

열공압 방식의 Polydimethylsiloxane 마이크로 밸브의 제작 및 특성

論 文

53C-4-8

Fabrication and Characteristics of Thermopneumatic-Actuated Polydimethylsiloxane Microvalve

金 珍 浩* · 曹 柱 鉉* · 韓 慶 熙** · 金 榮 浩*** · 金 翰 秀§ · 金 容 商§§

(Jin-Ho Kim · Ju-Hyun Cho · Kyung-Hee Han · Young-Ho Kim · Han-Soo Kim · Yong-Sang Kim)

Abstract - A normally open thermopneumatic-actuated microvalve has been fabricated and their properties are investigated. The advantages of the proposed microvalve are of the low cost fabrication process and the transparent optical property using polydimethylsiloxane (PDMS) and indium tin oxide (ITO) glass. The fabricated microvalves with in-channel configuration are easily integrated with other microfluidic devices on the same substrate. The fabrication process of thermopneumatic-actuated microvalves using PDMS is very simple and its performance is very suitable for a disposable lab-on-a-chip. The PDMS membrane deflection increases and the flow rates of the microchannel with microvalves decrease as the applied power to the ITO heater increases. The powers at flow-off are dependent on the membrane thickness and the applied inlet pressure but are independent of the channel width of microvalves. The flow rate is well controlled by the switching function of ITO heater and the closing/opening times are around 20 sec and 25 sec, respectively.

Key Words : microvalve, thermopneumatic-actuation, PDMS, ITO heater, membrane

1. 서 론

마이크로 밸브는 micro-TAS (Micro Total Analysis System) 및 lab-on-a-chip을 포함한 바이오 및 화학 응용 분야에 매우 중요한 유체 제어 디바이스로 주목을 받고 있다. 마이크로 밸브는 여러가지 구동 방식으로 연구되었다. 예를 들면, 압전 방식[1], 전자력 방식[2], 전기력 방식[3], 공압력 방식[4,5] 및 열공압력 방식[6,7] 등이 있다. 이들 방식 중 압전 방식, 전자력 방식, 전기력 방식은 막(membrane)의 변위가 작다는 마이크로 밸브 응용에 단점을 갖는다. 반면, 열공압력 방식은 큰 변위를 쉽게 형성할 수 있어 마이크로 밸브 응용에 매우 적합하다[8]. 이러한 마이크로 밸브의 개발은 실리콘 표면 및 벌크 미세 가공 기술로 주로 발전해 왔다. 마이크로 밸브의 대부분의 구조는 막으로 채널을 막아 유량을 제어하는 것이다. 그러므로 마이크로 밸브는 막의 큰 변위가 요구된다. 이런 측면에서 실리콘 막은 큰 변위를 형성하기 쉽지 않고 누설유량이 있다는 큰 단점을 지니고 있다. 또한 실리콘 유체 제어 디바이스는 제작비용이 비싼 단점도

있다. 하지만 polydimethylsiloxane (PDMS) 몰딩 기술은 평면구조를 매우 쉽고 저렴하게 만들 수 있고 투명한 광학적 특성을 가지고 있어 바이오 및 화학 응용 분야의 일회용 마이크로 밸브 제작에 매우 적합한 물질로 사료된다[9]. 물론 PDMS 몰딩 기술은 다른 유체 시스템과 쉽게 집적할 수 있고 대량 반복 생산이 가능한 장점이 있다. 또한 마이크로 밸브의 막을 PDMS로 제작하면 유연성(flexible)이 있어 변위가 크고 누설유량이 거의 없을 것으로 기대된다.

본 연구에서 제안하는 마이크로 밸브의 구조는 인 채널 구조로 다른 마이크로 유체 시스템과 쉽게 집적할 수 있는 장점을 가지고 있는 바 채널과 막을 모두 PDMS를 사용하여 제작하였다. 그리고 히터는 indium tin oxide (ITO)로 제작하여 주로 사용되는 금에 비해 가격이 매우 저렴하고 투명한 장점을 지닌다. 그러므로 ITO 히터를 사용하여 일회용 마이크로 밸브 제작이 가능해진다. 제작된 마이크로 밸브의 PDMS 막의 변위를 측정하였으며, 히터의 전력인가에 따른 유량을 측정 및 분석하였다.

2. 마이크로 밸브의 구조 및 동작원리

그림 1은 제안된 마이크로 밸브의 구조를 보여준다. 그림 1(a)는 마이크로 밸브의 단면도이며 유리 층, ITO 히터, PDMS 열공압 챔버, PDMS 막, 그리고 PDMS 채널 층으로 구성되어 있다. 제안된 마이크로 밸브의 구동원리는 PDMS 열공압 챔버 안의 공기 팽창으로 인해 PDMS 막의 변위가 발생하고 밸브 seat를 닫아 유체 흐름을 막는 것이다. 그림 1(b)와 같이 본 연구에서 제안된 마이크로 밸브의 채널은 인

* 準 會 員 : 明知大 電氣工學科 碩士課程

** 正 會 員 : 明知大 電氣工學科 教授 · 工博

*** 正 會 員 : 水原大 電子材料工學科 教授 · 工博

§ 正 會 員 : 斗原工科大学 電氣科 助教授 · 工博

§§ 正 會 員 : 明知大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受H字 : 2003年 11月 19日

最終完了 : 2004年 2月 3日

채널 방식으로 다른 마이크로 유체 디바이스와 쉽게 집적할 수 있다. PDMS 채널 층에는 inlet과 outlet 구멍이 형성되어 있고 내경이 1 mm인 실리콘관 튜브가 연결되어 있다. 채널의 깊이는 40 μm 이다. 채널의 폭은 400 μm , 500 μm , 600 μm 이고 밸브 seat의 지름은 1 mm로 제작하였다. PDMS 막의 두께는 30 μm , 70 μm , 170 μm 로 제작하였고 열공압 챔버의 깊이는 130 μm 이고 면적은 $2.4 \times 2.4 \text{ mm}^2$ 제작하였다. ITO 히터의 면적은 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 로 제작하였다.

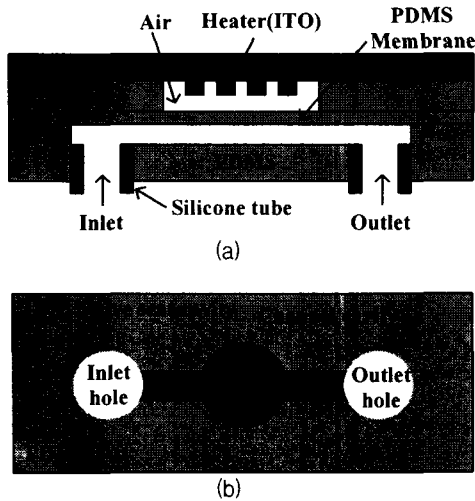


그림 1. 제안된 마이크로 밸브의 구조. (a) 마이크로 밸브의 단면도, (b) PDMS층의 평면도.
 Fig. 1 Configurations of the proposed microvalve. (a) Cross sectional view of the microvalve, (b) Cavity of PDMS replica of the microvalve.

3. 실험

제안된 마이크로 밸브는 3개의 다른층 (ITO 히터, PDMS 막, PDMS 채널)을 조립하여 제작한다.

PDMS 채널은 제작하기 위해 음성 감광제 (SU-8 50)를 실리콘 웨이퍼 위에 40 μm 두께로 스핀 코팅한 후 사진 공정을 통해 마이크로 밸브의 채널 및 밸브 seat의 모양을 형성한다. 그림 2와 같이 PDMS A, B 타입 용액을 10:1 비율로 섞은 후 SU-8 패턴이 형성된 실리콘 웨이퍼 위에 부은 후 상온에서 24시간 동안 경화 (curing)한다. 경화가 끝난 후 PDMS 층을 실리콘 웨이퍼에서 조심스럽게 분리한다. inlet과 outlet 튜브를 연결하기 위하여 PDMS 층에 기계적으로 구멍을 형성한다. 그림 3(a)는 패턴이 형성된 PDMS 층의 SEM 사진을 보여준다.

PDMS 열공압 챔버와 막을 제작하기 위해 음성 감광제 (SU-8 2075)를 실리콘 웨이퍼 위에 130 μm 두께로 스핀 코팅 후 사진 공정을 통해 열공압 챔버 모양을 형성한다. 차후 공정에서 PDMS 층이 실리콘 웨이퍼에서 잘 분리되게 하기 위해 실리콘 표면 위에 CH_4 플라즈마 처리를 수행하였다. CF_4 플라즈마 처리를 수행하면 실리콘 표면에 플루오르 카본 필름이 형성되어 실리콘 웨이퍼와 PDMS 막이 잘 분리된다[4].

그림 2와 같이 PDMS 혼합용액을 SU-8 패턴이 형성된 실리콘 웨이퍼 위에 스핀 코팅한다. PDMS 층의 전체 두께는 160 μm , 200 μm , 300 μm 로 코팅하였고 열공압 챔버의 두께가 130 μm 임을 고려하면 PDMS 막 두께는 30 μm , 70 μm , 170 μm 로 제작하였다. 그리고 코팅한 PDMS를 90 $^{\circ}\text{C}$ 에서 30분 동안 경화하였다. 그림 3(b)는 PDMS 열공압 챔버와 막의 SEM 사진이다.

그림 2와 같이 ITO 히터 공정은 유리 기판 위에 sputter 장비를 사용하여 ITO를 170 nm 두께로 증착하였다. 증착된

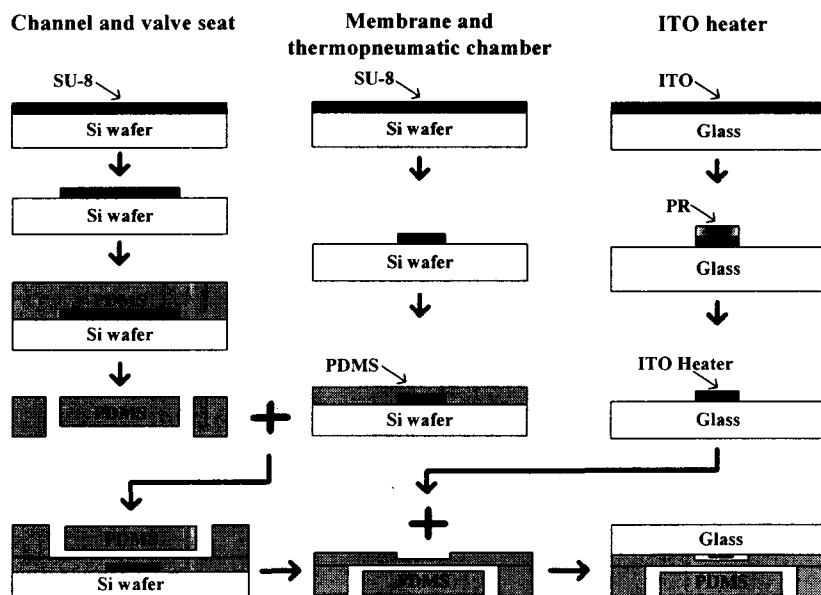
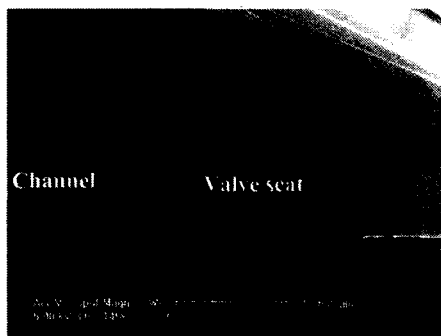


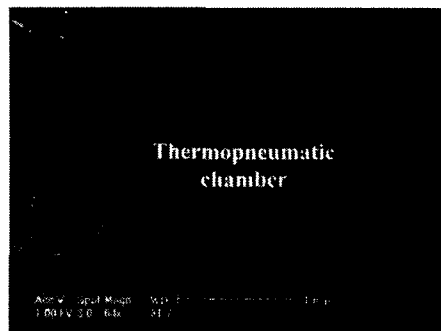
그림 2. 마이크로 밸브의 공정.
 Fig. 2 Fabrication process of the microvalve.

ITO의 면저항은 $10 \Omega/\square$ 이다. ITO 히터를 제작하기 위해 감광막 패터닝공정 후 FeCl_3/HCl 용액에서 20분 동안에 청한다. 그림 3(c)은 제작된 ITO 히터를 보여주는 SEM 사진이다.

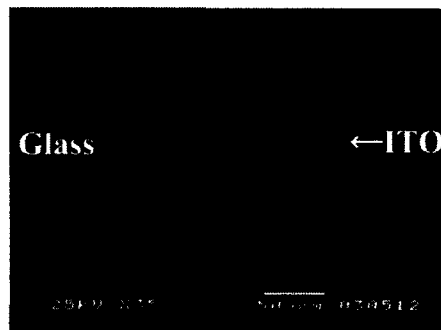
본 실험에서는 PDMS층 간의 접착 및 PDMS와 유리와의 접착을 위해 자외선 오존 클리너를 사용하였다. 먼저 그림 2과 같이 PDMS 열공압 챔버 층과 PDMS 채널층의 접착을 위해 접착할 표면을 자외선 오존 클리너를 이용하여 오존 처리를 수행 후 접착하였다. 접착 후 PDMS 층으로부터 실리콘 웨이퍼를 분리하였다. 다음 공정은 열공압 챔버와 ITO 히터가 있는 유리층을 같은 방법으로 접착하였다. 그림 4는 완성된 마이크로 밸브의 모습을 보여주고 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 3. PDMS 층의 SEM 이미지. (a) 채널 및 밸브 seat, (b) 열공압 챔버 및 막, (c) ITO 히터

Fig. 3 SEM images of the PDMS replication. (a) Channel and valve seat, (b) Thermopneumatic chamber and membrane, (c) ITO heater.

PDMS 막의 변위를 측정하기 위해서 현미경을 사용하였으며 히터 인가 전력의 변화에 따른 막 중앙 부분의 초점 거리의 변화를 측정하였다. 테스트 유체는 DI water를 사용하였고 inlet 압력은 1 kPa, 2 kPa, 그리고 3 kPa를 인가하여 측정하였다. ITO 히터에 DC전압을 인가하며 유량의 변화를 측정하였으며, 유량은 outlet 튜브의 유체와 공기 경계면의 이동거리로 계산하였다.

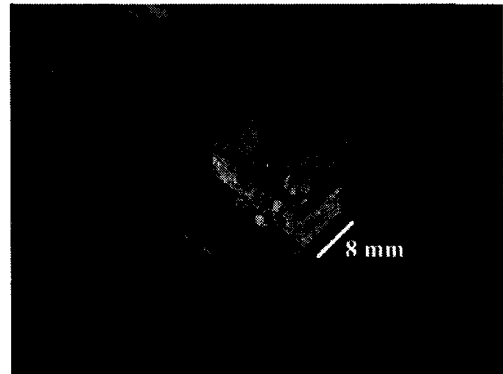


그림 4. 제작된 PDMS 마이크로 밸브의 사진.
Fig. 4 Photography of the fabricated PDMS microvalve.

4. 결과 및 토론

그림 5는 히터의 인가 전력에 따른 PDMS 막의 변위를 보여주고 있다. 이 그림에서 인가 전력이 증가함에 따라 PDMS 막의 변위도 증가함을 알 수 있다. 본 연구에서 제작된 마이크로 밸브의 채널의 깊이는 $40 \mu\text{m}$ 이다. 이 그림에 따르면 히터의 인가 전력이 약 25 mW 이상이면 충분히 밸브를 닫을 수 있는 변위가 발생하는 것을 알 수 있다.

마이크로 밸브의 히터 인가 전력에 따른 효과를 관찰하였다. 그림 6은 히터의 인가 전력과 유량의 관계를 보여주고 이때 마이크로 밸브의 채널 넓이는 $400 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$, $600 \mu\text{m}$ 이고 막의 두께와 채널 깊이는 $70 \mu\text{m}$ 와 $40 \mu\text{m}$ 이며 inlet 압력은 2 kPa을 인가하였다. 인가 전력이 영인 상태에서 채널 넓이가 $400 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$, 그리고 $600 \mu\text{m}$ 인 마이크로 밸브의 유량

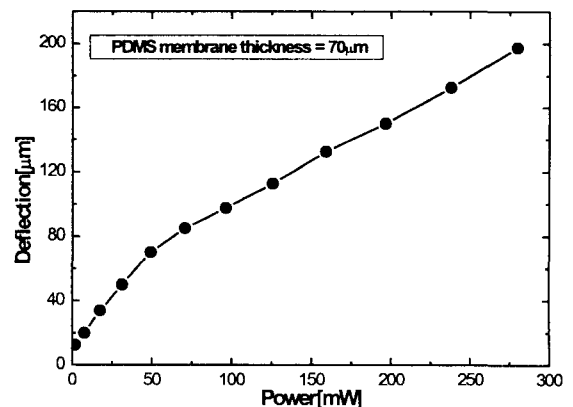


그림 5. 전력인가에 따른 PDMS 막의 변위.
Fig. 5 Deflection of the PDMS membrane with applied power.

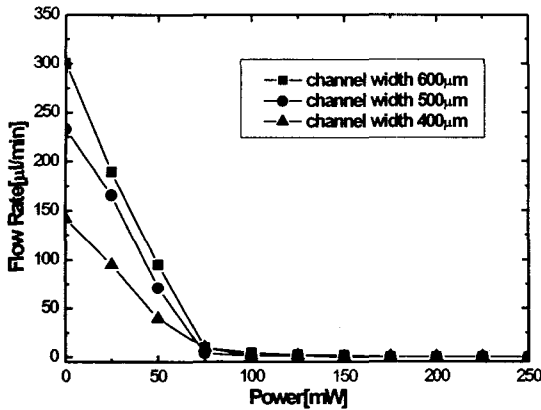


그림 6. 채널의 넓이에 따른 인가된 전력과 유량의 관계.
 Fig. 6 The relationships between the flow rate and the applied power as a channel width.

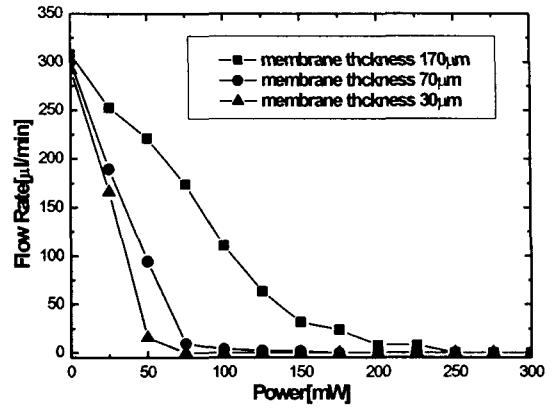


그림 8. PDMS 막의 두께에 따른 인가 전력과 유량의 관계.
 Fig. 8 Relationships between the flow rate and the applied power as a function of PDMS membrane thickness.

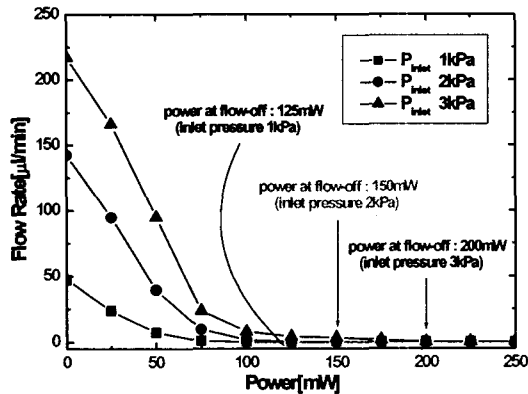


그림 7. inlet 압력에 따른 인가된 전력과 유량의 관계.
 Fig. 7 Relationships between the flow rate and the applied power with various inlet pressures.

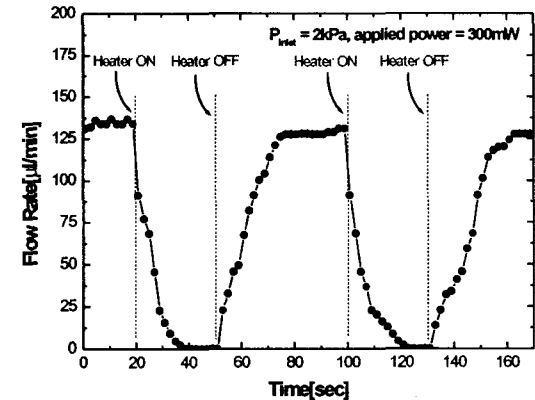


그림 9. 마이크로 밸브의 유체 스위칭 동작 특성.
 Fig. 9 Dynamic characteristics of the microvalve in fluid switching operation.

은 각각 142 $\mu\text{l}/\text{min}$, 233 $\mu\text{l}/\text{min}$, 그리고 300 $\mu\text{l}/\text{min}$ 이었다. 채널의 넓이 따라 유량은 비례하여 증가한다는 것을 알 수 있다. 하지만 유량이 영이 되는데 소모되는 전력량은 채널의 넓이와 관계없이 약 100 mW로 거의 같았다. 그러므로 유량이 영이 되는데 소모되는 전력은 채널의 넓이와는 관계가 없다고 사료된다.

그림 7은 inlet 압력에 따른 히터의 인가 전력과 유량의 관계를 보여주고 있다. 마이크로 밸브의 채널 넓이, 깊이, 그리고 PDMS 막의 두께는 각각 500 μm , 40 μm , 그리고 70 μm 이다. 마이크로 밸브의 유량은 inlet 압력이 증가함에 따라 비례하여 증가하였다. inlet 압력 1 kPa, 2 kPa, 그리고 3 kPa을 인가한 마이크로 밸브의 유량이 영이 되는데 필요한 인가 전력량은 각각 125 mW, 150 mW, 그리고 200 mW이다. 이 결과로 유량이 영이 되는데 필요한 인가 전력은 inlet 압력과 밀접한 관련이 있다는 것을 알 수 있다.

마이크로 밸브의 PDMS 막의 두께에 따른 히터 인가 전력과 유량 특성을 측정하였다. 측정된 마이크로 밸브의 채널 넓이와 깊이는 400 μm 와 40 μm 이고 막의 두께는 30 μm , 70 μm , 170 μm 이다. 히터에 인가한 전력이 영인 상태에서 유량은

PDMS 막의 두께와는 관련 없이 거의 일정하였다. 하지만 PDMS 막 두께에 따라서 히터의 인가 전력의 증가에 따라 유량이 감소하는 기울기의 차이가 관찰되었다. PDMS 막이 얇을수록 유량은 더 빠르게 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. PDMS 막 두께가 30 μm , 70 μm , 그리고 170 μm 인 마이크로 밸브의 유량이 영이 되는데 필요한 인가 전력은 각각 75 mW, 175 mW, 250 mW 이다. 이것은 히터에 같은 전력 인가 시 PDMS 막의 두께가 얇을수록 변위가 더 크게 발생하기 때문으로 사료된다.

그림 9는 마이크로 밸브의 유량 스위칭 동작 특성을 보여 준다. 측정된 마이크로 밸브의 채널의 넓이, 깊이, 그리고 PDMS 막의 두께는 각각 400 μm , 40 μm , 그리고 170 μm 이다. 히터의 인가 전력은 300 mW로 ON/OFF 시키며 측정하였다. 히터 인가 전력 ON/OFF에 따라 유량이 잘 제어된다는 것을 관찰할 수 있다. 그리고 유량이 닫히고 열리는데 걸리는 응답 속도는 대략 20초와 25초 정도가 소요되었다. 차후 연구에서는 제작된 마이크로 밸브의 작동시간과 소요전력을 단축하기 위해서 마이크로 밸브의 채널 및 열공압 챔버 사이즈의 개선이 요구된다고 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 열공압 방식의 PDMS 마이크로 밸브의 특성을 보여 주었다. 제작된 마이크로 밸브는 인 채널 구조로 다른 유체 제어 디바이스와 집적에도 용이하게 제작되었다. PDMS를 사용한 열공압 방식의 마이크로 밸브는 제작이 매우 간단하였으며 일회용 lab-on-a-chip에 응용하기에 좋은 특성을 보였다. 유량은 히터의 인가 전력으로 잘 제어되었다. 유량이 영이 되는데 필요한 인가 전력은 PDMS 막 두께와 inlet 압력의 인가량과는 밀접한 관련이 있었지만 채널의 넓이와는 관련이 없었다. 히터의 인가 전력의 ON/OFF에 따라 유량의 닫힘과 열림이 잘 제어된다는 것을 관찰할 수 있었고 유량이 닫히고 열리는데 소요되는 응답 속도는 대략 20초와 25초이었다.

참 고 문 헌

[1] David C. Roberts, Hanqing Li, J. Lodewyk Steyn, Onnik Yaglioglu, S. Mark Spearing, Martin A Schmidt, and Nesbitt W. Hagood, "A Piezoelectric Microvalve for Compact High-Frequency, High-Differential Pressure Hydraulic Micropumping Systems," *Journal of Microelectromechanical System*, vol.12. pp.81-92, 2003

[2] Mircea Capanu, James G. Boyd, and Peter J. Hesketh, "Design, Fabrication, and Testing of a Bistable Electromagnetically Actuated Microvalve," *Journal of Microelectromechanical System*, vol.9. pp.181-189, 2000

[3] Nelsimar Vandelli, Donald Wroblewski, Margo Velonis, and Thomas Bifano,, "Development of a MEMS Microvalve Array for Fluid Flow Control," *Journal of Microelectromechanical System*, vol.7. pp.395-403, 1998

[4] Kazuo Hosokawa and Ryutaro Maeda, "Low-Cost Technology for High-Density Microvalve Arrays Using Polydimethylsiloxane(PDMS)," *The 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical System, MEMS 2001*, pp.531-534

[5] Hidekuni Takao, Makoto Ishida, and Kazuaki Sawada, "A Pneumatically Actuated Full In-Channel Microvalve With MOSFET-Like Function in Fluid Channel Networks," *Journal of Microelectromechanical System*, vol.11. pp.421-426, 2002

[6] Xing Yang, Charles Grosjean, and Yu-Chong Tai, "Design, Fabrication, and Testing of Micromachined Silicone Rubber Membrane Valves," *Journal of Microelectromechanical System*, vol.8. pp.393-402, 1999

[7] 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

[8] 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

[9] Byung-Ho Jo, Linda M. Van Lerberghe, Kathleen M. Motsegood, and David J. Beebe, "Three Dimensional Micro-Channel Fabrication in Polydimethylsiloxane(PDMS) Elastomer," *Journal of Microelectromechanical System*, Vol.9. pp. 76-81, 2000

저 자 소 개



김진호(金珍浩)

1975년 12월 24일생. 1998년 명지대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 입학, 현재 동 대학원 석사과정
E-mail : jinho_94@mju.ac.kr



조주현(曹柱鉉)

1976년 1월 8일생. 2002년 한밭대학교 전기공학과 졸업, 2002~현재 명지대 전기공학과 석사과정
E-mail : turbo8507@hotmail.com



한경희(韓慶熙)

1943년 4월 9일생. 1967년 명지대 공대 전기공학과 졸업, 1983년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(공박), 현재 명지대 전기공학과 교수
Tel : (031) 330-6359
Fax : (031) 321-0271
E-mail : hkh@mju.ac.kr



김영호(金榮浩)

1954년 6월 12일생. 1977년 연세대 전기공학과 졸업. 1983년 연세대 대학원 전자재료공학과 졸업(공학), 현재 수원대 전자재료공학과 교수

Tel : (031) 220-2663

Fax : (031) 220-2699

E-mail : yhkim@suwon.ac.kr



김한수(金翰秀)

1965년 3월 9일생. 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과(공학). 1995년~1999년 삼성전자 반도체 총괄 근무. 현재 두원공과대학 전기과 조교수

Tel : (031) 670-7169

Fax : (031) 670-7160

E-mail : hansoo@doowon.ac.kr



김용상(金容商)

1965년 6월 5일생. 1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1994년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학), 1999년~2001년 UC Berkeley 방문 연구원, 현재 명지대 전기공학과 부교수

Tel : (031) 330-6365

Fax : (031) 321-0271

E-mail : kys@mju.ac.kr