

## 직선형 와전류 제동기의 특성 해석 및 비교

장석명 권정기 이성호 차주욱\* 김봉섭\*\* 조홍제\*\*  
충남대학교 철도철\* 한국기계연구원\*\*

### Characteristic Analysis And Comparison Of The Linear Eddy-Current brake systems

S.M. Jang, J.K. Kwon, S.H. Lee, J.W. Cha\*, B.S. Kim\*\*, H.J. Cho\*\*  
Chungnam National Univ., Korean National Railroad\*, KIMM\*\*

**Abstract** - Brake forces due to eddy-currents induced by the relative motion of a conductor and a magnetic devices: motors, brakes and magnetically levitated vehicles. In particular, the practicality of using permanent magnet in eddy-current brakes system is obviously recent, due to the manifold improvement in magnet materials and technology. For such a system we give analytical formulas considering eddy-current distribution as variables: flux density for each region and forces.

### 1. 서 론

고속으로 운전되는 기기들이 발전함에 따라 고속에서 안정된 제동력의 확보가 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다. 종래의 마찰 제동 방식은 접촉에 의한 소음, 분진, 기계적인 마모 등의 문제점이 발생됨에 따라 비접촉식의 와전류 제동 장치가 연구되기 시작했으며, 자성체 및 기술 향상으로 체적당 힘 밀도가 증가하여 고속으로 운전되는 기기에서 와전류 제동 장치가 많이 채택되고 있다.[1]

일반적으로 와전류 제동 장치의 계자 시스템에는 DC 전자석과 영구 자석에 의한 것이 있다. DC 전자석은 낮은 힘밀도를 가지며 전력을 소비하는 단점이 있으나, 제어가 용이한 장점이 있고, 영구 자석형은 높은 힘밀도를 갖는 장점이 있으나 제어가 어려운 단점이 있다.[2]

따라서 본 논문에서는 Halbach 자화 배열과 수직 자화 배열의 계자 시스템을 갖는 영구 자석형 와전류 제동 장치에 대하여 해석적 방법과 유한요소법을 이용하여 자계분포 특성 및 힘특성을 관한 해석을 하였다. 또한 제어가 용이한 DC 전자석 와전류 제동 장치에 대하여 자계분포 특성 및 힘특성을 해석적 방법과 유한요소법을 이용하여 해석하였다.

### 2. 와전류 제동 장치의 특성 해석

#### 2.1 와전류 제동 장치 모델

그림.1은 영구자석 및 DC 전자석을 이용한 와전류 제동 장치의 구조 및 가동자 구성을 위해 적용할 수 있는 세가지 형태의 제동 장치를 보인다. 그림1(a)와 (b)는 각각 영구자석의 각 세크먼트를 Halbach 배열과 수직 배열로 자화한 가동자의 구성 예이며, (c)는 DC 전류로 여자되는 전자석을 도시한 것이다. 해석 결과에 대한 영향을 최소화하면서 해석상 편의를 위해 해석 모델의 1차축은  $x$  방향으로  $V$ 의 속도로 직선 운동하고, 영구자석의 자화는  $x$  방향 및  $y$  방향 성분을 갖으며, 자기 벡터 포텐셜은  $z$  방향 성분만을 갖고, 철심의 투자율은 등방성이라고 가정하였다.

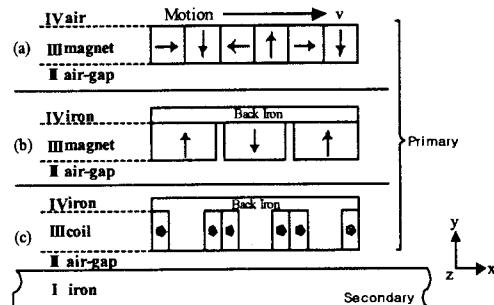


그림.1 와전류 제동 장치의 해석모델

또한 특성 비교를 위해 세가지 모델에 대해서 극간격과 자석 및 코일의 높이와 폭을 일정하게 하였다.

#### 2.1.1 와전류 제동 장치의 일반화된 모델

그림.1(a)의 Halbach 배열을 갖는 영구자석형 가동자는 자기 차폐 특성으로 인해 백-아이언이 필요하지 않으나 그림1(b)와 (c)는 더 강한 공극 자계를 얻기 위한 자기 회로 구성을 위해 철심 및 백-아이언을 필요로 한다. 또한 그림1(c)의 DC전자석은 치-슬롯 구조를 가지므로 카터 계수를 이용하여 기계적 공극을 보정하였다. 따라서 동일한 해석을 위하여 그림1의 세 가지 가동자에 대하여 일반화된 4영역 모델을 그림2에 도시하였다. 그림.2에서 영역1은 투자를  $\mu_1$ 과 도전율  $\sigma_1$ 을 갖는 자성 재료로 구성되며, 영역2는 공극이고, 영역3은 계자 시스템을 갖는 부분이며, 영역4는 투자를  $\mu_4$ 와 도전율이 0인 부분이다.

#### 2.1.2 지배 방정식

그림.1의 3영역에서 영구자석의 자화량과 코일의 전류밀도에 대한 공간적 분포를 푸리에 급수 전개하면 일반화된 식 (1)을 구할 수 있다.

$$F_x = \sum_{n=1, odd}^{\infty} 4F_0/n\pi \cdot \cos(n\pi\alpha_p/2)\sin(k_n x) \quad (1.a)$$

$$F_y = \sum_{n=1, odd}^{\infty} 4F_0/n\pi \cdot \sin(n\pi\alpha_p/2)\cos(k_n x) \quad (1.b)$$

여기서,  $F_x, F_y$ 는 푸리에 급수 전개에 의한  $n$ 차 고조파에 대한 각각 수평방향 및 수직방향 성분들의 크기이며,  $F_0$ 는 자화 및 전류밀도의 크기,  $k_n = n\pi/\tau$ ,  $\alpha_p$ 는 영구자석 길이 및 코일 간격,  $\tau$ 에 대한 극간격  $\tau$ 의 비이다. 맥스웰 방정식으로부터 그림2의 영역

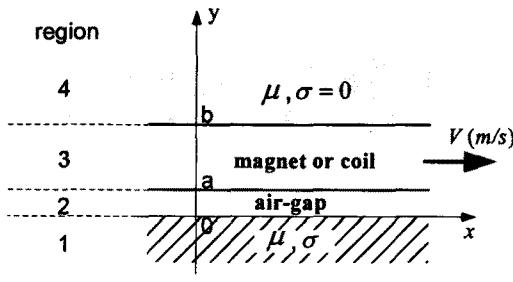


그림.2 특성해석을 위한 4영역 모델

3 및 투자를  $\mu$ , 도전율  $\sigma$ 를 갖는 영역에서 자기 벡터 포텐셜  $A$ 에 대한 식 (2)가 각각 유도될 수 있다.

$$\nabla \times (\nabla \times A) = \begin{cases} \mu_3 \nabla \times M & \text{영구자석} \\ \mu_3 J_f & \text{전자석} \\ \sigma \mu [V \times (\nabla \times A)] & \text{영역 1, 2, 4} \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $M$ 은 영구자석의 자화량이며, 전류 밀도  $J_f$ 는  $J_f = \frac{NI}{\text{슬롯면적}}$ 의 크기를 가지며,  $N$ 은 턴수,  $I$ 는 여자 전류이다. 식(2)로부터 그림2에 제시된 해석 모델의 3 영역 및 그 외의 모든 영역 대해 만족하는 일반화된 지 배 방정식은 식(3)으로 각각 표현된다.

$$\frac{\partial^2 A_{z3}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_{z3}}{\partial x^2} = \begin{cases} -\mu_3 \frac{\partial M_{y3}}{\partial x} & \text{영구자석} \\ -\mu_3 J_{f3} & \text{전자석} \end{cases} \quad (3.a)$$

$$\frac{\partial^2 A_{zi}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_{zi}}{\partial x^2} = \sigma_i \mu_i V_{xi} \frac{\partial A_{zi}}{\partial x} \quad (3.b)$$

여기서 식(3.a)는 계자 시스템이 포함된 영역3의 지 배 방정식이며 식(3.b)는 영역3을 제외한 모든 영역에서 일반화된 지배 방정식이며, 첨자  $i$ 는  $i$ -번째 영역을 의미한다. 또한  $M_{yi}$  및  $J_{fi}$ 는 각각 영구자석 및 전자석의 푸리에 급수 전개식으로 식(1)의 형태를 갖는다. 식(3)의 미분 방정식 해는 식(4)와 같이 표현된다.

$$A_{zi} = [C_i \exp(\alpha_i y) + D_i \exp(-\alpha_i y)] \cdot \exp(jk_i x) + S_n \quad (4.a)$$

$$S_n = \begin{cases} \frac{j}{k_3} \mu_3 M_{y3} \exp(jk_3 x) & \text{영구자석} \\ \frac{\mu_3 J_{f3}}{k_3^2} \exp(jk_3 x) & \text{전자석} \\ 0 & \text{3영역을 제외한 영역} \end{cases} \quad (4.b)$$

여기서  $S_n$ 은 영구자석과 DC전자석에 의해 만들어진 포아송 방정식의 특수해가 포함되어 있고, 그 외 영역에서는 0의 값을 갖는다. 또한  $\alpha_i^2 = k_i^2 + j\mu_i \sigma_i V k_i$ 의 관계를 갖으며 일반화된 라플라스 방정식에서 속도  $V$ 와 투자율  $\mu$ , 도전율  $\sigma$ 에 의해 만들어진 식이다.

### 2.1.3 공극자계 및 힘계산

식(4)로부터  $B = \nabla \times A$ 의 관계를 적용하여 그림.2의 모든 영역에서의  $x$ -방향 및  $y$ -방향 자속밀도는 식(5)와 같이 표현된다.

$$B_{xi} = \frac{\partial A_{zi}}{\partial y} = \alpha_i [C_i \exp(\alpha_i y) - D_i \exp(-\alpha_i y)] \cdot \exp(jk_i x) \quad (5.a)$$

$$B_{yi} = -\frac{\partial A_{zi}}{\partial x} = -jk_i [C_i \exp(\alpha_i y) + D_i \exp(-\alpha_i y)] \cdot \exp(jk_i x) \\ + \begin{cases} \mu_3 M(y) \exp(jk_3 x) & \text{영구자석} \\ J(y) \exp(jk_3 x) & \text{전자석} \\ 0 & \text{3영역을 제외한 영역} \end{cases} \quad (5.b)$$

또한 연자성체에 대하여  $H = B/\mu$ 의 관계가 성립하므로 모든 영역에서 자제의 세기  $H$ 를 구할 수 있다.

$$H_{xi} = \frac{1}{\mu_i} B_{xi} \quad (6.a)$$

$$H_{yi} = \frac{1}{\mu_i} B_{yi} \quad (6.b)$$

식(4)에서 미정계수  $C_i$ 와  $D_i$ 를 결정하기 위해, 경계면에 대한 전자계 연속성이 따라 그림.2로 제시된 해석 모델에서 각 영역의 경계면에 대한 경계 조건을 다음과 같이 적용할 수 있다.

- I ) 자속밀도의 수직 성분은 각 경계면에 대해 연속이다.
- II) 자계는  $y = \pm \infty$ 에서 존재하지 않는다.
- III)  $i+1$ 번 째 영역과  $i$ 번 째 영역 사이의 경계면에 수평 방향 자화  $M_x$ 가 존재한다면 경계면에 대해  $H_{x(i+1)} - H_{xi} = M_x$ 의 관계가 성립한다.

경계 조건을 이용하여 구하여진 공극 영역의 자속밀도와 맥스웰의 응력법을 이용하여 1차측 가동자에 작용하는 제동력 및 수직력을 식(7)과 같이 계산할 수 있다.

$$F_t = \frac{w_s p}{2\mu_0} \int_0^{2r} R e(B_t B_n^*) dx \quad (7.a)$$

$$F_n = \frac{w_s p}{4\mu_0} \int_0^{2r} (|B_n|^2 - |B_t|^2) dx \quad (7.b)$$

여기서  $w_s$ 는 2차측의 폭,  $p$ 는 극쌍수이다.

### 2.2 와전류 제동 장치의 특성 해석 결과

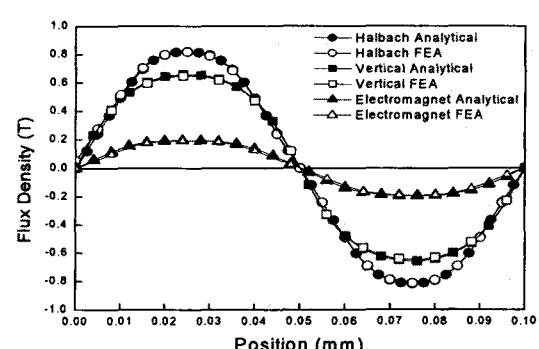


그림.3 2차측에서의  $y$ -방향 자속밀도 비교

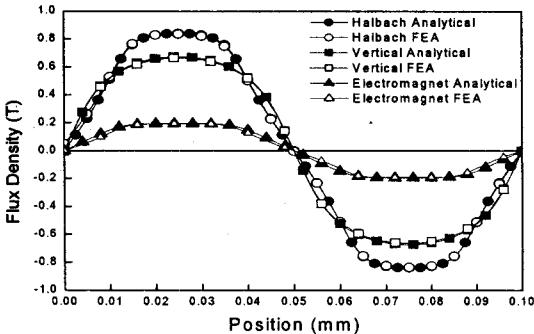


그림.4 공극에서의 y-방향 자속밀도 비교

그림.3은 그림.1에서 제시된 세 가지 형태의 와전류 제동 장치에 대한 2차축 자속 밀도를 보이고 있고, 그림.4는 공극에서의 자속 밀도를 보이고 있다. 해석을 위해 영구자석으로는 NdFeB를 사용하였고, DC전자석에서의 여자 전류 밀도로는  $5(A/mm^2)$ 를 사용하였다. 또한 해석의 타당성을 입증하기 위해 유한요소해석치와 비교하였다.

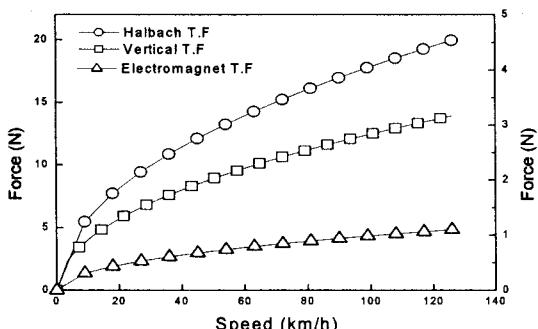


그림.5 속도에 따른 제동력 비교

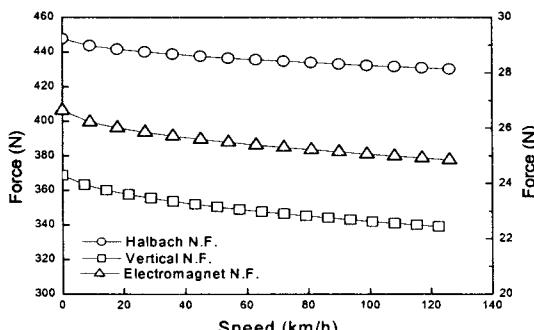


그림.6 속도에 따른 수직력의 비교

그림.5와 그림.6은 공극 자속밀도와 식(7)을 이용하여 1차축의 제동력과 수직력을 계산한 것이다. 여기서 DC전자석에 의한 제동 장치는 매우 작은 힘을 발생하므로 그림.5와 그림.6의 오른쪽 y-축에 나타내었다.

### 2.2.1 와전류 제동기의 성능 개선

그림1에서 2차축에 철만 있을 경우 도전율이 낮아 와전류의 발생에 저해된다. 이것은 그림5와 그림6에서 확인해 보여주고 있다. 따라서 2차축에 도전율이 매우 큰 재질을 삽입하여 힘 특성을 개선하고자 한다. 이 경우 그림.2의 해석 모델에서 영역이 추가될 뿐 지배 방정식에는 변화가 없다.

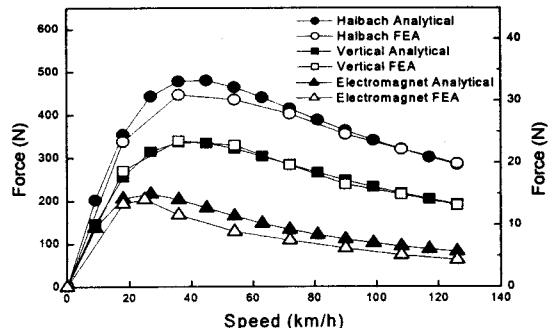


그림.7 알루미늄판의 삽입에 따른 특성 비교

그림.7은 2차측에 얇은 도체판을 삽입하여 해석한 것으로 이 도체판으로는 도전성이 좋은 알루미늄을 사용하였다. 또한 철만 있을 경우와 비교하기 위하여 그림5에서와 동일한 조건으로 해석하였으며, 그 결과치를 유한요소 해석치와 비교하였고, 그림.5와 마찬가지로 DC전자석 가동자의 경우 오른쪽 y-축을 사용하였다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 와전류 제동장치의 계자 시스템으로 사용되는 영구자석형과 DC전자석의 자계 분포 및 힘 특성을 상호 비교하였다. DC전자석은 여자 전류의 가변으로 제어가 용이하다는 장점이 있으나 영구 자석을 사용한 경우보다 힘특성이 저하됨을 확인하였다. 또한 영구자석형 계자 시스템에서도 Halbach 자화 배열을 갖는 가동자가 수직 자화 배열을 갖는 가동자보다 힘특성이 우수함을 확인하였다. 또한 그림7에서 보여주듯이 도전성이 좋은 얇은 도체판을 삽입할 경우 힘 특성이 매우 개선됨을 확인할 수 있다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 정수진, 강도현, 김동희, "고속전철 와전류 제동장치 설계와 특성해석 및 실험" Trans KIEE Vol. 51B, No. 12, DEC. 2002
- [2] S.M.Jang, S.H. Lee, S.S Jeong, I.K. Yoon, "The Application of Halbach Array to Permanent Magnet Linear Eddy Current Brake", KIEE Proceedings Vol. 2, July, 2002
- [3] Z.J. Liu, A. Vourdas, K.J. Binns, "Magnetic field and eddy current losses in linear and rotating permanent magnet machines with a large number of poles", IEE Proceedings-A, Vol.138, No.6, November 1991
- [4] K. Idir, G.E. Dawson, A.R. Eastham, "Modeling and Performance of Linear Induction Motor with Saturable Primary", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.29, No.6, November/December, 1993