

# 1축 자기 부상 장치의 비선형 슬라이딩 모드 강인 제어 Nonlinear sliding mode robustness control of Axial Electro-Magnetic suspension system

고유석 (한양대 대학원), 송창섭(한양대 공대), 이강원(한양대 대학원)

You-Seok Koh(Hanyang Univ), Chang-Seop Song(Hanyang Univ), Kang-Won Lee (Hanyang Univ)

## Abstract

In this paper, the nonlinear model of axial electro-magnetic suspension(EMS) system is presented. The characteristic of attraction force is analyzed by FEM. Some simulation is given to compare the sliding mode control based on the input-output linearization with the classical linear control using Taylor approximation. Real result of regulating control, transient response comparison ,and robustness control with disturbance using the sliding mode method is presented.

**Key Words** ; Nonlinear feedback linearization(비선형 피드백 선형화), EMS system(자기 부상장치), Sliding mode control,SMC(슬라이딩 모드 제어)

## 1. 서론

비접촉의 자기력을 사용하는 시스템은 영구자석과 초전도체간의 반발 방식의 것을 제외하고는 불안정한 시스템이며 전자력의 비선형성과 제어가능 영역의 한계등 제어의 어려움이 따른다. 따라서 위의 문제점을 제거하려는 선형함수를 이용한 AMB (Active Magnetic Bearing) device 능동제어에 관한 많은 연구가 되어져 왔다. 그러나, 자기 회로 식과 전기 회로 식을 통한 모델링이 비선형식으로 표현되어져 Taylor 급수에 의한 선형 모델링 제어는 어려움이 따른다. 따라서 비선형모델링의 제어가 필요하다. 근래의 초고속 집적 회로 및 주변 계측기 및 제어 장치의 발달로 인해 다양한 제어 알고리즘이 적용 연구되고 있다. 본 연구에서는 상전도 흡인식 부상 방식의 EMS 시스템을 사용한 전압 입력 방식의 비 선형 모델을 유도하고 슬라이딩 모드 강인 제어를 수행하였다. 연구 구성으로 2장에서는 모델링 유도와 구동원인 전자기력 특성을 전자장 해석 프로그램 Maxwell을 이용하여 해석하였다. 3장에서는 비 선형 제어를 위한 입출력 귀환 선형화(Input-Output feedback linearization)와 오차 방정식의 선형적 수렴을 구현해내고 외란 성분을 감안한 슬라이딩 모드

제어를 적용시켜 시뮬레이션을 하였다. 이를 통해 계인 특성을 분석하고 비선형 모델을 이용한 슬라이딩 모드 제어와 기존 제어방식(PID)과의 비교를 수행하였다. 4장은 실험을 통해 시스템의 특성을 이해하고 제어법칙에 관한 연구를 하였다. 5장은 결론으로 연구 내용을 요약하고 연구 과제를 제시하였다.

## 2. 수학적 모델링 및 해석

### 2.1 1축 자기 부상 시스템의 모델링

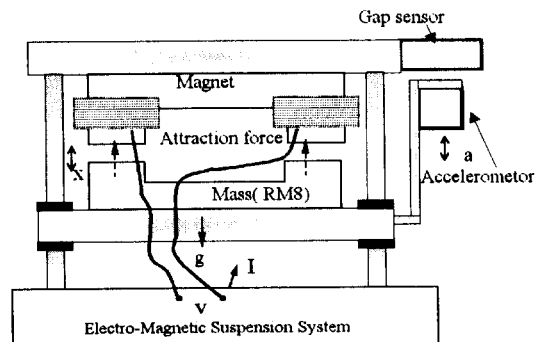


Fig.1 Schematic diagram of EMS system

질량  $M = 1.145$  [kg]  
 절단면 면적  $A = 0.001$  [ $m^2$ ]  
 코일의 DC 저항  $R = 8$  [ $\Omega$ ]  
 코어의 차로 길이  $L_1 = 0.07507$  [m]  
 질량의 차로 길이  $L_2 = 0.106$  [m]  
 진공의 투자율  $\mu_0 = 1.26 \times 10^{-6}$   $H \cdot m^{-1}$   
 질량의 상대 투자율  $\mu_2 = 4000$   
 코어의 상대 투자율  $\mu_1 = 4000$   
 턴수  $N = 480$  ( turns )

$$H_m = \nabla \Phi \quad (2.12)$$

$$\nabla \cdot \mu \nabla \Phi + \nabla \cdot \mu H_s = 0 \quad (2.13)$$

위식에서  $\Phi$ 는 FEM(Finite element method)을 이용하여 구한다. 이를 통해 구해진 B(자계 밀도)와 전자기력 특성을 Fig. 2와 Fig. 3에서 각각 보여준다.

Table 1 Parameters of Axial EMS system

Fig. 1은 1축 EMS 시스템의 개략도를 나타내며 Table 1은 EMS 시스템 제원이다. 여기서

$$\left( \alpha = \mu_0 AN^2, \beta = \frac{L_1}{\mu_1} + \frac{L_2}{\mu_2} \right)$$

자기 에너지식에서 전자기력을 유도하면

$$W = \frac{1}{2} \int B \cdot Hd\Omega = W = \frac{1}{2\mu_0} B^2 Ax \quad (2.1)$$

$$-\frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{\alpha I^2}{M(2x + \beta)^2} = F_{mag} \quad (2.2)$$

$$V = I \frac{dL}{dx} x_v + L \frac{dI}{dt} + RI \quad (2.3)$$

위의 식 (2.2)과 식 (2.3)에 운동 방정식을 적용하여 다음의 상태 방정식을 구한다.

$$\dot{x} = x_v \quad (2.4)$$

$$\dot{x}_v = g - \frac{\alpha I^2}{M(2x + \beta)^2} \quad (2.5)$$

$$\dot{I} = \frac{2x + \beta}{\mu_0 N^2 A} (V - RI) + \frac{2x_v I}{2x + \beta} \quad (2.6)$$

## 2.2 Maxwell 해석

이론식은 다음과 같다.

$$\text{Ampere 법칙} \quad \nabla \times H = J \quad (2.7)$$

$$\text{연속 방정식} \quad \nabla \cdot B = 0 \quad (2.8)$$

$$\text{제량 상호관계} \quad B = \mu H \quad (2.9)$$

$$H = H_m + H_s \quad (2.10)$$

$$\nabla \times H_s = J, \nabla \times H_m = 0 \quad (2.11)$$

$H_m$ 에 스칼라 포텐셜(scalar potential)을 도입한다

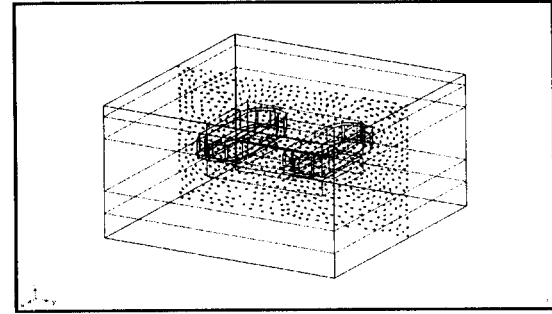


Fig.2 Magnetic flux density distribution

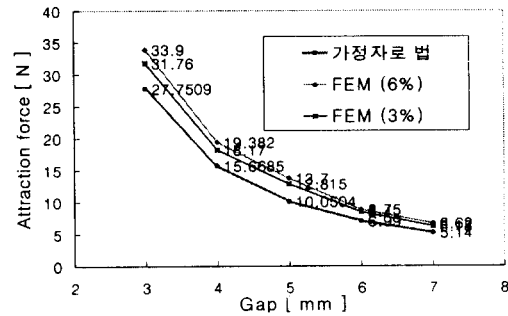


Fig.3 Attraction force - gap relation using FEM and magnetic circuit force method

## 3. 제어기 설계

### 3.1 비선형 모델을 이용한 SMC 제어기 설계

다음과 같이 슬라이딩 서피스를 잡고

$$\hat{x} = x - x_d \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned}
 s &= \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^2 (x - x_d) \\
 &= (\lambda^2 \{x^{(1)} - x_d^{(1)}\} + 2\lambda \{x^{(2)} - x_d^{(2)}\} \\
 &\quad + \frac{-2I}{M(2x + \beta)} \{V - RI\} - x_d^{(3)})
 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Lyapunov function를 정의후 다음과 같이 설정하면

$$V_f = \frac{1}{2} s^2 \quad (3.3)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{1}{2} s^2 = \dot{s} \cdot s \leq -K|s|, (K: \text{양수}) \quad (3.4)$$

$s$ 는 0으로 수렴하고 오차가 사라지게 된다. 스위칭 함수에 경계 조건을 적용한 제어 전압 입력을 설정한다.

$$V = \left\{ K_{sat} \left( -\frac{s}{\phi_b} \right) + \lambda^2 (x^{(1)} - x_d^{(1)}) + 2\lambda (x^{(2)} - x_d^{(2)}) + f(x) - x_d^{(3)} \right\} \frac{1}{-g(x)} \quad (3.5)$$

$$(\because x^{(3)} = f(x) + g(x)V) \quad (3.6)$$

$$f(x) = \frac{2RI^2}{M(2x + \beta)} \quad g(x) = -\frac{2I}{M(2x + \beta)} \quad (3.7)$$

### 3.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 프로그램을 이용하여 Taylor 시리즈 선형 모델 PID(속도 귀환 PI)제어와 비선형 모델 SMC 응답특성을 비교하였다. 비선형 모델의 레귤레이션 제어와 사인 신호에 대한 트래킹 제어에서 PID 제어는 한계가 있었으나 Fig. 5과 Fig. 6에서와 같이 SMC는 모두 구현해 내었다. 특히 Fig. 5에서의 PID 제어 응답 특성은 선형모델의 경우로 빠른 응답 특성과 정상 상태 오차등은 비선형모델 적용의 실패로 나타났다.

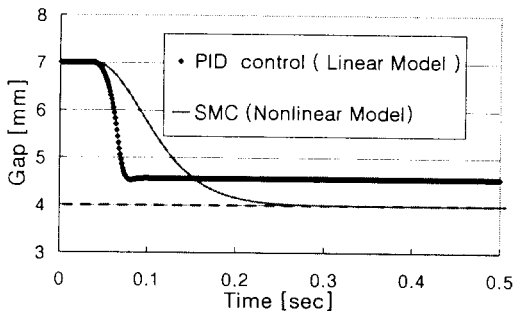


Fig.5 Responses by using PID control and SMC

## 4. 실험

Fig. 7과 같이 갭 프로브와 전류 센서에서 공극,  $x$

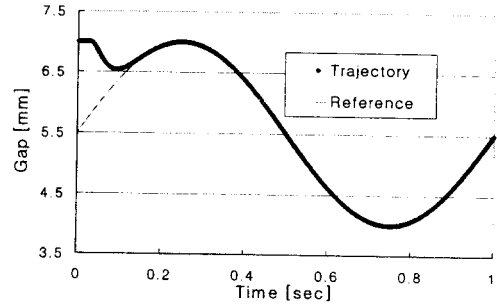


Fig.6 SMC Tracking Control

와 전류,  $I$ 를 가속도계에서 측정된 가속도 성분을 차아지 앰프를 통해 필터링과 적분을 해 속도  $x_v$ 를 DSP 측으로 보낸다. 각 상태 변수가 DSP의 A/D 전환기를 걸쳐 실수 전환이 되어지고 제어 알고리즘을 통해 실제 구동 전압이 연산되어지며 이산화 한 후 D/A 전환기를 통해 PWM 초퍼 앰프로 보내어진다. 이 초퍼 앰프에서 전압 증폭을 하여 EMS 시스템을 구동시킨다. 비선형 모델을 사용한 실시간 SMC 제어를 하기 위해서는 출력전압을 실시간으로 연산해 내어야 하기 때문에 DSP(digital signal processor) Sbc31 모델을 사용하였다. 센서의 대역폭보다 2배 느린 샘플링 시간[0.25 msec]으로 제어를 수행하였다. Fig. 8는 제어시 질량체에 외란을 가했을 때 정상상태 오차안에서 부상을 시키는 것을 보여주고 Fig. 9은 설정 질량 이상을 부가하여 초기 위치에서 일정 위치로 부상시키는 제어 실험을 수행한 결과이다.

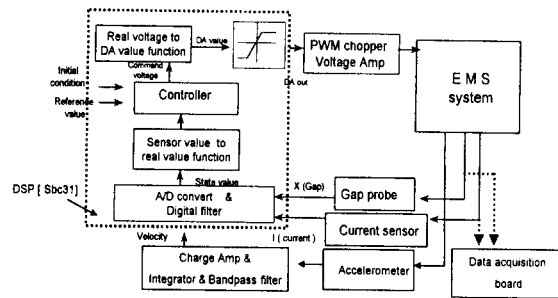


Fig.7 Experimental setup

## 5. 결론

EMS 시스템의 비선형 모델을 유도하고 전자장 해석 프로그램인 Maxwell로 정전자기력의 특성을

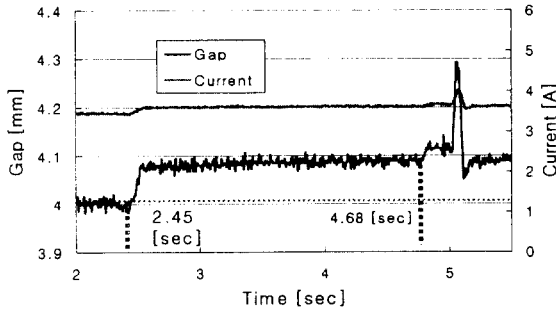


Fig.8 Regulating Control when the external disturbance is applied to levitating mass

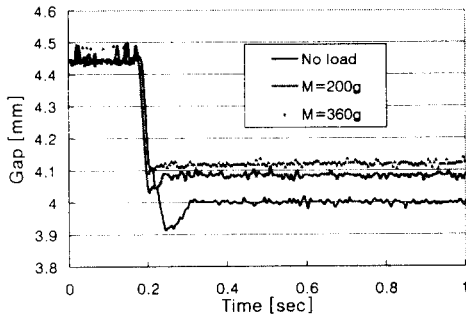


Fig.9 Response variation due to additional mass using SMC

해석하였다. 또한 제어 알고리즘에 적용되는 가정자료법을 FEM과 비교하여 타당성을 입증하였다. 시뮬레이션을 통해 PID 제어와 SMC의 응답 특성을 비교하였다. SMC만이 사인 입력에 대한 트래킹제어를 수행함으로써 각 상태 변수의 측정과 연산을 통해 전압 입력이 적용되는 SMC의 우수함을 보였다. 실험을 통해 SMC는 충격 외란을 극복하는 제어와 설정 질량 이상을 보상시키는 제어를 하였다.

EMS 시스템의 전압 구동식 SMC 실험시 유의해야 할 점은 다음과 같다. 첫째 저항 성분의 피드백 적용이 필요하다. 둘째, 전자기력 연산이 동특성을 감안한 알고리즘의 적용이 필요하다. 셋째, 게인  $K$ ,  $\lambda$ 를 시스템의 특성으로 튜닝하여 오차와 외란을 이겨내는 강인한 제어알고리즘이 적용되어야 한다. 일정 갭에서의 레귤레이션 제어와는 달리 스타팅 부상에서는 시스템의 동특성을 고려한 게인 튜닝이 이루어져야 한다고 본다.

## 참고문헌

1. J.E. Slotine , W. Li, " Applied Nonlinear Control ", Prentice Hall
2. 日本 電氣學會 磁氣浮上 응용 技術調査專門委員會, "磁氣浮上と 磁機軸受", 코로코社
3. Jerome De Miras , Ali Charara , Bernard Caron "Nonlinear Sliding-mode Control of Electromagnetic suspension", 3th Triennial World Congress, San Francisco, USA
4. K. OGUCHI and K.OKADA, " Contactless Starting and Positioning of a Steel Ball in Single-Axis Magnetic Suspension Device by Variable Structure Control", in Proc. 3rd Int. Sym.Magnetic Bearings. pp 60-69. 1992
5. 변지준, 주성준, 서진현, "레일이 유연한 자기부상 장치의 비선형 궤환 선형화 제어기 개발", 전기학회 논문집 44권 1호 1995년 1월
6. 임달호, " 전기계의 유한요소법", 동명사
7. J. F. WHIDBORNE, "EMS Control System Design for a Maglev Vehicle-A Critical System", Automatica. Vol. 29.No 5. pp 1345-1349. 1993
8. J.E. Slotine , W. Li, " Applied Nonlinear Control " Prentice Hall
9. Yu-Sheng Lu and Jian-Shiang Chen "Design of a Perurbation Estimator Using the theory of Variable-Structure System and Its Application to Magnetic Levitation Systems", IEEE TRANSACTION ON INDUSTRIAL ELECTRONICS. VOL.42. NO. 3. JUNE 1995