

IPMSM의 Hole에 의한 Rib의 두께 감소와 전자기적 성능 향상

이태근, 김도진, 홍정표
한양대학교 자동차공학과

Electromagnetic Performance improvement and Rib thickness Reduction by making a hole on Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

Tae-Geun Lee, Do-Jin Kim, Jung-Pyo Hong
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

Abstract -Interior permanent magnet synchronous motor [IPMSM] which has high power density is applied to motor for Hybrid electric vehicle[HEV], Electric vehicle[EV], Fuel cell electric vehicle[FCEV] and electric home appliances. In order to improve efficiency performance of IPMSM, this paper presented a study by making a hole around air barrier. Because concentrated rib stress is distributed by suitable hole, the hole can reduce rib thickness of IPM rotor. And it can help decrease PM[Permanent Magnet] leakage flux. Saliency ratio(L_q/L_d) is also increased by magnetic circuit change. For this study, structure analysis of rotor is performed by Ansys program.

이 식에서 r 와 ρ 는 로터의 프와송 비와 밀도이고 ω 는 회전각속도이다. 식 (1)-(2)를 통해 구한 수식적 방법은 오차가 커 정확한 구조해석을 위해서 유한요소해석 툴인 ANSYS를 사용하였다.

1. 서 론

최근 세계는 지구 온난화와 같은 환경문제를 막기 위해 대체에너지 개발 및 고효율 기기 설계에 많은 노력을 기울이고 있다. 특히 자동차에 있어서 배기가스를 줄이기 위해 화석연료를 사용하는 자동차의 생산을 점점 줄이고 하이브리드, 연료전지 및 전기 자동차등 친환경차량에 대한 연구를 하고 있다. 하이브리드 차량의 경우는 이미 상용화되어 사용되고 있다. 친환경 자동차의 경우 에너지원이 화석연료에서 전기에너지로 바뀌고 있으며 구동장치는 엔진에서 모터로 점차 넘어가는 추세이다. 모터는 자동차의 구동장치로 점점 중요해지고 있고 자동차의 제한된 공간에서 효율적인 사용을 위해 높은 출력을 내는 소형 모터를 설계하는 것이 중요하다. 논문에서 제시한 매입형 영구자석 동기전동기는 마그네틱 토크뿐만 아니라 릴럭턴스 토크를 동시에 사용할 수 있어 출력밀도가 높고 친환경 자동차의 구동모터로써 많은 연구가 되고 있다.

본 논문에서는 hole을 이용하여 rib의 두께를 줄이는데 중점을 두었다. 영구자석 동기 전동기의 경우 구조적으로 회전자 내부에 영구자석을 삽입시켜 영구자석의 비산을 방지한다. 고속으로 회전할수록 원심력이 커지고 영구자석과 회전자 외경 사이에 있는 두께가 얇은 rib에 최대 응력이 발생한다. Rib는 매입형 영구자석 전동기에서 구조적으로 중요한 부분이므로 rib의 두께를 충분히 두껍게 가져가 모터의 안정성을 확보한다. 그러나 rib의 두께를 최대한 얇게 가져가는 것이 영구자석에서 나오는 누설자속을 줄일 수 있고 또한 rib부분을 쉽게 포화시켜 돌극비를 높일 수 있으므로 구조해석을 통해 안전한 범위 내에서 rib를 최대한 얇게 가져가야 한다.[1]

본 논문에서는 rib의 두께를 감소하기 위해 먼저 회전자의 구조해석을 하였다. 그 다음 rib에 집중되는 응력을 막기 위해 공기 배리어(barrier) 옆에 hole을 뚫었다. Hole에 의해 rib으로 집중되는 응력이 분산되어 회전자의 허용응력까지 rib의 두께를 더 줄일 수 있었다. 그리고 hole에 의한 rib의 감소에 따른 역기전력 상승과 돌극비의 증가를 나타냈다.

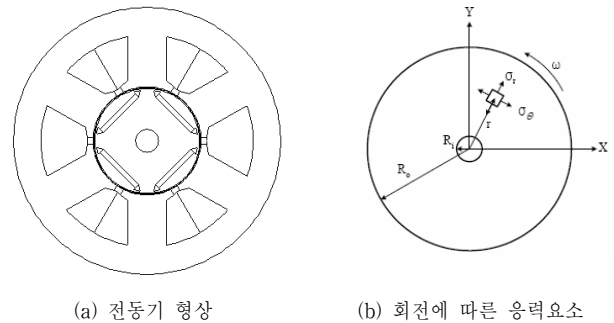
2. 본 론

2.1 구조해석

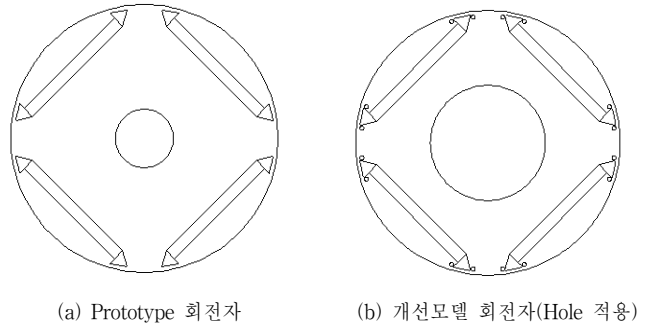
매입형 영구자석 동기전동기에서 로터에 걸리는 응력은 원주방향응력(circumferential stress) 식(1) 및 반경방향응력(radial stress) 식(2)로 계산되어 질 수 있다. [5]

$$\sigma_{\theta} = \frac{3 + \nu}{8} \rho \omega^2 \left[R_o^2 + R_i^2 + \frac{R_o^2 R_i^2}{r^2} - \frac{1 + 3\nu}{3 + \nu} r^2 \right] \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{3 + \nu}{8} \rho \omega^2 \left[R_o^2 + R_i^2 + \frac{R_o^2 R_i^2}{r^2} - r^2 \right] \quad (2)$$



<그림 1> 모델



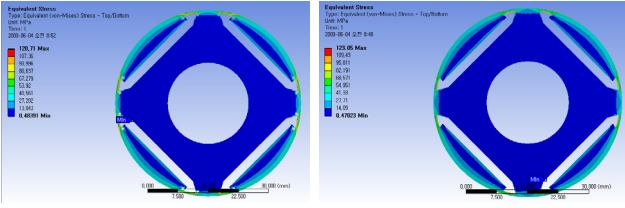
<그림 2> 회 전 자

2.2 FEM을 이용한 구조해석

먼저 그림 2의 (a)를 구조해석 하여 회전자의 응력분포를 확인하였다. 그 다음 공기 배리어 옆에 구멍을 뚫어 rib에 집중되는 응력을 분산하고자 하였다. 이를 통해 최대속도로 회전 시 Prototype과 rib의 두께를 줄인 모델의 최대응력을 비슷하게 할 수 있었다. 그리고 그림 2의 개선모델(b)의 구조해석을 통해 실제 rib에 걸리는 응력이 구멍에 분산됨으로서 rib에 걸리는 응력이 감소하는 것을 확인하였다. Rib의 두께는 0.6mm로 줄었고 이 때 회전자의 구조해석은 영구자석을 삽입하지 않았다.

<표 1> 기본 모델과 개선 모델 사양

	Prototype	개선모델(Hole적용)
Rib thickness[mm]	0.7	0.6
최대회전속도[RPM]	18,000	18,000
재질	S18	
허용응력 [Mpa]	270	
Rib Stress [Mpa]	123	120.7
Safe Factor	2	



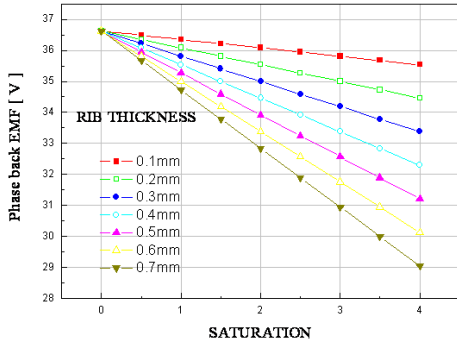
(a) Prototype (Rib 0.7mm) (b) 개선모델(Rib 0.6mm, Hole 적용)

<그림 2> Ansys에 의한 구조해석

2.3 역기전력과 THD

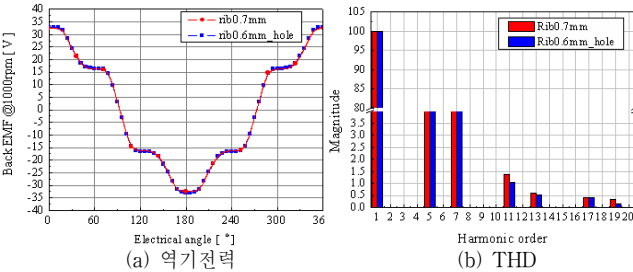
일반적으로 매입형 영구자석 동기 전동기의 경우 rib의 두께를 얇게 설계 할수록 누설자속을 줄여 역기전력의 크기를 향상시킬 수 있다. 식(3)을 사용하여 rib 두께와 포화에 따른 상 역기전력을 수식적으로 구하였고 그림 3에 rib 두께에 따른 상 역기전력을 나타내었다.[4]

$$E_a = \omega_a \frac{K_\omega N}{2} \frac{DL_{stk}}{p} \frac{4}{\pi} \frac{B}{\pi D - [2p \times 2R] + \frac{g\mu_{rec}}{t_m}} \sin \alpha_m \quad (3)$$



<그림 3> rib의 두께에 따른 역기전력 [Analytical method]

FEM을 사용하여 Prototype과 개선모델의 역기전력과 THD를 비교하여 그림 4와 표 2에 나타내었다.



<그림 4> 역기전력과 THD

<표 2> 역기전력과 THD

	rib0.7mm	rib0.6mm_hole
BEMF[Vrms] @1000rpm	29.95	30.2
THD[%]	16.37	16.15

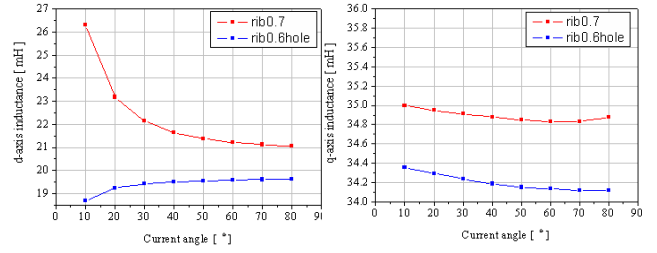
표2와 그림4. 에서 개선모델의 경우 Prototype에 비해 역기전력과 THD가 개선됨을 확인하였다.

2.4 인덕턴스와 돌극비

Rib의 두께가 줄어들면 포화가 더 쉽게 되어 돌극비가 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 포화가 되면서 전체 인덕턴스는 줄었지만 상대적으로 q축보다 d축 인덕턴스가 더 많이 줄어들었기 때문이다.[1] 그림 5.에서는 Prototype과 개선모델의 d,q축 인덕턴스와 돌극비를 나타냈다.

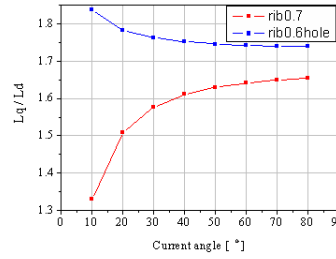
$$L_q = \frac{\Psi_o \sin \alpha}{i_q} \quad L_d = \frac{\Psi_a - \Psi_o \cos \alpha}{i_d} \quad (4)$$

$$T = P_n \{ \psi_a i_{oq} + (L_d - L_q) i_{od} i_{oq} \} \quad (5)$$

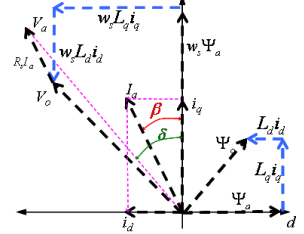


(a) d축 인덕턴스

(b) q축 인덕턴스



(c) 돌극비



(d) 백터도

<그림 5> rib 두께에 따른 인덕턴스

Rib 두께의 감소에 따른 돌극비와 상 역기전력의 증가로 밀력턴스 토크와 마그네틱토크가 상승하여 토크가 증가하면 동일 토크 발생시 입력 전류를 줄여 손실을 줄이고 모터의 효율을 높일 수 있다.

3. 결 론

매입형 영구자석 동기 전동기의 경우 공기 배리어(barrier)옆에 hole를 만들어 회전시 rib에 집중되는 응력을 hole로 분산시켰고 이를 통해 rib의 두께를 줄일 수 있다는 것을 확인하였다. 개선모델의 경우 돌극비와 역기전력 모두 증가 하였으며 THD 또한 개선되었다.

그리고 hole을 적용한다면 동일한 토크를 확보하기 위해 영구자석 사용량을 줄이거나 입력전류를 감소시킬 수 있고 이는 전동기의 효율을 개선하고 모터생산 비용을 저감 할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Yoji Takeda, Nobuyuki Matsui and Shigeo Morimoto "Design and Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors" Ohmsa, 2001
- [2] Edward C. Lovelace, Thomas M. Jahns, Thomas A. Keim, Jeffrey and H. Lang , "Mechanical Design Considerations for Conventionally Laminated, High-speed, Interior PM Synchronous Machine Rotors," *IEEE Trans, Ind Applic...* vol. 40, No. 3, May/June 2004.
- [3] A. Binder, T Schneider and M Klohr, "Fixation of Buried and Surface-Mounted Magnets in High-speed Permanent-Magnet Synchronous Machines," *IEEE Trans. Ind Applic...* vol. 42, NO. 4, July/August. 2006.
- [4] Tomas M. Jahns, "Design, Analysis, and Control of Interior PM Synchronous Machines," *IEEE-IAS Electrical Machines Committee 2004*
- [5] G. J. Han, T. H. Kim, S. C. Ahn, J. J. Shim and D. S. Han, Optimization of Pin-hole Location to Minimize Stress Concentration around Hole in Rotating Disc under Centrifugal Force." *J. of KSME*
- [6] A. Kioumars, M. Moallem, and B. Fahimi, "Mitigation of Torque Ripple in Interior Permanent Magn Motors by Optimal Shape Design," *IEEE Trans, on Magnetics...* vol. 42, No. 11, NOV, 2006
- [7] Liang Fang, Jae-Woo Jung, Jung-Pyo Hong, and Jung-Ho Lee, "Study on High-Efficiency Performance in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor With Double-Layer PM Design," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 11, pp. 4393-4396, Nov. 2008.
- [8] J. Y. Lee, S. H. Lee, G. H. Lee, J. P. Hong, and J. Hur, "Determination of parameters considering magnetic nonlinearity in an interior permanent magnet synchronous motor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 4, pp.1303-1306, Apr. 2006.