

계자원에 따른 직선형 와전류 제동기의 특성 해석 및 작용력 비교

장석명 권정기 이성호 김봉섭* 조흥제*
충남대학교 한국기계연구원*

Analysis And Comparison Of
The Linear Eddy-Current brake systems

S.M. Jang, J.K. Kwon, S.H. Lee, B.S. Kim*, H.J.Cho*
Chungnam National Univ., KIMM*

Abstract - The development of linear Eddy-Current brake systems has gradually gone beyond the adhesion limit in high-speed vehicles. In particular, the practicality of using permanent magnet in Eddy-Current brake systems is obviously recent, due to the manifold improvement in magnet materials and technology. On the basis of analytical two-dimensional field solution, this paper deals with flux density and force calculation about the linear Eddy-Current brake systems: DC excited electromagnet, Halbach magnetized and vertical magnetized permanent magnet.

1. 서 론

산업화가 발전함에 따라 고속에서 동작하는 기기들의 필요성이 대두되었고, 이에 대한 연구도 활발히 수행되어 왔다. 하지만 기기들이 고속화되면서 고속에서 안정된 제동력의 확보가 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다. 종래의 마찰 제동 방식은 접촉에 의한 소음, 분진, 기계적인 마모 등의 문제점이 발생됨에 따라 비접촉식의 제동 장치가 연구되기 시작했으며, 자성체 및 기술 향상으로 체적당 힘 밀도가 증가하여 고속으로 운전되는 기기에서 비접촉식의 제동 장치가 많이 채택되고 있다.[1].

비접촉식 제동 장치중의 하나인 와전류 제동 장치는 1차측과 2차측의 상대 운동에 따른 로렌츠 힘을 이용하여 제동력을 확보하는 것으로 1차측 계자원에 따라 DC 전자석형과 영구 자석형이 있다. 일반적으로 DC 전자석을 이용한 와전류 제동 장치는 낮은 힘밀도를 가지며 전력을 소비하는 단점이 있으나, 제어가 용이한 장점이 있고 영구 자석을 이용한 와전류 제동 장치는 높은 힘밀도를 갖는 장점이 있으나 제어가 어렵다.

따라서 본 논문에서는 Halbach 자화 배열과 수직 자화 배열의 계자원을 갖는 영구 자석형 와전류 제동 장치와 DC 전자석을 계자원으로 하는 와전류 제동 장치에 대하여 해석적 방법과 유한요소법을 이용하여 자체 분포 및 힘 특성에 관한 해석을 하였다. 또한 각각의 모델에 대해서 2차측과 백아이언의 비선형을 고려하여 해석하였고, 유한요소법을 이용하여 비교하였다.

2. 와전류 제동 장치의 특성 해석

2.1 와전류 제동 장치

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)는 DC 전류로 여자되는 가동자의 구성 예이며, (b)와 (c)는 각각 영구자석의 각 세크먼트를 수직 배열과 Halbach 배열로 자화한 가동자를 갖는 와전류 제동 장치를 도시한 것이다. 또한 각각의 모델은 더 강한 공극 자계를 얻기 위해 철심 및 백아이언을 필요로 한다. 하

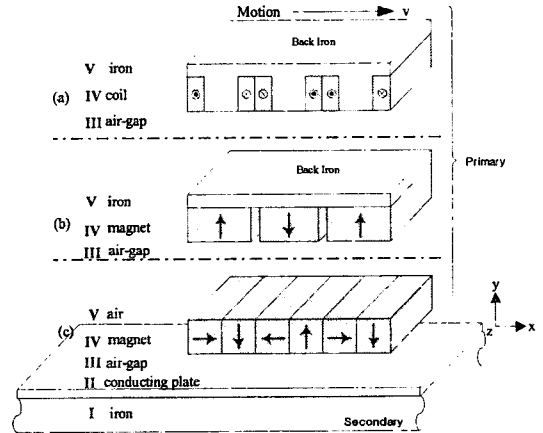


그림.1 직선형 와전류 제동 장치 (a) DC 전자석 가동자 (b) 수직 자화 영구자석 가동자 (c) Halbach 배열 영구자석 가동자

지만 Halbach 배열로 자화한 가동자는 자기 차폐 특성으로 인해 백아이언이 필요하지 않다.

2.2 해석 모델 및 지배 방정식

와전류 제동 장치를 구성하는 각 부분에 해당하는 해석 영역의 수가 4개 이상 일 경우 수작업에 의해 특성식을 유도하는데 한계가 있으므로, 다중층 해석에 대한 일반화된 모델링 기법을 적용하여 기기의 특성을 해석할 수 있다. 또한 해석의 편의성을 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- I. 1차측은 x-방향으로 V의 속도로 직선운동한다.
- II. 모든 영구 자석은 x 또는 y-방향 성분만 갖는다.
- III. 모든 전류는 z-방향 성분만을 갖는다. 이것은 벡터 자위의 방향과 일치한다.
- IV. 철심의 투자율은 등방성이다.

그림 2는 영구자석을 포함하는 N영역 다중층 모델로서, 각 층은 도전을 a_i , 투자율 μ_i , 두께 d_i 로 구성된다. 제시된 그림 2.다중층 해석모델의 $r-1$ 영역은 영구자석 및 코일로 이루어져 있으며, 1영역에서 N영역은 y 방향으로 $+\infty$ 에서 $-\infty$ 까지 확장된 영역으로 가정한다.

맥스웰 방정식에 기초하여 모든 영역에서의 지배 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\nabla \times (\nabla \times A) = \begin{cases} \mu_{(r-1)} \nabla \times M \\ \mu_{(r-1)} J_f \\ \sigma_i \mu_i [V \times (\nabla \times A)] \end{cases} \quad (1)$$

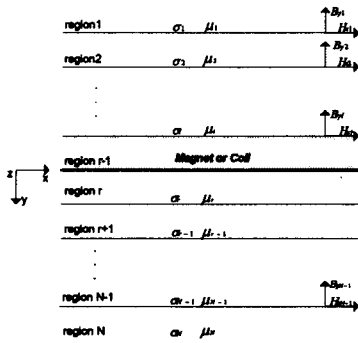


그림 2. 일반화된 와전류 제동기의 다중층 해석 모델

여기서 M 은 영구자석의 자화량에 대한 수평 및 수직 성분의 n -차 푸리에 급수 전개식의 크기이고, J 는 공급되는 전류밀도의 n -차 푸리에 급수 전개식의 크기이다.

식(1)로부터 자기 벡터 포텐셜 A 는 식(2)와 같은 일반해와 특수해로 구성된다.

$$A_{zi} = [C_i e^{a_i y} + D_i e^{-a_i y}] \cdot e^{jkx} + S_{ni} \quad (2)$$

$$S_{ni} = \begin{cases} \frac{j}{k(r-1)} \mu(r-1) M_x(r-1) e^{jk(r-1)x} \\ \frac{\mu(r-1) J(r-1)}{k^2(r-1)} e^{jk(r-1)x} \end{cases}$$

여기서 S_{ni} 는 제자원에 의한 것으로 $(r-1)$ 영역에서만 존재하고, $a_i^2 = k_i^2 + j\mu_i \sigma_i V k_i$ 의 값을 갖는다.

2.3 일반화된 자속밀도 방정식

자속밀도와 자기 벡터 포텐셜의 관계 $\nabla \times A = B$ 를 이용하여 모든 영역에서 자속밀도 방정식을 유도할 수 있다.

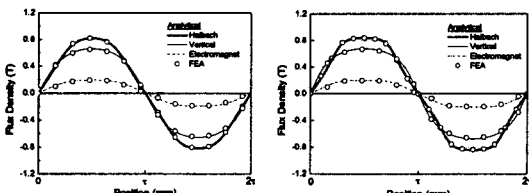
$$B_{xi} = \frac{\partial A_{zi}}{\partial y} = a_i [C_i e^{a_i y} - D_i e^{-a_i y}] \cdot e^{jkx} \quad (3)$$

$$B_{yi} = -\frac{\partial A_{zi}}{\partial x} = -jk_i [C_i e^{a_i y} + D_i e^{-a_i y}] \cdot e^{jkx} + S_{Bi}$$

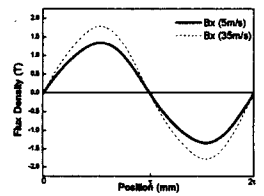
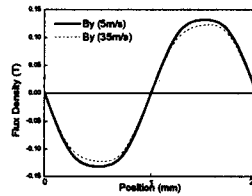
$$S_{Bi} = \begin{cases} \mu(r-1) M(y) e^{jk(r-1)x} \\ J(y) e^{jk(r-1)x} \end{cases}$$

식(3)에서 $H = B/\mu$ 의 관계를 이용하여 모든 영역에서 자계의 세기를 얻을 수 있다. 또한 B 와 H 의 연속성 및 제자원에서 불연속성을 경계 조건으로 사용하여 모든 영역에서 미정계수 C_i 와 D_i 를 얻을 수 있다.

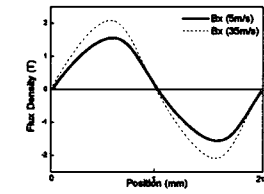
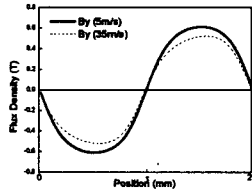
그림 3.은 경계 조건을 이용하여 식(3)의 미정 계수를 찾아 얻어진 방정식으로부터 해석한 결과이다. 여기



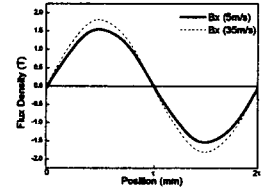
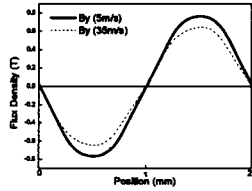
(a) 철심의 표면 (b) 공극의 중간
그림 3. 해석 모델의 y-성분 자속 밀도 및 유한요소해석 결과



(a) y-성분 자속밀도 (b) x-성분 자속밀도
그림 4. 전자석 가동자를 갖는 해석모델의 속도에 따른 자속밀도 비교



(a) y-성분 자속밀도 (b) x-성분 자속밀도
그림 5. 수직 자화 배열을 갖는 해석모델의 속도에 따른 자속밀도 비교



(a) y-성분 자속밀도 (b) x-성분 자속밀도
그림 6. Halbach 자화 배열을 갖는 해석모델의 속도에 따른 자속밀도 비교

서 $V=0$ 일 때 철심 및 공극에서의 y-성분 자속밀도를 도시하고 있다. 또한 와전류 제동기의 해석 모델에 대해 서각각 유한 요소 분석을 통하여 얻은 결과와 비교하여 해석 결과의 타당성을 보이고자 하였다.

또한 그림 4, 5, 6에서는 각각의 와전류 제동기 모델에 대해서 속도에 따른 철심 표면에서의 자속밀도를 보이고 있다. 속도는 각각 5 m/s일 때와 35 m/s일 때를 비교하였으며 비선형 해석으로 인해 자속밀도가 포화되는 것을 확인할 수 있다.

2.4 해석 모델의 와전류 분포

1차측과 2차측의 상대 운동에 따라 와전류가 발생하고 식(4)와 같이 표현된다.

$$J_i = \sigma_i (V \times B_i) \quad (4)$$

$$= \begin{bmatrix} a_x & a_y & a_z \\ V & 0 & 0 \\ B_x & B_y & 0 \end{bmatrix} = -j\sigma_i V B A e^{a_i y} e^{jkx}$$

여기서 와전류는 z-성분만이 있다고 가정하였으므로 식(4)와 같이 표현되고, 와전류와 자속밀도에 의한 로렌츠 힘이 1차측에 작용하여 제동력이 발생한다.

그림 7.은 식(4)를 이용하여 침투 깊이에 따른 와전류의 최대값을 도시한 것이다. 와전류는 침투 깊이에 따라 지수 함수적으로 감소하고 Halbach 배열을 갖는 가동자가 가장 큰 와전류가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 8.은 침투 깊이에 따른 B_x 성분의 최대값을 도시한 것으로 두 그림 모두 속도가 5 m/s일 때를 비교한 것이다.

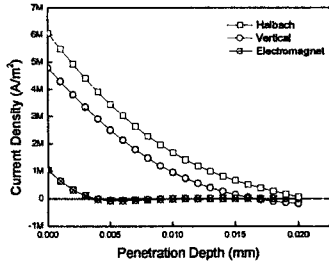


그림 7. 침투 깊이에 따른 전류 밀도 분포

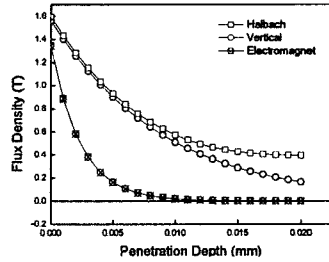


그림 8. 침투 깊이에 따른 수평방향 자속밀도 분포특성

2.5 맥스웰의 응력법에 의한 힘 특성

식 (3)과 (4)를 이용하여 제동력에 관한 방정식을 얻을 수도 있지만, 해석상 편의를 위한 가정에 의해 직선형 기기들의 수직력에 대한 방정식을 얻기는 힘들다.

1차축과 2차축 사이의 제동력 및 수직력은 맥스웰의 응력법을 이용하여 구해진다. 맥스웰의 응력법에서 2차원에 대한 T행렬은 식(5)와 같다.

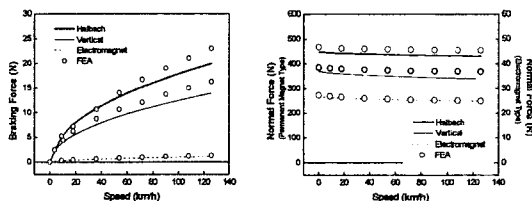
$$T = \frac{1}{\mu_0} \begin{bmatrix} B_x^2 - \frac{1}{2}|B|^2 & B_x B_y \\ B_y B_x & B_y^2 - \frac{1}{2}|B|^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

또한 전체 힘은 식(5)와 같다.

$$F = \int_v \nabla \cdot T^* dv = \int_s T^* \cdot ds \quad (6)$$

그림 9는 2차축이 철심으로만 구성된 경우 식(6)을 사용하여 얻어진 힘 특성을 도시한 것으로 유한 요소 해석치와 비교하였다. 여기서 전자석 가동자를 갖는 와전류 제동기는 다른 영구 자석형 제동장치에 비하여 매우 낮은 힘 특성을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 수직력의 경우 오른쪽 좌표축을 사용하여 도시하였다.

그림 10은 그림 1에서 제시된 서로 다른 가동자를 갖는 직선형 와전류 제동장치의 속도에 따른 힘 특성을 도시한 것이다. 또한 해석에 사용된 시스템 사양을 표 1에 나타내었다. 도체판이 삽입된 경우 그렇지 않은 경우보다 제동력이 상당히 증가함을 알 수 있다. 또한 최대 제



(a) 제동력 (b) 수직력
그림 9. 2차축이 도전성이 있는 철심으로만 구성된 경우 속도에 따른 힘 특성 비교

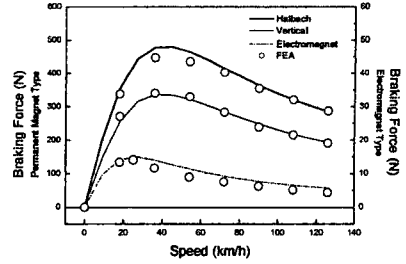


그림 10. 세 가지 직선형 와전류 제동장치 모델에 대한 속도에 따른 제동력 특성

표 1 직선형 와전류 제동장치의 사양

1차축이 영구자석으로 구성된 경우		
영구자석 사양 (단위)	Halbach	Vertical
길이 r_m (mm)	25	45
높이 h (mm)	25	
폭 w (mm)	25	
극간격 r (mm)	50	
공극 δ (mm)	10	
1차축이 전자석으로 구성된 경우		
전자석 사양 (단위)	치수	
슬롯 폭 (mm)	25	
슬롯 높이 (mm)	25	
치 폭 (mm)	25	
극간격 (mm)	50	
기계적 공극 (mm)	10	
슬롯면적당 전류밀도	5	

동력을 갖는 속도가 존재하게 되며, 이것이 가장 큰 특징이다. 따라서 큰 제동력을 얻기 위해 도체판을 삽입할 경우 기기의 운전 범위 및 최대 제동력이 필요한 속도를 알아야 하고, 이에 알맞게 제동장치를 설계해야 한다.

3. 결 론

본 논문에서는 서로 다른 가동자를 갖는 직선형 와전류 제동장치에 대해서 자속 밀도의 분포를 해석적 방법과 유한요소법을 이용하여 구하였고 해석적 방법의 타당성을 확인하였다. 또한 아이언의 비선형성을 고려하여 속도에 따른 자속 밀도 분포 특성을 확인하여 속도가 증가함에 따라 자속 밀도의 변화를 확인하였다. 또한 맥스웰의 응력법을 사용하여 도전성이 좋은 도체판이 삽입된 경우와 그렇지 않은 경우에 대해 제동력을 비교하였고 도체판의 삽입이 제동력에 미치는 영향을 알아보았다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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