Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 22, No.4, pp. 121~129 April 2008 논문 22-4-16

페라이트 자석을 희토류 자석으로 교체한 BLDC 전동기의 설계에 관한 연구

(A Study on the Design of BLDC Motor Replacing Ferrite Magnet with Rare Earth Magnet)

정태경*
(Tae-Kyung Chung)

요 약

본 논문에서는 페라이트자석을 사용하고 있는 BLDC 전동기를 희토류 자석을 사용하는 전동기로의 설계를 다루고 있다. 최근 전기기기가 소형 경량화 됨에 따라 자석 성능이 우수한 희토류 자석을 이용한 전동기가 많이 사용되고 있다. 그러나 전기제품 메이커들은 기존의 설계를 유지하려는 경향이 있다. 본 연구에서는 전기기기에 취부되는 전동기의 외형을 그대로 하고 내부의 설계만 희토류 자석으로 변경하는 설계를 한다. 설계를 간단히 하기 위해 유한 요소법의 상용 패키지를 반복적으로 사용하였고 코깅 토오크를 줄이기 위해 고정자 요크와 고정자 단의 그루브를 설계하였다.

Abstract

This paper deals with the design of BLDC motor replacing ferrite magnet with rare earth magnet. Electric machinery system using ferrite magnet motor is already widespread in large numbers. Electrical appliance makers have a tendency to adhere to existing system using ferrite magnet motors because of redesigning the whole system. This paper designs the rare earth magnet motor untouching the external system dimension and motor outer size. To do the design simply, finite element package is used iteratively. To reduce the cogging torque effect and magnetic saturation, stator yoke shape and the groove of the end face of yoke are redesigned.

Key Words : BLDC motor, rare-earth magnet, finite element package, cogging torque

1. 서 론

전기기기에 사용되는 자석의 발달에 따라 페라이트를 사용하던 전기기기가 희토류 자석을 사용한 전기기기로 교체되고 있다. 희토류 자석은 기존의 페라이트 자석보다 에너지 밀도가 높고 잔류자석 밀도와 항자력이 크고 자석의 특성 곡선이 직선으로 되

* 주저자 : 중앙대학교 전자전기공학부 교수
Tel : 02-820-5291, Fax : 02-822-2571
E-mail : tkchung@cau.ac.kr
접수일자 : 2008년 1월 7일
1차심사 : 2008년 1월 14일
심사완료 : 2008년 2월 1일

어 있어서 전기기기를 소형화 할 수 있고 특성도 더 우수하게 만들 수 있다. 광학기기, 컴퓨터 주변기기, 의료기기, 가전기기에 사용되는 소형 전동기 분야에 있어서도 페라이트 자석을 사용한 직류 전동기에서 페라이트 사용 BLDC 전동기, 희토류 자석 BLDC 전동기로 발전해 나가고 있다. 그러나 기존에 페라이트 전동기를 채용한 전기기기 시스템이 이미 많이 보급되어 있고 이를 특성이 우수한 희토류 자석 전동기로 교체하는 것은 전동기의 취부 조건이 달라져서 시스템 전체를 재설계하고 제작해야 하는 번거로움이 따르게 된다. 본 논문에서는 에어컨의 팬에 사용되는 페라이트 BLDC 전동기를 시스템의 외형 조건과 취부되는 전동기의 외형을 변화시키지 않고 희토류 자석을 채용한 BLDC 전동기를 설계하여 기존의 시스템보다 특성이 우수하고 효율이 좋은 전기기기 시스템을 제공하고자 한다.

제시하는 희토류 자석 전동기는 이미 외형이 정해져 있으므로 기존의 설계 방식인 자기저항법이나 최적 설계방법보다는 간단하게 상용의 유한 요소 해석 프로그램을 반복적으로 사용하여 자석의 형상과 코아의 형상을 설계하여 요구되는 특성이 나오도록 한다. 희토류 자석을 채용하면 높은 잔류 자속 밀도 때문에 포화 현상과 코깅 토오크가 커지고 이를 줄이기 위해 고정자 철심 치폭과 치단부의 형상을 변경하고 치단부에 있는 홈 (groove)의 크기를 변경한다 [1-3].

2. 8극 12슬롯 페라이트 BLDC 전동기의 해석

본 논문에서 교체 대상인 8극 12슬롯 페라이트 BLDC 전동기의 단면도를 그림 1에 전동기의 사양은 표 1에 나타내었다.

코일은 집중권, 결선방식은 Y결선, 영구자석은 방사형 방향으로 착자되어 있다.

그림 2는 시뮬레이션을 위한 1주기 단면도이다.

그림 3은 유한 요소법에 의한 8극 12슬롯 외전형 BLDC 전동기의 해석 모델의 요소분할도이고 전체 요소 수는 7,939개이며, 세부적으로는 표 2와 같다.

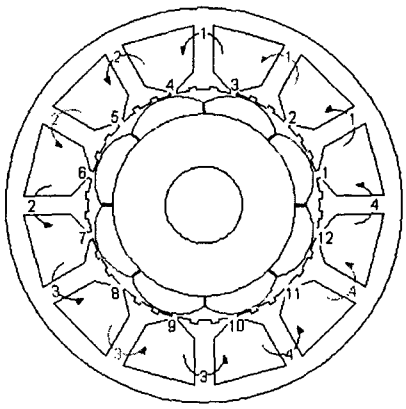


그림 1. 8극 12슬롯 BLDC 페라이트 전동기의 단면도
Fig. 1. Cross-section of 8-pole 12-slot BLDC motor

표 1. 8극 12슬롯 페라이트 BLDC 전동기의 사양
Table 1. Specification of 8-pole 12-slot BLDC motor

공급 전압[V]	380	슬롯 개구폭[㎜]	2.2
정격전류[A]	0.5	치폭[㎜]	6
상수	3	회전자 내경[㎜]	23.2
극수	8	회전자 외경[㎜]	55.2
고정자 내경[㎜]	70	축 방향 길이[㎜]	30
고정자 외경[㎜]	120	공극[㎜]	0.5
스큐	0	자석 각도[°]	44
무부하 회전수[rpm]	3,760	자석 두께[㎜]	6.9
상당 턴수	560	잔류자속밀도[T]	0.4

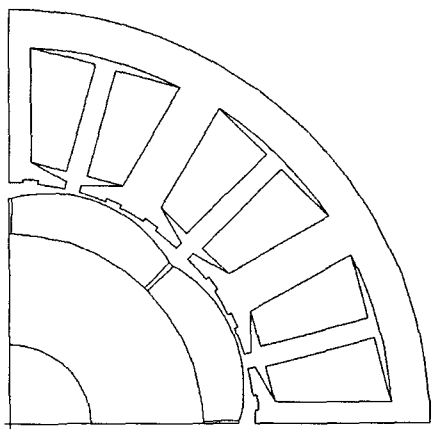


그림 2. Simulation을 위한 1주기(90[°]) 단면도
Fig. 2. Cross-section of one period for simulation

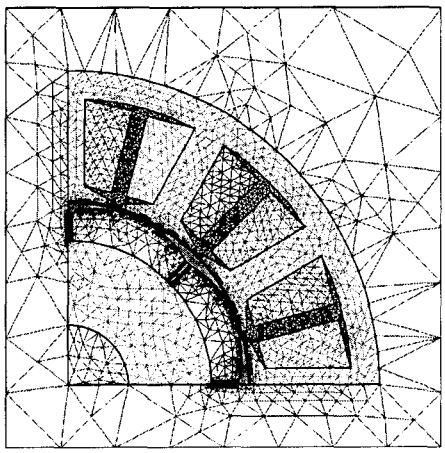


그림 3. 요소 분할도
Fig. 3. Mesh of the model

표 2. 요소 수
Table 2. Mesh number

AirGap	2003	Rotor	247	영구자석	1010
AirStator	1101	Stator	1276	Background	526
AirRotor	1003	Coil	732	Shaft	41

그림 4는 유한요소법으로 얻은 결과를 이용하여 무부하 때의 시간에 따른 토오크와 속도 곡선을 계산한 것으로 최대 속도는 3,760[rpm]이며, 이때 토오크는 0으로 잘 수렴함을 알 수 있다.

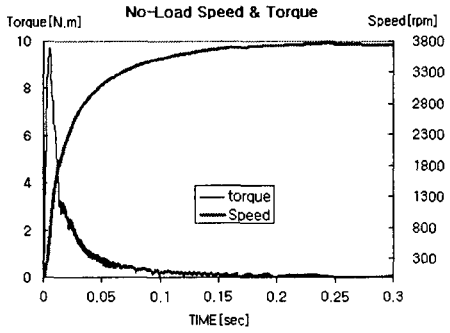


그림 4. 무부하 특성 곡선
Fig. 4. No-load characteristic curve

그림 5은 자속 밀도를 나타낸 그림으로 포화영역이 없음을 알 수 있다.

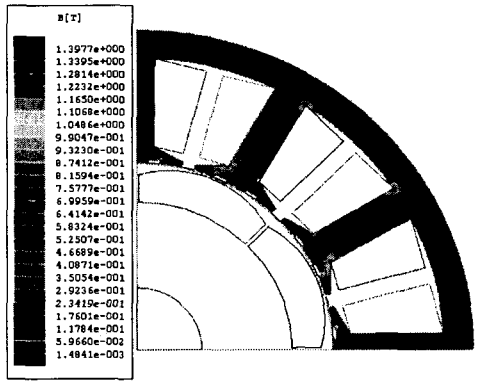


그림 5. 자속 밀도
Fig. 5. Flux density

3. 희토류 자석을 이용한 BLDC 전동기 설계

희토류 자석 BLDC 전동기를 설계하기 위해서 앞장에서 논의한 페라이트 BLDC 전동기의 외형을 그대로 유지하면서, 희토류 자석으로 대체하였다. 여기서 사용된 희토류 자석은 아이치 제강(Aichi Steel Corporation)의 MAGFINE 제품 중 MF19E를 사용하였다. 영구 자석의 부피를 효율적으로 줄이기 위해서 영구 자석의 극수를 16극으로 적용하여 FEM 해석을 하였다. FEM해석을 위한 1/4 형상의 전동기 단면도가 그림 6에 나타나 있다.

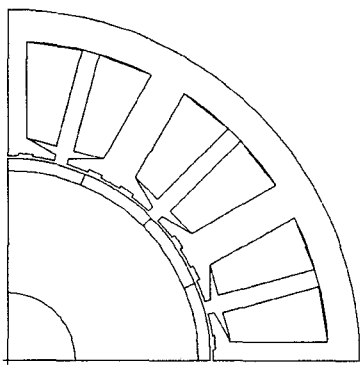


그림 6. Simulation을 위한 1주기 단면도
Fig. 6. Cross-section of one period for simulation

기존 전동기의 페라이트 자석은 최고 두께가 6.9[mm]이고 잔류자속밀도는 0.4[T]이었으나, MF19E

의 경우는 두께가 2[mm]로 일정하며 잔류자속밀도는 0.91[T]이다. 그림 7은 이 모델을 F.E.M해석한 결과로 철심부분에 포화가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

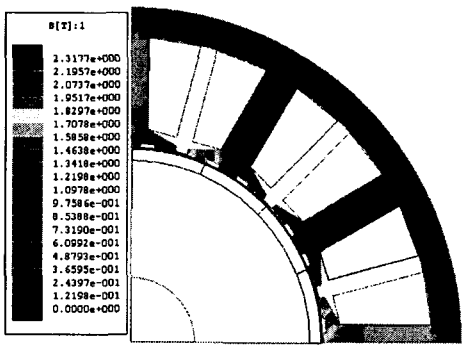
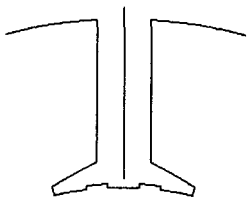
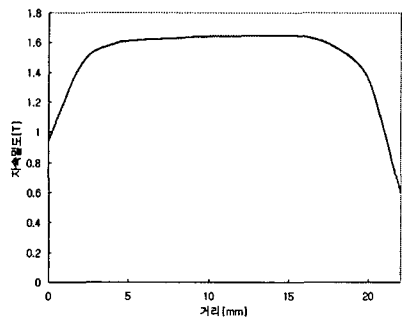


그림 7. 자속 밀도
Fig. 7. Flux density



(a) 고정자 철심



(b) Line에 따른 자속밀도

그림 8. 고정자 철심부분의 자속밀도
Fig. 8. Flux density of ststor core

그림 8은 철심부분의 자속밀도를 자세하게 그래프로 나타내었다. 철심부분의 자속밀도가 평균적으로 1.6[T]이상인 것을 볼 수 있다. 따라서 이 전동기는 철심의 포화로 정상적인 동작을 할 수 없다.

4. 철심부 포화방지를 위한 최적 설계

본 논문에서는 페라이트 자석을 희토류 자석으로 교체하는 BLDC 전동기의 설계라는 측면에서 철심부의 포화 방지 및 최대 토오크 향상을 목적으로 한다. 따라서 최적화 설계 변수로는 치폭과 치단의 길이를 잡았으며, 초기 설계 변수의 치폭과 치단의 길이는 기존 페라이트 BLDC 전동기의 값으로 하였다.

그림 9에 설계 변수를 나타내었다 치폭의 초기값은 6[mm], 치단이 길이는 1.5[mm]이다. 그리고 슬롯의 면적상 치폭이 8[mm]를 초과하면 코일의 점적률이 90[%] 이상이 되어 코일을 감을 수 없으므로 치폭의 최대값은 8[mm]로 제한하였다.

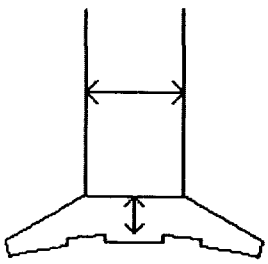


그림 9. 설계변수
Fig. 9. Design Variables

치폭을 6~8[mm], 치단길이를 1.5~3.5[mm]로 변화시키면서 계산한 토오크 값을 그림 10에 나타내었다.

치폭 8[mm], 치단길이 2.5[mm]일 때 최대 토오크가 가장 크다는 것을 알 수 있다. 그림 11에 개선한 치 모양을 나타내었다.

유한 요소법에 의한 변경된 BLDC 전동기의 해석 결과는 다음과 같다. 그림 12는 나누어진 요소를 나타내고 있다. 전체 요소수는 9,228개이며, 세부적으로는 표 3과 같다.

그림 13은 무부하 때의 시간에 따른 토오크와 속도 곡선으로 최대 속도는 2530[rpm]이며, 최대 토오크는 13.05[N.m]이고 토오크는 0으로 잘 수렴하고 있음을 알 수 있다. 그림 14는 자속선을 나타낸다.

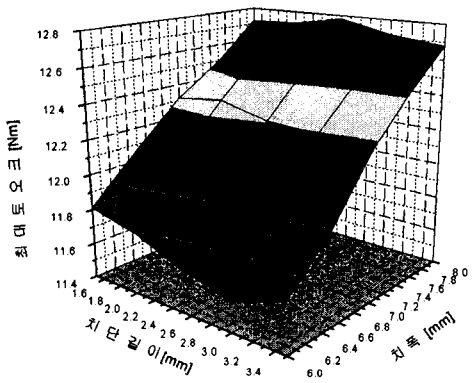


그림 10. 최대 토오크
Fig. 10. Maximum torque

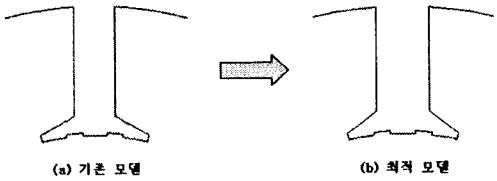


그림 11. 치 모양 비교
Fig. 11. Comparison of teeth shape

표 3. 요소 수
Table 3. Mesh number

AirGap	2003	Rotor	251	영구자석	924
AirStator	1326	Stator	1888	Background	449
AirRotor	1314	Coil	1032	Shaft	41

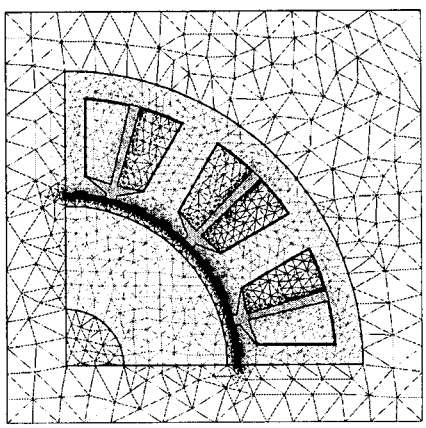


그림 12. 요소 분할도
Fig. 12. Mesh of the model

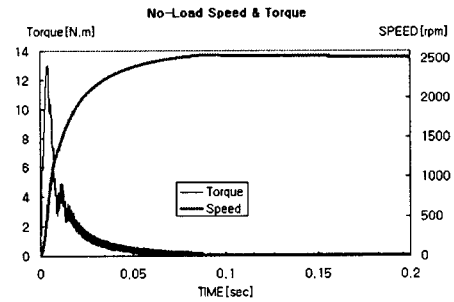


그림 13. 무부하 특성 곡선
Fig. 13. No-load characteristic curve

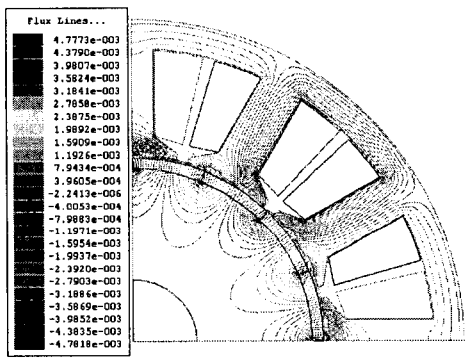


그림 14. 자속선
Fig. 14. Flux-Line

그림 15는 자속 밀도의 크기를 나타낸 그림이다. 철심부분이 평균 1[T]정도로써 포화영역이 없음을 확인할 수 있다.

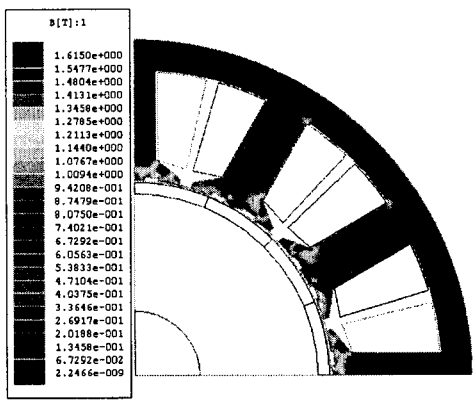


그림 15. 자속 밀도
Fig. 15. Flux density

그림 16은 정격 속도 및 토오크를 나타낸 것이다. 정격 토오크는 2.83[Nm]이고 정격 속도는 1,686 [rpm]이다.

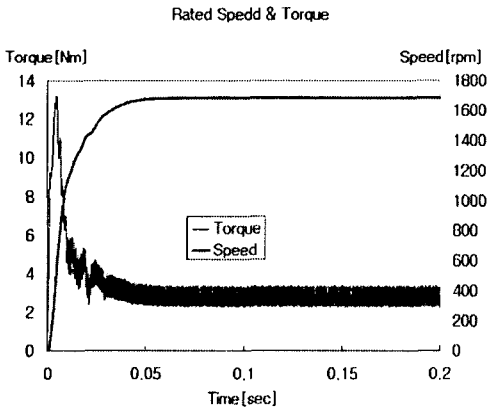


그림 16. 정격 속도 및 토오크
Fig. 16. Rated Speed and Torque

그림 17은 코깅 토오크를 나타낸 것으로 코깅 토오크는 0.13[Nm]이다.

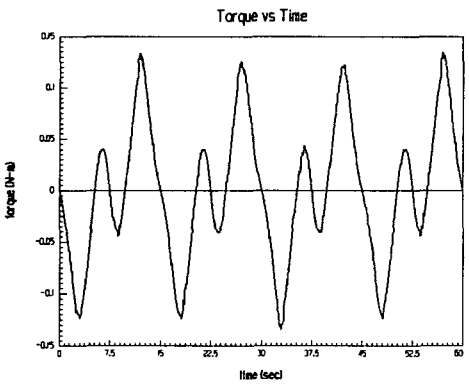


그림 17. 코깅 토오크
Fig. 17. Cogging Torque

5. 코깅 토오크 저감을 위한 Groove 설계

페라이트 자석에서 희토류 자석으로 대체하였기 때문에 자석의 잔류자속밀도가 크게 증가하였다. 따라서 기존의 페라이트 BLDC 전동기보다는 코깅 토오크가 상대적으로 증가할 것이라고 예상할 수 있다. 따라서 기존의 페라이트 BLDC 전동기의 Groove의 형상을 바꾸어 코깅 토오크를 저감시키려 한다. 설계 변수로서는 Groove의 폭과 깊이를 잡았으며, 초기 설계 변수의 폭과 깊이는 기존 치수에서 시작하도록 하였다[4-6].

그림 18에 설계 변수를 나타내었다 Groove 폭의 초기값은 2[mm], 깊이는 0.3[mm]이다.

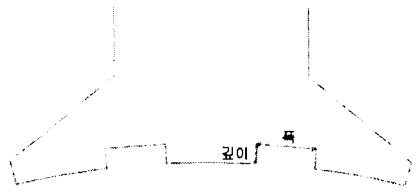


그림 18. 설계변수
Fig. 18. Design Variable

Groove 폭을 2~4[mm], 깊이를 0.3~1[mm]까지 변화시키면서 계산한 코깅 토오크 값을 그림 19에 나타내었다.

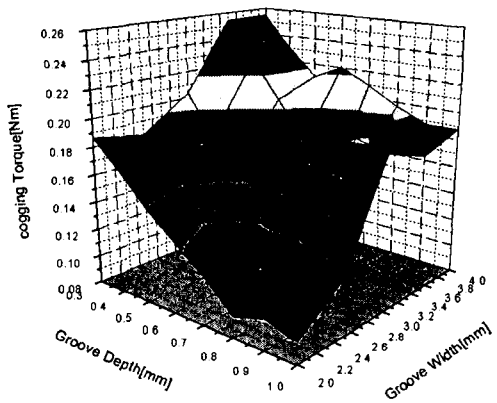


그림 19. 코깅 토오크
Fig. 19. Cogging Torque

그림 19에서 알 수 있듯이 Groove의 깊이가 0.8[mm], 폭이 2.5[mm]일 때, 코깅 토오크가 0.0866 [Nm]로 최소가 된다.

6. 토오크 향상을 위한 설계

앞 장에서 코깅 토오크가 최소가 되는 형상을 결정하였지만, 설계의 주요 목적은 최대 토오크의 향상이다. 그림 19를 보면 Groove의 폭이 2.5[mm]일 때, 어떤 Groove 깊이에서든지 코깅 토오크가 최소라는 것을 알 수 있다. 따라서 Groove의 폭을 2.5[mm]로 고정하여 코깅 토오크가 최소가 되도록 유지하면서 토오크를 향상시키려 한다. 최적화 설계 변수로서는 Groove의 깊이와 치폭으로 잡았다.

그림 21에 설계 변수를 나타내었다. Grooved 깊이의 초기값은 0.5[mm]이고, 치폭의 초기값은 6[mm]이다.

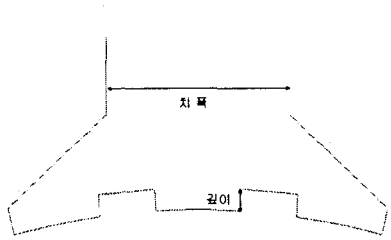


그림 20. 설계변수
Fig. 20. Design Variable

치폭은 6~8[mm], Groove의 깊이를 0.5~1.0[mm]까지 변화시키면서 계산한 최대 토오크 값을 그림 21에 나타내었다.

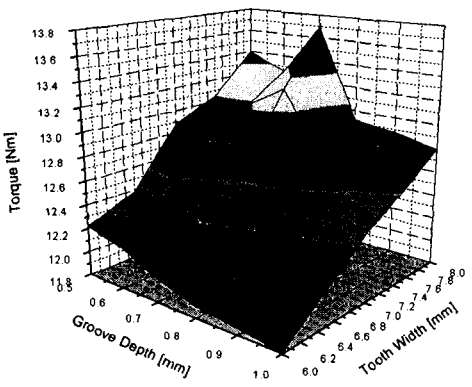


그림 21. 최대 토오크
Fig. 21. Maximum torque

그림 21에서 Groove 깊이가 0.7[mm], 치폭이 8[mm]일 때, 최대 토오크가 13.7[Nm]인 것을 알 수 있다. 그리고 지금까지 결정한 최적 치수를 표 4에 나타내었다.

표 4. 최적 설계 치수
Table 4. Optimum design size

치 폭[mm]	8	Groove 깊이[mm]	0.7
치단길이[mm]	2.5	Groove 폭[mm]	2.5

7. 설계된 BLDC 전동기의 F.E.M 해석 결과

이상의 해석에서 얻은 치수로 설계된 BLDC 전동기의 해석 결과는 다음과 같다.

그림 22는 무부하 때의 시간에 따른 토오크와 속도 곡선으로 최대 속도는 2,578[rpm]이며, 최대 토오크는 13.24[N.m]이고 토오크는 0으로 잘 수렴하고 있음을 알 수 있다. 그림 23은 자속선을 나타낸다.

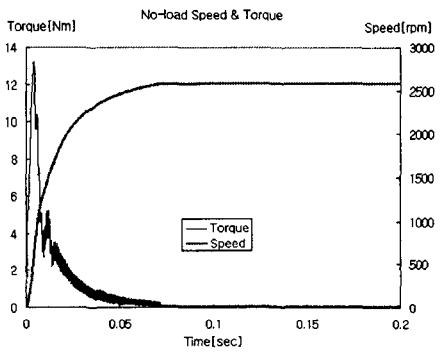


그림 22. 무부하 특성 곡선
Fig. 22. No-load characteristic curve

그림 24는 정격 속도 및 토오크를 나타낸 것이다. 정격 토오크는 2.83[Nm]이고 정격 속도는 1,753[rpm]이다.

그림 25는 코깅 토오크를 나타낸 것으로 코깅 토오크는 0.085[Nm]이다.

그림 26은 실제 제작하여 측정한 전동기의 속도 토오크 특성이고 그림 27과 28은 기존의 페라이트

전동기와 희토류 자석 전동기의 사진이다.

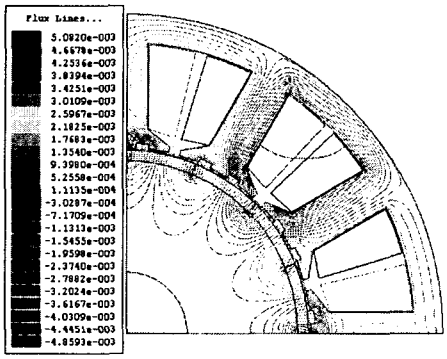


그림 23. 자속선
Fig. 23. Flux-Line

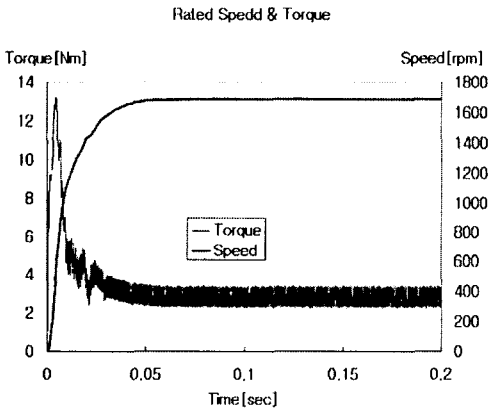


그림 24. 정격 속도 및 토오크
Fig. 24. Rated Speed and Torque

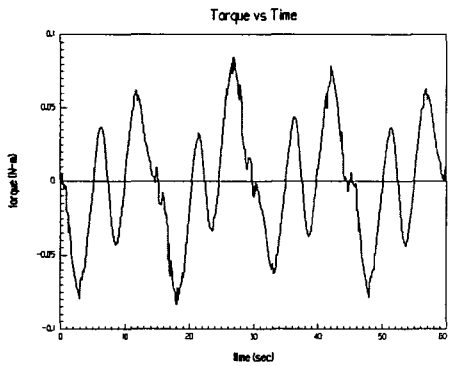


그림 25. 코깅 토오크
Fig. 25. Cogging Torque

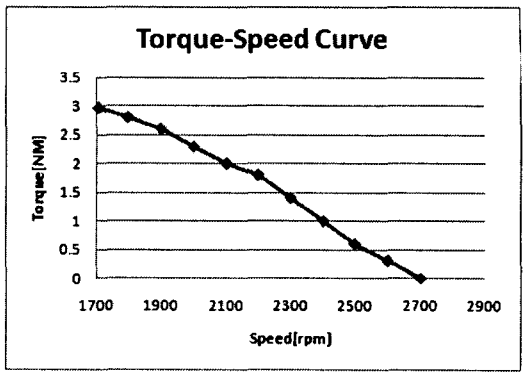


그림 26. 측정된 토오크 속도곡선
Fig. 26. Torque speed curve

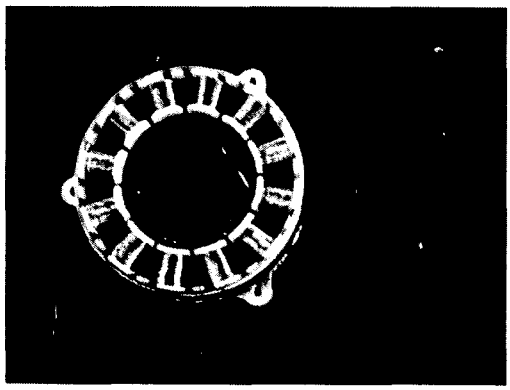


그림 27. 페라이트 자석 BLDC 전동기
Fig. 27. Ferrite BLDC Motor

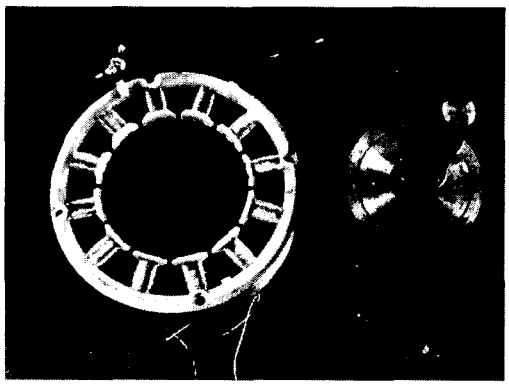


그림 28. 설계된 희토류 자석 BLDC 전동기
Fig. 28. Designed rare earth magnet BLDC motor

8. 결 론

본 논문에서는 기존에 사용중인 페라이트 자석 BLDC 전동기를 외형을 유지하고 회전자 부분의 페라이트 자석을 희토류 자석으로 교체하여 고출력을 얻기 위한 설계를 하였다. 기존 페라이트 자석보다 희토류 자석의 잔류자속밀도가 2배 이상 증가하였기 때문에 고정자 부분의 철의 포화가 예상 되었고, 유한 요소 해석결과 포화로 인해 정상적인 전동기 운행이 불가능 했다. 포화 방지를 위하여 고정자 치부분의 치단길이와 치폭을 설계 변수로 잡은 모델을 설계하였다. 하지만, 코깅 토오크가 증가하였음을 확인하여, 다시 치단길이와 치폭 및 Groove의 폭과 깊이까지 설계 변수로 추가한 모델을 최종적으로 설계하였다. 바로 전 모델에 비해서 최대 토오크를 유지하면서 코깅토오크가 감소된 결과를 얻을 수 있었다. 제작하여 검증한 결과 제시된 방법은 간단하면서도 빠르게 희토류 자석 전동기로 대체 할 수 있는 방법이라 사료된다.

따라서 본 논문에서는 페라이트 자석을 희토류 자석으로 교체하면서 발생하는 여러 가지 문제들을 해결함으로써 고출력의 BLDC 전동기를 설계하였다. 이를 통해 앞으로 다양한 종류의 페라이트 BLDC 전동기들을 고성능의 희토류 자석 BLDC 전동기로 대체 할 수 있으리라 기대된다.

이 논문은 2005년도 중앙대학교 학술연구비(일반연구비) 지원에 의한 것임.

References

[1] 임달호, "電氣界의 有限要素法", 東明社, 1987.
[2] S. J. Salon, Finite Element Analysis of Electrical Machines, Kluwer Academic Publishers. 1995.
[3] Jianming Jin, The Finite Element Method In Electromagnetics, John Wiley & Song, Inc. 2002.
[4] Takeo Ishikawa, Gorden R. Slemon. "A Method of Reducing Ripple Torque in Permanent Magnet Motors Without Skewing", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.29, No.2, pp.2028~2031 , March 1993.
[5] K.Goto and K. Kobayashi, "An Analysis of Cogging Torque of a DC Motor and a New Reducing Technique," Trans IEE Japan, vol. 103-B, no.11, pp.711-718, 1983.
[6] 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.

◇ 저자소개 ◇

정태경 (鄭泰庚)
1957년 3월 28일생. 1981년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기 공학과 졸업(박사). 1991~1992년 미국 Harvey Mudd College 방문교수. 현재 중앙대 공대 전자전기공학부 교수.