

〈論 文〉

## 자기부상 시스템의 디지털 제어

이승욱\* · 이건복\*\*

(1994년 1월 31일 접수)

### Digital Control of an Electromagnetic Levitation System

Seung-Ug Yi and Gun-Bok Lee

**Key Words :** Electromagnetic Levitation System(자기부상 시스템), Linear Quadratic Controller(선형 2차 제어기), Kalman Filter(칼만필터), State Estimation(상태추정)

#### Abstract

In this work the dynamics of an electromagnetic levitation system is described by a set of three first order nonlinear ordinary differential equations. The objective is to design a digital linear controller which takes the inherent instability of the uncontrolled system and the disturbing force into consideration. The controller is made by employing digital linear quadratic(LQ) design methodology and the unknown state variables are estimated by the kalman filter. The state estimation is performed using not only an air gap sensor but also both an air gap sensor and a piezoelectric accelerometer. The design scheme resulted in a digital linear controller having good stability and performance robustness in spite of various modelling errors. In case of using both a gap sensor and an accelerometer for the state estimation, the control input was rather stable than that in a system with gap sensor only and the controller dealt with the disturbing force more effectively.

#### 기 호 설 명

$E_0, E$	: 초기 전압, 제어 전압	$\mu_c$	: 코어의 상대투자율,
$g$	: 중력 가속도	$\mu_m$	: 질량의 상대투자율
$i_0, i$	: 초기 전압, 전압	$A, A_D$	: 시스템행렬, 이산치모델 시스템행렬
$M$	: 부양체 질량	$B, B_D$	: 입력행렬, 이산치모델 입력행렬
$R$	: 코일의 저항	$C, C_D, C_M$	: 출력행렬, 이산치모델 출력행렬, 이산치모델 측정치행렬
$k_1$	: $\mu_0 N^2 A$	$F$	: 제어기 게인
$\mu_0$	: 공기의 투자율,	$H$	: 관측기 게인
$N$	: 권수, $A$ : 자극의 단면적	$Q$	: $n \times n$ 양의 반한정 대칭행렬
$k_2$	: $\frac{L_c}{\mu_c} + \frac{L_m}{\mu_m}$	$R$	: $m \times m$ 양의 한정 대칭행렬
$L_c$	: 코어의 유효 자속길이	$r, k_1$	: 기준입력
$L_m$	: 질량의 유효 자속길이	$n(k), w(k)$	: 측정잡음, 입력잡음
		$x(t), x_e, y(t)$	: 상태변수벡터, 평형점벡터, 출력
		$\hat{x}(t)$	: 상태추정벡터
		$e(k)$	: 상태추정 오차

\*정회원, 숭실대학교 대학원 기계공학과

\*\*정회원, 숭실대학교 기계공학과

## 1. 서 론

자기부상 시스템은 자기부상열차, 자기베어링, 자기헤드 등 기계적인 접촉에 의하여 발생하는 마찰, 마모, 열 등을 최소화하고자 하는 목적에 주로 응용되는 것으로 최근 십여년간 국·내외에서 중요한 관심의 대상으로 활발히 연구가 이루어지고 있다.

자기부상을 이용한 기계적 시스템은 소음, 마모, 마찰, 열 등을 최소화할 수 있으며 제어 전자석을 사용함으로써 일정한 범위 안에서 강성을 임의로 설계할 수 있고 진동감쇠계수를 크게할 수 있는 장점이 있다. 특히 자기부상열차에 대해서는 차륜에 의한 마찰을 제거함으로써 에너지 효율의 향상, 레일설치 비용의 절감, 승차감과 주행속도의 향상을 기대할 수 있다.

자기부상 시스템은 부상력을 얻는 방법에 따라 반발부상(repulsive suspension) 방식과 흡인부상(attraction suspension) 방식으로 구분할 수 있다.<sup>(4,7)</sup>

반발부상방식은 와전류로 레일에 전자석과 동일한 극성이 발생하였을 때의 반발력을 이용하는 방식으로 자석과 레일에 부착된 유도코일 사이의 상대속도에 따라 지지력을 얻는다. 이 방식을 사용하면 비교적 부상간극을 크게 할 수 있는 장점이 있으나 자기력의 손실이 크고 강성이 흡인식에 비하여 작으며 현재의 기술력으로는 구현이 어렵다는 단점이 있다.

흡인부상방식은 전자석과 트랙 사이에 흡인력을 발생시켜 부상하는 방식으로 반발식보다 힘이 강하고 공칭간극이 작으므로 누설자속이 적어 에너지 효율이 크다는 장점이 있다. 그러나 이 방식은 자석과 레일사이를 통과하는 자석밀도의 강약에 따라 흡인력이 결정되므로 시스템을 지지하는데 필요한 부상력이 공진장의 변화에 매우 민감하여 본질적으로 불안정하다. 따라서 이의 설계를 위해서는 과도적인 외력이나 레일의 불균일성에도 공진장의 안정도가 유지될 수 있는 제어를 설계하여 자석이 전압응답에 추종하게끔 해야 한다.

흡인식 자기부상 시스템은 1970년대 독일에서 자기부상열차를 설계·실험하여 1980년 학계에 결과를 보고<sup>(1)</sup>하였으며 Kortüm<sup>(4)</sup>은 부상과 주행모드를 포함한 모델에 대하여 제어를 설계하였고 최근에는 Sugie<sup>(5)</sup>가  $H_2/H_\infty$  준최적화 설계법을 이용하여 강인한 제어를 설계하였다. 국내에서는 본드선드

모델링방법을 이용하여 부상과 안내를 겸용하는 편심 배치방식 자기부상 시스템을 모델링하여 LQG/LTR 제어를 설계한 예<sup>(7)</sup>와 비선형 자기부상 시스템에 대하여 LQG/LTR 제어를 설계한 예<sup>(10)</sup>가 있으나 실험을 통한 제어성능의 평가는 시도하지 않았고 단지 시뮬레이션만을 수행하였다.

본 연구에서는 현재 기술력에서 가장 실용화에 근접한 흡인식 자기부상방식을 채택하여 단일 전자석에 의하여 운동을 상·하 1자유도로 제한한 상태에서 시스템의 모델링오차와 작용외란을 고려하여 안정도—강인성과 주파수역성능을 확보한 디지털 선형제어를 설계하고 설계한 제어를 실제 자기부상 시스템에 적용하여 실험을 수행하고자 한다.

선형제어기 설계에서 제어 알고리즘은 LQ제어이론을 사용하며 미지의 상태는 관측기를 이용하여 추정한다. 상태추정은, 변위 측정치만을 이용하여 상태를 추정하는 방법과 변위와 가속도 측정치를 사용하여 상태를 추정하는 두가지 방법을 사용하고 자 하며 시스템에 작용하는 예측 불가능한 외란과 측정시 존재할 수 있는 측정잡음을 고려하기 위하여 칼만필터(Kalman filter)를 사용하고자 한다.

## 2. 모델링 및 제어기 설계

### 2.1 전자석의 모델링과 선형화

자기부상 시스템에 대한 기본 수학적 모델 및 작동점에 대한 선형화를 통한 상태제환제어는 여러 연구자들에 의해 수행된 바 있으며<sup>(2,5,7,10)</sup> 이들에 의하여 자기부상 시스템은 근본적으로 불안정한 시스템임이 증명된 바 있다.

Fig. 2.1과 같이 구성되어 있는 자기부상 시스템에 대한 지배방정식은 다음의 세가지 가정을 수반하여 식(2.1)과 같이 3원 1계 상미분방정식으로 표현할 수 있다.

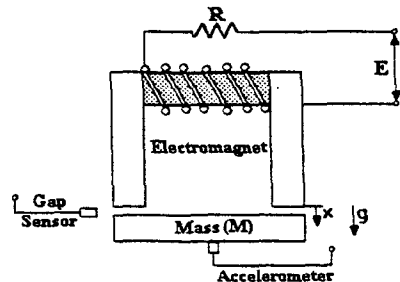


Fig. 2.1 Electromagnetic levitation system

가정 1. 자속의 누출현상과 프링징 (fringing) 효과는 무시한다.

가정 2. 자화곡선은 선형이다.

가정 3. 자속밀도와 자기장 강도는 노심, 간극, 부양체, 질량의 미소변형에 관계없이 일정하다.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = g - \frac{k_1 x_3^2}{M(2x_1 + k_2)^2} + \frac{f(t)}{M} \\ \dot{x}_3 = \frac{2x_1 + k_2}{k_1} (E - Rx_3) + \frac{2x_2 x_3}{2x_1 + k_2} \end{cases} \quad (2.1)$$

여기에서,

$$k_1 = \mu_0 N^2 A$$

$\mu_0$  : 공기의 투자율 ( $4\pi \times 10^{-7}$  N/A<sup>2</sup>)

$N$  : 코일의 권수

$A$  : 자극의 단면적

$$k_2 = \frac{L_c}{\mu_c} + \frac{L_m}{\mu_m}$$

$L_c, L_m$  : 코어와 부양체의 유효 자속길이

$\mu_c, \mu_m$  : 코어와 질량의 상대투자율

$x_1$  : 간극

$x_2$  : 부양체 속도

$x_3$  : 전류

선형제어이론을 적용하기 위하여 식(2.1)을 평형점(작동점)에서 선형화하면 전압제어를 위한 개루프 선형 시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + f(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (2.2)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{4gR}{E_0} \sqrt{\frac{Mg}{k_1}} & 0 & -\frac{2gR}{E_0} \\ 0 & 2\sqrt{\frac{Mg}{k_1}} - \frac{E_0}{k_1} \sqrt{\frac{k_1}{Mg}} & \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{E_0}{k_1 R} \sqrt{\frac{k_1}{Mg}} \end{bmatrix} \quad C^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad f(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ f(t) \\ M \end{bmatrix}$$

단, 선형화를 위한 평형점은 다음과 같다.

$$\{x_{1e}, x_{2e}, x_{3e}\} = \left\{ \frac{1}{2} \left[ \sqrt{\frac{k_1}{Mg}} i_0 - k_2 \right], 0, i_0 \right\}$$

식 2.2 에서  $x(t)$ 는 간극  $x_1$ , 속도  $x_2$ , 전류  $x_3$ 로 구성되어 있는 상태변수 벡터로서 간극, 속도, 전류의 평형점  $x_{1e}, x_{2e}, x_{3e}$ 에 대하여 식(2.1)을

선형화하는 과정에서 정의한 것이다. 행렬  $A$ 는 선형화한 시스템행렬이고 행렬  $B$ 는 제어벡터,  $u(t)$ 는 제어입력, 행렬  $f(t)$ 는 시스템에 외란력 (disturbing force)이 작용했을 때 나타나는 항이다.

식(2.2)에서 시스템행렬  $A$ 는 불안정 극점을 1개 가지고 있어 일정전압에 의한 부양시스템은 본질적으로 불안정하다. 본질적으로 불안정한 시스템의 제어를 위해서는 자석과 질량 사이의 간극을 측정하고 이것을 피드백하여 자석의 전압을 능동적으로 제어할 필요가 있다.

그러나 식(2.1)을 살펴보면 외란력  $f(t)$ 의 작용에 의하여 상태  $x_1$ 과  $x_2$ 가 그 영향을 직접 받고 있음을 알 수 있으며, 이 영향을 직접 제어입력에 반영하기 위하여 변위의 측정치만을 이용한 출력 피드백 이외에 변위와 가속도 측정치를 동시에 이용하여 출력 피드백제어를 수행하고자 한다.

## 2.2 출력 피드백을 이용한 제어기 설계

본 연구에서는 센서로서 부유체와 전자석에 대한 상대위치 측정을 위한 갭센서와 부유체의 가속도를 측정하기 위해 가속도계를 사용하였으며 측정시 잡음의 존재로 인한 측정치의 오염과 미지상태의 추정을 위해 관측기를 사용해야 한다. 그리고 추정된 상태를 이용하여 외란 제거능력, 잡음에 대한 저감도, 소비전력 최소화에 적합한 상태 피드백 제어기인 LQ제어기를 설계한다. 제어기 설계 문제는 플랜트에 대하여 최적제어이론에 기반을 둔 LQ 제어 문제와 플랜트에 백색잡음이 작용한다고 가정한 확률 동적 시스템에서 측정된 출력  $y_m(t)$ 로부터 상태벡터  $x(t)$ 를 최적으로 추정한 상태추정벡터  $\hat{x}(t)$ 를 찾는 칼만필터 설계문제로 나누어 생각할 수 있다. 각각에 대한 설계는 다음과 같은 과정을 통하여 이루어진다.

### 2.2.1 LQ 제어기 설계

전상태를 측정할 수 있고 외란력  $f(t)$ 가 작용하지 않는다고 가정하면, LQ제어 문제는 이산시간의 형태로 변형한 아래의 식(2.3)을 구속조건으로 하고 성능지수  $J$ 를 최소화하는 제어입력  $u = -F_x$ 를 구하는 문제가 된다.

$$\begin{cases} x(k+1) = A_{0x}x(k) + B_0u(k) \\ y(k) = C_0x(k) \end{cases} \quad (2.3)$$

$$J = \sum_{j=0}^{N-1} \{y^T(j) + u^T(j) R u(j)\}$$

여기서부터 최적상태 피드백 제인행렬  $F$ 는

$$F = [R + B^T S(k) B_D]^{-1} B^T S(k) A_D$$

이며,  $S(k)$ 는 다음 리카티방정식을 만족하는 해이다.

$$S(k-1) = C^T C_D + A^T S(k) A_D - A^T S(k) B_D [R + B^T S(k) B_D]^{-1} B^T S(k) A_D$$

### 2.2.2 상태 관측기 설계

칼만필터를 설계하기 위하여 입력외란과 측정잡음이 백색잡음이라고 가정하면 식(2.3)을 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$\begin{cases} x(k+1) = A_D x(k) + B_D u(k) + w(k) \\ y_M(k) = C_M x(k) + n(k) \end{cases} \quad (2.4)$$

여기에서  $y_M(k)$ 은 변위 측정치와 가속도 측정치를 피드백하기 위한 출력 측정치행렬이며,  $w(k)$ 와  $n(k)$ 는 0-평균 백색잡음으로 분산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E[w(j) w^T(i)] &= W(k) \delta_{jk} > 0 \\ E[n(j) n^T(i)] &= V(k) \delta_{jk} > 0 \\ E[w(j) n^T(i)] &= 0 \end{aligned}$$

$x(k)$ 를 추정하기 위하여 관측기를 설계하면  $\hat{x}(k)$ 를 상태추정변수라 할 때

$$\hat{x}(k+1) = A_D \hat{x}(k) + B_D u(k) + H(y_M(k) - \hat{y}_M(k)) \quad (2.5)$$

와 같이 되며 칼만필터 제인행렬  $H(k)$ 는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$H(k) = A_D P(k) C_M^T [V(k) + C_M P(k) C_M^T]^{-1}$$

여기에서,  $P(k)$ 는 아래 리카티방정식을 만족하는 해이다.

$$P(k+1) = W(k) + A_D(k) P(k) A_D^T(k) - A_D P(k) A_D^T [V(k) + C_M P(k) C_M^T]^{-1} C_M P(k) A_D^T$$

### 2.2.3 출력피드백을 이용한 제어기 설계

Fig. 2.2는 전체 폐루프시스템에 대한 블록선도로써 LQ제어기와 칼만필터를 이용한 상태 관측기를 결합하여 출력피드백을 수행하고 있으며 여러가지 원인으로부터 비롯되는 외란을 포함하고 있다.

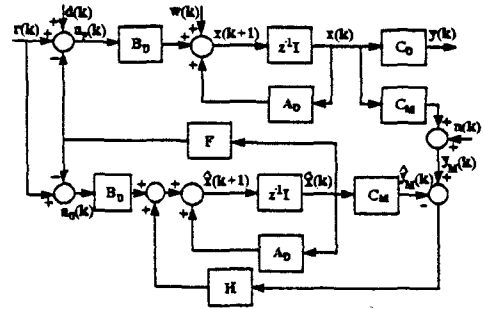


Fig. 2.2 Output feedback control system

$$\begin{cases} x(k+1) = A_D x(k) + B_D u_p(k) + w(k) \\ y(k) = C_D x(k) \\ y_M(k) = C_M x(k) + n(k) \\ u_p(k) = -F \hat{x}(k) + r(k) + d(k) \\ \hat{x}(k+1) = A_D \hat{x}(k) + B_D u_0(k) + H(y_M(k) - \hat{y}_M(k)) \\ \hat{y}_M(k) = C_M \hat{x}(k) \\ u_0(k) = -F \hat{x}(k) + r(k) \end{cases} \quad (2.6)$$

식 (2.6)을 정리하면,

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \hat{x}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_D & -B_D F \\ H C_M & A_D - B_D F - H C_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \hat{x}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_D & B_D & I & 0 \\ B_D & B_D & 0 & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r(k) \\ d(k) \\ w(k) \\ n(k) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

상태추정오차  $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ 로 하고 식 (2.7)에 대입하면,

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ e(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_D - B_D F & B_D F \\ 0 & A_D - H C_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ e(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_D & B_D & I & 0 \\ 0 & 0 & I & -H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r(k) \\ d(k) \\ w(k) \\ n(k) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

가 되며 식(2.8)로부터  $[A_D - B_D F]$ ,  $[A_D - H C_M]$ 의 극점이 단위원 안에 존재하는 LQ제어 제인과 칼만필터 관측기 제인을 분리하여 별도로 구할 수 있다. 여기에서,  $C_M$ 은 간극 측정치 이외에 가속도 측정치를 이용하여 상태를 추정하고자 할때 출력벡터에 관계되는  $2 \times 2$ 행렬로 가속도 측정치를 직접 관측기에 반영하고자 상태변수의 함수로 변형하여 간

극의 상태와 함께 측정치행렬을 구성하였다.

### 3. 시뮬레이션

식(2·2)를 토대로 설계한 선형제어기를 자기부상 시스템에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 부양체가 전자석에서 일정거리만큼 떨어져 있다고 가정하였을때 계단입력 신호에 대한 응답성능, 질량이 변화할 경우 강인성과 간극변화에 대한 추종성능에 대하여 각각 실시했다. 또한 바람과 임의의 방향에서 작용하는 힘등과 같은 외란, 입력잡음 및 측정잡음은 Fig. 3.1와 같은 유색잡음(colored noise)으로 가정하여 제어시간 전체에 걸쳐서 작용하도록 하였다.

Fig. 3.2는 시스템의 상보감도함수 및 감도함수에 대한 주파수 응답선도를 나타낸 것이며 Fig. 3.3부터 3.11까지는 설계한 제어기에 대한 시뮬레이션 결과로 전상태 피드백이 가능하다는 전제하에서 LQ 제어기만의 경우와 변위 측정치만을 사용한 제어기 그리고 변위와 가속도 측정치를 사용한 제어기에 대하여 잡음에 대한 저감도 능력과 질량변동에 대한 강인성 그리고 간극변화에 대한 추종성능을 살펴보았다.

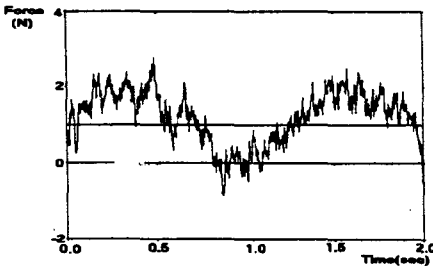


Fig. 3.1 Frequency response of complementary sensitivity function and sensitivity function

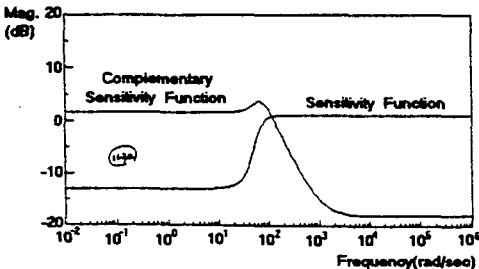


Fig. 3.2 Disturbance with mean: 1.0, covariance: 0.2, and sinusoidal amplitude: 0.1, frequency: 5(rad/sec)

Figs. 3.3, 3.6, 3.9는 일정한 간극을 유지하도록 하는 목표입력에 대하여 외란과 측정잡음이 작용했을 때의 외란제거능력 및 잡음에 대한 저감도성을 시뮬레이션한 것으로 모든 경우에 있어서 약 10 Hz 이하의 외란과 측정잡음에 대하여 저감도 능력을 가지고 있어 설계된 제어기의 주파수 응답선도(Fig. 3.1)와 일치함을 알 수 있었다. 그러나 변위 측정치만을 사용한 시스템(Fig. 3.6)은 부상체의 질량과 외란력의 영향으로 과도상태에서 제어입력값이 포화되고 있는 것을 볼 수 있으며 반면에 변위와 가속도 측정치를 사용한 시스템(Fig. 3.9)은 두

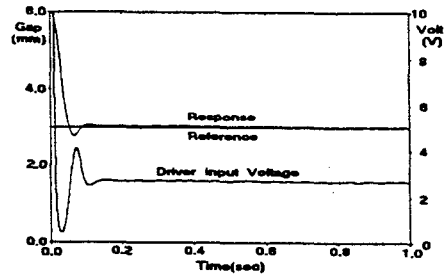


Fig. 3.3 Time response and driver input voltage in LQ control system with noise (gap: 6 mm → 4 mm), noise characteristics shown in Fig. 3.2

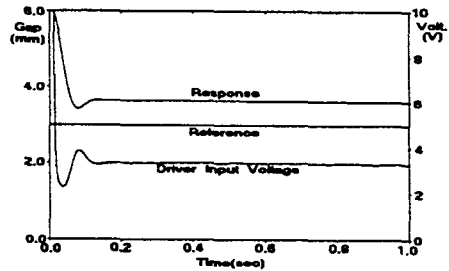


Fig. 3.4 Time response and driver input voltage in LQ control system with mass change (mass: 2.3 kg → 2.8 kg)

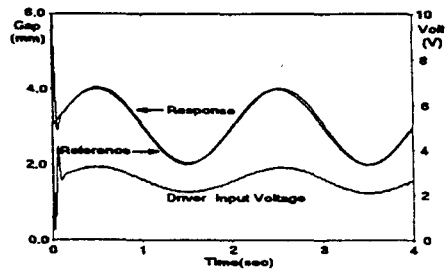


Fig. 3.5 Time response and driver input voltage in LQ control system with varying air gap (period T=2 sec)

개의 측정치로부터 추정이 이루어져 부상체의 질량과 외란력에 대한 영향이 감소하여 제어입력값의 포화현상이 발생하지 않았다.

질량변동에 대한 강인성을 시뮬레이션한 결과 LQ제어기는 동일한 제어제인에 대하여 23.3%의 정상상태오차를 보이고(Fig. 3.4) 변위측정치만을 사용한 시스템에서는 10%의 정상 상태오차를 보였으며(Fig. 3.7) 변위와 가속도측정치를 사용한 시스템에서는 17%의 정상상태오차를 보여(Fig. 3.10) LQ제어기의 경우 정상상태오차가 더 발생하였다.

그러나 Fig. 3.7과 3.10을 비교하여 보면 질량이 변화하였을 경우 변위와 가속도 측정치를 사용한 시스템(Fig. 3.10)이 가속도 측정치의 피드백으로 질량변동에 대한 영향을 고려할 수 있어 변위 측정치만을 사용한 시스템(Fig. 3.7)과는 다르게 제어입력값의 포화현상이 발생하지 않았다.

또한 변화하는 간극에 대한 추종성능을 나타낸 시뮬레이션 결과(Figs. 3.5, 3.8, 3.11) LQ제어기의 경우 목표입력에 대하여 약간의 오차를 가지고 추종하는 것을 볼 수 있다. 이것은 Fig. 3.3에서 정상

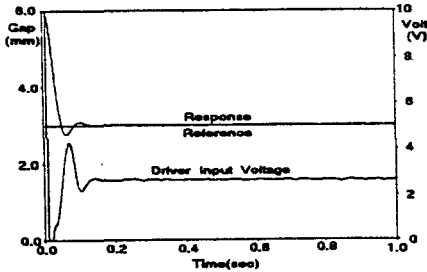


Fig. 3.6 Time response and driver input voltage in gap sensor installed system with noise (gap : 6 mm → 4 mm)

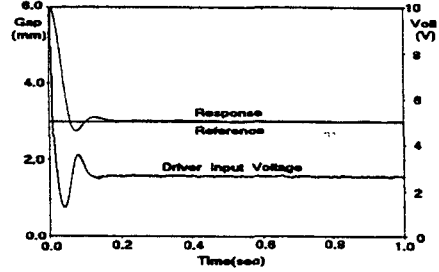


Fig. 3.9 Time response and driver input voltage in gap sensor and accelerometer installed system with noise (gap : 6 mm → 4 mm)

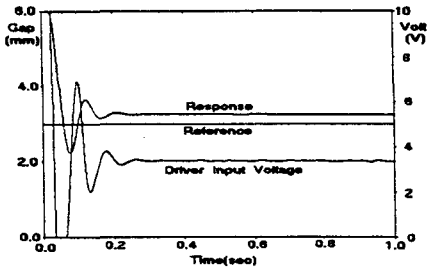


Fig. 3.7 Time response and driver input voltage in gap sensor installed system with mass change (mass : 2.3 kg → 2.8 kg)

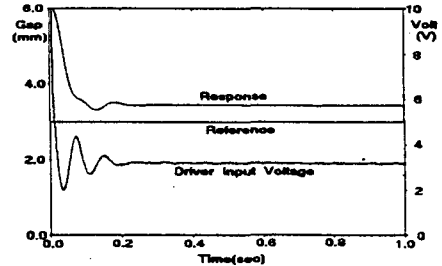


Fig. 3.10 Time response and driver input voltage in gap sensor and accelerometer installed system with mass change (mass : 2.3 kg → 24.8 kg)

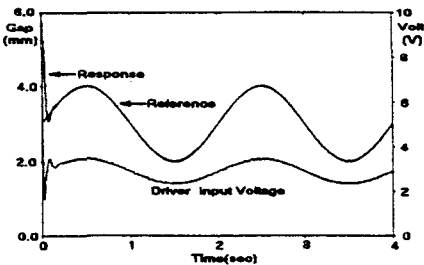


Fig. 3.8 Time response and driver input voltage in gap sensor installed system with varying air gap (period T = 2 (sec))

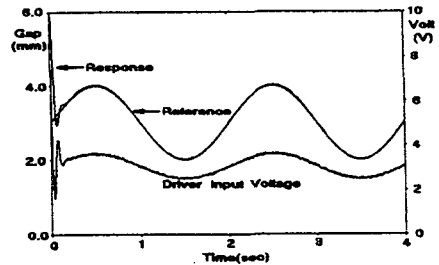


Fig. 3.11 Time response and driver input voltage in gap sensor and accelerometer installed system with varying air gap (period T = 2 (sec))

상태에서의 응답이  $\pm 0.15$  mm 오차 범위안에 있으나 여러가지 외란의 영향으로 인하여 목표입력에 대하여 약간의 차이가 있는 것이 간극이 변화하는 경우에 두드러지게 나타났기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 변위 측정치를 사용한 시스템(Fig. 3.8)과 변위와 가속도 측정치(Fig. 3.11)를 사용한 시스템의 경우는 입력값의 변화에 대하여 오차없이 추종하는 것을 볼 수 있는데 이것은 칼만필터의 사용으로 인하여 작용하는 외란에 효과적으로 대응하였기 때문인 것으로 본다.

#### 4. 실험

본 연구를 위하여 구성한 실험장치의 개략도는 Fig. 4.1과 같다. 그리고 Photo 1은 제어대상인 자기부상시스템을 나타내며 Photo 2는 전체적인 자기부상 시스템의 실험장치를 보여주고 있다.

실험장치를 구성하고 있는 요소는 제어대상인 전자석과 부양체, 전자석과 부양체 사이의 변위를 측정하기 위하여 사용한 겹센서와 부양체의 가속도를 측정하기 위하여 사용한 가속도계, 측정된 간극에 대한 전압신호를 증폭하고 필터링하기 위한 플록시미터와 가속도계로부터 발하는 신호를 증폭하고 필터링하기 위한 Charge 증폭기, 컴퓨터에서 발하는 제어입력의 전압·전류를 증폭하여 전자석을 구동하는 Power 증폭기, 컴퓨터와 외부기기의 인터페이스로서의 기능을 수행하는 DACA 보드, 페루프 제어를 위한 소프트웨어와 제어알고리즘의 처리, 데이터의 수집, 인터럽트의 기능을 수행하는 PC 등이 있다.

실험장치는 제어대상인 전자석과 질량에 대하여

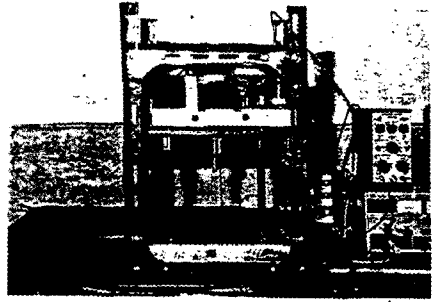


Photo 1 Close view of the electromagnetic levitation system

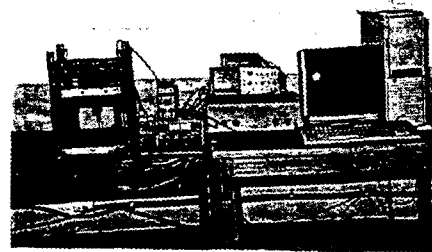


Photo 2 Photograph of experimental setup

겹센서는 전자석의 자극(磁極)면과 수평 위치에 설치하였으며 가속도계는 부양체의 편심을 고려하여 질량체의 중심선에 맞추어 밑면에 설치하였다. 겹센서는 플록시미터를 통과하고 가속도계는 Charge 증폭기를 통과하여 각각 A/D 변환기로 들어오며 이 신호는 PC에서 직접 프로그램한 제어기에서 받아들여 제어신호를 발하도록 하였다. 제어신호는 D/A 변환기를 통하여 Power 증폭기로 입력되어 전압과 전류를 증폭하게끔 하여 전자석을 제어할 수 있도록 하였다.

#### 5. 실험결과 및 토의

Fig. 5.1에서 5.8은 설계한 제어기에 의한 실험결과로 출력피드백에 있어서 변위 측정치만을 사용한 경우와 변위와 가속도 측정치를 동시에 사용한 경우에 있어서 목표입력에 대한 응답성능, 외란에 대한 저감도 능력, 질량변동에 대한 강인성 그리고 명령추종 능력을 각각 수행하였다. 목표입력에 대한 응답성능 실험에서는 전자석에서 임의의 초기 간극으로부터 일정위치에 도달하도록 하는 것을 수행하였으며 외란에 대한 저감도 능력실험에서는 부상된 질량에 상·하의 운동을 요란하는 외력을 임

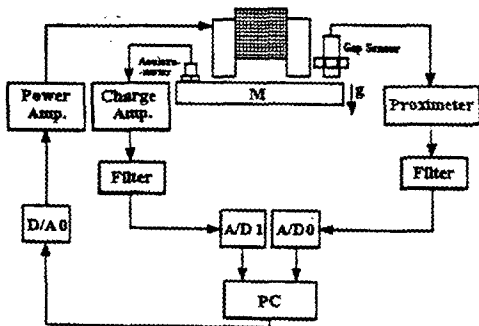


Fig. 4.1 Schematic diagram of the experimental setup

의로 작용하여 응답을 보였다. 그리고 질량변동에 대한 강인성 실험은 기준 질량에서 질량을 임의로 추가하여 실험하였으며 명령추종성능 실험은 선정된 기준 질량에 대하여 정현파를 입력으로 주었을 경우 이에대한 추종능력을 살펴보았다.

전자석의 잔류자기의 영향은 전자석의 히스테리시스곡선<sup>(3,6,9)</sup>에 의하여 결정되며 투자율에도 영향을 주기 때문에 사전에 신중히 고려해 보아야 한다. 본 실험에서 사용한 전자석은 투자율이 자속밀도에 대하여 비선형이므로 투자율의 결정을 정확하게 할 수 없어 실험에 중요한 장애요인으로 작용하였으나 다음의 실험결과에서 볼 수 있는 것과 같이

이와 같은 장애요인에도 불구하고 양호한 실험결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 5.1과 5.5는 변위 측정치를 사용한 시스템과 변위와 가속도 측정치를 사용한 시스템의 시간응답과 오차에 대한 것으로서 모두 기준위치에 오차없이 도달하는 것을 볼 수 있다. 그림에서 과도상태에서 나타난 현상은 부양체가 움직일때 안내가이드와의 마찰에 의한 영향과 검센서의 측정구간 한계에 기인할 것으로 생각된다.

그리고 두 시스템에 외란력이 작용했을 경우의 실험(Figs. 5.2, 5.6)에서는 모두 제어기 설계시 고려된(Fig. 3.1) 외란력의 작용 범위에 대하여 저감

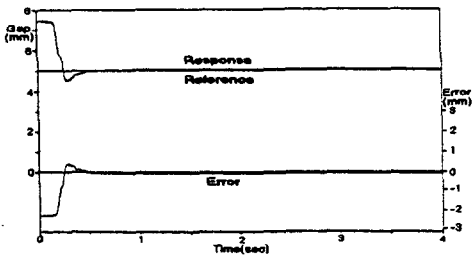


Fig. 5.1 Time response and error of the gap sensor installed system(gap : 7.5 mm  $\rightarrow$  5 mm)

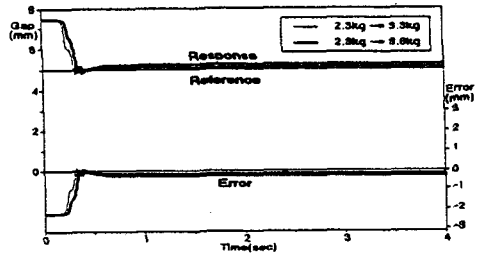


Fig. 5.4 Time response and error in gap sensor installed system with mass change (gap : 7.5 mm  $\rightarrow$  5 mm)

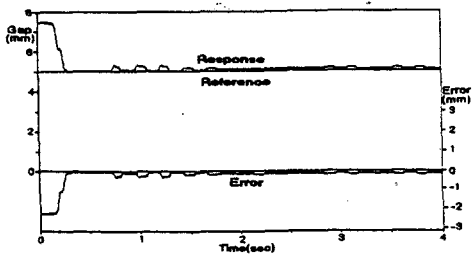


Fig. 5.2 Time response and error in gap sensor installed system with disturbing force (gap : 7.5 mm  $\rightarrow$  5 mm)

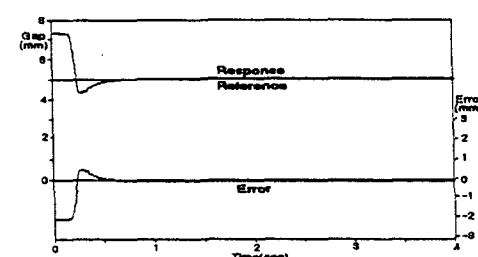


Fig. 5.5 Time response and error of the gap sensor and accelerometer installed system (gap : 7.5 mm  $\rightarrow$  5 mm)

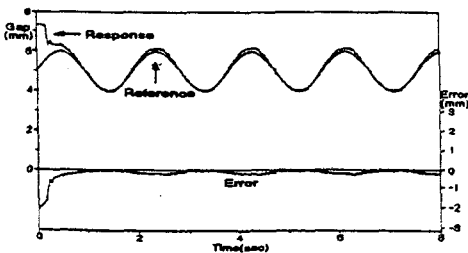


Fig. 5.3 Time response and error in gap sensor installed system with varying air gap (period T=2 (sec))

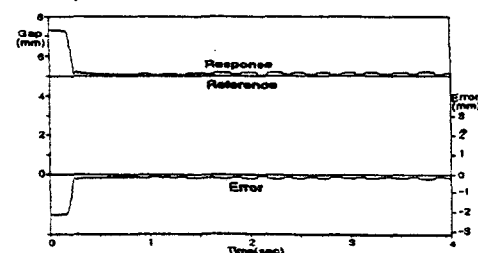


Fig. 5.6 Time response and error in gap sensor and accelerometer installed system with disturbing force (gap : 7.5 mm  $\rightarrow$  5 mm)



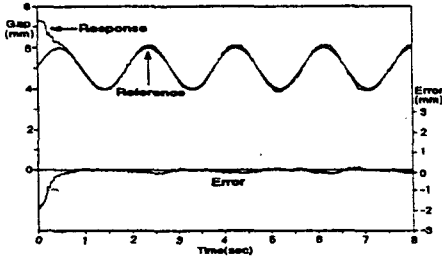


Fig. 5.7 Time response and error in gap sensor installed system with varying air gap (period  $T=2$  (sec))

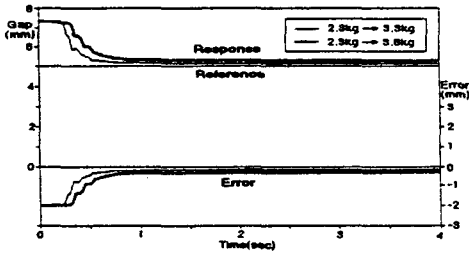


Fig. 5.8 Time response and error in gap sensor installed system with mass change (gap : 7.5 tmm  $\rightarrow$  5 mm)

도 능력이 적절한 것으로 나타나 있으며 특히 Fig. 5.7에서 보는 바와 같이 가속도 측정치의 피드백의 경우 외란력의 작용을 직접 고려할 수 있어 외란력에 대한 제어능력이 더욱 현저함을 알 수 있다.

또한 두 시스템에 간극을 변화시켰을 경우의 실험(Figs. 5.3, 5.8)에서는 모두 일정한 위치에서 오차를 보이고 있는데 이것은 제어입력값의 포화현상에 기인하며 이 현상은 가속도 측정치의 피드백(Fig. 5.7)의 경우 제어입력이 보다 안정되어 오차 감소 현상을 확인할 수 있는 것과 시뮬레이션(Figs. 3.8, 3.11)에서 제어입력값이 안정된 경우에는 오차없이 잘 추종하고 있는 것으로부터도 확인이 가능하다.

Fig. 5.4와 5.8은 두 시스템에 대하여 질량을 변동시켰을 경우에 대한 실험결과를 나타내며 기준질량에서 1.7배 이상의 질량증가에도 불구하고 0.5 mm 미만의 오차를 나타내어 시뮬레이션(Fig. 3.4, 3.7, 3.10)보다 더욱 양호한 결과를 보이고 있다.

이와 같은 결과로부터 본 연구에서 수행한 칼만 필터를 이용한 최적제어 설계기법은 자기부상 시스템 제어에 대하여 목표추종성과 외란제거능력을 고려한 제어기에서는 부양 중에 안내 가이드와의 마

찰과 간극 측정구간의 한계 그리고 제어입력값의 포화 등에도 불구하고 양호한 성능을 발휘했으며 질량변동의 경우에는 시뮬레이션보다 정상상태오차를 크게 감소시킬 수 있어 설계한 선형제어기를 통하여 원하는 강인성을 확보할 수 있었다.

## 6. 결 론

본 연구는 단일 전자석에 대하여 운동을 상하 1 자유도 운동으로 제한한 상태에서 시스템의 불안정 요소와 작용외란을 고려하여 충분한 안정도—강인성과 주파수역 성능을 확보함과 동시에 디지털 컴퓨터에 직접 적용할 수 있는 디지털 선형제어기를 설계하는 것이다.

제어기 설계는 외란과 잡음의 작용 이외에 기준 입력이 변화하는 경우를 함께 고려하여 수행하였다. 출력 피드백으로 변위 측정치만을 사용한 경우와 상태변수에 직접 영향을 주는 외란력의 작용을 고려하기 위하여 변위 측정치와 가속도 측정치를 함께 사용한 경우에 대하여 LQ 최적제어기와 칼만 필터 관측기를 설계하고 시뮬레이션과 실험을 통하여 성능을 분석하였다.

이상의 연구내용을 요약하여 결론을 내리면 다음과 같다.

- (1) 잡음과 외란에 대한 저감도 성능과 명령추종 성능을 고려한 자기부상 시스템의 제어기를 구성하였다.
- (2) 질량변동에 대해서는 시뮬레이션보다 정상상태 오차를 크게 감소시킬 수 있어 설계한 선형 제어기를 통하여 원하는 강인성을 확보할 수 있었다.
- (3) 간극만을 측정하여 전상태를 추정한 제어기의 경우 나타난 제어입력값의 포화현상과 진동현상이 간극과 가속도를 동시에 측정하여 전상태를 추정하는 제어기를 사용한 경우에는 감소하는 현상을 보였다.
- (4) 간극과 가속도를 동시에 측정하여 전상태를 추정하는 제어기의 경우 실험결과 외란력의 작용에 대하여 간극만을 측정하여 전상태를 추정하는 제어기의 경우보다 효과적으로 대응하는 것을 관찰하였으며 이로부터 가속도의 측정으로 외란의 영향에 대하여 효과적으로 대응함을 확인하였다.
- (5) 부양체의 질량선정과 전자석의 히스테리시스 등 여러가지 모델링 오차에도 불구하고 원활한 제어를 수행할 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) Gottzein, E., Meisinger, R. and Miller, L., 1980, "The Magnetic Wheel" in the Suspension of High-Speed Ground Transportation Vehicles," *IEEE Trans. on Vehicular Technology* Vol. VT-29, No.1.
- (2) Hebbale, K.V. and Taylor, D. L., 1986, "Dynamics of a Ferromagnetic Suspension System," *Proc. American Control Conference, Seattle, WA, Aug.*, pp.217~223.
- (3) Kenjo, T. and Nagamori, S., 1984, *Permanent Magnet and Brushless DC Motors*, Sogo Electronics Pub. Com.
- (4) Kortüm, W. and Utzt, A., 1984, "Control Law Design and Dynamic Evaluations for a Maglev Vehicle with a Combined Lift and Guidance Suspension System," *Trans. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 106, pp.286~292.
- (5) Sugie, T. and Tanai, Y., 1993, " $H_2/H_\infty$  Suboptimal Controller Design-Design Example of a Magnetic Levitation System" *International Workshop on Robust Control*, pp. 1~16, Hoam Faculty House, Seoul National University.
- (6) 김봉열, 1988, 재료·부품, 기다리, 서울.
- (7) 감중식, 박전수, 1991, "자기부상 시스템의 본드선도 모델링 및 LQG/LTR 제어기 설계", 대한기계학회논문집, 제15권, 제5호, pp.1620~1634.
- (8) 이승욱, 이진복, 1993, "자기부상 시스템의 디지털 제어," 대한기계학회 '93년 추계 학술대회 초록집 ( I ), pp.288~291.
- (9) 정필선 외 4인, 1974, '전기재료,' 학연사, 서울.
- (10) 조택선, 1992, "LQG/LTR 설계방법을 이용한 자기부상 시스템에 관한 연구," 석사학위 논문, 숭실대학교.