

## Design of Fault Tolerant controller for Electromagnetic Suspension System

張錫明\* · 成昭楹\*\* · 成鎬慶\*\*\* · 趙興濟§

(Suk-Myung Jang\* · So-Young Sung\*\* · Ho-Kyung Sung\*\*\* · Heung-Jae Cho§)

**Abstract** - Chopper and sensors failures resulting from electric shock and mechanical vibration generated by rail irregularities are the serious problem deteriorating the performance in the electromagnetic suspension systems. Thus, this paper proposes a fault-tolerant control scheme with a dynamic compensator for the failure of the choppers, gap sensors and acceleration sensors in electromagnetic suspension system. The advantage of the proposed control method are demonstrated through simulation and experimental results for the levitation characteristics when the failures of the chopper and sensors occur, respectively.

**Key Words** : electromagnetic suspension, fault-tolerant controller, dynamic compensator, choppers, sensors.

### 1. 서 론

자기부상 시스템은 전자기력을 이용하여 1차축과 2차축의 공극을 일정한 상태로 유지시키는 시스템으로 자기부상열차, 반도체 공정의 클린 룸에서의 반송시스템, 자기 베어링 등 그 응용범위가 매우 다양하다[1]. 이러한 자기부상 시스템은 상전도 흡인식 (EMS: Electromagnetic suspension system)과 전자석의 반발력을 이용하는 초전도 반발식 (EDS: Electrodynamic suspension system)이 있다. 현재 자기부상 열차는 EMS방식의 경우 독일의 Transrapid, 일본의 HSST가 있고, EDS방식으로는 일본의 MLX시스템으로 연구가 활발하게 진행되어 상용화 단계에 있다[2]-[4]. 그리고 국내에서는 국책연구사업으로 개발되어 한국기계연구원내의 1.1Km 시험선로에서 시험 운행되고 있다[5].

흡인식 자기부상 시스템은 본질적으로 높은 비선형성과 개루프 불안정 특성을 갖기 때문에, 여러 가지 외부조건에 대해 견실한 안정도와 높은 정밀성을 유지하도록 부상제어기를 설계하는 일은 매우 어려운 문제이다. 이 부분은 자기부상 시스템의 핵심기술로서 여러 가지 제어방식이 제시된 바 있으나, 주로 동작점에 대해서 선형화한 모델에 근거하여 설계된 선형제어기 구조를 갖는다[6]. 그러나 이러한 선형제어기들은 주행시 일어나는 각종 외란과 자체의 비선형성으로 인하여 안정도 보장이 어렵고, 제어성능 또한 만족시키기가 어렵다 [7]-[9]. 특히 주행 시 발생할 수 있는 센서나 제어명령을 증

폭해 주는 초퍼의 고장에 대한 대책이 전무한 상태이다. 일반적으로, 흡인식 자기부상 시스템은 상태변수를 추정하기 위하여, 가속도 센서와 공극 센서를 사용하는데, 두 개의 센서 중 하나가 고장나거나 초퍼가 고장났을 경우에는 시스템의 안정성을 보장하지 못한다. 실제로 한국기계연구원 내에서 시험중인 UTM-01모델[5]에서도 이러한 문제점들은 지적되고 있는 바, 주행 중 가속도 센서나 공극 센서의 고장시 정상적인 운전이 불가능하며, 초퍼 고장시에도 정상적인 부상상태를 유지할 수 없는 문제점이 나타나고 있다. 따라서 자기부상 시스템이 교통시스템에 적용될 경우에는 센서나 초퍼의 고장으로 인한 사고를 유발시킬 수 있다. 그러므로 자기부상 시스템과 같이 높은 안정성과 신뢰성을 요구하는 시스템에 대해서는 내고장성 제어기의 설계가 필수적이다. 또, 이러한 제어기는 외란에 대하여 강한 특성을 가져야 한다.

따라서, 본 논문에서는 상전도 흡인식 자기부상모델인 단일 전자석 부상모델[10]로는 초퍼의 고장에 관한 문제를 다룰 수 없으므로, 두 개의 전자석에 의한 부상시스템을 제안한다. 그리고, 상태변수 추정기인 동특성 보상기(dynamic compensator)를 설계하여 내고장성 출력제한 제어기를 구성한다. 이 제안된 제어기의 특성을 해석하고 제어 알고리즘을 실험을 통하여 검증한다. 그 결과, 센서 고장시에는 센서의 신호를 추정하고 시스템의 제어 이득을 조정함으로써 부상상태를 정상적으로 유지할 수 있으며, 초퍼의 고장시에도 시스템의 제어 이득을 조정함으로써 정상적인 부상상태를 유지할 수 있었다.

\* 終身會員 : 忠南大 電氣工學科 教授

\*\* 非會員 : 忠南大 電氣工學科 碩士課程

\*\*\* 正會員 : 韓國機械 硏究員 자기부상열차 開發 그룹

§ 非會員 : 韓國機械 硏究員 자기부상열차 開發 그룹장

接受日字 : 2000年 6月 19日

最終於了 : 2000年 11月 6日

### 2. 시스템 모델링

#### 2.1 부상모델

본 논문에서 제안하기 위한 내고장성 제어기를 설계하기

위해서는 단일 전자석 부상모델[10]로는 초퍼의 고장에 대해서 검토하는 것이 불가능하다. 따라서, 그림 1과 같은 두 개의 전자석이 하나의 부상하중을 동시에 부상시키는, 두 개의 전자석을 갖는 부상모델을 제안한다. 이 경우, 두 개의 전자석의 설계 및 성능조건은 동일하며, 강체로 서로 연결되어 있다고 가정한다.

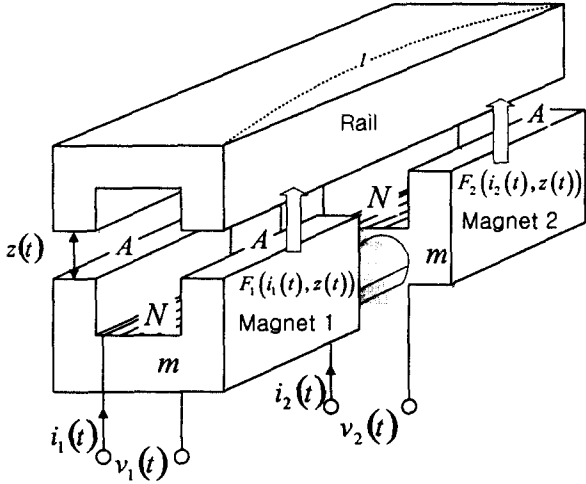


그림 1 두 개의 전자석에 의한 상전도 부상 시스템  
Fig. 1 Configuration of two electromagnets suspension system

그림 1과 같은 시스템의 상태방정식은 단일 전자석에 의한 부상시스템의 방정식[10]으로부터 물리계의 힘의 방정식과 평형방정식은 식 (1)~(4)로 쓸 수 있고, 전기계의 전압 방정식은 식 (5)~(6)으로 쓸 수 있다.

$$F[i_1(t), i_2(t), z(t)] = F_1[i_1(t), z(t)] + F_2[i_2(t), z(t)] \quad (1)$$

$$F_1[z(t), i_1(t)] = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left\{ \frac{i_1(t)}{z(t)} \right\}^2 \quad (2)$$

$$F_2[z(t), i_2(t)] = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left\{ \frac{i_2(t)}{z(t)} \right\}^2 \quad (3)$$

$$m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} = -F[i_1(t), i_2(t), z(t)] + mg \quad (4)$$

$$\begin{aligned} v_1(t) &= Ri_1(t) + \frac{d}{dt} [L\{z(t), i_1(t)\}, i_1(t)] \\ &= Ri_1(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2} \frac{d}{dt} \left\{ \frac{i_1(t)}{z(t)} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} v_2(t) &= Ri_2(t) + \frac{d}{dt} [L\{z(t), i_2(t)\}, i_2(t)] \\ &= Ri_2(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2} \frac{d}{dt} \left\{ \frac{i_2(t)}{z(t)} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $A$ 는 전자석의 유효 단면적,  $N$ 은 전자석의 권선수,  $\mu_0$ 은 진공중의 투자율,  $i_1(t), i_2(t)$ 는 전자석의 전류,  $v_1(t), v_2(t)$ 는 전자석의 입력 전압,  $R$ 은 전자석 코일의 저항,  $L$ 은 전자석의 비선형 인덕턴스,  $z(t)$ 는 공극,  $m$ 은 부상하중,  $g$ 는 중력가속도이다.

## 2.2 상태 방정식과 시스템의 특성

상태방정식으로 나타내기 위하여 식 (4)~(6)에서 상태변수를 공극  $z(t)$ , 속도  $\dot{z}(t)$ , 전자석의 전류  $i_1(t), i_2(t)$ 로 선택하고, 테일러 시리즈를 이용하여 공칭점에서 선형화하여 상태방정식으로 나타내면, 식 (7)로 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_{p1} \\ \dot{x}_{p2} \\ \dot{x}_{p3} \\ \dot{x}_{p4} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_z}{m} & 0 & -\frac{K_1}{2m} & -\frac{K_2}{2m} \\ 0 & \frac{K_1}{K_1} & -\frac{R}{L_0} & 0 \\ 0 & \frac{K_2}{K_1} & 0 & -\frac{R}{L_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{p1} \\ x_{p2} \\ x_{p3} \\ x_{p4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{L_0} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{p1} \\ u_{p2} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} y_{p1} \\ y_{p2} \\ y_{p3} \\ y_{p4} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{K_z}{m} & 0 & -\frac{K_1}{2m} & -\frac{K_2}{2m} \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 2K_1 & 0 & -K_1 & -K_1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{p1} \\ x_{p2} \\ x_{p3} \\ x_{p4} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $L_0$ 는 전자석의 공칭 인덕턴스이고  $K_1, K_2$ 는 각각 전류상수와 공극상수로 식 (8)~(9)로 주어진다. 그리고 각 입력력 변수는 식 (10)~(12)로 주어진다.

$$K_1 = \frac{\mu_0 N^2 A i_0}{2z_0^2} \quad (8)$$

$$K_2 = \frac{\mu_0 N^2 A i_0^2}{2z_0^3} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} x_{p1} &= z'(t) = z(t) - z_0 \\ x_{p2} &= \dot{z}'(t) = \dot{z}(t) \\ x_{p3} &= i_1'(t) = i_1(t) - i_0 \\ x_{p4} &= i_2'(t) = i_2(t) - i_0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} u_{p1} &= v_1'(t) = v_1(t) - v_0 \\ u_{p2} &= v_2'(t) = v_2(t) - v_0 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} y_{p1} &= \ddot{z}'(t) = \ddot{z}(t) \\ y_{p2} &= \frac{i_1'(t) + i_2'(t)}{2} \\ y_{p3} &= \Phi(t) \\ y_{p4} &= z'(t) \end{aligned} \quad (12)$$

식 (8)~(12)까지에서  $z_0$ 는 공칭 공극,  $i_0$ 는 공칭 전류,  $v_0$ 는 공칭 전압,  $\Phi(t)$ 는 전자석의 공극 자속이다.

식 (7)의 상태방정식을 이용하여 시스템의 블록선도를 그리면 그림 2와 같다.

본 논문에 적용된 전자석의 사양 및 각 계수를 표 1에 나타내었다.

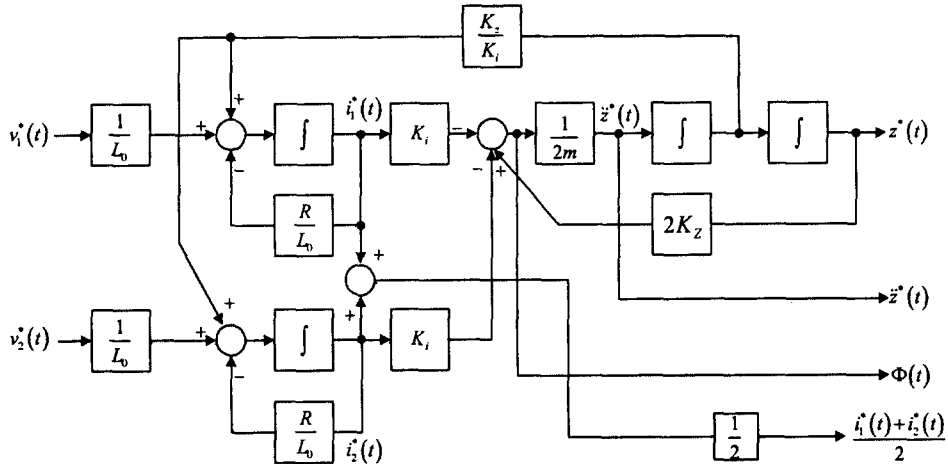


그림 2 상태방정식에 의한 두 개의 전자석 부상 모델의 블록선도  
Fig. 2 Block diagram of two electromagnets suspension system

표 1 전자석의 사양 및 각 계수  
Table 1 Magnet Specification and coefficients

Symbol	Value	Unit
$m$	300	[kg]
$A$	0.044	[m <sup>2</sup> ]
$N$	600	[turn]
$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}$	[H/m]
$R$	1	[ $\Omega$ ]
$z_0$	0.01	[m]
$i_0$	12.5	[A]
$L_0$	0.022	[H]
$K_i$	$1.36 \times 10^3$	[A/m]
$K_z$	$1.71 \times 10^6$	[N/m]

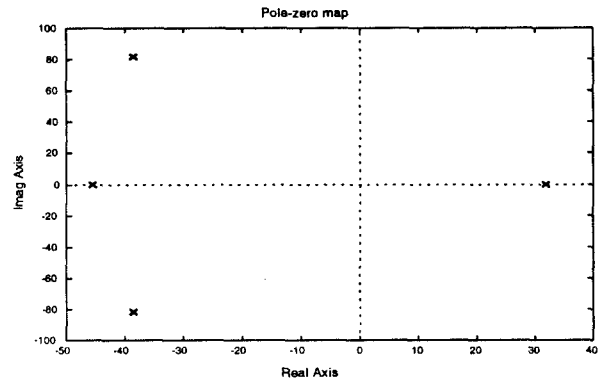


그림 3 개 루프 극점  
Fig. 3 Open loop poles

따라서, 이 시스템은  $s$ -평면의 우반평면에 하나의 극점이 존재하므로 개루프 시스템이 불안정하다.

### 3. 제어기 설계 및 시뮬레이션

#### 3.1 내고장성 제어기 구현개념

센서의 내고장성 제어기 설계를 위한 블록선도는 그림 4와 같이 구성하며 가정 1, 가정 2와 같이 가정한다[11]-[14].

가정 1:

- $G_1(s), G_2(s), G_3(s), G_4(s)$ 와 이것의 추정전달함수

$\bar{G}_1(s), \bar{G}_2(s), \bar{G}_3(s), \bar{G}_4(s)$ 는 알고 있다.

- 시스템의 전달함수는 정확하게 알고 있다.

가정 2:

- $G_1(s) = \bar{G}_1(s), G_2(s) = \bar{G}_2(s), G_3(s) = \bar{G}_3(s), G_4(s) = \bar{G}_4(s)$ 이다.
- $G_2(s), \bar{G}_2(s), G_3(s), \bar{G}_3(s), G_4(s), \bar{G}_4(s)$ 는 점근적으로 안정하다.

그러면, 플랜트의 전체 전달함수는 식 (15)로 표현할 수 있다.

식(7)의 상태방정식에 표 1의 전자석사양 및 계수를 이용하여 상태방정식을 다시 쓰면 식 (13)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{p1} \\ \dot{x}_{p2} \\ \dot{x}_{p3} \\ \dot{x}_{p4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 5702 & 0 & -2.2808 & -2.2808 \\ 0 & 2500 & -45.455 & 0 \\ 0 & 2500 & 0 & -45.455 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{p1} \\ x_{p2} \\ x_{p3} \\ x_{p4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 45.455 & 0 \\ 0 & 45.455 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{p1} \\ u_{p2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_{p1} \\ y_{p2} \\ y_{p3} \\ y_{p4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5702 & 0 & -2.2808 & -2.2808 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 3.42 \times 10^6 & 0 & -1368.5 & -1368.5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{p1} \\ x_{p2} \\ x_{p3} \\ x_{p4} \end{bmatrix}$$

(13)

식 (13)으로부터 두 개의 전자석에 의한 부상시스템의 개루프 극점을 식 (14)에 나타냈고, 이 개 루프 극점을 그림 3에 보였다.

$$\begin{aligned} s_1 &= -45.455, & s_2 &= -38.6 + 81.6i, \\ s_3 &= -38.6 - 81.6i, & s_4 &= 31.777 \end{aligned}$$

(14)

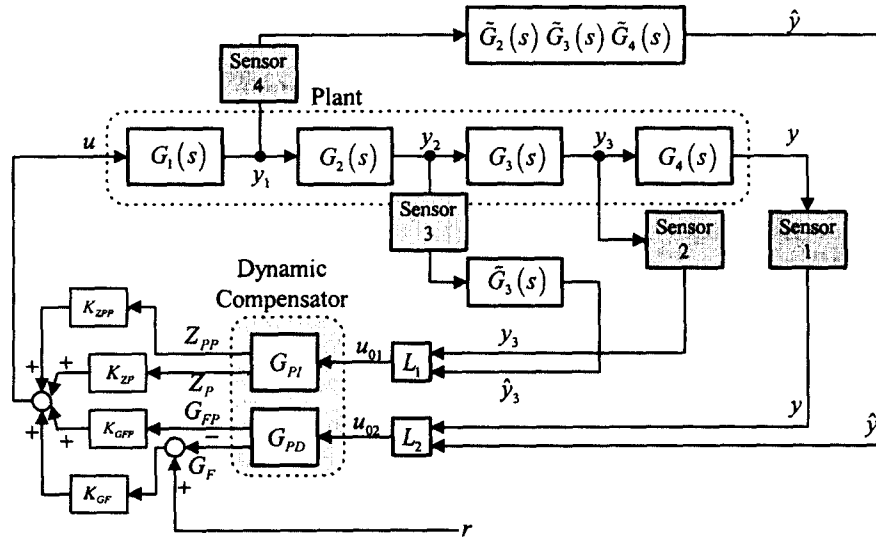


그림 4 내고장성 제어기의 구조와 동특성 보상기  
Fig. 4 Fault tolerant controller structure and dynamic compensator

$$G(s) = G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s) \quad (15)$$

식 (15)에서,

$$\begin{aligned} G_1(s) &= \frac{y_1(s)}{u(s)}, & G_2(s) &= \frac{y_2(s)}{y_1(s)}, \\ G_3(s) &= \frac{y_3(s)}{y_2(s)}, & G_4(s) &= \frac{y(s)}{y_3(s)} \end{aligned} \quad (16)$$

그리고, 그림 4의 동특성 보상기  $G_{pl}$ ,  $G_{pd}$ 의 전달함수를 식 (17)~(18)에 나타냈고,  $u_{pl}$ ,  $u_{pd}$ 는 각각  $G_{pl}$ ,  $G_{pd}$ 의 출력으로 식 (15)~(16)에 나타냈다.

$$u_{pl} = \frac{Z_{pp}}{u_{01}} = \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} \quad (17a)$$

$$u_{pi} = \frac{Z_p}{u_{01}} = \frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} \quad (17b)$$

$$u_{pd1} = \frac{G_f}{u_{02}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} \quad (18a)$$

$$u_{pd2} = \frac{G_{fp}}{u_{02}} = \frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} \quad (18b)$$

식 (17)~(18)에서  $\zeta$ 는 감쇄비이고  $\omega_n$ 은 자연 주파수,  $Z_{pp}$ 는 절대 가속도,  $Z_p$ 는 절대 속도,  $G_f$ 는 상대 공극,  $G_{fp}$ 는 상대 속도이다. 그리고 고장 모드를 결정하는  $L_1$ ,  $L_2$ 의 조건은 식 (19)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{if } L_1 = L_2 = 1, \text{ then } u_{01} &= y_3, \quad u_{02} = y \\ &: \text{정상동작모드} \end{aligned} \quad (19a)$$

$$\begin{aligned} \text{if } L_1 = 0, L_2 = 1, \text{ then } u_{01} &= \hat{y}_3, \quad u_{02} = y \\ &: \text{가속도 센서 고장 모드} \end{aligned} \quad (19b)$$

$$\begin{aligned} \text{if } L_1 = 1, L_2 = 0 \text{ then } u_{01} &= y_3, \quad u_{02} = \hat{y} \\ &: \text{공극 센서 고장 모드} \end{aligned} \quad (19c)$$

따라서, 그림 4와 같은 내 고장성 제어기의 출력  $u$ 는 식 (20)으로 쓸 수 있다.

$$u = K_{gf}(r - G_f) + K_{gfp}G_{fp} + K_{zp}Z_p + K_{zpp}Z_{pp} \quad (20)$$

식 (20)에서  $K_{gf}$ 는 상대 공극 이득,  $K_{gfp}$ 는 상대 속도 이득,  $K_{zpp}$ 는 절대 가속도 이득,  $K_{zp}$ 는 절대 속도 이득,  $r$ 은 기준 입력이다.

그러므로, 그림 4와 같이 주어진 시스템에서 내 고장성 제어기의 설계 문제는 정상 동작 모드와 센서의 고장모드에서 페루프 시스템의 안정도와 성능이 만족되도록 제어 이득  $K_{gf}$ ,  $K_{gfp}$ ,  $K_{zp}$ ,  $K_{zpp}$ 를 선정하는 문제로 한정할 수 있다. 그림 4로부터 페루프 시스템의 전달함수는 식 (21)와 식 (22)으로 놓을 수 있다.

- 정상동작 모드

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)}{\left[ (1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)L_1K_{zpp})s^2 + \{2\zeta\omega_n + G_1(s)G_2(s)G_3(s)(L_1K_{zp} + G_4(s)L_2K_{gfp})\}s + (1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)L_2K_{gf})\omega_n^2 \right]} \quad (21)$$

- 고장 모드

$$\frac{\hat{y}(s)}{r(s)} = \frac{G_1(s)\hat{G}_2(s)\hat{G}_3(s)\hat{G}_4(s)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)}{\left[ (1 + G_1(s)G_2(s)\hat{G}_3(s)L_1K_{zpp})s^2 + \{2\zeta\omega_n + G_1(s)G_2(s)\hat{G}_3(s)(L_1K_{zp} + \hat{G}_4(s)L_2K_{gfp})\}s + (1 + G_1(s)\hat{G}_2(s)\hat{G}_3(s)\hat{G}_4(s)L_2K_{gf})\omega_n^2 \right]} \quad (22)$$

정상 동작 모드와 고장모드에서 전체 페루프 시스템의 안정성을 보장하기 위해서 제어 이득  $K_{zpp}$ ,  $K_{zp}$ ,  $K_{gf}$ ,  $K_{gfp}$ 는 식 (21), 식 (22)의 특성방정식의 근이 s-평면의 좌반평면에 위치하도록 선택되어야 한다. 또한 식 (22)으로부터

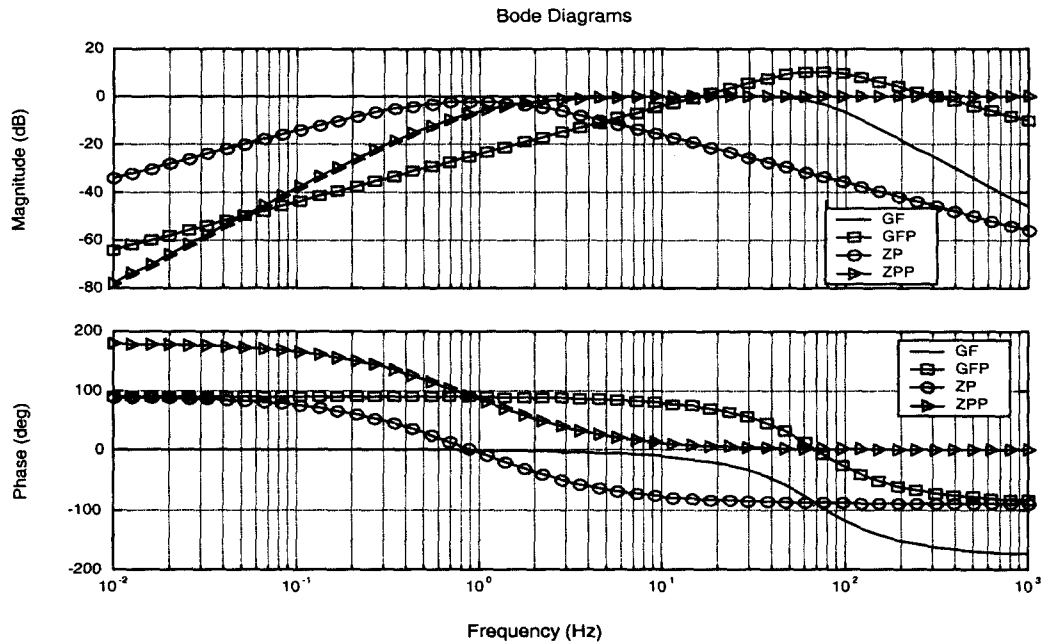


그림 6 동특성 보상기의 입출력 변수사이의 주파수 영역 응답 특성  
Fig. 6 Frequency response of dynamic compensator

$$M_{\infty} = \frac{G_2(s)}{\tilde{G}_2(s)} \Big|_{s=0} = \frac{G_1(s)}{\tilde{G}_1(s)} \Big|_{s=0} = \frac{G_4(s)}{\tilde{G}_4(s)} \Big|_{s=0} \quad (23)$$

를 얻을 수 있다. 여기서  $M_{\infty}$ 는 페루프 시스템의 DC이득이고, 가능한 1이 되도록 한다. 만약 DC이득이 1이 되면 센서의 고장의 경우에도 정상상태 응답은 정상동작상태와 같게 나타난다.

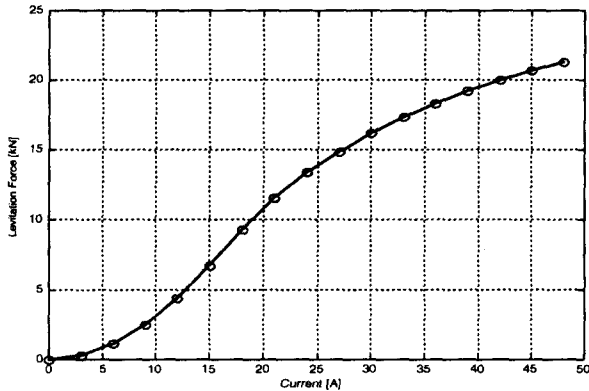


그림 5 전류에 따른 전자석의 부상력(공극 11mm)  
Figure 5 Levitation force for current at 11mm air-gap

한편, 초퍼의 고장모드는 그림 1에서 보는 바와 같이 강제로 연결된 두 개의 전자석이 하나의 부상하중을 부상시키는 경우이므로, 하나의 초퍼가 고장이 발생하더라도 다른 하나의 초퍼와 전자석이 부상하중을 감당할 수 있으면 된다. 그림 5에 본 논문에서 사용한 전자석의 전류에 따른 부상력을 보았다[15]. 따라서 초퍼의 고장시에 하나의 전자석이 필요한 부상력을 모두 부담할 수 있으므로 두 대의 초퍼중 한 대가 고장나 전자석 하나가 부상력을 부담하지 못한다 하더라도 나머지 하나의 전자석이 부상력을 모두 부담하게 되어 안정적

으로 부상할 수 있다. 그러나 고장시 정상적인 부상상태를 유지하기 위하여 제어이득  $K_{ZPP}$ ,  $K_{ZP}$ ,  $K_{GF}$ ,  $K_{GFP}$ 는 다시 선택되어야 한다.

### 3.2 동특성 보상기 설계 및 주파수 영역 응답 특성

제어기인 동특성 보상기는 가속도 신호와 공극 신호를 이용하여 속도 신호를 만드는데, 가속도 신호를 적분하여 절대 속도, 공극 신호를 미분하여 상대 속도를 만든다. 또한 미분과 적분시에 외부환경의 외란을 고려하여 동작 주파수 영역을 설정하는데, 식 (17)~(18)의 동특성 보상기의 주파수 영역이  $Z_{PP}$ ,  $Z_P$ 는  $\zeta=0.5$ ,  $\omega_n=2\pi \cdot 1.0$ [rad/sec],  $G_F$ ,  $G_{FP}$ 는  $\zeta=0.5$ ,  $\omega_n=2\pi \cdot 100$ [rad/sec]로 하였다. 또한, 센서에서 들어오는 신호는 전압신호이므로 물리적인 단위를 매칭시키기 위해서 scale factor를 적용한 동특성 보상기의 전달함수를 식 (24)~(27)로 표현하였고 이들간의 주파수 영역 응답특성을 그림 6에 나타냈다.

$$\frac{Z_{PP}}{u_{01}} = \frac{s^2}{s^2 + 13s + 31.9795} \quad (24)$$

$$\frac{Z_P}{u_{01}} = \frac{10s}{s^2 + 13s + 31.9795} \quad (25)$$

$$\frac{G_{FP}}{u_{02}} = \frac{1923.0769s}{s^2 + 576.9231s + 192307.6923} \quad (26)$$

$$\frac{G_F}{u_{02}} = \frac{192307.6923}{s^2 + 576.9231s + 192307.6923} \quad (27)$$

식 (24)~(27)까지의 식을 상태방정식으로 표현하면 식

(28)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{c1} \\ \dot{x}_{c2} \\ \dot{x}_{c3} \\ \dot{x}_{c4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1923.07 & 0 & 0 \\ -100 & -579.62 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -13 & -3.197 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{c1} \\ x_{c2} \\ x_{c3} \\ x_{c4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{c1} \\ u_{c2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_{c1} \\ y_{c2} \\ y_{c3} \\ y_{c4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -13 & -3.1979 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 1923.07 & 0 & 0 \\ 100 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{c1} \\ x_{c2} \\ x_{c3} \\ x_{c4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{c1} \\ u_{c2} \end{bmatrix} \quad (28)$$

여기서,  $x_{C1} = G_F$ ,  $x_{C2} = G_{FP}$ ,  $x_{C3} = Z_P$ ,  $x_{C4} = Z_{PP}$ 이고,  $u_{C1} = u_{01}$ ,  $u_{C2} = u_{02}$ 이다. 또한, 식 (28)의 고유치를 구하면 식 (29)와 같다.

$$[-2.88 \times 10^2 \pm 3.30 \times 10^2 i \quad -9.7047 \quad -3.2953] \quad (29)$$

그러므로, 동특성 보상기의 극점이 모두 s-평면의 좌반평면에 위치하고 있어 동특성 보상기는 안정한 시스템이다.

### 3.3 동특성 시뮬레이션

내고장성 제어를 시뮬레이션하기 위하여 플랜트와 동특성 보상기의 페루프 시스템의 블록선도를 그림 7에 나타냈다.

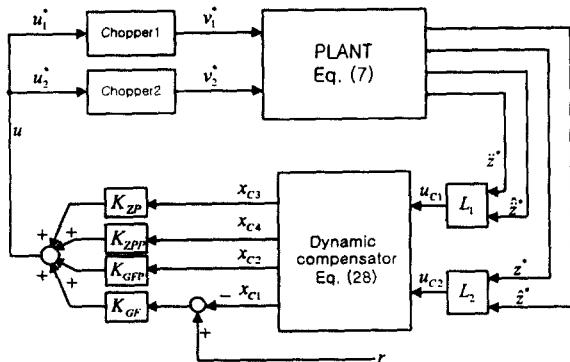


그림 7 동특성 보상기를 포함한 페루프 시스템의 블록도  
Fig. 7 Block diagram of closed loop system with dynamic compensator

그림 7에서  $\hat{z}^*$ 는 추정된 가속도,  $\hat{z}^*$ 는 추정된 공극신호이다. 각 모드에서의 제어이득을 표 2에 나타냈고, 시뮬레이션 결과를 그림 8~11에 나타내었다.

표 2 각각의 고장모드에서 시스템 제어이득  
Table 2 System control gains for each failure mode

모드	페루프 시스템 제어이득			
	$K_{GF}$	$K_{GFP}$	$K_{ZP}$	$K_{ZPP}$
정상동작	700	50	50	3
공극센서고장	1000	20	40	2.5
가속도 센서 고장	700	50	60	3
초퍼 고장	700	50	50	4

그림 8~11에 각각의 모드에 대한 시간영역에서의 계단 응

답특성을 보였다. 그림 8은 정상모드에서의 공극, 가속도, 초퍼의 전류를, 그림 9는 공극 센서가 고장났을 경우, 그림 10은 가속도 센서가 고장났을 경우, 그림 11은 초퍼가 고장났을 경우이다.

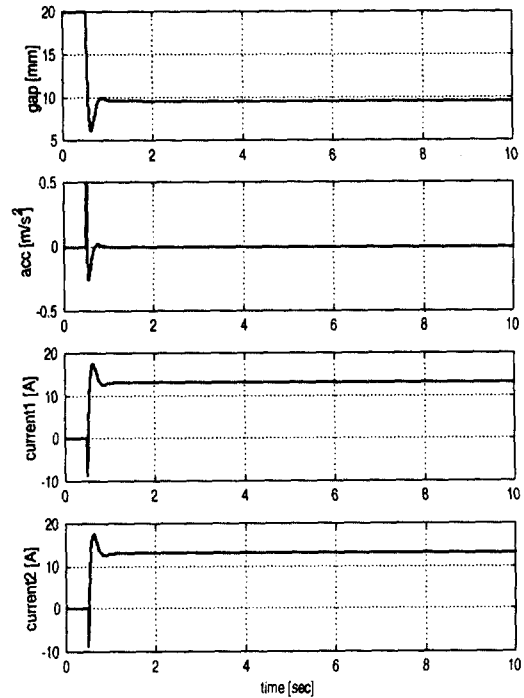


그림 8 정상모드에서 시간영역응답특성  
Fig. 8 Time response at normal mode

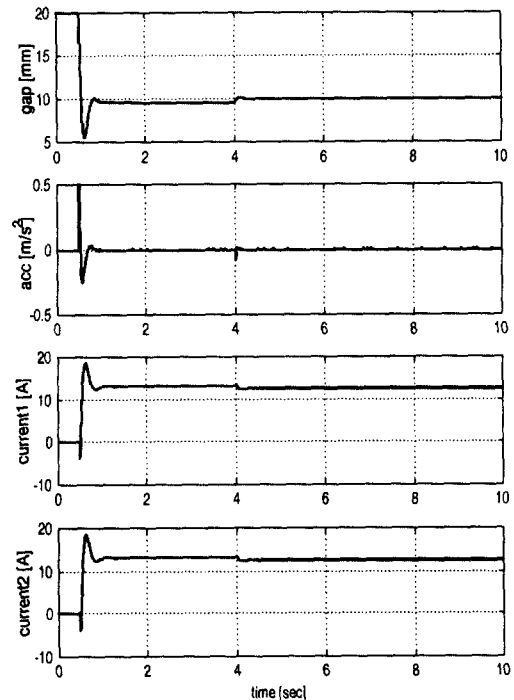


그림 9 t=4에서 공극센서가 고장났을 경우  
Fig. 9 Time response against gap sensor failure at t=4

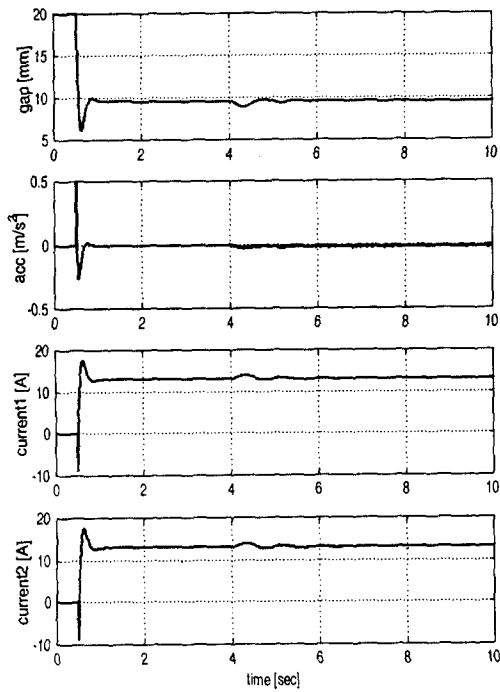


그림 10 t=4에서 가속도 센서가 고장났을 경우  
Fig. 10 Time response against acc. sensor failure at t=4

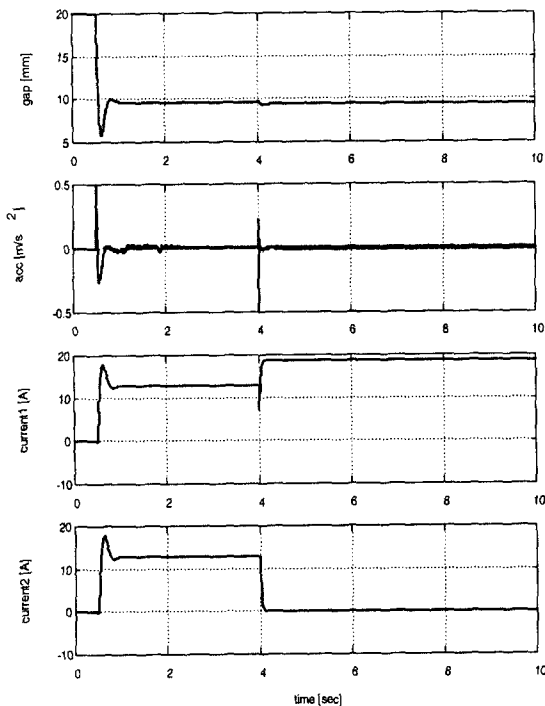


그림 11 t=4에서 chopper가 고장났을 경우  
Fig. 11 Time response against chopper failure at t=4

#### 4. 실험 및 고찰

##### 4.1 실험 장치 구성

제안된 알고리즘을 검증하기 위하여 그림 12와 같은 실험

장치를 구성하였다. 그리고 제어기는 Power PC(PPC1A 604e, 225Mhz)를 기반으로 하는 VME 디지털 제어기를 구성하였다. 이 제어기는 신호의 샘플링 오차를 줄이기 위해서 충분히 높은 주파수로 샘플링할 수 있도록 선택하였다. 또한 공극을 측정하기 위하여 0~25mm 까지 측정 가능한 와전류형 센서,  $\pm 3g$ 의 측정범위를 갖는 서보형 가속도 센서를 사용하였고, 전류측정은 Hall 센서, 전압을 측정하기 위해서는 분압기를 사용했다. 그리고 전자석에 전력을 전달하기 위해서 DC Link 전압이 300V인 10kHz PWM 초퍼를 사용하였다. 그림 12는 실험을 위한 장치이며, 그림 13는 제작된 디지털 제어기와 초퍼를 보였다.

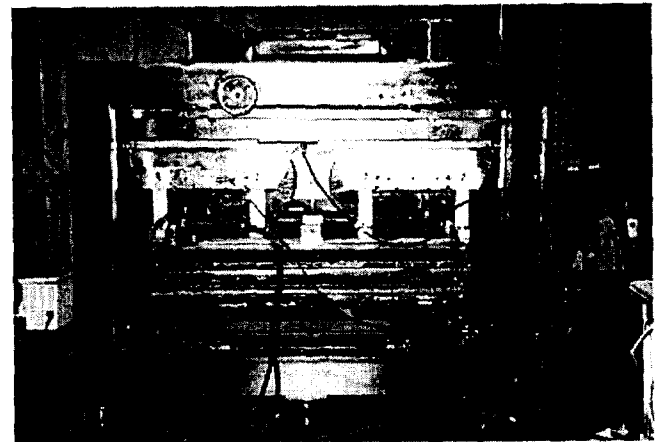


그림 12 전자석 부상 실험 장치  
Fig. 12 Electromagnetic suspension dynamics test rig

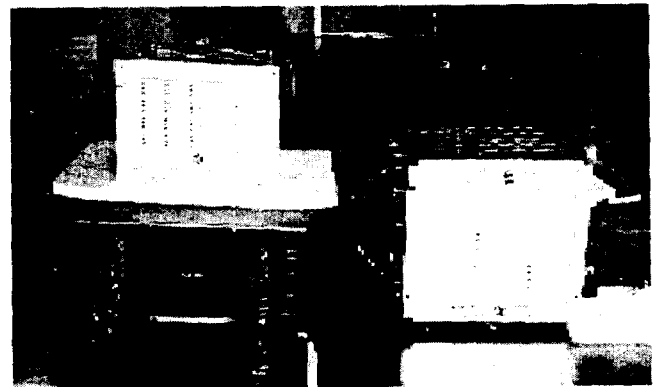


그림 13 디지털 제어기와 초퍼  
Fig. 13 Digital controller and chopper

제안된 제어 알고리즘과 데이터 취득을 위하여 실시간 OS인 VxWorks Tornado를 사용하여 제어 알고리즘을 코딩하였다. 그리고 샘플링 주파수는 2kHz로 하였다. 그런데 물리계에서는 다양한 종류의 노이즈가 존재한다. 따라서 측정된 신호에서 노이즈를 제거하기 위해서 저역통과 필터가 필요하다. 저역통과 필터의 설계를 위하여 스펙트럼 분석기를 사용하여 EMI 노이즈를 분석한 결과 노이즈의 주파수 밴드가 800Hz ~ 5kHz로 나타났다. 따라서 저역통과 필터의 Cut-off 주파수를 500Hz로 하였다. 데이터를 샘플링은 12bit

A/D 컨버터를 사용하였다. 속도를 측정하기 위해서 센서를 사용할 수 없으므로 가속도를 측정하여 PPCIA 604e를 이용, 높은 주파수로 샘플하여 동특성 보상기를 이용, 적분함으로써 속도를 추정하였다. 이러한 전제 제어 시스템의 구성도를 그림 14에 나타내었다.

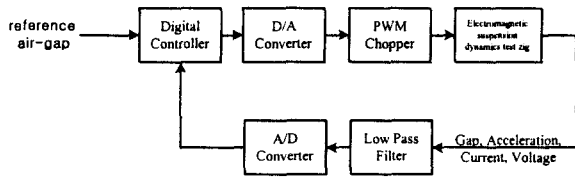


그림 14 디지털 제어 시스템의 구성도  
Fig. 14 Block diagram of Digital controller

4.2 실험결과 및 검토

4.2.1 실험방법

제안된 제어 알고리즘을 검증하기 위하여 공극센서가 고장났을 때, 가속도 센서가 고장났을 때, 초퍼 중 한 대가 고장났을 때의 세 가지 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 5초에서 25초 동안은 공극 외란을 가중하지 않은 정상부상상태에서, 35초에서 55초 동안은 공극에 ±2mm의 공극 외란을 가중한 상태에서 실험을 수행하였다. 그리고, 대략 10초와 40초에 강제로 고장을 유발시키고 20초와 50초에 정상으로 복귀시켰다.

4.2.2 각 고장모드에서의 제어 결과 및 검토

실험을 수행할 때에 정확하게 시간에 맞춰서 고장을 유발시키지 못한 이유는 수동으로 고장을 유발시켰기 때문에 시뮬레이션 결과와 고장시간이 정확하게 일치하지는 않는다. 또한, 전류가 실험값보다 시뮬레이션값이 크게 나오는 것은 시뮬레이션에서는 공칭전류를 12.5A로 했으나 실제의 경우는 약 11.5A가 흐르는 것을 알 수 있다.

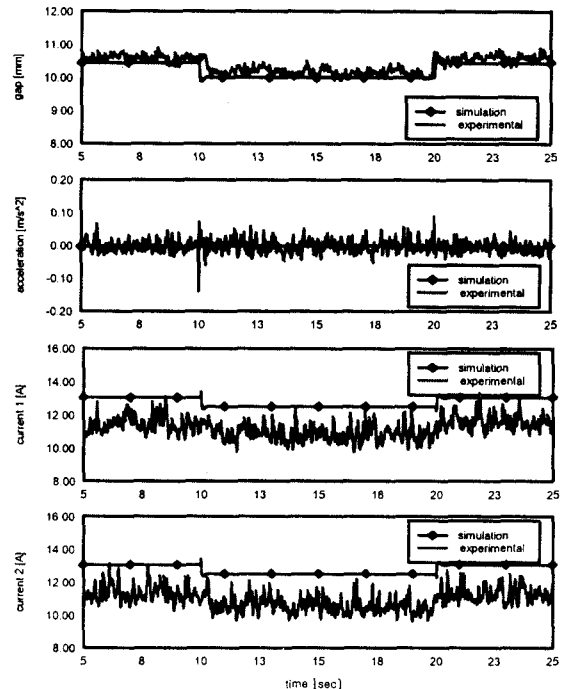
그림 15는 공극센서의 고장이 발생하였을 경우이다. 이 때, 공극이 대략 0.5mm정도 변화가 있는 것을 알 수 있다. 그러나 가속도의 변화량은 크게 변화가 없는 것을 알 수 있다. 외란을 가중한 경우에는 공극의 변화가 시뮬레이션에서는 센서의 고장에 관계없이 거의 같게 나타났으나, 실험에서는 오히려 공극의 변화가 작게 나타나는 것을 알 수 있었다.

그림 16은 가속도 센서의 고장이 발생하였을 경우인데, 시뮬레이션에서는 공극과 가속도에 큰 변화가 없었으나, 실제 실험에서는 가속도 신호에서 보는 바와 같이 고주파 진동이 있고, 공극의 변화량도 상대적으로 많이 나타남을 알 수 있다. 이는 가속도를 추정하기 위하여 전자석의 자속을 이용했는데 실제의 경우 자속이 시뮬레이션에서처럼 정확하게 계산되지 않았기 때문으로 사료된다.

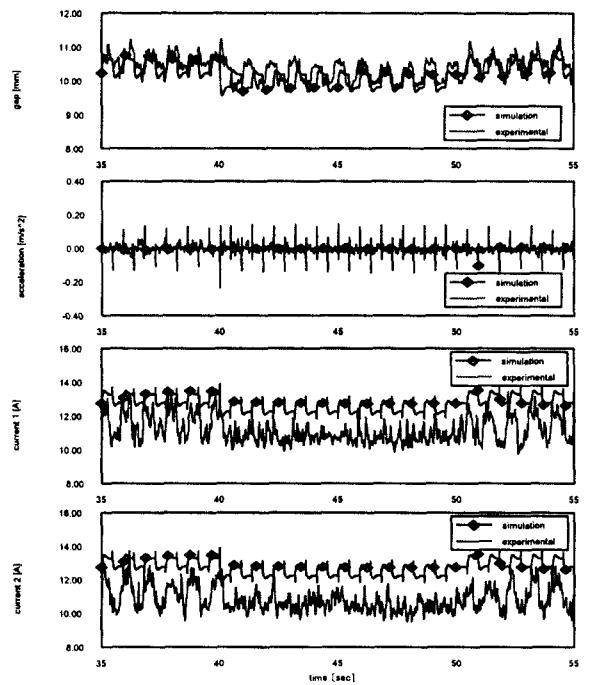
그림 17은 초퍼의 고장이 발생하였을 경우이다. 실험의 경우에는 초퍼가 고장이 발생한 순간에 과도상태로서 공극이 대략 4mm정도 변화하는 것을 볼 수 있다. 그리고 다시 원래의

상태로 복귀시켰을 때 시뮬레이션보다 전류의 회복이 늦게 나타남을 볼 수 있다. 이러한 현상은 시뮬레이션에서 초퍼의 동특성에 대해서 고려하지 않았지만, 실제의 경우에는 초퍼의 동특성에 의한 영향으로 인하여 전류가 늦게 회복이 되는 것으로 사료된다.

(a) 공극센서 고장 모드



(a)

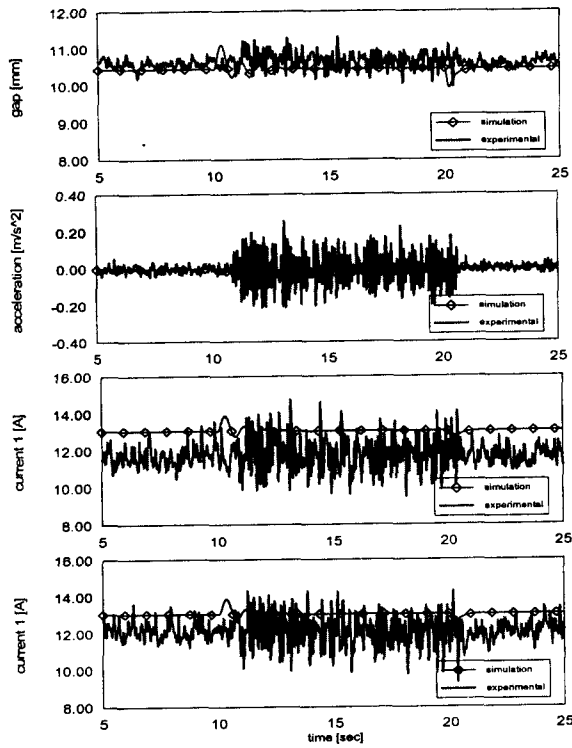


(b)

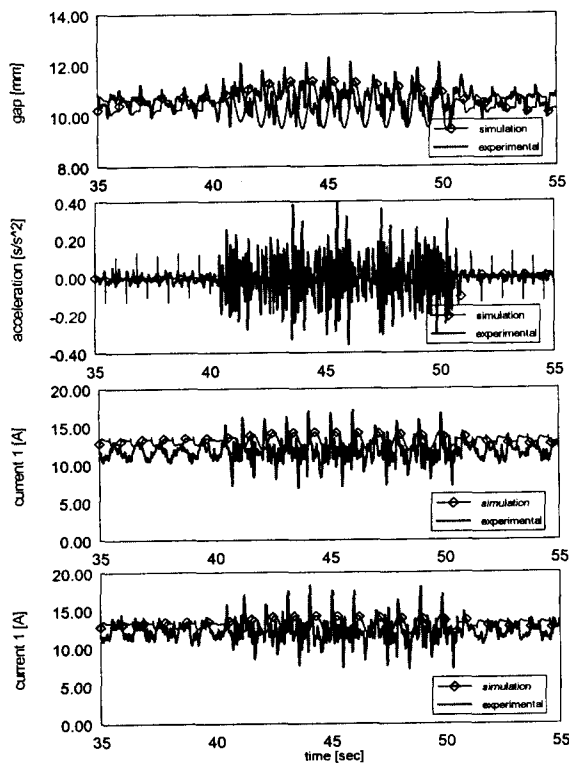
그림 15 (a) 외란이 없는 경우 (b) 외란이 있는 경우  
Fig. 15 (a) Without external disturbance (b) With external disturbance



(b) 가속도 센서 고장 모드



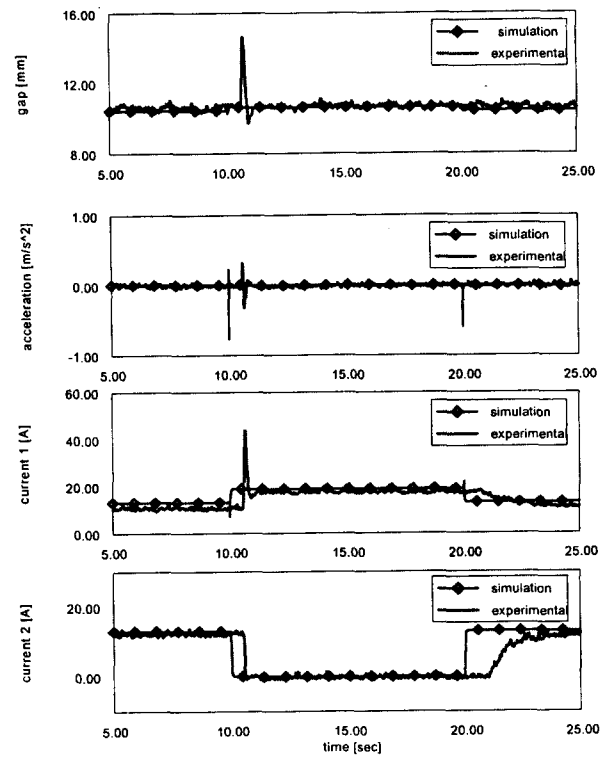
(a)



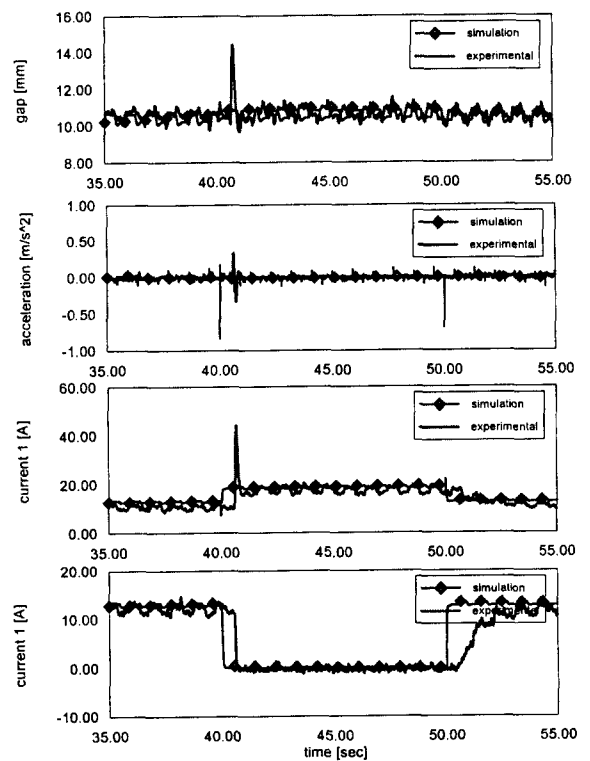
(b)

그림 16 (a) 외란이 없는 경우 (b) 외란이 있는 경우  
Fig. 16 (a) Without external disturbance (b) With external disturbance

(c) 추퍼 고장 모드



(a)



(b)

그림 17 (a) 외란이 없는 경우 (b) 외란이 있는 경우  
Fig. 17 (a) Without external disturbance (b) With external disturbance

### 5. 결 론

본 논문에서는 내고장성 제어기를 설계하기 위하여 단일 전자석 부상 모델로는 초퍼의 고장에 대해서 다룰 수 없으므로, 2개의 전자석에 의한 부상모델을 제안하였다. 이 부상모델로부터, 정상적인 부상상태에서 공극센서, 가속도 센서의 고장과 초퍼중 한 대가 고장났을 경우에 정상적인 제어가 되도록 하는 내고장성 제어기를 설계하였다. 그리고 제안된 제어 알고리즘의 특성을 시뮬레이션을 통하여 분석하였고, 이 결과를 실험을 통하여 비교 검토하였다. 그 결과, 공극 센서나 가속도 센서의 고장시 시스템의 제어 이득을 조정함으로써 전체 페루프 시스템의 극점을 s-평면의 좌반평면으로 이동시켜 고장시에도 시스템을 안정적으로 부상할 수 있음을 보였다. 또한 공극에 외란을 인가하였을 때 공극센서 고장시에는 부상공극의 변화가 약간 작게 나타났으며, 가속도 센서의 고장시에는 고주파 진동이 있고 부상공극의 변화도 상대적으로 많이 나타남을 알 수 있었다. 그리고 초퍼의 고장시에는 과도상태로 부상공극이 대략 4mm정도 변화가 있었다. 이러한 이유들은 센서의 추정값이 정확하게 추정되지 못하였고, 초퍼의 동특성에 대해서 고려하지 못했기 때문으로 사료된다. 자기부상시스템과 같이 개루프 불안정한 제어 시스템에서, 센서나 초퍼의 고장이 발생하면 안정도를 보장하지 못해 사고를 유발시킬 수 있으나, 본 논문에서 제안된 제어 알고리즘을 사용하면 고장에 대해서 사고를 막을 수 있으며, 고장에 견디는 시스템 개발에 기여를 하기를 바란다.

앞으로, 본 논문에서 제안된 제어 알고리즘을 실제 자기부상열차에 적용하여 지속적인 실험적 고찰과 연구가 계속되어야 할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구를 수행하기 위해서 협조해 주신 한국기계연구원 자기부상열차 개발 그룹에 진심으로 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

[1] Masayuki Fujita, Toru Namerikawa, Funtio Matsumura and Kendo Uchida, "  $\mu$ -Synthesis of an Electromagnetic Suspension System", IEEE Trans., Automatic Control, Vol. 40, NO. 3, pp 530-536, 1995.  
 [2] Paddison, Jonathan. E, Goodall, Roger, M. "EMS Maglev Suspension Control System Comparison and Trends", MAGLEV98 The 15th International Conference, pp.324-328, 1998.

[3] Hiroumi Soejima, Katsutoshi Isoura, "Development of the Maglev System in Japan: Past, Present and Future", MAGLEV98 The 15 International Conference, pp.8-11, 1998.  
 [4] Wahl, Gerhard, Raschbichler, Hans Georg, "The German Superspeed Maglev Transrapid and the System Suppliers Adtranz, Simens, and Thyssen", MAGLEV98 The 15th International Conference, pp.15-18, 1998.  
 [5] In-Kun Kim, Mun-Hwan Yoo, Kyu-Hwan Han, Gye-Seo Park, Heung-Sung Bae, "Status of the Maglev Development in KOREA", The 15th International Conference on Magnetically Levitated System and Linear Drives, pp. 34-38, 1998.  
 [6] David L. Trumper, Sean M. Olson, Pradeep K. Subrahmanyam, "Linearizing Control of Magnetic Suspension Systems". IEEE Transactions on Control systems Technology, Vol. 5 No. 4, pp. 427-438, 1997.  
 [7] 장석명, 성소영, 김인근, 성호경, "상전도 흡인식 자기부상 제어기 설계", 대한전기학회 전기기기 연구회 전기철도 연구회 춘계 합동 학술대회 논문집, pp20-23, 1999.  
 [8] 장석명, 성소영, 김인근, 성호경, "상전도 흡인식 자기부상 제어기 설계(II), 대한 전기학회 하계 학술대회 논문집, pp.101-104, 1999.  
 [9] 진주화, 서진현, 김국현, "비선형 궤환 선형화 기법을 사용한 단일자석 자기부상 시스템의 제어기 개발, 대한 전기 학회 논문지, Vol. 41, No. 13, pp. 292-299, 1992.  
 [10] Shinha, "Suspension Dynamics", Peter Peregrinus Ltd. pp. 52-57, 1987.  
 [11] Qing Zhao, Yifang Weng and Jin Jiang, "Design of the Reliable Control system with Mutiple Sensors", IEEE Contr. Sys. Mag., pp.225-228, 1998.  
 [12] John leventides, Joachim rosenthal and Xiaoching alex wang, "The pole placement problem via PI feedback controllers", Int. J. Control, Vol. 72, No. 12, pp.1065-1077, 1999.  
 [13] Q. Zhao and J. Jiang, "Reliable state feedback control system design against actuator failures", Automatica, Vol. 34, No. 10, pp.1267-1272, 1998.  
 [14] Jin Jiang, "Design of reconfigurable control systems using eigenstructure assignments", Int. J. Control, Vol. 59, No. 2, pp.395-410, 1994.  
 [15] 김봉섭, "Maxwell-3D를 이용한 UTM(Urban Transit Maglev)-02의 부상용 전자석 설계", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.699-701, 2000.

저 자 소 개



장 석 명 (張 錫 明)

1949년 7월 3일생, 1986년 한양대 대학원 박사과정 졸업(공학), 1989년 미국 Univ. of Kentucky(Post-doc), 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수, 현재 당학회 평의원, 편집이사

Tel : 042-821-5658

E-mail : smjang@ee.chungnam.ac.kr



성 호 경 (成 鎬 慶)

1982년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1998년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학). 1994~현재 한국기계연구원 자기부상열차 개발그룹 선임연구원

Tel : 042-868-7191

E-mail : sung-hk@mailgw.kimm.re.kr



성 소 영 (成 昭 楹)

1975년 3월 9일생. 1999년 대전산업대학교 제어계측공학과 졸업. 1999~현재 충남대학교 전기공학과 석사과정

Tel : 042-868-7191

E-mail : riverblu@baby.ee.chungnam.ac.kr



조 흥 제 (趙 興 濟)

1977년 연세대학교 기계공학과 졸업. 1982년 연세대학교 기계공학과 졸업(석사). 1990년 Rensselaer Polytechnic Institute(공학). 1991~현재 한국기계연구원 자기부상 열차개발그룹 그룹장

Tel : 042-868-7198

E-mail : cho\_hj@kimm.re.kr