

2중여자 2자유도 모터의 설계 및 특성해석

이재성, 권병일
한양대학교

Design and Characteristic Analysis of a Doubly-Fed 2-DOF Motor

Jae Sung Lee, Byung Il Kwon
Hanyang University

Abstract - In this paper describes the design and characteristic analysis of a novel 2-DOF(Degree of Freedom) motor. For multi DOF actuating, several numbers of motors have been used. But the using of normal motors they connected each other in single joint, have necessary to a several type of complex power transmission devices. The 2-DOF motor can drive pan, tilt motion in only one unit and it is not necessary to use additional gears and links parts. Therefore by the using of 2-DOF spherical motor can eliminate; combined effects of inertia, backlash, non-linear friction, and elastic deformation of gears. The validity of the analysis is confirmed by 3D finite element method.

여러 개 배치하여 그림 1과 같이 2자유도(Pan, Tilt)가 가능한 구조를 제안하였다.

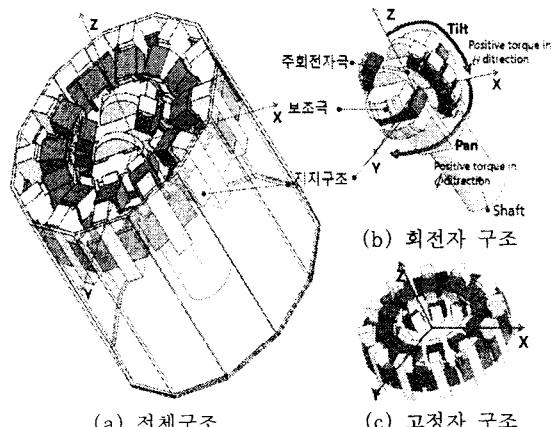


그림 1 제안모델의 전체 구조도

로봇이나 보안카메라 등, 현재 산업현장에서, 다자유도 구동원을 필요로 하는 분야가 점차 늘어나고 있다. 종래에는 다자유도 운동 메카니즘의 구현을 위하여 1개의 자유도를 갖는 여러 개의 모터를 하나의 조인트에 연결하여 다자유도 구현을 실현하였다. 하지만 여러 개의 모터로 구현 시 여러 개의 링크, 기어로 인한 백래쉬나 마찰 등 많은 단점들이 발생하게 된다.

이를 해결하기 위하여 Spherical Motor와 같이 다자유도 구동을 하나의 모터로 구현하기 위한 연구가 수행되고 있으며 최근에 국내에서도 기초적인 연구가 진행되고 있다. 그러나 제어알고리즘의 복잡성, 구형의 형상으로 인한 제작이 까다로운 점들로 인해 현재 실용화 되지 못하고 있는 실정이다[1-7].

본 논문에서는 보다 제작이 쉽고 제어가 간단한 새로운 구조의 2중여자 2자유도 모터를 제안하고 회전자 위치이동 능력을 확인하기 위하여 3차원 유한요소법을 통하여 그 특성을 해석하였다. 이로부터 구조적 소형화 장점을 가지며 회전자에 영구자석을 사용하지 않기 때문에 구동 시의 온도증가에 따른 감자에 위험이 없으며 제작비용이 저감되며 보다 현실적인 제작성을 갖는 Pan-Tilt 보안카메라용 2자유도 모터 구현에 관한 설계 및 특성 해석을 실시하였다.

2. 2중여자 2자유도 모터의 구조제안

기존의 Spherical Motor는 구형의 구조를 가지므로 3차원적 가공을 필요로 하나 일반적으로 모터에 쓰이는 규소강으로는 2차원적으로 적층하는 형식으로만 제작이 가능하다. 또한 비교적 구조적 제약이 자유로운 재질인 SMC(Soft Magnetic Composites)를 사용하여 3차원 성형을 하더라도 구형의 형상을 암분으로 인한 경도가 약해 제작하기 어렵다.

이러한 문제를 해결하기 위해 2차원적인 적층된 코어를

그림 1(a)는 전체구조를 나타내고 세부적으로 그림 1(b)의 회전자는 Tilt방향위치를 결정하기 위해 주회전자극이 5상으로 A상에서 E상까지 좌우상하 대칭으로 구성되어 있으며 Pan구동을 위한 보조극 2개로 구성되었다. 그리고 그림 1(c)의 고정자는 U상,V상,W상 3상으로 90도 주기로 각각 4개의 고정자편으로 총 12개의 고정자편으로 구성되어 있다. 그리고 그 외 Pan 구동 축안에 Tilt축이 있는 구조로써 구성되며 알루미늄재질의 지지구조로 하우징에 12개의 고정자편들을 고정시키고 보조극 2개를 회전자 축에 고정시킨다.

3. 회전자의 2자유도 위치결정

3.1 Tilt 방향 위치결정

Tilt 방향 위치결정은 고정자와 회전자의 권선에 전류를 동시에 인가하여 각각 형성된 자속을 제어하여 회전자 위치수렴을 결정한다. 그림 2와 같이 회전자의 고정자극과 반응할 회전자상중의 자속 방향이 회전자 바깥으로 향하는 자기쌍극자 모멘트

$\vec{M}_H = N_H A_H i_H(\alpha, 0, \beta)$ 로 표현이 되고 여기서 N_H 는 H상 턴수, A_H 는 극당 단면적이며 i_H 는 H상의 인가전류이다. 그리고 상수 $K_H = N_H A_H$ 를 이용하여

$\vec{M}_H = K_H i_H(\alpha, 0, \beta)$ 로 표현할 수 있다. Tilt의 위치 θ 로 이동한 후의 자기 쌍극자 모멘트와 그로 인해 발생되는 토크를 계산하기 위하여 식 (1)과 같은 새로운 자

기 쌍극자 모멘트를 얻는다.

$$\begin{aligned} \vec{M}_H &= K_H i_H(\alpha, 0, \beta) \cdot [rot_y(\Theta)] \\ &= K_H i_H(\alpha \cos \Theta + \beta \sin \Theta, 0, -\alpha \sin \Theta + \beta \cos \Theta) \quad (1) \end{aligned}$$

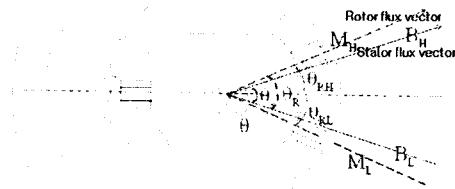


그림 2 회전자 Tilt 위치 결정

이때 새로운 위치에서 H상에 의한 자기 쌍극자 모멘트와 자속에 의해 발생하는 토크는 식 (2)와 같이 표현된다. ($B_H = (\epsilon, 0, \zeta)$)

$$\begin{aligned} \gamma_H &= M_H' \times B_H \\ &= K_H i_H(0, \epsilon(-\alpha \sin \theta + \beta \cos \theta) - \zeta(\alpha \cos \theta + \beta \sin \theta), 0) \quad (2) \end{aligned}$$

마찬가지로 회전자의 한쪽방향으로 향하는 자기쌍극자 모멘트가 $M_L = K_L i_L(\gamma, 0, \delta)$ 라 하면 $B_L = (\epsilon, 0, -\zeta)$ 과 결합하여 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \gamma_L &= M_L' \times B_L \\ &= K_H i_H(0, \epsilon(-\gamma \sin \theta + \delta \cos \theta) + \zeta(\gamma \cos \theta + \delta \sin \theta), 0) \quad (3) \end{aligned}$$

회전자의 뒷 상을 x축에 대해서 각도를 Θ_{RH} , 아랫 상을 x축 각도를 Θ_{RL} 이라하면 식 (4)와 식 (5)로 나타난다.

$$\theta_{RH} = \tan^{-1} \frac{-\alpha \sin \theta + \beta \cos \theta}{\alpha \cos \theta + \beta \sin \theta} \quad (4)$$

$$\theta_{RL} = \tan^{-1} \frac{-\gamma \sin \theta + \delta \cos \theta}{\gamma \cos \theta + \delta \sin \theta} \quad (5)$$

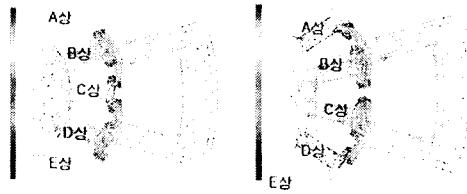
이때 회전자에서 발생하는 전체 Tilt 토크는 전류가 여자될 회전자상 사이의 각(Θ_R)과 고정자상 사이의 각(Θ_L)차이로 인하여 5가지 구간이 발생한다. Tilt에 관한 토크 γ_{tilt} 는 구간별로 식 (6)과 같다.

$$\begin{cases} \gamma_{tilt} = \gamma_H + \gamma_L & (\theta_{RL} < 0.5\theta_s) \\ \gamma_{tilt} = \gamma_H - \gamma_L & (\theta_{RL} > 0.5\theta_s, \text{ and } \theta_{RH} > \theta_{RL}) \\ \gamma_{tilt} = 0 & (\theta_{RH} = \theta_{RL}) \\ \gamma_{tilt} = -\gamma_H + \gamma_L & (\theta_{RH} > 0.5\theta_s, \text{ and } \theta_{RH} < \theta_{RL}) \\ \gamma_{tilt} = -\gamma_H - \gamma_L & (\theta_{RH} < 0.5\theta_s) \end{cases} \quad (6)$$

식 (6)과 같이 토크값이 존재하고 회전자와 고정자의 자속벡터 성분의 엇갈린 성분들로 인해 더 많은 위치성을 나타낼 수 있다.

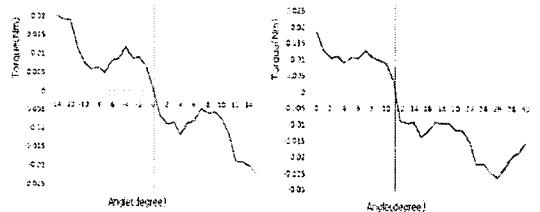
자속의 폐루프를 형성하기 위해 고정자의 한상을 여자시키고 그 기준 고정자 자속 벡터에 일치하기 위해 회전자의 두상을 정방향과 역방향을 주어 자속경로를 형성시킨다. 그림 3에서와 같이 바로 인접상과 여자를 하고 그 다음 상을 여자시켜 그 토크가 0이 되도록 하여 각상을 스위칭하여 0도, 11도, 22도, 33도에 수렴함을 그림 4에서 3D 유한요소 해석을 통하여 알 수 있다. 반대방향도

역방향으로 대칭되어 나타나 -33도~+33도까지 7개의 위치가 가능함을 알 수 있다. 또한 두상을 같은 방향으로 전류를 여자 하였을 때 위치 4개를 포함하면 총 11개의 위치 5.5도 간격으로 위치수령이 가능하다.



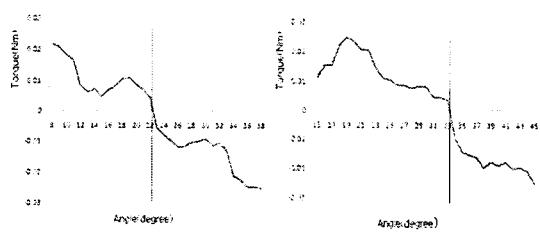
(a) 0도일 때(BD여자) (b) 11도일 때(BC여자)

그림 3 위치에 따른 Tilt 자속벡터



(a) 0°에 수렴

(b) 11°에 수렴



(c) 22°에 수렴

(d) 33°에 수렴

그림 4 스위칭별 Tilt 위치수령

제어회로에는 각 5상에 간단한 H 브릿지회로를 두어 2상을 스위칭시켰을 경우 나타나는 위치는 표 1과 같다.

표 1 각 상의 스위칭에 따른 Tilt 위치
(1값은 정방향 -1값은 역방향)

	A상	B상	C상	D상	E상
33°	1	-1	0	0	0
22°	1	0	-1	0	0
16.5°	0	-1	-1	0	0
11°	0	1	-1	0	0
5.5°	0	0	-1	-1	0
0°	0	1	0	-1	0
-5.5°	0	1	1	0	0
-11°	0	0	1	-1	0
-16.5°	0	0	1	1	0
-22°	0	0	1	0	-1
-33°	0	0	0	1	-1

3.2 Pan 방향 위치결정

Pan 위치결정은 주회전자극과 고정자상간의 토크와 보조극과 고정자상간의 토크로 이루어진다. 그림 5에 보조극이 추가된 구조를 나타냈다.

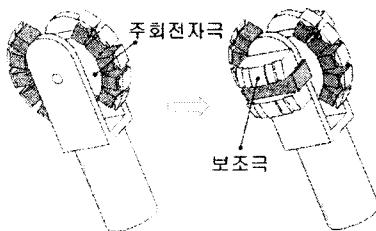


그림 5 보조극 추가

Pan 구동 시 회전자 측에는 Tilt구동을 위해 회전자에 전류가 여자되어 있는 상태이므로 현재 U상이 주회전자극의 위치에 수렴해 있는 상태라고 가정한다면 다음 상인 V상의 인가 시 회전자에서 나오는 자속이 U상에 끌어 당기려는 릴럭턴스토크 때문에 다음 위치인 V상으로 수렴을 하지 못한다.

따라서 그림 5와 같이 보조극을 두어 다음 상인 V상이 보조극을 끌어당기는 릴럭턴스토크를 이용하여 기동한다. 하지만 제작 시 회전자 보조극의 가장자리부분이 회전 시 고정자와 맞닿지 않고 일정한 공극길이를 유지하기 위하여 그 보조극의 두께가 얇을 수밖에 없는 단점으로 인해 크기가 좀 더 작은 코어를 양쪽에 붙인 형상으로 보조극을 결정한다.

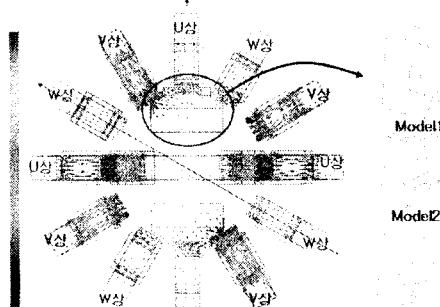


그림 6 보조극 형상과 자속분포도

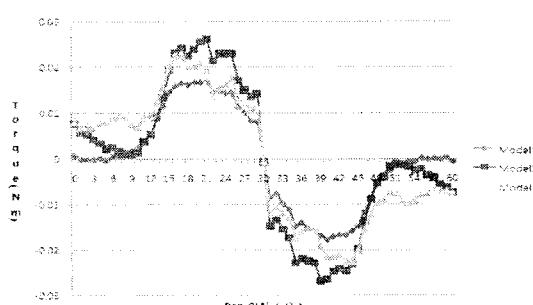


그림 7 보조극 형상 모델별 Pan Simulation

그림 6은 보조극의 3가지의 모델을 나타낸다. 기본형태인 모델 1은 보조극의 적층 두께가 얇아 끌어당기는 힘이 약했고 모델 2와 모델 3의 두께가 각각 3cm로 동일하나 그림 7에서와 같이 모델 2는 기동하다 지령위치까지 못가고 21° 앞의 위치에서 정지한다. 모델 3은 전 각도 영역에 걸쳐 만족스러운 토크를 발생시키는 적합한 구조임을 확인하였다. 모델 3의 보조극 형태로 30도 간격으로 U상 V상 W상을 90도 간격으로 스위칭하면 Pan방향으로 돌고 30도 간격으로 수렴할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 2중 여자 2자유도 모터의 개발에 관한 연구의 일환으로, 2차원적인 구조를 여러 개 배치하여 2자유도가 가능하도록 하였다. 최대한 제작이 쉬운 구조를 제안하고 지령위치로의 위치수렴 여부를 확인하기 위하여 3D 유한요소법을 통한 해석 시뮬레이션을 수행하여 그 타당성을 확인하였으며 2자유도 구동이 가능함을 보였다.

성능은 Tilt방향은 5.5도 간격으로 +33°~ -33까지 가능하며 Pan방향은 30도 간격으로 360도 구동 가능하여 이 두 방향의 전체 구동범위는 양호하나 미세한 움직임을 못하는 단점이 있다. 하지만 제작이 용이하고 복잡한 좌표변환을 통한 복잡한 알고리즘이 아닌 각각의 Tilt와 Pan방향 모두 독립적으로 제어함으로 구현이 용이하다. 또한 임의의 전류치 값을 넣어 위치를 제어하는 방식이 아닌 각상에 단순 On-Off제어만으로 제어회로가 꾸며져 좀 더 적용하는데 현실적이라고 할 수 있다.

향후 성능향상을 위해 회전자 및 고정자 극 구조와 형상 개선을 통한 설계로 구동범위 확장 및 고토크를 대기 위한 형상설계에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [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, Vol.10, No.3, pp 298 - 308 , June 1994
- [2] Dehez, B., Galary, G., Grenier, D., Raucient, B."Development of a Spherical Induction Motor With Two Degrees of Freedom" Magnetics, IEEE Transactions on Vol. 42, No. 8, pp 2077 - 2089 , Aug. 2006
- [3] Lee, K. M., Kwan, C.-K., "Design concept development of a spherical stepper for robotic applications", Robotics and Automation, IEEE Transactions on, Vol. 7, No. 1, pp 175 - 181, Feb. 1991
- [4] Qunjing Wang, Zheng Li, Youyuan Ni, Weidong Jiang, "Magnetic field computation of a PM spherical stepper motor using integral equation method", Magnetics, IEEE Transactions on, Vol. 42, No. 4, pp 731 - 734 , April 2006
- [5] Don Cheol Lee, Byung Il Kwon, "A Novel Structured 3 DOF Spherical Motor", ICEMS Conference on, LS2C-4, 2006
- [6] Sosseh, R.A., Kok-Meng Lee, "Finite element torque modeling for the design of a spherical motor" Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2002. 7th International Conference on Vol. 1, 2 - 5 ,pp 390 - 395, Dec. 2002
- [7] 양창일, 박준혁 백윤수, "전자석의 자기력 제어를 이용한 구형 3자유도 액추에이터의 설계 및 제어", 대한기계학회논문집, A권, 제25권, 제9호, pp 1341~1349, 2001