

마이크로 펌프, 밸브가 집적된 폴리머 기반의 미세 유체제어 시스템의 기계적 특성 강화

라규식*, Sandeep Kumar Jha*, 윤태식*, 이현호**, 김용삼***
 명지대학교 나노공학과*, 명지대학교 화학공학과**, 명지대학교 전기공학과***

Integrated microfluidic device with polymer-based micropump and microvalve for μ -TAS devices

Gyu-Sik Ra*, Sandeep Kumar Jha*, Tae-Sik Yoon*, Hyun-Ho Lee**, Yong-Sang Kim***
 Dept. of Nano Science and Eng., Myongji University*, Dept. of Chemical Eng., Myongji University**,
 Dept. of Electrical Eng., Myongji University***

Abstract - 미세 유체 제어 시스템 (마이크로 펌프, 마이크로 밸브, 마이크로 채널, 마이크로 믹서 등)의 집적은 화학 및 바이오 유체를 제어하는 Lab-on-a-chip 의 일부분으로서 사용되며 이러한 시스템의 집적은 Lab-on-a-chip 개발을 위해 필수적으로 요구된다. 본 논문에서는 이러한 microchip을 구현하기 위해서 초미세 유체 제어 소자인 마이크로 펌프와 마이크로 밸브를 같은 기판 위에 Polydimethylsiloxane (PDMS)와 indium tin oxide (ITO)를 사용하여 집적하였다. 그리고 밸브의 반복 작동 시 지속적인 유량의 감소를 줄이기 위해 PDMS의 혼합비를 달리하여 PDMS membrane 의 기계적 특성을 강화시켰다.

1. 서 론

Lab-on-a-chip의 개념은 1990년대 말에 많은 기능의 소자들을 반도체 칩과 같이 한 칩 위에 집적 하면서 제안되었다. Burns등[1]이 제안한 칩은 소형화에 의하여 화학 분석, 혼합, 분리, 가열, 검출 등 화학공학의 전통적인 단의 조작의 기능을 가지는 소자들과 화학 분석의 기능을 가지는 소자들을 한 칩 위에 집적한 것이다.

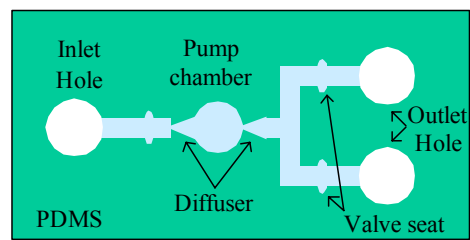
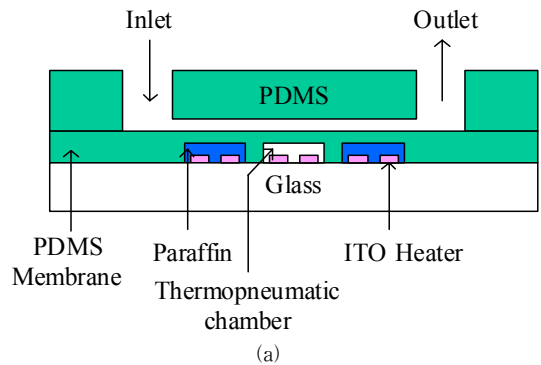
미세 유체 제어 시스템은 원하는 방향으로 원하는 양의 유체가 흐르도록 하는 유체의 교통제어 시스템이라고 할 수 있다. 이전에 보고되었던 미세 유체 제어 시스템에서 실리콘 유체 제어 소자의 membrane 은 큰 변위를 형성하기 쉽지 않고 누설유량이 있다는 큰 단점을 지니고 있으므로 pumping rate 나 flow rate 를 제어하기 위하여 있어서 한계가 있었다[2]. 이러한 기술적인 문제점들은 실리콘을 PDMS 로 대체함으로써 극복될 수 있으며 pumping rate 와 flow rate 를 쉽게 제어할 수 있는 열공압 방식의 마이크로 펌프와 마이크로 밸브가 집적된 in-channel 구조의 미세 유체 제어 시스템을 제안한다[3,4]. 일반적으로 미세 유체 제어 시스템은 휘어지거나 구부러지는 membrane 이 존재하며 열공압 방식의 소자는 membrane 의 변위가 매우 크게 발생시키는 장점을 가지고 또한 챔버 내에 파라핀 을 넣어줌으로써 추가적인 membrane 변위가 발생되므로 미세 유체 제어 시스템에 매우 적합하다.

본 연구에서 제안하는 마이크로 펌프와 마이크로 밸브가 집적된 시스템의 모든 구조물들을 PDMS 로 제작하였기 때문에 기존의 실리콘으로 제작된 디바이스에 비해 물딩 대량 생산이 가능하고 물질 및 공정비용 모두가 저렴하며 투명하다는 장점을 갖는다. 또한 일반적으로 사용되는 Au 에 비해 가격이 매우 저렴하게 제작되고 투명한 장점을 지닌 indium tin oxide (ITO) 를 사용하여 히터를 제작하였다. 본 논문에서는 밸브의 반복 작동 시 지속적인 유량의 감소를 줄이기 위해 PDMS 혼합비를 달리하여 PDMS membrane 의 기계적 특성을 비교, 분석하였고 디바이스 특성을 강화시켰다.

2. 본 론

2.1 구조 및 동작원리

그림 1은 제안된 미세 유체 제어 시스템의 구조를 보여준다. 본 논문에서 제안된 시스템은 마이크로 펌프와 마이크로 밸브의 채널 cavity 와 열공압 챔버 모양을 제외한 나머지 구조를 동일하게 설계하여 제작하였다. 그림 1(a)는 마이크로 펌프와 마이크로 밸브로 구성된 PDMS 미세 유체 제어 시스템의 단면도이다. Glass, ITO히터, PDMS 열공압 챔버, PDMS membrane, 그리고 PDMS 채널 층으로 구성되어 있다. 그림 1(b)는 마이크로 펌프와 밸브가 집적된 미세 유체 제어 시스템의 평면도이다. PDMS 평면도의 cavity는 pump chamber, diffuser, reservoir, valve seat, microchannel, inlet hole, outlet hole로 구성되어 있다. 시스템내의 diffuser inlet 폭, 길이, divergence 각도는 각각 80 μ m, 1500 μ m, 10° 이다. Pump chamber의 지름과 길이는 4.0 mm와 110 μ m로 제작하였다. 열공압 챔버의 길이는 130 μ m이고 면적은 $\pi \times 2.0$ mm²로 제작하였고 ITO 히터의 dimension은 2.35 \times 2.35 mm²로 제작하였다.



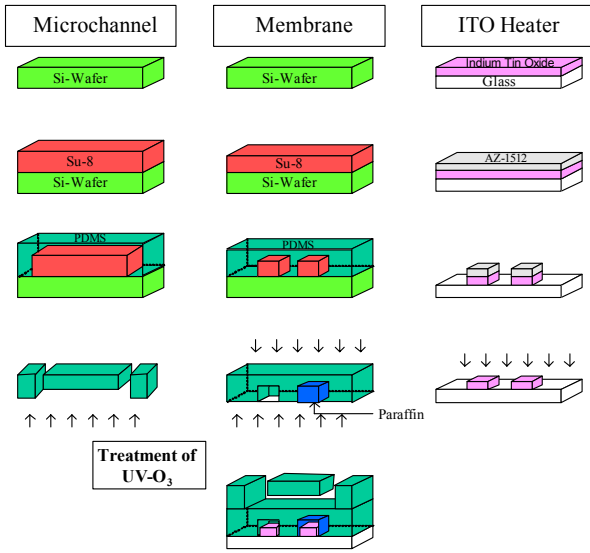
<그림 1> 마이크로 펌프와 밸브가 집적된 PDMS 미세 유체 제어 시스템의 (a) 단면도와 (b) 평면도.

마이크로 밸브의 공정 조건은 마이크로 펌프의 조건과 모두 같으나 채널 cavity의 펌프 챔버 대신 valve seat가 존재하며 열공압 챔버의 면적이 2.4 \times 2.4 mm²로서 다르게 제작된다. 또한 ITO 히터의 넓이는 2 \times 2 mm²로 제작하였다. 채널의 깊이, 폭, valve seat의 지름은 각각 130 μ m, 400 μ m, 1.5 mm로 제작하였다. PDMS membrane의 두께는 300 μ m로 제작하였다. 제안된 시스템은 열공압력의 구동원리에 의해 ITO 히터에 펄스 전력 인가시 PDMS 열공압 챔버 안의 공기 팽창으로 인해 PDMS membrane의 변위가 발생하여 diffuser를 통해 유체의 흐름을 발생시키고 밸브 seat를 닫아 유체 흐름을 막는 것이다. 반대로 ITO 히터가 꺼지면 열공압 챔버 내의 공기의 부피가 감소하므로 펌프 챔버의 부피가 증가되어 양단의 diffuser를 통해 유체가 유입되거나 밸브 seat가 열려 유체가 다시 흐르게 된다.

2.2 제작 공정 및 실험

제안된 미세 유체 제어 시스템은 그림 2에서처럼 PDMS 채널 층 공정, PDMS membrane 공정, ITO 히터 제작 공정, 그리고 접합 공정의 진행으로 제작된다. 먼저, PDMS 채널 층을 제작하기 위해 실리콘 기판 위에 음성 감광제 (SU-8 2075)를 190 μ m 두께로 스핀 코팅 후 사진 공정을 통해 채널 cavity를 형성한다. PDMS 용액을 SU-8 패턴이 형성된 실리콘 웨이퍼 위에 붓는다. PDMS curing이 끝난 후 실리콘 웨이퍼에서 PDMS 채널 층을 분리한다. 두 번째로 PDMS membrane을 제작하기 위하여 실리콘 웨이퍼 위에 100 μ m 두께의 음성 감광제 (SU-8 2075)로 스핀 코팅 후 사진 공정을 통해 열공압 챔버 cavity를 형성하였다. 추가적으로 각기 다른 PDMS 혼합비를 가지는 membrane 을 제작하기 위하여 monomer 용액의 100ml를 기준으로 crosslinker 의 비를 5ml, 10ml, 15ml, 20ml, 25ml, 30ml로 달리 하여 섞어주었다. 각기 다른 비를

갖는 membrane의 특성을 인장강도 측정기 (UTM, model LLOYD LR5K)를 사용하여 분석하였고 이러한 membrane을 갖는 디바이스를 각기 제작하여 밸브의 연속적인 작동시 유량의 감소량을 관찰하였다. 세 번째 공정으로서 ITO 히터 공정은 먼저 유리 기판 위에 sputter 장비를 사용하여 ITO가 170nm로 증착된 유리 기판 위에 AZ-1512 Photoresist를 코팅 후 현상하였다. ITO히터를 패터닝 하기 위해 ITO-Etchant 용액 (FeCl₃/HCl)에 식각을 한 후 남은 PR용액을 제거하였다. 제작된 각각의 층을 접합하는 공정으로 UV-O₃ cleaner를 사용하여 각각의 표면에 UV/ozone 처리 후 접착 하였다.



〈그림 2〉 초미세 유체 제어 시스템의 제작공정.

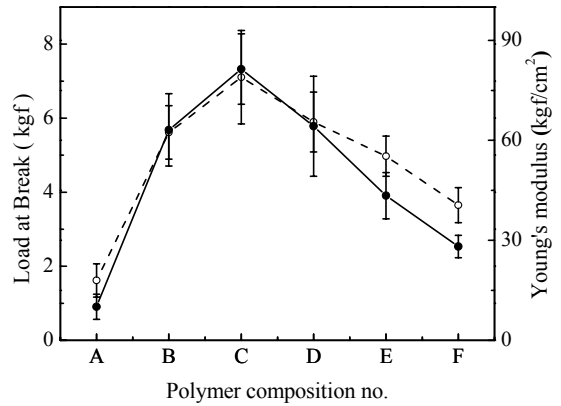
3. 결과 및 토의

그림 3은 각기 다른 비율로 섞인 PDMS membrane의 영률과 인장력을 측정된 결과를 보여준다. 동등한 조건에서 측정하기 위해서 membrane 제작 시 스펀코팅 조건을 달리하여 membrane의 두께를 300 μ m로 일정하게 제작하였다. PDMS의 혼합비가 100ml : 15ml 일때 가장 높은 영률 (79.8 kgf/cm²)과 가장 높은 부하 (7.3kgf)를 견딜 수 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 사실은 이러한 특성을 갖는 membrane이 가장 나은 유연성을 갖는 것을 말한다. 밸브의 연속적인 작동시 membrane의 복원력이 중요한데 membrane의 유연성은 복원력에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 이러한 사실을 확인하기 위하여 인장강도 측정 시와 동일한 membrane을 제작하여 디바이스를 제작한 후 밸브의 연속적인 작동시 유량의 변화를 관찰 하였다. 그림 4는 이러한 실험의 결과를 보여준다. 동등한 조건에서 실험하기 위해서 유체의 입력 압력은 1kPa로 일정하게 하였고 밸브의 작동 전력이 150 mW로 일정하게 인가하여 측정하였다. 밸브의 연속적인 작동시 PDMS membrane의 혼합비가 100:15 (▲)인 디바이스가 유량이 감소하는 비율이 가장 적은 것을 확인할 수 있다. 특히 처음 유량이 100%로 봤을 때 4번의 반복적인 온, 오프 작동 시에도 80% 정도의 유량이 흐르는 것을 확인할 수 있다. 반면에 PDMS membrane의 혼합비가 100:5 (○), 100:10 (□), 100:20 (■), 100:25 (△), 100:30 (●)인 디바이스는 여전히 감소하는 유량의 차이가 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 앞서 확인한 membrane의 유연성이 membrane의 복원력에 영향을 미치는 것을 보여주고 밸브의 다이내믹 특성을 강화시킨 결과를 보여준다. 현재 우리는 이러한 밸브의 다이내믹 특성을 더욱더 강화시키기 위하여 PDMS 대신 polymethylmethacrylate (PMMA)로 디바이스를 제작하는 연구를 하고 있다.

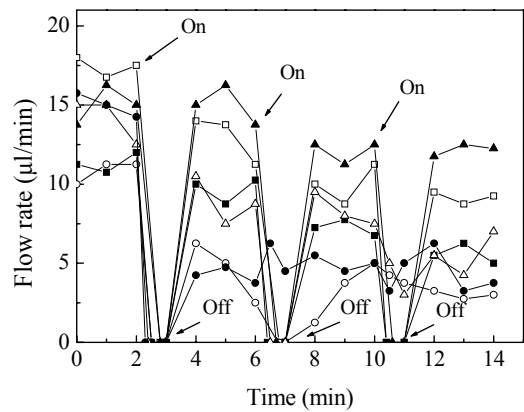
4. 결 론

본 연구에서는 PDMS로 제작된 열공압 방식의 마이크로 펌프와 파라핀으로 작동하는 마이크로 밸브가 집적된 in-channel 구조의 미세 유체 제어 시스템을 제작하고 특성을 분석하였다. PDMS와 ITO를 사용하여 제작된 시스템은 몰딩 대량 생산이 가능하고 물질 및 공정비용 모두가 저렴하며 투명하다는 장점을 갖는다. 이러한 시스템은 제작공정이 매우 간단하였으며 일회용 lab-on-a-chip에 응용하기에 좋은 특성을 보였다. 본 논문에서는 특히 밸브의 연속적인 작동시 지속적인 유량의 감소를 개선시키기 위하여 PDMS crosslinker의 비율을 달리하여

PDMS 특성을 분석하였고 이를 디바이스로 제작하여 밸브의 다이내믹 특성을 강화시켰다. PDMS membrane의 비율이 100:15인 membrane이 가장 나은 유연성을 보였으며 디바이스 제작 시에도 유량의 재현성이 가장 나은 특성을 보였다. 그때의 유량은 12.5 μ l/min로 밸브 작동 전 유량의 80%의 재현성을 보여준다.



〈그림 3〉 PDMS 혼합비에 따른 membrane의 인장강도 측정 (●) 끊기는 점에서의 부하, (○) 영률, (A) : 100:5; (B) 100:10; (C) 100:15; (D) 100: 20; (E) 100:25; (F) 100:30



〈그림 4〉 밸브의 온/오프 반복 작동시 유량의 변화, (○) 100:5; (□) 100:10; (▲) 100:15; (■) 100: 20; (△) 100:25 and (●) 100:30

[참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [2] S. Matsumoto, A. Klein and R. Maeda, "Development of bi-directional valve-less micropump for liquid," in Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems, pp. 141-146, Jan. 1999.
- [3] 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.
- [4] Jin-Ho Kim, Kwang-Ho Na, C J Kang, D. Jeon, and Yong-Sang Kim, "Thermopneumatic-actuated PDMS Microvalve," Microelectronic Engineering, Vol. 73-74, pp. 864-869, 2004.