

부상용 전자석의 설계 및 동특성 해석

장석명*, 최장영*, 성소영**, 성호경**

* 충남대학교, ** 한국기계연구원

Design and Dynamic Analysis of Electromagnets for Levitation Application

Seok-Myeong Jang*, Jang-Young Choi*, So-Young Sung**, Ho-Kyoung Sung**

* Chungnam National University, **KIMM

Abstract - This paper deals with design and dynamic analysis of electromagnets for levitation applications. On the basis of equivalent magnetic circuit (EMC) method and 3-D finite element analysis (FEA) model, initial and detailed design for electromagnets are performed. Using the state equation for the closed-loop control, the dynamic analysis of electromagnets is also performed. Finally, this paper investigates the variation of levitation force according to current under fixed nominal air-gap, and the variation of required current according to load weight in order to maintain the nominal air-gap. From these results, the validation of design and dynamic analysis of electromagnets is confirmed. In particular, the influence of winding temperature on levitation control is discussed in detail.

1. 서 론

자기 부상 열차는 친환경적이고 가벼워서 대량 수송에 적합하기 때문에 차세대 운송 수단으로 가장 적합한 모델중의 하나이다 [1]. 따라서 자기부상열차의 부상 및 추진에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 그들의 신뢰성을 높이기 위하여 부상 마그넷의 설계 및 동특성 해석에 많은 관심이 집중되고 있는 추세이다.

본 논문은 부상용 전자석의 설계 및 동특성 해석에 대한 연구를 다루는데, 먼저 등가자기회로를 이용하여 전자석의 초기설계를 진행한 후, 3차원 유한요소 해석을 이용하여 요구사양에 부합하는 전자석의 상세설계를 진행한다. 다음으로 전자석의 페루프 부상제어를 위한 상태방정식이 회로 방정식과 운동방정식으로부터 유도 되어 졌고, 이로부터 페루프 부상제어 알고리즘을 제시하였다. 설계결과를 바탕으로 제작된 전자석의 타당성을 검증하기 위하여 고정된 공극조건에서 전류에 따른 부상력 변화와 같은 정특성 실험과 부하증량에 따라 일정한 공극 유지를 위해 요구되는 전류 변화와 같은 동특성 실험을 수행 하였다. 특히, 권선의 온도변화가 부상제어에 미치는 영향에 대한 연구가 자세히 논의 되어졌다.

2. 전자석의 설계

2.1 해석모델 및 특성 방정식

그림 1은 전자석의 설계를 위한 해석모델이다. 이 그림에서 저장된 에너지 ($W_m(t)$)는 식 (1)과 같이 표현된다 [2].

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

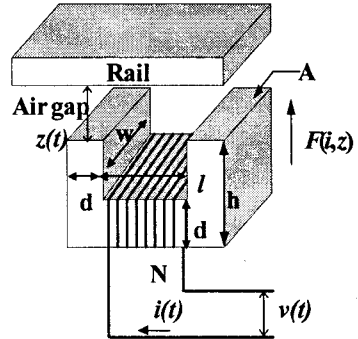


그림 1. 전자석 설계를 위한 해석 모델.

여기서 $i(t)$ 는 코일에 흐르는 전류이고, $L(z,i)$ 는 권선의 인덕턴스로 식 (2)로 주어진다.

$$L(z,i) = L(z) = \frac{N}{i} \phi(t) = \frac{N}{i(t)} \frac{Ni(t)}{R_m} = \frac{\mu_0 N^2 A}{2z(t)} \quad (2)$$

여기서 $\phi(t)$ 와 N 은 각각 공극 자속 및 권선의 턴 수이고, $z(t)$ 및 R_m 은 각각 공극길이 및 그림 1의 자기회로에 대한 릴럭턴스이다. μ_0 는 공기의 투자율을 나타낸다. 결론적으로 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 식 (3)으로 주어지는 부상력을 구할 수 있다.

$$F(z,i) = \frac{dw_m(t)}{dz} = \frac{d}{dz} \left\{ \frac{1}{2} L(z,i) [i(t)]^2 \right\} = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left\{ \frac{i(t)}{z(t)} \right\}^2 \quad (3)$$

표 1. 전자석 설계 요구사항 및 구속조건

Required Specifications		
Levitation Force	> 1200N	Nominal air-gap 3mm
		Nominal Current <7A
Design Constraints		
Magnet Depth (w)	≤200mm	Magnet Width (l+2d) ≤160mm
Magnet Height (h)	≤50mm	

2.2 설계 과정 및 결과

표 1은 전자석 설계요구 사양 및 구속 조건을 나타낸다. 표 1의 조건들과 그림 2 (a)로부터 다음과 같은 순서로 전자석의 설계를 진행 할 수 있다.

- i) 고정된 전류 밀도 및 표 1에 제시된 구속조건하에서 그림 1에 제시된 C-core 두께 즉 길이 d를 변경해 가며 슬롯 면적($l*w$)과 극면적 ($d*w$)을 계산한다.
- ii) 계산된 슬롯 면적으로부터 코일 직경에 따른 턴 수와 정격전류가 계산된다.

iii) 식 (3)에 계산된 코일 턴 수, 정격전류 및 극 면적을 대입하여 부상력을 계산한다.

iv) i)~iii)의 과정을 반복하여 그림 2(b)에 제시된 결과를 얻었으며, 그림 2(b)의 결과로부터 부상력이 최대가 되는 C-core 두께가 20mm임을 알 수 있다.

v) 그러나 식 (3)은 자기회로의 포화 및 전자석의 정확한 현상을 고려하기 어렵기 때문에 그림 2(c)에서 알 수 있듯이, 본 논문은 3차원 유한 요소 해석을 수행하여 상세설계를 진행하였다.

결과적으로 그림 3에 제시된 설계결과 및 제작된 전자석이 얻어졌다.

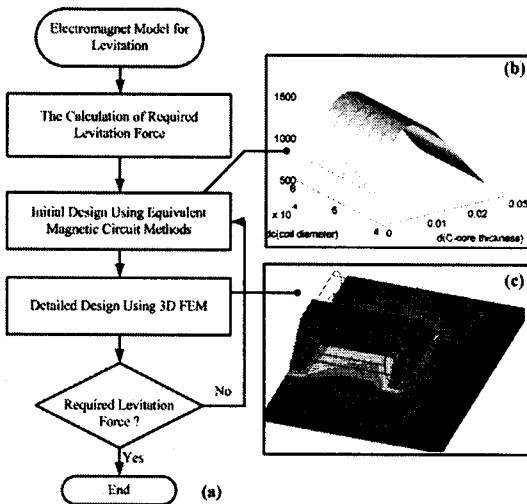


그림 2. 전자석 설계: (a) 설계과정, (b) 초기설계결과 및 (c) 3차원 유한요소해석을 이용한 상세설계.



그림 3. 제작된 전자석 및 사양.

3. 동특성 모델링

3.1 전압 방정식 및 운동 방정식

전자석에 대한 전압 방정식은 그림 4(a)와 식 (2)로부터 식 (4)로 표현된다.

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} = Ri(t) + \frac{d}{dz} \left\{ L(z, i) i(t) \right\} \\ = Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2} \frac{d}{dz} \left(\frac{i(t)}{z(t)} \right) \quad (4)$$

운동방정식 역시 그림 4(b)로부터 식 (5)와 같이 유도될 수 있다.

$$F(z, i) + m \frac{d^2 i(t)}{dt^2} = mg + f_d(t) \quad (5)$$

여기서 m , g 및 f_d 는 각각 전자석 무게, 중력가속도 및 부하 증량에 의해 가해지는 외력이다.

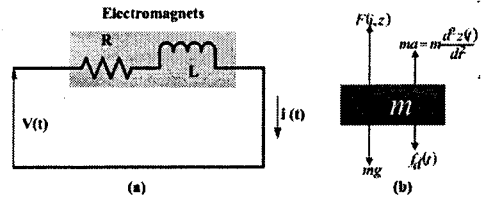


그림 4. (a) 전압 방정식 및 (b) 운동방정식 유도를 위한 개념도.

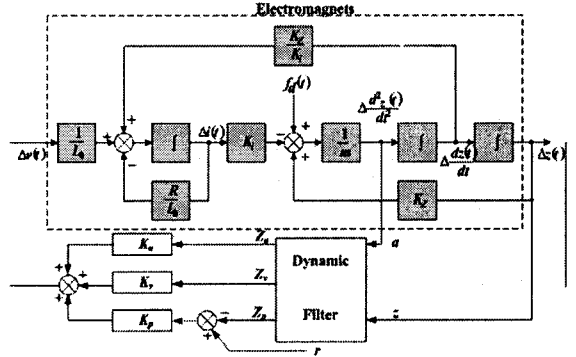


그림 5. 부상 시스템의 페루프 제어를 위한 블록 다이어그램.

3.2 동특성 알고리즘

식 (4) 및 (5)로부터 전자석의 개루프 제어를 위한 상태방정식을 얻을 수 있으며, 이에 다시 다이내믹 필터 부분을 고려하면 그림 5에 제시된 전자석의 페루프 제어를 위한 동특성 알고리즘을 얻을 수 있다.

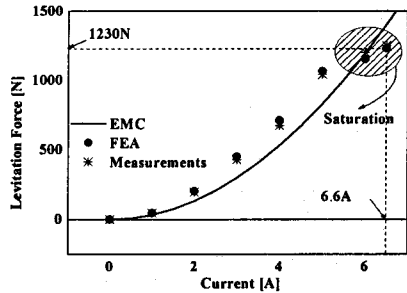


그림 6. 고정된 공극 하에서 전류에 따른 부상력 변화에 대한 해석결과, 유한요소해석결과 및 실험결과와의 비교.

4. 해석결과 및 검증

4.1 정특성 해석

그림 6은 고정된 공극 하에서 얻어진 전류에 따른 부상력변화에 대한 해석결과, 유한요소해석결과 및 실험결과와의 비교를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이, 실험결과는 등자기회로에 의한 결과 보다 3차원 유한요소 해석결과와 더 잘 부합하며, 전류가 6.6A인 경우에 포화가 발생함을 알 수 있다. 포화에도 불구하고, 요구 부상력을 만족하므로 본 논문은 부상 전자석의 정격 전류를 6.5A로 정했으며, 이는 본 논문의 전자석 모델의 인덕턴스의 감소를 가져와 시정수 측면에서 유리하다.

4.2 동특성 해석

그림 7은 전자석의 페루프 부상제어를 위한 구동드라이버 및 제어기에 대한 개념도 및 제작사진을 보여준다. 본 논문은 부상제어를 위한 제어기로 DSP 2808를 사용하였다.

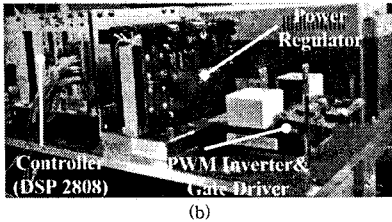
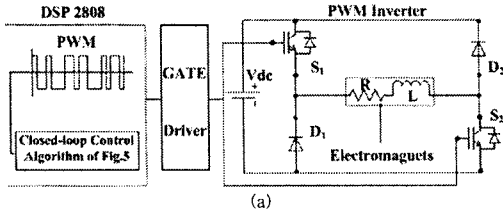


그림 7. 전자석의 페루프 부상제어를 위한 구동 드라이버 및 제어기: (a) 개념도 및 (b) 제작사진.

그림 8은 부하 중량의 변화에 따라 일정한 공극 유지를 위해 요구되는 전류량 변화를 보여준다. 그래프의 형태는 그림 6의 정특성 해석결과와 유사함을 알 수 있다. 그림 9는 전자석 부상 실험에서 부상전자석에 흐르는 전류, 부상되는 공극 및 권선의 온도변화를 보여준다. 그림 9(a)에서 알 수 있듯이, 부상 전자석은 무부하 즉 부상 전자석 자체의 무게만을 요구 공극 3mm로 부상 시키는 데 0.8A의 전류가 일정하게 들어감을 알 수 있으며, 전자석 코일의 온도는 계속하여 증가함을 알 수 있다. 또한, 그림 9(b)에서 전자석 코일의 온도가 섭씨 60도에 육박했을 때 전자석 전류의 요동으로 인해 부상제어의 실패에 이르게 됨을 확인할 수 있다. 그러나 0.8A의 전류는 실제로 정격전류에 비하여 작은 값이므로 전자석 코일의 온도상승이 전류량에 의한 결과로 보기에 무리가 있다고 판단된다. 따라서 코일의 온도상승에 영향을 주는 다른 요인을 찾기 위하여, 본 저자들은 그림 10에서 제시된 직류단 전압에 따른 온도 상승 추이를 실험하였다. 그림 10에서, 직류단 전압 및 전류가 300V 및 0.8A 인경우가 100V 및 2.5A인 경우 보다 온도상승이 더욱 두드러짐을 알 수 있으며, 이는 전자석 코일의 온도상승이 단순히 줄열에 의한 것이 아닌 직류단 전압과 관계가 높을 것임을 시사한다고 볼 수 있다. 따라서 향후 직류단 전압과 전자석 코일의 온도상승과의 관계 규명에 대한 연구를 수행할 것이다.

5. 결 론

본 논문은 부상용 전자석의 설계 및 동특성 해석에 대해 다루었다. 먼저 등가자기회로를 이용하여 설계제약 조건을 고려한 전자석의 초기설계를 진행하였고, 3차원 유한요소 해석을 이용하여 형상을 고려한 그리고 요구수양에 부합하는 전자석의 상세설계를 수행하였다. 설계결과를 바탕으로 부상용전자석을 제작하고 고정된 공극에서 전류에 따른 부상력 실험을 통해 본 논문에서 수행한 설계의 타당성을 검증하였다. 다음으로 전자석의 페루프 부상제어를 위한 상태방정식을 회로 방정식과 운동 방정식으로부터 유도하였고, 이로부터 페루프 부상제어 알고리즘을 제시하였다. 부상제어알고리즘의 신뢰성 검증을 위하여 부하중량에 따라 일정한 공극 유지를 위해 요구되는 전류 변화와 같은 동특성 실험을 수행 하여 부상제어 알고리즘의 타당성 역시 검증하였다. 특히, 권선의 온도변화가 부상제어에 미치는 영향이 줄열이 아닌 직류단 전압과 밀접한 관계가 있음을 규명하였으며 이로 부터 향후 연구 방향을 제시하였다.

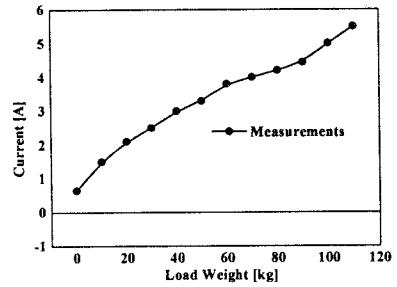


그림 8. 부하 중량의 변화에 따라 일정한 공극 유지를 위해 요구되는 전류량 변화.

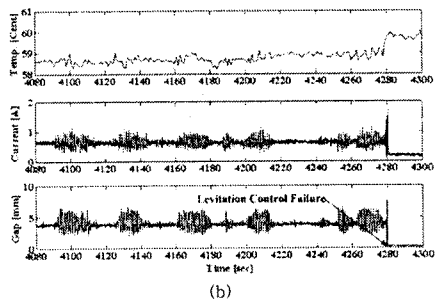
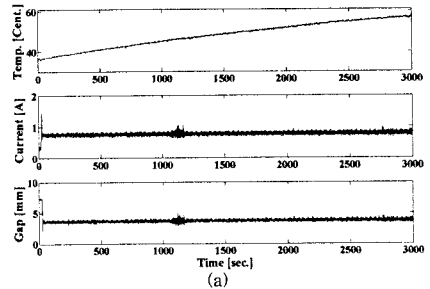


그림 9. 전자석 부상 실험결과: (a) 0~3000s 및 (b) 4000s 이후.

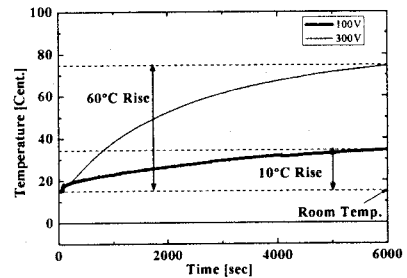


그림 10. 전자석의 페루프 부상제어를 위한 구동 드라이버 및 제어기: (a) 개념도 및 (b) 제작사진.

[참 고 문 헌]

- [1] H. W. Lee, K. C. Kim and J. Lee, "Review of maglev train technologies," *IEEE Trans. Magn.* vol. 42, no. 7, pp.1917-1925, 2006.
- [2] H. Weh and M. Shalaby, "Magnetic levitation with controlled permanent excitation," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 13, no. 5, pp.1409-1411, 1977.