

PDMS로 제작된 압전력 구동 방식의 마이크로 펌프의 특성

김진호, 나광호, 김영호\*, 김용상  
 명지대학교 전기공학과, \*수원대학교 전자재료공학과

Characterization of Piezoelectric-Actuated PDMS Micropump

Jin-Ho Kim, Kwang-Ho Na, Young-Ho Kim\*, Yong-Sang Kim  
 Dept. of Electrical Eng, Myongji University, \*Dept. of Electronic & Materials Eng, The University of Suwon

**Abstract** - The low-cost, simple structured micropump which is actuated by piezoelectric -discs, is fabricated with polydimethylsiloxane (PDMS) and the performances of the micropump, such as pump rate and backward pressure, are characterized. The PDMS micropump with diffusers instead of passive check valves as a flow-rectifying element was fabricated. While the square wave driving voltage is applied to the piezoelectric disc of the actuator, the flow rate is measured by fluid displacement variation of the outlet tube. The flow rate of micropump increases with enhancing the applied voltage due to the increase of diaphragm deflection. The flow rate and the backward pressure of the micropump with diffusers are about 32.9 $\mu$ l/min and 173Pa respectively for the above mentioned deflection conditions.

1. 서 론

마이크로 펌프는 micro-TAS(Micro Total Analysis System)또는 lab-on-a-chip 등에서 그 필요성이 크게 대두 되고 있다. 마이크로 펌프는 여러 종류의 구동방식으로 개발이 되었고 그 종류는 압전력 방식, 정전력 방식, 전자기력 방식, 형상기억합금 방식, 열공압력 방식, 그리고 전기 삼투압 방식 등이다. 이러한 구동 방식 중 정전력 방식, 전자기력 방식, 형상기억합금 방식, 열공압력 방식은 구동기의 구조가 매우 복잡하고 전기 삼투압 방식은 매우 낮은 펌프 수행 능력을 갖는 단점을 가지고 있다. 그러나 압전력 방식은 구동기의 구조가 간단하고 우수한 펌프 수행 능력을 갖으며 응답속도가 빠르고 인가전압으로 쉽게 유량을 제어 할 수 있는 장점이 있다.

마이크로 유체 제어 시스템의 개발은 주로 일반적인 반도체 물질과 집적 회로 공정 기술을 토대로 개발되었다. [1~3] 이러한 기술을 이용한 마이크로 유체 제어 시스템의 개발은 높은 개발비용과 많은 공정상의 제한이 있다. 그리고 대부분의 마이크로 펌프는 수동형 밸브를 가지는 다이아프램 펌프로 개발 되고 있다. 이러한 마이크로 펌프는 수동형 밸브의 복잡한 구조로 인해 제작공정이 복잡하고 제작비용도 높다.

본 연구에서는 polydimethylsiloxane (PDMS)를 사용하여 제작비용이 저렴하고 몰드를 이용하는 대량 반복 생산이 가능하며, 투명하여 화학 및 바이오 분야 등에 응용하기 적합한 마이크로 펌프를 개발하였다. 또한 복잡한 구조의 수동형 밸브를 대신하여 diffuser를 사용하여 구조가 간단하고 높은 신뢰성이 보장되는 마이크로 펌프를 제작하였으며 diffuser는 PDMS로 쉽게 제작 할 수 있었다. 제안된 마이크로 펌프는 구동 방식은 매우 간단하게 제작할 수 있는 압전 구동 방식으로 제작하였다. 제작된 마이크로 펌프의 다이아프램 변위, 유량, 그리고 backward 압력을 측정 및 분석하였다.

2. 제안된 마이크로 펌프의 구조 및 원리

그림 1(a)는 마이크로 펌프 구조의 단면을 보여준다. 제안된 마이크로 펌프는 총 2개의 층으로 구성되어 있다. 상층인 PDMS 층에는 펌프 챔버, diffuser, inlet hole, outlet hole, 그리고 reservoir가 있고, 하층인 유리 층은 압전 디스크가 있는 구동기 부분이다. 그림 1(b)와 (c)는 각각 PDMS 층과 유리 층의 평면도이다. PDMS 층의 펌프 챔버의 지름은 3.5mm이고, 깊이는 80 $\mu$ m이다. 유리 층은 펌프의 다이아프램으로 사용되고 두께는 150 $\mu$ m이다. 압전 디스크의 지름과 두께는 3mm와 300 $\mu$ m이다. Inlet 튜브와 outlet 튜브는 내경이 3mm인 실리콘 튜브를 사용하였다.

본 연구에서는 diffuser를 유체 정류기로 사용하였다. diffuser는 정방향으로 갈수록 채널 폭이 점점 증가하고

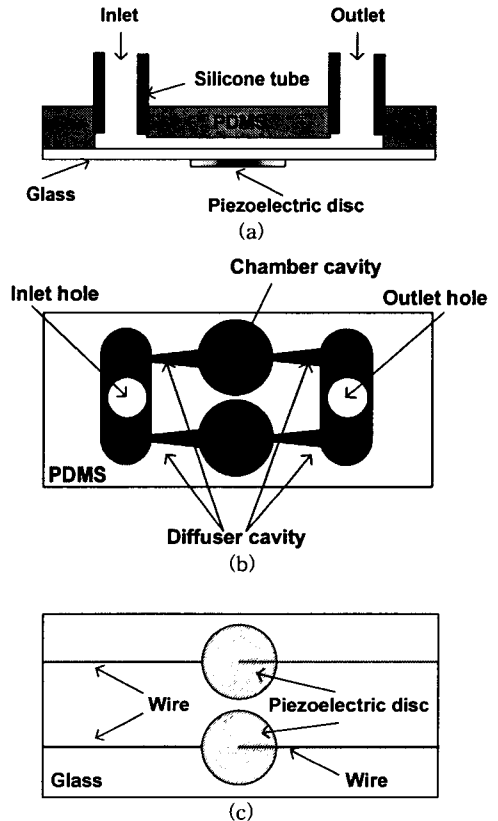


그림 1 제안된 마이크로 펌프의 구조. (a) 마이크로 펌프의 단면도, (b) PDMS층의 평면도, (c) 유리층의 평면도.

역방향으로 갈수록 채널 폭이 점점 감소하는 채널이다. diffuser는 유체의 속도 형태인 운동 에너지를 유체의 압력 형태인 위치에너지로 변환시키는 기능을 가지고 있어, 유체의 흐름이 정방향일 때의 운동 에너지 손실이 역방향일 때 보다 작다.[4] diffuser의 inlet 폭(W), 길이(L), 그리고 divergence 각도는 각각  $80\mu\text{m}$ ,  $1500\mu\text{m}$ ,  $10^\circ$  로 제작 하였다. 그림 2는 diffuser가 antiphase 방식으로 구동되는 개념도를 보여주고 있다. supply mode에서는 inlet 쪽에서 들어오는 유체의 속도가 outlet 쪽에서 들어오는 유체의 속도 보다 빠르고, 반면에 pump mode에서는 반대의 현상이 일어나게 된다.[4] 본 연구에서는 이러한 이중 챔버 방식이 cavitation에 의한 버블 생성을 억제하는 효과가 있으므로 이 방식을 도입하였다.

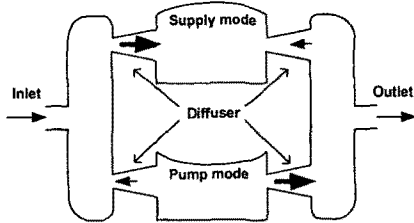


그림 2 antiphase 방식으로 구동되는 이중 챔버 마이크로 펌프.[4]

### 3. 실험

PDMS 층의 제작은 실리콘 웨이퍼, 음성 감광제(SU-8), 그리고 PDMS A, B용액(Dow Corning)을 사용한다. 그림 3은 패턴이 형성된 PDMS 층의 제작 공정을 보여준다. 음성 감광제(SU-8)를 실리콘 웨이퍼 위에  $80\mu\text{m}$  두께로 스핀 코팅한 후 사진공정으로 마이크로 펌프의 cavity 모양을 형성한다. 그림 3(c)와 같이 PDMS A, B 타입 용액을 10:1 비율로 섞고 저온 후 SU-8 패턴이 형성된 실리콘 웨이퍼 위에 붓는다. 그리고 PDMS 용액을 상온에서 24시간 동안 curing한다. curing이 끝난 후 PDMS replica를 실리콘 웨이퍼로부터 조심스럽게 분리한다. 그림 3(d)와 같이 inlet과 outlet 튜브를 연결하기 위해 PDMS replica에 기계적으로 구멍을 형성한다. 그림 4는 패턴이 형성된 PDMS replica의 SEM 사진을 보여준다. PDMS 층과 유리 층을 접착하기

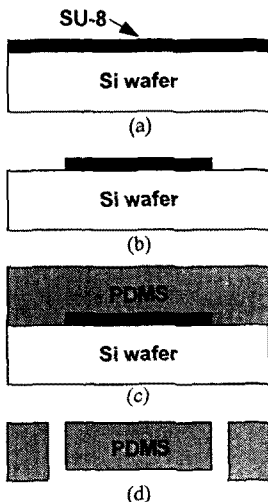


그림 3 패턴이 형성된 PDMS replica 공정 순서도.

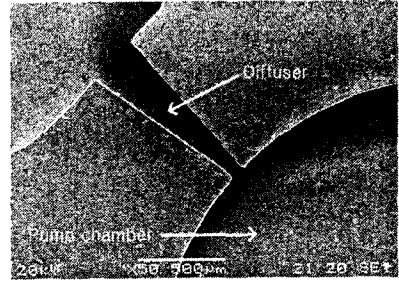


그림 4 패턴이 형성된 PDMS replica의 SEM 사진.

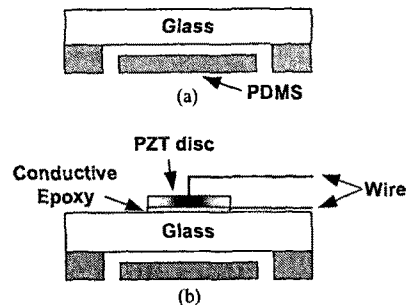


그림 5 PDMS 층과 유리 층의 접착 공정 및 구동기 제작. (a) PDMS 층과 유리 층의 접착, (b) 구동기 제작.

위하여 접착 표면에 산소 플라즈마 처리를 수행한다. 산소 플라즈마 처리는 reactive ion etching(RIE)을 사용하였다. 그림 5(a)는 산소 플라즈마 처리 후 빠르게 PDMS 층과 유리 층을 접착한 모습을 보여준다. 압전 구동기 제작을 위해 압전 물질은 lead zirconium titanate(PZT) 디스크를 사용하였다. 압전 디스크는 전도성 에폭시를 사용하여 유리 다이아프램 위에 접착한다.

마이크로 펌프의 다이아프램의 변위는 atomic force microscope (AFM)을 사용하여 측정한다. 본 실험에서는 테스트 유체로 메탄올을 사용하여 측정하였다. 메탄올은 물보다 표면 장력이 작기 때문에 마이크로 펌프 내부에 쉽게 가득 채울 수 있다. 이러한 이유로 마이크로 펌프의 유체 주입 시 생성되는 가스 버블을 최소화하여 정확한 유량을 측정하기 위해 메탄올을 사용하였다. 유량 측정은 마이크로 펌프의 압전 디스크에 구형과 전압을 인가하고 outlet 튜브 안의 메탄올과 공기 경계면의 이동거리를 통해 측정한다.

### 4. 결과 및 토의

그림 6은 구형과 전압을 80V로 인가하고 주파수를 250Hz에서 4kHz까지 변화시켜 인가한 상태에서 측정된 유량 및 다이아프램의 변위이다. 유량 측정 시 inlet과 outlet의 backward 압력차는 영으로 유지하였다. 그림 6에서 알 수 있듯이 300Hz와 2.5kHz에서 두개의 peak를 관찰할 수 있고 최대 유량은 300Hz에서  $9.8\mu\text{l}/\text{min}$  이 측정되었다. 반면에 다이아프램 변위는 주파수의 증가에 따라 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 이 현상은 압전 디스크에서 발생할 수 있는 최대 변위가 주파수의 증가에 따른 변위 발생 시간에 감소로 인하여 점점 감소하는 것으로 사료된다. 그러므로 주파수 변화에 따른 마이크로 펌프의 유량의 변화는 다이아프램 변위에 의한 현상으로 볼수 없다. 마이크로 펌프의 최적 주파수(300Hz)에서의 유량은 다른 주파수에서의 유량보다 현저히 크다는 것을 관찰할 수 있다. 이 현상은 주파수 변화에 따른 diffuser의 양방향성 특성과 유사한 원인으로 사료된다.[5]

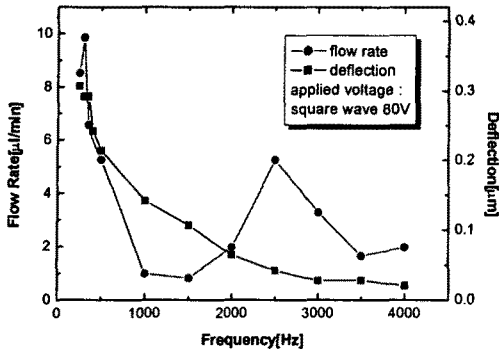


그림 6 압전 구동기의 인가 주파수(구형파 전압 80V)에 따른 다이아프램 변위 및 유량.

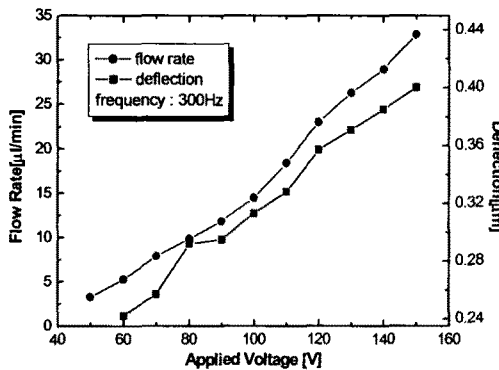


그림 7 압전 구동기의 인가전압(주파수 300Hz)에 따른 다이아프램 변위 및 유량.

유량은 주파수 변화뿐만 아니라 인가 구형파 전압의 변화에 따라도 변화였다. 그림 7은 압전 디스크에 최적 주파수인 300Hz를 고정 인가하고 인가 구형파 전압을 50V에서 150V까지 변화시킨 상태에서의 유량 및 다이아프램 변위의 측정 결과를 보여주고 있다. 그림 7에서 압전 디스크에 인가전압이 증가함에 따라 다이아프램 변위가 선형적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 다이아프램 변위는 구형파 150V(300Hz)에서 대략 0.4 $\mu$ m 가 측정되었다. 마찬가지로 마이크로 펌프의 유량은 압전 디스크의 인가전압의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 것

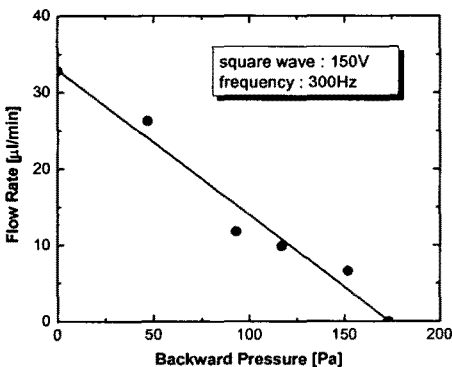


그림 8 backward 압력에 따른 유량.

을 관찰할 수 있으며, 이것은 인가전압에 의한 다이아프램 변위의 증가 때문이다. 이러한 현상은 잘 알려진 특성으로 압전 물질에 인가한 전계의 세기가 증가함에 따라 비례하여 압전 물질의 dimension이 변화하기 때문이다.[6] 마이크로 펌프의 유량은 인가 구형파 전압 150V(300Hz)에서 32.9 $\mu$ l/min이 측정되었다. 또한 마이크로 펌프의 유량은 3.2 $\mu$ l/min에서 32.9 $\mu$ l/min까지 인가전압의 세기에 따라 선형적으로 제어가 잘 되는 것을 관찰할 수 있다.

그림 8은 backward 압력을 변화 시키면서 유량을 측정 한 결과를 보여준다. 이때 인가 구형파 전압은 150V이며 주파수는 300Hz이다. 그림 8에서는 backward 압력이 증가함에 따라 유량이 선형적으로 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 인가전압 150V(300Hz)에서 최대 backward 압력은 173Pa이 측정되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 PDMS를 사용하여 제작비용이 저렴하고 대량 반복 생산이 가능하며, 투명하여 화학 및 바이오 분야 등에 응용하기 적합한 diffuser 마이크로 펌프를 제작하였고 특성을 분석하였다. 마이크로 펌프의 유량은 압전 디스크의 인가전압의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있었고, 이것은 인가전압에 따른 다이아프램 변위의 증가 때문이다. 물론 유량 특성은 주파수와 관련이 있었고 최적 주파수 300Hz에서 최대 유량을 관찰할 수 있었다. 마이크로 펌프의 유량과 backward 압력은 인가 구형파 전압 150V(300Hz)에서 32.9 $\mu$ l/min과 173Pa이 측정되었다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Shunichi Hayamizu, Kusunoki Higashino, Yasuhisa Fujii, Yasuhiro Sando, and Koji Yamamoto, "New Bi-Directional Valve-Less Silicon Micro Pump Controlled by Driving Waveform," *The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS2002*, pp. 113-116, 2002
- [2] R. Zengerle, J. Ulrich, S. Kluge, M. Richter and A. Richter, "A Bidirectional Silicon Micropump," *Sensors and Actuators A : Physical*, vol.50. pp. 81-86, 1995
- [3] Ok Chan Jeong and Sang Sik Yang, "Fabrication and Test of a Thermopneumatic Micropump with a Corrugated p+ Diaphragm," *Sensors and Actuators A : Physical*, Vol.83. pp. 249-255, 2000
- [4] Anders Olsson, Peter Enoksson, Gran Stemme, and Erik Stemme, "Micromachined Flat-Walled Valveless Diffuser Pumps," *Journal of Microelectromechanical System*, Vol.6. pp. 161-166, 1997,
- [5] Wouter van der Wijngaart, Helene Andersson, Peter Enoksson, Kjell Noren and Gran Stemme, "The First Self-Priming and Bi-Directional Valve-less Diffuser Micropump for both Liquid and Gas," *The Thirteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS2000*, pp. 674-679, 2000
- [6] Michael Koch, Alan Evans, and Arthur Brunnschweiler, "Microfluidic Technology and Applications," Baldock, Hertfordshire, England: Research Studies Press Ltd, pp.37-47, 2000