

새로운 3-자유도 구형 모터의 제안

이동철*, 권병일*
*한양대학교

A Proposal of a Novel Structured 3-DOF Spherical Motor

Dong Cheol Lee*, Byung Il Kwon*
*Hanyang University

Abstract - This paper proposes a novel structured 3-DOF(Degree-of-Freedom) spherical motor. 3-DOF spherical motor presents some attractive features by combining pitch, roll, yaw motion in a single joint. The proposed motor has pole which is electromagnetic in stator and rotor. poles produce magnetic flux through by exciting current then produce torque. We show a novel structured rotor to avoid mechanical overlapping of each coil in rotor. The validity of the analysis is confirmed by 3D finite element method.

다. 회전자 각 상의 극은 그림 2와 같이 원점으로부터 정육면체의 각 꼭지점을 향해 자속벡터를 발생하는 방향으로 위치하고 있다. 회전자 극의 종단면은 구의 1/8의 형상을 가지며 각 권선은 회전자의 원점을 중심으로 대칭적인 위치에 있는 권선과 한 쌍으로 직렬 연결되어 여자되어진다. 고정자 극은 각기 2자유도의 구동을 가능케 하므로 3 자유도의 구동을 위해 X축과 Y축 방향의 자속을 발생시키도록 그림 3과 같이 서로 90°간격을 이루며 위치한다. 이는 회전자의 구동 방향에 따라 선택적으로 여자되어진다.

1. 서 론

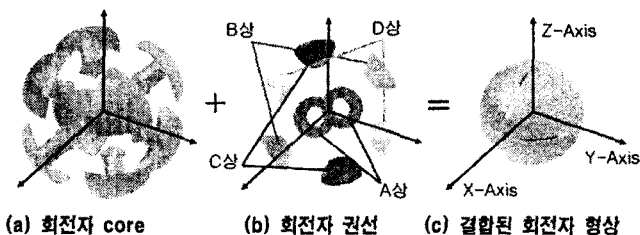
로봇 산업이 성장함에 따라, 다자유도 구동원에 대한 요구가 증대되어 왔다. 종래에는 다자유도 운동 메카니즘의 구현을 위하여 여러 개의 모터를 하나의 조인트에 연결하여 다자유도 실험을 위한 액츄에이팅 유닛으로 사용하였으나, 이는 여러 개의 복잡한 동력변환 장치를 필요로 함으로, 소형화, 정밀화가 요구되는 메카니즘에는 적용하기 힘들었다. 이를 해결하기 위하여 다자유도의 위치 제어가 가능한 단일 구동 형태의 구동원에 대한 연구가 필요하게 되었다. 3-자유도(3-DOF) 구형 모터는 3차원의 운동을 한 개의 모터에서 구현하여 부피와 중량을 감소시키고 기어와 링크를 사용하지 않기 때문에 백래시, 탄성 변형 등을 막을 수 있으며 설계 및 제작이 비교적 간단한 이점이 있다[1]-[4]. 그러나 기존의 구형 모터들은 낮은 발생토크량의 문제 또는 3-자유도 구현을 위해 다극 착자된 영구 자석을 사용하는 등의 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 다자유도 운동 구현이 가능한 새로운 구조의 구형 모터를 제안한다. 3-자유도 구동이 가능한 구조 제안으로부터, 회전자 위치 결정 이론을 유도하여 지령 위치로의 이동에 필요한 전류량에 따른 각 상의 여자주기를 결정하여 회전자의 위치 추종 가능성을 보인다. 이로부터, 구조적 간단성으로 인한 소형화의 장점을 가지고, 자속 방향의 발생 영역을 확장하여 구동범위의 극대화가 가능하며, 영구자석을 사용하지 않으므로 저코스트 및 환경적 특성이 우수할 수 있는 3-자유도 구형모터의 가능성을 논한다.

2. 새로운 3-자유도 구형 모터

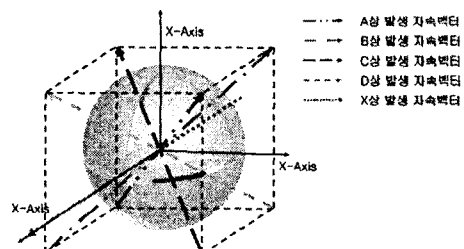
2.1 제안 구조 및 원리

본 제안 모델은 회전자와 고정자의 권선에 전류를 동시에 인가하고, 각각 형성된 자기장을 제어하여 회전자의 위치를 결정짓는 원리를 갖는다. 고정자와 회전자에서 각각 발생한 자속을 벡터로 해석할 때, 고정자 자속벡터와 회전자 자속 벡터는 서로 겹치도록 회전력을 받게 되므로 자유 운동이 가능한 회전자의 자속벡터가 고정된 고정자의 자속벡터와 겹치도록 회전자가 회전하게 된다. 이를 위하여 고정자 축에서 일정한 방향의 기준 자속 벡터를 발생시키고, 회전자에 x, y, z축 방향의 자속을 선택적으로 발생시킬 수 있는 구조가 제안되었다[1]. 그러나 이는 회전자와 고정자 간의 공극의 변화가 크고, 회전자 권선이 서로 중첩되는 구조로 낮은 효율과 토크를 가진다. 본 논문에서는 구형의 회전자로 공극의 변화가 없으며, 각 권선이 서로 중첩되지 않으면서 3차원 내의 임의의 방향으로 자속벡터를 발생시킬 수 있는 구조로 그림 1과 같은 회전자 구조를 제안한다.

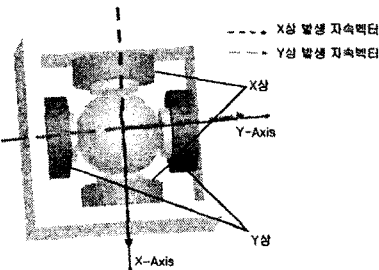


〈그림 1〉 제안모델의 회전자 구조도 및 형상

회전자 축에는 8개의 권선으로 이루어지는 4쌍의 극이 존재하며, 각 극에 직류전류를 각각 인가하여 그 여자 주기를 조절함으로써 회전력을 얻게 된다.



〈그림 2〉 회전자 구조와 자속벡터 방향

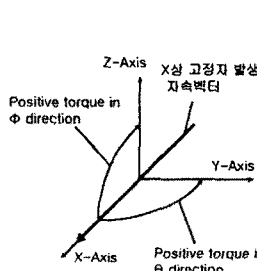


〈그림 3〉 고정자 발생 자속벡터 방향과 전체 형상

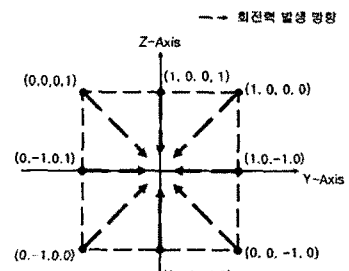
3. 회전자 위치 결정

3.1 상 여자에 따른 위치 결정

회전자를 지령위치로 이동하려면, 회전자의 각 상의 전류 여자를 통하여 회전자를 지령위치로 접근시킨다. 그림 4와 같이 절대좌표계를 기준좌표계로 하였을 때, 회전자의 각 상에서 발생하는 자속벡터는 기준좌표계로부터 θ 방향으로 45°, 135°, 225°, 315°, ϕ 방향으로 $\pm 45^\circ$ 의 위치를 기준으로 발생되게 되고, 또한 각 상의 자속벡터는 서로 70.5288°의 각 차를 가지고 위치하게 된다. 고정자의 X상 권선의 전류를 인가하여 X축과 동일선상의 기준자속을 발생 시, 회전자 각 권선에 정방향의 전류가 인가되었을 때를 1, 역방향의 전류가 인가되었을 때 -1, 인가되지 않았을 때를 0으로 하여 (A상, B상, C상, D상)으로 각 상의 전류인가 상태를 표현하면 회전자의 회전 후 위치는 각상의 여자 방식에 따라 표 1과 같이 결정되어지며, 이에 따른 회전력 발생의 예는 그림 5와 같다.



〈그림 4〉 기준 좌표계



〈그림 5〉 각 상 여자에 따른 회전자 회전방향 개념도

〈표 1〉 각 상의 여자방식에 따른 회전자 위치 결정

$\phi - \theta$	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
90°	(1, -1, -1, -1)							
45°	(0, -1, -1, 0)	(0, -1, 0, 0)	(-1, -1, 0, 0)	(-1, 0, 0, 0)	(-1, 0, 0, -1)	(0, 0, 0, -1)	(0, 0, -1, -1)	(0, 0, -1, 0)
0°	(1, -1, -1, 1)	(0, -1, 0, 1)	(-1, -1, 1, 1)	(-1, 0, 1, 0)	(-1, 1, 1, -1)	(0, 1, 0, -1)	(1, 1, -1, -1)	(1, 0, -1, 0)
-45°	(1, 0, 0, 1)	(0, 0, 0, 1)	(0, 0, 1, 1)	(0, 0, 1, 0)	(0, 1, 1, 0)	(0, 1, 0, 0)	(1, 1, 0, 0)	(1, 0, 0, 0)
-90°	(1, 1, 1, 1)							

3.2 스위칭 주기의 결정

회전자 각 상의 스위칭 주기는 지령위치로 이동하기 위해 각 상에서 필요한 토크를 발생시키기 위해 인가하여야 하는 회전자 각 상의 전류량의 비로 결정한다. 회전자의 위치를 결정하기 위한 전류량의 비는 발생되는 자속을 벡터로 표현하고, 이로 인해 발생한 각 토크치의 합으로 회전자의 위치를 파악하는 방법을 이용한다. 고정자 권선에서 발생하는 기준자속벡터의 방향이 x축과 일치할 때, 이를 $B=(1,0,0)$ 로 표현할 수 있다. 초기 회전자의 위치가 기준위치에 있을 때, 각 권선에서 발생하는 자속은 자기 쌍극자 모멘트의 벡터로 표현할 수 있다. 즉, A상 권선의 경우 x, y, z축 양의 방향의 정중앙을 향한 방향으로 자기 쌍극자 모멘트를 이루므로 이는 $M_A = N_A i_A (1,1,1)$ 로써 표현되고, 다시 상수 $K_A = N_A A_A$ 를 이용하여 $M_A = K_A i_A (1,1,1)$ 로 표현할 수 있다. 여기서 N_A 는 A상 권선 턴수, A_A 는 A상 극 단면적이며 i_A 는 A상 인가 전류이다. 어떤 위치 (θ, ϕ) 로의 이동을 위한 토크 발생을 각 회전자 권선들의 발생 토크로 표현하기 위해서는 각 권선에서 위치 (θ, ϕ) 로 이동한 후의 자기 쌍극자 모멘트와 그로 인해 발생되는 토크를 평가함으로 표현되어야 한다. 이를 위해 회전자 권선 중, 권선 A로 인한 토크를 계산하기 위해서 M_A 를 z축으로 θ 만큼, y축으로 ϕ 만큼 회전하게 되면, 식 (4)과 같이 새로운 자기 쌍극자 모멘트 M_A' 를 얻게 된다.

$$M_A' = K_A i_A (1,1,1) \cdot [rot_z(\theta)] \cdot [rot_y(\phi)]$$

$$= K_A i_A \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\phi - \sin\theta \sin\phi + \sin\phi \\ \sin\theta + \cos\theta \\ -\cos\theta \sin\phi + \sin\theta \cos\phi + \cos\phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

이때 새로운 위치에서 A상 권선에 의한 자기 쌍극자 모멘트와 고정자 기준 자속에 의해 발생하는 토크는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\tau_A = M_A' \times B$$

$$= K_A i_A (0, -\cos\theta \sin\phi + \sin\theta \sin\phi + \cos\phi, -\sin\theta - \cos\theta) \quad (5)$$

이와 같은 방법으로 각 B, C, D상에 의해 발생하는 토크의 량을 구하면 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\tau_B = K_B i_B (0, \cos\theta \sin\phi + \sin\theta \sin\phi + \cos\phi, \sin\theta - \cos\theta)$$

$$\tau_C = K_C i_C (0, \cos\theta \sin\phi - \sin\theta \sin\phi + \cos\phi, \sin\theta + \cos\theta)$$

$$\tau_D = K_D i_D (0, -\cos\theta \sin\phi - \sin\theta \sin\phi + \cos\phi, -\sin\theta + \cos\theta) \quad (6)$$

회전자가 위치 (θ, ϕ) 로 이동하여 더 이상 움직이지 않을 때 각각의 회전자 권선에 의한 토크들의 합이 0인 지점(rest point)이므로 회전자는 더 이상의 토크를 받지 않고 그 위치는 고정되게 되며 이는 식(7)과 같이 표현된다.

$$\tau_A + \tau_B + \tau_C + \tau_D = 0 \quad (7)$$

식(5)와 식(6)으로 구해진 각 상의 토크를 식(7)에 대입하여 정리하면 회전자 권선에 인가된 전류들의 값으로 인해 회전자의 위치를 결정할 수 있으며, 결정되는 회전자 위치 (θ, ϕ) 는 식(8)과 같이 얻을 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{-K_A i_A - K_B i_B + K_C i_C + K_D i_D}{K_A i_A - K_B i_B - K_C i_C + K_D i_D} \right)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{U}{V \sin\theta - W \cos\theta} \right)$$

$$\begin{cases} U = K_A i_A + K_B i_B + K_C i_C + K_D i_D \\ V = K_A i_A + K_B i_B - K_C i_C - K_D i_D \\ W = K_A i_A - K_B i_B - K_C i_C + K_D i_D \end{cases} \quad (8)$$

식(8)로부터 회전자의 지령 위치로의 이동을 위해 필요한 전류량은 식(9)과 같이 구할 수 있다. 이 때 K는 전류량의 크기에 관한 상수이다.

$$K_A i_A = K \cos\theta \cos\phi (1 - \tan\theta - (\sin\theta \tan\theta + \cos\theta) \tan\phi)$$

$$K_B i_B = K \cos\theta \cos\phi (-1 - \tan\theta - (\sin\theta \tan\theta + \cos\theta) \tan\phi)$$

$$K_C i_C = K \cos\theta \cos\phi (-1 + \tan\theta - (\sin\theta \tan\theta + \cos\theta) \tan\phi)$$

$$K_D i_D = K \cos\theta \cos\phi (1 + \tan\theta - (\sin\theta \tan\theta + \cos\theta) \tan\phi) \quad (9)$$

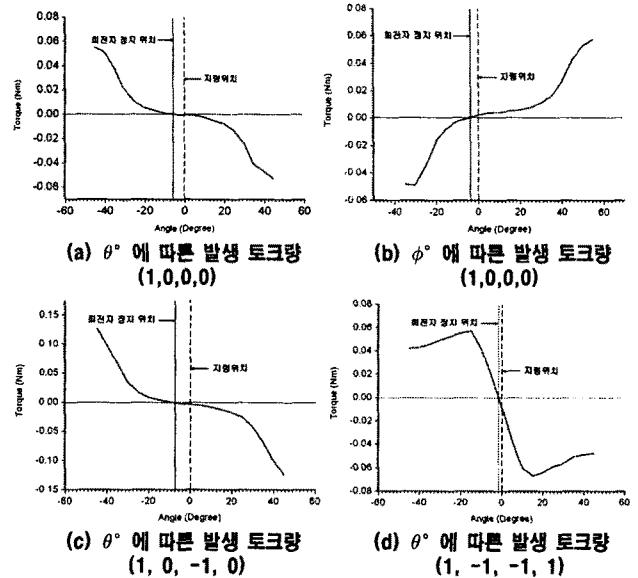
위의 식은 회전자의 위치에 따른 회전자 권선에 인가전류의 양을 표현하므로 이를 전체 주기에 따른 회전자 각 상의 전류 여자 주기로 표현하여야 한다. 전류여자의 전체 주기를 T_S 라 하고 회전자 A, B, C, D상의 주기를 T_A, T_B, T_C, T_D 라고 하였을 때, 회전자 위치에 따른 회전자 각 상의 전류 인가 주기는 식 10과 같이 표현된다.

$$T_S = T_A + T_B + T_C + T_D$$

$$T_x = \frac{|K_A i_A|}{|K_A i_A| + |K_B i_B| + |K_C i_C| + |K_D i_D|} \quad (x = A, B, C, D) \quad (10)$$

3.3 유한요소법을 통한 시뮬레이션 결과

회전자의 회전자 위치이동 능력을 확인하기 위하여 3차원 유한요소법을 통하여 설계된 모델을 시뮬레이션하였다. 회전자 방향을 결정짓기 위해 각 상이 여자되는 경우는 표 1에서 보인 바와 같이 1상, 2상, 4상이 한 주기내에 여자되어지는 경우이므로 시뮬레이션은 고정자의 X상과 회전자의 각 상이 (1,0,0), (1,0,-1,0), (1,-1,-1,1)로 여자되는 경우로 고정자 X상으로부터 -45° ~ +45° 구간에 대하여 수행되었다. 이 때 (1, 0, -1, 0)과 (1, -1, -1, 1)의 경우 발생 토크의 방향 중 $\phi=0$ 이므로 θ 값의 변화에 따른 토크량 변화만을 측정하였다.



〈그림 6〉 회전자 위치에 따른 발생 토크

시뮬레이션을 통하여 구한 발생 토크량을 비교한 결과 지령위치와 회전자 정지 위치간의 오차가 1.5°에서 최대 8°까지 발생함을 알 수 있었다. 이는 회전자 극 종단부의 형상과 시뮬레이션을 위해 이용한 근사 구형에 따른 자속 경로의 불균형 문제, 그리고 회전자 극 종단면에서의 자속발생 방향의 비선형성 때문인 것으로 보인다. 그러나 오차 구간사이의 토크량의 차이는 미미하므로 구동상의 큰 문제점은 없을 것으로 보인다.

4. 결 론

본 논문에서는 3-자유도 구형 모터의 개발에 관한 연구의 일환으로, 회전자와 고정자 권선에 전류를 동시에 인가하여 회전력을 발생시키는 모터를 제안하고, 제안 모델을 대상으로 지령 위치로의 회전자 이동을 위한 입력 전류 및 여자 주기와 회전자 위치와의 관계식을 기술하였다. 또한 제안한 3-자유도 모터의 타당성을 검증하기 위해 유한요소법을 통한 해석 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 제안된 구조는 일부 오차를 가지지만 3-자유도의 구동이 가능함을 보였다. 향후 성능 향상을 위해 회전자 및 고정자 극 구조와 형상 개선을 통한 설계로 회전자 위치 이동 정확도를 높이고 구동 범위를 확장하기 위한 고정자의 권선배치 및 형상 설계에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

This work was supported by the research fund of Hanyang University (HY-2005-M)

참고 문헌

[1] Bederson, B.B. Wallace, R.S. Schwartz, E.L., "A miniature pan-tilt actuator: the spherical pointing motor," Robotics and Automation, IEEE Transactions on Volume 10, Issue 3, June 1994 Page(s):298 - 308

[2] J. Wang, K. Mitchell, G.W. Jewell, D. Howe, "Multi-Degree-of-Freedom Spherical Permanent Magnet Motors," Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Volume 2, 2001 Page(s):1798 - 1805 vol.2

[3] L. Martins Neto, R.M. Mendes, D.A. Andeade, "Spherical Motor - A Three-Dimensional Position Servo," Electrical Machines and Drives, 1995. Seventh International Conference on (Conf. Publ. No. 412) 11-13 Sep 1995 Page(s):227 - 231

[4] 양창일, 박준혁, 백윤수. 2001, "전자석의 자기력 제어를 이용한 구형 3 자유도 액추에이터의 설계 및 제어," 대한기계학회논문집 A권, 제25권 제9호, pp. 1341-1349.