

마이크로 펌프와 밸브가 집적된 polydimethylsiloxane microfluidic system

유종철, 문민철, 김주호, 강치중*, 김용상
 영지대학교 전기공학과, *영지대학교 물리학과

A new polydimethylsiloxane microfluidic system integrated with micropump and microvalve

Jong-Chul Yoo, Min-Chul Moon, Ju-Ho Kim, C. J. Kang*, Yong-Sang Kim
 Dept. of Electrical Eng, Myongji University, *Dept. of Physics, Myongji University

Abstract - 본 연구에서 제안한 microfluidic system은 열공압 방식으로 구동 되고 indium tin oxide (ITO) 및 polydimethylsiloxane(PDMS)로 제작하여 공정이 간단하고 비용이 저렴하여 일회용으로 사용이 가능하며 투명한 장점을 갖는다. 또한 마이크로 펌프는 인-채널 구조의 마이크로 밸브와 동일한 공정으로 제작하였다. 제안된 마이크로 펌프는 인-채널 구조의 마이크로 밸브와 같은 기관 위에 쉽게 집적하여 제작할 수 있다. 마이크로 펌프의 pumping rate는 인가 펄스 전압의 주파수와 duty 비를 변화시켜 최적화 하였다. Duty 비가 1 %이고 주파수가 2 Hz일 때 최대 pumping rate를 보였으며 이때 pumping rate는 26.18 nL/min이었다. 마이크로 밸브는 ITO 히터에 전력을 인가함으로써 유량의 on/off 제어가 잘 됨을 확인할 수 있었고 유체를 closing하기 위해 필요한 전력은 100 mW이다.

1. 서 론

최근 MEMS 공정 기술을 기초로 제작된 microfluidic system의 개발에 많은 관심이 집중되고 있다. 마이크로 펌프와 마이크로 밸브는 micro-TAS (Micro Total Analysis System) 혹은 lab-on-a-chip을 포함하는 바이오 및 화학 응용분야에서 중요한 유체 제어 디바이스로 주목을 받고 있다 [1]. 이러한 기술의 개발을 위해서는 microfluidic system (마이크로 펌프, 마이크로 밸브, 마이크로 채널, 마이크로 믹서 등)의 집적이 필수적으로 요구된다. 제안된 microfluidic system은 보고되어진 인-채널구조의 polydimethylsiloxane(PDMS) 마이크로 펌프, 밸브와 동일한 공정과정으로 제작하였다 [2, 3]. 그러므로 제안된 microfluidic system 인-채널 구조의 PDMS 마이크로 펌프와 밸브를 같은 기관위에 쉽게 집적하여 제작할 수 있다.

열공압 방식의 microfluidic system은 membrane 변위가 매우 크다는 장점을 가지고 있기 때문에 [4], 제안된 마이크로 펌프와 밸브의 동작에 아주 적합하다 [5]. 본 연구에서 채널 cavity, membrane, 열공압 챔버 모두 PDMS를 사용하여 제작 하였기 때문에 실리콘에 비해 물딩 대량 생산이 가능하고 물질 및 공정비용 모두가 저렴하며 투명하다는 장점을 갖는다 [6]. 히터는 indium tin oxide (ITO)를 사용하여 제작하였으므로 히터로 흔하게 사용되는 금에 비해 가격이 매우 저렴하다. 이런 측면에서 micro-TAS 또는 lab-on-a-chip은 일회용으로 사용되는 응용부분이 많으므로 매우 좋은 장점을 가진다.

본 논문에서는 마이크로 펌프와 밸브를 집적하여 하나의 기관위에 제작하였으며 그 특성을 분석하였다. System내에 위치한 마이크로 펌프의 pumping rates는 인가하는 전압의 주파수와 duty비를 가변하여 특성을 분석하였다. 또한 마이크로 밸브의 동작 상태 분석을 위해 ITO 히터에 파워를 on/off로 전환하면서 flow rates를 측정 하였다.

2. DESIGN

그림 1은 제안된 PDMS microfluidic system의 구조를 보여준다. 그림 1(a)는 PDMS microfluidic system의 단면도이다. Glass, ITO히터, PDMS 열공압 챔버, PDMS membrane, 그리고 PDMS 채널 층으로 구성되어 있다. 그림 1(b)는 마이크로 펌프와 밸브가 집적된 PDMS microfluidic system의 평면도이다. PDMS 평면도의 cavity는 pump chamber, diffuser, reservoir, valve seat, microchannel, inlet hole, outlet hole로 구성되어 있다.

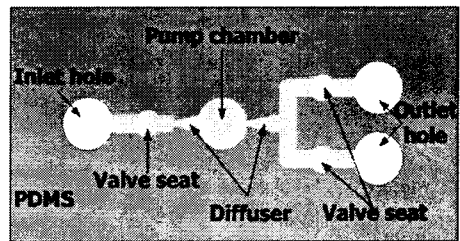
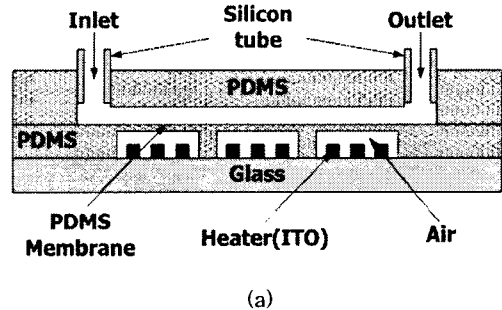


그림 1. 제안된 microfluidic system의 구조. (a) 마이크로 펌프와 마이크로 밸브가 집적된 microfluidic system의 단면도, (b) microfluidic system의 평면도.

본 연구에서 제안하는 microfluidic system에서 마이크로 펌프의 diffuser inlet 쪽, 길이, divergence 각도는 각각 80 μ m, 1500 μ m, 10° 이다. 펌프 챔버의 지름과 길이는 3.5 mm와 100 μ m로 제작하였다. 열공압 챔버의 길이는 130 μ m이고 면적은 $\pi \times 1.75^2 \text{ mm}^2$ 로 제작하였고 ITO 히터의 dimension은 2.35 \times 2.35 mm^2 로 제작하였다. 마이크로 밸브의 공정 조건은 마이크로 펌프의 조건과 모두 같으나 열공압 챔버의 면적이 2.4 \times 2.4 mm^2 로 다르다. 또한 ITO 히터의 dimension은 2 \times 2 mm^2 로 제작한다. PDMS 채널 층에는 inlet과 outlet에 hole 형성되어 있고 내경이 1 mm인 실리콘 튜브가 연결되어 있다. 같은 기관위에 같은 공정 진행 과정을 갖는

microfluidic system을 제작하기 위하여, 마이크로 펌프와 밸브의 PDMS membrane의 두께를 240 μm 로 제작하였다. ITO 히터가 열공압 챔버를 가열할 때, 챔버 내의 공기는 부피 팽창을 일으킨다. 이때 마이크로 펌프는 PDMS membrane이 구부러짐으로서 동작하고, membrane이 밸브 seat를 차단함으로써 유체는 흐르지 못하게 된다. 반대로 ITO 히터의 전원을 차단하면 열공압 챔버의 가열된 공기는 차가워지면서 수축된다. 이러한 경우에 마이크로 펌프는 계속해서 동작을 하지만 밸브 seat는 열리게 되어 유체가 흐르게 된다.

3. 실험

제안된 마이크로펌프와 밸브가 집적된 microfluidic system은 그림 2에서처럼 PDMS 채널 층 공정, PDMS membrane 공정, ITO 히터 제작 공정, 그리고 집합 공정의 진행으로 제작 된다.

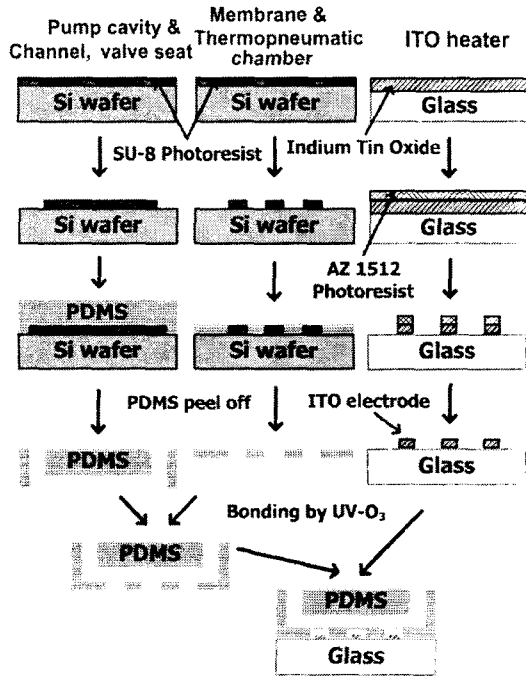
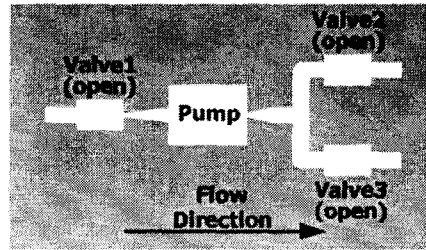


그림 2. 제안된 microfluidic system의 공정 진행 과정.

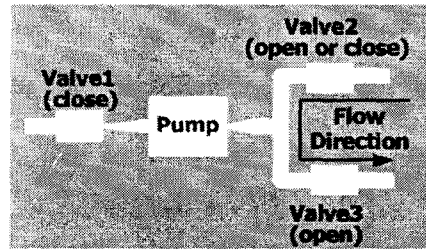
먼저, PDMS 채널 층 공정은 실리콘 기판 위에 SU 8을 100 μm 두께로 코팅 후 채널을 패터닝 하였다. PDMS A, B 타입 용액을 10:1로 잘 섞은 후 SU-8이 패터닝된 실리콘 기판 위에 붓는다. PDMS curing은 상온에서 24시간 동안 실시하였고, curing이 끝난 후 조심스럽게 실리콘 기판으로부터 PDMS 채널 층을 분리하였다. Inlet과 outlet에 튜브를 연결하기 위해, 패터닝된 PDMS 표면에 기계적으로 구멍을 뚫었다. 두 번째로 PDMS membrane 공정이다. 실리콘 기판 위에 130 μm 두께의 SU-8 코팅 후 패터닝 하였다. 다음 공정에서 제작된 얇은 PDMS membrane과 패터닝된 실리콘 기판의 접착력을 저하시키기 위해 P5000II-Etcher장비를 사용하여 실리콘 기판에 60초동안 CHF_3 -GAS 처리를 해준다. 이 공정은 얇은 PDMS membrane을 실리콘 기판으로부터 쉽게 떼어내기 위한 공정이다. 패터닝에 240 μm 의 membrane을 형성하기 위해 PDMS를 패터닝된 웨이퍼위에 스핀-코팅 한다. 세 번째 공정은 ITO 히터 공정으로서 ITO가 증착된 유리 기판 위에 AZ-1512 PR을 코팅 후 현상하였다. ITO 히터를 패터닝 하기위해 ITO-Etchant 용액에 에칭을 한

후 남은 PR용액을 제거 하였다. 마지막으로 제작된 각각의 층을 집합하는 것이다. 공정은 PDMS층간의 접착 및 PDMS와 유리와와의 접착을 위해 UV 오존 클리너를 사용하였다. PDMS 채널 층과 PDMS 열공압 챔버 층을 오존 클리너를 이용하여 오존 처리를 수행 후 접합하였다. 그 후 열공압 챔버와 ITO 히터가 있는 유리 층을 같은 방법으로 접착한다.

제작된 펌프와 밸브는 인가된 전압의 주파수와 duty비를 조절하고 히터에 인가되는 전력에 따른 유량 특성을 측정하였다.



(a)



(b)

그림 3. Microfluidic system의 특성을 분석하기 위한 실험의 개략도. (a) 시스템 내에 집적된 마이크로 펌프의 동작특성을 분석하기 위한 실험 방법의 개략도, (b) 마이크로 밸브의 flow rate를 측정하기 위한 실험 방법 개략도.

그림 3(a)는 마이크로 펌프의 pumping rate를 측정하기 위한 실험 방법이다. Pumping rate 측정 시 inlet과 outlet의 압력 차이는 항상 일정하게 유지하며 측정하였다. ITO히터에는 펄스 전압이 인가되고 그로 인해 outlet 튜브에는 다양한 유체의 변위가 측정된다. 마이크로 펌프의 pumping rate의 측정은 시스템 내의 모든 마이크로 밸브는 열려있는 상태에서 진행 된다. 그림 3(b)는 마이크로 밸브의 flow rate를 측정하기 위한 실험 방법이다. 밸브2의 on/off 특성은 밸브1은 닫혀있고 밸브3이 열려있는 상태에서 측정된다. Flow rate는 outlet 튜브에 가득차 있는 유체들의 변위로서 측정한다. 위의 실험을 위해 채널 내에 흘려주는 테스트용 유체는 D. I water가 사용되었다.

4. 결과 및 토의

본 연구에서는 microfluidic system의 최적 동작 상태를 분석하였다. 그림 4은 펄스 전압을 60 Volt로 고정하고 주파수를 1 Hz부터 8 Hz로 변화시켜 인가하였을 경우의 유량을 보여준다. ITO히터 저항은 1.8 k Ω 이다. 마이크로 펌프의 pumping rates는 인가전압의 duty비가 1 %와 2 %에서 측정 하였다. 최대 pumping rate는 duty비 1 %와 2 % 모두 2 Hz의 주파수에서 측정 되었다. Duty비가 1 %에서 pumping rate의 최대값을 관찰할 수 그 수치는 26.18 nl/min 이다. Duty비가 너무 낮아지면 열에 의한 공기 팽창이 불충분하게 발생되어 변위가 작게 생성되므로 낮은 pumping rate가 발생된다. 또한

duty비가 너무 높은 상태에서는 열공압 챔버 내부의공기가 완전히 식지 못하여 변위가 작게 생성돼 pumping rate가 낮게 발생한다. 마이크로 펌프의 membrane 두께가 얇아질수록 membrane의 복원력이 약해진다. 따라서 microfluidic system에 집적된 마이크로 펌프는 적은 주파수와 duty비에서 동작한다. 그림 5는 microfluidic system에 100 mW 파워를 on/off 할 때의 동적인 특성을 나타낸다. 이 결과는 ITO 히터를 on/off 스위칭할 때 flow rate가 잘 제어 된다는 것을 보여준다.

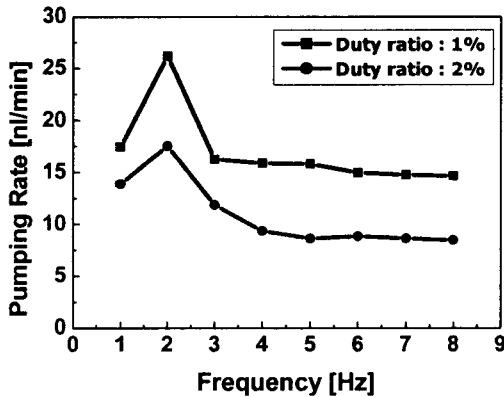


그림 4. Microfluidic system에 집적된 마이크로 펌프의 인가전압 주파수에 따른 pumping rates의 특성.

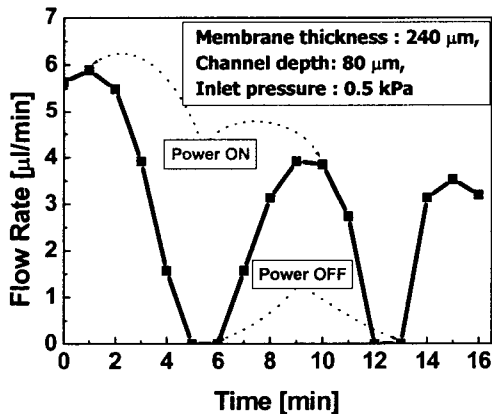


그림 5. Microfluidic system의 유체 스위칭 작동에 의한 유동적 특성.

Microfluidic system이 유체를 차단하기 위해 필요한 전력은 100 mW이다. Flow rate를 측정하는 동안 inlet과 outlet의 압력은 0.5 kPa로 유지된다.

본 연구에서 같은 공정 진행 과정을 가지고 있는 마이크로 펌프와 밸브를 집적하기 위한 조건을 알아냈다. 마이크로 펌프와 밸브는 같은 PDMS membrane 두께를 가지고 microfluidic system으로서 집적된다. 마이크로 펌프는 membrane 두께가 두꺼워질수록 최대 pumping rate가 크게 나타난다. 그리고 마이크로 밸브의 membrane 두께가 얇아질수록 flow rate의 조절이 더욱 더 쉬워진다 [2, 3]. 제작된 microfluidic system은 이전에 발표되었던 마이크로 펌프보다 적은 pumping rate를 갖는다. 이는 마이크로 밸브와의 집적을 위해 PDMS membrane 두께가 얇아져서 복원력이 부족하기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 같은 기관위에 마이크로 펌프와 밸브가 같은 공정 과정으로 집적된 새로운 PDMS microfluidic system을 제작하고 특성을 분석하였다. 제안된 시스템은 인-채널 방식으로 다른 디바이스와 쉽게 집적이 가능함을 보여 주었다. Duty 비가 1%이고 주파수가 2 Hz일 때 최대 pumping rate를 보이며 이때 pumping rate는 26.18 nl/min이었다. 시스템 내의 마이크로 밸브는 ITO 히터에 전력을 on/off 함으로서 유량의 제어가 잘 됨을 확인할 수 있으며 유체를 closing하기 위해 필요한 전력은 100 mW이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Kwang-Seok Yun, Il-Joo Cho, Jong-Uk Bu, Chang-Jin Kim, and Euisik Yoon, "A surface-tension driven micropump for low-voltage and low power operations," Journal of Microelectromechanical System, vol.11, pp. 454-461, 2002.
- [2] Jin-Ho Kim, Kwang-Ho Na, C. J. Kang, and Yong-Sang Kim, "A disposable thermopneumatic-actuated micropump stacked with PDMS layers and ITO-coated glass," Sensors and actuators. A, Physical, vol.120 no.2, pp.365-369, 2005
- [3] Jin-Ho Kim, Kwang-Ho Na, Yong-Sang Kim, "A disposable thermopneumatic-actuated microvalve stacked with PDMS layers and ITO-coated glass," Microelectronic Engineering, vol. 73-74, pp.864-869, 2004.
- [4] P. Selvaganapathy, E. T. Carlen, and C. H. Mastrangelo, "Electrothermally actuated inline microfluidic valve," Sensors and Actuators A : Physical, vol.104, pp.275-282, 2003.
- [5] Hidekuni Takao, Kazuhiro Miyamura, Hiroyuki Ebi, Mitsuaki Ashiki, Kazuaki Sawada, and Makoto Ishida, "A Thermo-pneumatic In-channel Microvalve With PDMS Diaphragm for Integrated Blood Examination System on Silicon," The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, TRANSDUCERS '03, pp.139-142, 2003.
- [6] Robin H. Liu, Qing Yu, and David J. Beebe, "Fabrication and Characterization of Hydrogel-Based Microvalves", Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 11, no. 1, pp.45-53, 2002