착자기 형상 설계를 통한 스핀들 모터의 코깅 토크 저감에 관한 연구

오세영*, 임승빈*, 이진헌*, 정대성*, 김 솔**, 이 주*
*한양대학교 전기공학과, **유한대학 전기정보과

A Study on the Reduction of Cogging Torque of the Spindle Motor by Design of Magnetizer Shape

Se-young Oh*, Seung-bin Lim*, Jin-hun Lee*, Dae-sung Jung*, Sol Kim**, Ju Lee*
*Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, **Dept. of Electrical Engineering, Yuhan College

Abstract - The spindle motor used on the ODD has a characteristic that electromagnetic pulsation and noise change differently by magnetization pattern of rotor. Therefore, design of magnetizer yoke that make to have optimal magnetization pattern is very important. In this paper, we proposed an analysis method that applies magnetizer analysis result to the spindle motor. We measured back-EMF of the real spindle motor. And then, we verified validity of the proposed analysis method by comparing the measurement and analysis result. Also, we designed the magnetizer shape that has optimal magnetization pattern by using proposed method. As a result, we reduced cogging torque of the spindle motor.

1. 서 론

광학 디스크 드라이브(Optical Disk Drive, ODD)에 사용되고 있는 스핀들 모터는 회전자의 영구자석의 착자 패턴에 의해 전자기적 진동·소음이 현격하게 달라지는 특징을 갖는다. 따라서 최적의 착자 패턴을 갖는 착자기를 설계하는 것이 아주 중요하다. 착자기를 설계하기 위해서는 착자기 시뮬레이션이 필수적인데, 그 결과를 스핀들 모터에 적용하여 해석하는 것이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 착자기 해석결과를 스핀들 모터 해석에 적용하는 방법을 제안하였고, 제안한 방법을 통해 스핀들 모터의 코깅 토크를 저감하는 영구자석 착자 패턴을 갖는 착자기의 형상을 설계하였다. 또한 제안한 해석방법의 타당성을 검증하기 위해서 실제 스핀들 모터의 역기전력을 측정하여 해석결과와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 코깅 토크

코깅 토크는 영구자석에 의한 기자력의 고조파와 슬롯의 존재로 인하여 발생하는 공극 퍼미언스 고조파의 상호작용에 의해 발생하며, 전동기 유효토크에는 큰 영향을 미치지 못 하지만 토크가 맥동하여 속도리플과 진동이 발생하게 되므로[1,2], 전동기의 성능을 저하시키는 결과를 가져오게 된다. 코깅 토크를 저감시키는 방법은 스큐, 보조슬롯 사용, 공극길이 증가, 분수슬롯 사용, 슬롯수의 증가, 슬롯 개구 폭의 최소화 등이 있다[3].

코깅 토크는 일반적으로 식 (1)로 표현된다[4].

$$T_{cog} = \frac{\pi}{4} D L_{sk} \sum n \frac{\sin(n\sigma L_{sk})}{n\sigma L_{sk}} \Lambda_n f_n \sin(n\theta) \qquad (1)$$

여기에서, $n = K_{cog} L_{CM}$, $K_{cog} = 1, 2, 3, \cdots$

L_{CM} : 슬롯수와 극수의 최소공배수

D: 회전자의 외경

L_{sk} : 고정자의 철심길이

σ : 스큐각도

$\frac{\sin(n\sigma L_{sk})}{n\sigma L_{sk}}$: 스큐의 효과

Λ_n : 공극 퍼미언스의 n차 공간고조파

f_n : 자석에 의한 자속분포의 n차 고조파

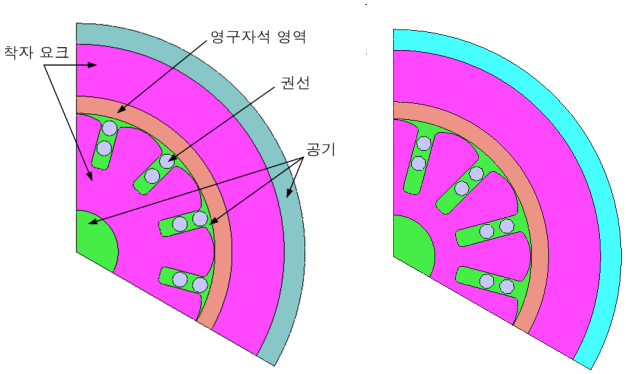
θ : 회전자의 회전각도

본 논문에서는 영구자석에 의한 자속분포를 개선하여 코깅 토크를 저감시켰다. 즉, 식 (1)에서 f_n 성분을 줄임으로써 T_{cog}를 저감하였다.

본 연구를 위해서는 착자기 해석을 통해 얻어진 영구자석의 자속밀도 자속밀도분포 데이터를 스핀들 모터의 영구자석 부분에 적용시켜 해석해야 한다. 따라서 본 논문에서는 착자기 해석결과를 이용하여 스핀들 모터를 해석하는 방법을 제안하였다.

2.2 착자기의 해석

그림 1의 (a)는 본 연구에 사용된 기본 착자기의 형상을 나타내고, (b)는 실험계획법을 이용하여 설계한 착자기의 최적 모델이다[5]. 최적 모델은 기본 모델에 비하여 착자기의 슬롯 부분을 더 깊게 만들고, 권선을 슬롯 안쪽으로 약간 이동시킨 형상이다. 여기서 영구자석은 12극의 극이방 착자가 된다.

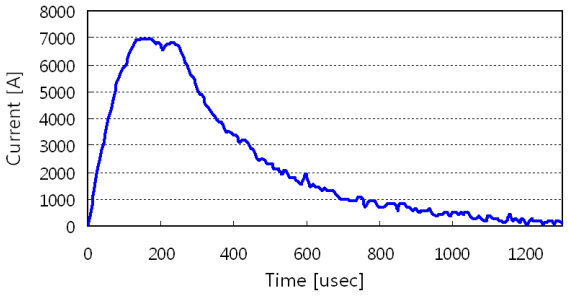


(a) 기본 모델 (b) 최적 모델

〈그림 1〉 착자기 1/3 형상

그림 2는 착자기 기본 모델의 전류파형을 측정한 그래프이다. 그림에서 착자기의 순간 최대 전류는 약 7kA를 나타낸다. 따라서 착자기 해석 모델에서 직류전류 7kA를 권선 영역에 인가하고 그 순간의 자속밀도분포를 유한요소법으로 해석하였다. 여기에서 얻어진 영구자석 영역의 자속밀도분포 데이터는 스핀들 모터 해석 모델에서 영구자석의 자화방향과 자화량의 상대적인 크기로 사용된다.

본 논문에서는 착자기 회로를 고려한 과도상태해석은 생략하였다. 여기에서 제안하는 스핀들 모터 해석방법은 최대 전류가 흐르는 한 스텝에서의 자속밀도분포 데이터만을 필요로 하기 때문이다.



〈그림 2〉 착자기 전류파형

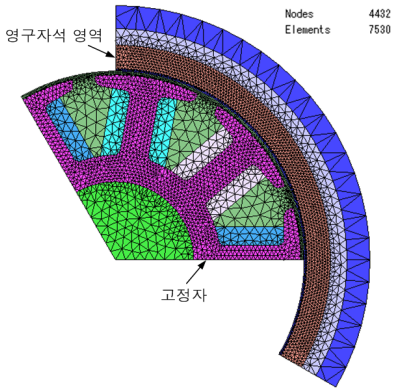
2.3 스핀들 모터의 해석

표 1은 ODD용 스핀들 모터의 사양을 나타내고 있다. 그림 3은 이 모델의 요소분할도를 나타낸다. 이 스핀들 모터는 12극 9슬롯의 형태로서 기하학적으로 120° 대칭이므로 1/3모델을 가지고 유한요소해석을 수행

하였다. 또한, 해석의 편의상 고정자를 반시계방향으로 4291.845rpm의 속도로 회전시켜서 해석을 수행하였다. 여기서 4291.845rpm으로 회전시킨 것은 역기전력의 크기를 실험결과와 비교하기 위해서이다. 이 결과를 통해 제안한 해석방법이 타당하다는 것을 입증하였다.

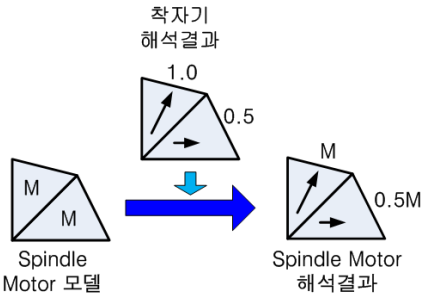
<표 1> 스핀들 모터의 기본 사양

구분	사양	구분	사양
고정자 외경[mm]	18	정격 속도[rpm]	11000
회전자 내경[mm]	18.6	입력전압[V]	12
회전자 외경[mm]	22.5	리코일 투자율	1.269
적층길이[mm]	5.25	최대 보자력[A/m]	438200



<그림 3> 스핀들 모터의 요소분할도

본 논문에서 제안하는 스핀들 모터 해석방법의 가장 큰 특징은 착자기 해석결과를 스핀들 모터 해석 모델의 입력으로 사용한다는 점이다. 그 해석원리를 그림 4에 나타내었다.



<그림 4> 착자를 고려한 스핀들 모터 해석방법

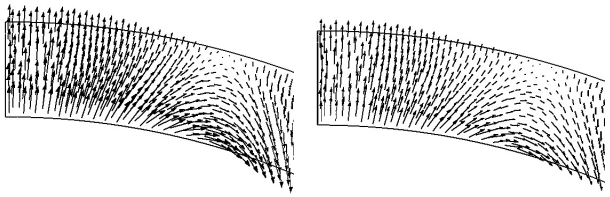
스핀들 모터의 영구자석 재질조건에 표 1의 최대 보자력과 리코일 투자율을 입력하고, 이 값으로부터 잔류자속밀도를 구한다. 이것이 그림 4의 M값이 된다. 착자기 해석결과로부터 얻은 자속밀도분포 데이터의 벡터 방향이 스핀들 모터에서 자화방향이 되고, 벡터 크기는 정규화 되어서 그림 4의 M값과 곱해지게 된다. 따라서 스핀들 모터 해석결과는 그림 4의 오른쪽부분과 같은 자속분포를 갖는다. 여기서 착자기의 영구자석 위치와 스핀들 모터의 영구자석의 위치는 두 모델이 모두 정확하게 일치하여야 한다.

2.4 해석결과

그림 5의 (a)와 (b)는 각각 착자기와 스핀들 모터의 영구자석 부분의 자속밀도분포를 나타내고 있다. 벡터의 방향은 그림 (a)와 (b)가 정확히 일치하고 그 크기만 차이가 있다. 그림의 가장 왼쪽부분에 있는 90° 방향을 향하고 있는 벡터가 가장 큰 자속밀도 값을 갖는다. 그 값은 (a)에서는 약 3T이고, (b)에서는 약 0.5T이다.

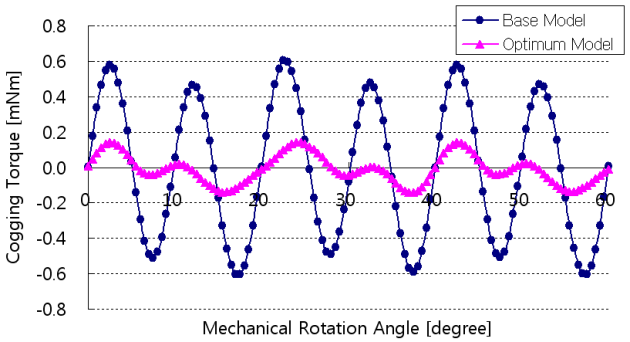
그림 5의 (b)와 같은 자속밀도분포를 갖는 영구자석을 사용한 스핀들 모터를 해석한 결과, 4291.845rpm으로 회전시 약 1.842V의 역기전력이 발생하였다. 같은 조건에서 실제 스핀들 모터의 역기전력을 측정한 결과가 약 1.876V이므로 본 논문에서 제안한 해석방법은 타당하다고 할 수 있다.

본 논문에서 제안한 해석방법을 가지고 최적의 착자 패턴을 갖는 착자기의 형상 설계를 수행하였다. 실험계획법을 이용하여 최적 설계를 수행하였고, 최적 모델의 형상을 그림 1의 (b)에 나타내었다. 그림 6은 기본 모델과 최적 모델의 착자기로 착자한 자석을 이용한 스핀들 모터의 코깅 토크 해석결과를 보여주고 있다. 최적 모델로 착자한 영구자석을 이용한 스핀들 모터가 기본 모델로 착자한 영구자석을 이용한 스핀들 모터에 비하여 코깅 토크가 약 76.47% 감소한 것을 확인할 수 있다. 이것은 영구자석의 자속밀도분포가 기존의 것보다 더 정현적으로 분포되어서 코깅 토크가 저감한 것으로 볼 수 있다.



(a) 최대 전류로 착자된 상태 (b) 스핀들 모터에 적용된 상태

<그림 5> 영구자석 해석결과



<그림 6> 기본 모델과 최적 모델의 코깅 토크 비교

3. 결 론

본 논문에서는 착자기 해석을 통해 얻어진 영구자석의 착자 패턴을 스핀들 모터의 영구자석에 적용하여 해석하는 방법을 제안하였다. 실제 ODD용 스핀들 모터의 역기전력을 측정하여 해석결과와 비교하여 제안한 해석방법의 타당성을 검증하였다. 또한 제안한 해석방법을 가지고 최적의 착자 패턴을 갖는 착자기의 형상을 설계하였다. 그 결과 코깅 토크를 기존의 모델에 비해 약 76.47% 저감하였다. 즉, 스핀들 모터의 형상 변화 없이 착자기 형상만 변경함으로써 코깅 토크를 저감시킬 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 에너지 관리공단(Korea Energy Management Corporation)의 에너지 자원기술개발사업(The Energy Technology R&D)의 지원에 의해 수행 되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] T.M. Jahns and W,L. Soong, "Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet ac motor drives-A review", IEEE Trans. on Power Electronics, vol.43, no.2, pp.321-330, 1996.

[2] R.P. Deodhar, D.A. Station, T.M. Jahns, and T.J.E. Miller, "Prediction of cogging torque using the flux-mmf diagram technique", IEEE trans. on Industry Application, vol.32, pp.569-576, 1996.

[3] Z.Q. Zhu and David Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol.15, no.4, pp.407-412, 2000.

[4] 이갑재, 이주, "분수슬롯을 가진 영구자석 전동기에서 극당 슬롯 비율이 코깅토크와 역기전력에 미치는 영향", 전기학회논문지, 제52권 제9호, pp. 454-459, 2003

[5] 오세영, 김승주, 정대성, 이철규, 이형우, 이주, "실험계획법을 이용한 단상 유도형 동기전동기의 최적 설계", 대한전기학회 논문지, 제56권 제4호, pp 699-704, 2007