부하 상태관측기에 의한 하이브리드 부상 시스템의 제로 파워 부상 제어

論 文
50B - 6 - 4

Zero Power Levitation Control of Hybrid Electro-Magnetic Levitation System by Load Observer

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

Abstract - This paper introduces the scheme that improve the control performance of electromagnetic levitation system with zero power controller. Magnetic levitation is used widely, but the electromagnetic force has nonlinear characteristics because it is proportioned to a square of the magnetic flux density and it is in inverse proportion to a square of the airgap. So, it is complicate and difficult to control the electromagnetic force. Besides, it is more difficult to control if the equivalent gap is unknown in case of zero power control. Therefore, this paper proposed the hybrid electro-magnetic levitation control method in which the variable load is estimated by using a load observer and its system is controlled at a new zero power equilibrium airgap position. Also it is confirmed that the proposed control method improve the control performance through simulation and experiment.

Key Words : Zero power Levitation control, hybrid electro-magnet, load observer.

1. 서 론

자기부상 시스템은 초전도 자석, 영구 자석과 상전도 전자석등의 자기력 발생장치와 자성재료의 발달로 인하여 다양한 방식으로 개발되어왔으며 OA기기에서 자기부상열차에 이르기까지 넓은 범위에서 확대 적용이 기대되고 있다.[1] 특히, 자기부상의 특징인 비접촉효과는 기계적 마찰, 마모 현상을 없애 반영구적 사용과 고속운동 및 고온과 저온 등의 특수 환경에 자기부상 시스템의 적용이 가능하게 하였으며, 전기적 능동제어로 인하여 진동 저감 및 위치 성능 향상을 이룰 수 있었다. 또한, 윤활유와 분진으로 인한 오염이 없어 환경보호에 부합하고 설치 장소의 제약이 적어 공간 활용 면에 유리하다.[2]~[5]

이와 같은 자기 부상 시스템 중에서, 전자석 흡인식 타입은 필요한 부상 공극을 유지하기 위하여 전자석을 여자 시켜야 하므로 평형상태에서 전력이 공급되어야 한다. 그러므로 배터리로 전력을 공급받는 자기 부상 시스템에서는 수시로 배터리를 충전하거나, 배터리 용량을 증가시켜야 하는 단점을 갖게 된다. 따라서, 안정한 부상 상태를 유지하며 평형상태의 전류를 최소로 하기 위하여 평형 공극 위치에서 전류의 값이 제로가 되는 제로파워제어(zero power control)가 제안되어왔으며, 하이브리드 전자석(Hybrid Electro Magnetic)으로 구성된 시스템이 에너지를 절약하는 최적시스템으로 증명되어 널리 사용되고 있다.[6][7] 그러나 기존 제로파워제어는 가변부하에 따른 공극 보상을 못하므로 수송하고자하는 대상물의 질량이 변할 때 그에 따른 평형 공극 위치에 대한 정보를 미리 알고 있지 못할 경우, 제어가 불안정하고 제로파워제어시 평형 공극 위치를 찾지 못하는 문제점을 갖고 있다.

따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 상태관측기를 사용하였다. 상태관측기란 미지의 상태값을 추정하는 이론으로 본 논문에서는 가변부하 시 미지의 가변부하를 추정한 후, PI제어기인 공극보상기를 구성하여 가변부하에 대해 소비전력이 제로가 되는 평형 공극을 찾아 그 평형 공극에서 부상제어가 되도록 하는 방법을 제안한다. 본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 ACSL(Advanced Continuous Simulation Language)을 이용한 시뮬레이션을 하였으며, 시뮬레이션에 앞서 하이브리드 전자석 자기부상시스템 (Hybrid Electro-Magnetic Levitation System : HEMLS)에 대해 모델링을 하고 모델링에 의해 계산된 각 공극과 전류에 따른 부상력을 수치해석 방법인 FEM(Finite Element Method)과 정 특성 실험에 의해 구해진 값들과 비교하여 하이브리드 자기부상시스템의 모델링에 대한 정확성을 검사하였다. 또한 하이브리드 자기부상 실험 시스템과 TMS320F240 DSP를 이용한 디지털 제어 회로를 제작하여 본 논문에서 제안한 제어 방법을 실제 구현, 시뮬레이션 결과와 비교 검토하였으며 제안된 방법에 의해 제로 파워 부상제어 성능이 향상됨을 확인하였다.

* 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 助敎授 · 工博
接受日字 : 2001年 3月 19日
最終完了 : 2001年 5月 18日

2. 자기 부상 시스템의 모델링

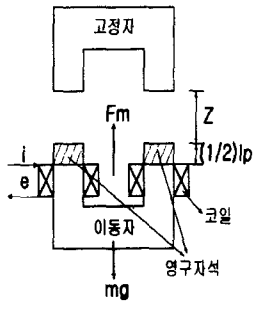


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. system model

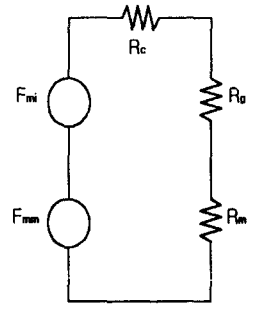


그림 2. 자기등가회로
Fig. 2. magnetic equivalent circuit

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(k
	코일 턴수	334(tur
	영구자석	Nd-Fe-I
	잔류자속밀도	1.2(T
	영구자석높이	2.7(mm
	영구자석 단면적	629.35(mn
	코어 높이	33.5(mn
	코어 길이	57.7(mr
	코어 폭	20.5(mn
	코어 사이의 길이	16.7(mn

그림 1은 하이브리드 자기부상 시스템의 모델을 나타내고 있다. 공극과 입력전압은 각각 z, e로 정의하였으며 각 부분의 재원은 표 1에 나타내었다. 그림 2는 하이브리드 자기부상 시스템의 등가자기회로를 나타내고 있으며 F_{mi}, F_{mm}은 영구자석과 전류에 의해 발생되는 기자력을 나타내고, R_c, R_g, R_m은 각각 고정자와 공극 및 영구자석의 자기저항으로 다음 식과 같이 계산 할 수 있다.

$$R_c=\frac{l_c}{\mu_c s},\ R_g=\frac{l_g}{\mu_0 s}=\frac{2z}{\mu_0 s},\ R_m=\frac{l_p}{\mu_m \cdot s} \tag{1}$$

$$F_{mi}=Ni \tag{2}$$

$$F_{mm}=\phi_m \cdot R_m=(B_r \cdot s)\cdot\frac{l_p}{\mu_m \cdot s}=\frac{B_r \cdot l_p}{\mu_m} \tag{3}$$

여기에서 l_c은 코어의 자로길이, l_p은 영구자석의 자로길이, s는 코어의 단면적, N은 turn 수, B_r은 잔류자속밀도, μ_m은 영구자석의 투자율, μ_c은 코어의 투자율을 나타낸다.

또한 식(1), (2), (3)의 결과를 이용하여 자속밀도와 발생 부상력을 구하면 식(4), (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$B=\frac{\left(B_r-\frac{1.05\cdot\mu_0\cdot Ni}{l_p}\right)}{\left(1+1.05\cdot\frac{2z}{l_p}\right)}=\frac{B_r-bi}{1+az} \tag{4}$$

$\frac{\mu_m}{\mu_0}=1.05,\ a=1.05\frac{2}{l_p},\ b=\frac{(1.05\mu_0 N)}{l_p},\ \frac{l_c}{\mu_c}$는 무시

$$F_m=\frac{s}{2\mu_0}\cdot B^2 \tag{5}$$

Taylor 급수로 전개하여 평형상태 부근에서 선형화 한 본 시스템의 운동방정식과 전압방정식은 식(6), (7)과 같이 정리할 수 있다.[2]

$$m\frac{d^2\triangle z}{dt^2}=\frac{s}{\mu_0}\left(b\cdot\frac{(B_r-bi_0)}{(1+az_0)^2}\cdot\triangle i + a\cdot\frac{(B_r-bi_0)^2}{(1+az_0)^3}\cdot\triangle z\right) \tag{6}$$

$$\frac{d\triangle i}{dt}=\frac{1}{L_0}\{-R\triangle i+\triangle E\} \tag{7}$$

여기에서 L_0는 평형상태에서의 인덕턴스, m은 이동자의 질량, g는 중력가속도, i_0 , z_0 , E_0는 정상상태에서의 전류와 공극, 전압치, $\triangle i$, $\triangle z$, $\triangle E$는 정상상태에서의 전류, 공극, 전압의 미소변동치를 나타낸다.

따라서, 식(6), (7)를 이용하여 식(8)과 같이 상태방정식을 구성할 수 있다.

$$\mathbf{x}'=\mathbf{Ax}+\mathbf{Bu} \tag{8}$$

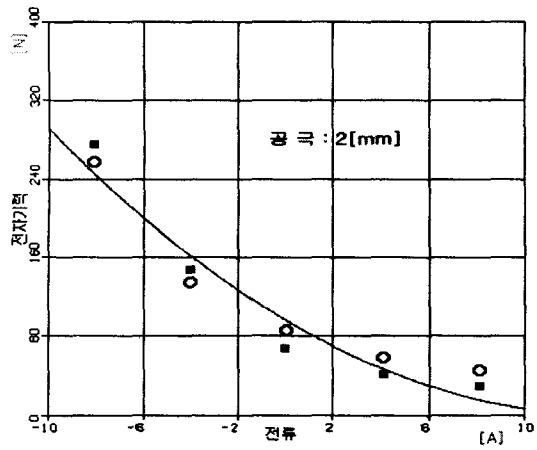
$$\mathbf{x}=\begin{pmatrix}\triangle z\\ \triangle v\\ \triangle i\end{pmatrix},\quad \mathbf{x}'=\begin{pmatrix}\frac{d(\triangle z)}{dt}\\ \frac{d(\triangle v)}{dt}\\ \frac{d(\triangle i)}{dt}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\triangle z'\\ \triangle v'\\ \triangle i'\end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A}=\begin{pmatrix}0 & 1 & 0\\ \frac{sa}{\mu_0 m}\frac{B_r^2}{(1+az_0)^3} & 0 & \frac{sb}{\mu_0 m}\frac{B_r}{(1+az_0)^2}\\ 0 & 0 & -\frac{R}{L_0}\end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B}=\begin{pmatrix}0\\ 0\\ \frac{1}{L_0}\end{pmatrix},\quad \mathbf{u}=\triangle E$$

기본방정식과 상태방정식을 구성한 후, 자기등가회로법에

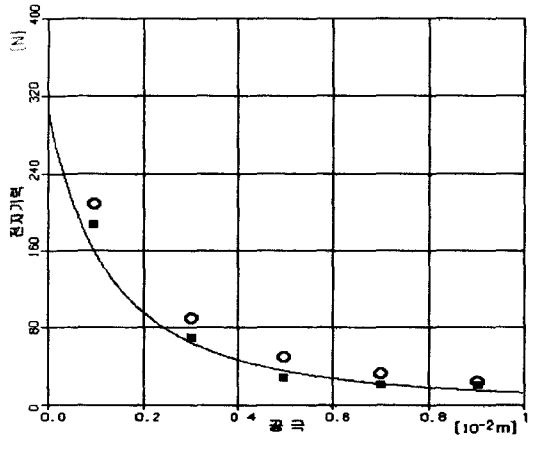
의하여 계산된 부상력의 정확성을 검토하기 위하여 수치해석방법으로 정특성 해석을 하였다. 그림 3, 4은 Maxwell응력을 이용하여 구한 부상력과 자기등가회로법에 의해 얻은 부상력을 실험을 통하여 구한 부상력과 비교한 것이다. 그림 3은 공극 2[mm]에서 전류에 따른 부상력을, 그림 4는 전류 0[A]에서 공극에 따른 부상력을 나타내고 있다. 해석 및 실험 결과로부터 부상력은 전류와 공극에 대하여 비선형적인 특성을 갖고 있음을 알 수 있었으며, 또한 수치해석방법인 FEM의 결과와 자기등가회로법의 결과가 실험과 유사한 양상을 나타내고 있다. 따라서, 본 논문에서 사용한 자기등가회로법에 의한 모델링이 실제 모델과 유사한 특성을 나타내므로, 자기등가회로법에 의한 모델링을 이용하여 시뮬레이션을 시행해주어도 만족할만한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.



-- : 자기등가회로법 ■ : 2D FEM ○ : 실험결과

그림 3. 전자기력 (전류 가변, 공극 일정)

Fig. 3. Electromagnetic force (variable current,



-- : 자기등가회로법 ■ : 2D FEM ○ : 실험결과

그림 4. 전자기력 (공극 가변, 전류 일정)

Fig. 4. Electromagnetic force (variable gap, constant current)

3. 제어기 설계

3.1 전차원관측기 (Full Order Luenberger Observer)

자기부상 시스템에서 전류는 센서로부터 측정가능하고, 속도는 공극센서로부터 얻은 위치 정보로부터 연산을 통하여 계산 가능하다. 그러나 부하는 측정이 불가능하므로, 부하의 상태를 추정하기 위하여 상태관측기(state observer) 이론인 Luenberger Observer를 사용하였다. 관측기이론을 사용하기 위하여 식(8)에서 구성한 상태방정식에 가변부하 변화분 $\triangle F_L$을 추가하여 상태방정식을 재구성하면 각각의 상태들과 계수 행렬을 식(9)와 같다.

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \triangle z \\ \triangle v \\ \triangle i \\ \triangle F_L \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x}' = \begin{pmatrix} \triangle z' \\ \triangle v' \\ \triangle i' \\ \triangle F_L' \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{sa}{m\mu_0}\frac{(B_r - bi_0)^2}{(1+az_0)^3} & 0 & \frac{sb}{m\mu_0}\frac{(B_r - bi_0)}{(1+az_0)^2} & \frac{1}{m} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L_0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_0} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{u} = \triangle E$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{cx}, \quad \mathbf{c} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \tag{9}$$

여기서, 출력은 $\triangle z$, $\triangle v$, $\triangle i$ 이며, $\hat{x}(t)$는 관측한 상태, $x(t)$는 실제상태로 정의하면 관측기식은 다음과 같다.

$$\hat{x}'(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - \hat{y}(t)] \tag{10}$$

이때, 식(10)은 전차원 관측시스템으로 L은 오차보정을 위한 행렬이며 구성은 다음과 같다.

$$L = \begin{pmatrix} L_{11} & 0 & 0 \\ 0 & L_{22} & 0 \\ 0 & 0 & L_{33} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} \end{pmatrix} \tag{11}$$

상태관측오차를 $e(t) = \hat{x}(t) - x(t)$ 로 정의하면, 식(10)은 다음과 같이 다시 정의 할 수 있다.

$$e'(t) = (A - LC)\, e(t) \tag{12}$$

여기서 (A-LC)이 안정행렬이면 $t \to \infty$ 일 때 $\hat{x}(t) \to x(t)$

가 됨을 의미한다. 따라서, 관측한 상태 $\hat{x}(t)$가 실제 상태 $x(t)$과 동일한 값으로 수렴하기 위하여 (A-LC)가 안정행렬이여야 하고, 행렬 (A-LC)의 고유값들이 음수가 되어야만 한다. 따라서, 고유값들이 음수가 되도록 L 행렬을 설정한 후, 식(10)에 대입하여 관측한 상태들의 결과식을 표현하면 식(13), (14), (15), (16)과 같다.

$$\Delta\hat{z} = \int (L_{11}(\Delta z - \Delta\hat{z}) + \Delta v)dt \tag{13}$$

$$\Delta\hat{v} = \int \Big(L_{22}(\Delta v - \Delta\hat{v}) + \frac{sa}{m\mu_0} \cdot \frac{(B_r - b i_0)^2}{(1+az_0)^3} \cdot (\Delta\hat{z}) + \frac{sa}{m\mu_0} \cdot \frac{(B_r - b i_0)}{(1+az_0)^2} \cdot (\Delta\hat{i}) + \frac{1}{m}(\Delta\widehat{F_L}) \Big) dt \tag{14}$$

$$\Delta\hat{i} = \int \Big(L_{33}(\Delta i - \Delta\hat{i}) - \frac{R}{L_0}(\Delta\hat{i}) + \frac{1}{L_0}\Delta E \Big) dt \tag{15}$$

$$\Delta\widehat{F_L} = \int (L_{41}(\Delta z - \Delta\hat{z}) + L_{42}(\Delta v - \Delta\hat{v}) + L_{43}(\Delta i - \Delta\hat{i}))dt \tag{16}$$

3.2 최소차원관측기 (Reduced Order Luenberger Observer)

전차원관측기는 사용자가 직접 설정해줘야만 하는 게인의 개수가 너무 많기 때문에 최적의 게인값을 찾아내기가 용이하지 않고 측정 가능한 상태까지 추정하므로 연산량이 많다는 단점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 공극보상기를 구성하기 위하여 필요한 가변부하만을 추정하는 최소차원관측기(Reduced Order Luenberger Observer)를 사용하였다. 전차원관측기의 식은 다음과 같이 최소차원관측기로 표현할 수 있으며,

$$z'(t) = Dz(t) + Ly(t) + Ju(t) \tag{17}$$

$$\hat{x}(t) = Pz(t) + Vy(t) \tag{18}$$

최소차원관측기가 되기 위한 조건으로 다음 식을 사용할 수 있다.

$$TA - LC = DT, \quad J = TB,$$

$$PT + VC = I_n, \quad n = 4 \tag{19}$$

이때, 각 행렬의 차원을 고려하면 다음과 같다.

$$D = d_1,\ J = j_1 \quad L = [\, l_1 \ \ l_2 \ \ l_3 \,],$$

$$P = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{pmatrix}, \quad V = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} \\ v_{41} & v_{42} & v_{43} \end{pmatrix},$$

$$T = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \end{pmatrix}^T, \quad I_n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{20}$$

식(17), (18), (19), (20)과 시스템 파라메터를 이용하여 추정 가변부하의 결과식을 식(21)과 같이 나타내었다.

$$\Delta\widehat{F_L} = f_1(-2780\Delta z + 0.00731\Delta i) - \int (f_2(-\Delta\widehat{F_L} + \Delta z + \Delta i) + (t_1 + t_2)\Delta v + (\frac{t_3}{L_0})\Delta E)\Delta t \tag{21}$$

3.3 제어기 구성

그림 5는 본 논문에서 제시한 상태관측기에 의한 제로파워 부상제어의 전체블럭도를 나타내고 있다. 그림에서 u행렬은 공극(△z), 속도(△v), 전류(△i), 가변부하($\triangle F_L$)의 변동분에 대한 지령치 벡터로 평형공극 위치에서는 상태들이 0이 되어야 하므로 영 벡터로 구성되어있으며 행렬재배열기는 3x1의 출력행렬(Y)와 관측기에서 관측한 가변부하($\triangle F_L$)의 공극보상기 출력을 조합하여 4x1의 행렬로 만들어주는 역할을 한다. 공극보상기는 PI제어기로 구성되었으며 부하변동분에 해당하는 공극변동분을 보상하여주므로 결국 그림의 $\triangle F_L'$는 -△z와 같은 값이 되도록 조절된다. F는 피드백 제어 게인을 나타내며, 시스템의 안정성을 향상시키는데 기여하며 A, B, C는 상태방정식의 계수행렬을 나타낸다.

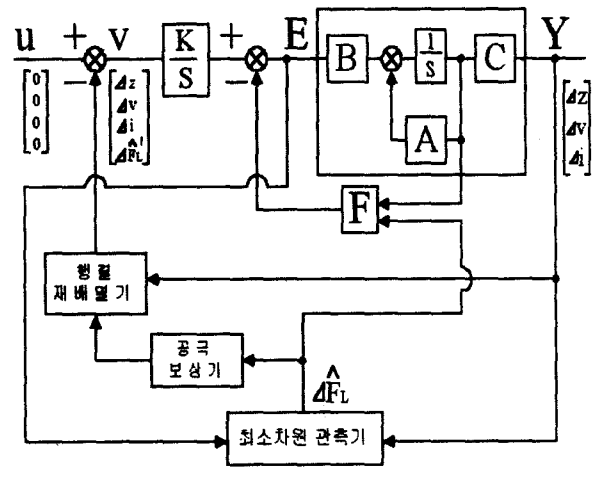


그림 5. 최소차원관측기를 포함한 제로파워부상제어
Fig. 5. Zero power control with Reduced Order Luenberger Observer

4. 시뮬레이션 및 실험

본 연구에서는 가변부하를 1[kg]으로 설정하였으며, 가변시간은 1[sec]으로 시뮬레이션을 수행한 후, 실험을 하였다.

실험 시 가변부하는 1[kg]의 추를 사람이 직접 손으로 이동자에 올려주는 방법을 이용하여 실험을 수행하였다. 그러나, 사람의 손을 이용하여 가변부하의 시간을 시뮬레이션과 같도록 조절하는 것은 용이하지 않다. 따라서, 실험과 시뮬레이션에 동일한 시간동안 부하가 인가되도록 하기 위하여 실험 시에 적용한 부하인가 시간으로 시뮬레이션을 재 수행하였다. 제로파워제어 주기는 300[μsec]이고, 관측기의 주기는 100[μsec]로 설정하였으며 가변부하는 1.6[sec]에서부터 3.25[sec]까지 약 1.7[sec]간 인가하였다.

4.1 시뮬레이션

4.1.1 상태관측기를 포함하지 않은 제로파워제어

본 논문에서 제안한 상태관측기를 포함한 제로파워부상제어 방법의 제어성능을 평가하기 위하여 상태관측기를 포함하지 않은 제로파워부상제어와 성능비교를 하였다. 그림 6은 상태관측기를 포함하지 않은 제로파워부상제어의 제어블럭도이다. 관측기를 포함하지 않은 제로 파워 부상제어는 일반적인 부상제어기에 △i로부터 제로 파워가 되는 평형공극을 PI제어기로 재조정하는 평형공극 위치 보정기가 포함되어 있어 △i가 0이 되도록 평형공극 위치를 조절하는 동작을 한다. 그림 7은 약 1.6[초]와 3.2[초] 사이에 1[Kg]의 부하가 인가되었을 때의 시스템의 전자기력을 나타내고 있다. 이때, 전자석의 전자기력은 증가된 부하만큼 전자기력이 증가되도록 공극위치가 이동하여 이동자가 부상 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 그림 8, 그림 9는 관측기를 포함하지 않은 제로파워제어 시 공극과 전류 파형을 나타내고 있다. 그림에서 관측기를 포함하지 않은 제로파워부상제어 역시 전류를 "0"으로 수렴하나, 가변부하에 따른 보상 제어 루틴이 없기 때문에, 가변부하 시 제어기의 응답성이 떨어지며, 아울러 공극, 전류의 리플도 크고 전력소비도 증가하여 계산상으로 4.016[w-sec]가 됨을 알 수 있다.

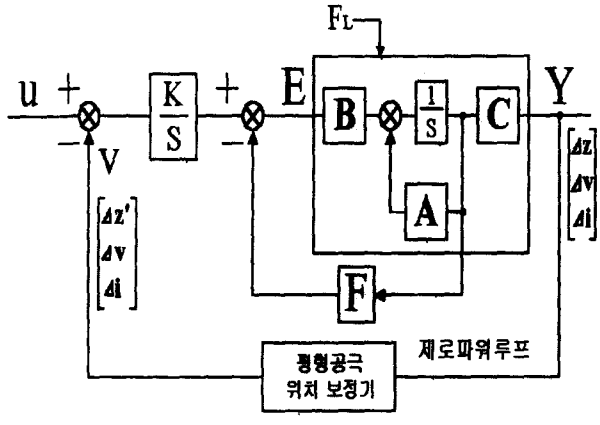


그림 6. 상태관측기를 포함하지 않은 제로파워부상제어
Fig. 6. Zero power control without state observer

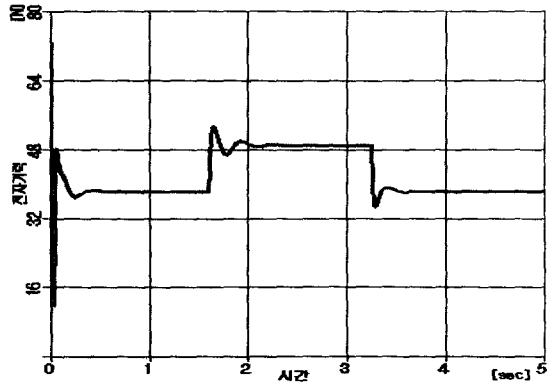


그림 7. 상태관측기를 포함하지 않은 시스템의 전자기력
Fig. 7. The electromagnetic force without state observer

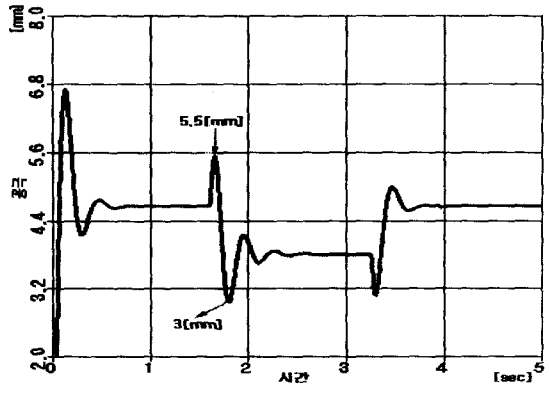


그림 8. 관측기를 포함하지 않은 제로파워제어의 공극 파형
Fig. 8. airgap waveform of zero power control without observer

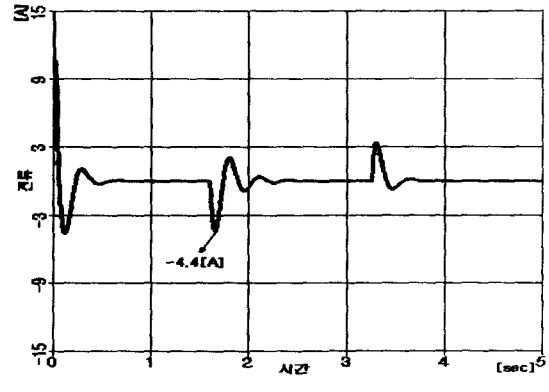


그림 9. 관측기를 포함하지 않은 제로파워제어의 전류 파형
Fig. 9. current waveform of zero power control without observer

4.1.2 Luenberger Observer를 포함한 제로파워제어

앞서 제안한 상태관측기를 포함한 제로파워제어의 타당성을 입증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 10은 최소차원 Luenberger Observer를 포함한 경우의 제로파워 부상제어 시 인가된 가변부하와 추정된 가변부하의 파형을 나타내고 있다. 그림에서 인가부하에 대해 부하 추정이 올바르게 수행됨을 알 수 있다. 이때 발생된 전자석의 전자기력을 그림 11에 나타내었고, 그림 12, 13은 제로파워 부상제어 시의 공극과 전류파형을 나타내었다. 관측기가 없는 경우의 제로파워 부상제어의 공극과 전류파형을 비교했을 때 응답성과 안정성 및 변동폭특성이 향상되었고 계산상에 의한 전력소비도 2.295[w-sec]로 관측기가 없는 경우보다 감소하였음을 시뮬레이션 결과로부터 알 수 있었다.

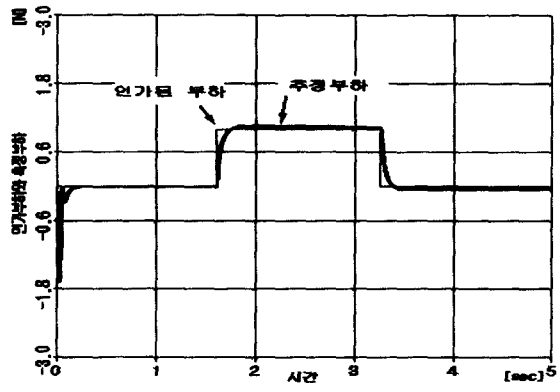


그림. 10. 가변부하 지령치와 관측된 가변부하

Fig. 10. Applied variable-load wave and obvserved variable-load wave

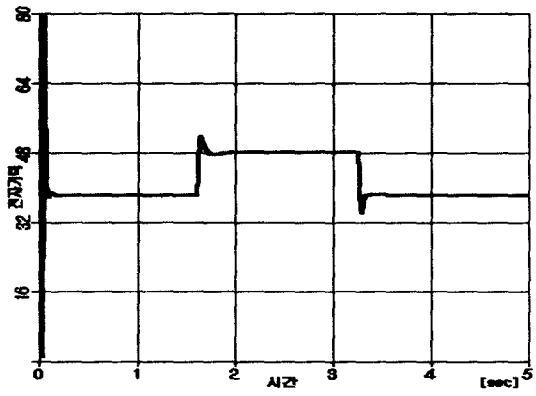


그림 11. 상태관측기를 포함한 시스템의 전자기력

Fig. 11. The electromagnetic force with state observer

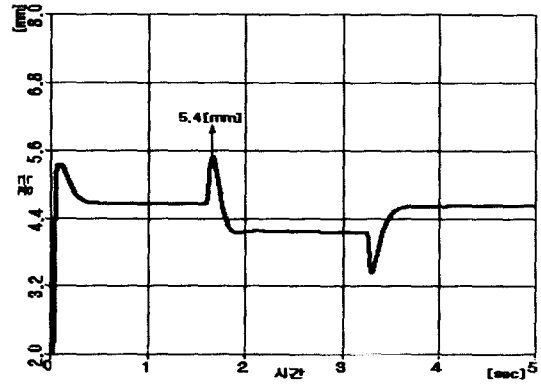


그림 12. 상태관측기를 포함한 제로파워제어의 공극 파형

Fig. 12. airgap waveform of zero power control with state observer

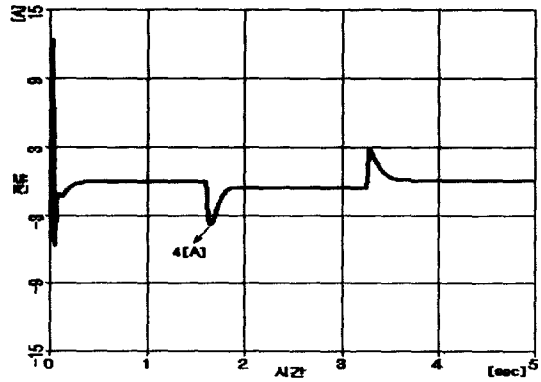


그림 13. 상태관측기를 포함한 제로파워제어의 전류 파형

Fig. 13. current waveform of zero power control with state observer

4.2 실험

4.1절에서는 Luenberger Observer을 이용하여 보상기를 구성한 경우의 제로파워부상제어가 상태관측기를 사용하지 않은 경우보다 리플과 응답성이 향상됨을 시뮬레이션으로부터 확인하였다. 4.2절에서는 Luenberger Observer의 성능을 실험을 통하여 검증하기 위하여 실험장치를 제작하여 실험을 실시하였다.

그림 14는 고정자와 하이브리드 전자석으로 구성된 자기부상시스템과 제어기의 구조를 나타내고 있다. 그림에서 영구자석과 코일로 구성되어 있는 이동자는 상하운동이 가능하도록 지지대를 설치하고 베어링을 삽입하였으며, 공극센서가 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

감쇄시키고, 반대로 (-)방향으로 전류를 인가할 경우 전자기력이 증가하도록 코일을 시행해주었으며, 앞서 모델링한 자기부상시스템과 수치적 연산을 위한 DSP 보드, 공극 위치 검출용 공극센서와 구동 Chopper 등으로 구성하였다. 이때, DSP 보드는 TI사의 TMS320F240을 사용하여 제작하였다[10]. 그림 15는 실험장치의 실제사진으로 공극센서 및 앰프, DSP 보드, SMPS와 Chopper 등으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

실험에서 가변부하는 1[kg]의 추를 이용하였다. 본 실험을 수행한 후 실험시의 가변부하시간과 같은 시간으로 시뮬레이션을 재 수행함으로써 동일시간에서의 시뮬레이션결과와 실험결과를 비교할 수 있었다. 실험 결과는 그림 16, 그림 17에 나타내었다. 그림 16은 상태관측기를 포함하지 않은 경우의 제로파워 부상제어 시 공극 파형과 전류 파형을 나타내고, 그림 17은 상태관측기(최소차원 Luenberger Observer)를 이용한 제로파워 부상제어의 공극 파형과 전류 파형을 나타내고 있다. 시뮬레이션과 동일하게 상태관측기를 포함한 경우의 공극, 전류변동폭이 관측기를 포함하지 않은 경우보다 감소하였으며 시스템이 보다 안정하게 동작함을 확인 할 수 있었다.

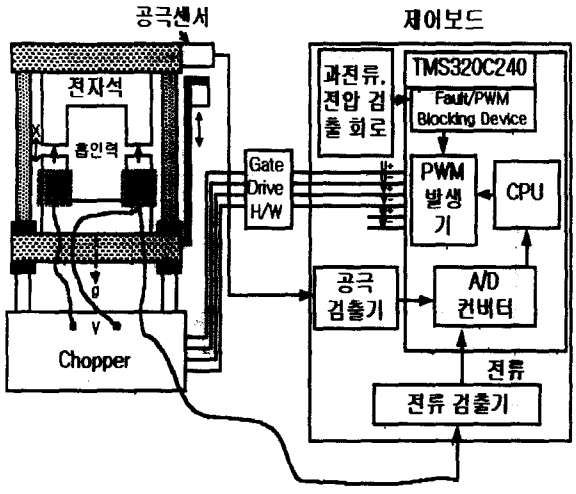


그림 14 실험장치 개요도

Fig. 14. Overview of experimental equipment

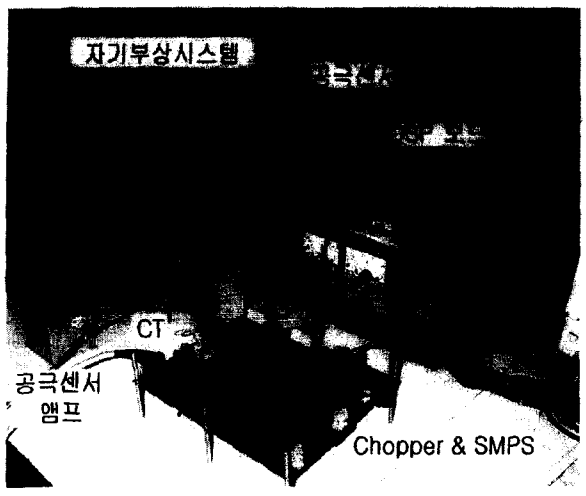


그림 15 실험장치

Fig. 15. Equipment for experiments

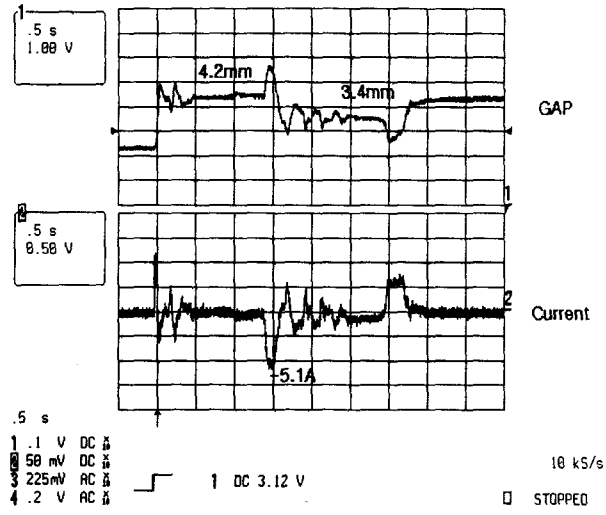


그림 16. 상태관측기를 포함하지 않은 실험결과 (공극, 전류파형)

Fig. 16. Result of experiments without observer (gap, current-waveform)

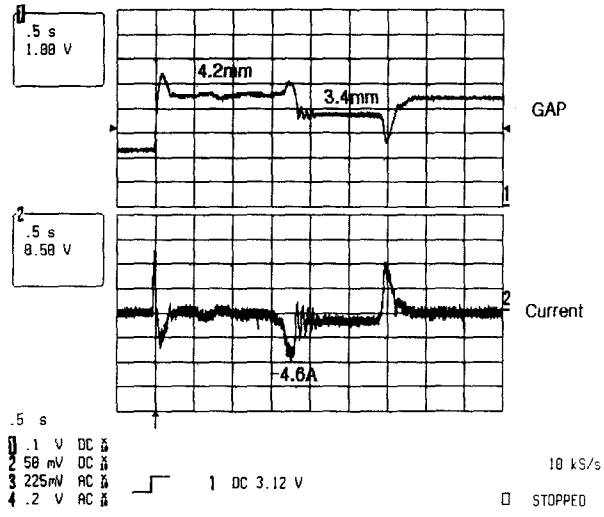


그림 17. 상태관측기를 포함한 실험결과 (공극, 전류파형)

Fig. 17. Result of experiments with observer (gap, current-waveform)

5. 결 론

본 논문에서는 제로파워제어 시 가변부하에 따른 응답성과 제어성을 향상시키기 위하여 Luenberger Observer를 이용하여 가변부하 관측기를 구성하고 관측기의 출력 값인 가변부하 추정치를 이용하여 PI제어기인 공극보상기를 구성하였다. 이때, 전차원 관측기를 사용하는 경우, 사용자가 직접 결정해야 하는 게인 값의 개수가 많고 측정이 가능한 상태들까지 추정하므로 연산 시간이 증대하게 되는 문제점이 발생하여 이를 해결하기 위하여 최소차원 관측기(Reduced Order Luenberger Observer)를 사용하였다. 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션 결과와 실제 제작한 자기부상시스템과 DSP를 사용한 제어 보드를 이용하여 얻어낸 실험결과를 비교 검토하여 그 타당성을 입증하였다. 최소차원 관측기를 이용한 제로파워 부상제어와 관측기를 포함하지 않은 제로파워 부상제어를 비교한 결과 상태관측기의 부하 추정값을 이용하여 구성한 제로파워 부상제어가 응답성, 안정도, 공극과 전류의 변동폭 크기 등에서 특성이 향상되었음을 알 수 있었다. 앞으로 더욱 향상된 부상제어 성능을 위해 복잡한 비선형 제어와 센서리스 제어 등의 지속적인 연구가 요망되며, 이로 인해 자기부상시스템이 더욱 널리 사용되는 계기를 마련할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (과제번호 : 981-0902-007-2)지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] K. Yosida, J. Lee, Y. J. Kim "3-D FEM field Analysis in controlled-PM LSM for maglev vehicle", *IEEE Trans. Magnetics* vol 33. 1997

[2] 日本 電氣學會 磁氣浮上応用 技術調査專門委員會 "磁氣浮上과 磁機軸受" コロナ社, 1993.

[3] T. Azukizama, et al. " A linear induction motor control system for magnetically levitated carrier system", *ibid.*, Vancouver, may 1986.

[4] 川口, 海老原, 他 "PM型浮上의 制止 時에서의 安定制御", *平成4年電氣學會全國大會*, 講演番號 779 (1992).

[5] 海老原, 他 "永久磁石反 發形磁氣 浮上方式의 浮上力과 橫방향 직선력의 解析" *電學論* B, 106卷, 11号, p.977 (1986)

[6] 森下明平, 小豆澤照男, "電導吸引式 磁氣浮上系의 제로파워-制御", *電學論*, D,108卷 5号, 昭 63, pp 447-454

[7] V. Kose, J. Sievert, "Magnetic levitation without airgap sensor", *IOS Press*, pp. 701-704, 1998

[8] J. P. Gauthier, H. Hammouri, and S. Othman, "A simple observer for nonlinear systems-application to bioreactors," *IEEE Trans. Automat. Contr.* vol. 37, June 1992

[9] J. P. Gauthier and I. A. K. Kupka, "Observability and observer for nonlinear systems" *SIAM J, Contr. Optim.* vol. 32, no. 4, pp. 975-994, 1994

[10] TMS320F240 DSP Controller, Texas Instrument.

저 자 소 개

김 윤 현 (金 倫 賢)

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

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

E-mail : yhyunk@ihanyang.ac.kr

이 주 (李 柱)

1963년 8월 30일 생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대 SYSTEM 정보과학연구과 졸업(공박). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 공대 전자전기공학부 조교수.

Tel : 02-2290-0342.

E-mail : julee@hanyang.ac.kr