

영구자석을 이용한 와전류 제동장치의 특성 해석

장석명, 차상도*, 정상섭,
충남대학교

Analysis of using Permanent Magnet Eddy Current Brake system

S. M. Jang, S. D. Cha*, S. S. Jeong,
Chungnam National Uni.

Abstract - This paper proposes two kinds of the eddy current brake which uses permanent magnet. The one, like multipolar excitation consists of hexahedron shape of a segmented permanent magnetic and iron situated in the air-gap. The other, like multipolar excitation consists of only a segmented permanent magnetic. We use a finite element method to compute the flux distribution in the model. Also, we use the Galerkin-FEM with linear interpolation function may oscillate between the adjacent nodes to calculate the braking and attraction force. The advantages of the Halbach array are discussed.

1. 서 론

최근의 고속 열차 시스템에는 신뢰성 있는 제동력을 얻기 위해 와전류 제동장치가 채택되었다. 와전류 제동장치의 특징은 제동력이 차방의 바퀴를 통해 전달하지 않고 직접 제동장치를 통해 발생되므로 바퀴와 레일의 마찰 계수에 영향을 받지 않고 제동력을 얻을 수 있다. 현재는 그림 1의 와전류 제동 장치 부분에 전자석을 이용한 여자방식을 채택하고 있다. 전자석 제동장치의 형태는 여자를 위한 시스템과 기타 부속 장치가 필요하다. 이러한 여자 시스템을 영구자석으로 대체한다면 시스템을 가볍고 간단하게 만들 수 있다. 그러나 영구자석은 체적 당 높은 자속밀도를 얻기가 어렵기 때문에 높은 자속밀도를 얻기 위한 연구가 필요하다. 영구 자석을 이용하여 높은 자속밀도를 얻기 위한 방안으로 그림 2와 같이 영구자석의 같은 극 사이에 철심을 넣는 형태가 제안되었다[1][2].

본 논문에서는 선형 영구자석 Halbach 배열을 이용한 와전류 제동장치를 제안한다. 실험용 크기의 선형 Halbach 배열을 제작해 정적인 자체특성과 이동시 발생하는 흡입력과 제동력을 시뮬레이션을 통한 결과를 나타냈다.

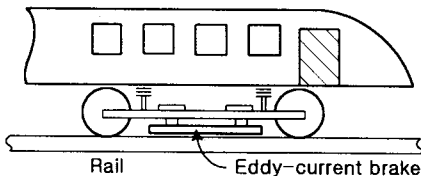


그림 1 와전류 제동장치의 개념도

2. 본 론

2.1 영구자석형 와전류 제동기의 종류

현재 상용화된 와전류 제동장치는 DC 전원으로 여자

되는 방식을 취하고 있다.

여자 장치로 영구자석을 이용하면 별도의 전원 장치가 필요 없으므로 시스템을 가볍게 할 수 있고 여자 에너지가 필요 없는 장점을 갖는다. 현재 제안된 영구 자석을 이용한 제동장치로는 그림 2와 같이 영구자석과 철심을 조합한 형태가 있다. 하지만, 전자석부분을 영구자석으로 대체할 때 단점 중의 하나로 체적 당 높은 자속밀도를 얻기가 어렵다. 높은 자속밀도를 얻기 위한 방안으로 그림 3과 같이 같은 길이에 영구자석을 더 사용한다면 영구자석과 철심을 조합한 형태에 비해 레일 표면에서 높은 자속밀도를 얻을 수 있다. 이러한 배열을 Halbach 배열이라 하며 Klaus Halbach에 의해 처음 제안되었다.

그림 3과 같은 배열은 그림 2의 형태에 비해 제작상의 어려움과 비용이 많이 들지만 높은 공극 자속밀도를 얻을 수 있다.

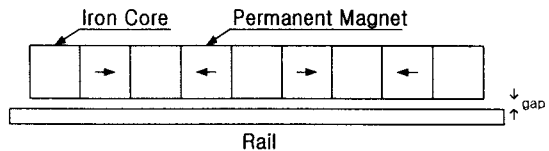


그림 2 영구자석과 철심 코어를 이용한 배열 형태

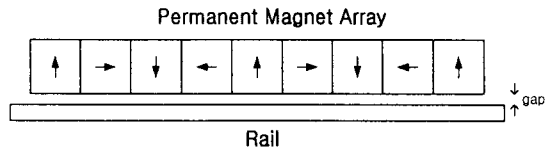


그림 3 Halbach 배열 형태

2.2 영구자석형 와전류 제동기의 정특성 비교

그림 4는 두 모델에 사용한 NdFeB의 특성 곡선이다. 영구자석 설계시 동작점은 $B-H$ 곡선으로부터 얻어진다.

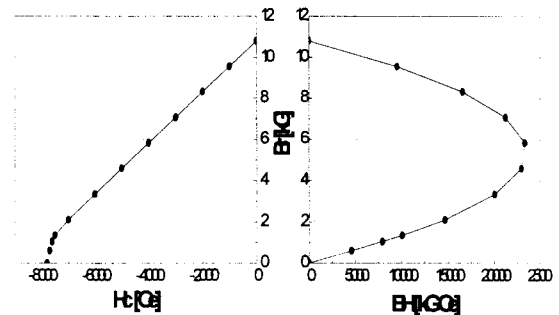


그림 4 NdFeB의 특성곡선

그림 5는 FEM을 이용한 두 모델의 공극 자속밀도를 비교한 값을 나타낸다. Halbach 배열을 이용할 경우 Iron-PM에 비해 최대값은 약 25% 이상의 공극 자속 밀도를 얻을 수 있고, 배열의 단부에서는 자속밀도가 큰 차이가 나타난다.

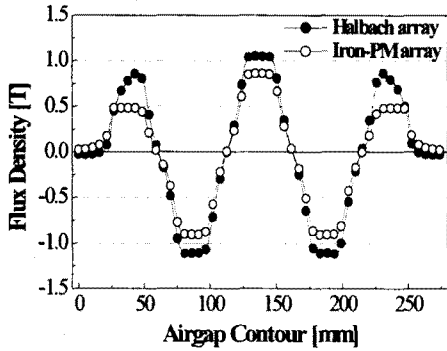


그림 5 Halbach 배열과 Iron-PM 배열의 2D-FEM 해석 결과값

그림 6은 Iron-PM 배열과 선형 Halbach 배열의 실제 제작된 모델의 측정값을 보여준다. 해석값과 측정값의 최대값을 비교해 보면 2D-FEM 해석값이 측정값보다 약 20% 정도 크게 나타난다. 또한, 해석값은 영구 자석 1편의 가운데에서 최고값을 나타내는 반면 측정값은 1편의 양 끝점에서 중앙보다 큰 값이 측정되었다. 제작된 Halbach 배열은 영구자석 사이의 접착제 때문에 누설 자속이 다소 크게 나타났다.

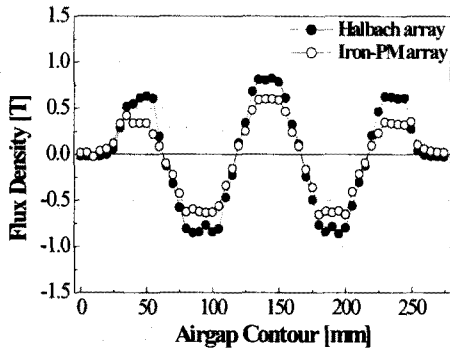


그림 6 2D-FEM 결과값과 측정값

그림 7은 Halbach 배열의 3D-FEM 해석결과 값이다. 비록 최대값은 영구자석의 중앙에서 나타나지만 그 값은 측정값과 비슷하다.

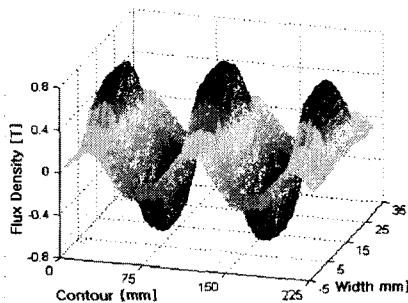
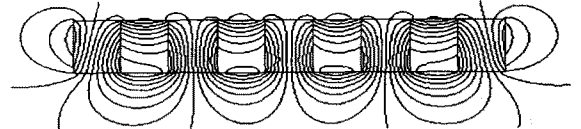


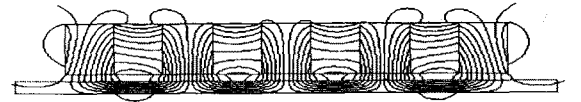
그림 7 Halbach 배열의 3D-FEM 결과값

2.3 Halbach 배열의 특징

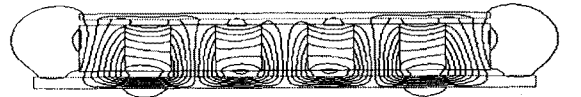
그림 8 (a),(b),(c)는 Halbach 배열의 몇 가지 자속 분포를 나타낸다. 해석결과로부터 Halbach 배열의 몇 가지 특징을 알 수 있다. 선형 Halbach 배열의 자속 분포는 한 쪽 방향으로 강한 자계가 형성되고 철심없이 자속 경로가 형성된다. 또한, 공극의 변화에 따라 자속 밀도의 변화가 적어 비교적 큰 공극을 원하는 곳에 적합하다. 그림 8 (c)는 와전류 제동기가 작동하지 않을 때 영구 자석 배열이 레일보다는 열차의 차체에 근접했을 때를 가정한 시뮬레이션 결과를 나타냈다. 누설 자속이 작아 차체 쪽으로의 흡입력이 적게 나타날 것이다.



(a) Halbach 배열 형태



(b) 2차측에 레일이 있을 때



(c) 제동장치와 차체가 근접해 있을 때
그림 8 Halbach 배열의 자속 분포

2.4 두 모델의 속도에 따른 흡입력과 제동력 계산

영구자석을 이용한 와전류 제동장치의 속도에 따른 제동력과 흡입력 계산의 지배 방정식은 다음과 같다. 영구자석에 의해 여자되므로 외부 전원에 의한 전류밀도는 영이다. 따라서 식 (1)과 같이 우변은 와전류 밀도만 나타난다.

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

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B} \quad (2)$$

여기서 \vec{J}_e 는 레일에 유도되는 와전류밀도이고 \vec{v} 는 제동장치와 레일의 상대속도를 나타낸다. \vec{B} 와 \vec{H} , \vec{M} 의 관계는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (3)$$

\vec{M} 은 영구자석의 자화벡터를 나타내고 식 (4)와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} + \vec{M}_0 \quad (4)$$

여기서 χ_m 은 단위 없는 양으로 자화율을 나타낸다. $\vec{M}_0 = B_r/\mu_0$ 으로 표현되며 B_r 은 영구자석의 잔류자속 값을 나타낸다. 와전류 제동장치가 \vec{v} 의 속도로 움직일 때 발생하는 와전류는 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} = \sigma(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (5)$$

σ 는 레일의 도전율을 나타낸다. 따라서 식 (1)은 식 (6)과 표현된다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu}(\nabla \times \vec{A}) = \sigma(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (6)$$

\vec{A} 는 자기 벡터 포텐셜값을 나타낸다. 속도가 x 방향 성분만으로 표현될 때 유도되는 와전류의 방향을 z 성

분만 고려하면 $\vec{v} \times \vec{B}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{V} \times \vec{B} = v_x \left(\mu_o M_{oy} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \vec{a}_z \quad (7)$$

$\vec{M}_o = M_{ox} \vec{a}_x + M_{oy} \vec{a}_y$ 일 때, 영구자석을 이용한 와전류 제동기의 2차원 유한요소 해석을 위한 지배 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{\mu_o \mu_r} \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right) - \sigma v_x \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} + \mu_o M_{oy} \right) = 0 \quad (8)$$

여기서 μ_r 는 레일의 비투자율을 나타낸다.

2차원 시뮬레이션 해석을 간단히 하기 위해 다음과 같은 몇 가지 가정을 했다.

- (i) 레일의 두께는 충분히 두껍게 설정했다.
- (ii) 두 모델의 단부 효과는 고려하지 않았다.
- (iii) 레일의 도전율은 일정한 상수값으로 계산하였다.

해석 모델의 크기와 제동력과 흡입력 계산을 위한 각 파라미터는 표1과 같다.

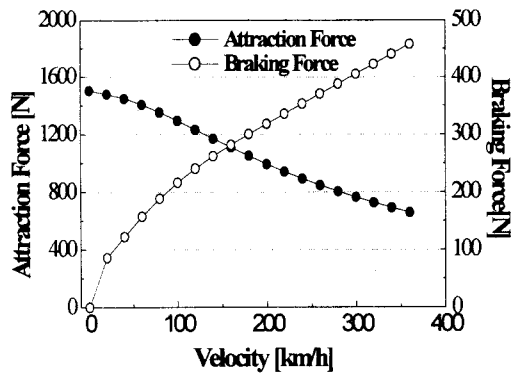
표1 영구자석 1편의 크기와 레일의 도전율

Parameters	Values
Height(mm)	25
PM one pitch Length(mm)	25
Width(mm)	25
Air-gap(mm)	5
Conductivity of rail ($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	1.57×10^6

지배방정식 (8)을 이용하여 이동 자계에 의한 레일에 발생하는 흡입력과 제동력의 변화를 계산하였다. 그림 9 (a),(b)는 Iron-PM 배열과 Halbach 배열에 대해 각각 시뮬레이션 결과값을 나타낸다.

전자석을 이용한 와전류 제동기는 DC 전원을 제어할 수 있으므로 저속에서 흡입력은 문제가 되지 않는다. 하지만 영구자석을 이용한 제동기는 항상 여자 상태이므로 저속에서 큰 흡입력은 차체에 부담을 준다. 따라서 속도에 따른 적당한 운전점을 고려해야 할 것이다.

선형 Halbach 배열을 이용한 와전류 제동기의 경우 속도에 따라 제동력이 계속 증가하는 경향을 보인다.



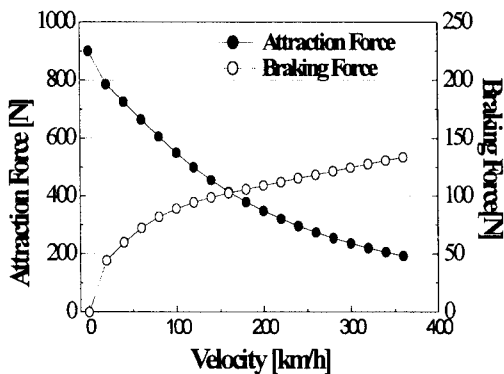
(b) Halach 배열
그림 9 속도에 따른 제동력과 흡입력

3. 결 론

두 모델의 정특성과 동특성 해석을 통해 Halbach 배열을 이용한 와전류 제동장치의 장점을 기술했다. Halbach 배열을 사용할 경우 높은 자속밀도를 얻을 수가 있어 제동력 계산의 시뮬레이션 결과, 고속에서 상대적으로 큰 제동력을 얻을 수가 있었다. 하지만 정자계 특성에서도 해석값과 측정값이 많은 차이가 보였듯이 시뮬레이션은 2D-FEM의 결과로 실제 측정할 제동력과 흡입력과는 차이가 날 것이다. 앞으로 정밀한 실험으로 동특성 시뮬레이션 결과값과 실제 측정값의 비교가 필요하다.

(참 고 문 헌)

- [1] 강도현, 조기현, "비접촉 제동 시스템 개발", 발명신고서, 1998
- [2] 강도현, 김용주, 광수태, "고속전철 제동장치 개념설계에 관한 연구, 하계학술대회 논문집, A권, pp 342-345
- [3] 한필완, "운동자계 문제의 해석을 위한 유한요소법에 관한 연구", 1999. 2. 한양대학교 석사학위논문.
- [4] K. Halbach, "Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Cobalt Material", Nuclear instruments and Methods, 169, pp 1-10, 1980.
- [5] David L. Trumper, "Magnet arrays for synchronous machines," in pro. IEEE IAS 28th Annu. Meet., Oct. 1993, pp. 9-18.
- [6] P.J.Wang, "Analysis of Eddy-current Brakes for High Speed Railway," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 4, July 1998.



(a) Iron-PM 배열