

손실 저감을 위한 초고속 영구자석 동기전동기의 회전자 슬리브와 고정자 형상 설계

장석명*, 안지훈*, 고경진*, 조한욱*, 이용복*
 충남대학교*, 한국과학기술연구원**

Rotor sleeve and Stator Shape Design of High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor for Loss Reduction

Seok-Myeong Jang*, Ji-Hun Ahn*, Kyoung-Jin Ko*, Han-Wook Cho*, Yong-bok Lee**
 Chungnam National University*, Korea Institute of Science and Technology**

Abstract - The loss is most important problems for the practical applications of permanent magnet synchronous motor(PMSM). In this paper, rotor sleeve and stator shape design of high speed permanent magnet motor for loss reduction. First, this paper found optimum sleeve thickness for calculation eddy current loss on the basis of analytical method, because eddy current is influenced by conductivity of material and area. Then, stator shape design is changed as maintain same slot area for reducing stator core loss. Finally, this paper compared analytical result with optimum sleeve thickness obtained from finite element(FE) method, and stator core loss is calculated from FE method.

1. 서 론

최근들어 고속전동기는 팬, 펌프, 터빈 발전기 등과 같은 전기기기의 응용분야에 널리 사용 되고 있으며 특히 부피가 작고 효율이 좋은 초고속 영구자석 동기전동기는 다양한 분야에서 사용되고 있으며, 영구자석 기기의 효율을 높이기 위한 전기적 손실을 최소화 하는 연구가 계속 되고 있다.[1]

일반적으로 초고속 전동기에서는 동일 출력 용량의 범용 저속 전동기에 비해 자기회로의 체적이 속도에 반비례하여 작아지므로 소형·경량화가 가능하다는 장점을 가지고 있는 반면, 초고속 회전에 따른 회전자의 기계적인 스트레스나 초고주파 입력전원에 의한 철손이 크게 발생하는 단점을 가지고 있다. 회전자는 자석의 탈자를 방지하기 위해 비자성체 슬리브를 일반적으로 사용하며, 슬리브에서 또한 손실이 발생한다. 회전자 손실은 치슬롯 형상에 의한 공극 자속밀도의 비정형성에 의한 와전류 손실과 고정자 기자력의 비 정형성에 의한 회전자 손실, 인버터 전원에 의한 시간 고조파의 추가적 손실 발생원으로 정의 된다. 또한, 고정자에서 발생하는 철손은 고정자 형상과 고조파 전원에 의한 고정자 코어내의 자계분포 왜곡으로 인해 발생한다.

본 논문에서는 공극 자속밀도의 비정형적 분포에 의해 발생하는 회전자 손실을 줄이기 위한 회전자 슬리브의 두께와 재질에 따른 손실 변화와 고정자 코어에서 발생하는 철손의 저감 방법에 관해 연구하였다. 일반적으로 사용되어 지는 재질을 이용하여 회전자 슬리브가 하나만 있을 경우를 기준으로 상대적으로 도전율이 높은 슬리브를 놓았을 경우(case2)와 상대적으로 도전율이 낮은 슬리브를 놓았을 경우(case3)를 비교하여 슬리브 재질과 두께에 따른 와전류 손실 변화를 해석적인 기법을 통하여 도출 하였으며 이를 유한요소법에 의해 도출된 결과와 비교 해 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 슬리브에 의한 회전자의 와전류 손실 저감

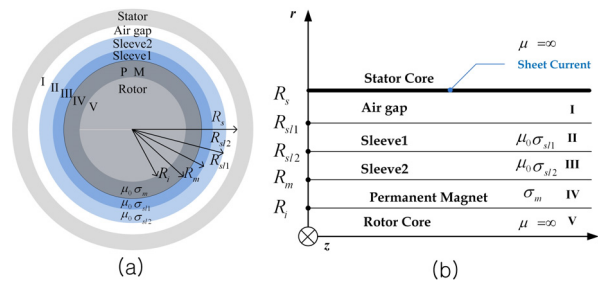
그림 1 (a)는 실제 해석 모델을 나타내며, (b)는 근사화한 넓이와 재질을 나타낸다. 해석 모델의 설계 사양은 표 1과 같으며, 그림 2는 논문에서 제시한 각각의 해석 모델을 나타낸다. 표 2는 각 해석 모델 슬리브의 도전율을 나타내며, 그림 1 (b)에서 나타낸 각 영역에서의 저항은 식 1로 표현된다.

$$R = \frac{l}{\sigma S} \quad (l = \text{length}, S = \text{area}) \quad (1)$$

본 논문에서 제시한 해석적인 기법으로 슬리브 두께에 따른 손실 변화를 도출하기에 앞서 다음과 같은 가정을 한다.

a) 각 영역의 저항은 그림 2와 식 1로 표현된다.

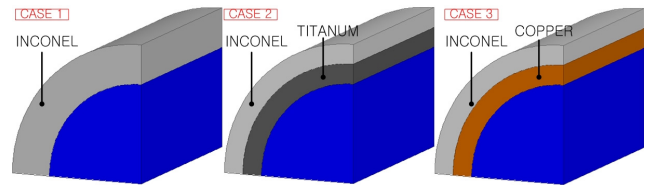
b) 각 영역에서의 자속 밀도는 식 2와 3으로 표현 된다.



<그림 1> (a)손실 예측을 위한 해석모델 (b)근사화한 구조

<표 1> 해석 모델의 설계 사양

고정자외경 [mm]	170	고정자내경 [mm]	72.5
슬리브외경 [mm]	68.5	자석 외경 [mm]	54.5
Stack 길이 [mm]	190	정격 전력 [kW]	226.9
정격 속도 [rpm]	60,000	정격 토크 [N.m]	35.8
슬롯수	36	상당 턴수	2



<그림 2> 재질변화에 따른 해석 모델

<표 2> 슬리브 재질 사양

재질	Inconel	Titanium	Copper
도전율	0.78e6[s/m]	1.82e6[s/m]	58e6[s/m]

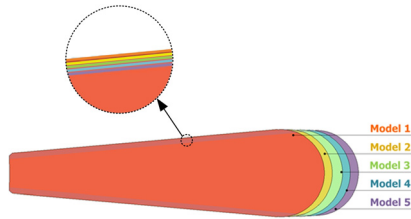
c) 각 영역의 와전류는 도전율에 반비례 한다.

$$\nabla \times E = -\frac{\alpha B}{at} \quad (2)$$

$$\nabla \times A = B, \quad E = -\frac{\alpha A}{at} \quad (3)$$

식 4는 각 영역에서 도체에 따른 침투 깊이를 나타내며 n과 m은 각각 시간 고조파와 공간 고조파를 나타 내며 ω_r 은 각속도 μ_r 은 비유전율을 나타낸다.

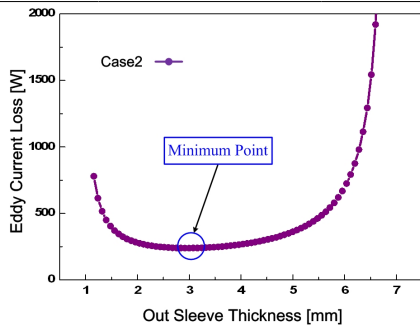
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{(n+m)\omega_r \sigma \mu_0 \mu_r}} \quad (4)$$



〈그림 3〉 손실저감을 위한 slot형상

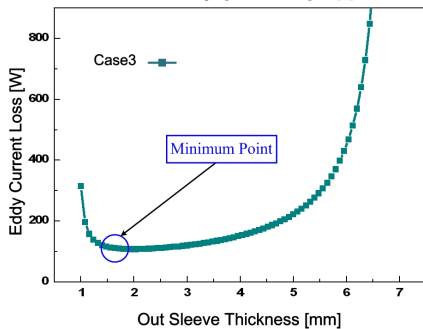
〈표 3〉 각 모델의 설계 사양

Model	치 두께 [mm]	요크 두께 [mm]
1	3.35	19.87
2	3.55	19.19
3(actual model)	3.75	18.48
4	3.93	17.83
5	4.12	17.13



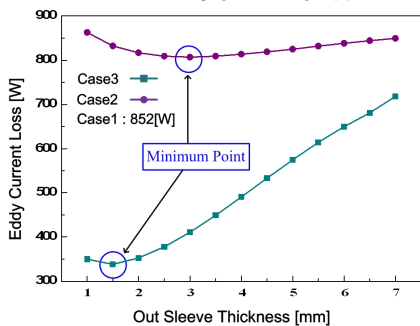
〈그림 4〉 해석적인 방법에 의해 구해진

Case2 일 때의 손실 최소점



〈그림 5〉 해석적인 방법에 의해 구해진

Case3 일 때의 손실 최소점

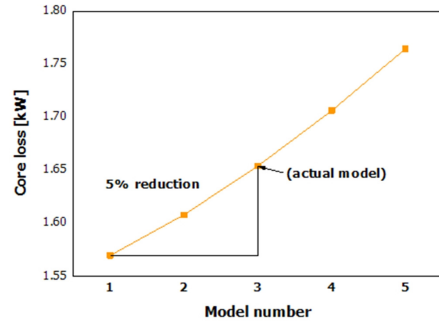


〈그림 6〉 유한요소해석에 의한 외부

슬리브의 두께에 따른 손실 변화

슬리브와 자석에서 발생하는 와전류 손실은 최종적으로 식 5로 표현된다.[2]

$$P_{loss} = \frac{1}{2} \oint_s Re(E \times H^*) ds = \frac{1}{2\sigma} \int_{\theta_1}^{\theta_2} Re(J_z H_\theta^*) l_a r d\theta \quad (5)$$



〈그림 7〉 모델별 고정자 코어 손실

2.2 고정자 형상에 의한 고정자 손실 저감

철손은 시변하는 자계에 의하여 철심의 재료적 성질에 의해 발생하는 손실이며, 고정자의 형상이 변화함에 따라 고정자에서 발생하는 회전자계와 교번자계는 변화 하게 된다. 손대락 외-는 철손 해석 및 측정 기술개발에 관한 연구에서 철심내 자속밀도가 같은 경우 회전자계 영역의 철손 발생이 교번자계 영역에서 철손 발생의 100% 이상 증가함을 실험을 통해 규명하였다.[3] 따라서 본 논문에서는 그림 3과 같이 요크의 두께와 치 두께를 변화시켜 5가지의 모델로 나누어 해석 하였다. 여기서 슬롯의 넓이는 일정하다. 표 3은 각각의 모델에서의 치 두께와 요크의 두께를 나타낸다.

3. 결 론

본 논문에서는 회전자 슬리브의 재질과 두께에 따른 와전류 손실 변화와 고정자 형상에 따른 고정자 철손 변화에 대해 다루었다. 그림 4와 그림 5는 본 논문에서 제시한 해석적인 방법에 의해 도출된 외부 슬리브의 두께와 재질에 따른 와전류 손실 변화를 나타내며, 그림 6은 유한요소법에 의해 도출된 결과를 나타낸다. 본 논문에서 제시한 해석법은 각각의 영역에서 발생하는 와전류를 저항에 의한 영향만을 고려하여 유한요소 해석법에 의해 도출된 결과와 값의 차이가 나타난다. 하지만 그림 4와 그림 5에서 외부 슬리브 두께 변화에 따른 손실 최소점에 대한 경향은 유사함을 알 수 있다. case2의 경우 외부 슬리브의 두께가 약 3mm일 경우에 손실이 최소가 됨을 알 수 있고, case3의 경우 외부 슬리브의 두께가 약 1.5mm일 때 손실이 최소가 됨을 알 수 있으며, 그림 6의 유한요소해석법에 의한 결과와 비교해 보았을 때 유사한 두께에서 최소의 손실을 나타냄을 확인할 수 있다. 또한 그림 7는 고정자 코어의 치 두께와 요크 두께의 변화에 따른 고정자 철손 변화를 나타낸 결과이다. 슬롯의 넓이를 동일하게 하고 치의 두께와 요크의 두께를 변화 시켰을 때 모델 1의 경우가 가장 낮은 손실을 나타냄을 확인할 수 있다. 모델 1과 모델 5를 비교해 보았을 때 치의 두께가 줄어들고 요크의 두께가 늘어날 경우 손실이 감소함을 알 수 있다. 이는 요크부분이 넓어짐에 따라 요크에서 발생하는 회전자계가 감소하여 회전자 코어의 손실이 감소함을 알 수 있다.[4] 따라서 본 논문에서 제시한 해석법을 이용하여 전동기 초기 설계시 전동기에서 발생하는 회전자 손실 저감을 위한 슬리브 재질과 두께 및, 고정자의 철손 저감을 위한 고정자의 형상 설계 시 보다 빠르게 접근할 수 있을 것으로 사료된다. 향후 실제 각 영역에서의 자속 밀도와 와전류 분포를 고려하여 보다 정확한 해석을 수행할 것이며, 본 논문에서 제안한 회전자 손실 예측의 타당성을 재검증할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Z. Q. Zhu, K.Ng, N.Schofield and D. How, "Analytical prediction of rotor eddy current loss in brushless machines equipped with surfaced-mounted permanent magnets, Part II : accounting for eddy current reaction field", fifth International Conference in Electrical Machines and Systems, vol.2, pp. 810-813, 2001.
- [2] F. Zhou, J. Shen, W. Fei and R. Lin, "Study of Retaining Sleeve and Conductive Shield and Their Influence on Rotor Loss in High-Speed PM BLDC Motors", IEEE Transaction on Mgnetics, vol.42, No.10, October 2006
- [3]Koung-Ho Ha, Sang-Yoon Cha, Jae-Kwan Kim, Jung-Pyo Hong, "Analysis of magnetic field behavior and iron loss in stator core of permanent magnet type motor", Transaction of the KIEE, vol.55
- [4] H.Y. Lee, H.B. Lee, H.K. Jung, S.Y. Hahn, K.S. Lee, I.H. Park, G.S. Park and D. Son, "shape design of stator slot for the reduction of stator core loss in the induction motor" Electric Machines and Drives Conference Record, 1997. IEEE International