

다자유도 구동 스피리컬 모터의 토크리플 저감 설계에 관한 연구

A Study on Torque Ripple Reduction of the Multi-degree of Freedom Operated Spherical Motor

강 동 우* · 이 주†
(Dong-woo Kang · Ju Lee)

Abstract - This paper presents a spherical motor which can control in multi-degree of freedom operation. The spherical motor has been researched by many types of structure. This paper shows a spherical shaped airgap and surfaced permanent magnets. Especially, The motor consists of dual rotor cores. Unlike a cylindrical motor, the spherical motor design can be considered with azimuth direction on spherical coordinates. Therefore the permanent magnet surfaced on the rotor need to be designed optimally in order to generate a sinusoidal magnetic flux density in the airgap. This paper presents results of optimal design for reducing torque ripple of the multi-degree of freedom spherical motor.

Key Words : Dual rotor core, Multi-degree of freedom motor, Spherical motor, Torque ripple

1. 서 론

본 논문에서는 1개의 모터로 다자유도 구동이 가능한 스피리컬 모터의 설계에 대한 연구내용을 보여주고 있다. 스피리컬 모터는 구조에 따라서 유도형 스피리컬 모터, 영구자석형 스피리컬 모터 등의 일반적인 모터의 설계방식과 유사한 방향으로 연구가 되어 왔다[1]-[5]. 다만, 스피리컬 모터는 회전자의 중심축을 Z축으로 정의를 했을 때, Z축이 회전하는 회전운동과 Z축이 기울어지는 틸팅운동이 동시에 가능해야 하기 때문에 자석의 배치와 코일 와인딩의 패턴이 일반적인 원통형(Cylindrical) 모터와 다른 차이점을 가진다.

그림 1은 Inner rotor 방식의 스피리컬 모터 구조를 나타내고 있다. 상부 전기자 코일과 하부 전기자 코일의 배치에 따라 회전자의 구동각이 결정되며 회전 및 틸팅 구동이 가능하도록 고정자의 각 코일에 인가되는 전류제어를 통해 위치 및 속도 제어가 된다. 특히, 고정자는 슬롯리스 구조로 설계되었는데 이는 스피리컬 모터가 로봇안구 구동용이나 3차원 측정기와 같은 미세한 구동각 제어가 필요한 위치제어용 서보시스템(Servo System)에 맞도록 설계하고자 하였기 때문에 공극의 릴럭턴스 차에 의한 코깅토크를 최대한 배제할 수 있도록 고정자 내측면에 비자성재료의 코일보빈을 이용하여 각 코일의 위치를 고정하는 방식으로 설계하였다.

이와 같은 구형의 모터는 일반 원통형 모터와는 달리 적층 방향으로 형태가 달라지기 때문에 전기장판 적층을 이용하여 고정자 코어를 완성하기 어려운 구조를 가지고 있다. 따라서 자성체를 구형으로 가공하여 철심코어를 제작하는 방식으로 고정자를 구성하기 때문에 와전류 손실의 철손 저

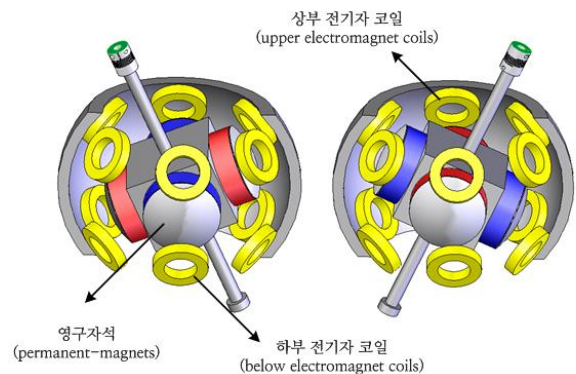


그림 1 가이드 프레임 Inner-rotor 방식의 표면부착형 스피리컬 모터

Fig. 1 Surface permanent-magnet spherical motor with the guide frame

감이 분리하여 모터 효율이 낮은 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 구조적인 단점을 극복하여 효율을 개선하고 또한, 표면부착형 영구자석 스피리컬 전동기의 토크리플을 최소화 하였다.

2. 본 론

그림 2는 이중 공극형(Dual Airgap) 스피리컬 모터의 구조와 조립도를 나타내고 있다. 이중 공극형 스피리컬 모터는 비자성재료의 코일보빈이 고정자코어의 역할을 함으로써 코어를 관통하여 쇠교하는 회전자계에 의한 고정자 철손이 발생되지 않을 뿐만 아니라 고정자의 내측 및 외측을 자성체의 회전자가 감싸는 구조로 되어 있기 때문에 회전자계와 동기속도로 회전을 하면서 동시에 공극을 통해 쇠교되는 자속이 폐루프(Closed loop)를 형성하게 됨으로써 누설 자속을 줄여 출력손실을 방지하는 설계가 적용되었다.

† Corresponding Author: Div. of Electrical and Biomedical Engineering, Hanyang University, Korea.

E-mail : julee@hanyang.ac.kr

* Motor R&D Part, Samsung Electronics, Korea.

Received : October 6, 2013; Accepted : October 16, 2013

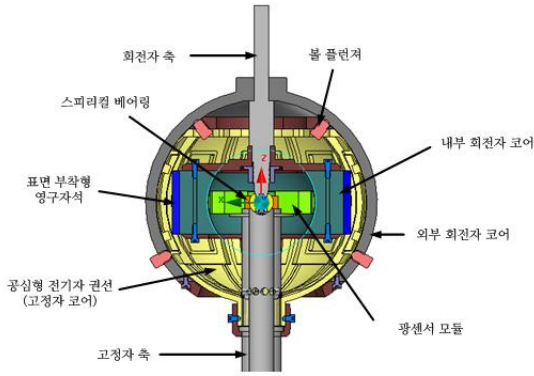


그림 2 이중 공극형 스피리컬 모터 구조
Fig. 2 Doubly airgap spherical motor structure

이러한 설계를 위해서는 이중으로 회전자 코어가 구동하기 때문에 위치 제어 응답성을 높이기 위해서 회전자의 관성을 최소화하는 설계가 요구가 된다. 하지만 회전자의 관성을 최소화하기 위해 외부 회전자 코어의 두께를 얇게 설계하게 되면 자속 포화에 의한 출력 저하와 회전자 코어의 구조강성이 약해진다는 단점이 존재하기 때문에 반드시 최적화된 설계치를 계산해내야 한다. 이에 외부 회전자와 내부 회전자의 코어 두께를 유한요소법을 통한 전자계 특성 해석을 실시하여 평균 토크의 손실이 발생되지 않는 최대의 자속 포화 지점에서 설계치를 산정하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 내부 회전자 코어의 경우에는 회전자 내부표면에 광센서를 통해 회전자의 위치 센싱이 가능하도록 회전자의 동작범위와 같이 구형으로 설계되었고 외부표면은 영구자석의 제작가능성을 고려하여 원통형으로 설계되었다. 이로 인하여 내부 회전자 코어의 중심부가 얇아지는 구조를 가지기 때문에 자속 포화밀도의 기준은 가장 얇아지는 내부 회전자의 중심부로 선정하여 전자계 특성 해석을 실시하였다.

그림 4와 그림 5에서 보는 바와 같이 코어내 평균 자속밀도값을 자속포화 수준에서 설계가 되도록 하였다. 다만, 외부 회전자 코어의 경우에는 1.4[T] 이상으로 코어내 자속밀도를 가지게 되면 평균 토크가 상대적으로 크게 저하되기 때문에 코어의 강성유지를 동시에 만족시키기 위해 4[mm]로 설계를 하였다.

이렇게 설계된 이중 공극형 스피리컬 모터는 일반적인 원통형 회전기와 비교를 해보면 표면부착형 영구자석 동기전동기와 같은 구조로 되어 있기 때문에 부하 인가시 발생하는 토크 리플에 대한 해석을 수행하였다. 고정자가 공심형으로 되어 있기 때문에 코깅토크가 발생되지 않는다는 조건아래 부하 조건에 따른 토크 리플 분석을 실시하였다.

슬롯이 존재하지 않는 구조에서 토크 리플을 최소화하기 위한 설계 요소를 그림 6과 같이 세 가지로 한정하고 각 파라미터에 따른 토크 리플 하모닉 분석을 실시하여 최적의 모델을 선정하였다. 토크 리플에 연관성이 높은 요소가 영구자석의 형상 측면에서 극호각의 설계가 중요하기 때문에 설계된 이중 공극형 스피리컬 모터는 영구자석의 극호각에 따른 토크 리플 분석을 통하여 설계를 수행하였다. 추가적으로 공극에서의 자속 밀도의 파형을 보다 정현적으로 형성시킬 수 있도록 하기 위한 설계 요소로 슬롯이 없는 전동기

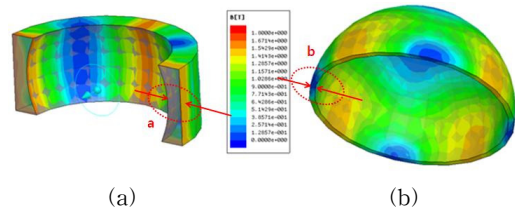


그림 3 내부 및 외부 회전자 코어의 두께에 따른 자속 밀도 계산. (a) 내부 회전자 (b) 외부 회전자
Fig. 3 Magnetic flux density computation. (a) Inner rotor (b) Outer rotor

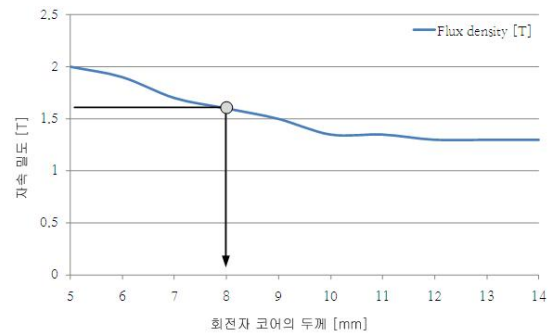


그림 4 내부 회전자의 두께에 따른 자속 밀도
Fig. 4 Magnetic flux density comparison of the inner rotor thickness.

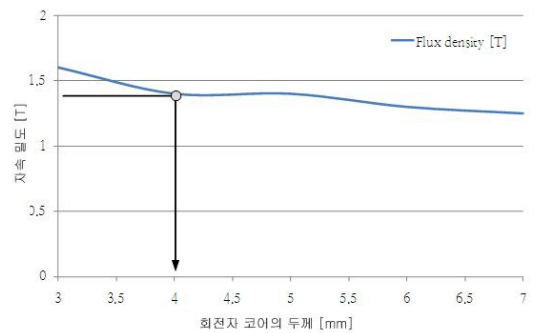


그림 5 외부 회전자의 두께에 따른 자속 밀도
Fig. 5 Magnetic flux density comparison of the outer rotor thickness

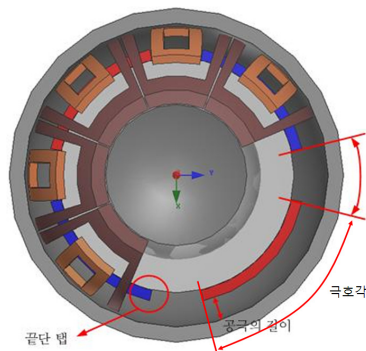


그림 6 토크 리플 최소화 모델을 선정하기 위한 설계 파라미터들
Fig. 6 Design parameters for torque ripple minimum

모델의 경우에는 치끝단부의 형상에 대한 설계 변수가 없기 때문에 주로 영구자석의 끝단 부분 가공(Tapped)을 하기도 한다.

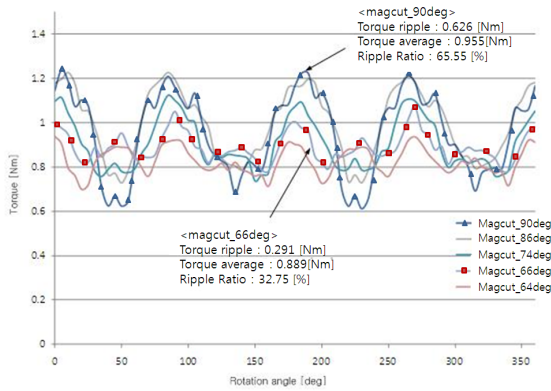


그림 7 극호각에 따른 토크 리플 분석
Fig. 7 Analysis of torque ripple by magnet cut angle

그림 7에서 보는 바와 같이 토크 리플저감 설계된 이중 공극형 스피리컬 모터는 극호각의 최대값인 90도 모델을 기준으로 하여 비교해 보면, 정현파 전류 구동시 극호각 90도에서 토크 리플을 약 65.5[%]이며 극호각 66도로 최적화된 경우에는 토크 리플을 32.7[%]로 최소화되었다. 가이드프레임형 스피리컬 모터는 코일이 자계내에서 차지하고 있는 짐작물이 낮고 자성체인 고전자 코어에서 발생하는 철손이 높음으로 인하여 출력 및 효율이 낮다는 단점이 있었다. 이와 대비하여 이중 공극형 스피리컬 모터는 상대적으로 회전자 내 발생하는 철손이 낮아 모터 효율 개선이 가능하였다. 공극의 자속밀도에 포함된 하모닉 성분을 분석하여 기본과 성분을 제외한 나머지 고조파 성분의 합이 최소화되는 극호각을 찾는 방법으로 토크리플 최소화하는 최적 설계 과정을 수행하였다.

3. 결 론

치(teeth)가 없는 slotless 구조의 다자유도 스피리컬 모터의 토크리플 저감을 위해서는 제한적인 설계요소를 이용할 수 밖에 없다. 일반적인 원통형 구조의 모터와 유사하게 구형의 스피리컬 모터도 마그넷의 형상 설계를 통해 토크리플을 최소화할 수 있었다. 특히 마그넷의 극호각은 공극의 자속과형을 결정하는데 주요한 설계인자이기에 본 논문에서는 마그넷의 극호각을 통한 토크리플 최소화 최적 설계를 진행하였고 설계지표로 공극 자속 밀도의 고조파 분석을 이용하였다.

References

[1] T. Villgratner, and H. Ulbrich, "Design and Control of a Compact High-Dynamic Camera-Orientation System," IEEE/ASME Trans. On Mech., vol. 16, no. 2, pp.221-231, April 2011.

[2] Yi-Chiao Lee, Chao-Chieh Lan, Cheng-Yu Chu, Chih-Ming Lai, and Yi-Jie Chen, "A Pan - Tilt Orienting Mechanism With Parallel Axes of Flexural Actuation," IEEE/ASME Trans. On Mech., vol. 18, no. 3, pp.1100-1112, June 2013.

[3] G. G. B. Dehez, D. Grenier, and B. Raucent, "Development of Spherical Induction Motor With Two Degrees of Freedom", IEEE Trans. on Magn., vol. 44, 2008.

[4] J. Wang, G. W. Jewell, and D. Howe, "A novel spherical actuator: design and control," IEEE Trans. Magn., vol. 33, no. 5, pp. 4209 - 4211, 1997.

[5] G. V. Kent Davey, and Richard Powers, "The Analysis of Fields and Torques in Spherical Induction Motors", IEEE Trans. On Magn., vol. 23, 1987.

저 자 소 개



강 동 우 (姜 東 佑)

1979년 12월 22일생. 2006년 한양대 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석박사통합) 현재 (주)삼성전자 책임연구원.

E-mail : dwkang1222@gmail.com



이 주 (李 柱)

1963년 8월 30일 생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구소 졸업(박사). 1997년 한국철도 기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 전기생체공학부 교수
E-mail : julee@hanyang.ac.kr