

보이스코일모터를 이용한 초정밀 자기부상 스테이지

이학준^a, 안다훈^{b*}

Ultra-precision Magnetic Levitation Stage Utilizing Voice Coil Motors

Hak-Jun Lee^a, Dahoon Ahn^{b*}^aSmart Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology^bDepartment of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology

ARTICLE INFO

Article history:

Received	24	January	2022
Revised	2	March	2022
Accepted	15	March	2022

Keywords:

Magnetic levitation (maglev)

Voice coil motor (VCM)

Force constant

High precision

Position control

ABSTRACT

Voice coil motor is an actuator that employs a non-contact electromagnetic force between its coils and magnets, and is widely used in precision stages on account of its good linearity between current and force. Additionally, these advantages are beneficial for implementing the magnetic levitation mechanism. Unlike the case of general use of a voice coil motor where 1-DOF translational motion is applied, 6-DOF magnetic levitation causes variation in the relative position and orientation between the coil and the magnet. Accordingly, the force constant also changes. In this study, high-level precision positioning of 20 nm was realized through the design and control of a magnetic levitation stage using voice coil motors. In the process, the change in the force of the voice coil motor was found to be approximately 1% within the range of motion. Therefore, the proposed design was verified to be suitable for high-precision stages.

1. 서 론

중스테이지는 가공 또는 측정하고자 하는 대상체를 이동하여 그 위치를 실시간으로 결정하는 시스템이다. 특히 반도체 또는 디스플레이 제조 장비는 높은 공정 정밀도를 요구하여 이들 공정에 사용하는 스테이지는 다양한 형태로 고정밀 성능을 구현하는 연구가 진행되었다^[1-7].

회전형 서보모터와 리드스크류, 볼스크류 등의 모션 변환 장치를 이용하는 스테이지^[1]는 선형 모션을 구현하는 가장 간단한 방법이지만 백래시로 인해 정밀도의 한계를 보인다. 이를 극복하기 위해 모션 변환 장치 없이 구동기에서 이동 대상체에 구동력을 직접 전달할 수 있는 리니어모터를 사용^[2]하지만 볼베어링, 크로스롤러, 도브테일과 같은 가이드의 마찰 역시 정밀도 한계의 원인 된다.

따라서, 리니어모터와 공기베어링의 조합^[3,4]을 사용하여 구동기와 이동 대상체 사이 기계적 연결이 없는 비접촉 구성으로 마찰을 제거하여 고정밀 모션을 달성할 수 있다.

고정밀도와 함께 장행정 모션을 구현하기 위해 공기베어링 이중 서보 메커니즘을 활용한다^[5]. 정밀도는 낮지만 행정 거리가 긴 조동스테이지와 행정 거리는 짧지만 정밀도가 높은 미세스테이지를 조합한다. 이때, 미세스테이지의 구동기로서 기계적 결합이 없는 보이스코일모터를 이용하여 정밀도를 높일 수 있다. 그러나 공기 베어링 가이드를 사용하는 스테이지는 진공이 요구되는 공정에 사용하기 어렵고, 공압을 유지하기 위한 공기 챔버 등 부수적인 설비가 요구된다. 이에 따라 진공 호환성, 비접촉 액추에이터 및 비접촉 가이드를 갖는 대면적 자기부상 메커니즘이 스테이지 시스템에 도입되기도 하였다^[6-12]. kim 등^[6]은 다수개의 다상 선형동기모터의

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6532

E-mail address: dhahn@seoultech.ac.kr (Dahoon Ahn).

구조를 이용하여 자기부상 6자유도 모션을 구현하였다. 선형동기 모터의 경우 전류의 크기와 상을 조절하여 추진력과 부상력을 모두 생성하고 제어할 수 있으므로 최소 3개 이상의 선형동기모터로 6자유도를 구현할 수 있다. 초기에 Kim 등에 의하여 구현된 형태는 선형동기 모터의 권선과 자석 크기에 따라 제한적인 행정 거리를 가졌으나, *compter*^[7-10]를 비롯한 다수의 연구에 의해 2차원의 대면적 자석배열 및 권선 배열을 이용하여 행정 거리를 이론적으로 무한히 확장할 수 있는 자기부상 평면모터가 소개되었다. 정광석 및 이상현^[11,12] 등은 부상력과 추진력을 생성하는 구동기를 분리한 형태의 자기부상 시스템을 제안하였다. 전자석의 흡인력을 이용하여 부상을 수행하고 추진력 발생 또한 가변자기저항 원리를 이용하여, 로런츠 힘을 이용하는 공심형 구동기에 비해 높은 구동력과 낮은 열발생의 장점이 있다. 그러나 다상모터 정류와 철심 코어가 유발하는 비선형성, 부상력과 추진력 간의 커플링 등으로 인해 제어의 복잡성이 증가하는 것이 단점이다.

본 연구에서는 고정밀 스테이지를 구현하기 위한 방법의 하나로써 보이스코일모터를 이용한 자기부상 스테이지의 설계 및 구현 결과를 제시한다. 보이스코일모터는 기계적 결합이 없어 무마찰 구동이 가능하며, 자기부상 메커니즘으로 구현하여 진공 환경에 사용할 수 있는 장점이 있다. 특히 보이스코일모터를 6자유도의 자기부상 구동기로 적용하면서 발생하는 코일과 자석 간의 상대적 위치 및 방향 변화에 따라 힘상수 변화에 대해 분석하고 이중 서보 시스템 등에서 미세스테이지로 사용할 수 있는 성능을 구현 및 검증한다. 이에 따라, 본문은 다음과 같은 구성으로 기술되었다. 2.1장에서 보이스코일모터를 이용한 자기부상 스테이지의 설계 절차를 제시하고, 2.2장에서 사용하는 보이스코일모터에 따른 힘상수 변화를 시뮬레이션 해석을 통해 검증한다. 2.3장에서 제어 대역폭 확보를 위한 자기부상 이동체의 동적 강성을 시뮬레이션 해석으로 검증하고, 2.4장에서 제어 시스템을 구현하고 자기부상 스테이지의 성능을 평가한 내용을 나타내었다.

2. 본 론

2.1 보이스코일모터 이용 자기부상 스테이지 설계

자기부상 스테이지는 고정 프레임과 기계적 결합 없이 이동체가 공중에 떠 있어서 6자유도의 모션을 수행해야 한다. 따라서 자기부상 스테이지를 구현하기 위해서는 최소한 6개의 보이스코일모터가 필요하다. 일반적인 보이스코일모터는 직선 축을 따라 양방향으로 1축의 구동력을 발생시킬 수 있기 때문이다. 6자유도 모션을 구현을 위한 가장 단순한 구성은 각 자유도별로 1개의 보이스코일모터를 대응시키는 것이다. 그러나 병진 자유도를 구현하기 위해 모든 보이스코일모터를 이동체의 질량 중심에 두는 것이 불가하고, 또

한 1개의 보이스코일모터로 회전 자유도 구현은 불가하다. 만일 Fig. 1(a)와 같이 2개의 보이스코일모터가 x 방향 모션, 다른 2개의 보이스코일모터가 y 방향 모션에 대응하면 공간적 배치와 함께 운동학적 특성이 대칭성을 갖는다. 3개의 보이스코일모터를 사용하는 Fig. 1(b)와 같은 구성 또한 대칭성을 갖지만 x 방향과 y 방향의 구동력이 서로 연관되어 제어 복잡성이 증가한다. 3개의 보이스코일모터로 x 방향과 y 방향을 Fig. 1(c)와 같이 분리하면 대칭성 확보가 불가하고, 방향에 따라 보이스코일 각각의 설계 목표가 바뀌며 설계 복잡성이 증가한다. 따라서 4개의 보이스코일모터로 대칭성과 독립성을 확보할 수 있는 Fig. 1(a)와 같은 구성을 선택하였으며, 수직 방향 또한 같은 원리로 4개의 보이스코일모터를 배치하는 구성을 이용한다. 총 2종류, 8개의 보이스코일모터로 Fig. 1(d)와 같이 자기부상 스테이지를 설계하였다.

2종류의 보이스코일모터 중 첫 번째는 수평 방향으로 구동력이 발생하는 HVCM(horizontal voice coil motor)이며, 두 번째는 수직 방향으로 구동력이 발생하는 VVCM(vertical voice coil motor)이다. 네 모서리를 따라 HVCM이 배치되었고, 네 꼭짓점에 VVCM이 배치되었다. HVCM은 수평력을 생성하므로 4개의 HVCM을 통해 면내 방향인 x-y-0z 방향 모션이 가능하고, VVCM은 수직력을 생성하므로 4개의 VVCM을 통해 면외 방향인 z-0x-0y 방향 모션이 가능하다.

두 종류의 보이스코일모터 모두 전력 소모에 따른 열발생을 제

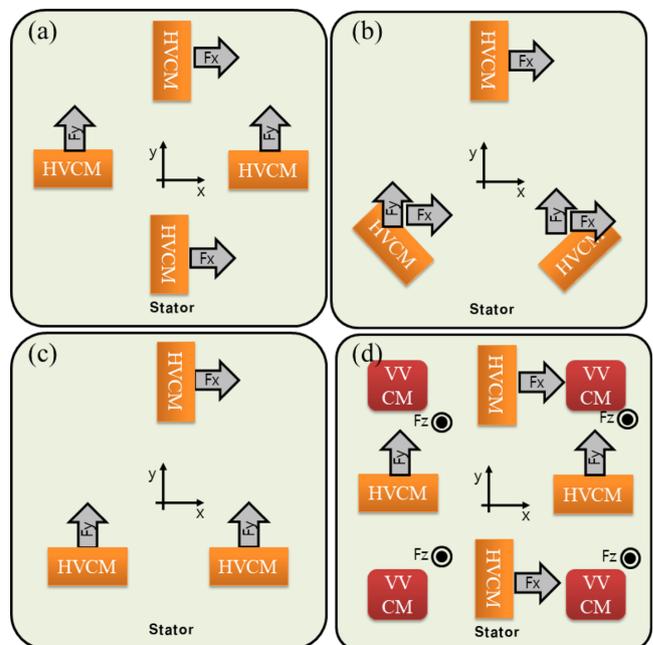


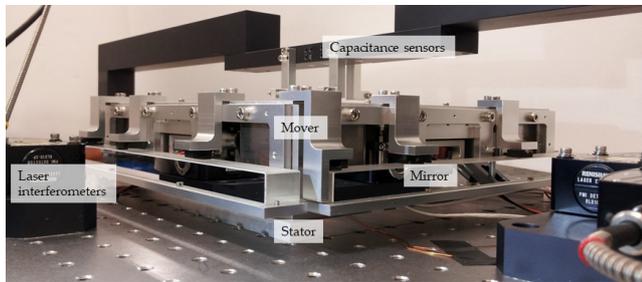
Fig. 1 Topology of voice coil motors for the magnetic levitation stage (a) symmetric arrangement of four HVCMs (b) symmetric arrangement of three HVCMs (c) asymmetric arrangement of three HVCMs (d) symmetric arrangement of eight HVCMs and VVCMs

한한 조건에서 구동력의 최대화를 목적으로 단순한 구조를 가질 수 있도록 설계하였다. Fig. 2에는 수평 및 수직 방향 구동력을 내는 보이스코일모터 각각의 구조가 나타나 있으며, Table 1은 보이스코일모터의 제원을 보여준다. 상세한 설계 과정은 선행 연구^[13]를 참조하여 살펴볼 수 있다.

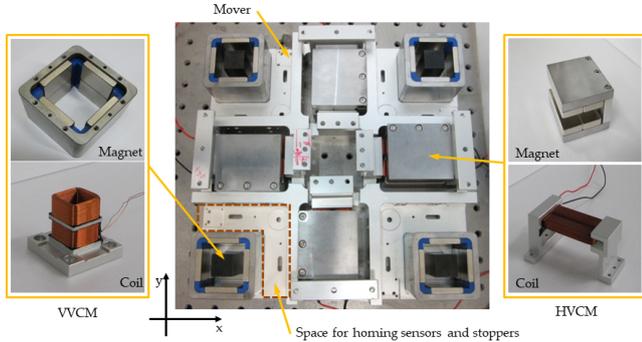
보이스코일모터는 코일과 자석 간의 로런츠 힘을 이용하여 구동력을 발생시킨다. 따라서 코일 또는 자석 모두 고정자 또는 이동자가 될 수 있다. 본 연구에서는 자석을 이동자, 코일을 고정자로 선정하여 고정 프레임에 코일이 위치하고 자기부상 이동체에 자석이 위치한다. 따라서 자기부상 이동체는 코일과 연결된 전선에 의한 외란의 영향이 없고, 코일에서 발생하는 열이 직접적으로 이동체

상부의 가공 또는 검사 대상체로 전달되지 않는 장점을 지닌다.

자기부상 스테이지는 우선 시스템 구현을 위해 반드시 조립성이 확보되어야 하며, 특히 보이스코일모터를 이용한 자기부상 스테이지는 코일과 자석 간 공극이 행정 거리 수준인 1 mm 정도로 매우 작으므로 반복적인 조립 작업에 대한 용이성과 반복성 확보가 매우 중요하다. VVCM은 외곽에 영구자석과 백요크가 배치되어 내부가 비어 있다. 이 내부 공간에 내부 요크와 코일부가 수직으로 삽입될 수 있으므로 이동자와 고정자 간 배치 및 조립이 매우 용이하다. 이동자를 위에서 아래로 내리며 마치 고정자에 뚜껑 역할을 하는 이동자를 덮듯이 배치할 수 있다. 반면 HVCM은 영구자석과 백요크가 위아래로 배치되어 코일과의 상대적인 움직임이 수평 방향으로 발생한다. 따라서 HVCM이 조립된 상태에서는 이동자의 자유로운 탈부착이 불가능하다. 본 연구에서는 자기부상 이동체에 VVCM과 HVCM의 자석을 조립하고 HVCM의 코일 또한 이동체 자석에 임시로 조립하여 이동체가 상하로 자유롭게 탈부착 되도록 한 후, VVCM의 코일이 조립된 고정자에 수직으로 뚜껑을 덮듯이 내려 조립을 진행하였다. 최종 조립 시에는 이동체에 임시로 조립되어 있던 HVCM의 코일이 고정자에 완전히 조립된다. 자기부상 스테이지에는 보이스코일모터뿐만 아니라 부상 및 위치 결정을 위한 변위 센서의 배치 공간도 Fig. 2와 같이 확보하였다.



(a) Experiment setup of the magnetic levitation stage



(b) Developed voice coil motors and their assembly

Fig. 2 Designed and fabricated magnetic levitation stage

Table 1 Specifications of voice coil motors

	HVCM	VVCM
number of coil turns (#)	297	738
max. current (A)	3.427	1.235
electric resistance (Ω)	3.29	11.29
max. force (N)	52.30	28.20
force constant (N/A)	15.26	22.83
power consumption (W)	17.44	17.20
operation duty	45%	100%
dimension (mm × mm × mm)	90 × 50 × 40	55 × 55 × 40
motion range	± 1 mm	± 1 mm

2.2 보이스코일모터 힘상수의 균일성

보이스코일모터는 자석과 코일 간 로런츠 힘으로 구동력을 생성한다. 인가하는 전류와 구동력이 비례하며, 비례율인 힘상수 값이 설계 및 제어에 주요한 인자이다. 보이스코일모터는 기계적 결합이 없는 상태에서 1축의 병진 방향 구동력을 생성하므로 이동자가 모션 가이드에 의해 구동력과 동일한 방향으로 정렬된 상태에서 주로 사용한다. 따라서 일반적으로는 구동력 방향으로의 코일과 자석 간 상대 위치 변화에 대해 힘상수의 균일성을 평가하고 설계에 반영한다. 그러나 본 연구에서와 같이 자기부상 스테이지에 보이스코일모터를 적용할 경우 이동자가 6자유도의 모션을 수행하게 되므로, 각각의 보이스코일모터에서는 이동자에 해당하는 자석이 구동력 방향 외 6자유도의 모든 방향으로 위치변화가 발생한다. 따라서 자기부상 스테이지 이동자의 행정 거리 범위 내에서 보이스코일모터의 힘상수 균일성 유지에 대한 검증이 필요하며, 변화율이 과도할 경우 제어에 반영하는 것이 필요하다.

본 연구에서 설계한 HVCM과 VVCM은 모두 양방향으로 1 mm의 행정 거리를 갖는다. 따라서 병진운동 방향(x, y, z)에 대해 각각 ± 1 mm, 회전운동 방향($\theta_x, \theta_y, \theta_z$)에 대해 각각 ± 2 deg. 자석이 이동할 때 힘상수 변화를 시뮬레이션해 분석하였다. 회전운동 방향 각도 범위는 자석과 코일 간 공극에 의해 자석이 회전할 수 있는 범위로 설정한 것이다. Fig. 3은 유한요소해석 모델을 나

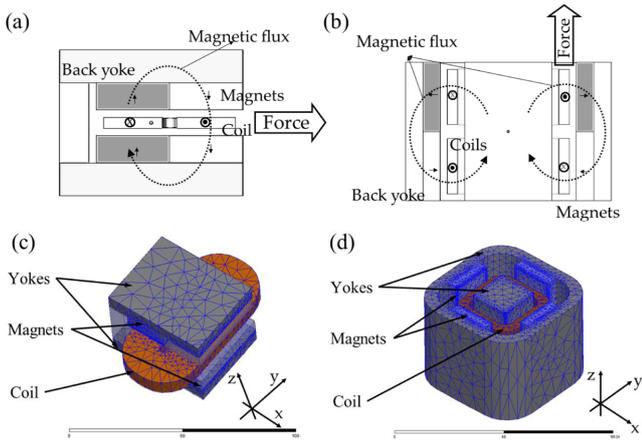
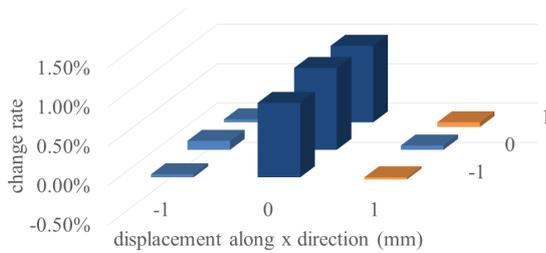
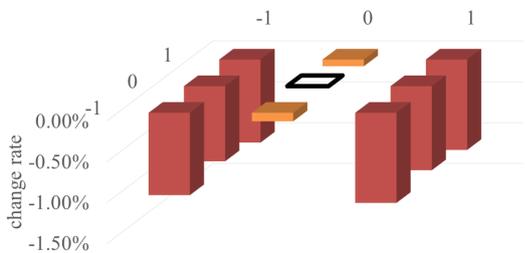


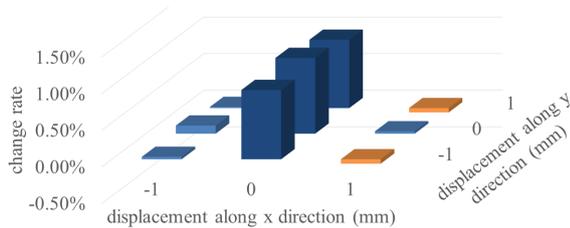
Fig. 3 Structures and force generation of VCMs (a) cross-section of the HVCM (b) cross-section of the VVCM (c) a finite element simulation model of HVCM (d) a finite element simulation model of VVCM



(a) Force constant change with 1 mm z displacement



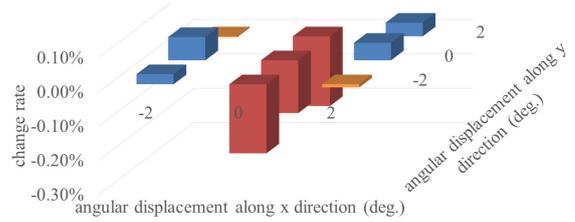
(b) Force constant change without z displacement



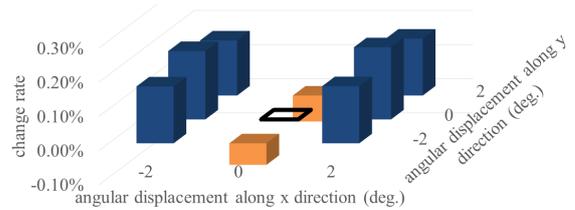
(c) Force constant change with -1 mm z displacement

Fig. 4 Change rate of HVCM force with respect to the translational displacement of the magnet

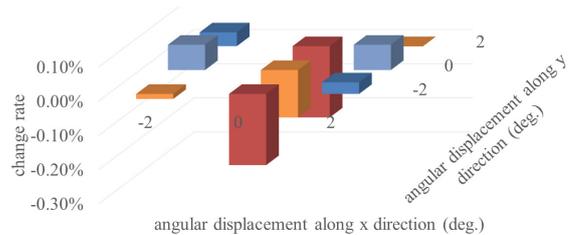
타내며, 해석 결과는 Fig. 4-7에 도시하였다. 이동자인 자석이 초기 위치에 있을 때 단위 전류 인가에 따른 구동력 대비, 자석이



(a) Force constant change with 2 deg. angular displacement along z direction



(b) Force constant change without angular displacement along z direction

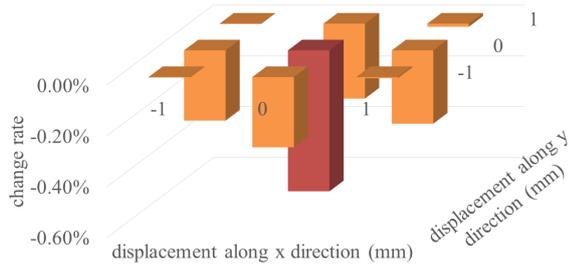


(c) Force constant change with -2 deg. angular displacement along z direction

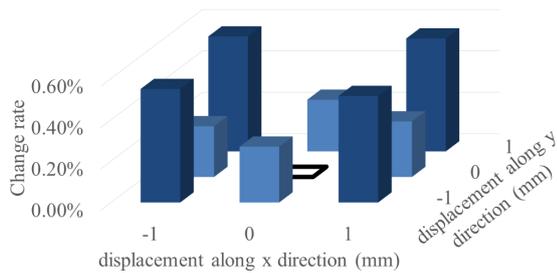
Fig. 5 Change rate of HVCM force with respect to the angular displacement of the magnets

이동자의 행정 거리만큼 이동하였을 때 구동력의 변화량을 비율로 나타낸 것이다.

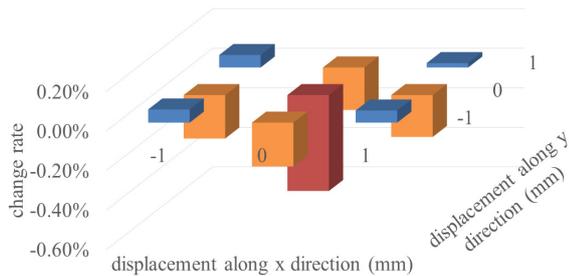
HVCM에서 이동자인 자석이 병진 방향으로 운동할 때 Fig. 4에서와 같이 최대 1.1%의 구동력 변화만이 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig. 4에서 전체적으로 볼 수 있듯이 z 방향 이동에 따라 약 1% 전후의 변화가 발생하며, x 방향 이동에 따라서는 비슷한 수준인 약 1% 전후의 변화가 발생한다. 그에 반해 y 방향으로 이동에 대해서는 구동력 변화가 거의 없다. 즉 HVCM에서는 자석과 코일이 z 방향으로 가까워지며 코일에 영향을 주는 자속밀도가 증가하여 구동력이 증가하고, x 방향으로 이동 시에는 자속밀도 범위에서 코일이 벗어나면서 구동력이 감소한다. 그러나 y 방향은 코일의 장축 방향이어서 자석의 이동 시에 자속밀도 범위에서 벗어나는 코일의 비율이 낮아 구동력 변화가 거의 없는 것으로 나타난다. HVCM의 이동자인 자석이 회전 방향으로 운동할 때는 Fig. 5에서와 같이 최대 0.21%의 작은 구동력 변화만이 발생한다. z 방향



(a) Force constant change with 1 mm z displacement



(b) Force constant change without z displacement

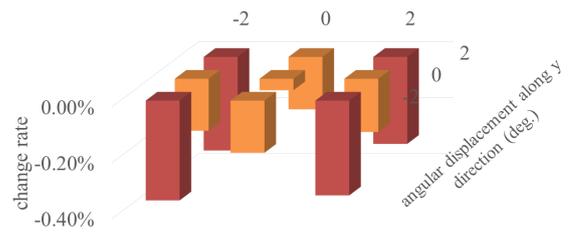


(c) Force constant change with -1 mm z displacement

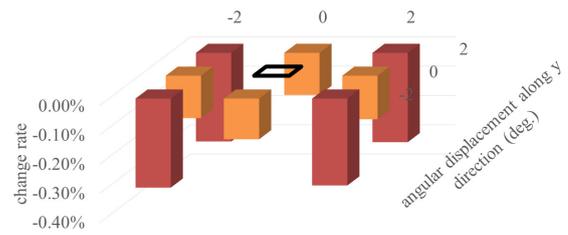
Fig. 6 Change rate of VVCM force with respect to the translational displacement of the magnets

회전에 따라 약 0.15% 정도의 구동력이 감소한다. z 방향 회전은 전류 방향에 수직인 자속밀도 성분 감소를 유발하지는 않으나 자석이 코일의 범위를 벗어나며 구동력 발생에 관여하는 자속밀도가 감소하여 구동력 감소가 일어난다. x 방향 회전에 따라 약 0.20% 정도의 구동력 증가, y 방향 회전에 따라서는 0.07% 정도의 구동력 감소가 발생한다. x축 회전 및 y축 회전 모두 코일에 수직인 자속밀도 성분의 감소를 유발하며 구동력이 감소하여야 하나, x축 회전 시에는 자석의 회전 반경이 커 코일 일부에 자석이 매우 가까워지면서 코일에 영향을 미치는 자속밀도가 증가함에 따라 구동력이 증가하는 것으로 보인다.

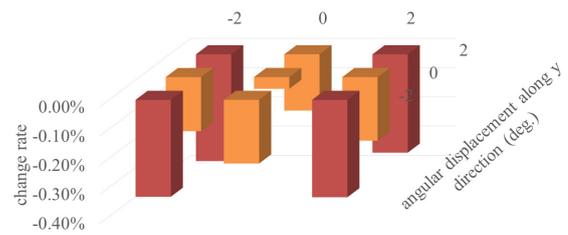
VVCM은 XY 평면상에서 대칭을 이루고 있으므로 x 및 y 방향으로의 운동에 대해서는 대칭적인 결과를 보인다. 이동자인 자석이 병진 방향으로 운동할 때 Fig. 6에서와 같이 최대 0.50%의 구동력 변화만이 발생하는 것을 볼 수 있다. z 방향 이동 시에는 자속



(a) Force constant change with 2 deg. angular displacement along z direction



(b) Force constant change without angular displacement along z direction



(c) Force constant change with -2 deg. angular displacement along z direction

Fig. 7 Change rate of VVCM force with respect to the angular displacement of the magnets

밀도가 감소하며 구동력이 약 0.50% 내외로 감소하고, x 또는 y 방향으로 이동 시에는 자석에 가까워지며 0.25% 내외의 구동력 증가를 보인다. 그에 따라 x 및 y 방향으로 동시에 이동 시에는 효과가 증첩되며 0.50% 내외의 구동력 증가가 나타난다. VVCM 이동자인 자석이 회전 방향으로 운동할 때는 Fig. 7에서와 같이 최대 0.37%의 구동력 변화가 발생한다. x 또는 y 방향으로 회전 시 코일 전류에 수직인 자속밀도 성분이 감소하며 0.15% 내외의 구동력 감소를 나타내고, x 및 y 방향으로 동시에 회전 시에는 효과가 증첩되며 0.3% 내외의 구동력 감소가 나타난다. 반면 z 방향으로 회전 시에는 0.04% 수준의 매우 작은 구동력 감소만이 나타난다. 이는 z 방향 회전이 x 또는 y 방향보다 회전 반경이 작기 때문으로 보인다. x, y, z 방향 회전이 모두 증첩될 때 0.35% 내외의 구동력 감소를 보인다.

자기부상 스테이지의 주목적은 병진운동 방향(x, y, z)으로의 위

치 결정에 있으므로, 코일과 자석 간 병진 방향 상대 위치 변화는 스테이지의 동작 중 지속해서 발생한다. 반면 회전운동 방향(θ_x , θ_y , θ_z) 각도 변화는 스테이지 구성품의 조립이나 센서 신호 초기화 위치 오차 등에 의하여 주로 발생하고, 스테이지 동작 중에는 회전 변위를 초기 상태와 같이 유지하려고 하여 코일과 자석 간 상대 각도 변화가 거의 없다. 코일과 자석 간에 병진 및 회전 위치변화 모두를 고려한 힘상수 변화를 분석하기 위해, 보이스코일모터에서 가장 큰 힘상수 변화를 나타낸 병진 방향 위치에서 모든 회전 방향에 ± 2 deg.의 각도 변화를 인가하여 해석을 수행하였다. 그 결과 HVCM은 최대 1.27%로 병진 방향 위치변화만 있을 때에 비해 소폭 증가하였고, VVCM은 최대 0.19%로 오히려 감소하는 수치를 나타내었다. HVCM과 VVCM 모두 자기부상 이동체의 행정 거리 범위 내에서 1.27% 이하 수준의 낮은 힘상수 변화만을 보인다. 제작이나 조립 오차 등을 고려하더라도 변화율이 높지 않으므로 자기부상 스테이지의 구현 및 제어 시에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 볼 수 있다.

2.3 자기부상 이동체의 동적 강성

자기부상 스테이지의 제어 시 이동체는 강체로 간주한다. 만일 이동체가 페르프 제어 대역 내에 구조 모드 진동수를 갖는다면 위치 결정 제어가 불안정하거나 발산하게 된다. 따라서 자석을 포함한 이동체는 낮은 질량 관성과 높은 강성을 가져야 한다. 이에 따라 Fig. 8과 같이 알루미늄으로 구성된 이동체의 구조 모드 및 고유진동수에 대한 해석을 수행하였다. 그 결과 Fig. 8(b)-(d)와 같이 1차, 2차 및 3차 모드에 대응하는 고유진동수가 각각 340.6 Hz, 686.4 Hz, 700.3 Hz로서 충분히 높아 제어 대역과 겹치지 않는 것을 확인하였다.

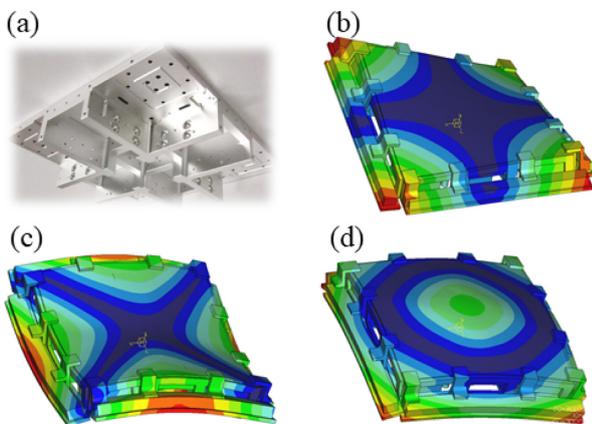


Fig. 8 Modal analysis using finite element simulations (a) fabricated mover of the magnetic levitation stage (b) mode shape of the 1st resonance (c) mode shape of the 2nd resonance (d) mode shape of the 3rd resonance

2.4 자기부상 스테이지 제어

자기부상 스테이지는 부상 및 하강을 위한 준비 및 종료 단계와 실제 정밀 위치 결정을 수행하는 작업 단계로 나누어 제어를 수행한다. 부상 및 하강을 위한 변위 피드백 센서는 자기부상 이동체의

Table 2 Specifications of position feedback sensors

Sensor		Measurement range	Theoretical resolution (16 bit A/D)	Bandwidth
Levitation/ Landing	C9.5R	1250 μm	19.07 nm	15 kHz
	C8S	2000 μm	30.52 nm	15 kHz
Positioning	C5S	10 μm	150 pm	15 kHz
	RLE10	1 m	38.63 pm	20 MHz

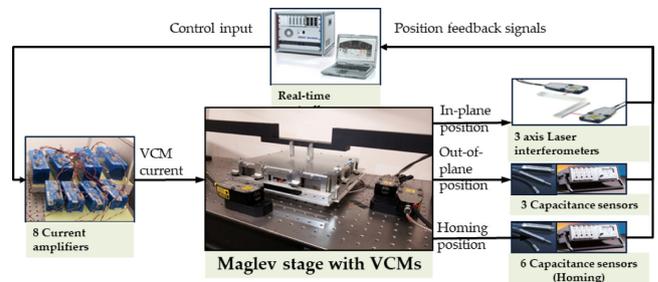


Fig. 9 Experiment set-up of the magnetic levitation stage

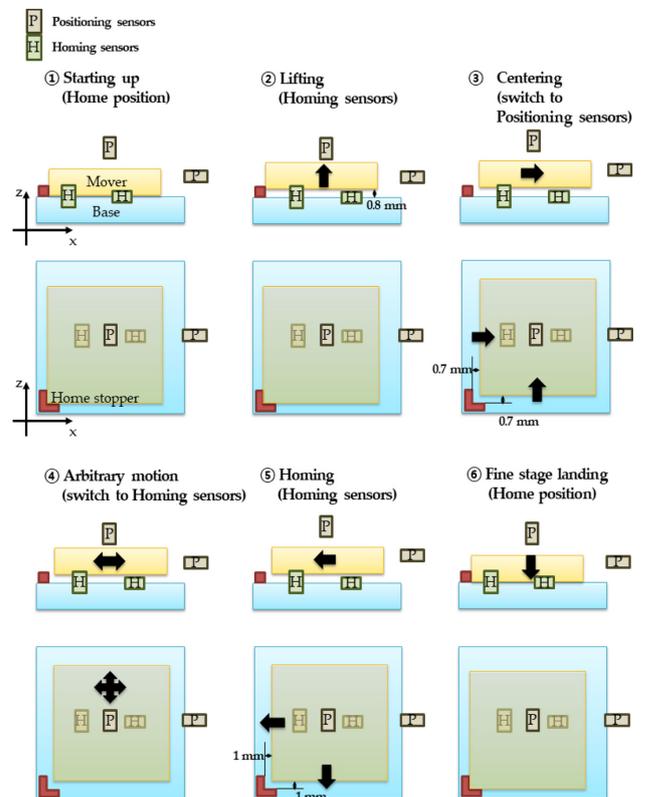


Fig. 10 Motion sequence of the magnetic levitation stage

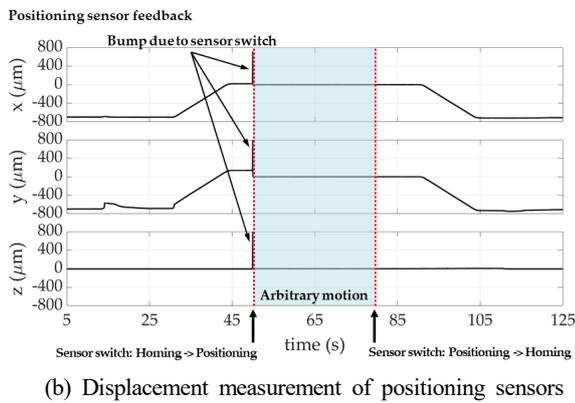
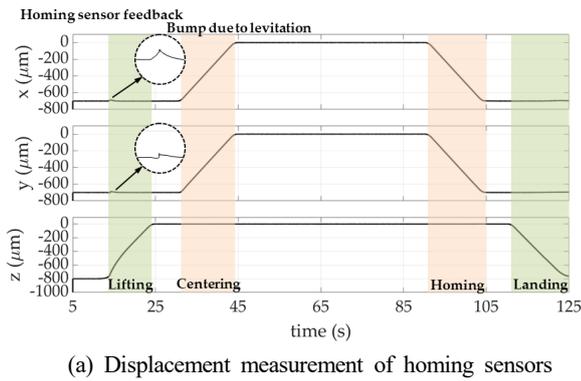


Fig. 11 Measured motion trajectory of the magnetic levitation stage

6자유도 모션 측정을 위해 총 6개의 정전용량 센서를 자기부상 스테이지 고정자 내부에 배치하여 이동자를 측정한다. 3개는 수직 방향의 변위를 측정하고(C9.5R, Lion Precision, US), 다른 3개는 수평 방향의 변위를 측정한다(C8S, Lion Precision, US). 이들 변위 센서는 비교적 정밀도가 낮은 반면 측정범위가 넓어 최초 부상 및 마지막 하강 제어에 사용된다. 실제 정밀 위치 결정 수행에는 고정밀도의 레이저 간섭계(RLE10, Renishaw, UK) 3축과 정전용량형 센서(C5S, Lion Precision, US) 3축을 이용한다. 레이저 간섭계는 대변위 측정이 가능한 센서로서 조동스테이지와 함께 이중서보 시스템으로 구현할 수 있도록 한다. 각 센서의 제원은 표 2와 같다.

Fig. 9는 자기부상 스테이지의 제어 시스템 구성도를 나타낸다. 변위 센서의 신호를 피드백 받아 실시간 제어기(DS1005, dSPACE, Germany)에서 제어를 수행한다. 8개 보이스코일모터의 전류제어를 위해 8개의 선형 전류증폭기(TA 115, Trust Automation, US)를 이용하였다. Fig. 10은 자기부상 스테이지의 제어 순서도를 나타낸다. 초기에 이동자는 홈 위치에서 정지 상태로 고정자 상에 자리 잡고 있다. 부상 및 하강용 변위 센서의 피드백을 이용하여 제어를 시작한다(starting up). XY 평면

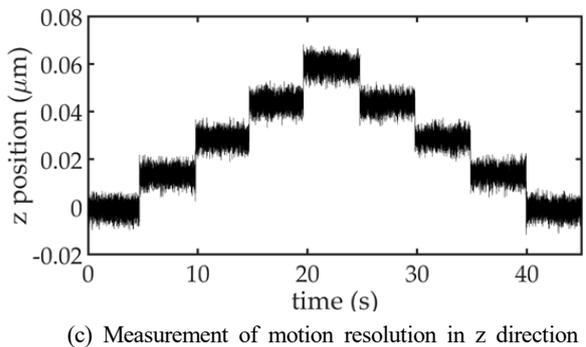
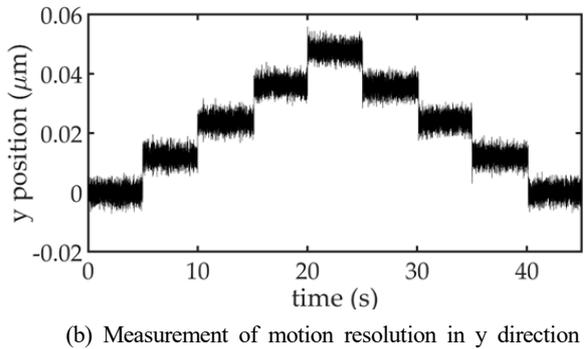
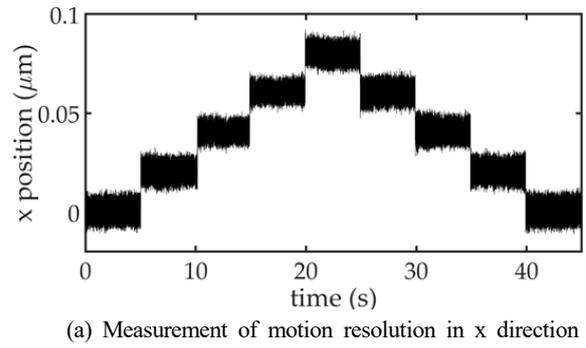


Fig. 12 Motion resolution test results by consecutive step motion commands

내 위치는 유지하면서 수직으로 0.8 mm 부상한다(lifting). 이후 x 및 y 방향으로 0.7 mm 이동하여 이동자는 고정자의 XY 평면 중앙에 위치한다(centering). 이 위치는 보이스코일모터 구동 범위의 중앙점이 되어 각 코일과 자석이 서로 중앙에 정렬한다. 이후 정밀도가 낮고 측정범위가 큰 부상 및 하강용 변위 센서에서 정밀도가 높은 위치 결정용 센서로 피드백 신호를 변경한다. 위치 결정용 센서를 이용하여 높은 정밀도로 6자유도의 원하는 모션을 수행하고 작업이 종료되면 다시 부상 및 하강용 센서로 피드백 신호를 변경한다. 부상 및 하강용 센서를 이용하여 xy 평면 상 홈 위치로 이동하고(homing), 이동자는 고정자 상으로 하강한다(landing).

제어 순서도에 따라 자기부상 스테이지의 위치 제어를 수행한 결과를 Fig. 11에 나타냈다. 6자유도 제어 알고리즘은 자유도별로

6개의 PID 제어를 이용하여 구현하였다. 부상 시에 고정자와의 접촉력이 사라지는 순간 작은 크기의 모션 범프가 발생하며, 부상 및 하강 센서에서 위치 결정용 센서로 피드백 신호를 전환하는 순간에도 범프가 발생하는 것을 볼 수 있다. 위치 결정 정밀도를 평가하기 위해 계단 입력을 인가하여 Fig. 12와 같이 최소 분해능을 구하였다. x, y, z 방향으로 20 nm, 12 nm, 15 nm의 step motion 이 구분되는 것을 확인하였다.

3. 결론

본 연구에서는 초정밀 제조 공정의 가공 및 검사 장비 등에 사용될 수 있는 자기부상 스테이지를 보이스코일모터를 이용하여 구현하고 그 성능을 검증하였다. 수직 또는 수평 방향으로 구동력을 발생하는 2종류의 보이스코일모터 8개를 이용하여 6자유도 초정밀 자기부상 스테이지를 대칭성 및 조립의 용이성 등을 고려하여 설계하였다. 특히 1자유도 구동기로만 주로 사용하는 보이스코일모터를 자기부상 스테이지에 적용함에 있어 자기부상 이동체의 6자유도 모션에 따라 발생하는 보이스코일모터의 힘상수 변화를 시뮬레이션해 분석하였으며, 이를 통해 구동력의 변화량이 1% 내외로 작아 제어 시 모델 불확도 등에 미치는 영향이 미미함을 확인하였다. 또한 자기부상 제어 대역폭의 확보를 위해 이동자의 구조모드 및 고유진동수를 시뮬레이션으로 분석하여 340 Hz 이상의 1차 구조모드를 확인하였다. 마지막으로 자기부상 스테이지를 제작하고 6자유도 자기부상 및 위치 제어를 수행하여 20 nm의 정밀도를 구현하여 초정밀 위치 결정장치로서의 성능을 검증하였다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No.2019R1G1A1099736) 및 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원 (과제번호 20CTAP-C157468-02) 으로 수행되었습니다.

References

- [1] Otsuka, J., 1992, Nanometer Level Positioning using Three Kinds of Lead Screws, *Nanotechnology*, 3:1 29-36, <https://doi.org/10.1088/0957-4484/3/1/006>.
- [2] Futami, S., Furutani, A., Yoshida, S., 1990, Nanometer Positioning and its Micro-dynamics, *Nanotechnology*, 1:1 31-37, <https://doi.org/10.1088/0957-4484/1/1/006>.
- [3] Ro, S.-K., Park, J.-K., 2008, Development of a Miniature Air-bearing Stage with a Moving-magnet Linear Motor, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 9:1 19-24.
- [4] Ro, S.-K., Kim, S., Kwak, Y., Park, C. H., 2010, A Linear Air Bearing Stage with Active Magnetic Preloads for Ultraprecise Straight Motion, *Precis. Eng.-J. Int. Soc. Precis. Eng. Nanotechnol.*, 34:1 186-194, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2009.06.010>.
- [5] Kim, K., Choi, Y.-M., Nam, B.-U., Lee, M.-G., 2012, Dual Servo Stage without Mechanical Coupling for Process of Manufacture and Inspection of Flat Panel Displays via Modular Design Approach, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 13:3 407-412, <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0052-0>.
- [6] Kim, W.-J., Trumper, D. L., 1998, High-precision Magnetic Levitation Stage for Photolithography, *Precis. Eng.-J. Int. Soc. Precis. Eng. Nanotechnol.*, 22:2 66-77, [https://doi.org/10.1016/S0141-6359\(98\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0141-6359(98)00009-9).
- [7] Compter, J. C., 2004, Electro-dynamic Planar Motor, *Precis. Eng.-J. Int. Soc. Precis. Eng. Nanotechnol.*, 28:2 171-180, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2003.08.002>.
- [8] Peijnenburg, A. T. A., Vermeulena, J. P. M., Eijk, J.V., 2006, Magnetic Levitation Systems Compared to Conventional Bearing Systems, *Microelectron. Eng.*, 83:4-9 1372-1375, <https://doi.org/10.1016/j.mee.2006.01.248>.
- [9] Jansen, J. W., van Lierop, C. M. M., Lomonova, E. A., Vandenput, A. J. A., 2008, Ironless Magnetically Levitated Planar Actuator, *J. Appl. Phys.*, 103 07E905, <https://doi.org/10.1063/1.2832310>.
- [10] Boeij, J. D., Lomonova, E., 2009, Experimental Verification of Look-up Table based Real-time Commutation of 6-DOF Planar Actuators, *Journal of System Design and Dynamics*, 3:4 563-571, <https://doi.org/10.1299/jsdd.3.563>.
- [11] Jung, K. S., Lee, S. H., Baek, Y. S., 2002, Feasibility Study of General-purpose Precision Stage Using A Novel Contact-Free Surface Actuator Based on Magnetic Suspension Technology, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 26:3 452-460.
- [12] Lee, S. H., Baek, Y. S., 2003, Contact-free Linear Actuator Using Active Magnetic Bearing, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, 20:7 91-98.
- [13] Ahn, D., Kim, H., Choi, K., Choi, Y.-M., Lim, J.-Y., 2020, Design Process of Square Column-shaped Voice Coil Motor for Magnetic Levitation Stage, *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, 62:3 517-540, <https://doi.org/10.3233/JAE-190029>.

	<p>Hak-Jun Lee Senior researcher in the Department of Smart Manufacturing R&D System, Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is precision motion mechanism and semiconductor/display equipment. E-mail: hak1414@kitech.re.kr</p>
	<p>Dahoon Ahn Professor in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is precision motion mechanism and energy harvesting. E-mail: dhahn@seoultech.ac.kr</p>