

# 열공압 방식으로 구동되는 미세 유체 제어 시스템의 제작 및 특성

論 文

55C-2-7

## Fabrications and Characteristics of Microfluidic Systems Actuated by Thermopneumatic Method

柳 鍾 喆<sup>\*</sup> · 姜 致 中<sup>\*</sup> · 金 容 商<sup>\*\*</sup>

(Jong-Chul Yoo · C. J. Kang · Yong-Sang Kim)

**Abstract** - We present a microfluidic system with microvalves and a micropump that are easily integrated on the same substrate using the same fabrication process. The fabricated microfluidic system is suitable for use as a disposable device and its characteristics are optimized for use as a micro chemical analysis system (micro-TAS) and lab-on-a-chip. The system is realized by means of a polydimethylsiloxane (PDMS)-glass chip and an indium tin oxide (ITO) heater. We demonstrate the integration of the micropump and microvalves using a new thermopneumatic-actuated PDMS-based microfluidic system. A maximum pumping rate of about 730 nl/min is observed at a duty ratio of 1 % and a frequency of 2 Hz with a fixed power of 500 mW. The measured power at flow cut-off is 500 mW for the microvalve whose channel width, depth and membrane thickness were 400  $\mu\text{m}$ , 110  $\mu\text{m}$  and 320  $\mu\text{m}$ , respectively.

**Key Words** : Microfluidic System, Micropump, Microvalve, PDMS, ITO

### 1. 서 론

미세 유체 제어 시스템은 micro-TAS (Micro Total Analysis System) 혹은 lab-on-a-chip과 같은 micro chemical analysis systems 응용 분야에 매우 중요한 유체 제어 소자로 주목을 받고 있다[1]. 미세 유체 제어 시스템(마이크로 펌프, 마이크로 밸브, 마이크로 채널, 마이크로 믹서 등)의 집적은 화학 및 바이오 유체를 제어하는 Lab-on-a chip의 일부분으로서 사용되며 이러한 시스템의 집적은 lab-on-a-chip 개발을 위해 필수적으로 요구된다. 생화학적 분석을 위한 집적소 소형화 system[2]는 cycle times, reagent costs, labor intensity 등을 크게 감소시킨다. 이는 시스템 내에 시약과 샘플들의 이동을 정확하고 효율적으로 제어하는 능력을 요구한다. 또한 최근 MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 공정 기술을 기초로 제작된 미세 유체 제어 시스템의 개발에 많은 관심이 집중되고 있다.

이전에 보고되었던 미세 유체 제어 시스템에서는 실리콘으로 표면 및 벌크 미세 가공 기술을 응용하여 개발하였기 때문에 복잡한 공정과정과 제작비용이 비싸다는 단점을 지니고 있다[3]. 또한 실리콘 유체 제어 소자의 membrane은 큰 변위를 형성하기 쉽지 않고 누설유량이 있다는 큰 단점을 지니고 있으므로 pumping-rate나 flow-rate를 제어하기 위함에 있어서 한계가 있었다[4]. 이러한 기술적인 문제점들은 실리콘을 polydimethylsiloxane (PDMS)로 대체함으로써 극복될 수 있으며 pumping-rate와 flow-rate를 쉽게 제어할 수 있는 새

로운 원리를 제안한다[5, 6]. PDMS는 평면구조를 매우 쉽고 저렴하게 만들 수 있고 투명한 광학적 특성을 가지고 있으며 hydrophobic하므로 바이오 및 화학 응용 분야의 일회용 미세 유체 제어 시스템 제작에 매우 적합한 물질로 사료된다[7, 8]. 따라서 본 연구에서는 PDMS로 제작된 열공압 방식의 마이크로 펌프와 마이크로 밸브가 집적된 in-channel 구조의 미세 유체 제어 시스템을 제안한다. PDMS를 이용한 몰딩 기술로 제작되므로 다른 유체 시스템과의 집적이 가능하고 대량 반복 생산이 가능한 장점이 있다. 일반적으로 미세 유체 제어 시스템은 휘어지거나 구부러지는 membrane이 존재하며 열공압 방식의 소자는 membrane의 변위가 매우 크게 발생시키는 장점을 가지고 있으므로[9] 미세 유체 제어 시스템에 매우 적합하다[10]. 시스템의 membrane을 flexible한 특성을 가지고 있는 PDMS로 제작하여 변위가 매우 크게 발생하므로, 마이크로 펌프는 높은 압력을 생성하고 마이크로 밸브의 경우는 누설유량이 거의 없을 것으로 기대된다.

본 연구에서 제안하는 마이크로 펌프와 마이크로 밸브가 집적된 시스템의 채널 cavity, membrane, 열공압 chamber 모두 PDMS를 사용하여 제작하였기 때문에 기존의 실리콘으로 제작된 디바이스에 비해 몰딩 대량 생산이 가능하고 물질 및 공정비용 모두가 저렴하며 투명한 장점을 갖는다[11]. 일반적으로 히터는 Au로 제작되나 본 연구에서는 Au에 비해 가격이 매우 저렴하게 제작되고 투명한 장점을 지닌 indium tin oxide (ITO)를 사용하여 히터를 제작하였다. 이런 측면에서 micro-TAS 또는 lab-on-a-chip은 일회용으로 사용되는 응용부분이 많으므로 매우 좋은 장점을 가진다. 본 논문에서는 미세 유체 제어 시스템내 마이크로 펌프의 최적의 동작 조건을 찾기 위하여 인가 펄스 파워의 주파수와 duty 비의 함수로서 pumping rate를 측정하였다. 또한 마이크로 밸브의 동작 상태 분석을 위해 ITO 히터에 파워를 인가하면서 flow rates를 측정하였다.

† 교신저자, 學生會員 : 明知大學 電氣工學科 碩士課程

E-mail : yoojc7902@mju.ac.kr

\* 正 會 員 : 明知大學 物理學科 助課程 · 理博

\*\* 正 會 員 : 明知大學 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2005年 10月 18日

最終完了 : 2005年 11月 22日

## 2. 미세 유체 제어 시스템의 구조 및 동작 원리

그림 1은 제안된 미세 유체 제어 시스템의 구조를 보여준다. 본 논문에서 제안된 시스템은 마이크로 펌프와 마이크로 밸브를 집적하여 하나의 기판위에 제작하였다. 다시 말하면, 마이크로 펌프와 마이크로 밸브의 채널 cavity와 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, ITO 히터, 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.

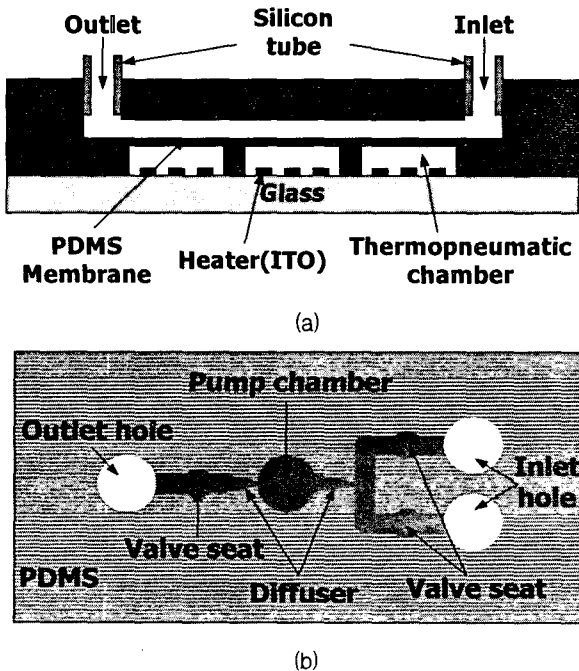


그림 1. 마이크로 펌프와 밸브가 집적된 microfluidic system의 구조. (a) 같은 구조를 가지는 마이크로 펌프와 밸브로 구성된 시스템의 단면도, (b) 마이크로 펌프와 밸브가 집적된 microfluidic system의 PDMS층 평면도.

Fig. 1 The configuration of the proposed microfluidic system integrated the micropump and microvalves. (a) The cross sectional view of the microfluidic system to be composed of the microvalves with the micropump has same structure, (b) The cavity of PDMS replica of microfluidic system integrated micropump and microvalves.

시스템내의 마이크로 펌프의 diffuser inlet 폭, 길이, divergence 각도는 각각  $80\ \mu\text{m}$ ,  $1500\ \mu\text{m}$ ,  $10^\circ$  이다. Pump chamber의 지름과 깊이는  $4.0\ \text{mm}$ 와  $110\ \mu\text{m}$ 로 제작하였다. 열공압 챔버의 깊이는  $130\ \mu\text{m}$ 이고 면적은  $\pi \times 2.0^2\ \text{mm}^2$ 로 제작하였고 ITO 히터의 dimension은  $2.35 \times 2.35\ \text{mm}^2$ 로 제작하였다. 마이크로 밸브의 공정 조건은 마이크로 펌프의 조건

과 모두 같으나 채널 cavity의 펌프 챔버 대신 valve seat가 존재하며 열공압 챔버의 면적이  $2.4 \times 2.4\ \text{mm}^2$ 로서 다르게 제작된다. 또한 ITO 히터의 dimension은  $2 \times 2\ \text{mm}^2$ 로 제작하였다. 채널의 깊이, 폭, valve seat의 지름은 각각  $110\ \mu\text{m}$ ,  $400\ \mu\text{m}$ ,  $1\ \text{mm}$ 로 제작하였다. PDMS membrane의 두께는 각각  $320\ \mu\text{m}$ ,  $390\ \mu\text{m}$ ,  $460\ \mu\text{m}$ 로 제작하였고 PDMS 채널 층에는 inlet과 outlet hole이 형성되어 있고 내경이  $1\ \text{mm}$ 인 실리콘 튜브가 연결되어 있다.

제안된 마이크로 펌프와 마이크로 밸브 열공압력의 구동 원리에 의해 동작한다. ITO 히터에 펄스 전압과 전력이 인가되어지고, 이때 PDMS 열공압 챔버 안의 공기 팽창으로 인해 PDMS membrane의 변위가 발생하여 diffuser를 통해 유체를 밀어내고 밸브 seat를 닫아 유체 흐름을 막는 것이다. 반대로 ITO 히터가 off 되면 열공압 챔버 내의 공기의 부피가 감소하므로 펌프 챔버의 부피가 증가되어 양단의 diffuser를 통해 유체가 유입되거나 밸브 seat가 열려 유체가 다시 흐르게 된다.

## 3. 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  $110\ \mu\text{m}$  두께로 스핀 코팅 후 사진 공정을 통해 채널 cavity를 형성한다. PDMS A와 B 타입 용액을 10:1로 혼합한 후 SU-8 패턴이 형성된 실리콘 웨이퍼 위에 붓는다. PDMS curing은  $72\ ^\circ\text{C}$ 에서 적어도 1시간 이상 실시하였고, curing이 끝난 후 실리콘 웨이퍼에서 PDMS 채널 층을 분리한다. Inlet과 outlet에 튜브를 연결하기 위해, 패턴된 PDMS 표면에 기계적으로 구멍을 형성한다. PDMS membrane을 제작하기 위하여 실리콘 웨이퍼 위에  $130\ \mu\text{m}$  두께의 음성 감광제 (SU-8 2075)로 스핀 코팅 후 사진 공정을 통해 열공압 챔버 cavity를 형성한 후 제작된 얇은 PDMS membrane과 패턴된 실리콘 웨이퍼와의 접착력을 저하시키기 위해 P5000II-Etcher장비를 사용하여 실리콘 기판에 60초 동안 CHF3-Plasma 처리를 하였다. 이 공정은 얇은 PDMS membrane을 실리콘 웨이퍼로부터 쉽게 떼어내기 위한 공정이다. 패턴위에  $320\ \mu\text{m}$ ,  $390\ \mu\text{m}$ ,  $460\ \mu\text{m}$ 의 membrane을 형성하기 위해 PDMS 혼합 용액을 패턴된 웨이퍼 위에 스핀 코팅 하였다. 세 번째 공정으로서 ITO 히터 공정은 먼저 유리 기판 위에 sputter 장비를 사용하여 ITO가  $170\ \text{nm}$ 로 증착된 유리 기판 위에 AZ-1512 Photoresist를 코팅 후 현상하였다. ITO히터를 패턴닝 하기 위해 ITO-Etchant 용액 ( $\text{FeCl}_3/\text{HCl}$ )에 식각을 한 후 남은 PR용액을 제거하였다. 제작된 각각의 층을 접합하는 공정으로 PDMS층간의 접착 및 PDMS와 유리와의 접착을 위해 UV- $\text{O}_3$  cleaner를 사용하여 각각의 표면에 UV/ozone 처리 후 접착 하였다. UV/ozone 처리를 한 후 PDMS 표면의 메틸기( $\text{CH}_3$ )는  $\text{O}_2$ 와  $\text{CO}_2$ 로 치환되어 기화하고 나머지 다른 표면과 Si-O-Si 공유 결합을 하게 된다[12]. PDMS 채널 층과 PDMS 열공압 챔버 층을 오존 클리너를 이용하여 오존 처리를 수행 후 접착하고 그 후 접착된 PDMS 층과 ITO 히터가 있는 유리 층을 같은 방법으로 접착하였다.

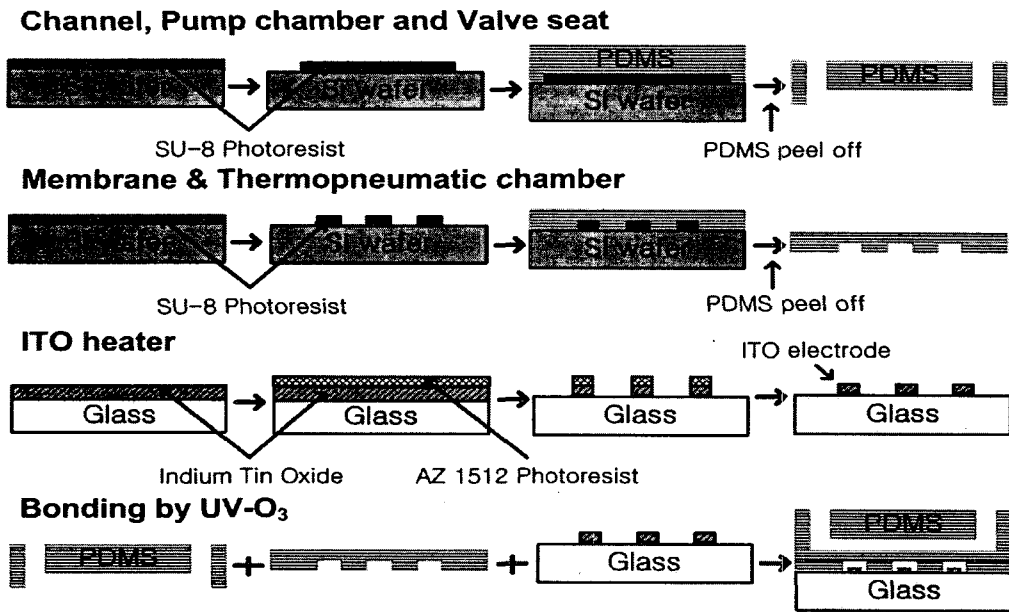


그림 2. 미세 유체 제어 시스템의 공정.

Fig. 2 The fabrication process of the proposed microfluidic system integrated micropump and microvalves.

그림 3은 완성된 microfluidic system의 모습을 보여주고 있다. 본 실험에서 마이크로 펌프와 밸브는 인가된 전압의 주파수와 duty비를 조절하고 히터에 인가되는 파워에 따른 유량 특성을 측정하였고 테스트 유체는 Deionized water (DIW)를 사용하였다. 마이크로 펌프의 경우 유량 측정 시 inlet과 outlet의 압력 차이는 항상 일정하게 유지하며 측정하였다. ITO 히터에 펄스 전압이 인가되고 그로 인해 outlet 튜브에는 다양한 유체의 변위가 측정된다. 또한 유량 측정 시 시스템 내의 모든 마이크로 밸브는 열려있는 상태에서 진행된다. 마이크로 밸브의 유량 제어 측정 시에는 시스템 내에 있는 마이크로 펌프의 diffuser의 영향이 없도록 측정하였으며 유량은 outlet 튜브의 유체와 공기 경계면의 이동거리로 측정하였다.

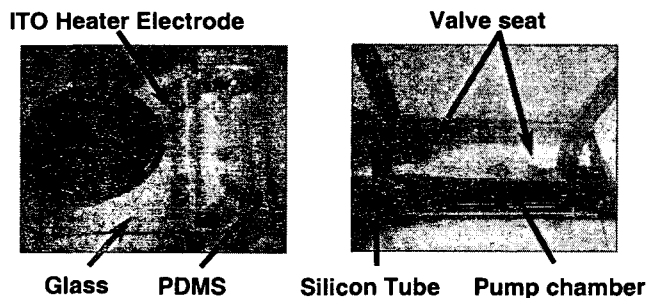


그림 3. 제작된 PDMS 미세 유체 제어 시스템의 사진.

Fig. 3 The photography of the fabricated PDMS microfluidic system.

#### 4. 결과 및 토론

본 연구에서 제안하는 미세 유체 제어 시스템은 PDMS membrane 두께에 따라 유량 발생의 특성이 다르므로[13] 측정된 소자의 PDMS membrane 두께는 각각 320  $\mu\text{m}$ , 390  $\mu\text{m}$ , 460  $\mu\text{m}$  이다. 그림 4는 미세 유체 제어 시스템의 PDMS membrane 두께에 따른 유량 발생의 특성을 보여주었다. 측

정한 소자의 채널 깊이와 두께는 각각 110  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ 이다. 펄스 전력을 500 mW로 인가하고 duty 비를 4%로 고정된 후 주파수를 변화시켜 인가시의 유량의 변화를 측정하였다. 인가 펄스 전력이 500 mW이상으로 증가 시킨 후 측정 시 너무 높은 열이 발생하여 유체에 기포가 발생하여 유체의 흐름을 원활하지 못하게 한다. 최대 유량은 PDMS membrane 두께가 320  $\mu\text{m}$ 로 제작된 소자에서 3 Hz의 주파수를 인가시 약 540 nl/min이 측정 되었다. 일반적으로 Membrane의 두께가 두꺼워 질수록 복원력이 증가하기 때문에 유량은 증가함을 관찰할 수 있었다[13]. 본 연구에서는 PDMS membrane 두께가 얇아질수록 낮은 duty 비에서

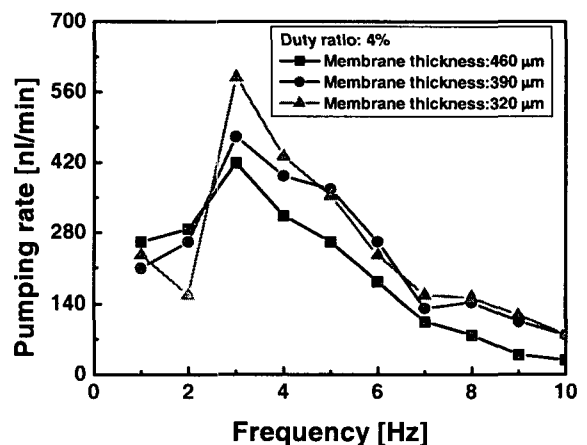


그림 4. Duty 비를 4%로 고정 시킨 후 PDMS membrane 두께에 따른 마이크로 펌프 유량의 특성. 채널의 깊이와 두께는 각각 110  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$  이다.

Fig. 4 Relationships between the pumping rate and the applied frequency as a function of PDMS membrane thickness at a fixed duty ratio of 4%. The channel depth and width are 110  $\mu\text{m}$  and 400  $\mu\text{m}$ , respectively.

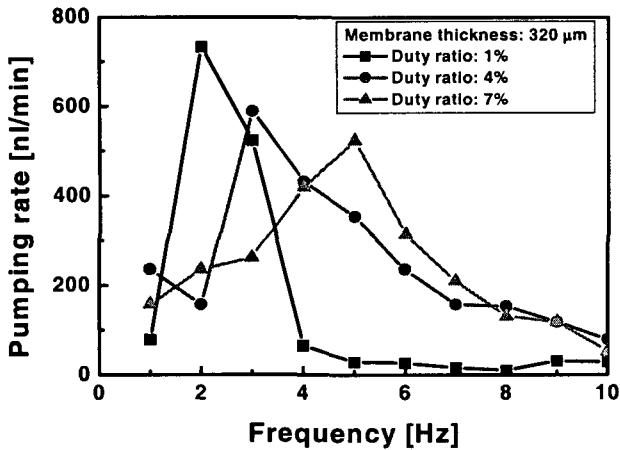


그림 5. 제안된 시스템의 마이크로 펌프에서 주파수(1 Hz~10 Hz)와 duty 비(1 %, 4%, 7%)의 변화에 따른 유량 특성. 채널의 깊이와 두께는 110 μm, 400 μm이며 membrane 두께는 320 μm 이다.

Fig. 5 Pumping rates of the micropump in the microfluidic system as a function of applied frequency with the various duty ratio of 1 %, 4 % and 7 %. The channel depth, width and membrane thickness are fixed at 110 μm, 400 μm and 320 μm, respectively.

membrane의 변위가 더 크게 발생함을 알 수 있었다. Duty 비가 너무 낮아지면 열에 의한 공기 팽창이 불충분하게 발생되어 변위가 작게 생성되므로 낮은 유량을 발생시킨다. 또한 주파수가 낮은 영역에서는 유량이 거의 비례적으로 증가하나 주파수가 높은 영역에서는 열공압 챔버 내부 공기의 느린 응답 속도로 인하여 유량이 감소하게 된다.

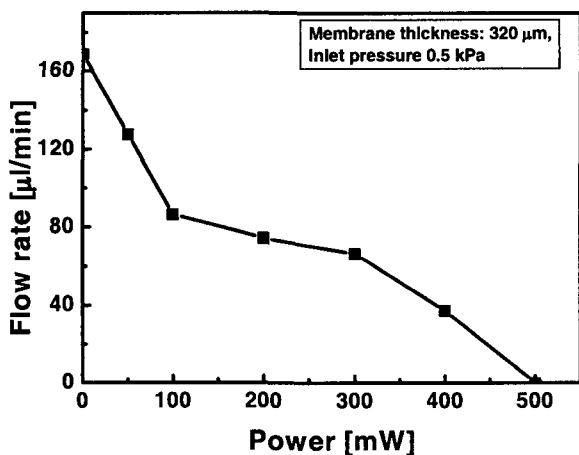


그림 6. 제안된 시스템의 마이크로 밸브에 전력을 인가할 때 유체 스위칭 동작 특성. Membrane 두께, 채널 깊이 그리고 inlet pressure는 각각 320 μm, 110 μm, 0.5 kPa 이다.

Fig. 6 Flow rate of the microvalve as a function of applied power. The membrane thickness, channel depth and inlet pressure are 320 μm, 110 μm and 0.5 kPa, respectively.

그림 5는 duty 비 1 %, 4 %, 7 %에서 인가된 주파수의 함수로서 측정된 유량을 보여준다. 채널 깊이와 두께, membrane 두께는 각각 110 μm, 400 μm, 320 μm 이다. ITO 히터에 전력을 500 mW 인가하고 주파수를 1 Hz ~ 10 Hz로 변화 시키며 유량을 측정하였다. 최대 유량은 인가 주파수가 2 Hz, duty 비 1 % 인 경우 약 730 nl/min을 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 6은 열공압력으로 구동하는 PDMS 마이크로 밸브의 최적 동작 상태를 보여준다. 측정된 마이크로 밸브의 membrane의 두께, 채널의 깊이는 펌프의 최적화된 조건과 동일한 320 μm, 110 μm이다. 실험이 진행되는 동안 inlet과 outlet의 압력 차이는 0.5 kPa로 유지하였다. 전력을 인가하지 않았을 경우 유량은 약 170 μl/min이며 약 500 mW의 파워를 인가할 경우 유체가 멈추게 된다. 유체를 closing 시키기 위한 전력은 inlet pressure에 의해 결정되며[6] ITO 히터에는 500 mW의 전력을 인가하여 측정하였다. ITO 히터 인가 전력에 따라 유량이 잘 제어된다는 것을 관찰할 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 PDMS로 제작된 열공압 방식의 마이크로 펌프와 마이크로 밸브가 집적된 in-channel 구조의 미세 유체 제어 시스템을 제작하고 특성을 분석하였다. 제안된 시스템은 제작공정이 매우 간단하였으며 일회용 lab-on-a-chip에 응용하기에 좋은 특성을 보였다. 시스템내 마이크로 펌프의 유량은 ITO 히터의 인가 펄스 전력의 주파수와 duty 비를 조절함으로써 잘 제어되었다. 펄스 전력 500 mW를 인가하였을 때 주파수 2 Hz, duty 비 1 %에서 730 nl/min의 최대유량이 측정되었다. Inlet과 outlet의 압력 차이는 0.5 kPa로 유지하였으며 전력을 인가하지 않았을 경우 유량은 약 170 μl/min이며 약 500 mW의 파워를 인가할 경우 유체가 멈추게 된다. 마이크로 밸브의 유량은 inlet 압력이 증가함에 따라 비례하여 증가하므로 유량이 off 되는데 필요한 인가 전력량이 비례하여 증가하며 membrane 두께에 따라서 히터의 인가 전력의 증가에 따라 유량이 감소하는 기술기의 차이가 있다. 이와 같이 유량이 off 되는데 필요한 인가 전력은 inlet 압력과 membrane 두께에 밀접한 관련이 있다는 것을 알 수 있다.

### 참 고 문 헌

[1] Maria A. Schwarz and Peter C. Hauser, "Recent developments in detecton methods for microfabricated analytical devices," Lab on a chip, vol. 1, pp. 1-6, 2001  
 [2] Mark A. Burns, Brian N. Johnson, Sundares N.

Brahmasandra, 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.

[3] 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.

[4] S. Matsumoto, A. Klein and R. Maeda, "Development of bi-directional valve-less micropump for liquid," *Twelfth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 1999. MEMS '99*. pp. 141-146.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Ju-Ho Kim, C. J. Kang, and Yong-Sang Kim, "A Development of a Microfabricated Disposable Microchip with a Capillary Electrophoresis and Integrated Three-Electrode Electrochemical Detection," *Biosensors & Bioelectronics*, vol. 20, no. 11, pp. 2314-2317, 2005.

[8] 김주호, 이인제, 강치중, 김용상, "Polydimethylsiloxane 채널과 indium tin oxide 전극을 이용한 일회용 전기화학적 검출 시스템," *대한전기학회 논문지* 54(C)권 5호, pp. 227-231, 2005.

[9] 김진호, 조주현, 한경희, 김영호, 김한수, 김용상, "열공압 방식의 polydimethylsiloxane 마이크로 밸브의 제작 및 특성," *대한 전기학회 논문지*, 53(C)권 4호, pp. 231-236, 2004.

[10] 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

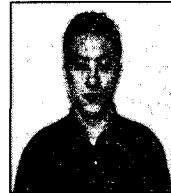
[11] Robin H. Liu, Qing Yu, and Daid J. Beebe, "Fabrication and Characterization of Hydrogel-Based Microvalves", *Journal of Microelectromechanical*

*System*, vol. 11, no. 1, pp.45-53, 2002

[12] Yevgeny Berdichevsky, Julia Khandurina, Andrés 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.

[13] 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*, To be published.

## 저 자 소 개



### 유 중 철(柳 鍾 喆)

1979년 3월 17일생. 2005년 명지대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 석사과정

E-mail : yoojc7902@mju.ac.kr



### 강 치 중(姜 致 中)

1967년 4월 17일생. 1990년 서울대 물리학과 졸업. 1998년 서울대 대학원 물리학과 졸업(이박), 1993~1995년 삼성전자 반도체 연구소 연구원, 1998~1999서울대 반도체 공동연구소 연구원, 1999~2002 하이닉스 반도체 메모리 연구소 연구원, 현재 명지대 물리학과 조교수



### 김 용 상(金 容 商)

1965년 6월 5일생. 1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1994년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 1999년~2001년 UC Berkeley 방문연구원, 현재 명지대학교 전기공학과 교수

Tel : (031) 330-6365

Fax : (031) 321-0271

E-mail : kys@mju.ac.kr