

1톤급 영구자석형 자기부상 시스템 제어

김중문, 우병철, 강도현
한국전기연구원 Mechatronics 연구그룹

Control of 1-ton CPM Maglev System

Jong-Moon Kim, Byung-Chul Woo, and Do-Hyun Kang
Mechatronics Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - In this paper, the control system of the controlled-permanent magnet(CPM) type MagLev system of 1ton is designed and implemented. The target to be controlled is PEM(permanent and electromagnet) type with 4-corners levitation which is open-loop unstable, highly non-linear and time-varying system. The designed controller is validated by some kinds of experiments.

1. 서 론

지난 수 십 년 동안 자기부상 요소 기술은 매우 다양하게 산업 현장에 적용되어 왔다. 그 중에서도 자기부상 열차, 플라이 퓌 등은 기존 시스템의 문제점을 보완하는 동시에, 그 자기부상의 장점을 살려 실용적으로 사용되어 오고 있다[1]. 최근에는 그 적용 범위가 더 넓어져서 반도체 장비[2]에도 적용하기 위한 연구가 많이 수행되고 있다. 이 반도체 장비가 있는 고정정실은 항상 어느 일정 청정도를 유지시켜야 제품의 질을 극대화할 수 있게 된다. 청정도를 높이기 위한 기술은 여러 가지가 있으나 그 중의 하나가 비접촉 전원장치(contactless power supply, CPS)를 포함하는 자기부상 반송장치라고 할 수 있다. 이 CPS 시스템은 기존의 반도체 시스템에서의 접촉식 이송장치가 갖는 문제점을 해결할 수 있지만 여전히 기계적으로 지지를 해주어야만 하기 때문에 윤활장치를 필요로 하는 단점이 있다.

따라서 이 논문에서는 이러한 문제를 해결하고자 반도체 및 LCD 반송 장치에 대한 저전력 자기부상 시스템의 설계 및 제어에 대해 제안하고자 한다.

이 논문의 내용은 다음과 같다. 먼저 자기부상 시스템에 대한 수학적 모델링을 하여 선형 상태방정식 및 전달함수를 구하여 관측자 및 상태 반환 제어기를 설계하였다. 그리고 기준입력 추종 성능 및 외란제거 성능 실험을 통하여 설계된 제어기가 안정된 부상성능을 유지하면서도 외란에 대해서도 둔감하다는 것을 보였다. 마지막으로 결론을 맺었다.

2. 본 론

2.1 선형 방정식 유도

자기부상 시스템을 모델링하기 위하여 먼저 비선형 전자기 방정식 및 동역학을 이용하여 선형 방정식을 구한다. 그림 1에서 레일이 강체이고, 누설 자속이 없다고 가정할 때, 공극자속밀도 B 는 다음과 같이 전류 i 와 공극 z 의 함수가 된다.

$$B = \frac{\phi_g}{A_g} = \frac{ai + B_r}{bz + 1} \quad (1)$$

B_r 는 잔류자속밀도이고, 계수 a 와 b 는 다음과 같다.

$$a = \frac{\mu_p \mu_0 N}{l_p} = \frac{1.05 \mu_0 N}{l_p} \quad (2)$$

$$b = \frac{2\mu_p}{l_p} = 2 \frac{1.05}{l_p} \quad (3)$$

여기서 l_p 는 영구자석의 자로길이인데, 영구자석의 높이와 같다. 그리고 코일과 영구자석에 의한 공극에서의 흡인력 F_a 는 자기 축적에너지 W 를 공극에 대해 편미분 형태로 표현되고, 전류의 자속에 비례하고, 공극의 자속에 반비례한다.

$$F_a = -\frac{\partial W}{\partial z} = \frac{A_g}{\mu_0} \left[\frac{ai + B_r}{bz + 1} \right]^2 \quad (4)$$

그림 1에서 흡인력 F_a 와 가속도 \ddot{z} 사이의 관계는

$$m\ddot{z} = mg - F_a + F_d \quad (5)$$

가 되고, m 은 전체 질량이고, g 는 중력가속도, F_d 는 외부로부터의 힘 외란이다. 그림 1에서 인덕턴스 L 은

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A_g}{\frac{l_c}{\mu_c} + 2z + \frac{l_p}{\mu_p}} = \frac{c_1}{2z + c_2} \quad (6)$$

와 같다. 여기서 μ_c 와 μ_p 는 각각 철심과 영구자석의 비투자율이고, μ_0 는 진공속의 비투자율이다. l_c 는 철심의 자로길이이고, N 은 코일의 권선수, A_g 는 철심의 극 단면적이다. 만약 영구자석이 없이 순수하게 코일만 있는 경우 b 가 0이 되고, 코어의 비투자율 μ_c 는 2000 보다 큰 값이므로 인덕턴스 L 은 다음과 같이 근사화된다.

$$L \approx \frac{\mu_0 N^2 A}{2z} \quad (7)$$

식 (5)의 기계적 방정식과 별도로 전기적 방정식은 다음과 같이 전압 방정식으로 표현된다.

$$v(t) = Ri(t) + \frac{d}{dt}[L(z,i)i(t)] \quad (8)$$

$$= Ri(t) + L(z,i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dz} \left(\frac{dz}{dt} \right)$$

따라서 코일과 영구자석으로 이루어진 자기부상 시스템의 비선형 상태방정식은 식 (10)~(12)가 되고, 상태 벡터 $x(t)$ 는

$$x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t)]^T = [z(t) \ \dot{z}(t) \ i(t)]^T \quad (9)$$

와 같고, 여기서 상태변수로는 공극 $z(t)$, 속도 $\dot{z}(t)$ 그리고 전류 $i(t)$ 가 된다. 그리고 제어전압 $v(t)$ 는 입력 신호이다.

$$\dot{x}(t) = x_2(t) \quad (10)$$

$$\dot{x}_3(t) = g - \frac{1}{m} \left(\frac{A_g}{\mu_0} \left(\frac{ax_3(t) + B_r}{bx_1(t) + 1} \right)^2 + F_d \right) \quad (11)$$

$$\ddot{x}_3(t) = \frac{1}{L} \left(-R x_3(t) - x_3(t) \frac{dL}{dx_1(t)} x_2(t) + v(t) \right) \quad (12)$$

여기서 인덕턴스 L 은 식 (6)과 같고, 공극에 대한 인덕턴스의 변화율 $\frac{dL}{dx_1(t)}$ 는 다음과 같다.

$$\frac{dL}{dx_1(t)} = \frac{-2c_1}{(2x_1(t) + c_2)^2} \quad (13)$$

이제 비선형 상태방정식으로부터 선형 상태방정식을 구하기 위해 동작점 부근에서 테일러 근사화 방법을 사용한다. 전류 $i(t)$, 공극 $z(t)$ 그리고 제어전압 $v(t)$ 는 다음과 같이 놓는다.

$$i = i_0 + \Delta i, z = z_0 + \Delta z, v = v_0 + \Delta v \quad (14)$$

여기서 i_0, z_0, v_0 는 동작점에서의 각각 전류, 공극 그리고 제어전압이 된다. 여기서 다루는 영구자석이 있는 자기 부상 시스템은 동작점에서 전류를 0으로 하므로, $i_0 = 0$ 이 되고, 기계적인 운동인 식 (5)를 선형화시키면 다음과 같이 된다.

$$\Delta \ddot{z} = \frac{K_z}{m} \Delta z - \frac{K_i}{m} \Delta i + \frac{F_d}{m} \Delta v \quad (15)$$

여기서 계수 K_z 와 K_i 는 다음과 같이 동작점에서 각각 공극과 전류에 대한 흡인력의 변화율로 정의된다.

$$K_z = \left. \frac{\partial F_a}{\partial z} \right|_{(z_0, i_0)} = \frac{2Ab(a_0 + B_r)^2}{\mu_0(bz_0 + 1)^3} \quad (16)$$

$$K_i = \left. \frac{\partial F_a}{\partial i} \right|_{(z_0, i_0)} = \frac{2Aa(a_0 + B_r)}{\mu_0(bz_0 + 1)^2} \quad (17)$$

계수 K_z 와 K_i 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\frac{K_z}{K_i} = \frac{b}{a} \left(\frac{a_0 + B_r}{bz_0 + 1} \right) \quad (18)$$

전압 방정식 (8)에 대한 선형 방정식은

$$\Delta \dot{i} = \frac{1}{L_0} \Delta v - \frac{R}{L_0} \Delta i, \quad (19)$$

여기서 L_0 는 동작점에서의 인덕턴스이다. 위에서 선형화 방정식인 식 (15)와 식 (19)를 이용한 선형 상태방정식은

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{z} \\ \Delta \ddot{z} \\ \Delta \dot{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_z}{m} & 0 & -\frac{K_i}{m} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z \\ \Delta \dot{z} \\ \Delta i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \\ 0 \end{bmatrix} F_d + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_0} \end{bmatrix} \Delta v \quad (20)$$

이 되고, 그림 2는 선형 시스템의 블록도가 된다. 식 (20)을 전달함수 형태로 표현하면

$$\frac{\Delta Z(s)}{\Delta V(s)} = \frac{-K_i}{(ms^2 - K_z)(L_0s + R)} \quad (21)$$

이 되고, 이 시스템의 극점은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{cases} s_1 = -\frac{R}{L_0} \\ s_{2,3} = \pm \sqrt{\frac{K_z}{m}} \end{cases} \quad (22)$$

따라서 극점은 s -평면에서 두 개는 좌반면에, 한 개는 우반면에 있어서 불안정한 시스템이 된다.

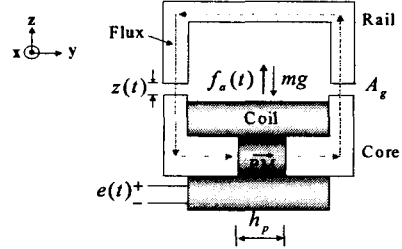


그림 1. CPM 자기부상 시스템

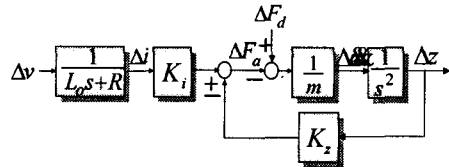


그림 2. 개루프 자기부상 시스템의 블록도

2.2 제어기 설계

이 논문에서는 CPS용 자기부상 시스템의 부상제어를 위하여 상태궤환 제어[3]를 구현하고자 한다. 상태궤환 제어는 자기부상 시스템에서 구할 수 있는 상태변수를 직접 측정 또는 추정한 후, 그 신호를 피드백 게인과 곱하는 형태를 기본적으로 하고 있다. 상태궤환 제어시, 피드백 신호는 갭, 속도 및 가속도를 사용하는 데 갭과 가속도는 센서로부터 직접 측정하고, 속도 신호는 갭과 가속도로부터 관측자를 통하여 추정한다.

그림 3은 관측자 모델의 일반적인 형태를 보여 준다. 여기서 관측자는 그림 2의 자기부상 시스템의 블록도에서 가속도부터 갭까지의 신호를 모델로 하였다. 즉, 관측자의 입력은 가속도 신호이며, 출력은 갭 추정치가 된다. 이 추정된 출력 신호는 실제 출력 신호인 갭 센서 신호와 비교를 한 후, 그 오차는 다시 추정 상태변수를 수정한다. 정상상태에 도달하면 그 오차는 0이 된다.

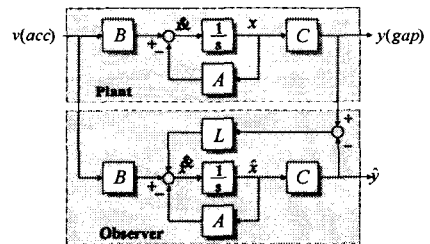


그림 3. 자기부상 시스템의 관측자 모델

관측자의 추정 상태변수를 $\hat{x}(t)$, 추정 출력을 $\hat{y}(t)$ 그리고 관측자 게인을 L 이라 하면, 추정 상태변수의 미분형은

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (23)$$

와 같이 표현된다. 관측자 게인 L 은 $[L_1 \ L_2]^T$ 와 같고, 상

대관측오차를 $e(t) = \hat{x}(t) - x(t)$ 로 정의하면, 오차방정식은 다음과 같게 된다.

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) \quad (24)$$

여기서 오차방정식의 행렬 $A - LC$ 가 안정하면, $t \rightarrow \infty$ 일 때, $\hat{x}(t) \rightarrow x(t)$ 가 된다.

그림 3의 관측자는 차수가 2가 되므로, $A - LC$ 의 특성방정식은 다음과 같은 형태가 된다.

$$\Delta_o(s) = s^2 + 2\zeta_o w_{no}s + w_{no}^2 \quad (25)$$

따라서 이 특성방정식의 ζ_o 와 w_{no} 를 결정하면 L_1 과 L_2 는 다음과 같이 구해진다.

$$L_1 = 2\zeta_o w_{no}, \quad L_2 = w_{no}^2 \quad (26)$$

갭, 속도 및 가속도 피드백을 한 경우의 페루프 시스템의 특성방정식은 다음과 같다.

$$\Delta(s) = s^3 + \frac{mR + K_i K_a}{mL_0} s^2 + \frac{K_i K_v - K_i L_0}{mL_0} s + \frac{K_i K_p - K_i R}{mL_0}$$

원하는 특성방정식은 다음과 같이 정하면,

$$\Delta_d(s) = (s + \alpha)(s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2) = s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0$$

결국 특성방정식의 계수 d_0, d_1, d_2 는 설계 파라미터인 α, ζ, w_n 에 의해 정해지고,

$$d_0 = \alpha w_n^2, \quad d_1 = 2\alpha \zeta w_n + w_n^2, \quad d_2 = \alpha + 2\zeta w_n \quad (28)$$

피드백 게인 K_p, K_v, K_a 는 다음과 같이 된다.

$$K_p = \frac{mL_0 d_0 + K_i R}{K_i} \quad (29)$$

$$K_v = \frac{mL_0 d_1 + K_i L_0}{K_i} \quad (30)$$

$$K_a = \frac{mL_0 d_2 - mR}{K_i} \quad (31)$$

2.3 실험 결과

2.3.1 실험 장치 설명

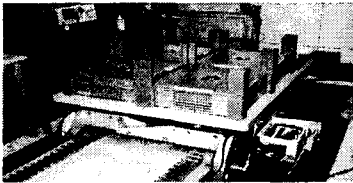


그림 4. 자기부상 실험장치 사진

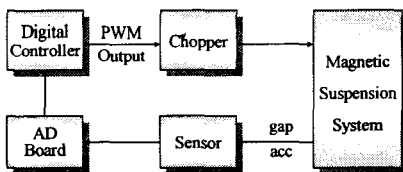


그림 5. 디지털 부상제어 시스템

이 논문에서 구현된 실험 장치를 설명하기 위하여 실험 장치 및 전체 블록다이어그램을 먼저 보인다. 그림4는 제작된 자기부상 시스템에 대한 사진이며, U자형 상전도 마그네트와 영구자석, 갭 센서, 전류 센서 및 가속도계로 이루어져 있다. 그림 5는 구현된 디지털 자기부상 시스템에 대한 블록 도이고, 미국 Motorola사의 300MHz PPC604 CPU 보드를 사용하였다. 제어 프로그램에서 샘플링 주파수는 4kHz이고, 실시간 운영체제인 VxWorks[4] 환경에서 C 코드로 되어 있고, PC에서 컴파일 된 후, 인터넷을 통하여 CPU 보드에 다운

로드되어 실행된다. 피드백 센서는 미국 KAMAN사의 갭 센서와 Dytran 사의 가속도계 그리고 전류 센서를 사용하였다. AD 보드는 정밀도 12bit, 변환범위 -5~+5V, 채널수는 32이다. 제어기 출력 신호는 초퍼에 PWM 형태로 광케이블을 통하여 전송된다. 초퍼는 4상한 방식으로, 스위칭 소자는 IGBT, 스위칭 주파수는 10kHz, DC 입력전압은 115V이다.

2.3.2 실험 결과

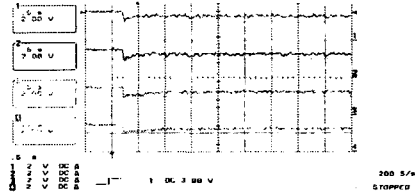


그림 6. 자기부상 시스템의 스텝 응답

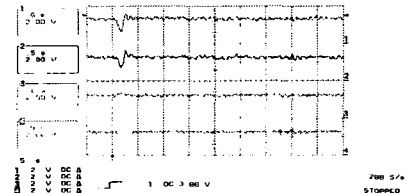


그림 7. 자기부상 시스템의 임펄스 응답

실험은 크게 기준공극을 변화시키는 스텝 응답과 임펄스형 전압을 제어전압에 더해주는 임펄스 응답을 구하였다. 그림 6은 전체 마그네트가 3mm에 떠있을 때, 기준공극을 2.5mm로 가변했을 때의 응답인데, 비교적 수렴이 양호하다고 볼 수 있다. 그림 7은 2.5mm에 부상중에 코너 1에 약 0.1초 동안 제어전압을 최대값으로 하였을 때의 응답이다. 이 그림에서 코너 1과 2의 공극파형이 거의 같은 것은 코너 1과 2가 가깝게 있어서 커플링이 매우 크다는 것을 보여 준다. 하지만 코너 3과 4는 영향이 거의 없다는 것을 알 수 있다.

따라서 관측자를 사용한 제어기는 비교적 양호한 부상 특성을 보여 준다는 것을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

이 논문에서는 영구자석과 코일이 혼합된 형태의 하이브리드형 자기부상 시스템에 대한 설계와 그에 대한 제어기 구현에 대해 언급을 하였다. 비접촉 지지를 위해 자기부상 장치를 실제로 제작하였으며, 이를 부상시키기 위한 제어기를 설계하였고, 이 제어기의 성능을 확인하기 위하여 실제로 적용하였다.

그 결과, 입력 추종 성능과 외란 제거 성능이 비교적 양호하다는 것을 알 수 있었고, CPS 시스템에 적용할 수 있다는 가능성을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] P.K. Sinha, *Electromagnetic suspension: dynamics and control*. Stevenage, U.K. Peregrinus, 1987.
- [2] Dick de Roover, *Motion control of a wafer stage*, Delft University Press, 1997.
- [3] Matlab *Control TB*, ver2.0.6, The Mathworks, 1998.
- [4] *VxWorks User's Guide*, The WindRiver, 1996.