

자기부상 시스템을 위한 가속율도달법칙기반의 슬라이딩 모드 제어 성능 평가

Performance Evaluation of Sliding Mode Control using the Exponential Reaching Law for a Magnetic Levitation System

문 석 환, 이 기 창, 김 지 원, 박 병 건, 이 민 철*
(Seok Hwan Moon^{1,2}, Ki Chang Lee^{1,2}, Ji Won Kim¹, Byoung Gun Park¹, and Min Cheol Lee^{2,*})

¹Electric Motor Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute

²School of Mechanical Engineering, Pusan National University

Abstract: Magnetic levitation systems using the attraction force of electromagnets have many constraints according to the variation of air gap and the nonlinearity of electromagnetic force and inductances. As a result of these constraints, the nonlinear control of a magnetic levitation system has been improved by the latest advanced processors and accurate measurement system which can overcome problems such as many constraints and nonlinearity. This paper concentrates on the modeling of a nonlinear magnetic levitation system and an application of an exponential reaching law based sliding mode controller using the exponential reaching law which is one of the most robust controllers against external unexpected disturbances or parameter fluctuations. Controllability of a magnetic levitation system using the sliding mode control algorithm and robustness against parameter fluctuations have been verified through the experimental results.

Keywords: magnetic levitation system, ERL (Exponential Reaching Law), SMC (Sliding Mode Control)

I. 서론

자기부상 시스템(magnetic levitation system)은 자기부상열차, 자기베어링, 초고속 회전장치 및 초정밀 반도체 이송장비 등 다양한 산업현장에 널리 사용되어 지고 있다. 이러한 자기부상 시스템은 비접촉 구동 시스템으로서 제어의 정밀도를 높일 수 있으며, 기계적인 마찰 및 소음이 없고, 윤활제가 필요하지 않기 때문에 청정한 환경에서 시스템을 구동시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다[1].

부상력을 이용하는 자기부상 시스템은 공극(air gap)의 변화에 따른 부상력이 비선형성을 가지고 있고, 부상 시스템의 질량, 인덕턴스 등 파라미터의 변화 및 외란에 의한 영향 등 제어시스템의 불안정한 요소들을 가지고 있다. 이러한 요소들에 의한 제어의 불안정성을 극복하기 위해 비선형시스템에 대한 선형화 모델을 이용한 강인제어에 관한 연구가 이루어져 왔다[2-4]. 하지만 자기부상 시스템은 선형화 모델에 의해 제어를 할 경우에는 동작점이 선형화 시킨 단일 동작점에서 벗어나게 될 수 있고 이 경우에는 제어 성능이 현저히 줄어드는 문제를 가지고 있다[5]. 이러한 문제

점들을 해결하기 위해 비선형 제어기법 중 하나인 슬라이딩 모드 제어는 불확실한 동적 시스템을 제어하기 위한 방법으로 넓은 동작범위를 갖는 자기부상 시스템 제어에 적합한 제어방법으로 연구되고 있다[6-8].

하지만 슬라이딩 모드 제어를 실제 시스템에 적용했을 때, 심각한 채터링 현상을 발생시킨다. 따라서 채터링의 주파수 및 크기를 줄이기 위한 방법으로 외란 관측기 및 고차 슬라이딩 모드 제어 등을 이용하는 방법들이 있다[9,10]. 외란 관측기를 이용하는 경우 모델링의 오차를 줄이거나 외란을 보상해 주는 장점이 있으나 관측기의 동특성이나 사용한 필터의 특성에 따라 추정값이 영향을 많이 받는다는 단점이 있다. 고차 슬라이딩 모드 제어를 이용하는 경우 채터링을 저감시키는 효과는 있지만 제어입력에 필요한 보조항을 추가하여야하고 이로 인해 제어기 설계가 복잡해지는 단점이 있다.

슬라이딩 모드 제어는 위상 공간 상에서 시스템의 상태를 스위칭 평면(switching surface)으로 도달시켜 구속하여 강인성을 얻는 비선형 제어기법이다. 슬라이딩 모드 제어 기법 중 하나인 비교적 적용이 쉽고 외란 또는 섭동에 강인한 도달법칙(reaching law)을 이용한 슬라이딩 모드 제어는 상태변수가 스위칭 평면에 도달할 때 도달시간 및 채터링을 줄일 수 있다. 도달 법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어 기법은 정상도달법칙, 비례도달법칙, 가속율도달법칙으로 구분 된다[11]. 본 논문에서는 도달 법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어 기법 중에서 임의의 초기상태에서 스위칭 평면까지의 거리가 먼 경우 스위칭 평면으로의 수렴속도가 비교적 빠르고 채터링이 비교적 적게 발생하는 가속율도달

* Corresponding Author

Manuscript received October 1, 2013 / revised November 6, 2013 / accepted November 25, 2013

문석환, 이기창, 김지원, 박병건: 한국전기연구원 전동력 연구센터 (mshg@keri.re.kr/leekc@keri.re.kr/jwkim@keri.re.kr/bgpark@keri.re.kr)
이민철: 부산대학교 기계공학부(mcllee@pusan.ac.kr)

※ 본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음. 또한 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

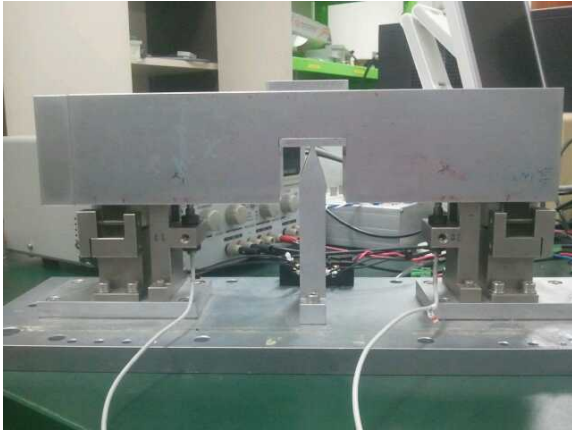


그림 1. 흡인식 자기부상 시스템 시소 실험 모델.
Fig. 1. Seesaw model of electric magnetic system.

법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어 기법을 적용한 제어기를 설계하여 자기부상 시스템에 적용하고자 한다. 제한한 가속도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어 기법의 성능을 평가하기 위해서 그림 1과 같은 흡인식 자기부상 모의 장치인 시소 (seesaw) 형태의 실험 모델을 이용하였으며, 슬라이딩 모드 제어기를 적용한 결과를 일반적인 PID 제어기를 적용한 실험 결과와 비교하여 비선형 제어기인 슬라이딩 모드 제어기를 적용한 결과가 좀 더 넓은 동작범위에서 안정적으로 제어 될 수 있음을 확인하고자 한다.

본 논문의 구성은 II 장에서 자기부상 시스템의 수학적 모델링을 비선형 상태방정식으로 나타내었고 III 장에서는 유도된 비선형 모델을 이용하여 가속도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어기를 설계하였다. IV 장에서는 자기부상 시스템을 묘사하기 위한 실험 장치에 대해 설명을 하였고 가속도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어 기법의 제어 성능을 확인하기 위해 스텝응답, 정현파응답 및 시스템의 질량을 변화시켜 제어기가 동작범위, 파라미터 변화 및 외란에 강인한지를 실험을 통하여 확인하였다. 또한 기존의 제어방식인 PID 제어방식과 결과를 비교 분석하였다.

II. 자기부상 시스템의 수학적 모델링

자기부상 시스템은 부상력 방식에 따라 반발식 부상 (repulsive suspension or electric dynamic system (EDS)) 방식과 흡인식 부상 (attraction suspension or electric magnetic system (EMS)) 방식이 있다[3,12]. 본 논문은 흡인식 자기부상 시스템을 대상으로 하였다. 그림 2는 1자유도에 대한 흡인식 자기부상 시스템의 모델이다. 시스템 모델링에 앞서 누설자속은 없다고 가정하고 자기코어의 릴럭턴스가 공극의 릴럭턴스보다 매우 작다고 가정한 후 흡인식 자기부상 시스템에 대한 수학적 모델링을 비선형 상태방정식으로 유도한다.

그림 2에서 인덕턴스는 부상공극에 따라 변하므로 식 (1)과 같이 표현되며, 흡인력 $F(i, z)$ 는 공극 변화당 자계 에너지의 변화량으로 식 (2)와 같이 유도된다[13]. 부상 전자석의 흡인력은 전류의 공급에 비례하고 공극의 공급에 반비례한다.

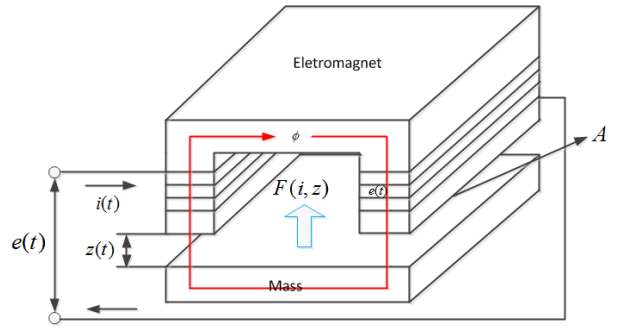


그림 2. 흡인식 자기부상 시스템의 구조.
Fig. 2. Structure of electric magnetic system.

$$L(t) = \frac{\mu_0 N^2 A}{2z(t)} \tag{1}$$

$$F(i, z) = -\frac{dW}{dz(t)} = -\frac{d}{dz(t)} \left(\frac{1}{2} L(t) \cdot i(t)^2 \right) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{i(t)}{z(t)} \right)^2 \tag{2}$$

여기서, μ_0 는 진공 투자율, N 은 코일에 감긴 권선수, A 는 전자석의 단면적, $z(t)$ 는 공극(=부상높이), $i(t)$ 는 전류, W 는 자계에너지이다.

부상 전자석 코일에서 전기적 방정식은 전압과 전류에 의한 전압방정식으로 다음과 같이 표현된다.

$$e(t) = Ri(t) + \frac{d}{dt} [L(t)i(t)] = Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2} \frac{d}{dt} \left[\frac{i(t)}{z(t)} \right] \tag{3}$$

여기서, $e(t)$ 는 전압, R 은 저항이다.

흡인식 자기부상 구조의 전자석의 흡인력과 부상 물체에 대한 일반적인 힘 관계는 그림 3으로부터 식 (4)를 유도할 수 있다.

$$m\ddot{z}(t) = -F(i, z) + f_d(t) + mg \tag{4}$$

여기서, m 은 부상체의 질량이고, $F(i, z)$ 는 식 (2)에서 구한 전자석의 흡인력, g 는 중력가속도, $f_d(t)$ 는 외란이다.

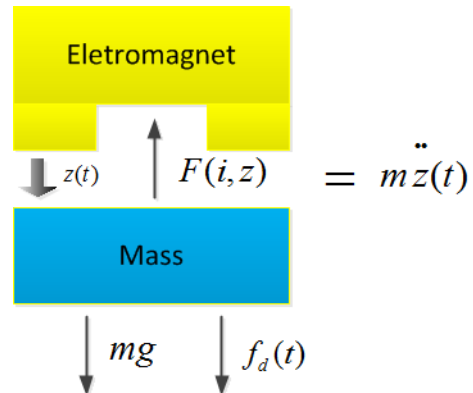


그림 3. 전자석과 부상체간의 힘관계.
Fig. 3. Relationship of the force between electromagnet and mass.

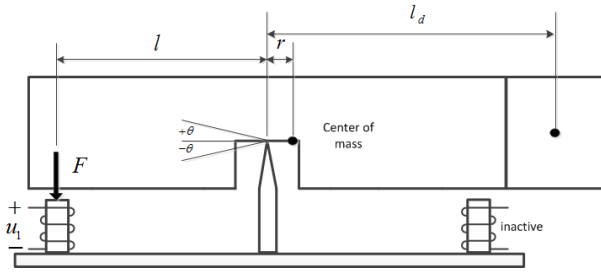


그림 4. 시소 모델에 대한 전자석과 부상체간의 회전운동량의 관계.

Fig. 4. Relationship of the momentum between electromagnet and mass about seesaw model.

본 논문에서는 시소모델을 이용해서 자기부상 구조를 묘사했기 때문에 전자석의 흡인력과 부상물체에 대한 회전운동량(momentum)의 관계는 그림 4로부터 식 (5)를 유도할 수 있다.

$$\ddot{\theta}(t) = -lF(i, z) + l_d \dot{f}_d(t) + mgr \quad (5)$$

여기서, J 는 부상체의 시소중심점을 회전축으로 한 관성모멘트이며, l 은 시소중심점에서 전자석중심점과의 거리, l_d 는 시소중심점에서 부상체중심점과의 거리, r 은 시소중심점과 무게중심점 사이의 거리이다.

시소모델은 회전운동을 하는 구조이기 때문에 식 (5)를 이용하여 상태방정식을 유도하여야하나 회전하는 각도가 $-0.1 \sim 0.1$ 도로 미미하여 힘의 방정식으로 선형근사화시켰을 때 그 차이가 거의 없기 때문에 흡인식 자기부상 시스템의 수학적 모델링을 식 (4)를 이용하여 상태방정식을 유도하였다.

앞에서 구한 식 (1)-(4)를 이용하여 $x_1 = z(t)$, $x_2 = \dot{z}(t)$, $x_3 = i(t)$, $u = e(t)$ 를 상태변수로 정의해서 비선형 상태방정식으로 표현하면

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= g - \frac{\mu_0 N^2 A}{4m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{L(t)} \left\{ \frac{\mu_0 N^2 A}{2} \left(\frac{x_2 x_3}{x_1^2} \right) + u - R x_3 \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

와 같이 된다.

III. 도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어기 설계

1. 부상공극을 제어하기 위한 좌표변환

흡인식 자기부상 시스템의 부상공극을 제어하기 위해 도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어를 적용하기 위해서는 새로운 동적방정식이 필요하다[7]. 부상공극 오차를 Z 로 한 새로운 흡인식 자기부상 시스템의 수학적 모델에 대한 상태변수는 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} Z_1 &= x_1 - x_{1ref} \\ Z_2 &= x_2 \\ Z_3 &= g - \frac{\mu_0 N^2 A}{4m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, x_{1ref} 는 제어하고자 하는 공극(=부상높이)이다.

새로운 상태 변수를 이용하여 상태방정식으로 표현하면 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{Z}_1 &= Z_2 \\ \dot{Z}_2 &= Z_3 \\ \dot{Z}_3 &= f(Z) + g(Z)u \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $f(Z), g(Z)$ 는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$f(Z) = \frac{\mu_0 N^2 A}{2m} \left(\left(1 - \frac{\mu_0 N^2 A}{2L(t)x_1} \right) \frac{x_2 x_3^2}{x_1^3} + \frac{R}{L(t)} \frac{x_3^2}{x_1^2} \right) \quad (9)$$

$$g(Z) = -\frac{\mu_0 N^2 A x_3}{2L(t)m x_1^2}$$

식 (7)-(9)는 다음 장에서 제어기를 설계할 때 이용 될 것이다.

2. 가속도도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어기 설계

도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어는 제어입력을 구하기 위해 식 (10)과 같은 슬라이딩 모드 도달법칙의 조건을 만족하는 스위칭 평면에 대한 동특성식을 선정하여 제어입력을 유도하여야 한다. 여기서 s 는 스위칭 평면을 나타낸다.

$$s \cdot \dot{s} < 0 \quad (10)$$

첫 번째로 제어기를 설계하기 위해서는 스위칭 평면 (switching surface)을 정의하여야 한다. 부상공극의 오차를 $e = x_1 - x_{1ref}$ 로 정의하면 스위칭 평면은 식 (11)과 같이 정의된다.

$$s = \ddot{e} + \lambda_1 \dot{e} + \lambda_2 e = Z_3 + \lambda_1 Z_2 + \lambda_2 Z_1 \quad (11)$$

여기서, λ_1, λ_2 는 설계파라미터이며 양의 실수값이다. 이 값들을 잘 설정해야 시스템이 안정하게 되고 슬라이딩 모드 제어의 문제점인 채터링현상도 줄일 수 있다.

다음은 스위칭 평면의 동특성식을 선정하여야 한다. 가속도도달법칙에 대한 스위칭 평면의 동특성식은 식 (12)와 같이 표현된다.

$$\dot{s} = -W |s|^\alpha \text{sign}(s) \quad 0 < \alpha < 1 \quad (12)$$

여기서, W, α 는 수렴속도와 관계되는 계인이며, 양의 실수값이다.

이 도달법칙의 특성은 초기 상태가 스위칭 평면까지의 거리가 멀 때 스위칭 평면까지의 수렴속도가 빠르게 되고, 스위칭 평면 근처에서는 수렴속도가 감소한다. 결과적으로 고속수렴과 저채터링의 효과를 가져온다. $s = s_0$ 에서 $s_{tr} = 0$ 까지 식 (12)를 적분하면 도달시간 t_r 은

$$\begin{aligned} \int_{s_0}^0 \frac{\dot{s}}{|s|^\alpha} dt &= - \int_{s_0}^0 W \text{sign}(s) dt \\ t_r &= \frac{1}{W} \int_{s_0}^0 |s|^{-\alpha} ds \\ &= \frac{1}{(1-\alpha)W} s_0^{(1-\alpha)} \end{aligned} \quad (13)$$

으로 된다[11]. 식 (13)에서 알 수 있듯이 가속율도달법칙은 α 값에 의해 스위칭 평면 근방에서는 수렴속도가 감소하여 채터링이 저감된다. 하지만 α 값이 1보다 크거나 같을 때 ($\alpha \geq 1$) 도달시간은 무한대가 되어 도달조건을 만족하지 않게 된다.

앞서 구한 식 (7), (8), (9), (11), (12)를 이용하여 고속수렴, 저채터링 효과를 갖는 가속율도달법칙을 이용한 슬라이딩모드 제어의 등가제어입력은 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\dot{s} = -W|s|^\alpha \text{sat}(s) = \dot{Z}_3 + \lambda_1 \dot{Z}_2 + \lambda_2 \dot{Z}_1 = 0$$

$$= f(Z) + g(Z)u$$

$$+ \lambda_1 \left(g - \frac{\mu_0 N^2 A}{4m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \right) + \lambda_2 x_2$$

$$u = \frac{1}{g(Z)} \left[-f(Z) - \lambda_1 \left(g - \frac{\mu_0 N^2 A}{4m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \right) - \lambda_2 x_2 - W|s|^\alpha \text{sat}(s) \right]$$

여기서, $\text{sat}(s) = \begin{cases} +1 & s > \varepsilon \\ s/\varepsilon & |s| \leq \varepsilon \\ -1 & s < -\varepsilon \end{cases}$ 이며, ε 는 경계층의 기울기이다.

또한, 유도된 등가제어입력의 슬라이딩 모드 존재조건을 만족시키기위해 리아프노브 함수 (Lyapunov function)를 이용하였다. 리아프노브 함수를 식 (16)과 같이 선택하기로 한다.

$$V = \frac{1}{2} s^T s$$

이 함수에 대한 식 (17)과 같이 도함수가 음의 한정함수가 되면, 시스템은 안정성을 가지며 전영역에서 스위칭 평면에 도달할 수 있다.

$$\dot{V} = s^T \dot{s} < 0$$

식 (17)에 식 (11), (14), (15)를 대입하여 식 (18)을 유도할 수 있다.

$$\dot{V} = s [f(Z) + \lambda_1 Z_3 + \lambda_2 Z_2 + (-f(Z) - \lambda_1 Z_3 - \lambda_2 Z_2 - W|s|^\alpha \text{sat}(s))] < 0$$

$$= s (-W|s|^\alpha \text{sat}(s)) < 0$$

$$= -W|s| < 0$$

식 (18)에서 알 수 있듯이 유도된 등가제어입력은 스위칭 평면($s=0$)에 수렴된다는 것을 알 수 있고, 또한 슬라이딩 모드 존재조건을 만족한다는 것을 알 수 있다.

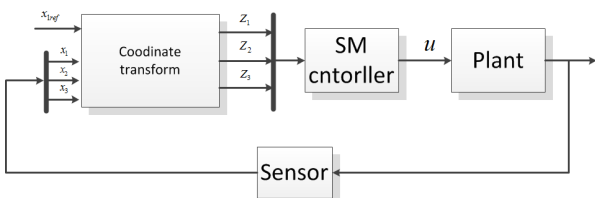


그림 5. 가속율도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어 블록도.
Fig. 5. Block diagram of sliding mode control using ERL.

그림 5는 설계된 가속율도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어의 전체적인 제어 블록도이다.

IV. 실험결과

이 장에서는 실험장치에 대해 설명한 후 가속율도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어 기법의 제어성능을 확인하기 위해 스텝응답, 정현과응답 및 시스템의 질량을 변화시켜 기존의 PID 제어방식과 결과를 비교 분석하였다.

1. 실험장치

그림 6은 자기부상 시스템에 대한 실험장치를 나타내었다. 시스템에 대한 기계적인 구조는 중심축에 대해 부상체가 1자유도를 갖고 부상하게 되며 부상체 양단 바로 밑에 U자형 전자석을 위치 시켰다. 이 실험 장치는 중심축을 중심으로 움직이기 때문에 부상체 양끝 무게가 똑같으면 전자석 2개를 이용하여 자기베어링구조로 사용할 수 있고 한 쪽에 무게를 증가시키면 중력인 mg가 작용하여 반대편 전자석 1개를 이용하여 자기부상 구조로 사용할 수 있다. 본 논문에서는 자기부상 구조를 적용하여 실험을 하였다.

자기부상 시스템을 제어하기 위해 MATLAB/Simulink와 dSPACE를 사용하였고 전자석의 전압공급용으로 아날로그 전류증폭기(operational amplification)를 사용하였다. dSPACE는 MATLAB/Simulink와 연동하여 Simulink 블록모형을 이용해 제어를 편리하게 설계할 수 있으며 구현한 제어 알고리즘을 그대로 사용할 수 있어 편리하게 실험을 할 수 있다. 또한 잭센서 및 전류센서의 값을 얻기 위해 dSPACE의 ADC채널을 이용하였다. MATLAB/Simulink를 통해 생성된 출력은 DAC 채널을 통해 아날로그 전류 증폭기로 입력되고 아날로그 전류 증폭기를 통해 전자석으로 전압이 인가된다. 아날로그 전류 증폭기는 OPA549T(파워앰프)를 사용하였으며, OPA549T의 주요특성은 정격전류 8A까지 출력할 수 있고 전류 리미트 설정기능 까지 있어 시스템에 대한 과전류 손상을 방지할 수 있다.

2. 실험 결과

이 절에서는 설계된 가속율도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어기 및 PID 제어에 대해 여러 실험을 통해 제어성능을 검증하였다. 자기부상시스템에 대한 사양값은 표 1에 나타내었다. PID 이득값은 근계적법을 이용하여 일차 선정



그림 6. 자기부상 시스템 실험 장치.
Fig. 6. Experiment equipment of magnetic levitation system.

표 1. 자기부상 시스템의 사양.

Table 1. Specifications of magnetic levitation system.

파라미터	값
공칭공극	0.24[mm]
초기공극	0.48[mm]
정격전류	1[A]
인덕턴스	5[mH]
저항	3.2[Ω]
코일 턴수	286[turn]
전자석 단면적	192[mm ²]
부상체 무게	11.8[Kg]
공급전압	±15[V]
제어주파수	10[KHz]

하였고 실험에서는 선정한 이득값을 바탕으로 시행착오법을 거쳐 다시 선정하였다. 가속율도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어기 이득값은 자유 설계파라미터(free design parameter)이며, 채터링을 최소화시키기 위해 시행 착오법에 의해 선정하였고 이득값은 아래와 같다.

가속율도달법칙: $\lambda_1 = 55, \lambda_2 = 550, W = 2000, \alpha = 0.3$

PID: $K_p = 20, K_i = 40, K_d = 162$

2.1 PID 제어

가속율도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어기와 비교하기 하기 위해 PID 제어기를 적용한 실험을 수행하였다. 그림 7은 공칭공극 0.24mm 스텝입력에 대한 위치응답을 보여준다. 세틀링 시간은 0.058초로 빠르게 수렴하는 것을 알 수 있고 오버슈트 (P.O)는 15.41%로 발생했지만 정상상태에서는 양호한 특성을 볼 수 있다. 그림 8은 공극 기준치가 정현파로 변동하는 경우 전 영역(0.06mm-0.42mm)에 대해 위치제어가 가능한지에 대한 위치응답을 보여준다. 0.42mm에서 리플이 발생하였지만 비교적 양호한 결과를 보여준다. 그림 9와 10은 시스템 질량의 50%, 100% 변화시 위치응답

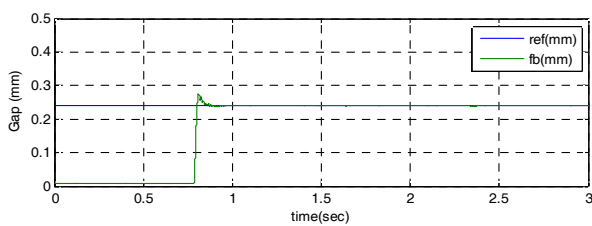


그림 7. PID 제어 위치 스텝 응답.
Fig. 7. Position step response using PID control.

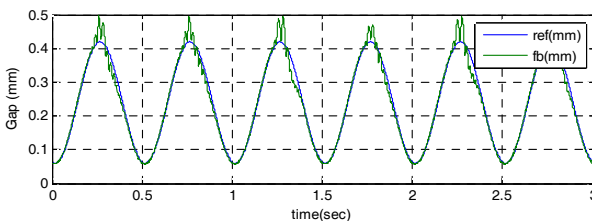


그림 8. PID제어 위치 정현파 응답.
Fig. 8. Position sinusoidal response using PID control.

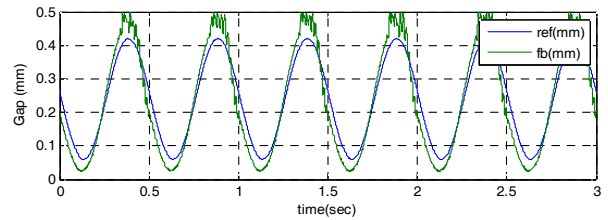


그림 9. PID 제어 시스템 질량의 +50% 변화시 위치 응답.
Fig. 9. Position response for the +50% of mass variation using PID control.

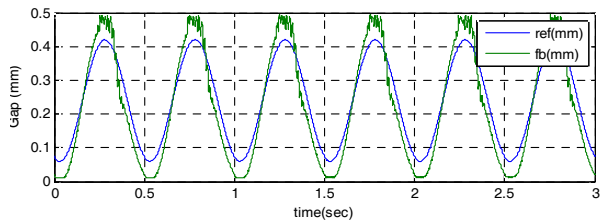


그림 10. PID제어 시스템 질량의 +100% 변화시 위치 응답.
Fig. 10. Position response for the +100% of mass variation using PID control.

을 보여준다. 시스템 질량의 50% 변화시 0.06mm 위치에서는 0.035mm, 0.42mm 위치에서는 0.07mm의 오차가 생겼다. 시스템 질량의 100% 변화시 0.42mm에서는 0.07mm의 오차가 생겼으며 0.06mm에서는 제어가 되지 않는 것을 알 수 있다. PID 제어기를 적용한 경우 일정한 위치를 유지하도록 하는 제어 동작에 대해서는 매우 우수한 성능을 보였지만 넓은 동작 범위를 갖는 제어 동작에 대해서는 외란이 인가되는 경우 오차가 크게 증가하는 특성을 나타내었다.

2.2 가속율도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어

그림 11은 가속율도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어기를 적용한 경우 공칭공극 0.24mm 스텝입력에 대해 위치응답을 나타낸 결과이다. 세틀링 시간은 0.022초로 PID 제어기를 적용하였을 경우보다 수렴속도가 2배이상 빠르다는 것을 알 수 있다. 하지만 정상상태에서의 위치 리플율은 4.1%로 PID 제어보다 리플율이 약간 크게 나타났지만 비교적 잘 추종하는 것을 알 수 있다.

그림 12는 정현파입력에 대한 위치응답을 비교한 결과이다. 위치를 가변시키면서 응답특성을 알아보기 위해 정현파를 입력하여 전 영역에서 제어가 가능한지를 실험하였다. 0.06mm-0.42mm 안에서 위치를 가변시켰으며 전 영역에서

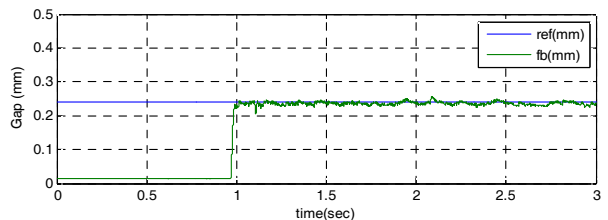


그림 11. 가속율도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어 위치 스텝 응답.
Fig. 11. Position step response using ERL sliding mode control.

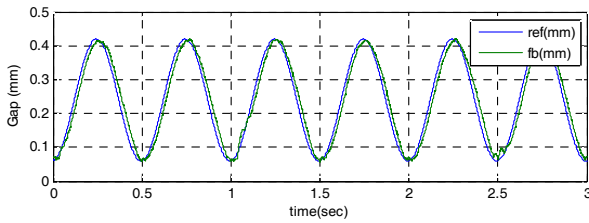


그림 12. 가속율도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어 위치 정현파 응답.

Fig. 12. Position sinusoidal response of sliding mode control using ERL.

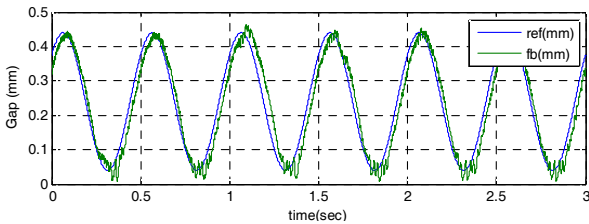


그림 13. 가속율도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어 시스템 질량의 +50% 변화시 위치 응답.

Fig. 13. Position response for the +50% of mass variation of sliding mode control using ERL.

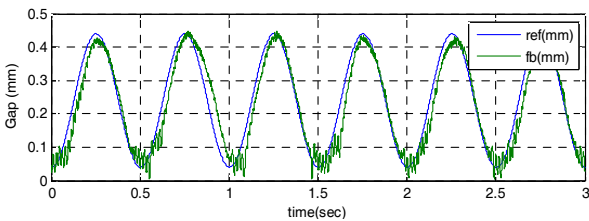


그림 14. 가속율도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어 시스템 질량의 +100% 변화시 위치 응답.

Fig. 14. Position response for the +100% of mass variation of sliding mode control using ERL.

오차가 거의 없이 위치를 비교적 잘 추종하는 것을 볼 수 있었다. 앞선 PID 제어 결과에서는 약간의 오차가 발생했지만 반면에 가속율도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어에서는 오차가 거의 없이 전 영역에서 제어가 가능하다는 것을 볼 수 있다.

그림 13, 14는 시스템 질량 변화에 대한 제어기의 강인성을 보기위해 50%, 100%의 시스템 질량을 변화하였을 때의 실험 결과를 나타낸다. 시스템 질량의 50% 변화시 0.02mm 오차를 두고 위치를 추종하였다. PID 제어를 적용했을 때보다 오차가 적게 나타나는 것을 볼 수 있으며 가속율도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어를 적용하였을 경우 시스템 질량변화에 대한 위치 추종성능이 상대적으로 우수하다는 것을 알 수 있다. 시스템 질량 100% 변화시 마찬가지로 PID 제어를 적용했을 때보다 가속율도달법칙을 이용하였을때가 상대적으로 위치 추종성능이 우수하게 나타났다. 이는 PID 제어기보다 가속율도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어기가 외란에 대해 강인하다는 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 시소모델을 이용한 흡인식 자기부상 시스템에 대해 자기부상 실험셋트를 구성하여 비선형 모델에 기초한 가속율도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어기법을 적용하였고 기존의 선형제어인 PID 제어기와 비교 실험하였다. 그 결과, PID 제어기는 공칭공극에서 제어성능이 우수하다는 것을 알 수 있었지만 공칭공극을 벗어나면 제어성능이 저하되었으며 또한 파라미터 변화시에도 제어성능이 저하되는 것을 알 수 있었다. 이에 비해 가속율도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어기법을 적용하였을 경우 공칭공극에서 PID 제어기보다 리플이 약간 있지만 전 영역에 대한 위치변화에 대해서는 우수한 것으로 나타났다. 시스템 질량변화에 따른 즉 외란에 대해서도 비교적 강인한 것을 알 수 있었다. 하지만 본래의 슬라이딩 모드 제어의 문제점인 채터링 문제는 극복하지 못하였다. 이는 시스템의 매개변수를 정확히 고려되지 못한데서 기인된 것으로 판단되며 또한 시스템 질량변동에 대해서도 변동량을 감안한 시스템 모델을 고려하여야 할 뿐만아니라 이것에 기초한 이득 조정도 필요할 것으로 판단된다. 향후 연구로는 강인하면서 채터링을 더욱 줄일수 있는 SMCSPO (Sliding Mode Control with Sliding Perturbation) 알고리즘을 적용하여 더욱 더 강인한 제어기를 설계하고자 한다.

REFERENCES

- [1] M. Takahashi, G. Kwok, and K. Kubota, "Marketing strategy of the HSST system," *Proceedings of Maglev 2006*, vol. I, pp. 53-57.
- [2] D. L. Trumper, S. M. Olson, and P. K. Subrahmanyam, "Linearizing control of magnetic suspension systems," *IEEE Trans on Control System Technology*, vol. 5, no. 4, pp. 427-438, Jul. 1997.
- [3] J. S. Kim and J. S. Park, "Bond graph modeling and LQG/LTR controller design of magnetically levitation systems," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers (in Korean)*, vol. 15, no. 5, pp. 1620-1634, 1991.
- [4] S. J. Kim, C. G. Kim, and S. M. Kwon, " H_{∞} PID controller design for an attraction type magnetic levitation system," *Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers (in Korean)*, vol. 57, no. 9, pp. 1624-1627, 2008.
- [5] A. E. Hajjaji and M. Ouladsine, "Modeling and nonlinear control of magnetic levitation systems," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 4, pp. 831-838, Aug. 2001.
- [6] I. M. Hassan, and A. M. Mohamed, "Variable structure control of a magnetic levitation system," *Proc. of the American Control Conference*, vol. 6, pp. 3725-3730, Jun. 2001.
- [7] N. F. AL-Muthairi and M. Zribi, "Sliding mode control of a magnetic levitation system," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2, pp. 93-107, Feb. 2004.

- [8] K. S. Lee, T. Y. Lee, and K. S. Yi, "Model-based design of estimator-controller for electromagnetic suspension of magnetic levitation vehicle," *Proc. of the Korean Society of Automotive Engineers*, Seoul, Korea, vol. 2, no. 4, pp. 1055-1066, Apr. 2008.
- [9] L. Chunfang and Z. Jian, "Design of second-order sliding mode controller for electromagnetic levitation grip used in CNC," *Control and Decision Conference*, pp. 3282-3285, May 2012.
- [10] M. J. Terra, H. Elmali, and N. Olgac, "Sliding mode control with sliding perturbation observer," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 119, pp. 657-665, 1997.
- [11] K. Nonami and H. Tian, *Sliding mode control*, Corona Pub, Japan, 1994.
- [12] W. Kortum and A. Utzt, "Control law design and dynamic evaluations for a maglev vehicle with a ComBined lift and guidance suspension system," *Tans. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 106, pp. 286-292, 1984.
- [13] S. H. Kim, DC AC BLDC Motor Control, Bogdoo Pub, Korea, 2010.
- [14] K. C. Lee, J. W. Moon, D. H. Koo, and M. C. Lee, "Magnetic levitated electric monorail system for flat panel display glass delivery applications," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 6, pp. 566-572, Jun. 2011.
- [15] A. Charara, J. D. Miras, and B. Caron, "Nonlinear control of a magnetic levitation system without premagnetization," *IEEE Trans on Control System Technology*, vol. 4, no. 5, pp. 513-523, Sep. 1996.
- [16] M. Zhihong and X. H. Yu, "Terminal sliding mode control of MIMO linear systems," *IEEE Trans on Circuits and System*, vol. 44, no. 11, pp. 1065-1070, Nov. 1997.
- [17] K. D. Young, V. I. Utkin, and U. Ozguner "A control engineer's guide to sliding mode control," *IEEE Trans on Control System Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 328-342, May 1999.
- [18] Y. S. Lee, J. H. Yang, S. Y. Kim, and O. G. Kwon, "Development of magnetic force modeling equipment for magnetic levitation systems," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 4, pp. 312-327, Feb. 2011.
- [19] H. Sira-ramirez, "On the sliding mode control of multi-variable nonlinear systems," *Internet. J. control*, vol. 64, no. 4, pp. 745-765, 1996.



문 석 환

2011년 동아대학교 전기공학과 졸업. 2011년~현재 한국전기연구원 전기추진 연구본부 연구원. 2014년 부산대학교 대학원 로봇관련협동과정 공학석사. 관심분야는 자기부상, 자기베어링, 발 전기제어등.



이 기 창

1998년 부산대학교 전기공학과 졸업. 2000년 포항공대 대학원 전자전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 한국전기연구원 전기추진연구본부 선임연구원. 2014년 부산대학교 대학원 기계공학부 공학박사. 관심분야는 자기부상, 자기 베어링, 고속전동기 센서리스 벡터제어등.



김 지 원

1994년 서울시립대학교 제어계측공학과 졸업. 1996년 광운대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1996년~현재 한국전기연구원 전기추진연구본부 선임연구원. 2005년~현재 부산대 대학원 전기공학과 박사과정 재학 중. 관심분야는 특수전동기 제어, 조류발전용 컨버터 제어등.



박 병 건

2005년 명지대 전기정보 제어공학부 졸업. 2007년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2011년~현재 한국전기연구원 선임연구원. 관심분야는 고속전동기 제어, 대용량 인버터, 전기 자동차용 전동기 제어.



이 민 철

1983년 부산대 기계공학과 졸업. 1988년 일본 쓰쿠바 대학교 이공학 연구과 공학석사. 1991년 동대학 물리공학 연구과 공학박사. 2000년 8월~2001년 8월 노스캐롤라이나 주립대학(NCSU) 방문교수. 2009년 8월~2010년 8월 Purdue 대학 방문교수. 1991년~현재 부산대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 시스템 규명, 로봇 제어, 지능형 서비스로봇, 이족보행로봇, 수술용로봇, 메카트로닉스.