

CPM형 자기부상의 진동제어

김종문

한국전기연구원 Mechatronics 연구그룹

Vibration Control of A CPM Maglev System

Jong-Moon Kim

Mechatronics Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - In this paper, the vibration control of CPM(Controlled-Permanent Magnet) type magnetic levitation system of 1ton is designed and implemented. The target to be controlled has 8 magnets and 4 corners of the maglev module are levitated using a digital feedback controller. The designed controller includes PID type gap controller and speed observer. Its performance is validated by some kinds of experiments.

1. 서 론

접촉식 베어링이 갖고 있는 문제를 해결하기 위하여 지난 수 십 년 동안 세계적으로 자기부상 기술을 연구하였으며 그 요소 기술은 매우 다양하게 산업 현장에 적용되어 왔다. 그 중에서도 자기부상열차, 플라이 휠 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.

하지만 자기부상 시스템 역시 기존의 접촉식 베어링같이 진동 문제가 큰 이슈가 되어 왔다. 자기부상 시스템의 큰 약점은 신뢰성 부족, 강성 저하 그리고 진동 문제를 들 수 있다. 이 논문에서는 이 중에서도 자기부상 시스템의 진동 문제에 대해 관심을 갖고 있으며 실험을 통하여 그 문제 해결 방안을 보이고자 한다.

이 논문의 내용은 다음과 같다. 먼저 자기부상 시스템에 대한 수학적 모델링을 하여 선형 상태방정식 및 전달함수를 구하여 관측자 및 상태 궤환 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 관계식 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

$$B = \frac{\phi_g}{A_g} = \frac{ai + B_r}{bz + 1} \tag{1}$$

B_r 는 잔류자속밀도이고, 계수 a 와 b 는 다음과 같다.

$$a = \frac{\mu_p \mu_0 N}{l_p} = \frac{1.05 \mu_0 N}{l_p} \tag{2}$$

$$b = \frac{2\mu_p}{l_p} = 2 \frac{1.05}{l_p} \tag{3}$$

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.

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

그림 1에서 흡인력 F_a 와 가속도 \ddot{z} 사이의 관계는

$$m\ddot{z} = mg - F_a + F_d \tag{5}$$

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

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

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 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.

$$L \approx \frac{\mu_0 N^2 A}{2z} \tag{7}$$

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

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

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

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

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

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

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t) \quad (10)$$

$$\dot{x}_2(t) = g - \frac{1}{m} \left(\frac{A_g}{\mu_0} \left(\frac{ax_3(t) + B_r}{bx_1(t) + 1} \right)^2 + F_d \right) \quad (11)$$

$$\dot{x}_3(t) = \frac{1}{L} \left(-Rx_3(t) - x_3(t) \frac{dL}{dx_1(t)} x_2(t) + v(t) \right) \quad (12)$$

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.

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

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

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

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

계수 K_z 와 K_i 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\frac{K_z}{K_i} = \frac{b}{a} \left(\frac{a i_0 + B_r}{b z_0 + 1} \right) \quad (18)$$

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

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

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.

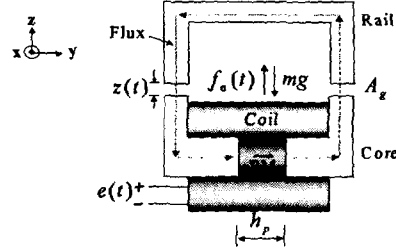


그림 1. CPM 자기부상 시스템

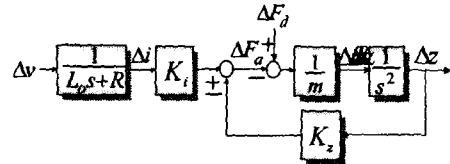


그림 2. 개루프 자기부상 시스템의 블록도

2.2 제어기 설계

이 논문에서는 CPS용 자기부상 시스템의 부상제어를 위하여 PID 제어기[3]를 구현하고자 한다. PID 제어 제어는 자기부상 시스템에서 구할 수 있는 상태변수를 직접 측정 또는 추정한 후, 그 신호를 피드백 계인과 곱하는 형태를 기본적으로 하고 있다. 피드백 상태변수는 갭, 속도 및 전류이며, 속도는 갭과 가속도를 이용하여 추정한다.

그림 3은 갭 신호와 가속도 신호를 이용한 속도 관측기의 구조를 보여 준다. 속도 신호는 갭 신호와 가속도 신호 각각의 단독으로도 추정이 가능하지만 특정한 주파수 대역에서는 정확한 속도를 추정하는 것이 어렵기 때문에 두 신호를 동시에 이용하면 항상 정확하게 속도를 추정할 수 있다. 그림 4는 속도 관측기 및 PID 갭 제어기를 보여 준다.

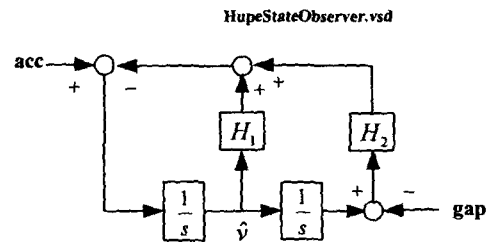


그림 3. 속도 관측기

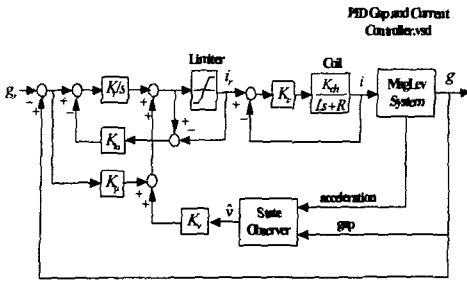


그림 4. 속도 관측기와 PID 겹 제어기 시스템

사용된 PID 겹 제어기의 구조는 다음과 같다.

$$i^* = K_p(-g_r + g) + K_i \int_0^t (-g_r + g) dt + K_d \dot{v} \quad (23)$$

그림 4에서 적분기는 적분기의 포화를 방지하기 위하여 anti-windup 방식을 사용하였다. 피드백 제어기 상수는 극점 지정 방식에 의해 구했으며, 전류 제어기는 비례제어기를 사용하였다. 즉

$$v_c = K_c(i^* - i) \quad (24)$$

2.3 실험 결과

2.3.1 실험 장치 설명



그림 4. 자기부상 실험장치 사진

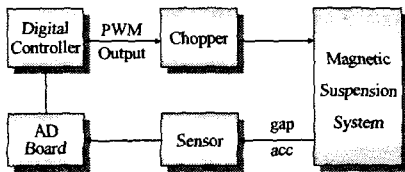


그림 5. 디지털 부상제어 시스템

이 논문에서 구현된 실험 장치를 설명하기 위하여 실험 장치 및 전체 블록다이어그램을 먼저 보인다. 그림4는 제작된 자기부상 시스템에 대한 사진이며, U자형 상전도 마그네트와 영구자석, 겹 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, 이더넷을 통하여 CPU 보드에 다운로드되어 실행된다. 피드백 센서는 미국 KAMAN사의 겹 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

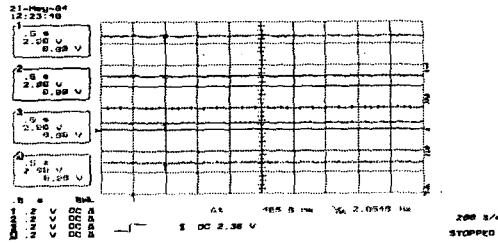


그림 6. 진동제어 고려안 한 경우의 겹 파형

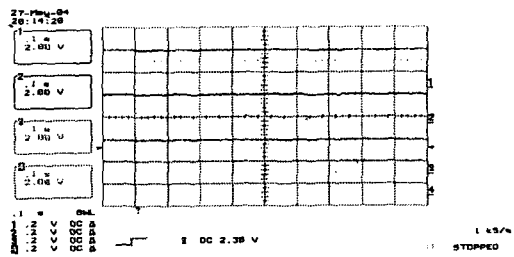


그림 7. 진동제어 고려한 경우의 겹 파형

실험은 크게 초기 공극 1.5mm에서 정상상태 공극 3mm로 이동한 후, 레일과 마그네트 사이의 공극의 변화를 줄이고자 여러 가지 방안을 강구하였다. 그림 6은 안정된 상태에서의 정상상태 공극의 파형을 보여 준다. 이 그림에서 알 수 있듯이 약 2Hz의 저주파 진동이 있다는 것을 알 수 있다. 하지만 66Hz의 고주파 진동은 잘 나타나지 않는 데 실제로는 이 고주파 진동이 큰 자기부상 시스템 전체의 진동에 결정적으로 작용한다. 따라서 그림 7에서 알 수 있듯이 가속도 및 속도 신호의 크기를 줄이는 방향으로 방안을 강구해야만 한다. 즉 가속도 신호의 민감도를 줄이는 것이 중요하다.

3. 결 론

자기부상 시스템의 진동 특성은 전기 시스템 뿐만 아니라 기계 시스템도 큰 영향을 미치므로 전체 시스템을 모두 고려해야만 좋은 부상 특성을 유지할 수 있다. 따라서 센서의 노이즈 특성, 부상제어기의 샘플링 문제, 초퍼의 선형 특성, 레일 및 모듈 프레임의 기계적 특성을 모두 설계 단계에서 조치를 취해야 한다.

위 실험 결과는 가속도 신호가 진동에 민감하다는 것을 실험으로 보였으나, 진동 원인은 매우 많으므로 더 지속적으로 문제를 해결해야 한다.

[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.