

## 영구자석에 의한 반발형 자기부상 테이블의 안정성 해석

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

### Stability Analyses of Magnetic Levitation Tables Using Repulsions of Permanent Magnets

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

#### ABSTRACT

This paper presents two actuators for levitation using repulsions of permanent magnet and two magnetic levitation tables using the actuators. Here, one actuator for levitation consists of one fixed magnet and one moving magnet, and the other actuator consists of two fixed magnets and one moving magnet. The moving part of the magnetic levitation table contains the moving magnets. Repulsive forces caused by the permanent magnets are linearized, and then the equation of motion of the moving part of the table is derived. Using the equation of motion, stability conditions of the moving part are deduced. The stability conditions are analyzed for positional relations of the moving magnets and the minimum number of active control required for stable system. As a result, in the each case of magnetic levitation tables, the requirements for stabilization are expressed by the positional relations and the number of the active controls.

**Key Words** : Permanent magnet (영구자석), Repulsion (반발력), Virtual spring (가상 스프링), Magnetic levitation (자기부상), Stability condition (안정조건)

#### 1. 서론

자기부상 시스템은 비접촉식 구동특성으로 인하여 청정환경 용 구동기, 초정밀 위치결정기구 및 고속전철 시스템 용으로 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 물체의 부상을 위한 부상력은 전자석 및 영구자석 들의 조합에 의한 추진력 및 반발력을 이용하고 있다. 영구자석의 반발력 만을 이용한 시스템은 부상을 위한 에너지가 요구되지 않는 장점이 있으나, 부상된 물체가 임의의 한 점에서

평형을 이루지 못하고 불안정해지는 단점을 가지고 있다. 즉, 영구자석 만에 의한 부상 시스템에서 시스템이 안정을 유지하기 위해서는 Earnshaw 와 Braunbeck 의 이론에 의해 적어도 1 자유도 이상의 능동제어가 필요하다<sup>(1)</sup>.

반발력을 사용한 회전형 자기부상 시스템으로는 Levitron 이라는 상품명<sup>(2,3,4,5)</sup>의 장난감<sup>(2,3,4,5)</sup>과 1 자유도 제어형 자기베어링<sup>(6)</sup>이 보고되었다. Levitron 은 축 방향의 회전속도를 임계속도 이상으로 유지시켜 안정화하였으며, 1 자유도 제어형 자기베어링은

\* 2001 년 7 월 20 일 접수  
\* 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 로봇제어그룹  
\*\* 미래산업주식회사 미래연구센터  
\*\*\* 동경공업대학(일본) 정밀공학연구소

단지 축 방향의 병진운동 만을 제어하여 안정화하였다. 이와 같이 반발력에 의한 자기부상 시스템의 경우 1 자유도의 제어에 의한 회전형 자기부상 시스템이 성공적으로 발표되었지만, 병진형 시스템의 경우 1 자유도 제어형은 아직 보고된 바 없고 2 자유도 이상의 능동제어 시스템이 보고된 바 있다. Polgreen 은 영구자석에 의해 횡방향과 요(yaw) 방향의 안정화가 필요한 레일웨이(Rail-way) 시스템을 보고하였다<sup>(7)</sup>. 이 시스템은 안정화를 위해 가이드 휠(Guide wheel)에 의한 기구학적인 방법을 이용하였다. Carabelli 역시 2 자유도 제어형 자기부상 차량을 제시하였다<sup>(8,9)</sup>. 그는 레일 상에 전자석을 배치한 후 능동제어에 의해 시스템을 안정화시켰다. 저자에 의해 개발된 자기부상식 미동매니플레이터는 영구자석과 전자석을 이용한 미세 위치결정용 시스템이며, 일정한 전류공급에 의해 기구학적으로 3 자유도가 안정화된다<sup>(10)</sup>. 이와 같이 영구자석 반발형 자기부상 시스템에서 1 자유도 제어형 병진시스템은 아직 보고된바 없으나 Earnshaw 와 Braunbeck 의 이론에 의하면 가능하다고 고려된다.

본 연구에서는 웨이퍼 반송 시스템에 자기부상 시스템을 응용하기 위해 회전형이 아닌 병진형 자기부상시스템을 제안한다. 또한, 아직까지 보고된 바 없는 1 자유도 만의 능동제어에 의해 제안된 병진형 자기부상시스템의 안정화 가능성을 검토하고, 안정 조건을 제시하여 자기부상 시스템의 설계에 이용하고자 한다.

## 2. 영구자석의 반발력에 의한 부상 구동기

물체를 자기력에 의해 부상시키기 위해서는 고정자석과 가동자석이 필요하다. 본 연구에서는 부상에 필요한 외부 에너지 공급을 불필요하게 하기 위해 영구자석 만을 이용한 부상시스템을 고려한다. 이 때 영구자석의 배치는 시스템의 안정성에 영향을 준다. 따라서 1 세트의 부상용 구동기를 위해 고정자석과 가동자석이 각각 1 개로 이루어진 경우와, 고정자석 2 개와 가동자석 1 개로 이루어진 경우에 대해 힘과 거리의 관계를 해석하고, 각각의 경우에 대해 부상용 구동기를 이용한 시스템을 제안하여 안정성을 검토하고자 한다.

## 2.1 고정자석과 가동자석이 각각 1 개인 부상용 구동기

Fig. 1 은 한 쌍의 영구자석이 서로 동일한 극끼리 마주보고 있는 반발형 부상 구동기이다. 하면의 영구자석은 고정자석이고 상면의 영구자석은 가동자석이다. 이 구동기를 A 형 구동기로 정의하자. 그림에서 (a)는 고정자석의 중심이 원점으로부터 y 축 방향으로  $-c_0$ 의 위치에 있는 경우이고, (b)는  $+c_0$ 의 위치에 있는 경우이다. 각 영구자석의 크기는  $p_a \times p_b \times p_c$  이고, 고정면에서 가동자석 중심까지의 초기위치는  $z_0$ 이다.

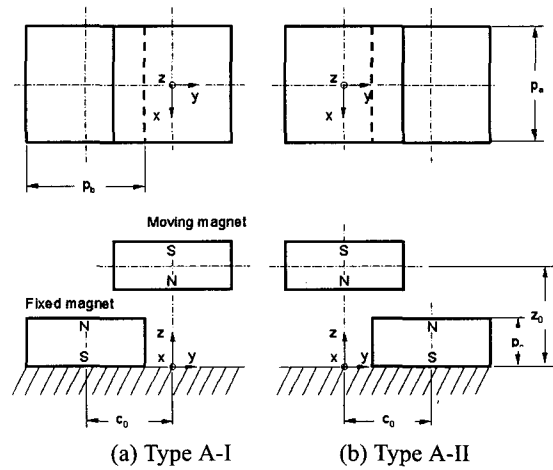


Fig. 1 A type of levitation actuator using a pair of permanent magnets

Fig. 1 에서 영구자석을 질점으로 가정하고, 두 질점 사이에 3 축 방향의 가상의 스프링이 존재하고 있는 것으로 고려하면, 가동자석을 초기위치  $(0, 0, z_0)$ 로 부터 각 축 방향으로 변위시켰을 때, 가상 스프링에서 발생하는 힘의 거동은 초기위치 부근에서 Fig. 2 와 같다<sup>(11)</sup>. 이 때 각 축의 스프링 힘  $F_x, F_y, F_z$  은 거리에 따라 비선형적인 힘의 거동을 보이나, 초기점(초기위치 및 초기력)에서 다음과 같이 선형화가 가능하다.

$$F_x = k_{xx} \Delta x \quad (1)$$

$$F_y = \mp F_{y0} + k_{yy} \Delta y \quad (2)$$

$$F_z = -F_{z0} + k_{zz} \Delta z \quad (3)$$

여기서  $-F_{y0}$  는 Fig. 1 (a)의 초기위치에서 y 방향의 힘이며,  $+F_{y0}$  는 Fig. 1 (b)의 초기위치에서 y 방향의

힘이다. 또한  $-F_{z0}$  는 초기위치에서  $y$  및  $z$  방향의 힘이다. 이 때 강성  $k_{xx}, k_{yy}, k_{zz}$  는 다음과 같이 정의 된다.

$$k_{xx} = \left[ \frac{\partial F_x}{\partial x} \right]_{\substack{x=0 \\ y=0 \\ z=z_0}} < 0 \quad (4)$$

$$k_{yy} = \left[ \frac{\partial F_y}{\partial y} \right]_{\substack{x=0 \\ y=0 \\ z=z_0}} > 0 \quad (5)$$

$$k_{zz} = \left[ \frac{\partial F_z}{\partial z} \right]_{\substack{x=0 \\ y=0 \\ z=z_0}} > 0 \quad (6)$$

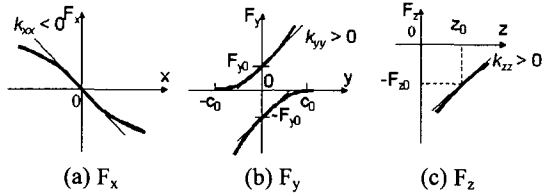


Fig. 2 Virtual spring force with the translation of the moving PM for A type of levitation actuator

### 2.2 2 개의 고정자석과 1 개의 가동자석을 갖는 부상용 구동기

Fig. 3 은 하면에 고정된 2 개의 고정자석과 상면에 1 개의 가동자석을 서로 동일한 크기리 마주 보게 배치한 반발형 부상 구동기이다. 이 구동기를 B 형 구동기로 정의하자. 각 영구자석의 크기와 가동자석의 초기위치는 A 형과 동일하고, 고정자석들의 중심 간 거리는  $2c_0$  이다. 이 경우도 가동자석과 고정자석 사이에 가상 스프링이 존재한다고 가정한 후, 초기위치  $(0, 0, z_0)$  로 부터 각 축 방향으로 변위시켰을 때 가상 스프링에서 발생하는 힘의 거동은 Fig. 4 와 같고, 각 방향의 스프링 힘  $F_x, F_y, F_z$  는 식 (1)-(3)과 같이 선형화 할 수 있다. 여기서, Fig. 4 를 Fig. 2 와 비교할 때  $y$  축 방향의 힘의 형태와 기울기가 다르다는 것을 알 수 있다. 따라서 이 경우,  $y$  방향의 스프링 힘  $F_y$  는 A 형과는 다르게 다음과 같이 표현 가능하다.

$$F_y = k_{yy} \Delta y \quad (2')$$

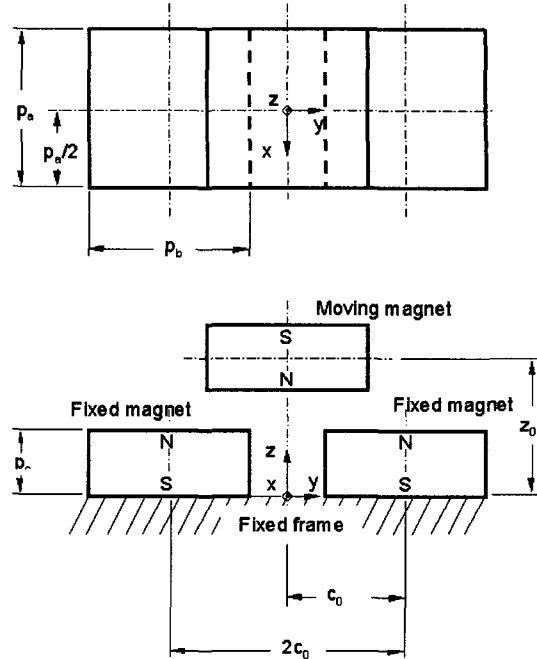


Fig. 3 B type of levitation actuator using a set of PMs

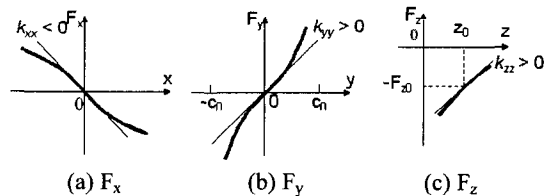


Fig. 4 Virtual spring force with the translation of the moving PM for B type of levitation actuator

### 3. 자기부상 테이블 가동부의 운동방정식

본 연구에서 제안하는 영구자석형 부상 테이블은 Fig. 5 와 같다. 여기서 (a)는 A 형 구동기, (b)는 B 형 구동기를 각각 테이블의 각 모서리에 배치한 것이다. A 형 및 B 형 구동기를 채택한 테이블을 각각 A 형 및 B 형 테이블로 정의하자. 구동기의 가동자석 들은 그림에서처럼 테이블의 각 모서리에 부착되고, 고정자석 들은 고정된 프레임에 부착된다. 가동자석 들은 테이블 가동부의 중심 (center of gravity)으로 부터  $P_1(l_{1X}, l_{1Y}, l_{1Z}), P_2(l_{2X}, l_{2Y},$

$l_{2z}), P_3(l_{3x}, l_{3y}, l_{3z}), P_4(l_{4x}, l_{4y}, l_{4z})$ 에 위치한다. 여기서

$$l_{1x} = l_{2x} = l_x, l_{3x} = l_{4x} = -l_x \quad (7)$$

$$l_{1y} = l_{4y} = -l_y, l_{2y} = l_{3y} = l_y \quad (8)$$

$$l_{1z} = l_{2z} = l_{3z} = l_{4z} = -l_z. \quad (9)$$

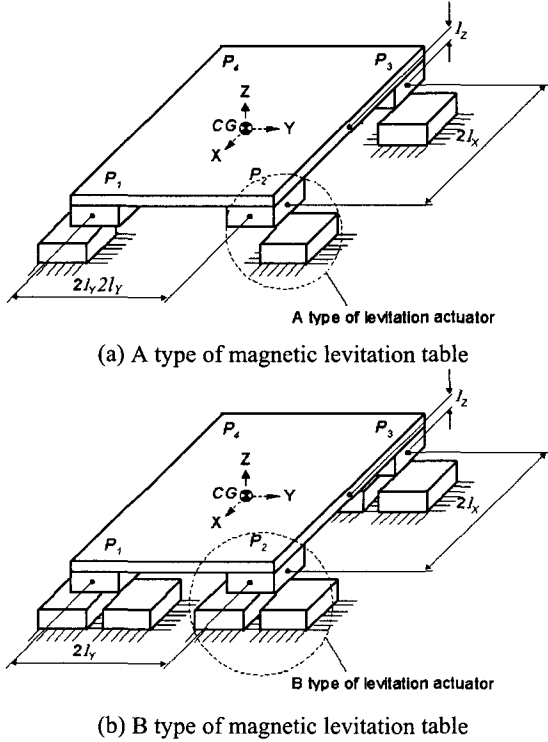


Fig. 5 Configuration of magnetic levitation table

각 가동자석 들의 중심에서는 반발력이 작용하고, 가동부의 중심에서는 자중이 작용한다. 각 힘의 작용점에서 작용하는 힘의 분력 들은 Fig. 6 과 같다. 여기서 XYZ-좌표는 테이블 가동부 중심의 초기위치에 고정되어 있는 고정좌표계이고,  $x'y'z'$ -좌표는 테이블 가동부의 중심에 부착되어 가동부와 함께 운동하는 이동좌표계이다. 또한 테이블 가동부의 운동을 기술하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- (i) 테이블 가동부의 운동은 미소 병진변위  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  및 미소 회전변위  $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$ 로 표현된다.
- (ii) 미소병진변위  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  는 가상 스프링 힘의 변화에 의해 발생된다.
- (iii) 미소회전변위  $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$ 는 Z-Y-X의 오일러 각으로 표현된 X, Y, Z 축에 대한 회전변위이며,

영구자석이 회전운동을 할 때 회전변위에 의한 모멘트는 발생되지 않는다.

- (iv) 미소회전변위  $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$ 로 부터 야기된 가동자석의 병진변위는 가상 스프링에 힘의 변화를 일으킨다.

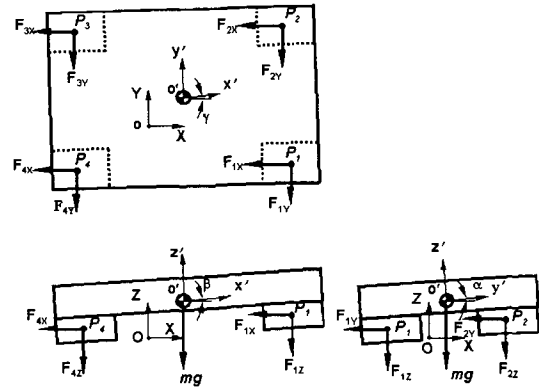


Fig. 6 Forces acting on the moving part of magnetic levitation table

부상 테이블 가동부의 미소변위에 의한 고정좌표계에서 이동좌표계로의 동차변환  ${}^{XYZ}T_{x'y'z'}$ 는 다음과 같다.

$${}^{XYZ}T_{x'y'z'} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma & \Delta\beta & \Delta X \\ \Delta\gamma & 1 & -\Delta\alpha & \Delta Y \\ -\Delta\beta & \Delta\alpha & 1 & \Delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

테이블 가동부에 부착되어 있는 가동자석 들의 중심  $P_i$ 는 다음 식에 의해서 변환된다.

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{XYZ}T_{x'y'z'} \begin{bmatrix} l_{ix} \\ l_{iy} \\ l_{iz} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서  $i=1,2,3,4$ 이며,  $X_i, Y_i, Z_i$ 는 가동자석의 중심  $P_i$ 의 변환된 위치이다. 또한  $P_i$ 의 변환된 위치에서 작용하는 반발력  $F_i(F_{ix}, F_{iy}, F_{iz})$ 는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} F_{ix} \\ F_{iy} \\ F_{iz} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & -F_{z0} + k_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - l_{ix} \\ Y_i - l_{iy} \\ Z_i - l_{iz} \end{bmatrix} \quad (12)$$

4 개의 가동자석에서 Z-축 성분의 힘은 초기위치에서 테이블 가동부의 자중  $mg$  와 균형을 이루어

야 하므로

$$4F_{z0} = mg \quad (13)$$

가 된다. 따라서 테이블 가동부의 중심에 작용하는 힘 ( $F_{GX}, F_{GY}, F_{GZ}$ )과 모멘트( $M_{GX}, M_{GY}, M_{GZ}$ )는 다음과 같이 표현된다.

$$F_G = -Kq \quad (14)$$

여기서

$$F_G = [F_{GX} \ F_{GY} \ F_{GZ} \ M_{GX} \ M_{GY} \ M_{GZ}]^T \quad (15)$$

$$q = [\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z \ \Delta \alpha \ \Delta \beta \ \Delta \gamma]^T \quad (16)$$

또한  $K$  는 테이블 가동부의 강성행렬로 다음과 같다.

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 & 0 & K_{x\beta} & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 & K_{y\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{\alpha\gamma} & 0 & K_{\alpha\alpha} & 0 & 0 \\ K_{\beta\gamma} & 0 & 0 & 0 & K_{\beta\beta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{\gamma\gamma} \end{bmatrix} \quad (17)$$

A 형 테이블에서 강성행렬의 각 요소는 다음과 같다.

$$K_{xx} = 4k_{xx} \quad (18)$$

$$K_{yy} = 4k_{yy} \quad (19)$$

$$K_{zz} = 4k_{zz} \quad (20)$$

$$K_{\alpha\alpha} = 4(-F_{y0}l_y - F_{z0}l_z + k_{yy}l_z^2 + k_{zz}l_y^2) \quad (21)$$

$$K_{\beta\beta} = 4(-F_{z0}l_z + k_{xx}l_z^2 + k_{zz}l_x^2) \quad (22)$$

$$K_{\gamma\gamma} = 4(-F_{y0}l_y + k_{xx}l_y^2 + k_{yy}l_x^2) \quad (23)$$

$$K_{x\beta} = K_{\beta x} = -4k_{xx}l_z \quad (24)$$

$$K_{y\alpha} = K_{\alpha y} = 4k_{yy}l_z \quad (25)$$

B 형 테이블에서 강성행렬의 각 요소는  $K_{\alpha\alpha}$  및  $K_{\gamma\gamma}$ 를 제외한 모든 요소가 A 형의 각 행렬 요소와 동일한 형태를 취하고 있다.  $K_{\alpha\alpha}$  및  $K_{\gamma\gamma}$ 는 다음과 같다.

$$K_{\alpha\alpha} = 4(-F_{z0}l_z + k_{yy}l_z^2 + k_{zz}l_y^2) \quad (21)'$$

$$K_{\gamma\gamma} = 4(k_{xx}l_y^2 + k_{yy}l_x^2) \quad (23)'$$

테이블 가동부의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{q} + Kq = 0 \quad (26)$$

여기서

$$M = \text{diag}[m \ m \ m \ J_{GX} \ J_{GY} \ J_{GZ}] \quad (27)$$

이고,  $J_{GX}, J_{GY}, J_{GZ}$  는 X, Y, Z 축에 대한 테이블 가동부의 질량관성모멘트이다.

#### 4. 부상 테이블 가동부의 안정성

테이블 가동부의 운동방정식을 라플라스 변환하면 다음으로 표현된다.

$$(Ms^2 + K)Q(s) = 0 \quad (28)$$

여기서  $Q(s)$ 는  $q$  의 라플라스 변환이다. 식 (28)의 특성방정식은 다음과 같이 인수분해가 가능하다.

$$\begin{aligned} & (ms^2 + K_{zz})(J_{GZ}s^2 + K_{\gamma\gamma}) \\ & \left\{ (ms^2 + K_{yy})(J_{GX}s^2 + K_{\alpha\alpha}) - K_{y\alpha}K_{\alpha y} \right\} \\ & \left\{ (ms^2 + K_{xx})(J_{GY}s^2 + K_{\beta\beta}) - K_{x\beta}K_{\beta x} \right\} = 0 \end{aligned} \quad (29)$$

테이블 가동부의 안정성을 판별하기 위해 특성방정식 (29)를 Routh-Hurwitz 안정 판별식에 적용하면 다음과 같은 안정조건을 얻는다<sup>(12)</sup>.

$$K_{zz} > 0 \quad (30)$$

$$K_{yy} > 0 \quad (31)$$

$$(mK_{\alpha\alpha} + J_{GX}K_{yy})^2 - 4mJ_{GX}(K_{yy}K_{\alpha\alpha} - K_{y\alpha}K_{\alpha y}) > 0 \quad (32)$$

$$K_{yy}K_{\alpha\alpha} - K_{y\alpha}K_{\alpha y} > 0 \quad (33)$$

$$(mK_{\beta\beta} + J_{GY}K_{xx})^2 - 4mJ_{GY}(K_{xx}K_{\beta\beta} - K_{x\beta}K_{\beta x}) > 0 \quad (34)$$

$$K_{xx}K_{\beta\beta} - K_{x\beta}K_{\beta x} > 0 \quad (35)$$

##### 4.1 A 형 테이블

이 경우는 식 (4)-(6)과 같이  $k_{xx}$  는 항상 음이고,  $k_{yy}, k_{zz}$  는 항상 양이다. 이 경우에 있어 위에서 제시한 안정조건을 고찰하자. 식 (30)은 식 (20)과 식(6)으로 인하여 항상 만족되는 관계식이다. 식 (31)을 만족시키기 위해서는 가동자석 들의 적절한 배치에 의해 가능하다. 따라서 가동자석 들의 배치관계는 식 (23)을 (31)에 대입하여 유도한다.

$$l_x > \sqrt{\frac{l}{k_{yy}}(F_{y0}l_y - k_{xx}l_y^2)} \quad (36)$$

식 (32)는 식 (33)이 만족되면 부등호 관계식에 의해 저절로 만족된다. 식 (33)은 식 (19), (21), (25)를 이용하여 재 정리하면 다음과 같다.

$$k_{yy}^2 l_z^2 - k_{yy} F_{z0} l_z + (k_{yy} k_{zz} l_y^2 - k_{yy}^2 l_x^2 - k_{yy} F_{y0} l_y) > 0 \quad (37)$$

위 식을 만족하는 가동자석 들의 배치관계 중  $l_z$  는 다음과 같다.

$$l_z > \frac{k_{yy} F_{z0} + \sqrt{k_{yy}^2 (F_{z0}^2 - 4k_{yy} (k_{zz} l_y^2 - k_{yy} l_x^2 - F_{y0} l_y))}}{2k_{yy}^2} > 0 \quad (38)$$

여기서

$$F_{z0}^2 - 4k_{yy} (k_{zz} l_y^2 - k_{yy} l_x^2 - F_{y0} l_y) > 0 \quad (39)$$

따라서 식 (39)를 만족시키기 위한 가동자석 들의 배치관계 중  $l_y$ 는

$$l_y > \frac{F_{z0}}{2k_{zz}} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{F_{z0}}{k_{zz}}\right)^2 - 4\left(\frac{k_{yy}}{k_{zz}} l_x^2 - \frac{F_{z0}^2}{4k_{yy}k_{zz}}\right)} > 0 \quad (40)$$

또한

$$\left(\frac{F_{z0}}{k_{zz}}\right)^2 - 4\left(\frac{k_{yy}}{k_{zz}} l_x^2 - \frac{F_{z0}^2}{4k_{yy}k_{zz}}\right) > 0 \quad (41)$$

이어야 하며 이로부터 가동자석 들의 배치관계 중  $l_x$ 는 다음과 같다.

$$l_x > \frac{F_{z0}}{2k_{yy}} \sqrt{\frac{k_{yy} + k_{zz}}{k_{zz}}} > 0 \quad (42)$$

식 (34)는 식(35)와  $K_{XX}$ 가 양이면 저절로 만족되는 부등호 관계식이다. 그러나 식(18)과 식(4)에 의해서  $K_{XX}$ 가 음이기 때문에 이 값을 양으로 만들 수 있도록 다음과 같은  $K'_{XX}$ 를 도입한다.

$$K'_{XX} > \frac{K_{X\beta} K_{\beta X}}{K_{\beta\beta}} > 0 \quad (43)$$

여기서  $K'_{XX}$ 는  $X$ 축만의 1 자유도 능동제어에 의해 부여할 수 있다. 따라서 식 (34)와 (35)에서  $K_{XX}$  대신  $K'_{XX}$ 를 대입하면 두 식은 만족된다.

#### 4.2 B 형 테이블

이 경우도 A 형 테이블과 같이 식 (4)-(6)과 같이  $k_{xx}$ 는 항상 음이고  $k_{yy}$ ,  $k_{zz}$ 는 항상 양이다. 이 경우에 있어 위의 안정조건을 고찰하자. 식 (30)은 항상 만족한다. 식 (31)를 만족시키기 위해서 가동자석 들의 배치관계 중  $l_x$ 는 다음과 같다.

$$l_x > \sqrt{-\frac{k_{xx}}{k_{yy}}} l_y \quad (44)$$

식 (32)는 A 형과 동일하게 식(33)이 만족되면 부등호 관계식을 만족한다. 식(33)이 만족되기 위해서는 다음 식을 만족해야 한다.

$$l_y > \sqrt{\frac{F_{z0}}{k_{zz}}} l_z \quad (45)$$

식(34)가 만족되기 위해서는 A 형과 동일하게  $K_{XX}$ 가 양이어야 하며 또한 (35)식이 만족되어야 한다. 따라서  $K_{XX}$ 가 음이기 때문에 식 (43)과 같은 양인  $K'_{XX}$ 를 도입하여 식 (34)와 (35)에 대입하면 이들 식은 만족된다. 이 때 양의  $K'_{XX}$ 는  $X$ 축 방향의 1 자유도 능동제어에 의해 부여한다.

#### 4.3 설계를 위한 고찰

부상테이블을 설계하기 위해서 우선, 임의의 크기를 갖는 영구자석을 결정하고 A 형과 B 형 구동기에서 필요한 영구자석 간의 초기위치를 결정한다. 이것으로부터 시뮬레이션에 의해 영구자석에 발생하는 반발력의 크기와 가상 스프링 상수를 구한다. 또한 가동자석과 테이블 가동부의 중심사이의 거리를 구하며 시스템의 안정성을 위해  $X$ 축의 운동을 제어하기 위한 1 자유도 능동제어기를 식(43)이 만족하도록 설계한다. 이때 능동제어기에 의해 발생하는 힘은 부상테이블의 가동부의 중심을 통과하고  $X$  방향에만 영향을 주도록 설계해야 한다.

A 형 테이블 경우 1 세트의 가동자석 배치관계 ( $l_x, l_y, l_z$ )는 식 (42), (40), (37)이 만족하도록 설계자가 선정한다. 그 후 선정된 값들이 다른 1 세트의 배치관계인 식 (36)을 만족하지 않을 경우 위의 관계로부터 또 다른 배치관계의 선정을 되풀이 한다. 만약 한정된 범위 내에서 선정된 값들이 식 (36)을 만족하지 않을 경우에는  $Z$ 축의 회전운동에 대한 또 하나의 능동제어기를 설계한 후 식 (42),(40),(37)만을 만족하는 가동자석들의 배치관계를 구할 수 있다. 이 때의 능동제어기는  $K_{yy}$  대신

$$K'_{yy} > 0 \quad (46)$$

를 만족해야 한다. 따라서 A 형 테이블은 최소 1 자유도 또는 최대 2 자유도의 능동제어기가 시스템의 안정화를 위해 필요하다.

B 형 테이블에서 1 세트의 가동자석 배치관계 ( $l_x, l_y, l_z$ )는 임의의  $l_z$ 를 선택한 후 나머지 값은 식 (45)와 (44)를 이용하여 구한다. B 형의 테이블은 A 형과는 달리 1 자유도 만의 능동제어기에 의해 시스템의 안정화가 가능하다.

시스템 안정화를 위한 조건식은 초기점에 대해 선형화된 자기력을 기초로 유도되었다. 따라서 가동 테이블이 설계에 이용된 초기점을 벗어나면 선형화시 무시된 고차항들의 영향이 상대적으로 증가하기 때문에 시스템의 안정성이 결여될 가능성이 있다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 영구자석에 의한 반발형 구동

기 A 형 및 B 형을 제시하고, 각 구동기의 가동자석과 고정면 사이에 3 개의 병진방향의 가상 스프링이 존재한다고 가정한 후, 각 스프링에 발생하는 선형화된 스프링 힘을 제시하였다. 또한 이들 반발형 구동기를 이용한 자기부상식 테이블을 가정한 후 테이블 가동부의 운동방정식을 유도하였다. 운동방정식으로부터 테이블 가동부가 안정화될 조건식을 구했으며 각 경우에 있어서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (i) A 형 테이블의 가동부는 안정화를 위한 2 세트의 가동자석 배치가 모두 만족될 경우 이 자석배치와 1 축 능동제어에 의해 안정화가 가능하다. 만약 안정화를 위한 가동자석의 배치가 1 세트의 안정조건은 만족하나 다른 1 세트의 안정조건을 만족하지 않을 경우 만족하는 1 세트의 안정조건과 2 자유도에 의한 능동제어에 의해 안정화가 가능하다.
- (ii) B 형 테이블의 가동부는 1 세트의 안정화 조건을 만족하는 가동자석의 배치와 1 자유도만의 능동제어에 의해 안정화가 가능하다.

### 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, 광윤근, "컴플라이언스를 갖는 웨이퍼 탐침 시스템용 미동 매니플레이터", 한국정밀공학회지, Vol. 14, No. 9, pp. 68-79, 1997.
11. Ebihara D, Suzuki R. "The repulsive characteristics of the PM-type magnetic levitation device," T. IEE Japan, Vol. 108-D, No. 5, pp. 455-460, 1988.
12. 김종식, 선형 제어시스템 공학, 청문각, 1996.