

모터 코아 내부에서 비정현적 자계의 거동에 따른 철손 해석

하경호, 차상윤, 김재관, *임암수, *허윤, **홍정표

POSCO 기술연구소 전기강판연구그룹, *대우정밀 기술연구소 PCM팀, **참원대학교 전기공학과

Analysis of Iron Loss Caused by Non sinusoidal Magnetic Behavior in Motor Core

Kyung-Ho Ha, Sang-Yoon Cha, Jae-Kwan Kim, Yang-Su Lim, Yoon Hur
Electric Steel Group, Technical Laboratory, POSCO, *PCM Team, Daewoo Precision

Abstract - This paper investigates magnetic field behavior and its iron losses in the stator core using electrical steels. The analysis model is a brushless motor with the permanent magnet. The elliptical rotating and alternating flux distributions with non-sinusoidal waveforms are obtained by Finite Element Method and then their harmonic components are extracted. Based on these results, the local iron losses in the stator core caused by the harmonic flux are calculated. Furthermore, this paper explains the relation between the complex flux waveform and iron loss produced in each part of the stator core.

1. 서 론

최근 산업 시스템이 다양해지고 에너지 절감 요구가 높아짐에 따라 각종 전력변환기들은 고출력, 고효율, 고성능화되어 가는 추세이며, 이에 의해서 발생하는 반열과 손실은 효율 저하뿐만 아니라 설계 자유도 저해 요소로 작용함에 따라 저손실 소재의 필요성이 더욱 부각되고 있는 실정이다. 따라서, 기기의 에너지 변환율을 극대화하기 위해서 효율적인 자기회로 구성과 손실을 최소화할 수 있는 자성재료의 선택이 중요하다.

전기강판은 전동기, 변압기와 같은 전력변환기에서 중요한 기능재료로써, 최적의 상태에서 효율적으로 사용 토록 하기 위해서는 고객사 제품의 자기회로 설계 및 특성분석 단계에서부터 각 공정을 거쳐 최종 제품에 이르기 까지 전기강판에서 발생하는 제반 자기적 특성의 변화에 대한 이해와 현상고찰이 필요하다. 특히, 전기강판이 전동기의 철심으로 사용될 경우 철심 내부에는 비정현적인 양상의 복잡한 자계분포가 발생되고, 이러한 현상은 전동기의 철손을 더욱 증가 시킨다 [1]. 따라서, 본 연구에서는 전동기 운전 중 철심 내부에서 발생하는 자계의 거동을 분석하였으며 이러한 자계분포가 철손에 미치는 영향을 살펴보았다.

본 논문에서는 전자장 수치해석기법을 사용하여 전동기 철심 내부에서 발생하는 자계분포를 분석하고, 한주기 동안의 자속밀도 최대치와 최소치의 비로부터 회전자계영역과 교번자계 영역으로 구분하였다. 왜곡된 자속밀도 과형을 주파수 분석하여 각 고조파의 자속밀도에 의한 철손을 계산함으로써 고정자 철심에서 발생하는 철손의 분포를 살펴보았다 [2]. 또한, 다양한 강종을 대상으로 전동기의 회전속도에 따른 전체 철손과 고조파에 의한 철손의 변화를 해석하여 전기강판이 전동기의 철손에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 해석 모델

해석 대상은 4극 24슬롯의 영구자석 매입형 브러시

레스 전동기로써, 정격출력은 3.5[kW], 정격속도 3500[rpm], 영구자석의 잔류자속밀도는 1.2[T]이다.

그림 1는 트로이달 링시편과 엡스타인 시편의 형상과 자속의 경로를 나타낸 것이다. 일반적으로 엡스타인 측정법(Epstein test)은 압연방향과 압연직각방향의 시편 이용하여 정현적인 교번자계 상태에서 자기적 특성을 측정하게 된다. 그러나, 전동기와 같은 회전기기에서는 두 방향 뿐만 아니라 전방향으로 자화가 되므로 엡스타인 측정 결과를 활용하기에 적합하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 전기강판의 전방향 특성을 반영할 수 있는 토로이달 링시편으로 측정된 철손 데이터를 활용하였다.

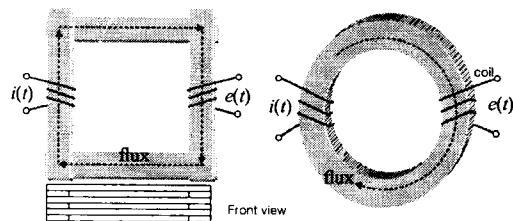


그림 1. Epstein(좌) 과 Toroidal ring(우) 시편의 자속경로

3. 이론적 배경

3.1 해석 방법

그림 2는 전동기 철심에서 발생하는 자속의 분포 측정에서부터 철손을 계산하기 위한 해석과정을 도시한 것이다. 전기강판의 자성 측정은 정현파 자계분포하에서 측정이 되나, 실제 전동기에서 발생하는 자계는 왜형을 가지는 비정현적 분포특성을 가진다. 따라서, 이러한 왜형적인 자계의 분포에 기인한 손실 특성을 반영하기 위하여 자속밀도를 주파수 분석하여 정현적인 분포의 고조파 합성으로 표현하고, 각 고조파성분의 자속밀도 크기와 주파수에 해당되는 철손을 전기강판의 철손 곡선에서 찾아 고조파성분에 기인한 철손을 예측하였다.

그림 3은 링시편을 이용하여 교번자계하에서 50(Hz)에서 15(kHz)까지 측정된 자속밀도 크기에 따른 철손 데이터로, 특정 고조파 성분의 주파수와 자속밀도에 대한 철손을 계산하기 위하여 본 데이터를 보간하여 사용하였다. 상기 해석방법 적용을 위하여 다음과 같은 가정을 두었다.

- 전기강판의 자기적 특성은 등방성이다.(방향별 자성의 평균치인 링시편의 자성데이터 사용)
- 축방향 자계변화는 없다.(직통 효과 손실 증가 없음)
- 회전자에서 발생하는 히스테리손실은 무시하였다.
- 회전자계에 기인한 손실 증가 없다.
- 고조파 성분이 손실에 미치는 영향은 상호 독립적이 다.

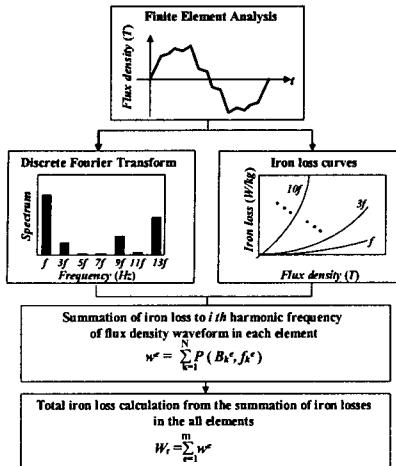


그림 2. 고조파 철손 해석과정

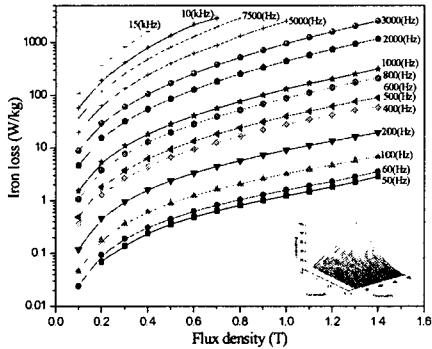


그림 3. 자속밀도와 주파수에 따른 철손(링측정)

3.2 해석 방법

브러시리스 전동기를 해석하기 위한 정상상태에서의 전자계 지배방정식은 엑스웰방정식으로부터 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\nabla \times (\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_0 + \vec{J}_m \quad (2)$$

여기서, u 는 자성체의 투자율, A 는 자기벡터 포텐셜, J_0 는 외부 인가전류, J_m 은 영구자석에 의한 자화전류를 나타낸다. 무부하 조건에서 시간적 공간적으로 변화하는 한주기 동안의 자속밀도 변화를 각 요소에서 계산하고, DFT를 이용하여 자속밀도를 주파수 분석하였다.

$$B(k) = \sum_{n=0}^{Z-1} B_p(n) e^{j(2\pi k)n/N} \quad (3)$$

여기서, k 는 고조파 차수, Z 는 해석된 이산 데이터 수, $B(k)$ 는 k 차 고조파 성분에 대한 자속밀도, $B_p(n)$ 은 해석 데이터 n 포인트에서의 자속밀도값이다.

3.3 철손 해석

임의 요소에서 각 고조파 성분의 주파수와 자속밀도에 해당되는 철손은 전기강판의 철손데이터를 보간하여 찾았으며, 임의 한 요소에서 발생하는 전체 철손은 각 고조파 성분에 의해서 발생하는 철손을 N 차 까지 합한 것이다. 해석모델 영역전체의 철손은 각 요소에서 계산된 철손을 더하여 얻을 수 있다. 회전자 철심은 영구자석에 의하여 자계의 변화가 없이 거의 일정하므로 회전자에서 발생하는 히스테리시스 손실은 무시하였다.

$$w^e = \sum_{k=1}^N P(B_k^e, f_k^e) \quad (4)$$

$$W_t = \sum_{e=1}^m w^e \quad (5)$$

여기서, w^e 는 임의 한 요소 e 에서 발생하는 전체 철손, P 는 특정 주파수와 자속밀도 하에서 측정된 전기강판 철손이다. 여기서, W_t 는 해석모델 영역의 전체 철손, m 은 해석영역 전체의 요소수를 나타낸다.

4. 결과 고찰

4.1 자계의 거동 분석

그림 4는 전동기 무부하 조건에서 치의 끝단부(Tooth tip: P1), 치의 중간부(Tooth body: P2), 치와 요크 연결부(Tooth root: P3), 요크부(Yoke: P4, P5)에서 발생하는 시간에 따른 자속밀도의 공간적 변화를 나타낸 것이다. 패적이 관측된 5곳의 위치는 그림 5와 같다. P2, P4, P5에서는 자화의 방향이 공간적으로 회전하지 않고, 단방향으로 크기만 바뀌는 교번자계가 발생하는 반면, P3와 P1은 타원형의 회전자계가 발생하고, 왜형율이 다른 영역에 비하여 상대적으로 크게 나타났다. 한주기 동안의 자속밀도 패적이에서 최대치와 최소치의 비가 0.1보다 크면 회전자계, 0.1보다 작으면 교번자계 영역으로 정의하였다. ($\beta = B_{min}/B_{max}$). 그림 7은 각 요소에서 계산된 를 이용하여 회전자계영역과 교번자계영역을 구분하고 등고선으로 표기한 것이다.

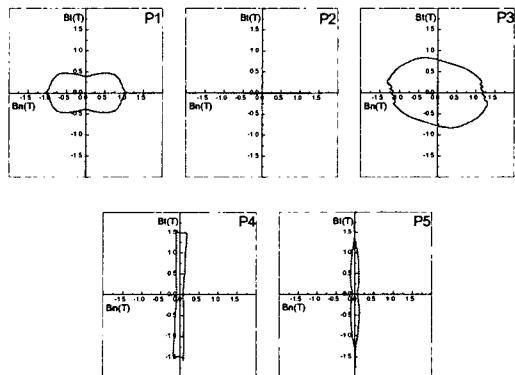


그림 4. 고정자의 철심에서 자속밀도 패적

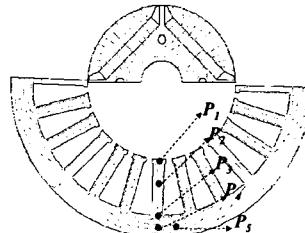


그림 5. 등포텐셜 분포도 및 관측 위치

4.2 철손 해석

그림 6은 모터가 3600[rpm]으로 회전시 철심에서 발생하는 각 위치에서의 철손분포와 기본파 성분을 제외한 고조파 성분에 기인한 철손의 분포를 나타낸 것이다. 여기서, 자계의 기본 주파수는 120(Hz)이다. 그림 6(a)에서 치영역이 요크 영역에 비하여 상대적으로 철손이 크게 발생하고 있다. 특히, 그림 6(b)에서 치끝단과 요크와 치가 연결되는 부위에서 철손이 가장 크게 나타나는데 이는 다른 영역에 비하여 자속밀도 분포의 패�이 많이 찌그려져 고조파 성분을 많이 포함하고 있기 때문이다.

4.3 강종별 손실 분포

표 1은 고정자 철심의 전기강판 재질에 따른 철손의 영향을 분석한 것으로, 전동기가 3600[rpm] 회전시 발생하는 전체 철손 W_t , 기본파를 제외한 50차까지의 고조파 철손 W_h , 그리고 이의 비율을 나타내었다. 본 결과에서 저급 E강종 사용시 전체철손은 123.5[W]이며, 기본파를 제외한 고조파 철손은 34.8[W]로 전체 철손에서 28.1[%]를 차지한다. 반면 A강종은 고조파 철손이 전체 철손에서 20[%]로 고급강종 일수록 고조파에 기인한 철손이 감소됨을 알 수 있다. 그럼 6은 전동기의 회전속도가 변시 강종별 철손 변화 추이를 나타낸 것이다. 저급강종일수록 속도가 증가함에 따라 철손의 증가가 기하급수적으로 증가함을 보이고 있다. 그럼 7은 그림 7에서 도출된 회전자계 영역과 교변자계 영역에서 발생하는 철손의 양을 강종별 비교한 그래프이다. 회전자계 영역에서 발생하는 철손이 전체 철손에서 약 70[%]를 차지하고 있다.

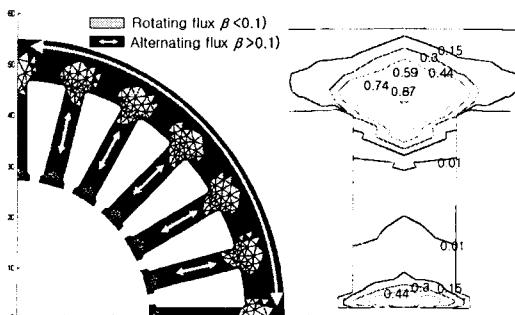


그림 6. 회전/교변자계 영역의 구분(좌) 및 등고선(우)

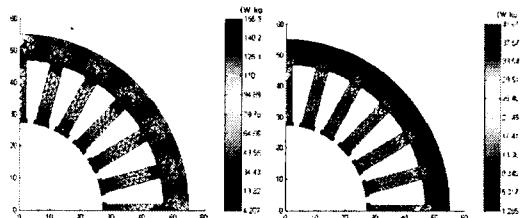


그림 7. 철손 분포(좌: 전체 철손, 우: 고조파 철손)

표 2. 강종별 철손(W_t : 전체손실, W_h : 고조파손실)

A-Grade	B-Grade	C-Grade	D-Grade	E-Grade	
W_t (W)	76.9	84.0	100.6	110.8	123.5
W_h (W)	15.2	17.8	27.8	32.6	34.8
W_h/W_t (%)	19.7	21.2	27.6	29.4	28.1
ΔW (%)	-	9.2	30.8	44.1	60.6

5. 결 론

본 논문에서는 브러시리스 전동기를 대상으로 고정자의 전기강판에서 자계의 거동파, 고조파 철손해석으로부터 다음과 같이 결론을 도출하였다.

- 치의 중간과 요크 영역에서는 정현적인 분포에 가까운 교변자계가 발생한다. ($\beta=B_{min}/B_{max} > 0.1$)
- 치의 끝단, 치와 요크가 만나는 영역에서는 비정현적

인 자계분포의 타원 또는 회전자계가 발생한다. ($\beta=B_{min}/B_{max} < 0.1$)

● 교변자계가 발생하는 영역은 고정자 전체 면적의 30[%]가량을 차지한다.

● 전동기 철손은 치의 끝단, 치와 요크가 만나는 영역에서 가장 크게 발생한다.

● 고조파 철손이 전체 철손에서 차지하는 비중은 20~30[%]로 고급강종 일수록 고조파에 기인한 철손이 감소되며, A강종은 B강종에 비하여 철손을 60[%]가량 줄일 수 있었다.

● 회전자계가 발생하는 영역에서의 철손은 전체 철손에 약 70[%]를 차지한다.

이상의 결과로부터 전동기 철심에는 복잡한 양상의 자계분포가 발생하며, 이에 따라 전동기에서 발생하는 손실은 더욱 증가함을 알 수 있다. 그러나, 전기강판의 자기적 특성은 정현적인 분포를 가지는 교변자계 하에서 자속밀도와 철손을 측정한 것으로 실제 모터에 사용하기에는 부적합한 점이 있다. 따라서, 회전자계 또는 고조파 철손과 같은 측정결과를 전동기의 자기회로 설계에 적절히 반영할 수 있는 연구가 필요하다.

[참 고 문 헌]

[1] N. Stanges and R.D. Findlay, "Importance of Rotational Iron Loss Data for Accurate Prediction of Rotating Machine Core Losses," Proceeding of IEEE-IAS'1994, Vol. 1, pp.123-127, 1994.

[2] H Nam, K. H. HA, J. J. Lee and J. P. Hong, "A Study on Iron Loss Analysis Method Considering the Harmonics of the FluxDensity Waveform using Iron Loss Curves Tested on Epstein Samples," IEEE Trans. on Magn., Vol. 39, No. 3, pp. 1472-1475, 2003.

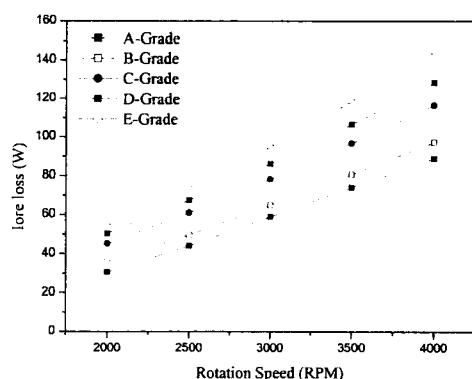


그림 8. 속도 가변에 따른 강종별 철손 변화

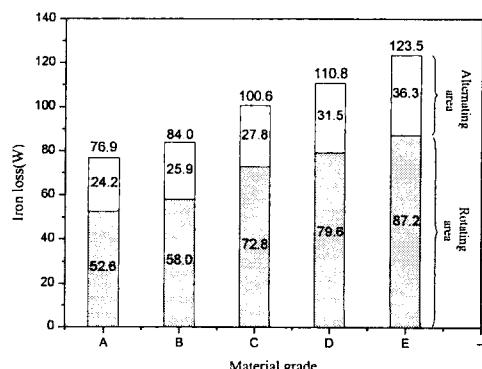


그림 10. 교변자계와 회전자계 영역에서의 철손