

영구자석형 모터의 고정자 철심에서 자계의 거동 및 철손 분석

論 文

55B-2-3

Analysis of Magnetic Field Behavior and Iron Loss in Stator Core of Permanent Magnet Type Motor

河京鎬^{*} · 車相潤^{*} · 金在寬^{**} · 洪正杓^{***}

(Kyung-Ho Ha · Sang-Yoon Cha · Jae-Kwan Kim · Jung-Pyo Hong)

Abstract - This paper investigates the 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 waveform 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. And then this paper explains the relation between flux waveform and iron loss produced in each part of the stator core. Furthermore, the iron loss at no load condition is measured and compared with the analysis results.

Key Words : Electrical Steels, Harmonic Flux, Iron Loss, Rotating Flux and Alternating Flux

1. 서 론

전자기 에너지 변환기들은 전원을 공급하는 도체와 도체를 취부 할 수 있는 기구부의 구조로 구성되고, 각 구성 요소는 전기에너지와 자기에너지를 전달하는 경로의 역할을 하게된다. 기구부에서 자기회로를 구성하는 자성재료는 이러한 기기들의 성능을 좌우한다. 특히, 최근 산업 시스템이 다양해지고 에너지 절감 요구가 높아짐에 따라 각종 전력변환기들은 고효율, 고효율, 고성능화되어 가는 추세이며, 이에 의해서 발생하는 발열과 손실은 효율 저하뿐만 아니라 설계 자유도 저해 요소로 작용함에 따라 저 손실 소재의 필요성이 더욱 부각되고 있는 실정이다. 따라서 기기의 에너지 변환율을 극대화하기 위해서 효율적인 자기회로 구성과 손실을 최소화할 수 있는 자성재료의 선택이 중요하다 [1-3]. 자성 재료중 전기강판 철심은 전동기, 변압기와 같은 전력변환기에서 중요한 기능재료로써, 최적의 상태에서 효율적으로 사용토록 하기 위해서는 자기회로 설계 단계에서부터 각 공정을 거쳐 최종 제품에 이르기 까지 전기강판에서 발생하는 제반 자기적 특성의 변화에 대한 이해와 현상 고찰이 필요하다 [3-7].

전기강판 소재가 제품에 적용될 경우, 철손을 더욱 증가하는 원인으로 크게 철심 제조공정에 의한 자성 열화와 에너지 변환 과정 중 발생하는 손실로 크게 분류할 수 있다

[6]. 전자의 원인으로는 전기강판이 절단, 타발, 용접, 불팅 또는 하우징 결합 등과 같은 제조공정을 거치면서 자성이 열화 되며, 이는 철심 내부 열적 기계적 응력 증가 (Stress/Strain) 때문이다. 후자의 원인은 전기기기 운전중 철심에 인가된 자계에 의한 영향으로 입력전원의 고조파 함유(Time harmonic), 고정자와 회전자에 기인한 자계 중첩 (Flux superposition), 철심 내부 자계의 변화(Flux distribution), 회전자계의 의한 손실 증가(Rotational flux), 적층시 절연 파괴에 의한 층간 단락(Short circuit), 발열에 의한 자성특성 저하(Temperature), 치 슬롯 구조에 의한 공간 고조파(Space harmonic) 등이 있다.

특히, 전동기 운전상태에서 전기강판 철심 내부에는 비정현적인 양상의 복잡한 자계분포가 발생되고, 이러한 현상은 전동기의 철손을 더욱 증가시킨다. [8,9]. 따라서 본 연구에서는 전동기 회전자 철심 내부에서 발생하는 자계의 거동을 분석하였으며 이러한 자계분포가 전동기 철손에 미치는 영향을 살펴보았다.

본 논문에서는 전자장 수치해석기법을 사용하여 전동기 철심 내부에서 자계의 분포를 도출하고 자계의 거동을 고찰하였으며, 이로부터 한주기 동안의 자속밀도 최대치와 최소치의 비로부터 회전자계영역과 교번자계 영역으로 구분하였다. 또한, 왜곡된 자속밀도 파형에 기인한 철손을 예측하기 위하여 주파수 분석기법을 이용하였으며 [10], 이로부터 각 고조파의 자속밀도에 의한 철손을 계산함으로써 고정자 철심의 국부위치에서 발생하는 철손의 분포를 살펴보았다. 전기강판의 다양한 강종(Grade)을 대상으로 전동기의 회전속도에 따른 전체 철손과 고조파에 의한 철손의 변화를 해석하여 전기강판의 강종별 철손이 전동기의 철손에 미치는 영향을 분석하였다.

† 교신저자, 正 會 員 : POSCO 技術研究所 研究員 · 工博
E-mail : khha@posco.co.kr

* 正 會 員 : POSCO 技術研究所 責任研究員 · 工博

** 正 會 員 : POSCO 技術研究所 首席研究員 · 工博

*** 正 會 員 : 昌原大學校 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2005年 10月 28日

最終完了 : 2006年 1月 2日

2. 해석 모델

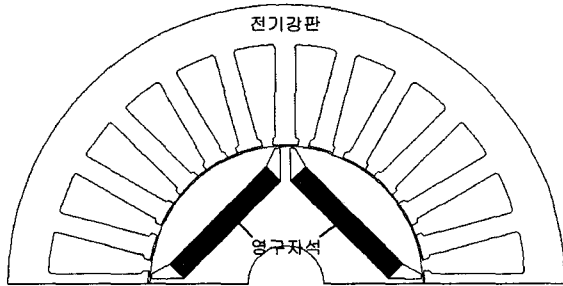


그림 1 해석 대상의 코아 형상
Fig. 1 Core shape of analysis model

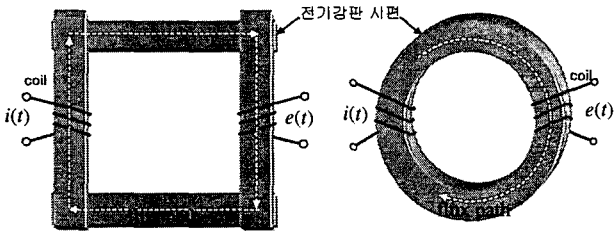


그림 2 전기강판 자성측정 엡스타인시편(좌)과 링시편(우)
Fig. 2 Epstein specimens(Left) and ring specimens(Right) for measuring magnetic properties of electrical steel

본 해석대상의 정격출력은 3.5[kW], 정격속도 3500[rpm], 극수와 슬롯수는 각각 4극 24슬롯이며, 영구자석은 Nd소결로 잔류자속밀도는 1.2[T]이다. 그림 1은 영구자석이 회전자 철심 내부에 삽입되어 있는 브리시레스 전동기의 철심 형상을 나타낸 것으로서, 고정자 철심은 전기강판으로 0.5[mm] 두께의 날장을 140매 적층하였다.

그림 2는 전기강판의 자기적 특성을 측정하기 위한 엡스타인 측정법과 토로이달측정법의 시편형상과 1차측 여자전류에 의한 자속의 경로를 나타낸 것이다. 일반적으로 엡스타인 측정법(Epstein test)은 전기강판의 압연방향과 압연직각방향으로 채취된 시편을 그림 2의 좌측과 같이 배치하여 여러 날장을 적층하고, 정현적인 교번자계를 인가하여 자기적 특성을 측정하게 된다. [11,12]. 그러나, 전동기와 같은 회전기에서는 전기강판의 두 방향뿐만 아니라 전 방향으로 자화가 되므로 엡스타인 방법으로 측정된 자기적 특성을 활용하기에 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 전기강판의 전 방향 특성을 반영할 수 있는 그림 2 우측과 같은 토로이달 링 시편을 이용하여 측정된 철손 데이터를 활용하였다.

3. 이론적 배경

3.1 해석 방법

그림 3은 전동기 철심에서 발생하는 자계분포를 추출하고 철손을 계산하기 위한 해석과정을 도시한 것이다. 전기강판의 자성 측정은 정현파와 자계분포에서 측정이 되나, 실제 전동기에서 발생하는 자계는 왜형을 가지는 비정현적 분포 특성을 가진다. 따라서, 이러한 왜형적인 자계의 분포에 기

인한 손실 특성을 반영하기 위하여 자속밀도를 주파수 분석하여 정현적인 분포의 고조파 합성으로 표현하고, 각 고조파 성분의 자속밀도 크기와 주파수에 해당되는 철손을 전기강판의 철손 데이터 곡선에서 찾아 고조파성분에 기인한 철손을 예측하였다.

그림 4는 전기강판의 링시편에 정현적인 분포의 교번자계를 인가하여 주파수와 자속밀도 크기 변화에 따라 철손을 측정된 데이터이다. 15포인트의 주파수 이외에 측정되지 않은 주파수와 자속밀도의 철손은 본 철손 데이터를 기반으로 스플라인 보간 하여 사용하였다. 표 1은 본 연구에 적용된 0.5[mm] 두께를 가지는 전기강판 제품의 철손 수치를 비교한 것으로, A강종에 가까울수록 저철손의 고급제품이며, E강종에 가까울수록 철손이 높은 낮은 등급의 제품이다.

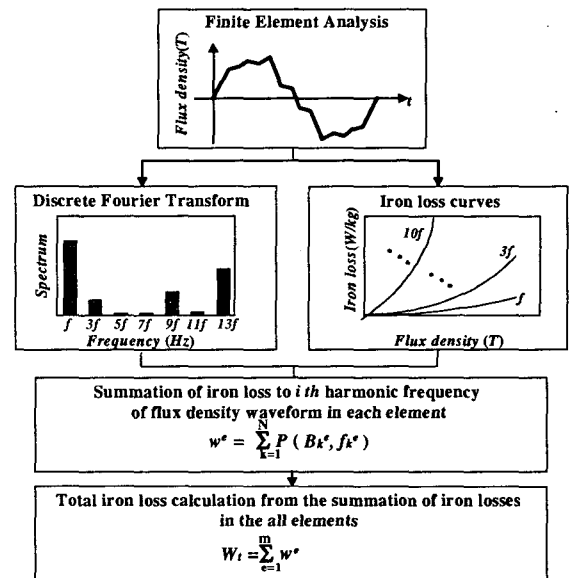


그림 3 자계분포 및 철손 해석 과정
Fig. 3 Analysis procedure for magnetic field and core loss

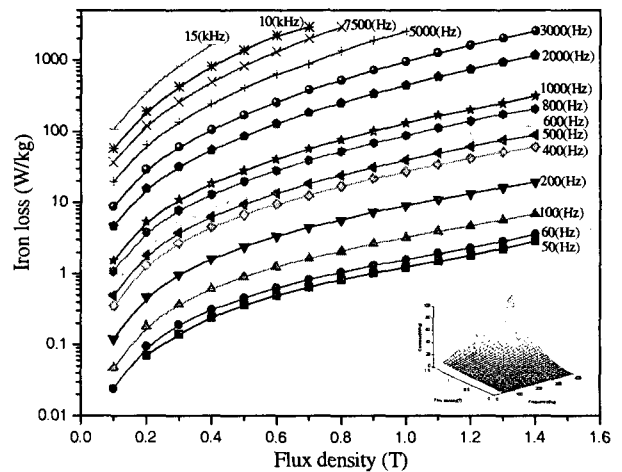


그림 4 링시편을 이용하여 측정된 자속밀도와 주파수에 따른 전기강판의 철손
Fig. 4 Iron loss of electrical steel as function of flux density and frequency measured by ring specimen

표 1 전기강판의 강종별 철손(단위:W/kg)
Table 1 Iron loss of electrical steel for various grade

	A-Grade	B-Grade	C-Grade	D-Grade	E-Grade
W _{15/60}	5.57	6.37	7.85	8.42	9.28
W _{10/400}	27.24	31.22	40.55	42.84	57.88
W _{10/3000}	952.9	1082.0	1398.5	1513.5	2150.0

주) Wx/y: 인가주파수 y[Hz], x/100(T) 자속밀도 조건에서 측정된 철손

상기 해석방법 적용을 위하여 다음과 같은 가정을 두었다.

- 전기강판의 자기적 특성은 등방성이다.
- 회전자계에 기인한 철손 증가는 무시하였다.
- 기계적 열적 응력에 의한 철손의 증가는 없다.
- 축 방향으로의 자계변화는 없다.
- 회전자에서 발생하는 철손은 무시하였다.
- 적층에 의한 손실 증가는 없다.
- 자속밀도의 각 고조파 성분이 철손에 미치는 영향은 상호 독립적이다.

3.2 자계분포 해석

전자장 수치해석 기법 중 유한요소법을 사용하여 브러시레스 전동기를 해석하기 위한 정상상태에서의 전자계 지배 방정식은 맥스웰 방정식으로부터 다음과 같이 유도할 수 있다.

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

여기서, μ 는 자성체의 투자율, A 는 자기벡터 포텐셜, J_0 는 외부 인가전류, J_m 은 영구자석에 의한 자화전류를 나타낸다.

무부하 조건에서 회전자 1도 간격으로 180도까지 해석하여 시간적 공간적으로 변화하는 한주기 동안의 자속밀도 변화를 각 요소에서 계산하고, DFT(Discrete Fourier Transform)를 이용하여 각 요소에서의 자속밀도를 주파수 분석하였다.

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

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

3.3 철손 해석

임의 한 요소에서 발생하는 전체 철손은 각 고조파 성분에 의해서 발생하는 철손을 N 차 까지 합한 것이다.

$$w^e = \sum_{k=1}^N P(B_k^e, f_k^e) \quad (3)$$

여기서, w^e 는 임의 한 요소 e 영역에서 발생하는 전체 철손, P 는 특정 주파수와 자속밀도 하에서 측정된 전기강판 철손이다.

해석모델 영역전체의 철손 W_t 는 각 요소에서 계산된 철손을 더하여 얻을 수 있다.

$$W_t = \sum_{e=1}^m w^e \quad (4)$$

여기서, m 은 해석영역 전체의 요소수를 나타낸다.

4. 결과 고찰

4.1 자계의 거동 분석

그림 5는 회전자 위치에 따른 자계 변화를 관측한 5곳의 요소 위치를 번호로 표기한 것이다. 그림 6은 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 회전자 위치에 따른 자속밀도의 공간적 변화를 나타낸 것이다. 여기서, 자속밀도의 궤적(Loci)은 시간의 변화에 따른 반경방향성분 B_n 과 접선방향성분 B_t 의 자속밀도 분포를 시간을 매개변수로 하나의 그래프로 처리한 리사쥬(Lissajous) 파형이다.

고정자 치영역에서 치중간 P2 지점은 치의 다른 부분인 P1, P3지점에 비하여 반경방향성분이 주성분이며, 요크영역 P4, P5 지점에서는 접선성분의 자속밀도가 크게 나타나고 있다. 이는 자화의 방향이 공간적으로는 크게 회전하지 않고, 주로 한 방향으로 크기만 바뀌는 교번자계가 주로 발생하는 영역임을 의미한다. 반면, 치와 요크 인접하는 영역 P1과 치끝단의 영역 P3는 타원형의 회전자계가 주요하게 발생하고 있으며, 자속밀도 파형의 찌그러짐 정도를 나타내는 왜형률 또한 다른 영역에 비하여 상대적으로 크게 나타났다.

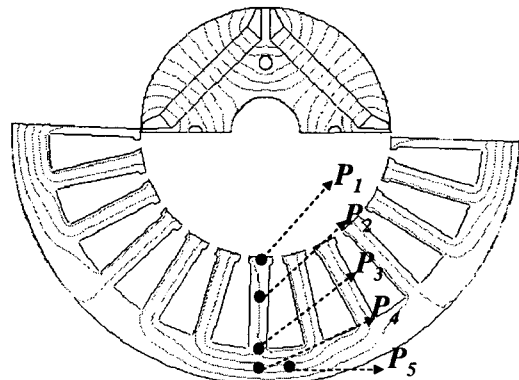


그림 5 등포텐셜 분포 및 모터 회전시 자계 관측 위치
Fig. 5 Equipotential line and five points for observing the variation of magnetic flux density under motor rotating

그림 7은 회전자계 영역과 교번자계 영역을 구분하기 위한 척도로 축비 β 를 정의한 그림이다. 한주기 동안의 자속 밀도 패적에서 최대치 자속밀도 B_{max} 와 최소치 자속밀도 B_{min} 의 비율인 축비 β 가 0.1보다 작으면 교번자계, 0.1보다 크면 회전자계 영역으로 정의하였다. ($\beta=B_{min}/B_{max}$).

그림 8(a)는 각 요소에서 계산된 축비를 이용하여 회전자계영역과 교번자계영역을 색으로 구분한 것으로, 회전자계 영역은 전체 영역의 30[%]를 차지하고 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 8(b)는 축비 β 수치를 등고선으로 그린 것으로, 요크와 치가 만나는 영역의 중심에서 β 는 0.87이상인 반면, 치의 중심부는 0.01로 동일 고정자 철심 내에서도 자계의 거동에 현격한 차이를 보이고 있다.

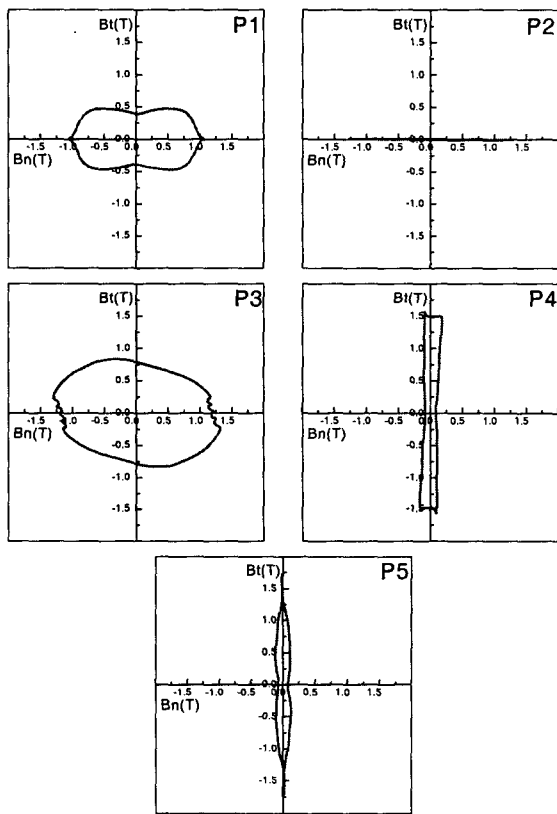


그림 6 고정자의 철심에서 자속밀도의 패적
Fig. 6 Loci of magnetic flux density at the stator core

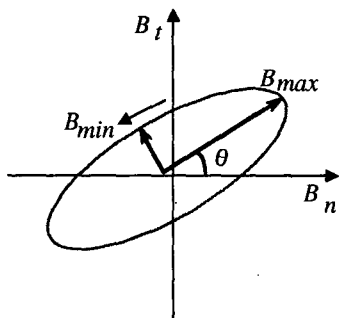


그림 7 회전 및 교번자계 영역 구분 위한 축비의 정의
Fig. 7 Define of Axis ratio for discrimination of between alternating and rotating field area

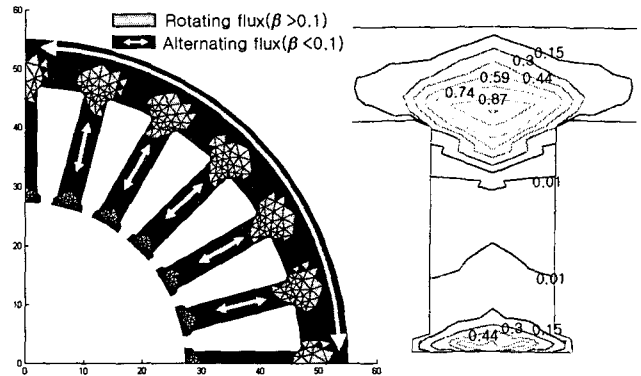


그림 8 회전 및 교번자계 영역의 구분(좌) 및 등고선(우)
Fig. 8 Discrimination of alternating and rotating field area and axis ratio contour of magnetic flux

4.2 철손 분석

그림 9는 철심에서 발생하는 철손분포를 색 띠로 표기한 것으로 붉은색일수록 국부 철손이 큼을 의미하며, 그림 9(a)는 전체철손, 그림 9(b)는 기본파성분을 제외한 고조파 성분을 나타낸 그림이다. 여기서, 모터의 회전속도는 3600[rpm]으로 자계의 기본 주파수는 120(Hz)이다. 그림 8(a)에서 치영역이 요크 영역에 비하여 상대적으로 철손이 크게 발생하고 있다. 특히, 그림 8(b)에서 치끝단과 요크와 치가 연결되는 부위에서 철손이 가장 크게 나타나는데 이는 다른 영역에 비하여 자속밀도 분포의 파형이 많이 찌그러져 고조파 성분을 많이 포함하고 있기 때문이다. 실제 회전자계에 의한 손실 발생시 철손은 더욱 증가할 것으로 예측된다. 그림 10은 각 고조파 차수에 해당하는 철손 값을 50차까지 비교한 것으로 20차 이후의 고조파 성분은 전체 철손에 큰 영향을 주지 않고 있다.

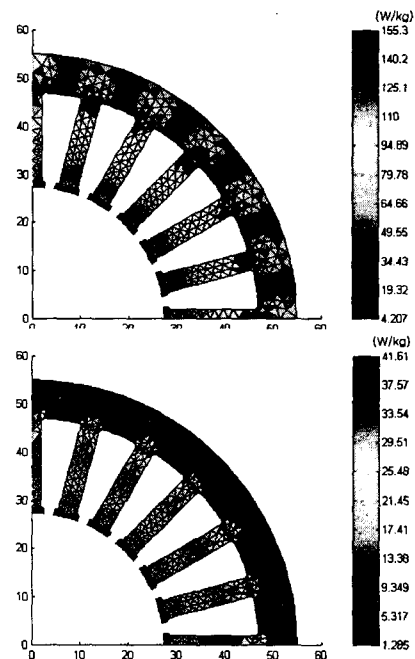


그림 9 철손 분포(상단: 전체 손실, 하단:고조파 손실)
Fig. 9 Core loss distribution in stator core (Upper: total loss, Lower: harmonic loss)

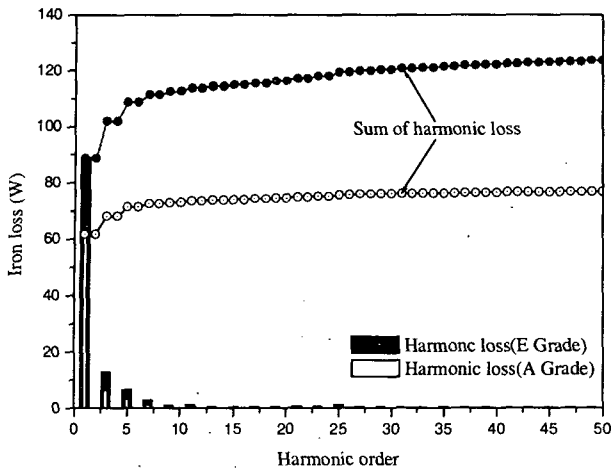


그림 10 각 고조파성분에 기인한 철손
Fig. 10 Core losses corresponding to harmonic components

4.3 강종별 손실 분포

표 2는 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 W_t 와 W_h 의 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 현저히 감소됨을 알 수 있다.

그림 11은 전동기 회전속도가 변할 때 강종별 철손 변화 추이를 나타낸 것이며, 그림 12는 기본파 철손과 고조파 철손을 분리한 것이다. 저급강종일수록 속도가 증가함에 따라 철손의 증가가 기하급수적으로 증가함을 보이고 있다. 그림 13은 그림 7에서 도출된 회전자계와 교번자계 각 영역에서 발생하는 철손의 양을 강종별로 비교한 그래프이다. 회전자계 영역에서 발생하는 철손이 전체 철손에서 약 70[%]를 차지하고 있다.

B강종의 해석치와 실험치 철손은 각각 38[W], 45[W]이며, E강종의 철손은 각각 36[W], 58[W]로써, 이론치와 실험치의 차이가 15~13[%] 차이를 가지고 있다. 실험치의 철손이 크게 나타난 이유는 전기강판의 가공(기계적 열적 응력, 적층)과 회전자계 특성에 의한 전기강판 철손의 열화를 반영하지 않았기 때문으로 판단된다.

표 2 고정자에서 전기강판 강종별 철손
Table 2 Core loss in the stator core for various grades

	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

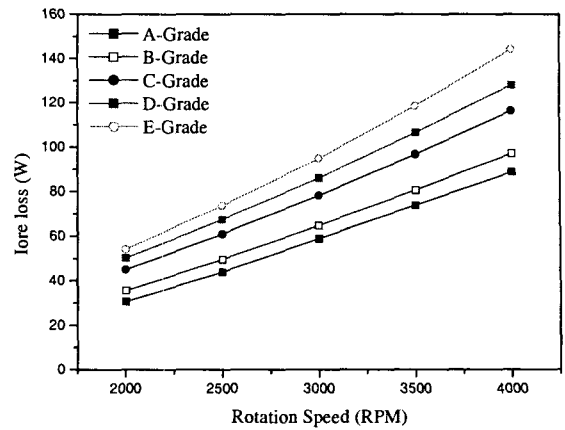


그림 11 속도에 따른 강종별 철손 변화
Fig. 11 Core loss for various grades vs. motor speed

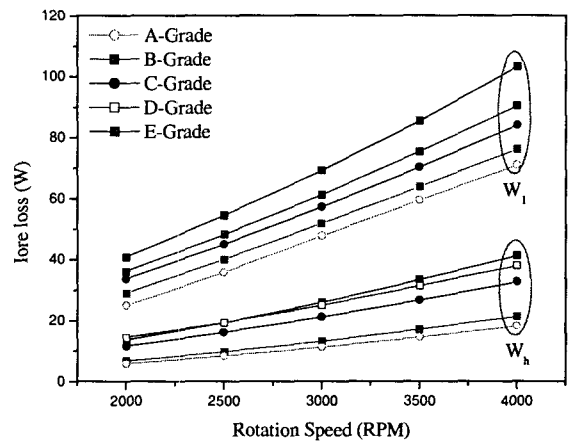


그림 12 속도에 따른 강종별 고조파 철손 변화
Fig. 12 Harmonic core loss for various grades vs. motor speed

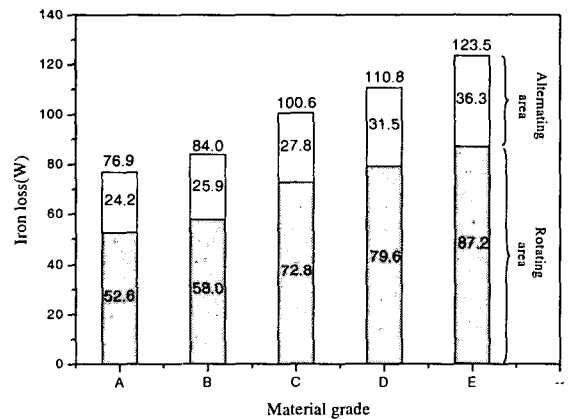


그림 13 교번자계 영역과 회전자계 영역에서의 철손
Fig. 13 Core loss at each region with alternating field and rotating field

5. 결 론

본 논문에서는 브리시레스 전동기를 대상으로 고정자의

전기장판에서 자계의 거동과, 고조파 철손해석으로부터 다음과 같이 결론을 도출하였다.

1) 치의 중간(Tooth body)과 요크(Yoke) 영역에서는 정현적인 분포에 가까운 교번자계가 발생한다. ($\beta = B_{min}/B_{max} < 0.1$)

2) 치의 끝단(Tooth tip), 치와 요크가 만나는 영역(Tooth root)에서는 비정현적인 자계분포의 타원 또는 회전자계가 발생한다. ($\beta = B_{min}/B_{max} > 0.1$)

3) 교번자계가 발생하는 영역은 고정자 전체 면적의 30[%]가량을 차지한다.

4) 전동기 철손은 치의 끝단(Tooth tip), 치와 요크가 만나는 영역(Tooth root)에서 가장 크게 발생한다.

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

6) 회전자계가 발생하는 영역에서의 철손은 전체 철손에 약 70%를 차지한다.

상기의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 전동기 철심에는 복잡한 양상의 자계분포를 가지며, 이에 따라 전동기에서 발생하는 손실은 더욱 증가함을 알 수 있다. 그러나 전기장판의 자기적 특성은 정현적인 분포를 가지는 교번자계 상태에서 측정된 것이므로 실제 전동기의 자기회로 분석에 사용하기에는 부적합한 점이 있다. 따라서 비정현적 자계 또는 회전자계 등과 같은 조건에서 전기장판의 자성을 측정하고, 이 결과를 전동기의 자기회로 설계에 적절히 반영할 수 있는 연구가 필요하다.

본 연구는 전기장판을 사용한 자기회로 설계, 철손 평가, 전기장판의 소재 선택 설정에 도움이 될 것으로 사료된다. 향후, 전기장판의 이방성 특성과 회전자계 영향, 가공 등의 영향에 의한 손실 증가 등을 고려한 모터 해석을 수행할 계획이다.

참 고 문 헌

[1] 홍정표, 하경호, "자성재료를 이용한 전자에너지 변환 기기의 설계 및 특성," 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1-5, 4, 2002.

[2] A. Honda et al., "Efficiency of Model Induction Motor Using Various Non-Oriented Electrical Steels", Journal of Material Science Technology, Vol. 16, No. 2, pp.238-248, 2000.

[3] M. Kawano, T. Fujiyama and T. Aoki, "Electrical Steels for High-Functional Automotive Electrical Components Corresponding to Energy Saving," Kawasaki Steel Technical Report, Vol. 48, pp. 47-52, 2003.

[4] M. Kohno, K. Senda, Y and Hayakawa "Electrical Steels Having Excellent Punchability for Compact and High-Functional Automotive Electrical Components," Kawasaki Steel Technical Report, Vol. 35, pp.1-6, 2003.

[5] K. sadahiro, M. Ishida, A. Honda, "Material

Properties and Applications of High-Frequency Thin Electrical Steel Sheets "HiFreqs"with Superior Magnetic Properties and Workability," Kawasaki Steel Technical Report, Vol. 35, pp.7-10, 2003.

[6] M. Yabumoto, C. Kaido, T. Wakisaka and T. Kubota, "Electrical Steel Sheet for Traction Motor of Hybrid/Electric Vehicles," Kawasaki Steel Technical Report, Vol. 378, pp. 51-54, 2003.

[7] M. Ishida, K. Sadahiro and S. Okabe, "Analysis of Local Magnetic Properties and Acoustic Noise in Three-Phase Stacked Transformer Core Model," Kawasaki Steel Technical Report, Vol. 35, pp.21-27, 2003.

[8] 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.

[9] Jeong-Jong Lee, Young-Kyoun, Hyuk Nam, Kyung-Ho Ha and Jung-Pyo Hong, "Loss Distribution of Three Phase Induction Motor Fed by Pulsewidth Modulated Inverter," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 40, No. 2, pp. 762-765, March 2004.

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

[11] International Standard, "MAGNETIC MATERIALS -part 2 : method of measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of an Epstein frame," IEC 60404-2.

[12] International Standard, "MAGNETIC MATERIALS -part 6 : method of measurement of the magnetic properties of isotropic nickel-iron soft magnetic alloys, types E1, E3 and E4," IEC 60404-6.

저 차 소 개



하 경 호(河京鎬)

1972년 5월 19일생. 1997년 창원대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 POSCO 기술연구소 전기장판연구그룹 연구원

Tel : 054-220-6164, Fax : 054-220-6163

E-mail : khha@posco.co.kr



차 상 윤(車 相 潤)

1960년 6월5일생. 1987년 부산대 물리학 과 졸업. 1989년 부산대 대학원 금속공학과 졸업(석사). 2005년 부산대 대학원 금속공학과 졸업(박사). 1989~1994 포항산업과학기술연구원(RIST) 연구원, 현재 POSCO 기술연구소 전기강판연구그룹 책임연구원

Tel : 054-220-6183, Fax : 054-220-6163

E-mail : sisteel@posco.co.kr



김 재 관(金 在 寬)

1958년 6월16일생. 1979년 부산대 금속공학과 졸업. 1981년 부산대 대학원 금속공학과 졸업(석사). 1990년 일본 동북대 재료물성학과 졸업(박사). 1982년~현재 POSCO 기술연구소 전기강판연구그룹 수석연구원

Tel : 054-220-4232, Fax : 054-220-6163

E-mail : jkwankim@posco.co.kr



홍 정 표 (洪 正 杓)

1959년 4월 17일생. 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임연구원 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~1996년 한양대 산업 과학연구소 선임연구원. 현재 창원대 공대 전기공학과 조교수

Tel : 055-279-7517, Fax : 055-263-9956

E-mail : jphong@sarim.changwon.ac.kr