

A Study on The Novel Structured 3-DOF Spherical Motor

李 東 哲[†] · 金 大 慶^{*} · 權 丙 一^{**}

(Dong-Cheol Lee · Dae-Kyong Kim · Byung-Il Kwon)

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

In this paper, we propose the novel structured 3-DOF spherical motor and derive its principles of operation. Firstly, we designed concept model of novel structured 3-DOF spherical motor. Next, we derive the control method by calculating the currents. Also, to have intuitive driving control, we express the rotor position in equivalent angle-axis system and determine the exciting period of currents from the calculation result of the currents.

To verify the control method, we calculated the currents by the position of rotor. and then we analyzed the characteristics by 3D Finite Element Method when the calculated currents are excited.

Key Words : Spherical Motor, 3-DOF Motor, 3-DOF Actuator, Rotor Sphere

1. 서 론

로봇 산업이 성장함에 따라, 다자유도 구동원에 대한 요구가 증대되어 왔다. 특히 로봇 관절부의 구동장치와 매니퓰레이터의 구동장치, 감시카메라의 카메라 이동용 구동장치, 고속 플라즈마 장치, 레이저 절삭기기 등과 같이 다자유도의 움직임을 요구하는 시스템에서 다자유도 구동장치의 요구는 증대되어 왔다[1].

종래에는 다자유도 운동 메카니즘의 구현을 위하여 여러 개의 모터를 하나의 조인트에 연결하여 다자유도 실현을 위한 액츄에이팅 유닛으로 사용하였다. 그러나 이는 다수의 기어와 링크 등과 같은 여러 개의 복잡한 동력변환 장치를 필요로 함으로, 소형화, 정밀화가 요구되는 메커니즘에는 적용하기 힘들었다[2].

이를 해결하기 위하여 다자유도의 위치 제어가 가능한 단일 구동 형태의 구동원에 대한 연구가 필요하게 되었다. 3-자유도(3-Degree of Freedom, 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[3][4].

Y. Kaneko 등에 의해 처음으로 구형 PM(Permanent Magnet) 액츄에이터가 발표되었다[5]. K.M. Lee 등은 구형 VR(Variable Reluctance) 모터의 설계 및 실험에 관해 연구하였다[6]. K. Davey 등은 F.Williams 등에 의해 발표된 구형 인덕션 모터를 이론적으로 해석하였다[7][8]. Foggia. A 등은 인덕션 모터에 기반을 둔 3-DOF 액츄에이터의 초기 모델을 제작하였고[9], R. L. Hollis 등은 자기부상과 coarse-motion device의 end-effector용 설계를 기반으로 하는 고해상도의 6-DOF 액츄에이터의 초기모델을 제작하였다 [10]. 그러나 이들 구형 모터들은 3-자유도 구현을 위해 다극 착자된 영구 자석 또는 다수의 영구 자석을 사용하거나 [2][5], 회전자 표면에 유도전류 발생을 위한 전도성 물질의 설치 문제점을 가지고 있다[7]~[9]. 또 다수의 회전자 극 설치를 위한 구조적인 복잡함[1][6] 등으로 인하여 제작상의 문제점을 가지거나 스톱퍼로써의 역할의 불가능 등 기능적 문제점을 가지고 있다[7]~[9].

이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 스톱퍼의 역할이 가능하며 자속 방향의 발생 영역을 확장하여 구동범위의 극대화 가능한 새로운 구조의 3-자유도 구형 모터를 제안한다. 제안된 3-자유도 구형 모터는 다수의 극을 사용한 구형 모터에 비해 임의의 위치에 대한 제어의 용이성을 가진다. 회전자 위치 결정 이론을 유도하여 지령 위치로의 이동에 필요한 전류량과 회전자 이동에 필요한 전류량에 따른 각상의 여자주기를 결정하여 회전자의 위치 추종 가능성을 보인다.

[†] 교신저자, 正會員 : LG電子 DA研究所 主任研究員

E-mail : very_day@lge.com

^{*} 正會員 : 電子部品研究員 DCC社業센터 센터長 · 工博

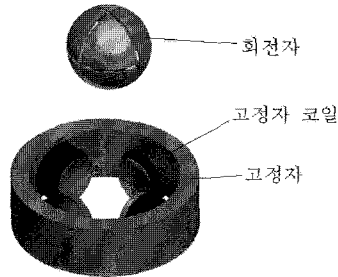
^{**} 正會員 : 漢陽大 工大 電子 · 컴퓨터工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2008年 1月 29日

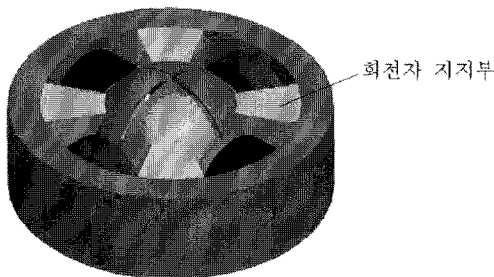
最終完了 : 2008年 7月 22日

2. 3-자유도 구형 모터의 형상 제안

그림 1은 제안된 3-자유도 구형 모터의 구조를 나타낸다. 제안된 3-자유도 구형 모터는 고정자와 회전자, 회전자 지지부로 구성되며, 회전자와 고정자 내부에는 각각 코일이 권선된다. 회전자는 고정자 중앙에 위치하며 회전자 지지부인해 소정의 공극으로 이격되어 배치된다.



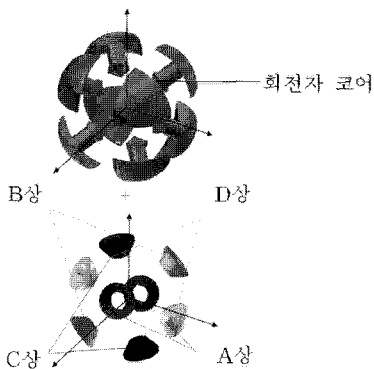
(a) 회전자와 고정자 구조
(a) Structure of the rotor and stator



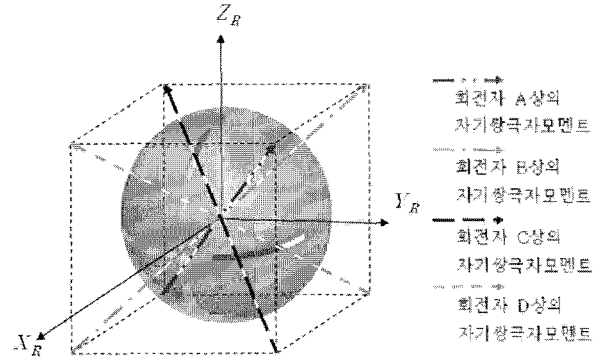
(b) 전체 구조
(b) Overall structure

그림 1 제안된 3-자유도 구형 모터의 구조
Fig. 1 Structure of the proposed 3-DOF spherical motor

그림 2는 제안된 3-자유도 구형 모터 회전자부의 구조를 나타낸다. 회전자는 구형의 코어를 각 회전자 극을 기준으로 하여 8개의 부분으로 나누어진 구조에 8개의 회전자 코일이 권선되어지는 구조를 이룬다.



(a) 회전자 코어와 회전자 코일의 구조
(a) Structure of the rotor core and rotor coil

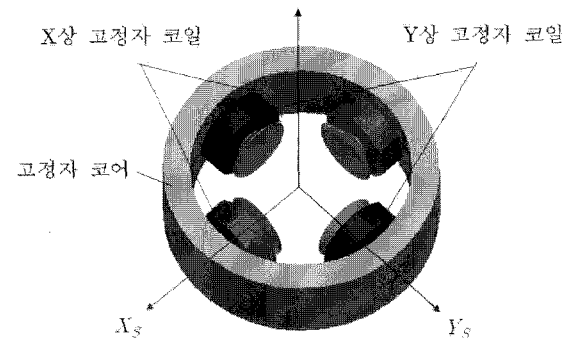


(b) 회전자 코일의 자기 쌍극자 모멘트
(b) Magnetic dipole moment of the rotor coil

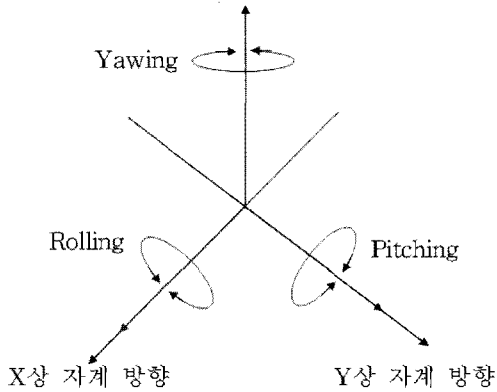
그림 2 회전자의 구조
Fig. 2 Structure of the rotor

각 회전자극에 권선된 코일은 서로 대칭되는 위치의 코일 들끼리 한 상으로 구성되어 전류를 인가함에 따라 자속을 발생한다. 회전자 각 상에서 발생하는 자속의 방향은 자기 쌍극자 모멘트로써 표현한다. 그 방향과 크기를 벡터로써 해석하면 각각의 회전자 코일에서 발생하는 자속은 정육면체의 각 꼭지점을 향하는 방향으로 발생한다. 이때, 회전자 코일은 회전자의 중심을 기준으로 서로 대칭되는 위치의 코일이 동일한 방향으로 자속을 발생시키도록 직렬 연결되어 한 상을 이룬다. 따라서 회전자 코일 각 상에서 발생하는 자기 쌍극자 모멘트는 정육면체의 하단부 꼭지점에서 시작하여 중심점을 통과해 상단부 꼭지점을 직선으로 연결하는 벡터로써 표현할 수 있다. 이 회전자 코일 각 상에서 발생하는 자기 쌍극자 모멘트의 방향의 단위 벡터는 회전자를 기준으로 하여 A상의 경우 (1, 1, 1), B상의 경우 (-1, 1, 1), C상의 경우 (-1, -1, 1), D상의 경우 (1, -1, 1)로 나타난다.

그림 3은 고정자의 구조를 나타낸다. 고정자는 원통형의 요크와 요크 내부에 요크의 중심으로 향해 서로 90°의 간격으로 배치되어있는 4개의 고정자 극을 가지며, 각 극에는 코일이 권선된다. 고정자 극에 권선된 코일은 서로 마주보는 방향의 코일끼리 동일한 방향의 자속을 발생하도록 한 상으로 구성되어 총 2상이다.



(a) 고정자의 구조
(a) Structure of the stator



(b) 자계 발생 방향과 회전 방향
(b) Direction of the magnetic field and direction of the rotation

그림 3 고정자의 자계 발생 방향과 회전 방향
Fig. 3 Direction of the magnetic field from the stator coil and direction of the rotation

회전자에 발생하는 힘은 자계 내에서 전류가 흐르는 회전자 코일에 유기되는 힘이다. 이 힘은 전류가 흐르는 회전자 코일이 각기 폐회로를 이룰 때, 폐회로가 이루는 평면에 수직한 방향과 고정자 코일에서 발생한 자계와 일치하는 방향으로 회전자 코일이 이동하도록 발생하고 고정자 코일에서 발생하는 자속을 중심으로 회전하는 방향으로 발생하지 않는다[11]. 때문에 고정자 코일 X상이 여자될 때, 회전자의 움직임 중 피치(Pitch)와 요(Yaw)만을 제어할 수 있다. 롤(Roll)의 중심축은 고정자 코일의 X상의 자계와 평행하기 때문에 이 축을 중심으로 회전하도록 하는 힘, 즉 롤 방향의 토크를 발생시키지 못한다. 마찬가지로, 고정자 코일 Y상이 여자되어 있을 때, 피치의 중심축은 고정자 코일 Y상의 자계와 평행하므로, 피치를 제외한 롤과 요의 움직임만을 제어할 수 있다. 따라서 회전자의 3 자유도의 구동을 위해서는 고정자 코일 X상과 고정자 코일 Y상은 변갈아 여자하고 여자된 고정자 코일에 따라 알맞은 전류를 각 회전자 코일에 인가함으로써 롤, 요, 피치의 움직임을 제어하게 된다. 이로 인해 원하는 크기와 방향의 토크를 제어함으로써 3 자유도의 운동을 일으킨다.

3. 3-자유도 구형 모터의 위치 제어

3.1 동작 원리

제안된 3-자유도 구형모터는 회전자와 고정자의 권선에 전류를 동시에 인가하고, 각각 형성된 자기장을 제어하여 회전자의 위치를 결정한다. 회전자를 움직이는 원리는 고정자 코일에서 발생하는 고정자 자계와 회전자의 회전자 자기 쌍극자 모멘트와의 상호작용에 의한 것이다. 회전자와 고정자 사이에 힘이 작용하여 회전자를 가장 낮은 위치 에너지를 가지는 위치로 이동하도록 회전자의 회전중심에 토크가 발생한다[11]. 각 회전자 코일의 각 상에 전류가 인가되었을

때 이로 인해 발생한 회전자 코일 각 상의 토크의 총 합이 0이 되는 지점에서 회전자의 위치 에너지는 가장 낮은 상태가 된다. 따라서 회전자는 회전자 코일 각 상에서 발생하는 토크의 합이 0이 되는 방향으로 회전력을 받아 회전하게 되며, 토크의 합이 0이 되는 위치에서 정지하게 된다.

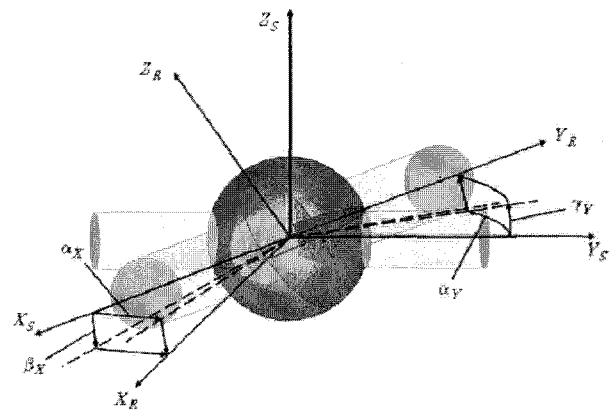
3.2 좌표계와 회전자 위치의 표현

제안된 3-자유도 구형 모터는 일반 회전기와 달리 롤, 피치, 요의 3방향의 회전운동을 복합적으로 구동한다. 따라서 회전자 위치 제어를 위해서는 회전자의 위치와 고정자 위치의 상호 관계의 파악이 필요하다.

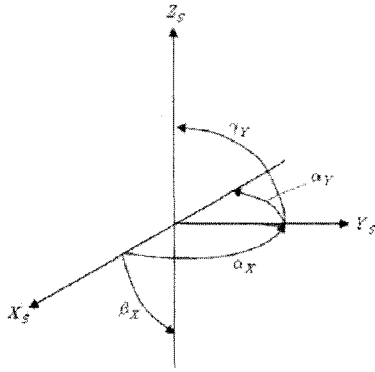
회전자 좌표계는 그림 2에 보인 바와 같이 회전자의 중심으로부터 회전자 각 상의 4극의 경계점을 향한 방향으로 각 축이 위치한다. 이는 직각좌표계로써 표현되며 아래첨자 R은 회전자(Rotor)를 기준으로 하는 좌표계를 표현한다. 고정자 좌표계는 그림 3에 보인 바와 같이 고정자의 중심으로부터 고정자 각 상의 두 코일을 연결하는 직선 방향으로 X, Y축이 위치하며, Z축은 두 축에 직교하는 방향을 향하는 직각좌표계로써 표시된다. 여기서 아래첨자 S는 고정자(Stator)를 기준으로 하는 좌표계를 표현한다.

이와 같은 회전자 좌표계와 고정자 좌표계를 통하여 회전자의 위치를 표현한다. 고정자 좌표계의 위치는 항상 고정되어 있으며, 회전자의 위치는 회전자 좌표계의 각 X_R, Y_R, Z_R 축이 고정자 좌표계의 X_S, Y_S, Z_S 축과 이루는 각으로써 표현된다. 즉, X_R 축과 X_S 축 사이의 각, Y_R 축과 Y_S 축 사이의 각, 그리고 Z_R 축과 Z_S 축 사이의 각으로 회전자가 어떠한 각도로 위치하고 있는가를 표현한다.

그러나 회전자 좌표계와 고정자 좌표계는 각 좌표계내의 3축이 서로 직교하는 직각좌표계로써 표현하므로, 각 좌표계의 X축과 Y축의 위치를 알고 있다면 Z축의 위치를 알 수 있다. 때문에 회전자의 위치는 회전자 좌표계의 3축과 고정자 좌표계의 3축 사이의 각을 모두 파악할 필요 없이 각 좌표계의 2축 사이의 각만으로 표현할 수 있다. 따라서 회전자의 위치는 X_R 축과 X_S 축 사이의 각, Y_R 축과 Y_S 축 사이의 각만으로 표현한다.



(a) 회전자 좌표계와 고정자 좌표계
(a) rotor-basis coordinate system and stator-basis coordinate system



(b) $\alpha_X, \beta_X, \alpha_Y, \gamma_Y$ 의 정방향
 (b) Positive direction of $\alpha_X, \beta_X, \alpha_Y, \gamma_Y$

그림 4 회전자 위치 표현
 Fig. 4 Expression of the rotor position

그림 4는 회전자 좌표계와 고정자 좌표계를 통한 회전자의 위치 표현을 나타낸다. 먼저, 회전자 좌표계의 X축인 X_R 축과 고정자 좌표계의 X축인 X_S 축 사이의 각은 X_S 축이 Z_S 축을 기준으로 α_X 만큼 회전하고, 다시 Y_S 축을 기준으로 β_X 만큼 회전하였을 때의 위치가 X_R 과 동일한 위치가 되도록 하는 두 각 α_X 와 β_X 로서 표현한다. 이때 아래 첨자 X는 회전자와 고정자의 X축 사이의 각임을 표현한다[12].

마찬가지로 회전자 좌표계의 Y축인 Y_R 축과 고정자 좌표계의 Y축인 Y_S 축 사이의 각은 Y_S 축이 Z_S 축을 기준으로 α_Y 만큼 회전하고, 다시 X_S 축을 기준으로 γ_Y 만큼 회전하였을 때의 위치가 Y_R 과 동일한 위치가 되도록 하는 두 각 α_Y 와 γ_Y 로서 표현한다. 이때 아래 첨자 Y는 회전자와 고정자의 Y축 사이의 각임을 표현한다. 또한, X축을 중심으로 하는 회전의 크기인 γ 는 롤, Y축을 중심으로 하는 회전의 크기인 β 는 피치, Z축을 중심으로 하는 회전의 크기인 α 는 요의 방향을 기준으로 표현한다.

3.3 회전자 위치 결정 이론

회전자 코일에서 발생하는 힘으로 회전자 원점에서는 토크가 발생하고, 회전자는 각 회전자 코일에 의한 토크를 동시에 받는다. 따라서 회전자는 토크의 합성 결과의 방향으로 회전한다. 토크의 합성 결과가 0인 지점, 즉 각 회전자 코일로 인한 토크들이 서로 상쇄되는 지점에서 회전자는 고정된다. 이때 제안된 새로운 3-자유도 구형 모터는 스토퍼의 역할이 가능하다[11]. 회전자 코일 A상에서 발생하는 토크를 τ_A , 회전자 코일 B상에서 발생하는 토크를 τ_B , 회전자 코일 C상에서 발생하는 토크를 τ_C , 회전자 코일 D상에서 발생하는 토크를 τ_D 라고 하여 표현하면 식(1)과 같다.

$$\tau_A + \tau_B + \tau_C + \tau_D = 0 \tag{1}$$

이때 각 회전자 코일에서 발생하는 토크는 고정자 코일에 전류가 인가되었을 때 발생하는 자속 벡터와 각 회전자 코일에 전류를 인가하였을 때 발생하는 자기 쌍극자 모멘트의

벡터로 구할 수 있다. 고정자 코일 X상에 전류가 인가되었을 때 발생하는 자속은 단위벡터 $\vec{B}_X = (1, 0, 0)$ 로 표현하고, 고정자 코일 Y상에서 발생하는 자속은 단위벡터 $\vec{B}_Y = (0, 1, 0)$ 으로 표현한다. 고정자 코일 X상에서 자속을 발생시키는 경우 피치와 요의 움직임만을, 고정자 코일 Y상에서 자속을 발생시키는 경우 롤과 요의 움직임만을 제어할 수 있으므로, 각 고정자 코일을 여자함에 따라 발생하는 토크는 따로 계산한다.

먼저 고정자 코일 X상을 여자하여 $\vec{B}_X = (1, 0, 0)$ 의 자속을 발생하는 경우를 살펴보면 다음과 같다.

회전자 코일 A상에 의해 발생하는 토크를 계산하기 위해 초기위치에서 회전자 코일 A상에 전류를 인가하였을 때 발생하는 자기 쌍극자 모멘트를 구하면 식(2)와 같다[13]. 이때 N_A 는 회전자 코일 A상의 권선수, A_A 는 회전자 극의 단면적, i_{AX} 는 인가전류이며 아래첨자 X는 고정자 X상을 여자하는 조건임을, 아래첨자 A는 회전자 코일 A상임을 의미한다.

$$\vec{M}_{AX} = N_A A_A i_{AX} [1, 1, 1] \tag{2}$$

마찬가지로, 초기위치에서 회전자 코일 B, C, D상에 전류를 인가하였을 때 회전자 코일 각 상에서 발생하는 자기 쌍극자 모멘트는 식(3)과 같으며 아래첨자 B, C, D는 각기 회전자 코일 B, C, D상을 표현한다.

$$\begin{aligned} \vec{M}_{BX} &= N_B A_B i_{BX} [-1, 1, 1] \\ \vec{M}_{CX} &= N_C A_C i_{CX} [-1, -1, 1] \\ \vec{M}_{DX} &= N_D A_D i_{DX} [1, -1, 1] \end{aligned} \tag{3}$$

회전자가 초기 위치가 아닌 임의의 위치에 있을 경우, 회전자 코일 A상에서 발생하는 토크는 회전자 코일 A상에서 발생하는 자기 쌍극자 모멘트와 고정자 코일 X상에 의해 발생한 자속과의 상호작용으로 발생하게 된다. 그러나 고정자 코일 X상을 여자할 때는 피치와 요의 움직임만을 제어할 수 있으므로, 임의의 위치에서의 회전자 코일 A상의 자기 쌍극자 모멘트를 \vec{M}_{AX}' 라고 정의하였을 때, \vec{M}_{AX}' 는 요 방향의 회전의 크기(α_X)와 피치 방향의 회전의 크기(β_X)로 그 위치를 표현해야 한다.

회전자 코일 A상의 인가전류를 i_{AX} 라 하면 (α_X, β_X) 위치에서 회전자 코일 A상의 자기 쌍극자 모멘트 \vec{M}_{AX}' 는 식(4)와 같이 계산된다. 여기서 상수 $K_A = N_A A_A$ 를 이용하여 표현한다[11].

$$\begin{aligned} \vec{M}_{AX}' &= K_A i_{AX} (1, 1, 1) \cdot [\text{rot}_Z(\alpha_X)] \cdot [\text{rot}_Y(\beta_X)] \\ &= K_A i_{AX} \begin{bmatrix} \cos\alpha_X \cos\beta_X - \sin\alpha_X \cos\beta_X + \sin\beta_X \\ \sin\alpha_X + \cos\alpha_X \\ -\cos\alpha_X \sin\beta_X + \sin\alpha_X \sin\beta_X + \cos\beta_X \end{bmatrix}^T \end{aligned} \tag{4}$$

이와 유사하게 (α_X, β_X) 위치에서의 회전자 코일 B상, 회전자 코일 C상, 회전자 코일 D상의 자기 쌍극자 모멘트 $\vec{M}_{BX}', \vec{M}_{CX}', \vec{M}_{DX}'$ 는 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} \overrightarrow{M_{BX}} &= K_B i_{BX}(-1, 1, 1) \cdot [\text{rot}_z(\alpha_X)] \cdot [\text{rot}_y(\beta_X)] \\ \overrightarrow{M_{CX}} &= K_C i_{CX}(-1, -1, 1) \cdot [\text{rot}_z(\alpha_X)] \cdot [\text{rot}_y(\beta_X)] \\ \overrightarrow{M_{DX}} &= K_D i_{DX}(1, -1, 1) \cdot [\text{rot}_z(\alpha_X)] \cdot [\text{rot}_y(\beta_X)] \end{aligned} \quad (5)$$

고정자 코일 X상에서 발생한 자속과 회전자 코일 A상의 자기 쌍극자 모멘트로 인한 토크를 τ_{AX} 라고 하였을 때, (α_X, β_X) 위치의 회전자 코일 A상에서 발생하는 토크는 식(6)과 같다[13].

$$\begin{aligned} \tau_{AX} &= \overrightarrow{M_{AX}}' \times \overrightarrow{B_X} \\ &= K_A i_{AX} \begin{bmatrix} 0 \\ -\cos\alpha_X \sin\beta_X + \sin\alpha_X \sin\beta_X + \cos\beta_X \\ -\sin\alpha_X - \cos\alpha_X \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (6)$$

이와 같은 방법으로 고정자 코일 X상과 회전자 코일 B, C, D상에 의한 (α_X, β_X) 위치에서의 토크는 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{BX} &= \overrightarrow{M_{BX}}' \times \overrightarrow{B_X} \\ &= K_B i_{BX} \begin{bmatrix} 0 \\ \cos\alpha_X \sin\beta_X + \sin\alpha_X \sin\beta_X + \cos\beta_X \\ \sin\alpha_X - \cos\alpha_X \end{bmatrix}^T \\ \tau_{CX} &= \overrightarrow{M_{CX}}' \times \overrightarrow{B_X} \\ &= K_C i_{CX} \begin{bmatrix} 0 \\ \cos\alpha_X \sin\beta_X - \sin\alpha_X \sin\beta_X + \cos\beta_X \\ \sin\alpha_X + \cos\alpha_X \end{bmatrix}^T \\ \tau_{DX} &= \overrightarrow{M_{DX}}' \times \overrightarrow{B_X} \\ &= K_D i_{DX} \begin{bmatrix} 0 \\ -\cos\alpha_X \sin\beta_X - \sin\alpha_X \sin\beta_X + \cos\beta_X \\ \sin\alpha_X + \cos\alpha_X \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (7)$$

식(1)과 같이, (α_X, β_X) 위치에서 회전자가 더 이상 이동하지 않고 고정될 때 각 회전자 코일에서 발생하는 자속들로 인한 토크의 합은 0이다. 이는 식(8)과 같은 제한 조건으로 표현되며 이때 아래첨자 X는 고정자 코일 X상이 여자되었을 때임을 표현한다.

$$\tau_{AX} + \tau_{BX} + \tau_{CX} + \tau_{DX} = 0 \quad (8)$$

따라서 이 조건에 만족되는 경우, 식(6)과 식(7)로 구한 각 상의 토크를 식(8)의 제약조건에 대입하여 정리하면 회전자 권선에 인가된 전류들의 값으로 인해 회전자의 위치를 결정할 수 있으며, 결정되는 회전자 위치 (α_X, β_X) 는 식(9)와 같다.

$$\begin{aligned} \alpha_X &= \tan^{-1} \left(\frac{U}{V} \right) \\ \beta_X &= \tan^{-1} \left(\frac{-W}{U \sin\alpha_X + V \cos\alpha_X} \right) \\ \begin{cases} U = K_A i_{AX} + K_B i_{BX} - K_C i_{CX} - K_D i_{DX} \\ V = -K_A i_{AX} + K_B i_{BX} + K_C i_{CX} - K_D i_{DX} \\ W = K_A i_{AX} + K_B i_{BX} + K_C i_{CX} + K_D i_{DX} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

위의 식(9)로부터, (α_X, β_X) 위치로 회전자가 이동하기 위해

회전자 코일에 인가시켜야 하는 전류량을 구하면 식(10)과 같으며 이때 K 는 비례상수이다.

$$\begin{aligned} i_{AX} &= K(\cos\alpha_X \cos\beta_X - \sin\alpha_X \cos\beta_X - \sin\beta_X) \\ i_{BX} &= K(-\cos\alpha_X \cos\beta_X - \sin\alpha_X \cos\beta_X - \sin\beta_X) \\ i_{CX} &= K(-\cos\alpha_X \cos\beta_X + \sin\alpha_X \cos\beta_X - \sin\beta_X) \\ i_{DX} &= K(\cos\alpha_X \cos\beta_X + \sin\alpha_X \cos\beta_X - \sin\beta_X) \end{aligned} \quad (10)$$

마찬가지로 고정자 코일 Y상이 여자되었을 때 (α_Y, γ_Y) 위치로 회전자를 이동시키기 위해 회전자 코일에 인가시켜야 하는 전류량을 구하면 식(11)과 같으며 이때 K 는 비례상수이다.

$$\begin{aligned} i_{AY} &= K(\sin\alpha_Y \cos\gamma_Y + \cos\alpha_Y \cos\gamma_Y - \sin\gamma_Y) \\ i_{BY} &= K(-\sin\alpha_Y \cos\gamma_Y + \cos\alpha_Y \cos\gamma_Y - \sin\gamma_Y) \\ i_{CY} &= K(-\sin\alpha_Y \cos\gamma_Y - \cos\alpha_Y \cos\gamma_Y - \sin\gamma_Y) \\ i_{DY} &= K(\sin\alpha_Y \cos\gamma_Y - \cos\alpha_Y \cos\gamma_Y - \sin\gamma_Y) \end{aligned} \quad (11)$$

3.4 스위칭 주기의 결정

3-자유도 구형 모터는 고정자의 X, Y상이 여자되었을 때, 회전자 각 상에 인가되는 전류의 비로써 회전자의 위치를 결정한다. 따라서 전체 주기에 따른 회전자 각 상의 전류 여자 주기를 회전자 각 상의 인가전류의 비로부터 결정한다. 전체 전류 인가 주기를 T_S 라 하고, 고정자 코일 X상의 전류 여자 주기를 T_X , 고정자 코일 Y상의 전류 인가 주기를 T_Y 라고 하면 T_X , T_Y 의 크기는 동일하고 고정자 코일의 전류 인가 주기는 식(12)와 같다. 여기서 아래첨자 X는 고정자 X상, Y는 고정자 Y상이 여자되었을 경우를 나타낸다.

$$\begin{aligned} T_S &= T_X + T_Y \\ |T_X| &= |T_Y| \end{aligned} \quad (12)$$

고정자 X상이 여자되었을 때 회전자 위치에 따른 회전자 A, B, C, D 상의 전류 인가 주기 T_{AX} , T_{BX} , T_{CX} , T_{DX} 는 식(13)과 같다.

$$\begin{aligned} T_X &= T_{AX} + T_{BX} + T_{CX} + T_{DX} \\ T_{kX} &= \frac{|i_k|}{|i_{AX}| + |i_{BX}| + |i_{CX}| + |i_{DX}|} \quad (k = A, B, C, D) \end{aligned} \quad (13)$$

마찬가지로 고정자 Y상이 여자되었을 때 회전자 위치에 따른 회전자 A, B, C, D 상의 전류 인가 주기 T_{AY} , T_{BY} , T_{CY} , T_{DY} 는 식(14)와 같다.

$$\begin{aligned} T_Y &= T_{AY} + T_{BY} + T_{CY} + T_{DY} \\ T_{kY} &= \frac{|i_k|}{|i_{AY}| + |i_{BY}| + |i_{CY}| + |i_{DY}|} \quad (k = A, B, C, D) \end{aligned} \quad (14)$$

3.5 전압 방정식과 기계 방정식

3-자유도 구형 모터의 전압 방정식은 식(15)와 같다[3].

$$[v] = [r][i] + \frac{d}{dt}[\lambda] \quad (15)$$

여기서 $[v]$, $[i]$ 그리고 $[\lambda]$ 는 회전자 코일 A, B, C, D상과 고정자 코일 X, Y상의 전압, 전류 그리고 쇄교 자속을 나타내는 행렬이다. $[r]$ 은 권선 저항을 나타내는 대각행렬이며 회전자 권선의 쇄교 자속은 식(16)과 같다.

$$\lambda_i = L_i i_i + M_{ij} i_j \quad \begin{matrix} (i = A, B, C, D) \\ (j = X, Y) \end{matrix} \quad (16)$$

또한 고정자 권선의 쇄교 자속은 식(17)과 같다.

$$\lambda_j = L_j i_j + M_{Aj} i_A + M_{Bj} i_B + M_{Cj} i_C + M_{Dj} i_D \quad (17)$$

3-자유도 구형 모터의 운동방정식은 회전자의 회전운동을 임의의 단위벡터 \vec{K} 을 기준으로 하는 θ° 만큼의 회전으로 그 움직임을 표현하면 식(18)과 같다.

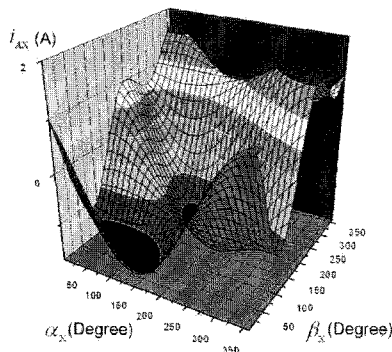
$$\tau_x + \tau_y - \tau_L = J \frac{d}{dt} \omega + D\omega \quad (18)$$

여기서 τ_x , τ_y 는 고정자 X, Y상 여자 시 발생하는 토크, τ_L 은 부하토크이며, J 는 관성계수, D 는 댐핑계수, ω 는 각속도이다.

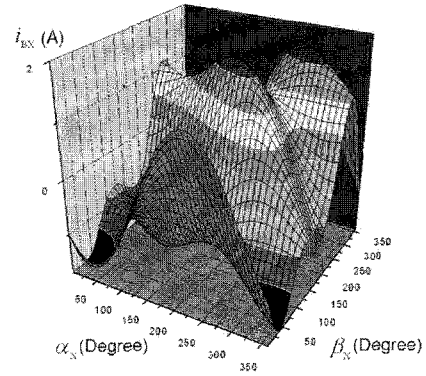
4. 해석 결과

4.1 회전자 위치에 따른 전류값

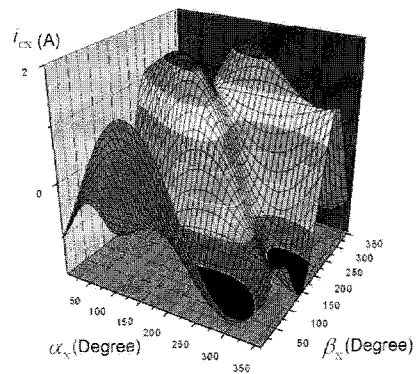
3-자유도 구형 모터의 고정자는 자기적으로 고정자 좌표계의 X_S 축과 Y_S 축의 형상이 동일하므로 해석은 X_S 축이 여자된 경우를 기준으로 해석한다. 그림 5는 식(10)을 통하여 구해진 회전자 위치가 α_X 와 β_X 일 때의 전류량을 나타내며 전류값의 최대치가 2A가 되도록 비례상수 K를 조정하였다. 이 결과를 통하여 회전자의 위치를 α_X 와 β_X 로 이동하기 위해 필요한 전류량을 구할 수 있다.



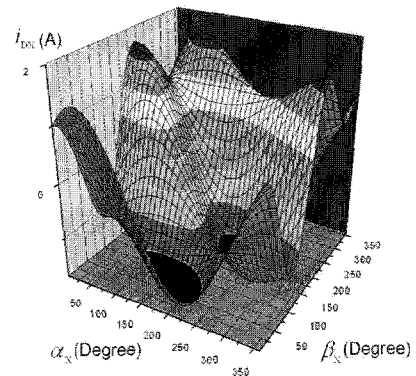
(a) 회전자 코일 A상
(a) Rotor coil phase A



(b) 회전자 코일 B상
(b) Rotor coil phase B



(c) 회전자 코일 C상
(c) Rotor coil phase C



(d) 회전자 코일 D상
(d) Rotor coil phase D

그림 5 회전자 위치에 따른 회전자 코일 각상의 전류값 결과
Fig. 5 Result of the current calculation of each rotor coil by position of the rotor

4.2 유한요소 해석에 의한 정특성

회전자 위치이동 능력을 확인하기 위하여 3차원 유한요소법(Finite Element Method, FEM)을 통하여 설계된 모델을 시뮬레이션하였다. 현재의 계산기의 능력으로는 다자유도의

동적특성의 해석이 어려우므로, FEM을 이용한 정특성을 해석함으로써 제안된 3-자유도 구형 모터의 회전자 이동 가능성과 위치 결정 능력을 확인한다. 그림 6은 FEM해석에 이용된 구형모터를 나타낸다. 해석 모델의 사양은 표 1과 같으며 인가 전류비의 비례상수 K는 2로 설정하였다.

본 논문에서는 두 가지의 정특성 해석을 행한다. 먼저 임의의 회전자 위치에서 필요한 전류값을 식(10)으로 계산하여 이를 고정한 후 회전자 위치의 변화에 따라 발생하는 토크값을 관측하여 회전자의 위치 결정 능력을 확인한다. 다음으로, 회전자가 고정되어 있는 상태에서 식(10)을 통하여 회전자의 위치별로 계산되어진 전류값을 인가하여, 이때 회전자 코일 각 상으로 인해 발생하는 토크를 관측하고, 토크량의 총 합을 구하여 회전자 이동 가능성과 동시에 식(1)을 만족함을 보인다.

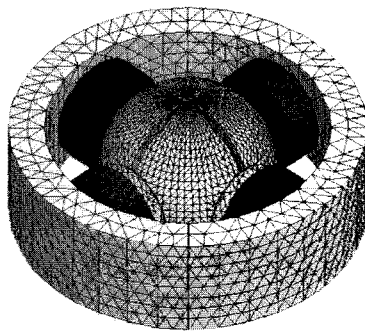


그림 6 유한요소법 해석 모델
Fig. 6 FEM(Finite Element Method) analysis model

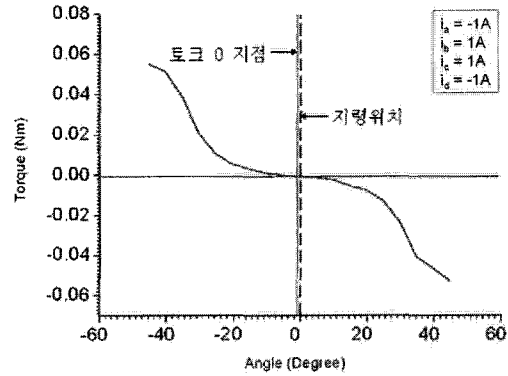
표 1 설계 사양
Table 1 Specification of analysis model

고정자 외경 [mm]	100
고정자 내경 [mm]	80
고정자 높이 [mm]	30
회전자 외경 [mm]	50
고정자 극 외경 [mm]	10
고정자 극 길이 [mm]	15
회전자 극 외경 [mm]	10
회전자 극 길이 [mm]	11
고정자 상당 턴수 [N]	131
회전자 상당 턴수 [N]	32
권선 선경 [mm]	0.4

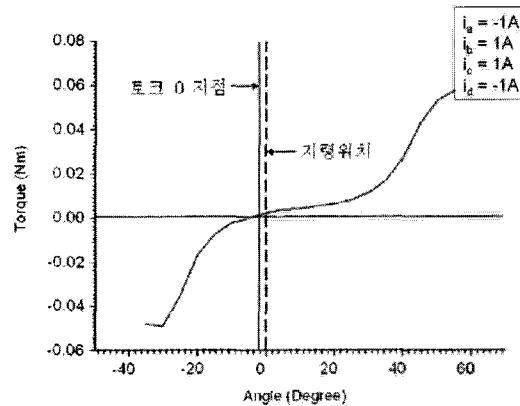
그림 7은 인가 전류값이 고정되어 있을 때, 회전자의 위치 이동에 따라 발생하는 토크량을 나타낸다. 본 해석은 회전자가 그림 13의 $\alpha_X = 0^\circ, \beta_X = 0^\circ$ 의 위치로 이동하기 위한 전류값이 회전자 코일 각 상에 인가되어 있을 때, 전류값을 고정시킨 상태에서 회전자의 위치를 $\pm 40^\circ$ 로 이동시키며 발생하는 토크값을 해석한다.

그림 7의 (a)와 (b)에서 보이는 바와 같이 지령 위치와 회전자 정지 위치 사이에 일부 오차를 가지지만 회전자는 지령 위치인 $\alpha_X = 0^\circ, \beta_X = 0^\circ$ 인 지점에서 발생 토크가

0(Nm)에 가까우며, 또한 $\alpha_X = 0^\circ, \beta_X = 0^\circ$ 의 위치에서 멀어질수록 토크가 증가함으로써 회전자의 지령위치를 향한 위치 이동 가능성과 함께 스톱퍼로서의 기능을 가짐을 알 수 있다. 이 때 발생하는 오차는 FEM 해석시 공극 부분 메쉬의 불균형으로 인한 자속 경로의 불균형이 원인으로 판단되나, 회전자가 지령위치에 가까워짐에 따라 발생하는 토크의 차이가 미미하므로 지령위치를 향한 위치 이동 가능성을 나타내기에는 충분할 것으로 사료된다.



(a) α_X 변화에 따른 토크 변화
(a) Torque variation by changing of α_X



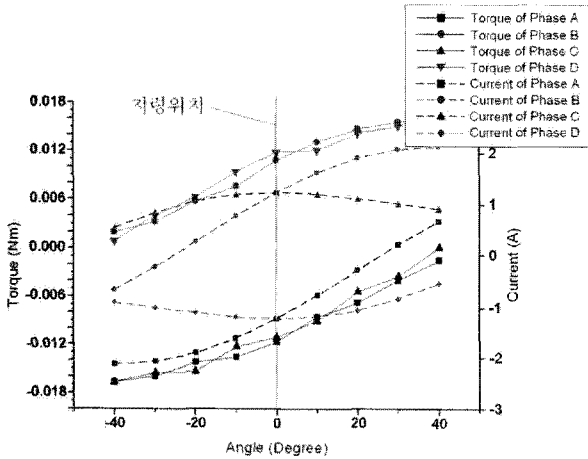
(b) β_X 에 따른 토크 변화
(b) Torque variation by changing of β_X

그림 7 회전자 위치에 따른 토크 변화
Fig. 7 Torque variation by changing of the rotor position

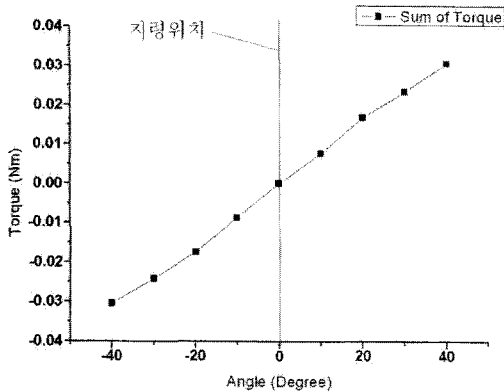
그림 8은 회전자 코일 각 상에 인가되는 전류값 변화에 따른 발생 토크량을 나타낸다. 회전자가 $\alpha_X = 0^\circ, \beta_X = 0^\circ$ 의 위치에 있을 때, 회전자 코일의 각 상에 $\alpha_X = \pm 40^\circ, \beta_X = 0^\circ$ 일 때의 전류를 인가시켜 회전자 코일 각 상에 의해 발생하는 토크량이다.

그림 8의 (a)에서 나타난 바와 같이 회전자 코일 각 상에서 발생하는 토크는 0(Nm)이상이므로, 각각의 회전자 코일에서 토크가 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 8의 (b)에서 보이는 바와 같이, 회전자 코일 각 상에서 발생하는 토크의 합은 회전자의 위치인 $\alpha_X = 0^\circ$ 에서 그 값이 0(Nm)이다. 이는 식(10)에 의해 계산된 전류값으로 인한 토

크값들이 식(8)을 만족함을 나타낸다. 또한 $\alpha_X = 0^\circ$ 인 지점에서 멀어질수록 토크의 합의 절대치가 증가하여 회전자가 임의의 위치에 있을 경우 $\alpha_X = 0^\circ$ 의 위치로 이동 가능함을 보여, 회전자 위치 이동 가능성을 보인다.



(a) 여자 전류 변화에 따른 회전자 각 상의 토크 변화
(a) Torque variation by changing of the exciting current of each coil



(b) 회전자 코일 각 상의 발생 토크의 총합
(b) The sum of all torques from the rotor coils

그림 8 전류값 변화에 따른 발생 토크
Fig. 8 Torque variation by changing of the exciting current

5. 결 론

본 논문에서는 새로운 다자유도 구동장치의 개발에 관한 연구의 일환으로, 회전자와 고정자 권선에 전류를 동시에 인가하여 회전력을 발생시키는 새로운 구조의 3-자유도 구형 모터의 기본 구조를 제안하였다. 그리고 제안 모델을 대상으로 지령 위치로의 회전자 이동을 위한 입력 전류와 회전자 위치와의 관계식을 기술하고 equivalent angle-axis를 통하여 회전자의 회전운동을 직관적으로 표현하는 수식을 도출하였다. 또한 도출된 전류비에 대한 수식을 통하여 각 상의 전류 여자주기를 결정하였다.

도출된 수식은 3차원 FEM을 통하여 먼저 회전자 고정

자 회전자 이동에 필요한 인가 전류량의 변화를 주어 각 토크 특성을 파악하고, 다음으로 인가 전류량 고정시 회전자 위치에 변화를 주어 각 토크 특성을 파악하였다. 시뮬레이션 결과 제안된 구조 및 회전자의 위치 제어를 위해 도출된 수식은 일부 오차를 가지지만 3-자유도의 구동이 가능함을 보였다. 또한 회전자 지령 위치로 이동 후 회전자의 위치를 유지하기 위한 토크가 발생하여 스톱퍼로써의 기능을 가짐을 확인하였다.

향후 성능 향상을 위해 회전자 및 고정자 형상 개선을 통한 설계로 회전자 위치 이동 정확도를 높이고 자기저항 성분으로 인해 발생하는 토크를 보상하는 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] K.M Lee, G. Vachtsevanos, C. k. Kwan, "Development of a spherical stepper wrist motor", Robotics and Automation, 1988. Proceedings., 1988 IEEE International Conference on 24-29 April 1988 Page(s):267 - 272 vol.1
- [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, "전자석의 자기력 제어를 이용한 구형 3 자유도 액추에이터의 설계 및 제어", 대한기계학회논문집 A권, 제25권 제9호, 2001, pp. 1341-1349.
- [5] Y. Kaneko, I. Yamada, and K. Itao, "A spherical DC servo motor with three degrees-of-freedom", Trans. ASME Dynam. Syst. Meas. Contr., vol. 111, no. 3, pp. 398-402, Sept. 1989.
- [6] K.M. Lee and C. k. Kwan, "Design concept development of a spherical stepper for robotic applications", IEEE Trans. Robot. Automat., vol. 7, pp. 175-181, Feb. 1991.
- [7] K. Davey, G. Vachtsevanos, and R. Powers, "The analysis of fields and torques in spherical induction motors", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 23, no. 1, pp. 273-282, Jan. 1987.
- [8] F.Williams, E. Laithwaite, and G. F. Eastham, "Development and design of spherical induction motors", Proceeding of the IEEE, pp. 471-484, Dec. 1959.
- [9] Foggia. A, Olivier. E, Chappuis. F, Sabonnadiere. J.C, "A new three degrees of freedom electromagnetic actuator", in IEEE Industry Applications Society

Annual Meeting, 1988, pp. 137-141.

[10] R. L. Hollis, S. E. Salcudean, and A. P. Allan, "A six-degree-of-freedom magnetically levitated variable compliance fine-motion wrist: design, modeling, control," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 7, no. 1, pp. 320-332, June 1991.

[11] 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

[12] John J. Craig, "Introduction to Robotics Mechanics and Control", Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

[13] William H. Hayt, John A. Buck "Engineering Electromagnetics", Sixth Edition, McGRAW-HILL, 2001



권병일 (權丙一)

1956년 2월 1일생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 일본 동경대 대학원 졸업(공학박사). 1990년 도시바(주) 시스템 소프트웨어 연구소 연구원. 1991년 한국 기계연구소 자기 부상 열차 사업단 선임연구원. 2001년 University of Wisconsin-Madison 객원교수. 1989년 10월~현재 일본 와세다 대학 이공학 연구소 객원연구원. 1991년~현재 한양대 전자컴퓨터공학부 교수

Tel : 031-400-5165
 Fax : 031-406-5073
 E-mail : bikwon@hanyang.ac.kr

저 자 소 개



이동철 (李東哲)

1978년 7월 5일생. 2005년 한양대 전자컴퓨터전기제어공학부 졸업. 2007년 동 대학원 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 2007년 1월~현재 LG전자 DA연구소 주임 연구원

Tel : 010-8288-4149
 Fax : 02-6915-1068
 E-mail : very_day@lge.com



김대경 (金大慶)

1972년 9월 27일생. 2001년 한양대 전기공학과 졸업(석사), 2007년 한양대 전자전기제어계측공학과 졸업(공학박사). 2001~2005년 삼성전자 가전연구소 선임연구원, 2005년 ~ 현재 전자부품연구원 DCC사업센터 센터장.

Tel : 062-975-7040,
 Fax : 062-975-7049
 E-mail : dkkim@keti.re.kr