

희토류 자석 BLDC 전동기의 해석 및 설계

장 철 혁·이 동 환·정 태 경
 중앙대학교 전자전기공학부

Analysis and Design of BLDC Motor Using Rare Earth Magnet

Chul-Hyeok Chang · Dong-Whan Lee · Tae-Kyung Chung
 Chung-Ang University

Abstract - 본 논문에서는 8극 12슬롯 내전형 BLDC 전동기를 기본 모델로 하고, 이를 자기저항법 및 유한요소법을 이용하여 해석 및 설계를 하고자 한다. 본 논문에서 설계대상으로 하는 내전형 BLDC 전동기는 기존에 사용중인 모델로서, 외부의 고정 전기자는 기존의 모델에 맞도록 외경을 그대로 유지하면서 Teeth 등을 설계 변수로 하였고, 내부의 회전 자석계자는 기존에는 페라이트 자석을 사용하였으나 전동기의 성능 향상을 위해서 희토류 자석으로 대체하였다. 그리고 이로 인한 고정자의 포화가 일어나지 않도록 최적 설계를 하였다. 유한요소법을 적용하여 자속분포, 코깅 토크, 토크 등을 해석하였고, 고정자와 슬롯의 최적화를 통하여 토크 및 전동기의 성능을 향상시켰다.

1. 서 론

BLDC 전동기는 기존의 DC 전동기에 비하여 소음이 적고 속도제어가 용이하며 영구자석에 의한 자기적 에너지 밀도가 높아 효율이 좋기 때문에 광학기기, 컴퓨터 주변기기, 의료기기, 가전기기 등에 널리 사용되고 있다.

BLDC 전동기는 그 구성방식에 따라 원판형(Axial type) 및 원통형(Radial type)으로 나눌 수 있으며, 원통형은 외전형(Outer-rotor type)과 내전형(Inner-rotor type)으로 나눌 수 있다. 일반적으로 회전자측은 계자자속을 만들어주기 위한 영구자속과 자속의 경로를 구성해 주기 위한 회전자 철심부로 구성된다.

BLDC 전동기는 전기가 권선이 있는 고정자와 영구자석이 요크 표면에 부착 또는 요크 내부에 매입되어 있는 회전자로 구성되어 있다. 영구자석 재료로는 가격이 저렴한 페라이트 재질을 많이 사용하고 있으나, 최근에는 희토류 자석으로의 대체가 이루어지고 있다. 이는 희토류 자석의 가격이 떨어지고 있고 매우 큰 잔류 자속 밀도와 큰 항자력, 그리고 2상한에서 굴곡점이 없는 희토류 자석의 특성 때문이라고 할 수 있다. 희토류 자석을 이용한 전동기는 페라이트 자석을 이용하는 전동기와 비교할 때 동일 체적으로 더 높은 효율과 더 큰 토크를 갖는다. 그러나 희토류 자석을 이용한 모터 설계는 희토류 자석의 큰 잔류 자속 밀도 때문에 철의 포화에 대하여 고려해야하는 어려움이 있다.

본 논문에서는 상용프로그램인 Maxwell을 이용하여 기존에 사용 중인 모델의 특성을 해석하였으며, 전동기

성능을 향상시키기 위하여 Ferrite Magnet을 희토류 자석으로 대체하여 최적 설계하였다. 그리고 희토류 자석은 AICHI STEEL CORPORATION의 Nd-Fe-B Resin-Bonded Magnet인 MAGFINE MF-19E를 사용하였다.

2. BLDC 전동기의 특성 해석

2.1 해석이론

Magnetic field에서의 토크식은 다음과 같다.

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{B} \quad [N/m^2] \quad (1)$$

\vec{r} : 자기력밀도 \vec{j} : 전류밀도 \vec{B} : 자속밀도

맥스웰 방정식을 이용하면

$$\vec{j} = \vec{\nabla} \times \vec{B} = (\nabla \times \vec{H}) \times \vec{B} = \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} \quad (2)$$

이때, 자기장에서 체적 V인 물체에 작용하는 토크T는

$$\vec{T} = \int_V (\vec{r} \times \vec{j}) dv = \int_V \frac{1}{\mu_0} \vec{r} \times [(\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B}] dv \quad (3)$$

이다.

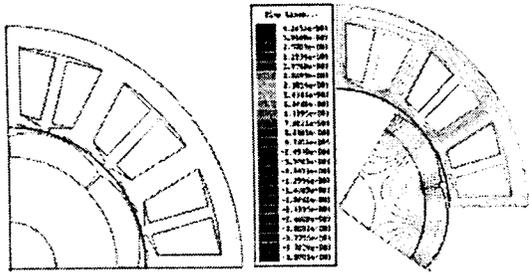
2.2 시뮬레이션 및 해석결과

2.2.1 기존 BLDC 전동기

본 논문에서 사용한 BLDC 전동기의 사양을 표 1에 시뮬레이션을 위한 모델 및 Flux Line을 그림 1에 나타내었다. 코일은 집중권, 결선방식은 Y결선, 영구자석은 페라이트자석으로 Radial방향으로 착자 하였다.

표 1 해석모델의 사양

공급 전압[V]	380	슬롯 개구폭[mm]	2.2
상수	3	치폭[mm]	6
극수	8	회전자 내경[mm]	23.2
슬롯수	12	회전자 외경[mm]	55.2
고정자 내경[mm]	70	축 방향 길이[mm]	30
고정자 외경[mm]	120	공극[mm]	0.5
스큐	0	자석 각도[degree]	44
권선 직경[mm]	0.6	자석 두께[mm]	6.9
상당 턴수	560	잔류자속밀도[T]	0.4



(a) 해석모델 (b) Flux Line
그림 1 해석모델 및 Flux Line

해석 모델은 8극으로 대칭구조이므로 해석 요소 수를 절감하기 위하여 전기적으로 한 주기에 해당하는 2극 즉, 전체의 1/4을 모델링 하였다.

그림2는 기존 BLDC 전동기의 무부하 특성곡선이다. 최대 토크는 9.7[Nm]이고, 무부하 속도는 3760[rpm]이다.

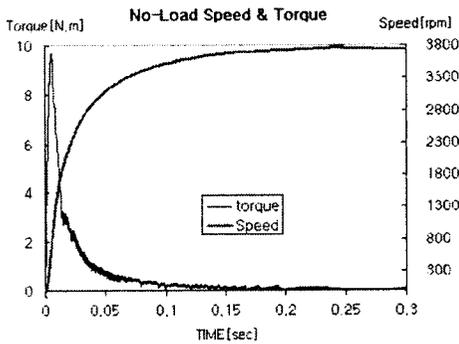


그림2 무부하 특성곡선

2.2.2 희토류 자석으로 교체

기존 모델은 8극으로 설계되어 있지만, 희토류 자석으로 교체시 16극으로 설계하였다. 이는 희토류 자석의 잔류 자속 밀도가 0.91[T]로써 페라이트 자석보다 2배이상 높기 때문에 한 극의 면적이 넓어져 코깅 토크의 증가 등 여러 가지 문제점을 해결하기 위해서이다.

그림 3은 교체한 자석의 형상이다. 기존 페라이트 영구 자석은 두께가 5.4 ~ 6.9[mm]이지만, 희토류 영구자석의 두께는 2[mm]로 일정하다.

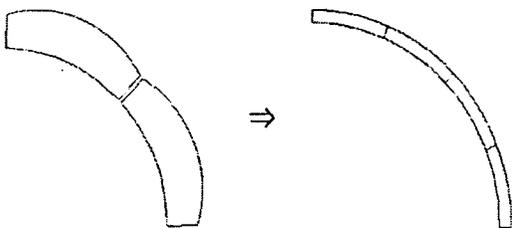
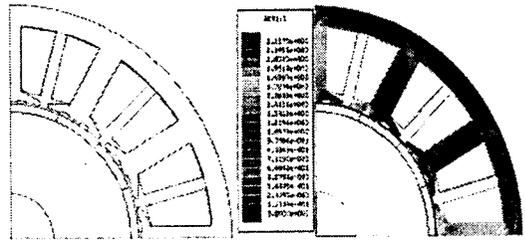


그림 3 희토류 자석(MF-19E) 형상

그림 4는 희토류 자석으로 교체한 모델의 형상과 자속 밀도이다. 고정자 치 부분의 평균 자속밀도가 1.6[T]이상이므로 철심이 포화되어 전동기가 정상적인 동작을 할 수 없다는 것을 알 수 있다.



(a) 해석모델 (b) 자속밀도
그림 4 해석모델 및 자속밀도

2.2.3 Stator 최적설계에 따른 토크 향상

최적설계를 위한 설계변수로는 Groove의 폭과 깊이, 치폭과 치단길이를 잡았다.

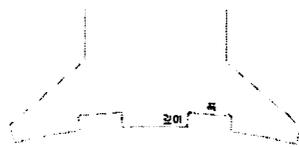


그림 5 설계 변수

그림 5와 같이 Groove의 깊이와 폭을 설계변수로 하여 깊이를 0.3~1.0[mm], 폭을 2.0~4.0[mm]까지 변화시키면서 계산한 코깅 토크를 그림6에 나타내었다.

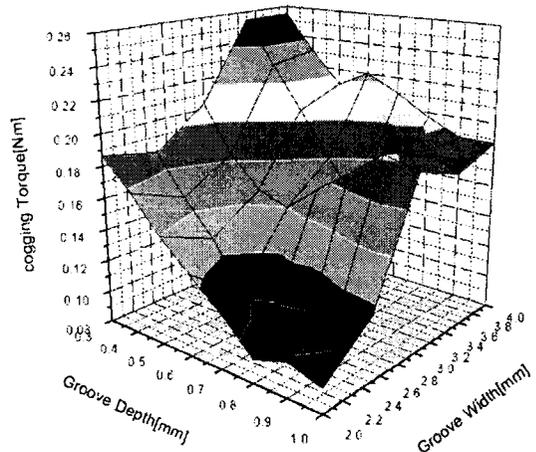


그림 6 설계 변수에 따른 코깅 토크

그림 6에서 Groove의 폭이 2.5[mm]일 때, 코깅 토크가 최대를 형성하는 것을 알 수 있다. 따라서 Groove의 폭을 2.5[mm]로 고정하고 Groove의 깊이와 치폭을 설계변수로 하였다.

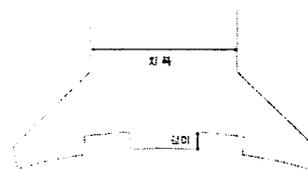


그림 7 설계 변수

그림 7과 같이 Groove의 깊이를 0.5~1.0[mm], 치폭을 6~8[mm]로 변화시키면서 계산한 토크값을 그림 8에 나타내었다. 그리고 치폭이 8[mm]를 초과하면 슬롯의 면적상 코일을 감을 수 없으므로 치폭

의 최대값은 8[mm]로 제한하였다.

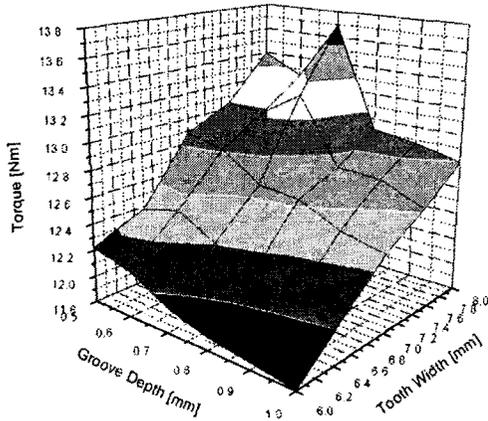


그림 8 설계 변수에 따른 최대 토오크

그림8에서 보듯이 치폭 8[mm], Groove 깊이가 0.7[mm]일 때 토오크가 최대가 된다. 따라서 최종적으로 치폭 8[mm], Groove의 폭 2.5[mm], 깊이 0.7[mm]로 결정하여 F.E.M 해석을 하였다. 그림 9에 F.E.M 해석을 위한 1/4 단면도를 표 2에 최적 설계한 BLDC 전동기의 사양을 나타내었다.

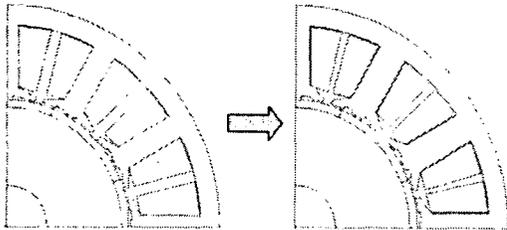
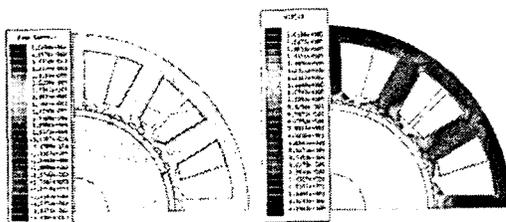


그림 9 최적 설계된 전동기 형상

표 2 최적모델의 사양

공급 전압[V]	380	슬롯 개구폭[mm]	2.2
상수	3	치폭[mm]	8
극수	16	회전자 내경[mm]	23.2
슬롯수	12	회전자 외경[mm]	65
고정자 내경[mm]	70	축 방향 길이[mm]	30
고정자 외경[mm]	120	공극[mm]	0.5
스큐	0	자석 각도[degree]	0
권선 직경[mm]	0.6	자석 두께[mm]	2
상당 턴수	560	잔류자속밀도[T]	0.91

그림 10에 Flux Line과 자속 밀도를 나타내었다. 고정자 치 부분의 자속밀도가 평균 1.1[T]로 포화가 없음을 알 수 있다.



(a) Flux Line (b) 자속 밀도
그림 10 최적모델의 Flux Line 과 자속 밀도

그림 11에 무부하 특성곡선을 나타내었다. 최대 토오크는 13.24[Nm]이고 무부하 속도는 2578[rpm]이다.

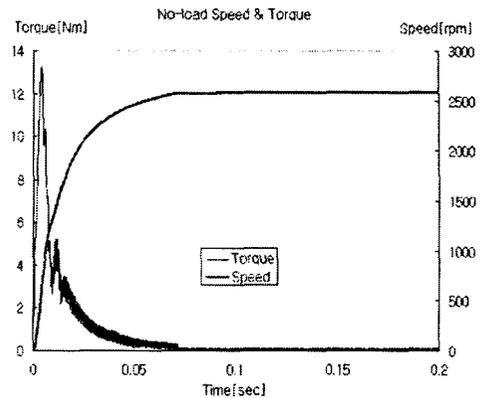


그림 11 최적 모델의 무부하 특성 곡선

3. 결 론

본 논문은 자기 저장법과 수치해석법에 의거한 RMxpt™ 과 FEM 상용 프로그램인 Maxwell™, 그리고 MotorPro를 사용하여 기존의 사용중인 내전형 BLDC 전동기를 희토류 자석으로 대체하여 전동기의 성능을 향상시키고자 하였다. 고정자 치 형상을 설계변수로 잡아 최적 설계함으로써 최대 토오크가 증가하였으며, 그에 따라 전동기의 특성 또한 향상되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 정병호, "A Study on the Optimal design of Motor Using Rare Earth Magnet by Niching Genetic Algorithm", 중앙대학교 전기공학과 공학석사 학위논문, 2000
- [2] 오승관, "A Study on the Optimal Design of high Factor BLDC Motor by the Permeance and Finite Element Method", 중앙대학교 전기공학과 공학석사 학위논문, 1999
- [3] 임달호, "電氣界의 有限要素法", 東明社, 1987
- [4] J.L Coulomb and Meunier, "Finite Element Implementation of Virtual Work Principle for Magnetic or Electric Force and Torque Computation", IEEE Transactions on Magnetics, vol. Mag-20, No.5, pp 1894-1896, September 1984
- [5] T.J.E. Miller, "Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives", Clarendon Press, 1989
- [6] J. R. Henderson Jr. and T. J. E Miller, Design of brushless permanent magnet motor, Oxford, 1994
- [7] Z. Q. Zhu and David Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent machines", IEEE Trans on Energy Conversion, vol.2, pp.1237-1242, 1999
- [8] Gordon R. Slemon, "Electric Machine and Drives", Addison-Wesley Publishing Company, INC, 1992
- [9] 大川光吉, 永久磁石回轉機, 綜合電子 出版社, 1985
- [10] S. J. Salon, Finite Element Analysis of Electrical Machines, Kluwer Academic Publishers, 1995
- [11] Jianming Jin, The Finite Element Method In Electromagnetics, John Wiley & Song, Inc. 2002