

단순 원판형 평면 3자유도 액추에이터 설계

Design of A Simple Disk-type 3-DOF Actuator

백 두 진* · 김 하 용* · 김 승 중†

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

(2004년 12월 14일 접수 : 2005년 2월 18일 심사완료)

Key Words : Multi-DOF Actuator(다자유도 액추에이터), Disk-type Actuator(원판형 액추에이터), Bias Flux(바이어스 자속), Current Stiffness(전류 강성계수), Lorentz Force(로렌츠 힘), Reluctance(자기 저항)

ABSTRACT

A disk-type 3-DOF actuator which has new principle and very simple structure is proposed. Also it utilizes the relation of bias and control fluxes produced by permanent magnets and coils, respectively, like other conventional electromagnetic actuators, but its main feature is that both the coils and permanent magnets are fixed in the stator, which makes it easy to design the shape of moving part. Operating principle is that a moving disk is driven by reaction force of Lorentz force acting on the fixed equivalent coil. Simple analytic approach and FEM analysis are performed to determine the design parameters so as to increase the driving force and distance. And some experimental results show the feasibility of the proposed actuator.

1. 서 론

다자유도 구동을 위해서는 일반적으로 자유도 수만큼의 구동 모터가 필요하고, 대부분 범용 기성 제품을 이용하여 독립적으로 구현된다. 또한 소형, 경량화가 요구되는 경우에는 고가의 고속 소형 DC 모터와 감속기를 함께 이용하는 것이 보통이다. 백윤수⁽¹⁾ 등은 3자유도 액추에이터를 구현하기 위해 3개의 모터와 그 외의 부수장치들을 하나의 조인트에 설치하는 방법을 연구하였고, 이보하⁽²⁾ 등은 맥스웰 힘을 이용한 선형 구동기를 연구하였으며, Laschi⁽³⁾ 등은 2개의 DC 모터를 사용한 벨트 구동 구조를 연구하여, 구형 3자유도 구동에 적용하였다. 이 밖에도 많은 다

양한 다자유도 액추에이터에 관한 연구가 발표된 바 있으나, 이러한 기존의 연구들은 대부분, 다자유도 구동 시, 여러 개의 모터와 감속기를 작은 공간 내에 장착해야 하는 어려움이 따르고, 개별 모터의 구동을 위한 여러 가닥의 전선과 각각의 구동 시스템 구성 문제, 자유도간에 연결된 복잡한 제어, 높은 제작비, 그리고 고속 회전으로 인한 모터 소음 문제들이 발생한다.

이에 이 논문에서는 단순한 구조를 갖는 원판형 3자유도 액추에이터를 제안한다. 제안된 액추에이터는 영구자석과 전자석이 모두 고정자에 장착된 구조가 특징으로, 이동자 형상 설계에 있어서 제한이 적고 적용 대상체에 따라 설계 변형이 용이한 장점이 있으며 소형화, 단순화에 유리하다. 또한 DC 전류의 크기를 조절함으로써 구동력 또는 구동 변위의 제어가 간단하다. 실험과 해석을 통하여 액추에이터의 주요 설계 변수인 코어의 폭 대비 단의 길이, 영구자석과 전자석의 자속비 등을 추출하고, 시작품을 제작하여 전류와 위치에 따른 구동력을 측정하였으며, FEM

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

* 정희원, 한국과학기술연구원 트라이블로지연구소센터

해석 결과와의 비교 분석을 통해 구동 특성을 검토하였다.

2. 제안된 액추에이터의 구조 및 구동 원리

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

기본적인 구동 원리는, 영구자석에 의한 자속은 C자형 코어와 이동자 사이의 두 공극에서 같은 방향으로 흐르고, 코일에 의해 생성되는 자속은 C자형 코어와 공극, 이동자가 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.^(4,5)

한편, 영구자석에 의한 자속경로 역시 폐회로를 이룰 수 있도록 Fig. 1의 기본구조 2개를 1쌍으로 이용하고 그들의 영구자석 극성을 반대로 배치하면 편향 자속경로는 이동자와 요크에 의해 폐회로를 형성한다. 3자유도 액추에이터를 구현하기 위해서는, Fig. 1의 기본 구조 4개를 Fig. 2와 같이 중심축 대칭으로 배열하고, 각 C자형 코어의 하단에 있는 영구 자석의 극성을 N, S, N, S극 순으로 부착하여 고정자와 이동자를 통한 폐회로가 구성되도록 한다. 그리고 이

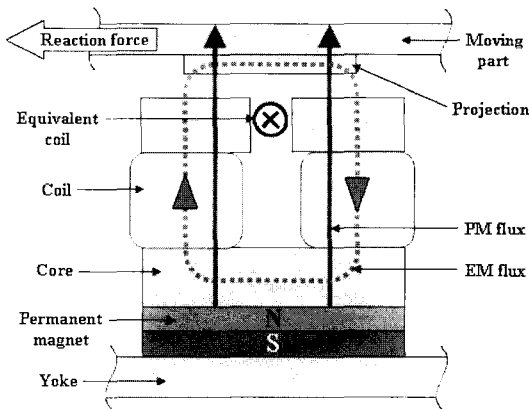


Fig. 1 Basic structure

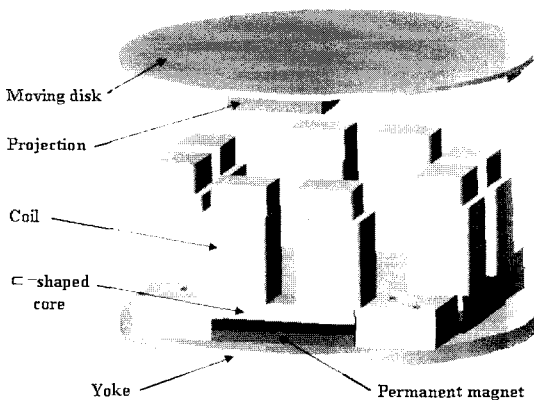
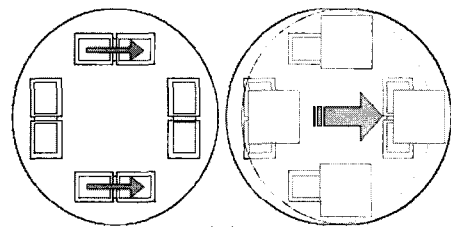
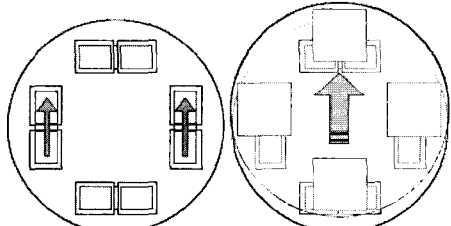


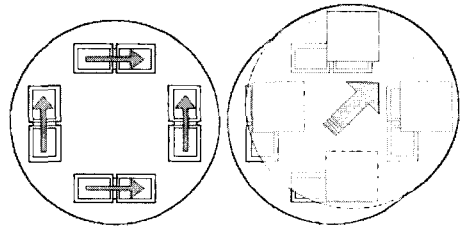
Fig. 2 Schematic view of the proposed actuator



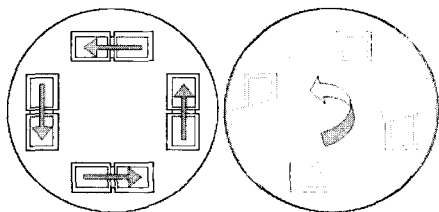
(a)



(b)



(c)



(d)

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

동자는 일반 자성체 재질의 원판이며 고정자 쪽의 표면에는 등간격으로 4개의 단이 형성되어 있다.

이동자는 이론적으로 단순한 평판도 가능하지만, 구동력을 증가시키기 위해 낮은 단을 형성해두었다. 각 단의 높이는 편의상 공극의 절반 이하로 하였고 폭도 고정자 폭보다 좁아야 하는데, 이들은 구동력과 구동 거리에 영향을 끼치는 주요 변수들이 된다.

Fig. 3은 제안된 3자유도 액추에이터의 구동 원리를 보여준다. 마주보는 한 쌍의 전자석에 같은 방향의 전류를 인가하면 2자유도의 병진 운동이 구현되며, 다른 방향의 전류를 인가하면 1자유도 회전운동이 구현된다. 또한 각 전자석에 인가되는 전류를 조절하면 평면상에서 임의의 방향으로의 구동이 가능하다. 다만, 구동 범위는 전자석 및 이동자 표면의 단의 길이에 따라 제한을 받는다.

3. 해석 및 실험 결과

간단한 해석 방법을 통하여 공극에서 발생하는 자속을 예측하기 위해서는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 공극 중, 단이 있는 부분과 없는 부분으로 구분하여 자기 저항(reluctance)을 구해야한다. 영구자석만 고려하였을 경우에 공극을 지나는 자속은 다음과 같이 표현된다.

$$\phi_m = B_m A_m = \frac{R_m}{R_m + R_T} B_r A_m \quad (1)$$

여기서, B_r 은 영구자석의 고유 특성인 잔류 자기(residual flux density), A_m 은 영구자석의 단면적, R_m 은 영구자석의 내부 자기 저항, R_T 은 공극에서의 자기 저항으로서 다음과 같이 표시되며, 코어에서의 자기 저항은 무시되었다.

$$R_m = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_m A_m} \quad (2)$$

$$R_T = \frac{R_o R_i}{R_o + R_i} \quad (3)$$

여기서, l_m 은 영구자석의 두께이고, μ_0 는 공기 중에서의 투자율(permeability, $= 4\pi \times 10^{-7}$ Weber/mA), μ_m 은 영구자석의 상대 투자율(≈ 1.05)이다. 단에 따라서 전체 자기 저항 값은 단이 있는 부분의 자기 저항 R_i 와 단이 없는 부분에서의 자기 저항 R_o 로

구분되며, 그 두 자기 저항은 병렬로 연결된 형태를 갖는다. 자속 손실 계수 α 를 고려하였을 때 공극을 흐르는 자속 밀도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

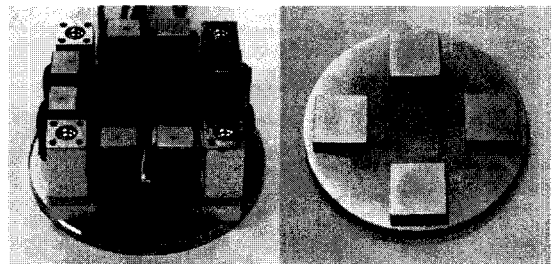
$$\phi_m = \alpha B_g A_g \quad (4)$$

여기서, B_g 는 공극에서의 자속 밀도, A_g 는 공극의 단면적이다. 로렌츠 원리에 의해 평판에 작용하는 힘은 다음과 같다.

$$F = B_g L N i \quad (5)$$

여기서, L 은 전류가 흐르는 코일의 길이, i 는 인가되는 전류, N 은 코일의 권선수이다.

Fig. 4는 시제작된 원판형 평면 3자유도 액추에이터의 이동자와 고정자이다. 코어를 포함한 고정자와 이동자의 구조는 Fig. 2와 동일하지만, 코어와 이동자 사이의 공극을 유지하기 위한 지지수단으로 4개의 쇠구슬을 네 구석에 장착하고 쇠구슬로의 자속 유출을 방지하기 위하여 그 지지부는 알루미늄으로 제작하였다. Table 1은 시작품의 주요 설계 변수의 값이다.



(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 area	$8 \times 10 \text{ mm}^2$
Mass of rotor	77 g	PM thickness	4 mm
No. of coil turns	183	PM area	$8 \times 25 \text{ mm}^2$
Coil diameter	0.4 mm	Projection size	$10 \times 10 \text{ mm}^2$
Current	-1.5 ~ +1.5A	Projection height	2 mm
Air gap between stator and rotor	2 mm	Gap between cores	5 mm

3.1 공극 자속 밀도

액추에이터 구동 실험에 앞서, 영구자석에 의한 공극에서의 자속 밀도를 측정하였다. 0.25T로 측정되었으며, 이 자속밀도 측정치를 이용하여, 제작된 시작품의 영구자석 대비 전자석의 자속비를 결정하기 위해 FEM 해석으로 초기 상태에서 전류 인가에 따른 수직, 수평 방향의 힘을 구하였고, 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, 영구자석의 세기가 너무 크다는 것을 알 수 있다. 영구자석의 자력이 셀수록 좋은 것은 아니며, 전자석에서 낼 수 있는 최대 자속의 2배 정도가 적당하다.

이 시작품의 경우, 영구자석에 의한 공극에서의 자속 밀도를 감소시키기 위해 영구자석과 요크 사이에 5 mm의 아크릴을 부착하여 영구자석 대 전자석의 자속비가 1.5가 되도록 하였으며, 이 때 영구자석에 의한 공극에서의 자속 밀도는 0.15T로 측정되었으며, FEM 결과는 0.18T, 식 (4)를 이용한 해석 결과는 0.17T이다. 또한, 코일의 굽기와 발열 특성을 고려하여 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 되도록 하였고, 그 결과, 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. 앞서 언급한 바와 같이 이동자에 부착된 단의 크기에 따라 액추에이터의 구동거리와 구동력이 결정되

며, 이러한 단의 크기는 제안된 액추에이터의 이동자와 고정자 사이의 공극과 π 자형 코어의 윗면 형상에 의해 정해진다. Fig.5와 같이 시작품의 코어는 25 mm의 폭으로 제작되었으며, 이 경우 Fig.6에서와 같이 10 mm 길이의 단에서 가장 큰 힘이 발생하는 것으로 해석되었다. 이 논문에서의 FEM 해석 결과들은 Fig.5의 치수를 갖는 기본 구조 2개가 조합되어 영구자석에 의한 바이어스 자속 경로가 폐회로가 되도록 한 경우에 대한 결과이다.

이에 10 mm 단이 사용된 액추에이터에 0.25A 간격으로 1.5 A까지 인가하여 전류에 따른 구동력을 측정하였다. 분해능 0.1 N의 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

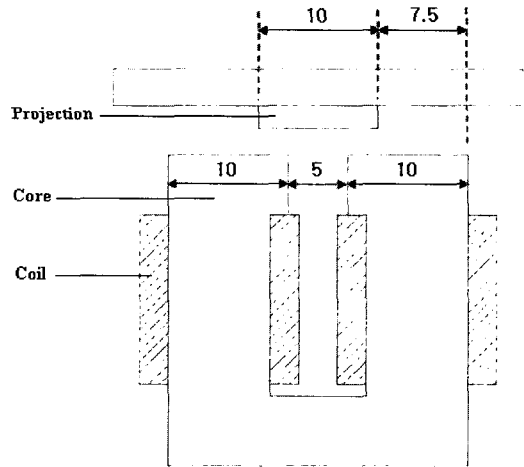


Fig. 5 Dimensions of the prototype

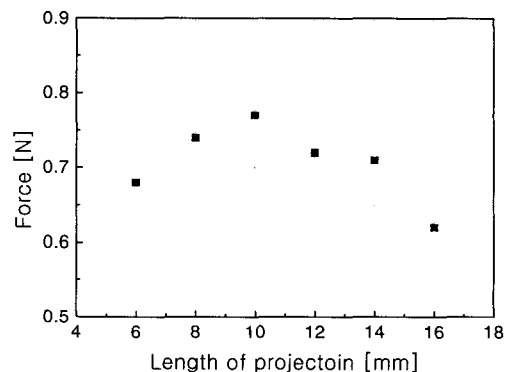


Fig. 6 Vertical translation force according to the length of projection : $i = 1.0$ A

Table 2 Calculated horizontal and vertical forces

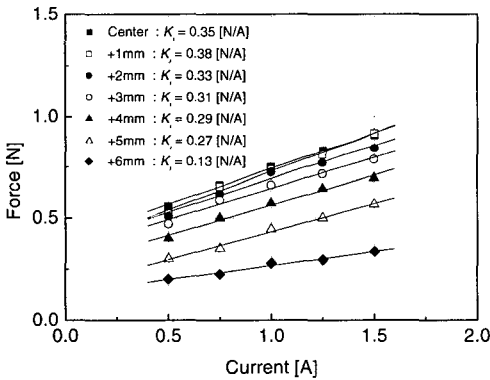
Current [A]	Horizontal force [N]	Vertical force [N]
0.5	0.39	5.93
0.75	0.58	6.17
1.0	0.77	6.49
1.25	0.96	6.91
1.5	1.14	7.43

해석 결과이다. 중심에서부터 6mm까지 1mm 간격으로 각 위치에서의 전류에 따른 구동력 변화를 보여준다. 결과들은 공통적으로 구동력이 전류에 선형적으로 비례하는 특성을 보이며, 제안된 구동 원리가 로렌츠 원리에 부합하는 것을 확인할 수 있다. 선형 피팅을 통해 단의 각 위치에서의 기울기가 구해지며, 이것이 전류 강성계수(K_i)에 해당한다. Fig. 7(a)의 실험 결과가 Fig. 7(b)의 해석 결과보다 전체적으로 구동력이 작게 측정되었다. 이는 영구자석, 고정자 및 이동자의 물성치 오차와 아울러, 해석 시에는 고려되지 않은, 영구자석과 전자석에 의한 수직방향 인력에 기인한 이동자와 쇠구슬 사이의 마찰력이 주요한 원인으로 판단된다.

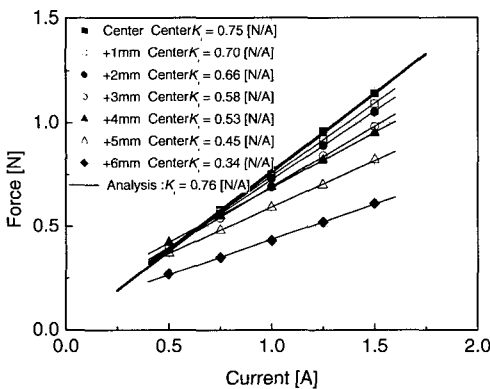
한편, 실험 결과와 해석 결과 모두 전류 강성 계수가 단의 위치에 따라 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 단의 위치가 중앙에서 멀어짐에 따라 양 쪽 코어에서 전자석 자속의 통과 면적의 변화에 의해 자기

저항이 증가하기 때문이다. 이러한 현상은 영구자석에 의한 편향 자속과는 무관하며, 또한 제안된 액추에이터는 양 쪽 코어에서의 공극이 같으므로 전자석 자속의 통과 면적의 변화량만이 구동력의 감소에 영향을 주어 전류 강성계수가 감소하는 것이다. 참고로, 식 (1)~(5)의 해석 식을 통해 계산된 결과가 Fig. 7(b)의 굵은 실선으로 표시되었는데, 이는 같은 조건에서 구한 FEM 해석 결과와 상당히 유사함을 알 수 있다. 즉, 단순화된 자기 회로에 의한 해석결과도 설계 변수 도출에 유용할 수 있음을 뜻한다. 한편, 실험 결과와 해석 결과 모두 단이 5mm 이동한 위치에서부터 구동력이 갑자기 감소하는 경향을 보인다. 이 위치는 π 자형 코어의 한 쪽과 이동자에서 형성되는 자속경로 상에서 단이 벗어나는 위치로, 단의 두께만큼의 공극 변화에 의한 자기 저항이 갑자기 증가하기 때문이다.

Fig. 8은 이동자의 위치에 따른 구동력의 변화로서,

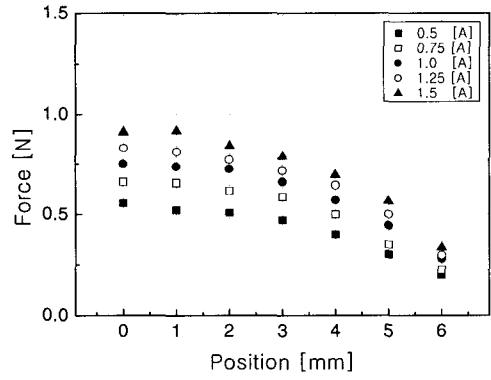


(a) Measured value

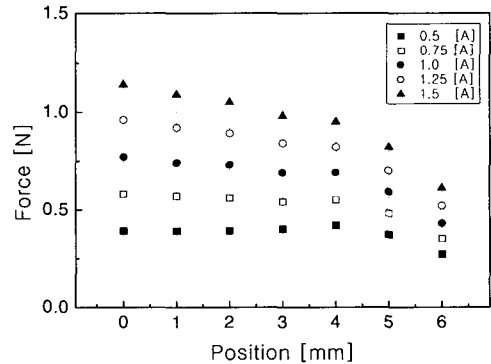


(b) Calculated value

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



(a) Measured value



(b) Calculated value

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

Fig. 7과 동일한 데이터를 이용하여 다시 그린 것이다. 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. Fig. 8(b)의 해석 결과에서는 4mm 이후 Fig. 7에서 규명한 바와 같은 이유로 구동력이 갑자기 감소하는 현상을 보인다. 따라서 모든 구동범위 내에서 선형으로 근사되는 것은 어려움이 있다. 또한 Fig. 8(a)의 실험 결과는, 1A 이상의 전류가 인가되었을 때, 단이 중심에서 멀어짐에 따라 Fig. 8(b)의 해석 결과에 비해 전체적으로 작은 구동력이 측정되었다.

이는 마찰력에 의한 영향으로서, Fig. 9에 도시한 수직 흡인력의 FEM 해석을 통해 알 수 있듯이 인가 전류가 증가함에 따라 이동자를 끌어당기는 흡인력이 비례적으로 증가하게 되어 마찰력도 비례적으로 증가하는 것에 기인하는 현상으로 사료된다. 그러나 1 A 이하의 전류가 인가된 경우의 구동력은 해석 결과보다 크게 측정되었다. 이는 실제 실험 시, 힘 측정기의 분해능이 0.1 N인 이유로, 작은 크기의 구동력은 정밀한 측정의 어려움이 있었기에, 측정오차에 기인하는 것으로 판단된다. Fig. 7과 Fig. 8의 결과를 통해, 제안된 액추에이터의 구동력이 각각 단의 위치 및 인가 전류의 영향을 받는 것을 알 수 있다. 특히, 이동자의 위치에 따른 자속 밀도가 이동자에 부착된 단에 의해 영향을 받으므로, 자속 밀도는 변위의 함수로 고려되어야 함을 알 수 있다.

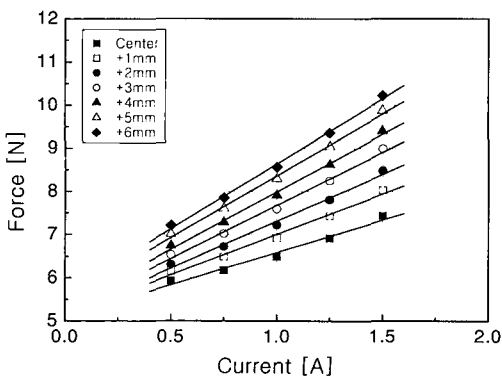


Fig. 9 Calculated vertical attractive force vs. current

3.3 구동 실험

실제로 임의의 입력 전류에 따른 구동 특성을 확인하기 위해, 임의의 전류를 인가하였을 때의 응답 신호를 측정하였다. 액추에이터의 이동자 원판 윗면에 소형 3축 가속도 센서(Type4326, B&K)를 부착하였으며, 그 응답 신호를 Fig. 10에 나타내었다. 마주보는 한 쌍의 전자석에 일정 교류 신호를 입력하고 다른 한 쌍의 전자석에 90°의 위상차와 같은 크기의 전류를 인가하면 'o'형태의 움직임이 가능하며, 다른 한 쌍의 전자석에 위상차 없이 2배의 주파수를 인가하면 '8'형태의 움직임이 가능하다. 이 외에 전류 크기와 위상에 따라, 평면상에서의 다양한 형태의 구동이 가능하다. 이와 같이, 이 논문에서 제안한 액추

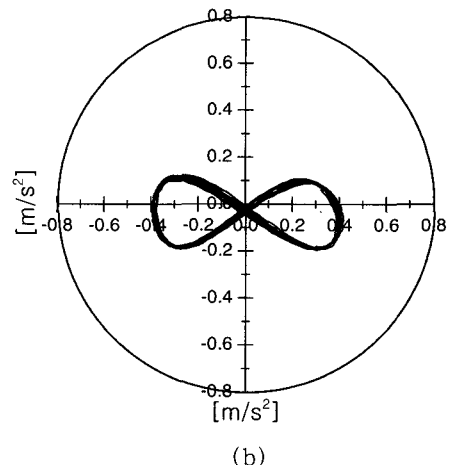
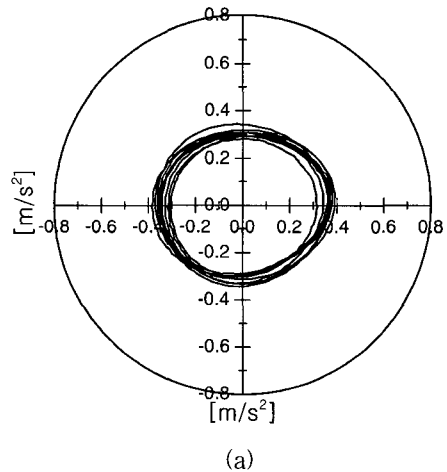


Fig. 10 Various planar motions of the prototype

에이터는 간단한 전류의 입력만으로도 평면상에서의 3자유도 구동이 가능함을 확인하였다.

4. 결 론

이 논문에서는 영구자석과 전자석이 모두 고정자에 장착되어 있는 구조의 평면 3자유도 액추에이터를 설계하였다. 이러한 구조는 이동자 형상의 소형화, 단순화를 가능하게 할 수 있기에, 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 알아 보았으며, 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 흡인력이 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 이 논문에서 수행한 실험 및 해석 결과를 통해 제시되었다. 향후, 이 논문에서 제안된 평판형 액추에이터는 로봇의 얼굴 요소(눈썹 등)의 구동에 적용될 예정이며, 마찰력을 최소화하는 구조 설계의 체계화 및 위치 추종 제어 등에 관한 연구가 계속될 것이다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) 백윤수 등, 2001, "전자석의 자기력 제어를 이용한 구형 3자유도 액추에이터의 설계 및 제어," 대한기계학회논문집 A권, 제 25 권, 제 9 호, pp. 1341~1349.
- (2) Lee, B. H., et. al., 2003, "Design of the Current Feedback Electromagnetic Actuator for Engine Vibration Control," The 32nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Jeju, Korea, pp. 355~359.
- (3) Cedilia Laschi et. al., 2003, "Visuo-motor Coordination of a Humanoid Robot Head with Human-like Vision in Face Tracking," Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.1, pp. 232~237.
- (4) Kim, H. Y., et. al., 2003, "Design and Control of Active Magnetic Bearings System with Lorentz Type Axial Actuator," Proceedings of DETC'03 ASME 2003 Design Engineering Technical Conference, VIB-48542.
- (5) 백두진, 김하용, 김승중, 2004, "평면 다자유도 액추에이터 설계," 한국소음진동공학회, 추계학술대회논문집, pp. 490~493.