

자기변형 마이크로 작동기의 설계

김도연*, 박영우#, 임민철**

Design of a Magnetostrictive MicroActuator

Do-Youn Kim *, Young-Woo Park # and Min-Cheol Yim **

ABSTRACT

This paper presents the development of a magnetostrictive microactuator. The structural and functional requirements are as follows: it must be a millimeter structure and must achieve controllable displacement with nanometer resolution. Finite Element Analysis(FEA) is used to determine the structure with the most uniform and highest magnetic flux density along the Terfenol-D rod. The microactuator prototype 1 is designed and made based on the FEA. It is observed that the microactuator show some level of hysteresis and that it produces 25 newton in force and 3 μm in displacement with 1.5 amperes of current, and resolution of 250 nm per 0.1 amperes.

To improve the performance of the microactuator prototype 1, microactuator prototype 2 is made again with a permanent magnet (PM). It is observed that the microactuator prototype 2 generates 3.3 μm in displacement with 0.9 amperes of current. It means that the microactuator prototype 2 performs better than the microactuator prototype 1.

Key Words : Magnetostriction(자기 변형), Microactuator(마이크로 작동기), Finite Element Analysis(유한요소법), Terfenol-D(터페놀-디)

기호설명

H = the magnetic field strength
n = turns per unit length of the coil
I = current through the coil
N = turns of the coil
l = length of the coil

1. 서론

마이크로 작동기는 소형 시스템에 사용되는 소형 작동기로 정의할 수 있다. 마이크로 작동기에는 압전, 정전기, 전자기, 자기변형효과 등이 이용가능하다. 그 중 압전효과를 이용한 마이크로 작동기가 많이 사용되고 있으나 변위와 출력이 상대적으로 작은 단점이 있다.¹ 본 논문에서는 자기 변형 효과를 이용한 마이크로 작동기를 설계하고자 한다.² 자기변형이란 전기 에너지가 기계 에너

접수일: 2003년 9월 29일; 게재승인일: 2004년 2월 20일

* 엘지 화학 연구소

교신저자, 충남대학교 메카트로닉스공학과

E-mail ywpark@cnu.ac.kr Tel. (042) 821-6874

** 한국델파이

지로 바뀌는 에너지 변환 과정이다.³ 자기변형 재료는 큰 힘을 출력할 수 있다는 장점으로 인해 기계 구동을 목적으로 많이 연구되고 있다. 자기변형 재료 중 Terfenol-D 는 희토류계 금속과 철의 합금이다. 상온에서 2000 ppm 이상의 자기변형을 일으킨다.¹

마이크로 작동기는 구조상 밀리미터 구조물이 구조물이어야 하고, 기능상 나노미터의 분해능으로 제어 가능한 변위를 낼 수 있어야 한다.

본 논문에서는 상기의 요구조건을 만족하는 마이크로 작동기의 설계안을 도출하고, 이를 상용 프로그램인 ANSYS 를 이용한 자기장 해석에 적용하여 검증하였다. 검증조건은 Terfenol-D 로드를 따라서 가장 일정하고 가장 높은 자속 밀도를 가지는 구조이다. 그리고, 성능 실험을 통해 나노미터 분해능이 가능함을 보였다.

또한, 보다 성능이 개선된 마이크로 작동기를 얻기 위해, 상기 과정을 거쳐 마이크로 작동기를 재제작하였다. 그리고, 성능 실험을 통해 에너지 효율이 개선되었음을 보였다.

2. 본론

2.1 자기변형

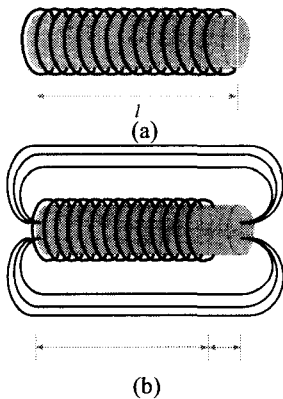


Fig. 1 Magnetostriction : (a) when Terfenol-D is not exposed to a magnetic field, (b) when Terfenol-D is exposed to a magnetic field

자기변형이란 전기 에너지가 기계 에너지로 바뀌는 에너지 변환 과정이다.³ Fig. 1 은 Terfenol-D 의 자기변형을 보이고 있다. Fig. 1(a)는 코일에 전

류가 흐르지 않는 상태로, Terfenol-D 의 길이는 l 이다. Fig. 1(b)는 코일에 전류를 흘려 자기장을 형성한 상태로, 길이 l 인 Terfenol-D 가 Δl 만큼의 형상변화를 일으킨다.

2.2 마이크로 작동기의 분류

마이크로 작동기는 Terfenol-D 에 자기장을 인가하는 방식에 따라 두 가지로 나뉜다. 코일만을 이용한 솔레노이드형, 코일과 함께 영구자석을 이용한 영구자석의 혼합형이 있다.

2.2.1 솔레노이드형

Fig. 2 는 코일과 Terfenol-D 로 구성된 솔레노이드형 구조이다. 구조가 간단하기 때문에 액츄에이터의 구현이 쉽다.

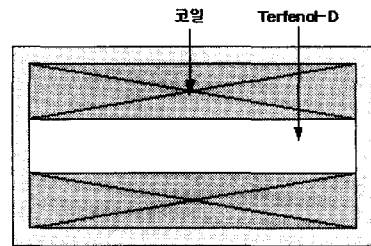


Fig. 2 Structure of a microactuator with a solenoid

2.2.2 영구자석 혼합형

Fig. 3 은 영구자석 혼합형의 구조이다. 영구자석 혼합형은 솔레노이드형에서 코일의 바깥에 영구자석을 설치하는 형태이다.

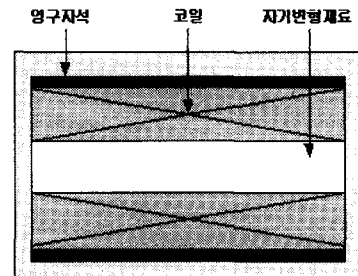


Fig. 3 Structure of a microactuator with a permanent magnet and a solenoid

영구자석은 높은 자속밀도와 낮은 보자력을 갖는다. 영구자석을 사용함으로써 보다 많은 자기력선을 Terfenol-D 로 회귀시켜 자기에너지의 손실을 줄일 수 있다. 영구자석에서 발생하는 자속

밀도를 코일에서 발생시킨 자기장의 세기로 영구 자속의 자기밀도를 제어한다.

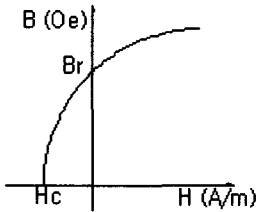


Fig. 4 The B-H curve of a permanent magnet

Fig. 4 는 영구자석의 특성을 표시한 B-H 곡선이다. 외부에서 영구자석에 자기장을 가하지 않을 경우, 영구자석의 자속밀도는 Br 이다. 영구자석에 보자력 Hc 만큼의 자기장을 가하면 영구자석의 자속밀도는 Br 에서 0 으로 감소된다.

영구자석 혼합형 마이크로 작동기는 코일에 전류를 가하지 않았을 경우, Terfenol-D 에 Br 만큼의 자속밀도가 가해져 변형이 일어나고, 코일에 전류를 흘려 자기장을 생성했을 경우, 자기장의 방향과 세기에 따른 영구자석의 자속밀도의 변화에 의해 Terfenol-D 의 변형방향과 크기가 결정된다.

본 논문에서 사용한 마이크로 작동기는 영구자석 혼합형으로, 에너지 효율이 높은 구조를 얻기 위해 ANSYS 를 이용한 해석결과를 이용하여 제작하였다.

2.3 마이크로 작동기 구조

본 논문에서는 두 개의 마이크로 작동기를 제작하였다. 마이크로 작동기는 자기변형 드라이브 로드(Terfenol-D), 보빈과 코일로 이루어진 자기회로, 푸쉬 로드, 예압 스프링, 엔드 디스크, 힘 센서 및 하우징으로 구성된다. 마이크로 작동기는 구조상 밀리미터 구조물이어야 한다.

2.3.1 Terfenol-D

Etrema 사에서 생산·판매중인 Terfenol-D 로드 중에서 가장 크기가 작은 로드로 결정하였다. 직경 5 mm, 길이 10 mm 이다.

2.3.2 영구자석

영구자석은 자속밀도가 높고 보자력이 작은 ALNICO5 를 사용하였다. ALNICO5 의 자속밀도는

1.2 T, 보자력은 600 Oe 이다.

2.3.3 코일

코일의 감긴 횟수는 자장밀도(H)에 영향을 미치고, 자장밀도는 드라이브 로드의 발생 가능한 변위에 영향을 미친다. 따라서 감긴 코일의 횟수와 최대 허용 전류의 크기를 이용하면, 다음과 같은 방법에 의해 이론적인 최대 변위가 계산될 수 있다.

코일은 영구자석의 보자력 600 Oe 만큼의 자기력을 발생시킬 수 있어야 한다. 코일이 솔레노이드 형태를 띠고 있을 경우, 자기장은 다음과 같다.

$$H = n \cdot I = N / l \cdot I \quad (1)$$

코일에 공급되는 전류가 0 ~ 1.2 A 로 제한되면, 코일에 의해 발생하는 최대자기력은 전류가 1.2 A 일 경우이다. 코일을 감은 횟수는 식 (1)을 통해 구할 수 있다. 이 때, 코일의 길이는 14 mm 로 제한하였다. 식 (1)로부터 코일을 감은 횟수는 약 558 회 이상이어야 함을 알 수 있었으며, 실제로 코일을 감은 횟수는 600 회이다.

코일과 영구자석을 크기가 제한된 마이크로 작동기에 설치하기 위해 코일의 높이와 영구자석 두께의 합은 10 mm 로 제한된다.

2.3.4 기타

푸쉬로드는 Terfenol-D 에 의해 발생하는 힘과 변위를 전달한다. 외압용 볼트와 예압스프링은 Terfenol-D 에 예압을 가한다. Terfenol-D 와 Coil, 영구자석 앞과 뒷면에는 재질이 스테인레스 강인 원판 형태의 자기회로 요소를 맞대어 자기회로를 완성한다.

2.3.5 마이크로 작동기 : 프로토타입 1

하우징은 쉘 형태로 제작, 마이크로 작동기의 구성요소 및 힘 센서를 내장하였다. 마이크로 작동기의 크기는 직경 26 mm, 높이 43 mm 이다.

2.3.6 마이크로 작동기 : 프로토타입 2

프로토타입 1 과 유사하나 힘센서는 제외되었다. 또한, 자기회로를 구성하는 구성요소 이외의 구성요소의 재질을 모두 알루미늄으로 변경하였다.

마이크로 작동기의 크기는 가로, 세로 29 mm,

높이 40 mm 이다.

2.4 마이크로 작동기 : 프로토타입 1

2.4.1 자기해석

Terfenol-D 로 자기에너지가 효율적으로 전달되는 구조를 ANSYS 를 이용한 자기장 해석에 적용하여 검증하였다. 검증조건은 Terfenol-D 로드를 따라서 가장 일정하고 가장 높은 자속 밀도를 가지는 구조이다. 마이크로 작동기는 중심축에 대하여 대칭이므로 계산상의 효율성을 위하여 작동기의 반을 모델링하였다. Fig. 5 는 마이크로 작동기의 ANSYS 모델이다.

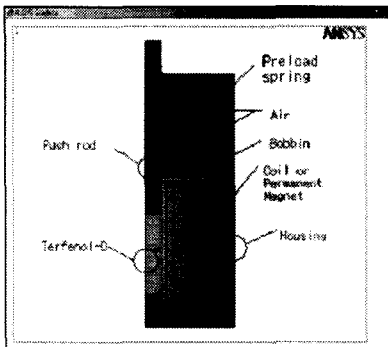


Fig. 5 ANSYS model of the microactuator

자기회로 해석을 위해 사용한 물성치는 상대 투자율, 영구자석의 B_r , H_c 값이다. 상대투자율은 Table 1 과 같다. 영구자석은 Alnico5 에 해당하는 B-H 곡선의 데이터를 이용하였다.

Table 1 Relative permeabilities

재료	상대투자율
SUS 304	400
공기	1
Terfenol-D	10
영구자석	1.5
코일	1

여기에 입력전류 $I = 0.5$ A, 감긴 코일의 횟수는 자석이 있을 경우에는 450 회, 자석의 자리에 코일을 감았을 경우는 850 회를 감은 것으로 시뮬레이션을 실행했다.

시뮬레이션은 작동기의 내부에 영구자석이 있을 경우, 영구자석이 없는 경우, 그리고 영구자석이 있던 자리에 코일을 감았을 경우 등 세 가지 경우의 자속 밀도와 자속 흐름을 비교, 분석했다.

(a) 작동기의 내부에 영구자석이 있을 경우

작동기의 내부에 코일과 영구자석이 함께 존재하는 경우에 자속 밀도와 자속 흐름의 시뮬레이션 결과는 각각 Figs. 6 과 7 에 나타난다. 최대 자속은 9765 Oe 이며 Terfenol-D 로드를 따라 균일하게 분포함을 알 수 있다(Fig. 6). 그리고, 자속은 영구자석과 하우징을 통해 원활하게 흐름을 알 수 있다(Fig. 7).

(b) 작동기의 내부에 영구자석이 없을 경우

작동기의 내부에 영구자석을 제거하고 코일만 존재하는 경우에 자속 밀도와 자속 흐름의 시뮬레이션의 결과는 각각 Figs. 8 과 9 에 나타난다. 최대 자속은 76.24 Oe 이며 Terfenol-D 로드를 따라 균일하게 분포함을 알 수 있다(Fig. 8). 자속은 영구자석과 하우징을 통해 원활하게 흐름을 알 수 있다(Fig. 9).

(c) 작동기의 내부에 영구자석이 있던 자리에 코일을 감았을 경우

작동기의 내부에 영구자석을 제거하고 코일만 존재하는 경우에 자속 밀도와 자속 흐름의 시뮬레이션의 결과는 각각 Figs. 10 과 11 에 나타난다. 최대 자속은 155 Oe 이며 Terfenol-D 로드를 따라 불균일하게 분포함을 알 수 있다(Fig. 10). 자속은 Terfenol-D 로드의 중심으로부터 활 모양으로 분포함을 알 수 있다(Fig. 11).

이상의 해석의 결과로부터 영구자석이 있는 경우가 없는 경우보다 자기장의 밀도가 하우징에 작게 걸리고 자속의 흐름도 영구자석이 있는 경우가 더 원활하다는 것을 알 수 있다. 반면 영구자석을 제거하고 남은 공간에 코일을 감으면 전류 컨트롤을 통해 얻을 수 있는 자기장 세기의 범위가 넓어지는 이점이 있다. 하지만, 전체적으로 보면 영구자석을 사용하는 것이 마이크로작동기에 유리하다.

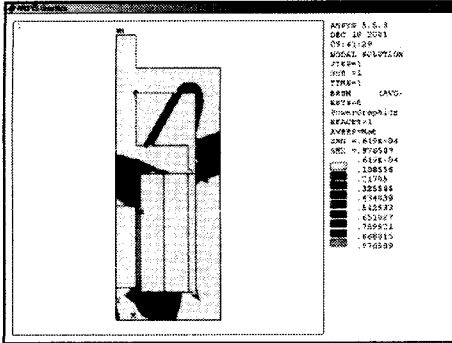


Fig. 6 Distribution of magnetic flux with PM

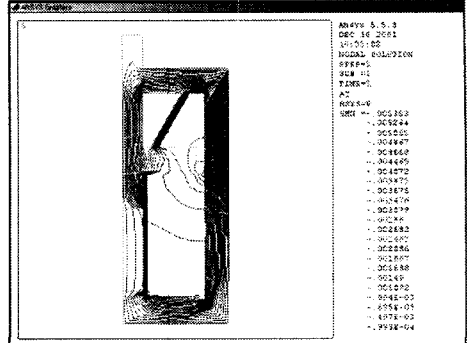


Fig. 9 Magnetic flux contour without PM

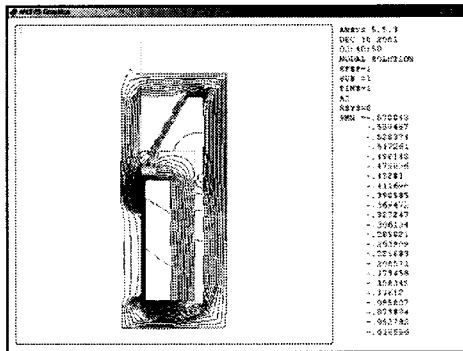


Fig. 7 Magnetic flux contour with PM

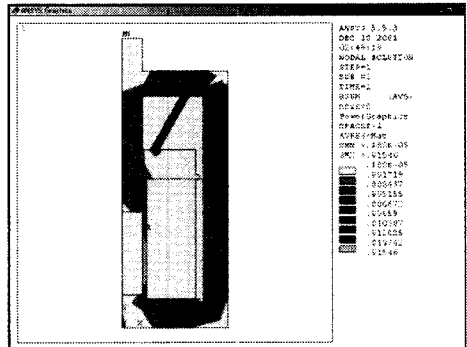


Fig. 10 Distribution of magnetic flux with fully-wound Coil.

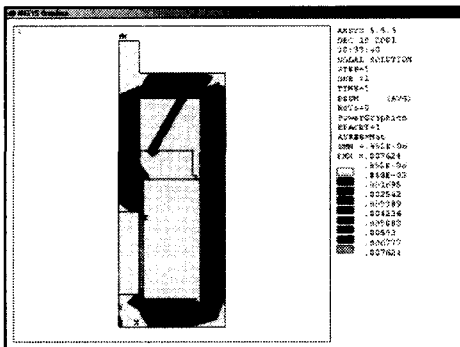


Fig. 8 Distribution of magnetic flux without PM

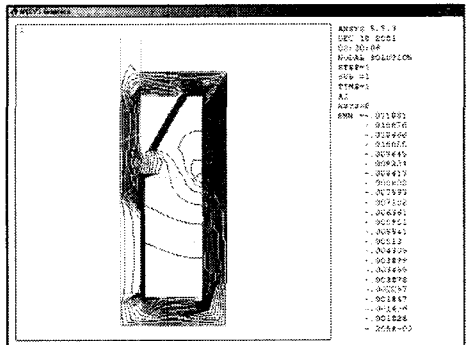


Fig. 11 Magnetic flux contour with fully-wound Coil

2.4.2 마이크로 작동기 제작

이상의 결과를 바탕으로 제작한 마이크로 작동기는 Figs. 12, 13 과 같다.

Fig. 12 는 제작된 마이크로 작동기의 조립된 모습이고, Fig. 13 은 제작된 마이크로 작동기의 구성품을 볼 수 있는 분해도이다.

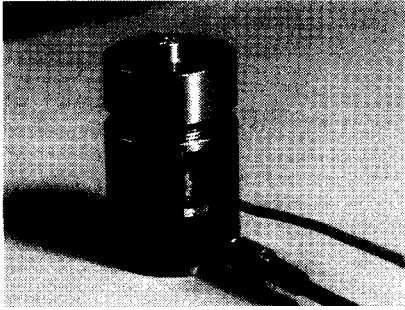


Fig. 12 Assembled view of the microactuator



Fig. 13 Exploded view of the microactuator

2.4.3 성능평가

입력 전류에 대한 출력 변위와 힘을 측정하여 마이크로 작동기의 성능을 평가하였다. 변위센서는 ACE-5706PS 로 민감도는 10 mV/ μm 이다. 힘 측정하는 센서는 압전 로드셀로 민감도는 11.241 mV/N 이다. Fig. 14는 입력전류가 0 A 에서 1.5 A 로 급격히 증가했을 때 마이크로 작동기에 의해 생성되는 힘과 변위이다. 전류가 1.5 A 가 되면, 마이크로 작동기는 3 μm 의 변위와, 25 N 의 힘을 발생한다.



Fig. 14 Generated force and displacement

연속적으로 변하는 전류에 의한 마이크로 작동기의 출력변위는 Fig. 15 와 같다. 그림으로부터 코일에 의해 발생하는 자기장에 대한 Terfenol-D 의 자기 도메인의 정열 지체로 인해 발생하는 히스테리시스를 보이고 있다.²

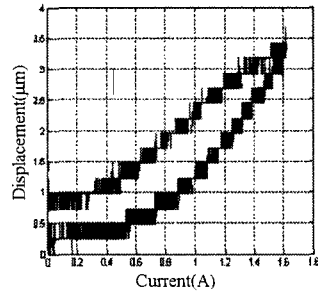


Fig. 15 Hysteresis curve

2.5 마이크로 작동기 : 프로토 타입 2

2.5.1 자기해석

영구자석을 사용함으로써 기대할 수 있는 효과와 영구자석의 사용 시 에너지 전달 효율을 알아보기 위해 ANSYS 를 이용한 시뮬레이션을 하였다. 영구자석은 Alnico5 에 해당하는 B-H 곡선의 데이터를 이용하였다. 전류밀도(Current Density)는 코일의 특성치로, 지름이 0.3 mm 인 전선에 전류 1 A 를 흘렸을 경우 9183673.469 A/m² 로 결정했다. Fig. 16 은 시뮬레이션을 위한 마이크로 작동기의 ANSYS 모델이다. 시뮬레이션을 위해 사용한 물성치는 상대투자율, 영구자석의 Br, Hc 값, 그리고, 전류밀도이다. 상대투자율은 Table 2 와 같다.

Table 2 Relative permeabilities

재료	상대투자율
SUS 304	400
공기	1
Terfenol-D	3
영구자석	1.5
코일	1

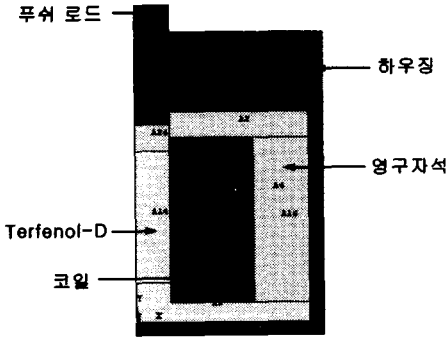


Fig. 16 ANSYS model of the microactuator

(a) 영구자석이 자기회로에 미치는 영향

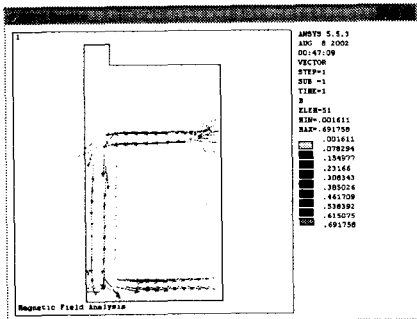


Fig. 17 Magnetic flux contour without PM

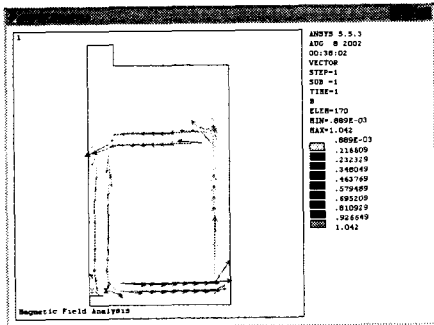


Fig. 18 Magnetic flux contour with PM

영구자석이 자기 회로에 미치는 영향은 영구 자석의 유무에 따른 자속 흐름, 자속밀도, 자기력, 자기에너지($B \times H$)를 비교하였다. Figs. 17 과 18 은 자속 흐름에 대한 시뮬레이션 결과이다. 영구 자석이 없을 때보다 영구 자석이 있을 때 자속이 마

이크로 작동기 내 자기회로를 통해 자속이 원활히 흐름을 알 수 가 있다.

Table 3 BH_{max} depending on PM

	자석이 있을 때	자석이 없을 때
자속밀도 (T)	0.4638	0.3850
자기력 (A/m)	106805	88615
$B \times H$	49536.16	34116.78

자속밀도, 자기력, 자기에너지($B \times H$) 시뮬레이션 결과는 Table 3 과 같다. 영구자석이 없을 경우 보다 영구자석이 있을 경우 보다 높은 자속밀도, 자기력, 에너지를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

(b) 에너지 전달 효율

코일의 높이와 영구자석 두께의 합이 10 mm 로 제한되므로, 마이크로 작동기 내의 자석의 두께를 5~1 mm 사이에서 변화시키며 에너지 변화를 시뮬레이션한 결과는 Table 4 와 같다. 자석의 두께가 4 mm 이고, 코일의 높이가 6 mm 일 때 Terfenol-D 에 전달되는 자기에너지가 가장 큼을 확인할 수 있다.

Table 4 BH_{max} with the variation of PM thickness

자석두께 [코일두께] (mm)	자속밀도 (T)	자기력 (A/m)	$B \times H$
5 [5]	0.332309	89959	29894.185
4 [6]	0.312250	99500	31068.875
3 [7]	0.275839	106538	29387.335
2 [8]	0.245098	88706	21741.663
1 [9]	0.200002	96011	19202.392

2.5.2 마이크로 작동기 제작

이상의 결과를 바탕으로 제작한 마이크로 작동기는 Figs. 19, 20 과 같다.



Fig. 19 Assembled view of the microactuator

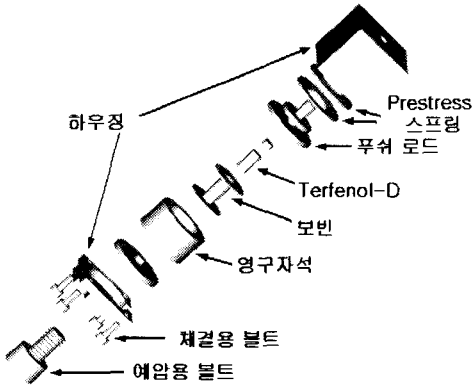


Fig. 20 Exploded view of the microactuator

2.5.3 성능평가

마이크로 작동기 프로토타입 2의 성능은 변위 센서를 이용하여 평가되었다. 변위 센서는 ADE MicroSense 3401 Gaging System(커패시턴스 센서)로 분해능은 1 nm 이고 25 μm / 10 V 이다.

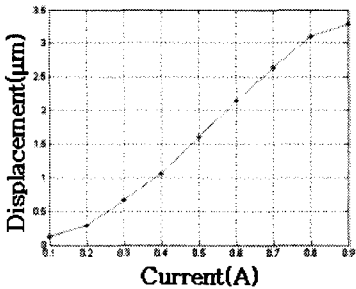


Fig. 21 The output displacement of the microactuator

Fig. 21은 마이크로 작동기의 출력변위이다. 전류가 0.1 A 부터 0.9 A 까지 0.1 A 씩 증가할 때 마이크로 작동기의 출력을 보이고 있다. 전류 0.9 A 가 입력되었을 때 마이크로 작동기의 출력변위는 약 3.3 μm 이다.

마이크로 작동기 프로토타입 1의 출력변위 결과와 비교하면, 출력변위 3.3 μm 를 얻는데 필요한 전류가 1.6 A 에서 0.9 A 로 줄어들었음을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 FEA 프로그램인 ANSYS 와 관련 논문을 근거로, Terfenol-D 를 이용한 마이크로 작동기의 개발을 상세히 기술하였다. 마이크로 작동기 프로토타입 1의 성능평가 결과로부터 마이크로 작동기가 히스테리시스를 갖고 있음을 확인하였다. 전류의 변화에 따른 변위의 변화로부터 마이크로 작동기가 0.1 A 당 250 nm 의 분해능을 가질 수 있다. 그리고, 입력전류가 1.5 A 일 경우 25 N 의 힘과 3 μm 의 변위를 발생시킴을 확인하였다.

또한, 마이크로작동기 프로토타입 2의 성능평가 결과로부터 에너지 전달 효율이 높은 마이크로 작동기를 제작했음을 보였다. 즉 3.3 μm 의 변위를 발생시킬 경우 필요한 전류가 1.6 A 에서 0.9 A 로 감소되었음을 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초 (R05-2001-00-01092-0)지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Park, Y. W. and Won, M. C., "Development of a cutting tool micropositioner using a magnetostrictive material," J. of the KSPE, Vol. 15, No. 3, pp.75-81, 1998.
2. Tabib-Azar, M., "Microactuators," Kluwer Academic Publishers 1997.
3. Butler, J. E., "Application Manual for the Design of ETREMA Terfenol-D Magnetostrictive Transducers," Edge Technologies, Inc. 1998 .