

자기부상 시스템에서의 내 고장성 제어기 설계

장 석 명*, 성 소 영*, 김 인 근**, 성 호 경**
 충남대학교 전기공학과*, 한국기계연구원 자기부상열차 개발 그룹**

Design of Fault tolerant controller for electromagnetic suspension system

Seok-Myeong Jang*, So-Young SUNG*, In-Kun KIM**, Ho-Kyung SUNG**
 Electrical Engineering Dept. of ChungNam National University*, KIMM, Maglev Project Team**

Abstract - Actuator (chopper) and sensors failures resulting from electric shock and mechanical vibration generating by rail irregularities are the serious problem deteriorating the performance in the electromagnetic suspension systems. Thus, this paper proposes the reliable output feedback controller for the electromagnetic levitation systems against actuator, air-gap sensor and acceleration sensor failures. The designed controller is an extend version of a novel design technique which has the design method of the output feedback controller using dynamic compensator. The benefits of this scheme are demonstrated through the experimental results for the proposed controller against chopper, air-gap sensor and acceleration sensor failures of electromagnetic levitation system.

1. 서 론

자기부상 시스템은 플랜트의 모델이 비 선형적이고 개루프 불안정하기 때문에 일반적인 PID 제어로는 제어성을 만족시키는데 제한적이므로, 상태공간 제어기의 설계가 필수적이다.

본 논문에서는 상전도 흡인식 자기부상모델인 두 개의 전자석에 의한 부상 시스템을 모델링한다. 그리고, 상태변수 추정기인 동특성 보상기를 설계하여 내 고장성 상태공간 제어기를 설계한다. 그리고, 자기부상 제어기는 상태변수를 추정하기 위하여, 가속도 센서와 공극 센서를 사용하는데, 이 두 개의 센서 중에서 하나가 고장나거나, 제어기의 제어명령을 증폭해주는 액츄에이터가 고장났을 경우에는, 플랜트의 특성이 개 루프 불안정하므로 안정성을 만족시키기 매우 어렵다. 따라서 자기부상 시스템이 차량과 같은 교통시스템에 적용되었을 때에는 고장에 의한 사고로 이어질 수 있는 위험성을 안고 있다. 따라서 자기부상 시스템과 같은 시스템에 대해서는 내 고장성 제어기의 설계가 필수적이다. 또한 이러한 제어기는 외란에 대하여 매우 강한 특성을 가져야 한다. 따라서, 본 논문에서는 가속도 센서, 공극 센서, 액츄에이터인 초퍼가 고장을 일으켰다고 하더라도 제어기가 비교적 안정된 동작을 할 수 있도록 하는 내 고장성 제어기를 설계하는 것을 목적으로 한다. 이 제어 알고리즘을 두 개의 전자석에 의한 부상시스템에 적용, 실험하여 제안된 제어 알고리즘을 검증한다.

2. 두 개의 전자석에 의한 부상모델

단일 전자석에 의한 부상모델은 [1]의 식 (1)-(3)으로부터 식(1)-(5)로 쓸 수 있다. 두 개의 전자석에 의한 부상모델을 그림 1에 보였다. 그림 1에서 두 개의 전자석에 의한 부상모델을 보였다.

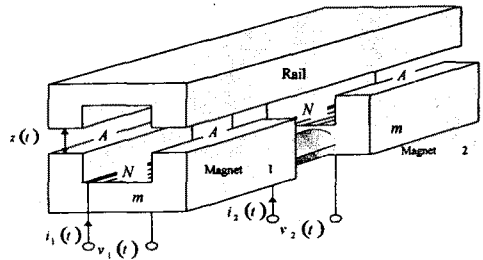


그림 1 두 개의 전자석에 의한 부상 모델

$$F(z(t), i_1(t)) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left\{ \frac{i_1(t)}{z(t)} \right\}^2 \quad (1)$$

$$F(z(t), i_2(t)) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left\{ \frac{i_2(t)}{z(t)} \right\}^2 \quad (2)$$

$$v_1(t) = Ri_1(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2} \frac{d}{dt} \left\{ \frac{i_1(t)}{z(t)} \right\} \quad (3)$$

$$v_2(t) = Ri_2(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2} \frac{d}{dt} \left\{ \frac{i_2(t)}{z(t)} \right\} \quad (4)$$

$$F(z(t), (i_1(t) + i_2(t))) + m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} = mg \quad (5)$$

식 (1)-(5)를 이용하여 두 개의 전자석에 의한 부상모델의 블록도를 그림 2에 나타냈다. 여기서 두 개의 전자석은 동일하고, 서로 강제로 연결되어 있고 외란은 없다고 가정한다. 식 (1)-(5)를 상태방정식으로 나타내면 식 (6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_z}{m} & 0 & -\frac{K_z}{m} & -\frac{K_z}{m} \\ 0 & \frac{K_z}{K_v} & -\frac{R}{L_0} & 0 \\ 0 & \frac{K_z}{K_v} & 0 & -\frac{R}{L_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{L_0} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 $x_1(t) = z^*(t)$, $x_2(t) = \dot{z}^*(t)$, $x_3(t) = i_1^*(t)$, $x_4(t) = i_2^*(t)$, $u_1(t) = v_1^*(t)$, $u_2(t) = v_2^*(t)$ 이다.

표 1의 전자석시양 및 계수를 이용하여 상태방정식의 행렬을 다시 쓰면 식 (7)과 같다.

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 5702 & 0 & -2.2808 & -2.2808 \\ 0 & 2500 & -45.455 & 0 \\ 0 & 2500 & 0 & -45.455 \end{bmatrix}, \quad B_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 45.455 & 0 \\ 0 & 45.455 \end{bmatrix}$$

$$C_p = \begin{bmatrix} 5702 & 0 & -2.2808 & -2.2808 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 3.42 \times 10^6 & 0 & -1368.5 & -1368.5 \end{bmatrix}, \quad D_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (7)에서 측정 가능한 출력은 $y_1(t) = \dot{z}^*(t)$, $y_2(t) = i_1^*(t)$,

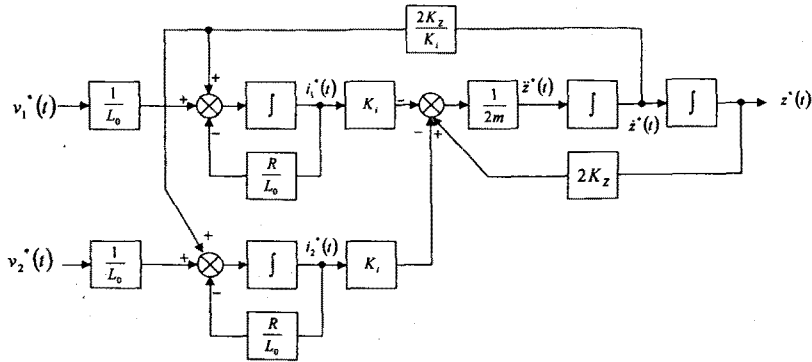


그림 2 두 개의 전자석 부상 모델의 블록도

$y_3(t) = \dot{z}^*(t)$, $y_4(t) = \phi^*(t)$, $y_5(t) = z^*(t)$ 이다.
이 때, 상태방정식의 고유치(eigenvalue)를 식 (8)에 나타냈다.

$$[31.777 \quad -3.86 \pm 8.16i \quad -45.455] \quad (8)$$

표. 1 전자석의 사양 및 각 계수

Symbol	Mean	Value	Unit
m	Levitated Weight	300	Kg
g	Gravity Constant	9.8	m/s^2
A	Sectional Area of Magnet	0.04	m^2
μ_0	Permeability Factor	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m
N	Number of Magnet Coil	660	Turns
R	Magnet Resistance	1	Ω
z_0	Nominal Airgap	0.011	m
I_0	Nominal Current	12.5	A
L_0	Nominal Inductance	0.022	H
K_i	Current Constant	1.36×10^3	N/A
K_z	Airgap Constant	1.71×10^6	N/m

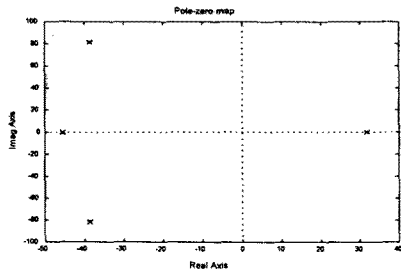


그림 3 개 루프 극점

시스템의 개 루프 극점을 그림 3에 보였다. 따라서 이 시스템은 복소수 평면의 우반평면에 하나의 극점이 존재하므로 개 루프 불안정하다.

3. 제어기 설계 및 시뮬레이션

자기부상 시스템에서 사용하는 센서는 공극센서와 가속도 센서, 전압 및 전류센서를 가지고 있다. 그러나 공극센서나 가속도 센서는 가격이 고가이고, 기계적 및 전기적 충격에 약한 구조를 가지므로, 실제로 고장이 많이 발생한다. 또한 시스템의 액츄에이터인 초퍼도 전기적 서지에 의한 고장이 자주 발생한다. 따라서, 제어기의 설

계목적은 공극센서, 가속도 센서가 고장났을 경우, 또는 제어기의 명령을 증폭해 주는 액츄에이터가 고장났을 경우에도 안정된 동작을 할 수 있도록 하는 것을 목적으로 한다. 동특성 보상기는 자기부상시스템에 사용될 제어신호들을 적절한 물리적 성질을 갖도록 균질한특성을 가져야 한다. 따라서 공극 및 가속도 센서고장시 다른 센서로부터 동일한 성질의 물리량을 갖도록 설계되어야 한다.

내고장성 제어기는 입력변수를 $\ddot{z}^*(t)$, $\dot{z}^*(t)$, $z^*(t)$, $\phi^*(t)$, $z^*(t)$ 로 하고 출력변수는 상대공극 $G_F(t)$, 상대속도 $G_{FP}(t)$, 절대속도 $Z_P(t)$, 절대가속도 $Z_{PP}(t)$ 이다. 이러한 동특성 보상기를 포함한 제어기의 블록도를 그림 4에 보였다.

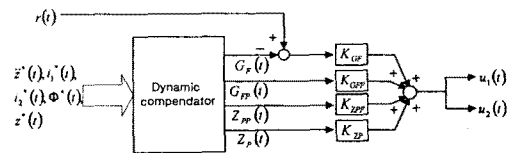


그림 4 동특성 보상기를 포함한 제어 시스템의 블록도

그림 4에서 K_{ZPP} 는 절대가속도 이득, K_{ZP} 는 절대속도 이득, K_{GFP} 는 상대속도 이득, K_{GF} 는 상대공극 이득이다. 이 동특성 보상기를 포함한 제어기의 고유치를 식 (9)에 나타냈다.

$$[-9.7047 \quad -3.2953 \quad -2.88 \times 10^6 \pm 3.30 \times 10^2 i] \quad (9)$$

4. 실험 및 고찰

제안된 알고리즘을 검증하기 위하여 그림 5과 같은 실험장치를 구성하였다. 그리고 제어기는 Power PC(PCIA 604e, 225MHz)를 기반으로 하는 VME Digital 제어기를 구성하였다. 또한 공극을 측정하기 위하여 0~25mm 까지 측정 가능한 Eddy Current 타입의 공극센서를 사용하였고, 가속도를 측정하기 위하여 $0 \pm 3g$ 의 측정범위를 갖는 servo타입의 가속도 센서를 사용했다. 그리고 전류를 측정하기 위해서 Hall 센서를 사용하였고, 전압을 측정하기 위해서는 분압기(voltage divider)를 사용했다. 그리고 전자석에 전력을 전달하기 위해서 DC Link 전압이 300V인 10kHz PWM Chopper를 사용하였다.

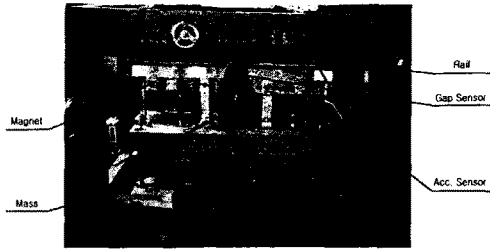


그림 5 두 개의 전자석 부상 실험 장치

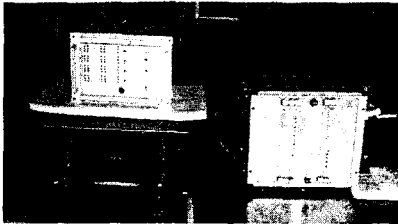


그림 6 디지털 제어기와 액추에이터

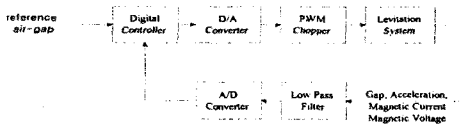


그림 7 디지털 제어 시스템의 구성도

그림 5에 실험대상을 보였고 그림 6는 설계된 디지털 제어기와 액추에이터인 초퍼를 보였다.

그림 7에 디지털 제어 시스템의 전체 블록도를 보였다.

제안된 제어 알고리즘을 검증하기 위하여 공극센서가 고장났을 때, 가속도 센서가 고장났을 때, 초퍼 중 한 대가 고장났을 때의 세 가지 경우에 대하여 실험을 하였다. 5초에서 25초 동안은 공극 외란을 가중하지 않은 정상부상상태에서 실험을 수행하였다. 그리고, 대략 10초에 강제로 고장을 유발시키고 20초에 정상으로 복귀시켰다. 실험을 수행할 때에 정확하게 시간에 맞춰서 고장을 유발시키지 못한 이유는 매뉴얼로 고장을 유발시켰기 때문에 시뮬레이션 결과와 고장시간이 정확하게 일치하지 않는다. 이 결과를 그림 8-10에 보였다.

- 공극센서 고장시

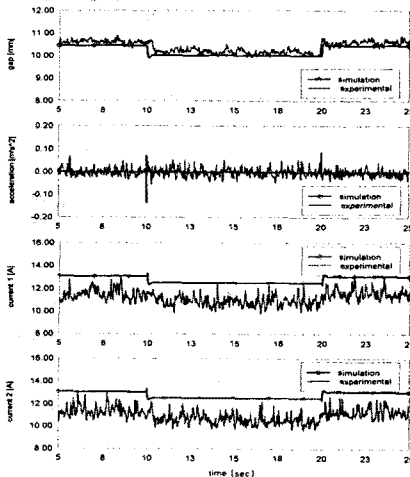


그림 8 공극센서 고장시 부상상태

- 가속도 센서 고장시

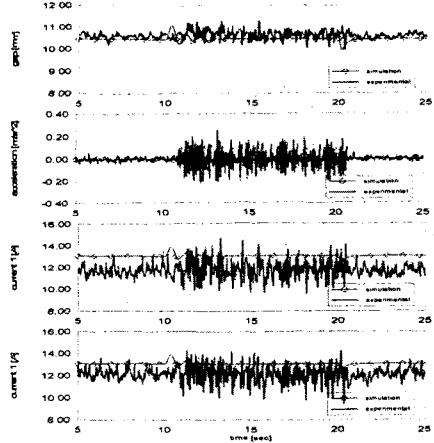


그림 9 가속도센서 고장시의 부상 과정

- 액추에이터 고장시

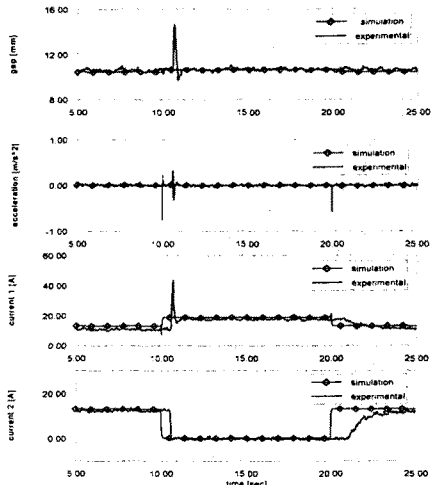


그림 10 액추에이터 고장시 부상상태

5. 결 론

본 논문에서는 단일 전자석 부상 모델로부터 두 개의 전자석에 의한 부상모델을 제안하고, 정상부상상태에서 공극센서, 가속도 센서의 고장 및 액추에이터인 초퍼중 한 대가 고장났을 경우에도 정상적인 제어가 되도록 하는 내 고장성 제어기를 설계하고 시뮬레이션하여, 실험과 비교 검토하였다.

센서나 액추에이터 고장이 발생하였을 때 시스템의 이득을 조정함으로써 전체 페 루프 시스템의 극점을 s-plane의 LHP로 이동시킬 수 있으므로, 고장시에도 시스템이 안정적으로 부상할 수 있음을 보였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 성소영, 장석명, 김인근, 성호경, "상전도 흡인식 자기부상 제어기 설계", 대한전기학회 전기기기 연구회 전기철도 연구회 '99춘계 합동 학술대회, pp20~p23, 1999. 5. 7
- [2] 성소영, 장석명, 김인근, 성호경, "상전도 흡인식 자기부상 제어기 설계(II), 대한 전기학회 '99 하계 학술대회, pp101-104
- [3] Shinha, "Suspension Dynamics", Peter Peregrinus Ltd.