

최소차원 확장형 상태관측기에 의한 제어형 영구자석 자기 부상 시스템의 제로전력 부상 제어

論 文
51B-9-4

Zero Power Levitation Control of Controlled-PM Electromagnet Levitation System by Reduced Order Extended State Observer

金 倫 賢* · 金 솔** · 李 柱***
(Youn-Hyun Kim · Sol Kim · Ju Lee)

Abstract - This paper presents the scheme that improves control responsibility and stability of the controlled-PM electromagnet levitation system with zero power controller. A magnetically levitation system is used widely because friction can almost be disappeared. But it is difficult to control due to restraint of controllable area and nonlinear characteristics of electromagnetic force, which is proportioned to a square of the magnetic flux density and is in inverse proportion to a square of the air-gap. So, the application of observer theory in which the levitation system is considered to be a linear dynamic model has resulted in omitting the time dependence on mover's speed. Consequently, the performance of the observer is quite poor during transients. Therefore, this paper proposed the controlled-PM electro-magnetic levitation control method in which the variable load is estimated by using the reduced order extended luenverger observer and its system is controlled at a new zero power equilibrium air-gap position. It is also verified that the proposed control method improve the control performance through simulation and experiment.

Key Words : Zero Power Levitation Control, Controlled-PM Electromagnetic Levitation System, Reduced Order Extended Luenberger Observer

1. 서 론

자기부상시스템은 1930년대부터 실질적으로 산업분야에 응용되어왔으며, 바퀴의 마찰에 의한 이동소음이 적고 분진이 발생되지 않는 장점을 가지고 있어 반도체 제조공장 혹은 생화학공장의 초청정실에서 적합한 재료반송시스템으로 실용화가 이루어지고 있다 [1]. 여러 가지 자기력 발생장치와 자성재료의 발달로 인하여 다양한 자기부상방식들이 소개되어졌으며, 특히 고에너지적 영구자석의 상업적 이용이 가능해짐에 따라 복합여자형 자석(Hybrid-Excited Magnet) 혹은 제어형 PM(Controlled-PM : CPM) 전자석으로 구성된 자기부상시스템이 에너지절약형 최적 시스템으로 일반화되고 있다 [2][3]. 이러한 시스템은 기존의 전자석 흡인방식에서 부상을 얻기 위해 소비되는 에너지량을 감소시키고자 영구자석을 적용한 것으로서, 반송자의 전체 무게의 중력에 해당하는 부상력을 제공하는데 영구자석을 이용하였으며 과도적인 부상력을 발생시키기 위해 전자석을 사용한다. 따라서 CPM 전자석으로 구성된 자기부상방식은 과도상태에서만 전력의 소모가 발생하도록 [4]에서 제시된 제로전력제

어기법(Zero-Power-Control Method)을 적용할 경우 유로 하중의 변화에 대한 CPM 전자석의 정상상태 손실을 현저히 감소시킬 수 있다. 아울러, 고보자력을 갖는 회로류계 영구자석을 채택할 경우 최소의 전력으로 충분한 부상력을 얻을 수 있어 전 시스템의 경제적인 운전이 가능하다 [2].

그렇지만, 이와 같은 부상시스템은 전자기력의 비선형특성과 제어가능영역의 한계 때문에 영구자석과 초전도체간의 반발방식의 것을 제외하고는 불안정한 시스템이며 제어하기가 어렵다. 그리고, 기존의 제로전력제어기법을 적용한다고 하더라도 가변부하에 대한 공극보상을 할 수 없기 때문에, 각각의 부하와 그에 상응하는 제로전력 평형공극에 대한 정보가 없다면 수송하고자하는 대상물의 무게가 변할 때 정확한 제로전력 부상제어가 불가능해지고 평형공극을 찾지 못하는 문제점을 갖고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 부하가 변화할 때 전 부상시스템을 선형적인 동적모델로 보고 미지의 가변부하의 상태를 추정할 수 있는 선형적인 상태관측기 이론이 상기의 CPM 전자석 부상시스템의 제로전력 부상제어에 적용되어졌다 [5]. 하지만, 이렇게 미지의 상태값에 대한 선형적인 추정이론을 적용하여 부상 제어할 경우 이동자의 이동속도에 관련된 변화시간을 제대로 인식할 수 없어 과도응답시 상태관측기의 성능이 저하된다.

따라서, 상태관측기 이론을 적용한 제로전력 부상제어의 응답성과 안정도를 향상하기 위하여 본 논문에서는 전자기력의 비선형특성을 고려할 수 있는 확장형 상태관측기를 사용하였다. 특히, 최소차원 확장형 상태관측기 (Reduced

* 正 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 博士課程

*** 正 會 員 : 漢陽大 電子電氣컴퓨터工學部 助教授 · 工博

接受日字 : 2002年 3月 14日

最終完了 : 2002年 6月 15日

Order Extended Luenberger Observer : ROELO)를 사용하여 부하가변 시 미지의 가변부하에 대한 비선형특성의 상태값을 추정한 후 가변부하에 대해 소비전력이 영이 되는 평형공극을 찾아 그 평형공극에서 부상제어가 되도록 하는 제어기법을 제안한다. 본 연구에서 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 ACSL(Advanced Continuous Simulation Language)을 이용한 시뮬레이션을 CPM 전자석 자기부상 시스템의 모델링에 대하여 실시하였다. 또한, CPM 전자석 자기부상의 실험적 시스템과 TMS320F240 DSP를 이용한 디지털 제어회로를 제작하여 본 논문에서 제안한 제어기법을 구현하였으며, 실험과 시뮬레이션에 의한 결과를 비교 검토하였다.

2. 제어형 PM 전자석 자기부상시스템의 모델링

시스템의 제어를 위한 상태방정식을 구하기 위해서는 그 시스템에 대한 운동방정식과 전압방정식을 구해야 한다. 그림. 2.1은 CPM 전자석 자기부상시스템의 형상모델을 나타낸 것으로서, 각 부분의 재원은 표 1과 같으며 변수 Z를 공극, e를 입력전압, (1/2)lp를 영구자석의 높이로 설정한다.

표 1 부상시스템의 재원

Table 1 Specification of Levitation System

고정자	전체높이	40(mm)
	전체길이	107(mm)
	치높이	30(mm)
	치폭	5(mm)
CPM	중량	3.91(kg)
	코일 턴수	334(turn)
	영구자석	Nd-Fe-B
	잔류자속밀도	1.2(T)
	영구자석높이	2.7(mm)
	영구자석 단면적	629.35(mm ²)
	코어 높이	33.5(mm)
	코어 길이	57.7(mm)
	코어 폭	20.5(mm)
	코어 사이의 길이	16.7(mm)

그림 2.1 모델의 공극자속밀도 B와 인덕턴스 L을 구하면 다음의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$B = \frac{B_r - bi}{1 + az} \tag{2-1}$$

$$L = \frac{N^2 \cdot s}{\frac{l_c}{\mu_c} + \frac{2z}{\mu_o} + \frac{l_p}{\mu_m}} \tag{2-2}$$

여기서, $a = 1.05 \frac{2}{l_p}$, $b = \frac{(1.05\mu_o N)}{l_p}$ 이고 l_p 는 영구자석의 자로길이, s 는 철심의 단면적, N 은

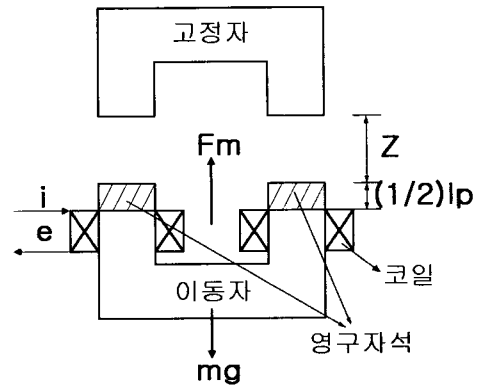


그림 2.1 시스템 모델
Fig. 2.1 System model

코일의 Turn수, B_r 은 잔류자속밀도, μ_o 는 공극의 투자율, μ_m 는 영구자석의 비투자율, l_c 는 철심의 자로길이, 그리고 μ_c 는 철심의 비투자율을 나타낸다.

또한 상기에서 구한 식과 이러한 자기부상모델의 자기축적에너지 W로부터 발생 전자기력을 식(2-3)과 같이 구할 수 있다.

$$F_m = -\frac{\partial W}{\partial z} = \frac{s}{2\mu_o} \cdot \left(\frac{B_r - bi}{1 + az} \right)^2 \tag{2-3}$$

본 시스템의 상태방정식을 도출하기 위한 기본적인 운동방정식과 표현하면 식(2-4), 식(2-5)과 같으며, 제로전력제어를 적용하여 가변부하에 따라 각각의 정상상태로 공극이 수렴한 경우 전류, 공극과 전압을 두가지의 다른 성분으로 분리하여 식(2-6)과 같이 표현할 수 있다.

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = m \frac{dv}{dt} = mg - F_m \tag{2-4}$$

$$Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dz} \left(\frac{dz}{dt} \right) = E \tag{2-5}$$

$$i = i_0 + \Delta i, \quad z = z_0 + \Delta z, \quad E = E_0 + \Delta E \tag{2-6}$$

여기서, m 은 이동자의 질량, g 는 중력가속도이고 i_0, z_0, E_0 는 정상상태에서의 전류, 공극과 전압을, $\Delta i, \Delta z, \Delta E$ 는 과도상태의 전류, 공극과 전압의 미소변동치를 나타낸다.

식(2-1), (2-2), (2-3), (2-4)와 식(2-5)에 식(2-6)을 대입한 후 과도상태의 미소 변동치에 대하여 Taylor 급수를 전개하면 평형상태 부근에서 선형화된 운동방정식과 전압방정식을 각각 식(2-7)과 식(2-8)과 같이 얻을 수 있다.

$$m \frac{d(\Delta v)}{dt} = \frac{s}{\mu_0} \left(b \cdot \frac{(B_r - bi_0)}{(1 + az_0)^2} \cdot \Delta i \right. \\ \left. + a \cdot \frac{(B_r - bi_0)^2}{(1 + az_0)^3} \cdot \Delta z \right) \quad (2-7)$$

$$\frac{d(\Delta i)}{dt} = \frac{1}{L_0} \{-R \Delta i + \Delta E\} \quad (2-8)$$

여기서, $\Delta v = \frac{d(\Delta z)}{dt}$, L_0 는 정상상태에서의 인덕턴스이다.

따라서, 위의 식들을 이용하여 본 자기부상시스템의 상태방정식을 구할 수 있다. 본 논문에서는 인덕턴스의 변화에 따른 시스템의 비선형 특성을 고려하기 위하여 확장형 관측기를 사용하였기 때문에, 상태방정식을 구성하기 전에 상태변수와 매개변수의 부분으로 분리해 주어야 한다. 식 (2-9)은 인덕턴스를 CPM의 매개변수(첨자 p)로, 전자석 시스템에 관련된 부분을 상태변수(첨자 n)로 행렬식을 구성한 본 자기부상시스템의 상태방정식을 나타낸 것으로서, $x_n = (\Delta z \ \Delta v \ \Delta i \ \Delta F_L)^T$ 는 상태변수를, $x_p = L$ 는 매개변수를, $B_n = (0 \ 0 \ L^{-1} \ 0)^T$, $u = \Delta E$, 그리고 ΔF_L 은 가변부하의 미소 변동치를 나타낸다.

$$\frac{dx}{dt} = \begin{pmatrix} \frac{dx_n}{dt} \\ \frac{dx_p}{dt} \end{pmatrix} \\ = \begin{bmatrix} A_n(x_p) & 0 \\ A_q(x_n) & A_p(x_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ x_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_n \\ 0 \end{bmatrix} u \\ = \begin{bmatrix} f_n \\ f_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_n \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (2-9)$$

$$\text{여기서, } f_{n1} = \frac{d(\Delta z)}{dt} = \Delta v$$

$$f_{n2} = g - \frac{s}{2m\mu_0} \left(\frac{B_r - b\Delta i}{1 + a(z_0 + \Delta z)} \right)^2 + \frac{\Delta F_L}{m}$$

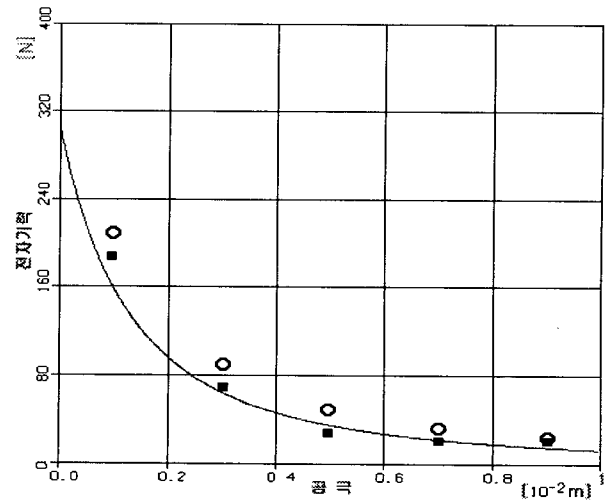
$$f_{n3} = -\frac{\Delta i}{L} \left(R + \frac{dL}{dz} \Delta v \right)$$

$$f_{n4} = \frac{d(\Delta F_L)}{dt} = 0$$

$$f_p = -\frac{2N^2\mu_0 s \Delta v}{\left(\frac{l_c}{\mu_c} + 2(z_0 + \Delta z) + \frac{l_p}{\mu_m} \right)^2}$$

3. 상태관측기 이론(State Observer Theory) 및 제어기 설계

전술한 상태방정식을 적용한 제어기의 구현은 시스템에서 상태변수를 정확하게 알 경우에만 가능하지만 일반적으로 그 상태변수의 값을 알기란 쉽지 않다. 따라서 본 자기부상 시스템에서의 제로전력제어를 위해 센서로부터 측정할 수 있거나 혹은 센서로부터 얻은 위치정보를 연산 처리하여 얻을 수 있는 공극, 속도와 전류의 미소 변동치 ($\Delta z, \Delta v, \Delta i$)를 출력으로 이용하여 부하의 상태를 추정할 수 있는 상태관측기 이론을 적용할 수 있다. 그림 3.1은 수치해석방법을 통한 정특성해석 및 실험의 결과로부터 얻은 전류 0[A]에서 공극에 따른 부상력을 나타낸 것으로서, 전자기력에 의한 부상력이 전류와 공극에 변화에 대하여 비선형적인 특성을 갖고 있음을 알 수 있다[5]. 만약 이와 같은 비선형적인 특성결과의 주원인인 가변부하에 따른 인덕턴스를 선형적인 값으로 고정한 채 부하의 상태를 추정할 수 있는 상태관측기 이론 즉, 일반적인 Luenberger Observer를 적용하여 제로전력제어를 하는 경우 응답성이 늦고 큰 맥동을 발생하는 문제점을 갖고 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 보완하기 위해서 제어기의 설계시, 비선형적인 요소인 인덕턴스를 가변부하에 따른 매개변수로 하여 부하의 상태를 추정할 수 있는 확장형 상태관측기를 사용하였다.



-- : 자기등가회로법 ■ : 2D FEM ○ : 실험결과

그림 3.1 전자기력 (공극 가변, 전류 일정)

Fig. 3.1 Electromagnetic force (variable gap, constant current)

3.1 전차원 확장형 관측기(Full Order Extended Luenberger Observer : FOELO)

CPM 전자식 자기부상시스템의 선형적인 수학적 모델을 얻기 위하여 실제 상태변수들의 값이 상태벡터의 궤도 $x(t)$ 에서 약간 벗어난 점에 있다고 가정한다면, 이 점에 대해 식(2-10)은 Taylor 급수전개로 식(3-1)과 같이 확장될 수 있다.

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(\hat{x}(t))[x(t) - \hat{x}(t)] + \text{higher order terms} + Bu(t) \quad (3-1)$$

만약 변화분 $(x - \hat{x})$ 가 작다면, 위 식의 $(x - \hat{x})$ 에서 고차성분들은 무시될 수 있다. 따라서 $\frac{d}{dx} f(\hat{x})$ 항을 $\tilde{A}(\hat{x}(t))$ 로 두면 부하를 고려한 전차원 확장형 관측기(FOELO)는 식(3-2)와 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{d\hat{x}(t)}{dt} = \tilde{A}(\hat{x}(t))\hat{x}(t) + Bu(t) + G(\hat{x}) + K(\hat{x})(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (3-2)$$

여기서 $K(\hat{x})$ 는 관측기의 이득행렬이고 $g(x)$ 와 $\tilde{A}(\hat{x}(t))$ 는 식(3-3)과 같이 표현된다.

$$\tilde{A}(\hat{x}(t)) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} & a_{24} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & a_{35} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{51} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$g(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ g_2 \\ g_3 \\ 0 \\ g_5 \end{pmatrix} \quad (3-3)$$

$R_{total} = \frac{l_c}{\mu c} + 2(z + \Delta z) + \frac{l_p}{\mu_m}$, $B_{total} = B_r - b\Delta i$, 그리 고 $Z_{total} = 1 + a(z_0 + \Delta z)$ 이라 하면 각각의 행렬값들은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$a_{21} = \frac{Sa}{m\mu_0} \frac{B_{total}^2}{Z_{total}^3}, a_{23} = \frac{Sa}{m\mu_0} \frac{B_{total}}{Z_{total}^3}, a_{24} = \frac{1}{m},$$

$$a_{31} = -\frac{8(\Delta i)}{L} \frac{N^2\mu_0 S}{R_{total}^2}, a_{32} = -\frac{\Delta i}{L} \frac{dL}{dz},$$

$$a_{33} = -\frac{1}{L} \left(R + \frac{dL}{dz}(\Delta v) \right), a_{35} = \frac{1}{L^2} \left(R + \frac{dL}{dz}(\Delta v) \right),$$

$$a_{51} = 8 \frac{N^2\mu_0 S(\Delta v)}{R_{total}} - 2 \frac{N^2\mu_0 S}{R_{total}^2},$$

$$g_2 = g - \frac{S}{2m\mu_0} \left(\frac{B_{total}}{Z_{total}} \right)^2 \left(1 - \frac{2a}{Z_{total}}(\Delta z) - \frac{2b}{B_{total}}(\Delta i) \right),$$

$$g_3 = \frac{8\Delta i}{L} \frac{N^2\mu_0 S}{R_{total}^3} + \frac{\Delta i}{L} \frac{dL}{dz}(\Delta v) - \frac{1}{L^2} \left(R + \frac{dL}{dz}(\Delta v) \right) L$$

$$g_5 = -8 \frac{N^2\mu_0 S(v)}{R_{total}^3}(\Delta z)$$

3.2 최소차원 확장형 관측기(Reduced Order Extended Luenberger Observer : ROELO)

전차원 확장형 관측기의 경우 사용자가 직접 설정해줘야만 하는 이득 $K(\hat{x})$ 의 개수가 너무 많기 때문에 최적의 이득값을 찾아내기가 쉽지 않고 측정 가능한 상태까지 추정해야 하기 때문에 연산량이 너무 많다는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 이득의 개수를 줄여 필요한 가변부하만을 추정하는 최소차원 확장형 관측기(ROELO)를 사용하였다. 전차원 확장형 관측기의 식으로부터 다음과 같은 계수행렬간의 관계식(3-4)을 이용하여 최소차원 확장형 관측기를 식(3-5)과 같이 표현할 수 있다.

$$TA(\hat{x}(t)) - FT = K(\hat{x})C, \quad TB = H, \quad G(\hat{x})Tg(x) \quad (3.4)$$

$$\frac{dz(t)}{dt} = Fz(t) + K(\hat{x})y(t) + H(\hat{x})u(t) + G(\hat{x}) \quad (3.5)$$

상기 식에서 T행렬과 F행렬은 식(3-6)과 같이 표현된다.

$$T = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} & T_{15} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} & T_{25} \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} F_{11} & 0 \\ 0 & F_{22} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

여기서 T행렬의 각각의 값은 다음과 같다.

$$P_1 = \frac{1}{a_{23}} \left\{ a_{21} - \frac{F_{11}^2}{a_{12}} \right\},$$

$$S_{12} = - \left(\frac{F_{11}a_{33} - F_{11}^2}{a_{35}} \right) P_1 \left\{ \frac{F_{11}^2}{a_{11}a_{35}} a_{32} \right\}, \quad S_{31} = \frac{F_{22}}{a_{24}} a_{23},$$

$$S_{21} = \frac{F_{22}}{a_{24}} a_{21} - \left(\frac{F_{22}^3}{a_{12}a_{24}} \right), \quad S_{23} = \frac{a_{32}}{a_{12}a_{35}} (F_{22}^2) + a_{51},$$

$$S_{33} = \frac{F_{22}a_{33} - F_{22}^2}{a_{35}}, \quad R_1 = k_{11} + \frac{F_{11}}{a_{12}} k_{12} - P_1 k_{13},$$

$$R_2 = k_{21} + \frac{F_{22}}{a_{12}} k_{22} - \frac{S_{21}k_{23}}{S_{31}}, \quad T_{25} = - \frac{S_{31}R_2}{S_{33}S_{21}},$$

$$T_{15} = - \frac{(S_{23}S_{31} - S_{21}S_{33})T_{25} - R_2S_{31}}{S_{21}S_{32}},$$

$$T_{24} = \frac{k_{23} - S_{33}T_{25}}{S_{31}},$$

$$T_{14} = \frac{a_{24}}{F_{11}a_{23}} \left\{ k_{13} - \left(\frac{F_{11}a_{33} - F_{11}^2}{a_{35}} \right) T_{15} \right\},$$

$$T_{21} = \frac{1}{a_{12}} \left\{ k_{22} + \left(\frac{F_{22}^2}{a_{24}} \right) T_{24} - \frac{F_{22}}{a_{35}} a_{32} T_{25} \right\},$$

$$T_{12} = \frac{F_{11}}{a_{24}} T_{14}, \quad T_{13} = \frac{F_{11}}{a_{35}} T_{15},$$

$$T_{11} = \frac{1}{a_{12}} \left\{ k_{12} + \left(\frac{F_{11}^2}{a_{24}} \right) T_{14} - \frac{F_{11}}{a_{35}} a_{32} T_{15} \right\},$$

$$T_{22} = \frac{F_{22}}{a_{24}} T_{24}, \quad T_{23} = \frac{F_{22}}{a_{35}} T_{25}$$

3.3 제어기 설계 및 구성

전술한 식(3-5)을 이용하면 과도상태에서 정상상태에 이르기까지의 부하편차를 나타내는 가변부하와 이때의 인덕턴스를 계산할 수 있으며, 이것은 최소차원 확장형 관측기를 이용하여 공극보상기를 구현하면 비선형요소를 고려하면서 가변부하를 추정할 수 있다는 것을 보여준다. 그림 3.2는 본 논문에서 제시한 상태관측기에 의한 제로전력 부상제어의 전체 블록도로서, 시스템의 안정성을 향상하기 위하여 상태피드백루프(State-feedback Loop)가 추가되어져 있다. 그림에서 u행렬은 공극, 속도, 전류, 그리고 가변부하의 변동치($\Delta z, \Delta v, \Delta i, \Delta F_L$)에 대한 지령치 벡터로 평형 공극의 위치에서 상태변수들이 0이 되어야 하므로 영 벡터행렬로 구성있으며, E는 전압입력치를, Y는 3x1의 출력행렬을, F는 피드백 제어이득을, A, B, C는 상태방정식의 계수행렬을 나타낸다.

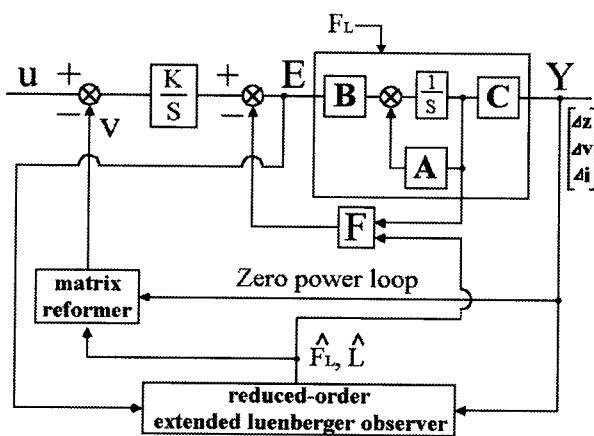


그림 3.2 최소차원 확장형 관측기를 포함한 제로파워부상제어
 Fig. 3.2 Zero power control with Reduced Order Extended Luenberger Observer

4. 시뮬레이션 및 실험

본 논문에서 제시한 제로전력제어와 부하상태 관측기를 포함한 자기부상 제어기의 시뮬레이션을 위해 ACSL를 이용하여 1 [kg]의 가변부하와 1 [sec]의 가변시간을 기준으로 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 가변부하 1 [kg]의 추를 사람이 직접 손으로 이동자에 올려주는 방법을 이용하여 실험을 수행하였다. 사람의 손을 이용하여 가변부하의 시간을 시뮬레이션과 같도록 조절하는 것은 어렵기 때문에, 실험과

시뮬레이션에 동일한 시간동안 부하가 인가되도록 하기 위하여 실험시에 적용한 부하의 인가시간으로 시뮬레이션을 재수행하였다. 제로전력제어의 샘플링 주기는 300 [μ sec]이고, 관측기의 샘플링 주기는 100 [μ sec]로 설정하였으며 가변부하는 1.6[sec]에서부터 3.25[sec]까지 약 1.7[sec]간 인가하였다.

본 논문에서 제안한 부상제어기법의 타당성을 입증하기 위하여 비선형요소를 고려하지 않은 최소차원 상태관측기와 본 연구에서 제시한 최소차원 확장형 상태관측기를 포함한 제로전력 부상제어방법에 대한 각각의 성능결과들을 비교하였다. 그림 4.1과 그림 4.2는 일반적인 최소차원 상태관측기와 본 연구에서 제시한 최소차원 확장형 상태관측기를 이용한 제로전력 부상제어시의 시뮬레이션 결과로 각각 공극과 전류의 파형을 나타낸 것으로, 부하가 변화하더라도 전류는 0에 수렴하고 있다. 그러나, 공극과 전류의 파형을 비교해보면 최소차원 상태관측기보다 본 연구에서 제시한 최소차원 확장형 상태관측기를 적용하여 제로전력 부상제어를 할 경우 응답성이 향상되고 백동이 상당히 감소되었음을 알 수 있다.

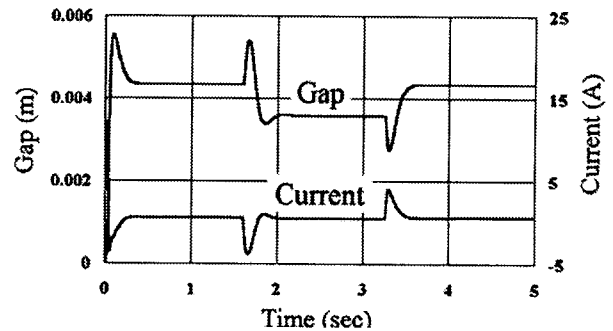


그림 4.1 최소차원 상태관측기를 포함한 제로파워제어시의 공극과 전류 파형
 Fig. 4.1 Gap and current waveform of zero power control with Reduced Order Luenberger Observer

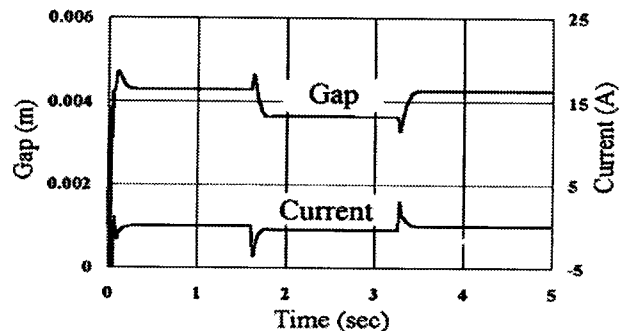


그림 4.2 최소차원 확장형 상태관측기를 포함한 제로파워제어시의 공극과 전류 파형
 Fig. 4.2 Gap and current waveform of zero power control with Reduced Order Extended Luenberger Observer

맥동과 응답성이 향상됨을 확인된 시뮬레이션의 결과를 실제적으로 검증하기 위하여 그림 4.3과 같이 실험장치를 제작하여 실험을 실시하였다. 그림 4.3은 고정자와 CPM 전자석으로 구성된 자기부상시스템과 제어기의 구조를 나타낸 것으로 영구자석과 코일로 구성된 이동자는 상하운동이 가능하도록 지지대를 설치하고 베어링을 삽입하였다. 또한 이동자의 변위를 감지할 수 있도록 공극센서와 대향되는 위치에 금속판을 설치하여 이동자와 같이 움직이도록 하였다. 전자기력은 전자석의 전류에 의해 조절할 수 있으며, 전류를 (+)방향으로 인가하는 경우 영구자석의 전자기력을 감소시키고, 반대로 (-)방향으로 전류를 인가할 경우 전자기력이 증가하도록 코일을 시행하였다. 앞서 모델링한 자기부상시스템과 수치적 연산을 위한 DSP 보드, 공극 위치 검출용 공극센서와 구동 초퍼 등으로 구성하였다. 여기서, DSP 보드는 TI사의 TMS320F240을 사용하여 제작하였다[6].

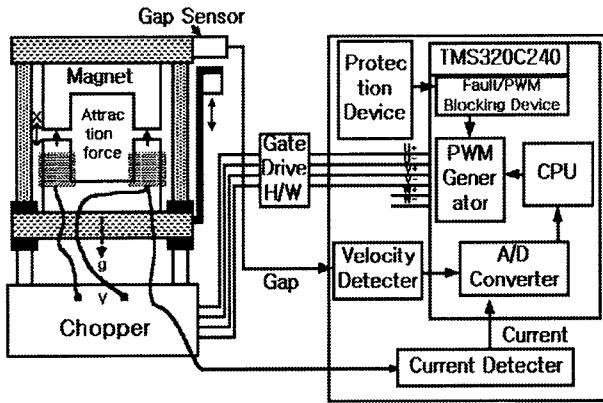


그림 4.3 실험장치 개요도
Fig. 4.3 Overview of experimental equipment

실험에서 가변부하는 1[kg]의 추를 이용하였으며, 본 실험을 수행한 후 실험시의 부하 가변시간과 같은 시간으로 시뮬레이션을 재수행 함으로써 동일한 시간에서의 시뮬레이션의 결과와 실험결과를 비교할 수 있었다. 실험 결과는 그림 4.4와 그림 4.5에 나타내었다. 그림 4.4는 일반적인 최소차원 상태관측기를 적용한 경우의 결과이며, 그림 4.5는 전자기력의 비선형특성을 고려하기 위하여 본 연구에서 제안한 최소차원 확장형 상태관측기를 적용한 경우의 제로전력 부상제어시 공극과 전류의 파형을 나타내고 있다. 시뮬레이션의 결과와 동일하게 최소차원 확장형 상태관측기를 포함한 경우의 공극과 전류의 맥동이 일반적인 최소차원 상태관측기를 포함한 경우보다 거의 1/2 이하로 감소하였으며 시스템의 응답특성이 향상됨을 확인할 수 있었다.

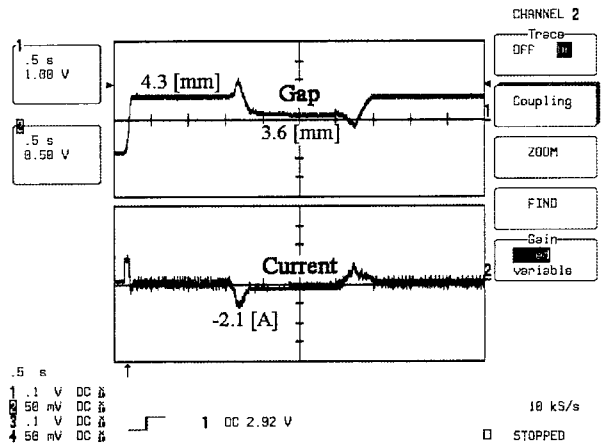


그림 4.5 최소차원 확장형 상태관측기를 포함한 실험결과(공극과 전류 파형)

Fig. 4.5 Result of experiments with Reduced Order Extended Luenberger Observer(Gap and Current Waveform)

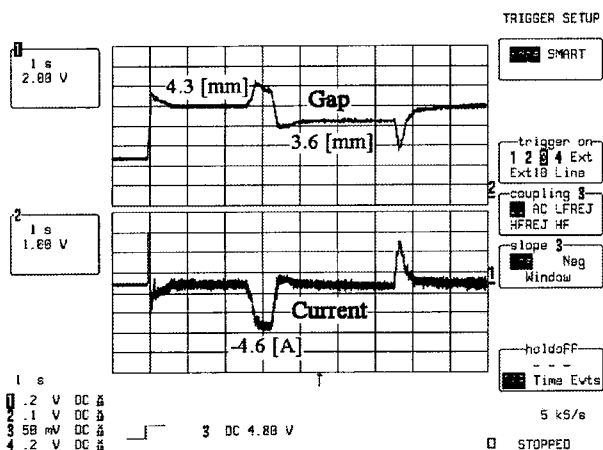


그림 4.4 최소차원 상태관측기를 포함한 실험결과(공극과 전류 파형)

Fig. 4.4 Result of experiments with Reduced Order Luenberger Observer(Gap and Current Waveform)

5. 결 론

본 논문에서는 CPM 전자석 자기부상시스템의 제로전력 부상제어시 가변부하에 따른 응답과 제어 특성을 향상시키기 위해 최소차원 확장형 상태관측기(Reduced Order Extended Luenberger Observer)를 적용한 가변부하 관측기를 구성하였다. 적용된 관측기에 의해 시스템의 비선형요소를 고려하면서 가변부하의 상태를 추정할 수 있었다. 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션 결과와 실제 제작한 자기부상시스템의 실험장치, DSP를 사용한 제어기판을 이용하여 얻어낸 실험결과를 비교 검토하여 그 타당성을 입증하였다. 전자기력의 비선형특성을 고려할 수 있는 최소차원 확장형 상태관측기와 선형적인 시스템의 해만을 구할 수 있는 최소차원 상태관측기를 이용한 제로전력 부상제어의 결과를 비교해 보면, 최소차원 확장형 상태관측

기의 부하 추정값을 이용하여 구성된 제로전력 부상제어가 공극과 전류의 맥동, 응답성, 그리고 안정도 등에서 특성이 향상되었음을 알 수 있었다. 앞으로 더욱 향상된 부상제어 성능을 위해 복잡한 비선형 제어와 센서리스(Sensorless) 제어 등의 지속적인 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 국제공동연구 (과제 번호: M1-0011-0021) 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] K. Y. Ahn, "A new magnetic levitation transport system" Third International Conference on Motion and Vibration, 1996.
- [2] Yeou-Kuang Tzeng and Tsih c. Wang, "Dynamic Analysis of the Maglev System Using Controlled-PM Electromagnets and Robust Zero-Power-Control Strategy" IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 31, No. 6, pp. 4211-4213, November 1995.
- [3] V. Kose, J. Sievert, "Magnetic levitation without airgap sensor", IOS Press, pp. 701-704, 1998.
- [4] M. Morishita et al., "A new Maglev system for magnetically levitated carrier system", IEEE Trans. On Vehicular Tech, vol. 38. no. 4, pp. 230-236, 1989.
- [5] 김운현, 이 주, "부하 상태관측기에 의한 하이브리드 부상 시스템의 제로 파워 부상 제어" 電氣學會論文誌 50B卷 6號, pp. 282-289, 2001年 6月.
- [6] TMS320F240x DSP Controller Reference set and Reference guide, Texas Instrument. 1998.

저 자 소 개



김 윤 현 (金 倫 賢)

1964년 3월 13일 생. 1987년 한양대 전기 공학과 졸업. 1989년 한양대 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1989~1999년 LG 산 전연구소 책임연구원. 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (02) 2290-0349

Fax : (02) 2295-7111

E-mail: yhyunk@ihanyang.ac.kr



김 솔 (金 솔)

1970년 6월 10일 생. 1997년 한양대 전기 공학과 졸업. 1999년 한양대 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 2000년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-2290-0349, Fax : 02-2295-7111

E-mail : slamsol@ihanyang.ac.kr



이 주 (李 柱)

1963년 8월 30일 생. 1986년 한양대 전기 공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 SYSTEM 정보과학연구과 졸업(공학). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원.

1997년~현재 한양대 공대 전자전기공학부 조교수.

Tel: (02) 2290-0342.

E-mail: julee@hanyang.ac.kr