

자화패턴에 따른 영구자석 직선형 와전류 제동장치의 특성 해석

論 文

52B-9-1

Characteristic Analysis of Permanent-Magnet Linear Eddy-Current Brake System According to Magnetization Pattern

李成浩* · 趙漢旭** · 張錫明***

(Sung-Ho Lee · Han-Wook Cho · Seok-Myeong Jang)

Abstract - Permanent magnet movers with three different magnetization patterns were applied to a linear eddy current braking system. By using a two-dimensional analytical technique, this paper deals with the comparison of the design guidelines, magnetic field, required magnet volume, and force capability for three types of linear brakes. The analytical results are also verified by finite element analyses.

Key Words : Permanent-magnet movers, magnetization patterns, eddy current braking system, force capability

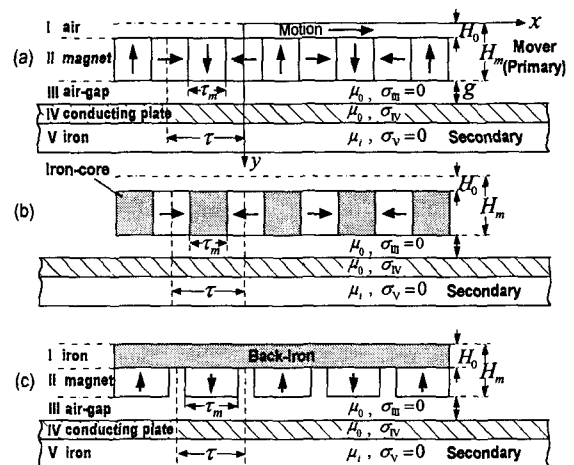
1. 서 론

제동기, 커플링, 자기 베어링 및 Inductrack 등과 같이 전자기 에너지로부터 기계적 에너지를 얻기 위한 기기들은 자체 내에 위치한 도체의 상대적 운동에 기인한 와전류와 자계의 상호작용에 의한 발생력으로 동작된다[1][2]. 이러한 응용분야에서 와전류 제동기는 전자기 에너지를 이용하여 제동력을 얻기 위해 적용되는 기기이다.

제동력을 얻기 위한 제동방식은 기계적 마찰 제동방식과 비마찰 제동방식인 전자기 제동방식으로 구분될 수 있다. 그런데 기계적 마찰 제동방식은 제동장치 부분에서의 열과 철가루와 같은 분진이 발생하여 마찰계수에 영향을 주기 때문에 신뢰성 있는 제동력을 얻는데 한계가 있다. 그러므로 이러한 기계적 마찰 제동방식의 단점을 피하기 위해 비마찰 전자기 제동방식인 와전류 제동장치가 연구 및 실용화되고 있다[3].

그런데 최근에 영구자석의 재료 및 관련기술의 발달에 힘입어, 많은 산업에 적용되고 있는 전기기기들의 계자코일에 에너지 밀도가 높은 영구자석으로 대체되고 있다[4]. 현재 와전류 제동장치를 적용하는 시스템의 경우, 계자 시스템으로 DC 전자석이 주로 이용되고 있으나, 이 부분이 영구자석으로 대체된다면 더욱 소형화, 고밀도화 및 운전 중 신뢰성 확보 측면에서 큰 이점을 기대할 수 있다[5]-[7].

영구자석을 사용하는 경우에도 자성재료, 자화패턴 및 자기회로의 구성방법에 따라 특성 및 제작에 큰 영향을 받게 된다[8]. 또한 본 저자들은 최근 영구자석의 Halbach 배열



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

그림 1 가동자 영구자석 자화 패턴에 따른 직선형 와전류 제동장치

Fig. 1 Permanent magnet linear eddy current brakes according to the mover magnetization pattern

법을 제동장치에 적용하기 위한 연구를 하여, 그 결과를 발표한 바가 있다[5][6].

본 논문에서는 영구자석을 직선형 와전류 제동기의 계자 시스템으로 적용함에 따라 가동자 영구자석 배열을 Halbach 배열, 수평방향 배열, 수직방향 배열로 각각 구성하였을 경우, 자화패턴 및 설계변수에 따른 와전류 제동기의 성능에 관한 영향을 전자장 이론 해석 결과를 토대로 비교·검토 하고자 한다. 이를 위해, 세 가지 자화패턴에 따라 각각 구성된 가동자를 갖는 와전류 제동기들은 자체특성, 동일자속을 얻기 위한 자석 체적, 제동력 성능에 대해 각각 비교된다. 또한 본 논문에서 제시된 해석결과들을 유한요소해석 결과와 비교함

* 正 會 員 : LG電子 DA研究所 要素技術그룹 先任研究員

** 准 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 碩士課程

*** 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2003年 1月 22日

最終完了 : 2003年 8月 12日

으로써 해석결과의 타당성을 검증하고자 하였다.

2. 직선형 와전류 제동장치 모델 및 특성해석

2.1 해석모델

그림 1은 영구자석을 이용한 직선형 와전류 제동기의 구조 및 가동자 구성을 위해 적용할 수 있는 세 가지 형태의 영구자석 배열을 보인다. 그림 1(a)는 영구자석의 각 세그먼트를 Halbach 배열로 구성한 경우이며, (b)와 (c)는 수평방향으로 자화된 영구자석과 수직방향으로 자화된 영구자석 배열로 각각 구성된 경우이다. 2차측은 설계요구사항에 따라 사용재질을 선정할 수 있으며, 구조적으로 그림 1에서 도시된 편측식 외에 수직력 발생이 없이 제동력만을 얻을 수 있는 양측식 구성도 가능하다.

2.2 특성해석

그림 2는 그림 1에서 보여지는 Halbach 및 수평방향 자화된 영구자석 가동자를 갖는 와전류 제동기 모델에 대하여 해석이 용이하도록 단순화하여 구성한 5영역 해석모델이다. 수직방향으로 자화된 가동자 모델에 대해서는 그림 2의 영역 I을 계철 영역으로 대체하면 된다.

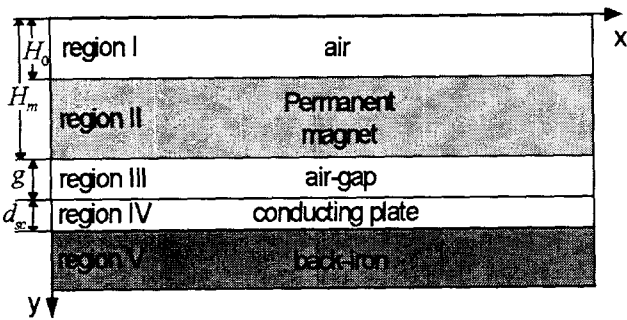


그림 2 특성해석을 위해 구성한 5영역 모델
Fig. 2 Five-region model for the characteristic analysis

1) 영구자석 자화 모델링

그림 1의 Halbach 배열을 갖는 2차측 영구자석영역의 자화는 식 (1)로 표현된다 [8]-[10].

$$M = \sum_{n=1, odd}^{\infty} (M_{xn} \vec{i}_x + M_{yn} \vec{i}_y) e^{jk_n x} \quad (1)$$

여기서, M_{xn} , M_{yn} 은 n 차 고조파에 대한 수평방향 및 수직방향 자화 성분들의 크기이며, $k_n = n\pi/\tau$ 이고 τ 는 극간격이다. 또한 M_{xn} 과 M_{yn} 은 식 (2)로 주어진다.

$$\begin{aligned} M_{xn} &= \sum_{n=1, odd}^{\infty} 4M_0/n\pi \cdot \cos(n\pi\alpha_p/2) \\ M_{yn} &= \sum_{n=1, odd}^{\infty} 4M_0/n\pi \cdot \sin(n\pi\alpha_p/2) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, 자화 M_0 는 B_{rem}/μ_0 의 비로 구할 수 있으며, B_{rem} 은 영구자석의 잔류자속밀도, α_p 는 영구자석 1편의 길이 τ_m 과 극간격 τ 의 비이다. 그림 1의 수평방향 자화된 영구자석과 수직방향 자화된 영구자석으로 구성된 가동자는 식 (1)에서 M_{yn} 과 M_{xn} 를 각각 0으로 대체하여 모델링할 수 있다.

2) 공극 자계

쿨롱계이지 조건을 적용하여, 그림 2에 제시된 각 영역에서의 지배방정식은 식 (3)으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \nabla^2 A_{I,III,V} &= 0 && (\text{공극과 백-아이언 영역}) \\ \nabla^2 A_{II} &= -\mu_0(\nabla \times \vec{M}) && (\text{영구자석 영역}) \\ \nabla^2 A_{IV} &= -\mu_0\mu_{IV}\sigma_{IV}(\vec{v} \times \nabla \times \vec{A}_{IV}) && (\text{도체판 영역}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $A_{I,II,III,IV}$ 는 각 영역에서의 자기 벡터 포텐셜, M 은 자화 벡터, μ_0 은 자유공간에서의 투자율, μ_{IV} 와 σ_{IV} 는 각각 영역 IV에서의 상대 투자율 및 도전율, v 는 x 방향으로의 가동자 직선 운동 속도이다.

식 (3)으로 표현되는 공극 및 영구자석 영역에 대한 지배방정식을 자기 벡터포텐셜에 대해 풀 후, $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ 의 관계를 적용하면 두 영역의 수평 및 수직방향 자속밀도를 식 (4)와 같이 각각 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} B_{xair} &= k_n(A_c \cosh k_n y + B_s \sinh k_n y) e^{jk_n x} \\ B_{yair} &= -jk_n(A_s \sinh k_n y + B_c \cosh k_n y) e^{jk_n x} && (\text{공극영역}) \\ B_{xmag} &= k_n(C \cosh k_n y + D \sinh k_n y) e^{jk_n x} \\ B_{ymag} &= -jk_n(C \sinh k_n y + D \cosh k_n y) e^{jk_n x} + \mu_0 M_{yn} e^{jk_n x} && (\text{영구자석 영역}) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 유도한 동일한 방법을 적용하여 그림 2의 공극 및 영구자석 영역을 제외한 나머지 영역에 대한 수평 및 수직방향 자속밀도를 도출할 수 있다. 따라서 각 영역의 경계면에 대한 자계의 연속성에 관한 경계조건을 부여하여 식 (4)의 미정계수 A, B, C, D 를 구하게 되고, 이로부터 Halbach 배열 모델의 공극자속밀도에 대한 x -성분과 y -성분은 각각 식 (5)와 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} B_{llx} &= \sum_{n=1, odd}^{\infty} \frac{-u\mu_0(M_{hal}/2)(1 - e^{k_n(H_m - H_0)})e^{jk_n x}}{\sinh k_n(H_m - H_0 + g) + j\mu \cosh k_n(H_m - H_0 + g)} \\ B_{lly} &= \sum_{n=1, odd}^{\infty} \frac{\mu_0(M_{hal}/2)(1 - e^{k_n(H_m - H_0)})e^{jk_n x}}{\sinh k_n(H_m - H_0 + g) + j\mu \cosh k_n(H_m - H_0 + g)} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $u = v\mu_0\sigma_{IV}d_{sc}$ 로 표현되며, d_{sc} 는 도체판의 두께, M_{hal} 은 n 차 고조파에 대한 수평방향 및 수직방향 자화 성분들

의 크기의 합이며, $H_m - H_0$ 는 영구자석의 높이, g 는 공극의 길이이다.

3) 제동력 및 수직력

가동자에 작용하는 x -방향으로의 제동력과 y -방향으로의 수직력은 식 (5)로 구해진 공극자속밀도로부터, 맥스웰 응력법을 이용하여 식 (6)으로 각각 계산된다 [7].

$$F_{xb} = \sum_{n=1, odd}^{\infty} \frac{w_p \phi}{2\mu_0} \int_0^{2\tau} Re(B_{IIIx} B_{IIIy}^*) dx$$

$$F_{yn} = \sum_{n=1, odd}^{\infty} \frac{w_p \phi}{4\mu_0} \int_0^{2\tau} (|B_{IIIy}|^2 - |B_{IIIx}|^2) dx \quad (6)$$

여기서, w_p 는 가동자의 폭, ϕ 는 극쌍수이다. $n=1$ 에 대하여 식 (6)의 제동력을 속도에 대해 미분하여 최대 제동력이 발생하는 속도 v_m 을 식 (7)로 구할 수 있다.

$$v_m = \frac{\tanh k(H_m - H_0 + g)}{\mu_0 \sigma_{IV} d_{sc}} \quad (7)$$

여기서 $k = \pi/\tau$ 이다. 또한 식 (7)을 식 (5)에 대입한 후, 다시 식 (6)을 통해 정리하면 최대 제동력 $F_{x_{bm}}$ 은 식 (8)과 같이 구해진다.

$$F_{x_{bm}} = \frac{0.5Lw_p\mu_0(M_{hal}/2)^2(1 - e^{k(H_m - H_0)})^2}{2 \sinh k(H_m - H_0 + g) \cosh k(H_m - H_0 + g)} \quad (8)$$

여기서, L 는 가동자의 길이이다.

4) 표피효과와 횡방향 모서리 효과

가동자가 x -방향으로 직선 운동함에 기인한 2차측 도체판에 유도되는 와전류의 기본 주파수는 $f = v/2\tau$ 로 표현되므로 비자성 2차측 도체의 표피효과에 의한 침투깊이는 식 (9)로 구해진다.

$$\delta = \sqrt{1/\mu_0 \pi \sigma f} = \sqrt{2\tau d_{sc} / \pi \tanh ke} \quad (9)$$

또한 2차측의 유한 폭에 따른 횡방향 단부 효과는 Russell & Norworthy 계수 c_n 으로 2차측 도체판의 도전율을 식 (10)과 같이 보정하여 고려할 수 있다 [7][11].

$$c_{III} = c_n \sigma_s$$

$$c_n = 1 - \frac{\tanh \epsilon}{\epsilon(1 + \tanh \epsilon \tanh \phi)} \quad (10)$$

여기서, $\epsilon = \pi w_p/2\tau$, $\phi = \pi(w_s - w_p)/2\tau$ 이며, w_s 는 2차측 도체판의 폭이다.

5) 길이방향 단부효과

유한길이를 갖는 가동자의 길이방향 단부효과에 의한 공

극자계의 왜형에 따른 제동력을 고려하기 위하여, $K_m(x)$ 를 영구자석영역을 표현하는 등가면전류밀도라 하고, $K_s(x)$ 를 2차측 도체판에 유도되는 전류의 등가면전류밀도라 하면, 앙페르의 주회법칙으로부터 식 (11)을 유도할 수 있다.

$$(H_m - H_0 + g) \frac{dB}{dx} = -\mu_0(K_m + K_s) \quad (11)$$

여기서, $K_s = d_{sc} \sigma_{IV} v B_{IIIy}$ 로 표현되므로 식 (11)에 대입하여 정리하면 식 (12)가 된다.

$$\frac{dB}{dx} + \frac{uB}{H_m - H_0 + g} = -\mu_0 K_m \quad (12)$$

길이방향 단부효과에 의한 자계는 식 (12)의 일반해인 식 (13)으로 표현된다 [7].

$$B_e = B_0 e^{-ux/(H_m - H_0 + g)} \quad (13)$$

여기서, 길이방향 단부효과에 의한 입구단 자계 B_0 는 영구자석 배열의 첫 번째 세그먼트에 의한 자계에 대하여 크기는 동일하고 180°위상차를 갖는다. 그러므로, 식 (5)로부터 식 (13)의 B_0 는 식 (14)와 같이 구해진다 [7].

$$B_0 = - \sum_{n=1, odd}^{\infty} \frac{\mu_0(M_{hal}/2)(1 - e^{k_n(H_m - H_0)})}{\sinh k_n(H_m - H_0 + g)} \cos\left(\frac{k_n \alpha_p \pi}{2}\right) \quad (14)$$

또한 식 (14)로부터 길이방향 단부효과로 인한 입구단 자계에 의해 발생하는 제동력은 식 (15)로 계산된다.

$$F_{xe} = w_p \int_0^L B_e K_s dx$$

$$= w_p \int_0^L d_{sc} V \sigma_{III} B_0^2 e^{-2ux/(H_m - H_0 + g)} dx$$

$$= w_p (H_m - H_0 + g) B_0^2 [1 - e^{-2uL/(H_m - H_0 + g)}] / 2\mu_0 \quad (15)$$

그러므로, 총 제동력은 식 (6)으로 계산되는 제동력에 길이방향 단부효과로 인한 식 (15)로 계산되는 제동력을 합하여 구한다.

3. 영구자석 자화 패턴에 따른 특성

3.1 자계 분포특성

그림 3은 그림 1에서 제시된 세 가지 형태의 가동자 영구자석 자화 패턴 및 2차측 유무에 따른 정자계 분포특성을 보인다. Halbach 배열은 그림 3(a)에서와 같이 자기차폐 특성으로 인해 자기회로 구성을 위해 계절이 필요하지 않으나,

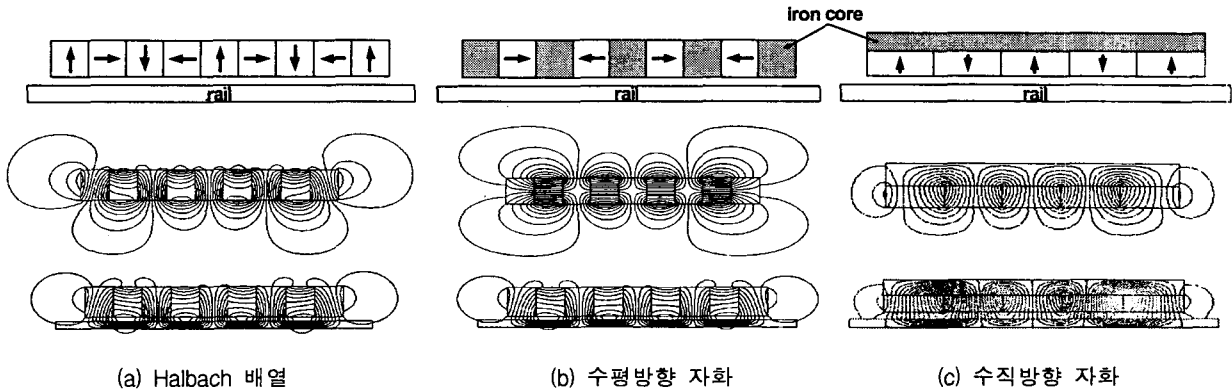
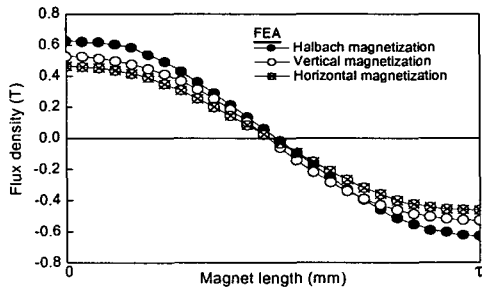
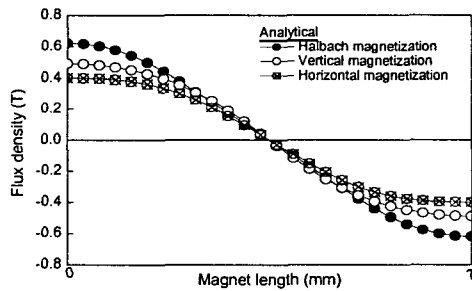


그림 3 2차측 유무 및 자화 패턴에 따른 정자계 분포
 Fig. 3 Magneto-static field distributions according to magnetization pattern



(a) 유한요소해석에 의한 공극자속밀도 분포특성



(b) 해석적 방법에 의한 공극자속밀도 분포특성

그림 4 유한요소해석 및 해석적 방법에 의해 구한 영구자석 자화 패턴에 따른 공극자속밀도 분포특성에 대한 비교
 Fig. 4 Comparison of air-gap flux density distributions obtained by FEM and analytical method according to magnetization pattern of the primary permanent magnet

수평방향 자화 패턴을 갖는 모델 (b)와 수직방향 자화 패턴을 갖는 모델 (c)는 자기회로 구성을 위해 철심 폴 및 계철을 각각 필요로 한다.

그림 4는 그림 3에서 제시된 세 가지 형태의 자화 패턴을 갖는 영구자석 배열을 각각 이용하여 가동자를 구성할 경우, 해석 및 유한요소해석을 통해 구한 공극자속밀도의 분포특성을 각각 비교하여 나타낸 것이다. 그림 4의 (a)와 (b)를

비교해 볼 때, 해석치와 유한요소해석 결과가 잘 부합됨을 알 수 있다.

3.2 설계 파라미터에 따른 자계 특성

그림 5는 공극길이 g 와 극간격 r 의 비를 0.25로 고정하였을 경우에, 세 가지 형태의 자화패턴을 갖는 직선형 와전류 제동기의 영구자석 높이에 대한 기본과 공극자속밀도의 최대치의 변화를 보인다. H_0/H_m 의 비가 0.85 이하에서 Halbach 자화된 가동자는 수직방향 자화된 가동자이 대해 우수한 자속밀도 특성을 보이며, H_0/H_m 의 비가 0.64 이하에서 수평방향 자화된 가동자는 수직방향 자화된 가동자에 대해 우수한 자속밀도 특성을 보인다. 또한 그림 5로부터 Halbach 자화된 가동자는 수평방향 자화된 가동자이 대해 항상 우수한 자계 특성을 갖고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 영구자석 높이 $H_m - H_0$ 에 대한 공극길이 g 의 비를 2로 고정하였을 경우에, 극간격에 대한 세 가지 자화패턴을 각각 갖는 가동자에 의한 공극자속밀도의 최대치의 변화를 비교하여 제시한 것이다. 그림 6으로부터 Halbach 자화 가동자와 수평방향 자화 가동자는 $H_m - H_0/g$ 의 비에 대해 공극자속밀도가 최대가 되는 r/H_m 의 비가 존재함을 알 수 있다. 이에 반하여 수직방향 자화 가동자는 r/H_m 의 비가 증가함에 따라 공극자속밀도 최대치의 변화가 서서히 둔화되며 증가함을 볼 수 있다. 그러므로 영구자석을 효율적으로 이용할 수 있는 고정된 $H_m - H_0/g$ 의 비에 대해 r/H_m 의 비를 결정할 수 있음을 알 수 있다.

3.3 힘 특성

고정된 극간격 r 에 대하여 그림 7은 세 가지 자화패턴을 갖는 직선형 와전류 제동기의 체적에 비례하는 변수 $H_m - H_0/g$ 의 비에 대한 영구자석 체적당 최대 제동력을 비교하여 도시한 것이다. 이 경우에 영구자석의 체적은 식

(16)으로 정의된다.

$$V_{r1} = 2pt^2w_p(g/\tau)(H_m - H_0/g) \quad (16)$$

그림 7에 제시된 결과로부터 Halbach 배열 가동자가 가장 우수한 영구자석 체적당 제동력 특성을 보임을 알 수 있다. 또한, $H_m - H_0/g$ 의 비가 2.5 이상에서 수평방향 자화된 가동자가 수직방향 자화된 가동자에 대해 영구자석 체적당 제동력 특성이 우수함을 볼 수 있다.

고정된 $\tau/(H_m - H_0)$ 의 비에 대하여, 그림 8은 세 가지 가동자 모델의 g/τ 의 변화에 대한 영구자석 체적당 최대 제동력을 각각 비교하여 도시한 것이다. 즉 세 가지 모델에 대해 공극 길이 변화에 따른 체적당 최대 제동력 변화 특성을 보인 것이다.

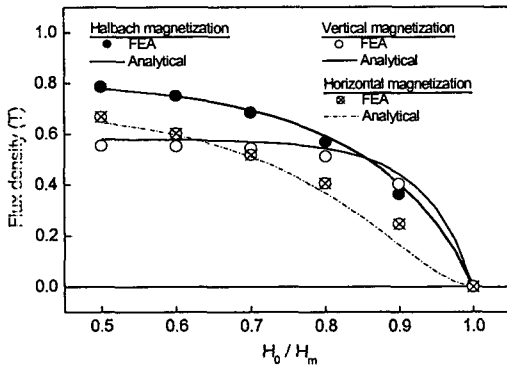


그림 5 세 가지 형태의 자화패턴을 갖는 와전류 제동기의 영구자석 높이에 대한 최대 공극자속밀도의 변화 특성

Fig. 5 Variation of peak air-gap flux density vs. magnet thickness for the topologies with three different magnetization

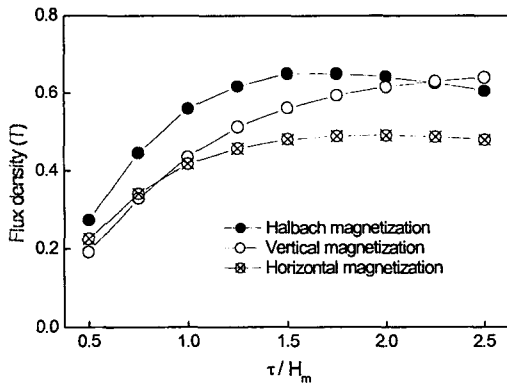


그림 6 세 가지 형태의 자화패턴을 갖는 와전류 제동기의 극간격에 대한 최대 공극자속밀도의 변화 특성

Fig. 6 Variation of peak air-gap flux density vs. pole pitch for the topologies with three different magnetization

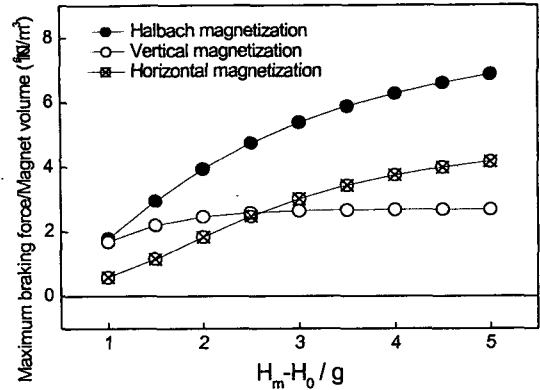


그림 7 세 가지 형태의 자화패턴을 갖는 와전류 제동기의 $H_m - H_0/g$ 의 비에 대한 영구자석 체적당 최대 제동력 비교

Fig. 7 Comparison of maximum braking force per magnet volume vs. $H_m - H_0/g$ for the topologies with three different magnetization

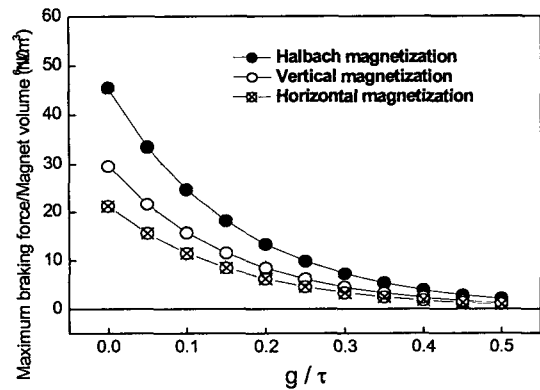


그림 8 세 가지 형태의 자화패턴을 갖는 와전류 제동기의 g/τ 의 비에 대한 영구자석 체적당 최대 제동력 비교

Fig. 8 Comparison of maximum braking force per magnet volume vs. g/τ for the topologies with three different magnetization

3.4 동일한 자속밀도를 얻기 위해 요구되는 자석 체적

고정된 g/τ 및 자석의 폭 w_p 에 대하여, 그림 9는 등가의 수직방향으로 자화된 가동자의 H_0/H_m 에 대한 Halbach 및 수평방향 자화 가동자의 H_0/H_m 의 변화를 보인다. 제시된 그림 9의 결과로부터 동일한 공극자속밀도를 얻기 위한 세 가지 모델에 대해 요구되는 자석의 체적을 상대적으로 비교할 수 있다. 즉 H_0/H_m 의 비가 0.85 이하에서, Halbach 배열 가동자가 동일 자속을 얻기 위해 수직방향 자화된 가동자보다 자석의 체적이 적게 요구된다. 또한

H_0/H_m 의 비가 0.68 이하에서, 수평방향 자화된 가동자가 동일 자속을 얻기 위해 수직방향 자화된 가동자 보다 자석의 체적이 적게 요구된다. 또한 동일 자속을 얻기 위해 Halbach 자화된 가동자는 수평방향 자화된 가동자에 대해 항상 자석 체적이 적게 요구됨을 알 수 있다.

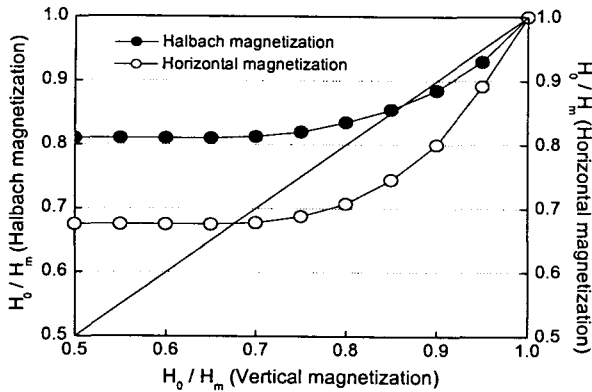


그림 9 수직방향 자화된 가동자의 H_0/H_m 의 비에 대한 Halbach 자화된 가동자 및 수평방향 자화된 가동자의 H_0/H_m 의 비 변화

Fig. 9 Variation of H_0/H_m for the Halbach magnetized topology and the horizontal magnetized topology with H_0/H_m of vertically magnetized topology

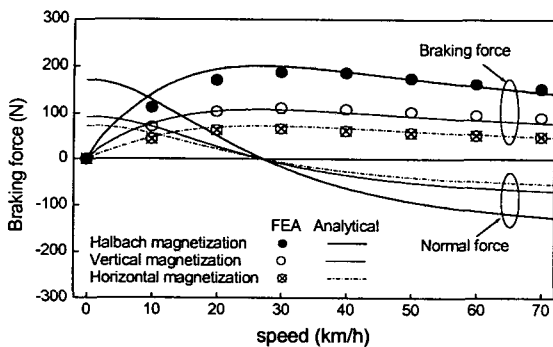


그림 10 세 가지 형태의 자화패턴을 갖는 직선형 와전류 제동기의 속도에 따른 제동력 및 수직력 특성 비교

Fig. 10 Comparison of braking and normal forces vs. speed for the topologies with three different magnetization patte

3.5 세 가지 형태의 자화패턴을 갖는 와전류 제동기의 제동력 특성비교

식 (16)으로 계산되는 동일한 1차측 체적하에서, 세 가지 형태의 자화패턴을 갖는 영구자석 직선형 와전류 제동기의 주요 설계 파라미터들 및 1차측 구성방식에 따른 1차측 체적 및 중량당 최대 제동력 비교 결과를 표 1에 제시하였다. 또한 그림 10은 표 1의 사양을 각각 갖는 와전류 제동기들에 대한 속도에 따른 제동력 및 수직력 특성을 비교하여 제

시한 것이다. 표 1에서 제시된 바와 같이 자석 및 1차측 체적과 중량당 최대 제동력은 Halbach 배열 모델이 수직 및 수평방향 배열 모델과 비교하여 우수함을 알 수 있다. 이는 Halbach 배열의 우수한 자계 특성에 기인한다. 표 1의 결과에서 1차측 중량은 영구자석 및 철심의 중량밀도를 각각 $7,500 \text{ kg/m}^3$ 과 $7,850 \text{ kg/m}^3$ 로 하여 계산하였다.

표 1 세 가지 형태의 자화패턴을 갖는 영구자석 직선형 제동기의 주요 설계 파라미터 및 최대 제동력 비교
Table 1 Design parameters of permanent magnet linear brakes with three different magnetization pattern and comparison of the maximum braking force

설계변수	Halbach	수직방향	수평방향
H_m	40 (mm)		
H_0/H_m	0.75		
τ/H_m	0.5	0.47	0.5
$H_m - H_0/g$	2		
g/τ	0.25	0.27	0.25
τ_m/τ	0.5	0.75	0.5
L	90 (mm)		
w_p	50 (mm)		

최대 제동력 비교

항목(단위)	Halbach	수직방향	수평방향
제동력/자석체적 (N/m^3)	4.44×10^6	2.88×10^6	3.5×10^6
제동력/1차측 체적 (N/m^3)	4.44×10^6	2.4×10^6	1.56×10^6
제동력/1차측 중량 (N/kg)	592	384	202

4. 결론

해석적 방법에 의해, 영구자석 가동자의 기하학적인 사이즈 비를 변수로 하여 세 가지 다른 자화패턴을 갖는 영구자석 직선형 와전류 제동기들을 자속밀도, 동일자속을 얻기 위해 요구되는 자석체적, 가동자 체적당 제동력 성능과 속도에 따른 제동력 및 수직력 특성 등을 각각 비교하여 제시하였다. 본 연구를 통해, 동일한 가동자 체적에 대해 Halbach 배열 가동자를 갖는 와전류 제동기의 영구자석 및 가동자 체적당 제동력 성능이 제시된 다른 두 가지 모델에 비해 우수함을 확인할 수 있었다. 또한 해석결과들을 유한요소해석 결과와 비교하여 제시된 해석의 타당성을 검증하였다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

참 고 문 헌

- [1] W.L. Lorimer and D. K. Lieu, "Correlation of experimental data and three-dimensional finite element modeling of a spinning magnet array," IEEE Trans., Magn., vol. 30, pp. 3004-3007, Step. 1994.
- [2] T. W. Nehl and B. Lequesne, "Nonlinear two-dimensional finite element modeling of permanent magnet eddy current couplings and brakes," IEEE Trans. Magn., vol.30, pp.3000-3003, 1994
- [3] P.J. Wang, "Analysis of eddy-current brakes for highspeed railway," IEEE Trans. Magn., vol.34, pp. 1237-1239, 1998.
- [4] A. Wallace and A. V. Jouanne, "Comparison testing of an adjustable speed permanent magnet coupling," IEEE Pulp & Paper Industry Technical Conference, Atlanta, June 2000.
- [5] 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, pp. 2627-2629, 2001.
- [6] S.M. Jang, S.H. Lee, S.S. Jeong, "Characteristic analysis of eddy-current brake system using the linear Halbach array," IEEE Trans. Magn. vol.38. no. 5. pp.2994-2996. 2002
- [7] J.D. Edwards, B.V. Jayawant, W.R.C. Dawson, and D.T. Wright, "Permanent-magnet linear eddy-current brake with a non-magnetic reaction plate," IEE Proc-Electr. Power Appl., vol.146, pp.627-631, 1999
- [8] J. Wang, G.W. Jewell, and D. Howe, "A general framework for the analysis and design of tubular linear permanent magnet machines," IEEE Trans. Magn., vol.35, no. 3, pp.1986-2000, 1999
- [9] D. L. Trumper, "Magnet arrays for synchronous machines," in Proc. IEEE IAS 28th Annu. Meeting, pp.9-18, 1993
- [10] D. L. Trumper, W.J. Kim, and M.E. Williams, "Design and analysis framework for linear permanent-magnet machines," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.32, pp.371-379, 1996.
- [11] I. Boldea and S.A.Nasar, Linear Motion Electromagnetics Systems. New York:Wiley, 1985
- [12] K. Halbach, "Physical and optical properties of rare earth cobalt magnets," Nucl. Inst. Method, pp.109-117, 1981.

저 자 소 개

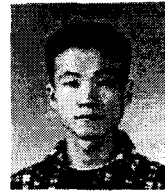


이 성 호 (李成浩)

1971년 11월 1일생. 1997년 충남대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 석사졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 LG 전자 디지털 어플라이언스 연구소 요소기술그룹 선임연구원

Tel : 02-818-7961

E-mail : iemechas@lge.com



조 한 옥 (趙漢旭)

1976년 12월 3일생. 2002년 충남대 전기공학과 졸업. 2002년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 042-822-4933

E-mail : hwcho@cnu.ac.kr



장 석 명 (張錫明)

1949년 7월 3일생. 1986년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1989년 미국 Univ. of Kentucky (방문연구교수), 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수, 현재 당학회 평의원, 전기기기 및 에너지 변환 시스템 부분회 부회장 및 편집 위원장

Tel : 042-821-5658

E-mail : smjang@ee.cnu.ac.kr

Homepage : <http://iemechas.cnu.ac.kr>