

## 매입형 영구자석 동기 전동기의 철손 저감 설계

이수진, 김성일, 권순오, 정재우, 홍정표  
한양대학교 기계공학부

### Reduction Design of Core Loss in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

Su-Jin Lee, Sung-Il Kim, Soon-O Kwon, Jae-Woo Jung, Jung-Pyo Hong  
School of Mechanical Engineering, Hanyang University

**Abstract** - This paper deals with the core loss as well as torque characteristics according to the change of stator shape in an interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM). The finite element method and functional core loss data obtained by the steinmetz equation are used in order to estimate the core loss. To minimize the core loss caused by the shape of tooth tip, slot-area and volume of permanent magnet, those are all the same in each model. In the end, the ratio between tooth width and yoke thickness to minimize the core loss in the IPMSM is presented in this paper.

#### 1. 서 론

화석연료의 사용으로 인한 대기 오염 및 지구 온난화와 같은 자연 재해가 심각해지고, 자원고갈의 문제가 대두됨에 따라 그 대책의 일환으로 대체에너지의 개발 및 고효율 기기의 설계에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 많은 기업과 대학에서 고효율의 전동기를 설계하기 위하여 활발한 연구가 이루어지고 있다. 높은 효율의 전동기를 설계하기 위해서는 손실을 최소화해야하며 특히 전동기 손실의 대부분을 차지하는 동손과 철손의 저감이 필요하다. 이때 동손은 코일의 저항과 입력 전류에 의해 결정되고, 철손은 주파수와 자속밀도의 변화에 따라 달라진다. 자동차에 적용되는 전동기의 경우 공간적인 제약으로 인한 철심의 포화도가 높기 때문에 철손 저감 설계는 반드시 필요한 사항이다. 따라서 본 논문에서는 손실 저감 설계를 위하여 전동기의 형상 변화에 따른 철손의 양상을 살펴보고자 한다[1].

전동기 회전자의 경우 동기속도로 회전할 때 회전자 철심에서의 자속 밀도 변화가 미소하여 고정자에서 발생하는 철손과 비교하면 매우 작은 값을 가진다. 따라서 전동기에서의 철손 대부분은 고정자에서 발생하고, 고정자의 다양한 설계 인자들은 철손에 큰 영향을 미친다. 최종적으로 본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기를 대상으로 철손을 최소화하는 치 폭과 요크 두께의 비를 제시하고 그에 따른 토크 특성을 살펴보고자 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 해석 모델

그림 1은 본 논문에서 다루어지는 기본모델의 회전자와 고정자의 형상을 보여주고 있다. 설계변수 A와 B는 각각 요크 두께와 치 폭을 나타내며 A와 B를 제외한 고정자 형상은 각 모델에서 모두 동일하다.

본 논문에서는 요크 두께와 치 폭 변화에 따른 철손을 정확하게 평가하기 위하여 영구자석 사용량, 슬롯 면적, 그리고 고정자에서의 tooth tip 형상을 동일하게 가져갔다. 또한 매 극 매 상 당 슬롯 수가 0.5 이고 극수가 16인 모델을 대상으로 특성을 분석하였고 각 모델의 철심 재질은 PN230이며, 축방향 길이는 56[mm]이다. 각 해석 모델의 치수와 슬롯 단면적은 표 1에 나타내었다.

##### 2.2 특성 분석

###### 2.2.1 무부하 철손

본 논문에서는 해석적으로 철손을 산정하는 방법을 이용하였다. 수정된 steinmetz식에 의해 함수화 된 철손 데이터와 유한 요소법(FEM)을 이용하여 고조파를 포함한 왜곡된 자속밀도 변화를 고려 할 수 있는 해석적 방법을 사용하였다. 수정된 steinmetz식은 다음 식(1)과 같다.

$$P_c = P_h + P_e + P_a$$

$$= k_h f B^2 + k_e f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} \quad (1)$$

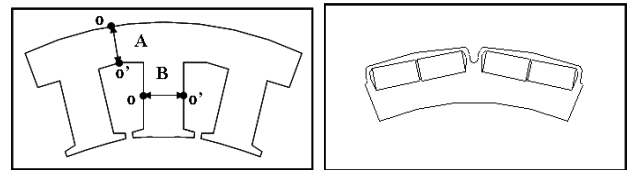
여기서,  $f$ 는 외부에서 인가되는 자계의 주파수,  $B$ 는 자속밀도,  $k_h, k_e$

그리고  $k_a$ 는 각각 히스테리시스 손실 계수와 와전류 손실계수 그리고 이상 와전류 손실계수(anomalous loss coefficient)를 나타낸다.

전기 강판의 제작사에 의해 주어지는 철손 데이터는 한정된 주파수와 전류밀도에 따른 철손 값을 제공한다. 그러나 실제 모터의 철손을 해석하기 위해서는 광범위한 주파수와 자속밀도에 관한 철손데이터가 필요하다. 이것을 충족시키기 위하여 본 논문에서는 수정된 steinmetz식을 이용하여 철손 데이터의 함수화를 수행하였다[2-5]. 그림 2는 철손 산정에 사용된 철심 재질 PN230의 함수화 된 철심 데이터이며 각각의 모델에 대하여 기저속도인 1500 [rpm]과 최대속도인 6000[rpm]에서의 무부하 철손을 산정하고 그 값을 표2와 그림 3에 나타내었다.

###### 2.2.2 부하 철손

부하 시 철손 산정 또한 무부하 시 철손 산정과 동일한 방법을 사용하였다. 부하 철손 해석을 위한 부하 전류 및 전류 위상각은 특성 해석을 통해 기저속도에서의 정격 토크(195[Nm])가 나오는 값을 이용하였다. 각 모델의 부하 전류 및 전류 위상각은 표 3에 나타내었고, 표 4와 그림 4는 부하 시 철손 해석 결과를 나타낸다.

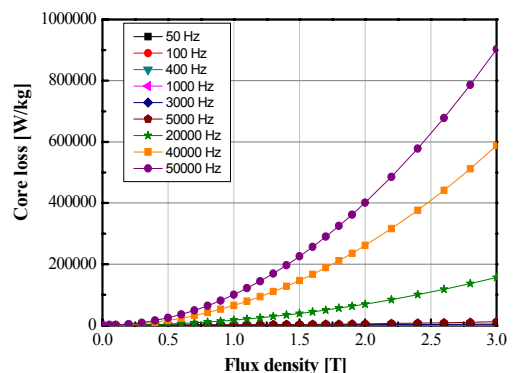


(a) 고정자의 형상 (b) 회전자의 형상

〈그림 1〉 해석 모델

〈표 1〉 치 폭과 요크 두께의 비에 따른 해석 모델의 치수

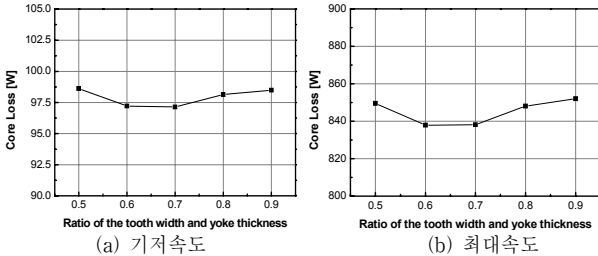
치 폭과 요크 두께의 비	치 수 [mm]		슬롯의 단면적[mm <sup>2</sup> ]
	요크 두께(A)	치 폭(B)	
0.5	18	9.2	167.71
0.6	17.2	10.5	167.63
0.7	16.3	11.7	168.83
0.8	15.5	12.7	169.75
0.9	14.9	13.5	169.58



〈그림 2〉 재질 PN230의 철손 데이터

〈표 2〉 치 폭과 요크 두께의 비에 따른 무부하 철손

치 폭과 요크 두께의 비	무부하 철손[W]	
	기저속도(@1500rpm)	최대속도(@6000rpm)
0.5	98.62	849.57
0.6	97.21	837.90
0.7	97.14	838.17
0.8	98.14	848.12
0.9	98.49	852.01



〈그림 3〉 무부하 철손 비교

〈표 3〉 치 폭과 요크 두께의 비에 따른 전류의 크기와 전류 위상각

치 폭과 요크 두께의 비	전류[A <sub>phase-peak</sub> ]	전류 위상각 [°]
0.5	271.45	19.20
0.6	270.98	17.80
0.7	272.44	17.50
0.8	273.00	17.80
0.9	280.93	18.10

2.2.3 치와 요크에서의 자속밀도 변화

다음 그림 5는 부하 시 치 폭과 요크 두께에 따른 자속밀도 변화의 기본과 크기와 THD를 비교한 것이다. 이 때, 치와 요크에서의 자속 밀도 변화는 두 점(O-O')에서의 벡터 포텐셜 차를 이용하여 산정하였다. 수식은 다음 식 (2)와 같다.

$$\frac{(\vec{A}_o - \vec{A}_{o'}) \times l_{st}}{l \times l_{st}} \quad (2)$$

여기서  $\vec{A}_o, \vec{A}_{o'}$ 은 각 점에서의 벡터 포텐셜,  $l_{st}$ 와  $l$ 은 축방향 길이와 두점 사이의 거리를 나타낸다. 그림 5를 통하여 요크에서의 자속밀도 변화의 크기와 THD는 부하 시 철손에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

2.2.4 토크 특성

유한요소해석을 통하여 각 모델의 토크 특성을 살펴보았다. 다음 그림 6은 치 폭과 요크 두께의 비에 따른 토크를 비교한 것이다. 치 폭이 줄어들수록(치 폭과 요크 두께의 비가 커질수록) 치의 포화가 심해져 출력 토크가 줄어들을 수 있다.

2.3 특성 비교

무부하 시의 철손은 치 폭과 요크 두께의 비에 따른 변화가 거의 없다. 그러나 부하 시에는 치에서의 자속밀도 변화와 THD는 작은 반면 요크에서의 그 값들은 상대적으로 크게 평가되었다. 그래서 부하 시에는 요크의 두께가 좀 더 철손에 영향을 미친다고 볼 수 있다. 따라서 공간적인 제약과 함께 큰 토크를 내야하는 traction motor의 경우 초기 형상 설계 시 슬롯 면적을 확보 할 수 있는 범위 내에서 요크의 두께를 최대한 크게 가져가고 치 폭을 줄이는 것이 철손을 최소화 할 수 있는 방법이다. 그러나 이 때, 치 폭을 줄이게 되면 치에서의 포화가 심해져 출력 토크가 줄어드는 단점이 있다.

3. 결 론

전동기의 성능 향상을 위하여 치 폭과 요크 두께의 비를 적절하게 가져감으로써 전동기의 효율을 증가 시키고, 원하는 토크와 출력력을 만족시킬 수 있다. 이로 인해 출력 밀도가 높은 traction motor의 경우 초기 설계 시 설계의 방향을 제시 할 수 있다. 본 논문을 통해 자속 밀도가 높은 전동기의 고정자 형상 설계 시 철손을 최소화 시키며, 토크 특성 및 출력력을 만족 시키는 치 폭과 요크 폭의 비를 제시하였다. 또한 자속 밀도가 낮은 모델의 경우 치 폭과 요크 폭의 비에 따른 철손 및 토크의 변화가 미비함을 알 수 있었다. 그러나 극수의 변화에 따른 철손 및 토크

크 특성에 대한 검토를 추가하여야 할 것이다.

이상의 결과와 더불어 철손에 큰 영향을 미치는 고정자의 Tooth tip의 형상과 Slot opening의 영향에 대한 검토가 이루어진다면 전동기의 사용 목적에 따른 철손 저감 설계에 있어서 좋은 지표가 될 수 있을 것으로 본다.

〔참 고 문 헌〕

[1] 반지형, 권순오, 하승형, 홍정표, “매입형 영구자석 동기전동기의 극수 슬롯 수 조합에 따른 특성에 관한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 771-772, 2006

[2] Hyuk Nam, Kyung-Ho Ha, Jeong-Jong Lee, Jung-Pyo Hong and Gyu-Hong Kang, "A Study on Iron Loss Analysis Method Considering the Harmonic of the Flux Density Waveform Using Iron Loss Curves Tested on Epstein Samples," IEEE Trans. on Magnetic, pp. 1472-1475, May, 2003

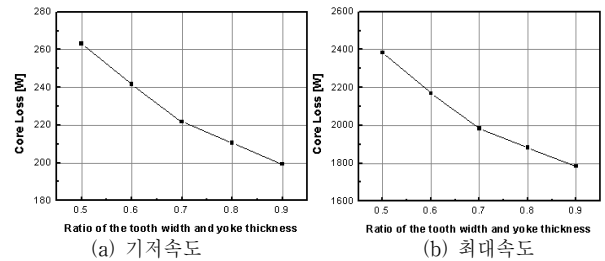
[3] Sang-Ho Lee, Ji-Young lee, Jung-Pho Hong, Jin-Hur, Ha-gyeong Sung, "3D Core Loss Calculation in BLDC Motor made of SMC Material," ICEMS, in CD, 2004

[4] Y. Chen, and P. Pillay "An Improved formula for lamination core loss calculations in machines operating with high frequency and high flux density excitation," in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, vol. 2, pp. 759-766, Oct. 2002

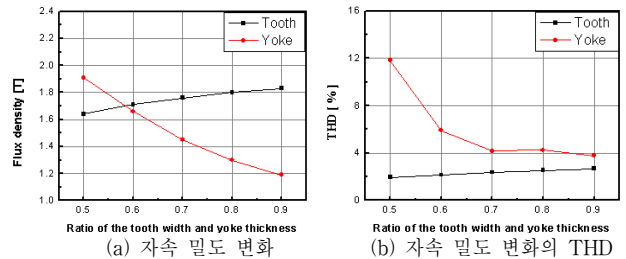
[5] 장석명, 조한욱, 고정진, “고속으로 운전되는 영구자석형 동기전동기의 철손 및 풍손 해석”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 511-520, 2006

〈표 4〉 치 폭과 요크 두께의 비에 따른 부하 철손

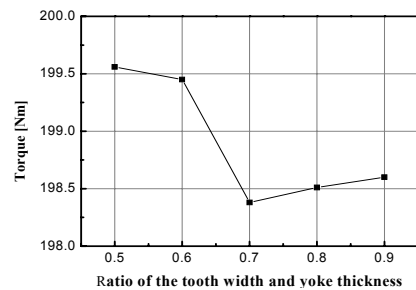
치 폭과 요크 두께의 비	부하 철손[W]	
	기저속도(@1500rpm)	최대속도(@6000rpm)
0.5	212.45	1913.92
0.6	198.64	1777.80
0.7	187.01	1672.74
0.8	176.90	1583.32
0.9	170.44	1526.81



〈그림 4〉 부하 철손 비교



〈그림 5〉 부하 시 자속 밀도 변화의 기본과 크기와 THD 비교



〈그림 6〉 토크 특성 비교