

# PDMS를 이용한 마이크로 구동기의 제작 및 평가

이동원#, 박종성\*\*

## Detection of Tool Failure by Wavelet Transform

Dong Weon Lee#, Jong Sung Park\*\*

### ABSTRACT

In this study, we propose and develop PDMS-based modular actuators. The microactuator which looks like a small insect uses thermal expansion power of the PDMS (polydimethylsiloxane; sylgar®184 silicone elastomer). The PDMS-based microactuator provides a large displacement due to a high thermal expansion coefficient (approximately 310ppm). The microactuator with 1mm length 350  $\mu$ m width is optimized by using a numerical analysis. The shape of the PDMS actuator is variously designed. They are placed at several positions to find the optimal position that provides a high transformation ratio. The PDMS-based microactuators are fabricated using a conventional micromachining technique. The fabricated microactuator is heated using a hot-plate. The actuator displacement is measured as a function of temperature from 27°C to 300 °C. The experimental results are compared to the simulation result. When heating temperature up to 300°C is applied to the PDMS actuator, each V-groove-shaped joint is actuated 30  $\mu$ m at 300°C. Another design of the microactuator has a maximum displacement of about 656mm.

**Key Words** : PDMS, Actuator, Thermal expansion

### 1. 서론

열팽창을 이용한 마이크로 구동기는 서로 다른 열팽창계수를 가진 물질을 두 개의 층으로 만든 다음 주열 열을 인가해 팽창력이 작은 물질 쪽으로 움직이는 방법이 주로 사용되었다[1]. 기본적인 구동 방법은 선형적인 열팽창 계수(Linear thermal

expansion coefficient:  $\alpha_L$ )를 갖는 물질에 온도 변화 ( $\Delta T$ )를 주게 되면 열팽창 계수에 비례하게 표면적이 변화하게 된다.

하나의 구동기를 이용하려면 일반적으로 서로 다른 열팽창 계수를 갖는 2개의 물질을 샌드위치 구조로 쌓게 되고 열팽창을 하게 된다. 이러한 방식의 구동기를 Bimetallic 또는 Thermal bimorph 라고 부르며 이 구동기는 서로 다른 열팽창 계수에 의해 한 쪽 방향으로 휘어지게 된다. Thermal bimorph 형태의 구동기는 열팽창계수에만 의존해야 한다는 단점을 가지며 매우 얇은 두께의 막을 이용하므로 어떤 시스템과 모듈화 되어 움직임을 나타낼 수 없는 단점을 안고 있다. 만약 어떤 시스템과 모듈화 하여 구동을 하기 위해서는 그 시스템의 무게를 지탱해줄

# 전남대학교 기계시스템공학부 교수  
E-mail mems@chonnam.ac.kr (062) 530-1689  
\*\* 전남대학교 대학원 기계공학과

수 있는 수백  $\mu\text{m}$ 의 두께를 필요로 하게 된다. 이러한 방법을 이용하게 되면 구동 변위량이 작아지기 때문에 마이크로 또는 밀리미터 단위의 구조체를 움직이기 위한 구동기로써 적용하기 힘들다.

또 다른 방법으로는 Thorbjorn Ebefors[2]이 제안한 Working Robot이라는 구동기로 이는 폴리이미드(Polyimide)가 채워진 V모양의 홈에, 주열 열을 발생시킬 수 있는 전기 히터를 제작하고, 그 홈에 폴리이미드를 채워 넣어 전기적으로 히팅된 폴리이미드의 열팽창력을 이용하여 구동하는 방식이 새롭게 제안되었다. Working Robot은 두 물질의 열팽창 차이가 아닌 폴리이미드라는 물질 하나를 가지고 열팽창을 유도하여 구동력을 이끌어 냈다. 이는 선형적인 열팽창계수에만 의존하는 Bimetallic 방식과 달리 폴리이미드를 경화하는 과정에서 수축되는 현상과 수축된 폴리이미드를 팽창하는 방법을 이용하였다.

V모양의 홈에 폴리이미드를 패터닝하고 고온에서 폴리이미드를 경화(curing) 하면 폴리이미드가 약 30% 정도 수축하게 되며 V모양의 홈을 많이 형성하면, 더 큰 힘을 얻을 수 있다. 구동은 집적화된 히터에 전류를 인가하여 열을 발생 시키고, 가열된 폴리이미드는 열팽창을 하면서 구동력을 발생시킨다. 폴리이미드 기반 구동기의 구동 변위는  $170\mu\text{m}$ 을 보인다. 대변위량을 요구하는 시스템이나 다양한 구조체에 대한 응용, 그리고 사용된 폴리이미드의 가격적인 측면에서 단점을 갖게 된다.

본 연구에서는 기존에 제작된 열팽창 구동기 제작에 있어서, 단위공정의 단순화, 제작비용의 절감, 다른 시스템과의 모듈화 가능성 등을 고려하여 마이크로 구동기를 설계 및 제작 하였다. 또한 생체모방공학을 바탕으로 하여 새로운 구동메커니즘을 제안하고, 대변형을 갖는 마이크로 구동기를 설계 및 제작 하였다. 그리고 큰 열팽창 계수(약  $310\text{ppm}/^\circ\text{C}$ )를 가지며, 반도체 공정에서 사용되는 폴리머 중 가장 많은 장점을 가지며, 재현성이 좋은 폴리머인 PDMS(Polydimethylsiloxane, Sylgard® 184 silicone elastomer)를 이용하여 마이크로 구동기의 제작 가능성을 보였다. 그리고 유한요소 해석프로그램인 ANSYS를 이용하여 마이크로 구동기를 최적화한 후 마이크로머시닝 기술을 이용하여 구동기를 제작 및 평가하였다.

Table1. Properties of Polydimethylsiloxane(PDMS)

sylgard® 184 silicone elastomer	
Viscosity, centipoise or mPa.s	3900
Specific Gravity	1.03
Thermal conductivity (Watt-meter-K)	0.18
Linear coefficient thermal expansion(ppm)	310
Volume resistivity (ohm-cm)	$1.2 \times 10^{14}$

## 2. 재료 특성

큰 변위를 가지는 마이크로스케일의 구동기 개발에 있어서 중요한 것은 사용되는 구동기 재료 및 구동방법의 결정이다. 본 논문의 PDMS를 이용한 마이크로 구동기는 전기적 히팅과 PDMS의 열팽창을 이용하여 대변형을 만들어 낸다. PDMS는 주로 미세 패턴을 그리기 위한 나노 임프린트, 마이크로 채널 형성에 이용이 되며, 생체 조직과 유사한 정도의 유연성을 가지고 있어서 바이오 분야에서도 많이 응용이 되고 있다. 이렇게 다양한 분야에서 사용이 되는 이유는 마이크로 스케일에서의 패턴 형성이 쉬우며, 투명하고, 쉽게 노화되지 않기 때문이다. 실제로 PDMS를 이용한 연구는 나노 스케일의 패턴 형성이 가능하며, 인체에 직접 접촉을 해도 아무 무리 없을 정도의 생체 적합성을 가지며, 마이크로 채널과, 일정 두께에서 빛을 직진성있게 통과시키기 때문에 유체소자와 광섬유의 가이드 역할도 하게 된다. 본 논문에서 사용한 PDMS는 sylgard® 184 silicone elastomer로서 재료가 가지는 물성은 표 1과 같으며 열 구동기에서 일반적으로 사용되는 알루미늄( $23\text{ppm}$ )보다 약 11배 높은 열팽창 계수를 갖는다. 또한 앞서 언급된 쉽게 노화되지 않은 성질과 반복 구동에 의해 발생 될 수 있는 피로파괴가 작기 때문에 많은 반복구동을 요구하는 마이크로 구동기 응용에 적합하다. 또한 가격적인 측면에서 볼 때 반도체

공정에서 주로 사용되는 폴리이미드 보다 약 1/12배 저렴한 장점을 가지고 있다.

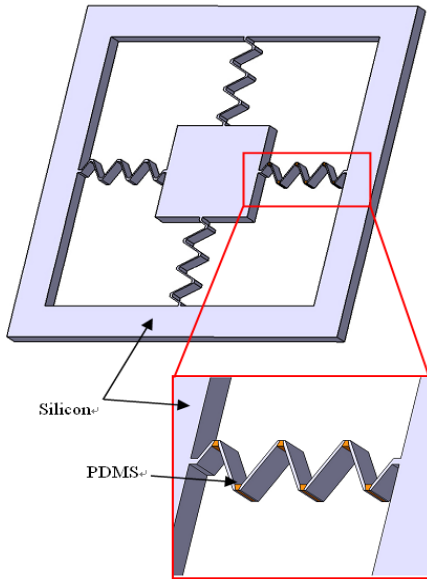


Fig. 1 A schematic view of a PDMS based X-Y stage

PDMS는 경화되는 과정에서 수축되는 온도에 따라서 표면 거칠기가 바뀌게 되는데, 이는 PDMS 표면에 금속층을 증착할 때 신중히 고려되어야 할 사항이다. 일반적으로 PDMS기판과 금속 층과의 점착력이 좋지 않은데 그 이유는 실리콘 계의 고무형태인 PDMS와 금속 층간의 격자상수와 열팽창 계수의 차이 등으로 인해 PDMS표면에 금속층 형성이 어렵게 된다. 이를 해결하기 위한 방안으로 두 가지가 있으며 하나는 PDMS의 경화되는 온도를 최대한 낮게 하면서 경화시간을 늘려 PDMS의 표면 거칠기를 거칠게 유도하는 방법이며, 두 번째는 경화된 PDMS를 물리적인 효과를 이용하여 표면 거칠기를 증가시키는 방법이 있다. 우선 첫 번째 방법에서 PDMS는 낮은 온도에서 경화 될수록 표면 거칠기가 증가된다.

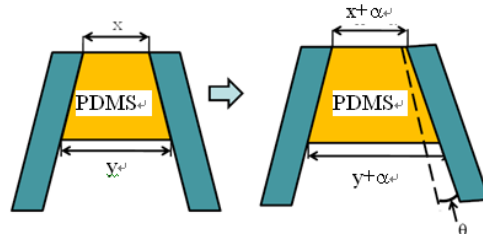


Fig. 2 Actuating principle of the PDMS based actuator

상온에서 경화가 진행된 PDMS와 85℃의 오븐 속에서 1시간동안 경화된 PDMS의 표면 거칠기를 측정하면, 상온에서는 4.8nm 이며, 85℃의 PDMS의 거칠기는 2.6nm가 나옴을 실험적으로 알 수 있다[3]. 또 다른 방법인 물리적인 효과를 이용한 표면 거칠기를 증가시키는 방법으로는 산소 플라즈마(O<sub>2</sub> Plasma)를 이용하여 거칠기를 증가시키는 방법이 있다. 일반적으로 폴리머 계열의 물질은 산소 플라즈마의 활성화된 라디칼(Radical)이온에 의해 물리적인 충격을 주며 이로 인해 폴리머가 제거 되는 특징을 갖는다. 이를 이용하여 산소 플라즈마 환경에서 수 초 동안 노출되면 표면 거칠기가 증가하게 된다. 이렇게 증가된 표면 거칠기는 PDMS와 금속의 표면적을 증가시켜 높은 점착력을 가지는 금속막을 형성할 수 있다.

### 3. 구동기 구동원리 및 제작

그림1은 마이크로 구동기를 X-Y 스테이지에 적용한 예이다. PDMS기반의 마이크로 구동기를 중심의 스테이지를 기준으로 4면에 구동기를 집적화 하여 원하는 위치로 구동을 하는 것이 가능하도록 설계하였다. 인가된 전류에 따라서 가열 온도가 변화하게 되고 이를 유지 하게 되면 원하는 위치와 구동변위를 조절할 수 있도록 설계 하였다.

설계된 마이크로 구동기는 유한요소 해석법(Finite Element Methode; FEM)을 이용하여 해석을 하였다. 먼저 구동기의 기초 부분이 되는 PDMS와 실리콘 연결부위의 최적화와 구동기 전체의 변형량 해석을 수

행하였다. 먼저 PDMS와 실리콘 연결 부위를 해석하였으며, 이는 주울 열의 열전도를 이용한 PDMS의

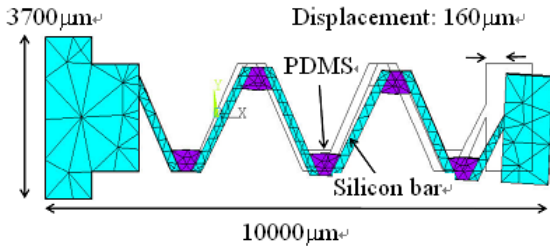


Fig. 3 FEM analysis using ANSYS.

자유로운 팽창을 목표로 두고 해석을 수행하였다. PDMS와 실리콘의 연결은 V모양의 구조를 갖도록 디자인 하였으며, 그림2와 같이 PDMS의 길이 차를 이용한 윗면의 팽창과 아랫면의 팽창의 차를 이용하여 같은 면적에서 최대의 변위를 갖도록 디자인 하였다. 똑같은 열이 PDMS에 전달될 때, 팽창률(α)은 동일하므로, 상대적으로 아래쪽 PDMS의 팽창이 더 크며 이를 이용하여 대변위를 얻을 수 있도록 설계 하였다. 또한 실리콘 연결 부위의 두께가 얇을수록 구동 변위가 증가하는 것을 해석을 통하여 확인 하였다. 그러나 반응성 이온식각기 (reactive ion etching)를 이용하여 3차원 구조물을 제작할 때 높은 중형 비를 갖는 10 μm 이하의 구조물 형성이 어렵고, PDMS의 자유로운 팽창을 위해 연결부위의 두께를 "0"으로 결정하였다. 최적화 된 구동기 해석결과 최대 변위량은 약 160 μm을 보였다(그림3).

450 μm의 두께를 가진 양면 폴리싱된 p-type 웨이퍼를 사용하였고 일반적인 마이크로머시닝 공정을 이용하여 구동기를 제작하였다(그림 4(a)). 제작 과정은 4(b)와 같이 실리콘 웨이퍼에 RIE를 이용하여 관통된 틀을 형성한 후 관통된 영역에 스펀코팅 장비를 이용하여 PDMS를 채워 넣었다(그림 4(c)). 다음으로 4(d)와 같이 국소적인 주울 히팅을 하기 위한 Al 전기배선을 Sputter를 사용하여 실리콘 웨이퍼의 양면에 증착 및 형성하였다. 마지막으로 구동기의 형태를 만들기 위해 RIE를 이용해 관통 함으로써 PDMS를 이용한 마이크로 구동기의 제작이 완료되었다. (그림 4(e)).

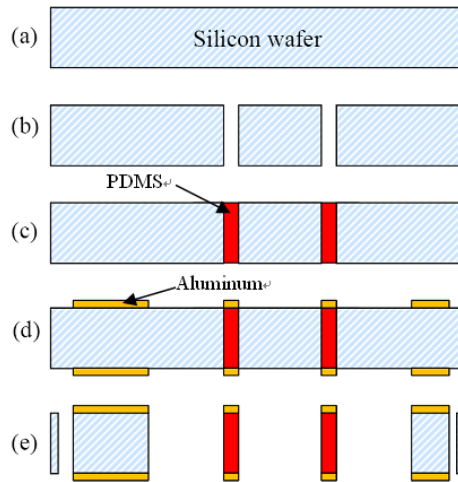


Fig. 4 Process flow for the PDMS microactuator. (a) Wafer preparation P-Type 450Ωcm, (b) first Deep-RIE process, (c) PDMS injection, (d) metal deposition and patterning, (e) second Deep-RIE process

#### 4. 구동기 평가

그림 5와 같이 제작된 구동기는 길이 10mm, 높이 3700 μm 구동기의 제원을 갖는다. 구동기는 총 3개의 형태로 디자인 되었으며, PDMS형태가 각각 다르게 설계 및 제작하였다. 각각의 상세한 구동기 사진은 그림 6과 같다.

6(a)와 (b)는 사다리꼴 형상, 그림 6(c)는 다이아몬드 형상으로 제작되었고 각각 Type-1 ~ 3으로 분류 하였다. Type-1의 경우 비교적 간단한 구조로 설계 되었지만 유한요소해석을 통하여 해석을 한 결과 구동기가 구동할 때에 구조에 따라 상 또는 하측으로 휘는 현상을 예측할 수 있었다. Type-2의 경우 Type-1의 구동기를 윗부분에 하나 더 적층한 형태를 갖게 된다. 이렇게 적층함으로써 Type-1에서 발생하는 힘을 방지할 수 있고, 또한 구동기의 구동원인 PDMS의 부피가 2배로 늘어나기 때문에 구동력이 더 크게 나타날 것으로 예측된다.

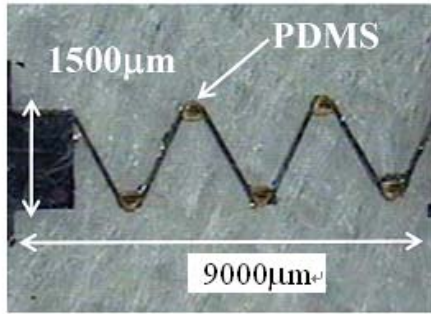


Fig. 5 An optical microscope image of the fabricated microactuator

마지막 Type-3은 다이아몬드 형상으로 제작 되었다(그림6-(b)). Type-3변의 경우 상대적으로 많은 양의 PDMS를 이용하여 열팽창에 따른 대변위를 유도 하였다 (그림6-(c)).

제작한 마이크로 구동기의 구동 변위를 알아보기 위해 산화막이 성장된 실리콘 웨이퍼에  $10\mu\text{m}$ 단위의 자(ruler)모양의 패턴을 형성하였다. 이렇게 제작된 실리콘 웨이퍼의 자 표면에 구동기를 놓은 다음, 열판 상부에 올려놓는다. 구동기의 앞부분을 고정 한 후 실온에서부터 섭씨 50도 간격으로 가열하면서 온도에 따른 구동변위를 평가하였다. 적외선 온도계로 구동기의 실제 온도를 실시간으로 측정하고, 현미경을 이용하여 구동 변위량을 측정 하였다. 이러한 방법을 이용하여 구동기를 평가한 이유는 실제 제작된 배선에 전류를 흘리고 이에 따라 발생하는 주열 열을 이용하여 구동기의 변위와 관련한 성능을 평가할 경우 마이크로 스케일의 히터에서 발생하는 열의 정확한 온도를 확인 할 수 있는 방법이 쉽지 않고 변위량의 정확한 판단이 힘들 것으로 예측되어 열판 온도에 따른 변위량을 실험 하였다. 이는 집적화된 마이크로 히터를 이용한 구동 변위와 실험과 거의 동일하게 나타날 것으로 예측된다.

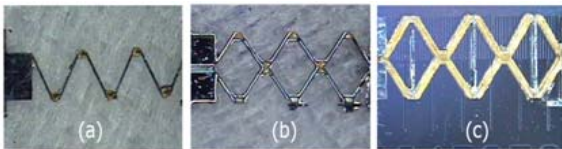


Fig. 6 Optical microscope images of microactuators

with various design. (a) Type-1 actuator, (b) Type-2 actuator, (c) Type-3 actuator

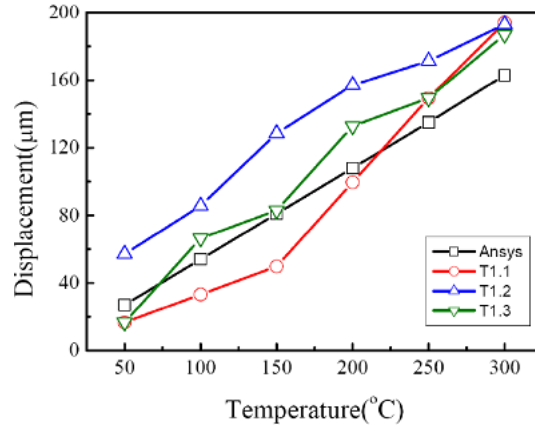


Fig. 7 Change in displacement according to applied temperature (Type 1)

따라서 본 연구에서는 주열 히팅에 의한 구동기의 변위 특성 평가와 더불어 온도에 따른 정확한 변위량을 파악하기 위해 위에서 언급한 열판을 이용한 측정 시스템을 구축하여 실험을 수행하였다.

구동기 평가 결과 PDMS의 형태가 각각 다르기 때문에 구동변위는 확연히 차이가 남을 알 수 있었다. 실온에서부터  $50^{\circ}\text{C}$  간격으로 세가지 종류의 구동기를 테스트 한 결과 최대 변위는  $750\mu\text{m}$ 로 나타났다으며, 세가지 종류의 구동기 모두

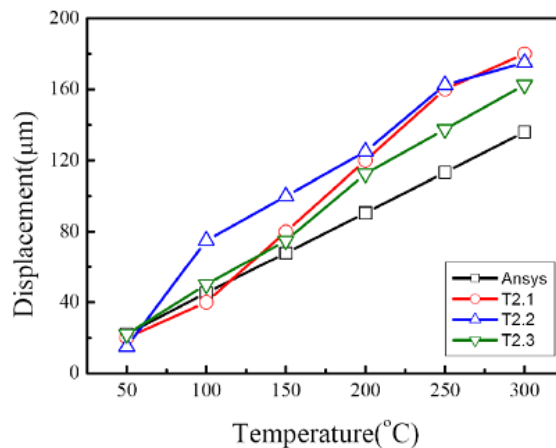


Fig. 8 Change in displacement according to applied temperature (Type 2)

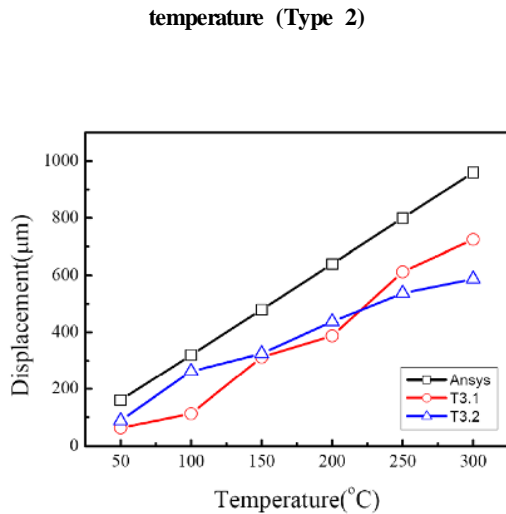


Fig. 9 Change in displacement according to applied temperature (Type 3)

시뮬레이션 결과보다 조금 큰 변위를 가짐을 확인하였다. 그 이유로는 첫 번째 제작공정의 반응성이 온식각 과정에서 설계했던 치수보다 좀더 크게 식각이 되어서 실제 제작된 구동기의 PDMS크기가 증가된 것으로 사료된다.

300°C에서의 평균 구동 변위 결과는 Type-1의 구동기의 경우  $191\mu\text{m}$  ( $0.63\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ )의 변위량을 (그림 7), Type-2의 구동기는  $172\mu\text{m}$  ( $0.58\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ )의 변위량을 (그림 8), 마지막으로 Type-3의 구동기는  $656\mu\text{m}$  ( $2.81\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ )의 변위를 가짐을 알 수 있었다 (그림 9). 또한 동일한 디자인의 다른 구동기를 가지고 실험을 수행한 결과 동일한 온도범위에서 약  $\pm 10\%$ 의 오차 결과를 나타내었다.

## 5. 결론

스프링의 수축과 팽창의 움직임을 바탕으로 한 새로운 구동메커니즘, 대변형, 그리고 재현성이 우수한 새로운 구조의 대변형 구동기를 유한요소 해석프로그램(ANSYS)을 이용하여 설계 및 해석하고, 마이크로머시닝기술을 이용하여 제작하였다. 기존의 열팽창을 이용한 구동기보다 더 큰 열팽창 계수를 가진

PDMS를 이용하므로 제작된 구동기는 최대변위가  $656\mu\text{m}$ 을 보였다. 더욱이 각각의 구동기를 모듈화하는 것이 가능하므로  $656\mu\text{m}$ 의 구동변위를 2~3배 정도 증가할 수 있다는 장점을 가진다. 제작된 구동기는 마이크로 스케일의 구동기나 대변형을 필요로 하는 수~cm의 구조체, 그리고 X-Y스테이지에 집적화하여 구동을 할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

This work was supported by Korea Research Foundation Grant funded by Korea Government. (MOEHRD, Basic Research Promotion Fund) (KRF-2005-205-D00010).

## 참고문헌

- Gregory T.A. Kovacs, "Micromachined transducers sourcebook", McGraw-Hill, pp289-294, 2000
- T. Ebefors, J. U. Mattsson, E. Kalvesten, and G. Stemme, "A robust micro conveyer realized by arrayed polyimide joint actuators", J. Micromech. Microeng. 10, pp.337-349, 2000
- S. I. chang and J. B. Yoon, "Fabrication of microlens array by using a new diffuser lithography and its characterization", The 7th Korean MEMS conference, Jeju, pp. 363, 2005
- J. Garra, T. Long, J. Currie, T. Schneider, R. White, and M. Paranjape, "Dry etching of polydimethylsiloxane for microfluidic systems", J. Vac. Sci. Technol. A20(3), May/Jun, pp.975-982, 2002
- D. W. Lee, J. S. Park, S. H. Park, J. O. Park, and H.S. Yoon, "MEMS-based modular actuator for capsular endoscope applications", Microelectronic Eng. 84, 1278-1281, 2002
- D. W. Lee and J. S. Park, "Evaluation of PDMS-based thermal micro-actuator", Sensors & Materials, in press 2007