

상전도 부상 시스템의 부상 Magnet 설계에 관한 연구

임 달 호, 최 창 규, 김 규 탁, 신 병 호
한양대학교

A Study on the Design of Magnet of Electromagnetic Levitation System

Dal-Ho Im, Chang-Gyu Choi, Gyu-Tak Kim, Myoung-Ho Shin
Dept. of Electrical Eng. Hanyang University

Abstract

Electromagnetic levitation system became powerful because of its high speed, safety, reliability, and so forth

So, in this paper, various characteristics of magnet in electromagnetic levitation system were analyzed by Finite Element Method and its design parameters were proposed by simulation results.

1. 서론

급속한 경제발전과 이에 대응한 교통인구의 증가로 운송 시스템의 속도 경쟁은 날로 심화되고 있다. 그러나 기존의 차륜구동 시스템은 본질적으로 궤도와 차륜의 마찰에 의하여 추진력을 얻기 때문에 평균 최대속도 250 Km/h(상한 최대속도 350 Km/h) 수준이며 소음, 진동 등의 많은 문제점이 있다.

이러한 단점을 극복하기 위하여 선진 외국에서는 부상식 열차의 개발에 관심을 표명하여 1960년대 후반부터 자기부상식 열차와 공기부상식 열차에 대한 연구를 병행하였다. 1970년대 중반까지 프랑스, 영국, 미국 등에서 개발이 진행된 공기 부상식 열차는 고속 주행 및 환경 문제 등에 문제점이 많아 실용화에는 이르지 못하고 신교통 시스템에 부분적으로 적용되고 있는 실정이다. 그러나 자기부상 열차는 Power Electronics 및 자기관련 기술의 급속한 발전에 힘입어 현재 실용화 단계에 이르고 있다.

특히 자기 부상(Magnetic Levitation: Maglev) 시스템은 레일과의 마찰력에 의해 추진하는 방식이 아니기 때문에 본질적으로 고속성, 무공해, 안정성, 신뢰성, 경제성 그리고 승차감이 뛰어나다. Maglev는 레일 표면에서 자력을 이용해서 약 1.0cm(상전도 부상방식) 또는 10cm(초전도 부상방식)가량 부상한 상태에서 주행하기

때문에 외부와의 물리적인 접촉이 필요없어 마찰에 의한 소음, 공해, 마모 등이 없는 대단히 이상적인 미래의 운송 수단으로 각광을 받고 있다. 이 중 초전도 자기 부상 방식은 제작비, 유지비 등에 많은 문제점을 내포하고 있다. 한편 주행레일의 형상에 따라 Plate형과 U자형 레일로 크게 나눌 수 있으나 Plate형은 복원력을 발생하기 위한 부수적인 장치가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 상전도 자기 부상 시스템의 부상 마그네트의 제반 특성을 수치해법으로 강력히 대응된 유한요소법을 이용하여 해석하므로써 설계지표를 도출하였다.

2. 적용이론

2.1 지배방정식

그림 1과 같은 자기부상 철도용 Magnet 를 2차원적으로 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 두었다.

1. Magnet 의 길이는 중국에 비해 매우 크므로 주행방향의 누설자속은 무시하며 Magnet 는 주기적으로 배치되어 있다.
2. Magnet 의 여자전류는 Z 방향 성분만을 고려한다.
3. 재질은 균일하며 등방성이다.
4. 주행 레일은 Z 방향으로 무한대이며 Magnet 는 Z 방향으로만 이동한다.

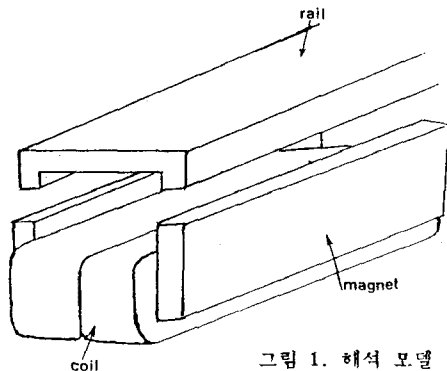


그림 1. 해석 모델

주행 레일에 유기된 기전력 및 공극 합성 자계는 다음 식으로 주어진다.

$$\nabla \times E = \nabla \times (V \times B) \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J_0 + J_a \quad (2)$$

여기서 V : 부상 Magnet 의 이동속도
 J_0 : Magnet 의 여자전류 밀도
 J_a : 주행 레일에 유기된 와전류 밀도

한편 와전류 밀도 J_a 와 전계의 세기 E 의 관계로부터 주행 레일에 유기된 와전류 밀도 J_a 는 다음과 같다.

$$J_a = \sigma (V \times B) + \sigma \nabla \phi \quad (3)$$

여기서 σ 는 주행 레일의 도전율
 ϕ 는 임의의 스칼라 함수이다.

식 (2), (3) 으로부터 자기벡터 포텐셜에 대한 지배 방정식을 유도하면 식 (4)로 주어진다.

$$\nabla^2 A / \mu = - (J_0 + \sigma (V \times B) + \sigma \nabla \phi) \quad (4)$$

한편 Magnet 가 l_p 를 주기로 N, S 극이 고대로 배치되어 있다고하면 Magnet 의 여자전류 분포는 다음과 같이 fourier 급수로 표현 할 수 있다.

$$J_0 = \sum J_{0n} e^{j(k_n z)} \quad (5)$$

단 $J_{0n} = 4 / (n \pi) \sin(k_n l / 2)$, $k_n = n \pi / l_p$
 여기서 n : 고조파 차수, l : Magnet 길이
 J_m : 여자전류 밀도의 최대치

Magnet 의 길이가 폭에 비해 매우 크므로 주행 레일에 의해 유기된 와전류중 X 방향 성분은 무시할 수 있으므로 자기벡터 포텐셜 A 도 Z 방향 성분인 A_z 만 존재하며 이는 (6)식과 같다.

$$A_z = \sum A_n e^{j(k_n z)} \quad (6)$$

식 (5), (6)을 식 (4)에 대입하여 각 성분을 구하고 이로부터 ϕ_n 을 유도하면 식 (7)과 같다.

$$\phi_n = -V_z A_n e^{j(k_n \cdot z)} + C_n \quad (7)$$

식 (7)을 (3)에 대입하여 정리하면 주행 레일에 유기된 와전류 밀도 J_a 는 식 (8)과 같다.

$$J_a = \sum \sigma \partial \phi_n / \partial z \quad (8)$$

한편 레일에 유기된 와전류의 합은 전류의 연속 조건에 의해 항상 0 이 되므로 (7)식과 (8)식에 의하여 $\partial C_n / \partial z$ 을 유도하면 다음과 같다.

$$\partial \phi_n / \partial z = j V_z k_n A_{0n} e^{j(k_n \cdot z)} \quad (9)$$

여기서 A_{0n} 은 주행 레일 내의 벡터 포텐셜의 평균치로서

$$A_{0n} = 1 / S_t \int_{S_t} A_n ds \quad (10)$$

(S_t : 주행 레일의 단면적)

이다.

식 (8), (9) 를 (4)식에 대입하여 정리하면 식 (11)과 같은 지배방정식이 유도된다.

$$\sum (1 / \mu (\partial^2 A_n / \partial x^2 + \partial^2 A_n / \partial y^2 - k_n^2 A_n) - j \sigma V_z k_n (A_n - A_{0n})) = \sum (-J_{0n}) \quad (11)$$

2.2 유한 요소법 적용

식 (11)을 유한 요소법을 적용하여 해석하기 위하여 해석 영역을 삼각 요소로 분할하고 각 삼각 요소 내부에서의 벡터 포텐셜 A 가 선형적으로 변화한다고 가정하면 요소 (e) 내의 임의점에 대한 포텐셜 값은 식 (12) 와 같이 근사화 된다.

$$A^{(e)}(x, y) = \sum N_{i0}(x, y) A_{i0} \quad (12)$$

여기서 $N_{i0}(x, y) = 1/2A (a_i + b_i x + c_i y)$ 는 보간함수 또는 형상함수 이다.

식 (11)에 Galerkin 법을 적용하여 계 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\{ [S] + j [R] \} \{ A \} = \{ F \} \quad (13)$$

2.3 특성 계산

각 요소내의 자속밀도는 식 (13)의 다원 연립방정식을 풀어 얻은 각 절점의 절점치로부터 식 (14)에 의해 얻을 수 있다.

$$B_x^{(e)} = 1/2A \sum \sum c_i A_{n1} \\ B_y^{(e)} = -1/2A \sum \sum b_i A_{n1} \quad (14)$$

한편 부상 Magnet 의 부상력 F_L 과 안내력 F_R 는 Maxwell의 응력으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$F_L = 1/2 \mu_0 \int (B_y B_y^* - B_x B_x^*) dx \\ F_R = 1/ \mu_0 \int (B_x B_y^* + B_x^* B_y) dx \quad (15)$$

3. 해석 결과 및 검토

유한요소법을 이용하여 그림 2와 같은 U자형 주행 레일을 갖는 상전도 자기부상 장치의 주행시의 계반 특성을 해석하기 위하여 총절점수 598, 총요소수 1100개로 영역을 분할하였다.

부상 Magnet가전위된 경우에도 적용할 수 있도록 하기 위하여 전 영역을 해석 영역으로 설정하였으며 경계조건은 마그네트로 부터 충분한 거리를 두고 고정 경계조건을 주었다.

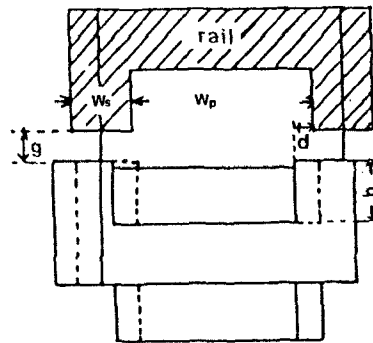


그림 2. 부상 Magnet

그림 3은 주행레일과 데먼된 Magnet의 폭이 제반 특성에 미치는 영향을 규명하기 위하여 속도에 따른 부상력의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 F_{lo} 는 정지시 주행레일과 Magnet사이의 편위가 없는 경우의 부상력이다. 동일 기자력하에서 공극 자속 밀도를 일정하게 하기 위하여 자극 단면적을 일정하게 한 경우, 폭 증가에 따라 속도의 의존성이 크게 나타난다. 즉 시속 300 Km/h인 경우 폭이 15mm인 경우는 정지시의 64%정도로 감소하나 폭이 40mm인 경우는 23%로 급격히 감소한다. 이는 속도증가에 따라 주행레일의 와전류가 급격히 증가하기 때문에 속도의 의존성을 줄이기 위하여는 레일 폭을 가급적 적게 하여야 한다.

그림 4는 정지시 부상 Magnet와 주행레일의 편위에 따른 부상력 변화를 나타낸 것으로 $w=15mm$ 인 경우 편위가 5mm시 92%, 10mm인 경우 74%로 부상력이 급격히 감소한다. 그러나 자극 폭이 25mm인 경우는 96,87%로 폭이 15mm인 경우보다 훨씬 안정된 부상력을 발생함을 알 수 있다. 한편 상전도 자기 부상 모듈의 마그네트는 안전 운전을 위하여 자극폭과 레일폭을 일치형으로 배치하지 않고 지그재그형으로 배치하고 있는 점과 외력 및 rolling등에 의한 영향까지도 고려한다면 자극 폭은 20 - 25mm정도가 적합함을 알 수 있다.

그림 5는 자극의 단면적이 결정된 후 권선을 시험하기 위한 창의 폭이 부상력 특성에 미치는 영향을 규명하기 위한 것으로서 창폭이 자극폭의 4 - 8배에서는 그다지 큰 영향을 미치지 않으나 그 이상에서는 크게 감소하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 권선 저항에 의한 온도 상승, 코일 배치, 코일의 점적물등을 고려할때 6 - 8배로 하는 것이 적절하다고 사료된다.

그림 6은 입력 전류 변화에 따른 부상력의 변화 곡선으로서 공극이 5mm인 경우, 부상력을 4000(N)정도로 유지하는데 필요한 전류는 15A정도이다. 공극이 10mm일때 같은 부상력을 얻기 위하여 필요한 전류는 25A정도로 67%정도의 전류가 더 필요하여 비 효율적이다. 그러나 자기 부상 시스템은 추진 장치인 리니어 모터에서 발생하는 Normal force의 영향도 고려하여 공극을 결정하여야 한다. 공극이 작은 경우 Normal force의 영향이 기동 및 정지시 매우 크게 나타나며 주행속도에 의한 영향도 고려하여야 하므로 마그네트의 공극을 작게만 설계할 수 없다.

한편 그림 7은 공극 변화에 따른 부상력의 속도의 의존성을 나타낸 것으로 공극이 작을 수록 매우 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 그림 6,7로부터 부상 마그네트의 공극은 10mm전후가 적절함을 알 수 있다.

그림 8은 편위시의 속도의 의존성을 나타낸 것으로서 5mm편위 된 경우는 편위가 없는 경우와 부상력 특성에서 그리 큰 차이가 나타나지 않았다. 오히려 200Km/h

이상에서는 편위가 없는 경우보다 부상력이 다소 크게 나타났다. 이는 편위가 없는 경우 여자전류에 의한 공극자속 밀도가 커 속도가 고속인 경우에는 주행레일의 와전류가 크게 증가하기 때문이라 사료된다. 한편 10mm이상의 편위에서는 부상력이 급격히 감소한다. 따라서 Stegger량을 5mm정도로 하는 것이 안내력에 의한 안정운전 및 부상력 유지에도 유리하리라 사료된다.

그림 10은 위의 해석 결과로부터 도출된 자료들로부터 500Kg급의 주행 magnet를 설계한 경우의 자속 분포도이다. a)는 편위가 없는 경우 정지시의 자속 분포를 나타낸 것이며 b)는 5mm편위된 경우, 300Km/h로 주행시의 자속분포도이다. 주행레일의 와전류의 영향으로 레일중의 자속분포는 표면으로 집중됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고속성, 무공해, 안전성, 신뢰성 및 우수한 승차감등으로 인하여 미래의 ,교통수단으로 강력히 대두된 상전도 자기 부상 열차용 부상 마그네트의 제반 특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였으며 설계지표를 제시하였다.

참 고 문 헌

1. P.K. Sinha, "ELECTROMAGNETIC SUSPENSION DYNAMIC & CONTRIL", Peter peregrinus Ltd., 1987
2. YOSHIRO J, TADATOSHI Y, "Analysis of Lift and Drag Forces in Electromagnetic Levitation System", Trans. IEE Japan, Vol. 97, No. 4, pp 45 - 52, 1977
3. 임 달 호, "상전도 자기부상열차의 주행모즐개발", '90과학의 달 기념강연집, pp 33 - 49. 1990
4. J. F. Eastham, D. Rodger, " The Performance of Induction Levitators", Trans IEEE. Vol. Mag-20, No. 5, pp 1684 - 1686, 1984
5. J. Lagerholm, "Numerical Computation of eddy current effects in ferromagnetic maglev suspension", J. Appl. Phys. Vol.46, No.12, pp 5255 - 5258, 1975

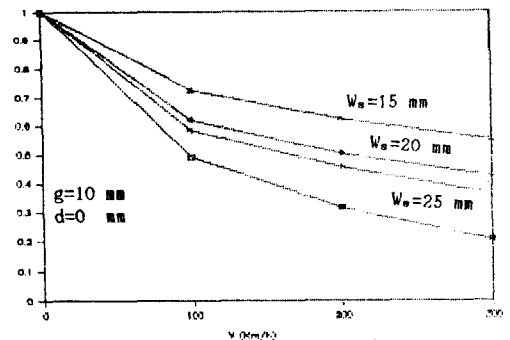


그림 3. 자극폭 변화에 따른 속도 - 부상력 의존성

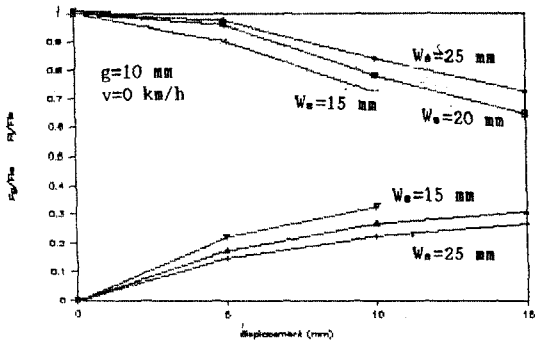


그림 4. 편위 - 부상력 특성

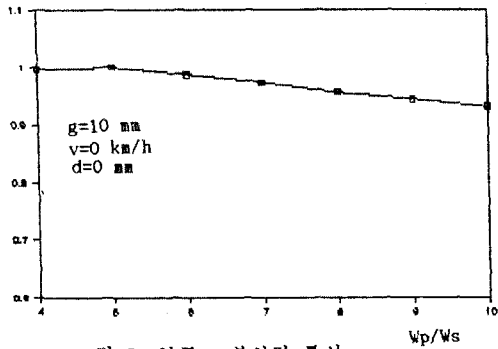


그림 5. 창폭 - 부상력 특성

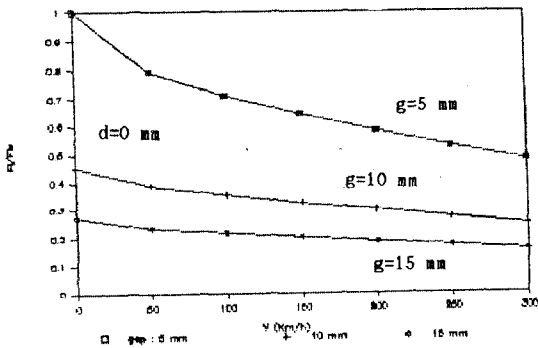


그림 7. 공구 변화에 따른 속도 - 부상력 특성

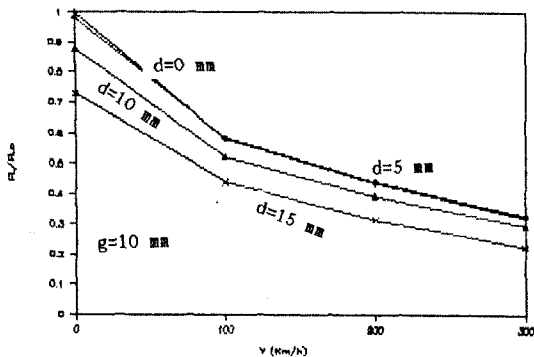


그림 8. 편위에 따른 속도 - 부상력 특성

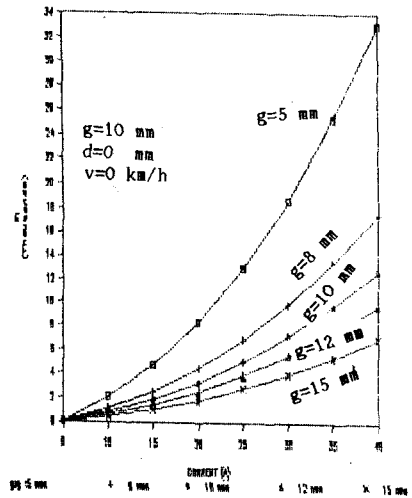
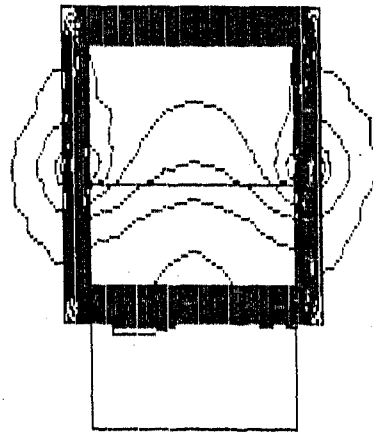
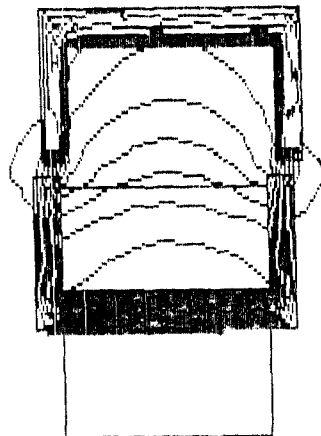


그림 6. 전류 - 부상력 특성



(a) v=0 km/h, d=0 mm인 경우



(b) v=300 km/h, d=5 mm인 경우

그림 9. 자속 분포도