

초미세 유체 제어 시스템 구현을 위한 마이크로 펌프와 밸브의 집적

유중철, 허현정, 최영진*, 강치중*, 김한수**, 이경일***, 신진국***, 김용상****
 영지대학교 나노공학과, *영지대학교 물리학과, **두원공과대학, ***전자부품연구원, ****영지대학교 전기공학과

Characterization of Microfluidic system integrated with micropump and microvalve

Jong-Chul Yoo, Hyun-Jung Her, Y. J. Choi*, C. J. Kang*, Han-Soo Kim**, Kyoung Il Lee***, Jin Koog Shin***, Yong-Sang Kim****

Dept. of Nano Science and Eng., Myongji University, *Dept. of Physics, Myongji University, **Dept. of Building Equipment, Doowon Techical College, ***Korea Electronics Technology Institute, ****Dept. of Electrical Eng, Myongji University

Abstract - Micro ElectroMechanical Systems (MEMS) 기술을 이용한 초미세 유체 제어 시스템 (마이크로 펌프, 마이크로 밸브, 마이크로 채널, 마이크로 믹서 등)은 화학, 생명분야의 DNA 분석, 항원-항체 분석, 질병의 진단 등에 사용되는 lab-on-a-chip, micro total analysis system (μ -TAS) 등에서 화학 및 바이오 유체를 제어하는 분석 시스템의 일부분으로서 사용되며 필수적으로 요구된다. 본 논문에서는 이러한 microchip을 구현하기 위해 초미세 유체 제어 소자인 마이크로 펌프와 밸브를 같은 기판 위에 polydimethylsiloxane (PDMS)와 indium tin oxide (ITO)-Glass를 사용하여 동일한 구조로 집적 하였다. 마이크로 펌프의 pumping rate은 인가 직류 펄스 전력의 주파수와 duty 비를 변화시켜 최적화 하였다. 직류 펄스 전력 500 mW를 인가하였을 때 주파수 2 Hz, duty 비 7 %에서 약 1.05 μ l/min의 최대 유량이 측정되었다. 마이크로 밸브는 ITO 히터에 전력을 인가함으로써 유량의 on/off 제어가 잘 됨을 확인할 수 있었고 유체를 closing하기 위해 필요한 전력은 약 300 mW이다.

1. 서 론

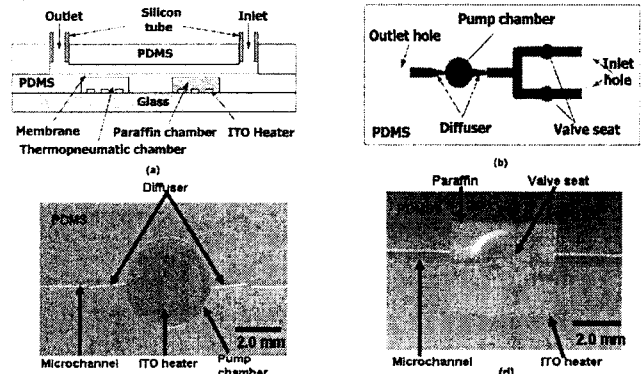
최근 Bio Medical분야에서 Micro ElectroMechanical Systems (MEMS) 기술을 이용하여 Micro System을 개발하려는 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]. MEMS 기술로서 개발된 시스템은 매우 소형화 되고 휴대성이 증대되어 현장에서 즉각적인 활용과 적은 양의 시료 분석을 가능케 하여 비용이 절감될 수 있고, 온도 제어가 필요할 경우 빠른 응답 속도를 기대할 수 있을 뿐만 아니라, 소자가 집적될 경우 신뢰성 향상을 기대할 수 있는 장점이 있다 [2]. 이러한 Micro System은 임상 진단학, 환경 감지 및 모니터링을 위한 미생물학 영역에 큰 영향을 미치기 시작했으며, 미지않아 분자생물학과 세포생물학에 대한 기초 및 응용 연구에도 영향을 미칠 것으로 예상된다 [3]. 초소형 분석 장치는 분석 대상 액체를 정량적으로 공급하는 초미세 유체 제어 소자 (마이크로 펌프, 마이크로 밸브), 반응액과 혼합하는 혼합부 (마이크로 믹서), 항원항체반응을 검출할 수 있는 검출부로 구성된다 [4, 5]. 정량적 분석을 위하여 대상 액체의 유량을 정확하게 조절하고 손실을 최소화 하는 마이크로 펌프와 마이크로 밸브가 필수적이다. 미세 유체 제어 시스템 (마이크로 펌프, 마이크로 밸브, 마이크로 채널, 마이크로 믹서 등)은 화학 및 바이오 유체를 제어하는 분석 시스템의 일부분으로서 사용되며 이러한 시스템의 집적은 lab-on-a-chip 개발을 위해 필수적으로 요구된다. 이는 시스템 내에 수 μ l의 시약과 샘플들의 이동을 정확하고 효율적으로 제어하는 능력을 요구한다. 따라서 본 연구에서는 polydimethylsiloxane (PDMS)와 indium tin oxide (ITO)로 제작된 in-channel 구조의 초미세 유체 제어 시스템을 제안한다. 이전에 보고되었던 소자는 실리콘으로 개발되었기 때문에 복잡한 공정과정과 제작비용이 비싸다는 단점을 지니고 있을 뿐 만 아니라 [6] membrane은 큰 변위를 형성할 수 없으므로 pumping rate나 flow rate를 제어함에 있어서 한계가 있었다. 이러한 기술적인 문제점들은 투명한 광학적 특성을 가지고 있고 hydrophobic 하며 평면 구조를 매우 쉽고 저렴하게 제작할 수 있는 PDMS를 실리콘 대신 사용하여 극복될 수 있다. 또한 일반적으로 Au로 제작되는 히터를 Au에 비해 가격이 매우 저렴하게 제작되고 투명한 장점을 지닌 ITO로 제작된 히터를 제안한다. 이러한 측면에서 lab-on-a-chip 또는 micro-total analysis system (μ -TAS)을 구현함에 있어 일회용으로 사용되는 응용부분이 많으므로 좋은 장점을 가진다. 본 논문에서는 열공압 방식으로 구동되는 마이크로 펌프와 파라핀으로 동작하는 마이크로 밸브를 하나의 기판위에 집적하여 초미세 유체 제어 시스템을 제작 하였다.

2. 본 론

2.1 구조 및 원리

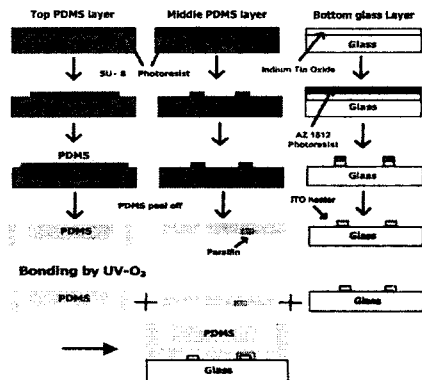
그림 1은 열공압 방식으로 구동되는 마이크로 펌프와 파라핀에 의해 동작하는 마이크로 밸브가 집적된 PDMS 초미세 유체 제어 시스템의 (a) 단면도와 (b) 평면도이다. 제작된 마이크로 채널의 길이와 폭은 140 μ m, 400 μ m이다. 시스템내 마이크로 펌프의 diffuser inlet 폭, 길이, divergence 각도는 각각 100 μ m, 2250 μ m, 10°이다. Pump chamber 아래의 열공압 챔버와 valve seat 아래의 파라핀 챔버의 길이는 130 μ m이고 마이크로 펌프를 구동

하는 ITO 히터의 dimension은 2.95 x 2.95 mm²로 제작하였다. Membrane 두께에 따른 동작 특성을 검증하기 위해 PDMS membrane 두께를 300, 390 μ m로 변화를 주어 제작하였다. Pump chamber와 valve seat의 지름에 따른 동작 특성을 입증하기 위해 pump chamber의 지름을 4.0 mm와 4.5 mm로 제작하여 특성을 비교 하였다. 열공압 챔버의 지름은 pump chamber와 같은 크기로 제작된다. 반면에 valve seat의 지름과 ITO 히터의 dimension은 각각 1.5 mm, 3.0 x 3.0 mm²와 2.0 mm, 3.5 x 3.5 mm²로 고정되어 제작된다.



〈그림 1〉 마이크로 펌프와 밸브가 집적된 PDMS 초미세 유체 제어 시스템의 (a) 단면도와 (b)평면도. 제작된 초미세 유체 제어 시스템의 (c) 마이크로 펌프와 (d) 밸브의 사진.

제안된 마이크로 펌프는 열공압력의 구동원리에 의해 동작한다. ITO 히터에 직류 펄스 전력이 인가될 때 열공압 챔버 안의 공기 팽창으로 인해 PDMS membrane의 변위가 발생하여 diffuser를 통해 유체를 밀어내어 유량을 발생 시킨다. 반대로 ITO 히터가 off 되면 열공압 챔버 내의 공기의 부피가 감소하므로 펌프 챔버의 부피가 증가되어 양단의 diffuser를 통해 유체가 유입된다. 제안된 마이크로 밸브의 구동원리는 ITO 히터에 직류 전력을 인가하면 파라핀이 가열되어 고체에서 액체로의 상변화를 일으킨다. 이때, 파라핀의 재료적 특성상 발생된 부피 팽창으로 인해 PDMS membrane의 변위가 발생하고 밸브 seat를 닫아 유체 흐름을 막는 것이다. 반대로 ITO 히터가 off 되면 파라핀이 고체로 상변화하면서 부피가 감소하므로 valve seat가 열려 유체가 다시 흐르게 된다. 그림 1의 (c)와 (d)는 완성된 초미세 유체 제어 시스템의 마이크로 펌프와 밸브의 모습을 보여주고 있다.



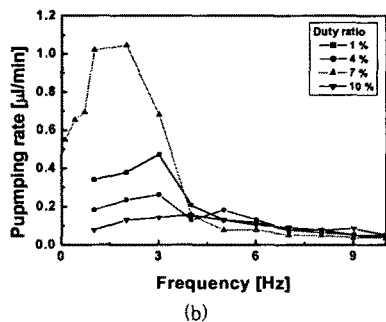
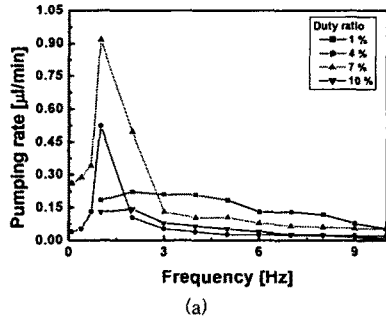
〈그림 2〉 초미세 유체 제어 시스템의 제작공정.

2.2 제작공정 및 실험

그림 2에서처럼 Top PDMS 층을 제작하기 위해 실리콘 기판 위에 음성 감광제 (SU-8 2075)를 140 μm 두께로 스핀 코팅 후 사진 공정을 통해 채널 cavity를 형성한다. PDMS 용액을 SU-8 패턴이 형성된 실리콘 웨이퍼 위에 부은 후 curing이 끝난 후 실리콘 웨이퍼에서 PDMS 채널 층을 분리한다. Middle PDMS 층을 제작하기 위하여 실리콘 웨이퍼 위에 130 μm 두께의 음성 감광제 (SU-8 2075)로 스핀 코팅 후 사진 공정 후 패턴위에 300 μm , 390 μm 의 membrane을 형성하기 위해 PDMS 용액을 패턴된 웨이퍼 위에 스핀 코팅 하였다. 세 번째 공정으로서 bottom glass 층 공정은 ITO가 170nm로 증착된 유리 기판 위에 AZ-1512 Photoresist를 코팅 후 현상하였다. ITO히터를 패턴링 하기 위해 ITO-Etchant 용액 (FeCl_3/HCl)에 식각을 한 후 남은 PR용액을 제거하였다. 제작된 각각의 층을 접합하는 공정으로 UV- O_3 cleaner를 사용하여 각각의 표면에 UV/ozone 처리 후 접착하였다. UV/ozone 처리를 한 후 PDMS 표면의 메틸기(CH_3)는 O_2 와 CO_2 로 치환되어 기화하고 나머지 다른 표면과 Si-O-Si 공유 결합을 하게 된다 [7].

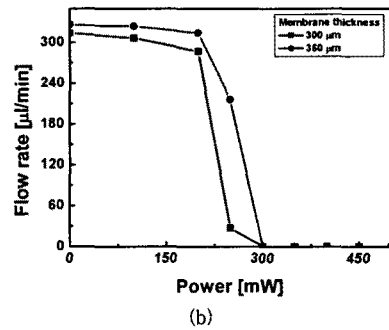
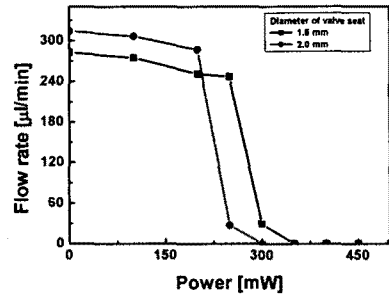
3.결과 및 토의

그림 3(a)는 duty 비 1, 4, 7, 10 %에서 인가된 주파수의 함수로서 측정된 유량을 보여준다. Pump chamber의 dimension과 membrane 두께는 $\pi \times 2.25^2 \text{ mm}^2$, 360 μm 이다. ITO 히터에 전력을 500 mW 인가하고 주파수를 1 Hz ~ 10 Hz 로 변화 시켜가며 유량을 측정하였다. 최대 유량은 인가 주파수가 1 Hz, duty 비 7 % 인 경우 약 0.92 $\mu\text{l}/\text{min}$ 을 측정하였다. 시스템에 인가된 다양한 주파수와 duty 비 가운데 최적의 유량은 다른 조건들에 비하여 현저히 크다는 것을 확인할 수 있다. Duty 비가 높을 경우는 열공압 챔버 내부의 공기가 완전히 식지 못하여 변위가 작게 생성되어 유량이 적게 발생한다. 따라서 시스템의 유량을 증가시키기 위해서는 적은 duty 비와 주파수에서 동작되어야 한다. 그림 3(b)는 pump chamber의 dimension과 membrane 두께는 $\pi \times 2.0^2 \text{ mm}^2$, 300 μm 이며, ITO 히터에 500 mW의 전력 인가시 측정된 유량이다. 최대 유량은 위의 결과와 매우 비슷하게 인가 주파수가 2 Hz, duty 비 7 % 인 경우 약 1.05 $\mu\text{l}/\text{min}$ 을 측정하였다. 1 %의 duty 비에서의 유량은 7 %의 경우에 비하여 membrane의 변위가 더 작게 발생 한다. Duty 비가 너무 낮아지면 열에 의한 공기 팽창이 불충분하게 발생되어 변위가 작게 생성되므로 낮은 유량을 발생시킨다.



〈그림 3〉 제안된 시스템의 마이크로 펌프에서 주파수(1 Hz~ 10 Hz)와 duty 비(1, 4, 7, 10%)의 변화에 따른 유량 특성. (a) pump chamber의 dimension과 membrane 두께는 $\pi \times 2.25^2 \text{ mm}^2$, 360 μm 이고 (b) pump chamber의 dimension과 membrane 두께는 $\pi \times 2.0^2 \text{ mm}^2$, 300 μm 이다.

그림 4(a)는 valve seat의 지름에 따른 히터의 인가 전력과 유량의 관계를 보여주고 있다. Valve seat의 지름이 1.5 mm 와 2.0 mm인 마이크로 밸브의 유량이 off 되는데 필요한 인가 전력량은 각각 350 mW, 300 mW이다. 이 결과로 유량이 off 되는데 필요한 인가 전력은 valve seat의 지름과 밀접한 관련이 있다는 것을 알았다. 그림 4(b)에서 마이크로 밸브의 PDMS membrane의 두께에 따른 히터 인가 전력과 유량 특성을 측정 하였다. 히터 인가 전력 off 상태에서 유량은 PDMS membrane의 두께와는 관련 없이 거의 일정하며, 유량이 off 되는데 소모되는 전력량은 PDMS membrane의 두께와 관계없이 약 300 mW로 거의 같았다. 이것은 파라핀으로 동작하는 마이크로 밸브는 membrane의 두께와는 관계가 없다고 사료된다.



〈그림 4〉 제안된 시스템의 마이크로 밸브에 전력을 인가할 때 유체 스윙 동작 특성 (a) valve seat의 지름이 1.5 mm 와 2.0 mm, (b) membrane 두께는 300, 360 μm 이다.

4. 결 론

본 연구에서는 microchip을 구현하기 위해 in-channel 구조의 초미세 유체 제어 소자인 마이크로 펌프와 밸브를 같은 기판 위에 PDMS와 ITO-Glass를 사용하여 동일한 구조로 집적 하였다. 제안된 시스템은 제작 공정이 매우 간단하였으며 일회용 lab-on-a-chip에 응용하기에 좋은 특성을 보였다. 직류 펄스 전력 500 mW를 인가하였을 때 주파수 2 Hz, duty 비 7 %에서 1.05 $\mu\text{l}/\text{min}$ 의 최대 유량이 측정되었다. 마이크로 밸브는 ITO 히터에 전력을 인가함으로써 유량의 on/off 제어가 잘 됨을 확인할 수 있었고 유체를 closing하기 위해 필요한 전력은 약 300 mW이다. 유량이 off 되는데 필요한 인가 전력은 valve seat의 지름과 밀접한 관련이 있지만, membrane의 두께와는 관계가 없는 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 2단계 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음

참고 문헌

- [1] Maria A. Schwarz and Peter C. Hauser, "Recent developments in detection methods for microfabricated analytical devices," Lab on a chip, vol. 1, pp. 1-6, 2001.
- [2] D. Satake, H. Ebi, N. Oku, K. Matsuda, H. Takao, M. Ashiki, and M. Ishida, "A sensor for blood cell counter using MEMS technology," Sens. Actuators B, vol. 83, pp. 77 - 81, 2002.
- [3] Mark A. Burns, Brian N. Johnson, Sundaresh N. Brahmaandra, Kalyan Handique, James R. Webster, Madhavi Krishnan, Timothy S. Sammarco, Piu M. Man, Darren Jones, Dylan Heldsinger, Carlos H. Mastrangelo, David T. Burke, "An Integrated Nanoliter DNA Analysis Device," Science, vol. 282, pp. 484-487, 1998.
- [4] Jong-Chul Yoo, Min-Chul Moon, C. J. Kang, D. Jeon and Yong-Sang Kim, "Dynamic Characteristics of the Micro-Fluidic Systems Actuated by Thermopneumatic-Method," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 45, no. 1B, pp. 519-522, 2006.
- [5] Kwang-Ho Na, Yong-Sang Kim and C.J. Kang, "Fabrication of piezoresistive microcantilever using surface micromachining technique for biosensors," Ultramicroscopy, vol. 105 no.1/4, pp. 223-227, 2005.
- [6] Woo Young Sim, Hyeun Joong Yoon, Ok Chan Jeong and Sang Sik Yang, "A phase-change type micropump with aluminum flap valves," Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 13, pp. 286 - 294, 2003.
- [7] Yevgeny Berdichevsky, Julia Khandurina, András Guttman, Y.-H. Lo, "UV/ozone modification of poly(dimethylsiloxane) microfluidic channels," Sensors and actuators. B, Chemical, vol. 97, no. 2/3, pp.402-408, 2004.