

평면 다자유도 액추에이터 설계 Design of A Plane Multi-DOF Actuator

백두진* · 김하용* · 김승중†

Du-Jin Bach, Ha-Yong Kim and Seung-Jong Kim

Key Words : Multi-DOF Actuator(다자유도 액추에이터), Bias Flux(바이어스 자속), Current Stiffness(전류 강성계수)

ABSTRACT

A 3-DOF actuator which has new principle and very simple structure is proposed. Its principle seems to be similar to conventional electromagnetic actuators, that is, to utilize the relation of control and bias fluxes produced by coils and permanent magnets, respectively, but the coils and permanent magnets of the proposed actuator are fixed in the stator. Such a structure helps to optimally design the actuator for its use. Some experimental and FEM analysis results show the feasibility of the proposed actuator and some characteristics of system that are useful for structure design and control.

1. 서 론

모터를 이용하여 다자유도 구동을 위해서는 일반적으로 자유도 수만큼의 구동 모터가 필요하고, 모터는 대부분 범용 기성 제품을 이용하여 독립적으로 구현되어 왔는데, 소형, 경량화가 요구되는 경우 고속 소형 DC 모터와 감속기를 함께 이용하는 것이 보통이다. 이 경우, 여러 개의 모터와 감속기를 작은 공간 내에 장착해야 하는 어려움이 따르고, 많은 전선수와 복잡한 제어 구조로 고장 가능성이 증가하고 제작비도 높으며 고속 회전으로 인한 모터 소음이 문제가 되기도 한다.

이에 본 논문에서는 단순한 구조를 갖는 평판형 다자유도 액추에이터를 제안한다. 제안된 액추에이터는 영구자석과 전자석이 모두 고정자에 장착된 구조가 특징으로, 다양한 이동자 형상으로 응용이 가능하기에 대상체에 따라 설계 변형이 용이한 장점이 있다. 또한 전압 크기를 조절함으로써 구동력 또는 구동 변위의 간단한 제어가 가능하다. 본 논문에서는 실험과 해석을 통하여 액추에이터의 주요 설계 변수인 코어의 폭 대비 단의 길이, 영구자석과 전자석의 자속비 등을 추출하고, 시제품을 제작하여 전류와 위치에 따른 구동력을 측정하여 구동 특성을 검토한다.

2. 액추에이터의 구조 및 구동 원리

Fig. 1은 본 논문에서 제안하는 직류 구동 액추에이터의 기본 구조로서, 고정자의 요크(yoke)와 C자형 코어 사이에 영구자석이 장착되어 편향 자속(bias flux)을 제공하며, 제어 자속을 만드는 코어에 감겨 있는 코일, 표면에 단이 형성되어 있는 이동자로 구성되어 있다.

기본 원리는, Fig. 1의 기본 구조 2개가 1쌍으로 작용하여 영구자석에 의한 자속이 C자형 코어와 이동자 사이의 두 공극에서 같은 방향으로 흐르고, 코일에 의해 생성되는 자속은 각 기본 구조 내에서 C자형 코어와 공극, 이동자가 이루는 자속경로를 따라 흐르도록 함으로써 코어의 양쪽 공극에서 자속 밀도의 차이에 의해 힘을 발생시키게 된다. 이 경우 기본 구조 2개의 영구자석의 극성을 반대로 하여

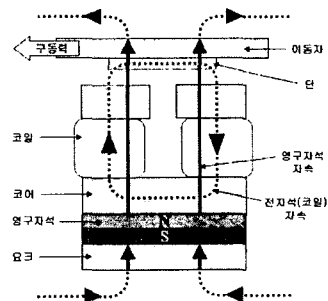


Fig. 1 Basic principle of the proposed actuator

† 책임저자, 정희원, 한국과학기술연구원 트라이블로지연구센터
E-mail : sjongkim@kist.re.kr
Tel : (02) 958-5610, Fax : (02) 958-5659

* 정희원, 한국과학기술연구원 트라이블로지연구센터

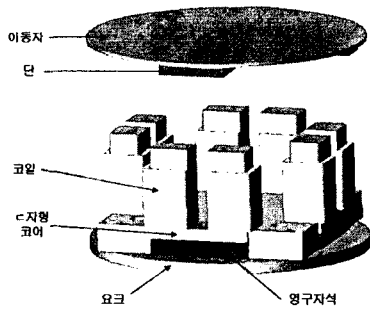


Fig. 2 Schematic view of the prototype

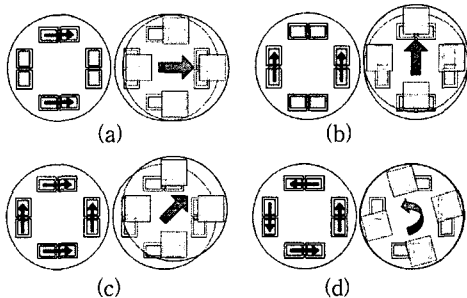


Fig. 3 Multi-DOF operation mechanism; (a), (b), (c) translations and (d) rotation

폐회로가 구성되도록 한다. 이러한 원리는 기존의 호모폴라 방식의 액추에이터^(1,2)와 유사하나, 제안된 액추에이터는 영구자석이 고정자에 부착된 구조로써 이동자에 구동력이 발생하게 된다. 따라서 이동자의 형상 설계에 있어서 권선 구조 또는 영구 자석의 부착 등의 제약이 없으므로 다양한 형상의 액추에이터 설계가 가능하다.

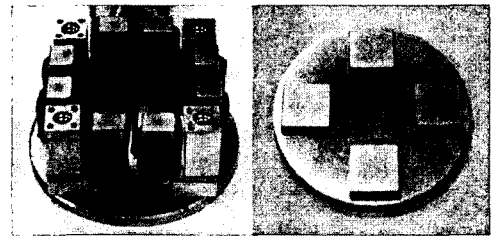
다자유도 액추에이터를 구현하기 위해, Fig. 1의 기본 구조 4개를 Fig. 2와 같이 중심축 대칭으로 배열하고, 각 c자형 코어의 하단에 있는 영구 자석의 극성을 N, S, N, S 극 순으로 부착하여 고정자와 이동자를 통한 폐회로가 구성되도록 하였다. 그리고 이동자에는 일반 자성체 재료의 원판에 등간격으로 4개의 단이 형성되어 있다. 이동자는 이론적으로 단순한 평판도 가능하지만, 구동력을 증가시키기 위해 낮은 단을 형성해두었다. 이 경우, 코어와 단 사이 공극에서의 자속경로 상의 통과 면적이 바뀌게 되어, 이동자의 변위에 따라 자속 밀도가 변하는 현상이 발생한다. 즉, 코어의 폭 대비 단의 길이가 액추에이터의 구동력과 구동거리를 결정하는 설계 변수가 된다. Fig. 3은 4개의 기본구조가 함께 작동하여 2자유도 병진운동과 1자유도 회전운동이 되는 원리를 보여준다. 각 전자석에 인가되는 전류를 조절하면 평면상에서 임의의 방향으로의 구동이 가능하다. 다만, 구동 범위는 전자석 및 이동자 표면의 단의 길이에 따라 제한을 받는다.

3. 실험 및 해석 결과

Fig. 4는 시제작된 평면 3자유도 액추에이터의 이동자와 고정자이다. 코어를 포함한 고정자와 이동자의 구조는 Fig. 2와 동일하지만, 코어와 이동자 사이의 간극을 유지하기 위한 지지수단으로 4개의 쇠구슬을 삽입하고 쇠구슬의 자화를 방지하기 위하여 그 기둥부는 알루미늄으로 제작하였다. Table 1은 시작품의 주요 설계변수 값이다.

3.1 공극 자속 밀도

액추에이터 구동 실험에 앞서, 영구자석에 의한 공극에서의 자속 밀도를 측정하였다. 또한 제작된 시작품의 영구자석 대비 전자석의 자속비를 결정하기 위해 FEM 해석으로 초기 상태에서 전류 인가에 따른 수직, 수평 방향의 힘을 구하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 수평 구동력은 전류의 세기에 비례하여 선형적으로 증가함을 보인다. 그러나 주로 영구자석에 의해 발생하는 수직 흡인력은, 전류에 의한 자속의 영향으로 양쪽 코어에서의 자속 차이가 클수록 증가하게 된다. 시제작된 액추에이터에서는 수평 구동력에 비해 수직 흡인력이 6~15배 크므로, 초기 영구자석의 세기가 너무 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 영구자석



(a) stator (b) moving disk

Fig. 4 The prototype

Table 1 Design parameters of the prototype

Parameter	Value	Parameter	Value
Diameter of rotor	70 mm	Core width	10 mm
Mass of rotor	77 g	Core depth	8 mm
No. of coil turns	183	PM thickness	4 mm
Coil diameter	0.4 mm	PM length	25 mm
Current	-1.5~+1.5A	Projection length	10 mm
Air gap between stator and rotor	2 mm	Gap between cores	5 mm

Table 2 Calculated horizontal and vertical forces

Current [A]	Horizontal force [N]	Vertical force [N]
0.5	0.39	5.93
0.75	0.58	6.17
1.0	0.77	6.49
1.25	0.96	6.91
1.5	1.14	7.43

선정 시, 자력이 셀수록 좋은 것은 아니며, 전자석에서 낼 수 있는 최대 자속의 2배 정도가 적당하다. 본 시작품의 경우, 영구자석에 의한 공극에서의 자속 밀도를 감소시키기 위해 영구자석과 요크사이에서 5mm의 아크릴을 부착하여 영구자석 대 전자석의 자속비가 1.5가 되도록 하였으며, 이때 영구자석에 의한 공극에서의 자속 밀도는 0.15T로 측정되었다. 또한, 제한된 액추에이터를 정격 구동하기 위한 허용 전류의 범위를 -1.5~1.5A로 설정하였으며, 1.5A의 전류가 인가되었을 때, 전자석에 의한 공극에서의 자속 밀도는 π 자형 코어의 양쪽에서 각각 -0.1T와 0.1T가 되어, 전체 자속 밀도는 각각 0.05T, 0.25T로 측정되었다.

3.2 구동력

전류에 따른 구동력 측정에 앞서, 이동자에 부착된 단의 길이를 선정하기 위한 FEM 해석을 수행하였다. 이동자에 부착된 단의 크기에 따라 액추에이터의 구동거리와 구동력이 결정되며, 이러한 단의 크기는 제한된 액추에이터의 이동자와 고정자 사이의 공극과 π 자형 코어의 윗면 형상에 의해 정해진다. Fig. 5와 같이 시작품의 코어는 25mm의 폭으로 제작되었으며, 이 경우 Fig. 6에서와 같이 10mm 길이의 단에서 가장 큰 힘이 발생하는 것으로 해석되었다. 본 논문에서의 FEM 해석 결과들은 Fig. 5의 치수를 갖는 기본 구조 2개가 조합되어 영구자석에 의한 바이어스 자속 경로가 폐회로가 되도록 한 경우에 대한 결과이다.

이에 10mm 단이 사용된 액추에이터에 0.25A 간격으로 1.5A까지 인가하여 전류에 따른 구동력을 측정하였다. 본

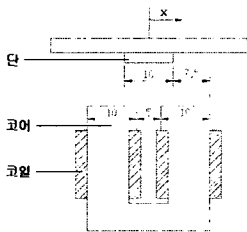


Fig. 5 Driving range of prototype

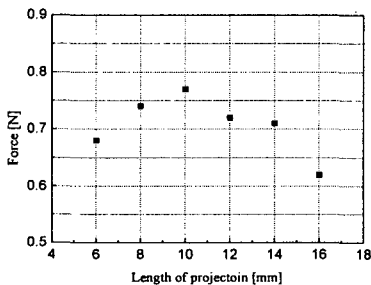
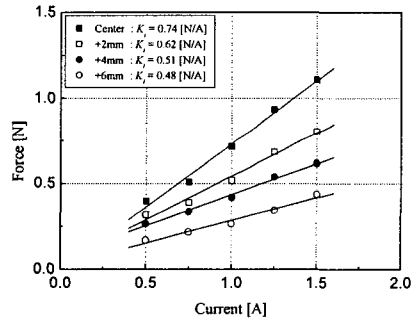


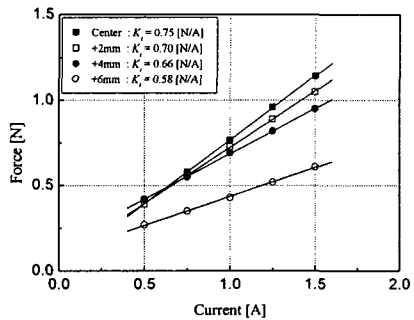
Fig. 6 Vertical translation force according to the length of projection : $i = 1.0$ A

해능 0.1N의 힘 측정기(AIKOH Co.)를 사용하여, 전류 인가 시 이동자의 움직임이 발생하는 순간의 힘을 측정하였다.

Fig. 7은 이동자의 구동 범위 내에서 인가 전류에 따른 구동력의 측정 결과와 해석 결과이다. 중심에서부터 6mm까지 2mm 간격으로 각 위치에서의 전류에 따른 구동력을 보여준다. 쇠구슬의 마찰 저항과 영구자석이 이동자를 끌어당기는 힘에 의한 마찰력에도 불구하고, 해석을 통해 예상되었던 것처럼 선형적인 특성을 보인다. 선형 피팅을 통해 단의 각 위치에서의 기울기가 구해지며, 이것이 전류 강성 계수(K_i)에 해당한다. Fig. 7(b)의 해석 결과에서, 단이 6mm에 위치했을 때 구동력이 갑자기 감소한 것을 보인다. 이 위치는 π 자형 코어의 한 쪽과 이동자에서 형성되는 자속 경로 상에서 단이 벗어나는 위치로, 단의 두께만큼의 공극 변화에 의한 자기 저항(reluctance)이 갑자기 증가하기 때문이다. 그리고 실험과 해석 결과 모두 전류 강성 계수가 단의 위치에 따라 감소하는 것을 알 수 있으며, 단이 코어의 중심에서는 그 값이 차이가 없으나, 단의 위치가 중심에서 벗어남에 따라 실험값이 해석값보다 작은 것을 알 수 있다. 이는 해석 결과에서 이동자와 쇠구슬 사이의 마찰 영향이 포함되지 않은 것으로 볼 수 있다.

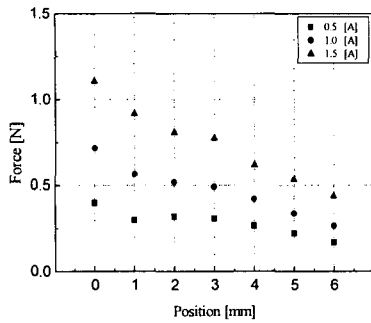


(a) measured value

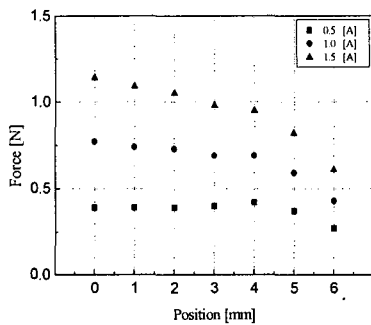


(b) analyzed value

Fig. 7 Measured and calculated translation forces according to current at various positions



(a) measured value



(b) analyzed value

Fig. 8 Measured and calculated translation forces according to the displacement for various currents

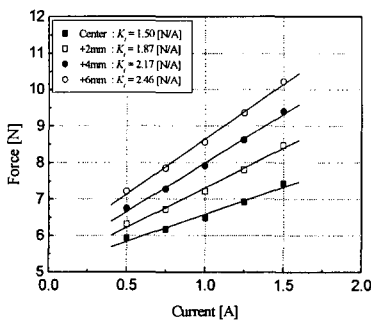


Fig. 9 Calculated vertical attractive force vs. current

Fig. 8는 이동자의 위치에 따른 구동력의 변화이다. 단이 코어의 중심에서 멀어질수록 구동력이 상대적으로 점점 약해지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 편향 자속을 형성하는 부분에 이동자의 단이 포함되어 있는 구조이기 때문이며, 단의 이동에 따라 영구자석에 의한 자속 밀도가 변하여 구동력이 변하게 되는 것이다. 또한 결과를 통해 이동자가 중심에서 멀어질수록 중심으로 당기는 복원력이 감소하는 것을 알 수 있다. 이 복원력은 전류가 인가되지 않은 초

기 상태에서 단이 코어의 중심에 위치하도록 하는 역할을 하지만, 단의 위치가 중심에서 멀어질수록 그 힘이 약해지는 것을 알 수 있다. Fig. 8(b)의 해석 결과에서는 6mm 위치에서 자속경로 상의 자기 저항의 영향으로 구동력이 갑자기 감소하는 현상을 보인다. 따라서 모든 구동범위 내에서 선형으로 근사되는 것은 어려움이 있다. 또한 Fig. 8(a)의 실험 결과는, 단이 중심에서 멀어짐에 따라 Fig. 8(b)의 해석 결과에 비해 전체적으로 작은 구동력이 측정되었다. 이는 마찰력에 의한 영향으로, Fig. 9의 FEM 해석을 통해 알 수 있듯이 인가 전류가 증가함에 따라 이동자를 끌어당기는 수직 방향의 흡입력이 비례적으로 증가하게 되어 구동력도 비례적으로 감소하게 되는 현상으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 영구자석과 전자석이 모두 고정자에 장착되어 있는 구조의 액추에이터를 설계하였다. 이동자 형상의 소형화, 단순화가 가능하므로, 기존의 다자유도 액추에이터의 구조적 단점을 개선할 수 있는 장점이 있다.

FEM 해석을 통해, 설계 시 필요한 주요 변수들을 선정하여 시작품을 설계, 제작하였다. 구동 실험을 통하여 액추에이터의 기본 성능 및 특성을 알아보았으며, 실험 결과 및 해석 결과의 비교를 통하여 제안된 원리의 타당성을 증명하였다. 그러나 이동자의 위치와 인가 전류의 증가에 따라 발생하는 수평 방향 구동력뿐만 아니라 수직 방향 흡입력이 평판 구동을 위해 장착된 쇠구슬에서의 마찰력을 증가시키는 단점으로 작용하는 것을 알 수 있었다. 이를 통해, 전류와 구동력의 관계 및 영구자석과 전자석의 자속비, 마찰력 등은, 제안된 액추에이터의 주요 설계 변수임을 알 수 있었으며, 최적화된 설계 변수들은 본 논문에서 수행한 실험 및 해석 결과를 통해 제시되었다. 현재, 제어기 설계를 통하여 동특성 및 제어 성능 실험이 수행되고 있으며, 마찰력을 최소화하는 구조 설계 등이 향후 과제로 남아 있다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) H. Y. Kim, et. al., 2003, "Design and Control of Active Magnetic Bearings System with Lorentz Type Axial Actuator", Proc. of DETC'03 ASME 2003, VIB-48542.
- (2) N. Kurita, et. al., 2002, "Development of Lossless Magnetic Bearing", Proc. of 8th ISMB, pp. 91-96.