

센서리스 자기 부상계의 제어계 설계에

관한 연구

⁰김창화^{*}, 김영복^{**}, 양주호^{***}

(A Study on the Control System Design of Sensorless Magnetic Levitation System)

(Chang-Hwa Kim, Young-Bok Kim, Joo-Ho Yang)

Abstract

The magnetic levitation system is utilized in the magnetic bearing of high-speed rotor because of little friction, no lubrication, no noise and so on. The magnetic levitation system need the feedback controller for the stabilization of system, and gap sensors are usually used to measure the gap. The use of sensor is troublesome such as sensor trouble, discord between the measurement point and the control point etc.

This paper presents the design of robust stabilizing controller by H_∞ control theory using the sensorless method proposed already by authors in the magnetic levitation system. And we investigated both the validity of the designed controller and the usefulness of the sensorless method proposed by authors of magnetic levitation system through results of actual experiment.

1. 서론

자기 부상계는 비접촉으로 물체를 부상하기 때문에 마찰이나 열등을 최소화하기 위한 고속 회전 기기나 운송 시스템 등의 여러 분야에 응용이 활발히 이루어지고 있다. 그런데 자기 부상 방법 중 흡인식 자기 부상계는 본질적으로 불안정 시스템 이므로 원하는 위치에 물체를 부상시키기 위해서는 위치 정보를 이용하여 시스템을 안정화하는 피드백 제어를 행하여야 한다^{1),2)}. 이 때 변위 측정을 위해서는 와전류식, 광학식, 캐패시턴스형 등의 변위측정용 센서가 주로 이용된다^{3),4)}.

변위센서를 사용한 자기 부상계의 피드백 제어 계는 경제적으로 고가이고, 또한 센서의 고장 등은 자기 부상계에 있어 심각한 문제들을 초래한다.

그리고 시스템의 구조상의 제약이나 센서 부피 등으로 인하여 위치 검출점과 제어점이 불일치하게 되는 경우가 있을 수 있어, 이는 제어 성능 및 내부 안정성에 악영향을 줄 수 있다. 따라서 변위 센서를 사용한 경우의 단점들을 극복하기 위해, Visher등은⁵⁾ 관측기(Observer)를 사용하여 전류의 검출로 변위를 추정하였고, Okada등은⁶⁾ 자기 유도 계수(Inductance)가 변위의 함수라는 것을 이용하여 변위를 추정하였으며, 권등은⁷⁾ Okada가 제안한 방법을 사용하여 선형 앰프로 구동되는 자기 부상계의 변위를 추정하였다. 그리고 저자등⁸⁾은 제어 입력 PWM파와 반송PWM파를 전자석에 인가하여 자기 부상계를 센서리스(sensorless)화 하는 한 방법을 제안한 바 있다.

제어계의 설계를 체계적으로 행하는 가장 직접적인 방법은 미분 방정식으로 기술된 제어 대상의 수학적 모델에 대해 평가 함수를 선정하고, 이것을 일정한 값 이하로 하던가 또는 최소화하는 보상기를 구하는 것이다. 이러한 요구 조건에 응하는 대

* 부경대학교 대학원

** 부경대학교 박사 후 연수

*** 부경대학교 제어기계공학과

표적인 현대 제어 이론으로는 LQ 제어, LQG제어 이론을 들 수 있다. 그런데 대개 수식으로 표현된 모델은 제어 대상의 특성을 완벽히 표현할 수 없는 경우가 많고, 모델에 대한 제어 특성이 양호하더라도, 실제 시스템에 대해서는 양호한 특성이 얻어지지 않은 경우가 일어난다. 따라서 설계될 제어기는 어느 정도의 모델링 오차가 있어도 양호한 제어 성능을 발휘할 수 있도록 로바스트성을 확보할 필요가 있다. 따라서 1980년대에 들어 모델링 오차를 주파수 영역에서 고려하는 로바스트 제어기 설계 이론이 활발히 연구되기 시작하였고, 그 대표적인 이론이 H_∞ 제어 이론^{9~10)}이다.

본 연구에서는 우선 저자 등이 연구 발표한 자기 부상계의 센서리스 방법을 이용하여 변위를 추정하고, H_∞ 제어 이론에 의해 피드백 제어기를 설계한다. 이렇게 구성된 자기 부상 제어계에 대해 센서 및 본 연구에서 제안한 센서리스 등에 의해 부상 실험을 수행한다. 그리고 이러한 자기 부상 제어계에 대해 제안한 센서리스 방법의 타당성을 실험 결과로부터 검토하고, 향후 자기 베어링과 같은 장치에 적용 가능성을 조사한다.

2. 제어대상의 모델링 및 실험장치제작

2.1 자기 부상계의 모델링

직류 전자석의 흡인력을 이용하여 부상체를 지정된 위치에 부상시키는 Fig.1과 같은 자기 부상 시스템을 생각한다. 이 때, 직류 전자석에 관해서는 아래의 가정을 둔다.

- (1) 전자석에 있어 누설자속은 없다.
- (2) 철심의 투자율은 무한대이다.
- (3) 자기 회로에 관한 이상적인 조건들을 가정한다.

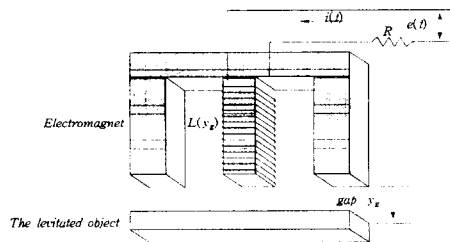


Fig. 1 Magnetic levitation system

여기서, 전자석에 가해지는 전압 e 를 제어 입력, 전자석과 부상체 사이의 간극 중 평행점에서의 미소

변화분 y_p ($y_g = Y + y_p$, Y :평행점에서 전자석과 부상체 사이의 거리)를 출력으로 했을 때, 제어 대상의 상태 공간 표현은^{11~12)}

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (1)$$

단,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{QI^2}{m(Y_\infty + Y)^3} & 0 & -\frac{QI}{m(Y_\infty + Y)^2} \\ 0 & \frac{QI}{(Y_\infty + Y)(Q + L_0(Y_\infty + Y))} & -\frac{R(Y_\infty + Y)}{Q + L_0(Y_\infty + Y)} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{(Y_\infty + Y)}{Q + L_0(Y_\infty + Y)} \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 0 \ 0],$$

$$D = [0], \quad x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$$

와 같이 표현된다.

2.2 자기 부상계의 제작 및 파라미터 추정

실험에 이용할 자기 부상계의 실험 장치는 Fig.1과 같이 제작하였다. 우선, 전자석에 사용된 자성체는 주파수 특성이 우수한 페라이트를 이용했고, 전자석의 코일은 직경이 0.75[mm]인 구리선을 300회 감아 만들었으며, 이 때 코일의 저항은 2.0 [Ω]이었다. 자기 부상계의 모델링에 있어서 파라미터 Q , Y_∞ , L_0 의 값은 다음과 같이 추정하였다. 먼저 부상 물체를 전자석 아래의 어느 한 위치에 고정시켜 둔 상태에서 교류전압을 코일에 가하여 정상 상태에서의 전류를 측정한다. 이 때의 전압과 전류 사이의 관계로부터 그 상태(거리)에서의 인덕턴스를 구한다. 이렇게 구한 부상 물체의 위치를 변경해 가면서 인덕턴스를 구한 결과는 Fig.2의 별표(*)로 표시된 것과 같다. 이러한 데이터를 가지고 최소 자승법에 의해 $L(y_g)$ 의 각 파라미터의 값을 구한 후, 이 값에 의해 구한 인덕턴스 $L(y_g)$ 는 Fig.2의 실선과 같다.

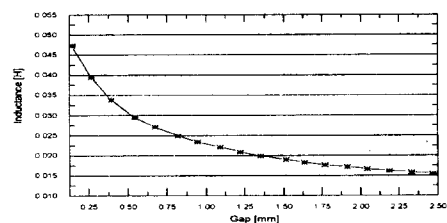


Fig. 2 Coil inductance L vs. gap y_g

여기서, 자기 부상계의 평형점은 0.6[mm]로 하였고, 이 평형점에서 자기 부상계의 공칭치는 표 1과 같다. 표.1에 기술된 파라미터 값을 자기 부상 시스템의 상태 공간 식 (1)에 대입하여 자기 부상 시스템을 상태 공간으로 표현하면

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{단, } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 16149.6906 & 0 & -34.668168 \\ 0 & 311.100762 & -428.899116 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 35.3294165 \end{bmatrix} \quad C = [1 \ 0 \ 0]$$

$$D = [0], \quad x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$$

로 된다.

Table 1 The nominal value of the magnetic levitation system

Parameters	Nominal value
$Q [Hm]$	$1.7043048 \cdot 10^{-5}$
$L_0 [H]$	$9.401999 \cdot 10^{-3}$
$R [\Omega]$	12.14
$Y_\infty [m]$	$3.016043 \cdot 10^{-4}$
$y_p [m]$	$0.60 \cdot 10^{-3}$
$M [kg]$	0.254
$I [A]$	0.42

3 자기 부상계의 센서리스 및 검출 신호 보정식

3.1 센서리스의 이론적 배경

Fig.2에 있는 자기 부상계에 대해 전자석의 전기 회로는 등가적인 R-L 회로로 생각할 수 있고, 이 회로의 전기적 회로 방정식은 키르히 호프의 전압 법칙에 의하여

$$Ri(t) + L \frac{di}{dt} = e(t) \quad (3)$$

로 된다. 그리고, 식 (3)에서 인덕턴스 L의 값은 전자석과 부상체의 위치 y_g 에 대해 지수 감소 형태로 변화한다. 따라서 인덕턴스에 대한 식을 다시 써 보면

$$L(y_g) = \frac{Q}{Y_\infty + y_g} + L_0 \quad (4)$$

로 된다. 여기서, 전자석의 회로 방정식 (3)에서

저항 R을 알고 전류 i와 전압 e를 측정할 수 있다면, 인덕턴스 $L(y_g)$ 를 추정할 수 있으며, 추정된 값으로부터 간극 y_g 를 식 (4)로부터 계산할 수 있다. 이러한 이론적 근거를 배경으로 하여 자기 부상계의 변위를 검출하기 위해 주파수가 ω_c , 듀티 비가 0.5, 전압의 크기가 E_a 인 방형파 전압(이하 반송 PWM파)을 제어 입력의 방형파 전압(이하 제어 입력 PWM파)에 중첩시켜 전자석에 인가한다. 이 때 전자석에 흐르는 전류의 계측하여 그 값을 I_c 라하면, 전자석과 부상체 사이의 변위 y_g 는

$$y_g \approx \frac{Q}{\frac{1}{\omega_c} \left| \frac{E_c}{I_c} \right| - L_0} - Y_\infty \quad (5)$$

로 되어 전자석과 부상체 사이의 변위 y_g 를 추정할 수 있다.

3.2 검출 신호 보정식

3.1절에서 거론한 자기 부상계의 센서리스를 위한 회로 구성에 관해서는 문헌 8)에 서술되어 있다. 따라서 Fig.3은 이러한 회로를 이용하여 물체의 부상 위치에 따른 측정 전압과 제어 입력에 대해 실험한 결과이다. 본 실험에서는 제어 전원 전압 $e_a(t)$ 는 11[V]이고, 반송파 전원 전압 $e_b(t)$ 는 3[V]이다.

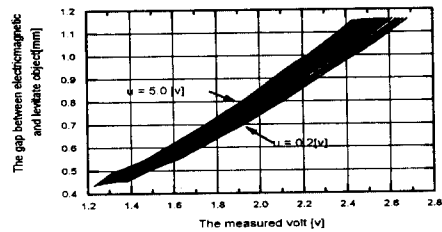


Fig.3 The relation between the measurement voltage versus gap

Fig.3에서 알 수 있듯이 전자석과 부상 물체와의 거리(갭)는 제어 입력에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 이것은 본 연구에서 설계하여 이용된 대역 통과 필터(Band pass filter : BPF)로는 반송파 신호와 제어 입력 신호를 완벽히 구분하여 필터링할 수 없어, 제어 입력 성분이 약간 남아 있었기 때문으로 생각된다. 그러므로 제어 입력 및

측정 전압의 측정치로부터 변위를 추정하는 보정식이 필요하다. i) Fig.3에서 알 수 있는 바와 같이 각 제어 입력에 따라 측정치 곡선의 모양이 상이하므로, 일정한 제어 입력 u 에 대해 측정 전압 v 와 부상 물체의 거리 y_g 의 관계를 식 (6)과 같이 2차함수로 가정한다.

$$\begin{aligned} u = u_{\min}, & \quad y_{g1} = a_1 v^2 + a_2 v + a_3 \\ u = \frac{1}{2}(u_{\min} + u_{\max}), & \quad y_{g2} = b_1 v^2 + b_2 v + b_3 \\ u = u_{\max}, & \quad y_{g3} = c_1 v^2 + c_2 v + c_3 \end{aligned} \quad (6)$$

ii) 그리고, 일정한 측정 전압에 대해 제어 입력 u 와 부상 물체의 거리 y_g 의 관계는 식 (7)과 같이 2차함수로 가정한다.

$$\begin{aligned} y_{g1} &= \alpha u_{\min}^2 + \beta u_{\min} + \gamma \\ v = \text{const}, & \quad y_{g2} = a \left(\frac{1}{2}(u_{\min} + u_{\max}) \right)^2 + \beta \left(\frac{1}{2}(u_{\min} + u_{\max}) \right) + \gamma(7) \\ y_{g3} &= \alpha u_{\max}^2 + \beta u_{\max} + \gamma \end{aligned}$$

그러므로, 전자석과 부상 물체 사이의 거리를 추정하는 함수 $y_g = f(u, v)$ 는 식 (6), (7)을 연립하여 풀면

$$\begin{aligned} y_g = f(u, v) &= (h_{11}u^2 + h_{21}u + h_{31})v^2 + \\ & (h_{12}u^2 + h_{22}u + h_{32})v + (h_{13}u^2 + h_{23}u + h_{33}) \end{aligned} \quad (8)$$

로 된다. 이 때, 식 (8)에 있는 각 계수의 값들은 Fig.3의 데이터를 이용하여 구하면 아래와 같다. Fig.4는 정식화한 식 (8)을 이용하여 다시 그린 것이다. 여기서 실선은 원래의 데이터이고, 별표는 본 연구에서 정식화한 변위 추정식 (8)에 의해 구한 데이터이다. 이 그림으로부터 정식화한 식 (8)은 잘 들어맞고 있음을 알 수 있다.

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.2909 \cdot 10^{-4} & 1.4086 \cdot 10^{-3} & -3.8743 \cdot 10^{-3} \\ 3.8905 \cdot 10^{-3} & 5.2049 \cdot 10^{-3} & 9.7653 \cdot 10^{-3} \\ 10.229 \cdot 10^{-2} & 13.246 \cdot 10^{-2} & 7.4737 \cdot 10^{-2} \end{bmatrix}$$

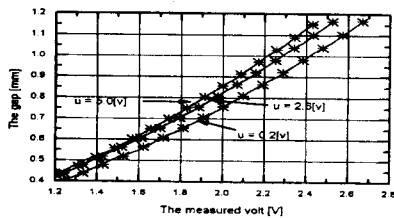


Fig. 4 The relation between the measurement voltage versus gap using revision formula

4 혼합감도문제에 의한 H_{∞} 제어기 설계

4-1 일반화 플랜트의 구성

먼저 H_{∞} 최적 제어를 위해서 하중 함수를 포함하는 일반화 플랜트 $G(s)$ 와 제어기 $K(s)$ 로 구성되는 일반적인 제어 시스템을 Fig. 5에 나타낸다.

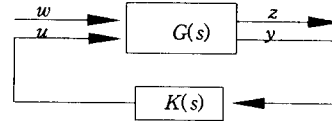


Fig. 5 Generalized control system

여기서, 변수 벡터 w, u, z, y, x 는 아래와 같은 값이다.

$w \in R^{m1}$: 외부입력 (시스템 외란, 관측잡음 및 목표치 등)

$u \in R^{m2}$: 제어입력 (조작가능한 입력)

$z \in R^{p1}$: 제어량 (출력과 목표치간의 오차, 입력의 제한치)

$y \in R^{p2}$: 관측출력 (제어입력의 생성에 이용 가능한 출력)

$x \in R^n$: 내부 상태

이 때, 입력 w 에서 편차 e 까지의 전달 함수를 감도함수 $S(s)$, 입력 w 에서 제어대상 $P(s)$ 의 출력 y_p 까지의 전달 함수를 상보 감도 함수 $T(s)$ 로 하고, 루프 전달함수를 $L(s)$ 라 하면, $L(s), S(s), T(s)$ 는 아래와 같이 된다.

$$L(s) = P(s)K(s) \quad (9)$$

$$S(s) = \{I + L(s)\}^{-1} \quad (10)$$

$$T(s) = L(s)\{I + L(s)\}^{-1} = I - S(s) \quad (11)$$

감도함수 $S(s)$ 의 계인을 작게하면, 시스템의 목표치에 대한 추종특성이 좋게된다. 또한 $T(s)$ 의 계인에 제한을 두는 것은 시스템의 강인한 안정성을 보증한다. 따라서 감도 함수 $S(s)$ 와 상보 감도 함수 $T(s)$ 를 동시에 고려하는 혼합 감도 문제에서는 식 (11)에서 보는 바와 같이 목표치에 대한 추종 특성과 강인한 안정성간의 적절한 타협이 문제 해결의 실마리를 제공한다. 감도 함수와 상보감

도함수의 주파수 하중을 $W_s(s)$, $W_f(s)$ 로 표시하면, 혼합 감도 문제¹³⁾는 Fig.5에 나타낸 시스템을 안정화하면서 부등식

$$\left\| \begin{bmatrix} W_s(s) S(s) \\ W_f(s) T(s) \end{bmatrix} \right\|_{\infty} < \gamma \quad (12)$$

을 만족하는 제어기 $K(s)$ 를 구하는 문제이다.

4-2 H_{∞} 제어기 설계

식 (12)를 만족하는 보상기를 구하기 위해서는 감도 함수 및 상보 감도 함수의 주파수 하중 함수 $W_s(s)$, $W_f(s)$ 를 선정해야 한다. 우선, 감도 함수 $S(s)$ 에 대한 주파수 하중 $W_s(s)$ 은 공칭성능에 대해 0.09(rad/s)의 명령 추종성을 갖기 위하여

$$W_s(s) = \frac{10}{\left(\frac{1}{2 \times \pi \times 0.0145} s + 1\right)} \quad (13)$$

와 같은 일차 하중 함수를 선정하였다.

다음으로 상보 감도 함수 $T(s)$ 에 대한 주파수 하중 $W_f(s)$ 은 곱셈형 섭동(Multiplicative perturbation)의 불확실과 전달 함수 $P(s)$ 의 분모와 분자의 상대적 차수를 고려하여

$$W_f(s) = \frac{\left(\frac{1}{30 \times \pi} s + 1\right) \left(\frac{1}{900 \times \pi} s + 1\right) \left(\frac{1}{1500 \times \pi} s + 1\right)}{7} \quad (14)$$

와 같이 선정하였다.

위에서 선정된 주파수 하중 함수를 사용하여 식 (12)에서 $\gamma = 1$ 로하고 Glover-Doyle이 제안한 알고리즘에 따라 H_{∞} 제어기 $K(s)$ 를 구하면

$$K(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (15)$$

$N(s) = -10^8 * (6.865s^3 + 3761s^2 + 4.096 * 10^5 s + 5.605 * 10^5)$
 $D(s) = s^4 + 7909s^3 + 1.617 * 10^7 s^2 + 5.371 * 10^9 s + 4.892 * 10^8$
 로 된다.

이때 샘플링 주기를 650 (μ s)으로하여 식 (15)를 쌍선형 변환 방식으로 이산화한 제어기는

$$K(z) = \frac{N(z)}{D(z)} \quad (16)$$

$N(z) = 10^4 * (-4.838z^4 + 8.118z^3 + 1.455z^2 - 8.118z + 3.383)$
 $D(z) = z^4 - 1.606z^3 + 0.4732z^2 + 0.1413z - 0.008645$
 로 계산된다.

5. 실험 결과 및 고찰

5.1 변위 측정실험

4.1절에서 정식화한 식 (8)를 이용하여 변위 검출 성능을 조사하기 위해 시판되고 있는 거리 검출용 레이저 센서(KEYENCE LB-72)와 비교하여 본다. 이 때 사용한 레이저 센서의 사양은 표 2에 나타내었다.

Fig.6은 부상 물체를 0.4[mm]에서 0.95[mm]로 자유 낙하시켰을 때의 변위를, 본 연구에서 제작하여 계측한 측정 전압을 보정식 (8)을 이용하여 변위를 검출한 것과 레이저 변위계로써 계측한 것을 나타낸 그림이다. 이 때 레이저 변위계의 응답 시간은 2[ms]로 설정(Setting) 하였다. Fig.6에서, 위치 검출에 대한 속응성은 센서에 의한 것보다 센서리스에 의한 것이 빠름을 알 수 있으며, 센서리스에 의한 응답에서 초기에 약간의 언더 슈트가 있는 것은 보정식에 제어 입력의 변동에 대한 동특성을 고려하지 않았기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 또한, 부상 물체가 0.95[mm]에 도착했을 때 센서리스에 대한 응답이 약간의 오버슈트를 나타내고 있는 것은 낙하시 부상 물체가 충격에 대한 응답이 반영된 것으로 생각되며, 이 경우 센서에 대한 응답을 보면 이러한 현상이 미약하게 나타나는 것은 센서의 자체적인 응답성과 한 점에 대해서만 측정하기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다

Table 2 Parameters of the Laser sensor

Model	LB-72
Stand-off distance	40 mm
Measurement range	± 10 mm
Laser	Semiconductor laser
Linearity	1 % of F.S
Resolution	2 μ m(60ms), 15 μ m(2ms), 50 μ m(0.15ms)
Zero point adjustment range	30 mm to 50 mm
Span adjustment range	0.4V/mm \pm 30%
Response speed	DC ~ 3kHz(at 0.15ms) -3db DC ~ 200Hz(at 2ms) -3db DC ~ 60Hz(at 60ms) -3db
Operating illumination	4000 lx

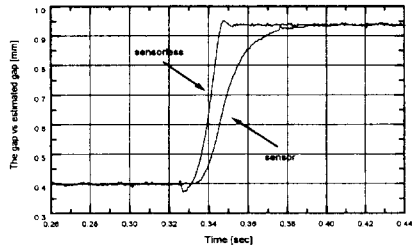


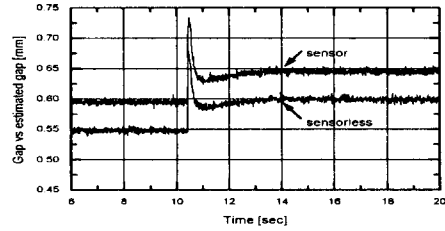
Fig. 6 The measure response of sensor and sensorless

5.2 부상 실험

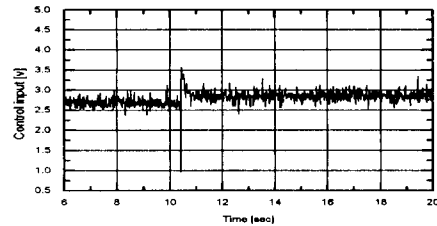
4장에서 설계한 디지털 제어기로는 IBM-PC/486을 이용하였고, 연속계와 이산계 사이의 신호 변환을 위하여 12비트의 A/D, D/A 변환기(converter : AXIOM-AX5411)를 사용하였다. 이 때 샘플링 주기는 A/D, D/A 변환기의 카운터를 이용하여 하드웨어 인터럽트를 이용하였다. 또한, 센서리스의 응답과 비교를 위하여 부상체 하방에 레이저 센서를 이용하여 변위를 계측하였다. 그리고, 부상 실험은 4장에서 설계된 제어기를 가지고 센서리스 자기 부상계의 부상 실험과 센서에 의해 구성된 자기 부상계의 응답 실험을 병행한 것이다.

Fig.7은 센서를 사용한 피드백 제어계에 있어 평형점에서 기준 위치를 스텝적으로 0.05[mm]를 변경한 경우의 실험 결과이고, Fig.8은 센서리스를 이용한 피드백 제어계에 대한 응답이다. 여기서, Fig.7.a 와 Fig.8.a는 부상 물체의 위치를 나타내고 있다. 또한 Fig.7.a에서는 센서로 검출한 위치를 비교하기 위해 센서리스에 의한 위치를 0.05[mm] 정도의 간격을 두고 밑에 나타내었다. 그리고 Fig.8.a는 센서리스로 검출한 위치를 비교하기 위해 센서로 검출한 위치를 0.05[mm] 정도의 간격을 두고 아래에 나타내었다. 이 때, Fig.7.b와 Fig.8.b는 피드백 제어기의 제어 입력을 나타내고 있다. Fig.7.a와 Fig.8.a를 보면 과도 상태에서는 오버슈트가 일어나고 있지만, 정상 상태에서는 모두 안정하게 부상하고 있음을 알 수 있다. 또한 과도 상태의 오버슈트 크기를 보면 센서에 의한 응답이 센서리스에 의한 응답보다 많음을 알 수 있는데, 이는 Fig.6에서 알 수 있는 것처럼 센서의 응답성이 늦은 것으로 생각된다. 또한 두개의 응답에서 기준 위치의 변경에 의해 정상 상태의 오프셋(offset)이 있는 것은

중심해로 제어기를 구한 것이므로, 제어기내에 적분 요소가 들어 있지 않기 때문에 나타나는 현상이다. 따라서 과도 상태의 특성을 개선하기 위해서는 하중 함수를 조정할 필요가 있고, 정상 상태의 오프셋을 영(zero)으로 하기 위해서는 적분기를 피드백 제어기내에 포함시키거나 2자유도 제어계를 구성할 필요가 있다.

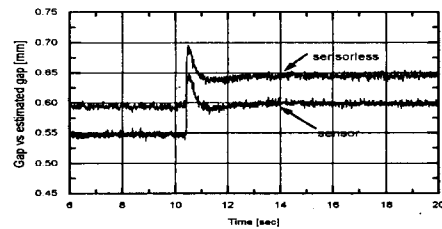


(a) The gap in between electromagnet and the levitated object

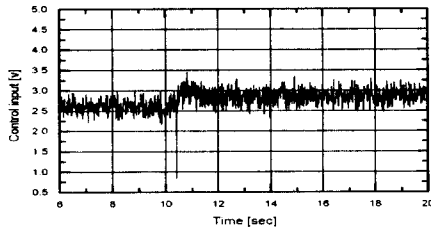


(b) Control input u

Fig. 7 Step response of magnetic levitation system using sensor



(a) The gap in between electromagnet and the levitated object



(b) Control input u

Fig. 8 Step response of sensorless magnetic levitation system

6. 결 론

본 연구에서는 저자 등이 이미 연구 발표한 자기 부상계의 센서리스 방법을 이용하여 변위를 추정하고, H_∞ 제어 이론 의해 내부 안정성 및 불확실성을 고려하여 피드백 제어기를 설계하여 자기 부상 제어계를 구성하였다. 이렇게 구성된 자기 부상 제어계에 대해 센서 및 본 연구에서 제안한 센서리스 등에 의해 변위를 검출하고, 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서 제안한 센서리스에 의한 추정된 변위는 제어 입력과 측정 전압의 함수로 되었다. 또한, 부상 물체의 위치를 변경한 경우, 변위 검출 응답성은 레이저 센서(KEYENCE LB-72)의 응답성보다 센서리스의 응답성이 빠름을 알 수 있었고, 보정식 (8)을 이용함으로써 변위를 추정할 수 있었다.

2) 자기 부상계에 대해 로바스터 제어계를 구성하여 센서에 의한 응답과 센서리스에 응답이 차이가 없음을 보여주고 있어 본 연구에서 제안한 센서리스의 방법이 자기 부상계에 적용할 수 있는 가능성이 확인되었고, 센서를 사용하여 자기 부상 제어계를 구성할 때 일어나는 구조적인 제약이나 경제적인 측면을 해결할 수 있다고 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) 野波, “磁氣浮上 磁氣軸受制御の現況と制御理論”, 計測と制御, Vol.32.4, pp.301, 1993
- 2) 電氣學會, “磁氣浮上と磁氣軸受”, コロナ社, pp.6 ~ pp.36, 1993

- 3) 永田正夫, “磁氣浮上技術の動向と動的問題”, 日本機械學會誌, Vol.96, No.899, pp.876~879, 1993
- 4) 松村, 日月, 1979, “大振幅動作に適した磁氣吸引つり下げ系”, 日本電氣學論集文D, Vol.99, pp.25-32
- 5) D.Visher and H.Bleuler, “A New Approach to Sensorless and Voltage Controlled AMB,s based on Network Theory Concept,” Proc. of the 2nd Intl Symp. on Magnetic Bearing, pp.301~306,1990
- 6) Y.Okada, K.mastuda and B.Nagagi, “Sensorless Magnetic Levitation Control by Measuring the PWM Carrier Frequency Component,” Proc. of the 3rd Intl Symp. on Magnetic Bearing, pp.176 ~183,1992
- 7) 권계시, 정호섭, 이종원, “전류신호를 이용한 능동 자기베어링계의 제어,” 한국소음진동공학회지, 제5권 제1호, pp.49~57,1995
- 8) 김창화, 양주호, “인덕턴스 특성을 이용한 자기 부상계의 변위 측정의 한 방법에 관한 연구,” 한국소음진동공학회지, 제6권 제3호, pp.357~362,1996
- 9) Glover, K. and Doyle, J.C., 1988, “State-Space Formulae for All Stabilizing Controllers that Satisfy an H_∞ -Norm Bound and Relations to Risk Sensitivity”, Systems & Control Letters, Vol.11, pp. 167~172.
- 10) Doyle, J.C., Glover, K., Khargonekar, P.P. and Francis, B.A., 1989, “State-Space Solutions to Standard H_2 and H_∞ Control Problems”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 34, No. 8, pp. 831~847.
- 11) 양주호, 김창화, 정석권, 김영복, “자기부상 시스템에 강인한 제어기 설계에 관한 연구(I)”, 한국박용기관학회, Vol.19, No.3, 1995
- 12) 양주호, 김창화, 정석권, 김영복, “자기부상 시스템에 강인한 제어기 설계에 관한 연구(II)”, 한국박용기관학회, Vol.20, No.3, 1996
- 13) 細江繁幸, 荒木光彦, 1994, 制御系設計(H_∞ 制御とその應用), 朝倉書店, 東京, pp.4~136.