

동일 구조의 마이크로 펌프와 밸브가 집적된 열공압 방식의 PDMS 미세 유체 시스템

문민철, 유종철, 강치중, 김용상

명지대학교 전기공학과 & 나노 바이오 연구소, 명지대학교 물리학과 & 나노 바이오 연구소

A thermopneumatic-actuated polydimethylsiloxane microfluidic system integrated with micropump and microvalve on the same structure

Min-Chul Moon, Jong-Chul Yoo, C. J. Kang, Yong-Sang Kim

Dept. of Electrical Eng, Myongji University, Dept. of Physics, Myongji University

Abstract - 열공압 방식으로 동작하는 마이크로 펌프와 밸브가 집적된 (polydimethylsiloxane)PDMS 미세 유체 시스템을 제작하였다. 본 실험에서 제한한 미세 유체 시스템은 PDMS 마이크로 채널, PDMS membrane, 열공압 챔버, indium tin oxide(ITO) 히터로 구성되어 있다. 마이크로 펌프의 경우 가해주는 펄스 전압의 변화를 통해 유속을 최적화 하였고 마이크로 밸브의 경우 가해주는 직류 전압을 변화시켜 유체의 흐름을 제어할 수 있었다. 미세 유체 시스템의 최적화된 조건은 마이크로 펌프의 경우 duty 4%와 주파수 4Hz에서 최대 pumping rate 을 나타냈고 그때의 pumping rate 68nl/min이었다. 마이크로 밸브의 유체를 closing 전력은 450mW이었다.

각각 80 μ m, 1200 μ m, 15°이다. 마이크로 채널 윗부분의 눈금은 각 1mm 간격으로 구성되어 있고 마이크로 펌프와 밸브의 ITO 히터는 각각 2050 μ m*2050 μ m, 1750 μ m*1750 μ m의 크기를 갖는다. Membrane은 마이크로 펌프와 밸브를 집적하기 위해 350 μ m로 제작하였다.

1. Introduction

최근 LOC(Lap-On-a-Chap)이나 μ -TAS(micro total analysis system)에 많이 응용되고 있는 마이크로 펌프나 밸브에 관한 연구들이 진행되고 있다. 이들 디바이스나 단일 디바이스에 그치지 않고 한 기관 위에 집적함으로써 하나의 시스템으로 사용할 수 있게 된다. 전자기 [1], 정전기[2], 전기삼투[3], 압전기[4], 열공압[5] 등의 디바이스 동작 원리가 있지만 공정이 간단하고 저렴한 열공압 방식으로 디바이스를 제작하였다. 뿐만 아니라 기존 연구자들의 경우 반도체 물질이나 Glass를 이용해 공정이 복잡하고 비용이 많이 들었으나 본 연구에서 제한하는 PDMS와 Glass, ITO를 이용한 시스템의 경우 공정이 간단하고 비용이 저렴하며 투명하며 후대가 간편하고 일회용이 가능하다는 장점을 갖는다. 또한 인-채널 구조로 마이크로 펌프와 마이크로 밸브가 같은 공정으로 제작된다. PDMS, glass를 사용함으로써 디바이스의 각층을 간단하게 bonding할 수 있다.

본 연구에서 마이크로 펌프와 밸브를 동일 기관 위에 제작하였을 뿐만 아니라 동일 유속 내에서 함께 동작하는 특성을 확인하였다. 두 디바이스 모두 가해진 전압의 간단한 조작을 통해 특성을 확인할 수 있었다. 마이크로 펌프의 경우 펄스 전압(duty비, frequency)의 변화로 flow rate을 확인하였고 마이크로 밸브의 경우 input 전압의 변화로 on/off 특성을 확인하였다.

2. Configuration and Principle

그림 1은 미세 유체 시스템의 구조를 나타낸다. 그림 (a)는 미세 유체 시스템의 단면도이다. 유체가 흐르는 PDMS 마이크로 채널 부분과 PDMS membrane, 열공압 챔버, ITO 히터, glass로 구성되어 있다. 그림 (b)는 PDMS 몰드의 평면도이다. 펌프 챔버와 valve seat, diffuser로 이루어져 있다. 특히 마이크로 채널 윗부분의 눈금을 이용해 유체가 흐르는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 펌프 챔버의 직경은 4000 μ m이고 밸브 시트의 직경은 1mm이다. diffuser의 입구 쪽 너비와 길이, 발산 각도는

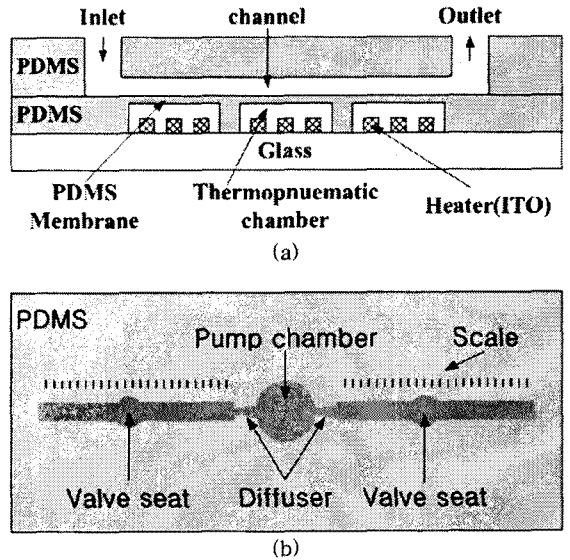


그림 1. 마이크로 펌프와 밸브가 집적된 미세 유체 시스템의 구조
(a) 미세 유체 시스템의 단면도, (b) 평면도

마이크로 펌프의 동작 원리는 히터에 가해주는 펄스 전압에 따라 열공압 챔버가 heating/cooling되고 그에 따라 PDMS membrane이 deflection되면서 diffuser의 특성에 의해 유체가 inlet에서 outlet로 흐르게 된다. 그림 2에서 diffuser의 특성을 보여준다. 펌프에 가해진 펄스 전압이 off일 경우 공급 모드로 inlet쪽 유체가 outlet쪽 유체보다 더 많이 펌프 챔버에 유입되고 펄스 전압이 on일 경우 펌프 모드로 inlet쪽 보다 outlet쪽으로 더 많은 유체가 흐르게 된다. 그래서 전체적인 유체는 inlet에서 outlet쪽으로 형성되게 된다.[6]

마이크로 밸브의 경우 히터에 전압을 가해주면 열공압 챔버가 heating되고 챔버 내부 공기가 팽창하여 membrane이 deflection되면서 마이크로 채널을 막게 되어 유체가 멈추게 되고 전압을 가하지 않으면 열공압 챔버가 cooling되고 챔버 내부 공기가 다시 수축해 membrane이 원래대로 복구하여 채널로 다시 유체가 흐르게 된다.

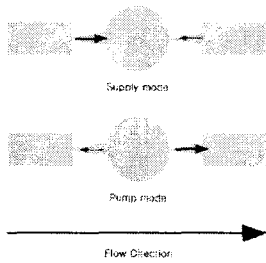


그림 2. 마이크로 펌프의 동작 원리

3. Experiment

미세 유체 시스템은 PDMS 채널, PDMS membrane, ITO 히터 이렇게 세 개의 층을 각각 반도체 공정을 통해 만들어 bonding을 함으로써 제작된다. 그림 3은 각 층의 공정 순서를 잘 보여주고 있다. 먼저 실리콘 웨이퍼 위에 negative PR인 SU-8을 130 μ m로 스핀코팅 후 포토 공정으로 채널을 패터닝한다. PDMS A, B용액을 섞어 채널이 패터닝된 실리콘 웨이퍼 위에 부은 후 72 $^{\circ}$ C 오븐에서 10시간 curing 후 실리콘 웨이퍼에서 PDMS replica를 떼어낸다. Inlet, outlet이 되는 부분을 기계적으로 구멍을 뚫는다. 두 번째로 실리콘 웨이퍼에 SU-8을 130 μ m로 스핀코팅 후 포토공정으로 membrane 패터닝을 한다. PDMS가 마이크로 채널과 같이 두꺼운 경우는 상관없지만 membrane처럼 수백 μ m 정도로 얇은 막이 될 경우 실리콘 웨이퍼에서 잘 떨어지지 않기 때문에 잘 떨어지게 하기 위해 CF₄ 가스 처리를 해준다.[7] PDMS A,B 용액을 섞어 CF₄ 가스 처리가 되어있는 membrane 패턴 위에 스핀코팅을 한다. 65 $^{\circ}$ C 오븐에서 30분 curing 후 실리콘 웨이퍼에서 PDMS membrane를 떼어낸다. 세 번째로 ITO가 코팅되어 있는 glass에 positive PR을 스핀코팅 후 포토 공정을 통해 히터 패턴을 한다.

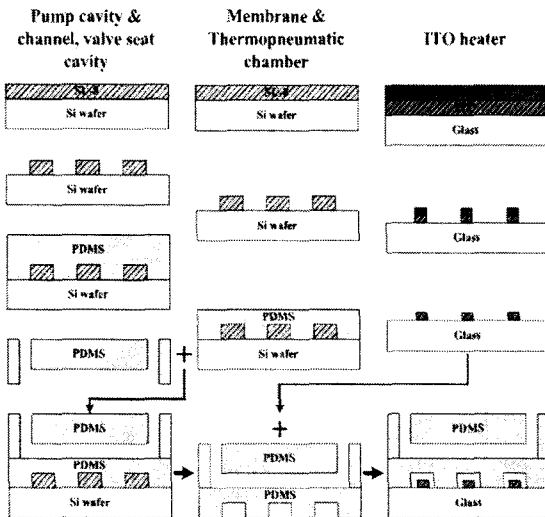


그림 3. 미세 유체 시스템의 공정 과정

세 개의 층을 bonding하기 위해 UV O₃ cleaner를 사용하였다. 각 층의 접촉면에 O₃ 처리를 해줌으로써 쉽게 bonding을 할 수 있게 된다. 그림 4는 PDMS와 PDMS, glass와 PDMS간 bonding 원리를 나타낸다. PDMS와 glass 각각 표면을 O₃ 처리를 해주게 되면 한쪽은 clearing이 되고 한쪽은 CH기가 O로 치환되어 Si-O-Si의 공유 결합을 하게 된다. 기존의 O₂ 플라즈마를 이용

한 bonding보다 O₃를 이용하는 bonding의 장점은 기기가 저렴하고 O₃ 처리 후 align을 할 시간적 여유가 있다.

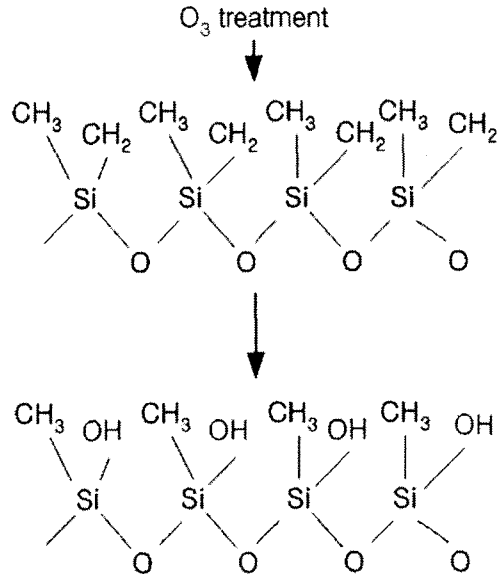


그림 4. 미세 유체 시스템의 Bonding 원리

그림 5는 완성된 미세 유체 시스템의 개략도이다. 제작된 미세 유체 시스템의 마이크로 펌프는 가해준 펄스 전압의 변화를 통해 유속을 변화시켜 주고 마이크로 밸브는 히터에 직류 전압을 가해 유체의 on/off 동작을 제어하게 된다.

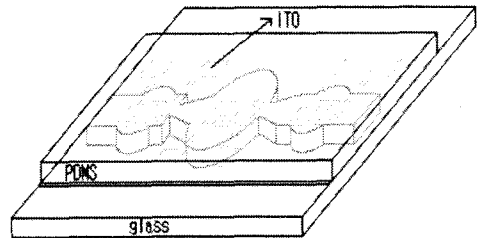


그림 5. 미세 유체 시스템의 개략도

4. Result and Discussion

미세 유체 시스템 내에 마이크로 펌프와 밸브가 동시에 동작하는 최적의 조건하에 실험을 진행하였다. 그림 5는 미세 유체 시스템 내부의 마이크로 펌프의 동작 특성을 보여준다. Duty 비를 4, 7%로 고정시켜 놓고 frequency를 1~9Hz까지 변화시켜 flow rate를 측정하였다. 이때 히터의 저항은 1.9k Ω 이었고 가해준 전압은 29V였다. 최대 flow rate은 각각 4Hz에서 나타났다. Duty 7%보다 4%에서 더욱 큰 flow rate을 보이는 이유는 7%에서는 열공압 챔버가 heating 되었다가 cooling 되는 시간이 부족해 membrane deflection이 적어지기 때문이다. 또 최대 flow rate을 나타내는 4Hz이후 flow rate 줄어드는 이유는 챔버 내부의 공기가 반응속도가 frequency보다 느려 membrane deflection이 줄어들기 때문이다.

[참고 문헌]

- [1] Saif, M.T.A. ; Alaca, B.E. ; Sehitoglu, H. "Analytical modeling of electrostatic membrane actuator for micro pumps," Journal of microelectromechanical system, Vol.8, No.3, pp.335-345, 1999
- [2] Leboucher, L. ; Boissonneau, P. ; Villani, D. "Channel shape optimization of electromagnetic pumps," IEEE transactions on magnetics, Vol.31, No.3, pp.2142-2145, 1995.
- [3] Brask, A. ; Goranovic, G. ; Bruus, H. "Theoretical analysis of the low-voltage cascade electro-osmotic pump," Sensors and actuators. B, Chemical, Vol.92 No.1/2, pp.127-132, 2003.
- [4] Maeda, R. ; Tsaur, J.J. ; Lee, S.H. ; Ichiki, M. "Piezoelectric Microactuator Device," Journal of electroceramics, Vol.12, No.1/2, pp.89-100, 2004.
- [5] Jeong, O. C. ; Yang, S. S. "Fabrication of Thermopneumatic micropump with Aluminum Flap Valves," Journal of the Korea Physical Society, Vol.37, No.6, pp.873-877, 2000
- [6] Jiang, X.N. ; Huang, X.Y. ; Liu, C.Y. ; Zhou, Z.Y. ; Li, Y. ; Yang, Y. "Micronozzle/diffuser flow and its application in micro valveless pumps," Sensors and actuators. A, Physical, Vol.70, No.1/2, pp.81-87, 1998
- [7] Hosokawa, K. ; Maeda, R. "Low-cost technology for high-density microvalve arrays using polydimethylsiloxane(PDMS)," Micro Electro Mechanical Systems 2001, pp. 531-534, 2001

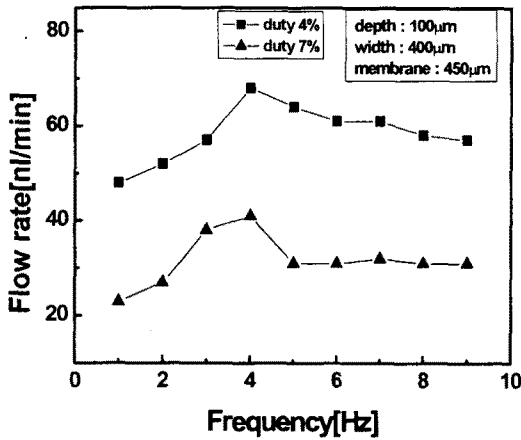


그림 5. 미세 유체 시스템 내부의 마이크로 펌프의 동작 특성

그림 6은 미세 유체 시스템 내부에 마이크로 밸브의 동작 특성을 보여준다. Inlet pressure를 0.75kPa로 유지시킨 상태에서 실험을 진행하였다. 이때 밸브의 membrane 두께는 350µm이었다. 히터에 인가한 전압에 따라 유체의 flow rate이 줄어들고 400mW에서 시스템이 완전히 closing된 것을 확인할 수 있다. 마이크로 펌프의 경우 membrane의 두께가 두꺼워야 복원력이 좋아져 flow rate이 더 크게 나오는 반면 마이크로 밸브의 경우 membrane의 두께가 얇아야 시스템의 on/off 동작을 잘 할 수 있게 된다.

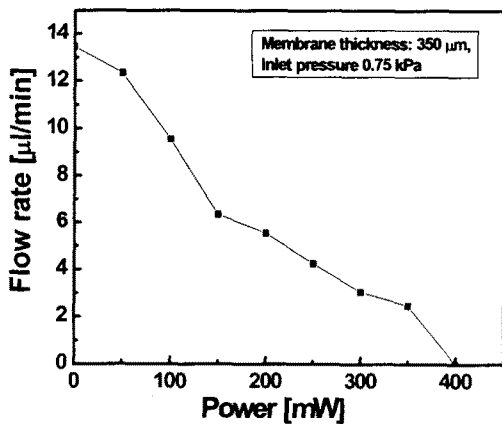


그림 6. 미세 유체 시스템 내부의 마이크로 밸브의 동작 특성

5. Conclusion

본 연구에서 동일 구조와 동작 원리를 갖는 마이크로 펌프와 밸브를 동일 기판 위에 제작하고 분석하였다. 마이크로 펌프로 유속을 제어하고 마이크로 밸브를 통해 전체 유체를 제어할 수 있다는 것을 실험을 통해 알 수 있었다. 마이크로 펌프의 최대 flow rate은 duty비가 4%이고 frequency가 4Hz일때 68nl/min이었고 마이크로 밸브의 closing 전력은 400mW였다.