

## 상전도 흡인식 자기 부상 시스템의 적용 제어 부하 예측기를 이용한 가변 구조 제어기 설계

이상빈, 이정옥, 이인호, 유지윤  
고려대학교 대학원 전기공학과

### Variable Structure Control of an Electromagnetic Suspension Sys Using Adaptive Load Estimation

Sang-Bin Lee, Jeong-Uk Lee, In-Ho Lee, Ji-Yoon Yoo  
Dept. of Electrical Eng., Korea University

**Abstract** - In this paper, adaptive variable structure control is proposed for Electromagnetic Suspension(EMS). Although variable structure control shows excellent robustness to unstructured modelling uncertainty, such as flux leakage and saturation, it has several drawbacks that severely limit practical applicability such as high control activity and control chattering. To minimize these effects, the mass of the electromagnet and efficiency of levitation force are estimated on-line to reduce the range of system uncertainty.

The effectiveness of the proposed control scheme is verified by experimental results using a 1.5kg electromagnet and DSP (TMS320C31).

#### 1. 서 론

지금까지 비선형 시스템인 자기 부상 시스템의 부상 제어기로서 동작점에서의 선형 근사화 방법과 비선형 궤환 선형화가 많이 연구되었다[1]. 자기 부상 시스템은 자속의 포화나 누설 성분 등으로 인해 정확한 모델링이 힘들기 때문에, 정확한 모델이 요구되는 위의 두 가지 방법 모두 성능에 한계를 가지게 된다. 특히, 전자는 동작점 부근에서만 선형 특성이 보장된다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 시스템의 응답이 모델의 불확실성이나 외란 등에 대해 강한 특성을 가지는 가변 구조 제어기를 사용하였다[2]. 가변 구조 제어기는 강인성을 가지는 반면 여러가지 문제점을 가진다. 슬라이딩 평면에 도달하기까지의 리칭 모드에서는 강인성을 보장받을 수 없으며, 불연속 제어 입력으로 인해 제어 입력의 변동폭이 크고, 채터링을 일으키게 된다. 이것은 모델링 과정에서 생략된 고주파 특성을 유기할 수 있으며, 고주파 진동, 소음의 원인이 되기 때문에 가변 구조 제어기에서 가장 큰 문제이다.

이러한 문제들의 영향을 줄이고자, 본 논문에서

는 적분항이 첨가된 슬라이딩 평면을 사용하여 리칭 모드를 제거하고자 한다. 또한, 시스템의 불확실성의 범위를 줄여서 불연속 제어 입력의 폭과 채터링을 줄이기 위해 부상체의 질량 및 부상력의 효율을 적용 제어 기법을 사용하여 추정하는 방법을 사용하고자 한다.

제안된 전체 제어기의 구현을 위해 DSP (TMS320C31)를 사용하고, 시제작한 1.5kg의 전자석을 이용한 실험을 통하여 제안한 방식의 우수성과 타당성을 입증한다.

#### 2. 이상적인 자기 부상 시스템의 모델

그림 1은 시제작한 자기 부상 시스템의 모형이다.

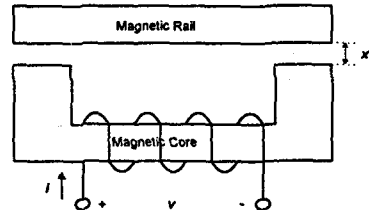


그림 1 시제작한 상전도 흡인식 자기 부상 시스템 식(1)은 중력 방향으로 작용하는 힘을 중력 가속도에 의한 힘과 전자석에서 발생하는 부상력의 차로 나타낸 힘의 방정식이다.

$$m\ddot{x} = mg - \frac{B^2 A_e}{\mu_0} \quad (1)$$

여기서,  $m$ 은 부상체의 질량[kg],  $g$ 는 중력 가속도 [ $m/s^2$ ],  $B$ 는 자속 밀도[T],  $A_e$ 는 전자석의 단면적 [ $m^2$ ]이다. 식(2)의 자속 밀도와 전류( $i$ ), 공극( $x$ )과의 관계식을 이용하면 식(3)과 같은 상태 방정식을 이끌어낼 수 있다. 여기서,  $N$ 은 코일의 턴수이다.

$$B = \frac{\mu_0 Ni}{2x} \quad (2)$$

$$\ddot{x} = g - \frac{\mu_0 A_e N^2}{4mx} i^2 \quad (3)$$

### 3. 제어기 설계

본 논문의 제어기는  $i^2$  을 입력으로 하는 공극 제어기와 여기서 계산된 전류 기준치를 추종하도록 하는 PI 전류 제어기를 직렬로 연결하여 구성하였다. 이와 동시에  $\eta_f/m$ 를 추정하여 시스템에 대한 정보를 얻었다. 전체 제어 블록도는 그림 2와 같다.

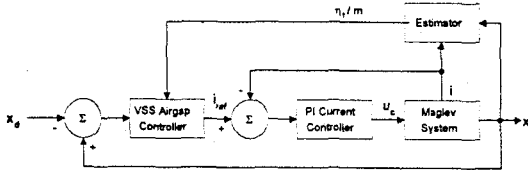


그림 2 전체 제어 블록도

#### 3.1 제어를 위한 자기 부상 시스템의 모델

실제의 자기 부상 시스템은 수식적으로는 표현하기 힘든 자속의 누설과 포화에 의한 부상력의 손실분( $f_{loss}$ )이 존재한다. 이를 고려한 모델은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. ( $f$ : 부상력)

$$\ddot{x} = g - \frac{f - f_{loss}}{m} = g - \frac{f - f_{loss}}{f} \frac{f}{m} \quad (4)$$

$(f - f_{loss})/f$ 를 부상력의 효율  $\eta_f$ 라 정의하고, 우변의 두 번째 항을 입력과 나머지 부분으로 식(5)와 같이 놓으면 식(6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$b(x) = \frac{\eta_f \mu_0 A N^2}{4 m x^2}, \quad u = i^2 \quad (5)$$

$$\ddot{x} = g - b(x) u \quad (6)$$

여기서  $b(x)$ 는 부상체의 질량 변화, 자속의 손실분의 영향이 나타나는 부분으로 그 최대, 최소값을 (7)과 같이 설정하고,  $b(x)$ 의 공칭값은 최대, 최소값의 기하 평균으로 놓는다. (식(8))

$$0 < b_{\min}(x) \leq b(x) \leq b_{\max}(x) \quad (7)$$

$$\hat{b}(x) = \sqrt{b_{\min}(x) b_{\max}(x)} \quad (8)$$

#### 3.2 적분 보상형 가변 구조 제어기 설계

모든 상태 오차( $\tilde{x}, \tilde{\dot{x}}$ )의 선형 조합으로 주어지는 스위칭 함수 S는 초기값으로 인한 리칭 모드가 존재하여 리칭 모드시 강인성을 보장받을 수 없게 된다. 이를 제거하기 위해 식(9)와 같이 적분항을 추가한 스위칭 함수를 사용한다.

$$S(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^2 \int_0^t \tilde{x}(\tau) d\tau \quad (9)$$

적분항의 초기치는 S가 슬라이딩 평면에서 시작되도록 식(10)과 같이 결정한다.

$$S(x, 0) = \tilde{x}(0) + 2\lambda\tilde{x}(0) + \lambda^2 I(0) = 0 \quad (10)$$

$$I(0) = -2\tilde{x}(0)/\lambda$$

적분항을 스위칭 함수에 포함시킴으로써 과도 상태 응답 개선 외에도 경계층 사용으로 인한 정상 상태 오차도 줄일 수 있다.

#### 3.3 제어 입력 설계

가변 구조 제어에서 제어 입력은  $\hat{b}(x)$ 를 실제 값으로 가정할 때의 입력인 연속 제어 입력( $u_{equ}$ )과 강인성을 갖도록 해 주는 불연속 제어 입력( $u_{var}$ )으로 이루어지며, 식(11)의 형태를 가진다.

$$u_{equ} = (g + 2\lambda\tilde{x} + \lambda^2\tilde{x}) / \hat{b} \quad (11)$$

$$u_{var} = -k \cdot \text{sat}(S) / \hat{b}$$

$u_{var}$ 을 결정할 때는 S가 항상 슬라이딩 평면으로 향하도록 해줌으로써 슬라이딩을 보장하는 식(12)의 슬라이딩 조건을 만족하도록 결정한다.

$$s\dot{s} \leq -\eta|s| \quad (12)$$

그 결과, k의 범위는 식(13)과 같이 결정된다.

$$k \leq -(\hat{b}/b)\eta - |(\hat{b}/b) - 1| |g + 2\lambda\tilde{x} + \lambda^2\tilde{x}| \quad (13)$$

#### 3.4 적응 제어 알고리즘을 이용한 $\eta_f/m$ 추정

시스템의 불확실한 정도가 클 경우에 제어 입력의 변동폭도 커지게 된다. 경계층의 폭을 크게 할수록 채터링을 감소시킬 수는 있지만, 강인성이 떨어지게 된다. 큰 부하 질량의 변화에 대해서도 안정되게 동작하게 하기 위해서는 식(7)의 범위가 커져 성능이 크게 저하된다. 따라서, 시스템의 불확실성의 범위를 최소화하기 위해  $\eta_f/m$ 를 추정한다.

상태 변수와 파라미터의 추정값과 실제값의 오차를 각각  $\varepsilon = \dot{x} - \hat{\dot{x}}$ ,  $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ 와 같이 놓으면, 추정하려는 식은 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\tilde{x}} = g - \hat{f}\tilde{\theta} - Q\varepsilon \quad (PQ = -Q) \quad (14)$$

비선형 시스템에서 파라미터를 추정하는 알고리즘[3]을 이용하여 Lyapunov candidate(식(17))의 미분이 negative semi definite가 되도록 하는 적응 법칙은 식(15)와 같다.

$$\dot{\hat{\theta}} = -\Gamma f P \varepsilon \quad (15)$$

식(15)를 이용하면  $\dot{\theta} = 0$ 이 만족될 때,  $\varepsilon$ 과  $\tilde{\theta}$ 가 0으로 수렴함을 보장할 수 있다. 그러나,  $\eta_f/m$ 의 변화량은 0이 아니며 무시할 수 있을 만큼 작지 않으므로 식(15)를 사용하였을 때의 시스템의 응답을 예측하기가 힘들다. 따라서,  $\varepsilon$ 과  $\tilde{\theta}$ 가 항상 bound되어 있음이 보장되는 새로운 적응 법칙( $\sigma$ -modification)[3]인 식(16)을 사용한다.

$$\dot{\hat{\theta}} = -\Gamma f P \varepsilon - \sigma' Q P^{-1} \hat{\theta} \quad (0 < \sigma' \leq 1) \quad (16)$$

식(16)을 사용하였을 때의 안정도를 해석하기 위해 식(17)과 같은 Lyapunov candidate을 고려한다.

$$V = P\varepsilon^2/2 + \Gamma^{-1} \tilde{\theta}^2/2 \quad (\Gamma > 0) \quad (17)$$

식(17)의 미분으로부터 식(18)을 이끌어낼 수 있고, 이로부터 식(19)와 같이  $V(t)$ ,  $\varepsilon(t)$ ,  $\tilde{\theta}(t)$ 가 bound됨을 보일 수 있다.

$$\dot{V}^{1/2} \leq -\frac{\sigma' Q V^{1/2}}{P} + \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{\sigma' Q \theta}{\Gamma^{1/2} P} + \frac{\dot{\theta}}{\Gamma^{1/2}} \right) \quad (18)$$

$$\leq -\alpha V^{1/2} + \beta$$

$$V^{1/2}(t) \leq V(t_0)^{1/2} e^{-\alpha(t-t_0)} + \frac{\beta}{\alpha}(1 - e^{-\alpha(t-t_0)}) \quad (19)$$

$$|\epsilon| \leq \sqrt{2} P^{-1/2} V^{1/2}, \quad |\bar{\theta}| \leq \sqrt{2} \Gamma^{-1/2} V^{1/2}$$

식(19)에서  $\epsilon$ 과  $\bar{\theta}$ 의 범위가 작도록  $P, Q, \Gamma, \sigma$ 를 선정한다. 식(4)와 (14)로부터 오차 동특성을 식(20)과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = -f\bar{\theta} + Q\epsilon \quad (20)$$

식(20)으로부터  $\epsilon$ 이 0으로 수렴할 경우에  $f \neq 0$ 이므로, 추정된 파라미터  $\hat{\theta}$ 는  $\eta_f/m$ 가 됨을 알 수 있다. 그러나,  $\epsilon$ 과  $\bar{\theta}$ 는 일정 오차내로 bound되어 있으므로, 추정시의 오차를  $b(x)$ 의 범위 결정시 고려해야 한다. 이와 같은 추정 알고리즘을 사용함으로써 시스템의 불확실성의 범위가 크게 감소된다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

본 논문에서 제시된 제어 기법을 구현하기 위한 하드웨어 구성은 그림 3과 같다.

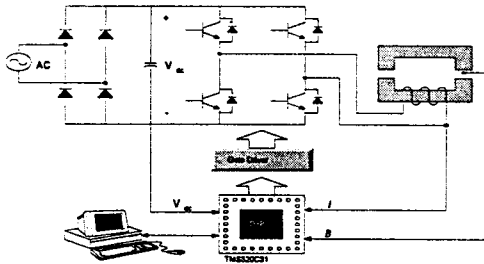


그림 3 하드웨어 구성

그림 4는 스위칭 함수에 적분항을 포함시키지 않고,  $\eta_f/m$ 를 추정하지 않았을 경우의 응답으로 시스템에 대한 정보가 적기 때문에 제어 입력의 변동폭이 크고, 이것이 채터링을 일으키고 있으며, 슬라이딩 평면에 도달하기까지의 리칭 모드가 존재함을 알 수 있다. S에 적분항을 포함시키고,  $\eta_f/m$ 를 추정하였을 경우의 응답은 그림 5에 나타내었다.  $\eta_f/m$ 를 추정하므로 제어 입력의 변동폭이 크게 감소하여 성능이 개선되었으며, 시작부터 스위칭 평면 위에 있기 때문에 과도 상태에서 강인성이 보장

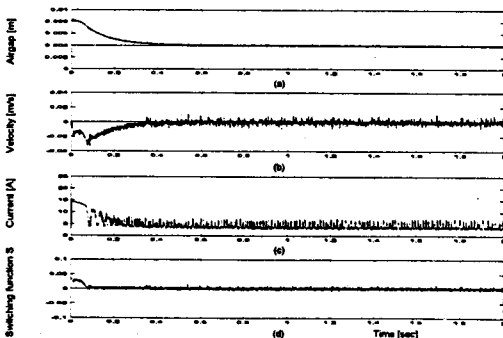


그림 4 가변 구조 제어기의 응답

된다. 그림 6은 부상체의 질량을 1.5→2.0→2.3→2.6→2.3→2.0[kg]으로 변화시켰을 때의 응답이다. 전자식이 크게 포화되도록 하는 큰 부하 질량에 대해서도 안정된 특성을 보임을 알 수 있다.

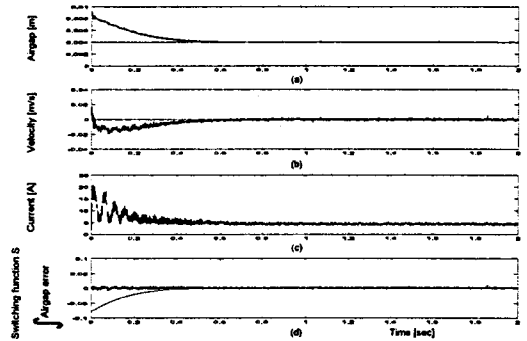


그림 5 적분 보상형 가변 구조 제어기 응답

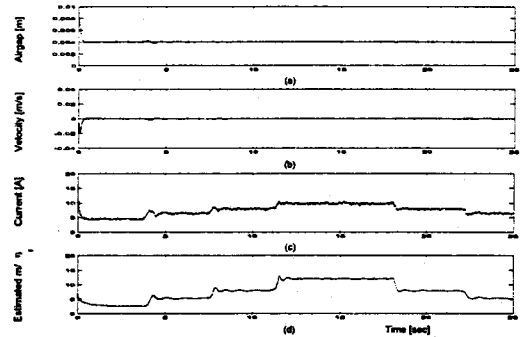


그림 6 부하 질량 변화에 대한 응답

#### 5. 결론

본 논문에서는 비선형 시스템이며 불확실한 모델을 가지는 자기 부상 시스템에 적분 보상형 가변 구조 제어 이론을 적용시켰다. 여기에  $\eta_f/m$ 를 추정하는 알고리즘을 결합함으로써 시스템 불확실성의 범위를 최소화하여 가변 구조 제어의 문제점인 제어 입력의 변동폭과 채터링을 줄이고자 하였다.

실험 결과로부터 제안된 제어기는 안정되고 정밀한 과도 상태 및 정상 상태 응답을 가지며, 큰 부하 변화에 대해 강인한 특성을 가짐을 확인하였다.

#### [참고 문헌]

- [1] Hung J.Y., "Nonlinear Control of a Magnetic Levitation System", Conf. Rec. of IEEE IECON, pp.268-273, 1991.
- [2] Slotine, J.J. & Li, Weiping, "Applied Nonlinear Control", Prentice Hall, 1991
- [3] 윤태용, 윤성식, 남기범, "유도 전동기의 비선형 제어: 지능제어적 접근", 고려대학교 전기공학 과 전기,전자,전과공학부 연구 보고서, 1996. 12.