알루미늄 플랩 밸브와 상변화 구동 마이크로 펌프의 제작

이상우*, 심우영, 양상식
아주대학교 전자공학부

The fabrication of a micro pump with a flap valve and a phase change actuator

Sang Woo Lee*, Woo Young Sim, Sang Sik Yang
School of Electronics Engineering, Ajou University

Abstract - This paper presents the fabrication of a micro pump consisting of a pair of Al flap vave and a phase change actuator. The phase change actuator is composed of a heater, a silicone rubber diaphragm and a working liquid chamber. The diaphragm is actuated by the evaporation and the condensation of the working liquid. The actuator pumps fluid through the valves. The micro pump is fabricated by the anisotropic etch, the boron deposition and the metal evaporation. The forward and the backward flow characteristics of the flap valves were obtained. Also, the flow rate of the micro pump has been measured. When the square wave input of 12 V, 60 % duty ratio and 0.2 Hz is applied, the average flow rate is 0.15 $\mu\ell$ /sec for zero pressure difference.

1. 서 론

최근 소량의 액체 표본으로 여러 병소의 감염을 테스트하고, 분석할 수 있는 면역분석기가 필요해 짐에 따라 마이크로머시닝 기술을 이용하여 면역분석장치를 소형화하는 연구가 이루어지고 있다. 이 초소형 면역분석장치는 분석 대상 액체를 정량적으로 공급하는 펌프와 밸브 또는 노즐, 반응액과 혼합하는 혼합부, 항원항체반응을 검출할 수 있는 검출부로 구성된다. 이 장치에 의한 정량적 분석을 위하여 미소량의 표본 액체를 정확하게 공급하고 역류가 없는 마이크로 펌프와 밸브가 필수적이다.

마이크로머시닝 기술과 접합기술을 이용하여 정전형[1], 압전형[2], 열공압형[3], 비등형[4] 등과 같은 여러 구동방식을 갖는 마이크로 펌프에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 이 중 비등 구동은 작동액체의 비등과 응축으로 구동되는데 다른 구동방식에 비해 적은 전력 손실로 큰 구동력을 낼 수 있다. 밸브는 능동형[5]과 수동형[1]으로 크게 구분되는데 능동형 밸브는 유체의 흐름을 정교히 제어할 수 있지만 구조와 공정이 복잡하다. 이에 반해 수동형 밸브는 유체의 압력 차로 유량을 제어하므로 구조가 간단하고 제작이 용이하다.

본 논문에서 연구된 펌프는 한 쌍의 수동형 밸브와 상변화 구동기로 구성된다. 수동형 밸브는 알루미늄으로 제작되는 플랩형 밸브이다. 구동기에 사용되는 막으로는 작은 구동력에도 큰 변형을 얻기 위하여 고 신축성의 실리코운 러버를 사용한다. 상변화 구동기는 히터가 제작된 파이렉스 유리와 실리코운 러버 막 사이에 채워진 상변화 작동액의 비등과 응축으로 구동된다.

본 논문에서는 마이크로 리터 이하의 분석 대상 액체를 정량적으로 공급하고 제어할 수 있으며 초소형 면역분석기에 집적화가 가능한 마이크로 펌프 및 밸브를 제작하고 시험하고자 한다.

2. 본 론

2.1 마이크로 펌프의 구조 및 구동 원리

그림 1은 마이크로 펌프의 구조를 보여준다. 마이크로 펌프는 한 쌍의 수동형 밸브와 상변화 구동기가 접합된 구조로 이루어진다. 수동형 밸브는 알루미늄 플랩 밸브가 제작된 두 장의 웨이퍼가 접합된 구조이다. 상변화 구동기는 큰 변위를 낼 수 있는 실리코운 러버 막과 Cr/Au 히터로 구성된다. 실리코운 러버 막과 히터 사이의 챔버에는 상변화 작동액이 채워진다. 그림 1(c)는 히터가 제작된 유리 기판의 평면도를 보여준다. 유리 기판에는 작동액을 주입하기 위한 두 개의 구멍이 있다. 마이크로 펌프의 전체 크기는 20 × 6 × 2 ㎣ 이고 알루미늄 밸브는 두께가 2 ㎛이고 크기가 1.7 × 1 ㎟ 인 플랩 형태이다. 플랩 밸브에 연결된 입·출력 구멍의 크기는 500 × 500 $㎛^2$ 이다.

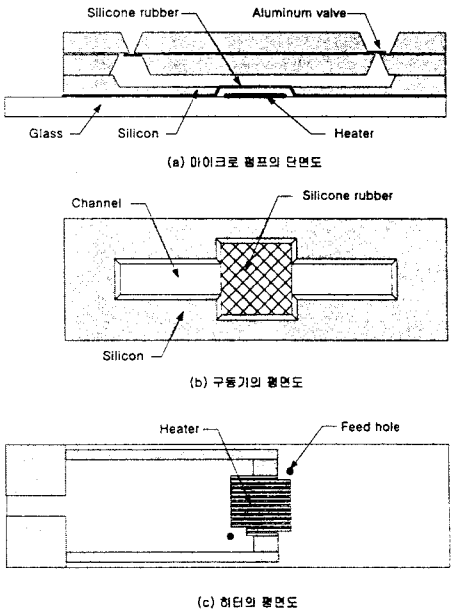


그림 1. 마이크로 펌프의 구조.

히터에 전압을 인가하면 실리코운 러버 막과 히터 사이에 충전된 작동액이 기화하면서 박막이 팽창하고 전류를 끊으면 기체가 다시 응축하면서 박막이 원상으로 수축한다. 이 때 발생되는 챔버내의 압력 변화에 따라 두 수동형 밸브가 교대로 열리고 닫히면서 유체는 순방향으로만 흐르게 된다.

2.2 마이크로 펌프의 제작

마이크로 펌프는 구동기와 수동형 밸브를 각각 제작하여 접합한다. 구동기와 밸브의 제작에 사용된 웨이퍼는 두께가 525 ± 10 ㎛인 n형 〈100〉 실리콘 웨이퍼이다. 그림 2는 구동기의 제작 공정을 보여준다. 전극과 구동기 박막 사이에 작동 액체가 주입되는 공간을 형성하기 위하여 그림 (a)와 같이 웨이퍼의 앞면에 사진 식각 공정으로 200 ㎛ 깊이의 공간을 만든다. 식각액은 EPW (Ethylendiamine : Pyrocathecol : DI Water = 250㎖ : 40g : 80㎖)를 사용한다.

구동기 박막을 제작하기 전에 실리코운 러버 코팅에 필요한 p+ 박막을 먼저 제작한다. 그림 (b)에서 고체 확산원, BN1100을 이용하여 고농도 붕소 층을 제작한다. 이 웨이퍼의 뒷면을 그림 (c)와 같이 이방성 식각액으로 식각하여 두께 2 ㎛인 p+ 박막을 제작한다. 이 때 밸브까지 연결되는 유로도 동시에 제작된다. 제작된 p+ 박막 위에 그림 (d)와 같이 실리코운 러버 (Shin-Etsu KE 1800)를 5700 rpm으로 60 초간 스핀 코팅한다. 코팅된 실리코운 러버는 비접촉 단차 측정기로 3 개의 샘플을 측정한 결과 30 ± 5 ㎛의 균일한 두께를 갖는다. 이 실리콘 기판과 Cr/Au로 증착하여 저항 60 Ω의 히터가 제작된 파이렉스 유리판을 그림 (e)와 같이 실리코운 러버의 접착력을 이용하여 접착한 후 상온에서 6 시간동안 경화시킨다. 완전히 접착된 실리콘 기판과 파이렉스 유리판을 3 분간 등방성 식각액(질산 : 초산 : 불산 = 85㎖ : 10㎖ : 5㎖)으로 처리하여 p+막을 제거함으로써 30 ㎛ 두께의 실리코운 러버 막을 갖는 그림 (f)와 같은 구동기를 완성한다. 그림 3은 제작된 구동기의 사진이다. 투명한 실리코운 러버 막 아래로 히터가 보인다.

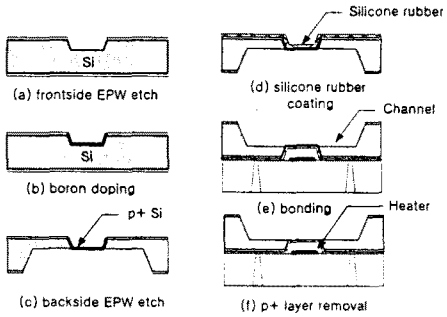


그림 2. 구동기 제작 공정.

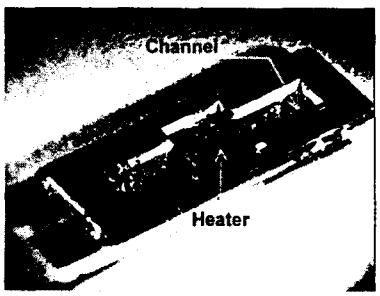


그림 3. 제작된 구동기 사진.

그림 4는 알루미늄 플랩 밸브의 제작 공정을 보여준다. 그림 (a)에서 웨이퍼의 한 면에 고농도 붕소 층을 제작한다. 그림 (b)에서 이방성 식각을 통하여 밸브 입·출력 구멍을 제작한다. 그림 (c)에서 알루미늄 플랩 밸브의 희생층으로 PR(photo resist)을 패턴닝한 다음 두께 2 ㎛의 알루미늄을 증착한다. 그림 (d)에서 p+ 막과 PR을 제거한다. 그림 (e)와 같이 플랩 밸브가 제작된 웨이퍼 두 장을 에폭시로 접합하여 한 쌍의 수동형 플랩 밸브를 완성한다. 이 밸브와 그림 2(f)의 구동기를 에폭시로 접합하여 펌프를 완성한다. 그림 5는 제작된 마이크로 펌프의 사진이다. 그림의 우측 상단에 알루미늄 밸브가 보인다.

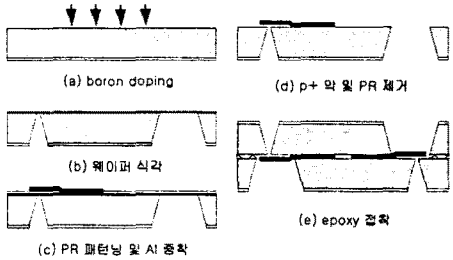


그림 4. 수동형 플랩 밸브 제작 공정.

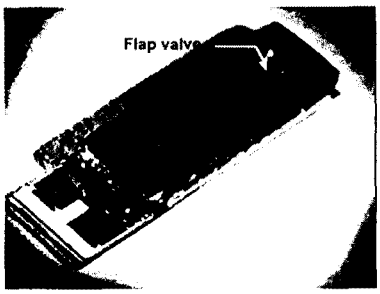


그림 5. 제작된 마이크로 펌프의 사진.

2.3 특성 시험

마이크로 펌프의 특성 시험은 수동형 밸브의 성능시험과 제작된 펌프의 유량 시험으로 이루어진다.

2.3.1 수동형 플랩 밸브의 특성

제작된 플랩 밸브쌍의 순방향 및 역방향 흐름 특성을 시험하기 위하여 그림 6과 같이 밸브의 입·출구에 모세관을 연결하였다. 구동기를 작동하지 않은 상태에서 그림 6의 수위차를 조절하여 입출구의 압력차를 다르게 하면서 증류수의 유량을 측정하였다.

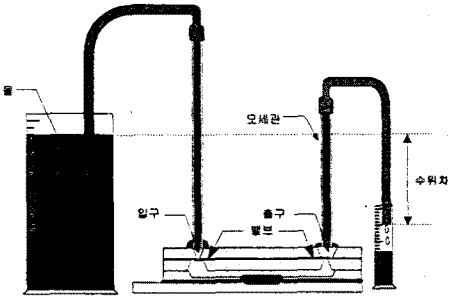


그림 6. 밸브의 유량 측정 장치.

그림 7은 순방향 및 역방향 압력에 대하여 측정된 유량을 보여준다. 순방향으로는 압력이 3 ㎜H_2O 이상일 때 유체의 흐름이 관찰되고 압력이 증가함에 따라 유량도 증가한다. 역방향으로는 압력이 600 ㎜H_2O 까지 증가되어도 유체의 흐름이 관찰되지 않았다.

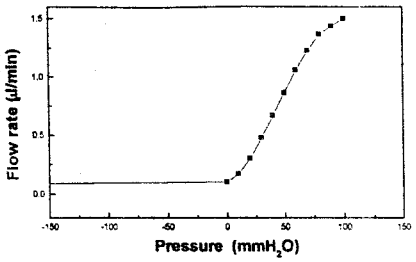
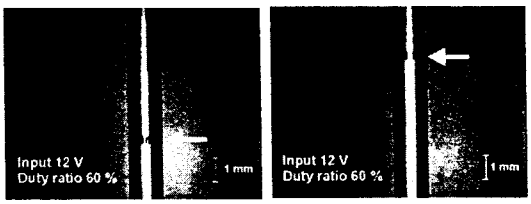


그림 7. 밸브의 입·출구 압력에 따른 유량.

2.3.2 마이크로 펌프의 특성

마이크로 펌프의 성능을 시험하기 위하여 그림 6과 같이 설치된 펌프의 입·출력 압력차를 0으로 한 상태에서 구동기를 작동시켜 흐르는 유체의 양을 측정한다. 작동액으로는 증류수와 메탄올을 사용하였다. 히터에 인가되는 입력 파형은 듀티비가 60 %이고 주파수가 0.2 Hz인 구형파이다. 증류수를 작동액으로 사용할 경우 10 V 이상의 전압으로 구동하면 전극이 산화되어 실험이 불가능하였다. 증류수의 경우에는 전기분해가 일어나지 않도록 6 V와 8 V의 전압을 인가하였고 메탄올의 경우에는 충분히 큰 전압인 12 V를 인가하였다. 그림 8은 메탄올을 작동액으로 하여 크기가 12 V인 구형파 전압을 30 초간 히터에 인가했을 때 모세관 내 액면이 상승하는 모습을 보여준다.



(a). 전압 인가 전 (b). 전압 인가 30 초 후

그림 8. 12 V 구형파 전압 인가시 액면 상승 사진.

그림 9는 증류수와 메탄올을 작동액으로 하여 다양한 전압의 구형파 입력을 인가하면서 시간에 따라 출력측 유로로 토출되는 유량을 측정한 결과이다. 인가 전압이 6 V와 8 V인 경우는 전압을 인가한 3 초간의 토출량이 0.5 ㎕이하로 너무 작아서 전압을 끊으면 토출되었던 액체가 펌프 챔버로 도로 돌아가므로 평균 유량은 거의 0에 가깝다고 할 수 있다. 12 V의 경우에는 3초간의 토출량이 0.8 ㎕ 이상으로 크고, 펌프 챔버로 되돌아가는 양이 약 0.1 ㎕이어서 한 주기당 평균 0.7 ㎕의 토출 유량을 보인다.

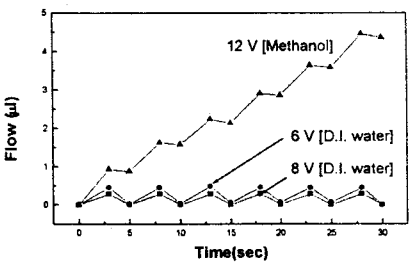


그림 9. 다양한 전압의 구형파 입력에 대한 토출 유량.

제작된 마이크로 펌프로부터 유효한 유량을 얻기 위해서는 열손실과 펌프 챔버로 되돌아가는 유량손실에 해당하는 임계 전압 이상의 전압을 인가해야 함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 초소형 액체 분석 장치에서 미량의 분석 액체를 정량적으로 공급할 수 있는 마이크로 펌프를 제작하고 시험하였다. 마이크로 펌프는 알루미늄 플랩 밸브와 작동액체의 상변화로 구동되는 실리코운 러버 막으로 구성된다. 알루미늄 플랩 밸브의 성능 시험 결과 순방향 압력이 3 ㎜H_2O 이상이면 유체의 흐름이 관찰되었고, 역방향으로는 600 ㎜H_2O의 압력에서도 밸브의 누수가 관찰되지 않았다. 메탄올을 작동액으로 한 펌프의 특성 시험에서는 듀티비가 60 %이고, 주파수가 0.2 Hz인 12 V의 구형파 전압을 인가할 때 평균 유량이 측정되었다.

향후, 펌프의 사공간(dead space)을 최소화하기 위하여 펌프 챔버와 밸브를 연결하는 유로의 단면 크기를 축소하여야 한다. 증류수를 작동액으로 하는 경우에는 전기분해에 의한 히터의 산화를 방지하기 위하여 보호막을 입힐 필요가 있다. 메탄올을 작동액으로 하는 경우에 산화가 일어나지는 않으나, 반복 구동시 과열되지 않으면서 높은 펌프 성능을 얻을 수 있도록 적절한 전압과 듀티비, 주파수 등의 조건을 얻는 것이 필요하다.

본 논문은 한국과학재단이 지원하는 마이크로/나노 시스템 집적화 연구센터의 초소형 면역분석기 개발과제 (97K4-0900-00-01-3과제)의 연구비 지원에 의한 것입니다.

[참 고 문 헌]

[1] J. Branebjerg, and P. Gravesen, "A New Electrostatic Actuator providing Improved Stroke length and Force," *Proc. IEEE Microelectro - mechanical Systems Workshop*, Travemunde, Germany, Feb. pp. 6-11, 1992.

[2] H. T. G. Van Lintel, "Piezoelectric Micropump Based on Micromaching of Silicon," *Sensors and Actuators A*, Vol. 15, pp. 153-167, 1988.

[3] T. S. J. Lammerink, M. Elwenspoek and J. H. J. Fluitman, "Integrated Micro-Liquid dosing System," *Proc. IEEE Microelectro - mechanical Systems Workshop*, Fort Lauderdale, Florida, U.S.A., Feb. 7-10, pp. 254-259, 1993.

[4] A. Asai, "Application of the Nucleation Thoery to the Design of Bubble Jet Printers," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 28, No. 5, May, pp. 909-915, 1989.

[5] T. Ohnstein, T. Fukiura, J. Ridley and U. Bonne, "Micromachined Silicon Microvalve," *Proc. IEEE Microelectro - mechanical Systems Workshop*, Napa Valley, California, U.S.A., Feb. 11-14, pp. 95-98, 1990.

[6] R. Zengerle, S. Kluge, M. Richter and A. Richter "A Bidirectional Silicon Micro Pump," *Proc. IEEE Microelectro - mechanical Systems Workshop*, Amsterdam, Netherlands, Jan. 29 - Feb. 2, pp. 19-24, 1995.