

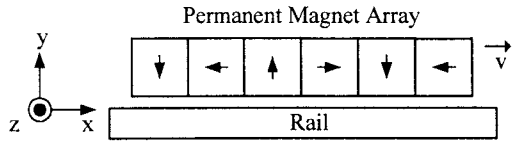
와전류형 브레이크의 특성해석

장석명, 차상도*, 이성호, 정상섭, 이종호*
 충남대학교, 충북과학대학*

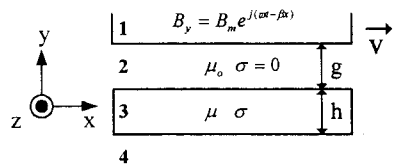
Analysis of Eddy Current Brake system

S. M. Jang, S. D. Cha*, S. H. Lee, S. S. Jeong, J. H. Lee*
 Chungnam National Uni., Chungbuk Provincial Uni.*

Abstract - The eddy current brake system is one of important application of eddy current. It is adequate to obtain safe braking force in high speed transportation system and electric vehicle etc. There is a variety of configurations and materials used in manufacturing of eddy current brakes. This paper proposes the eddy current brakes which uses permanent magnet. The dynamic characteristic has been analyzed to FEM and compared with measured data.



(a) 영구자석을 이용한 와전류 제동기



(b) 와전류 제동기 2차원 모델

그림 1. 와전류 제동기

1. 서 론

와전류 제동장치는 고속에서 기계적 제동장치의 부담을 줄이고 제동력을 얻기 위해 사용된다. 와전류 제동장치의 원리는 여자 시스템과 레일과의 상대 속도에 따라 발생하는 와전류와 쇠교자속과의 로렌츠 힘을 제동력으로 이용하는 것이다. 기존의 와전류 제동장치는 여자 시스템으로 DC 전자석을 이용하여 자계를 발생시켰다. 하지만 DC 전자석을 영구자석으로 대체하면 자계를 발생시키기 위한 전원장치를 제거할 수 있다. 여자 시스템을 제거함으로써 와전류 제동장치의 구조를 간단히 할 수 있어 경제적으로 이점 있다. 영구자석을 이용한 와전류 제동장치는 영구자석과 철심을 조합한 형태와 자화 방향을 90° 간격으로 배열된 Halbach array가 제안되었다[1][2][3].

본 논문에서는 Halbach array를 이용한 와전류 제동장치의 특성을 해석하고 실험값을 비교함으로써 영구자석 와전류 제동장치의 특성을 제시한다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 1은 영구자석을 이용한 와전류 제동장치의 개략도이다. 기존의 DC전자석 부분을 그림 1(a)와 같이 배열된 영구자석으로 대체 하였다. 각 화살표는 영구자석의 자화방향을 나타낸다. 각 영역의 전자기적 성질에 따라 그림 1(b)와 같이 해석모델의 영역을 나누어 고려할 수 있다. 해석을 용이하게 하기 위해 z방향으로 유한한 폭을 갖고 x방향으로 무한하다고 가정한다. 영역 1은 Halbach array에 의해 발생하는 자속밀도 분포로 나타내고 영역 2와 4는 공기부분, 영역 3은 투자율 μ , 도전율 σ 를 갖는 레일 부분을 나타낸다. 영역 1과 영역 3은 x 방향으로 일정한 속도 v 를 갖는다.

Halbach array에서 발생하는 자속밀도는 정현파로 영구자석이 속도 v 로 직선 운동하는 것은 한점에서 자속이 시간에 따라 교번하는 것으로 볼 수 있다. 이와 같은 자속밀도를 식(1)과 같이 속도 v 로 이동하는 자속은 시간에 의존하는 함수로 표현할 수 있다.

$$B_y = B_m e^{j(\omega t - \beta x)} \tag{1}$$

이동자계의 진폭의 변화가 y방향으로 벡터포텐셜 \vec{A} 는 x방향 또는 z방향을 갖게 된다. 제동력에 영향을 주는 전류 방향은 z방향으로 \vec{A} 는 z방향 성분만을 고려하여 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{(x,y,t)} = A_{(y)} e^{j(\omega t - \beta x)} a_z \tag{2}$$

$\nabla^2 A = -\mu\sigma \cdot v \times (\nabla \times A)$ 관계로부터 지배방정식은 식(3)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = \mu\sigma \left(j\omega A_z + v_x \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \tag{3}$$

식(2)와 식(3)의 조합으로 각 영역에서의 2계 미분방정식을 얻을 수 있다. 영역 2와 영역 3에서의 미분방정식은 식(4)와 같다.

$$\frac{\partial^2 A_{2z}}{\partial y^2} - \beta^2 A_{2z} = 0 \quad \frac{\partial^2 A_{3z}}{\partial y^2} - a^2 A_{3z} = 0 \tag{4}$$

각 영역의 경계조건으로부터 해는 각각 식(5), 식(6)과 같다.

$$A_2 = (C_1 e^{\beta y} + C_2 e^{-\beta y}) e^{j(\omega t - \beta x)}$$

$$C_1 = B_m e^{-\beta g} \frac{1 - \alpha\mu_o/\beta\mu}{2j\beta\Delta}$$

$$C_2 = B_m e^{\beta g} \frac{1 + \alpha\mu_o/\beta\mu}{2j\beta\Delta} \tag{5}$$

$$A_{23} = (C_3 e^{\alpha y} + C_4 e^{-\alpha y}) e^{j\omega t - \alpha x}$$

$$C_3 = 0$$

$$C_4 = \frac{B_m e^{\alpha x}}{j\beta \Delta} \quad (6)$$

각 계수에 포함된 문자에 대한 값은 다음과 같다.

$$\alpha = \beta \sqrt{1 + j \frac{\mu \sigma v}{\beta}} \quad \beta = \frac{\pi}{\tau}$$

$$\Delta = \cosh(\beta g) + \frac{a \mu_o}{\beta \mu} \sinh(\beta g)$$

영역 2에선 도전율과 전류밀도가 0 이므로 로렌츠 힘은 발생하지 않는다. 영역 3은 도전성 재료로 이 영역에 로렌츠 힘이 발생한다.

$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ 관계로부터 영역 3의 자속밀도는 식(7)과 같다.

$$B_3 = (-\alpha A_3) a_x + (j\beta A_3) a_y \quad (7)$$

$E = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ 관계식으로부터 영역 3의 기전력과 전류밀도는 각각 식(8)과 식(9)와 같다.

$$E_3 = (j\omega A_3) a_z \quad (8)$$

$$J = \sigma(E + v \times B) = \sigma(j\omega A_3 + v_x \beta A_3) a_z \quad (9)$$

평균시간적으로 발생하는 힘 밀도를 적층폭과 레일의 두께, 이동장치의 한 파장에 대해 적분하면 식(10)과 같은 제동력을 계산할 수 있다.

$$F_{z3} = \int_0^w \int_g^h \int_{-\lambda/2}^{\lambda/2} \frac{1}{2} (J \times B^*) dx dy dz \quad (10)$$

2.2 유한 요소법을 이용한 해석

와전류 제동기는 속도기전력을 포함하는 문제로 속도기전력항을 포함하는 2차원 정자계의 지배방정식은 다음과 같이 유도할 수 있다.

영구자석을 이용한 와전류 제동장치는 외부 전류가 없으므로 식(11)과 같이 암페르 주회법칙 미분형에서 우변은 와전류밀도로만 표현된다.

$$\nabla \times H = J_e \quad (11)$$

또한, 속도와 와전류전밀도와와의 관계식은 식(12)와 같다.

$$J_e = \sigma E = \sigma(v \times B) \quad (12)$$

$B = \nabla \times \vec{A}$ $B = \mu_o(H + M)$ 관계식으로부터 식(11)은 식(13)과 같고 쿨롱 조건으로부터 식(14)와 같이 지배방정식이 표현된다.

$$\nabla \times (\nabla \times A) = \mu_o (\nabla \times H + \nabla \times M) \quad (13)$$

$$\nu_0 \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right) - \sigma v_x \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + J_m = 0 \quad (14)$$

여기서, M 은 영구자석의 자화율을 나타내고 J_m 은 영구자석에 의한 등가 자화전류밀도이다. 식(14)를 유한요소 해석을 위한 Galerkin법으로 이산화하면 식

(15)와 같이 표현된다.

$$\nu_0 \int_{D'} \sum_{j=1}^3 \left\{ \frac{\partial N_{ie}}{\partial x} \frac{\partial N_{je}}{\partial x} + \frac{\partial N_{ie}}{\partial y} \frac{\partial N_{je}}{\partial y} \right\} A_{je} dx dy$$

$$+ \sigma v_x \int_{D'} \sum_{j=1}^3 N_{ie} \frac{\partial N_{je}}{\partial x} A_{je} dx dy - J_m \int_{D'} N_{ie} dx dy = 0 \quad (15)$$

속도기전력 문제를 Galerkin법으로 정식화된 유한요소법을 이용하면 pecllet number에 의해 해의 안정성이 결정된다. pecllet number는 요소는 도전율, 투자율, 속도의 크기와 요소의 크기에 좌우된다. 저속에선 pecllet number가 비교적 작기 때문에 해는 안정된 값을 갖는다. 하지만 고속에서는 pecllet number가 크기 때문에 해는 매우 불안해진다. 그림 2는 속도에 발생하는 제동력을 나타낸다.

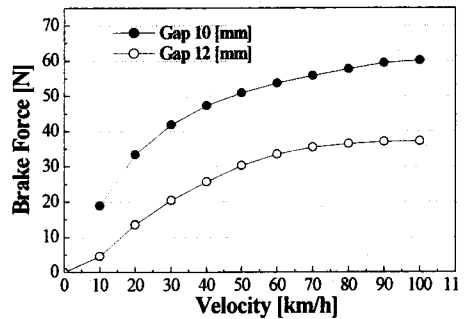


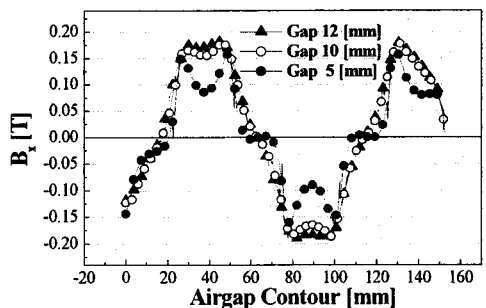
그림 2. 속도에 따른 제동력 해석값

2.3 제동력 측정

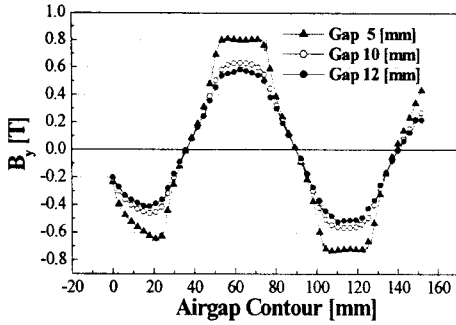
표1과 같은 크기의 영구자석 6편을 이용해 Halbach array를 구성하였다. 그림 3은 Halbach array와 레일사이의 공극에 따른 자속 밀도 값이다.

표 1. 와전류 제동기의 체원

Parameters		Values
PM one pitch	Height(mm)	25
	Length(mm)	25
	Width(mm)	25
Conductivity of rail ($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)		1.57×10^6



(a) 공극에 따른 B_x 값



(b) 공극에 따른 B_y 값

그림 2. 속도에 따른 제동력 해석값

그림 4는 제동력 측정을 위한 실험장치이다. 제작된 Halbach array를 밑면에 고정시키고 철심을 원판 모양에 고정 시킨 후 장착된 유도전동기를 이용해 회전시켰다. 레일과 Halbach array와의 간격과 레일의 속도가 변할 때 발생하는 제동력을 Load Cell을 이용하여 측정하였다.

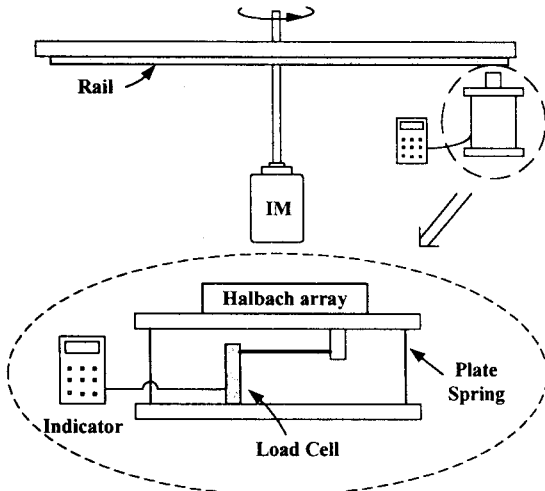


그림 4. 제동력 측정 시험 장치

그림 5는 원판의 반지름과 회전수를 고려하여 Halbach array와 레일과의 상대속도에 따라 발생하는 제동력을 측정 한 값이다.

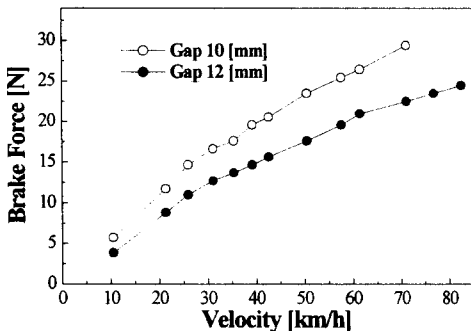


그림 5. 제동력 측정값

3. 결 론

영구자석 Halbach array을 이용한 와전류 제동장치의 속도에 따른 특성을 해석을 하였다. 이론적으로 해석된 값과 측정값은 큰 오차가 발생하였다. 이 오차는 2차원 해석을 위한 가정으로부터 발생한다. 2차원 모델에서 와전류 분포는 z 방향으로 무한히 분포한다고 가정되어 있기 때문에 실제 형상에서 와전류 분포 값보다 크다. 이 오차를 줄이기 위해서는 2차원 해석에 따른 레일의 도전율이 보장되어야 한다. 또한 제작된 Halbach array의 각 편 사이에서 자속 감소에 기인한다.

제동력 실험 장치의 기계적인 문제로 100 [km/h] 이상에서 동특성 실험이 어려웠다. 실험장치의 보완으로 고속에서 동특성 실험이 요구된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 장석명 외3, "선형 영구자석 Halbach 배열을 이용한 와전류 제동장치", 2000 대한전기학회 하계학술대회 논문집 B권 pp. 855-857
- [2] 강도현, 조기현, "비접촉 제동 시스템 개발", 발명신고서, 1998
- [3] 하경호 홍정표, 김규탁, 강도현, "비접촉 와전류 제동기의 설계에 관한 연구", 전기학회논문지, 제49B권 제2호, pp 77-84, 2000
- [4] 한필완, "운동자계 문제의 해석을 위한 유한요소법에 관한 연구", 1999. 2. 한양대학교 석사학위논문.
- [5] K. Halbach, "Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Cobalt Material", Nuclear instruments and Methods, 169, pp 1-10, 1980
- [6] P.J.Wang, "Analysis of Eddy-current Brakes for High Speed Railway," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 4, July 1998.
- [7] J. A. Tegopoulos, "Eddy Currents in Linear Conduction Media," ELSEVIER.