

## 영구자석을 이용한 와전류 자기반발식 부상장치에 관한 연구

성호경, 조정민, 김봉섭, 조홍제, 김동성

한국기계연구원

### A study on Eddy current Magnetic Repulsion System Using Permanent Magnets

H.K. Sung, J.M. Jho, B.S. Kim, H.J. Cho, D.S. Kim

Korea Institute of Machinery & Materials

**Abstract** – Maglev equipped with permanent magnets on the moving part can be levitated by the magnetic repulsion between Halbach array and conducting plate when this vehicle is running. This paper deals with the fundamental principles of the eddy-current magnetic repulsion system and the force characteristics to the change of the permanent magnet array and conduction bar.

#### 1. 서 론

자기부상열차는 전자기적인 힘으로 부상·추진되므로 바퀴가 없이 운전되는 새로운 궤도교통수단의 차량(MAGLEV: Magnetically Levitated Vehicle)이다. 따라서 선로와 선체간에 아무런 접촉 부분이 없어 기계적 진동이 없이 조용히 주행할 뿐만 아니라 동력발생 시스템에 별도의 회전-직선형 운동변환장치가 전혀 필요 없어 시스템의 가동 신뢰성이 높고 보수유지비가 적은 것이 큰 특징이다.

자기부상 기술은 지난 수십 년 동안 독일과 일본을 중심으로 지속적으로 발전하였으며, 자기부상 방식으로는 상전도 방식과 초전도 방식으로 크게 나눌 수 있다. 상전도 방식은 다시 흡인식과 반발식, 유도식으로 구분될 수 있으며 현재 UTM에서는 상전도 흡인식 자기부상 방식을 채용하고 있다. 상전도 흡인식 자기부상 방식은 기존의 전자석 제작 방식이 그대로 적용된 것으로서 부상력 한계로 인해 부상높이를 10mm 이상 크게 늘릴 경우 과도한 전류를 전자석에 흘리게 되어 부상에너지 효율이 떨어지게 된다. 따라서 영구자석을 이용한 유도식 부상방식이 연구되어 왔으며, 자기부상열차, 플라이휠 등의 분야에서는 기존 시스템을 보완하는 동시에 자기부상의 장점을 살려 발전해 오고 있다.

본 연구는 Halbach 배열 영구자석 갖는 자기 부상 시스템에 관한 것으로, 본 부상 장치는 일정 속도 이상에서 요구 부상력이 발생하며, 항시 제동력이 작용하는 단점을 가지고 있으나, 전력 소비가 없고 제어 장치가 불필요한 장점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 공간 고조파법과 유한요소법을 이용하여 부상 장치의 설계 변수에 따른 부상력과 제동력의 비를 확인하고자 한다.

#### 2. 와전류 발생원리와 수직력 및 제동력의 발생원리

그림 1은 와전류의 발생 원리를 설명하기 위한 개념도이다. 그림에서 1차축은 영구자석으로 구성되어 있으며 실선 화살표 방향으로 자화되어 있다. 2차축은 도전율을 갖는 재질로 구성되어 있으며 1차축과 2차축은 일정 간격으로 이격되어 있다. 1차축의 영구자석이 x-축 방향으로 V의 속도로 이동하면 2차축의 도체판에는 점선 화살표

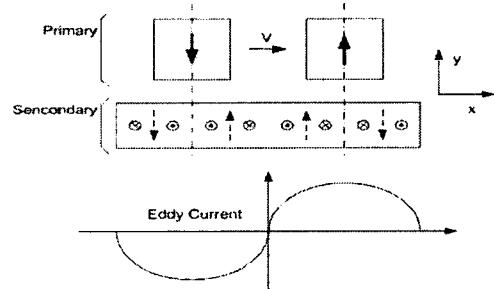


그림 1 와전류의 발생 원리 개념도

방향으로 영구자석에 의한 자계의 변화를 방해하려는 자계가 형성되고, 이 자계는 도체판에 와전류를 발생시킨다. 이와 같은 와전류를 속도 기전력에 의한 와전류라고 하며, 식 (1)과 같이 표현된다[1][2].

$$\begin{aligned} J &= \sigma(V \times B) = \sigma \begin{bmatrix} a_x & a_y & a_z \\ V_x & 0 & 0 \\ B_x & B_y & 0 \end{bmatrix} \\ &= \sigma V_x B_y a_z \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 와전류의 크기는 도체판의 도전율과 속도 및 자속밀도의 법선 성분 크기에 비례한 것을 알 수 있다. 따라서 와전류의 발생을 크게 하려면, 도전율이 좋은 재질을 선택해야 하며, 속도 및 법선 성분 자속밀도의 크기를 크게 하여야 한다.

그림 1과 같이 정지된 도체판에 와전류가 발생하면 Lorentz의 힘방정식에 의하여 식 (2)와 같은 힘이 발생하게 된다.

그림 1에서 와전류는 도체판을 따라 흐르게 되므로 식 (2)에서는 와전류의 x-성분도 고려하였다. 식 (2)에서 영구자석이 받는 힘은 z-성분의 전류 밀도와 y-성분의 자속 밀도에 의하여 x-성분의 제동력이 발생하며, z-성분 전류 밀도와 x-성분 자속 밀도에 의하여 y-성분의 부상력이 발생하게 된다. 또한 x-성분 전류 밀도와 y-성분 자속 밀도에 의하여 z-성분의 힘이 발생하게 되며 이것을 진동의 원인이 된다.

$$\begin{aligned} F &= J \times B = \begin{bmatrix} a_x & a_y & a_z \\ J_x & 0 & J_z \\ B_x & B_y & 0 \end{bmatrix} \\ &= -J_z B_y a_x + J_x B_z a_y + J_x B_y a_z \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 부상력을 최대로 하며 제동력을 최소로 하기 위해서는 z-성분의 전류 밀도와 x-성분 자속 밀도를 크게 하여야 하며, y-성분의 자속 밀도를 작게 하여야 한다.

### 3. Halbach 배열 영구자석을 갖는 자기부상 시스템의 힘의 특성식

#### 3.1 맥스웰의 스트레스 텐서에 의한 힘 특성식

Halbach 배열 영구자석 자기 부상 모델에 대한 공극자속밀도를 각각 구한 후, 맥스웰 스트레스 텐서를 이용하여 2차축 영구자석에 작용하는 제동력 및 수직력을 식(3)과 같이 계산할 수 있다.

$$F_t = \frac{w_s p}{2\mu_0} \int_0^r Re(B_{z2}B_{y2}^*)dx \quad (3.a)$$

$$F_n = \frac{w_s p}{4\mu_0} \int_0^r (|B_{z2}|^2 - |B_{y2}|^2)dx \quad (3.b)$$

여기서  $w_s$ 는 2차축의 폭,  $p$ 는 극쌍수,  $r$ 는 극간격이다.

#### 3.2 로렌츠 힘특성식에 의한 힘 특성식

로렌츠의 힘 특성식에 의해서는 식(4)와 같이 힘 특성식을 얻을 수 있다.

$$F_t = \frac{\sigma V k_n^2 w_s p r}{4} \int_0^r \{(Ce^{a_s y} + De^{-a_s y}) * (Ce^{a_s y} + De^{-a_s y})^* dy\} \quad (4.a)$$

$$F_n = \frac{-j\sigma V k_n a_s w_s p r}{4} \int_0^r \{(Ce^{a_s y} + De^{-a_s y}) * (Ce^{a_s y} + De^{-a_s y})^* dy\} \quad (4.b)$$

#### 3.3 힘 특성식의 검증

표 1은 Halbach 배열 영구자석 자기 부상 모델에 대한 1차축 영구자석의 사양이다.

표 1 Halbach 배열 영구자석의 설계 변수

영구자석 사양 (mm)	치수
길이 $r_m$	30
높이 $PM_h$	30
폭 $P_w$	200
극간격 $r$	60
공극 $g$	5

그림 2는 유한요소법을 이용하여 힘특성을 비교하였으며, 힘특성식을 이용하여 속도에 따른 부상력과 제동력을 보여주고 있다.

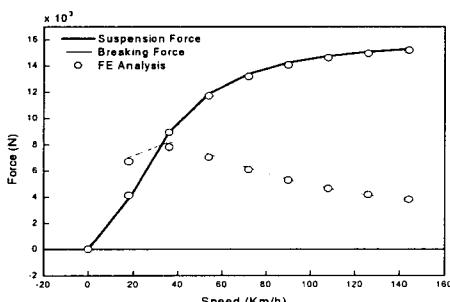


그림 2 해석 모델의 속도에 따른 부상력과 제동력

### 4. 설계변수에 따른 자기부상시스템의 특성

#### 4.1 영구자석 자화 방향에 따른 힘특성

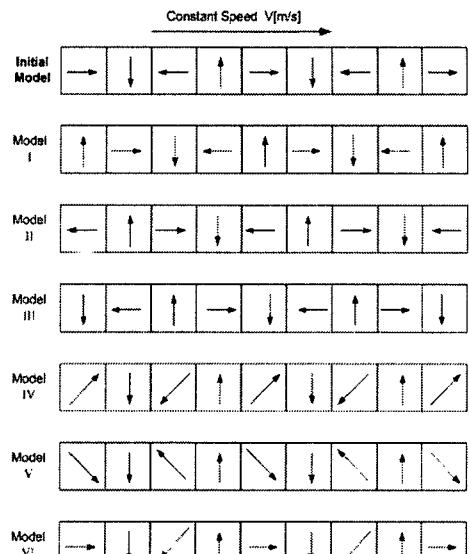


그림 3 Halbach 배열 영구자석 자화 패턴

Halbach 배열을 갖는 영구자석은 특히 등록이 되어 있는 모델이다. 따라서 Halbach 배열을 대체할 수 있는 영구자석의 배열이 요구되어 지며 Halbach 배열의 초기 영구자석의 자화 패턴에 따른 힘 특성도 연구되어져야 한다.

그림 3은 Halbach의 초기 영구자석 자화 패턴에 따른 특성과 Halbach 배열의 대체 모델을 제시하고 있다. 그림 3의 초기 모델은 전형적인 Halbach를 갖는 모델이며, 모델 I, II, III은 Halbach 배열의 초기 영구자석 자화 패턴은 달리진 모델이다. 또한 모델 IV, V, VI은 Halbach 배열을 대체할 수 있는 영구자석의 자화 패턴으로 수평 성분 자화된 영구자석을 사선 성분 자화된 영구자석으로 대체한 모델이다.

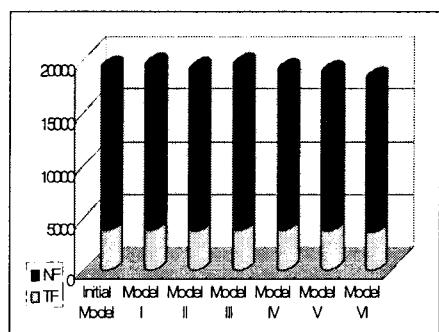


그림 4 자화 패턴에 따른 부상력과 제동력

그림 4는 그림 3에 제시된 모델에 대한 부상력과 제동력을 비교한 그림이다. 그림에서 비교 모델 모두 비슷한 힘 특성을 보이고 있다. 따라서 Halbach 배열의 초기 영구자석 자화 방향에 따른 힘특성이 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있고, 사선 성분 자화 패턴을 갖는 모델도 Halbach 배열 영구자석과 동일한 힘특성을 보이는 것으로 확인됐다.

#### 4.2 공극 길이에 따른 힘특성

그림 5, 6, 7은 각각 공극 길이에 따른 힘특성을 보이고 있다. 그림에서 공극 길이가 커질수록 제동력과 부상력 모두 감소하는 특성을 보이고 있지만 부상력에 대한 제동력의 비는 약간 씩 커지는 것을 확인할 수 있다.

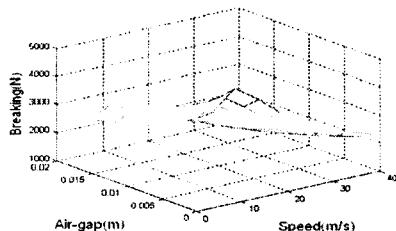


그림 5 공극 길이에 따른 제동력

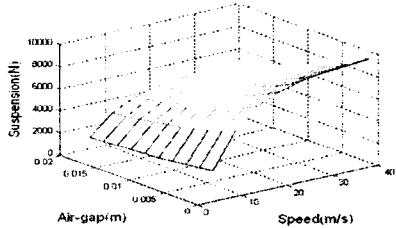


그림 6 공극 길이에 따른 부상력

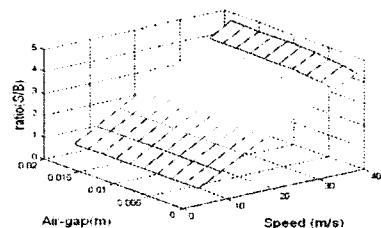


그림 7 공극 길이에 따른 부상력/제동력

따라서 공극이 커질수록 부상력/제동력의 비는 점차 커지므로 설계에서 기준 공극 길이를 적절히 선택해야 하는 문제를 안고 있다.

#### 4.3 도체판 두께에 따른 힘특성

그림 8은 도체판 두께에 따른 힘특성을 보이고 있다. 그림에서 도체판이 두꺼워 질수록 제동력은 감소하며 부상력은 포화된다.

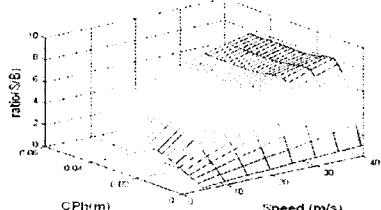


그림 8 도체판의 두께에 따른 부상력/제동력

따라서 부상력에 대한 제동력의 비는 최적점을 갖게 된다. 하지만 도체판의 두께는 1차측 영구자석의 동기 속도 및 극간력에 따라 최적점이 달라지는 경향을 가지므로 이러한 파라미터의 변화에 따른 특성을 확인해야 한다.

#### 5. 자기 부상 열차용 Halbach 배열 영구자석 자기 부상 시스템

표 3을 실제 모델에 적용 가능한 Halbach 배열 영구자석 자기 부상 시스템의 요구 사양과 설계 사양을 보여주고 있다. 표에서 동기 속도에서 요구 부상력은 30000(N)으로 정하였으며, 이 때 여유율을 13%로 가정하였다.

표 3 실험 모델 사양

설계 변수	사양
요구 부상력	3000 (N)
영구자석 크기	110×250×86 (mm)
영구자석 편수	9
기준 공극	10 (mm)
선속도	35(m/s)
알루미늄 두께	20(mm)
알루미늄 컷팅간격	40(mm)

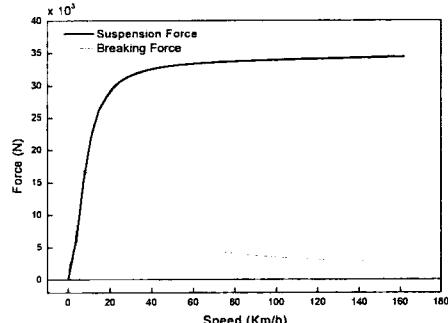


그림 9 공간고조파법에 의한 속도대 힘특성

그림 9는 표 3과 같은 사양을 갖는 모델에 대하여 공간고조파법을 이용하여 속도에 따른 힘특성을 보이고 있다. 그림에서 동기 속도 35(m/s)에서 부상력에 대한 제동력의 비는 10.227이다.

#### 6. 결 론

본 연구에서는 공간고조파법과 유한요소법을 이용하여 부상 장치의 설계변수에 따른 부상력과 제동력의 비를 확인하고, 부상력과 제동력의 비가 최대가 되는 설계 변수를 도출하고자 하였다. 또한 1차측 영구자석의 자화 방향에 따른 힘특성과 공극길이에 대한 힘특성 및 도체판 두께에 따른 힘특성을 확인하고, 부상력과 제동력의 비가 최대가 되는 영구자석 배열 및 형상을 제시하고자 하였다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Thompson, M.T., "Eddy current magnetic levitation Models and experiments," Potentials, IEEE, Volume 19, Issue 1, Feb. March 2000 pp 40-44
- [2] Mirzamani, S.J., Paul, R., Guidance dynamics of mixed mu levitators for MAGLEV vehicles, Magnetics, IEEE Transactions , Volume 21, Issue 6, Nov 1985 pp.2404-2407