

영구자석형 와전류제동기의 토크 특성 해석

신현재*, 최장영*, 조한욱*
충남대학교*

Torque Analysis of Axial Flux PM Type Eddy Current Brake

Hyeon-Jae Shin*, Jang-Young Choi*, Han-wook Cho*
ChungNam National University*

Abstract - This paper deals with torque analysis of axial flux permanent magnet (AFP) type eddy current brake (ECB) based on analytical field computation. On the basis of a magnetic vector potential and a two-dimensional (2-D) polar coordinate system, analytical solutions for normal and tangential flux density due to permanent magnet (PM) considering eddy current effect are obtained. And then, using derived analytical field solutions, braking torque and normal force characteristics according to rotor speed are also predicted. A three-dimensional (3-D) finite element (FE) analysis is employed to confirm the validity of analyses.

1. 서 론

회도류계 제질의 영구자석을 사용한 전기기기들은 권선형 계자를 사용한 기기에 비하여 소형·경량화 및 고출력화가 가능하다. 따라서 기계적 브레이크를 대체하는 수단으로 권선형 와전류 브레이크 타입이 널리 사용되는 시점에서, 권선형 계자를 영구자석으로 대체할 경우 다음과 같은 장점이 기대된다 [1-4]. 계자에 전류를 공급할 필요가 없기 때문에 전력 소모가 없고, 동손이 존재하지 않기 때문에 발열 측면에서 유리하며, 영구자석의 사용으로 소형/경량화가 가능하다. 또한 제동시의 분진, 소음 발생과 제동을 위한 부품의 소모를 줄일 수 있어 유지보수 비용의 절감이 가능하다. 위와 같은 장점에도 불구하고, 영구자석을 와전류 브레이크 타입에 적용하기 위해서는 해결해야 할 문제가 존재한다. 먼저, 영구자석은 에너지 조절이 어렵기 때문에, 응용 처를 고려하여 속도에 따른 요구 브레이크 토크를 정확히 예측해야 하며, 이를 위해서는 빠르고 정확한 해석기법 확립이 무엇보다 중요하다.

영구자석형 와전류 브레이크는 크게 두 가지 타입 (반경 방향 자속 와전류 브레이크 타입 및 축방향 자속 와전류 브레이크 타입)으로 분류할 수 있는데, 타입별로 자기회로 구성조건이 다르기 때문에, 각 기기의 전자기적 설계 및 해석 방식 역시 기기 타입에 맞추어 다른 시각으로 접근해야 한다.

영구자석 와전류 브레이크의 전자기적 해석 및 설계에는 유한요소해석법과 같은 수치해석 방법과 공간고조파법과 같은 해석적 방법이 사용될 수 있다. 유한요소 해석법과 같은 수치해석 방법은 고정자 요크의 포화 및 재질의 비선형 등을 고려한 정확한 해석 및 설계를 제공하는 반면에, 해석시간이 오래 걸린다는 단점이 해석의 문제점으로 작용했다. 공간고조파법과 같은 해석적 방법은 해석시간이 매우 빠를 뿐만 아니라, 해석해를 통한 회로 정수도출이 용이하여 전자기 설계에 높은 통찰력을 제공한다는 장점을 갖는다. 반면에, 비선형 해석시 해석적 부담으로 여러 가지 가정이 적용되기 때문에 해석해의 정확도가 문제점으로 작용해 왔다.

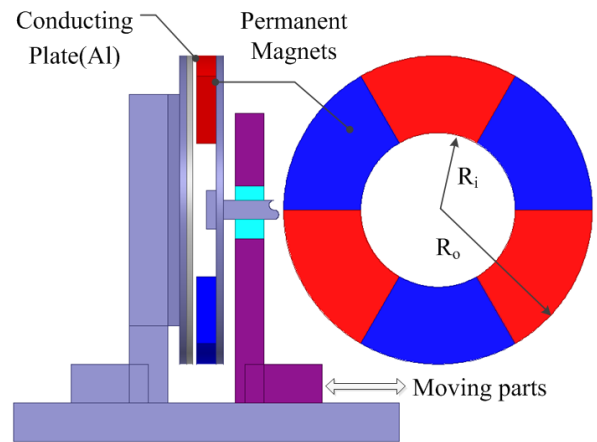
따라서 본 논문에서는 반경방향 자속 및 축방향 자속 영구자석 와전류 브레이크의 정확하고 빠른 전자기적 특성 해석을 위해 2-D 좌표계를 활용하여 자기장의 해석 모델을 정하고, 제동력과 수직력에 대한 해석과 3-D FE를 통한 예측을 비교하여 보고자 한다. 도출된 해석해는 자속방향에 따른 영구자석 와전류 브레이크의 설계 및 특성해석 시 해석시간 및 정확성 측면에서 매우 유용하기 때문에, 최근 이슈가 되고 있는 전기자동차의 브레이크 및 헬스기구의 부하 설계에 쉽게 응용될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 축자속 영구자석 기기 특성 해석

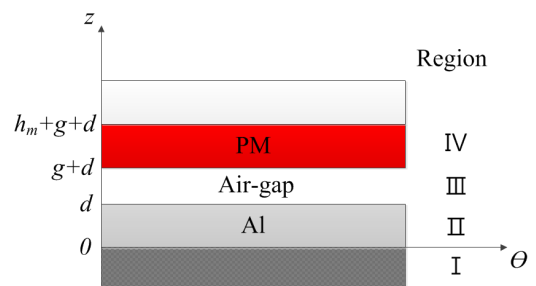
2.1 해석 모델

그림 2 는 축 방향 영구자석의 자화모델링을 얻기 위한 개략적인 2-D 해석모델이다. 해석모델에서 h_m 은 영구자석의 두께, g 는 공극의 길이, d 는 알루미늄재질의 도전판의 두께이다. 그리고 위치에 따라서 4개의 영역으로 나누어지며, 각 영역은 고정자 코어영역, 알루미늄 재질 도전체

영역, 공극영역, 회전자 영구자석 영역, 회전자 코어영역 으로 분류하였다. 그리고 구조적으로 크게 두 부분으로 나누면 고정되어있는 영역과 공극을 조절하여 제동력 조절하기 위한 이동 영역으로 나눌 수 있다.



〈그림 1〉 영구자석형 축방향 와전류 제동기의 구조도



〈그림 2〉 자기 예측을 위하여 단순화한 축방향 영구자석 기기 모델

2.2 지배방정식

영구자석 영역에서는 흐르는 전류가 없으므로, $\nabla \times \mathbf{H} = 0$ 이고, $\nabla \times \mathbf{B} = -\mu_0(\nabla \times \mathbf{M})$ 이다. 자기벡터 포텐셜 \mathbf{A} 는 $\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}$ 로 정의되며, 푸아송 방정식을 이용하여 영역 별로 생각해보면

$$\nabla^2 \mathbf{A}^I = -\mu_0 \mathbf{J}_I \quad (1)$$

$$\nabla^2 \mathbf{A}^{II} = -\mu_0 \mathbf{J}_{II} \quad (2)$$

$$\nabla^2 \mathbf{A}^{III} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla^2 \mathbf{A}^{IV} = -\mu_0(\nabla \times \mathbf{M}) \quad (4)$$

식(1~4)과 같이 나타낼 수 있으며, 고정되어 있는 부분 I, II 영역에서의 유효되는 와전류는

$$\mathbf{J}_{II} = \sigma_2(\boldsymbol{\omega}_r \times \mathbf{B}^{II}) = \sigma_2 \omega_r B_2^{II} \mathbf{i}_r \quad (5)$$

$$\mathbf{J}_I = \sigma_1(\boldsymbol{\omega}_r \times \mathbf{B}^I) = \sigma_1 \omega_r B_2^I \mathbf{i}_r \quad (6)$$

식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. $\mathbf{A} = \sum A_n(z)e^{-jnp\theta}\mathbf{i}_r$ 이므로, 식(5, 6)에서 \mathbf{B} 를 \mathbf{A} 로 다시 정리하면,

$$\mathbf{J}_{II} = \sum_{n=1, odd}^{\infty} (jnp/r)\sigma_2\omega_r A_n^II(z)e^{-jnp\theta}\mathbf{i}_r \quad (7)$$

$$\mathbf{J}_I = \sum_{n=1, odd}^{\infty} (jnp/r)\sigma_2\omega_r A_n^I(z)e^{-jnp\theta}\mathbf{i}_r \quad (8)$$

2.3 제동력과 수직력

축방향 와전류 제동기에서 발생하는 힘은 제동력 (braking force : F_b)와 수직력 (normal force : F_n)으로 구분할 수 있으며, 이는 맥스웰 스트레스 텐서를 이용하여 생각해보면

$$F_b = \frac{1}{2\mu_0} \int_0^{2\pi} \int_{R_i}^{R_o} [B_{\theta}^{III}(r, \theta, d+g) \cdot \{B_z^{III}(r, \theta, d+g)\}^*] r dr d\theta \quad (9)$$

$$F_n = \frac{1}{4\mu_0} \int_0^{2\pi} \int_{R_i}^{R_o} [B_{\theta}^{III}(r, \theta, d+g)^2 - B_z^{III}(r, \theta, d+g)^2] r dr d\theta \quad (10)$$

식 (9,10)과 같다. 식에서 R_i 와 R_o 는 영구자석의 내측과 외측 반지름이다.

2.4 예측 결과와 FE 해석 결과의 비교

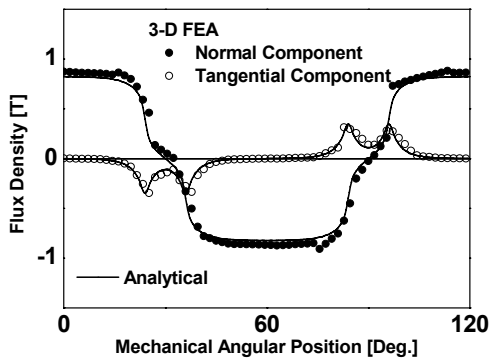
예측 결과와 3-D FE 해석 결과와의 비교를 위하여 주요 설계 변수값들을 정하였고 이를 표 1에 나타내었다. 자속 밀도 비교를 위하여 0rpm과 1000rpm 시의 결과를 그림 3과 4에 나타내었다. 그림 3에서 0rpm 시에는 예측 결과와 3-D FE 결과가 거의 일치하며, 1000rpm 시에도 높은 정확도를 보여준다. 또한 로터의 회전속도에 따른 제동 토크와 수직력 비교는 그림 5와 같으며 해석 구간 내에서 높은 정확도를 보여준다.

3. 결 론

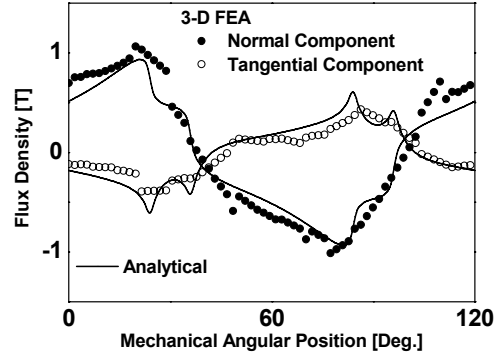
본 논문은 전자장 해석법을 이용하여 축 자속 영구자석 와전류 제동기에 대한 특성 해석을 진행하였다. 첫째로, 2-D 좌표계를 활용한 자기장의 해석 모델과 정하고, 둘째로 지배 방정식을 통한 특성 해석을 하였으며 마지막으로 3-D FE 해석 결과와 비교를 진행하여 높은 정확도를 보여 주었다. 위의 특성 해석 결과를 바탕으로 축 방향 영구자석 제동기의 설계에 활용하면 좀 더 정확한 예측과 해석시간을 절감 할 수 있다.

〈표 1〉 3-D FE 실행을 위한 주요 설계 변수값

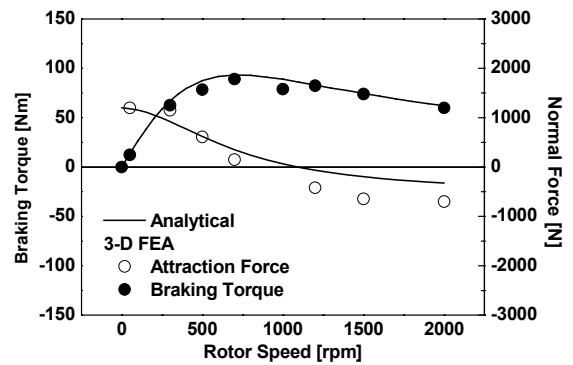
변수	값	변수	값
g(air-gap)	1mm	Br(remanence)	1.28T
hm(PM height)	10mm	p(pole-pairs)	3
R_i (inner PM Radius)	40mm	d(Al thickness)	3mm
R_o (outer PM radius)	80mm	Pole arc ratio	0.8



〈그림 3〉 0rpm에서 해석법과 3-D FE에 따른 수직, 수평방향 자속밀도 비교



〈그림 4〉 1000rpm에서 해석법과 3-D FE에 따른 수직, 수평방향 자속밀도 비교



〈그림 5〉 0rpm에서 해석법과 3-D FE에 따른 제동토크와 수직력 비교

[참 고 문 헌]

- [1] S. E. Gay and M. Ehsani, "Analysis and experimental testing of a permanent magnet eddy-current brake", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 756-765, 2005.
- [2] Bruno Lequesne, Buyun Liu and Thomas W. Nehl, "Eddy-current machines with permanent magnets and solid rotors", Ieee Trans. Ind. Appl. vol 33, no.5, pp.1289-1294, 1977
- [3] Peter Vrtic, Miralem Hadziselimovic, Time Marcic, and Bojan Stumberger, " Torque Analysis of an Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine by Using Analytical Magnetic Field Calculation", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, Mo. 3, pp. 1036-1039, March 2009
- [4] David L. Trumper, Won-jong Kim, and Mark E. Williams, "Design and Analysis Framework for Linear Permanent-Magnet Machines", IEEE, Trans. IAS, vol.32, pp.371-279, 1996.