

부분적으로 자기장에 노출된 굴곡형 스프링을 이용한 대변위 전자기력 구동기

서대건* · 한 원* · 조영호*†

* 한국과학기술원 바이오및뇌공학과, 나노감응시스템연구소

Large-Displacement Electromagnetic Actuators with the Meander Springs Partially Exposed to Magnetic Field

Dae Geon Seo*, Won Han* and Young-Ho Cho*†

* NanoSensuating Systems Lab., Dept. of Bio and Brain Engineering, KAIST

(Received July 8, 2011; Revised February 23, 2012; Accepted March 1, 2012)

Key Words : Meander Spring(굴곡형 스프링), Electromagnetic Actuator(전자기력 구동기), Large-Displacement Actuator(대변위 구동기)

초록: 본 논문에서는 대변위 구동이 가능한 구동기의 설계를 위해 기존의 전자기력 구동기에 비해 낮은 스프링 상수를 갖는 굴곡형 스프링을 적용하고, 변위가 발생하는 방향으로만 로렌츠힘이 생기도록 굴곡형 스프링의 일부분만 자기장에 노출시키는 구동기를 제안한다. 굴곡형 스프링의 양쪽 부재가 자기장에 노출된 구조(prototype F)와 굴곡형 스프링의 한쪽 부재만을 자기장에 노출시킨 구조(prototype P)를 설계하고, 제작하여 실험한 결과 prototype P가 굴곡형 스프링의 양쪽 부재를 자기장에 노출시킨 prototype F의 구동성능에 비해 16.9±1.2%의 진폭 증가를 보임을 실험적으로 검증하였다. 제안된 구동기는 제한된 면적 내에서 작은 전류(<50mA)와 작은 자기장(<0.3T)으로 대변위 구동을 가능케 하여 광 스위치 또는 광 단속기 등에 응용이 가능하다.

Abstract: We discuss the design, fabrication, and testing of a large-displacement electromagnetic actuator with the meander springs partially exposed to a magnetic field. We compared two prototypes: a prototype (F) of the conventional actuator with the meander springs fully exposed to a magnetic field and a prototype (P) of the proposed actuator with the meander springs partially exposed to a magnetic field. For a 5 Hz square input current varying from 10–40 mA, P showed an increase of 16.9 ± 1.2% in the amplitude, which was greater than the increase in the case of F. Thus, we experimentally demonstrated the large-displacement actuation performance of the proposed actuator in a small volume and at low currents (below 40 mA). The proposed electromagnetic actuator can be used for low-power and large-displacement manipulation of optical switches and optical choppers.

- 기호설명 -

1. 서론

F : 로렌츠 힘
 B : 자기장
 i : 전류
 f_r : 공진주파수
 Q : 특성계수

광 스위치⁽¹⁾ 또는 광 단속기⁽²⁾ 등의 광 정보기기
에 사용되는 기존의 전자기력 구동기⁽³⁻⁶⁾는 외팔
보 형태의 스프링을 사용하여 대변위(>100μm)를
구현하기 위해 큰 자기장(>0.3T)을 가진 큰 부피
(두께>5mm)의 자석을 사용한다. 전자기력 구동기
에 있어서, 구동력과 변위의 비선형적인 거동을
보이는 외팔 보 형태의 스프링에 비해, 선형적인
거동을 보이는 굴곡형 스프링⁽⁷⁾ 구조가 대변위를
구현하는데 유리하다. 외팔 보 형태의 스프링에

† Corresponding Author, nanosys@kaist.ac.kr

비해 굴곡형 스프링 구조는 탄성이 적다는 장점이 있으나, 일정한 방향의 자기장 내에서는 스프링의 굴곡형 구조에 의한 전류 방향의 변화가 전자기력 구동기의 변위를 억제하는 영향을 초래한다.

본 논문에서는 제한된 면적 내에서 대변위 구동의 발생을 위해 탄성이 적은 굴곡형 스프링을 적용하되 변위가 발생하는 방향으로만 로렌츠 힘이 생기도록 굴곡형 스프링의 일부분만 자기장에 노출시킨 전자기력 구동기를 제안한다.

2. 설계 및 이론적 해석

본 논문에서 제안된 전자기력 구동기는 표면 자기장이 0.1T 를 띄는 두 개의 링 타입 네오디뮴(NdFeB) 영구자석과 그 사이에 위치한 실리콘 구동기로 구성된다. Figure 1 은 굴곡형 스프링 구조를 자기장에 완전히 노출 시킨 경우(Fig. 1(a))와 부분적으로 노출시킨 경우(Fig. 1(b))에 대하여 로렌츠 힘이 스프링 부재의 구동에 미치는 영향을 각각 비교하여 나타내었다. 일정한 자기장의 분포 내에서 굴곡형 스프링의 스프링 부재가 자기장에 완전히 노출된 구조에 비해 부분적으로 노출된 구조는 한쪽 방향으로만 로렌츠 힘이 발생하기 때문에 굴곡형 스프링을 적용한 전자기력 구동기의 구동변위가 증가하는 효과를 기대할 수 있다. Figure 2 에는 본 논문에서 제안하는 전자기력 구동기의 각 prototype 에 따른 상세한 구조와 동작 원리를 나타내었다. 반경이 1.3mm 인 반원형의 블레이드가 굴곡형 스프링에 연결된 구조를 가지고 있으며, 위와 아래에 위치한 두 개의 링 타입 영구자석에 의해 prototype F(Fig. 2(a))는 자기장에 굴곡형 스프링의 양쪽 부재가 모두 노출됨으로써 구동방향과 반대방향의 로렌츠 힘이 동시에 발생하는 구조를 가진다. 반면, prototype P(Fig. 2(b))는 굴곡형 스프링의 한쪽 부재만 자기장에 노출됨으로써 구동방향으로만 로렌츠 힘이 발생하는 구조를 가진다.

본 논문에서 제안하는 전자기력 구동기는 아래에서 위로 흐르는 수직한 자기장 B 사이에서 굴곡형 스프링 및 블레이드에 형성된 전기통로를 따라 전류 i 가 흐르면, 플레밍의 왼손 법칙⁽⁸⁾에 따라 로렌츠 힘 F 가 생긴다.

$$\vec{F} = \int id\vec{l} \times \vec{B} \quad (1)$$

Figure 3 에 나타난 바와 같이 입력전류에 따라 발생하는 로렌츠 힘에 의해 z 축의 자기장 방향과 굴곡형 스프링에 흘러준 전류의 방향인 y 축에 수

직한 x 축 방향으로 구동한다.

굴곡형 스프링의 양쪽 부재를 자기장에 모두 노출시킨 구조의 prototype F(Fig. 2(a))는 직경이 7.5mm 인 링 타입 네오디뮴(NdFeB) 영구자석에 의해 구동방향과 반대방향의 힘을 발생시키는 부재의 길이(l_B)가 1.45mm 로 설계되었으며, 이때 굴곡형 스프링의 부재와 부재 사이의 길이(l_p)는 1.35mm 로 설계하였다. 반면, 굴곡형 스프링의 한쪽 부재만을 자기장에 노출시킨 구조인 prototype P(Fig. 2(b))는 구동방향과 반대방향의 힘을 발생시키는 부재의 길이(l_B)가 0mm 이며, 이때 굴곡형 스프링의 부재와 부재 사이의 길이(l_p)는 2.54mm 로 설계하였다.

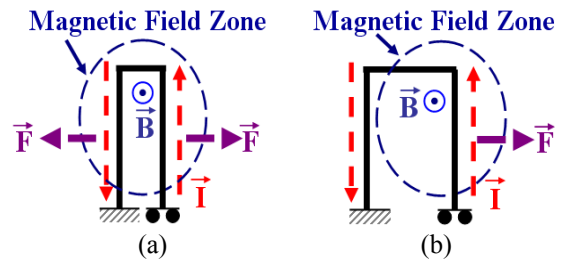


Fig. 1 Lorentz force of the meander springs in the magnetic field: (a) fully exposed to magnetic field; (b) partially exposed to magnetic field; \vec{B} , \vec{i} , and \vec{F} are magnetic field, input current, and Lorentz force, respectively

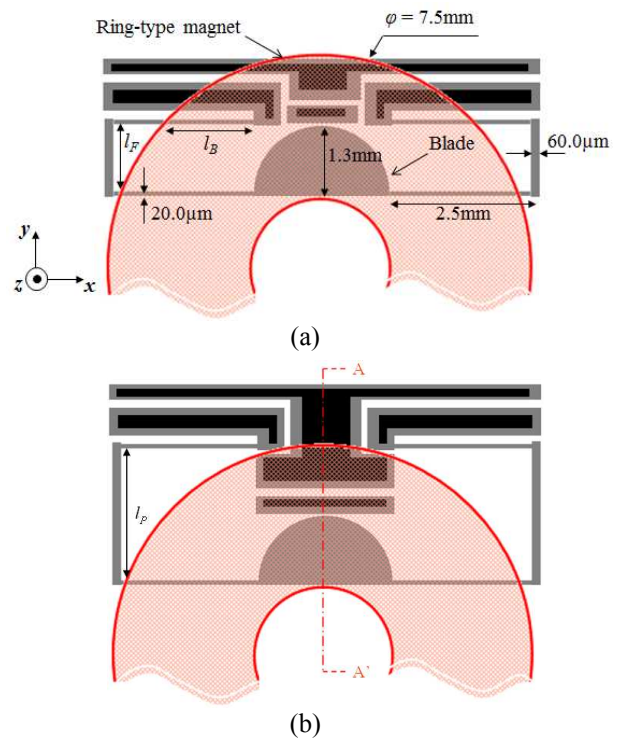


Fig. 2 Schematic view of the electromagnetic actuators: (a) prototype F; (b) prototype P

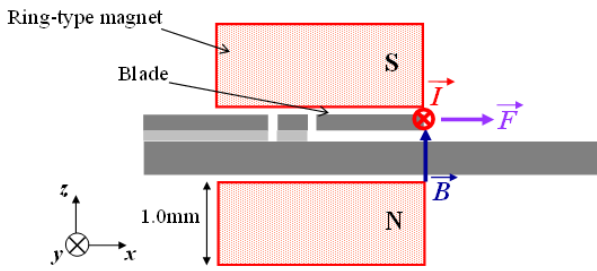
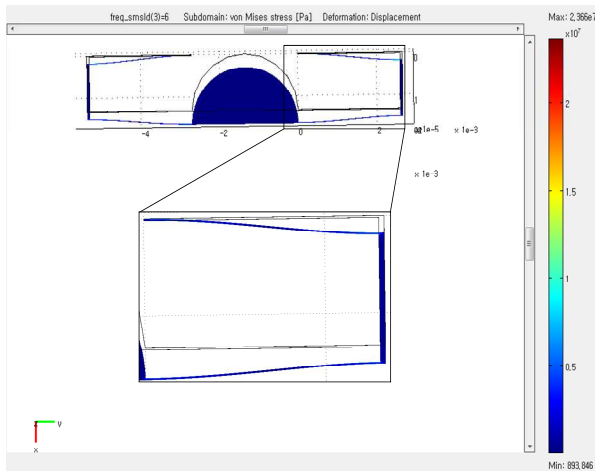
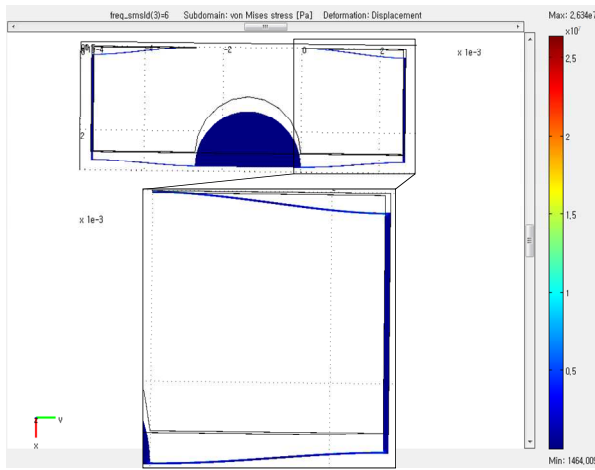


Fig. 3 Cross-section view across A-A' in Fig. 2(b)



(a)



(b)

Fig. 4 Stress and deflection analysis of the prototypes at 40mA input current: (a) prototype F; (b) prototype P

두 prototype 의 경우 모두 1.3mm 의 블레이드 반경과 7.5mm 의 영구자석 외경을 고려하여 구동력을 발생시키는 스프링 부재의 길이를 2.5mm 로 설계하였으며, 폭과 두께는 SOI(Silicon On Insulator) 웨이퍼 상층 실리콘의 식각 공정 시 안정성을 고려하여 각각 20 μ m 로 설계하였다. 또한, 굴곡형 스프

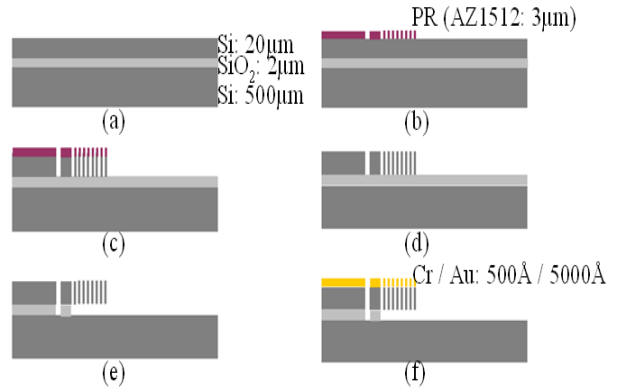
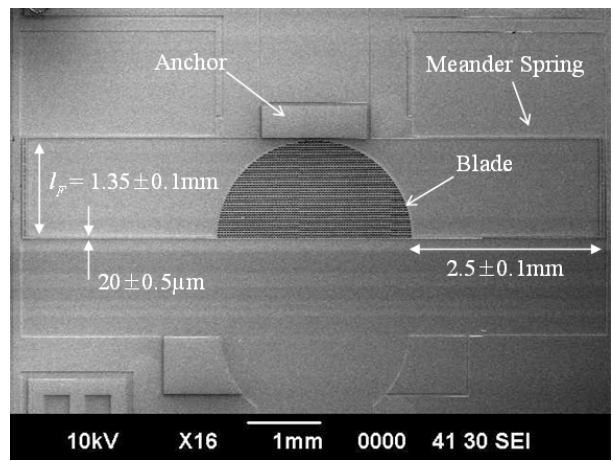
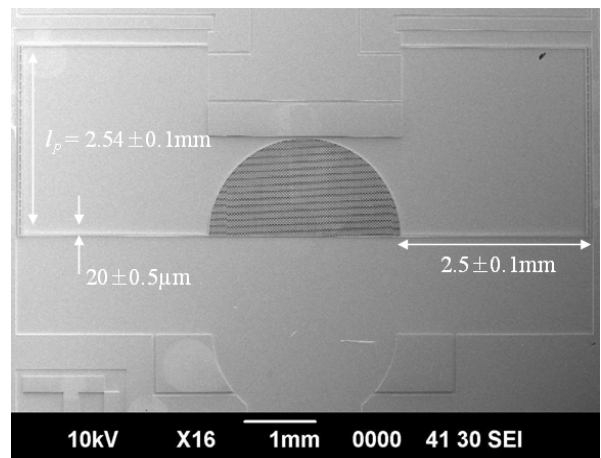


Fig. 5 Fabrication process showing the cross-section of A-A' in Fig. 2(b): (a) starting SOI wafer; (b) PR patterning; (c) Si DRIE; (d) PR removal & device dicing; (e) device release; (f) Cr/Au layer(500Å/5000Å) sputtering for electrode



(a)



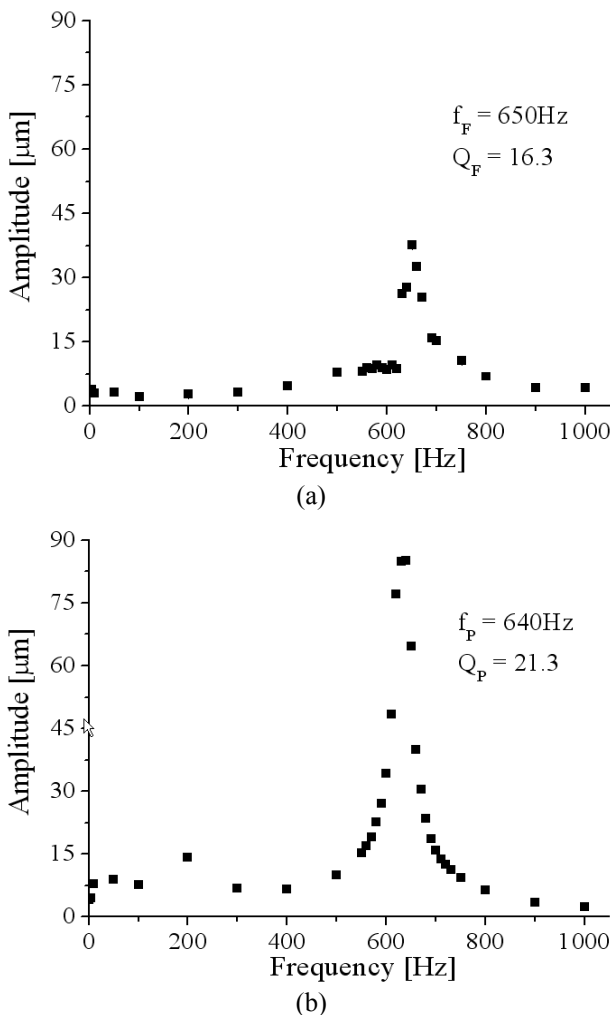
(b)

Fig. 6 SEM photograph of the fabricated prototypes: (a) prototype F; (b) prototype P

링 구조의 부재와 부재를 연결하는 연결부재의 폭을 60 μ m 로 설계함으로써 전자기력 구동기의 구동

Table 1 Designed and measured dimensions of the prototypes shown in Fig. 2

Geometric characteristics	Dimensions	
	Designed	Measured
Magnet diameter	7.5mm	7.5±0.1mm
Aperture diameter	2.5mm	2.5±0.1mm
Magnet thickness	1.0mm	1.0±0.1mm
Blade radius	1.3mm	1.3±0.1mm
Span beam width	20.0μm	20.0±0.5μm
Connector beam width	60.0μm	60.0±0.5μm
Length of span beam inducing forward magnetic force	2.5mm	2.5±0.1mm
Length of connector beam in prototype F(l_F)	1.35mm	1.35±0.1mm
Length of connector beam in prototype P(l_P)	2.54mm	2.54±0.1mm

**Fig. 7** Frequency response of the prototypes at 5mA input current: (a) prototype F; (b) prototype P

시 연결부재의 굽힘 현상이 발생하지 않도록 설계하였다. Comsol Multiphysics 를 이용한 FEM 해석을 통하여 각 prototype 의 구동 시 굴곡형 스프링에

발생하는 응력 및 변형을 해석한 결과를 Figure 4 에 나타내었으며, 두 prototype 모두의 경우에서 굴곡형 스프링의 연결 부재의 굽힘 변형 없이 거동함을 확인할 수 있었다.

3. 제작 공정

Figure 5 는 제안된 전자기력 구동기의 공정 순서도이다. 상층 실리콘 20μm 를 갖는 SOI 웨이퍼(Fig. 5(a)) 전면에 Etch Mask 를 형성하기 위하여 AZ1512 PR(Photo Resist)을 이용하여 패터닝(Fig. 5(b))한다. 전면에 형성된 PR Etch Mask 를 이용하여 전면 실리콘을 DRIE (Deep Reactive Ion Etching)로 패터닝(Fig. 5(c))하여 전자기력 구동기의 구조를 형성하게 된다. DRIE 후에는 Etch Mask 로 사용된 PR 을 제거하고 각각의 소자를 dicing(Fig. 5(d))한다. 소자의 release 를 위해 Buried-Oxide 는 BOE (Buffered Oxide Etchant)에 의해 제거(Fig. 5(e))하며, 전기통로 형성을 위해 Cr/Au 를 증착(Fig. 5(f))한다. Figure 6 은 제작된 구동기의 각 prototype 에 따른 SEM (Scanning Electron Microscope) 사진이며, Table 1 에 제작된 전자기력 구동기의 측정치수를 정리하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 주파수 응답

표면 자기장 0.1T 를 띄는 두 개의 링 타입 네오디뮴(NdFeB) 영구자석 사이에 제작된 실리콘 구동기를 위치시키고, 입력전류 5mA 의 사각파를 인가하여 LDV(Laser Doppler Vibrometer)를 이용하여 블레이드의 주파수 응답을 측정하였다.

Figure 7 은 각 prototype 에 따른 5Hz 부터 1kHz 까지의 주파수 응답 측정 결과를 보여준다. 측정된 주파수 응답 결과로부터 prototype F(Fig. 7(a))에서 650 Hz 의 공진주파수(f_r)와 16.3 의 Q 값을 측정하였고, prototype P(Fig. 7(b))에서는 640Hz 의 공진주파수(f_r)와 21.3 의 Q 값을 측정하였다.

4.2 정상상태 응답

각 prototype 에 따라 입력 주파수 5Hz 의 사각파를 인가하여 입력 전류에 따른 블레이드의 정상상태 응답을 측정하였다. Table 2 에 입력 전류 40mA 의 5Hz 사각파 입력 주파수에서의 정상상태 응답을 각각의 prototype 에 따른 이론치와 실험치를 정리하였다. 측정결과, prototype P(30.49±0.36μm)가 prototype F(26.02±0.65μm)에 비해 정상상태 응답이 17.2% 증가하는 것을 확인하였다.

Table 2 Amplitude of the prototypes at 40mA square input current of 5Hz

Prototypes	Amplitudes	
	Theoretical	Experimental
F	28.98 μ m	26.02 \pm 0.65 μ m
P	32.60 μ m	30.49 \pm 0.36 μ m

Table 3 Nonlinearity of the prototypes

Prototypes	Nonlinearity*	
	Theoretical	Experimental
F	0.02%	3.50%
P	0.06%	3.08%

*The nonlinearity is the ratio of the maximum amplitude deviation from the linear fit to the total amplitude range.

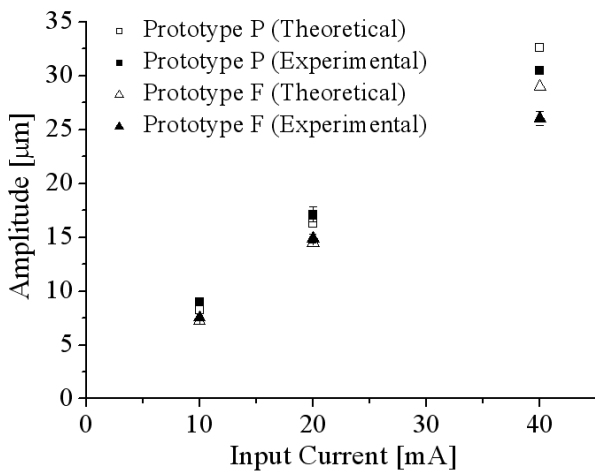


Fig. 8 Amplitude of the prototypes for varying square input current at 5Hz

Figure 8 에서 입력전류를 10mA 에서 40mA 로 변화시키면서 5Hz 사각파 입력 주파수에서의 각각의 prototype 에 대한 블레이드의 정상상태 응답을 나타내었다. Comsol Multiphysics 를 이용한 FEM 해석 결과를 통해 5Hz 의 입력 주파수와 10~40mA 의 입력 전류에서 굴곡형 스프링의 양쪽 부재를 자기장에 노출시킨 구조인 prototype P 가 굴곡형 스프링의 한쪽 부재만을 자기장에 노출시킨 구조인 prototype F 에 비해 진폭이 12.4~13.0% 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 제작된 각 prototype 의 측정을 통하여 굴곡형 스프링의 한쪽 부재만을 자기장에 노출시킨 구조(prototype P)가 굴곡형 스프링의 양쪽 부재를 자기장에 노출시킨 구조(prototype F)에 비해 진폭이 16.9 \pm 1.2% 증가하는 것을 확인하였다.

측정을 통한 실험치는 이론치와 최대 오차를

19.8% 내에서 일치한다. 오차의 원인은 실험에서 제작된 실리콘 구동기와 위 아래에 위치한 링 타입 영구자석의 정렬 시에 발생하는 불균일한 자기장의 분포에 의해서 발생하는 오차로 인해 \pm 0.05 T 정도의 자기장 변화가 예측되며, 이것으로 발생하는 오차는 \pm 30% 이내 이다.

Table 3 에서는 측정된 진폭결과를 바탕으로 본 논문에서 제안된 굴곡형 스프링의 비선형도를 측정하여 나타내었다. Prototype F 와 Prototype P 의 모두에서 비선형도가 3.5% 이내로 측정되어 본 논문에서 설계한 굴곡형 스프링이 선형적인 거동을 나타내었음을 보여준다.

5. 결론

본 연구에서는 제한된 면적 내에서 낮은 입력 전류로 대변위 구동이 가능한 구동기의 설계를 위해 기존의 전자기력 구동기에 비해 낮은 스프링 상수를 갖는 굴곡형 스프링을 적용하고, 변위가 발생하는 방향으로만 로렌츠힘이 생기도록 굴곡형 스프링의 일부분만 자기장에 노출시키는 구동기를 제안하였다. 굴곡형 스프링의 양쪽 부재를 자기장에 노출된 구조(prototype F)와 굴곡형 스프링의 한쪽 부재만을 자기장에 노출시킨 구조(prototype P)를 설계하고, 제작하여 굴곡형 스프링의 한쪽 부재만을 자기장에 노출시킨 prototype P 가 굴곡형 스프링의 양쪽 부재를 자기장에 노출시킨 prototype F 의 구동 성능에 비해 16.9 \pm 1.2% 진폭 증가를 보임을 실험적으로 검증하였다. 제안된 구동기는 제한된 면적 내에서 작은 전류(<50mA)와 작은 자기장(<0.3T)으로 대변위 구동을 위해 탄성이 작은 굴곡형 스프링의 구동 성능 및 적용 가능성을 실험적으로 검증하여 광 스위치 또는 광 단속기 등의 광 정보기기에 응용이 가능하다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부/한국과학재단 중견연구자지원사업(도약과제)인 “생체모사 인간감응시스템” (과제번호 20110016502)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Han, J. S., Ko, J. S., Kim, Y. T. and Kwak, B. M., 2002, “Parametric Study and Optimization of a Micro-Optical Switch with a Laterally Driven Electromagnetic

- Microactuator,” *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 12, No. 2, pp. 939~947.
- (2) Li, L. and Uttamchandani, D., 2004, “Design and Evaluation of a MEMS Optical Chopper for Fibre Optic Applications,” *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, Vol. 151, No. 2, pp. 77~84.
- (3) Park, S. and Hah, D., 2008, “Pre-Shaped Buckled-Beam Actuators: Theory and Experiments,” *Sensor and Actuators A*, Vol. 148, pp. 186~192.
- (4) Ko, J. S., Lee, M. L., Lee, D. -S., Choi, C. A. and Kim, Y. T., 2002, “Development and Application of a Laterally Driven Electromagnetic Microactuator,” *Applied Physics Letters*, Vol. 81, No. 3, pp. 547~549.
- (5) Cao, A., Kim, J. and Lin, L., 2007, “Bi-Directional Electrothermal Electromagnetic Actuators,” *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 17, No. 5, pp. 975~982.
- (6) Holzer, R., Shimoyama, I. and Miura, H., 1995, “Lorentz Force Actuation of Flexible Thin-Film Aluminum Microstructures,” *IEEE*, pp. 156~161.
- (7) Lishchynska, M., Cordero, N., Slattery, O. and O’Mahony, C., 2006, “Spring Constant Models for Analysis and Design of MEMS Plates on Straight or Meander Tethers,” *Sensor Letters*, Vol. 4, No. 2, pp. 200~205.
- (8) Brauer, J. R., 2006, *Magnetic Actuators and Sensors*, John Wiley & Sons, Inc.