

전자석의 자기력 제어를 이용한 구형 3 자유도 액추에이터의 설계 및 제어

양창일* · 박준혁** · 백윤수†

(2000년 12월 11일 접수, 2001년 6월 23일 심사완료)

Design and Control of 3 D.O.F. Spherical Actuator Using the Magnetic Force of the Electromagnets

Chang Il Yang, Joon Hyuk Park and Yoon Su Baek

Key Words : 3 D.O.F. Actuator(3 자유도 액추에이터), Spherical Motor(구형 모터), 3 D.O.F. Motor(3 자유도 모터), Electromagnetic Force(전자기력), Electromagnet(전자석), Iron-Core Solenoid(철심 솔레노이드), Permanent Magnet(영구 자석), PID Control(PID 제어), Coulomb's Law(쿨롱의 법칙), Lorentz Force(로렌츠 힘)

Abstract

In this paper, 3 D.O.F. actuator, which has three degrees of freedom in one joint, is proposed. The proposed 3 D.O.F. spherical actuator is composed of the rotor and stator. The upper plate of the stator supports the rotor and five electromagnets are located at the base of the stator. The rotor has two permanent magnets, and each rotational axis of the rotor gimbal system is supported by the bearing. To find out the governing equations for the torque generation, Coulomb's law and Lorentz force with respect to magnetism is applied. As the experimental results, if the distance between electromagnet and permanent magnet is far enough, the force between these magnets can be expressed from current of coils and z-axial distance. For the purpose of control 3 D.O.F. actuator, PID control law is applied. The experimental results are presented to show the validity of the proposed 3 D.O.F. actuator.

1. 서론

현재 산업 현장에서 사용되는 로봇이나 매니플레이터에는 액추에이터로서 다양한 종류의 모터들이 주로 사용되고 있다. 이러한 일반적인 전기 모터는 고속, 저토크의 특성을 갖는다. 따라서 실제적으로 사용할 때는 감속 기어를 사용하게 되고 이로 인해 무게와 부피가 증가하게 된다. 이러한 액추에이터들은 각 조인트에 대해 1 자유도만을 가지므로 다자유도를 필요로 하는 손목 관절 등에

사용한다면 여러 개의 링크가 갖는 문제점들로 인해 정확한 위치 제어가 쉽지 않다. 따라서 미세한 운동이나 소형 경량을 필요로 하는 메카니즘에는 적용되기 힘들다.

이러한 문제점들을 해결하기 위한 작고 가벼운 다자유도 구동원으로써의 모터의 개발이 요구되어 왔다. 3 자유도를 갖는 모터, 즉 링크와 기어 시스템을 기구학적으로 단순화 하기 위하여 하나의 조인트에서 3 자유도(yaw, roll, pitch)의 운동을 할 수 있는 모터에 대한 연구가 필요하게 되었다.

3 자유도 액추에이터를 사용할 경우, 3 개의 모터와 그 외의 부수장치들을 하나의 조인트에 설치함으로써 부피와 무게를 감소시키고, 기어를 사용하지 않기 때문에 백래쉬나 마찰 등도 방지할 수 있다. 또 링크를 사용하지 않기 때문에 링크를 사용함으로써 발생하는 탄성적 휨에 의한 오차도 발생하지 않으며 기구를 단순화시킬 수 있다는 장점

* (주) 엔디텍

** 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과
E-mail : watchcon@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-2827 FAX : (02)362-2736

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계전자공학부

이 있다. 이외에도 구조가 비교적 간단하기 때문에 설계 및 제작이 비교적 용이하다. 일반적으로 3 자유도 액추에이터는 구형 표면을 따라 움직이며 자전이 가능하다. 또한 작업 영역 경계를 제외하고 작업 공간 내에서 특이점을 갖지 않는다.

따라서 3 자유도 액추에이터는 로봇 시스템을 소형화, 경량화, 단순화 시킬 수 있어 현재 미국 및 일본 등지에서 연구가 활발히 진행되고 있다.

Laithwaite^(1,2) 등은 3 자유도 형태의 구형 모터를 설계 실험하였으며 후에 3 자유도 모터 연구가들에게 많은 영향을 미치게 되었다.

Vachtsevanos 와 Davey⁽³⁾는 이전과는 다른 개념의 로봇 구동기에 관한 연구를 하였다. 이들은 하나의 조인트에서 pitch, roll, yaw 운동이 가능한 기구에 대한 연구를 하였다. 이 때 연구된 구형 유도 모터는 회전자에 영구 자석이 부착되어 있는 형태로 고정자에는 전류를 인가시킬 수 있어서 회전을 원하는 위치로 갈 수 있도록 하였다.

Kaneko⁽⁴⁾ 등은 3 자유도를 갖는 구형 DC 서보 모터에 대한 연구를 하였다. 이 모델은 구조적으로 간단하지만 코일을 감는 방법이 복잡하고 기울기 범위와 토크 상수가 다소 제한적이다.

강규원⁽⁵⁾은 Kaneko 가 제시한 모델을 바탕으로 비선형 항들을 선형화하지 않고 비선형 제어 기법을 이용하여 실험을 수행하였다.

Lee, K-M⁽⁶⁾ 등은 로봇 손목에 쓰이는 구형 모터의 설계에 대한 연구를 하였다. 이들은 회전축의 위치를 VR(variable reluctance) 모터의 원리를 이용하여 제어하였다. 이들은 공극(airgap) 내에 축적되는 에너지를 최소화하는 방향으로 회전자가 움직이는 원리를 이용하였다.

Wang⁽⁷⁾ 등은 3 자유도의 고토코를 낼 수 있는 구형 액추에이터를 제안하였다. 구형 좌표계에서 3 차원 자기장 분포를 분석적 기법을 통해 해석하여 토크 벡터와 역기전력의 폐형태로 유도되도록 하였다.

양창일^(8,9) 등은 전자석에 인가되는 전류의 크기를 조절하여 전자석과 영구자석 간에 발생하는 힘을 제어함으로써 회전을 움직이는 새로운 개념의 3 자유도 액추에이터를 제안하고 프로토타입을 제작하여 실험을 수행함으로써 그 가능성을 확인하였다.

DC 서보 모터의 특성을 갖는 기존의 3 자유도 액추에이터는 회전이 원활하고 구조가 간단하지만 코일 감기가 복잡하고 작업 범위가 비교적 좁다. 반면 VR 모터의 특성을 갖는 액추에이터는 작업 영역이 넓고 에너지 손실이 적은 반면, 제작이 어렵고 VR 모터의 특성을 가지므로 임의의 위치로

의 이동이 어렵다.

따라서 본 연구에서는 기존의 3 자유도 액추에이터의 장점을 살리고 단점을 보완할 수 있는 새로운 3 자유도 액추에이터를 제안하여 그 타당성을 검토하고자 한다. 특히 철심 슬레노이드와 영구자석 사이의 힘을 쿨롱의 법칙과 로렌츠의 법칙을 이용하여 구하고 이 식을 이용하여 3 자유도 모터의 제어를 수행하였다.

2. 토크발생을 위한 전자석과 영구자석 간의 힘에 대한 모델링

2.1 자기에 관한 쿨롱의 법칙을 이용한 방법

두 점자극의 세기를 각각 m_1 , m_2 , 극간 거리를 r , 상호간에 작용하는 힘을 F 라 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = k \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$

이 때의 방향은 양극을 연결하는 직선 위에 있다.⁽¹⁰⁾ 이것을 자기에 관한 쿨롱의 법칙이라 한다. MKS 단위계에서는 진공 중에서 같은 세기의 두 점자극을 1 m 거리에 놓았을 때 작용하는 힘이 6.33×10^4 N 이 되는 것을 단위로 하여 1 weber 라 한다. 따라서 이 단위계에 의하면 $k = 6.33 \times 10^4$ 이 되어 위 식은 다음과 같다.

$$F = 6.33 \times 10^4 \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad [\text{N}] \quad (2)$$

여기서 m_1 , m_2 는 [Wb], r 은 [m] 단위이다. 정전계에 관한 쿨롱의 법칙과 동일한 모양으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{m_e m_p}{r^2} \mathbf{r} \quad [\text{N}] \quad (3)$$

여기서 m_e 는 전자석의 자극의 세기를, m_p 는 영구자석의 자극의 세기를 나타내고, μ_0 는 자유공간에서의 투자율($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m)을 의미한다.

식 (3)에서 두 자극의 세기는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_e &= B_e S_e \\ m_p &= B_p S_p \end{aligned} \quad (4)$$

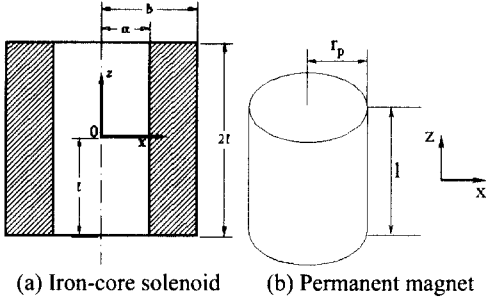


Fig. 1 Geometry of electro- and permanent magnet

여기서 B_p , B_c 는 각각 전자석과 영구자석의 표면 자속 밀도를 나타내며 S_e , S_p 는 각각 전자석과 영구자석의 면적을 나타낸다.

전자석의 경우는 등가 영구자석의 개념을 이용하여 면적을 구한다.^(11,12)

$$S_e = \pi r_{eq}^2 \tag{5}$$

$$r_{eq} = k_{eq} a \tag{6}$$

$$k_{eq} = \frac{\mu_{core} a}{\mu_{core} a + \mu_{coil} b} \tag{7}$$

여기서

- r_{eq} : 등가 반지름 (equivalent radius)
- k_{eq} : 등가비 (equivalent ratio)
- a : 철심의 반지름
- b : 솔레노이드 전체 반지름
- μ_{core} : 철심의 비투자율(relative permeability)
- μ_{coil} : 코일의 비투자율

Fig. 1 은 본 연구에서 사용된 전자석과 영구자석의 외형을 나타낸 것이다.

이 때 철심의 비투자율은 전류에 따라 변화하지만 인가전류 범위 내에서 평균값을 취하여 사용한다.

전자석의 표면자속 밀도 B_e 는 철심의 비투자율 (μ_{core})을 적용한 경우이므로 다음과 같이 쓸 수 있다.⁽¹³⁾

$$B_e = \frac{\mu_{core} \mu_0 N I}{2(b-a)} \ln \left\{ \frac{b + \sqrt{b^2 + 4l^2}}{a + \sqrt{b^2 + 4l^2}} \right\} \tag{8}$$

이때 N 은 코일을 감은 횟수를, $2l$ 은 전자석의 길이를 나타낸다.

또한 전자석의 자극의 세기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_e = \frac{\mu_{core} \mu_0 N I \pi a^2 k_{eq}^2}{2(b-a)} \ln \left\{ \frac{b + \sqrt{b^2 + 4l^2}}{a + \sqrt{b^2 + 4l^2}} \right\} \tag{9}$$

영구자석의 경우는 실제 면적을 구하고, 표면 자속 밀도는 가우스미터로 직접 측정한다.

전자석의 표면 자속 밀도가 전류에 대한 함수이므로 식 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹³⁾

$$\mathbf{F} = \frac{C}{r^2} I \mathbf{r} \tag{10}$$

여기서

$$C \triangleq \frac{1}{8} \frac{B_p \pi r_p^2 \mu_{core} N a^2 k_{eq}^2}{(b-a)} \ln \left\{ \frac{b + \sqrt{b^2 + 4l^2}}{a + \sqrt{b^2 + 4l^2}} \right\} \tag{11}$$

이 때 r_p 는 영구자석의 반지름을 나타낸다.

식 (10), (11)으로부터 영구자석과 전자석간에 작용하는 힘은 회전자의 위치가 정해졌을 경우, 즉 영구자석의 위치가 정해질 경우 전류만의 함수임을 알 수 있다.

2.2 로렌츠 법칙을 이용한 방법

일반적으로 자기장을 발생 시키는 소스(source)와 이에 영향을 받는 계(system)가 있을 때 이들 사이에서 발생하는 힘은 로렌츠 법칙에 의해 다음과 같이 정의된다.⁽¹⁴⁾

$$\mathbf{F} = \nabla(\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}_0) \tag{12}$$

여기서 \mathbf{m} 은 계를 자기 쌍극자로 모델링 하였을 때의 자기 쌍극자 모멘트이고 \mathbf{B}_0 는 소스에서 생성되어 계에 영향을 미치는 자기장이다.

식 (12)를 전자석과 영구자석 간에 작용하는 힘을 구하기 위해 적용하면, m 을 영구자석에 의한 쌍극자 모멘트로 가정하고, B_0 를 전자석에서 발생하는 자속 밀도로 가정할 수 있다.

Fig. 1 과 같은 원기둥 형태의 영구자석의 자기 쌍극자 모멘트는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹³⁾

$$m = \frac{2B_z V}{\mu_0} \left\{ \frac{z + \frac{1}{2}l}{\sqrt{a^2 + (z + \frac{1}{2}l)^2}} - \frac{z - \frac{1}{2}l}{\sqrt{a^2 + (z - \frac{1}{2}l)^2}} \right\}^{-1} \quad (13)$$

여기서 V 는 영구자석의 부피, z 는 영구자석의 원점으로부터(영구자석의 중심) 높이, l 은 영구자석의 길이를 나타낸다.

이때 B_z 는 영구자석의 표면 자속 밀도이므로 직접 측정이 가능하다.

본 연구에서 사용한 철심 솔레노이드는 관찰점과 철심 솔레노이드 사이의 직선 거리가 약 7mm 이후부터는 임의의 위치에서 z 축 방향의 자기장의 크기와 유사한 크기를 갖는다. 즉, 임의의 위치에서의 z 축 방향 성분과 x 축 방향 성분을 합한 자기장의 크기가 7mm 이후부터는 철심 솔레노이드 축 위에서의 자기장의 크기와 유사한 값을 갖는다.⁽¹²⁾

Fig. 2는 z 축을 고정 시키고 x 축 방향으로 이동하며 측정한 자속 밀도를 나타내고 있다. 이때 측정은 철심 솔레노이드의 끝단을 원점으로 하여 ($z=0$) 측정 하였다. 이 자속 밀도를 측정 점과 전자석의 직선 거리로 환산한 경우의 자속 밀도와 z 방향으로 측정했을 때의 데이터를 비교해 보면, 직선거리 7mm 이상인 경우에는 자기장의 변화가 순수 z 축 방향의 변화와 유사하게 됨을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 3 자유도 액추에이터는 영구자석과 철심 솔레노이드 간의 거리가 7mm 이상이므로 철심 솔레노이드의 임의의 방향에서의 자속 밀도를 종 방향의 자속 밀도로 나타낼 수 있다.⁽¹²⁾

철심 솔레노이드의 z 축 방향의 자속 밀도는 식

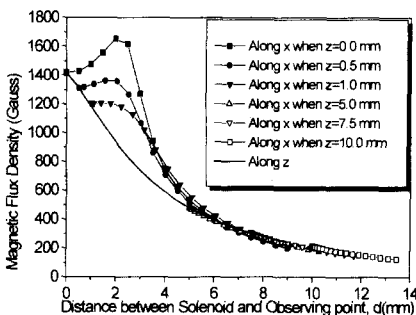


Fig. 2 The magnetic flux density with respect to distance between solenoid and observing point, distance $d=(x^2+z^2)^{1/2}$

(14)와 같다.

$$B(z) = \frac{\mu_{core} \mu_0 NI}{4l(b-a)} \left[(l+z) \ln \left\{ \frac{b + \{b^2 + (l+z)^2\}^{1/2}}{a + \{a^2 + (l+z)^2\}^{1/2}} \right\} + (l-z) \ln \left\{ \frac{b + \{b^2 + (l-z)^2\}^{1/2}}{a + \{a^2 + (l-z)^2\}^{1/2}} \right\} \right] \quad (14)$$

그러므로 식 (13)과 식 (14)를 식 (12)에 대입하여 영구자석과 전자석간에 작용하는 힘을 구할 수 있다.

식 (12)는 상호 작용 에너지(interaction energy)로부터 정의 되었고 이 상호 작용 에너지는 소스에서 관심 있는 계로 흐르는 자속으로부터 정의 되었다. 즉 계가 소스로 미치는 영향은 고려하지 않았다. 또한 소스로부터 그 계에 미치는 자기장은 그 계에 균일하게 작용을 하여 그 자기장은 소스와 그 계의 거리에만 관계가 있으며 그 계의 길이 등의 기하학적인 모양에는 독립적이라는 가정을 하였다.

이와 같은 특성과 가정은 3 자유도 모터의 제어 입력 식으로 로렌츠 법칙을 사용할 수 있게 해주며 이에 따라 전류에 대한 폐형해를 간단히 나타낼 수 있다. 즉 본 연구에서 개발한 모터를 설계할 때 이를 고려하여 영구자석과 전자석 간의 거리를 정하면 실제 제어시 계산 시간을 최소화하는 방향으로 제어 입력 식을 유도 할 수 있다.

3. 3 자유도 액추에이터의 모델링

3.1 3 자유도 액추에이터

Fig. 3은 본 연구에서 제시한 3 자유도 액추에이터의 개략도를 나타낸 것이다.

다섯 개의 전자석은 고정자, 즉 베이스(base)에 부착되어 있으며 이는 정 20 면체의 하반구의 다섯 꼭지점을 의미한다. 다섯 개 전자석의 중심선들은 회전자의 회전 중심에서 만나게 되고 중심선들은 즉 전자석은 평면에 대하여 26.5° 기울어져 있다. 회전자는 모터의 케이스(Support for rotor) 안쪽에 지지대(Guide for rotor axis)에 의해 부착되며 두 개 또는 네 개의 영구 자석을 부착시킬 수 있도록 설계하였다. 이때 전자석과 가까운 부분이 N극이 오도록 영구자석을 배치시켜 극의 대칭성을 유지시킨다. 영구자석을 부착시키는 위치, 즉 회전

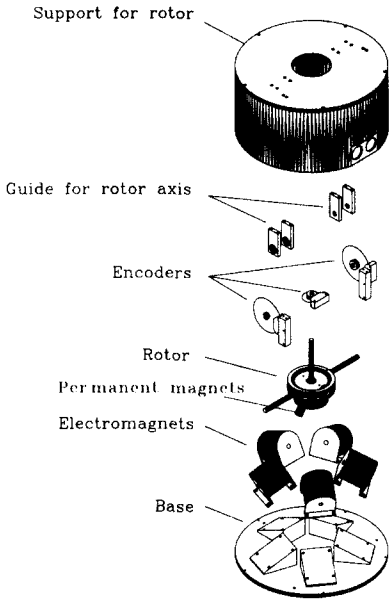


Fig. 3 Assembly view of 3 D.O.F. actuator

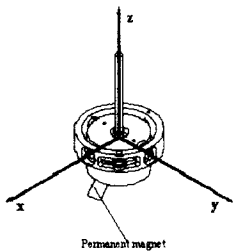


Fig. 4 Three rotations about each axis of the rotor

자의 극의 위치의 사이각은 고정자 극의 위치를 고려하여 63.5° 가 되도록 설계하였다. 이렇게 할 경우 회전자의 기울어짐이 최대 ± 31.75° 까지 가능하다. 그러나 엔코더 및 와이어의 간섭을 고려할 경우 약 ± 25° 범위를 갖는다. 즉 두 개의 극을 이용할 경우에는 두개의 N 극을, 네 개의 극을 이용할 경우에는 N 극과 S 극을 교대로 위치시켜 극의 대칭성을 유지시킨다.

본 연구에서 제시한 3 자유도 액추에이터의 기본적인 작동 원리는 전자석의 인가 전류를 조절하여 영구 자석의 위치를 결정하는 것이다. 따라서 입의 위치에 정지시키는 스톱퍼(stopper) 기능이 고속의 회전이 동시에 가능하다.

3.2 회전자의 운동방정식 및 토크 지배 방정식

3.2.1 회전자의 운동방정식

Fig. 4 는 본 연구에서 제안한 3 자유도 모터의

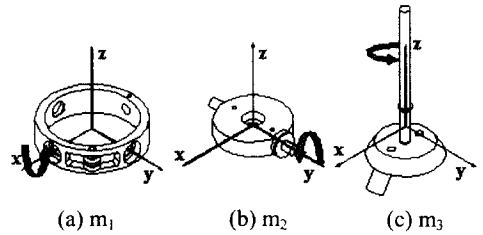


Fig. 5 Three parts of the rotor and three rotations of each part

회전자를 나타내고 있다. 회전자는 크게 세 부분으로 나눌 수 있으며 각 방향에 대한 회전량을 측정하게 되는데, m₁, m₂, m₃의 회전각을 각각 측정하게 된다.

Fig. 5 와 같이 세 부분이 조립되어 움직일 때에는 m₁의 경우는 x 축에 대해서, m₂의 경우는 x, y 축에 대해서, m₃의 경우는 x, y, z 축에 대해서 움직임이 가능하게 된다. 결과적으로 m₃의 경우 3 자유도 운동이 가능하게 된다.

이와 같은 다자유도계의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_0 = M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) \tag{15}$$

여기서, M₀는 각 회전축에 인가되는 토크 혹은 제어 입력으로 간주할 수 있고, M은 관성행렬, h는 코리올리력항, 중력항 등 각종 비선형항을 포함하는 벡터를 나타낸다. q, q̇, q̈는 각 축의 회전각, 각속도, 각각속도를 나타낸다. 이러한 식을 다음과 같이 변형시켜서 나타낼 수 있다.

$$\ddot{q} = -M^{-1}(q)h(q, \dot{q}) + M^{-1}(q)M_0 \tag{16}$$

위 식을 또한 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\ddot{q} = \hat{f} + \hat{b}u_0 \tag{17}$$

여기서

$$\hat{f} = -M^{-1}(q)h(q, \dot{q}) \tag{18}$$

$$\hat{b} = M^{-1}(q) \tag{19}$$

$$u_0 = M_0 \tag{20}$$

$$M^{-1}(q) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix}^{-1} \tag{21}$$

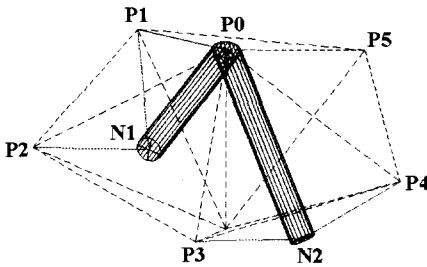


Fig. 6 Interaction between permanent magnets and electromagnets

$$h(q, \dot{q}) = \begin{Bmatrix} hl_1 + G_1 \\ hl_2 + G_2 \\ hl_3 + G_3 \end{Bmatrix} \quad (22)$$

3.2.2 토크 지배 방정식

Fig. 6 은 회전자를 구성하고 있는 두 개의 영구 자석(N1, N2)을 나타내고 있으며 P0 는 회전 중심, P1~P5 는 전자석의 위치를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 영구자석은 각 자극의 가까운 두 점으로부터 영향을 받는다. 즉, 영구자석의 N1 극은 P1, P2 의 전자석에 의해, 영구자석의 N2 극은 P3, P4 의 전자석에 의해 각각 영향을 받는다. 물론 모든 전자석이 각 극에 영향을 미치지만 극 주위의 두 점에 비해 다른 점들에서 미치는 영향은 작다고 가정한다.

Fig. 6 과 같은 경우에 전자석과 영구자석에 의해 회전 중심 P0 에서 발생하는 토크는 다음과 같다.⁽¹³⁾

$$M_0 = \sum_{i=1}^2 r_{N1} \times F_i + \sum_{i=3}^4 r_{N2} \times F_i \quad (23)$$

여기서 r_{N1} , r_{N2} 는 각각 N1, N2 극의 위치벡터를 나타내고, F_1 , F_2 는 N1 극과 P1, P2 간에 작용하는 힘을, F_3 , F_4 는 N2 극과 P3, P4 간에 작용하는 힘을 각각 나타낸다.

4. 3 자유도 액추에이터의 제작 및 실험

Fig. 7 은 본 실험을 위해 제작된 3 자유도 액추에이터의 외형을 나타내고 있으며 그 사양은 Table 1 에 나타내었다.

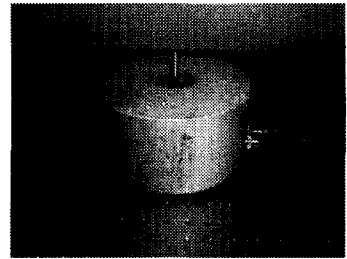


Fig. 7 Photograph of 3 D.O.F. actuator

Table 1 Specification of 3 D.O.F. actuator

	Value
Dimensions	>200□110 mm
Weight	3.57 kg
Movable range	± 25°
Radius of rotor	40 mm
Material	Duralumin

4.1 자기에 관한 쿨롱의 법칙을 이용한 제어
본 연구에서는 3 자유도 액추에이터를 제어하기 위해 PID 제어를 사용하였다. 제어 입력은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 식 (10)과 식 (23)에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹³⁾

$$M_{6 \times 1} = R_{6 \times 6} C_{6 \times 4} I_{4 \times 1} \quad (24)$$

$R_{6 \times 6} C_{6 \times 4}$ 를 $A_{6 \times 4}$ 로 대체하여 다시 쓰면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

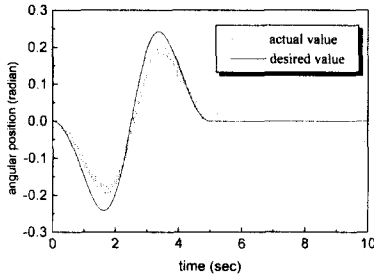
$$M_{6 \times 1} = A_{6 \times 4} I_{4 \times 1} \quad (25)$$

식 (25)에 의해 제어 입력 전류는 식 (26)과 같이 정의될 수 있다.

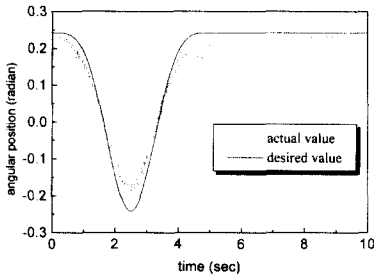
$$I = (A^T A)^{-1} A^T M \quad (26)$$

Fig. 8 은 회전자가 5 초 동안 45 바퀴의 자전 (540rpm), 즉, Fig. 5 의 m3 를 중심으로 회전하면서 x, y 평면에서 원운동을 하는 경우이다. 이때의 각 이득은 Table 2 와 같다.

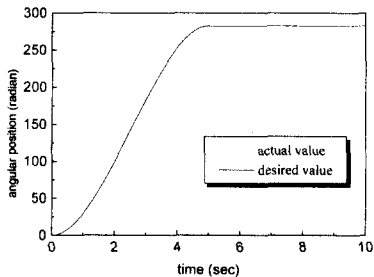
x 축과 y 축의 경우 운동의 방향이 바뀌는 구간에서의 오차가 다른 곳에 비해 더 크다. 그 이유는 이러한 구간에서 더 큰 토크를 필요로 하기 때문이다.



(a) x axis rotation



(b) y axis rotation



(c) z axis rotation

Fig. 8 Angular position of each joint with a circular motion of the endpoint of the rotor(540 RPM)

Table 2 Gain values of PID control using Coulomb's law

	x-axis	y-axis	z-axis
K_P	0.1308	0.1006	0.1449
K_I	0.0001	0.0001	0.0001
K_D	0.00255	0.00204	0.00255

Fig. 9 는 각 축에 대한 목표값과 실제값 사이의 오차를 나타내고 있다. 세 축의 오차가 비슷한 크기를 보이고 있다.

Fig. 10 은 회전자의 끝단의 궤적을 나타낸 것이다. 목표값과 차이를 나타내지만 대체적으로 원의 궤적을 그림을 알 수 있다.

이러한 차이는 영구자석과 전자석 사이의 힘에 대한 모델링이 철심에 의한 비선형성을 고려하지 않은 모델링이기 때문에 어느 정도 오차가 수반되며 이러한 오차를 보상할 정도로의 충분한 전류를

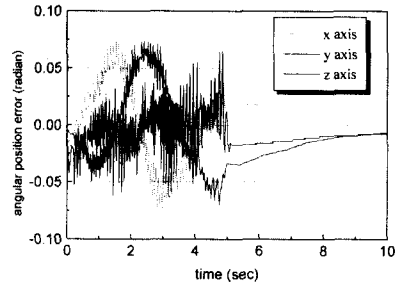


Fig. 9 Angular position errors about each axis(540 RPM)

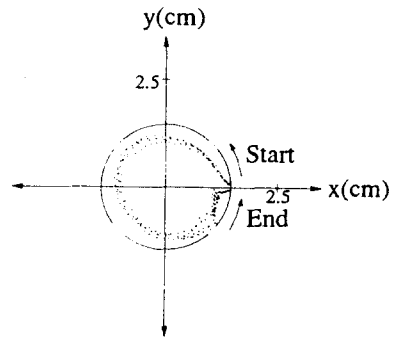


Fig. 10 Traced circular trajectory of the end point of the rotor (540 RPM)

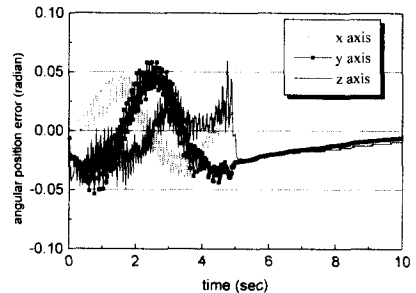


Fig. 11 Angular position errors about each axis(540 RPM)

모터에 공급하지 못하였기 때문에 생기는 현상으로 판단된다. 따라서 전류를 보다 충분히 공급할 수 있는 경우에는 이러한 오차를 충분히 줄일 수 있다고 판단된다.

Fig. 11 은 앞의 실험과 같은 조건에서 기준반경을 줄인 상태에서 실험한 결과로 이때의 오차를 나타낸다. Fig. 9 와 비교하였을 때 오차가 다소 줄어든 것을 알 수 있다. 이는 전류를 보다 충분히 공급하면 오차를 더욱 줄일 수 있다는 것을 간접적으로 나타낸다고 할 수 있다. 그러나 제어성을 보다 높일 수 있도록 계속적인 연구가 추후에 필요하다 할 수 있다.

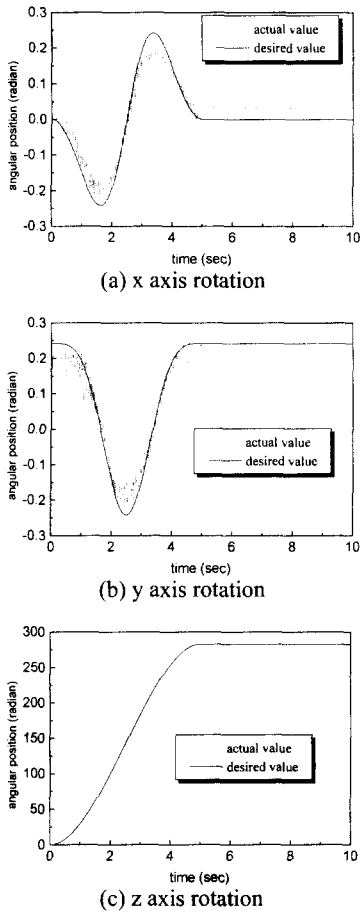


Fig. 12 Angular positions of each joint with circular motion of the endpoint of the rotor(540 RPM)

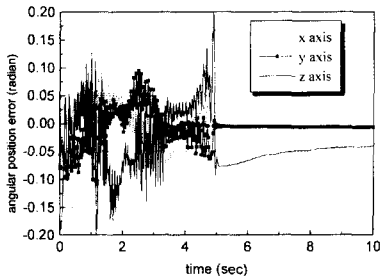


Fig. 13 Angular position errors about each axis(540 RPM)

4.2 로렌츠의 법칙을 이용한 제어

Fig. 12 는 로렌츠 법칙을 이용하여 제어한 결과이다. 4.1 절과 마찬가지로 PID 제어를 사용하였으며 또한 5 초 동안 45 바퀴의 자전(540rpm)과 x, y 평면에서 한번의 원운동을 수행하도록 하였다. 이때의 각 이득은 Table 3 과 같다.

Table 3 Gain values of PID control using Lorentz force

	x-axis	y-axis	z-axis
K_P	12.99	5.14	11.35
K_I	0.005	0.005	0.005
K_D	0.232	0.085	0.337

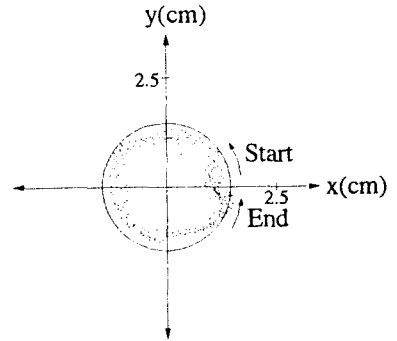


Fig. 14 Traced circular trajectory of the end point of the rotor(Lorentz, 540 RPM)

4.1 절의 쿨롱의 법칙을 적용한 경우와 비슷한 정도의 제어 결과를 보이지만, 전반적으로 채터링(chattering) 현상이 증가함을 알 수 있다. 또한 4.1 절의 실험 결과와 비교하여 보면 z 축에 대한 오차가 다른 축에 비해 상대적으로 더 증가한 것을 알 수 있다

이러한 현상은 로렌츠 법칙을 이용한 제어력이 쿨롱의 법칙을 이용한 제어력 보다 다소 떨어지기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 즉, 쿨롱의 법칙을 적용한 경우나 로렌츠의 힘을 적용한 경우나 철심에 의해 나타나는 비선형성을 고려하지 않은 모델링이기 때문에 실제 제어력과의 오차가 존재한다. 그런데 로렌츠의 힘을 적용한 경우가 실제 힘과의 오차가 상대적으로 더 크기 때문에 이로 인해 채터링 현상이 증가하였다고 판단할 수 있다.

그렇지만 z 축의 회전이 약 280 radian 이고 최대 오차가 0.2 radian 임을 감안하면 허용 한도에 들어 있는 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 13 은 각 축에 대한 목표값과 실제값 사이의 오차를 나타내고 있고 Fig. 14 는 회전자의 끝단의 궤적을 나타낸 것이다. 목표값과 차이는 있지만 대체적으로 원의 궤적을 그림을 알 수 있다. 이 결과 역시 앞의 결과에 비해 채터링 증가 현상을 보이고 있다.

본 절의 실험 결과를 4.1 절의 결과와 비교해볼 때 비슷한 정도의 제어 결과를 나타내지만, 전반적으로 채터링 현상이 증가하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 3 자유도를 얻을 수 있는 액추에이터를 제안 및 설계, 제작하였다. 또한 제안한 3 자유도 액추에이터의 타당성 및 성능을 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 이러한 다양한 실험을 통하여 얻은 결론을 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 전자석과 영구자석 간의 힘을 해석하기 위해 자기에 관한 쿨롱의 법칙, 로렌츠의 법칙 등을 적용하여 관계식을 유도하였고 영구자석과 전자석 간의 힘이 거리가 어느 정도 이상일 경우 방향에 관계없이 거리에 관련된 함수로 가정할 수 있음을 실험을 통하여 증명하였다. 따라서 이러한 가정으로부터 식을 좀더 간략하게 할 수 있었고 실시간에 적용하여 제어가 가능하다.

(2) 앞서 구한 전자석과 영구자석 간의 힘에 관한 관계식을 이용하여 회전자의 토크발생에 관한 지배 방정식을 유도하였고 회전자를 제어하기 위한 제어법칙을 PID 제어를 이용하여 설정하였다. 또한 제어 입력식이 주어졌을 때 각 전자석의 입력을 결정하기 위한 관계식을 유도하였다.

(3) 본 연구에서 제안한 3 자유도 액추에이터를 이용하여 회전자의 3 자유도 운동을 구현할 수 있었다.

PID 제어만으로도 제어 이득값을 늘리면 그 오차를 줄일 수 있지만, 제어 입력의 포화 현상으로 인해 그 한계에 도달하게 된다. 따라서 전자석과 영구자석간의 힘을 증가시킴에 따라 더욱 정밀한 고속 운동이 가능하다는 것을 예측할 수 있다.

이와 같이 3 자유도 모터의 성능을 향상 시키기 위해 여러 부분에 대하여 보다 많은 연구가 필요하지만 본 연구에서는 3 자유도 운동을 한 축에 대하여 구현할 수 있는 메커니즘을 제안하고 실험을 통하여 검증하였다.

따라서 앞으로 영구자석과 전자석과의 힘을 증가 시키고 보다 콤팩트(compact)하게 제작하면 CCD 카메라용 모터나, 레이저(laser)를 이용한 거리 측정용 모터 등 고폭크 보다는 고속, 고정밀을 요하는 다자유도 모터에 적용할 수 있을 것이라고 판단된다. 또한 위치 추종 제어의 성능을 높이기 위해서는 모델링의 정확성을 증가 시키기 위한 연구가 계속적으로 필요하다.

참고문헌

- (1) Williams, F., Laithwaite, E., and Eastham, G.F., Dec. 1959, "Development and Design of Spherical Induction Motors," *Proc. IEEE*, Vol. 106A, pp. 471~484.
- (2) Laithwaite, E., Jun. 1960, "Design of Spherical Motors," *Electrical Times*, Vol. 9, pp. 921~925.
- (3) Vachtsevanos, G., Davey, K., and Powers, R., Jan. 1987, "The Analysis of Fields and Torques in Spherical Induction Motors," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. MAG-23, No. 1, pp. 273~282.
- (4) Kaneko, K., Yamada, I., and Ita, K., sep. 1989, "Spherical DC servo Motor with Three Degrees of Freedom," *ASME Trans. Journal of dynamic systems, measurement and Control*, Vol. 111, Number 3, pp. 398~402.
- (5) 강규원, 1996, "3 자유도 모터의 동역학적 해석 및 제어에 관한 연구," 석사학위 논문, 기계공학과, 연세대학교.
- (6) Lee, K.M., Vachtsevanos, G. and Kwan, C.K., 1988, "Development of a spherical Stepper Wrist Motor," *Proc. of the IEEE 1988 International conference of Robotics and automation*, Philadelphia, PA. Also in *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 1(1988), pp. 225~142.
- (7) Wang, J., Wang, W., Jewell, G.W., Howe, D., 1998, "A Novel Spherical Permanent Magnet Actuator with Three Degrees-of-freedom," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 34, No. 4, pp. 8/1~8/6.
- (8) 양창일, 백운수, 1999, "자기력 제어를 이용한 3 자유도 액추에이터의 메커니즘 및 제어기 설계," 대한 기계학회 논문집 A 권 제 23 권 제 9 호, pp. 1476~1483.
- (9) Yang, C.I., Baek, Y.S., 1999, "Design and Control of the 3 D.O.F. Actuator by Controlling the Electromagnetic Force," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, No. 5, pp. 3607-3609
- (10) Lee, H.P., 1990, 최신 전자기학, 문운당.
- (11) Craik, D., 1995, *Magnetism*, John Wiley & Sons.
- (12) 박준혁, 1999, "3 자유도 모터 제어를 위한 영구자석과 철심 솔레노이드간의 힘 특성에 관한 연구," 석사학위 논문, 기계공학과, 연세대학교.
- (13) Yang, C.I., 1999, *Design and Control of 3 D.O.F. Actuator using the Magnetic Force of the Electromagnet*, Ph.D. dissertation, Dep. Mech. Eng., Yonsei University.
- (14) Yangness, R.K., 1997, *Electromagnetic fields*, John Wiley & Sons, 2nd edition.