 비해 RSA 는 평판 형태의 스테이지 구조를 취하기 때문에 ASA 에 비해 그러한 연성의 효과가 적으며 앞서 언급한 옵셋 보다는 측정 기구의 기구학적 오차에 기인하는 연성 효과가 더욱 지배적이다.

7. 결론

기계적인 접촉으로 인해 가공 공차에 의존하는 구동기의 성능 한계를 극복하고 더욱 정밀한 운동을 구현하기 위하여 다양한 연구들이 시도되고 있다. 본 논문에서는 그러한 연구의 일환으로 저자들이 기개발한 서피스 모터를 주요 구동원으로 하는 비접촉식 RSA 와 ASA 의 비교 연구를 통해 자기력을 초정밀 시스템에 적용하였을 경우 발생할 수 있는 다양한 문제들을 정성적인 측면과 더불어 정량적인 측면에서 논의하였다.

일반적으로 널리 알려져 있는 공극을 통한 자기 반발력과 흡인력에 내재되어있는 특성들에 대한 고찰에 추가하여 이러한 힘을 이용해 부상되어 구동 되는 반발식 그리고 흡인식 6 축 스테이지의 힘 배치 및 조합, 구동원의 정량적 모델링, 자기력의 공극 변화와 스테이지 구동에 따른 동특성의 변화, 구현 정밀도와 외란에 대한 강인성 그리고 자유도간의 연성을 비롯한 성능 등을 비교 평가하여 추후 자기력을 이용한 6 자유도 초정밀 이송 시스템의 개발 시 적절한 참고자료가 되도록 하였다.

후 기

본 연구는 2000 년도 한국과학재단 목적 기초연구 과제(2000-1-30400-009-3)의 연구비 지원에 의한 연구 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Steve Chen, S. J. and Busch-Vishiniac, I. J., "A magnetically levitated, automated, contact analytical

probe tool," IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing, Vol. 8, No. 1, pp. 72-78, 1995.
2. Jung, K. S. and Baek, Y. S., "Design, modeling, and control of a novel six d.o.f positiong system using magnetic levitation," IEICE Trans. on Electronics, Vol. E83-C, No. 12, pp. 1937-1949, 2001.
3. 정광석, 백윤수, "전자기력 제어를 이용한 6 자유도 초정밀 스테이지," 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 3 호, pp. 158-164, 2000.
4. Holmes M., Hocken R. and Trumper D., "The long-range scanning stage : a novel platform for scanned-probe microscopy," Precision engineering, Vol. 24, pp. 191-209, 2000.
5. Jeong M. C. and Busch-Vishiniac I. J., "A submicron accuracy magnetic levitation micromachine with endpoint friction," Sensors and Actuators, Vol. 29, pp. 225-234, 1991.
6. Xu, W. and King, T., "Flexure hinges for piezoactuator displacement amplifiers : flexibility, accuracy, and stress considerations," Precision engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 4-10, 1996.
7. Awabdy, B. A., Shin, W. and Auslander D. M., "Nanometer positioning of a linear motion stage under static loads," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 3, No. 2, pp. 113-119, 1998.
8. Tadokoro S., Murakami T., Fuji S., Kanno R. and Oguro K., "An elliptic friction drive element using an ICPF actuator," IEEE Control Systems Magazine, Vol. 17, No. 3, pp. 60-68, 1997.
9. Tomita, Y. and Koyanagawa, Y., "Study on a surface-motor driven precise positioning system," Journal of Dynamic systems, Measurement, and Control, Vol. 117, pp. 311-319, 1995.
10. Jung, K. S. and Baek, Y. S., "Study on a novel contact-free planar moving system using electromagnet and permanent magnet," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 7, No. 2, pp. 35-43, 2002.
11. Jung, K. S. and Baek, Y. S., "Contact-free electromagnetic planar motion system for high precision manipulating in super clean environments," Proc. of the 32nd ISR (International Symposium on Robotics), Korea, April, pp. 1099-1104, 2001.
12. 정광석, 백윤수, "비접촉 평면 구동기의 자기력 조합 방식 구동 원리," 한국정밀공학회지, 제 18 권 제 3 호, pp. 115-121, 2001.
13. Jung, K. S. and Baek, Y. S., "Precision stage using a non-contact planar actuator based on magnetic suspension technology," Mechatronics (to be published).
14. 정광석, 이상헌, 백윤수, "자기 흡인식 부상 원리에 기초한 비접촉식 서피스 액추에이터의 초정밀 범용 스테이지에의 적용 가능성," 대한기계학회 논문집 A 권, 제 26 권, 제 3 호, pp. 452-460, 2002.