

Lab-on-a-chip과 m-TAS를 위한 미세 유체 시스템

문민철, 김주호, 김진호, 강치중*, 김용상
 명지대학교 전기공학과, *BOE-HYDIS, **명지대학교 물리학과

Fabrication and Characteristics of Thermopneumatic-Actuated Polydimethylsiloxane microfluidic systems

Min-Chul Moon, Ju-Ho Kim, C. J Kang*, and Yong-Sang Kim
 Department of Electrical Engineering, *Department of Physics, Myongji University

Abstract - 본 연구에서 제안하는 마이크로 시스템은 열공압 방식으로 구동되고 제작비용이 저렴한 indium tin oxide (ITO) 및 polydimethylsiloxane (PDMS)로 제작되었다. 제안된 마이크로 밸브와 마이크로 펌프의 구조는 ITO 히터, SU-8 층, PDMS membrane, 그리고 PDMS 채널로 구성 되어 있다. 제안된 마이크로 펌프와 마이크로 밸브는 제작 공정 및 구조가 간단하고 값이 저렴하며, 마이크로 펌프와 마이크로 밸브를 같은 기판 위에 쉽게 직접화할 수 있는 장점을 가진다. 마이크로 밸브의 유량은 채널 쪽에 비례하며 밸브가 closing 되는 전력은 채널의 폭과 상관없이 100 mW이다. 마이크로 밸브의 ITO 히터의 온-오프에 따라 유량이 매우 잘 제어되었다. 제안된 마이크로 펌프의 경우, 히터의 인가 펄스 전압이 증가함에 따라 유량은 선형적으로 비례 증가함을 관찰할 수 있다. 마이크로 펌프의 최대 유량은 펄스 전압과 duty 비가 55V와 10%일 때 6 lL에서 78 nl/min이 측정 되었다.

크로 밸브 PDMS 채널 층의 평면도이며 밸브 seat는 지름 1.2 mm인 원이다. 그림 1(c)는 본 연구에서 제안된 마이크로 펌프의 cavity를 보여주며 펌프 챔버, diffuser, inlet hole, outlet hole, 저장소로 구성되어 있다. 펌프 챔버의 지름과 깊이는 3.5 mm와 130 μm로 제작하였다. 그림 1(d)는 마이크로 펌프와 마이크로 밸브를 하나의 기판 위에 통합한 평면도이다. outlet 쪽에 두 개의 밸브는 분배기 또는 혼합기 역할을 한다.

1. 서 론

마이크로 펌프와 마이크로 밸브는 micro-TAS (Micro Total Analysis System) 및 lab-on-a-chip 응용에 있어 매우 중요한 유체 제어 디바이스로 주목 받고 있다. lab-on-a-chip의 개발을 위해서는 미세 유체 제어 디바이스들 (마이크로 밸브, 마이크로 펌프, 마이크로 채널, 마이크로 믹서 등)의 집적이 필수적으로 요구된다. 그러나 다른 구조를 갖는 마이크로 밸브와 마이크로 펌프를 하나의 기판에 집적하려면 시스템의 구조가 매우 복잡해진다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 같은 구조를 갖는 마이크로 밸브 및 마이크로 펌프를 개발해야 한다. 다시 말하면, 마이크로 밸브와 마이크로 펌프의 채널 cavity 모양을 제외한 나머지 구조를 동일하게 설계하여 제작하는 것이다.

본 연구의 목적은 열공압력으로 구동하는 PDMS 마이크로 펌프와 마이크로 밸브를 제작하고 특성을 분석하며 두 개의 디바이스를 하나의 기판에 집적화하는데 있다. 제안된 미세 유체 시스템은 인-채널 구조방식으로 제작하였고 같은 기판위에 쉽게 집적하여 제작 할 수 있다. 제안된 마이크로 펌프와 마이크로 밸브는 채널 cavity, membrane, 열공압 챔버를 모두 PDMS를 사용하여 제작하였고 히터는 indium tin oxide (ITO)로 제작하여 값이 저렴하고 완전히 투명하다는 장점을 가진다 [1].

본 논문에서는 마이크로 펌프와 마이크로 밸브 [2]를 각각 제작하여 특성을 분석하였으며 두 개의 디바이스를 하나의 기판 위에 집적하여 제작하였다.

2. 본 론

2.1 마이크로 펌프 및 마이크로 밸브의 구조

그림 1(a)는 마이크로 펌프의 단면도이고 유리 층, ITO히터, PDMS 열공압 챔버, PDMS membrane, 그리고 PDMS 채널 층으로 구성되어 있다. 그림 1(b)는 마이

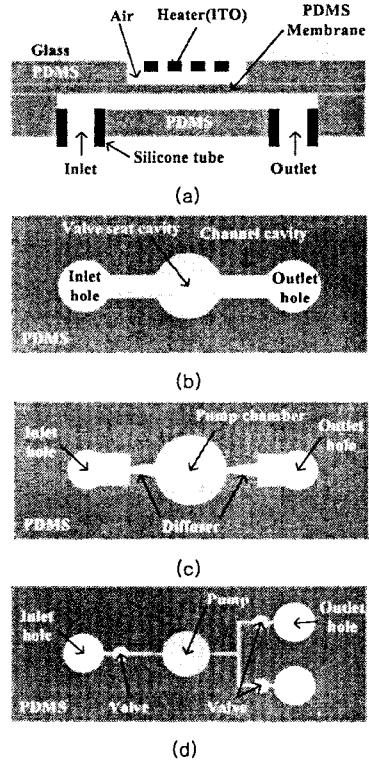


그림 1. 제안된 마이크로 펌프 및 마이크로 밸브의 구조. (a) 마이크로 펌프 및 마이크로 밸브의 단면도, (b) 마이크로 밸브 PDMS층의 평면도, (c) 마이크로 펌프 PDMS 층의 평면도 (d) 마이크로 펌프와 마이크로 밸브가 통합된 마이크로 시스템의 평면도.

그림 2는 diffuser 펌프의 동작원리를 보여준다. 마이크로 펌프의 ITO히터에는 펄스 전압이 인가되어지고, 이때 열공압 챔버 내의 공기가 열로 인해 부피가 팽창하여 PDMS membrane을 휘게 만든다. 이로 인해 펌프 챔버

의 부피는 줄어들어 양단의 diffuser를 통해 유체를 밀어낸다. 반대로 ITO 히터의 히터에 전압이 off 되면 열공압 챔버 내의 공기의 부피가 감소하므로 펌프 챔버의 부피가 증가되어 양단의 diffuser를 통해 유체가 유입된다.

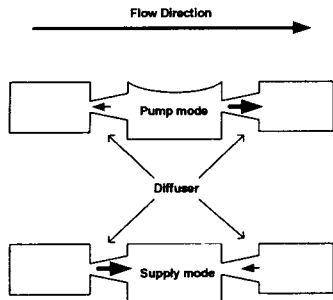


그림 2. diffuser 마이크로 펌프의 동작개념.

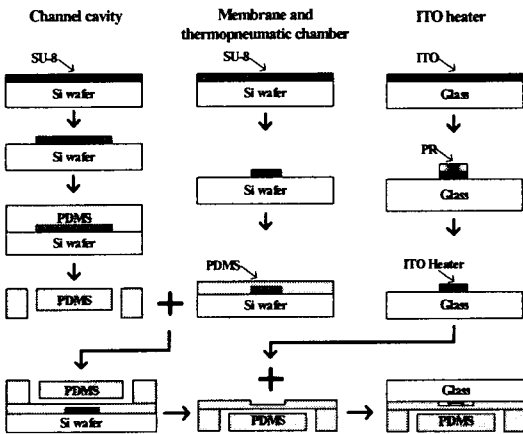


그림 3. 제안된 마이크로 펌프 및 마이크로 밸브의 제작 공정.

2.2 마이크로 펌프 및 마이크로 밸브 제작

그림 3은 제안된 미세 유체 시스템의 제작 공정을 나타내고 있다. 마이크로 펌프의 PDMS cavity와 마이크로 밸브 seat를 제작하기 위해 음성 감광재 (SU-8 50)를 실리콘 웨이퍼 위에 130 μm 두께로 스핀 코팅한 후 사진 공정을 통해 cavity를 형성한다. PDMS A, B 타입 용액을 10 : 1 비율로 섞은 후 SU-8 패턴이 형성된 실리콘 웨이퍼 위에 부은 후 상온에서 24시간 동안 curing 한다. curing이 끝난 후 PDMS replica를 실리콘 웨이퍼에서 조심스럽게 분리한다. inlet과 outlet 튜브를 연결하기 위하여 PDMS replica에 기계적으로 구멍을 형성한다.

PDMS 열공압 챔버와 membrane을 제작하기 위해 음성 감광재 (SU-8 2075)를 실리콘 웨이퍼 위에 130 μm 두께로 스핀 코팅 후 사진 공정을 통해 열공압 챔버 cavity를 형성한다. 차후 공정에서 PDMS 층이 실리콘 웨이퍼로부터 잘 분리되게 하기위해 실리콘 표면 위에 CH_4 플라즈마 처리를 수행하여 fluorocarbon 필름을 형성하였다. PDMS 혼합용액을 SU-8 패턴이 형성된 실리콘 웨이퍼 위에 스핀 코팅한다. PDMS 층의 전체 두께는 900 μm 로 코팅하였고 열공압 챔버의 두께가 130 μm 임을 고려하면 PDMS membrane 두께는 770 μm 이다. 코팅한 PDMS를 90 °C에서 30분 동안 curing하였다. 그림 4(b)는 PDMS 열공압 챔버와 membrane의 SEM 사진이다.

그림 3과 같이 ITO 히터 공정은 먼저 유리 기판 위에 sputter 장비를 사용하여 ITO를 170 nm 두께로 증착하였다. 증착된 ITO의 면저항은 10 Ω/\square 이다. ITO 히터를 제작하기 위해 PR 패턴공정을 실시하였다. 그 후 ITO는 FeCl_3/HCl 용액에서 식각하였다. 마지막으로 PR을 제거하여 ITO 히터를 완성하였다.

본 실험에서는 PDMS층 간의 접착 및 PDMS와 유리의 접착을 위해 UV 오존 클리너를 사용하였다. 그림 3과 같이 PDMS 열공압 챔버 층과 PDMS 채널층을 오존 클리너를 이용하여 오존 처리를 수행 후 접착하였다. 접착 후 PDMS 층으로부터 실리콘 웨이퍼를 분리하였다. 그 후 열공압 챔버와 ITO 히터가 있는 유리층을 같은 방법으로 접착한다. 그림 4는 완성된 마이크로 펌프와 마이크로 밸브 사진이다.

본 실험에서는 마이크로 펌프와 마이크로 밸브 내부에 유체를 채우면서 생기는 버블을 최소화하기 위해 표면장력이 작은 메탄올을 사용하였다. 유량 측정 시 inlet과 outlet의 압력 차이는 항상 일정하게 유지하며 측정하였다. 유량 측정은 마이크로 펌프의 ITO히터에 펄스 전압을 인가하고 outlet 튜브 내의 메탄올과 공기의 경계면의 이동거리를 통해 산출하였다.

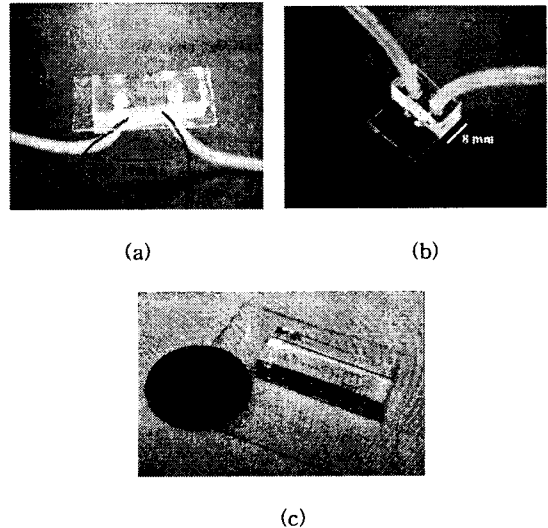


그림 4. 완성된 PDMS 마이크로 펌프(a), 마이크로 밸브(b), 직접화된 마이크로 펌프와 밸브(c) 사진.

3. 결과 및 토의

본 연구에서는 열공압 방식의 PDMS 미세유체 시스템을 제작하고 특성을 분석하였다. 제안된 미세유체 시스템은 제작 공정 및 구조가 간단하고 값이 저렴하며, 마이크로 펌프와 마이크로 밸브를 같은 기판 위에 쉽게 직접화할 수 있는 장점을 가진다. 그림 5는 채널 폭에 따라 마이크로 밸브에 인가된 전력에 대한 유량 관계를 보여준다. 채널의 폭이 400 μm , 500 μm , 600 μm 일 때의 유량은 각각, 142 $\mu\text{l}/\text{min}$, 233 $\mu\text{l}/\text{min}$, 300 $\mu\text{l}/\text{min}$ 이다. 이것은 마이크로 밸브의 유량이 채널 폭에 비례하는 것을 보여준다. 그러나 채널의 폭과 상관없이 밸브가 닫히는데 필요한 전력은 100 mW이다. 그림 6은 제안된 마이크로 밸브의 스위칭 온-오프 특성을 보인다. 채널 폭, 깊이, PDMS membrane 두께는 각각 400 μm , 40 μm , 170 μm 이다. 온-오프 특성을 측정하는 동안 인가된 전력은 300 mW이다. 유량은 ITO 히터의 온-오프에 따라 제어되며 밸브가 개폐되는 시간은 열릴 때가 25초, 닫힐 때가 20초이다.

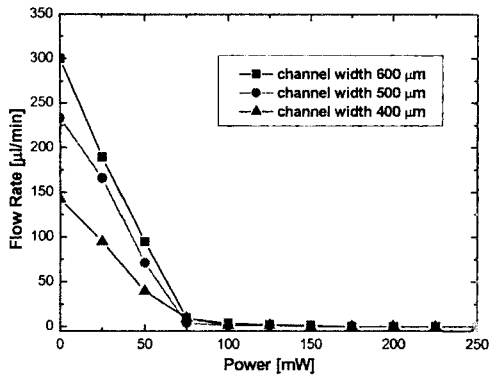


그림 5. 유체 스위칭 작동에 따른 마이크로 밸브의 유동 특성.

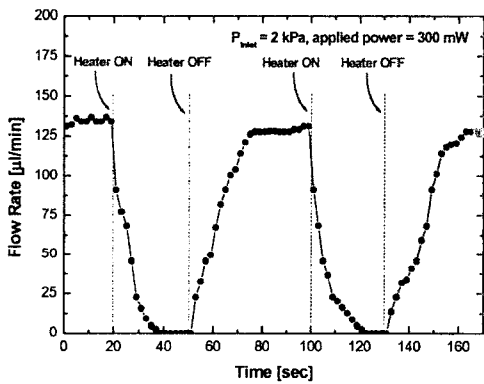


그림 6. 유체 스위칭 작동에 따른 마이크로 밸브의 유동 특성.

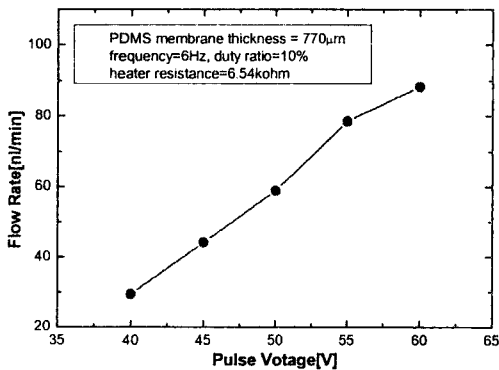


그림 7. 인가 펄스 전압에 따른 유량 특성.

그림 7은 마이크로 펌프의 히터에 펄스 전압 40 V 부터 60 V 까지 5 V 간격으로 변화시켜 인가 할 때의 유량의 변화를 보여준다. 이때 주파수와 duty 비는 6 Hz와 10 %로 고정하였다. 히터의 인가 펄스 전압이 증가함에 따라 유량은 선형적으로 비례 증가함을 관찰할 수 있다. 이러한 유량의 변화는 펄스 전압이 증가에 따라 membrane의 변위가 비례적으로 증가하기 때문으로 사료된다 [3].

그림 8은 펄스 전압과 duty 비를 55 V와 10 %로 고정

하고 주파수를 2 Hz부터 9 Hz로 변화시켜 인가하였을 경우의 유량을 보여준다. 최대 유량은 6 Hz에서 78 nl/min이 측정 되었다. 주파수 6 Hz 부터 9 Hz까지는 열공압 챔버 내부 공기의 느린 응답 속도로 인하여 유량이 감소하는 것으로 사료된다.

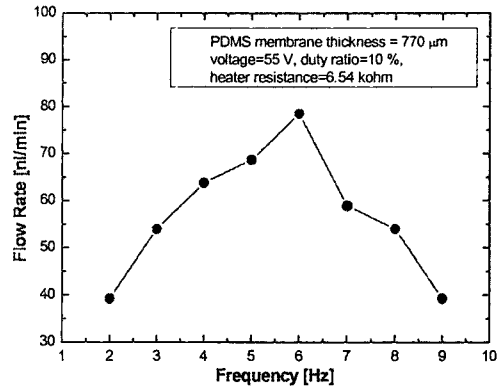


그림 8. 인가된 주파수에 따른 마이크로 펌프의 유량.

4. 결 론

본 연구에서는 열공압 방식의 PDMS 미세 유체 시스템을 제작하고 특성을 분석하였다. 제안된 마이크로 펌프와 마이크로 밸브는 같은 기판 위에 쉽게 집적 가능함을 보여주었다. 제안된 마이크로 펌프와 마이크로 밸브의 제작공정은 매우 간단하다. 제작된 마이크로 밸브는 유량의 on/off 뿐만 아니라 유량의 크기 제어도 잘됨을 확인할 수 있었다. 마이크로 펌프의 유량은 ITO 히터의 인가 펄스 전압이 증가함에 따라 선형적으로 비례 증가하였고 매우 잘 제어됨을 알 수 있었다. 제작된 마이크로 펌프의 특성은 일회용 약물전달 시스템 응용에 적합함을 관찰하였다 [4].

[참 고 문 헌]

- [1] Jin Ho Kim, Kwang-Ho Na, Yong Sang Kim, "Thermopneumatic-actuated PDMS Microvalve," Microelectronic Engineering, vol.71, pp.119, 2004.
- [2] 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.
- [3] Ok Chan Jeong and Sang Sik Yang, "Fabrication of a Thermopneumatic Microactuator with a Corrugated p-Silicon Diaphragm," Sensors and Actuators A : Physical, vol.80, pp.62-67, 2000.
- [4] Bourouina, Tarik, Bossebœuf, Alain, and Grandchamp, Jean Paul, "Design and simulation of an electrostatic micropump for drug delivery applications," Journal of micromechanics and microengineering, vol. 7 no. 3, pp.186-188, 1997