

흡인식 자기부상 시스템의 외란관측자를 이용한 최소전력 부상제어

(Zero Power Control for an Attraction Type Magnetic Levitation System using Disturbance Observer)

안준선* · 유선종 · 김 솔**

(Joon-Seon Ahn · Sun-Jong Yu · Sol Kim)

요 약

본 논문에서는 자기부상 시스템에서 널리 채용되고 있는 흡인식 자기부상 시스템의 제어특성을 개선하기 위한 연구를 수행하였다. 흡인식 자기부상 시스템은 그 특성 상 제어계의 불안정성을 내재하고 있기 때문에 일반적으로 산업현장에서 널리 사용되는 비례적분제어방식(PI)이 아닌 비례적분미분제어방식(PID)을 이용하여 제어 시스템을 구성한다. 본 논문에서는 이러한 PID 제어방식의 제어특성을 개선하기 위하여 외란관측자를 이용한 제어기를 제안하였으며 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 특성을 확인하였다.

Abstract

In this paper, authors performed improvement of control characteristics of an attraction type magnetic levitation system. The attraction type magnetic levitation system has an inherent instability in the system, therefore its controller must have not only proportional-integral gain but also differential gain additionally. In this paper, authors were proposed control algorithm using disturbance observer(DOB) on feedback signal. The computer simulation and experiments were performed for its verification.

Key Words : Magnetic Levitation System, Zero Power Control, Disturbance Observer

1. 서 론

최근 들어 친환경 기술로 더욱 각광받고 있는 자기부상 시스템은 그 용도가 초기의 교통수단에서부터 확대되어 생산 설비내의 제품 및 재료 이송부분에 이르기까지 확대되고 있다[1]. 특히 급전 장치가 없는 시스템의 경우 고정자와 가동자간의 기계적인 접촉이 없이 움직일 수 있기 때문에 정밀한 제어가 가능하며 분진을 발생시키지 않기 때문에 반도체

* 주저자 : 오산대학 전기시스템제어과 교수

** 교신저자 : 유한대학 전기정보과 교수

Tel : 031-370-2673, Fax : 031-375-9601

E-mail : jsahn@osan.ac.kr

접수일자 : 2009년 3월 3일

1차심사 : 2009년 3월 4일, 2차심사 : 2009년 7월 2일

심사완료 : 2009년 7월 16일

공정이나 LCD 제조 공정과 같은 고 정밀, 고 청정 공정에 사용되는 이송 시스템에 매우 적합하다. 하지만 비접촉 방식을 사용하는 구조로 인해 전원공급을 비접촉 방식으로 구성하여 전력을 공급받을 수 있는 비접촉 전원공급 시스템을 사용하거나[2] 소비전력을 최소한으로 유지하는 시스템으로 구성하는 것이 바람직하다. 비접촉 전원공급 방식의 경우 자기유도 방식을 이용하여 전원을 전달하는 방식이 대부분이며 비접촉 방식으로 시스템을 구성하는 것이 가능하기는 하나 효율 측면에서 어려움이 있다. 따라서 시스템을 소비전력이 최소화되는 구조로 시스템을 구성하는 것이 바람직하며 이를 충족시키기 위해 제로 파워 공극 제어 방식이 제안되었다[3]. 하지만 제로파워 방식의 자기부상 시스템은 여타의 자기부상 시스템과 마찬가지로 시스템에 내재된 불안정성(instability)으로 인하여 시스템이 매우 불안정하다. 따라서 산업계에서 널리 사용하는 비례-적분 제어기법의 사용이 어려우며 이에 미분 이득을 부가한 제어기를 사용한다 하더라도 급작스러운 부하 변동 등의 외란에 대해서는 시스템의 안정성이 매우 떨어지게 된다. 이를 극복하기 위해 루엔버거 관측기나 강인구조형 부상 제어기를 적용하는 연구가 진행되어 왔다[4-5]. 이러한 제어기들은 성능적인 측면에서는 만족할만한 특성을 보이고는 있으나, 제어기 구조의 복잡성으로 인해 구현이 어려운 단점이 있다. 반면에 최근 주목 받는 제어기법 중에서 외란관측자는 그 구현의 간편함과 전기-기계 결합 시스템에 적합한 주파수 특성을 지니고 있다[6].

본 연구에서는 외란을 부하변동으로 가정한 외란 관측자를 공극 제어에 적용한 제로 파워 부상 제어 기법을 제안하였다. 외란관측자를 적용함으로써 인접한 부상 시스템의 불안정성이나 공극의 변화에 영향을 받는 파라미터의 변동을 외란 관측자가 보상함으로써 복잡하지 않으면서도 외란에 강인한 제로파워 부상 제어 시스템을 구현하는 것이 가능하였다. 본 연구에서는 제안하는 제어기법을 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해서 그 타당성을 검증하였다.

2. 자기부상 시스템

2.1 최소전력 부상제어

그림 1에 본 연구의 대상인 자기부상 시스템의 개념도를 나타내었다. 시스템은 두 개의 철심으로 구성되어 있으며 상부에 설치된 철심이 고정자에 해당되고 하부에 설치된 철심이 가동자에 해당된다. 가동자는 수직 방향으로 움직일 수 있으며 가동자에 부착되어 있는 영구자석(빛금친 부분)에 의해서 발생하는 흡인력과 가동자가 받는 중력이 서로 반대방향으로 작용하도록 구성되어 있다. 가동자에는 영구자석과 함께 권선이 설치되어 있어서 영구자석의 자속과 동일한 방향 및 반대 방향으로 자속을 발생시킬 수 있으며 이를 이용하여 자기회로의 총 자속을 제어함으로써 해서 흡인력을 제어할 수 있다. 영구자석에 의한 자속을 통해 발생하는 흡인력과 중력에 의한 힘이 서로 균형을 이루는 지점에서 가동자는 평형 상태가 되며, 일정한 공극을 두고 부상 상태를 유지하기 된다. 이렇게 평형 상태가 되면 별도의 에너지를 공급하지 않고도 부상상태를 유지할 수 있어 에너지를 효율적으로 사용할 수 있다.

2.2 흡인식 자기부상 시스템의 모델링

그림 1에서 보는 바와 같이 전류에 의한 힘은 식 (1)과 같고 영구자석에 의한 힘은 식 (2)와 같다.

$$F_{mi} = N \times i \tag{1}$$

$$F_{mm} = \psi_m R_m = \frac{l_p}{\mu_m} B_r \tag{2}$$

여기서, F_{mi} 는 전류에 의한 전자기력, F_{mm} 은 영구자석에 의한 힘이며, l_p 는 영구자석의 두께, μ_m 은 영구자석의 투자율, B_r 은 자속밀도이다.

한편 공극의 자속밀도 B 는,

$$B = \frac{1}{S} \psi = \frac{B_r - \frac{\mu_0}{l_p} Ni}{\frac{\mu_m}{\mu_c} \frac{l_c}{l_p} + \frac{\mu_m}{\mu_0} \frac{2}{l_p} z + 1} = \frac{B_r - ci}{a + bz} \tag{3}$$

$$a = \frac{\mu_m l_c}{\mu_c l_p} + 1, \quad b = \frac{\mu_m 2}{\mu_0 l_p}, \quad c = \frac{NS\mu_m}{l_p}$$

가 되며, μ 는 공기의 투자율, μ_c 는 철심의 투자율을 나타내며, l_c 는 철심의 자로길이, z 는 부상간극이다.

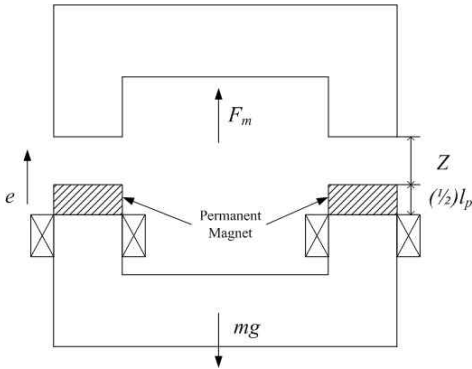


그림 1. 자기부상 시스템의 모델링
Fig. 1. Magnetic Levitation System

식 (3)으로부터 인덕턴스를 구하면,

$$L = \frac{N^2}{\frac{l_c}{\mu_c S} + \frac{2z}{\mu_0 S} + \frac{l_p}{\mu_m S}} \quad (4)$$

가 되고, 이를 정리하면,

$$L = \frac{N^2 \mu_0 S}{\frac{l_c \mu_0}{\mu_c} + 2z + \frac{l_p \mu_0}{\mu_m}} \quad (5)$$

가 된다.

식 (3)으로부터 공극의 에너지는 식 (6)이 되고,

$$W = \frac{1}{2\mu_0} B^2 S z = \frac{1}{2\mu_0} \left(\frac{B_r - \alpha i}{a + bz} \right)^2 S z, \quad (6)$$

이로부터 부상력 F_m 은,

$$F_m = -\frac{\partial W}{\partial z} = \frac{S}{2\mu_0} (B_r - \alpha i)^2 \frac{a - bz}{(a + bz)^3} \quad (7)$$

로 유도되며, 여기서 S 는 철심의 단면적을 나타내며,

따라서 기계 시스템의 미분방정식은 식 (9)와 같다.

$$m\dot{v} = mg - F_m \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{z} &= v \\ m\dot{v} &= mg - \frac{S}{2\mu_0} (B_r - \alpha i)^2 \frac{a - bz}{(a + bz)^3} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, m 은 가동부의 질량을 나타내고, g 는 중력 가속도, v 는 가동부의 이동속도이다.

시스템의 전압방정식은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있으며,

$$v_e = Ri + L(z) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(z)}{dz} \quad (10)$$

에서,

$$L(z)\dot{i} = -Ri - i \frac{dL(z)}{dz} + v_e \quad (11)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서, R 은 권선의 저항, v_e 는 코일의 전압을 나타낸다.

식 (9), (10)으로부터 시스템의 상태 방정식은 Tylor 급수 전개에 의한 선형화를 통하여,

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \end{aligned} \quad (12)$$

으로 유도되며 여기서,

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} z \\ v \\ i \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_z}{m} & 0 & \frac{k_i}{m} \\ 0 & \frac{i_o}{a_1 + z_0} - \frac{R}{L_0} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_0} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_0} \end{bmatrix}, \mathbf{D} = [0]$$

이고 각 계수는,

$$k_i = \frac{a_3}{a_1 + z_0}, \quad k_z = \frac{a_2 - a_3 i_0}{(a_2 + z_0)^2},$$

흡인식 자기부상 시스템의 외란관측자를 이용한 최소전력 부상제어

$$a_1 = \frac{l_c \mu_0}{2 \mu_c}, a_2 = \frac{B_r l_m \mu_0}{2 \mu_m}, a_3 = \frac{\mu_0 N}{2}$$

이다.

3 외란관측자

외란관측자(Disturbance Observer, DOB)는 적응 제어 제어방법과 유사하게 시스템의 전달함수를 이용해 시스템 자체의 불확정성을 파악하여 이를 보상하는 방식의 제어 방법이다. 외란관측자는 응답 특성이 비교적 저주파수의 동적 특성을 갖거나 외란의 주파수가 저주파수인 시스템에 적용할 경우 상대적으로 우수한 특성을 갖는 제어방식으로 알려져 있으며, 그 구조적 특성이 복잡하지 않아 쉽게 구현이 가능하여 본 연구의 대상인 제로과워 자기부상 시스템에 적용하기에 적합한 제어 방식이다. 그림 2 (a)에 앞서 언급한 외란관측자의 일반적인 형태를 나타내었고 그림 2 (b)에는 상태공간 모델에 적용하기 위해 구조를 수정한 외란관측자를 나타내었다.

그림 2 (a)에서 보는 바와 같이 제어 대상 플랜트 P 의 출력 y 에 이득 P_n^{-1} 을 곱한 뒤 여기서 제어 입력 u 를 감하면 시스템의 외란 d 를 구할 수 있고 이를 폐환신호에 부가하여 이론적으로 외란을 제거할 수 있다. 여기서 Q 필터의 역할은 일반적으로 플랜트 P 의 전달함수의 분자의 차수가 분모의 차수보다 낮기 때문에 이득 P_n^{-1} 가 proper한 형태를 가지기 어려우며 이를 극복하기 위해 제어입력과 출력에 동일한 Q 필터를 곱하여 폐환 신호의 전달 이득이 proper할 수 있도록 하기 위한 것이다. Q 필터의 이득을 정하는 데 있어서 여러 가지 경우가 있을 수 있으며 분자와 분모 차수의 차이가 적을수록 제어시스템의 강인성이 향상되며, 분자의 차수가 클수록 외란제거 성능이 향상되는 것으로 알려져 있다[6].

따라서 본 논문에서는 이러한 부분을 고려하며 적절한 Q 필터의 선정에 위하여 저역 통과 필터의 선정에 널리 쓰이는 binomial 계수 설계법에 의해서 4 가지 필터를 설계한 후 그 성능을 비교하였다[7].

Binomial 계수 설계법 Lee와 Tomokazu가 제안한 방법으로 식 (13)에 의해 필터의 계수를 선정한다.

$$Q(s) = \frac{\sum_{i=0}^M a_{Ni} (\tau s)^i}{(\tau s + 1)^N} \quad (13)$$

여기서,

$$a_{Ni} = \frac{M!}{i!(N-i)!}, M=0,1,\dots,N-r$$

이며 N 은 분모의 차수, k 는 분자의 차수, r 은 플랜트 ($P(s)$)의 상대차수, τ 는 시정수를 의미한다.

플랜트의 분자 및 분모의 차수를 고려하여 다음 네가지의 경우에 대해서 성능을 분석하였다. 성능의 평가는 필터의 보드 선도와 잡음에 대한 감도함수의 민감도 해석을 실시하였다.

$$Q_{31}(s) = \frac{0.003s + 1}{1e^{-9}s^3 + 3e^{-6}s^2 + 0.003s + 1}$$

$$Q_{32}(s) = \frac{3e^{-6}s^2 + 0.003s + 1}{1e^{-9}s^3 + 3e^{-6}s^2 + 0.003s + 1}$$

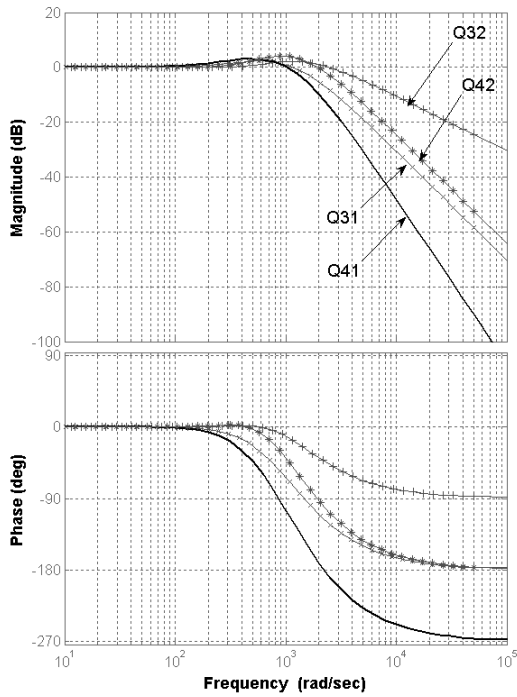
$$Q_{41}(s) = \frac{0.004s + 1}{1e^{-12}s^4 + 4e^{-9}s^3 + 6e^{-6}s^2 + 0.004s + 1}$$

$$Q_{42}(s) = \frac{6e^{-6}s^2 + 0.004s + 1}{1e^{-12}s^4 + 4e^{-9}s^3 + 6e^{-6}s^2 + 0.004s + 1}$$

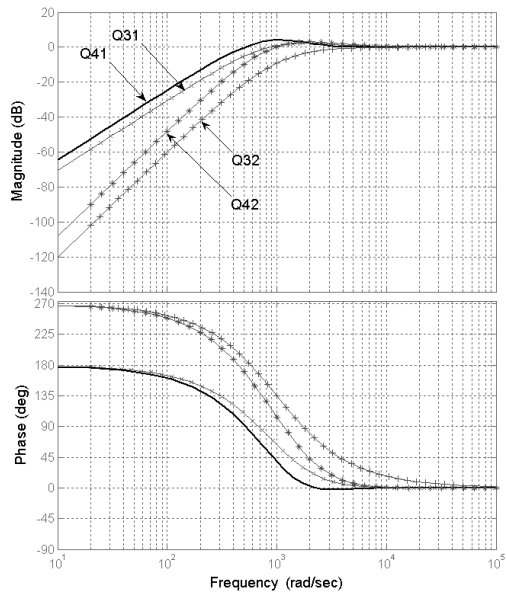
($\tau = 0.001$)

그 결과 그림에서 보는 바와 같이 Q_{41} 의 경우가 외란 감쇄 성능에서 가장 우수함을 보이고 있으며 잡음에 대한 민감도 측면 Q_{41} 이 잡음에 대해 가장 민감한 것으로 나타났다. 따라서 본 논문에서는 Q_{41} 의 경우를 이용하여 시뮬레이션 및 실험을 진행하였다.

그림 3에서는 본 논문에서 사용된 외란관측자가 포함된 제어기의 블록 선도를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 제어입력(r)에 대해서 폐환 제어기 (C) 출력에 점선으로 표시된 외란관측자를 구성하여 제어기의 출력을 외란(d)과 관계없이 플랜트가 추종할 수 있도록 제어기를 구성하였다. 본 논문에서 사용된 폐환제어기(C)에는 부상 제어기와 제로과워 제어기가 cascade 구조로 포함되어 있으며 두 제어기 모두 PID구조의 제어기를 사용하였다. 또한 fast dynamics의 효과에 의한 외란관측자의 성능 저하를 방지하기 위하여 외란 관측자의 출력 신호에 포화기를 부가하여 높은 주파수의 잡음에 대한 제어기의 오동작을 감소시켰다.



(a) Q 필터의 감쇄비 비교
(a) Comparisons of Damping Ratio



(b) Q 필터의 민감도 비교
(b) Comparisons of Sensitivity

그림 2. Q필터의 성능비교
Fig. 2. Performance Comparisons of Q Filter

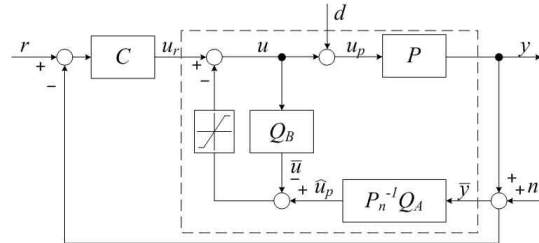


그림 3. 외란관측자가 사용된 제어기
Fig. 3. Disturbance Observer Based Controller

4. 시뮬레이션 및 실험

표 1에는 본 연구에 사용된 자기부상 시스템의 제원을 나타내었고, 그림 4에 본 연구에서 사용된 컴퓨터 시뮬레이션 블럭도를 나타내었다. 블럭도는 그림에서 보는 바와 같이 자기부상 모델 부분과 공극 제어기 부분 및 외란관측자의 크게 세 부분으로 나뉘지며 외란은 공극 부하의 형태로 인가되게 된다. 그림 5에 본 시뮬레이션에 사용된 외란관측자의 상세 블럭도를 표시하였다. 시뮬레이션은 MATLAB/Simulink 프로그램을 이용하여 수행 하였으며 비교 대상은 일반적으로 산업계에 널리 사용되는 PID 제어방식을 사용한 경우와 외란관측자를 부가하여 제어한 경우를 비교하였다. 시뮬레이션에 사용한 PID 제어 이득은 $k_p = 8000$, $k_i = 40000$, $k_d = 200$ 을 사용하였다. 또한 그림 6에는 본 연구에 사용된 자기부상 시스템의 실 구현 모델을 나타내었다.

표 1. 자기부상 시스템의 제원
Table 1. Specification of MAGLEV

CPM	중량	[kg]	3.91
	코일턴수	turn	334
	영구자석		Nd-Fe-B
	잔류자속밀도	T	1.2
	영구자석 높이	[mm]	2.7
	영구자석 단면적	[mm ²]	629.35
	코어 높이	[mm]	33.5
	코어 길이	[mm]	57.7
	코어 폭	[mm]	20.5
고정자	코어 사이의 길이	[mm]	16.7
	전체 높이	[mm]	40
	전체 길이	[mm]	107

흡인식 자기부상 시스템의 외란관측자를 이용한 최소전력 부상제어

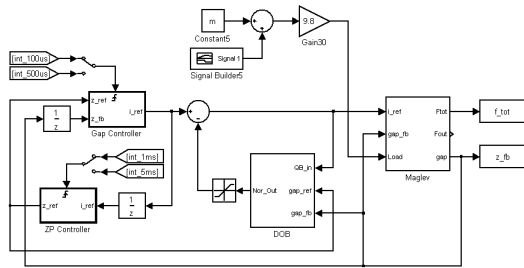


그림 4. 시뮬레이션 블럭도
Fig. 4. Block Diagram of controller

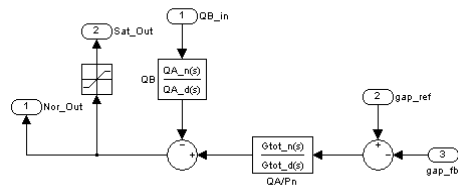


그림 5. 외란관측자의 시뮬레이션 모델
Fig. 5. Simulation Block Diagram of DOB

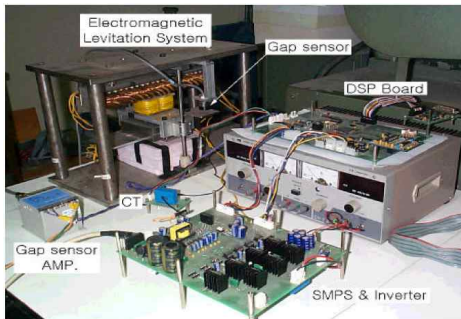


그림 6. 자기부상 실험 set
Fig. 6. Experimental Set of MAGLEV

그림 7은 공극제어 성능특성을 비교한 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 외란관측자를 사용한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해서 안정적인 제어 특성을 보이고 있다. 자기부상 시스템의 내재된 불안정성을 고려한다면 외란관측자가 시스템의 안정도 향상에 기여하고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 공극 제어에 따른 전류의 응답 특성을 나타내고 있다. 제어 시 응답 오버슈트가 적은 만큼 외란관측자의 시뮬레이션 결과가 과도상태에서 좀 더 적은 전류를 필요로 함을 볼 수 있다.

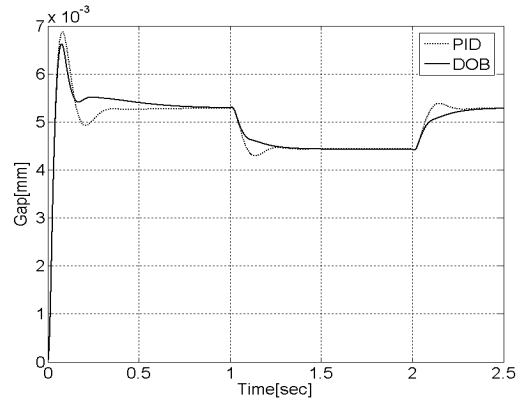


그림 7. 시뮬레이션 결과 : 공극 제어특성
Fig. 7. Simulation Results : Characteristics of Gap Control

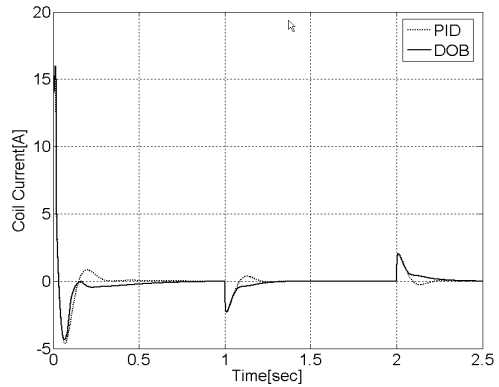


그림 8. 시뮬레이션 결과 : 전류 응답특성
Fig. 8. Simulation Results : Responses of Coil Current

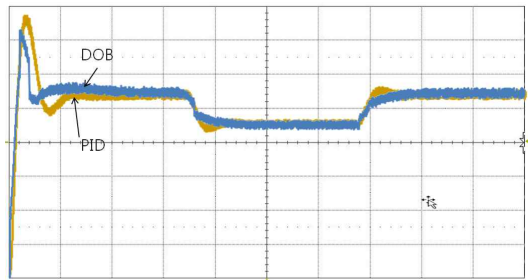


그림 9. 실험결과 : 공극제어 특성(x축 : 250[ms/div], y축 : 2.5[mm/div])
Fig. 9. Experimental Results : Gap Control Waveforms(x-axis : 250[ms/div], y-axis : 2.5[mm/div])

그림 9와 그림 10에는 그림 6의 자기부상 구현 set 를 이용하여 실험을 수행한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 실험 결과 역시 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 외란관측자를 적용한 제어기가 좀 더 우수한 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

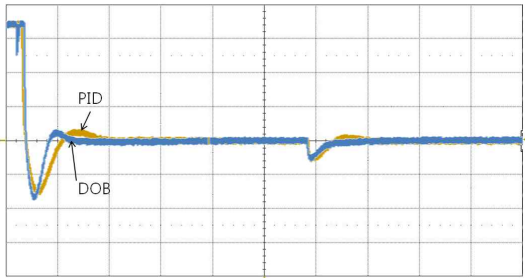


그림 10. 실험결과 : 전류 응답 특성(x축 : 250(ms/div), y축 : 5(A/div))
 Fig. 10. Experimental Results : Current Response Waveforms(x-axis : 250(ms/div), y-axis : 5(A/div))

5. 결 론

본 논문에서는 제로파워 자기부상 시스템의 안정성을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 자기부상 시스템은 시스템의 전달함수에 내재적인 불안정성이 있으며, 부상력을 결정하는데 중요한 파라미터인 인덕턴스 역시 부상 간극에 따라서 비선형적으로 변하는 특성을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 이러한 비선형적인 특성들이 제어계의 안정성에 미치는 영향을 최소화하고 시스템의 강인성을 향상시키기 위해 외란관측자를 이용하여 부상제어기를 구성하였다. 시뮬레이션과 실험 결과 기존의 PID제어방식에 비해서 제안하는 시스템의 과도응답특성이 개선되는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 외란관측자가 이러한 비선형적인 요소들을 외란으로 간주하여 적절히 보상하는 결과로 볼 수 있다.

향후 연구과제로는 외란관측자의 Q 필터의 선정에 따른 제어특성의 변화와 포화기의 적절한 정수 선정에 대한 연구가 필요하다 하겠다.

감사의 글

본 연구는 2008년 오산대학 교내 학술 연구과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] H.-W.Lee, S.G.Lee, S.-H.Won and J.Lee, "Optimal design of high-precision maglev system using simulation-based DOE and FEM," IEE Proc. -Electr. Power Appl. Vol. 153, No.5, pp.773~770, Sep., 2006.
- [2] D.H. Koo, J.P.Hong, D.H.Kang, "Design and Simulation of Linear Inductive Power Transformer(LIPT)," IEEE Proc. ISPSD '04, pp. 111~114, May, 2004.
- [3] Y.H. Kim, K.M. Kim, and J. Lee, "Zero Power Control with Load Observer in Controlled-PM Levitation," IEEE Trans. on Magnetics, Vol.37, No.4, pp.2851~2854 July, 2001.
- [4] D.L. Trumper, S.M. Olson and P.K. Subharmayan, "Linearizing Control of Magnetic Suspension Systems," IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol.5, No.4, pp.427~438, July, 1997.
- [5] 김석주, 김춘경, 권순만, "흡인식 자기부상시스템의 H ∞ PID 제어기 설계," 대한 전기학회 논문지, 57권, 9호, pp.1624~1627, 2008년 9월.
- [6] Y. Choi, K. Yang, W. Chung, H. Kim, I. Suh, "On the Robustness and Performance of Disturbance Observer for Second-order Systems," IEEE Trans. on Automatic Control, 2003.
- [7] H. S. Lee and M. Tomizuka, "Robust motion controller design for high-accuracy positioning systems," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 43, No. 1, pp. 48-55 Feb. 1996.

◇ 저자소개 ◇

안준선 (安浚善)

1970년 12월 10일생. 1993년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 기전공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995~2000년 LS 산전 빌딩설비사업부 연구소. 2001~2003년 (주)저스텍 기술연구소. 2008년~현재 오산대학전기시스템제어과 전임강사.

유선중 (劉善鐘)

1953년 9월 16일생. 1979년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업. 현재 오산대학전기시스템제어과 교수.

김 솔 (金 솔)

1970년 6월 10일생. 1997년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2004~2005년 전기기기 인력양성센터(HCEM) 사무국장. 2005년~현재 유한대학 전기정보과 조교수.