2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2002.7.10-12

영구자석 선형 와전류 제동기의 특성해석

장석명, 이성호, 정상섭, 차상도, 조홍제*, 김봉섭*
충남대학교, 한국기계연구원*

Analysis of Permanent Magnet linear Eddy Current Brake

S.M. Jang, S.H. Lee, S.S. Jeong, S.D. Cha, H.J. Cho*, B.S. Kim*
Chungnam Nat'l Univ. KIMM*

Abstract - Permanent magnet is applied to the mover of eddy current braking system for high speed. On the analytical 2D field solutions considering end effect, this paper deals with the magnetic field, and forces according to the secondary magnet array. Comparisons between analytical results and experimental results are also presented.

1. 서 론

고속열차나 고속자기부상열차와 같은 고속으로 운전되는 시스템의 제동방식으로는 기계적 마찰 제동방식과 비마찰 제동방식인 전기제동방식으로 크게 구분된다. 마찰제동 방식은 제동장치 부분에 열과 분진이 발생하여 마찰계수에 영향을 주기 때문에 고속에서 신뢰성 있는 제동력을 얻는 데 한계가 있다. 따라서 고속열차에서는 마찰제동방식과 전기제동방식 양자를 모두 채택해 제동력을 분담시키고 있다. 그 예로, 독일의 ICE에서는 고속에서 회생제동력과 와전류 제동력을 비마찰 제동력으로 채택하고, 저속에서 또는 비상시에 기계적 마찰제동력을 이용한다[1].

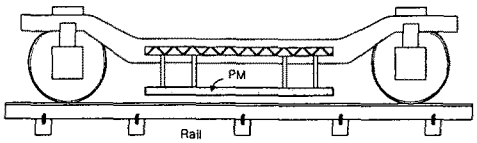
와전류 제동장치는 차량에 설치된 계자시스템이 고정 레일에 대하여 상대적 선형운동을 함에 따라, 레일에 유도되는 와전류와 자계의 상호작용으로 제동력을 얻는다. 현재 와전류 제동장치를 적용하는 독일의 ICE의 경우, 계자시스템으로 DC 전자석이 이용되고 있다. 그런데 이 부분을 영구자석으로 대체하면 경량화, 소형화, 고효율화, 신뢰성에서 큰 장점을 얻을 수 있다.

따라서 본 논문에서는 와전류 제동장치에 영구자석을 적용하였을 경우, 해석적 방법에 의해 자계분포 특성 및 힘 특성에 관한 해석을 하고자 한다[2]. 또한 레일에 대하여 수직방향으로 자화된 영구자석 조합으로 2차측을 구성하였을 경우와 보다 정현적이고, 강한 자계를 발생시키기 위한 Halbach 배열로 2차측을 구성하였을 경우, 각각에 대한 자계 및 힘특성 해석결과를 상호 비교 및 검토하고자 한다. 마지막으로 본 논문에서 제시된 해석결과들을 유한요소해석 및 실험결과와 상호 비교하여 타당성을 검증하고자 한다.

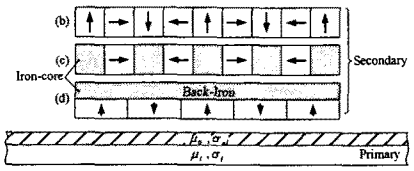
2. 영구자석을 이용한 와전류 제동기

2.1 모델

그림. 1은 영구자석을 이용한 선형 와전류 제동기의 구조 및 2차측 구성을 위해 적용할 수 있는 세가지 영구자석 배열을 보인다. 그림. 1(a)는 영구자석 각 세그먼트를 Halbach 배열로 구성한 경우이며, (b)와 (c)는 각각 수평방향으로 자화된 영구자석과 수직방향으로 자화된 영구자석 배열로 구성된 2차측 구성 예들을 도시한다. 1차측은 설계요구사양에 따라 사용재질을 선정할 수 있으며, 구조적으로 그림. 1에서 도시된 편측식 외에 수직력은 존재하지 않고, 제동력만을 얻을 수 있는 양측식 구성도 가능하다.



(a) 영구자석을 이용한 열차용 와전류 제동기



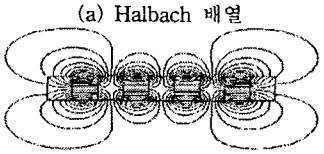
(b) Halbach 배열, (c) 수평방향 자화, (d) 수직방향 자화

그림. 1 영구자석 선형 와전류 제동기의 구조 및 2차측 구성을 위한 영구자석 배열

2.2 영구자석에 의한 정자계 분포

그림. 2는 그림. 1에서 제시된 세 가지 2차측 영구자석 배열 모델에 따른 정자계 분포특성을 보인다. Halbach 배열은 그림. 2(a)에서와 같이 자기차폐 특성으로 인해 백-아이런이 필요하지 않으나, (b)와 (c)모델은 더 강한 공극 자계를 얻기위한 자기회로 구성을 위해 철심 및 백-아이런을 필요로 한다.

(a) Halbach 배열



(b) 수평방향 자화

(c) 수직방향 자화

그림. 2 영구자석 배열에 따른 정자계 분포

3. 특성해석

그림. 3은 그림. 1에서 보여지는 영구자석 선형 와전류 제동기 해석을 위하여 구성한 4영역 모델이다. 여기서 K_s는 1차측 도체의 면전류를 표현한 것이다.

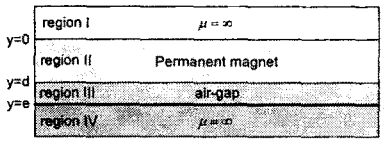


그림. 3 특성해석을 위해 구성한 4영역 모델

3.1 영구자석 모델링

그림. 1(a)의 Halbach 배열을 갖는 2차측 영구자석영역의 자화는 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$M=\sum_{r=1}^{\infty} M_{pry}\cos(rkx)+M_{prx}\sin(rkx)$$
$$r=(1,3,5,\cdots) \tag{1}$$

여기서, $k=\pi/\tau$, τ는 극간격이다. 식 (1)에서 고조파 계수 M_{pry}와 M_{prx}는 식 (2)로 표현된다.

$$M_{pry}=4M_0/r\pi\cdot\sin(r\pi\alpha/2)$$
$$M_{prx}=4M_0/r\pi\cdot\cos(r\pi\alpha/2) \tag{2}$$

자화 M_0는 B_{rem}/μ_0의 비로 구할 수 있으며, α는 영구자석 1편의 길이와 극간격의 비이다. 그림. 1의 수평방향 자화 영구자석과 수직방향 자화 영구자석 세그먼트 조합으로 구성된 2차측은 식 (1)에서 M_{pry}와 M_{prx}를 각각 곱으로 대치함으로써 모델링할 수 있다.

3.2 공극자계

영역 III에서의 지배방정식은 식 (3)으로 표현된다.

$$\frac{\partial^2 A_{III}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 A_{III}}{\partial y^2}=0 \tag{3}$$

각 영역에 대한 지배방정식과 영역의 경계면에 대한 경계조건으로부터 공극자속밀도의 x성분과 y성분은 각각 식 (4)로 구해진다.

$$B_{xe}=\sum_{r=0}^{\infty}\frac{-v\mu_0 M\sinh(rkd)}{\sinh(rke)-jv\cosh(rke)}e^{jrkx}$$
$$B_{ye}=\sum_{r=0}^{\infty}\frac{\mu_0 M\sinh(rkd)}{\sinh(rke)-jv\cosh(rke)}e^{jrkx}$$
$$r=(1,3,5,\cdots) \tag{4}$$

3.3 힘계산

수평방향 제동력과 수직방향 힘은 식 (4)로 표현되는 자속밀도를 이용하여, 맥스웰 스트레스법에 의해 식 (5)로 각각 계산된다.

$$F_t=\sum_{r=0}^{\infty}\frac{w_s p}{2\mu_0}\int_0^{2\tau}Re(B_{xe}B_{ye}^*)dx$$
$$F_n=\sum_{r=0}^{\infty}\frac{w_s p}{4\mu_0}\int_0^{2\tau}(|B_{ye}|^2-|B_{xe}|^2)dx \tag{5}$$

여기서, w_s는 2차측의 폭, p는 극쌍수이다.

식 (5)로부터 $r=1$에 대해서 제동력은 속도 $v_m=\tanh(ke)/\mu_0\sigma d_{sc}$ 일 때 식 (6)으로 표현되는 최대치를 갖는다.

$$F_{tm}=0.5l_s w_s\mu_0 M^2\sinh^2(kd)/2\sinh(ke)\cosh(ke) \tag{6}$$

여기서, l_s는 2차측의 길이이다.

3.4 표피효과와 횡방향 모서리 효과

2차측이 선형운동함에 따라 1차측에 유도되는 와전류의 기본 주파수는 $f=v/2\tau$이며, 비자성 1차측 도체의 표피효과에 의한 침투깊이는 식 (7)로 표현된다.

$$\delta=\sqrt{1/\mu_0\pi\sigma f}=\sqrt{\tau d_{sc}/\pi\tanh ke} \tag{7}$$

1차측의 유한 폭에 따른 횡방향 모서리 효과는 Russell과 Norsworthy 계수 k_n으로 1차측 도체의 도전율을 식 (8)로 보정하여 고려할 수 있다.

$$\sigma=k_n\sigma_p$$
$$k_n=1-\frac{\tanh\varepsilon}{\varepsilon(1+\tanh\varepsilon\tanh\phi)} \tag{8}$$

여기서, $\varepsilon=\pi w_p/2\tau$, $\phi=\pi(w_p-w_s)/2\tau$이며, w_p는 1차측의 폭이다.

3.5 길이방향 단부효과

유한길이를 갖는 2차측의 단부효과로 기인한 공극자계의 왜형에 따른 부가적인 제동력을 고려하기 위하여, 우선, $K_s(x)$를 영구자석영역을 표현하는 등가면전류밀도라 하고, $K_p(x)$를 1차측 도체판에 유도되는 전류의 등가면전류밀도라 하면, 앙페르의 주회적분법칙으로부터 식 (9)를 유도할 수 있다.

$$e\frac{dB}{dx}=-\mu_0(K_s+K_p) \tag{9}$$

여기서, $K_p=d_{pc}u\sigma B$로 표현되므로 식 (9)에 대입하여 정리하면, 식 (10)이 구해진다.

$$\frac{dB}{dx}+\frac{vB}{e}=-\mu_0 K_s \tag{10}$$

길이방향 단부효과에 의한 자계는 식 (10)의 일반해로 식 (11)로 표현된다.

$$B_e=B_0 e^{(-vx/e)} \tag{11}$$

여기서, 식 (4)로부터

$B_0=-\sum_{r=0}^{\infty}\mu_0 M\sinh(rkd)\cos(r\alpha\pi/2)/\sinh(rke)$이며, 단부효과에 기인한 부가적인 제동력은 식 (12)로 구할 수 있다.

$$F_{te}=w_s\int_0^{l_s}B_e K_{pe}dx$$
$$=w_p eB_0^2(1-e^{-2vl_s/e})/2\mu_0 \tag{12}$$

그러므로, 총 제동력은 식 (5)로 산출되는 제동력에 식 (12)로 산출되는 제동력을 합하여 계산된다.

4. 해석 및 실험결과

그림. 4는 해석에 사용된 두 가지 형태의 2차측 영구자석 모델을 보인다.

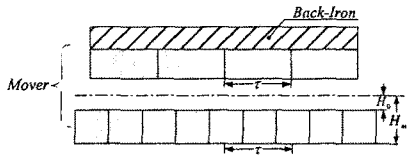
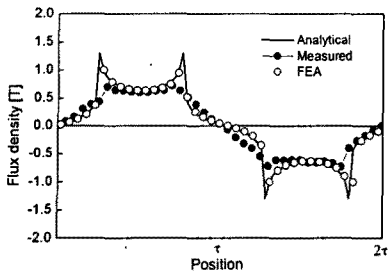
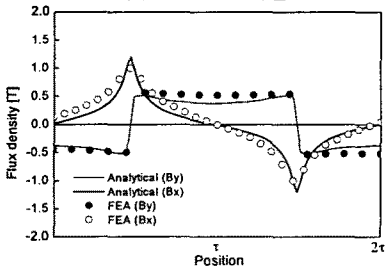


그림. 4 2차측 영구자석 해석모델

그림. 5는 그림. 4에 제시된 두 가지 형태의 해석모델에 대한 2차측 영구자석 표면에서의 자속밀도 분포를 보인다. 해석치를 실험치 및 유한요소해석치와 비교할 때, 타당한 결과를 보임을 알 수 있다.



(a) Halbach 배열



(b) 수직방향 자화

그림. 5 2차측 영구자석 표면에서의 자속밀도 분포

그림. 6은 일정한 공극길이하에서, 영구자석 높이에 따른 기본파 자속밀도 최대치의 변화를 그림. 4에 제시된 두 가지 모델에 대하여 비교하여 나타낸 것이다. H_0/H_m의 비가 0.6이하에서 Halbach 배열을 갖는 2차측이 수직방향 자화를 갖는 영구자석 배열로 구성된 2차측보다 공극 자속밀도의 최대치가 커짐을 알 수 있다.

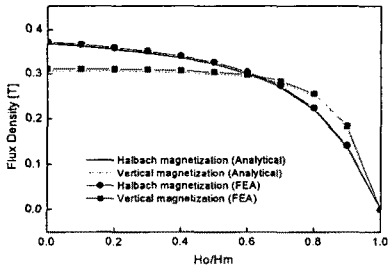


그림. 6 영구자석 높이에 따른 기본파 자속밀도 최대치의 변화

그림. 7은 2차측 Halbach 배열을 갖는 모델에 대한 제동력과 수직력 특성을 도시한다. 해석에 사용된 1차측(레일)은 그림. 1에서 제시된 바와 같이, 도체판과 백-아이런으로 구성된 경우이다. 속도가 증가함에 따라 제동력은 최대치까지 증가하다가, 감소하는 경향을 갖으며, 수직력은 흡인력에서 반발력으로 변해감을 알 수 있다.

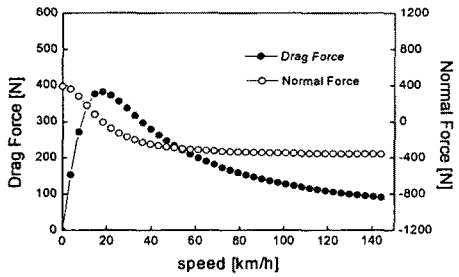


그림. 7 제동력과 수직력 특성

그림. 8은 2차측이 Halbach 배열로 구성된 제동력 측정을 위한 실험장치 구성도이다. 실험장치는 제동력 측정을 위해 로드셀이 장착된 블록게이지, 회전원판 레일, 일정속도로 원판을 회전시키기 위한 유도전동기와 전원장치로 사용되는 인버터, 속도측정을 위한 타코미터 등으로 제작되었다.

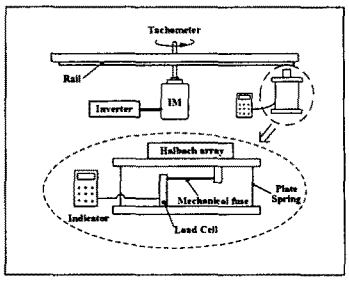


그림. 8 2차측 Halbach 배열로 구성된 제동력 실험장치 구성도

표 1은 실험에 사용된 1, 2차측 사양이다. 1차측(레일)은 Iron만으로 구성되었다.

표 1 제동력 측정을 위해 사용된 1, 2차측 사양

파라미터	수치 (단위)
영구자석 높이 (d)	25 (mm)
영구자석 폭 (w_s)	25 (mm)
영구자석 길이 (l_s)	150 (mm)
잔류자속밀도 (B_{rem})	1.1 (T)
극간격 (τ)	50 (mm)
공극의 길이 (g)	10 (mm)
레일의 도전율 (σ_p)	1.57×10^6 $(\Omega^{-1}\cdot m^{-1})$

그림. 9는 속도에 따른 제동력의 해석치와 실험치를 비교하여 나타낸 것이다. 제시된 결과로부터 속도가 140 km/h에서 약 15%정도의 오차를 보인다.

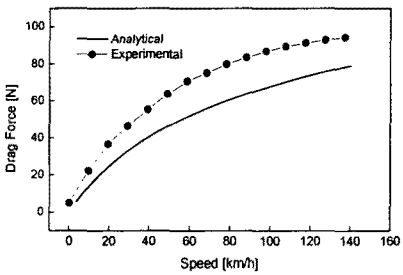


그림. 9 속도에 따른 제동력 실험치와 해석치의 비교

3. 결 론

본 논문에서는 영구자석을 차량용 와전류 제동기에 적용하고자 하였다. 해석적인 방법에 의해 두 모델에 대한 2차측 영구자석에 의한 정자계특성 및 1, 2차측 상호작용에 의한 제동력, 수직력 해석결과를 제시하였다. 또한 Halbach 배열로 구성된 2차측을 갖는 제동력 측정장치를 구성하여 제동력 해석결과의 타당성을 검증하고자 하였다.

[참 고 문 헌]

[1] S. M. Jang, S. S. Jeong, and S. D. Cha, "The application of linear Halbach array to eddy current rail brake system", IEEE Trans. Magn., vol. 37, no. 4, pp. 2627-2629, 2001

[2] J. D. Edwards, "Permanent-magnet linear eddy-current brake with a non-magnetic reaction plate", IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 146, No. 6, November 1999.