자성 측정 방법에 따른 BLDC 전동기의 전자계 특성해석

김지현, 하경호, 권오열, 차상윤, 김재관
포스코 기술연구소 전기강판연구그룹

Finite Element Analysis of BLDC Motor Characteristic according to Magnetic Property Measurement Methods

Ji-Hyun Kim, Kyung-Ho Ha, Oh-Yeoul Kwon, Sang-Yoon Cha, Jae-Kwan Kim,
Electrical Steel Research Group,
Technical Laboratory, POSCO

Abstract - This paper deals with finite element characteristic analysis of brushless DC motor according to magnetic property measurement methods. Magnetic property data for non-oriented (NO) electrical steel for electric motors are measured by the Epstein test which is considered as the international standards. Data from Epstein test may result in discrepancy from motor characteristic tests due to innate anisotropic property of NO electrical steel. Finite element analysis were performed for a BLDC motor by various measurement methods such as Epstein test, Ring test and single sheet test (SST), and calculated results were compared with considering anisotropic property conditions

1. 서 론

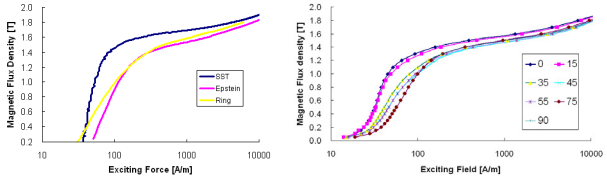
최근 들어 전기강판 및 영구자석 등과 같은 재료의 발전과 더불어 모터의 성능이 향상되고 있으며, 이에 따른 모터의 설계 단계에서부터 제작에 이르기까지 전기강판의 특성을 효율적으로 활용하기 위하여 전기강판의 제반 특성에 대한 이해가 중요하다. 전기강판의 자기적 특성은 모터 성능에 미치는 중요한 인자로써 모터 설계시 정확한 물성치의 입력이 필요하다. 특히, 최근 고정밀 모터 개발시 이상 고조파 성분의 코깅토크 등이 발생하거나, 고효율 고속 모터 등에서 해석된 철손 수치가 실험치와 다소 상이한 경우가 발생하는데 이는 해석에 사용된 전기강판 자성 특성이 실제 모터 동작시 철심내부에서 발생하는 현상과 다르기 때문이다.

일반적으로 철강회사에서는 무방향성 전기강판 자기적 특성은 자구미세화 전기강판을 제외하고 국제 표준 규격에 의거 Epstein법으로 측정하여 등급 판정용으로라는 조건하에서 측정된 것이기 때문에 모터의 성능 및 전자장해석의 정밀도에 영향을 미치게 된다. 자성측정법은 Epstein법 이외에도 SST 방법과 Ring 시험법이 있는데 시험편이 측정법마다 다르므로, 모터의 자로의 경로에 가장 유사한 조건에서는 상기 측정법에 따라 얻어진 B-H 자화특성을 이용하여 모터 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 측정방법별 자성데이타를 유한요소해석에 입력으로 사용하였으며, 이때 SST측정법으로 얻어진 방향별 자화곡선을 이용한 전자계 해석시 이방성 해석을 수행하였다. BLDC 모터를 대상으로 코깅토크, 역기전력 및 고정자 철심에서의 자속밀도 분포를 비교하였다.

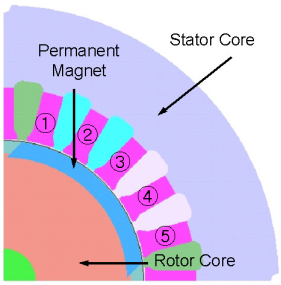
2. 본 론

2.1 자성 측정 방법에 따른 B-H 특성

본 연구에서 시행한 자성 측정 방법으로는 Epstein, SST 및 Ring 시편을 이용하였다. 그림 1은 자성 측정 방법 및 방향별 B-H 특성곡선을 나타내었다. 본 연구에 사용된 전기강판은 35PN440(S18) 이다.



<그림 1> 자석 측정 방법 및 방향별 B-H 특성 곡선



극수	4
고정자 슬롯수	24
회전자 재질	35PN440
고정자 재질	35PN440
회전자 외경	69mm
고정자 외경	136mm
철심장	40mm
공극	0.5mm
영구자석 Br	1.21T

<그림 2> 해석 모델 외형도

<표 1> 해석 조건

조건	측정방법	해석방법	B-H 커브 수
Method1	Epstein	등방성	1 curve
Method2	Ring	등방성	1 curve
Method3	SST(0°, 90°)	이방성	2 curves
Method4	SST(theta)	이방성	7 curves

여기서 방향별 B-H 특성곡선은 압연방향을 0°로하고 압연방향에 수직지점을 90° 가 되게 기준을 잡아 각도별로 시편을 제작하여 측정한 결과이다. 그림 1(좌)에서 보는 바와 같이 자성 측정방법에 따라 B-H 특성이 달라지고 따라서 각각의 B-H 특성에 대해 전자장해석 결과가 상이하게 된다. 그림 1(우)에서 자화방향별 B-H특성이 상이함을 보이며, 0°에서 가장 자속밀도가 높고 45° ~ 55°에서 특성이 나쁨을 확인할 수 있다.

2.2 해석 조건 및 방법

본 연구에서 특성 해석을 위한 모델 모터는 4극 24슬롯의 표면부착형 영구자석 BLDC 모터이며 해석모델 외형은 그림 2와 같다. 해석모델에 사용된 영구자석은 희토류계 Nd-Fe-B 이며, 해석시 스큐 및 영구자석의 오버행(overhang)효과를 고려하지 않았다. 이방성을 고려한 2차원 정자계 해석에서의 자기벡터포텐셜로 표현되는 지배방정식은 식 (1)과 같다. 여기서 **A**는 z방향 성분의 자기벡터포텐셜, **J**는 영구자석 등가전류밀도이며, 해석조건에 따라 재질의 투자율에 대한 수학적 모델링은 다르게 적용된다. [1]

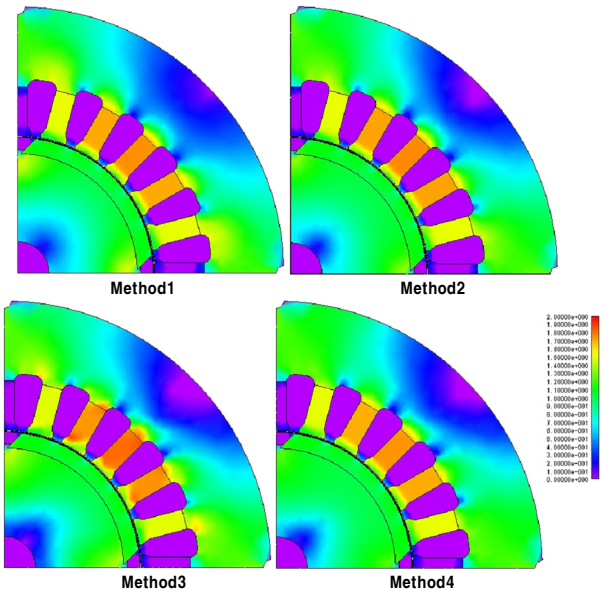
$$\nabla\times\left(\frac{1}{\mu}\right)\nabla\times\vec{A}=\vec{J},\quad \mu=\begin{bmatrix}\mu_{xx} & \mu_{xy}\\ \mu_{yx} & \mu_{yy}\end{bmatrix} \quad (1)$$

유한요소해석시 표 1과 같은 조건으로 측정된 B-H곡선을 사용하였으며, 회전수 1800rpm 무부하조건으로 해석을 실시하였다. 여기서 이방성 해석 중 SST(0°, 90°)는 압연방향 (0°) 및 압연수직 방향 (90°)의 SST B-H 특성만을 고려한 것을 의미하며 SST(theta)는 각 각도별 (0°, 15°, 35°, 45°, 55°, 70°, 90°)SST B-H 특성을 고려하였으며, 이방성 해석시 B와H 벡터는 일치하는 것으로 가정하여 위상각 은 0°로 처리하였다.

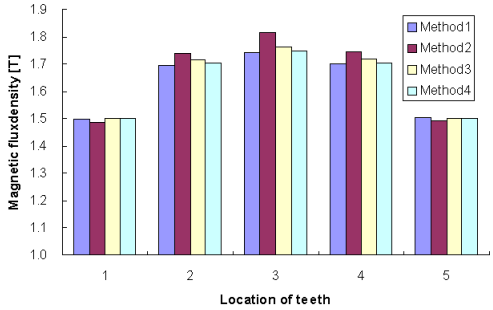
2.3 해석 결과

2.3.1 자속밀도

회전자가 d축 위치에서의 자속밀도 분포도는 그림 3과 같다.



〈그림 3〉 자속밀도 분포



〈그림 4〉 치의 자속밀도 비교

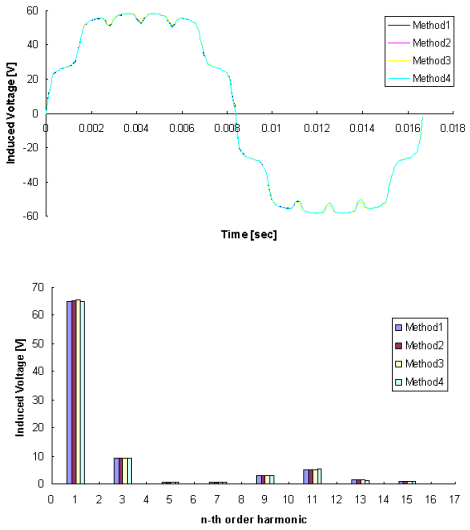
고정자 치(teeth)에서의 자속밀도 분포를 보면 Epstein 및 Ring 조건에서는 균일한 자기분포를 가지나 Method 3의 치의 자속밀도는 그림 1의 3번치를 기준으로 대칭이 되지 않고, 부분 포화가 심하며 누설자속이 많아짐을 확인 할 수 있다. 또한 고정자 요크(yoke)에서 Epstein 및 Ring을 이용한 이방성 해석 조건에 비해 상대적으로 자속밀도가 높아짐을 확인할 수 있다. 그림 4는 치에서의 자속밀도를 상호 비교해 놓았다. 치의 설계 자속밀도는 1.7T 정도로 Epstein 조건에서는 해석치와 유사한 결과를 확인할 수 있으나 Method 3으로 해석한 경우 치의 자속밀도가 1.8T이상 증가하고 그림 4와 같이 치 2, 4에서의 크기가 비대칭적임을 확인할 수 있다.

2.3.2 역기전력

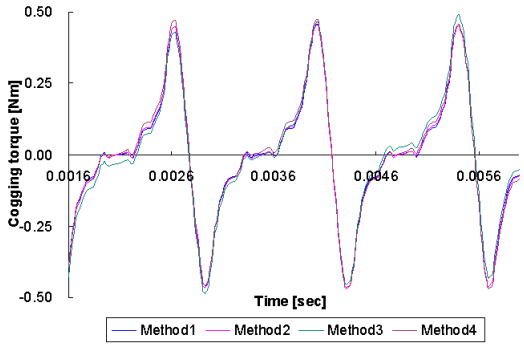
각 조건별로 역기전력을 계산한 뒤 푸리에변환 (FFT)을 실시하여 그림 5에 나타내었다. Method1 대비 Method3의 기본파 성분 차이는 1.2% 증가 하나 전체적으로 비교해 볼 때 크게 차이가 나지 않는데, 이는 역기전력의 경우 권선에서 전체 쇄교자속량(flux linkage)이 일정하기 때문이다. 따라서 국부적인 특성은 달라지지만 역기전력과 같은 전체적인 특성에는 차이가 적다.

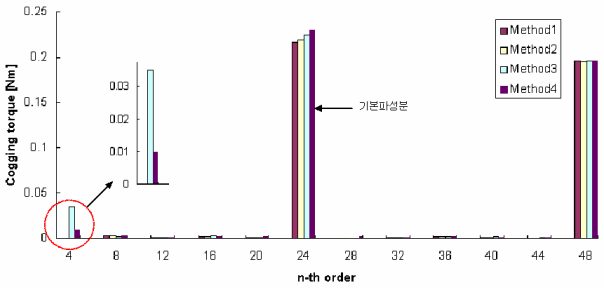
2.3.3 코깅토크

코깅토크의 경우 조건별 차이가 다소 발생하였다. 그림 6은 계산된 코깅토크 파형(상) 및 푸리에 변환(하)결과를 계산 조건별로 비교한 것으로 Method1, 2의 경우 코깅토크의 최대치가 일정한 반면 Method 3, 4와 같이 이방성 해석을 고려할 경우 코깅토크의 최대치가 서로 다르고, 주기별로 대칭을 이루지 않는다. 24차 고조파의 경우 Method 1 대비 Method 4는 6.6%의 차이가 발생한다. 모터 회전주파수의 4배에 해당하는 4차고조파의 경우 전기강판의 자기적 이방성에 의해 크게 발생하게 된다. Method 3 에서의 코깅토크 최대치간 편차가 가장 크게 나타나는데, 이는 자기적 이방성이 코깅토크에 상당한 영향을 주는 것으로 추론할 수 있다.



〈그림 5〉 역기전력 특성





〈그림 6〉 코깅토크 특성

3. 결 론

본 논문에서는 무방향성 전기강판 자성측정방법별 특성데이터를 이용 BLDC 모터의 무부하 특성해석을 실시하여 해석 조건별 차이를 분석하였다. 자기이방성을 고려시 권선에 쇄교되는 총쇄교자속량에 의한 역기전력과 같은 특성은 해석 조건별 차이는 미미하였으나 국부적인 관점에서 볼때 고정자 치 및 요크(yoke)에서 자속밀도의 차이가 크게 발생하고 국부포화를 야기시켜 국부발열의 원인이 될것으로 사료된다. 자기이방성에 기인한 코깅토크의 이상 고조파 성분에 의해 이상 진동 및 소음이 발생할 수 있으므로 모터 설계시 이에 따른 고려가 필요하다.

[참 고 문 헌]

[1] M. Enokizono et al,."Study on Torque Improvement of Single-Phase Induction Motor by using FEM", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 35. No. 5. 1999