

리니어 모터를 위한 능동 자기 베어링의 설계 및 제어

양 광 원, 허 경 무
단국대학교 전자공학과
전화 : 041-589-8459 / 핸드폰 : 011-9068-4673

Design and Control of an Active Magnetic Bearing for Linear Motors

Kwang-Won Yang, Kyung-Moo Huh
Dept. of Electronics, Dankook University
E-mail : yangkwangwon@hotmail.com

Abstract

This paper deals with new type of active magnetic bearing (AMB) for the linear motors. We adopted optical sensing mechanism for the gap sensing. Using the laser and the PSD (Position Sensitive Device), the absolute rotor position is obtained independent of the profile of the guide rail. With this measurement, the rotor can be controller to follow the straight beam of the laser. Another advantage of optical sensing mechanism might be the elimination of the possible interference between the proximity sensor and the electro-magnet. By adopting the push-full actuating mechanism, the bearing stiffness is increased near the equilibrium position. For the simplicity, distributed control system is constructed. Eight independent PID control algorithm is used with the full order observer. Several simulation and test results are presented.

I. 서론

리니어 모터는 기계적인 진송 메카니즘을 제거함으로써 선형 이동을 필요로 하는 많은 장치에서 모터의 회전자에 비해 더 많은 장점들을 제공한다[1]. 그러나 이런 장점들이 있는 대신, 시스템 구성이 더 복잡하고 어려워

지게 되는데, 그중 하나가 리니어 모터의 지지구조이다.

일반적으로, 리니어 모터는 비대칭적 구조로 인해 자기력이 상쇄되지 않기 때문에 회전자보다 불균형한 힘을 발생한다. 이 힘들은 운행축 방향의 ripple force와 베어링에 작용하는 수직력을 포함한다. 이런 불균형한 힘들로 인해 리니어 모터는 회전 모터보다 더 강한 베어링을 필요로 한다. 지금까지 리니어 모터의 보편적인 베어링은 상대적으로 싸고 강한 기계적인 리니어 가이드이다. 그러나 급속히 변하는 산업에서는 더 정밀하고 빠른 기계와 형태로서는 공기 베어링이나 자기 베어링같은 비접촉 형태의 베어링을 요구한다. 회전형 자기 베어링에 대해서는 많은 연구결과가 있으며 상품화되어 있다 [2][3]. 그러나 리니어 자기 베어링은 직선 이동이 회전 이동보다 빠르지 않고 특수용으로만 쓰이고 있기 때문에 보편화되지 않았다. 본 논문에서는 리니어 BLDC(Brushless DC) 모터에 대한 리니어 자기 베어링을 다룬다.

2장에서 베어링 설계의 기하학적 문제에 대하여, 3장에서는 시스템의 동적 모델을 다루고, 4장에서는 시뮬레이션 결과를 그리고 5장에서는 실험 결과를 제시하겠다.

II. 기하학적 구조

공간상의 강체는 6자유도를 가진다. 리니어 모터의 아마추어(amateur)를 공간상의 자유 물체로 간주할 수 있다. 그러나 주행 방향은 모터 드라이버에 의해 바로 제

어되므로 다른 다섯 방향은 베어링 시스템에 의해 제어하여야 한다. 5 자유도 시스템을 제어하기 위해서는 최소한 다섯 개의 독립된 힘이 필요로 하지만 여러 실질적인 문제들이 존재한다.

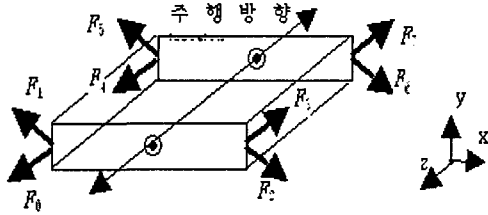


그림 1. 8개 단극전자석을 가진 아마추어 부상

첫 번째는 전자석의 성질이다. 힘이 일련의 전자석과 철의 표면으로부터 발생되어질 때 그 힘은 언제나 단방향성을 띤다. 이런 경우 다섯 개의 전자석으로 아마추어를 제어하기엔 충분하지 않다.

다음 문제는 기하학적인 것일 수 있다. 자유 시스템의 5자유도의 안정된 제어를 얻기 위해서는 많은 기하학적인 대안이 있을 수 있다. 기초적인 가이드라인을 위해서는 쉬운 구조, 더 나은 다이내믹, 간단한 모델링, 그리고 쉬운 제어기 설계 같은 별개의 장점을 얻기 위해 간단하고 좌우 대칭적인 구조를 선호한다. 그림 1에 보면 제한된 시스템은 아마추어의 각 코너에 8개의 전자석을 설치했다.

이 구조는 좌우 대칭의 동적 관계를 주고 각 축사이의 상호 작용을 최소화 한다. 전자석은 단지 흡인력을 발생하지만 자석의 좌우 대칭적인 구조가 소위 push-pull 방식을 형성한다. Push-pull 방식을 사용함으로써, 제시된 시스템은 힘의 모든 방향을 만들어 낼 수 있고 형태상으로 제어기의 구성을 쉽게 할 수 있다.

III. 동적 모델링

3.1 전자석

전자석은 전기적, 자기적 그리고 기계적 성질을 가지는 대단히 비선형적인 장치이다. 전자석의 정확한 모델링을 위해서는 유한 요소 모델링이나 다른 수치해석의 방법들이 널리 사용되지만, 제어장치를 위해 간단하고 효율적인 방법을 택한다. 본 논문에서는 multi-domain 시스템에 대해 효율적인 방법으로 알려진 본드 그래프 방식을 사용한다.

그림2는 전자석의 본드 그래프 모델이다. 각 줄(power line)에 표시된 변수들은 왼쪽부터 각각 전기 (e, i), 자기(M, ϕ) 그리고 기계적 변수들을 나타낸다. 자레이터(Gy)와 커패

시턴스(C)는 multi-port 에너지 전환 요소들이다. 본드 그래프 모델로부터 에너지 전환 프로세스를 쉽게 알아낼 수 있다. 이 경우에 전기 에너지는 자기 에너지, 기계적인 에너지로 전환한다.

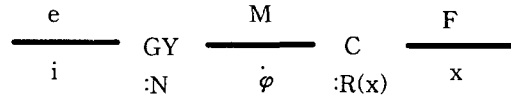


그림2. 전자석에 대한 본드그래프 모델

상세한 수학적 모델을 위해 우선 자레이터 특성을 고려하자. 만약 자기 포화나 히스테리시스 효과와 같은 자석의 비선형성을 무시한다면 전자기 변수는 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$M = Ni \tag{1}$$

$$e = N\dot{\phi} \tag{2}$$

$$M = R(x)\phi \tag{3}$$

여기에서 $R(x)$ 는 공극에서의 자기 저항을 나타내며 기하학적인 변수와 다음과 같은 간단한 관계를 가진다.

$$R(x) = \frac{2x}{\mu_0 A} \tag{4}$$

여기에서 μ_0 는 공기의 투자율이고, x 와 A 는 공극의 간격과 면적을 각각 표시한다. 공극에서 에너지는 자기적 형태로 축적되어 있으므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} E(x, \phi) &= \frac{1}{2} R(x)\phi^2 = \frac{1}{2} R(x)\left(\frac{M}{R(x)}\right)^2 \\ &= \frac{\mu_0 A}{4x} M^2 \end{aligned} \tag{5}$$

그리고 기계적인 흡인력은 위에 저장된 에너지를 편미분함으로써 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} F(x, i) &= \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\mu_0 A N^2 i^2}{4x} \right\} \\ &= -\frac{\mu_0 A N^2 i^2}{4x^2} \end{aligned} \tag{6}$$

3.2 시스템의 상태 방정식

아마추어는 공간상의 자유 강체로써 간주될 수 있다. 그림1에 나타난 것과 같이 8개의 전자석력은 이 자유 강체에 따라 동작한다. 힘의 방향은 y-z 평면에 놓여있고 45도 기울어진 상태이며, 아마추어의 운동은 상대적으로 작다. 따라서 기하학적인 관계를 간단하게 할 수 있으며 각 방향의 동적인 상호 관계를 무시할 수 있다. 이런 가정에서 각 방향을 기술하면 다음과 같은 동적 방정식이 주어진다.

리니어 모터를 위한 능동 자기 베어링의 설계 및 제어

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x} &= (-F_0 - F_1 + F_2 + F_3 - F_4 - F_5 + F_6 + F_7)\sin 45^\circ \\
 m\ddot{y} &= (-F_0 + F_1 - F_2 + F_3 - F_4 + F_5 - F_6 + F_7)\cos 45^\circ \\
 I_x\ddot{\theta}_x &= (+F_0 - F_1 + F_2 - F_3 - F_4 + F_5 - F_6 + F_7)l\cos 45^\circ \\
 I_y\ddot{\theta}_y &= (-F_0 - F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 - F_6 - F_7)l\sin 45^\circ \\
 I_z\ddot{\theta}_z &= (+F_0 - F_1 - F_2 + F_3 + F_4 - F_5 - F_6 + F_7)r\cos 45^\circ \\
 x_0 &= x + l\theta_y & y_0 &= y - l\theta_x - r\theta_z \\
 x_1 &= x + l\theta_y & y_1 &= y - l\theta_x + r\theta_z \quad (8) \\
 x_2 &= x - l\theta_y & y_2 &= y + l\theta_x - r\theta_z \\
 x_3 &= x - l\theta_y & y_3 &= y + l\theta_x + r\theta_z
 \end{aligned}$$

여기에서 x_i 와 y_i 는 작동점의 각 코너에서의 센서 출력을 나타내고, r 과 l 은 무게 중심에서 힘까지의 길이를 표시한다.

따라서, 상태방정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= [y \ \dot{y} \ z \ \dot{z} \ \theta_x \ \dot{\theta}_x \ \theta_y \ \dot{\theta}_y \ \theta_z \ \dot{\theta}_z]^T \\
 u &= [F_0 \ F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4 \ F_5 \ F_6 \ F_7]^T \quad (9) \\
 y &= [x_0 \ y_0 \ x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2 \ x_3 \ y_3]^T
 \end{aligned}$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 &+ \begin{bmatrix} \frac{\sin 45^\circ}{m} [0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0] \\ \frac{\cos 45^\circ}{m} [0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0] \\ \frac{l\cos 45^\circ}{I_x} [-1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1] \\ \frac{l\sin 45^\circ}{I_y} [0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0] \\ \frac{r\cos 45^\circ}{I_z} [-1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1] \\ \frac{l\cos 45^\circ}{I_x} [0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0] \\ \frac{l\sin 45^\circ}{I_y} [1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1] \\ \frac{r\cos 45^\circ}{I_z} [0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0] \\ \frac{l\sin 45^\circ}{I_y} [-1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1] \\ \frac{r\cos 45^\circ}{I_z} [0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0] \\ \frac{l\sin 45^\circ}{I_y} [1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1] \end{bmatrix} u \\
 y &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -l & 0 & 0 & 0 & -r & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -l & 0 & 0 & 0 & r & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & l & 0 & 0 & 0 & -r & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & l & 0 & 0 & 0 & -r & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & l & 0 & 0 & 0 & -r & 0 \end{bmatrix} x \quad (11)
 \end{aligned}$$

따라서 위 시스템이 controllable하고 observable하다

는 것을 쉽게 알 수 있다.

IV. 시뮬레이션

제어기를 위해 간단한 PID 제어 알고리즘이 사용했다. 더구나 전체적인 설계를 분산제어 방식을 사용함으로써 간단화 하였다. 따라서 각 전자식에 독립적인 8개의 PID제어기들을 다음과 같이 설계하였다.

$$u_i = K_i(s)y_i, \quad i=1 \dots 8 \quad (12)$$

그림 4에 보인 바와 같이 SIMULINK 패키지를 사용하여 모델링과 시뮬레이션을 실행하였다. 그 결과가 그림 5에 나와 있다. 여기에서 응답은 최적화되지는 않았지만, 안정된 응답을 보여주었으며, 제시된 시스템의 실현가능성을 입증했다.

V. 실험

그림5.에서처럼 실험 장치를 구성했다. 아마추어의 절대위치를 감지하기위해 4개의 2차원 PSD(Position Sensitive Detector)를 사용하였고, 레이저와 PSD의 조합은 가이드 레일과는 독립적으로 정확한 위치 감지 메카니즘을 제공한다. 제어 알고리즘은 IBM PC 호환기종에 설치된 DSP와 AD/DA 컨버터에 의해 실현되어졌다.

그림 6.과 그림7.에 보인 실험 결과는 실제 파라미터가 예측한 파라미터와는 다르기 때문에 시뮬레이션 결과와 정확히 일치하지는 않는다. 시뮬레이션에서 8개의 서브 시스템은 각각 정확히 일치하나, 실제 시스템에서 서브 시스템은 서로 다르다. 하지만 실험과 시뮬레이션에서 결과는 비슷한 경향을 나타내었다. 전체적인 동작과 rising time은 제시된 시스템이 시뮬레이션에서 예측 가능하다는 것을 보였다.

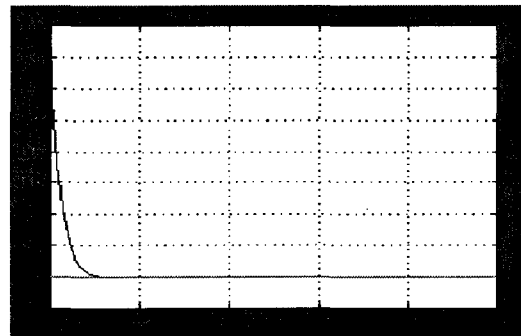


그림 4. 시뮬레이션 결과

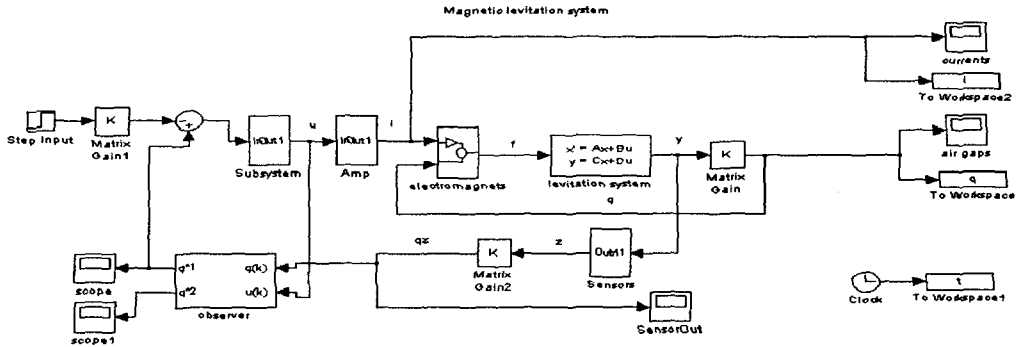


그림 3. 시스템의 Simulink 모델

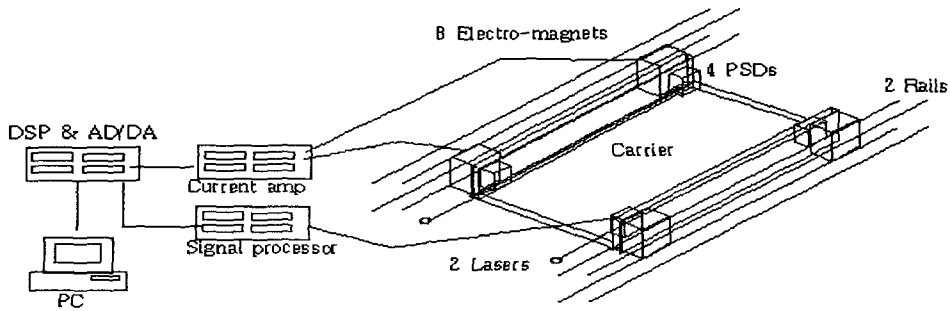


그림 5. 시스템구조

VI. 결론

본 논문에서는 제안한 디자인의 가능성을 보이기 위해 새로운 타입의 리니어 능동 자기베어링 시스템을 고안하였고 실험하였다. 비접촉형 광학 감지 시스템은 간단한 구조와 레일 상태와는 독립적인 정확한 위치 신호를 제공하였으며, 그 실험 결과가 시뮬레이션 결과와의 일치함을 보였다.

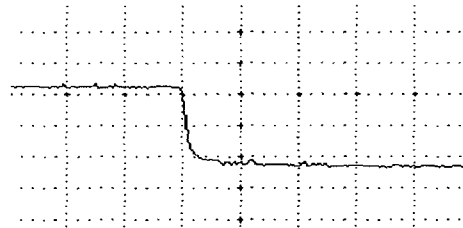


그림 7. 결과 (x:0.1mm/D, t:0.1s/D)

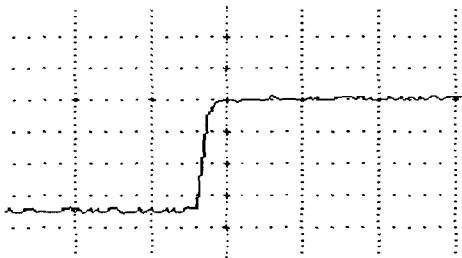


그림 6. 결과 (y:0.1mm/D, t:0.1s/D)

참고문헌

- [1] Yamata e.t. al, *Linear Motor Application Handbook*, Sewha, 1988, pp492-497.
- [2] H. Habermann and G. Liard, "An Active Magnetic Bearing System", *Tribology international*, April 1980.
- [3] T. Higuchi, "Application of Magnetic Bearings in Robotics", *Proceedings of the 1st Int. Symposium*, ETH Zurich, Switzerland, 1988.