

부하 관측기에 의한 공극 보상기를 포함한 제로파워 부상제어

\*김 광 민, \*김 윤 현, \*전 연 도, \*이 주, \*\*김 학 원  
\* 한양대학교 전기공학과, \*\* 서울산업대학교 전기공학과

Zero Power Levitation Control with Gap Compensator of Hybrid Magnet Levitation by Load Observer

Kwang Min Kim, Youn Hyun Kim, Yon Do Chun, Ju Lee  
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

**Abstract** - This paper introduced the scheme that it improved performance of magnetic levitation system with zero power controller. Magnetic levitation is used widely, but it is complicated and difficult to control due to having nonlinear characteristics of gap and current. So, it is proposed a scheme considered changed gap according to variable load and is verified by simulation and experiments in this paper.

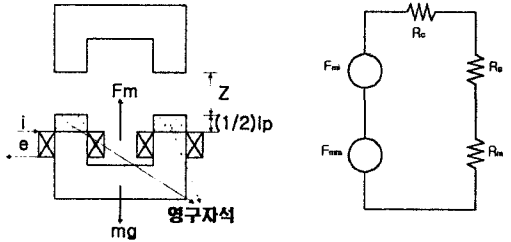


그림 1. 모델링

그림 2. 자기동가회로

1. 서 론

자기부상시스템은 OA기기에서부터 자기부상열차에 이르기까지 넓은 범위의 응용분야에서 확대 적용이 기대되고 있다. [1] 특히, 크린룸 내의 반송이나 유지보수가 곤란한 분야 등에서 실용화가 이루어지고 있으며 그에 따른 자기부상연구도 활발히 진행되고 있다.

자기 부상 시스템 중에서, 전자석 흡인식 타입(EMS)은 필요한 공극과 전력을 유지하기 위하여 전자석을 여자시켜야 하므로 안정하게 부상 상태를 유지하고 전류를 최소로 하기 위해서는 평형공극위치에서 제로파워상태로 유지되는 제로파워제어가 제안되어졌다. 제로파워부상제어는 하이브리드 전자석(Hybrid Controlled PM)을 사용한 자기 부상 시스템이며 에너지를 절약하는 시스템으로 증명되어, 널리 사용되고 있다. [2] 이때, 영구자석은 Nd-Fe-B와 같이 강한 전자기력을 낼 수 있는 것을 주로 사용하며 제로파워제어는 과도 상태에서만 전력을 소비하므로 최소한의 전력으로 시스템을 제어할 수 있다.

그러나 자기부상 시스템은 불안정한 시스템이고 전자기력과 제어가능한 범위의 제한으로 비선형적인 특성을 갖고 있기 때문에 제어가 힘들고 기존의 존재하던 제로파워제어는 부하와 각 부하에 따른 평형공극위치에 대한 정보를 미리 알고 있지 못할 때는 제로파워평형공극위치를 찾지 못하는 문제점을 갖고 있다. 따라서 본 논문은 가변부하를 관측기로 추정하여 공극을 보상해주는 방법을 제안하였고, FEM으로 영구자석 흡인식 자기부상 모델에 대한 비선형특성을 분석하고 가변 부하에 따른 관측기와 공극 보상기를 설계하였다. 제안된 방법은 제어 가능성과 관측가능성을 판별한 후에 제로파워제어으로써 시뮬레이션하였고, 실험과 비교 검토하였다.

2. 시스템 분석과 모델링

2.1 시스템 모델링

그림 1은 고정자와 하이브리드 전자석으로 구성된 자기 부상 시스템으로, 모델링을 위하여 그림 2와 같이 자기 동가회로를 구성하였다. 여기서 Fmi, Fmm, Rc, Rg, Rm은 각각 영구자석과 전자석의 전자기력, 고정자와 공극의 자기저항 그리고 영구자석의 자기저항을 나타낸다. 자기동가회로로부터 전자기력 Fm, 인덕턴스 L, 쇄교자속 B를 유도할 수 있으며 각 결과는 식 (1), (2), (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$F_m = -\frac{\partial W}{\partial z} = \frac{S}{2\mu_0} \left( \frac{B_r - bi}{1+az} \right)^2 \quad (1)$$

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

$$B = \frac{\phi}{S} = \frac{B_r + Ni \frac{\mu_m}{l_p}}{\frac{\mu_m}{l_p} \mu_0 + 1} \quad (3) \text{ 여기서, } b = \frac{\mu_m N}{l_p}, \quad a = \frac{\mu_m 2z}{\mu_0 l_p}$$

- N : 코일의 턴수, S : 쇄교단면적
- R : 자기저항, z : 공극
- lc : 쇄교자속이 통과하는 코어의 길이
- lp : 영구자석의 길이, Br : 잔류자속밀도
- μ0 : 진공의 투자율, μc : 코어의 투자율
- μm : 영구자석의 투자율

$$m \frac{d^2 z'}{dt^2} = \frac{S}{\mu_0} \left( b \frac{(B_r - bi)}{(1+az_0)^2} i + a \frac{(B_r - bi)^2}{(1+az_0)^3} z' \right) \quad (4)$$

$$\frac{di'}{dt} = \frac{1}{L_0} (-Ri' + E) \quad (5)$$

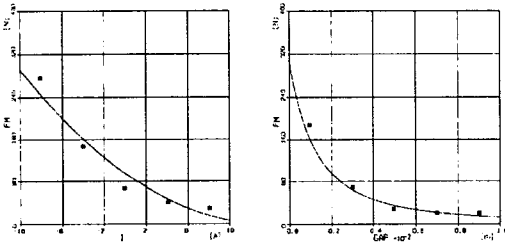
자기 부상 시스템은 비선형시스템이기 때문에, 선형화를 위하여 운동 방정식을 Taylor 급수로 전개하여 첫 번째 항을 취하면 식 (4), (5)와 같은 선형화된 식으로 나타낼 수 있다. 이 식에서 z0, i0는 각각 평형상태의 공극과 전류를 z', I', E'는 평형상태에서의 미분된 각각의 공극, 전류, 전압을 나타낸다.

2.2 모델의 분석

표1은 해석을 위한 시스템의 제원을 나타내고 이것을 FEM으로 해석, 비교한 결과가 그림 3이다. (a)는 공극을 2[mm]로 고정시키고 가변전류에서의 전자기력을 나타낸 것이다. 같은 방법으로, (b)는 전류를 0으로 고정시키고 가변공극에서의 전자기력을 계산, 비교한 것이다. 검은 사각형은 FEM 해석 결과를 나타내고 꼭선은 식(1)로 계

고정자	전체 높이	40(mm)
	전체 길이	107(mm)
	치 높이	30(mm)
	치 폭	5(mm)
CPM	중량	3.91(kg)
	코일 턴수	334(turn)
	영구자석	Nd-Fe-b
	잔류자속밀도	1.2(T)
	영구자석 높이	2.7(mm)
	영구자석 단면적	629.35(mm <sup>2</sup> )
	코어 높이	33.5(mm)
	코어 길이	57.7(mm)
	코어 폭	20.5(mm)
코어 사이의 길이	16.7(mm)	

표 1. 분석 모델의 제원



(a) 가변 전류 (고정 공극) (b) 가변 공극 (고정 전류)  
그림 3. 진자기력

산된 결과를 나타내며 이 결과를 통해 자기부상시스템의 비선형성을 알 수 있었다.

### 3. 제어이론

가변부하시 부하에 따른 평형공극 위치를 알고 있는 경우 제로파워제어가 가능하지만 알고 있지 못한 경우에는 제로파워제어가 불가능하거나 어렵다. 따라서, 부하관측기를 이용하여 설계한 공극보상기와 같이 가변부하를 고려한 새로운 방법의 제어구성이 필요하다. 관측기를 이용한 제어기를 설계하기 위하여 상태방정식을 식 (6)과 같이 표현할 때 상태행렬은 4x1 행렬이고, 출력행렬  $y(t)$ 는 3x1 행렬이며,  $L_0$ 는 평형상태에서의 인덕턴스이다. 이 방정식을 이용해 관측기를 설계할 때, 동일차원 관측기를 사용하면 식이 복잡해지므로 출력이 아닌 상태만을 관측하도록 최소차원 관측기로 설계하면 식 (7)과 같고,  $z(t)$ 는 관측을 하려는 상태를 나타낸다. 최소차원 관측기가 성립하기 위한 조건으로 식 (8)이 만족되어야 하며 관측기에서 부하관측치를 표현하면 식 (9)과 같이 표현된다.

$$\dot{x}(t) = \begin{pmatrix} \dot{z} \\ \dot{v} \\ \dot{j} \\ \dot{F}_L' \end{pmatrix} = Ax(t) + Bu(t) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} & a_{24} \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \\ 0 \end{pmatrix} E \quad (6)$$

여기서,

$$a_{21} = \frac{Sa(B_r - bi_0)^2}{m\mu_0(1 + a\alpha_0)^3}, \quad a_{23} = \frac{Sa(B_r - bi_0)^2}{m\mu_0(1 + a\alpha_0)^3}, \quad a_{24} = \frac{1}{m}$$

$$a_{33} = -\frac{R}{L_0}, \quad b_3 = \frac{1}{L_0}, \quad a = B_r \frac{2z}{l_p}, \quad b = B_r \frac{Ni\mu_0}{l_p}$$

$$\dot{z}(t) = Dz(t) + Ly(t) + Ju(t), \quad z(0) = z_0$$

$$\dot{x}(t) = Px(t) + Vy(t) \quad (7)$$

$$TA - LC = DT \quad (8-a)$$

$$J = TB \quad (8-b)$$

$$PT + VC = I_n \quad (8-c)$$

$$\hat{F}_L(t) = f_1(-2780\Delta z + \Delta v + 0.00731\Delta j) - \int [f_2(-\hat{F}_L(t) + \Delta z + \Delta j) + (1+r_2)\Delta v + (t_3 \times \frac{1}{L_0})\Delta E] \quad (9)$$

식(8)에서 D, L, J, P, V, T는 각각 1x1, 1x3, 1x1, 4x1, 4x3, 1x4행렬이고  $\hat{F}_L$ 은 부하관측상태를 나타내고  $t_1, t_2, t_3$ 는 T행렬의 원소들이며  $f_1 \sim f_2$ 은 계인을 나타낸다. 이때, 시스템의 안정성과 관측기 설계가능성을 판정하기 위하여 시스템 행렬의 가제어성과 가관측성을 판별하였고, 그 결과, 본 시스템은 제어가 가능하고 관측기 설계가 가능함을 알 수 있었다.

이 결과로부터, 가변부하를 고려한 적분제어기를 포함한 공극보상기를 구성할 수 있었으며, 전체제어기는 그림 4와 같이 부하관측기에 의한 공극보상기를 포함한 제로파워제어기로 구성되어 있다. 이때 제로파워제어는 3x1행렬이고 v는 4x1행렬이다.

### 4. 시뮬레이션과 실험

그림 5는 1kg의 부하를 가변시킬 때의 부하 관측기 파형을 나타낸다. 이때, 관측된 부하파형은 실제 부하의 파형보다 고주파 리플을 많이 포함하게 되는데 저역통과 필터를 사용하여 고주파 성분을 감쇄시켰다. 그림 6은 평형공극을 알지 못할 경우 즉, 공극보상기가 없는 경우 가변부하시 제로파워제어 파형으로 평형공극위치로 이동하지 않고, 전류도 영으로 되지 않음을 알 수 있다. 그림 7은 공극보상기를 포함한 경우의 가변부하시 제로파워제어 파형으로 전류가 영이 되는 새로운 평형공극위치로 제어됨을 알 수 있다.

시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여, 그림 8과 같은 부상시스템과 제어시스템을 설계하여 제어를 시행하였다. 그림 9는 실험을 하기 위한 자기부상 시스템과 제어기를 나타내고 제어기의 고속연산을 위한 DSP는 Texas Instrument 사의 TMS 320F240을 사용하였다. 그림 10은 부하관측기를 사용하여 실제 부하를 관측한 파형이고 그림 11은 가변부하시 오실로스코프로 측정된 공극파형과 전류파형으로 시뮬레이션과 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

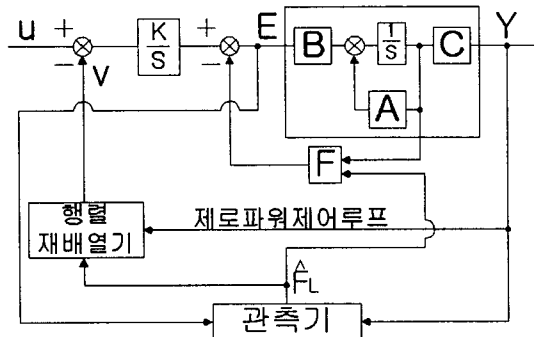
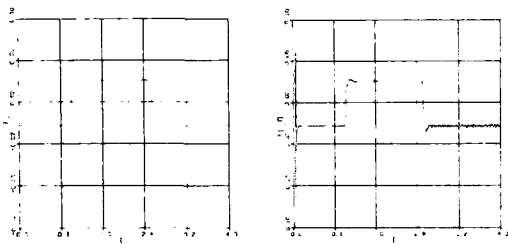
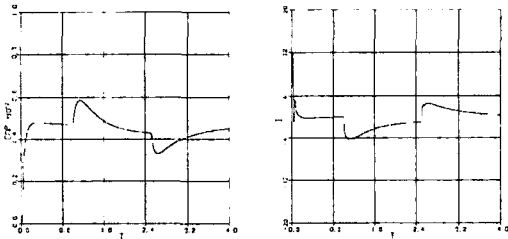


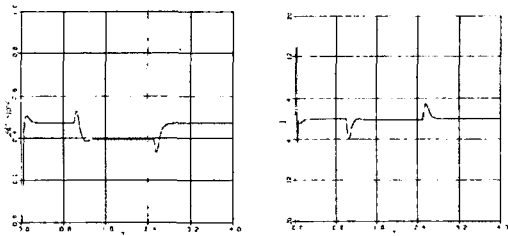
그림 4. 부하관측기를 포함한 제로파워제어 블록도



실제 부하 관측된 부하  
그림 5. 실제 부하와 관측된 부하 파형



공극 vs. 시간 전류 vs. 시간  
그림 6. 공극보상기론 포함하지 않는 제로파워제어



공극 vs. 시간 전류 vs. 시간  
그림 7. 공극보상기론 포함한 제로파워제어

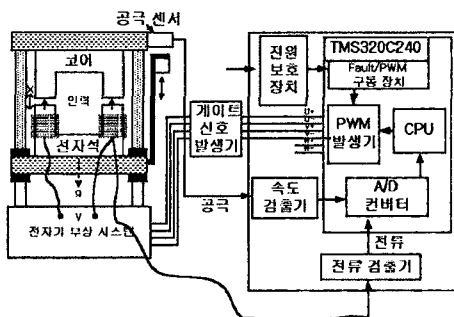


그림 8. 전체 시스템

#### 4. 결론

본 연구에서는 부하관측기를 포함한 공극보상기를 사용하여 미지의 가변부하에 대해서도 전력이 영이 되는 평형공극위치를 안정하게 찾아가는 제로파워 부상제어기를 제안하였으며, 제한한 제어기를 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다. 앞으로, 복잡한 비선형 제어와 센서리스제어 연구가 요망되며, DSP 기술의 발달로 인해 개선

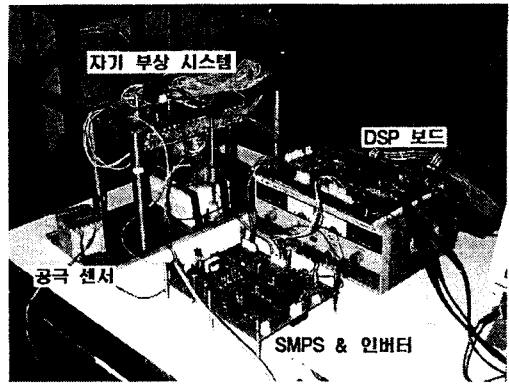


그림 9. 실험 장치

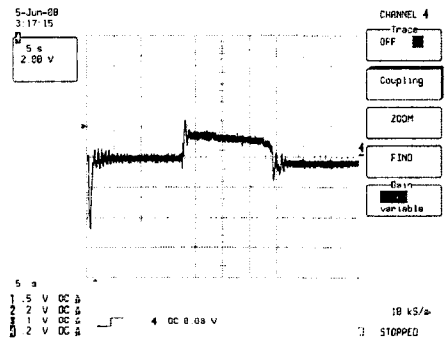


그림 10. 관측된 부하치 (실험결과)

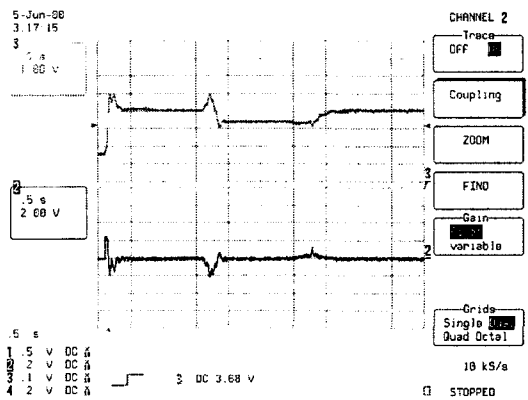


그림 11. 제로파워제어 (실험 결과)

된 비선형 제어와 센서리스제어 이론에 의한 자기부상제어의 실용화가 가능하게 될 것이며 자기부상시스템이 더욱 널리 사용되는 계기를 마련할 것으로 기대된다.

#### [참고 문헌]

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