

유한요소해석을 이용한 영구자석의 와전류 손실 해석

이정종, 정재우, 이상호, 권순오, 홍정표
한양대학교 기계공학부

Eddy current loss analysis of permanent magnet using Finite Element Method

Jeong-Jong Lee, Jea-Woo Jung, Sang-Ho Lee, Soon-O Kwon, and Jung-Pyo Hong
School of Mechanical Engineering, Hanyang University

Abstract - In this paper, eddy current compensation method of 2D finite element method(FEM) is studied compared with 3D FEM. The result of eddy current loss of permeant magnet is different from 3D FEM result because current loop of the inside of permanent magnet can not expressed by 2D FEM. In order to reduce the error between 2D and 3D FEM, permanent magnet conductivity is compensated considering current loop of magnet shape according to length and width.

1. 서 론

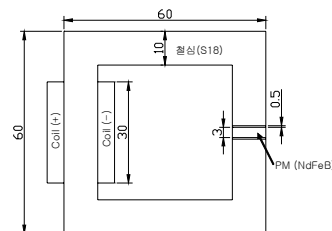
고성능 회로유계 영구자석의 종류로서는 크게 SmCO₃와 NdFeB로 구분된다. SmCO₃에 비하여 NdFeB 영구자석은 비용대비 성능이 우수하고, 수년간 표면처리 기술이 발전하여 산업계에서 활용성이 증대되고 있다. NdFeB의 특징으로서 페라이트 영구자석에 비하여 높은 에너지 밀도를 가지므로 에너지 변환기에 적용 시 높은 출력밀도를 낼 수 있다. 하지만 단점으로써 고온 불가역 감자 특성을 가지므로 연속 구동 시 온도 포화상태에서 자기적인 특성이 저감되는 현상을 나타낸다. 특히 NdFeB 영구자석의 경우 내부의 도전율로 인한 내부 전류로부터 자체적인 온도 상승의 열원이 될 수 있으며 이러한 내부 열원은 영구자석의 성능을 저감시키는 고온 불가역 감자를 발생시키는 큰 원인이 된다. 이러한 감자 작용을 해석하기 위해서는 감자 작용에 영향을 미치는 영구자석의 온도분포, 외부자계에 의한 자속을 해석하여 결과를 예측 할 수 있어야 한다. 영구자석의 온도 상승은 코일의 저항손, 기계적 마찰손, 철심의 철손에 영향을 있지만, 영구자석 자체의 도전성 재질이 외부자계에 반응하여 일으키는 와전류(eddy current)에 큰 영향을 받는다[1][2].

본 논문에서는 영구자석의 내부 와전류손을 해석하기 위하여 2D Finite-Element Method(FEM)를 사용하였으며, 영구자석 내부 전류의 전체 loop를 표현하지 못하는 단점을 보완하기 위하여 영구자석 길이와 폭의 형상비율을 이용하여 내부 전류 loop를 고려하였다. 와전류를 산정하기 위하여 2D FEM에서 해석방법으로는 time-harmonic field 방정식을 사용하였으며, 영구자석 길이와 폭의 형상비율에 따른 해석 결과는 analytical method를 사용하여 도전율(σ)을 보상하는 방법을 사용하였다. 또한 2D FEM 결과의 타당성은 와전류 loop가 표현되는 3D FEM 결과와 비교 되었다. 해석의 비교 결과 2D FEM에 비하여 3D FEM 해석 결과에서 영구자석의 손실이 낮게 나타났으며, 형상을 보완한 2D FEM 해석 결과에서는 3D FEM 해석 결과와 유사함을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

영구자석의 와전류를 확인하기 위하여 그림 1과 같은 모델을 선정하였다. C-코어 형상은 coil과 철심(S18)으로 구성되었으며 영구자석의 두께는 3mm, 폭은 10mm로 설정하였다. 축 방향 길이 변화에 따른 해석 결과를 분석하기 위하여 축 방향 길이는 10mm, 30mm, 50mm 까지 선정하였고, 인가전류의 범위는 1A, 5A, 10A까지 해석하였다.



〈그림 1〉 영구자석 와전류 해석 모델

표1은 해석 모델의 재질 특성

재질 특성	값
영구자석의 도전율 (S/m)	6.94*10 ⁵
영구자석 잔류자속밀도 (T)	1.2
영구자석 비투자율	1.05
코일 턴 수 (Turn)	100

2.2 해석 방법

2차원 와전류의 해석과 3차원 와전류분포를 계산하기 위하여 2차원 해석 방법에서는 자기벡터포텐셜(\vec{A})을 계변수로 하는 FEM 해석 방법을 적용하였고, 2차원 해석의 타당성 확인을 위한 3차원 해석 방법은 상용소프트웨어인 Maxwell 3D를 사용하였다. 2차원에서 3차원 전류분포의 영향을 고려하기 위하여 analytical method를 사용하여 3차원 결과와 등가적인 도전율(σ) 값을 결정하였다.

2.2.1 2차원 FEM 와전류의 계산

Maxwell 방정식으로부터 시변자계(Time-varying magnetic field)의 지배방정식(Governing equation)을 식 (1)에 나타내었다. 여기서, 자기벡터포텐셜(\vec{A})는 z축 방향 성분만이 존재하고, 재질의 투자율은 등방성이며, 모든 현상이 정현적으로 변화한다고 가정하여, 2차원으로 해석 할 경우 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 2D FEM에서 영구자석에 의한 자속의 bias 성분은 무시되었다[3].

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) + \sigma \left[\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{v} \times (\nabla \times \vec{A}) - \nabla \phi \right] - \vec{J}_0 = 0 \quad (1)$$

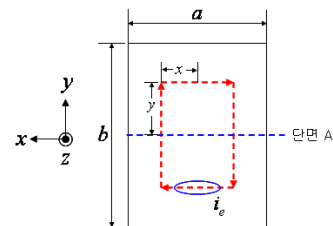
$$-\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right) \right) + \sigma (j\omega A + v_x \frac{\partial A}{\partial x} + \nabla \phi) - J_0 = 0 \quad (2)$$

여기서, μ 는 재질의 투자율, σ 는 도체의 도전율, J_0 는 전류의 입력 항을 나타낸다.

2.2.2 3차원 등가 와전류 손실 계산을 위한 Analytical method

그림2는 영구자석의 위 단면을 나타내었다. 2D FEM 해석 시 A단면을 기준으로 모델링한다. 2D 해석에서 전류의 방향은 y방향 성분만 고려되므로, y방향을 제외한 i_e 전류는 해석에 포함되지 않는다. 그러므로 축 방향 길이에 따라서 전류의 특성이 3차원 해석 결과와 차이를 가진다. 이러한 차이를 보정하기 위하여 loop의 저항으로부터 도전율 값을 보완하였다. 그림2에서 도체의 2D 무한 길이로 보고, 루프의 평균면적은 a/2로 보면, 전류loop의 저항은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 3차원 저항의 경우 loop를 고려하면 식 (4)와 같이 표현된다. 저항의 비율을 산정하면 식 (5)와 같고, 이로부터 등가화 된 도전율 값은 식 (6)과 같다.

$$R_{2D} = \rho \frac{L}{S} = \rho \frac{2b}{0.5a} = 4\rho \frac{b}{a} \quad (3)$$



〈그림 2〉 영구자석 내부의 전류 분포

$$R_{3D} = \rho \frac{L}{S} = \rho \frac{2(b+a)}{0.5a} = 4\rho \frac{(b+a)}{a} \quad (4)$$

$$\frac{R_{2D}}{R_{3D}} = \frac{b}{(b+a)} \quad (5)$$

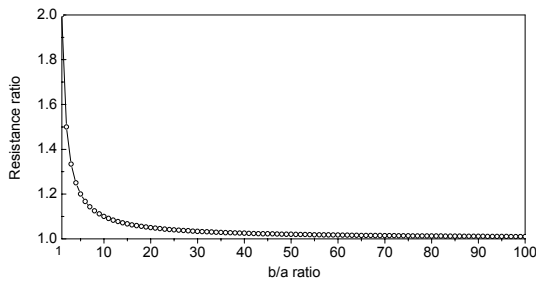
$$\rho' = \frac{b}{(b+a)} \rho \quad (\rho' : 3차원 등가 도전율) \quad (6)$$

2.3 해석 결과

축 방향 길이와 도체 넓이의 비율에 따른 손실 특성을 식 (6), (7)로부터 산정하였다. 2D FEM 해석에서 도전율을 보정하였을 경우와 보정하지 않았을 때의 결과를 산정하여 3차원 해석과 비교하였다.

2.3.1 폭과 축 방향 길이비율에 따른 손실 비율

영구자석의 넓이는 동일하고 축 방향 길이만 변경된다고 가정 할 때, 와전류 손실의 비율을 그림 3에 나타내었다. b 값이 증가 할수록 1에 가까운 값으로 수렴한다.



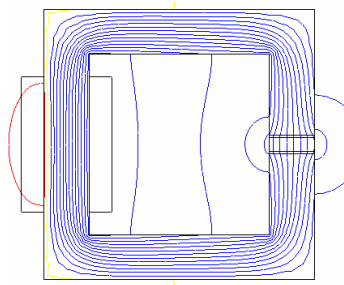
〈그림 3〉 축방향 길이에 따른 Loss 비율

2.3.2 2D FEM 해석 결과

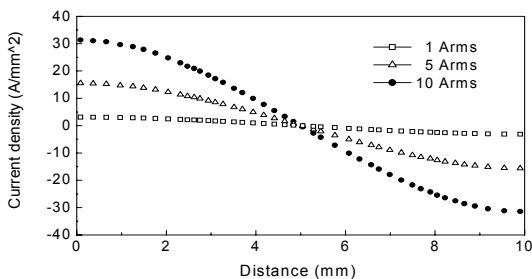
그림 4와 그림 5는 2D FEM 해석 결과로부터 산정한 등포텐셜 분포와 영구자석 내부 중심에서의 와전류 밀도를 나타내었다. 영구자석 내부의 $\nabla\phi$ (수식2참조)는 0이 아니므로 영구자석 내부의 와전류는 지면(z축)방향으로 입력되는 전류와 출력되는 전류가 동일하게 되어 총합은 0이 된다. 그림 5에서는 입력전류 1Arms, 5Arms, 10Arms일 때, 영구자석 내부에서의 와전류밀도를 나타낸다.

2.3.3 3D FEM 해석 결과

그림 6은 3차원 해석결과로써 영구자석 중심에서의 와전류분포를 길이별로 나타내었다. 축 방향 길이 10mm의 경우 영구자석 넓이와 도체의 축 방향 길이가 같을 때를 나타내며 이 때 전류의 분포는 축 방향과 길이방향으로 동일한 전류가 흐름을 알 수 있다. 축 방향 길이 30mm



〈그림 4〉 등포텐셜 분포



〈그림 5〉 영구자석 중심의 전류밀도 분포

및 50mm 결과에서는 축 방향으로 양 끝단부에서 전류밀도가 길이방향보다 낮으며 축 방향 길이 10mm보다 넓은 부분에 전류가 흘러 전류밀도가 낮음을 알 수 있다. 그림 7은 축 방향 길이 10mm 일 때 영구자석의 중심에서 전류밀도를 나타낸 것이며, 2D FEM 결과에 비하여 전류밀도가 낮음을 알 수 있다.

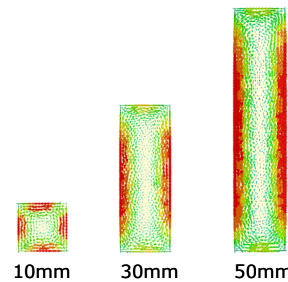
그림 8은 영구자석에서의 와전류 손실을 나타내었다. 축 방향 길이 10mm에서는 2D FEM 해석치가 3D FEM 해석치 보다 높게 평가된 반면 30mm, 50mm에서는 낮게 산정되었는데, 그 이유는 끝단부의 영향에 따라서 오차가 발생한 것으로 사료된다.

3. 결 론

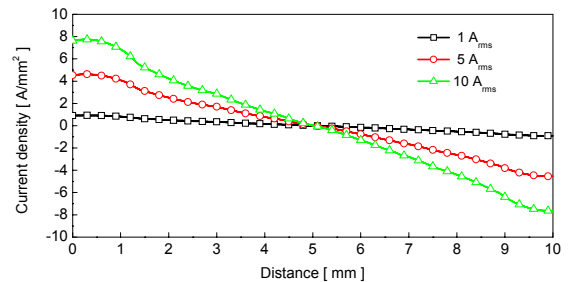
본 논문에서는 영구자석의 와전류 손실 계산에서 영구자석의 길이와 넓이의 비례관계에 따른 2차원 해석과 3차원 해석의 오차를 확인하였다. 2차원 보정 수식을 사용하여 도전율 값을 등가화 하여 3차원 해석결과와 유사한 결과를 확인 할 수 있었다. 제시된 방법은 도체의 와전류 산정 시 축 방향 길이에 따른 해석 결과를 도출 할 때 유용하게 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

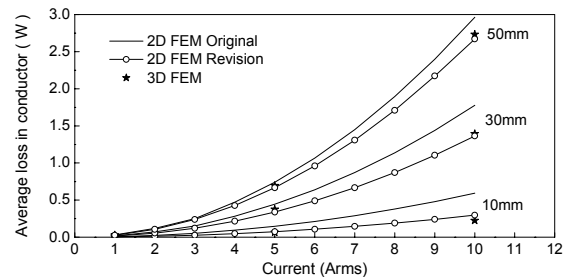
- [1] Jae-Woo Jung, Soon-O Kwon, Ji-Hyung Ban, and Jung Pyo Hong, "Optimum design for eddy current reduction in IPMSM by response surface methodology," Conference on the computation of electromagnetic field 2007, Proceeding of the 16th IEEE, pp. 747-748, June 24-28, 2007.
- [2] Gyu-Hong Kang, Jin Hur, Hyuk Nam, and Jung-Pyo Hong, "Analysis of irreversible magnet demagnetization in line-start motor based on the finite element method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39 no. 3, pp. 1488-1491, May 2003.
- [3] Kinjiro Yoshida, Yasufiro Hita, and Katsumi Kesamaru, "Eddy-current loss analysis in Pm of surface-mounted-PMSM for electric vehicles," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36 no. 4, pp. 1941-1944, July 2000.



〈그림 6〉 영구자석 중심의 전류 분포



〈그림 7〉 영구자석 중심의 전류 분포



〈그림 8〉 영구자석의 와전류 손실