

두 개의 챔버를 갖는 마이크로 버블펌프의 개발

최종필*, 박대섭, 반준호(강원대 대학원 기계메카트로닉스공학부),
김병희, 장인배, 김현영(강원대 기계메카트로닉스공학부)

Development of having double-chamber in micro-bubble pump

J. P. Choi, D. S. Park, J. H. Ban (Mecha. Eng. Dept. KWNU),
B. H. Kim, I. B. Chang, H. Y. Kim (Mecha. Eng. Dept., KWNU)

ABSTRACT

In this paper, a valveless bubble-actuated fluid micropump has been developed and its performance was tested. The valveless micropump consists of the lower plate, the middle plate, the upper plate and a resistive heater. The lower plate includes the nozzle-diffuser elements and the double-chamber. Nozzle-diffuser elements and a double-chamber are fabricated on the silicon wafer by the DRIE(Deep Reactive Ion Etching) process. The lower plate also has inlet/outlet channels for fluid flow. The middle plate is made of glass and plays the role of the diaphragm. The chamber in the upper plate is filled with deionized water, and which contacts with the resistive heater. The resistive heater is patterned on a silicon substrate by Ti/Pt sputtering. Three plates and the resistor heater are laminated by the aligner and bonded in the anodic bonder. Since the bubble is evaporated and condensed periodically in the chamber, the fluid flows from inlet to outlet with respect to the diffusion effect. In order to avoid backflow, the double chamber system is introduced. Analytical and experimental results show the validity of the developed double-chamber micropump.

Key Words : Micropump(마이크로 펌프), Nozzle(노즐), Diffuser(디퓨저), Bubble(버블), Resistive heater(히터)

1. 서론

의료 분야를 포함한 여러분야에서는 약물의 공급, 시료의 분석 및 기기의 세척 등을 위하여 마이크로 펌프를 이용하려는 연구가 진행되고 있다. 유량을 정밀하게 제어하고 펌핑하기 위해서는 열과 같은 외부에 의한 영향으로 유체의 특성이 변화되지 않아야 하고, 유체의 역류가 발생하지 말아야 한다⁽¹⁾.

본 논문에서는 마이크로 펌프가 가지는 최대의 단점인 밸브 등 구동부의 피로과과 문제를 근본적으로 해결할 수 있고, 밸브 막힘의 위험성도 줄일 수 있는, 밸브리스(valve-less) 디퓨저/노즐(diffuser/nozzle) 마이크로 버블 펌프^(2,3)를 실리콘 웨이퍼와 파이렉스의 접합기술인 Anodic Bonding 을 기반으로 제작하여 나노 리터 단위의 미세유량 제어를 시도하였다. 또한 다양한 설계변수의 변화에 따른 특성을 유한체적법을 이용한 마이크로 유동해석과 실제 제작된 마이크로 펌프의 성능시험을 통하여 비교 분석함으로써 최적의 설계변수를 도출하였다. 또한

단일챔버 형태의 마이크로 펌프에서 흔히 발생하는 역류량을 줄이기 위하여 두 가지의 더블 펌핑챔버 모델을 제안하고 유동 특성을 통해 통해 그 유용성을 밝혔다.

2. 마이크로 펌프의 구조 및 제작

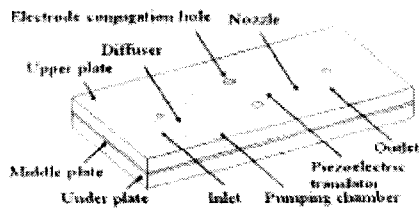
Fig. 1 은 본 연구에서 사용된 마이크로 펌프의 구조를 보여주고 있다. 마이크로 펌프는 하판, 중간판, 상판들이 서로 접합된 구조로 전체 크기는 15×7.5×1.7mm 이다. 하판의 재질은 실리콘이며 Fig. 1(a)에서 보듯이 하판에는 펌핑 챔버, 디퓨저 및 노즐부분을 포함하고 있으며 챔버 및 유로의 깊이는 80 μm 이다. 디퓨저와 노즐이 시작하는 부분의 폭은 80 μm 이고 끝나는 부분의 폭은 338 μm 이다. 또한 시작부분과 끝부분의 직선거리는 2000 μm 이며 디퓨저 각도는 9°이다. 또한 디퓨저로의 입구 손실을 막기 위하여 입구에 라운드 처리를 하였다. 유로의 경우 마이크로 펌프의 직접적인 성능에 가장 큰 영향을 미치는

부분이므로 가공의 정밀도를 확보하기 위하여 DRIE 에칭 기법을 사용하였다⁽⁴⁻⁷⁾. 또한 유체가 흐를 수 있도록 직경이 500 μm 인 구멍이 KrF 엑시머 레이저를 이용하여 가공되어 있으며, 펌프의 입구와 출구에 각각 연결되어 있다.

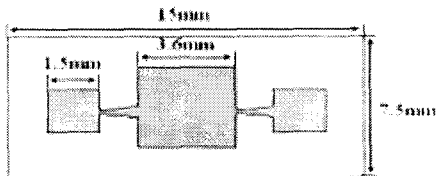
중간판의 크기는 $15 \times 7.5 \times 0.1 \text{ mm}$ 이며, 재질은 파이프스 7740(탄성계수 : 7.2 GPa, 열팽창계수 : $3.6 \times 10^{-6} / \text{K}$)이다. 가공이 끝난 하판과 중간판은 정렬후, 양극 접합(anodic bonding)을 이용하여 실리콘/유리 본딩을 수행하였다. 양극 접합은 주로 실리콘과 알칼리 금속을 함유한 유리간의 접합에 사용되며, 기판 내부에서의 전하 이동에 의존한다^(8,9). Anodic bonding 은 유리 기판을 실리콘 기판과 맞닿도록 한 뒤, 유리의 뒷면에 강한 음의 전압을 인가하게 되면 유리 내부에 Na^+ 이온들이 발생하여 음전극 방향으로 이동하게 된다. 이로 인하여 실리콘/유리 접합 계면에 공간 전하 영역이 형성되어 두 기판을 강하게 끌어당긴다. 이때, 양이온의 이동도는 온도에 비례하여 증가하게 되며, 전계에 의해 유리로부터 접합 계면으로 이동한 산소들은 실리콘과 결합하여 SiO_2 층을 형성함으로써 접합을 더욱 견고하게 한다.

상판은 $15 \times 7.5 \times 2 \text{ mm}$ 의 크기로 가공이 쉽고 펌핑 식별이 가능한 폴리머에 전극과 작동 유체인 deionized water 가 채워질 챔버 가공 후, 양극접합된 하판/중간판과 일반 접합제 본딩을 수행하였다. 전극은 $3 \times 3 \text{ mm}$ 의 크기에 Ti/Pt($500 \text{ \AA} / 2000 \text{ \AA}$)를 sputter 로 증착하여 제작하였다.

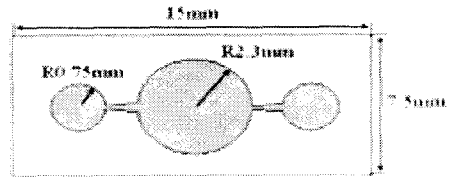
Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)는 마이크로 펌프의 하판을 보여주고 있다. 본 연구에서는 6 개의 펌프 모델에 대하여 유동 해석과 제작 및 시험을 하였는데, 6 개의 펌프 모델 중에서 5 개는 Fig. 1(b)와 같은 사각형 챔버를 가지고 있고 나머지 한 경우에만 Fig. 1(c)와 같은 원형 챔버를 가지고 있다. Fig. 1(d)는 전극 형상이다.



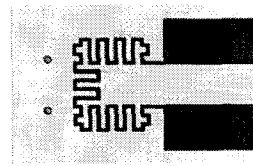
(a) 3-D view of the micropump



(b) top view of the square chamber in lower plate



(c) top view of the circle chamber in lower plate



(d) The resistive heater

Fig. 1 Structure of the micropump and heater

Fig. 2 는 실제 제작한 마이크로 펌프와 50 원 주화를 비교한 사진이다.

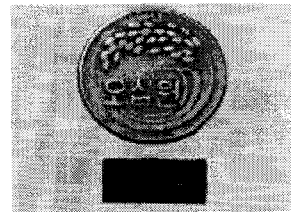


Fig. 2 Photograph of micropump and 50-won coin

3. 마이크로 펌프의 설계변수

펌프의 기본모델은 챔버의 형상에 따라 사각형 챔버와 원형 챔버로 분류하고, 다시 설계변수를 변경하여 세부적인 모델을 만들었다. Fig. 3 은 사각형 챔버를 채택한 펌프의 하판이며, 디퓨저 부분의 라운드를 보여주기 위해서 확대하여 나타내었다.

펌프의 설계변수는 크게 디퓨저 입구 부분의 폭 d 와 출구 부분의 폭 D , 디퓨저의 길이 L 로 설정하였고 입구 부분에 라운드의 유무 또한 중요한 설계변수 중 하나이다. 디퓨저의 개략적인 모양은 Fig. 4 에 나타내었다. 설계변수들이 유체의 유동에 어떠한 영향을 미치는가를 알기 위해서 펌프의 형상을 크게 6 가지로 나누고 해석을 수행하였다.

실제 해석에 사용된 경계조건은 Fig. 5 에 나타내었다. 진동자의 진동수는 이론적⁽¹⁰⁾으로 1~10Hz 정도가 적당하며, 본 해석에서는 4Hz 의 진동수를 주었다. 진폭은 챔버 깊이의 50%인 40 μm 로 하였고, 유체의 물성치는 물의 물성치를 사용하였다. 출구에서의 흐름은 가능한 직류성분에 가깝도록 조절해 주어야 하나, 본 해석에서 채택한 마이크로 펌프의 형상으로는 약간의 역류가

발생하는 것은 피할 수 없다. 따라서 마이크로 펌프를 제작하기 전에 유동 해석이 먼저 수행되어야 한다. 기본적인 유량을 만족하더라도 출구에서의 역류량이 문제가 되기 때문에 이를 유동 해석을 통해서 검증해야 한다⁽¹⁰⁾.

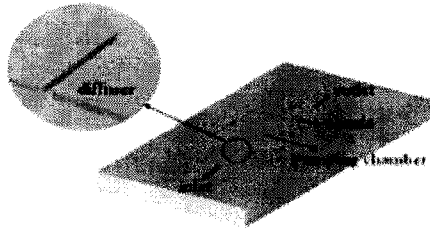


Fig. 3 Square chamber of lower plate

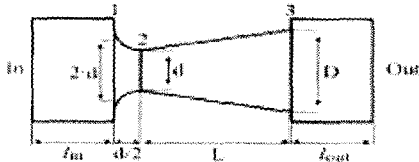


Fig. 4 Geometry of diffuser

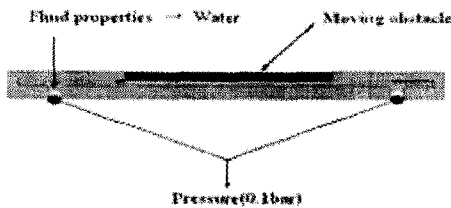


Fig. 5 Boundary conditions of micropump

4. 유동 해석

Table 1 은 해석 및 시험에 사용한 펌프의 형상변화를 나타내고 있다. 다양한 평가를 위하여 6 개의 시험모델을 설정하였다. 음영이 들어간 부분은 노즐이 시작하는 부분에 라운드가 없는 것을 의미한다.

Fig. 6 은 펌프 1 의 조건을 가질 경우, 마이크로 유동 해석에 있어 입구와 출구에서 시간에 따른 유량의 변화를 보여 주며, 거의 일정하다는 것을 알 수 있다. 진동에 따른 펌프 내의 유량 변화는 $0.023\text{mm}^3/\text{sec}$ (= $0.023 \mu\text{l}/\text{sec}$)이다. 한편, Fig. 7 에서 보는 바와 같이 펌프 2 는 노즐 부분이 길어짐에 따라 유체의 점성마찰이 증가하여 전체적인 유량이 펌프 1 보다 줄어들게 된다. 하지만 Fig. 7 에서 보는 것처럼 출구 부분에서의 유동 변화가 적기 때문에 음의 흐름(역류)이 발생을 피하기 위한 관점에서 볼 때에는 펌프 2 가 펌프 1 에 비하여 우수한 성능을 가지고 있음을 알 수 있다. 펌프

2 의 유량 변화는 $0.015\text{mm}^3/\text{sec}$ 이다. 펌프 3 은 펌프 1 과 비교해서 출구의 노즐 부분에 라운드가 없는 것을 제외하면 모든 조건이 같다. 하지만 유량은 펌프 1 이 $0.023\text{mm}^3/\text{sec}$ 이고 펌프 3 은 $0.031\text{mm}^3/\text{sec}$ 으로 펌프 3 이 더 크다. 이것은 노즐 부분에 라운드가 없어지면서 생긴 유동의 변화에 의한 것이며, 이 결과로 부터 라운드의 유무가 유체의 유동에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 펌프 3 의 유량 변화는 $0.031\text{mm}^3/\text{sec}$ 이다. 펌프 4 는 펌프 3 과 비교해서 출구의 노즐 부분에 설계변수인 d_2 , D_2 가 증가한 것을 제외하면 모든 조건이 같다. 하지만 해석 결과에서는 펌프 3 보다 유량이 훨씬 크다. 이것은 노즐부분의 설계변수 d_2 , D_2 가 증가하면 유량도 증가한다는 것을 보여준다. 유량은 펌프 4 가 가장 크기지만 출구부분에서 유동의 변화가 너무 크기 때문에 펌프의 특성으로 보면 좋지 않다. 펌프 4 의 유량 변화는 $0.044\text{mm}^3/\text{sec}$ 이다. 펌프 5 를 펌프 1 과 비교하면 디퓨저와 노즐부분의 설계변수 d , D 가 모두 감소하였다.

Table 1 The measured flow rate of the micropump for performance test result

	Inlet [μm]			Out let [μm]		
	d_1	L_1	D_1	d_2	L_2	D_2
Pump1	80	1080	260	80	1080	260
Pump2	80	1080	260	80	1400	234
Pump3	80	1080	260	80	1080	260
Pump4	80	1080	260	96	1080	378
Pump5	60	1080	228	60	1000	228
Pump6	Inlet ($\phi 1.5$), Out let ($\phi 1.5$), Pump cavity($\phi 4.6$), Circle chamber					

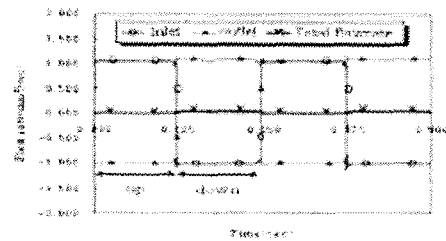


Fig. 6 Flow rate of pump 1

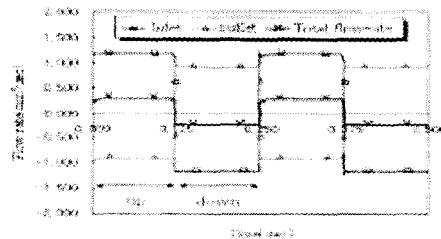


Fig. 7 Flow rate of pump 2

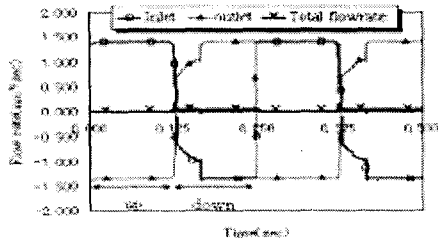


Fig. 8 Flow rate of pump 6

이로 인해 디퓨저와 노즐의 단면적이 감소하게 되어 펌프 1 에서 유속 변화 보다 펌프 5 에서의 유속이 훨씬 크게 나타난다. 입구와 출구에서의 유체의 유동은 거의 일정하게 나타나고, 유량 변화는 $0.041\text{mm}^3/\text{sec}$ 이다. 펌프 6 은 펌프 모델 6 가지 중에서 유일하게 원형 챔버를 가지고 있는 모델이다. Fig. 8 에서 보듯이 중간판이 하강을 할 때 난류로 인해서 매우 불규칙한 유체의 유동 특성이 나타난다. 이러한 유동 특성은 펌프의 유량을 제어하는데 어려움이 있으므로 좋지 않다. 진동에 따른 펌프 내의 유량변화는 $0.028\text{mm}^3/\text{sec}$ 이다.

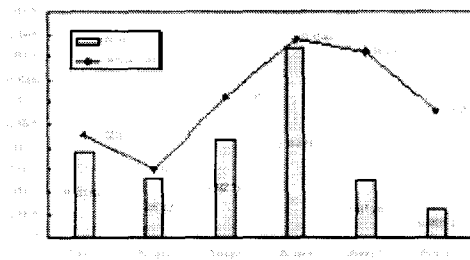


Fig. 9 Comparison of simulation and experiment

5. 유동 해석과 실제 시험 결과의 비교

5.1 유동 해석과 성능 시험

Fig. 9 는 유동해석 결과 성능시험 두 결과를 비교한 것으로서 유량은 약간의 차이가 나지만, 전체적으로 그래프의 추세는 유사한 것을 알 수 있다. 펌프 모델 중 2, 3, 4 번은 유동 해석 결과와 성능 시험 결과가 거의 일치하게 나타났지만 1, 5, 6 번 모델은 약간의 오차가 발생한 것을 알 수 있다.

5.2 더블 펌핑 챔버 해석

펌핑 챔버가 하나일 때 설계변수를 변경하여 여러 가지 모델에 대해서 해석한 결과 유량은 만족할만한 결과를 얻었지만, 출구에서의 역류는 여전히 해결해야 할 문제로 남아있다. 본

논문에서는 출구에서의 역류량을 줄이고자 더블 챔버 모델을 제안하였다. Fig. 10 은 해석에 사용된 더블 펌핑 챔버를 가지고 있는 펌프 모델을 나타내었다. 디퓨저와 노즐의 길이를 비롯한 챔버의 깊이, 유로의 폭, 라운드의 유무 등은 앞에서 해석한 펌프 1 과 같다. 단지 펌프 1 이 펌핑하는 챔버가 하나라는 것만 다르다. 이것은 더블 펌핑 챔버의 해석 결과를 펌프 1 과 비교하여 출구에서의 역류량이 얼마나 줄었는지를 판단하기 위함이다. 해석 시 경계조건은 펌프 1 과 동일하게 주었으며, 진동자의 주기만 펌프 1 과 다르다. 더블 펌핑 챔버의 경우 하나의 진동자가 하강하면 다른 하나는 상승하는 구조로 이루어져 있다. 이것은 두 펌핑 챔버 모두 같은 방향성을 가지게 된다면, 유량은 두 배가 되지만 출구에서의 역류량 또한 두 배가 되기 때문에 디퓨저/노즐의 원리를 이용하여 역류량을 줄이기 위해서 채택된 형식이다.

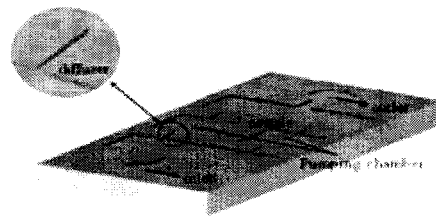


Fig. 10 Picture of double pumping chamber

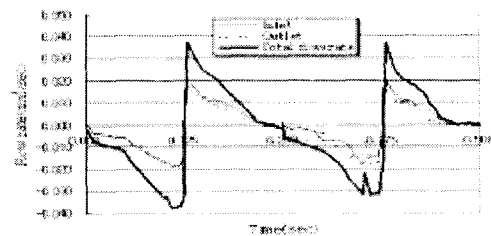


Fig. 11 Flow rate of double pumping chamber

Fig. 11 는 진동자의 운동에 따른 입구와 출구에서 시간에 따른 유량의 변화를 보여주고 있다. Fig. 6 의 펌프 1 에서의 결과와는 달리 입구와 출구에서의 유동 방향이 동일하게 나타남을 알 수 있다.

더블 펌핑 챔버의 유량은 $0.041\text{mm}^3/\text{sec}$ 로 펌프 1 과 비교하여 약 1.8 배 크며, 전체적인 유량의 변화는 작게 나타났다. 또한 출구 부분에서의 역류량이 더블 펌핑 챔버가 $0.023\text{mm}^3/\text{sec}$ 로 펌프 1 의 $1.039\text{mm}^3/\text{sec}$ 보다 98% 감소하였다. 마이크로 펌프에서 가장 중요하게 고려되는 전체적인 유량과 역류량의 문제로 볼 때, 더블 펌핑 챔버는 앞서 해석한 여러 가지 펌프 모델들 보다 우수한 특성을 가지고 있다. 더 나아가서 펌핑 챔버의 개수를 늘린다면, 역류량이 적고 보다 정밀하게 유량을 제어할 수 있을 것이나.

6. 결론

본 연구에서는 실리콘 웨이퍼와 파이렉스 유리를 DRIE 가공 및 양극 접합하여 마이크로 펌프를 제작/시험하였으며, 마이크로 유동 해석을 통해 최적의 펌프설계 데이터를 도출하였다. 또한 역류되는 유량을 줄이기 위하여 더블 펌핑 챔버를 도입하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) DRIE 기술을 이용하여 실리콘에 유로형상을 가공하였으며, 양극 집합을 이용하여 실리콘/유리 본딩을 수행하여 다양한 형태의 마이크로 펌프를 제작/시험하였다.
- 2) 주요 설계 변수들이 실제 마이크로 펌프가 동작할 때 어떠한 영향을 미치는지 유동 해석을 통하여 알 수 있었으며, 각 펌프 모델들이 가지는 유동 특성을 확인하였다.
- 3) 디퓨저/노즐 형식의 밸브리스 마이크로 펌프는 최소한의 역류가 발생하는 것을 피할 수 없지만, 더블 펌핑 챔버의 해석을 바탕으로 추가적인 연구를 수행한다면 역류량의 감소와 유량을 보다 정밀하게 제어할 수 있다는 것을 입증하였다.

후 기

본 연구는 에이앤디티(주)가 주관하고 강원대학교에서 위탁과제를 수행하는 산업자원부 공동핵심 기술 개발사업의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 김영수, 양상식, "실리콘 박막을 이용한 마이크로펌프의 제작 및 성능시험," 대한전기학회 논문지, 제 46 권, 제 7 호, pp. 1135-1140, 1997.
2. E. Stemme and G. Stemme, "A Valve-less Diffuser/Nozzle based Fluid Pump," Sensors and Actuators, vol. A39, pp. 159-167, 1993.
3. E. Stemme and G. Stemme, "Valve-Less Fluid Pump," Swedish Patent Appl. No. 9300, 604-607, 1993.
4. M. Elwenspoek, T. S. J. Lammerink, R. Miyake, and J. H. J. Fluitman, "Towards integrated microliquid handling systems," Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 4, pp. 227-245, 1994.
5. F. M. White, Fluid Mechanics. New York: McGraw-Hill, 1986.
6. J. G. Smits, "Piezoelectric Micropump with Three Valves Working Peristaltically," Sensors and Actuators, vol. A21-A23, pp. 203-206, 1990.
7. R. Zengerle, S. Kluge, M. Richter, and A. Richter, "A Bidirectional Silicon Micropump," presented at IEEE 8th International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'95), Amsterdam, the Netherlands, Jan. 29 - Feb. 2, 1995.
8. W. Bacher, W. Menz, and W. K. Schomburg, "Micropump manufactured by thermoplastic molding," presented at IEEE 7th International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'94), Oiso, Japan, January 25-28, 1994.
9. E. H. Klaassen, K. Petersen, J. M. Noworolski, J. Logan, N. I. Maluf, C. Storment, W. McCulley, and G. T. A. Kovacs, "Silicon fusionbonding and deep reactive ion etching; a new technology for microstructures," presented at ansducers'95 - Eurosensor IX, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995.
10. H. T. G. van Lintel, F. C. M. van den Pol, and S. Bouwstra, "A piezoelectric micropump based on micromachining in silicon," Sensors and Actuators, vol. 15, pp. 153-167, 1988.