

3-자유도 구형모터의 홀딩토크 개선 연구

A Study on Holding Torque Improvement of Three-Degree Of Freedom Spherical Motor

강동우*, 원성홍**, 이형우***, 이주†
Kang, Dong-Woo* Won, Sung-Hong** Lee, Hyung-Woo*** Lee, Ju†

ABSTRACT

The spherical motor is an electric machine which is able to tilt its shaft on 3-dimensional space as using electromagnetic force. Recently a permanent magnet is remarkable material for applying electric machinery, because of high magnetic flux density. In this paper, a spherical motor, which has permanent magnet on its rotor, is researched. As known, the spherical motor has a special feature as 3 degrees of freedom (D.O.F) operation. This performance can be realized by using electromagnetic torque between coils and magnets. Therefore, in this paper, a permanent magnet spherical wheel motor is introduced and performance characteristics are analyzed for improving of operation stability.

1. 서 론

전기전자분야에서의 시스템은 그 발전 속도가 과거와 달리 빠른 속도로 진화해 가고 있다. 이러한 현상은 시스템의 성능향상 뿐만 아니라 그 시스템을 적용한 구조체의 특성도 동시에 향상시키고 있다. 하나의 예로 최근 휴머노이드와 같은 복잡한 시스템이 놀라운 속도로 발전해 오면서 휴머노이드 시스템에 구현되어 있는 복합적인 기술력의 개발이 끊임없이 요구가 되고 있다. 특히 모터를 사용한 시스템의 경우에는 기계적인 구조의 구동 특성 향상의 문제가 항상 대두되고 있기 때문에 이 구동특성과 직접적으로 연관이 있는 모터와 제어기반의 기술 발전은 필수적이라 볼 수 있다. 대부분의 구동부는 다 자유도의 운동을 하기 위해서 각 구동축마다 회전형 모터를 사용하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 로봇의 관절 부분의 경우 여러 모터를 사용해서 제어를 해줌으로써 인간이 구현하고 있는 움직임을 재현하고 있는 것이다. 하지만 이러한 구성은 시스템을 복잡하게 만들 뿐만 아니라 다채널 제어를 요구하며 배터리로부 터 전원공급을 받는 시스템의 경우에는 특정 모션을 구현하기 위해 여러 모터와 해당 제어기를 구동해야 하기 때문에 에너지 효율문제를 항상 고민해야 한다. 따라서 이러한 문제점을 개선하고 기존의 모터 기술을 바탕으로 새로운 구조의 모터를 설계하여 개발되고 있는 것이 본 논문에서 소개가 되는 3 자유도 구형 모터이다.

† 책임저자 : 정희원, 한양대학교, 전기공학과, 교수
E-mail : julee@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0342 FAX : (02)2295-7111

* 비회원, 한양대학교, 전기공학과, 박사과정

** 비회원, 동양공업전문대학, 전기공학과, 교수

*** 정회원, 한국철도기술연구원, 초고속열차연구실, 선임연구원

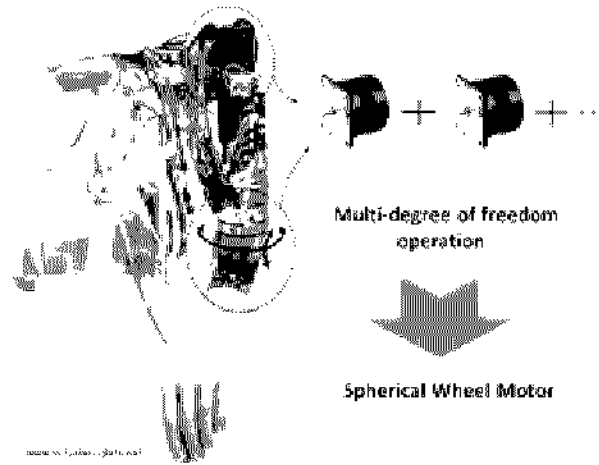


그림 1. 다 자유도 구동 시스템

2. 자유도 구형모터의 설계

다 자유도 구동이 가능하기 위해서는 기존의 일반 모터와는 다르게 구동축이 회전 가능한 구조로 설계가 되어야 한다. 그림 2는 본 논문에서 연구가 된 구형모터의 세부 구조도 이다.

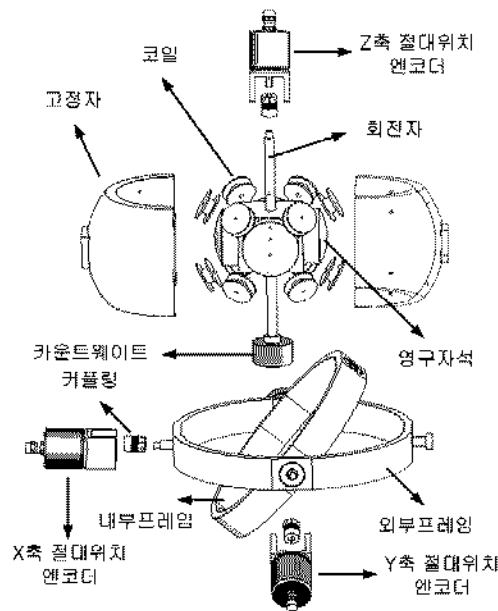


그림 2. 영구자석형 구형모터의 전개도

회전자에는 4개의 Nd계열 영구자석을 사용하였고 고정자에는 12개의 코일을 배치하여 원하는 위치로 회전자를 위치시킬 수 있는 구조로 설계가 되었다. 회전자의 운동은 회전운동과 회전자가 특정위치로 기울어지는 포지셔닝 운동이 가능하다. 이 포지셔닝 운동은 고정자의 기계적 구조에 따라 범위가 결정이 된다. 본 논문에 연구된 모터는 중심을 기준으로 ± 30 도 범위에서 구동이 가능하다. 이 구동의 특징은 그림 3에서 보는 것과 같이 고정자의 코일 위치에 따라 결정이 되며 코일의 위치는 α, β 의 각도로 표현이 된다. 따라서 고정자 코일의 위치는 상하 위치를 나타내는 α 각으로 ± 30 도로 아래위 배치가 되어있으며 각 코일은 회전방향을 나타내는 β 각으로 60도 간격으로 배치가 되어있다. 회전자의 자석과 고정자의 코일에 의해서 발생하는 토크로 회전자의 위치가 결정이 되는데 이것을 3차원 유한요소법으로 해석해보면 그림 4와 같은 결과를 얻을 수 있다.

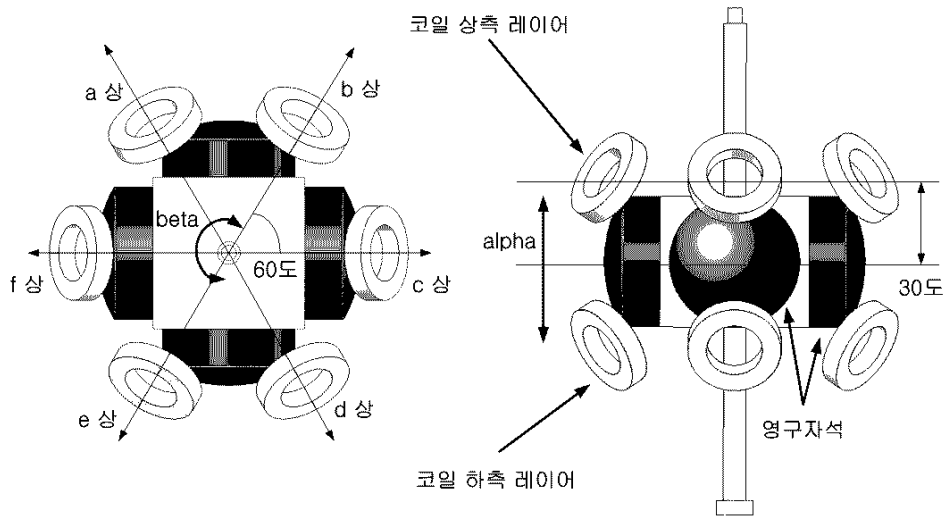


그림 3. 영구자석과 코일의 구조

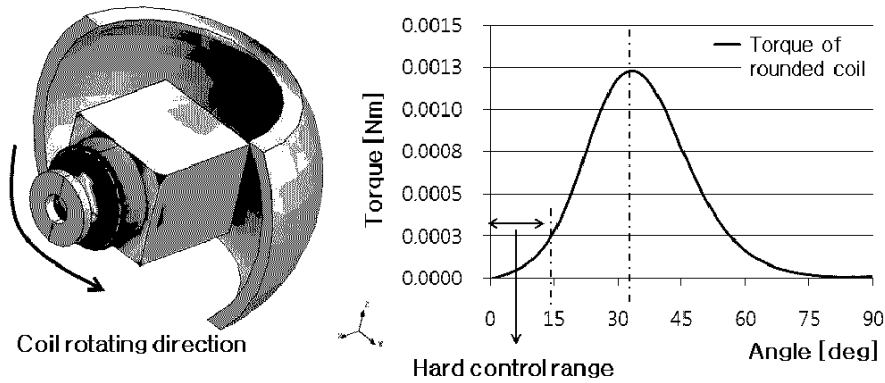


그림 4. 코일과 영구자석에 의한 발생 토크

그림 4에서 해석된 토크를 이용하여 12개의 코일과 4개의 마그넷과의 상대 위치에 따른 토크를 구해 내어 계산된 결과의 벡터합이 회전자가 특정위치에서 발생하고 있는 토크가 된다. 따라서 이러한 계산과정을 수치해석적인 방법을 통해서 그림 4에서 구해진 해석 결과를 보간을 통해서 함수화하여 근사화 해본 결과 3차원 유한요소법으로 해석된 결과값과 약간의 오차를 가지는 근사값을 얻어낼 수 있었다. 이것은 실제 설계를 하는 과정에서 매번 3차원 유한요소법으로 해석해 내기에는 계산시간이 길어 불편할 뿐만 아니라 해석된 결과가 방대한 데이터를 가지고 있기 때문에 전자계의 해석을 위해 성능 높은 시스템이 항시 요구가 된다. 따라서 근사방법을 통한 개선된 수치해석 기법을 사용하게 되면 위에서 제시된 문제점을 해결할 수 있을 뿐만 아니라 높은 정확성을 보이기 때문에 올바른 대안이 될 것이며 이를 바탕으로 본 논문에서도 영구자석형 구형모터를 설계하였다.

3. 해석된 홀딩토크의 오차 분석 및 개선

구형모터의 설계에 있어서 가장 중요한 점은 회전자를 특정위치로 고정시켜줄 홀딩토크가 어떤 특성을 가지고 있는지 분석하는 것이 우선이다. 따라서 본 논문에서는 회전자를 포지셔닝 할 때, 발생하는 토크를 분석하여 해당위치에서 안정적으로 회전자가 고정이 되는지 여부에 의해서 설계의 평가 기준을 선정하였다. 그림 5는 초기 설정된 α 각 ± 30 도 위치에 코일이 배치가 되었을 때, 회전자가 특정위치로 포지셔닝하면서 발생하는 토크를 분석한 결과이다. 결과를 분석해 보면, 고정자의 코일 위치에 따라서

회전자의 포지셔닝 안정도가 달라지는 것을 확인할 수가 있으며 해석된 결과에 의해서 코일의 위치가 ± 24 도 위치 이내로 접근하여 위치하게 되면 홀딩토크가 안정적으로 회전자를 고정하게 됨을 알 수 있다. 따라서 처음 제시된 ± 30 위치에서 최대 ± 18 도 위치까지 코일의 위치를 보정하여 포지셔닝 모드에서의 구동 안정성을 확보할 수 있는 모델의 최적화를 실시하였다.

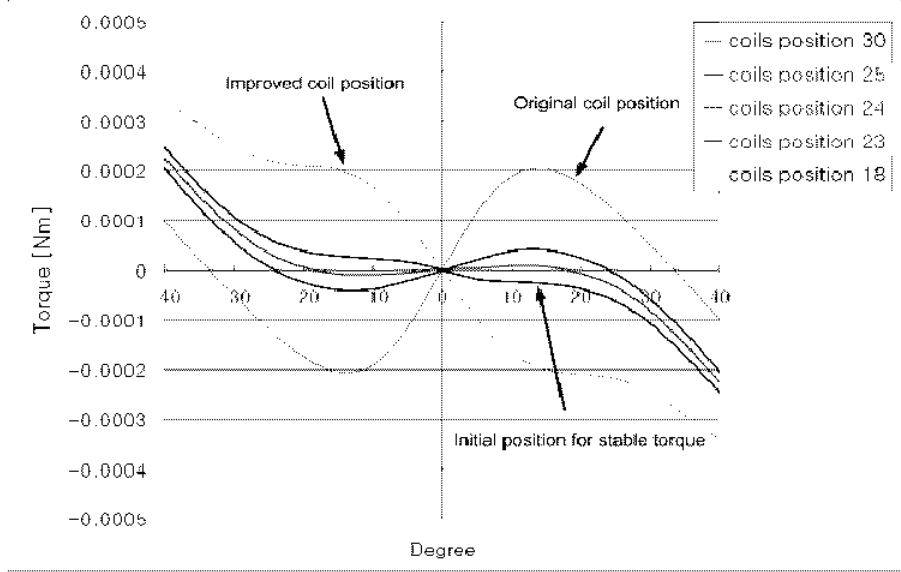


그림 5. 코일 위치 변화에 따른 홀딩토크 특성 및 최적 코일 위치

하지만 코일의 위치 변화에 따른 안정성 확보에도 한계가 있다. 이는 그림 4에서 살펴본 코일과 자석 사이에 발생하는 토크의 특성이 비선형성을 가지고 있으며 특히 코일과 영구자석사이의 거리가 가까울 때 발생하는 토크가 크지 않다는 점에서 여러 코일에 의해서 특정 위치로 고정이 될 회전자의 안정성에 심각한 문제를 발생시킨다. 따라서 이를 해결하기 위해서 전체 포지셔닝 영역에 따른 오차분석을 그림 6과 같이 실시하여 오차 결과를 얻어내었다.

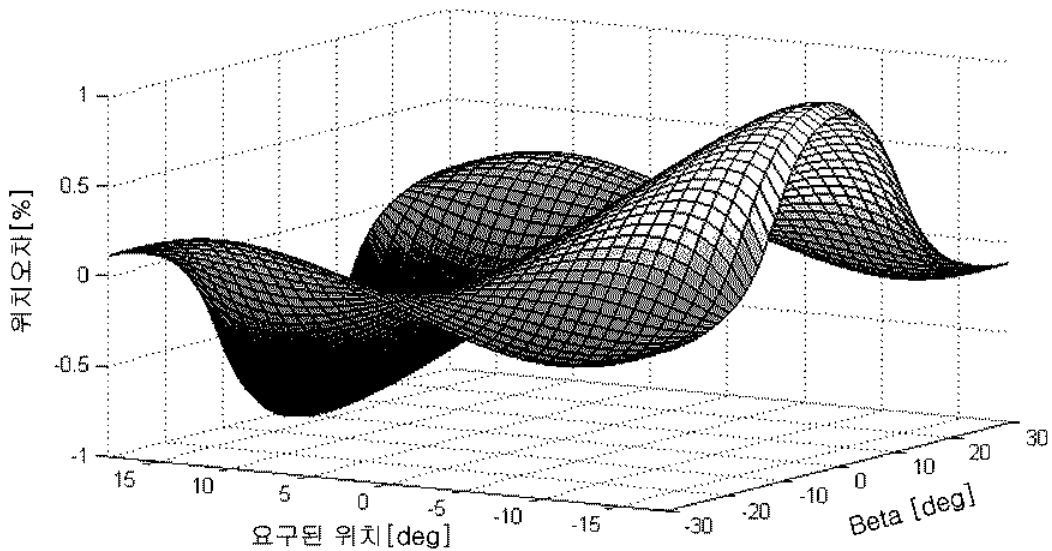


그림 6. 회전자 위치에 따른 위치 오차분석

그림 6에서 살펴본 것과 같이 α, β 각도에 따라서 오차의 크기가 변하는 것을 알 수가 있으며 이를 보정하기 위해서 본 논문에서는 고정자 코일에 인가되는 전류를 보정함으로써 특정 위치에서의 포지셔닝

불안정성을 해소하고자 하였다. 이에 아래 수식 (1)과 같은 코일에 인가되는 전류식을 보정하기 위해서 α 각의 변화에 따른 보정을 실시하여 아래 식 (2)의 보정식을 구해내었다.

$$i_{km} = I_m \cos\left(\frac{\pi}{4} + (n) \frac{3}{2} \alpha \times \cos\left(\beta - \frac{\pi}{3}(k-1)\right)\right) \times \cos\left(2\left(\omega t + \beta - \frac{2\pi}{3}(k-1)\right)\right) \quad (1)$$

$$\Gamma(\alpha, \beta) = \sum_{N=1}^{21} \sigma(\beta, n) \times \alpha^{22-n} \quad (2)$$

보정식은 보간법을 이용하여 고차 다항함수의 보간을 실시하여 22차수의 보간 함수를 구해내었다. 위 보정식을 사용하여 보정을 해본 결과, 실제 식 (2)에 의한 α 각 보정시 오차가 개선되었으며 이에 해당하는 전류보정식은 식 (3)과 같다. 그림 7은 보정식을 사용하였을 때, 포지셔닝 안정도에 대한 분석결과이다.

$$i_{km} = I_m \cos\left(\frac{\pi}{4} + (n) \frac{3}{2} \Gamma \times \cos\left(\beta - \frac{\pi}{3}(k-1)\right)\right) \times \cos\left(2\left(\omega t + \beta - \frac{2\pi}{3}(k-1)\right)\right) \quad (3)$$

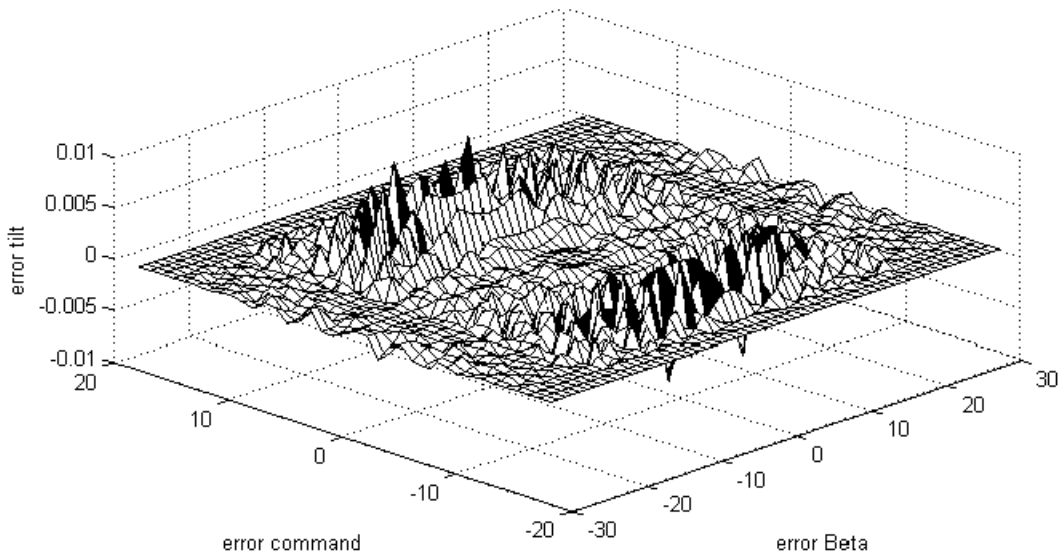


그림 7. 보정된 전류식을 사용한 포지셔닝 안정도의 오차 분석

4. 결 론

3 자유도 구형모터를 설계하면서 모터의 특성에 주요한 영향을 미치는 부분이 회전자를 특정위치에 포지셔닝 할 수 있는 홀딩토크의 안정성이라는 것을 분석해 내었다. 이 홀딩토크는 코일의 위치와 같은 구조적인 영향도 받지만 한계이상의 구조 개선에 따른 특성최적화에 어려움이 존재하였다. 이에 회전자의 위치에 따른 위치 안정도를 전체적으로 분석해 내에 특정 위치에서 발생하는 불안정의 요소를 인가되는 전류의 보정을 통해서 해결하였다. 그 결과 보정식을 사용한 모델의 포지셔닝 안정도가 크게 개선된 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Lee K-M, and Son H-S, "Torque Model for Design and Control of a Spherical Wheel Motor", Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, MC3-03, 335-340, 24-28 July 2005.
2. Liang Yan, I-Ming Chen, Guilin Yang and Kok-Meng Lee, "Analytical and Experimental Investigation on the Magnetic Field and Torque of a Permanent Magnet Spherical Actuator", IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, Vol. 11, No. 4, August 2006.
3. Sung-Hong Won, Dong-Woo Kang, and Ju Lee, "Design optimization of the PM-spherical wheel motor for stable positioning torque", proceeding of The 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Filed Computation.