

전기강판의 가공 및 포화를 고려한 IPM 모터의 철손 해석

하경호*, 김지현*, 김재관*, 이선권**, 나민수**
 포스코 기술연구원 EMES연구프로젝트팀*, LG전자 C&M 사업팀 모터 그룹**

Core Loss Analysis of IPM Motor Considering Magnetic Saturation and Manufacturing of Electrical Steel

Kyung-Ho Ha*, Gi-Hyun Kim*, Jae-Kwan Kim*, Technical Research Institute, POSCO
 Sun-Kwon Lee**, Min-Su Na**, LG Electronics Home Appliance Company

Abstract - This paper proposes a core loss analysis method to obtain high accuracy prediction by using Multi-curve representing magnetic properties of a electrical steel in Finite Element Analysis (FEA). Generally, the magnetic prosperities of the electrical steel are measured by Epstein Method based on the international standards that are not good sufficient to predict motor performances. The method only aims to grade products in steel companies. The magnetic properties of actual stator core is highly different to those given by steel companies due to the fact that stacking effect, shearing stress, nature anisotropy of electrical steels are not taken into account. In this paper, the magnetic properties are variously measured by three measuring devices, and then the several BH curves and BW curves obtained are used to analyze the core loss of a IPM. The BH curve in the high magnetic field are extrapolated using the mathematical formulation with the maximum saturation magnetic polarization measured

1. 서 론

전기기기는 전원을 공급하는 도체와 도체를 취부 할 수 있는 기구부의 철심 구조로 구성되고, 이러한 철심 구조는 기구부로서의 역할 뿐만 아니라 자로의 역할로써 기기의 성능에 중요한 영향을 미친다. 연자성재료 중 전기강판은 기기의 자속과 철손과 관련된 중요한 기능재료로써 대부분의 전기기기에서 채택되고 있으며, 최근에는 고효율 모터의 요구가 증대됨에 따라 전기강판의 자기적 특성에 관심이 증대되고 있다.

무방향성 전기강판의 자기적 특성은 국제 측정규격인 Epstein 측정법으로 가급적 무응력 상태로 가공된 시편을 상온 상태에서 교번자계를 인가하여 측정하게 되며, 철강회사는 측정된 철손과 자속밀도의 수치로부터 제품의 등급을 결정하게 된다. 그러나, 전기강판은 모터로 만들기 위한 가공공정에 의한 열적 기계적 응력과 모터 동작시 에너지 변환 과정에서 철심 내부에서의 비정현적인 복잡한 전자계 현상 등에 기인하여 Epstein 측정 조건과는 다르게 전기강판의 특성이 많이 변하게 되어 모터의 성능을 저하시키게 된다[1]. 따라서, 전기강판을 최적의 상태에서 효율적으로 사용하기 위하여 모터 각 제조 공정을 거쳐 최종 구조에 이르기 까지 전기강판에서 발생하는 제반 자기적 변화에 대한 이해와 현상을 고찰하고, 전기강판 자체의 이방성, 열적 기계적 응력 및 회전자계 하 등에서 자성 분석을 통하여 이를 자기회로 설계 또는 전자계 해석 등에 활용하고 있다 [2,3].

모터의 고정자 철심은 전기강판을 금형으로 타발 후 적층하여 만들게 되는데 철심 전단면에 기계적 응력으로 인하여 자성이 열화되고, 적층으로 인한 층간 손실이 증가하게 된다. 또한, 무방향성 전기강판은 고급제품일수록 자화 방향별 자기 이방성이 증가한다. 따라서, 모터 성능 예측을 위해 수치 해석시 일반적인 Epstein법으로 측정된 수치를 활용할 경우 이러한 가공, 적층, 이방성 등에 의한 손실 영향이 고려되지 않았기 때문에 실제 실험치와 상이한 결과를 얻게 된다. 한편, 영구자석 매입형 영구자석 전동기(Interior Permanent Magnet Type Synchronous Motor: 이하 IPM)의 회전자 림(Rib)에는 영구자석의 자속에 의해 매우 심하게 포화가 된다. 그러나, 일반적인 측정 장비로는 전기강판의 자속밀도를 1.9[T]이상의 고자장 영역까지 측정하는 것이 쉽지 않다. 따라서, 전자계 해석을 정밀히 수행하기 위해서는 측정 영역 이외의 고자속밀도까지의 데이터가 반드시 필요하다.

본 논문에서는 모터 철심의 자기회로에 적합한 전기강판의 자기적 특성을 다양한 방법으로 측정하고 이렇게 얻어진 여러 개의 BH곡선과 BW곡선을 해석에 활용할 수 있는 방법(Multi-curve method)을 제안하였다. 전기강판의 자화방향별 특성(이방성)은 단판 자성기(Single sheet test)로, 적층 특성은 스테이터 측정기(Stator test)로, 전주방향 특성은 링측정기(Ring test)로 자화특성(BH곡선)과 철손특성(BW곡선)을 측정

하고, 측정된 BH곡선은 고자장 영역까지 최대포화자화량을 이용하여 보간 하였다. 이렇게 얻어진 여러 개의 Multi-curve를 활용하여 IPM모터의 철손을 예측하고 실험치와 비교하여 본 논문의 접근 방법에 대한 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

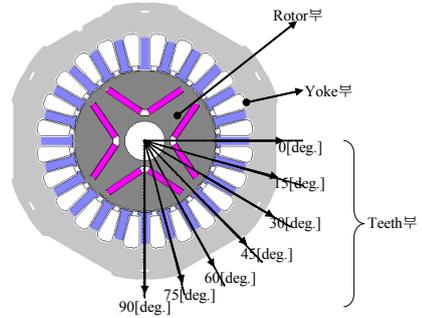
2.1 자성 측정 방법

그림 1은 본 해석방법의 검증을 위하여 사용된 4극 24슬롯의 IPM 모터로써 35PN230의 전기강판을 사용하여 엠보싱 적층으로 만들었으며, 타발 응력에 기인한 열화된 자성을 회복하기 위하여 고정자 철심은 열처리(Stress Relief Annealing: SRA)하였다. 그림 2(d)가 가장 일반적으로 사용되는 Epstein 측정법이나 실제 모터 현상에 사용하기에는 적합하지 않기 때문에, 실제 모터에서의 자기회로 현상과 가장 유사한 조건의 자성을 측정하기 위해서는 그림 2(a~c)와 같은 측정기가 필요하다.

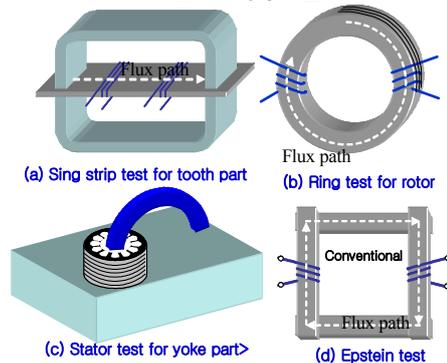
Fig. 2(a) SST(Single Sheet Test) for tooth area: 전기강판은 이방성을 가지므로 그림 1에서 같이 0[deg]로부터 15[deg.]간격으로 위치한 각치에서의 전기강판 자기적 특성은 상이 하게 된다. 따라서, 전기강판의 시편을 0~90[deg.]까지 15[deg.]간격으로 7개의 시편을 잘라 그림 2(a)와 같은 장치를 이용하여 자성을 측정하였다.

Fig. 2(b) Ring test for rotor area: 모터의 회전자는 영구자석의 배치로 인하여 전방향으로 자화되므로 이와 가장 유사한 자기회로를 가지는 측정법인 그림 2(b)와 같이 전기강판을 링으로 잘라서 적층후 자성을 측정하였다.

Fig. 2(c) Stator test for stator yoke area: 고정자는 전기강판의 날장을 적층하여 사용하므로 층간 및 엠보싱 영향에 기인한 자성을 얻기 위하여 그림 2(c)와 같이 실제 고정자 철심 상태로 자성을 측정하였다.



〈그림 1〉 해석 모델



〈그림 2〉 모터 영역별 자기적 특성 측정방법

2.2 자성 측정 결과

그림 3은 상기 3가지 방법으로 측정된 BH곡선으로 측정방법에 따라 자화 특성이 매우 상이함을 볼 수 있으며, Stator test로 측정된 자기적 특성이 가장 나쁠 수 있다. 여기서, Stator test와 SST에 사용된 시편은 열처리된 고정자 철심과 전기강판 시편을 사용하였다.

2.3 B-H curve Modelling

일반 자성 측정 장비로는 고자장 영역까지 측정하기 쉽지 않기 때문에 측정 데이터를 기준으로 고자장 영역을 보간하는 방법을 그림 4에 나타내었다. 모터 해석시 사용되는 일반적 방법으로는 그림 4의 (1) 방법으로 측정된 마지막 A점과 B점의 기울기를 이용하여 보간하는 방법과, (2)번 방법과 같은 마지막 데이터 B점 이후를 공기의 투자율로 보간하는 방법이 있으나 인가 자계가 높을수록 (1)번 방법은 자속밀도가 과대평가, (2)번 방법은 과소평가된다. 본 논문에서는 전기강판의 최대포화자화점인 C점을 이용하여 B점과 C점의 사이는 2차함수로 보간하고, C점 이후는 공기의 투자율로 보간하였다. 여기서, C점은 전기강판 고유의 최대포화자화로 성분계를 통한 추정 또는 VSM등의 계측 장비로 측정 가능하다. 본 전기강판 제품의 최대포화자화는 1.96[T] 정도 된다.

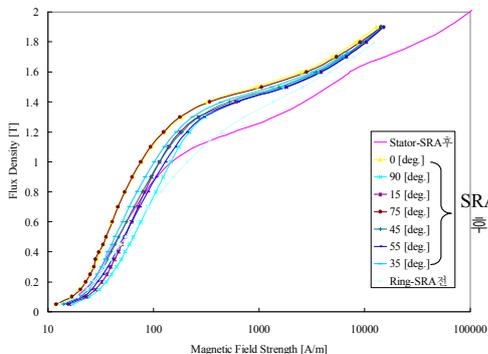
그림 5는 그림 4의 (3)번 방법으로 보간된 결과로써 (1)번 방법과 (2)번 방법의 사이에 존재함을 볼 수 있다.

2.4 전자계 해석 방법

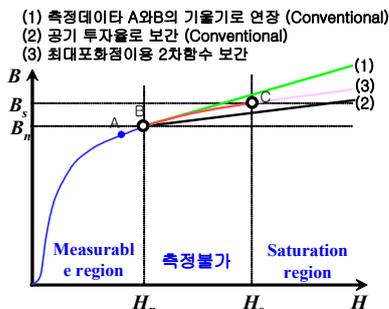
표 1은 전자계 해석 및 철손 해석에 수행된 Multi-BH curve 및 Multi-BW curve 적용 방법을 나타낸 것이다. 유한요소해석을 위하여 고정자 요크 영역에는 Stator test로 측정된 BH curve, 고정자 치 영역에는 SST로 측정된 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90[deg.] 방향의 7개의 BH curve, 회전자 Ring test로 측정된 BH curve, 도합 9개의 BH 곡선을 2.3절의 방법으로 보간된 곡선을 각 영역에 적용하여 해석을 수행하였다. 철손 해석은 고주파 분석 기법을 이용하였으며 BW곡선 이용방법은 전자계 해석시와 동일하며 각 BW곡선은 30Hz~10kHz까지 14개의 주파수에서 측정된 데이터를 활용하였다.

2.5 철손 해석 결과

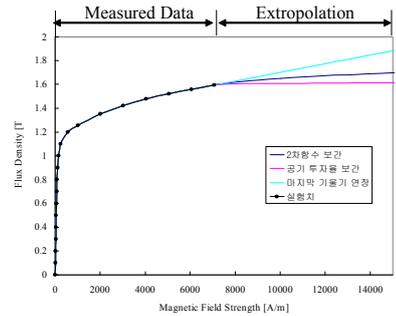
그림 6의 우측은 Epstein법으로 측정된 1개의 BH곡선과 1개의 BW곡선을 이용하여 해석된 철손 분포이며, 좌측은 9개의 곡선을 이용하여 해석한 철손 분포이다. 기존 해석방법과 비하여 고정자 요크에서 손실이 크고 치 위치별 손실 분포가 다르게 보임을 알 수 있다. 표 2는 IPM 모터의 3600[rpm]에서 실험치 철손과 해석치 철손을 비교한 것으로 Multi-curve를 이용하여 해석한 것이 실험치에 근접함을 알 수 있다.



〈그림 3〉 해석 방법



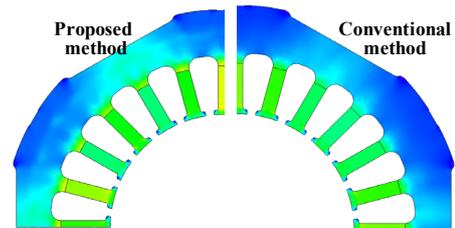
〈그림 4〉 B-H곡선 고자장 보간방법



〈그림 5〉 Stator test기로 측정된 B-H곡선 고자장 보간 결과

〈표 1〉 Multi-curve 방법을 이용한 전자계 해석 방법

		Multi-curve Method (Proposed method)	Conventional Method
전기강판 자성측정방법		Stator, SST, Ring tester	Epstein tester
전자계 해석	B-H curve	Several curves(9 curves) • Yoke: Stator tester 1 curve • Teeth: SST tester 7 curves • Rotor: Ring tester 1 curve	One curve • 전체영역: Epstein test
	B-H Extrapolation	2차함수 (최대포화자속밀도이용)	공기의 투자율
철손해석	B-W curve	Several curves(9 curves) • Yoke: Stator tester 1 curve • Teeth: SST tester 7 curves • Rotor: Ring tester 1 curve	One curve • 전체영역: Epstein test
	Frequency	Multi-Frequency (14 curves:30Hz~10kHz)	1- or 2-Frequency



〈그림 6〉 Multi-curve를 이용한 방법(좌측)과 일반적 방법(우측)의 모터 철심에서의 철손 분포 비교

〈표 2〉 철손 해석 결과 비교

Speed [rpm]		3600
Measured Core loss [W]		14.34
New Method	Total loss [W]	13.80
	Error [%]	3.72
Conventional Method	Total loss [W]	11.49
	Error [%]	19.85

3. 결 론

본 논문에서는 유한요소해석에 필요한 전기강판의 자기적 특성을 다양한 방법으로 측정하여 이를 모터 해석에 활용하는 방법을 제시하였다. 전기강판의 가공, 적층, 이방성 영향등을 고려하여 측정된 여러개의 BH 곡선과 BW곡선을 이용하여 철손 해석에 적용한 결과 일반적 방법(Epstein법)으로 측정된 결과를 이용한 것보다 실험치에 더욱 근접함을 보였다. 본 해석 방법은 실제 모터 현상에 가까운 전기강판의 자성을 이용함으로써 모터의 성능 예측 향상에 도움이 되리라 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 하경호, 차상윤, 김재관, "전기기기 코어용 전기강판 소재의 자기적 특성", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 페이지, 2004
- [2] 하경호, 차상윤, 김재관, 홍정표, "영구자석형 모터의 고정자 철심에서 자계의 거동 및 철손 분석", 전기학회논문지, Vol. 55B, No. 2, pp.78-82, 2006
- [3] 하경호, 임양수, 권오열, 김지현, 김재관, "영구자석형 프릭션 토크 저감을 위한 고정자 철심의 열처리 및 발생원 분석", 전기학회논문지, Vol. 57B, No. 10, pp.1752-1758, 2008