

FEM에 의한 부상마그네트의 횡방향 편위를 고려한 자기부상시스템의 안내력변화 특성해석

任 達 鎬 權 丙 一 洪 正 杓 任 志 元^o
한양대학교 전기공학과

Analysis of Dynamic Characteristics of Electromagnetic Suspension system with Lateral Displacement by FEM

Dal-Ho Im, Byung-Il Kwon, Jung-Pyo Hong, Jee-Won Im^o
Department of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract : In this paper, an analysis of lift and lateral forces as a function of speed in electromagnetic suspension system (EMS) using the finite element method is presented. It is shown that, as in the case of the lift force, the lateral restoring force decreases with increasing speed, and the lateral dynamic characteristic for lateral disturbance at low speed is different from that at high speed.

1. 서론

자기부상열차의 부상방식의 하나인 전자석과 레일사이에서 발생하는 흡인력을 이용하는 전자흡인식(EMS) 부상방식은 지지-안내독립식과 지지-안내겸용식이 있다. 지지-안내겸용식은 안내력 확보를 위한 자석을 따로 설치하지 않고 부상용자석을 이용한다. 따라서 제어면에서는 까다롭지만 중량이 감소되고, 궤도가 간단해지므로 일반적으로 이 방식을 이용한다[1]. 그러나 전자석이 레일에 대하여 상대속도를 갖고 주행할 경우, 레일에는 속도기전력이 유기되어 와전류가 발생한다. 이 와전류는 공극자속밀도를 감소시켜 지지력뿐만 아니라 안내력과 제어 특성에 영향을 미치게 된다.

안내력 확보가 필요한 지지-안내겸용식에 있어서 이러한 영향은 독립식보다 심각하므로 이의 구체적인 특성파악이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는, 우선 편위된 상태하에서 주행방향으로 규칙적으로 배열된 단일 전자석의 속도에 따른 지지력-안내력 특성을 유한요소법을 이용하여 해석한다. 또한, 정지시에 안내제어계를 구성하여 속도변화에 따른 횡방향 동특성을 고찰한다.

2. U자형 전자석의 특성

본 장에서는 유한요소법을 이용하여 속도에 따른 지지력-안내력의 특성을 나타내었다.

2.1 해석모델 및 해석방법 [2]

그림 1. a), b)는 U자형 전자석과 레일의 해석모델의 정면도 및 측면도이며, 전자석이 N, S로 교번적으로 배치되어 있는 상태하의 여자전류밀도 분포를 그림 1. c)에 표시하였다.

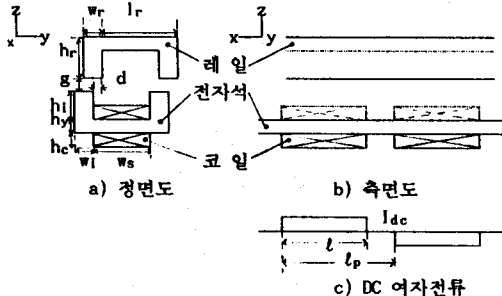


그림 1. U자형 전자석과 레일의 해석모델
Fig. 1 Analysis model of U-shaped magnets and inverted U-shaped rail

일반적으로 U자형 전자석은 자극폭보다 주행방향의 길이가 매우 크므로 주행방향의 변화를 무시하여 2차원적으로 해석하였으며, 다음과 같은 가정을 두었다.

- ① 전자석과 레일의 부자율과 도전율은 일정하다.
- ② 코일의 와전류는 무시한다.
- ③ 전자석은 주기적으로 배치되어 있다.
- ④ 주행레일에 발생한 와전류는 주행방향성분만을 고려한다.
- ⑤ 여자전류와 자기벡터포텐셜은 x방향성분만 고려한다.

그림 1. a)에서 제시한 해석모델의 제원은 다음과 같다.

표 1. 해석모델의 제원

Table 1. Parameter of calculation model

MAGNET			
COIL TURN	: N = 350	POLE WIDTH	: $w_l = 0.03$ [m]
POLE DEPTH	: $h_l = 0.06$ [m]	YOKE DEPTH	: $h_y = 0.03$ [m]
COIL DEPTH	: $h_c = 0.05$ [m]	RELATIVE PERM.	: $\mu_r = 3000$
RAIL			
WIDTH	: $l_r = 0.2$ [m]	POLE WIDTH	: $w_r = 0.03$ [m]
POLE DEPTH	: $h_r = 0.11$ [m]	POLE SEPARATION	: $w_s = 0.14$ [m]
RELATIVE PERM.	: $\mu_r = 1000$	CONDUCTIVITY	: $\sigma = 5.56 \times 10^6$ [Ω^{-1}/m]
AIR GAP			
	: $g = 0.015$ [m]		

전자석을 기준좌표계로 하여 기본방정식을 도출하면

$$\nabla \times E = \nabla \times (V \times B) \quad (2-1)$$

$$\nabla \times (B/\mu) = ic + i_o \quad (2-2)$$

$$\nabla^2 A = -\mu (ic + \sigma(V \times B) + \sigma \nabla \phi) \quad (2-3)$$

와 같다.

- 여기서, V: 주행속도, i_c : 전자석의 여자전류밀도
 i_o : 와전류 밀도, B: 자속밀도
 μ : 부자율, ϕ : 스칼라 포텐셜
A: 자기벡터포텐셜, σ : 도전률

그림 1. c)에서 표시한것과 같이 전자석의 여자전류밀도 i_c 는 진행방향 성분, x성분뿐이므로 전자석의 여자전류 밀도분포는 다음식과 같이 fourier 급수로 표현할 수 있다.

$$i_{cx} = \sum_N I_{CN} \exp(j k_N X) \quad (2-4)$$

$$I_{CN} = \frac{4}{N\pi} I_{dc} \sin\left(\frac{k_N l}{2}\right), \quad k_N = \frac{N\pi}{l_p}$$

여기서, N: 고조파차수, l: 전자석의 자극길이
 I_{dc} : 여자전류밀도의 최대치, l_p : 반주기

이때 고조파의 차수가 높아짐에 따라 고조파전류성분의 영향이 급격히 감소하게 되며, 제 7고조파는 기본파의 3.8 [%] 정도가 되어 7고조파까지만 고려하였다. 또한 전자석의 자극폭에 비하여 자극의 길이는 일반적으로 충분히 길기 때문에 와전류의 z방향성분을 무시하면 자계의 벡터포텐셜 A도 x성분 즉, A_x 뿐으로 되며 (2-4)식에 대응하여 다음식과 같이 표현된다.

$$A_x = \sum_N A_N \exp(j k_N X) \quad (2-5)$$

여기서, A_N : N고조파의 자기벡터포텐셜

V는 x방향성분 V_x (주행속도)만을 고려하면 다음과 같은 지배방정식을 얻는다[1].

$$\sum_N \left[\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_N}{\partial y^2} - KN^2 A_N \right) - j \sigma KNV_x (A_N - A_{0N}) \right] = \sum_N (-Ic_N) \quad (2-6)$$

여기서 A_{0N} 은 궤도 단면 S_T 내에서의 벡터포텐셜 A_N 의 평균치이며, 다음식으로 표현되어진다.

$$A_{0N} = \frac{1}{S_T} \int_{S_T} A_N ds \quad (2-7)$$

식(2-6)의 지배방정식을 풀기위하여 유한요소법을 적용하였다.

2.2 해석결과

단일 전자석에 대하여 안내력·지지력 특성을 고찰한 결과, 그림 2)에서 처럼 속도에 의하여 궤도에 와전류가 발생하여 자속이 대부분 궤도의 표면 부근에 집중하는 현상을 나타내었다. 이결과, 동일전류하에서 공극자속밀도가 감소하게 되며, 그림 3)에서 처럼 안내력·지지력이 감소하는 것을 알 수 있었다.

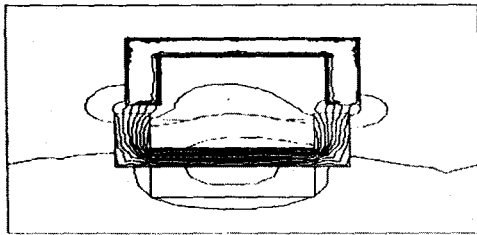


그림 2. 자속분포도(단일 전자석, $v=150$ [km/h], $d=10$ [mm])
Fig. 2 Magnetic flux distribution at $v=150$ [km/h], $d=10$ [mm]. (single magnet)

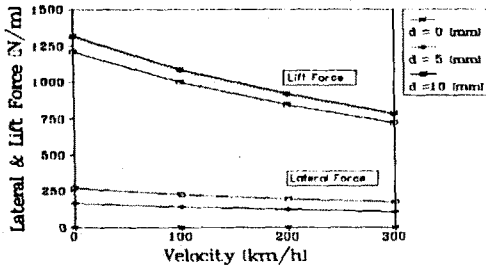


그림 3. 속도와 편위에 따른 안내력·지지력 특성 (단일 전자석)

Fig. 3 lateral and lift force vs. velocity for displacement. (single magnet)

3. 자기부상열차의 횡방향동특성

본 장에서는 안내·지지검용식에 대하여, 정지시에 안내제어계를 구성하여 속도변화에 따른 안내제어특성을 고찰하였다. 본 연구에서 행하는 안내·지지검용식에서 스테거량이 비교적 크다면 편위에 따른 지지력의 변화가 작게되므로 지지와 안내는 독립적이라 가정한다[4][5].

3.1 차량의 해석모델

스테거의 형태에는 lateral 스테거식[6]과 transversal 스테거식[7]으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 그림 4)에서 표시한 것과 같은 transversal 스테거식을 채택하였다[4].

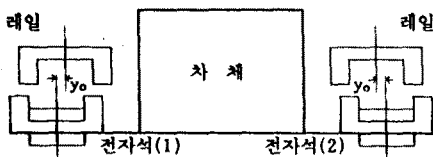


그림 4. Transversal 스테거를 가진 열차의 정면도
Fig. 4 A front view of vehicle with transverse stagger

3.2 안내제어시스템의 설계

안내·지지검용식을 전류제어 할 경우 스테거시킨 전자석의 입력전류는 다음과 같이 표현된다.

$$i_a = i_0 + i_1 \quad (3-1)$$

$$i_b = i_0 + i_2 \quad (3-2)$$

여기서,

i_a : 전자석(1)의 입력전류

i_b : 전자석(2)의 입력전류

i_1 : 전자석(1)의 전류변화량

i_2 : 전자석(2)의 전류변화량

i_0 는 평형상태에서의 전류(초기 여자전류)이며, 일정한 공극의 유지와 차체의 무게를 지탱하기 위하여 i_0 는 속도에 따라 변화한다. 안내계와 지지계가 독립하다고 가정하면 단일 전자석에 대한 횡방향 선형운동방정식은 다음과 같이 표현된다[4][5].

$$M \dot{y} = Fd + ffd \quad (3-3)$$

$$Fd = k_1 \cdot (i_1 - i_2) + k_y \cdot y_{c1} \quad (3-4)$$

여기서, M : 열차의 무게

Fd : 안내력

ffd : 횡방향 외력

k_1 : 전류에 영향을 미치는 계수

k_y : 편위에 영향을 미치는 계수

y_{c1} : 횡방향 편위

식(3-3)은 다음과 같은 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dy_{c1}}{dt} = y_{c1} \quad (3-5)$$

$$\frac{d^2 y_{c1}}{dt^2} = \frac{k_1}{M} \cdot i_r + \frac{k_y}{M} \cdot y_{c1} + \frac{ffd}{M} \quad (3-6)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} y_{c1} \\ \dot{y}_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ k_y/M & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_{c1} \\ \dot{y}_{c1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_1/M \end{bmatrix} \cdot i_r + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/M \end{bmatrix} \cdot ffd \quad (3-7)$$

여기서, 전류변화량 $i_1 - i_2$ 를 i_r 로 대체시키고, y_{c1} 와 속도 \dot{y}_{c1} 을 피이드 백하여 제어하면, i_r 는 식(3-8)과 같다.

$$i_r = k_a \cdot y_{c1} + k_b \cdot \dot{y}_{c1} \quad (3-8)$$

여기서, k_a : 편위에 대한 피이드 백 이득

k_b : 속도에 대한 피이드 백 이득

식(3-8)을 식(3-3)에 대입하여 다음과 같은 방정식을 얻는다.

$$M \dot{y}_{c1} = (k_1 \cdot k_a + k_y) \cdot y_{c1} + k_1 \cdot k_b \cdot \dot{y}_{c1} + ffd \quad (3-9)$$

계수 k_1 와 k_y 는 정지시에 단일 전자석으로부터 식(3-11), 식(3-13)과 같이 구하여진다.

$$F_{d0} = a + b \cdot i + c \cdot i^2 \quad (y=y_0) \quad (3-10)$$

여기서, F_{d0} : 정지시에 단일 전자석의 안내력

식(3-10)으로 보간된 전류에 대한 안내력과 계수 k_1 는 평형상태에서의 전류(초기 여자전류, i_0)에서 곡선의 접선기울기로 선형화하여 구한다. 이때의 스테거량은 $y=y_0$ 이며, 전류에 대한 안내력곡선은 그림 5)로 나타내었다.

$$\left. \frac{d F_{d0}}{d i} \right|_{i=i_0} = k_1 \quad (3-11)$$

$$F_{d0} = a' + b' \cdot y + c' \cdot y^2 \quad (i=i_0) \quad (3-12)$$

또한 편위에 대한 안내력과 계수 k_y 는 스테거량 y_0 에서 곡선의 접선기울기로 선형화하여 구한다. 이때의 전류는 평형상태에서의 전류(초기 여자전류, i_0)이며, 편위에 대한 안내력곡선은 그림 6)으로 나타내었다.

$$\frac{d F_{d0}}{d y} \Big|_{y=y_0} = k_y \quad (3-13)$$

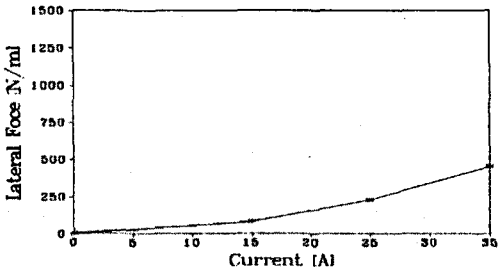


그림 5. 전류에 대한 안내력 특성 (v=0[km/h], d=10[mm])
Fig.5 Lateral force vs. current variation

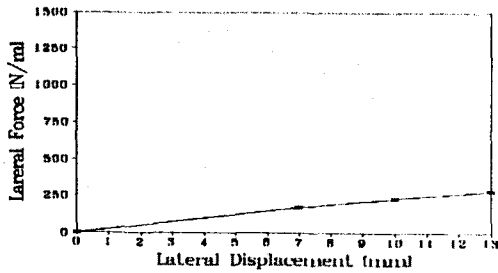


그림 6. 편위에 대한 안내력 특성 (v=0[km/h], i=25[A])
Fig.6 Lateral force vs. displacement variation

식(3-7)의 특성방정식을 극배치법에 의하여 고유주파수 ω_n 을 11.7, 감쇠계수 ζ 을 0.707이 되도록 설정하였다. 이상으로부터 횡방향 동특성해석을 하기위한 제정수들은 표 2.와 같다.

표 2. 제정수

parameters of vehicle and control gain	
$M = 266.544$ [N/m]	$ff_d = 0.05Mg$
$k_y = -18659.6$ [N/m]	$k_a = -967.1$ [A/m]
$k_l = -18.434$ [N/A]	$i_0 = 25$ [A]
$k_b = 239.2$ [A/m/sec]	$y_0 = 10$ [mm]

3.3 횡방향 동특성해석

그림 4)에서 나타낸 transversal 스테이지에 대하여 안내제어계를 구성하여, 횡방향의력이 가해질 경우에는 양전자석의 전류가 변화하게 된다. 첫번째로, 정지시의 제어시스템을 구성하고, 또한 안내제어계의 횡방향동특성을 해석하기 위하여 정지시에 얻은 제어 이득을 이용하고, 지지력은 일정하다고 가정한다. 그림 7)로 나타낸 단일 전자석에서의 횡방향 편위 및 전류에 대한 안내력특성과 그에대한 보간법을 이용하여 안내력을 추정한다.

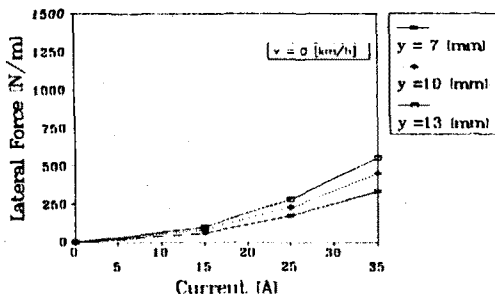


그림 7. 단일 전자석에서의 횡방향 편위 및 전류에 대한 안내력특성 (v=0[km/h])

Fig.7 Characteristic curve of lateral force

안내력은 전류와 편위에 대하여 다음식과 같이 보간할 수 있다.

$$F_{d1} = f(i, y) = \sum_{j=1}^3 N_j \cdot F_{dj} \quad (3-14)$$

여기서, N_j : 보간함수, F_{dj} : 각 편위에 대한 안내력

보간함수 N_j 는 y 의 함수로 보아 식(3-15)와 같이 쓸 수 있다.

$$F_{d1} = \sum_{j=1}^3 N_j \cdot F_{dj} = \alpha + \beta y + \gamma y^2 \quad (3-15)$$

여기서, F_{d1} 와 F_{dj} 는 단일자석의 안내력이고, F_{dj} 는 전류에 대한 함수로 표현하면 다음식으로 된다.

$$F_{d1} = (a_{11} + a_{12} \cdot y_1 + a_{13} \cdot y_1^2) \cdot F_{d1} + (a_{21} + a_{22} \cdot y_2 + a_{23} \cdot y_2^2) \cdot F_{d2} + (a_{31} + a_{32} \cdot y_3 + a_{33} \cdot y_3^2) \cdot F_{d3} \quad (3-16)$$

안내의 동특성을 얻기 위하여 비선형식(3-3), 식(3-8), 식(3-16)을 이용한다. 속도가 주어질 경우에도 3.2절에서 구한 정지시의 제어이득을 이용하여 해석하였다.

속도 0, 150, 300 [km/h]의 운전상태에서 횡방향 외력(0.05mg가 0.1[sec]동안 가해질 경우)에 대한 동특성을 해석하여 횡방향 편위 y_{cl} 의 변화를 그림 8)에 나타내었다. 즉, 속도가 증가함에 따라 안내계의 제어특성이 변화함을 알 수 있었다.

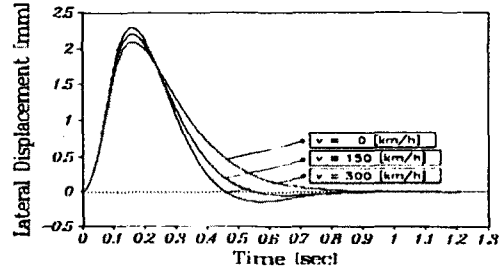


그림 8. 횡방향 외력이 있을 경우의 횡방향편위 특성

Fig.8 Characteristic of Displacement with transverse extra force (v = 0, 150, 300 [km/h])

4. 결론

전자흡인식(DMS) 부상방식의 하나인 지지-안내결합식에 대하여 속도변화에 따른 지지력, 안내력의 특성과 횡방향 동특성을 고찰하였다. 그 결과 속도증가에 따른 와전류의 증가로 지지력, 안내력이 감소함을 보였으며, 이러한 변화는 속도변화에 따라 횡방향 동특성의 변화를 나타내었다.

그러므로, 속도증가에 따른 지지력, 안내력의 감소는 지지-안내결합식 부상시스템의 설계시 고려해야 할 문제점이 된다. 또한, 속도의 변화에도 의존하지 않는 최적의 제어특성을 얻기 위해서는 속도변화에 강인한 새로운 제어기법이 요구됨을 알 수 있었다.

**** 참고문헌 ****

- [1] S.Yamamura, etc., "Analysis of Speed Characteristics of the Attractive Electromagnet for the Magnetic Levitation of Vehicles", Trans. IEE. Japan, Vol. 95, NO. 4, pp 4, pp. 209-215, 1975.
- [2] J. Yoshihiro, etc., "Analysis of Lift and Drag Forces in Electromagnetic Levitation System", Trans. IEE. Japan, Vol. 97 NO. 4, pp. 215-222, 1977.
- [3] R.H. Borcherts and L.C. Davis, "Lift and Drag forces for the Attractive Electromagnetic Suspension System", IEEE, Trans. Magn. Vol. MAG-10, pp. 425-428, 1974.
- [4] E. Masada, B.I. Kwon, "A Novel Control Scheme of Magnetic Lift and Guidance", T. IEE. Japan, Vol. 110-D, NO. -12, 1990.
- [5] D.A. Lambert, etc., "Controlled Dynamic Characteristics of Ferromagnetic Vehicle Suspensions Providing Simultaneous Lift and Guidance", Trans. ASEM, Vol. 101-2-19, September 1979.
- [6] M. Morishita, T. Asukizawa, "A new electromagnetic guidance technology with no guidance magnets, 11th Int. Conference on Maglev & Drives, July, pp. 381-386, 1989.
- [7] Suzuki, S., Kawashima, M., Hosoda, Y., and Tanida, T.: "H-SST-03 system", IEEE Trans., 1984, MAG-20, pp. 1675-1977.
- [8] 任 達鎮, "電氣界의 有限要素法", 東明社, 1987.