

자기부상식 이송장치용 전자석의 자기력 특성 해석

이성형, 신인섭, 조운현
 동아대학교 전기공학과

Magnetic Force Characteristics Analysis of Magnet for Magnetic Levitation Conveyor

Sung-Hyung Lee, In-Sub Sin, Yun-Hyun Cho
 Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University

Abstract - 본 논문에서는 자기부상방식의 이송장치의 부상 및 안내력을 발생시키는 주 전자석의 자기력 특성 해석에 관해 연구하였다. 부상용 전자석의 자기력 특성을 해석하기 위해서 이론적 해석 방법에 의한 등가 자기 부상 모델을 제시하였으며, 제어 변수에 따른 특성을 고찰하기 위해서는 시뮬레이션 값과 유한요소법에 의한 계산값과 비교, 분석하였다.

1. 서 론

자기부상 시스템은 기존의 접촉방식을 탈피한 비접촉방식으로, 흡인식 자기부상방식과 반발식 자기부상방식으로 구분한다. 흡인식은 철 등의 자성체 궤도와 차체에 고정되어 자기력의 세기를 제어할 수 있는 전자석으로 구성되어 있다. 전자석과 레일의 틈새를 검지하여, 틈새가 작아지면 자기력을 약하게 하여 흡인력을 작게 하고, 틈새가 커지면 자기력을 세게 하여 흡인력을 증대시킴으로써 부상되는 높이를 일정하게 유지한다. 높이가 작고 정밀도가 높은 틈새 검지와 즉시 반응하는 제어시스템이 없으면 부상되는 높이를 일정하게 유지할 수 없는 불안정계이다. 자석은 일반적으로 전자석을 이용하므로 상전도 자기부상식이라고 한다.

자기부상시스템을 설계하는데 있어서 우선시 되는 부분이 전자석의 해석이다. 소형의 전자석을 이용하거나 초전도 코일 등에 의한 구동기일지라도 안정적이고 정확한 결과를 얻기 위해서는 고려해야 될 사항이다. 특히 설계된 전자석의 코일에 의한 인덕턴스와 저항 등의 중요한 파라메타와 전자석 흡인력관계가 중요한 결정요인이다. 이에 본 연구에서는 자기부상방식 이송장치의 부상 및 안내력을 발생시키는 주 전자석의 자기력 특성해석에 관해 연구하였다.

2. 본 론

2.1 시스템의 수학적 모델링

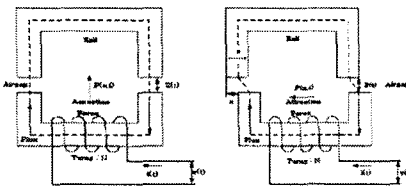


그림 1. 전자석 부상 시스템

그림 1은 본 연구에서 구성한 자기부상 시스템의 구조를 나타낸다. 누설자속과 공극에서 프런징 효과를 무시하면, 코어에서 발생하는 자속 밀도는 일정하므로 Ampe

re's circuit law을 적용하면 다음과 같다.

$$\oint \vec{A} \cdot d\vec{l} = NI \quad (1)$$

여기서, \vec{H} 는 자계의 세기 벡터이며, $d\vec{l}$ 은 자속이 흐르는 경로 벡터이다. 자속이 이동하는 경로의 면적을 일정하다고 할 때, 자속 밀도는 항상 일정하므로 코일에서의 자속 밀도를 B_f , 공극에서의 자속 밀도를 B_g 라 하면, $B_f = B_g = B$ 가 된다. 코어와 공극에서의 자계의 세기는 각각

$$H_f = \frac{B}{\mu}, H_g = \frac{B}{\mu_0} \quad (2)$$

이므로 식 (1)에 적용하면

$$B = \frac{\mu_0 \mu NI}{\mu_0(l_1 + l_2) + 2\mu z} \approx \frac{\mu_0 NI}{2z} \quad (\mu \gg \mu_0) \quad (3)$$

이 된다. 여기서, μ_0 는 공기중 투자율이다. 식 (3)을 이용한 시스템의 총 쇄교 자속은

$$\lambda = NAB = \frac{\mu_0 N^2 A}{2z} I = LI \quad (4)$$

이므로, 코일에 저장되는 자계 에너지 $w_m(t)$ 는

$$w_m = \frac{1}{2} Li^2 \quad (5)$$

로 주어진다. 여기서 식 (5)를 전개하면

$$w_m(t) = \frac{1}{2} L(z, x) [i(t)]^2 \quad (6)$$

$w_m(t)$ 는 전자석에 저장되는 자기에너지이고 거리에 대한 부상력과 안내력의 변화율로 나타낼 수 있다. 즉,

$$F_{LEV}(i, z, x) = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial z} L(z, x) \right] i^2$$

$$F_{LEV}(i, z, x) = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial z} L(z, x) \right] i^2 \quad (7)$$

따라서 [그림 1]과 같은 Suspension System에서의 흡인력은 식 (7)과 같음을 알 수 있다. 여기서 공극의 거리를 z 라 하면 전자석의 인덕턴스는 다음과 같다.

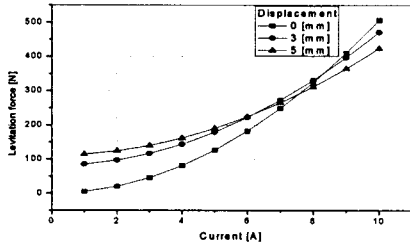
$$L(x, z) = N^2 \frac{1}{2} \mu_0 \left[\frac{a-x}{z} + \frac{4}{\pi} \ln \left(1 + \frac{\pi x}{4z} \right) \right] l \quad (8)$$

식(8)을 식(7)에 대입하면 마그네트에 작용하는 힘은

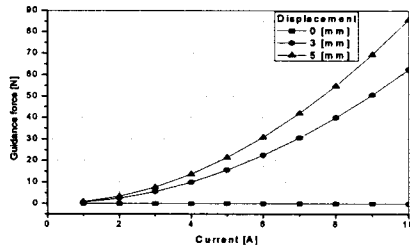
$$F_{LEV}(x, z, i) = \frac{1}{4} N^2 \mu_0 \left[-\frac{(a-x)}{z^2} - \frac{4x}{4z^2 + \pi z x} \right] l i^2 \quad (9)$$

$$F_{GUID}(x, z, i) = \frac{1}{4} N^2 \mu_0 \left[-\frac{1}{z} + \frac{4}{4z + \pi x} \right] l i^2 \quad (10)$$

[그림 2], [그림 3]은 식 (9)와 식 (10)을 통하여 얻은 부상용 전자석의 부상력과 안내력을 나타낸다.



(a) 전류에 따른 부상력



(b) 전류에 따른 안내력

그림 2. 전류 변화에 대한 힘 (이론적 해석 값)

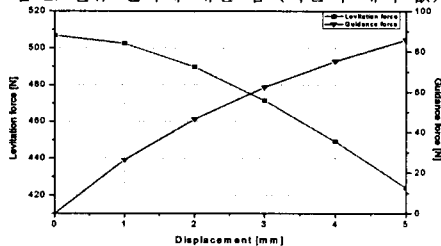


그림 3. 변위 변화에 대한 힘 (이론적 해석 값)

2.2 설계치수 결정

[그림 4]과 같이 부상용 전자석은 50Kg의 중량을 부상시킬 수 있도록 설계되었다.

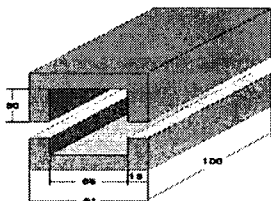


그림 4. 부상용 전자석

세부사항	값
중량 [Kg]	50
pole 면적 [mm ²]	1300
코어재질	S30
Window Area [mm ²]	1950
Turns [Turns]	557
점적율	0.6
전류 [A]	10
코일직경 [mm]	1.5
공극 [mm]	5

표 1 전자석 설계사항

부상용 전자석 1개에서 발생하는 힘은

$$\overline{W} = \frac{1}{2} B H \times V = \frac{B^2}{2\mu_0} \times (S \times g_0) \quad (11)$$

$$F = \frac{\partial \overline{W}}{\partial g_0} = \frac{B^2}{2\mu_0} S = \frac{B_0^2}{2\mu_0} 2A = \frac{B_0^2}{\mu_0} A \quad (12)$$

그리고

$$\Phi = \frac{AT}{R} = \frac{AT}{2g_0} = \frac{\mu_0 S}{2g_0} AT \quad (13)$$

이므로

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{\mu_0}{2g_0} AT, \quad AT = \frac{2g_0}{\mu_0} B \quad (14)$$

으로 나타낼 수 있다.

이 식들을 바탕으로 초기 부상력을 계산하면 다음과 같다. 본 논문에서는 100kg의 중량을 2개의 전자석에 분산하여 부상시키게 되므로 전자석 1개당 50kg의 중량을 계산하면 pole 하나당의 면적은 다음과 같다.

$$A = F \frac{\mu_0}{B_0^2} = 500 \times \frac{4\pi \times 10^{-7}}{0.7^2} = 0.0013[m^2]$$

1300[mm²]이므로 pole은 폭 13mm, 길이 100mm로 정한다. 기자력은

$$M = \frac{2g_0}{\mu_0} B = \frac{2 \times 0.005}{4\pi \times 10^{-7}} \times 0.7 = 5570.4[A \text{ turns}]$$

이므로 $I=10[A]$ 라 하면 557[turns]가 된다.

전류밀도 $J=5[A/mm^2]$ 라 하면 코일의 단면적은

$I/J=10/5=2[mm^2]$ 가 되어서, 코일

$\phi = 2r = 2\sqrt{\frac{2}{\pi}} = 1.59[mm]$ 를 사용한다.

Window Area의 치수는 점적율 0.6으로 하면,

$$Wh = \frac{M}{KJ} = \frac{5570.4}{0.6 \times 5} = 1856.8[mm^2]$$

이다. 대략 62×30정도의 치수이지만 충분한 공간을 고려하여, 65×30(=1950mm²)으로 한다.

2.3 해석 결과 및 분석

[그림 5]는 자속선의 분포를 나타내고 있으며 [그림 6]은 안내력의 현상을 나타내기 위한 x방향 변위 전후의 자

속 분포와 세기를 나타내고 있다.

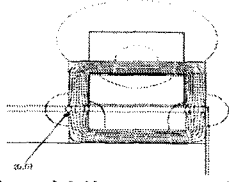


그림 5. 자속분포 (공극 = 5[mm])

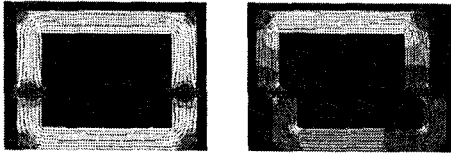


그림 6. 전자석 x축 변위시 자속분포 (공극 = 5[mm])

[그림 7]은 공극을 5[mm]로 일정하게 유지하면서 전류 변화에 의한 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 부상용 전자석에서 발생하는 부상력은 500[N]으로 설계하였다. 계산값과 [그림 10]의 시뮬레이션을 비교하면 전류가 10[A]일 때 부상력은 약500[N]가 됨을 알 수 있다.

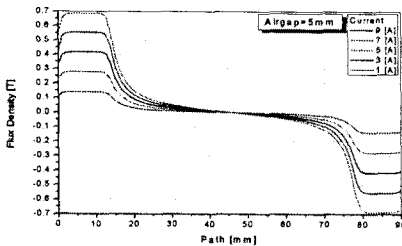


그림 7. 전류의 변화에 따른 자속밀도 (공극 = 5[mm])

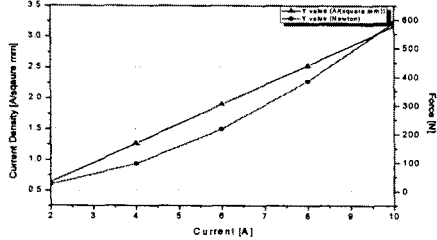


그림 8. 전류의 변화에 따른 힘 (공극 = 5[mm])

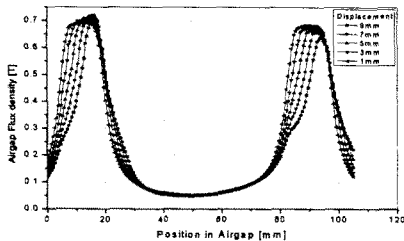


그림 9. 변위에 따른 공극 자속밀도

[그림 9]는 전자석의 x축에 대하여 변위를 주었을 때 전자석의 자속밀도를 나타낸다. x축으로 1[mm]에서 9[mm]까지 변위를 하였을 때 전자석이 안정한 위치로 돌아오게 하는 안내력에 대한 자속밀도를 나타낸다.

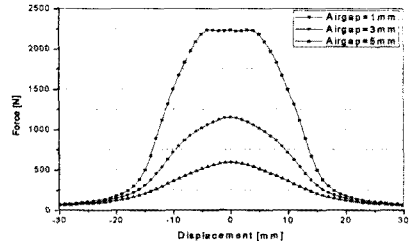


그림 10. 변위에 따른 흡인력

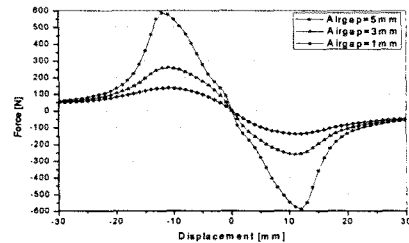


그림 11. 변위에 따른 안내력

[그림 10], [그림 11]는 공극 간격에 대해 발생하는 흡인력과 안내력을 유한요소법으로 나타낸 시뮬레이션 결과이다. [그림 12]는 전류에 대해 발생하는 흡인력을 유한요소법으로 시뮬레이션 하여 [그림 2], [그림 3]과 비교하였을 때 그 결과 값이 거의 같음을 알 수 있다. 공극의 변화에 따른 자속 분포의 변화는 공극이 좁아질수록 포화로 인한 자속의 일그러짐이 크게 나타나 부상력이나 안내력의 제어에 악영향을 미칠 것으로 사료되는바 필요로 하는 부상력에 따라 적절한 공극을 갖도록 설계 되는 것이 좋을 것이다.

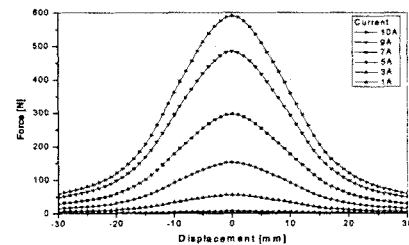


그림 12. 전류 변화에 따른 흡인력

3. 결 론

자기부상 시스템의 성능을 향상시키기 위해서는 시스템의 구동기인 전자석에 대한 분명한 이해와 실험적인 결과가 필요하고 실험 결과로부터 성능향상을 위한 설계가 요구된다. 따라서 본 논문에서는 부상용 전자석의 자기력 특성해석에 관해 연구하였다. 부상용 전자석의 자기력 특성을 해석하기 위해 유한요소 프로그램이 사용되었으며 실제 계산값과 비교, 분석하였다.

본 논문은 한국전력공사의 한국에너지자원기술기획평가원(KETEP)에서 지원한 전력변환시스템신기술 연구센터(과제번호 2007-0192)의 사업으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Jayawant, B.V.: "Electromagnetic levitation and suspension techniques" (Edward Arnold, London, 1981)
- [2] Yang, Z.J., and Tateishi, M.: "Adaptive robust nonlinear control of a magnetic levitation system", Automatica, 2001, 37, pp. 1125-131