

# 새로운 기포동력 마이크로펌프 제작 및 실험

정정열<sup>†</sup> · 곽호영<sup>\*</sup>

## Novel Fabrication and Testing of a Bubble-Powered Micropump

Jung-Yeul Jung and Ho-Young Kwak

**Key Words :** Bubble-powered(기포동력), Micro heater(마이크로 히터), Micropump(마이크로 펌프), Visualization(가시화)

### Abstract

Micropump is very useful component in micro/nano fluidics and bioMEMS applications. In this study, a bubble-powered micropump was fabricated and tested. The micropump consists of two-parallel micro line heaters, a pair of nozzle-diffuser flow controller and a 1 mm in diameter, 400  $\mu\text{m}$  in depth pumping chamber. The two-parallel micro line heaters with 20  $\mu\text{m}$ -width and 200  $\mu\text{m}$ -length were fabricated to be embedded in the silicon dioxide layer of a wafer which serves as a base plate for the micropump. The pumping chamber, the pair of nozzle-diffuser unit and microchannels including the liquid inlet and outlet port were fabricated by etching through another silicon wafer. A glass wafer (thickness of  $525 \pm 15 \mu\text{m}$ ) having two holes of inlet and outlet ports of liquid serve as upper plate of the pump. Finally the silicon wafer of the base plate, the silicon wafer of pumping chamber and the glass wafer were aligned and bonded (Si-Si bonding and anodic bonding). A sequential photograph of bubble nucleation, growth and collapse was visualized by CCD camera. Clearly liquid flow through the nozzle during the period of bubble growth and slight back flow of liquid at the end of collapsing period can be seen. The mass flow rate was found to be dependent on the duty ratio and the operation frequency. As duty ratio increases, flow rate decreases gradually when the duty ratio exceeds 60 %. Also as the operation frequency increases, the flow rate of the micropump decreases slightly.

### 1. 서 론

마이크로 펌프는 마이크로 유체시스템, 생화학 분석연구, 생명공학 연구 등에 있어서 아주 중요한 장치이다. 지난 10 여년간 많은 연구자들이 다양한 원리의 마이크로 펌프를 제안하고 연구하여 왔다. Koch 등[1]은 PZT 박막과 노즐/확산기를 제작하고 에탄올을 이용하여 마이크로펌프 실험을 수행하였으며, 사인파의 전압을 600 V, 작동 주파수를 2 kHz 로 공급하여 최대 155  $\mu\text{l}/\text{min}$  의 유량을

얻었다. Jun 과 Kim[2]은 수력직경이 3.4  $\mu\text{m}$  인 마이크로 유로에서 마이크로 히터로 기포를 발생시키고, 연속하여 설치된 3 개의 마이크로 히터로 유로의 길이방향으로 온도 구배를 형성하여 기포를 이동시키는 방법의 마이크로 펌프를 개발하였다. 그들은 3 개의 히터에 공급되는 전압 펄스의 폭, 겹침, 크기 등을 조절하여 실험을 수행하였으며 최고 0.5  $\text{nl}/\text{min}$  의 유량과 이때 800 Pa 의 압력수두를 얻었다. Olsson 등[3]은 노즐/확산기와 얇은 횡격막의 운동을 이용한 펌프의 모델을 제시하였고, Tsai 와 Lin[4]은 알루미늄 박막 히터를 이용한 노즐/확산기 마이크로 펌프를 제작, IPA(Isopropyl Alcohol)로 실험하였다. 이들은 1 W 의 전력을 250 Hz(10 %duty)로 공급하여 5  $\mu\text{l}/\text{min}$  의 최고유량과 377 Pa 의 정압수두를 얻었다. Sim 등[5]은 2 개의 알루미늄 박막 밸브를 이용한 마이크로 펌프를 제

<sup>†</sup> 중앙대학교 대학원

E-mail: lust7349@ms.cau.ac.kr

TEL: (02)820-5278, FAX: (02)826-7464

<sup>\*</sup> 중앙대학교 기계공학부

작하여, 물을 작동유체로 사용하여 실험하였다. 이들은 10 V의 전압을 0.5 Hz(60 %duty)로 히터에 가하여 최고 6.1  $\mu\text{l}/\text{min}$ 의 유량과 압력수두는 10 mmH<sub>2</sub>O를 얻었다.

하지만 앞에서 언급한 연구들은 구조가 복잡하고[1,3,5], 제작이 어려우며[3,5], 내구성의 문제[1,5]를 가지고 있다. 그리고 기포력을 이용한 이들의 연구[2-5]에서 기포의 거동에 대한 내용은 보고되지 않고 있다. Tsai와 Lin[4]은 저항이 매우 작은 알루미늄 막박을 히터로 사용하였기 때문에 저항을 높이기 위하여 꾸불꾸불한 형상으로 히터를 제작하였다. 그리고 원하는 위치에서 기포의 생성을 이루어지지 않았으며 작동 주파수 250 Hz로 전력을 공급한 것은 실제 기포를 제어하였다고 보기 어렵다.

본 연구에서는 제작이 간단하며 적은 전력으로 큰 유량을 얻을 수 있는 기포력 마이크로 펌프를 제작하였다. 그리고 챔버 내에서의 기포 거동을 관찰하였으며, 최적의 조건으로 기포를 제어함으로써 원하는 유량을 얻을 수 있었다.

## 2. 마이크로 펌프 제작

### 2.1 마이크로 펌프의 구성

본 연구에서는 밸브 대신으로 잘 알려진 노즐/확산기로 이루어진 기포력 마이크로 펌프의 원리를 이용하였으며 펌프가 구동되는 동안 챔버 내에서의 기포 거동을 관찰하기 위하여 새로운 방법으로 펌프의 제작을 시도하였다.

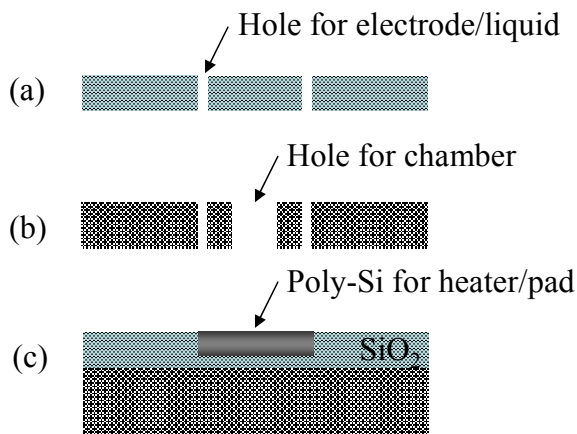


Fig. 1 Structure of micropump; (a) glass having inlet/outlet hole, (b) silicon having chamber and nozzle/diffuser, and (c) silicon substrate having micro heater

Figure 1과 같이 펌프는 총 3개의 층으로 이루어져 있다. Fig. 1(a)의 유리웨이퍼는 펌프의 윗판

역할을 하며, sand blaster로 작동유체의 입/출구, 히터에 공급되는 전원의 연결을 위한 구멍을 뚫고, 기포의 거동을 관찰할 수 있는 창 역할을 한다. Fig. 1(b)는 챔버, 노즐/확산기, 마이크로 유로를 건식 식각 방법으로 실리콘 웨이퍼를 관통시켜 제작한 것이며, Fig. 1(c)는 마이크로 히터를 실리콘 웨이퍼의 산화 실리콘 층에 제작한 것이며 마이크로 펌프의 밑 바닥이 된다.

각 층의 제작이 완료되면, Fig. 1(b)와 (c)를 실리콘-실리콘 접합법으로 접합하고, 이것을 Fig. 1(a)와 아노딕(anodic) 접합법으로 접합하면 마이크로 펌프가 완성된다. 폴리실리콘 히터는 산화 실리콘에 충분히 들어가 있으므로 Fig. 1(b)와 (c)를 접합 후 (b)의 실리콘과 (c)의 히터 사이의 저항을 측정해보면 0이 되므로 전기적으로 절연되어 있음을 알 수 있다.

### 2.2 마이크로 히터의 제작

Figure 1(c)에서 볼 수 있는 바와 같이 폴리실리콘 히터가 산화실리콘 층에 들어가 있다. 본 연구에서 적은 전력으로 기포를 형성하고 펌프를 구동하기 위한 가장 중요한 것이 마이크로 선형히터이다. 또한 챔버 내에서의 기포 거동을 관찰함으로써 펌프 구동과정을 가시화할 수 있었다.

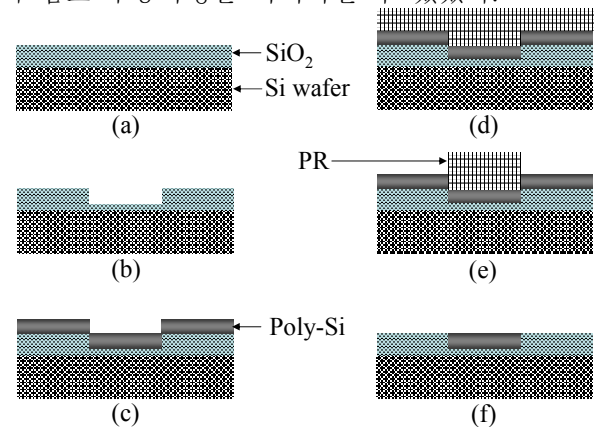


Fig. 2 Fabrication process of embedded micro line heater

구체적인 제작 과정은 Fig. 2에 보여진 바와 같다. Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 (a) 전기적 절연을 위하여 산화실리콘 막(1500 nm)을 형성한다. (b) 히터형상 부분의 산화실리콘을 플라즈마 식각공정을 통하여 제거한 후, (c) 화학 증기 증착법(LPCVD)으로 폴리실리콘(0.6 nm)을 증착한다. (d) 감광막(PR; photo resist)을 도포한 후, (e) 히터형상만 남기고 감광막을 제거한다. 마지막으로 (f) 폴리실리콘을 제거한 후, 감광막을 제거하면 산화실리콘에 들어간 폴리실리콘 박막 히터를 제작할 수 있다. 여기서 Fig. 2(b)와 (e)공정에 사용된 마스크는 같은 것이며, 성질이 서로 반대인 감광막을 사용함으로써 경제적으로 제작할 수 있다.

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 실험 장치

본 연구에서는 다른 연구에서와는 달리 부피 유량이 아닌 질량 유량을 측정하였다. 실험장치 주위온도를 25 °C 로 유지함으로써 작동유체의 증발을 방지하였고, 1 시간 동안 펌프를 통하여 나온 유량을 정밀도가 ±0.0001 g 인 전자저울로 측정하였다.

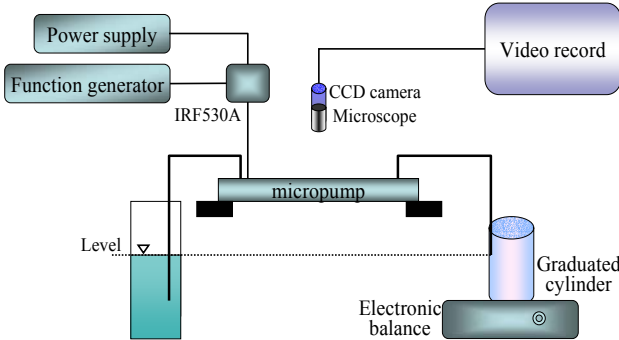


Fig. 3 Schematic of experimental apparatus

전체적인 실험장치의 구성은 Fig. 3 과 같다. 직류 전원을 MOSFET(IRF530A)을 통하여 마이크로 히터에 공급하고, 함수발생기(Function generator)로 직각 펄스(square pulse)를 발생하여 히터에 공급되는 전압의 on/off (duty ratio)를 제어하였다. 동시에 현미경이 부착된 CCD 카메라를 이용하여 기포의 거동을 관찰하였으며, 비디오 레코드로 촬영하여 분석하였다.

#### 3.2 실험 방법

작동유체는 탈이온수(deionized water)를 사용하였으며, 공급되는 수위와 배출되는 수위를 같게 유지함으로써 중력에 의한 영향을 제거하였다.

기포의 거동을 관찰하기 위한 실험은 1.47 W 의 전력, 작동 주파수 0.4 Hz, 40 %의 전기 흐름률로 공급하였고, 유량을 측정하기 위한 실험은 마이크로 히터에 공급되는 전력은 1.2 W 로 고정하였으며, 공급되는 전압의 주파수(frequency)를 0.5 Hz 에서 2.0 Hz 까지 0.25 Hz 씩 증가시켰고, 전기 흐름률(duty ratio)은 40 %부터 80 %까지 10 %씩 증가시키며 실험하였다.

### 4. 결과 및 토의

#### 4.1 마이크로 선형 히터

전형적인 반도체 공정을 통하여 제작된 마이크로 선형 히터는 Fig. 4 와 같으며, 길이는 200 μm, 폭은 20 μm, 그리고 높이는 0.6 μm 로 산화실리콘 안에 증착된 것이다. 두 개의 히터를 병렬로 배열하였으며 전체 저항은 190~200 Ω 이다.

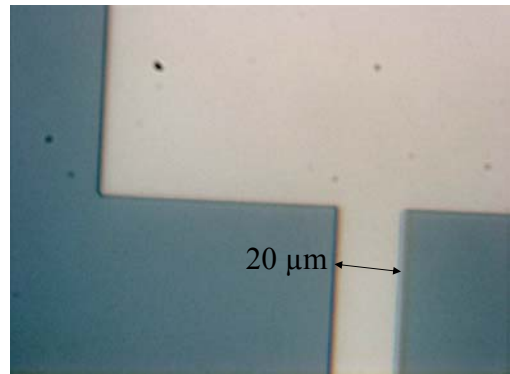


Fig. 4 Micro heater was embedded in silicon dioxide

#### 4.2 챔버 내에서 기포의 거동

챔버 내에서 기포의 거동은 마이크로 선형 히터에 직각 펄스를 한번 흘려 전압을 공급하고, 동시에 CCD 로 촬영된 영상을 분석함으로써 관찰할 수 있으며 Fig. 5 와 같다.

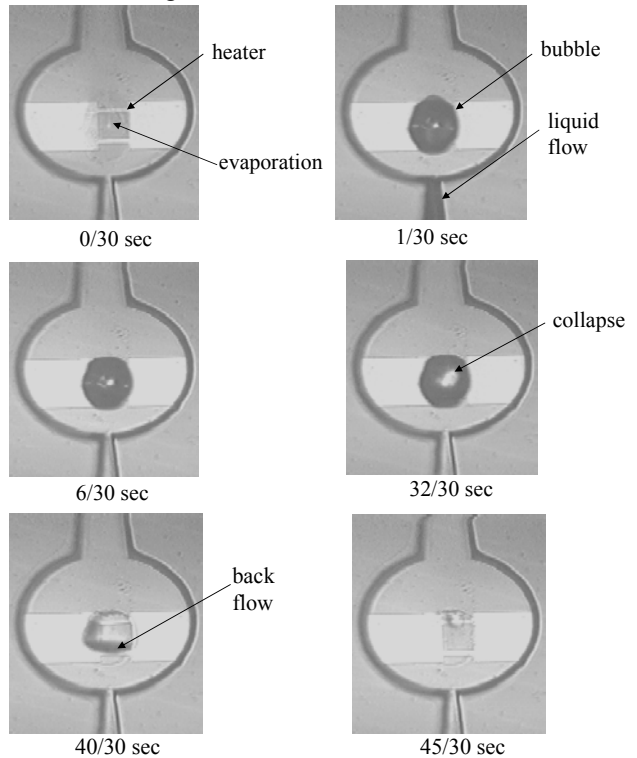


Fig. 5 Operation sequence of bubble powered micropump during application of 1.47 W, 0.4 Hz and 40 %duty.

Figure 4 에서 볼 수 있는 바와 같으며, 작동 주파수 0.4 Hz, 40 % 전기 흐름률로 전류를 흘리는 것은 1 초간 전류가 흐르고 1.5 초간 전류가 끊기는 것을 의미한다. 히터에 전류를 가하자마자 히터 표면에서의 작동유체가 가열되는 것을 볼 수 있으며, 1/30 초 후에는 완전한 기포의 형성함을 관찰할 수 있다. 이것은 개방된 환경에서의 마이크로

로 선형히터 연구[6-7]에서 밝혀진 것과 같은 현상이다. 기포가 완성되는 순간(1/30 초) 급격한 유체의 흐름이 확산기에서 일어남을 관찰할 수 있다. 1 초 후 전류가 끊겨도 기포는 계속 존재하다가 32/30 초 후 기포의 수축이 시작되는 것을 관찰할 수 있다. 그리고 발생된 자리에서 수축되던 기포는 확산기에서 나오는 역류에 의하여 후퇴하는 것을 40/30 초 경 관찰할 수 있으며 45/30 초 후에는 기포가 완전히 소멸되는 것을 볼 수 있다.

4.3 마이크로 펌프 유동 특성

본 연구에서는 챔버의 형상에 의한 마이크로 펌프의 유량 변화와 유량 특성을 파악하기 위하여 원형 챔버와 사각 챔버의 마이크로 펌프를 제작하였다.

4.3.1 원형 챔버

원형 챔버를 가진 마이크로 펌프의 경우 0.50 Hz 에서 2.00 Hz 까지 0.25 Hz 씩 증가시키고, 전류 흐름률(duty ratio)은 40 %부터 10 %씩 증가시키며 80 %까지 실험을 수행하였다.

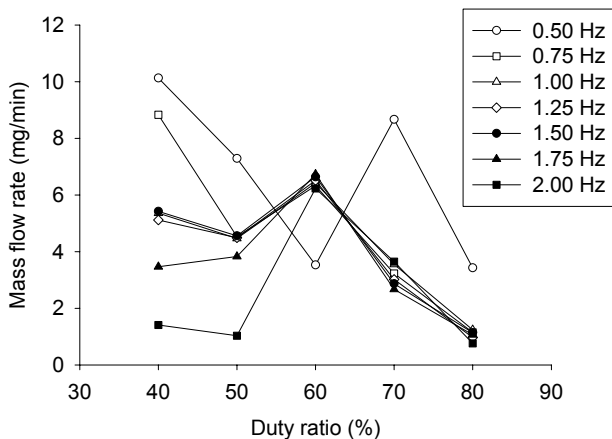


Fig. 6 Mass flow rate of micropump with circular chamber depending on various duty ratios

Figure 6 에서 볼 수 있는 바와 같이, 전류의 흐름률이 증가한다고 펌프의 구동률이 향상되는 것이 아님을 알 수 있다. 전류 흐름률이 60 %가 넘어가면 전체적으로 유량이 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 이것은 전류가 너무 오래 흐르게 되면 기포가 수축하고, 작동유체가 냉각되기 위한 시간이 부족해서 펌프가 제대로 작동하지 않기 때문이다. 기포가 발생, 성장하는데 적당한 시간이 필요하듯이, 기포가 수축되고 소멸되는데도 적당한 시간이 필요하다. Fig. 7 은 전기 흐름률이 70 %인 경우 기포가 소멸 후 일정시간이 지나지 않으면 정상적인 기포가 제대로 발생하지 못하는 것을 보여주고 있다.

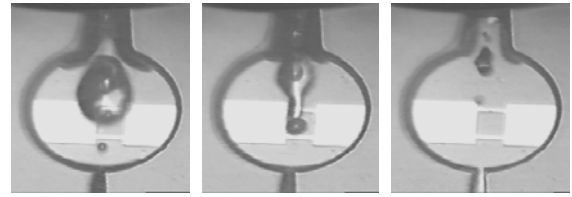


Fig. 7 Unwanted bubble nucleation during application of 1.2 W, 2.0 Hz and 70 %duty.

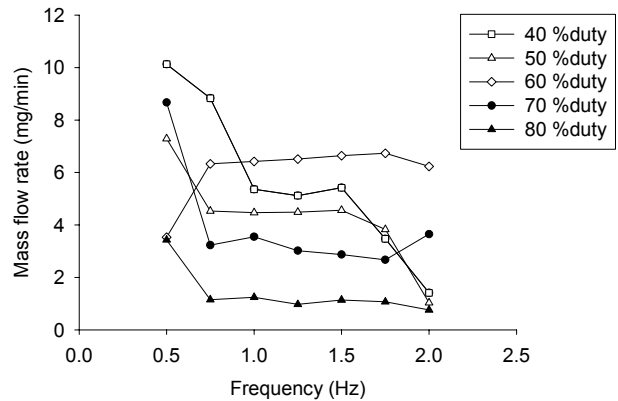


Fig. 8 Mass flow rate of micropump with circular chamber depending on various frequencies

Figure 8 은 주파수에 변화에 따른 유량의 변화를 보여주고 있다. 주파수가 2.0 에서 40 %duty 를 제외하고는 유량이 매우 낮아지는 것을 볼 수 있다. Figs. 6, 7, 8 에서 볼 수 있는 바와 같이 본 연구에서 제작한 마이크로 펌프의 경우는 작동 주파수 0.5 Hz, 40 % 전기 흐름률에서 가장 최적의 유량과 기포의 거동이 안정된 상태로 진행됨을 알 수 있다.

4.3.2 사각 챔버

사각 챔버를 가진 마이크로 펌프의 실험결과는 Figs. 9 와 10 과 같다. Fig. 9 에서 볼 수 있는 바와 같이 전류 흐름률이 낮은 구간에서는 상당히 안정적으로 유량 흐름을 보여주고 있으나 2.00 Hz 인 경우에는 상대적으로 낮은 유량을 얻었다. 그러나 원형 챔버와 마찬가지로 전류 흐름률이 60 %를 넘어서면 전체적으로 유량이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있는데 Fig. 7 가 같은 현상이 자주 발생하기 때문이다.

Figure 10 은 사각 챔버를 가진 펌프의 주파수 변화에 따른 펌핑 유량을 보여주고 있다. 원형 챔버일 때에 비슷한 경향을 보여주고 있으며 전류 흐름률이 높을수록 유량이 줄어드는 것을 보여주고 있다. 또한 작동 주파수가 2.0 Hz 에서는 낮은 전류 흐름률일 때 유량이 급격히 줄어드는 것을 볼 수 있다.

유량은 원형 챔버일 경우와 비슷한 것을 볼 수

있으며, 마이크로 펌프의 챔버는 사각일 경우 40~60 % 전기 흐름률에서는 작동주기가 0.5~1.7 Hz 내에서 일정한 유량을 공급할 수 있음을 알 수 있다.

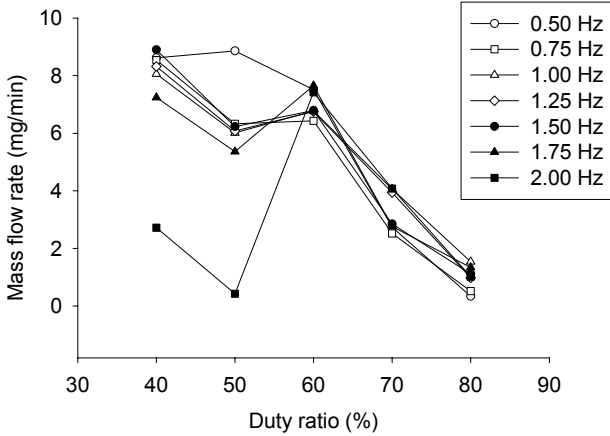


Fig. 9 Mass flow rate of micropump with rectangular chamber depending on various duty ratios

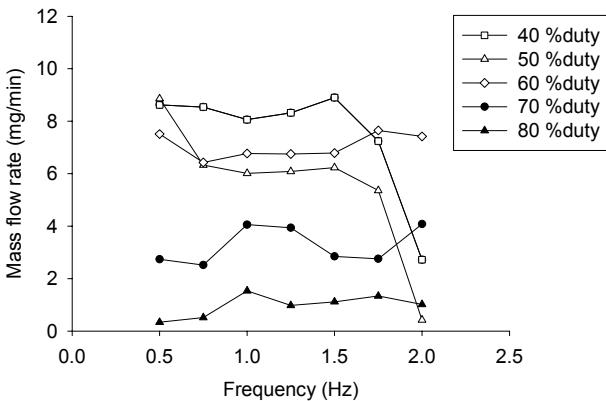


Fig. 10 Mass flow rate of micropump with rectangular chamber depending on various frequencies

### 5. 결론

새로운 약을 시험하거나 오염 물질 테스트를 위해 소량의 액체를 좁은 유로로 밀어 넣어주는 마이크로 펌프의 필요성은 높아지고 있다. 본 연구에서는 새로운 방법으로 기포동력 마이크로 펌프를 제작하였다. 펌프의 작동시 기포의 거동을 관찰함으로써 작동 주파수, 전류 흐름률 등이 전체적인 유량에 어떠한 영향을 주는지를 알 수 있었다. 전원을 공급하는 주파수가 높다고 펌프의 효율이 좋아지는 것이 아니며, 전류 흐름률이 60 %를 넘어서면 먼저 발생한 기포의 완전한 소멸이 이루어지지 않아 이어서 발생하는 기포가 정상적인 형태를 갖지 못하는 경우가 발생함으로써 펌프의 효율을 저하시키는 것을 확인할 수 있었다. 원형 챔버를 가진 마이크로 펌프의 구동에서 10.1

mg/min 의 최고 유량을 얻을 수 있었으며, 이때 구동 압력은 275 Pa 이었다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단 특정목적연구비의 지원 (과제번호 1999-1-304-002-5)으로 행해진 연구임.

### 참고문헌

- (1) M. Koch, A. G. R. Evans and A. Brunnschweiler, 1998, "The dynamic micropump driven with a screen printed PZT actuator," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 8, pp. 119-122.
- (2) T. K. Jun and C. J. Kim, 1998, "Valveless pumping using traversing vapour bubbles in microchannels," *J. Appl. Phys.*, vol. 83, pp. 5658-5664.
- (3) A. Olsson, G. Stemme and E. Stemme, 1995, "A valve-less planar fluid pump with two pump chambers," *Sensors Actuators A*, vol. 46-47, pp. 549-556.
- (4) J. H. Tsai and L. Lin, 2002, "A thermal-bubble-actuated micronozzle-diffuser pump," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 11, pp. 665-671.
- (5) W. Y. Sim, H. J. Yoon, O. C. Jeong and S. S. Yang, 2003, "A phase-change type micropump with aluminum flap valves," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 13, pp. 286-294.
- (6) J. Y. Lee, H. C. Park, J. Y. Jung and H. Y. Kwak, 2003, "Bubble nucleation on micro line heaters," *ASME J. Heat Trans.*, vol. 125, pp. 687-692.
- (7) J. Y. Jung, J. Y. Lee, H. C. Park and H. Y. Kwak, 2003, "Bubble nucleation on micro line heaters under steady or finite pulse of voltage input," *Int. J. Heat Mass Trans.*, vol. 46, pp. 3897-3907.