

대면적 이송 자기부상 스테이지 개발

Development of Magnetic Levitation Stage with Wide Area Movement

*전정우, **Mitica Caraiani, ***강동식, ****오현석, *****김성신

Jeong-Woo Jeon, Mitica Caraiani, Dong-Sik Kang, Hyun-Seok Kang, Sung-Shin Kim

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 발생할 수 있도록 Halbach 구조로 되어 있다. Matlab/Simulink 모델링을 수행하였으며, Simulation 결과를 보였다.

Key Words : 자기부상, 초정밀 제어, 스테이지, 나노제어, 대면적 이송

1. 서 론

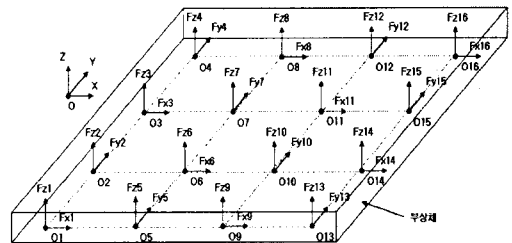
종래에는 정밀 위치제어를 위한 리니어 모션을 위해 공기부상 리니어모터가 주로 사용되어 왔다. 공기부상방식의 경우 기계적 가이드의 초정밀 가공의 한계로 인해 롱스트로크(>200mm)에서 10nm이하의 정밀도를 가지는 것은 매우 어렵다. 특히 X-Y 스테이지의 경우 직선정밀도를 10nm이하로 구현하는 것은 더더욱 어려운 기술이 된다. 이러한 것을 극복하기 위해 김원종 박사[1]는 3상 영구자석 동기모터 4개를 이용한 자기부상방식 스테이지 시스템을 제안하였다. 그러나 이것을 대면적 이송(>200mm)에 적용하기에는 시스템이 비효율적으로 커지는 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 개념설계 및 모델링을 수행하였다. 그리고 Lead-PI 제어기를 이용하여, Simulation을 수행하였으며, 양호한 결과를 얻었다.

2. 본 론

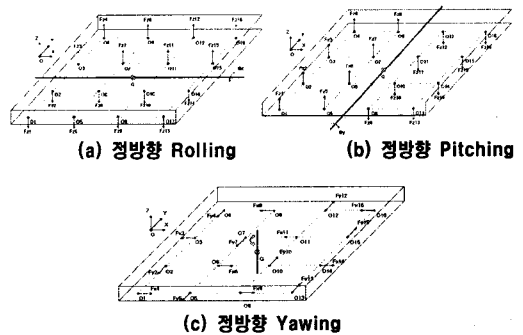
2.1 대면적 이송 자기부상 스테이지

저자 소개

- * 전정우 : 한국전기연구원 선임연구원
- ** Mitica Caraiani : 한국전기연구원 연구원
- *** 강동식 : 한국전기연구원 책임연구원
- **** 오현석 : 한국전기연구원 책임연구원
- ***** 김성신 : 부산대학교 전자전기통신공학부 교수



〈그림 1〉 대면적 자기부상 스테이지



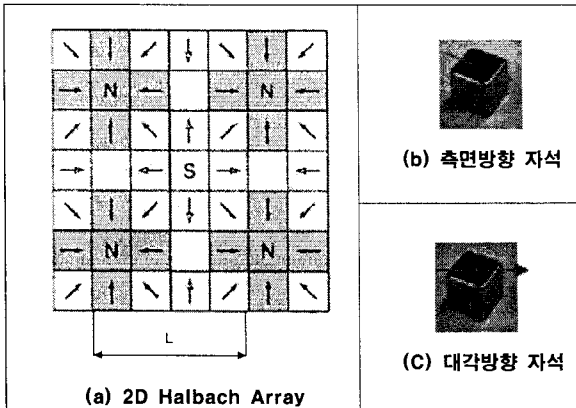
〈그림 2〉 자기부상 스테이지의 회전 운동

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 김원종박사가 제안한 자기부상 스테이지는 4개의 작용점에 자기반발력을 이용하여 부상을 구현하였으나, 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)

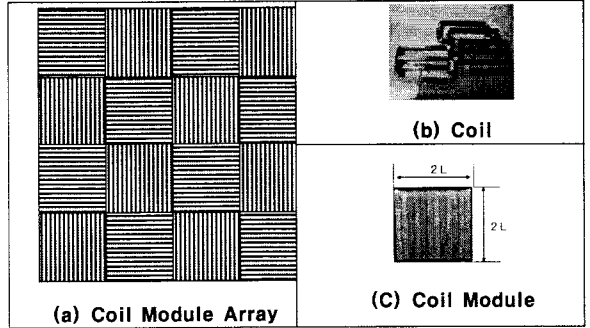
부상체의 구조를 간단하게 하기 위해 부상체의 하단에 그림3과 같이 2차원 Halbach 영구자석 어레이를 적용하였다. 이것은 김원종 박사가 제안[2]한 구조로서, X축 또는 Y축 방향으로 전자력을 인가하는 방향에 따라 부상체의 이동이 가능한 구조이며, 또한 측면방향 자석(b) 및 대각방향 자석(c)에 의해, 전체 자력의 세기도 단일 자석구조보다 약 20% 이상 크게 나타난다. 1 pitch(=L)는 그림에서와 같이 4개의 자석으로 구성된다.



〈그림 3〉 이동자 부분의 Magnet Array 구조

2.1.2 고정자

X축 또는 Y축 방향으로 전자력을 발생시킬 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
$u_0 M_0$	Magnet remanence, T	0.8
n_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, $F_x=8.0384[N]$, $F_y=8.0384[N]$ 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.

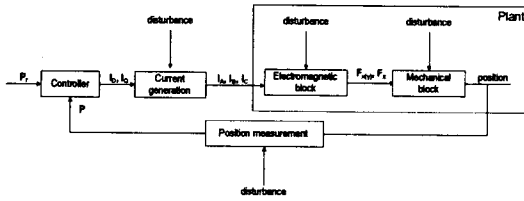
$$M \ddot{z} - g = T F_z \quad (3)$$

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 페루프 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

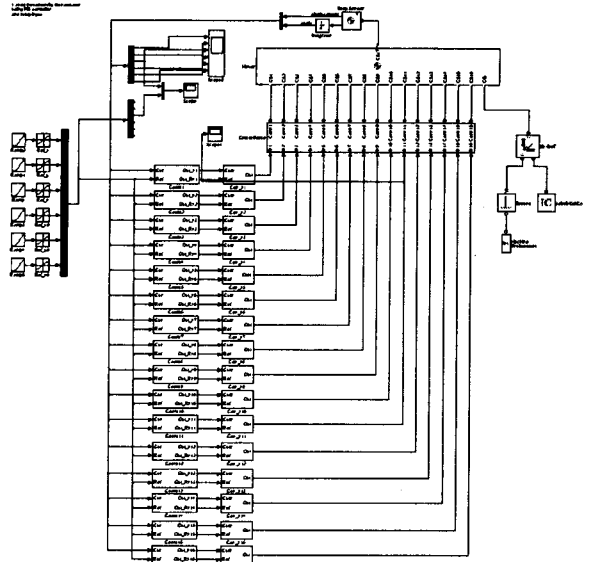
제어기 파라미터 $K=40,000$, $A=189.3$, $B=1893$, $C=18.9$ 를 각각 입력하고, Z축 방향 Reference를 $100\mu\text{m}$ 로 하였을 경우, Simulation 한 결과를 그림 7에 보였다. 이때 Reference는 Ramp 입력을 사용하였다. 결과를 보면, Z축은 Reference 값을 잘 따라감을 보이고 있고, 나머지 5축의 값은 매우 작게 나타남을 알 수 있다.

3. 결 론

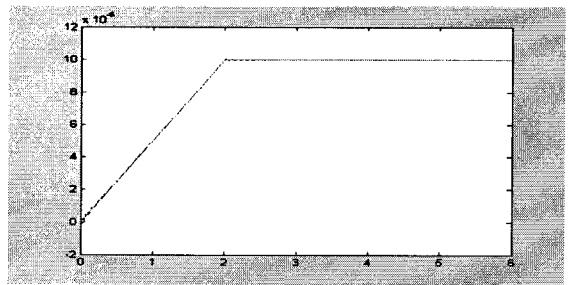
본 논문에서 제시한 대면적 이송 자기부상 스테이지 시스템은 영구자석과 전자석의 자기반발력을 이용하여 부상력과 추진력을 발생시키고, 이것을 16개의 작용점에 적용하여, 부상체를 부상시키고, 그 상태에서 6자유도(X, Y, Z, Θ_x , Θ_y , Θ_z) 운동을 할 수 있는 구조로 설계되었다. Matlab/Simulink를 이용하여 시스템 모델과 제어기를 구현하였으며, Simulation 결과 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 향후, 외란을 입력하여, 6축 방향을 동시에 제어하는 것을 구현해 볼 것이며, 실제 시스템을 제작하여 실험을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

참 고 문 헌

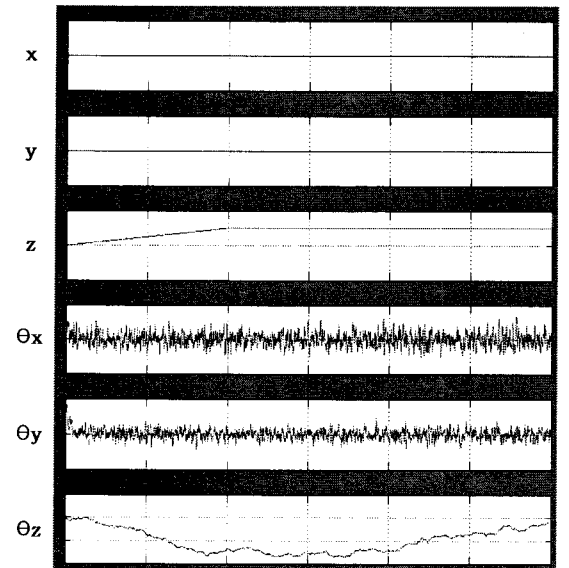
- [1] W. J. Kim, High-precision Planar Magnetic Levitation, Doctorial Thesis, Massachusetts Institute of Technology, June 1997
- [2] D. L. Trumper, W. J. Kim, and M. E. Williams, "Magnetic arrays," US. Patent Office, PatentNo. 5,631,618, May 1997
- [3] W.J.Kim, "Design and Control of a 6-DOF High-Precision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



〈그림 6〉 Simulink Model



(a) Z축 방향 결과



(b) 6축 방향 결과

〈그림 7〉 Simulation Result