

대면적 이송 자기부상 스테이지 개발

*전정우, *Mitica Caraiani, *이주훈, *황돈하, *강동식, **김성신
 * 한국전기연구원 산업전기연구단 전력설비진단연구그룹, ** 부산대학교 전자전기통신공학부

Developments of Magnetic Levitation Stage for Wide Area Movements

*Jeong-woo Jeon, *Mitica Caraiani, *Joo-hoon Lee, *Don-ha Hwang, *Dong-sik Kang, Sung-shin Kim
 * Korea Electrotechnology Research Institute ** Pusan National University, Electrical Engineering Major

Abstract - 본 논문은 대면적 자기부상 스테이지의 정밀급 위치제어를 위한 시스템 구성 및 제어 알고리즘에 대한 연구결과를 기술한다. 자기부상 스테이지는 16개의 동기모터에 의해 구동되며, 각 모터의 Moving 부분에 수직방향의 힘과 수평방향의 힘을 모두 발생시킬 수 있도록 Halbach 구조로 되어 있다. Matlab/Simulink 모델링을 수행하였으며, Simulation 결과를 보였다.

체의 이동이 가능한 구조이며, 또한 측면방향 자석(b) 및 대각방향 자석(c)에 의해, 전체 자력의 세기도 단일 자석구조보다 약 20% 이상 크게 나타난다. 1 pitch(=L)는 그림에서와 같이 4개의 자석으로 구성된다.

1. 서 론

종래에는 정밀 위치제어를 위한 리니어 모션을 위해 공기부상 리니어모터가 주로 사용되어 왔다. 공기부상방식의 경우 기계적 가이드의 초정밀 가공의 한계로 인해 톨스트로크(>200mm)에서 10nm이하의 정밀도를 가지는 것은 매우 어렵다. 특히 X-Y 스테이지의 경우 직선정밀도를 10nm이하로 구현하는 것은 더욱 어려운 기술이 된다. 이러한 것을 극복하기 위해 김원중 박사[1]는 3상 영구자석 동기모터 4개를 이용한 자기부상방식 스테이지 시스템을 제안하였다. 그러나 이것을 대면적 이송(>200mm)에 적용하기에는 시스템이 비효율적으로 커지는 단점이 있게 된다. 그 후 대면적 이송을 위한 2차원 Halbach Array[2]를 제안하여, 실제로 구현[3] 하였으며, 자기부상방식을 이용한 대면적 초정밀 이송의 가능성이 증대되었다. 그러나 역시 부상력의 한계로 인해 보조적으로 공기부상방식을 이용하여야 하였다. 본 논문에서는 순수한 자기부상방식만으로 부상하여, 대면적(>300mm) 초정밀(<10nm) 이송이 가능한 시스템을 제안하고자 한다. 본 시스템은 16개의 영구자석 동기모터로 구성되어 있으며, 각 동기모터는 부상력과 추진력을 동시에 구현하여 부상체가 6자유도 운동이 구현될 수 있도록 설계되었다. Matlab/Simulink를 이용하여 대면적 자기부상 스테이지 시스템의 개념 설계 및 모델링을 수행하였다. 그리고 Lead-PI 제어기를 이용하여, Simulation을 수행하였으며, 양호한 결과를 얻었다.

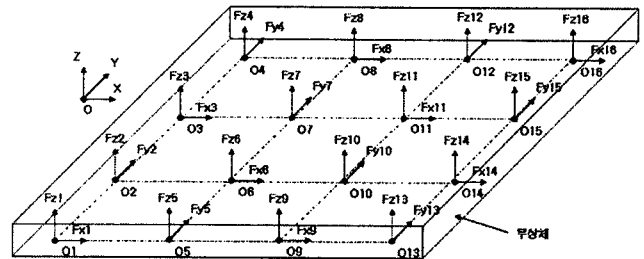
2. 본 론

2.1 대면적 이송 자기부상 스테이지

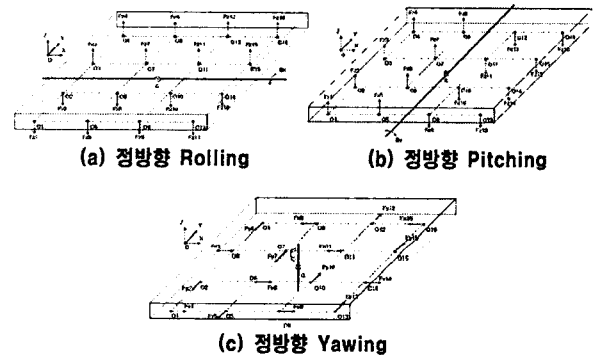
그림1은 대면적 이송 자기부상 스테이지의 개념을 보여주고 있다. 부상원리는 부상대상체 하단의 16개 작용점(O1~O16)에 중력에 반대되는 수직한 자기반발력(이하 부상력, Fz1~Fz16)을 고르게 분포하여 부상하는 것이다. 기존 김원중박사가 제안한 자기부상 스테이지는 4개의 작용점에 자기반발력을 이용하여 부상을 구현 하였으나, 본 논문에서 고려한 부상대상체의 경우 좀 더 넓어지고, 좀 더 무거워지면서, 부상력이 증가될 필요가 있게 되었다. 그래서 총 16개의 자기부상력을 이용하여 부상체를 부상하고자 하였다. 부상체의 구조를 간단하게 하면서, 부상중량도 작게 유지 할 수 있도록 하기 위해 각 작용점마다 부상력과 동시에 X축 방향 추진력(Fx1, Fx3, Fx5, Fx7, Fx9, Fx11, Fx13, Fx15) 또는 Y축 방향의 추진력(Fy2, Fy4, Fy6, Fy8, Fy10, Fy12, Fy14, Fy16)도 함께 작용될 수 있도록 하였다. 또한 각 작용점의 추진력은 인접한 작용점들 간에 X축 또는 Y축 방향으로 직교될 수 있도록 분포되어 있으므로, X축 또는 Y축 중 임의의 한쪽 축방향으로 부상체가 이동시 다른 축방향으로 이동하지 못하도록 가이드 역할을 수행할 수 있다. 또한 양쪽 축방향으로 동시에 이동하는 것도 가능하며, 각축을 중심으로 회전 운동도 가능하다. 그림2에 자기부상 스테이지의 회전운동을 보여주고 있다. (a) 정방향 Rolling 운동의 경우, Fz3, Fz4, Fz7, Fz8, Fz11, Fz12, Fz14, Fz15 는 양의 부상력을, Fz1, Fz2, Fz5, Fz6, Fz9, Fz10, Fz13, Fz14 는 음의 부상력을 이용하여 구현할 수 있다. 그리고 (b) 정방향 Pitching 운동의 경우, Fz1, Fz2, Fz3, Fz4, Fz5, Fz6, Fz7, Fz8 은 양의 부상력을, Fz9, Fz10, Fz11, Fz12, Fz13, Fz14, Fz15, Fz16 은 음의 부상력을 이용하여 구현할 수 있다. 마지막으로 (c) 정방향 Yawing 운동의 경우, Fx1, Fx6, Fx9, Fx14, Fy10, Fy12, Fy13, Fy15 는 양의 추진력을, Fx3, Fx8, Fx11, Fx16, Fy2, Fy4, Fy5, Fy7 는 음의 추진력을 이용하여 구현할 수 있다. 결론적으로 본 논문에서 제안한 대면적 이송 자기부상 스테이지는 16개 작용점에 작용하는 부상력과 추진력을 이용하여 6자유도 운동을 할 수 있게 된다.

2.1.1 이동자(부상 대상체)

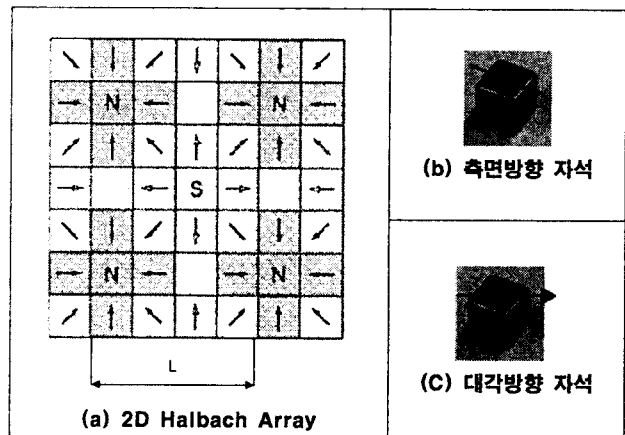
부상체의 구조를 간단하게 하기 위해 부상체의 하단에 그림3과 같이 2차원 Halbach 영구자석 어레이를 적용하였다. 이것은 김원중 박사가 제안[2]한 구조로서, X축 또는 Y축 방향으로 전자력을 인가하는 방향에 따라 부상



〈그림 1〉 대면적 자기부상 스테이지



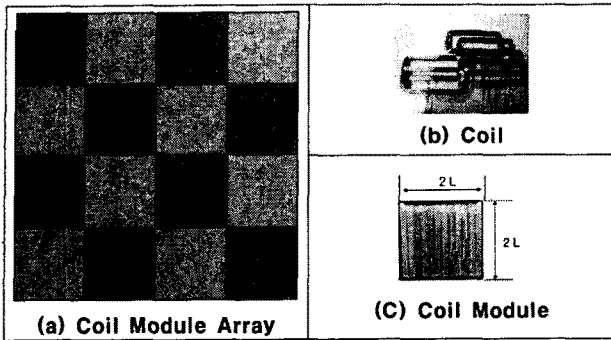
〈그림 2〉 자기부상 스테이지의 회전 운동



〈그림 3〉 이동자 부분의 Magnet Array 구조

2.1.2 고정자

X축 또는 Y축 방향으로 전자력을 발생할 수 있도록 하기 위해 코일모듈을 그림4와 같이 격자모양으로 직교배치하여 구성하였다. 각 코일모듈은 3상 권선으로 구성되어 있으며, 코일모듈의 크기는 2 pitch x 2 pitch 정사각형 구조로 되어있다. 코일모듈의 3상 권선에 인가되는 사인파의 크기 및 주파수에 따라, 코일모듈 상단의 전자력 분포 및 세기가 결정될 수 있다.



〈그림 4〉 고정자 부분의 Coil Array 구조

2.1.3 부상력 및 추진력

1 pitch에서의 부상력(Fz) 및 추진력(Fx, Fy)은 다음 식 (1), (2)에 의해 구할 수 있다[1].

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \mu_0 M_0 \eta_0 N_m G e^{-\frac{\pi}{l} z_0} \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{l} x_0 & \sin \frac{\pi}{l} x_0 \\ -\sin \frac{\pi}{l} x_0 & \cos \frac{\pi}{l} x_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$G = \frac{\sqrt{2} w l^2}{\pi^2} (1 - e^{-\frac{\pi}{l} \Gamma}) (1 - e^{-\frac{\pi}{l} \Delta}) \quad (2)$$

〈표 1〉 부상력 및 추진력 계산방정식의 기호 및 값

Symbol	Name	Value
$\mu_0 M_0$	Magnet remanence, T	0.8
η_0	turn density, Turn/mm ²	2.3704e+006
N_m	number of active magnet pitch	2
w	magnet array width, m	0.03
l	motor coil pitch, m	0.03
Γ	magnet thickness, m	0.0075
Δ	motor coil thickness, m	0.0054
Z_0	nominal gap, m	0.0001
X_0	displacement of platen, m	0

상전류(i_a, i_b, i_c)의 크기를 2A로 하면, $F_x=8.0384[N]$, $F_z=8.0384[N]$ 를 얻을 수 있다. 그러므로 전체 부상력(TFx)은 128.6149[N]을 얻을 수 있다.

2.2 시스템 모델링

부상체의 Z축 방향 모델은 식(3)과 같이 표현될 수 있다.

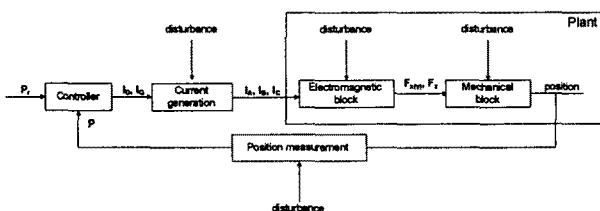
$$M\ddot{z} - g = TF_z \quad (3)$$

여기서, $M=12\text{kg}$, g (중력가속도)= $9.8[N]$ 을 적용하였다. 시스템 모델링을 위해 Matlab/Simulink를 이용하였으며, 그림 6에서 Mover 블록으로 표현되어 있다.

2.3 Control Algorithm

제어알고리즘은 그림5와 같이 폐루프 제어를 수행하고 있다. 본 논문에서는 Controller에 Lead-PI 제어를 설계하여 적용하였다.

$$H(s) = K \frac{s + A}{s + C} \frac{s + B}{s} \quad (4)$$

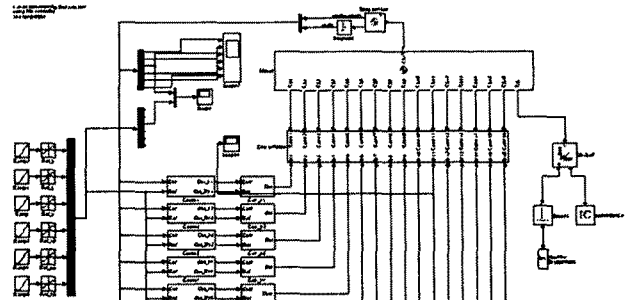


〈그림 5〉 Control Algorithm

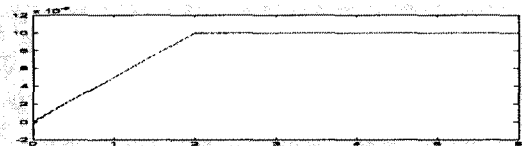
2.4 Simulation

제어기 파라미터 $K=40,000$, $A=189.3$, $B=1893$, $C=18.9$ 를 각각 입력하

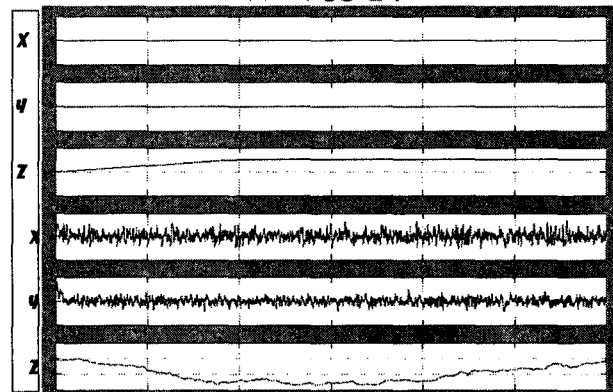
고, Z축 방향 Reference를 100 μm 로 하였을 경우, Simulation 한 결과를 그림 7에 보였다. 이때 Reference는 Ramp 입력을 사용하였다. 결과를 보면, Z축은 Reference 값을 잘 따라감을 보이고 있고, 나머지 5축의 값은 매우 작게 나타남을 알 수 있다.



〈그림 6〉 Simulink Model



(a) Z축 방향 결과



(b) 6축 방향 결과

〈그림 7〉 Simulation Result

3. 결 론

본 논문에서 제시한 대면적 이송 자기부상 스테이지 시스템은 영구자석과 전자석의 자기반발력을 이용하여 부상력과 추진력을 발생시키고, 이것을 16개의 작용점에 적용하여, 부상체를 부상시키고, 그 상태에서 6자유도(X, Y, Z, $\Theta_x, \Theta_y, \Theta_z$) 운동을 할 수 있는 구조로 설계되었다. Matlab/Simulink를 이용하여 시스템 모델과 제어를 구현하였으며, Simulation 결과 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 향후, 외란을 입력하여, 6축 방향을 동시에 제어하는 것을 구현해 볼 것이며, 실제 시스템을 제작하여 실험을 수행할 계획이다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] W. J. Kim, High-precision Planar Magnetic Levitation, Doctoral Thesis, Massachusetts Institute of Technology, June 1997
- [2] D. L. Trumper, W. J. Kim, and M. E. Williams, "Magnetic arrays," US. Patent Office, PatentNo. 5,631,618, May 1997
- [3] W.J.Kim, "Design and Control of a 6-DOF High-Precision Integrated Positioner", Preceeding of the 2004 American Control Conference, 2493-2498, 2004