전력전자학술대회 논문집 2003. 7. 14 ~ 7. 17

DSP를 사용한 자기부유기의 위치제어

김정재, 송승호
전북대학교 전자정보공학부

Position control of magnetic levitation system using DSP

J.J. Kim and S.H. Song
Chonbuk National University

ABSTRACT

자기 부유기는 전자력을 이용해서 자성 재료를 공중에 떠있게 할 수 있는 장치이다. 자기 부유기는 근본적으로 비선형이며 불안정한 시스템으로서 제어에 많은 어려움이 따른다. 본 논문에서는 비선형 시스템을 국부적으로 선형화해서 모델링하고, 위치가변제어를 수행할 수 있도록 비례미분 위치제어기를 설계하였다. 시뮬레이션과 DSP를 이용한 자기부유기 제작 및 실험으로 위치제어 응답성능을 검증하였다.

1. 서 론

자기 부유기는 많은 사람이 연구한 주제이며, 자기부유기를 제작에는 R-L회로의 특성, 전기에너지에서 기계에너지로 변환, 전력용반도체의 사용방법, 비례미분적분(PID)제어이론의 이해, 마이크로프로세서의 응용 등 전기공학의 여러 이론들이 적용되고 사용된다. 그러므로 자기 부유기 제작 및 실험을 통해서 전기공학 전공자는 전공에 대한 이해를 높이고, 이론을 실제 상황에 적용하는 방법을 터득할 수 있을 것이다.

또한 자기 부유기의 원리는 고속회전기에 사용되는 자기 베어링과 자기 부상 열차의 부상원리 등에 응용될 수 있다.

자기 부유기를 구성하는 방법으로서 연산증폭기를 이용하여 아날로그제어기를 구성하는 방법과 고성능 DSP를 이용한 디지털 제어기로 구성하는 방법이 있다. 아날로그 제어기는 적은 비용으로 구성할 수 있지만 작은 외란이나, 자기 부유기 동작 시 소자와 코일에 발생하는 열에 의해서 안정상태에 오래 머물지 못한다.[1] 반면 디지털 제어기는 간단한 프로그램 조작으로 다양한 시스템 에 적용할 수 있고, 환경변화에 대한 강인성이 우수하여 아날로그 제어기에 비해 많은 장점을 갖는다.[2]

기존의 연구는 비선형 시스템인 자기 부유기를 한 점에서 선형화 시켜 고정된 위치에서 제어한다.[2],[3] 본 논문에서는 자기 부유기의 모델링과 시뮬레이션을 수행하고, DSP를 이용한 디지털 제어기로 이루어진 자기 부유기를 제작했다. 제작된 자기부유기의 특성을 실험적으로 검증하였다. 또한 비선형 시스템인 자기 부유기 모델을 국부적으로 선형화시켜 위치 가변 제어를 시도하고 결과를 보여준다.

2. 본 론

2.1 자기 부유기 모델링

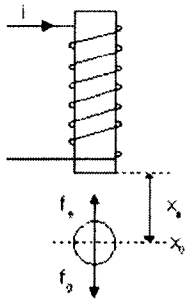


그림 1 시스템 모델링을 위한 개념도
Fig. 1 Diagram for system modeling
i :전자석에 흐르는 전류 x : 쇠구슬의 위치
f_e : 전자석에 의한 부상력 f_g : 중력

그림 1에서 보면 쇠구슬에 작용하는 힘은 단 두 가지이다. 쇠구슬을 아래로 떨어지게 만드는 중력과 이와 반대방향으로 작용하는 전자석에 의한 힘이다. 평형위치(x_0)에서 두 힘의 합이 0이라면 쇠구슬은 평형위치(x_0)에 떠 있을 수 있을 것이다. 두 힘의 합이 0이 되도록 하기 위해서는 두 힘을 알아

야 한다.

먼저 전자석에 의한 힘을 구하면 다음과 같다. 전류에 의한 자속 밀도는 식 (1)과 같고 공극에 저장된 에너지는 식 (2)와 같다. 여기에서 V_a는 공극의 부피이고, A_a는 공극의 단면적이다. 이때 전자석에 의한 부상력은 식 (3)과 같이 표현되고 여기에 식 (1)을 대입해서 정리하면 식 (4),(5)와 같이 나타낼 수 있다.[4]

$$B_a = \mu_0 \frac{Ni}{x_a} \tag{1}$$

$$W_a = \frac{1}{2} B_a H_a V_a = \frac{1}{2} B_a H_a A_a x_a \tag{2}$$

$$f_e = \frac{\partial W_a}{\partial x_a} = \frac{1}{2} B_a H_a A_a = \frac{B_a^2 A_a}{2\mu_0} \tag{3}$$

$$f_e = \frac{1}{2}\mu_0 A_a \left(\frac{Ni}{x_a}\right)^2 = \frac{1}{2}\mu_0 N^2 A_a \frac{i^2}{x_a^2} = k\frac{i^2}{x_a^2} \tag{4}$$

$$f_e = k\frac{(i_0 + \Delta i)^2}{(x_0 + \Delta x)^2} \tag{5}$$

그림 1에서 중력의 방향을 양의 방향으로 잡으면 쇠구슬에 작용하는 힘의 총합은 (6)과 같이 된다. 식 (6)를 $(\Delta i, \Delta x)=(0,0)$에서 테일러 전개하여 선형화 시키면 식 (7)과 같다.

$$f_x = f_g - f_e = mg - k\frac{(i_0 + \Delta i)^2}{(x_0 + \Delta x)^2} \tag{6}$$

$$f_x = m\ddot{x} = -\frac{2k\, i_0}{x_0^2}\Delta i + \frac{2k\, i_0^2}{x_0^2}\Delta x \tag{7}$$

식 (7)에서 쇠구슬에 가해지는 두 힘의 합(f_x)이 0이 되기 위해서는 쇠구슬의 위치(x)의 변화에 따라 전자석에 흐르는 전류(i)가 증가하거나 감소해야 됨을 알 수 있다.

2.2 시뮬레이션

시뮬레이션은 MATLAB을 이용하였고 표 1은 시뮬레이션에 사용된 파라미터를 보이고 있으며 그림 2는 시뮬레이션 블록도를 나타낸다.

위치제어기는 비례 미분(PD)제어기가 사용되었고, 전류제어기는 비례 적분(PI)제어기가 사용되었다.[5] 전자석은 제작한 전자석의 R-L값을 측정하여 사용하였고 플랜트는 식 (7)을 이용하여 구성하였다. 그림 3은 위치 명령을 10㎜에서 12㎜로 변화시켰을 때의 시뮬레이션 결과 파형을 보여준다. 그림 3(a)는 k_P=0.8 k_D=45 일 때이고, 그림 3(b)는 k_P=0.8 k_D=180 일 때의 파형이다.

그림 3의 결과 파형에서 자기 부유기의 위치제어에는 미분항(k_D)이 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다. 이는 쇠구슬의 위치가 변화할 때 전류 명령이 위치 변화 크기보다도 위치 변화 속도에 빠르게 반응해야 함을 의미한다.

표 1 자기부유기의 파라미터
Table 1 Parameters of the magnetic levitator

N	전자석 턴 수	3000회
A_a	Air gap 면적	0.000314[m²]
i_0	평형위치의 전류 값	1.1[A]
x_0	평형위치	0.01[m]
R	전자석의 저항	4.5[Ω]
L	전자석의 인덕턴스	292[mH]
μ_0	투자율(Permeability)	$4\pi \times 10^{-7}$[H/m]

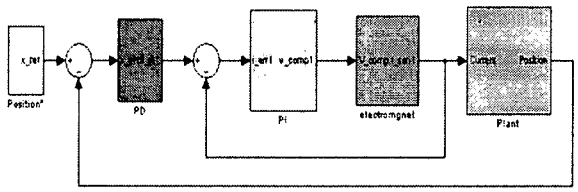
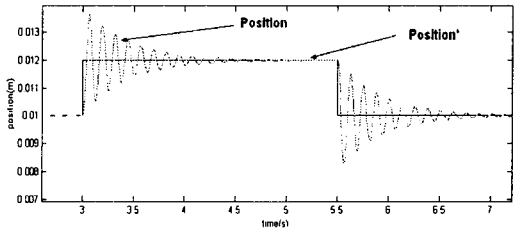
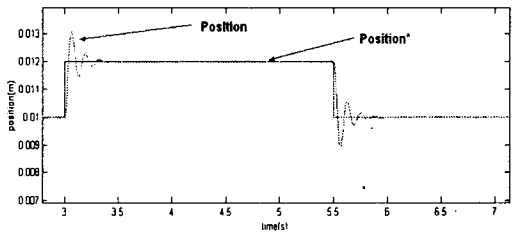


그림 2 시뮬레이션 블록도
Fig. 2 Block diagram for simulation



(a) k_P=0.8 k_D=45



(b) k_P=0.8 k_D=180

그림 3 위치제어 결과 파형
Fig. 3 Waveform of Position control

2.3 실험장치의 구성

그림 4는 자기부유기 제어보드이다. 컨트롤러는 TMS320C31을 사용하였고, 8개의 A/D입력과 4개의 D/A출력이 있다. 그리고 PWM출력을 위하여 8254를 사용하였다.

그림 5은 전력 회로도를 보이고 있다. 1개의 전력용 MOSFET를 사용하여 전자석에 흐르는 전류

를 제어하고, MOSFET를 보호하기 위하여 RCD스너버를 사용하였다. 그리고 제어보드와의 절연을 위하여 전류센서와 포토커플러가 사용되었다.

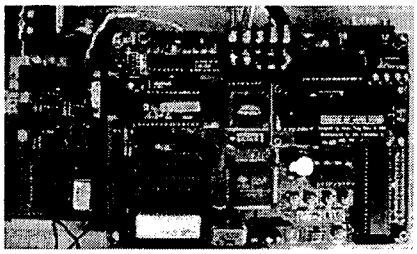


그림 4 제어 보드
Fig. 4 Control board

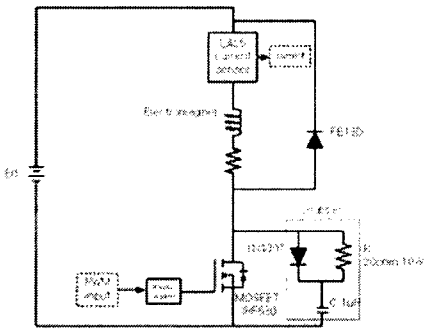


그림 5 전력 회로도
Fig. 5 Power circuit

그림 6은 자기 부유기 전체 구성을 보여주고 있다. 위치 파악을 위해 할로겐 램프와 빛의 양에 따라 저항 값이 변하는 CdS를 사용하였다.[2] 위치센서를 사용하지 않고 코일에 고주파 신호를 주입하여 인덕턴스를 알아내고, 이를 통해 위치를 파악하는 방법도 있다.[4]

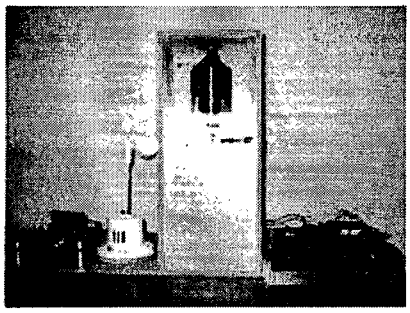


그림 6 자기 부유기 전체 시스템
Fig. 6 Total system of Magnetic levitator

2.4 제어 알고리즘

그림 7은 전체 시스템의 블록도를 나타낸다. 위치 기준값과 입력된 현재 쇠구슬 위치를 이용하여 전류 기준값을 계산하고, 계산된 전류 기준값과 현재 흐르는 전류 값을 이용하여 전압 명령을 계산해 낸다. 전압명령은 8254로 입력되고, PWM으로 MOSFET에 스위칭 신호로 전달된다.

스위칭 주파수는 10㎑이고 쇠구슬 위치 파악에서 PWM 출력까지 동작이 100㎲안에 이루어진다. 그리고 위치 가변 제어 실험을 위하여 DSP의 외부 인터럽트(INT1,INT0)를 이용해서 위치 명령 값을 변화 시킬 수 있도록 구성하였다.

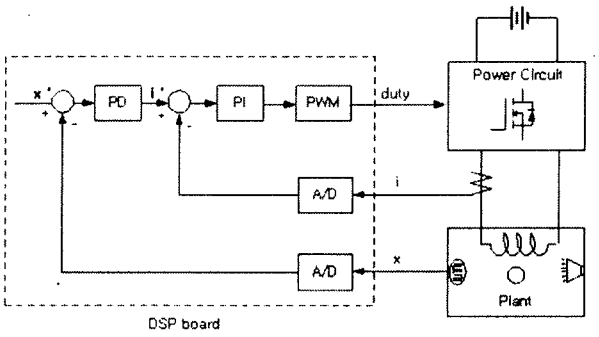


그림 7 전체 시스템 블록도
Fig. 7 Total system block diagram

2.5 실험 결과

그림 8은 전류 명령에 대한 응답을 보여주고 있다. 자기 부유기의 안정적인 동작을 위해서는 전류 제어기의 빠른 응답이 필요하다. 그림 8에서 전류 명령에 대한 응답이 5ms안에 이루어지는 것을 볼 수 있다.

그림 9은 위치 제어 실험 결과를 보여주고 있다. 위치 명령을 10㎜에서 12㎜로 변화시키면서 위치 명령과 위치 응답을 관찰했다. 미분항(k_D)이 45에서 4배 정도 증가했을 때 위치제어기는 빠른 응답을 보이는 것을 볼 수 있다.

그림 10는 안정적으로 동작하고 있는 자기 부유기를 보여주고 있다.

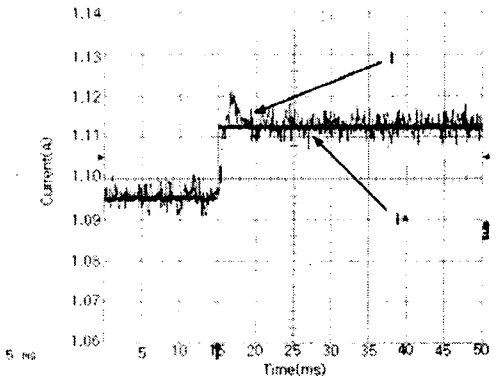
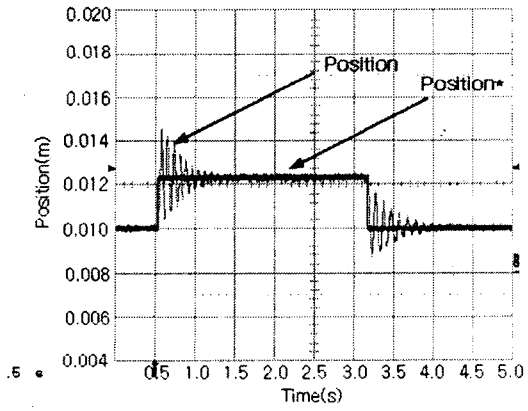
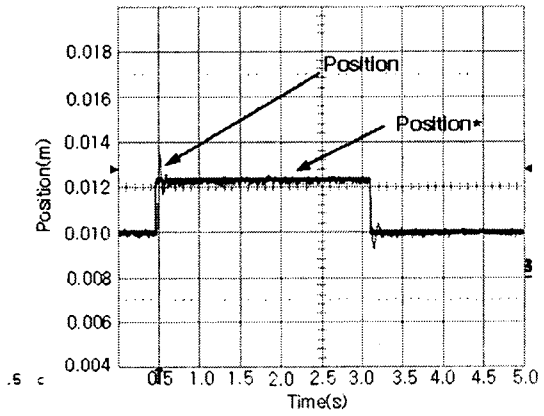


그림 8 전류 제어기 실험 파형
Fig. 8 Experimental waveform of current controller



a) k_P = 0.8 k_D = 45



b) k_P = 0.8 k_D = 180

그림 9 위치제어 실험 파형

Fig. 9 Experimental waveform of position control

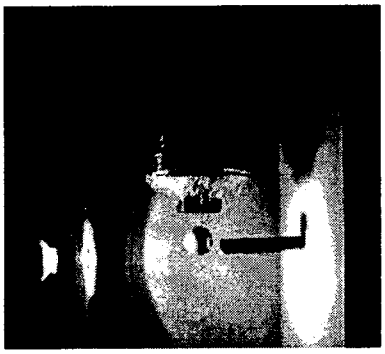


그림 10 자기 부유기

Fig. 10 Magnetic levitator

3. 결 론

본 논문에서 자기 부유기의 모델링, 시뮬레이션, PWM 전력 변환부 설계 및 제작, 전류제어 및 위치제어 특성실험을 통해 안정적 특성을 보이는 자기부유기를 제작하고 성능을 검증하였다.

또한 비선형 시스템인 자기 부유기를 국부적으로 선형화 시켜 위치 제어를 시도했다. 그리고 위치 제어에서 빠른 응답성을 확보하기 위해서는 적절한 응답이득 설정이 중요함을 확인하였다.

이와 같은 자기 부유기 설계 및 제작은 전력변환에 의한 시스템 제어 및 응용의 좋은 학습 예제로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] http://www.oz.net/~coilgun/levitation/home.htm

[2] 박세준 "자기 부유기의 설계 및 구현" 서울대학교 전기공학부, 학사학위 논문, 1997.

[3] El Hajjaji, A.Ouladsine, M "Modeling and nonlinear control of magnetic levitation systems" Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Volume: 48 pp. 831-838 2001.

[4] 임정식, 김장환, 설승기, 안형준, 최상현, "자기베어링의 센서리스 제어를 위한 회전축 위치 추정", 대한전기학회, 2002.

[5] A.E Hartavi, O. Ustun, R.N. Tuncay, F.Gurleyen, "The Design, Simulation and Experimental Study of Active Magnetic Bearing", Electric Machines and Drives Conference, 2000. IEMDC 2001. IEEE International, 17-20 June 2001.

[6] 김정재, 이혜인, 육진성 "전자석을 이용한 자기 부유기", 전북대학교 전자정보공학부, 현장실습 파일럿 스터디 결과 보고서, 2002.