

# 1 자유도 능동제어에 의한 영구자석 반발형 자기부상 테이블의 구현

조영근\*, 최기봉\*\*, 신시 타다히코\*\*\*, 시모코베 아키라\*\*\*

## Implementation of Permanent Magnetic Repulsion Type of Magnetic Levitation Table Using One Degree-of-freedom Active Control

Young Geun Cho\*, Kee-Bong Choi\*\*, Tadahiko Shinshi\*\*\* and Akira Shimokohbe\*\*\*

### ABSTRACT

This paper shows an experimental magnetic levitation table using one degree-of-freedom active control. The magnetic levitation table using repulsions of permanent magnets was theoretically presented already. Thus the objective of this paper is to prove stable levitation with only one degree-of-freedom active control experimentally. For the design of the system, at first, permanent magnets are selected. Secondly, the spring constants of the virtual spring are obtained by simulation. Thirdly, the moving magnets are arranged using a stable layout relation. Fourthly, a linear voice coil motor is designed. Finally, the magnetic levitation system is manufactured. The phenomenon of stable levitation in the manufactured table is proven by means of dynamic time and frequency responses. The differences between the theoretical natural frequencies and experimental ones are analyzed. Also, stable range in the control direction is shown experimentally.

**Key Words :** Permanent magnet (영구자석), Repulsion (반발력), Magnetic levitation (자기부상), Stable layout relation (안정 배치관계), Linear voice coil motor (선형 보아스 코일 구동기)

### 1. 서론

자기부상 시스템은 비접촉식 구동특성으로 인하여 운동 시 마찰이 존재하지 않는 장점이 있다. 이와 같은 무마찰 구동으로 인하여 청정환경에서의 구동원이나, 고속운전이 가능한 자기부상열차 등에 이용되고 있다. 그러나 자기부상식 구동은 접촉식에 구동에 비해 강성이 작고, 고유적인 불

안정성을 가지고 있기 때문에 부가적 안정화 노력이 필요하다. 자기부상 시스템에서 자기회로의 적절한 설계에 의해 최소 자유도의 제어를 부여함으로써 시스템을 안정화시키려는 노력이 오래 전부터 있어왔다. 여기서 최소 자유도란 1 자유도 이상을 일컫는 것으로, Earnshaw 와 Braunbeck 의 이론에 근거한 것이다<sup>(1)</sup>.

반발력을 사용한 시스템의 경우에 있어 현재

\* 2001년 7월 20일 접수

\*\* 미래산업주식회사 미래연구센터

\*\*\* 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 로봇제어그룹  
동경공업대학(일본) 정밀공학연구소

까지 발표된 논문에 따르면, 회전형 자기부상시스템의 경우 1 자유도만의 제어에 의해 안정화에 성공한 예가 보고되었다. Levitron이라는 상품명의 장난감<sup>(2,3,4,5)</sup>과 자기베어링<sup>(6)</sup>이 그 예이다. Levitron은 축방향의 회전속도를 임계속도 이상으로 유지함에 의해 안정된 부상을 유지하며, 자기베어링은 축방향의 운동을 제어함에 의해 안정된 운동을 유지할 수 있다. 비록 1 자유도에 의한 회전형 자기부상 시스템이 성공적으로 발표되었지만, 병진형 시스템의 경우 1 자유도 능동제어에 의한 안정 부상의 예는 아직 보고된 바가 아직 없고, 2 자유도 이상의 능동제어 시스템 만이 발표되었다<sup>(7,8,9,10)</sup>.

본 논문의 저자들은 병진형 자기부상 시스템의 경우에 1 자유도 및 1 또는 2 자유도의 능동제어에 의한 2 종류의 영구자석 반발형 자기부상 테이블을 제시한 후 이 테이블의 가동부가 안정화될 수 있는 가동자석들의 배치관계를 해석적으로 제안하였다<sup>(11)</sup>. 따라서 본 논문에서는 제시된 2 종류의 자기부상 테이블 중 1 자유도 제어형 자기부상식 테이블을 선택하여, 주어진 안정조건에 의해 설계 및 제작한 후 실험적으로 1 자유도 만의 제어에 의해 테이블의 가동부가 안정화될 수 있음을 보이며, 또한 개발된 시스템의 응용을 위해 새로운 형태의 자기부상식 웨어퍼 반송 시스템을 제안하여 개발된 자기부상 테이블의 실용화의 가능성 을 타진하고자 한다.

## 2. 영구자석에 의한 반발형 자기부상 테이블

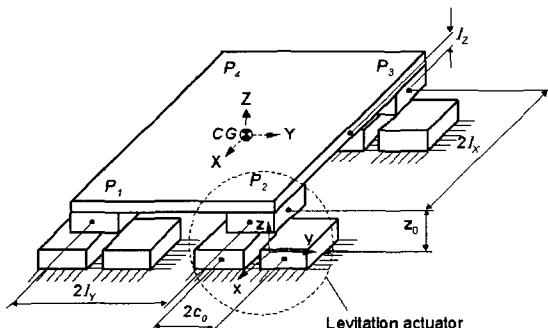


Fig. 1 Configuration of magnetic levitation table

Fig. 1 은 이전의 논문에서 저자들이 제안한 영구자석 반발형 자기부상 테이블이다. 테이블은 반

발식 부상을 위한 4 개의 부상 구동기를 가지고 있다. 각각의 부상 구동기의 하면에는 2 개의 영구자석이 프레임에 고정되어 있으며, 상면에는 1 개의 영구자석이 테이블 가동부에 부착되어 있다. 상면의 영구자석과 하면의 영구자석은 서로 동일한 극이 마주보고 있어서 반발력이 작용한다. 이 자기부상 테이블은 1 자유도의 능동제어에 의해 안정한 부상이 가능하다.

### 2.1 자기부상 테이블에서 가동자석들의 안정 배치관계<sup>(11)</sup>

Fig. 1에서 테이블 가동부의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = 0 \quad (1)$$

여기서

$$\mathbf{M} = \text{diag}[m \ m \ m \ J_{GX} \ J_{GY} \ J_{GZ}] \quad (2)$$

$$\mathbf{q} = [AX \ \Delta Y \ \Delta Z \ \Delta \alpha \ \Delta \beta \ \Delta \gamma]^T \quad (3)$$

이고,  $m$ 은 테이블 가동부의 질량,  $J_{GX}, J_{GY}, J_{GZ}$ 는  $X, Y, Z$  축에 대한 테이블 가동부의 질량관성모멘트이다. 또한  $\mathbf{K}$ 는 테이블 가동부의 강성행렬(stiffness matrix)로 다음과 같다.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 & 0 & K_{x\beta} & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 & K_{y\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{\alpha\gamma} & 0 & K_{aa} & 0 & 0 \\ K_{\beta\gamma} & 0 & 0 & 0 & K_{\beta\beta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{\gamma\gamma} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $k_{xx}, k_{yy}, k_{zz}$ 를 부상 구동기의 가상 스프링에 발생하는  $x, y, z$ -방향의 스프링 상수라 할 때 강성행렬의 각 요소는 다음과 같다.

$$K_{xx} = 4k_{xx} \quad (5)$$

$$K_{yy} = 4k_{yy} \quad (6)$$

$$K_{zz} = 4k_{zz} \quad (7)$$

$$K_{\alpha\alpha} = 4(-F_{z0}l_z + k_{yy}l_z^2 + k_{zz}l_y^2) \quad (8)$$

$$K_{\beta\beta} = 4(-F_{z0}l_z + k_{xx}l_z^2 + k_{zz}l_x^2) \quad (9)$$

$$K_{\gamma\gamma} = 4(k_{xx}l_x^2 + k_{yy}l_x^2) \quad (10)$$

$$K_{xp} = K_{\beta x} = -4k_{xx}l_z \quad (11)$$

$$K_{ya} = K_{\alpha y} = 4k_{yy}l_z \quad (12)$$

이 시스템이 안정하기 위해서는  $X$ -축의 강성계수가 다음을 만족하여야 한다.

$$K_{xx} > \frac{K_{x\beta} K_{\beta x}}{K_{\beta\beta}} > 0 \quad (13)$$

또한 가동자석 들의 배치관계가 다음과 같이 만족되어야 한다.

$$l_x > \sqrt{-\frac{k_{xx}}{k_{yy}}} l_y \quad (14)$$

$$l_y > \sqrt{\frac{F_{z0}}{k_{zz}}} l_z \quad (15)$$

여기서  $l_x, l_y, l_z$  는 테이블 가동부의 중심(center of gravity)과 각 가동자석의 중심간 거리이다.

## 2.2 영구자석의 설계

부상구동기용 영구자석으로 스미토모 엔지니어링의 제품인 희토류계 영구자석 NEOMAX48 을 선정하였다. 이것의 잔류자속밀도 (residual induction)는 1.36 T 이고, 고유보자력(coercive force)은  $8.75 \times 10^5$  A/m 이다. 이 영구자석은 잔류자속밀도와 보자력이 다른 종류의 영구자석에 비해 크기 때문에 큰 반발력을 얻을 수 있는 장점이 있다. 영구자석의 크기는  $30mm \times 30mm \times 10mm$  의 직육면체이다. 선정된 영구자석의 표면에서 발생되는 자속밀도는 MAXWELL 을 이용하여 Fig. 2 와 같이 구했다.

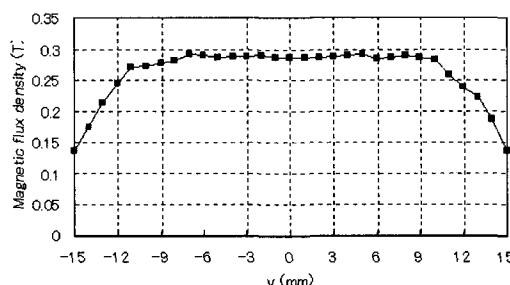


Fig. 2 Magnetic flux density

그림에서 보듯이 영구자석 표면의 중앙에서 발생하는 자속밀도는 0.286 T 이다. 또한 부상구동기에 사용할 12 개의 영구자석의 표면 중앙에서 자속밀도를 실측하였으며, 실측한 자속밀도의 평균치는 0.287 T 이고, 표준편차는 0.013 T 였다. 따라서 MAXWELL 을 이용하여 구한 값은 실제값과 비교하여 단지 0.3 % 정도의 오차 만을 보이므로 MAXWELL 을 이용하여 구할 반반력 등의 값들도

역시 신뢰할 수 있을 것으로 고려된다.

## 2.3 부상 구동기에서 영구자석 들의 배치

Fig. 1 에서 부상 구동기의 영구자석 간의 배치를 위한 거리  $c_0$  및 초기위치  $z_0$  는 각각 40 mm 및 25 mm 로 선정하였다. 이것은 z-축에 대한 영구자석 들의 초기간극을 8.5 mm, y-축에 대한 간극을 10 mm 로 설정하는 것이며, 이 설정에 의해 고정자석과 가동자석 사이에 존재하는 가상 스프링의 스프링 상수를 시뮬레이션을 통해 구할 수 있다. 본 연구에서는 MAXWELL 을 이용하여 가동자석에 작용하는 반발력을 구한 후, 초기위치에서 힘의 기울기를 이용하여 스프링 상수를 다음과 같이 계산하였다.

$$k_{xx} = -3,700 \text{ N/m} \quad (16)$$

$$k_{yy} = 1,188 \text{ N/m} \quad (17)$$

$$k_{zz} = 2,660 \text{ N/m} \quad (18)$$

또한, 초기위치에서 발생하는 z 방향의 부상력  $F_{z0}$  는 다음과 같다.

$$F_{z0} = 37.5 \text{ N} \quad (19)$$

1 개의 가동자석에서 발생하는 부상력  $F_{z0}$  는 식 (19)와 같이 계산되었기 때문에, 4 개의 가동자석에서 발생하는 부상력과 테이블 가동부의 자중은 초기위치  $z_0$  에서 균형을 이루어야 한다. 따라서 균형을 이루기 위한 부상 테이블 가동부의 질량 m 은 15.3 kg 으로 계산되었다.

## 2.4 부상 테이블에서 가동자석 들 간의 배치 관계

Fig. 1 의 테이블 가동부를 안정화 시키기 위해 서는 X-방향의 능동제어기를 설치하여 식 (13)의  $K_{xx}$  를 양으로 만든 후, 식 (14)와 (15)를 만족하도록 가동자석 들을 배치하여야 한다.

식 (14)와 (15)를 이용하여 가동자석 들의 배치 관계( $l_x, l_y, l_z$ )를 구하기 위해,  $l_x, l_y, l_z$  의 범위를 200 mm 이내로 한정한 후, 시뮬레이션을 통해 Fig. 3 과 같은 안정영역을 구했다. 이 그림에서 안정영역 내에 있는 1 세트의 ( $l_x, l_y, l_z$ )를 선택할 경우 1 자유도 만의 능동제어에 의해 부상 테이블 가동부의 안정화가 가능하다. 본 연구에서는 안정영역 내의 한 점을 선택하여 다음과 같이 결정하였다.

$$(l_x, l_y, l_z) = (160 \text{ mm}, 80 \text{ mm}, 49.5 \text{ mm}) \quad (20)$$

식 (20)의 가동자석 배치관계를 선택함으로써 부상 테이블 시스템의 강성행렬의 요소를 Table 1 과 같이 구했다.

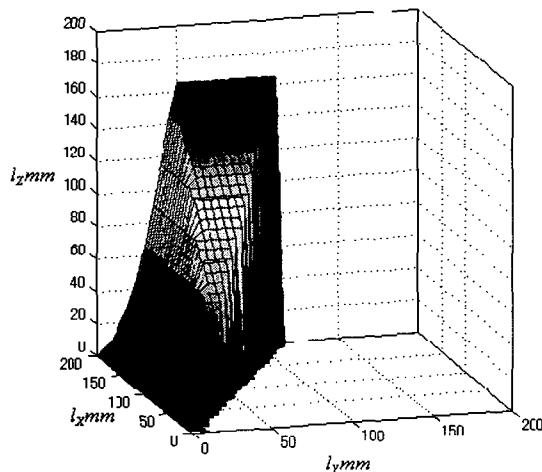


Fig. 3 Stabilization range for layout of moving magnets

Table 1 Elements of stiffness matrix

Elements	Values
$K_{xx}$	-14,800 N/m
$K_{yy}$	4,750 N/m
$K_{zz}$	10,600 N/m
$K_{\alpha\alpha}$	72.3 N/m
$K_{\beta\beta}$	228.7 N/m
$K_{rr}$	26.9 N/m
$K_{xy} = K_{yx}$	733 N
$K_{yz} = K_{zy}$	235 N

## 2.5 X-축 구동기

부상 테이블 시스템의 X-축에 대한 강성계수를 양으로 만들기 위해 Fig. 4 와 같은 보이스 코일 모터(voice coil motor)를 고려하였다. 이 구동기는 영구자석을 포함하고 있는 요크(yoke)와 코일로 구성되어 있다. 코일은 기저의 프레임에 고정되어 있고 요크는 부상 테이블 가동부에 부착되어 있는 가동자석형 구동기이다. 요크와 코일사이의 간극

으로 인하여 부상 테이블 가동부는 비접촉식 부상이 가능하다.

보이스 코일 모터의 설계에서 주의해야 할 점은 구동축이 테이블 가동부의 중심(center of gravity)을 통과하여 X-축 방향 이외의 다른 축에는 영향을 미치지 않도록 해야 한다. 설계한 선형 구동기의 사양은 Table 2 와 같다.

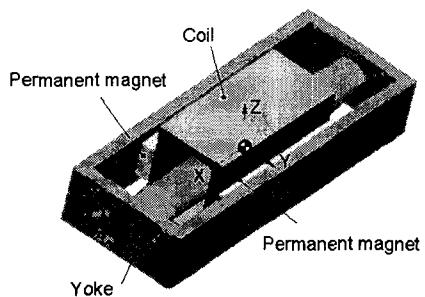


Fig. 4 Linear voice coil motor

Table 2 Specification of linear voice coil motor

Items	Values
Dimension of outer yoke	98 mm×39 mm×236 mm
Depth of outer yoke	10 mm
Diameter of center yoke	32 mm
Dimension of coil	58 mm×76 mm×135 mm
Depth of coil	10 mm
Diameter of coil wire	0.6 mm
Number of turns of coil	1800 turn
Resistance of coil	13.4 Ω

보이스 코일 모터의 코일에 전류  $i_c$  를 인가할 때 모터에서 발생하는 추력  $F_d$  는 다음과 같다.

$$F_d = K_i i_c \quad (21)$$

여기서  $K_i$  는 추력계수이다. 이 추력계수는 MAXWELL 을 이용한 자기력의 시뮬레이션을 통해서 Fig. 5 와 같은 전류와 추력과의 관계를 구한 후 이것으로부터 다음과 같은 값을 구했다.

$$K_i = 10.4 \text{ N/A} \quad (22)$$

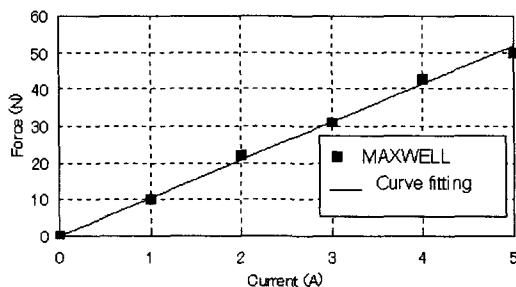


Fig. 5 Relationship between force and current

## 2.6 자기부상 테이블의 제작

보이스 코일 모터로 인하여 Fig. 1에서 제시한 자기부상 테이블의 형태가 수정되었다. 우선 선형 구동기의 코일이 테이블 가동부와 접촉되지 않게 하기 위해서 테이블 가동부 상판의 중앙을 직사각형으로 제거하였다. 그 후 위에서 제시한 가동자석 들의 배치관계를 유지하면서 자중이 초기위치  $z_0$ 에서 균형을 이루도록 하기 위해 테이블 가동부에 더미 중량(dummy weight)을 첨가하였다.

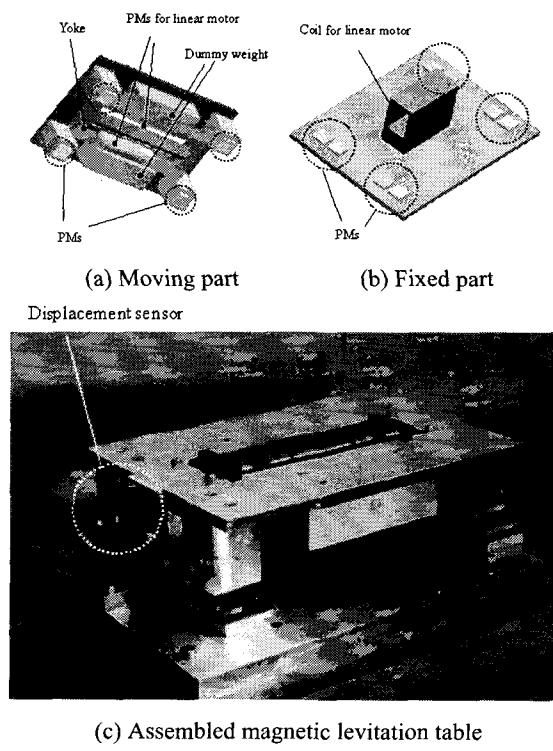


Fig. 6 Magnetic levitation system

자기부상 테이블의 전체 구조는 Fig. 6과 같다. 그림에서 (a)는 테이블의 가동부로서 테이블 상판, 더미 중량 및 부상 구동기용 가동자석들과 보이스 코일 모터용 영구자석을 포함한 요크이고, (b)는 기저 프레임으로 부상 구동기용 고정자석들과 선형 구동기용 고정 코일이다. (c)는 실험을 위해 제작한 자기부상 테이블의 사진이다. 여기서는 X-축 방향의 제어를 위한 변위 센서가 포함되어 있다. 테이블 가동부의 질량관성 모멘트는 설계도면으로부터 계산에 의해 추출하였으며 그 결과는 Table 3과 같다.

Table 3 Mass inertia moments of table moving part

Mass inertia moments	Values
$J_{Gx}$	$0.080 \text{ kg m}^2$
$J_{Gy}$	$0.140 \text{ kg m}^2$
$J_{Gz}$	$0.207 \text{ kg m}^2$

## 3. 실험

보이스 코일 모터에 의해 1 자유도에 대해 PID 제어를 함으로써 테이블의 가동부가 안정하게 부상되었다. Fig. 7은 X-축 방향의 PID 제어에 의해 테이블 가동부가 안정하게 부상되는 현상을 시간 영역에서 보여주고 있다. 제어를 하고 있는 X-축 방향의 응답은 매우 빠른 반면 그 외의 비제어 축에서는 매우 느리고 서서히 감소하는 응답을 보여주고 있다. 응답이 느린 원인은 비 제어축의 고유 진동수가 매우 낮기 때문이다. 또한 서서히 감소하는 응답의 원인은 가동자석의 운동으로 인하여 영구자석 들의 표면에 와전류(eddy current)가 발생하며 이 와전류로 인해 냄평으로 발생하였기 때문인 것으로 고려된다.

테이블 가동부의 동적 컴플라이언스를 초기위치에 대해서 Fig. 8처럼 측정하였다. 그림에서, 비제어축 고유진동수는 6 Hz 이하로 관찰되었다. 또한 Table 1과 Table 3에 의해 각 축의 고유진동수를 계산할 수 있다. 실험에 의한 고유진동수와 계산에 의한 고유진동수는 Table 4와 같다. 테이블에

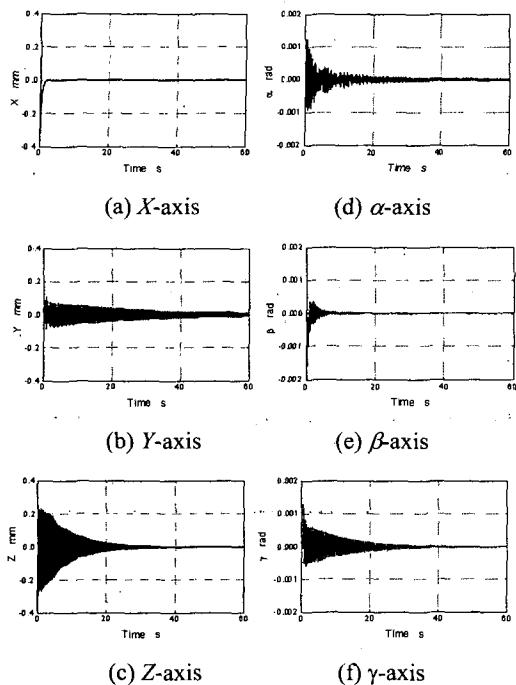


Fig. 7 Time responses of magnetic levitation table

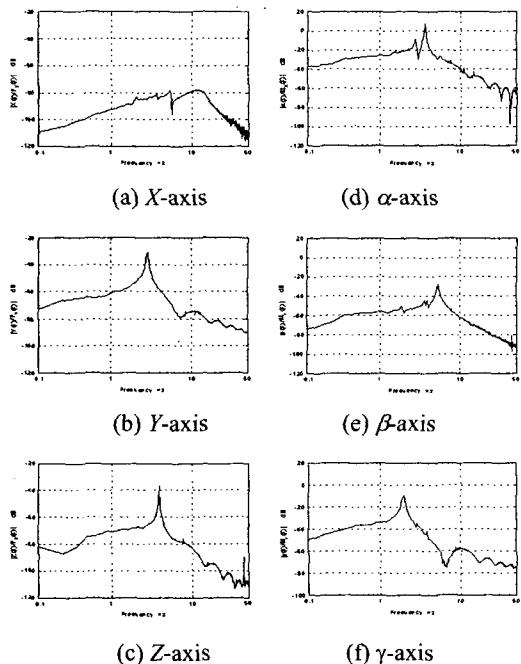


Fig. 8 Frequency responses of magnetic levitation table

Table 4 Comparison of natural frequencies between experiments and calculations

Axes	Calculations (Hz)	Experiments (Hz)
$X$	2.81	2.88
$Z$	4.20	3.88
$\alpha$	4.78	3.63
$\beta$	6.43	5.38
$\gamma$	1.82	2.00

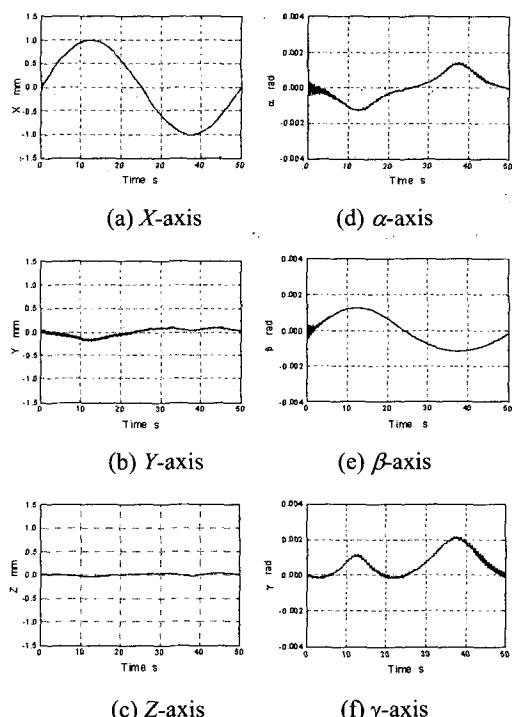


Fig. 9 Time responses using  $X$ -axis sinusoidal command

서 병진방향의 고유진동수는 잘 일치하고 있지만 회전방향의 고유진동수는 최대 25 %의 오차를 보여주고 있다. 오차의 원인은 참고문헌 (11)에서 테이블 구동부의 회전에 의해 가동자석에 발생하는 모멘트 향이 운동방정식 (1)을 유도할 때 무시되었기 때문인 것으로 고려된다.

*X*-축에 사인파 입력을 인가하여 테이블 가동부를 운동시킬 때 안정하게 구동 가능한 *X*-축 방향의 구동범위를 Fig. 9 와 같이 측정하였다. 식 (1)-(4)에서, *X*-축의 운동은 *Y*-축의 회전방향인  $\beta$ -축과 연성되어 있어서  $\beta$ -축 운동에만 영향을 줄 것으로 기대되었으나, 실험을 통해서 본 결과는 나머지 4 축에서도 모두 *X*-축 운동의 영향이 관찰되었다. 이것의 원인으로서, 4 개의 부상 구동기의 영구자석에서 발생하는 자속밀도의 형태가 서로 동일하지 않기 때문에 실험상의 초기위치가 설계상의 위치와 변동이 생겨 발생된 것으로 고려된다. 그럼에서와 같이 *X*-축의 구동범위는  $\pm 1\text{ mm}$  까지 안정적으로 구동 되었으나 이 구동범위 이상에서는 시스템이 불안정하게 되는 현상이 관찰되었다.

#### 4. 응용

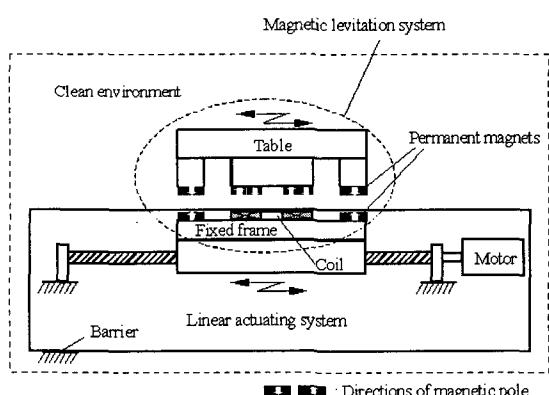


Fig. 10 Proposed wafer transportation system

개발된 자기부상 테이블의 응용을 위해 Fig. 10과 같은 새로운 형태의 웨이퍼 반송 시스템을 제안한다. 제안된 반송 시스템은 넓은 구동 범위를 갖는 회전모터에 의한 선형구동시스템과 그 위에 부상되어 있는 자기부상 테이블의 가동부로 구성된다. 이 때 자기부상 테이블 고정부의 보이스 코일의 형태는 평면형으로 수정되어야 한다. 이들 시스템은 청정환경 안에 놓여 있으며, 구동 시 마찰에 의한 먼지 입자의 발생 가능성이 있는 선형 구동시스템은 폐공간을 형성하도록 벽에 의해 자기부상 테이블과 완전히 격리시킴으로써 환경 오염의 가능성을 배제시킨다. 자기부상 테이블의 고

정부는 선형구동 시스템의 이송부에 부착되어 있어 선형구동시스템의 운동에 따라 부상테이블 가동부를 레귤레이션 제어한다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 참고문헌 (11)에서 제시한 영구자석 반발형 자기부상 테이블을 제작한 후 실험을 통해 1 자유도의 능동제어 만에 의해 안정한 부상을 구현하였다. 현재 전 세계적으로 1 자유도 만의 능동제어에 의해 안정적인 부상을 실험적으로 보여준 것은 회전형 부상시스템 밖에 존재하지 않았다. 그러나 본 연구에서는 제안된 병진형 부상시스템을 실제적으로 구현하여 병진형 부상시스템도 1 자유도의 능동제어에 의해 안정된 부상을 할 수 있음을 성공적으로 증명하였다. 또한 개발된 자기부상 시스템을 청정환경에서 사용하기 위해 새로운 형태의 웨이퍼 반송 시스템을 제안하였다.

본 연구에 의해 개발된 자기부상 테이블의 실험결과를 통해서 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (i) 구현된 시스템의 고유진동수는 계산된 결과에 비해 회전방향의 고유진동수에서 최대 25%의 오차를 보였다. 이것의 원인으로서는 운동방정식 유도 시 가동자석에 발생하는 모멘트 항이 무시되었기 때문인 것으로 고려된다.
- (ii) 이론상 운동방정식에 나타나지 않았던 연성항이 실험에 의해 관찰되었다. 이것은 4 개의 부상 구동기의 영구자석에서 발생하는 자속밀도의 형태가 동일하지 않기 때문인 것으로 고려된다.
- (iii) 구현된 테이블 가동부는  $\pm 1\text{ mm}$  의 구동범위 내에서 안정된 부상을 보여주었다.

#### 참고문헌

1. Jayawant B.V., "Electromagnetic suspension and levitation techniques," Proceedings of The Royal Society of London, Vol. A 416, pp. 245-320, 1988.
2. Kagan D., "Building a magnetic levitation toy," Physics Teacher , Vol. 31, pp. 432-433, 1993.
3. Berry M.V., "The Levitron™: an adiabatic trap for spins," Proceedings of The Royal Society of London, Vol. A 452, pp. 1207-1220, 1996.

4. Simon M.D., Heflinger L.O., Ridgway S.L., "Spin stabilized magnetic levitation," American Journal of Physics, Vol. 65, No. 4, pp. 286-292, 1997.
5. Jones T.B., Washizu M., Gans R. "Simple theory for the Levitron®," Journal of Applied Physics, Vol. 82, No. 2, pp. 883-888, 1997.
6. Mukhopadhyay S.C., Ohji T., Iwahara M., Yamada S., Matsumura F., "Disturbance attenuation and  $H^\infty$  control of repulsive type magnetic bearing," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 5, pp. 4233-4235, 1997.
7. Polgreen G., "Rail-ways with magnetic suspension," The Engineer, Vol. 226, pp. 632-636, 1968.
8. Carabelli S., Cerruti F., Delprete C., Majo F.D., Genta G., Zanolli S., "A two active-axes suspension for maglev vehicles," Proc. of the 5th International Symposium on Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan, pp. 357-362, 1996.
9. Carabelli S., Delprete C., Genta G., Zanolli S., "Control of a two active-axes suspension for maglev vehicles," Proceedings of the American Control Conference, Albuquerque, New Mexico, pp. 3962-3966, 1997.
10. 최기봉, 김수현, 꽈윤근, "컴플라이언스를 갖는 웨이퍼 탐침 시스템용 미동 매니퓰레이터," 한국정밀공학회지, Vol. 14, No. 9, pp. 68-79, 1997.
11. 최기봉, 조영근, 신시 타다히코, 시모코베 아키라, "영구자석에 의한 반발형 자기부상 테이블의 안정성 해석," 한국정밀공학회지, Vo. 19, No. 7, pp. 36-42, 2002.