

2자유도 제어기법에 의한 자기 부상계의 센서리스 실현에 관한 연구

김 창 화* · 양 주 호**

A Study on the Sensorless Realization of Magnetic Levitation System by Two-Degree-of-freedom Control Method

C. H. Kim · J. H. Yang**

Key words : Magnetic Levitation System(자기부상계), Sensorless Realization(센서리스 실현), Two - Degree - of - Freedom Controller(2자유도 제어기)

Abstract

In this paper, we present a magnetic levitation system which has not a gap sensor with sensorless realization and stabilizing controller design. For measuring gap between magnet and levitated object, we propose a gap sensorless method and adopt two-degree-of-freedom controller for robustness and performance of the magnetic levitation system. Form time responses, we confirm that the proposed sensorless method which can be applied to magnetic levitation system. Also the designed stabilizing controller has good disturbance rejection and reference tracking performance.

1. 서 론

비접촉상태로 물체를 부상시키는 자기 부상계는 마찰이나 열등의 발생이 적어 고속 회전 기기나 운송시스템 등 여러 분야에 적용되고 있다. 그런데 흡인식 자기 부상계는 본질적으로 불안정 시스템이므로, 원하는 위치에 물체를 부상시키기 위해서는 위치 정보를 이용하여 시스템을 안정화하는 피드백 제어기가 요구되며¹⁾, 이 때 변위 측정을 위

해서 와전류식, 광학식, 캐패스턴스형 등의 변위 센서가 주로 이용된다^{2) 4)}.

변위센서를 갖는 자기 부상 제어계는 경제적으로 고가이고, 센서의 고장으로 인하여 제어계에 심각한 문제들을 발생시킬 수 있으며, 시스템 구조상의 제약이나 센서 크기 등으로 인하여 위치 검출점과 제어점이 불일치하게 되는 경우가 발생함으로써 제어 성능과 내부 안정성에 악영향이 나타날 수도 있다. 자기부상 제어계에 있어 변위센서를 사용

* 정회원 경남정보대학 제어시스템 정보과(원고접수일 : 98년 9월)

** 정회원 부경대학교 제어기계공학과

한 경우의 단점을 보완하는 변위 추정에 대한 연구^{51~53)}가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 저자 등이⁷⁾ 발표한 바 있는 자기 부상계의 센서리스 방법을 이용하여 자기 부상계의 로버스트 서보 제어계를 설계한다. 이때 설계될 제어기로는 시스템의 내부안정성과 불확실성에 대해 H_∞ 제어 이론을 사용한 피드백 제어기와 기준입력의 명령추종특성을 위한 피드포워드 제어기를 갖는 2자유도 제어기이다.

구성된 자기 부상 제어계에 대해, 센서를 사용한 자기부상 실험과 본 연구에서 제안한 센서리스 방법에 의한 자기 부상 실험을 수행한다. 그리고 실험 결과로부터 제안한 센서리스 방법의 타당성을 검토하고, 향후 자기 베어링과 같은 장치에 적용 가능성을 조사한다.

2. 센서리스 자기 부상 제어계 구성

Fig. 1은 센서리스 자기 부상계의 전체적인 구성을 보여주는 블록선도이며, 증첩회로, 전자석, 검출회로 및 제어기로 구성되어 있다. 여기서 증첩회로는 제어기로부터 출력된 제어입력에 대응한 PWM 신호와 변위성분을 추정하기 위한 반송파 PWM신호를 증첩하여 전자석에 가하는 전력 증폭회로까지를 말하며, PWM과 발생회로와 전력 증폭회로로 구성된다. 또한 검출회로는 전자석에 흐르는 반송파의 전류성분만을 추출하는 회로에서 제어기가 읽어 들일 수 있는 직류로 변환하는 직류 변환회로까지를 말하고, 대역통과필터, 실효치-직류변환회로, Pick-up & Hold회로로 구성되어 있다. 제어기는 퍼스널 컴퓨터에 A/D, D/A변환기

를 정착한 것으로, 제어 알고리즘을 계산하여 제어 입력을 출력시킨다.

Fig. 1의 자기 부상계에 있어 모델링, 제작 및 파라미터의 추정에 관해서는 문헌⁸⁾에 나타나 있으며, 센서리스에 관한 이론적 배경과 회로구성에 관해서는 문헌⁹⁾에 나타나 있다. Fig. 1에서 전자석에 강해지는 전압 e 를 제어 입력, 전자석과 부상체 사이의 간극 중 평행점에서의 미소변화분 y_p 를 출력으로 했을 때, 제어 대상의 상태 공간 표현은⁹⁾

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

와 같이 표현된다.

여기서,

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

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{Y_\infty + Y}{Q + L_0(Y_\infty + Y)} \end{bmatrix}, C = [100], D = [0] \text{ 이다.}$$

Table 1은 자기 부상계에서 평형점을 0.6[mm]로 하였을 때 자기 부상계의 공칭값이다. Table 1에 기술된 파라미터 값을 자기부상 시스템의 상태공간 식(1)에 대입하여 정리하면 각 행렬의 계수값은

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

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 35.3294165 \end{bmatrix}, C = [100], x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$$

Table 1 Parameter values

Parameters	Max. value	Nominal value	Min. value
$Q[Hm]$	1.87546×10^{-3}	1.704304×10^{-3}	1.58754×10^{-3}
$L_0[H]$	10.04199×10^{-3}	9.40199×10^{-3}	8.901999×10^{-3}
$R[\Omega]$	13.2	12.14	11.58
$Y_\infty[m]$	3.56274×10^{-1}	3.016043×10^{-1}	2.66274×10^{-1}
$M[kg]$	0.30	0.254	0.20
$I[A]$	0.47	0.42	0.37
$y_p[m]$	0.70×10^{-2}	0.60×10^{-2}	0.50×10^{-2}

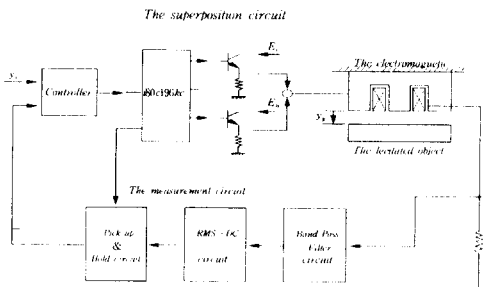


Fig. 1 Block diagram of the proposed self-sensing method

로 된다.

3. 자기부상 제어계의 2자유도 제어기 설계

다음식으로 기술되는 선형 제어계 $\Sigma(C, P)$ 을 생각해 보자.

$$y = Pu, \quad u = C \begin{bmatrix} r \\ y \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 P 는 제어대상, C 는 목표치 r 과 제어대상의 출력 y 등의 정보를 이용하여 제어입력 u 를 계산하는 일반적인 2자유도 제어기이다. 이때 다음의 결과가 알려져 있다¹⁰⁾.

주어진 제어대상과 제어기를 P, C 라 하면 선형 제어계 $\Sigma(C, P)$ 를 내부 안정화하는 모든 2자유도 보상기는 아래와 같이 표현된다.

$$C = [P^{-1}F + K_b F - K_b] \quad (3)$$

여기서 F, K_b 는

$$F \in RH_{\infty}, \quad P^{-1}F \in RH_{\infty} \quad (4)$$

$$K_b = \Omega(P) \quad (5)$$

이며, $\Omega(P)$ 는 페루프계 $y = Pu, u = K_b y$ 를 내부 안정화하는 제어기의 집합이다.

2자유도 제어기 C 를 설계하는 것은 식 (4), (5)의 조건하에서 (F, K_b)를 설계하는 것과 동가인 것을 알 수 있다. Fig. 2는 (F, K_b)를 이용하여 선형 제어계 $\Sigma(C, P)$ 를 표현한 2자유도 제어계의 블록선도이다¹¹⁾.

3.1 피드백 제어기 설계

2자유도 제어계에 있어 양호한 피드백 특성을

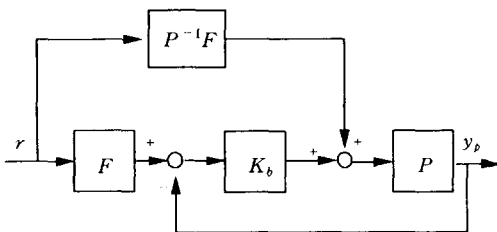


Fig. 2 Two-degree-of-freedom control system

얻기 위해 H_{∞} 제어이론 중 혼합감도 문제로 피드백 제어기 K_b 를 구한다. 여기서 감도함수 $S(s)$ 에 대한 주파수 하중함수 $W_s(s)$ 는 양호한 저감도 특성을 갖도록 하기 위하여

$$W_s(s) = 10 / (10.97620 \times s + 1) \quad (6)$$

와 같은 1차 하중함수로 선정하였다.

상보감도함수 $T(s)$ 에 대한 주파수 하중 $W_t(s)$ 는 아래와 같은 제어대상의 정보를 이용한다.

① 전달함수 $P(s) (= P(s)_{nom})$ 의 분모와 분자의 상대적 차수가 3인 것.

② 공칭 플랜트 $P(s)_{nom}$ 에 대한 곱셈형 섭동 (Multiplicative perturbation : Δ_{mpl})이 아래식을 만족할 것.

$$\Delta_{mpl}(s) = (P_{real} - P_{nom})P_{nom}^{-1} \quad (7)$$

$$\bar{\sigma}(\Delta_{mpl}(j\omega)) \leq |W_t(j\omega)| \quad (8)$$

이 때 제어대상에서 파라미터 변동에 대한 최대값 및 최소값은 Table 1에 있으며, 식 (8)에 있는 주파수 응답으로부터 상보감도함수 $T(s)$ 에 대한 주파수 하중함수 $W_t(s)$ 는

$$W_t(s) = (0.01061033 \times s + 1) (0.000353 \times s + 1) (0.0002122 \times s + 1) / 7 \quad (9)$$

와 같이 선정하였다.

이렇게 선정된 주파수 하중함수 식 (6), (9)를 가지고 Glover - Doyle의 알고리즘¹²⁾을 이용하여 구한 피드백 제어기 $K_b(s)$ 는

$$K_b(s) = \frac{-10^8 \times (6.865s^3 + 3761s^2 + 4.096 \times 10^3s + 5.605 \times 10^6)}{s^4 + 7909s^3 + 1.617 \times 10^7s^2 + 5.371 \times 10^8s + 4.892 \times 10^8} \quad (10)$$

로 된다.

3.2 피드포워드 제어기 설계

3.1절에서 설계한 피드백(Feedback) 제어기 $K_b(s)$ 와 더불어 제어량이 목표값을 잘 추종하도록 피드포워드(Feedforward) 제어기 $F(s)$ 를 설계한다. Fig. 2에서 입력 r 로부터 출력 y 까지의 전달함수 $G_{yr}(s)$ 은

$$G_{yr}(s) = F(s) \tag{11}$$

로 된다.

식 (11)로부터 피드백 제어기 $K_b(s)$ 는 입력 r 로부터 출력 y 에 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 한편 피드포워드 제어기 $F(s)$ 는 피드백 특성에 영향을 주지 못한다. 또한 제어기의 안정성을 보장하고 정상편차를 없애기 위해 피드포워드 제어기 $F(s)$ 는

$$P^{-1}(s)F(s) \in RH_{\infty} \tag{12}$$

$$F(0) = I \tag{13}$$

을 만족해야 한다.

본 절에서는 자기 부상계의 분모 분자의 상대적 차수가 3차임에 유의하여 피드포워드 제어기 $F(s)$ 를

$$F(s) = \frac{\alpha}{(s + \alpha)} \tag{14}$$

와 같이 3차로 선정하였다. 식 (14)에 있는 α 의 값은 20으로 선정하였다.

4. 응답실험

3절에서 설계된 제어기로써 센서리스 자기 부상계와 센서를 사용한 자기 부상계의 응답 실험을 병행하였다. 이때 디지털 제어기는 연속계와 이산계 사이의 신호 변환을 위하여 12비트의 A/D, D/A 변환기를 내장한 IBM-PC 486이다. 또한 샘플링

주기는 A/D, D/A 변환기 내의 카운터를 이용하여 하드웨어 인터럽트 방식으로 설정되었다. 센서를 사용한 자기 부상 제어계와 센서리스 자기 부상 제어계 각각에 대하여 공통적으로 아래의 두 가지 경우로 나누어 자기 부상계의 응답실험을 행하기로 한다.

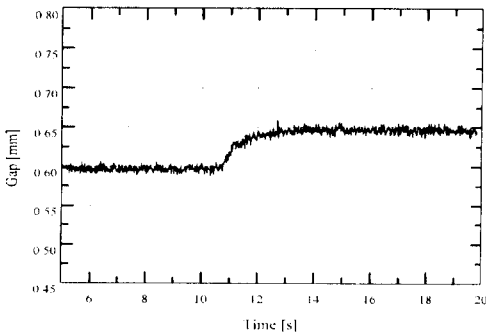
(case A) : 명령 추종 성능을 조사 하기위해 계단상으로 부상위치를 변경한다.

(case B) : 외란제거 성능을 알아보기 위해 부상체가 평형점에 있을 때 외란을 가한다.

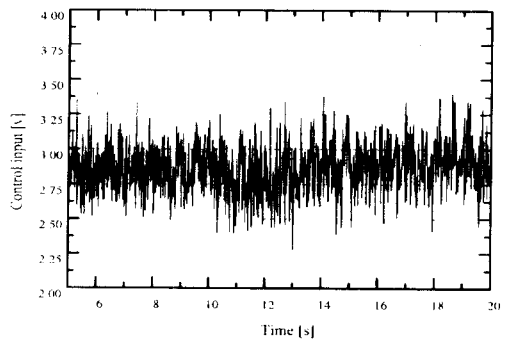
이때 case A의 경우에 있어서 기준위치 변경신호는 컴퓨터 내에서 소프트웨어로 구현하였다. 또한 Fig.*(a)는 전자석과 부상체사이의 간극에 대한 응답이고, Fig.*(b)는 로버스터 제어기에서 계산된 제어입력을 나타낸다.

먼저 Fig. 3~Fig. 4는 (case A)에 해당하는 경우로서 자기 부상계의 부상체가 안정하게 부상된 후 편차없이 기준위치로 수렴하는가를 알아보기 위해 부상위치를 0.60 → 0.65[mm]로 변경한 경우의 응답특성이다. 이로부터 오버슈트의 크기, 정정시간, 기준입력에 대한 추종성 등의 모든 성능면에서 센서리스화 방법에 의한 경우와 센서에 의한 경우 모두 양호한 응답을 보이고 있음을 알 수 있다.

다음으로 Fig. 5~Fig. 6은(case B)에 해당하는 경우로서 기준위치가 0.60[mm]일 때 각각 외란을 자기 부상계의 입력측에 가한 경우의 응답특성이다. 이때 자기 부상계의 가해지는 외란의 크기는 부상체가 부상된 후 약 1[sec]동안 제어 입력에

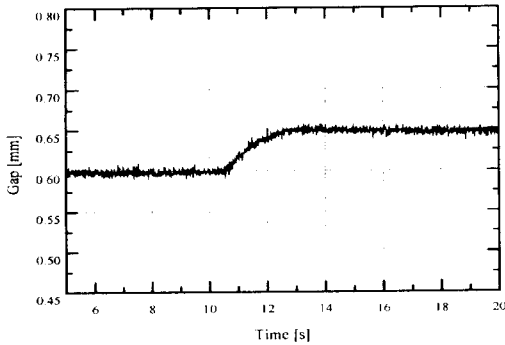


(a) The gap y_p

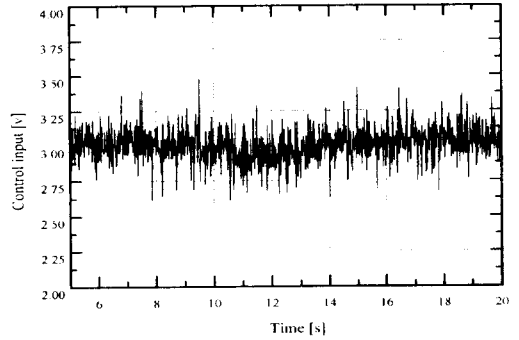


(b) Control input u

Fig. 3 Step response by sensorless method

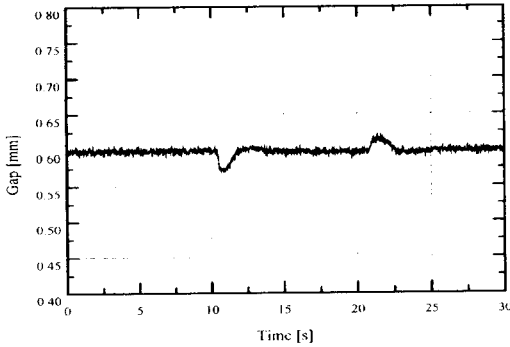


(a) The gap y_p

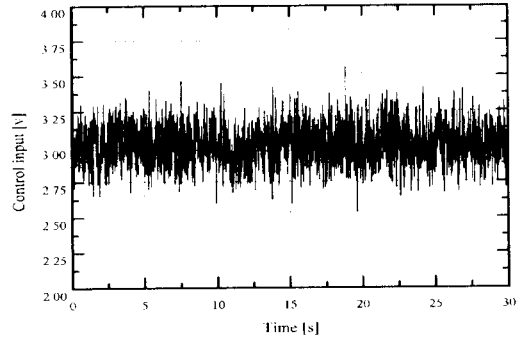


(b) Control input u

Fig. 4 Step response by sensor

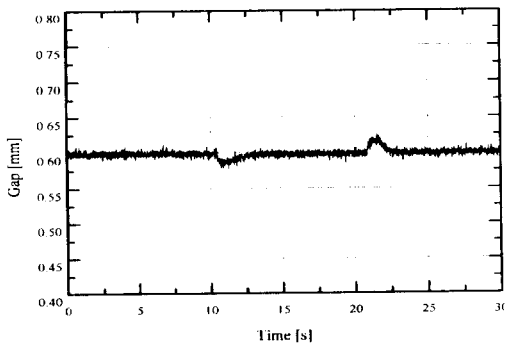


(a) The gap y_p

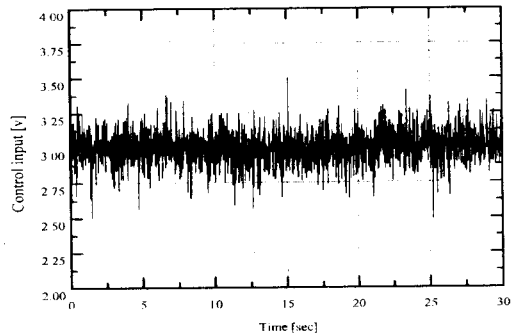


(b) Control input u

Fig. 5 Transient response against disturbance (using sensorless : Reference position = 0.60[mm])



(a) The gap y_p



(b) Control input u

Fig. 6 Transient response against disturbance (using sensor : Reference position = 0.60[mm])

0.15[V]를 부가한 것이다.

실험결과로부터 두 경우 모두 양호한 외란제거 성능을 가지고 있음을 알 수 있고, 센서리스의 경

우 초기에 외란이 가해진 경우에 부상체의 위치가 조금 더 하강하고 있음을 보이지만 정상상태에서는 기준입력을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 자기 부상계의 센서리스 방법을 제안하고 변위를 추정하였다. H_∞ 제어 이론에 따라 내부 안정성 및 불확실성을 고려한 피드백 제어기와 명령 추종성을 위한 피드 포워드 제어기를 갖는 2자유도 제어기를 설계하여 자기 부상 제어계를 구성하였다. 이렇게 구성된 자기 부상 제어계에 대해 센서를 사용했을 때의 응답실험과 제안한 센서리스 방법을 이용했을 때의 응답실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 부상체의 기준위치를 변경하 경우, 과도상태에서는 오버슈트가 발생하지 않았으며, 정상 상태에서는 편차 없이 기준위치로 수렴하고 있어 설계한 제어계는 기준입력에 대한 양호한 추종특성을 발휘하였다. 또한 정상상태에서 외란을 가한 경우 설계된 제어계는 외란 제거 특성을 가지고 있었다.
- 2) 2자유도 제어기를 사용한 자기 부상계에 있어서, 센서에 의한 응답과 센서리스에 의한 부상실험 결과에 차이가 없었다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 센서리스 기법을 자기 부상계에 적용할 수 있음을 확인하였고, 자기부상 제어계를 구성할 때 센서 사용에 따른 구조적인 제약이나 센서 구입 비용을 줄일수 있다고 생각된다.

참고문헌

- (1) 野波, "磁氣浮上磁氣軸受制御の現況と制御", 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.6~36, 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, "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, 1979
- (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 Int'l 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 Int'l Symp. on Magnetic Bearing, pp.176~183, 1992
- (7) 김창화, 양주호, "인덕턴스 특성을 이용한 자기 부상계의 부위 측정의 한 방법에 관한 연구," 한국소음진동공학회지, 제6권 제3호, pp.357~362, 1996
- (8) 김창화, 김영복, 양주호, "센서리스 자기부상계의 제어계 설계에 관한 연구" 한국소음진동공학회 추계학술대회, pp.175~181, 1996. 11
- (9) 김창화, 하영민, 심성효, 양주호, "자기부상계의 변위추정 회로설계에 관한 연구," 한국동력기계공학회, Vol.1. No.1, pp.144~153, 1997
- (10) Hara, S, and T. Sugie, "Independent parameterization of Two-Degree-of-Freedom compensators in general robust tracking systems," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-33, No. 1, pp.59~67, 1988
- (11) 藤崎泰正, 池田雅夫, "2自由度積分型サボ系構成," 日本計測自動制御學論文集, Vol. 27, No.8, pp.907~914. 1991
- (12) Clover, K. and Doyle, J. C., "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.

저 자 소 개



김창화(金昌和)

1965년 12월생. 1991년 2월 부산수산대학교 졸업. 1993년 2월 부산수산대학교 대학원 졸업(석사). 1997년 2월 부경대학교 대학원 졸업(박사). 1997년 3월~현재 경남정보대학 제어시스템정보과 교수, 당 학회 회원



양주호(梁注鎭)

1953년 10월생. 1977년 2월 부산수산대학교 졸업. 1980년 2월 부산수산대학교 대학원 졸업(석사). 1988년 2월 한국해양대학교 대학원 졸업(박사). 1980년 3월~1988년 2월 경남전문대학 교수. 1988년 3월~현재 부경대학교 제어기계공학과 교수, 당 학회 회원, 편집위원