

로봇 안구 구동용 구형 전자석 액추에이터 설계

Design of A Spherical Electromagnetic Actuator for Robot's Eyeball

백두진* · 곽호성* · 김하용** · 김승종*

Du-Jin Bach, Ho-Seong Kwak, Ha-Yong Kim and Seung-Jong Kim

Key Words : Spherical Actuator(구형 액추에이터), Multi-DOF Actuator(다자유도 액추에이터), Lorentz Force(로렌츠 힘) Reluctance Force(자기저항력)

ABSTRACT

This paper proposes a simple actuator with a spherical rotor for robot's eyeball, which has two degrees of freedom. It features that both permanent magnets and coils are equipped in a stator and the spherical rotor with steps on its surface is driven by reaction of Lorentz force acting on the fixed coils. Such a structure is helpful to design a simple actuator and particularly suitable for a spherical actuator. Based on the FEM analysis, design parameters such as the sizes of core and permanent magnet, the width of step, coil turns and maximum current, are determined so as to maximize the torque and rotating angle. For the experimental verification of the feasibility, a prototype is manufactured and its operating characteristics are investigated.

1. 서 론

로봇 매니플레이터나 관절, 안구 등에 사용되는 다자유도 액추에이터는 고정밀도, 간단한 제어, 소형화 등의 성능이 요구되고 있다. 그러나 일반적으로 다자유도 구동은 자유도 수만큼의 구동 모터를 사용하여 독립적으로 구현된다. 또한 소형, 경량화가 요구되는 경우에는 고가의 고속 소형 DC 모터와 감속기를 함께 이용하는 것이 보통이다.

다자유도 액추에이터는 수십 년 동안 연구의 주제가 되어 왔으며, 다양한 종류와 형태로 발전해 왔다. 특히, 지금까지 로봇 안구 구동을 위한 다자유도 액추에이터에 관한 몇몇 연구들이 있었다. Wallace⁽¹⁾가 제안한 3축 짐벌 시스템 구조의 직접 구동 로터리 액추에이터는 복잡한 3축 시스템에 사용되지만, 짐벌 시스템을 구동하는데 필요한 공극이 상대적으로 크기 때문에, 낮은 출력 토크를 가지며, 기계적으로 튼튼하지 못하다. Laschi⁽²⁾에 의해 개발된 로봇 안구는 2자유도의 yaw축과 1자유도의 pitch축으로 이루어진다. pitch축은 DC 모터와 조화 구동 시스템에 의한 벨트

구동 메커니즘에 의해 구동되며, yaw축은 DC 모터와 토션 스프링에 의해 구동된다. 그리고, Kobayashi^(3,4)에 의해 개발된 로봇 안구는 안구 마운팅용 구형 베어링이 장착되어 있으며, DC 모터를 사용하여 2자유도 회전운동을 한다. 그러나 이러한 시스템들 역시 각각의 자유도들 간에 연성된 복잡한 제어와, 여러 개의 모터와 감속기를 작은 공간 내에 장착해야 하는 어려움이 따르기 때문에 크기가 커지며 복잡한 구조를 가지게 된다.

이에, 본 논문에서는 로봇 안구 구동을 위한 단순한 구조의 2자유도 구형 전자석 액추에이터를 제안하였다. 기본 개념은 영구자석에 의해 생성된 자기장 내에 고정된 코일에 작용하는 로렌츠 힘의 반작용으로써 로터를 구동하는 원리이다. 특히, 영구자석과 전자석이 모두 고정자에 장착되므로, 구형 로터의 형상 설계에 큰 장점을 갖는다.

구동력, 구동 범위 및 선형성의 상관관계에 대한 FEM 해석을 수행하여, 코어의 길이, 폭 및 간격, 그리고 이동자단의 길이, 공극 자속밀도, 각 코어의 권선수 등의 최적 설계 변수를 도출하였다. 또한, FEM을 통해, 전류와 위치에 따른 구동 토크를 해석하여, 제안된 원리 및 설계 기법에 대한 타당성을 검증하였다. 선정된 설계 변수들을 이용하여, 제안된 액추에이터의 시제품을 제작하였으며, 실험을 통해 구동 특성을 확인하였다.

* 책임저자, 정회원, 한국과학기술연구원 트라이블로지연구센터
E-mail : sjongkim@kist.re.kr

Tel : (02)938-5610, Fax : (02)938-5659

* 한국과학기술연구원 트라이블로지연구센터

** 삼성종합기술원 HDD program팀

2. 구조 및 구동 원리

Fig. 1은 DC 구동 액추에이터의 기본 구조로서, 고정자의 요크(yoke)와 4개의 전자석으로 구성된 코어의 배면 사이에 영구자석이 장착되어 편향 자속(bias flux)을 제공하며, 제어 자속을 만드는 코어에 감겨 있는 코일, 그리고 이동자로 구성되어 있다. 특히 이동자는 이론적으로 단순한 평면도 가능하지만, 구동력을 증가시키기 위해 단이 형성되어 있는 구조를 사용한다. 이 때, 단의 위치에 따라, 코어와 이동자의 단을 통한 전자석 자속이 형성되는 경우는 Fig. 1과 같이 3가지이며, 4개의 전자석 중, 왼쪽의 2개와 오른쪽의 2개의 자속 방향을 반대가 되도록 하고, 양 바깥쪽의 전자석에는 안쪽 전자석의 3배의 코일 권선수를 갖도록 하여 3가지에 대한 모든 경우에 같은 원리로 동작화 할 수 있다.

기본적인 구동 원리로, 이동자의 위치에 따라 서로 근접한 2개의 전자석과 이동자의 단으로 이루어진 자속 경로를 형성한다. 영구자석에 의한 자속은 코어와 단 사이의 두 공극에서 같은 방향으로 흐르고, 코일에 의해 생성되는 자속은 2개의 전자석과 공극, 이동자의 단이 이루는 자속경로(Fig. 1의 점선)를 따라 흐르도록 함으로써 자기장이 걸린 코어의 중앙부에 가상의 등가 코일이 존재하는 효과를 낸다. 즉, 영구자석이 제공하는 자기장 내에 등가 코일이 존재하는 경우이므로 로렌츠 힘이 발생하는데, 코일이 고정자에 장착되어 있으므로 그 반작용으로 이동자에 반작용 힘이 작용한다.⁽⁵⁾ 한편, 영구자석에 의한 자속경로 역시 폐회

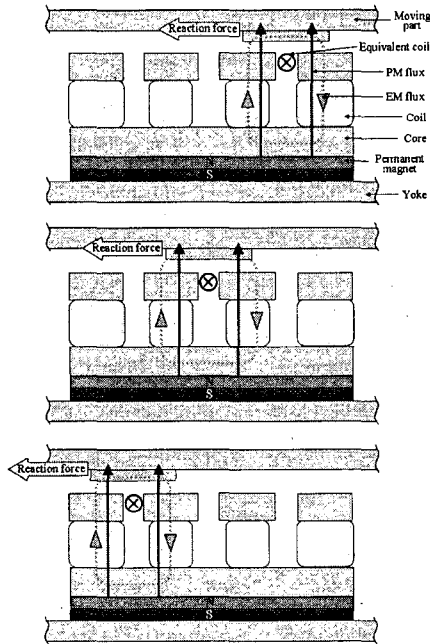


Fig. 1 Basic principle and structure

로를 이룰 수 있도록 Fig. 1의 기본구조 2개를 1쌍으로 이용하고 그들의 영구자석 극성을 반대로 배치하면 편향 자속경로는 이동자와 요크에 의해 폐회로를 형성한다. Fig. 1의 기본구조 2개가 1쌍으로 작용하여, 1자유도의 회전 운동이 구현되며, Fig.2와 같이, 각 2쌍의 기본 구조를 사용하면 2자유도 회전 운동이 가능하다.

3. 설계 변수 해석

3.1 코어, 로터(이동자)

Fig. 1의 각 3가지의 경우는 동작화 되어 모두 같은 경우이므로, 최적의 설계 변수 도출을 위한 FEM 해석은 단이 포함된 이동자와 2개의 전자석으로 구성된 형상에 대해 이루어 졌다.

코어 사이의 간격을 공극보다 작게 설계할 경우, 전자석에 의한 자속이 이동자를 통과하지 않고 코어 사이를 통해 직접 통과한다. 그리고 코어의 위치에 따른 구동력의 선형성이 가장 좋을 때의 코어의 길이는 코어 사이의 간격의 2~2.5배에서 최적임을 Fig. 3의 FEM 해석을 통해 선정하였다. 코어 사이의 길이가 길어질수록 이동자의 단이 코어의 중심에 위치했을 때의 구동력이 상대적으로 감소하여 제어

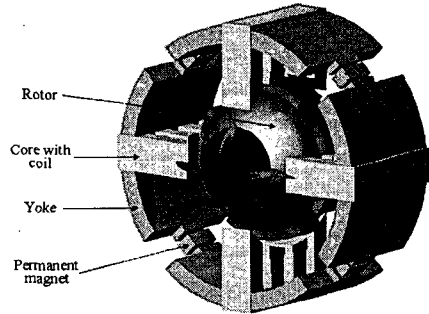


Fig. 2 Schematic view of the 2-DOF rotating motion

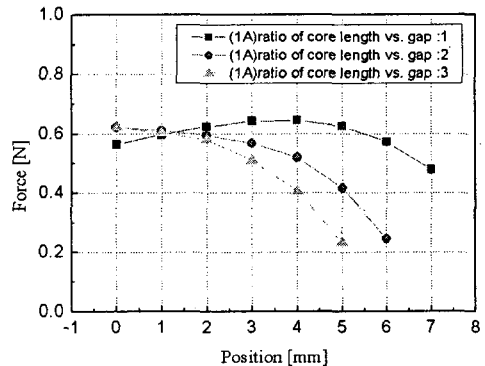


Fig. 3 Force vs. step position for various gaps between cores

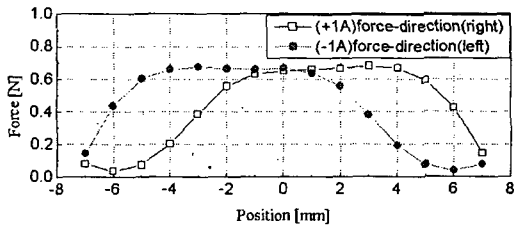
전류 인가의 문제가 발생하며, 코어 사이의 길이가 줄어들수록 구동력이 감소하는 현상을 확인할 수 있다. 그러므로 이 경우 Fig. 1과 같이, 2개의 코어와 이동자의 단으로 형성되는 전자석의 자속 경로상의 제어 자속밀도가 일정하게 유지되기 위한 설계 조건을 만족해야 한다. 특히 이 경우에 대해, 구동 범위를 확대하기 위해 코어의 길이를 길게 설계하면 상대적으로 이동자의 단 또한 길게 설계되어 구동 범위 확대의 큰 효과를 볼 수 없으며, 또한 이동자 전체에 단이 차지하는 크기의 비율이 커지므로, 이동자에 단을 형성하여 구동력을 확대하는 장점도 줄어든다.

또한 FEM 해석을 통해, 10mm 폭의 코어와 코어사이의 간격이 5mm인 경우에 대해, 단의 길이에 따른 구동력을 해석하였으며, Fig. 4에 그 결과를 나타내었다. 최대 구동력

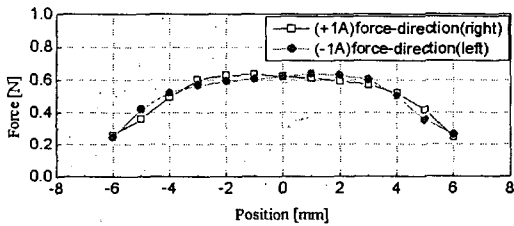
이 발생하는 이동자의 길이는 Fig. 4(a)와 같이, 코어의 길이와 비슷한 경우이지만, 이 경우 이동자의 끝단이 코어 사이에 위치하는 영역이 발생하여 자기저항이 급격히 증가하는 단점이 발생한다. 이러한 현상은 편향 자속을 형성하는 부분에 이동자의 단이 포함되어 있는 구조이기 때문이며, 단의 위치에 따라 영구자석에 의한 자속밀도가 변하기 때문이다. 즉, 이는 기존의 영구자석 모터와 같이, 회전자의 영구자석과 고정자의 슬롯(slot)의 상호작용에 의해 발생하는 코깅(cogging)과 같은 현상으로, Fig. 5와 같이 제어 전류가 인가되지 않은 상태에서도 영구자석에 의한 영향이 있는 것을 알 수 있다. 이러한 영향으로 결국, Fig. 4(a), (c)와 같이, 코어의 중심을 대칭으로 구동 방향에 따른 구동력의 히스테리시스 현상이 발생하게 되며, 이는 정밀 제어 측면에서 어려움의 주원인이 된다. 따라서 단의 길이는 Fig. 4(b)와 같이 코어의 길이와 코어 사이의 간격을 합한 길이의 0.85~0.9배가 최적임을 알 수 있다.

이와 같이, 구동력과 구동범위, 그리고 이에 따른 선형성에 대한 최적의 코어 및 로터 설계 방법을 요약하면 다음과 같다.

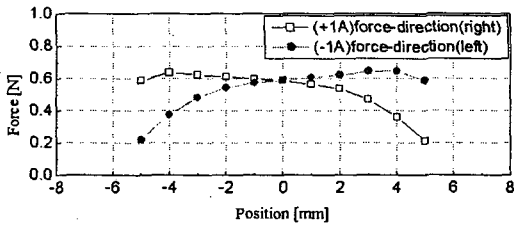
- 각 코어 사이의 간격은 공극보다 크게 설계한다.
- 코어의 길이는 코어 사이의 간격보다 2~2.5배 크게 설계한다.
- 이동자에 형성된 단의 길이는 코어 하나의 길이와 코어 사이의 간격을 합한 길이의 0.85~0.9배로 설계한다.



(b) step width = 10mm



(b) step width = 13mm



(c) step width = 15mm

Fig. 4 Force vs. step position for three step widths

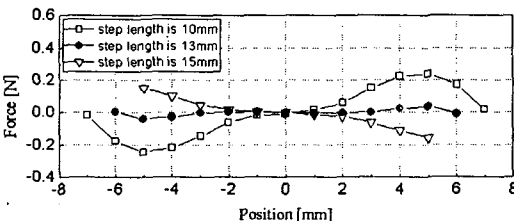


Fig. 5 Force vs. step position in the case of no current

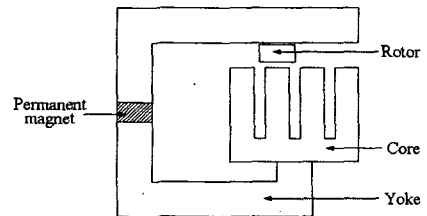


Fig. 6 A simplified model for flux analysis

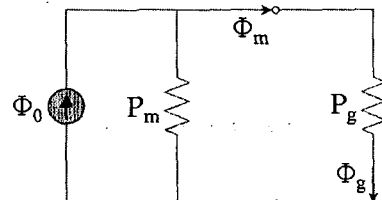


Fig. 7 Magnetic circuit with a permanent magnet

회로에서 $\Phi_0 = B_r \times A_m$ 이고, 영구자석 내부와 공극에서의 투자도(permeance)는 각각 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다. 여기서 자성체 코어에서의 자기 저항(reluctance)은 일반적으로 무시한다.

$$P_m = \frac{\mu_m A_m}{l_m} \quad (1)$$

$$P_g = \frac{\mu_0 A_g}{l_g} \quad (2)$$

그리고, 병렬로 연결된 자속은 단순히 더해진 값으로서 식 (3)과 같이 얻어진다.

$$\Phi_g = \Phi_0 \left(\frac{P_g}{P_g + P_m} \right) \quad (3)$$

이 때, B_g 는 Φ_g/A_g 이며, 자속 손실 계수 α 가 고려된 공극에서의 자속밀도 B_g 는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$B_g = \frac{\Phi_g}{\alpha A_g} \quad (4)$$

자속 손실 계수 $\alpha=3.5$ 를 적용하고^(6,7), 공극에서의 자속밀도 B_g 를 0.20~0.25T의 값을 갖기 위한 영구자석의 단면적과 길이를 선정하였으며, 선정된 영구자석의 크기와 이때 사용된 잔류 자속밀도 B_r 및 자속이 흐르는 곳의 단면적 및 길이를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material properties of PM and design parameters

| Parameter | Value |
|-----------|---------------------------------------|
| B_r | 1.2 Tesla |
| μ_0 | $4\pi \times 10^{-7}$ H/m |
| μ_m | $1.05 \times \mu_0$ |
| l_g | 2×10^{-3} m |
| A_g | 54.54×10^{-6} m ² |
| l_m | 6×10^{-3} m |
| A_m | 50×10^{-6} m ² |

Table 2 Calculated values of the flux and permeance

| Parameter | Value |
|-----------|---------------------------------------|
| B_r | 1.2 Tesla |
| μ_0 | $4\pi \times 10^{-7}$ H/m |
| μ_m | $1.05 \times \mu_0$ |
| l_g | 2×10^{-3} m |
| A_g | 54.54×10^{-6} m ² |
| l_m | 6×10^{-3} m |
| A_m | 50×10^{-6} m ² |

선정된 영구자석의 치수에 맞추어, 식 (1)~(3)과 Table 1을 이용하여 자속과 투자도를 구하였으며, 이것을 Table 2에 나타내었다. 공극에서의 자속밀도는, Table 2와 식 (4)로부터 $B_g = 0.24$ T로 구해진다.

3.3 전자석의 기자력(magneto-motive force)

1개의 코어를 구성하는 4개의 전자석은 Fig. 1과 같이, 로터에 형성된 단의 위치에 따라 서로 인접한 2개의 전자석과 로터로 이루어진 자속 경로를 형성한다. 이때의 전자석 자기 회로를 Fig. 8에 나타내었다. 이 경우, 4개의 전자석 중, 왼쪽의 2개와 오른쪽의 2개의 자속 방향이 반대라 되도록 한다.

Fig. 8에서 똑같은 크기의 자속이 로터로 흐르게 하기 위해서는, 4개의 전자석에 감기는 코일의 권선수 비가 3:1:1:3이 되어야 하며, 왼쪽 2개와 오른쪽 2개의 자속이 반대이므로, 결국 서로 인접한 2개의 전자석과 단으로 형성되는 모든 경우에 2N(N:권선수)으로 등가화 되어 계산될 수 있다. 또한, 영구자석에 의한 공극 자속밀도를 0.24 T로 선정했기 때문에, 전자석에 의한 공극에서의 자속밀도를 최대 0.2 T가 되도록 하여, 이에 적합한 코일의 권선수를 선정한다. 이때 코일에 인가하는 최대 전류는 코일의 굵기(직경 0.25mm)와 발열 특성을 고려하여 1.5 A로 선정하였다.

Fig. 8의 회로를 사용하면, 식 (5), (6), (7)이 구해진다.

$$3NI = \frac{\Phi_{g1}}{P_g} \quad (5)$$

$$\Phi_{g1} = B_{g1} A_g \quad (6)$$

$$NI = \frac{B_{g1} l_g}{3\mu_0} \quad (7)$$

$l_g = 2$ mm의 공극과 자유 공간에서의 투자율 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m의 값이 정해지고 최대 전류와 전자석에 의한 공극에서의 자속밀도를 각각 $I = 1.5$ A, $B_{g1} = 0.2$ T로 선정하면 코일의 권선수는 $N \approx 70$ 으로 구해진다. 그러나, 코일을 많이 감으면, 코어의 길이나 폭이 길어지게 되어 전체적인 액추에이터의 크기가 커지게 되므로, 본 논문에서 제안하는 시작품에서는 180, 60, 60, 180 turn으로 권선수를 결정하였다.

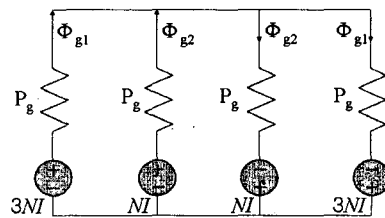


Fig. 8 EM flux source circuit

4. 해석 및 실험 결과

4.1 시제품 제작

Fig. 9는 시제작된 구형 2자유도 액추에이터이다. 코어를 포함한 고정자의 구조는 Fig. 2와 동일하지만, 단이 형성된 구형 로터는 케이스 제작이 까다로워서 Fig. 10(b)와 같이 단의 길이만큼의 두께를 갖는 디스크 형태로 제작하였다. 이 자성체 재질의 디스크는 비자성체 재질의 구형 내부에 결합된다. 이 경우, 디스크 두께는 코어의 형상에 의해 정해지며, 앞 절에서 설명한 설계법에 따라 8mm로 제작하였다. 중심에는 구멍을 만들어 내부에 CCD 카메라 및 센서 등이 장착될 수 있도록 하였다. 그리고, 구형 로터는 테프론으로 제작하여, 로터 외부 표면과 4개의 코어면 사이에서

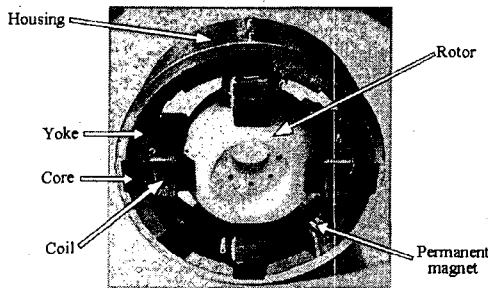


Fig. 9 Photo of the prototype

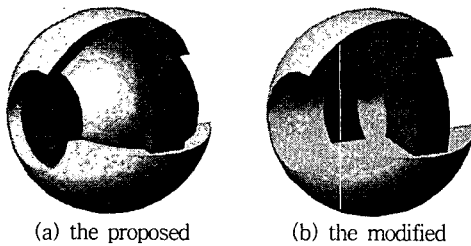


Fig. 10 Structure of the rotor

Table 3 Design parameters of the prototype

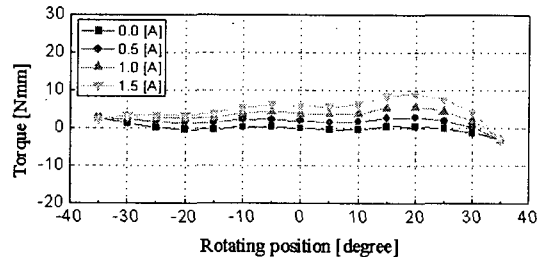
| Parameter | Value |
|--------------------------------------|------------------------|
| Outer diameter of disk | 37 mm |
| Outer diameter of spherical exterior | 40 mm |
| Mass of the rotor | 75.5 g |
| Thickness of PM | 6 mm |
| Area of PM | 5×10 mm ² |
| No. of coil turns | 180 and 60 |
| Coil diameter | 0.25 mm |
| Air gap between stator and rotor | 2 mm |
| Current | -1.5~1.5 A |
| Area of core | 6.09×9 mm ² |
| Gap between cores | 2.86 mm |

고체 윤활이 되도록 하였다. 코어, 요크 및 영구자석을 고정시키기 위해, 비자성체 재질의 하우징(housing)을 외부에 장착하였으며, Table 3에 시제품의 주요 설계 변수들을 정리하였다.

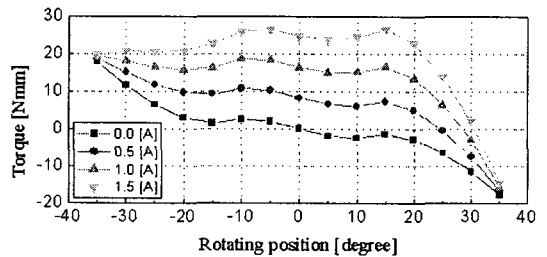
4.2 구동 토크 해석 및 실험

5° 간격으로 로터의 위치에 따른 구동 토크를 해석하였으며, 단이 형성되어 있는 구형 로터와 디스크 형태의 로터에 대한 결과를 각각 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11 (a)와 같이, 단이 형성되어 있는 구형 로터가 사용되면 액추에이터가 구동되는 전 범위에서 어느 정도 일정한 토크가 유지되는 것을 알 수 있다. 따라서, 이 경우 액추에이터는 ±30°의 회전 구동 범위 내에서 출력 토크를 선형 근사화할 수 있으며, 인가 전류에 따라 제어될 수 있음을 알 수 있다.

단이 형성되어 있는 구형 로터를 사용하지 않고, Fig. 11 (b)와 같이, 단 길이만큼의 두께를 갖는 디스크 형태의 로터를 사용하는 경우, 영구자석 자속이 로터로 통하는 면적이 좁아지므로 자속밀도가 증가하여 토크가 증가하지만, 이 경우, 로터의 위치에 따른 코깅 현상이 가중된다. 또한 단의 길이를 코어 하나의 길이보다 크게 설계한 구조적인 이유로, 단이 고정자의 양 끝단 근처에 위치하는 경우 프링징(fringing) 효과의 균형이 깨져서 반대 방향의 토크가 크게 발생하게 된다. 따라서, 이러한 현상을 고려하면, 시제작된 액추에이터는 실제로 적용될 수 있는 회전 구동 범위가 ±20° 정도로 제한되어야 함을 알 수 있으며, 이 범위에서는 이동자의 위치에 따른 토크가 어느 정도 일정한 값을 갖는 것을 알 수 있다.



(a) case of the spherical-type rotor with steps



(b) case of the disk-type rotor

Fig. 11 Torque vs. angular position for various current

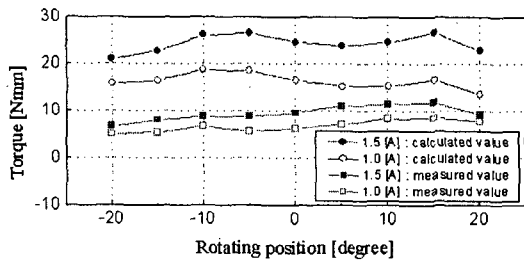


Fig. 12 Calculated and measured torques in a permissible range(± 20 degree)

그리고, 1.0A와 1.5A를 인가하여 위치에 따른 토크를 측정하였다. 분해능 0.1N의 힘 측정기(AIKOH Co.)를 사용하여, 전류 인가 시 로터가 중앙 위치에서 움직이는 순간의 힘을 측정하였으며, 이 때 측정된 힘을 토크로 환산하였다. Fig. 12는 Fig. 11(b)의 FEM 해석 결과를 토대로 시작품의 허용 구동 범위인 $\pm 20^\circ$ 범위에서 인가 전류에 따른 토크의 측정 결과와 해석 결과를 나타낸 것이다.

실험 결과는 시제작된 액추에이터의 허용 구동 범위 내에서 일정한 값을 유지하는 경향을 보인다. 또한 실험 결과는 해석 결과에 비해 토크가 작게 측정되었다. 이는 실제 실험 시 힘 측정기의 분해능이 0.1N인 이유로, 작은 크기의 힘에 대한 정밀한 측정의 어려움과, 힘을 측정하여 토크로 환산하는 과정에서, 측정 위치의 오차 및 로터와 지지부 사이의 유격으로 인한 오차들이 누적되는 측정 오차에 의한 것으로 판단된다. 아울러, 실제 로터 외부 표면과 코어면 사이에서 발생하는 마찰 영향도 토크 감소의 한 원인이라 사료된다.

5. 결론

본 논문에서는 영구자석과 전자석이 모두 고정자에 장착되어 있는 구조의 2자유도 구형 액추에이터를 설계하였다. 이러한 구조는 이동자 형상의 소형화, 단순화를 가능하게 할 수 있기에, 구형 로터의 형상 설계에 장점을 갖는다. 따라서, 제안된 구조는 기존의 다자유도 액추에이터의 구조적 단점을 개선할 수 있으므로 로봇의 안구 구동용으로 적합하다.

FEM 해석과 전자기 회로 해석을 수행하여, 코어의 길이, 폭 및 간격, 그리고 이동자 단의 길이, 공극 자속밀도, 각 전자석의 권선수 등의 최적 설계 변수를 도출하여, 제안된 구조의 액추에이터에 대한 설계 기법을 정립하였다.

선정된 설계 변수를 사용하여, 구형 액추에이터를 설계,

제작하였다. FEM 해석을 통해 토크 특성을 해석하였으며, 실험 결과와 비교 분석을 하였다. 구형 구조의 제작상의 어려움으로 인해, 로터의 구조를 디스크 형태로 변경함으로써, 실험 결과는 해석을 통해 예측된 결과와 차이를 보인다. 그리고, 고정자 양 끝단 부근에서 작용하는 역토크가 구조적인 단점으로 작용하는 것을 알 수 있었으며, FEM 해석에는 적용되지 않았지만, 실제로 로터 외부 표면과 코어면 사이의 마찰 영향도 작용하므로, 설계 시 고려해야 할 설계 변수임을 알 수 있었다. 현재, 제어기 설계를 통하여 동특성 및 제어 성능 실험이 수행되고 있으며, 향후 성능 향상을 위해, 마찰 영향의 최소화 및 구동 범위 확대, 구동 토크 증가 등 구조 설계에 관한 연구가 계속될 것이다.

후기

이 논문은 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구개발사업(인간기능 생활지원 지능로봇 기술개발사업)의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) Richard S. Wallace, 1994, "Miniature Direct Drive Rotary Actuators II: Eye, Finger and Leg," Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.2, pp.1496-1501,
- (2) Cecilia Laschi et al., 2003, "Visuo-Motor Coordination of a Humanoid Robot Head with Human-like Vision in Face Tracking," Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.1, pp.232-237,
- (3) H. Kobayashi et al., 2000, "Study on Face Robot Platform as a KANSEI Medium," Industrial Electronics Society, IECON 2000, 26th Annual Conference of the IEEE, vol.1, pp.481-486,
- (4) H. Kobayashi et al., 2001, "Development on Face Robot for Real Facial Expressions," Proc. of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems, vol.4, pp.2215-2220,
- (5) 백두진, 김하용, 김승중, 2005, "단순 원판형 평면 3자유도 액추에이터 설계," 한국소음진동공학학회논문집, 제 15권 제 3호, pp.334~340.
- (6) Hanselman, 1994, D.C., Brushless Permanent-Magnet Motor Design, McGraw-Hill,
- (7) Rotors, H. C., 1941, Electromagnetic Devices, John Wiley & Sons Inc,