

상하 및 좌우진동이 부상용 전자석 시스템에 미치는 영향

Effects of Vertical and Lateral Motion on Levitation Magnet System

車 貴 守* · 裴 東 鎭**
(Guee-Soo Cha · Dong-Jin Bae)

Abstract - Magnet core and rail of a magnetically levitated vehicle are usually made of highly conductive materials. Accordingly, eddy currents are induced in those members. Eddy currents often lead to a decrement of levitation and guidance force. This paper has calculated the decrement of both forces due to eddy current generated by magnet's vertical and lateral motion. U-shaped electromagnet and rail were chosen as a model of 2D finite element analysis. Calculated results proved that both forces dropped significantly at high speed. Consequently, effects of eddy current should be considered in designing the magnet and control system.

Key Words : · Levitation Magnet(부상용 전자석) · Magnetic Levitation(자기부상)
· Levitation Force(부상력) · Guide Force(안내력)

1. 서 론

자기적인 힘으로 부상하고, 선형전동기에 의해서 추진되는 자기부상열차는 다음세대의 운송수단으로 관심을 모으고 있다. 자기부상열차는 비접촉식으로 추진되고 부상되기 때문에 기계적인 진동과 소음이 거의 없고 고속화가 가능하다. 이에 따라 쾌적하고 신속한 교통수단이 될 것으로 생각된다[1, 2].

국내에서도 이에 대한 관심이 높아져서, 대학과 연구소에서 소형모델을 제작해서 시험운전을 한 바 있다[3, 4]. 국내에서 제작된 자기부상열차모델은 선형유도전동기에 의해서 추진되고, 전자석에 의해서 부상되는 형태이다. 부상력뿐만 아니라 안정된 방향으로 작용하는 안내력을 발생시키기 위

해서 U형 레일을 사용하고 있다.

레일과 전자석을 제작하기 위해서 사용되는 물질은 일반적으로 투자율과 도전성이 높으므로 차량이 진행방향으로 주행할 때 와전류가 발생한다. 이 와전류는 전자석의 부상력을 감소시키게 되어, 간략화된 모델을 이용한 계산에 의하면 차량이 시속 300km로 주행하고 있을 때 부상력이 45% 정도가 감소하는 것으로 밝혀졌다[5].

또한 차량이 상하 혹은 좌우진동 할 때에도 와전류가 발생한다. 특히 상하진동을 할 때에는 자기저항이 크게 변하기 때문에, 상하진동의 변화속도가 빠르지 않더라도 부상력은 크게 감소한다.

본 연구에서는 자기부상열차가 상하진동 또는 좌우진동을 할 때에 발생하는 와전류에 의한 전자석의 부상력과 안내력의 변화를 계산했다. 계산에 사용된 모델은 한국전기연구소가 제시한 중축형 전자석을 택했고, 2차원 유한요소법을 이용해서 수치계산을 수행했다.

*正 會 員 : 順天鄉大工大 電氣工學科 助教授 · 工博

**正 會 員 : 서울大 大學院 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 1991年 5月 13日

1次修正 : 1991年 10月 31日

2. 해석이론

전자석의 와전류 특성을 해석하기 위해서 사용되는 Maxwell 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_o + \vec{J}_e \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

여기서 \vec{J}_o 는 여자전류밀도이고, \vec{J}_e 는 와전류 밀도이다. 또한

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \vec{J}_e &= \sigma \vec{E} \\ &= \sigma[-\nabla \phi + \vec{V} \times (\nabla \times \vec{A})] \end{aligned} \quad (5)$$

이다.

여기서, 철심은 적층되어 있어서 와전류를 무시하고, 레일에서의 와전류만을 고려한다면, 하나의 도체만 있는 경우이므로 $\nabla \phi$ 항은 영으로 처리할 수 있다.

따라서 지배방정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = -[\vec{J}_o - \sigma \vec{V} \times (\nabla \times \vec{A})] \quad (6)$$

위의 지배방정식에 Galerkin법을 적용하면 잔차 R은 2차원인 경우에,

$$R = \int_{\Omega} N_i \nabla \times \left[\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right] d\Omega - \sigma \int_{\Omega} N_i \vec{V} \times (\nabla \times \vec{A}) d\Omega - \int_{\Omega} N_i \vec{J}_o d\Omega$$

가 된다.

이 때, 속도기전력인 $\sigma \vec{V} \times (\nabla \times \vec{A})$ 항은 그림1의

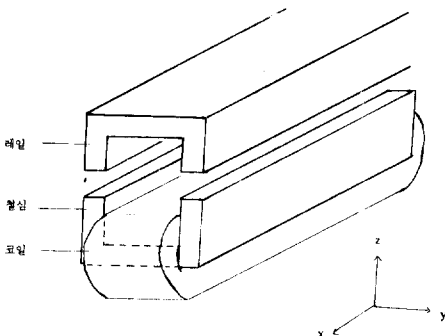


그림 1 부상용 전자석과 U형 레일
Fig. 1 Electromagnet and U-shaped rail

좌표계에서 속도 \vec{V} 는 \vec{V}_z 와 \vec{V}_y 의 경우를 고려하고, \vec{A} 는 \vec{A}_x 의 경우에 해당하므로

$$\sigma \vec{V} \times (\nabla \times \vec{A}) = \sigma \left(\vec{V}_z \frac{\partial \vec{A}_x}{\partial z} + \vec{V}_y \frac{\partial \vec{A}_x}{\partial y} \right)$$

로 처리하였다.

따라서 전체 계행렬은 다음과 같다.

$$\mathbf{K} \times \mathbf{A} = \mathbf{F}$$

여기서,

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= \frac{1}{\mu} \int_{\Omega} \left[\frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial z} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial y} \right] d\Omega \\ &\quad - 6 \int_{\Omega} \left[\vec{V}_z \frac{\partial N_i}{\partial z} + \vec{V}_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \right] d\Omega \end{aligned}$$

$$\mathbf{F} = \int_{\Omega} N_i \vec{J} d\Omega \text{이다.}$$

이 때, 부상력을 계산하기 위해서 맥스웰 스트레스 텐서를 이용하였다.

자속밀도 \vec{B} 인 자장내에 전류밀도 \vec{J} 인 도체는 단위체적당

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} [N/m^3]$$

의 힘을 받는다.

이 식은 다시

$$\vec{f} = \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B}$$

이고,

$$(\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} = (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B} - \frac{1}{2} \nabla B^2 \text{를 적용하고}$$

전체도체가 받는 힘은 체적적분을 행하면

$$\begin{aligned} \vec{F} &= \frac{1}{\mu_0} \int_V (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B} dV - \int_S \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{n} dS \\ &= \frac{1}{\mu_0} \int_S \vec{B} (\vec{B} \cdot \vec{n}) dS - \int_S \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{n} dS \\ &= \frac{1}{\mu_0} \int_S \vec{P} dS \end{aligned}$$

여기서, \vec{P} 는

$$P_x = -[(B_z^2 - B_y^2)n_x + 2n_y B_z B_y]$$

$$P_y = -[(B_y^2 - B_z^2)n_y + 2n_x B_z B_y]$$

이 되어 전체 도체가 받는 힘을 계산하였다.

3. 해석모델

부상력과 안내력을 발생시키기 위해서 사용되는 전자석과 U형레일은 그림1과 같다.

그림1과 같은 모델에서 발생하는 와전류의 영향을 2차원 유한요소법으로 해석하기 위해서 진행방

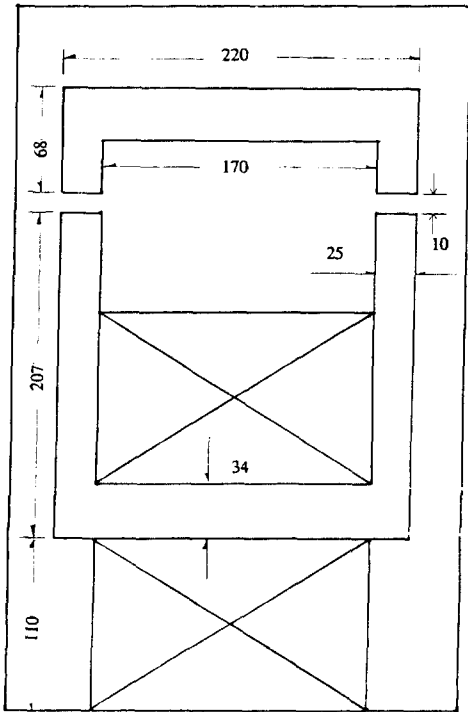


그림 2 해석모델 크기 [mm]
Fig. 2 Dimension of analysis model

향(x방향)으로 무한히 길다고 가정했다. 또한 레일 및 전자석 철심의 투자율은 일정하다고 가정했고, 전자석철심은 성층되어 있어서 철심에서는 와전류가 발생하지 않는다고 보았다.

위와 같은 가정을 적용한 해석모델은 그림2와 같다. 그림2의 해석모델은 한국 전기연구소에서 제시한 중축형 부상용 전자석 및 레일과 같다.

코일의 정격전류는 25[A], 권선수는 270×2 [turns]이므로, 기자력은 13500[AT]이다.

윗 모델에서 레일과 전자석철심의 비투자율 μ_r 은 800으로 보았고, 레일의 도전율 σ 은 1.0×10^7 [V/m]로 했다. 전자석철심은 성층되어 있다고 보아 도전율은 0으로 했고, 전류밀도 \vec{j} 는 7.22×10^5 [A/m²]로 해서 13500[AT]의 기자력을 갖도록 했다.

4. 상하진동

레일과 전자석철심 사이의 공극이 10[mm]이고, 좌우변위가 없을 때의 ($d=0$) 요소를 그린 것이 그림3이다. 요소는 자동요소분할방법으로 발생시

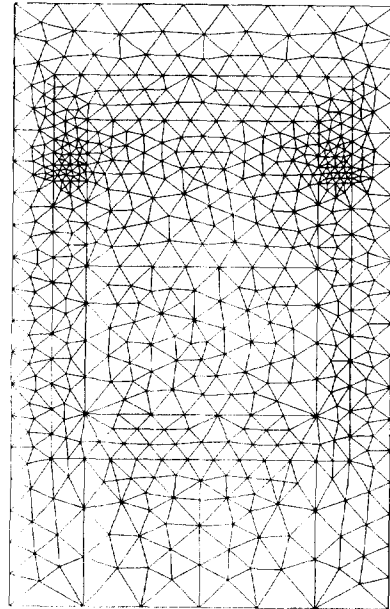


그림 3 공극이 10[mm]이고 좌우변위가 없을 때의 요소도
Fig. 3 Mesh diagram, gap=10[mm], $d=0$ [mm]

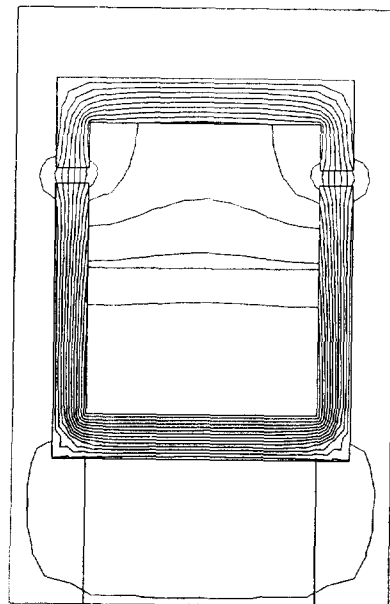


그림 4 전자석이 정지해 있을 때의 자속분포
좌우변위=0[mm]
Fig. 4 Flux distribution, gap =10[mm], $d=0$ [mm], $\vec{V}_z=0$ [m/sec]

졌고, 그림3의 경우에 절점수는 619개, 요소수는 1118개 이다.

그림3과 같이 공극이 10[mm]이고, 좌우변위가 없고, 전자석이 정지해 있을 때 ($\vec{V}_z=0$)의, 자속 분포가 그림4이다.

그림4와 공극과 좌우변위는 같지만 (gap = 10[mm], $d=0$ [mm]), 전자석이 1[m/sec] 속도로 오른쪽으로 움직이고 있을 때 ($\vec{V}_z=1$ [m/sec])의 자속분포가 그림5이다. 레일내의 자속분포가 운동에 의해서 발생하는 와전류에 의해서 아래쪽으로 쏠리는 것을 볼 수 있다. 한편 전자석철심의 도전율은 무시했기 때문에 전자석철심 내의 자속분포는 거의 변하지 않는다.

다음은 여러가지 속도에서 부상력을 Maxwell Stress Tensor를 이용해서 계산한 결과이다.

전자석이 위쪽으로 움직일 때에 부상력 \vec{F}_z 가 변화하는 정도를 보인 것이 그림6이다. 공극을 14[mm]에서 6[mm]까지 2[mm] 간격으로 변화시키면서 각 공극에서의 속도 \vec{V}_z 를 0에서 2[m/sec] 까지 변화시켰을 때이다. 일정 공극에서 속도가 증가하면 부상력이 감소하고, 부상력이 감소하는 정도는 공극이 가까울수록 큰 것을 알 수 있다. 공극이 10[mm]인 경우를 예로들면, 속도가 1[m/

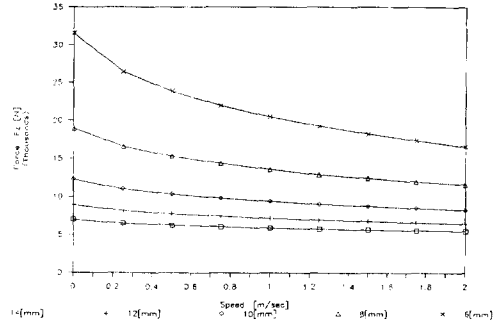


그림 6 상하진동에 의한 부상력의 변화
Fig. 6 Levitation force against vertical motion

sec]일 때에도 부상력이 25% 감소하고, 2[m/sec]인 경우는 36%가 감소한다.

5. 좌우진동

전자석이 한쪽으로 치우쳐 있을 때에는, 부상력 뿐만 아니라 전자석을 안정한 위치로 돌아오게 하는 안내력이 발생한다. 여기에서는 왼쪽으로 치우쳐 있는 전자석이 속도 \vec{V}_y 로 오른쪽으로 이동하

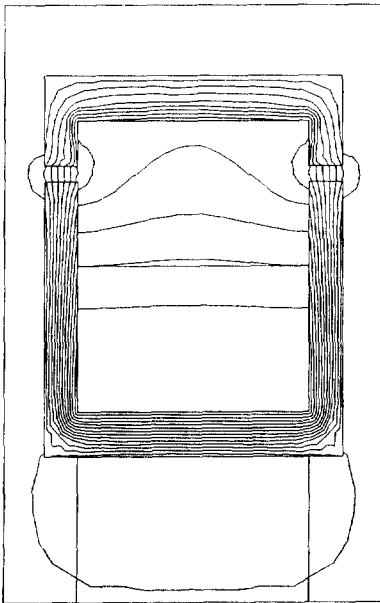


그림 5 전자석이 움직일 때의 자속분포, gap = 10[mm], $d=0$ [mm], $\vec{V}_z=1$ [m/sec]
Fig. 5 Flux distribution, gap = 10[mm], $d=0$ [mm], $\vec{V}_z=1$ [m/sec]

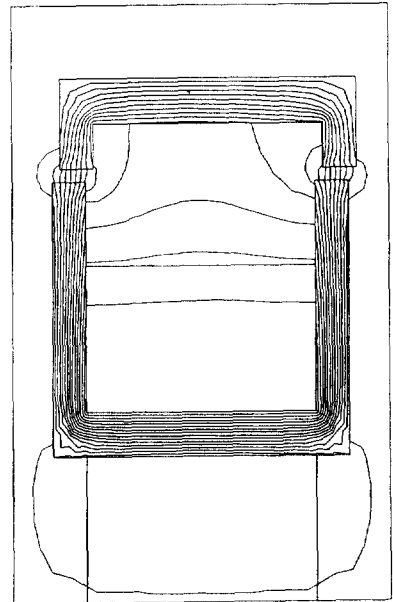


그림 7 전자석이 움직일 때의 자속분포, gap = 10[mm], $d=6$ [mm], $\vec{V}_y=1$ [m/sec]
Fig. 7 Flux distribution, gap = 10[mm], $d=6$ [mm], $\vec{V}_y=1$ [m/sec]

고 있을 때에, 운동에 의한 부상력과 안내력의 변화를 수치해석적으로 계산한 결과를 검토해 본다.

그림7은 공극이 10[mm]이고, 6[mm]의 좌우변위가 있는 경우($g=10$ [mm], $d=6$ [mm])로서, 1[m/sec]의 속도로 y방향으로 움직이고 있을 때이다. ($\overline{V}_y=1$ [m/sec])

상하이동에서 자속변화(그림 5와 그림 6)와 좌우이동에서의 자속변화(그림7)를 비교해보면, 폭방향의 움직임은 윗쪽으로 움직임에 비해서, 자속의 변화에 미치는 영향이 적다는 것을 알 수 있다. 이는 상하로 움직일 때에는 자기저항이 크게 변하므로와 전류가 많이 발생하지만, 폭방향으로 움직일 때에는 자기저항의 변화가 비교적 적어서, 공극을 10[mm]로 일정하게 하고, 폭방향의 변위 d 를 8[mm]에서 2[mm]까지 2[mm] 간격으로 변화시켰을 때에 운동에 따른 부상력의 변화가 그림

8이다. 변위가 6[mm]이고, 속도가 1[m/sec] 및 2[m/sec]일 경우에 부상력은 각각 3.5%, 4.3% 감소하므로, 감소정도는 상하운동에 비해서 상당히 적은 것을 알 수 있다. 또한 폭 방향의 변위가 적을수록 부상력 자체도 크고 감소하는 정도도 크다.

그림8과 같은 조건에서, 안내력(\overline{F}_y)의 변화를 보인 것이 그림9이다.

변위가 6[mm]이고, 속도가 1[m/sec] 및 2[m/sec]인 경우에 안내력은 각각 8%, 12% 감소하고 이는 부상력이 감소하는 정도의 2.5배에 해당된다. 그림8과 그림9로부터 전자석이 좌우로 이동할 때에는 부상력보다는 안내력에 미치는 영향이 더 큰 것을 알 수 있다.

6. 결 론

선형유도전동기로 추진되는 자기부상열차에서는 부상용전자석과 U형레일을 이용해서 부상력과 안내력을 발생시킨다. 이 구조에서는 차량이 주행할 때에는 물론이고, 상하 및 좌우진동을 할 때에도 레일에 와전류가 발생하게 되어 부상력과 안내력에 영향을 미친다.

본 연구에서는 상하 및 좌우진동에 의한 부상력과 안내력의 변화를 2차원 유한요소법을 이용해서 계산했다. 계산결과에 의하면 상하진동시에는 부상력이 상당히 감소하고, 좌우진동시에는 안내력이 영향을 받는 것으로 밝혀졌다.

이에 따라 전자석을 설계하거나 부상제어시스템을 설계할 때에는 차량의 진행방향운동뿐만 아니라, 상하 및 좌우진동도 고려해야 할 것으로 생각된다.

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원에 의해서 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] S.A. Nasar, I. Boldea, Linear Motion Electric Machines, WILEY, 1976.
- [2] S.A. Nasar, L. DEL CID, Jr, "Propulsion and Levitation Forces in a Singlesided Linear Induction Motor for High Speed Ground Transportation," Proc. of IEEE, Vol. 61, No. 5, MAY 1973, pp. 638~643.
- [3] 임달호, 최창규, 이철직, 조운현, "유한요소법에 의한 편축식 선형유도전동기의 1차측

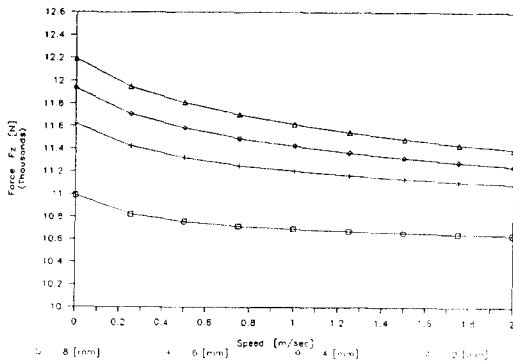


그림 8 좌우진동에 의한 부상력의 변화
Fig. 8 Levitation force against lateral motion

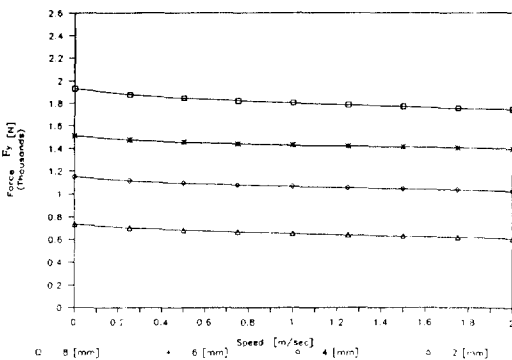


그림 9 좌우진동에 의한 안내력의 변화
Fig. 9 Guidance Force against lateral motion

과 2차측의 횡방향편위에 따른 특성해석," 대한전기학회 논문지, Vol. 39, No. 8, AUG 1990.

- [4] 한규환, 성호경, 최규철, 김국진, "자기부상 열차 모형개발에 관한 연구," 1989 대한전기학회 하계 종합학술대회 논문집 pp. 40~43.
- [5] S. Yamamura and T. Ito, "Analyssis of Speed Characteristics of Attracting Magnet

for Magnetic Levitation of Vehicles", IEEE Trans. Mag, Vol. Mag-11, No. 5, 1975, pp. 1504~1507

- [6] D. Roger, S. Pickering and J.F. Eastham, "A Comparison of Results from 1, 2 and 3 Dimensional Models of a Simple Linear Induction Motor," ICEM, Munich, Germany, Sep., 1986.

저 자 소 개



차귀수(車貴守)

1956년 7월 18일생. 1978년 서울대 공대 공업교육과 졸업. 1982년 동 대학원 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(공학박). 현재 순천향대 공대 전기공학과 조교수.



배동진(裴東鎭)

1966년 4월 7일생. 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료 예정. 현재 현대중전기 기술연구소 주임연구원.