자기부상시스템 모델링 및 시스템개발

*박병철[1], 한아름[2], 노명규[3]
[1] 한전 전력연구원, [2](주)캄코, [3]충남대 메카트로닉스공학과

Development of the Magnetic Levitation System Based on the System Modeling

*B. C. Park[1], A. R. Han[2], M . G. Noh[3]
[1] Korea Electric Power Research Institue, [2]KAMCO, [3]Dept. Mechatronics Eng., CNU

Key words : Magnetic Levitation, Modeling, phase lead controller

1. 서론

자기부상시스템은 비접촉인 상태로 물체를 공중에 부상시킴으로써 마찰을 최소화시키는 장점을 가지고 있어서 자기베어링, 자기부상열차등으로 활용되고 있다. 또한 자기부상시스템은 대표적인 메카트로닉스 시스템의 하나로써 제어, 전자, 기계이론을실험적으로 적용할수 있는 좋은 대상체이다.

Wong은 [1]에서 실험실에서 간단히 만들 수 있는 자기부상시스템을 설계 및 제작하였다. 이 시스템에서는 쇠구슬을 자기부상시켰으며, 위치센서로는 photoresister를 사용하였다. 본 연구에서 설계한 자기부상시스템은 영구자석을 부착한 지구본을 자기부상시켰다. 이와같이 영구자석이 활용된 시스템을 하이브리드시스템이라고 한다. 위치센서로는 홀센서가 활용되었다.

2. 자기부상시스템 구조

본 연구에서 설계한 자기부상시스템의 개략적인 구조는 Fig 1.과 같다. 시스템은 자기부상 부분과 motoring 부분으로 나뉜다.이 시스템은 전자석을 이용한 Active 자기부상형태로써 부상체는 영구자석이 쓰인 하이브리드 형태이다. 일반적으로는 전자석에 바이어스 전류값으로 부상체 무게에 해당되는 힘을 발휘하게 하지만, 본 시스템은 바이어스 전류값을 줄이기 위하여 부상체로 영구자석을 사용하였다. 위치센서는 선형 홀센서를(liner hall effect sensor) 활용하였다. 선형 홀센서는 자기장의 세기에 따라 출력값이 선형적으로 변화하는 특성을 가지고 있기 때문에, Fig 1의 하단부와 같이 영구자석, 홀센서, Steel을 배치하면 지구본의 위치를 계측할 수가 있다. 이와같은 센서부는 위치계측 역할 이외에도, 지구본 하부에 인력을 작용하여 자기부상의 안정성을 향상시키는 역할을 하도록 설계하였다.

motoring 부분은 Brushless Motor와 동일한 구조로 설계하였다. 회전체가 되는 지구본의 적도에 일정간격으로 영구자석을 배치하였고, 고정자의 극수는 두개로(2상구조) 설계하였다.

3. 시스템 모델링

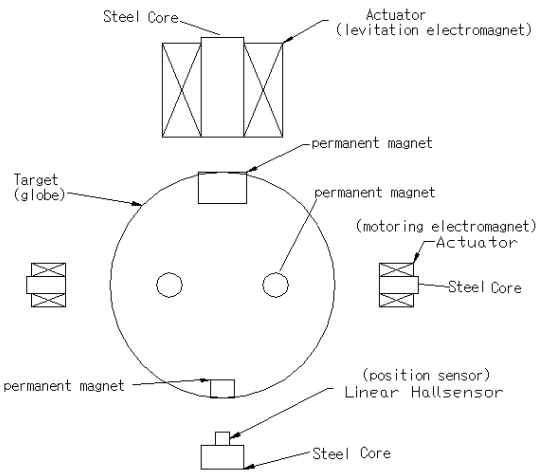

Fig 1. Magnetic levitation system

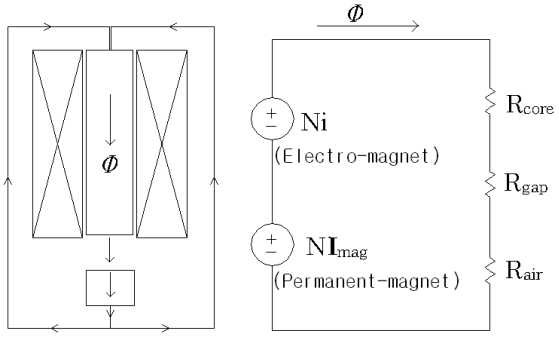

Fig 2 . Simplified magnetic circuit model of electromagnet actuator

참고문헌 [1] 에서 부상체가 쇠구슬일때 전자석에서 발휘되는 힘의 방정식을 제시하였다. 본 연구에서는 [1] 에서 제시한 방정식을 활용하면서 영구자석을 [1]에서 제시한 모델에 반영하기위해 Ampere 전류를[2] 도입하였다. Ampere 전류개념을 적용하면 Fig 2.와 같이 자기회로로 모델링 할 수 있다. (비선형 효과는 무시함.)

$$Magnetomotive\,Force = N(I_{mag} + i) \qquad (1)$$

식 (1)은 영구자석이 전자석에 흐르는 전류값으로 표현할수 있음을 보여준다. [1]의 모델에 식 (1)을 적용하면,

$$F_{upper} = C\frac{(I_{mag} + I_b + i_p)^2}{g_u^2} \qquad (2)$$

Fig 3과 같이 지구본의 변위를 x라 정의하면, 중력을 제외한 지구본에 가해지는 힘은 아래식으로 모델링 할수 있다.

$$F = C\frac{(I_b + I_{mag} + i_P)^2}{(g_{u0} - x)^2} - \frac{C'}{(g_{L0} + x)^2} \qquad (3)$$

여기서,우항의 두번째 식은 위치계측부 영구자석에 의한 힘. 식(3)을 Taylor series를 이용하여 $x = 0, i_p = 0$에서 선형화하면,

$$F = F_0 + K_x x + K_i i_p \qquad (4)$$

여기서, $F_0 = C\frac{I_b^2}{g_{u0}^2} - \frac{C'}{g_{L0}^2}$, $K_i = \frac{2C(I_b + I_{mag})}{g_{u0}^2}$

$$K_x = C\frac{2(I_b + I_{mag})^2}{g_{u0}^3} + \frac{2C'}{g_{L0}^3}$$

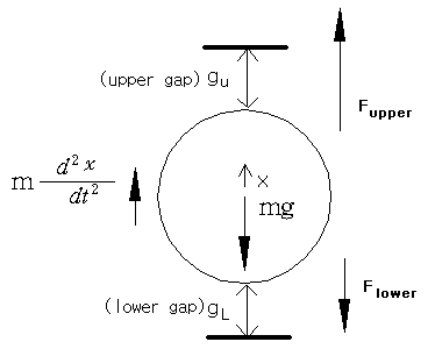

Fig 3. Free body diagram of the system

Table 1. Numerical values of physical parameters

	symbol	measured value
mass of globe	m	0.337 kg
resistance of electromagnet coil	R	3.6 Ω
inductance of electromagnet coil	L	23.5 mH
coil current at equilibrium point	I_b	0.53 A
constant of electromagnet coil	C	1.20×10^{-4} Nm^2/A^2
constant of lower permanent magnet	C'	9.57×10^{-5} Nm^2
Ampere current of upper permanent magnet	I_{mag}	2.87 A
upper gap at equilibrium point	g_{uo}	1.98×10^{-2} m
lower gap at equilibrium point	g_{Lo}	2.06×10^{-2} m
actuator gain	K_i	2.08 N/A
open loop stiffness	K_x	379 N/m
sensor gain	β	295 V/m

$F_0 = mg$가 되도록 I_b값을 조정하면, 운동방정식이 다음과 같다.

$$m\ddot{x} = -mg + K_x x + K_i i_p \tag{5}$$

식 (5) 라플라스 변환하면,

$$\frac{X(S)}{I_P(S)} = \frac{K_i}{mS^2 - K_x} \tag{6}$$

전자석을 전기회로로 모델하면 다음과 같이 할수 있다.

$$V_p = Ri_p + L\frac{di_p}{dt} \tag{7}$$

$$\frac{I_P(S)}{V_P(S)} = \frac{1}{R+LS} \tag{8}$$

식(6), (7)을 조합하면 전자석에 가해지는 전압과 지구본의 변위간의 전달함수를 구할수 있다.

$$G(S) = \frac{X(S)}{V_P(S)} = \frac{1}{LS+R}\frac{K_i}{mS^2 - K_x} \tag{9}$$

Table 1.의 측정된 상수값을 (9)에 대입하면,

$$G(S) = \frac{263}{(S+162)(S+33.5)(S-33.5)} \tag{10}$$

제어기 및 센서를 포함하여 블록다이어그램을 작성하면, Fig 4. 와 같다. 이 폐루프 시스템의 Characteristic equation은,

$$C.E = 1 + \beta G(S) G_c(S) \tag{11}$$

제어기($G_c(S)$)를 비례제어기를 적용하면 식 (11)의 의 Root Locus가 게인값을 어떤값을 취하더라도 한개의 pole이 항상 RHP에 위치한다. Phase-lead 제어기를 적용하여 불안정한 pole(33.5)을 LHP로 이동시켜 시스템을 안정화 시킬 수 있다. [1]

이와같은 경우 Phase-lead 제어기는 제어기의 zero를 Real axis의 0과 -33.5사이에 놓으면서 -33.5에 가깝게 놓고, 제어기의 pole은 zero의 10배에 위치시킨다. [1] 본 연구에서는 식 (12)와 같이 zero를 20으로 설계하였다.

$$K\frac{s+20}{s+200} \tag{12}$$

식 (12)의 제어기 식(11)에 적용하여 Root Locus를 살펴보면

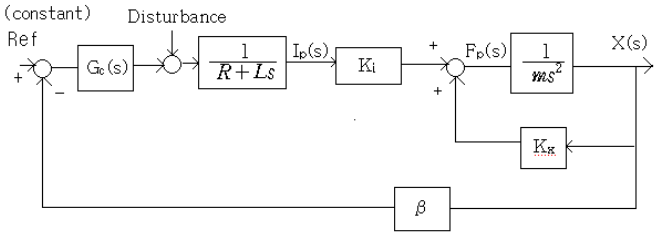

Fig 4. Block Diagram of the system

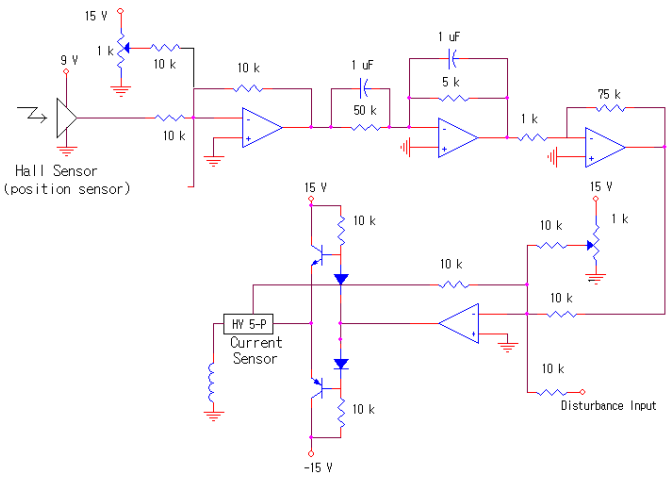

Fig 5. The electronic circuit of the magnetic levitation system

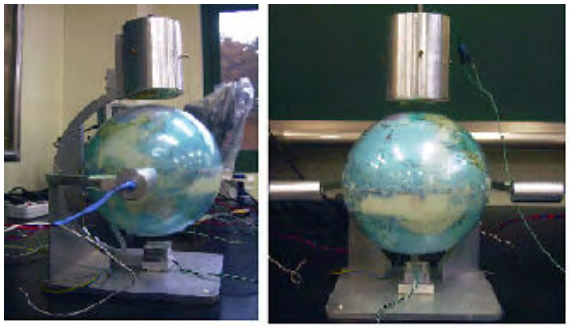

Fig 6. The photograph of the magnetic levitation system

K값의 안정화 범위가 23.6 < K < 120 까지 나오는데, 범위의 중앙값인 K=72로 결정하였다.

4. 전자회로 및 실험

시스템의 전자회로도는 Fig 5와 같다. phase lead 제어기는 op-amp를 사용한 제어기를 적용하였으며, 증폭기는 push-pull follower를 적용하였다.

표 1의 값중 C 및 Imag 값을 추정하기위하여 I_b 값이 특정치에서 지구본이 상부전자석에 붙는 지점을 식 (13)을 만족하는 포인트로 보고 실험하였다. 식 (13)을 기초로 두개이상의 수식을 얻기 위해 지구본의 질량을 변화(추가질량 m_{add})시키면서 값을 관찰하여 C값 및 Imag 값을 추정할수 있었다. 이때 g_{L0}를 $F_{lower} = m_L g$ (m_L : 아래쪽 영구자석의 무게)를 만족하는 지점으로 결정하여 C'값을 구하였다.

$$F = C\frac{(I_b + I_{mag})^2}{g_{u0}^2} - \frac{C'}{g_{L0}^2} - (m + m_{add})g = 0 \tag{13}$$

5. 결론

본 연구에서 제작한 자기부상시스템은 모델링을 기초로 제어기를 개발하여 안정적인 자기부상에 성공하였다. 이것은 시스템 모델링이 실제시스템에 근접하게 이루어졌음을 간접적으로 확인할수 있게한다.

참고문헌

1. Wong T. H. , "Design of a magnetic levitation control system -An undergraduate project," IEEE Trans. Educ., vol. E-29
2. Tipler Paul A. "물리학 “, 청문각, 제3판, 1995