

방사형 자기장 내의 전기도금된 평면코일을 이용한 전자기형 마이크로 액추에이터

류지철* · 강태구* · 조영호**
(1999년 8월 26일 접수)

Electromagnetic Microactuators with the Electroplated Planar Coil Driven by Radial Magnetic Field

Ji-Chul Ryu, Tae Goo Kang and Young-Ho Cho

Key Words: Electromagnetic Microactuator(전자기형 마이크로 액추에이터), Radial Magnetic Field
(방사형 자기장), Twin Magnets(두 개의 자석), Electroplating(전기도금)

Abstract

This paper presents an electromagnetic microactuator using the copper coil electroplated on the p+silicon diaphragm. The microactuator generates a vertical motion of the diaphragm using the radial components of the magnetic field on the coil plane. In order to guide and concentrate the magnetic field in the radial direction, we propose a new actuator structure with twin magnets. The microactuator shows a values of resonant frequency and quality factor in the ranges of $10.51 \pm 0.22\text{kHz}$ and 46.6 ± 3.3 , respectively. The twin magnet microactuator generates the maximum peak-to-peak amplitude of $4.4 \mu\text{m}$ for the AC rms current of 26.8mA, showing 2.4 times larger amplitude than the single magnet microactuator.

1. 서 론

최근 극소량의 유체 제어 및 분석시스템 구성을 위하여 마이크로펌프 및 마이크로밸브 등 MEMS 기술을 이용한 미소 유체소자⁽¹⁻¹⁶⁾의 개발이 진행되어 왔다. 이러한 미소 유체소자에서의 미소 유동의 발생 및 제어를 위해서는 미소 유체 이송용 마이크로 액추에이터가 필요하며, 그 구동원리로서는 열공압형,⁽²⁻⁴⁾ 정전형,⁽⁵⁻⁷⁾ 압전형,⁽⁸⁻¹⁰⁾ 열팽창형,⁽¹¹⁻¹²⁾ 전자기형⁽¹³⁻¹⁶⁾ 등이 사용되어 왔다.

본 논문에서는 생화학 물질의 분석을 위한 바이오칩 구성을 위하여, 미소 생화학적 유체의 이송을 위한 마이크로 액추에이터를 연구하였다. 생화학적 유체의 이송을 위한 구동원리로서 열공압 및 열팽창 방식과 정전 방식은 각각 고온 및 고전계에 의한 이송유체의 손상을 초래할 우려가 있어 배제하였으며, 압전 구동방식에 비해 구동속도는 다소 느리지만 큰 진폭을 얻을 수 있는 전자기형 방식⁽¹³⁻¹⁶⁾을 채택하였다.

지금까지 MEMS기술을 이용한 미소유동 발생 및 제어용 전자기형 액추에이터는 구조특성상 다음과 같이 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째 부류는 1991년 Wagner 등⁽¹³⁾이 제안한 자석이동 방식으로서, 박막에 부착된 자석(NdFeB) 주위에 평면형 코일을 설치하여 유체 이송을 위한 박막 구동을 발생시키며, 1993년 Yanagisawa 등⁽¹⁴⁾은 이러한 구조를 이용하여 미소밸브를 제작하였다.

* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과
마이크로머신 및 마이크로시스템 연구실
E-mail : mems@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3038 FAX : (042)869-3050

또 다른 부류는 코일이동 방식으로서, 1998년 Meckes 등⁽¹⁶⁾이 한 개의 영구자석을 사용하여 박막 위에 제작된 평면 코일을 구동시키는 액추에이터(Fig. 1(a))를 제안하였다.

지금까지 제안된 평면코일 구동방식의 마이크로 액추에이터⁽¹⁵⁻¹⁶⁾는 (Fig. 1(a))에 도시한 바와 같이 평면코일을 자석과 평행한 위치에 두고, 자석에서 발생하는 자기장 중 평면 코일의 반경방향의 성분을 이용하여 자석면과 수직인 방향으로의 평면코일 구동을 얻고자 하였다. 한편, 본 논문에서는 평면코일의 구동력 증대를 위하여 (Fig. 1(b))와 같이 평면코일 양쪽에 두개의 자석을 대칭적으로 배치함으로써 평면코일면 상의 자기장이 평면코일의 반경방향으로 집중되도록 유도하였다. 따라서 본 논문에서 제안하는 대칭자석을 사용한 전자기형 마이크로 액추에이터는 기존의 구조에 비해 같은 전력 하에서 보다 큰 구동력을 발생시킬 수 있다는 장점을 지니고 있다.

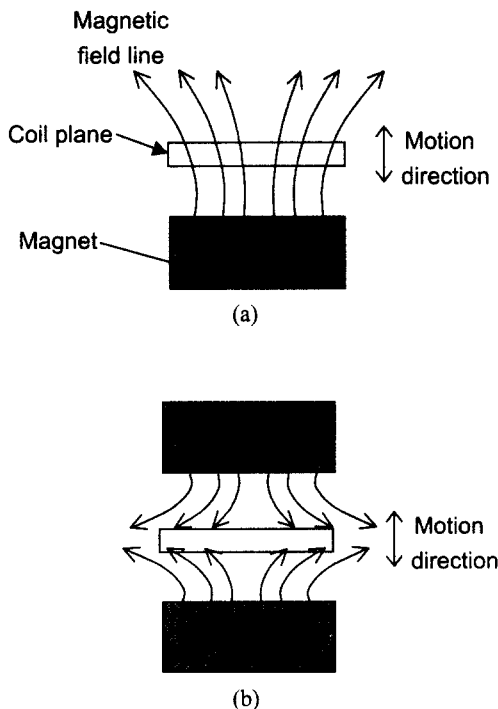


Fig. 1 Electromagnetic microactuators driven by radial magnetic field: (a) Conventional structure with single magnet; (b) Presented structure with twin magnets

2. 이론 및 해석

2.1 전자기력 분석

Fig. 2는 본 논문에서 제안하는 전자기형 액추에이터의 개념도이다. 두개의 자석에 의해서 형성된 자기장내에서 나선형 평면코일에 전류가 흐르게 되면, 자석면 혹은 실리콘 박막에 수직인 방향으로 전자기력이 발생하며 이는 박막의 구동력으로 사용된다.

자기장 \vec{B} 내에 있는 코일에 전류 i 를 공급할 경우 발생하는 전자기력 \vec{F} 는 식 (1)로 표시된다.

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

이때 발생하는 전자기력 중 박막에 수직인 방향(z-direction)의 성분만이 박막을 구동하는데 사용되며, 평면코일 반경방향의 자기장분포가 축대칭이므로 실제 유체 이송에 사용되는 박막 구동력은 평면코일 중심에서부터의 반경방향 거리의 함수가 된다.

구동력 계산의 단순화를 위해서 나선형 모양의 코일(Fig. 2)을 동일한 회전수(n)의 동심원 코일의 집합으로 가정하면, 수직방향의 구동력은 아래 식 (2)와 같이 표현된다.

$$F_{total} = \sum_{k=1}^n F_k = \sum_{k=1}^n i(2\pi r_k) B_k \quad (2)$$

한편, 단순화된 동심원 모델의 코일 길이 l 와 실제 나선형 코일의 길이 l_a 는 각각 다음과 같이 표현된다.

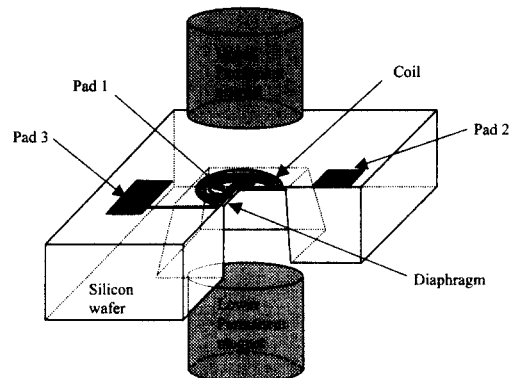


Fig. 2 Perspective view of the presented electromagnetic microactuator where the radial magnetic field is guided and concentrated by twin magnets

$$l_s = \sum_{k=1}^n 2\pi r_k = \frac{\pi}{p} [r_o^2 - r_i^2 + p(r_o + r_i)] \quad (3a)$$

$$l_a = \int r d\theta = \int_{\theta}^{\theta_0} \frac{p}{2\pi} \theta d\theta = \frac{\pi}{p} (r_o^2 - r_i^2) \quad (3b)$$

여기서, p , n , r_i 와 r_o 는 각각 코일의 피치, 코일의 회전수 및 코일의 안쪽 반지름과 바깥쪽 반지름을 나타내며, θ 는 코일의 각도를 나타낸다.

식 (1)을 기준으로 식 (3a)와 (3b)를 비교해 보면, 단순화된 동심원 코일 모델의 경우가 실제 나선형 코일에 작용하는 전자기력보다 크게 예측된다는 것을 알 수 있다. 이 때, 방사형 자기장의 분포가 반경 방향에 대해 균일하다고 가정한다면, 두 가지 모델의 전자기력의 차이는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{error} = \frac{l_s - l_a}{l_a} \times 100\% = -p \frac{1}{r_o - r_i} \times 100\% \quad (4)$$

2.2 정적 구동 분석

정방형 박막에 균일한 분포하중이 가해진 경우, 그 박막의 변형은 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$u = C \sin \frac{\pi x}{a} \cos \frac{\pi y}{2a} \quad (5a)$$

$$v = C \sin \frac{\pi y}{a} \cos \frac{\pi x}{2a} \quad (5b)$$

$$w = w_0 \cos \frac{\pi x}{2a} \cos \frac{\pi y}{2a} \quad (5c)$$

여기서, C 는 상수이며, u , v 및 w 는 각각 박막 위의 (x, y) 점에서의 x , y 및 z 방향으로의 변형량이다. 또, a 는 정방형 박막의 한 변의 길이의 반이며, w_0 는 박막의 z 방향으로의 최대 변형량을 나타낸다. 위의 (식 5)와 같이 가정된 변형에 대해 가상 일의 원리를 적용하여 박막의 하중과 변형과의 관계를 구한 다음, 유한요소해석을 통해서 계수를 보상하는 방법을 사용하여 사각박막의 하중과 변형과의 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.⁽¹⁷⁾

$$P = 3.41 \frac{t \sigma_0 w_0}{a^2} + 1.37(1.446 - 0.427\nu) \frac{E}{1-\nu} \frac{t w_0^3}{a^4} \quad (6)$$

여기서, P 는 균일하게 작용하는 분포하중을 나타내며, t 는 박막의 두께를, σ_0 는 잔류응력을, w_0 는 박막의 중심에서의 변형을, a 는 정방형 박막 길이의 반을, E 는 탄성 계수를, 그리고, ν 는 포아송의 비를 각각 나타낸다.

본 논문에서는 박막의 정적구동을 예측하기 위해 식 (6)의 분포하중 P 를 식 (2)에서 구한 박막 전체의 전자기력을 박막면적으로 나눈 값으로부터 가정하고, 박막 위의 코일이 박막의 변형형태에 영향을 미치지 않는다고 가정하였다.

2.3 동적 구동 분석

박막의 공진 주파수는 다음과 같은 3가지 방법에 의해서 각각 계산될 수 있다.

먼저 기존의 박막 이론으로부터 각 변이 고정된 박막의 제 1 공진 주파수를 다음과 같이 구할 수 있다.⁽¹⁸⁾

$$f = \frac{\lambda}{2\pi(2a^2)} \left[\frac{Et^3}{12\gamma(1-\nu^2)} \right]^{1/2} \quad (7a)$$

여기서, λ 는 표준화된 공진 주파수로서, 고정된 사각박막의 경우에 35.99로 정의되어 있으며, ν 는 박막의 단위 면적당 질량을 나타낸다.

식 (7a)는 평면 하중 또는 잔류응력이 없는 고정된 사각박막의 경우에만 적용할 수 있는 식이며, 여기에 평면 하중 또는 잔류응력을 고려할 경우 공진주파수는 다음과 같이 표시된다.⁽¹⁸⁾

$$f = \left[f_{\text{Non-plane}}^2 + \frac{NJ}{2\gamma(2a)^2} \right]^{1/2} \quad (7b)$$

여기서, N 은 박막의 한 변의 길이 당 가해지는 평면하중을 나타내며, J 는 경계조건과 모우드수에 의해 결정되는 무차원 상수이며, 고정단이며 제 1 모우드인 경우에 1.248인 것으로 알려져 있다.

한편, Rayleighs의 방법을 사용하면 운동에너지와 위치에너지의 개념으로부터 박막의 공진 주파수를 구할 수 있다. 여기서, 운동에너지는 박막의 질량과 관계가 있는 값이며, 위치에너지는 변형에너지와 관계된 값이다. 즉, 자중에 의한 정적 변형에 근거한 변형에너지로부터⁽¹⁸⁾ 박막의 공진주파수는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_s}} \quad (7c)$$

여기서, g 와 δ_s 는 각각 중력 가속도와 자중에 의한 정적 변형을 나타내며, Jones⁽¹⁹⁾와 Johns⁽²⁰⁾는 얇은 박막의 제 1 공진 주파수에 대해서 다음과 같이 수정된 식을 제안하였다.

$$f = \frac{1.277}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_s}} \quad (7d)$$

한편, 감쇠가 매우 작은 경우($\zeta < 0.05$)에, 정적 변형 δ_{st} 와 공진점에서의 동적 진폭 X 의 비는 특성인자(Q-factor)와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\left(\frac{X}{\delta_{st}}\right) = Q \quad (8)$$

본 논문에서는 정적변형과 특성인자의 값을 측정하여 식 (8)에 대입함으로써 공진점에서의 동적 응답특성을 예측하였다.

3. 설계

실리콘 박막재료의 기계적 강도와 붕소 확산 공정의 공정 조건을 고려하여 박막의 두께는 $5 \mu\text{m}$ 로 결정하였다. 한편, 실리콘 박막을 사용하는 마이크로펌프에 관한 이전의 연구⁽⁶⁻¹⁰⁾를 살펴보면, 챔버의 부피와 한번의 행정(stroke)에서 펌핑되는 유체의 부피 사이에는 $0.625 \times 10^{-3} \sim 6.25 \times 10^{-3}$ 범위의 비를 가지는 것을 알 수 있으며, 이 비는 실리콘 박막의 크기에 관계되어 있다는 것을 고려하여, 박막 한 변의 길이의 반인 a 를 2mm 로 결정하였다.

또한, 박막의 크기가 $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ 인 점을 고려하여, 자석의 크기는 지름이 5mm , 높이가 5mm 로 각각 결정하였으며, 박막의 변위를 측정하기 위하여 (Fig. 2)의 상부 자석에 반지름이 1mm 인 구멍을 내었다.

다음으로, 상부 자석의 구멍크기에 맞도록, 코일의 안쪽반지름은 1mm 로 하였다. 코일의 바깥쪽 반지름은 사각박막의 변형형태가 거의 원형을 유지할 수 있도록 1.5mm 로 결정하였다. 전체 코일의 길이를 최대로 하기 위해서, 코일의 폭과 코일과 코일 사이의 간격을 예멸전 마스크(emulsion mask)의 최소 선폭인 $25 \mu\text{m}$ 로 결정하였다. 또한, 코일의 단면을 최대로 하기 위해서, 재현성 있는 전기도금 구조물의 두께인 $30 \mu\text{m}$ 를 코일의 높이로 결정하였다.

4. 제조 공정

본 논문에서 제안하는 전자기형 마이크로 액추에이터(Fig. 2)는 p+실리콘 박막 위에 평면형 구리코일이 전기도금된 코일판과 한 쌍의 영구자석으로 구성되어 있다.

Fig. 3은 p+실리콘 박막과 코일의 제조 공정을 나타낸 것으로, $520 \mu\text{m}$ 두께의 4인치 (100)방향의 실리콘웨이퍼를 기판으로 사용하였다. 먼저, Fig. 3(a)에서는 1100°C 에서 9시간 동안 붕소 확산 공정을 수행함으로써 p+실리콘 박막을 정의하였으며, 전기적 절연층과 뒷면 etching공정의 마스크층으로 사용하기 위하여 2500 \AA 두께의 LPCVD 실리콘 질화막을 형성하였다. 다음으로, Fig. 3(b)에서는 $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ 의 실리콘 박막형성을 위한 식각창(etch window)을 형성하기 위하여, RIE 공정을 이용하여 실리콘 질화막을 패터닝하였다. Fig. 3(c)에서는 전기도금을 위한 seed layer로써 $200 \text{ \AA} / 1200 \text{ \AA}$ 두께의 Cr/Cu층을 형성하였으며, Fig. 3(d)에서는 두꺼운 PR을 형성한 후 사진작업을 거쳐서 고단면비 전기도금 몰드(mold)를 형성하였다. 다음으로, 구리를 전기도금한 후 seed layer인 Cr/Cu를 식각하고, EDP용액을 사용하여 뒷면에서부터 실리콘을 식각함으로써, Fig. 3(e)와 같은 사각박막과 코일의 제조공정을 완료하였다. Fig. 4는 제작된 마이크로 액추에이터를 위에서 본 사진이다.

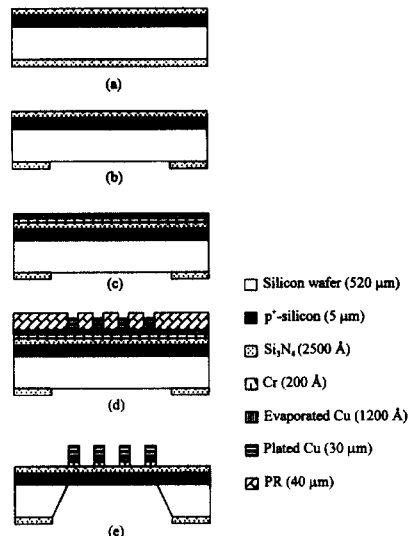


Fig. 3 Fabrication process for the electroplated planar coil on the diaphragm: (a) boron doping and Si_3N_4 deposition; (b) RIE of Si_3N_4 for etch window opening; (c) Cr/Cu seed layer evaporation; (d) thick PR patterning and Cu backing; (e) Cr/Cu seed layer etching and backside silicon etching

5. 성능 예측

제작된 구조의 크기를 측정하고 측정된 치수로 부터 마이크로 액추에이터의 공진 주파수와 전자기력 및 정적 변형을 예측하였다. 먼저, 식 (7a), (7b)와 (7d)로부터 마이크로 액추에이터의 공진 주파수 예측 결과를 Table 1에 정리하였다.

평면 코일에 작용하는 자기장의 분포를 분석하기 위하여 상용 전자기 해석 프로그램인 Maxwell 3D Field Simulator를 이용하였다. Fig. 5에 도시한 바와 같이 자석을 한 개 사용한 경우(S0), 구멍이 없는 자석을 두 개 사용한 경우(T0), 두 개의 자석 중 한 개의 자석에만 구멍이 있는 경우(T1) 등 서로 다른 3가지 형태의 자석배치에 대하여 코일 반경방향의 자기장 크기를 분석한 결과를 Fig. 6에 도시하였으며, 영구자석의 세기는 제작에서 사용되어질 자석의 세기와 같은 0.5 Tesla를 사용하였다.

Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이, 구멍이 없는 두개의 자석을 사용한 경우(T0)가 세 경우 중에서 가장 큰 반지름 방향의 자기장을 형성한다. 특히, T0의 경우에 반지름 방향 자기장의 세기는 한 개의 자석을 사용한 경우(S0)에 비해 2배 이

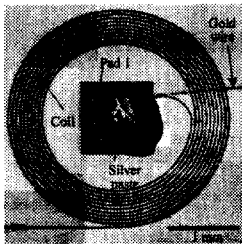


Fig. 4 Top view of the fabricated microactuator, where the gold wire provides an electrical interconnection

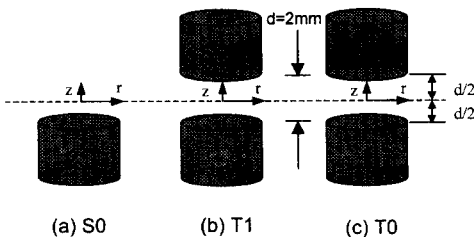


Fig. 5 Magnet compositions for radial magnetic field on the coil plane at $z=0$: (a) single magnet; (b) twin magnets with single hole; (c) twin magnets without hole

상 큰 것으로 나타났다.

평면코일에 작용하는 전자기력은 Fig. 6의 자기장과 식 (2), (3a)를 사용하여 예측하였으며, 한 개의 자석을 사용한 경우(S0)에는 9.554i mN, 두 개의 자석 중 한 개의 자석에만 구멍이 있는 경우(T1)에는 14.158i mN, 구멍이 없는 두 개의 자석을 사용한 경우(T0)에는 19.145i mN으로 각각 계산되었다. 여기서 i 는 코일에 흐르는 전류를 나타내며, 코일에 흐르는 전류에 대한 전자기력의 크기를 Fig. 7에 나타내었다. 또한, 실제 나선형 코일을 단순화한 동심원 코일 모델을 사용함으로써 생기는 오차는 식 (4)로부터 5%임을 알 수 있다.

Table 1 Estimated natural frequencies of the coil diaphragm

Loading conditions	Natural frequency
Without in-plane loads	0.927 kHz
With in-plane loads	13.9 kHz
With static deflections	13.1 kHz

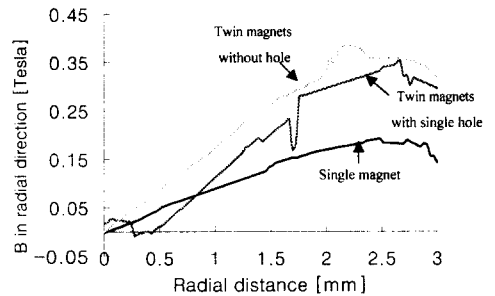


Fig. 6 The magnitude of the radial magnetic field along the radial direction on the plane

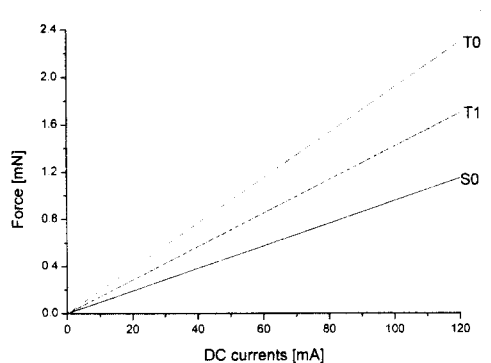


Fig. 7 Estimated electromagnetic force for varying DC coil current

6. 실험 결과 및 토의

Fig. 8과 같은 실험장치를 이용하여 제작된 마이크로 액추에이터의 응답특성을 측정하였다. Fig. 5의 S0과 T1의 두 가지 자석배치에 대하여 제작된 마이크로 액추에이터의 전자기 구동 진폭을 측정하였으며, 측정은 민감도(sensitivity) $20 \mu\text{m/V}$, 분해능(resolution) $0.08 \mu\text{m}$ 로 행하여졌다.

Fig. 9는 자석배치 S0의 경우 전자기형 마이크로 액추에이터의 주파수 응답특성을 나타내고 있으며, 이로부터 S0의 공진 주파수와 특성인자(Q-factor)는 각각 $10.51 \pm 0.06\text{kHz}$ 와 45.9 ± 2.1 임을 알 수 있다. 또, T1의 경우에는 각각 $10.51 \pm 0.22\text{kHz}$ 와 46.6 ± 3.3 으로 측정되었으며, 결과를 표 2에 정리하였다.

Table 2 Electromagnetic actuation characteristics of the fabricated microactuator

Magnet composition	Resonant frequency [kHz]	Quality factor	Peak-to-peak amplitude at resonance [μm]
S0	10.51 ± 0.06	45.9 ± 2.1	1.8 *
T1	10.51 ± 0.22	46.6 ± 3.3	4.4 **

* measured at the rms AC current of 25.5 mA

** measured at the rms AC current of 26.8 mA

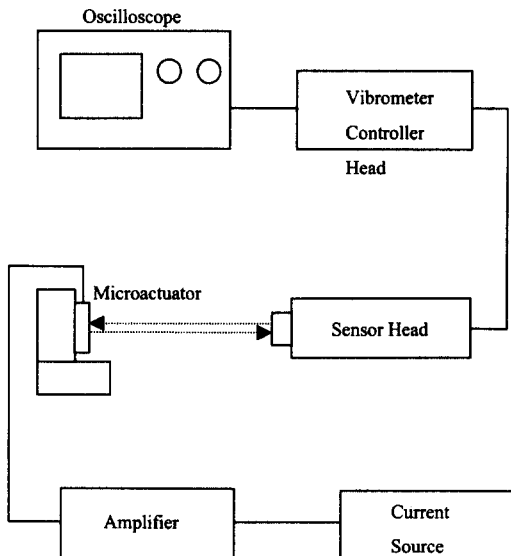
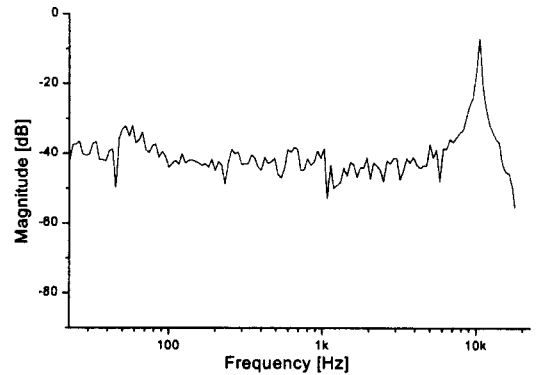
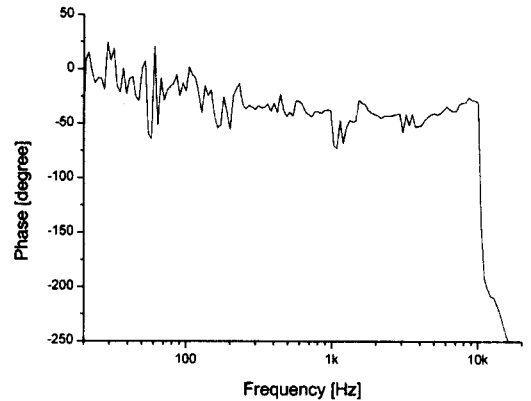


Fig. 8 Instrumental set-up for a measurement of the dynamic response of the microactuator

S0와 T1의 자석배치의 경우, 코일에 흐르는 전류의 세기를 변화시켜 가면서 마이크로 액추에이터의 진폭을 각각 측정하였으며, Fig. 10과 11은 전류 세기에 따른 구동 진폭의 변화를 고정된 주파수 10.6kHz에서 측정한 결과이다. S0 (Fig. 10)과 T1 (Fig. 11)을 비교해 보면, S0이 T1보다 더 큰 진폭을 발생하는 것으로 측정되었다. T1의 경우 자기장 분포를 시뮬레이션(simulation)해 본 결과(Fig. 12), 이러한 현상은 자석의 구멍으로 인해 코일이 구멍이 있는 자석 쪽으로 갈수록 자기장의 세기가 급격히 줄어드는 데서 기인한 것으로 분석할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 9 Frequency response function of the electromagnetic actuator: (a) amplitude response; (b) phase response

또한 Fig. 12에서 알 수 있는 바와 같이, 두 자석의 가운데에서부터 구멍이 없는 아래쪽 자석 (Fig. 5(b)) 쪽으로는 자기장의 세기가 일정하다는 점에 근거하여, 구멍이 없는 아래쪽 자석의 위치를 박막 쪽으로 - Fig. 5(b)의 아래쪽 자석을 양의 z 방향으로 - $450\ \mu\text{m}$ 만큼 이동시킨 다음 다시 실험을 수행하였다. 이 실험으로부터 Fig. 13에 나타나 있는 바와 같이, T1이 S0보다 AC 전류 26.8mA에서 2.4배정도 더 큰 진폭을 나타냄을 확인하였다.

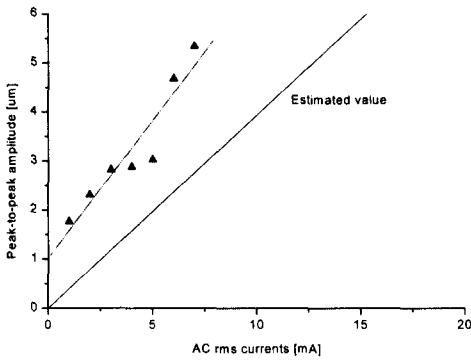


Fig. 10 Measured and estimated peak-to-peak amplitude of the microactuator for varying AC coil current at the resonant frequency of 10.6kHz for the case of the single magnet (S0)

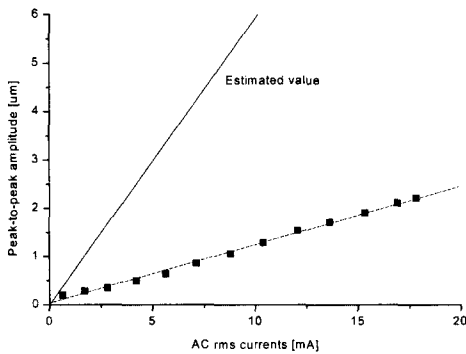


Fig. 11 Measured peak-to-peak amplitude of the microactuator for the varying AC coil currents at the resonant frequency of 10.6kHz for the case of the twin magnets with single hole (T1)

한편, Fig. 10, 11, 13에 나타나 있는 estimated value는 2장에서 설명한 방법으로 구한 값들이며, 실험값과 차이가 나는 이유는 첫째, 예측값은 전자기력의 분포를 균일한 분포하중으로 가정하는데 반하여 측정값의 경우는 코일이 위치한 부분에만 전자기력이 작용하였으며, 두 번째로는 박막의 변형을 가정할 때 균일한 사각박막모델을 사용하였으나, 실제로는 균일한 사각박막위에 나선모양의 코일이 더하여진 형태이다. 마지막으로, 식 (4)에 나타낸 바와 같이 코일 형상을 동심원으로 가정하고 계산하였기 때문이며, 이로 인한 오차는 식 (4)로부터 5%인 것으로 계산되었다.

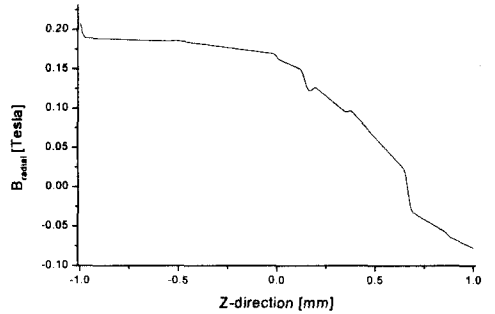


Fig. 12 Estimated magnitude of the radial magnetic field along z-direction for the case of the twin magnets with single hole

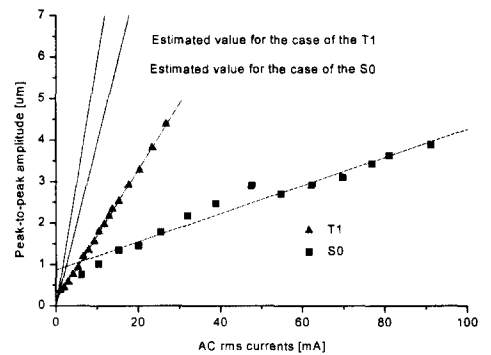


Fig. 13 Measured and estimated peak-to-peak amplitude of the microactuator for varying AC coil currents at the resonant frequency of 10.51kHz : The lower magnet is raised by $450\ \mu\text{m}$ from the cases of S0 and T1 of Figs. 5

7. 결 론

본 논문에서는 실리콘 박막 위에 전기도금된 구리 코일을 구동하는 방식의 전자기형 마이크로 액추에이터를 설계, 제작, 시험하였다. 본 마이크로 액추에이터의 구조상의 특징은 두 개의 영구자석에 의해서 형성된 방사형 자기장을 이용하였다는 점이다. 제작된 마이크로 액추에이터를 대상으로 자석을 한 개만 사용하였을 경우와 두 개를 대칭적으로 사용하였을 경우의 응답특성을 서로 비교하였다. 자석을 한 개만 사용하였을 경우(S0)에 마이크로 액추에이터의 공진 주파수와 특성인자(Q-factor)는 각각 $10.51 \pm 0.06 \text{kHz}$ 와 45.9 ± 2.1 로 나타났으며, 두 개의 자석중 한 개의 자석에 구멍이 있는 경우(T1)에는 각각 $10.51 \pm 0.22 \text{kHz}$ 와 46.6 ± 3.3 으로 나타났다. 두 개의 자석을 사용하는 경우 (T1), 동일한 AC rms 전류 26.8mA 로 구동했을 때, 한 개의 자석을 사용한 경우(S0)에 비해 약 2.4배의 큰 진폭을 얻을 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

따라서 본 논문에서 제안한 대칭형 자석배치는 코일면상에서의 자기장의 방향을 방사형으로 집중시킴으로써 큰 구동력을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한 본 전자기형 마이크로 액추에이터는 저온, 저전압, 저전계 구동으로서 생화학적 응용을 위한 마이크로펌프 및 미소유량의 정밀 제어용 밸브에 응용 가능하다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 지원으로 한국과학기술원 의공학센터가 주관하는 바이오칩 기술개발 과제에 의뢰로 수행되었다.

참고문헌

- (1) Shoji, S., 1998, "Fluids for Sensor Systems," Topics in Current Chemistry, Vol. 194, pp. 163~188.
- (2) Lammerink, T., Elwenspoek, M. and Fluitman, J., 1993, "Integrated Micro-Liquid Dosing System," Proc. Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 245~259.
- (3) Kang, T. G., Seo, K.-S. and Cho, Y.-H., 1998, "A Long-Stroke Thermopneumatic Actuator for Applications to Microflow and Pressure Regulation," Proc. Actuators '98, pp. 62~65.
- (4) Schomburg, W. K., Ahrens, R., Bacher, W., Engemann, S., Krehl, P. and Martin, J., 1997, "Long-Term Performance Analysis of Thermo-Pneumatic Micropump Actuators," Proc. 1997 Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers 97), pp. 365~368.
- (5) Huff, M. A., Mettner, M. S., Lober T. A. and Schmidt, M. A., 1990, "A Pressure-Balanced Electrostatically-Activated Microvalves," Proc. IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, pp. 123~127.
- (6) Zengerle, R., Richter A. and Sandmaier, H., 1992, "A Micro Membrane Pump with Electrostatic Actuation," Proc. Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 19~24.
- (7) Zengerle, R., Kluge, S., Richter, M. and Richter, A., 1995, "A Bidirectional Silicon Micropump," Proc. Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 19~24.
- (8) Smits, J. G., 1990, "Piezoelectric Micropump with Three Valves Working Peristaltically," Sensors and Actuators, A21-A23, pp. 203~206.
- (9) Koch, M., Harris, N., Evans, A. G. R., White N. M. and Brunnschweiler, A., 1997, "A Novel Micromachined Pump Based On Thick-Film Piezoelectric Actuation," Proc. 1997 Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers 97), pp. 353~356.
- (10) Linnemann, R., Woias, P., Senfft, C.-D. and Ditterich, J. A., 1998, "A Self-Priming and Bubble-Tolerant Piezoelectric Silicon Micropump for Liquids and Gases," Proc. Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 532~537.
- (11) Benecke, W. and Riethmuller, W., 1989, "Applications of Silicon-Microactuators Based on Bimorph Structures," Proc. Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 116~120.
- (12) Jerman, H., 1990, "Electrically-Activated Micromachined Diaphragm Valves," Proc. IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, pp. 65~69.

- (13) Wagner, B. and Benecke, W., 1991, "Microfabricated Actuator with Moving Permanent Magnet," *Proc. Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, pp. 27~32.
- (14) Yanagisawa, K., Kuwano, H. and Tago, A., 1993, "An Electromagnetically Driven Microvalve," *Proc. 1993 Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers 93)*, pp. 102~105.
- (15) Behrens, J., Meckes, A. and Benecke, W., 1996, "Micropump and -Valves with Electromagnetic Actuation," *Micro System Technologies 96*, pp. 820~822.
- (16) Meckes, A., Behrens, J. and Benecke, W., 1998, "A Microvalve with Electromagnetic Actuator," *Actuators 98*, pp. 152~155.
- (17) Go, J. S. and Cho, Y.-H., 1998, "Experimental Evaluation of Anodic Bonding Process using Taguchi Method for Maximum Interfacial Fracture Toughness," *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS '98)*, pp. 318~321.
- (18) Blevins, R. D., 1979, *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*, Van Nostrand Reinhold Company.
- (19) Jones, R., 1975, "An Approximate Expression for the Fundamental Frequency of Vibration of Elastic Plates," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 38, No. 4, pp. 503~504.
- (20) Johns, D. J., 1975, "Comments on an Approximate Expression for the Fundamental Frequency of Vibration of Elastic Plates," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 41, No. 3, pp. 385~387.