

다자유도 모터의 구동특성 개선을 위한 연구

강동우, 원성홍, 이주
한양대학교 전기공학과

A Study on Improving Performance Characteristic of Multi-D.O.F Spherical Wheel Motor

Dong-Woo Kang, Sung-Hong Won, Ju Lee
Hanyang University

Abstract - Electrical machineries have been developed as following with various and high technical application in these days. Especially the robot is integrated system including mechanical structure, electronic control, and electrical technology. The robot system is not compact and has not natural motion like human, although the technology of robot has been developing continuously. The spherical wheel motor is useful electric machine for using robot joint as operation of 3-degrees of freedom. In this paper, a permanent magnet spherical wheel motor is introduced and performance characteristics are analyzed for improving of operation stability.

1. 스페리컬 모터의 소개

에너지 변환기기는 오랜 기간 발전을 거듭해 오면서 다양한 형태로 개발이 되어져 왔으며 새로운 어플리케이션에 적용가능하기 위하여 새로운 재료와 구조가 끊임없이 연구되고 개발이 되어져 왔다. 그 하나의 예로 영구자석의 사용이 가능해지면서 고자속밀도의 에너지를 이용하게 됨으로써 에너지 변환기기의 개발은 새로운 발전의 전환기를 맞게 되었다. 본 논문에서 소개할 스페리컬 모터로 인해 그 동안 연구되고 개발된 일반적인 모터의 구조와는 다른 새로운 타입으로 에너지 변환기기의 분야의 발전에 또 다른 연구 분야를 제시해줄 것으로 생각한다.

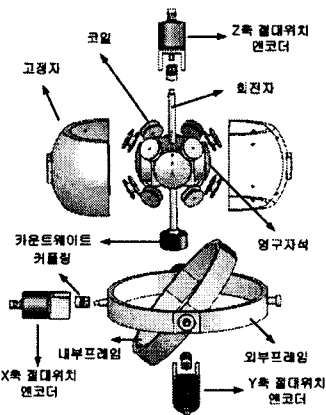


그림1. 영구자석형 스페리컬 모터의 전개도

그림 1에 제시되어 있는 전개도는 본 논문에서 연구가 된 영구자석형 스페리컬 모터이다. 스페리컬 모터는 3 자유도 운동이 가능한 모터로서 기존의 축방향 1 자유도 운동만이 가능한 모터들과 비교했을 때, 복잡한 시스템에 이용가능성이 높다고 볼 수 있다[1]. 특히 로봇과 같

은 다 자유도 운동을 하는 시스템에서는 필수적으로 많은 수의 모터를 사용하여 로봇의 움직임을 표현하고 있으나 이는 전체 시스템을 복잡하고 부피를 크게 만들뿐만 아니라 전력소비량을 증가시켜 휴머노이드와 같은 축전기 구동방식의 시스템을 가지는 로봇의 경우에 있어서는 에너지효율이 저하되는 문제점도 야기할 수 있다. 따라서 시스템의 이러한 문제점을 개선하기 위해서는 다자유도 모터와 같은 새로운 모터의 개발이 요구된다[1][2].

2. 스페리컬 모터의 구조 특성

2.1 스페리컬 모터의 구조

영구자석형 스페리컬 모터는 그림 2에서 보는 바와 같이 4극의 Nd계열 영구자석이 사용이 되었으며 12개의 코일이 사용이 되어 각각의 전자기적 극을 생성하여 구동하게 된다.

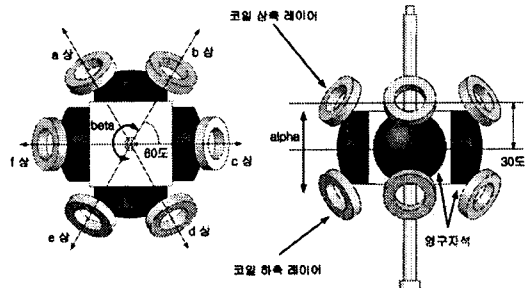


그림 2. 스페리컬 모터의 전자기 구조

그림 2에서와 같이 각 코일은 수직회전방향으로 정의되는 alpha각 30도로 상하로 배열되며 각 층에 수평회전방향으로 정의되는 beta각 60도의 등간격으로 6개의 코일이 배치가 되어있다. 전체 12개의 코일에 회전자 위치함수로 정의된 전류가 여자되어 원하는 위치로 회전자를 포지셔닝 할 수 있다. 스페리컬 모터는 회전자가 요구된 위치로 포지셔닝 할 수 있다는 특징과 동시에 회전운동이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 이 모터의 특성을 최적화하기 위해서는 우선적으로 요구된 위치에 회전자가 정확하게 포지셔닝 할 수 있도록 위치안정성 개선을 해야 하며 동시에 회전운동도 안정적으로 이루어질 수 있도록 해야 할 것이다. 본 논문에서는 이 모터의 동작특성 개선을 위해 포지셔닝을 어느 정도로 정확하고 안정적으로 할 수 있는가에 대한 연구가 다루어진다.

2.2 회전자 홀딩토크의 정의

스페리컬 모터의 구동 특성은 요구된 위치에 회전자의 포지셔닝이 가능하다는 것이다. 이것을 가능하게 하는 전자기적 현상은 코일에 의한 기자력축과 영구자석에 의한 자기력축에 사이에 발생하는 홀딩토크로 설명이 가능

하게 되는데 그림 3은 영구자석의 위치에 따른 홀딩토크의 안정성에 대한 개념도를 보여주고 있다[2].

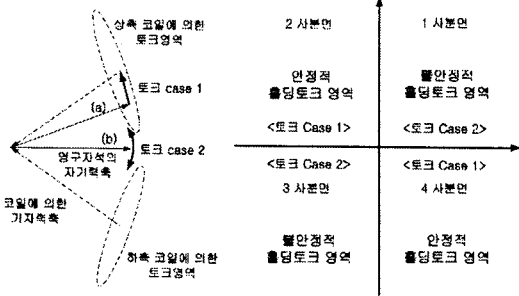


그림 3. 영구자석 위치에 따른 홀딩토크 특성 비교

그림 3에서 보는 바와 같이 하나의 코일에 의해 생성된 토크 영역은 FEM 해석결과에 의해 약 35도에서 최대토크를 가진다. 그림 3에서 (a)의 경우와 같이 그 토크영역 내에 영구자석에 의한 자기력축이 위치할 때는 강한 홀딩토크를 발생한다. 하지만 (b)와 같이 최대토크 영역을 벗어나 2개의 코일에 의해 영향을 받게 되면 불안정 홀딩토크가 발생된다. 본 연구에서 사용된 스페리컬 모터는 상하측 2개 이상의 코일에 의해 토크가 발생하기 때문에 홀딩토크의 안정영역을 찾는 것이 중요하다.

2.3 스페리컬 모터의 홀딩토크 특성

스페리컬 모터의 포지셔닝 특성은 다음 두 가지 단계로 나누어 개선을 하였다. 첫 번째는 위에서 정의된 alpha각 0도의 위치(회전자가 수직으로 세워진 상태)에서 beta각의 변화에 따라 안정적으로 포지셔닝 하는가에 대한 연구와 두 번째로 alpha각을 변화시켰을 때 beta각의 영향에 대한 포지셔닝의 안정도 연구가 이루어졌다.

2.3.1 홀딩토크의 불안정 요인 분석

위에서 언급된 첫 번째 경우에서의 주요 영향은 고정자 코일 위치에 있음을 연구를 통해 알 수 있었다. 각 코일 위치에 따른 홀딩토크의 안정영역 시뮬레이션은 그림 4와 그림 5에서 그 차이를 볼 수 있다. 그림 4의 경우는 상하측 코일 2개 사이에 회전자 자극이 위치할 경우의 홀딩토크이다. 이때는 2개 코일에 의한 최대 토크영역이 겹치게 되어 회전자가 안정적으로 홀딩이 된다.

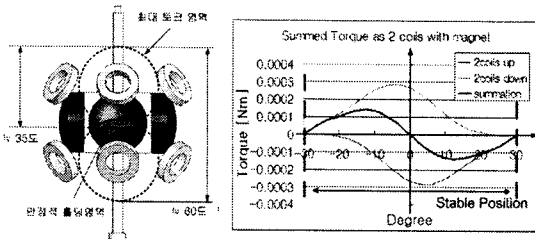


그림 4. 회전자 자극이 2개 코일 사이에 위치한 경우

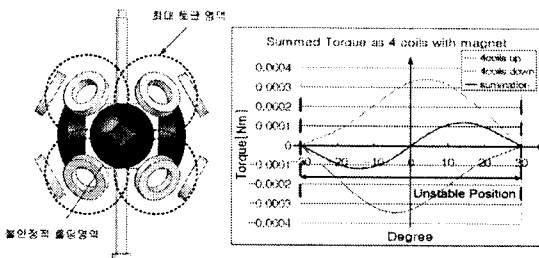


그림 5. 회전자 자극이 4개 코일 사이에 위치한 경우

반면에 그림 5의 경우에서처럼 회전자의 자극이 4개의 코일 사이에 위치하게 되면 4개 코일에 의한 최대토크영역이 합성되어 중앙 부분에서는 약하게 영향을 주기 때문에 불안정하게 홀딩되는 현상이 발생하게 된다[3].

2.3.2 코일 위치 수정에 의한 홀딩토크 개선

본 연구에서는 초기 코일 위치를 alpha각 30도 간격으로 상하로 배열하였으나 위 2.3.1의 결과에서처럼 4개의 코일 사이에 회전자 자극이 위치하였을 경우 안정적으로 홀딩이 되지 못하는 문제점이 발생하였기 때문에 이를 개선하기 위해서 안정적으로 홀딩토크가 발생하는 지점을 코일의 위치 즉, 코일의 alpha각을 변화시켜가면서 분석을 해본 결과 그림 6과 같이 불안정 홀딩토크영역이 안정 홀딩토크로 전환이 되는 코일의 위치를 찾을 수가 있었다.

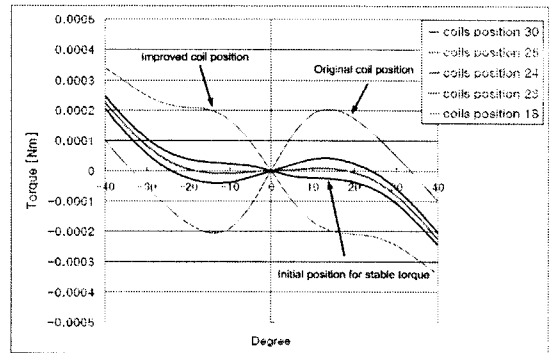


그림 6. 코일 위치 변화에 따른 홀딩토크 특성

그림 6에서 살펴볼 수 있듯이 상하측 4개 코일들의 위치가 alpha각 24도에 위치할 때, 홀딩토크가 안정영역으로 역전됨을 알 수 있으며 코일을 설치할 수 있는 고정자 구조적인 한계를 고려하여 최대 안정 홀딩 토크의 발생지점을 alpha각 18도에 코일위치를 보정하였다.

2.3.3 회전자 회전에 따른 포지셔닝 특성

두 번째 연구분야로 언급한 alpha각과 beta각이 동시에 변화할 때의 영향에 대한 분석을 실시하였다. 회전자를 원하는 위치로 포지셔닝하도록 전류를 인가했을 때, 요구된 회전자 위치와 실제 회전자의 위치사이의 오차를 통해서 분석을 하였는데 먼저 beta각을 0도와 30도에서 alpha각을 변화시켜가면서 토크분석을 해본 결과 그림 7과 그림 8과 같이 그 차이를 볼 수 있다.

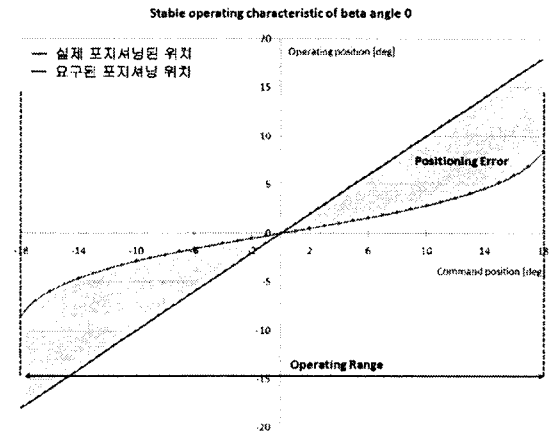


그림 7. beta 0도일 때 alpha각 변화에 따른 포지셔닝 특성

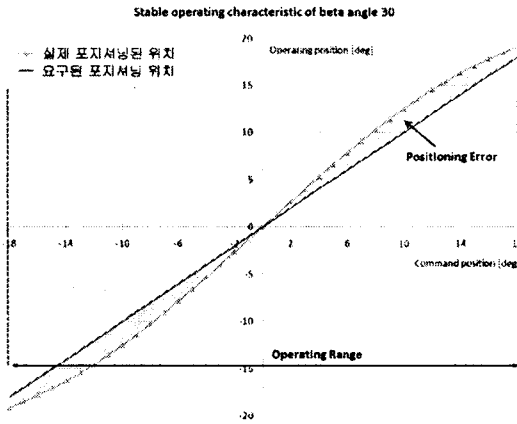


그림 8. beta 30도일 때 alpha각 변화에 따른 포지셔닝 특성

위의 두 데이터를 비교해보면 beta 30도인 경우에는 원하는 위치로 밀팅하는 것에 작은 오차값을 가지지만 beta 0도인 경우에는 큰 오차값을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 beta각 전반에 걸쳐서 포지셔닝 토크의 특성 분석이 필요할 것으로 판단이 되어 포지셔닝 최대범위인 alpha각 ±18도의 범위에서 해석을 하였으며 beta의 경우에는 60도 등간격으로 코일이 배치가 되어 60도 주기로 그 특성이 반복되므로 beta각 ±30로 변화시켜 해석을 하였다. 그림 9는 그 변화 범위에서의 포지셔닝 오차값을 3차원으로 표현한 것이다.

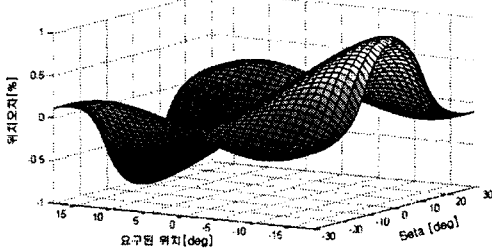


그림 9. alpha/beta 각도 변화에 따른 위치오차분석

2.3.4 회전자 위치변화에 따른 포지셔닝 안정도 개선

그림 9에서 보는 바와 같이 alpha각의 변화와 beta각의 변화에 따라 포지셔닝 오차의 값이 특정 경향성을 보이고 있다. 이 현상에 의해 스페리컬 모터를 구동하였을 때 회전자가 밀팅된 상태로 회전시 세차운동을 하게 되는 문제점이 발생하게 된다. 따라서 이러한 오차를 줄여야만 스페리컬 모터의 고유특성인 밀팅 및 회전의 운동을 동시에 안정적으로 할 수 있게 된다. 따라서 이를 개선하기 위해서는 코일 구조의 개선, 코일에 인가되는 전류의 개선, 보극을 이용한 위치안정도 개선 등의 방안이 제안될 수 있을 것이다. 본 논문에서는 위 현상을 개선하기 위해 코일에 인가되는 전류함수를 보정하는 방법을 이용하여 위치안정도를 개선하였다.

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

회전자를 포지셔닝하기 위해서 각 코일에 식 (1)과 같은 전류함수식으로 전류가 입력이 된다. k는 코일의 순서로 1, 2, 3, 4, 5, 6의 값을 가지며 n은 상하축을 구분하기 위한 값으로 ±1이다. 이 전류함수식은 포지셔닝을 요구된 위치의 alpha, beta 값으로 함수와 되어 있기 때

문에 각도에 대한 변수보정을 통해서 문제를 해결할 수 있다. 여기서는 alpha 각의 보정을 통해서 alpha 변화에 따른 포지셔닝 오차범위를 줄이는 것으로 포지셔닝 안정도를 개선하였다. 그림 9의 변화추이를 두 가지 경향으로 나누어 분석을 하게 되면 beta 0도의 기준으로 alpha 변화에 따른 오차의 경향성은 식 (2)와 같이 5차 다항식으로 보간이 가능하며 beta의 변화에 따른 오차의 경향성은 Fast Fourier Transform으로 분석을 하여 식 (3)과 같은 7차의 코사인함수 합으로 보간이 가능함으로써 오차를 꼭면 보간이 가능하다.

$$y = 2 \times 10^{-6} x^5 - 5 \times 10^{-14} x^2 - 0.724x \quad (2)$$

$$y = \frac{1}{2} \times 1.8704 - 1.667 \cos x + 0.4096 \cos \frac{1}{2} x + 0.0257 \cos \frac{1}{3} x - 0.079 \cos \frac{1}{4} x + 0.0202 \cos \frac{1}{5} x + 0.0136 \cos \frac{1}{6} x - 0.0088 \cos \frac{1}{7} x \quad (3)$$

그림 10은 두 보간식을 이용하여 위치오차를 개선한 후 위치 오차를 보여주고 있다. 최대 오차범위를 기준으로 약 60%의 오차가 보정이 되었음을 확인할 수 있다.

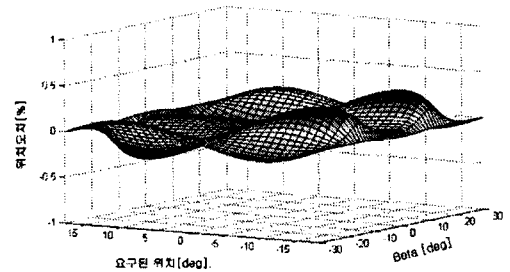


그림 10. 오차를 꼭면보간을 통해 개선된 위치오차

3. 결 론

스페리컬 모터는 다자유도 운동 특성을 가지고 있기 때문에 기존의 로봇관절용 모터나 산업용 매니퓰레이터의 구동용 모터들을 대체함으로써 에너지 효율성과 시스템의 소형화를 가능하게 할 수 있다. 본 연구에서는 스페리컬 모터의 포지셔닝 특성개선을 위해서 코일위치 보정을 통해 홀딩토크를 안정적으로 개선하였고 회전자 포지셔닝 오차를 분석하여 구동 특성을 개선할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 교육과학기술부 국가지정연구실(과제번호: ROA-2008-000-20048-0)사업의 연구비 지원으로 수행된 논문입니다.

[참 고 문 헌]

- [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 Field Computation.