

전기강판의 2차원 교번자계 특성을 고려한 대형 BLDC모터의 자계분포 해석

윤희성*, 송민호*, 신판석**, 고창섭*
 충북대학교*, 홍익대학교**

Magnetic Field Analysis of Large-scale BLDC Motor considering Two-dimensional Alternating Magnetic Properties of Electrical Steel Sheet

Hee Sung Yoon*, Min Ho Song*, Pan Seok Shin**, Chang Seop Koh*
 Chungbuk National University*, Hongik University**

Abstract - 본 논문에서는 전기강판의 2차원 교번자계 특성을 고려한 대형 영구자석 BLDC 모터의 자계 분포를 해석한다. 등방성 전기강판의 2차원 자기특성은 2차원 Single Sheet Tester를 이용하여 측정되었고, 그 결과는 확장된 B-H곡선 근사화방법을 통하여 유한요소 해석에 적용되었다. 제안된 유한요소 해석을 통하여 BLDC 모터에서의 자계 및 철손 분포가 해석되었고, 그 결과는 일반적인 유한요소 해석에 의한 결과와 비교되어진다.

1. 서 론

최근 들어 MW급 대형 영구자석 BLDC 모터 (permanent magnet brushless DC motor)가 전기 기차와 선박 등에서의 추진수단으로써 활발히 활용되어지고 있다 [1]. 철손, 역기전력, 토크 특성 등과 같은 대형 모터의 성능은 기기에 사용되어지는 전기강판의 자기 특성에 크게 영향을 받게 된다. 일반적으로 회전에 널리 사용되는 등방성 전기강판 (non-oriented electrical steel sheet)은 인가 자속밀도의 방향에 대해 동일한 자기 특성을 가진다고 가정되어졌다. 즉 자계세기의 크기는 자속밀도 크기의 함수로만 표현되어졌고, 자계세기의 방향은 자속밀도의 방향과 정확히 일치한다고 가정되어졌다. 그러나 최근 2차원 Single Sheet Tester (SST)의 개발을 통해 등방성 전기강판의 경우라도 인가 자속밀도의 방향에 따라 다른 자기특성이 나타남이 보고되었다 [2]. 그림 1은 인가 교번자속밀도의 방향에 따른 측정된 자계세기의 파형을 비교한 것으로, 교번 자속밀도의 방향은 각각 0°, 15°, 75°이고 크기는 1.3T로 고정되었다. 자계세기의 파형은 등방성 전기강판 50A1300에서 주파수 50Hz하에서 2차원 SST를 이용하여 측정되었다. 그림 1에서 보듯이 등방성 전기강판의 경우에도 자계세기의 크기와 방향이 인가된 자속밀도의 방향에 따라 크게 영향을 받는 것을 볼 수 있다. 따라서 철손, 코깅 토크, 역기전력과 같은 기기의 성능을 정확히 해석하기 위해서는 전기강판의 2차원 자기특성이 유한요소 해석에 반드시 적용되어야 한다.

본 논문에서, 등방성 전기강판 50A1300의 2차원 자기특성이 2차원 SST를 이용하여 측정되어졌고, 측정된 자기특성은 자속밀도의 크기와 방향을 독립변수로 하여 모델링되어지고, 비선형 유한요소 해석 (non-linear finite element analysis)과 결합되어진다. 그리고 제안된 유한요소 해석을 통하여 대형 영구자석 BLDC 모터에서의 자계 및 철손 분포가 해석되고, 그 결과는 일반적인 유한요소 해석에 의한 결과와 비교되어진다.

2. 본 론

2.1 교번 자계특성의 근사화

본 논문에서는 교번 자속밀도의 크기 B_m 과 방향 θ_B 에 대응하는 자계세기의 파형이 2차원 SST에 의해 측정되어지고, 자속밀도와 자계세기의 관계는 그림 2에서 표시된 사각마크와 같이 (B_m, θ_B) 에 대응하는 (H_m, θ_H) 로서 표현되어진다. 여기서, H_m 과 θ_H 는 각 교번자속밀도의 크기가 최대가 될 때의 자계세기의 크기와 방향을 나타낸다 [3]. 교번 자속밀도의 크기와 방향을 변화시키면서 이러한 과정을 반복해서 수행하면 (B_m, θ_B) 와 (H_m, θ_H) 의 관계는 그림 3과 같이 구해진다. 그림 3으로부터 50°~55° 부근에서 투자율이 가장 작게 나타나고, 30° 부근에서 자속밀도와 자계세기의 위상차(θ_{HB})가 가장 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 교번 자속밀도의 파형이 (B_m, θ_B) 로서 표현되어지기 때문에 본 논문에서는 이 근사화 방법을 (B_m, θ_B) 모델이라 하고, 이 모델은 일반적인 B-H곡선 근사화 방법에서 확장된 모델이라 할 수 있다. 그림 4는 교번자계조건하에서 (B_m, θ_B) 에 대응하는 측정된 철손 특성을 나타낸 것이다.

그림 3과 4의 측정된 2차원 자기특성으로부터 등방성 전기강판의 경

우에도 인가자계의 방향에 따라 그 특성이 달라지고, 자속밀도와 자계세기의 방향이 다르게 나타남을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 유한요소법을 이용하여 등방성 전기강판이 사용되는 전기기기의 특성 해석을 수행할 경우, 그림 3과 4에서 표시된 전기강판의 제조업체에 의해 제공되는 카탈로그 데이터만을 이용하여 해석을 수행하게 된다. 즉, Rolling direction (RD)에서 측정된 하나의 B-H곡선과 철손 곡선만을 이용하고, 자속밀도와 자계세기의 방향이 정확히 일치한다고 가정하여 해석을 수행하게 된다. 이는 전기기기의 특성 해석에 있어 부정확한 결과를 가져올 수 있다. 따라서 기기의 정확한 특성 해석을 위해서는 2차원 자기특성이 반드시 고려되어야 한다.

2.2 유한요소식

그림 3의 2차원 자기특성이 고려된 자속밀도와 자계세기의 관계를 나

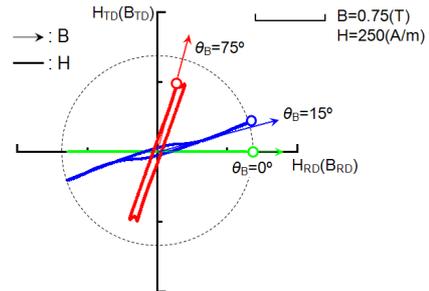


그림 1. 교번 자속밀도 방향에 따른 측정된 자계세기 파형의 비교 ($B_m=1.3T$).

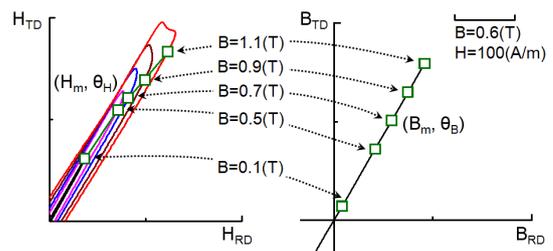


그림 2. 측정된 교번자계 특성으로부터 근사화된 자속밀도와 자계세기의 관계 ($\theta_B = 60^\circ$).

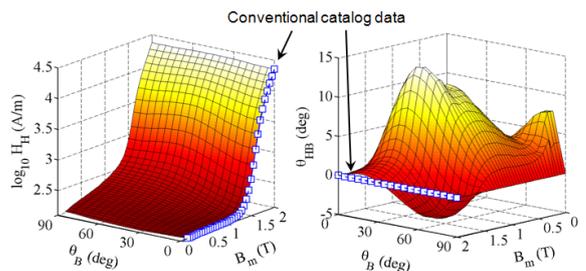


그림 3. 측정된 2차원 자기 특성 (등방성 전기강판, 50A1300).

타내기 위해 자기저항을 표현식은 유효자기저항을 표현식으로부터 다음과 같이 정의되어진다. [3], [4].

$$[\nu] = \begin{bmatrix} \nu_x & 0 \\ 0 & \nu_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_x(B_m, \theta_B)/B_x & 0 \\ 0 & H_y(B_m, \theta_B)/B_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

비선형 유한요소 해석에서 한 요소 (element)에서의 B_m 과 θ_B 가 계산되어진다면, 이에 대응하는 H_m 과 θ_H 가 그림 3을 통해 구해지고, 식 (1)을 이용하여 자기저항을 계산할 수 있다.

비선형 해석을 위해 Newton-Raphson식을 식 (1)에 적용하면 가중잔차와 그 미분치는 다음과 같이 표현되어진다.

$$R_i^{(e)} = \frac{\nu_x B_x d_i}{2} - \frac{\nu_y B_y c_i}{2} - J_0 \frac{\Delta}{3} \quad (2)$$

$$\frac{\partial R_i^{(e)}}{\partial A_j} = \frac{\nu_x d_i d_j + \nu_y c_i c_j}{4\Delta} + \frac{1}{2} B_x d_i \frac{\partial \nu_x}{\partial A_j} - \frac{1}{2} B_y c_i \frac{\partial \nu_y}{\partial A_j} \quad (3)$$

여기서 Δ 는 요소 e의 면적, c_i 와 d_i 는 절점 (node)의 좌표 함수, A 와 J_0 는 자기 벡터 포텐셜 (magnetic vector potential)과 인가 전류밀도를 나타낸다. 식 (3)에서 자기저항의 편미분항은 B_m , θ_B , H_m , θ_H 의 함수이기 때문에 다음과 같이 정의되어진다.

$$\frac{\partial \nu_k}{\partial A_j} = c_1^k \frac{\partial H_m}{\partial B_m} + c_2^k \frac{\partial H_m}{\partial \theta_B} + c_3^k \frac{\partial \theta_H}{\partial B_m} + c_4^k \frac{\partial \theta_H}{\partial \theta_B}, \quad k = x, y \quad (4)$$

여기서 c^k 는 B_m , θ_B , H_m , θ_H 로부터 계산되어지고, 각 편미분항들은 그림 3의 측정된 자기특성의 Bezier surface spline을 이용하여 계산되어진다.

2.3 6MW BLDC모터의 해석결과

그림 5는 6MW급 영구자석 BLDC모터의 사양을 나타낸 것이다. 고정자와 회전자의 RD는 x축 방향과 같고, 회전자의 RD는 회전하게 된다.

그림 6은 일반적인 해석방법과 제안된 해석방법에 의해 계산된 자속밀도 분포를 비교한 것이다. 제안된 해석방법에 의한 결과의 경우 일반적인 해석방법에 비해 자속밀도의 크기가 작게 나타나고, 자속밀도의 분포가 보다 광범위하게 분포함을 알 수 있다. 이는 등방성 전기강판의 이방성 성질에 의해 투자율이 비교적 큰 RD방향으로 자속 경로가 발생하려는 경향이 있기 때문이다.

그림 7은 그림 4의 P1과 P2점에서의 자속밀도 파형을 비교한 것으로 두 방법에 의해 해석된 결과가 크게 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 자속밀도의 최대값이 크게 차이가 발생하는데, 이는 최대 자속밀도 값을 이용하여 철손을 계산하는 종래의 Steinmetz식과 같은 근사식을 이용할 경우 부정확한 철손 해석결과를 가져올 것으로 예상된다. 그림 8은 그림 4의 측정된 철손 특성을 이용하여 계산된 철손 분포를 비교한 것으로 해석방법에 따라 철손 분포가 크게 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 전기강판의 2차원 교변자계 특성을 고려한 유한요소 해석을 대형 BLDC모터의 자계 분포 및 철손 분포 해석에 적용하였다. 2차원 교변자계 특성을 고려하여 해석할 경우 기존의 유한요소 해석법에 의한 결과와 큰 차이가 나타남을 알 수 있었다. 이러한 자계 분포의 차이는 역기전력, 코깅 토크와 같은 특성 해석에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 전기기기의 정확한 특성 해석을 수행하기 위해서는 해석 과정에서 전기강판의 2차원 자기특성이 모델링되어야 하고 그 결과를 고려한 유한요소 해석이 수행되어야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] P. S. Shin, S. H. Woo, Y. Zhang, and C. S. Koh, "An application of Latin hypercube sampling strategy for cogging torque reduction of large-scale permanent magnet motor," IEEE Trans. on Magn., vol. 44, no. 11, pp. 4421-4424, Nov. 2008.
 [2] H. J. Kim, C. S. Koh, S. K. Hong, and P. S. Shin, "Double-excitation type single sheet tester for the measurement of the magnetic characteristics of the electrical steel sheets," Trans. of KIEE, vol. 54-B, no. 10, pp. 461-469, Oct. 2005.
 [3] H. S. Yoon, Y. H. Eum, Y. Zhang, P. S. Shin, and C. S. Koh, "Comparison of magnetic reluctivity models for FEA considering

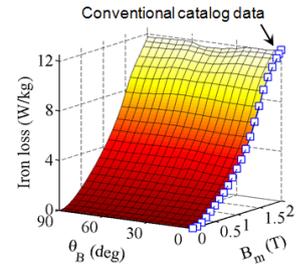


그림 4. 측정된 철손 특성 (등방성 전기강판, 50A1300).

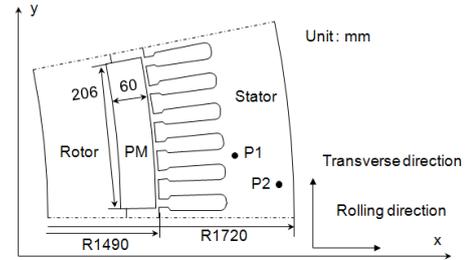
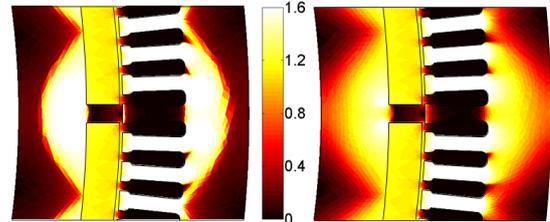


그림 5. 6MW급 BLDC모터의 사양 (1/32 model).



(a) 일반적인 해석방법 (b) 제안된 해석방법
그림 6. 자속밀도 분포의 비교.

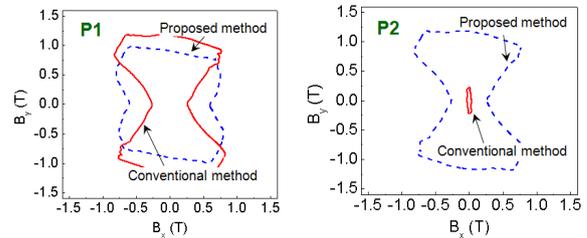
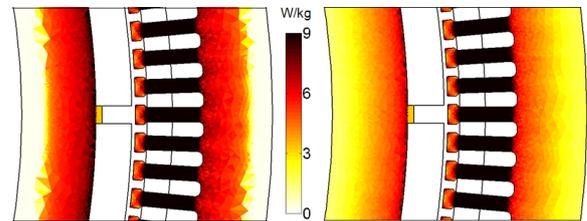


그림 7. 그림 4의 P1과 P2점에서의 자속밀도 파형 비교.



(a) 일반적인 해석방법 (b) 제안된 해석방법
그림 8. 철손 분포의 비교.

two-dimensional magnetic properties," IEEE Trans. on Magn., vol. 45, no. 3, pp. 1202-1205, Mar. 2009
 [4] M. Enokizono and N. Soda, "Finite element analysis of transformer model core with measured reluctivity tensor," IEEE Trans. on Magn., vol. 33, no. 5, pp. 4110-4112, Sep. 1997.
 [5] K. Fujiwara, T. Adachi, and N. Takahashi, "A proposal of finite-element analysis considering two-dimensional magnetic properties," IEEE Trans. on Magn., vol. 38, no. 2, pp. 889-892, Mar. 2002.