

솔레노이드 코일을 이용한 전자 마이크로 펌프의 제작 및 시험

論 文
49C - 5 - 11

Fabrication and Test of an Electromagnetic Micropump using Solenoid Coil

金基勳* · 金舜榮* · 鄭玉贊** · 梁翔植***
(Ki-Hoon Kim · Soon-Young Kim · Ok-Chan Jeong · Sang-Sik Yang)

Abstract - This paper presents the fabrication and test of a micropump with an electromagnetic actuator and a pair of aluminum flap valves. The actuator consists of a solenoid coil, a permanent magnet and an actuator diaphragm. The actuator diaphragm is fabricated by the spin coating of silicone rubber. The valves are passive ones and are fabricated by micromachining. The deflection of the fabricated actuator diaphragm is measured with a laser vibrometer. The deflection of the actuator diaphragm is proportional to the input current. The measured deflection of the fabricated diaphragm is 400 μm when the input current is 118 mA_{PP}, and the cut-off frequency is 50 Hz. The maximum flow rate of the fabricated micropump with the electromagnetic actuator is about 50 $\mu\text{l}/\text{min}$ at 5 Hz when the input current and the duty ratio of the square wave are 118 mA_{PP} and 50 %, respectively.

Key Words : Electromagnetic actuator, solenoid coil, micropump, silicone rubber, flap valve

1. 서 론

현재 MEMS (Micro Electro Mechanical System) 기술의 발달로 인하여 기기를 소형화하려는 연구가 수행되고 있으며, 특히 유량을 제어할 수 있는 마이크로 펌프는 응용 분야가 넓다. 의료 분야에서는 초소형 분석기를 제작하려는 과정에서 시액의 공급, 기기의 세척을 위하여 마이크로 펌프를 이용하려는 연구가 진행되고 있다. 이러한 의료 분야에서는 유량을 제어하고 펌핑할 때 열과 같은 외부에 의한 영향으로 유체의 특성이 변화되지 않아야 하고 유체가 역류하지 않아야 한다. Lammerink[1] 등은 소량의 액체의 pH 분석용 소형 분석기를 제작하였다. 제안한 소형 분석기에는 한 개의 챔버 내로 서로 다른 두 시액을 공급하여 섞어 주기 위해 두 개의 마이크로 펌프를 제작하고, 유체의 역류를 방지하기 위해 각각 수동형 밸브를 부착하였다.

일반적으로 마이크로 펌프는 밸브와 구동기로 구성된다. 밸브는 수동형과 능동형 방식이 있다. 능동형은 밸브를 직접 구동함으로써 유량의 흐름을 제어할 수 있으나 제작이 복잡하다. 수동형 밸브는 직접 유량 제어를 할 수 없으나 제작이 용이하다. 마이크로 펌프의 구동 방식에는 정전형, 열공압형, 비등형, 전자형 등의 방식이 있다[2~6]. 정전형 구동 방식은 간극과 인가전압의 조절로 미세 유량 조절이 가능하나 구동기의 대면 전극간의 간격으로 변위가 제한되

며, 인가 전압이 높다는 단점이 있다. 열공압형 구동 방식은 공동 내의 공기를 가열과 냉각의 반복 작업으로 구동하는 방식으로 저전압으로 큰 변위를 얻을 수 있으나 공동 내에 발생된 열이 박막을 통하여 펌핑되는 액체에 전달될 수 있다. 비등형 구동 방식은 구동기 내의 유체에 열을 가하여 기화와 액화의 반복 작업으로 구동하는 방식이나 열공압형 방식과 같이 주파수 응답이 느리다. 인체 내에 삽입되는 의료기와 같은 경우에는 고전압 사용 및 고온 작동은 제한된다. 반면에 전자 구동 방식은 자장 내의 전류로 인해 생기는 로렌츠 힘을 이용하는 방식으로서 구동시에 열 발생이 적고 저전압에서 큰 변위를 얻을 수 있으며 주파수 응답이 빠르다는 장점이 있다.

전자 구동 방식을 이용한 펌프는 평면 코일과 영구 자석 사이의 로렌츠 힘을 이용한 방식[5]과 전자석과 자성 박막을 이용한 방식[6] 등이 있다. 평면 코일의 경우, 구동 박막과 그 위에 제작되는 코일을 마이크로머시닝 기술로 소형화할 수 있으나 로렌츠 힘을 발생하는 유효한 코일 권수 및 전류에 한계가 있고 박막 위에 제작된 코일이 박막의 강성을 증가시켜 변위를 감소시킨다. 자성박막의 경우 자력에 의한 변위는 한 방향으로만 제한되므로 큰 변위를 얻기 위해 박막을 유연하게 하면 복원력이 약해지고, 복원력을 크게 하기 위해 박막의 강성을 높이면 변위가 작아지는 단점이 있다.

지금까지 초소형 전자 구동기에는 평면 코일을 사용하는 것이 일반화되어 있으나, 본 논문에서는 솔레노이드 코일을 사용한다. 솔레노이드 코일은 평면 코일보다 권수 및 전류를 크게 하여 로렌츠 힘을 증가시킬 수 있고, 박막의 코일이 일부분에만 접촉되기 때문에 박막 강성의 변화가 거의 없다.

본 논문에서는 소형 분석기에 적용하기 위한 펌프를 제작

* 准 會 員 : 亞洲大 電子工學部 碩士課程
** 正 會 員 : 亞洲大 電子工學部 博士課程
*** 正 會 員 : 亞洲大 電子工學部 教授 · 工博
接受日字 : 1999年 9月 6日
最終完了 : 2000年 3月 23日

한다. 펌프는 전자 구동 방식의 구동기와 한 쌍의 수동형 알루미늄 플랩 밸브로 구성된다. 구동기는 상용화되고 있는 솔레노이드 코일과 영구자석 그리고 실리콘 러버 (silicone rubber)로 제작한다. 제작된 구동기의 변위 특성 시험을 수행하고, 또 펌프 성능 시험을 수행한다.

2. 전자 구동 방식 펌프의 구조 및 원리

그림 1(a)는 전자 구동 펌프의 구조이다. 펌프는 구동기와 밸브로 구성된다. 구동기는 하부의 유리기판과 아크릴 기판, 알루미늄 기판 등으로 이루어져 있다. 유리기판 위에는 코일 도선 연결용 Cr/Au 전극이 있고, 영구 자석이 고정되어 있다. 실리콘 러버로 제작한 구동 박막은 알루미늄 기판에 제작되어 있고, 원통형 코일은 실리콘 러버막 아래에 부착되어 있다. 구동 박막의 위의 부분은 유체가 채워지는 펌프 챔버이다. 아크릴 지지대는 코일이 움직일 수 있도록 실리콘 러버막과 자석사이의 공간을 형성한다. 한 방향으로만 열리는 두 개의 수동형 알루미늄 플랩 밸브는 서로 반대 방향으로 열리도록 되어 있다. 수동형 밸브의 개구의 크기는 $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ 이고 밸브 플랩의 크기는 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 이다. 밸브 기판과 구동기 기판은 정사각형이고 크기는 모두 $18 \times 18 \text{ mm}^2$ 이다. 펌프 챔버의 내경과 높이는 각각 15 mm와 1 mm이다. 실리콘 러버막의 두께는 30 μm 이고 아크릴 지지대의 두께는 2 mm이다. 구동기 제작에 사용된 코일선의 직경은 40 μm 이고 원통형 코일의 직경과 높

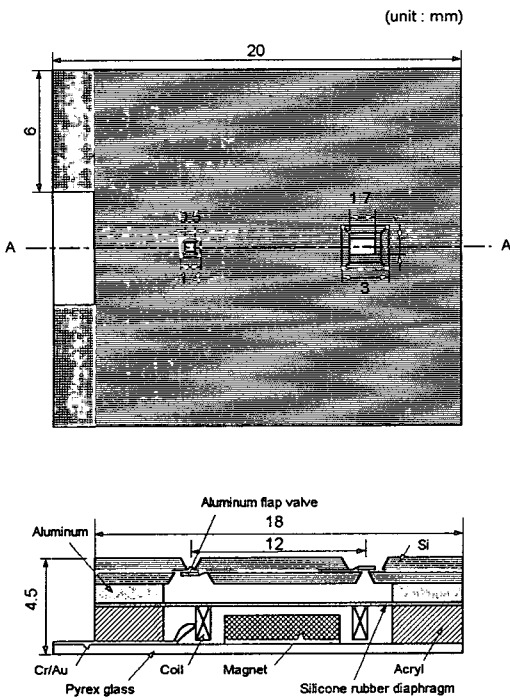


그림 1 전자 구동 방식 펌프의 구조

- (a) 평면도
- (b) A-A 단면도

Fig. 1 The structure of the electromagnetic micro pump

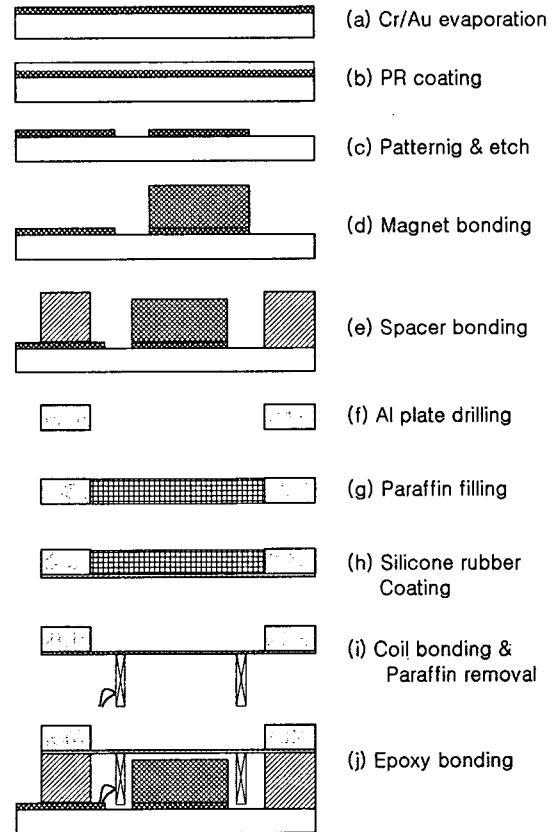
- (a) The top view
- (b) The A-A cross-sectional view

이는 각각 9.3 mm와 1.5 mm이며, 권수는 20이고 저항은 3 Ω 이다. 영구자석은 원기둥형으로써 직경과 높이는 각각 7 mm와 0.8 mm이고 재질은 Nd이며 자석 중심 표면 최대 자속 밀도는 1400 gauss이다.

전자 구동 방식은 영구자석 주위의 자장 내에 있는 코일에 전류를 흘려주면 코일에 로렌츠 힘이 생기는 것을 이용하는 구동방식이다. 코일에 흐르는 전류의 방향에 따라 로렌츠 힘이 코일의 중심축 방향으로 코일에 작용하고 코일이 부착된 박막이 진동한다. 박막이 아래 방향으로 변형되면 유체가 입구 밸브를 통하여 구동기 챔버 내로 유입되고 전류의 방향이 바뀌게 되면 박막은 위로 움직이게 되어 유체는 출구 밸브를 통하여 챔버 밖으로 유출되면서 유체가 순 방향으로 흐르게 된다.

3. 전자 구동기의 제작

그림 2는 전자 구동기의 제작공정도이다. 전자 구동기는 전극과 영구자석, 솔레노이드 코일 그리고 실리콘 러버막 등으로 구성된다. 구동기는 전극과 영구자석을 포함하는 부분인 그림 2의 (a) ~ (e) 공정과, 코일과 구동박막을 포함하는 (f) ~ (i) 공정 두 부분으로 구성된다.



- ▨ Acryl ▤ Cr/Au ▧ Magnet ⊠ Coil
- ▩ Paraffin □ Al plate □ Pyrex glass

그림 2 전자 구동기의 제작 공정

Fig. 2 The fabrication process of the electro magnetic actuator

먼저, 두께가 500 μm 인 파이렉스 유리 (Pylex glass #7740)에 크롬과 금을 증착한 후, 감광제 (AZ 1512)를 코팅한다. 전극과 영구자석을 부착할 지점을 패터닝한 후, 금 식각액 ($\text{HCl} : \text{HNO}_3 = 2 : 1$)과 크롬 식각액 (CR-7)을 사용하여 전극을 형성한다. 파이렉스 유리에 영구자석을 에폭시로 부착한다. 코일의 진동 공간을 위해 두께가 2 mm인 아크릴 기판에 직경 15 mm의 구멍을 드릴로 제작한 후 유리 기판 위에 부착한다. 코일이 부착된 부분은 구동기에 사용된 코일이 원형이므로 챔버를 원형으로 제작하기 위해 두께 1 mm의 알루미늄 기판에 직경 15 mm의 구멍을 드릴로 가공하여 제작한다. 실리콘 러버 (silicone rubber)를 코팅하기 위해 구멍을 파라핀으로 채운다. 파라핀이 굳은 후 5600 rpm의 속도로 60 초간 스핀 코팅하여 약 30 μm 두께의 실리콘 러버막을 형성하고, 실리콘 러버막이 굳기 전에 막의 하부에 솔레노이드 코일을 붙인다. 코일은 실리콘 러버막이 굳으면서 부착된다. 코일이 실리콘 러버막에 완전히 부착된 후 약 70 $^{\circ}\text{C}$ 의 아세톤에서 파라핀을 녹여 제거한다. 코일의 양끝을 유리기판 위의 전극에 납땀을 한다. 전극 위에 부착된 영구자석이 코일의 안으로 들어가도록 정렬하고 챔버 기판과 지지대를 에폭시 수지로 접합하여 그림 2(j)와 같이 구동기를 완성한다.

4. 구동기 특성 시험

그림 3은 구동기 박막의 변위 측정 장치도이다. 함수 발생기를 이용하여 구동기에 다양한 주파수의 정현파 전류를 인가하고 레이저 진동계를 이용하여 구동기 박막 중심의 속도를 측정한다. 이때, 박막의 속도신호를 스펙트럼 분석기 (Lecroy 9310 Dual Oscilloscope)로 분석한 결과를 이용하여 변위를 얻는다.

그림 4는 주파수가 1 Hz인 정현파 전류를 인가하였을 때 측정된 구동기 박막 중심의 변위 (peak-to-peak)를 나타낸다. 박막의 변위는 인가 전류에 비례하여 선형적으로 증가하고 인가 전류가 118 mA_{PP} (peak-to-peak amplitude)일 때 박막의 변위는 400 μm 이다. 180 mA_{PP} 의 전류를 오래 인가하면 코일이 탈 수 있으므로 118 mA_{PP} 를 최대 인가 전류로 한다. 그림 5는 118 mA_{PP} 의 정현파 전류를 구동기에 인가하였을 때, 주파수에 따른 막의 변위 (peak-to-peak)를 나타낸다. 구동박막의 차단 주파수는 50 Hz이고 DC 변위는 400 μm 이다. 차단 주파수 이하에서 118 mA_{PP} 의 전류를 인가할 때 계산된 행정부피는 47 μl 이다.

5. 수동형 밸브의 제작

그림 6은 알루미늄 플랩 밸브의 제작 공정을 나타낸다. 밸브 제작에는 525 \pm 10 μm 두께인 4 inch, n 형, (100) 실리콘 웨이퍼를 사용한다. 먼저 0.8 μm 두께의 열산화막을 성장시키고 앞면의 산화막을 제거한다. 고농도의 붕소 도핑 공정은 고체 확산원, BN1100을 이용하여 1100 $^{\circ}\text{C}$ 에서 600 분간 수행한다. 산화 후 LTO (Low Temperature Oxidation) 공정을 900 $^{\circ}\text{C}$ 에서 60 분간 수행한 후, 표면에 생성된 BSG (Boro Silicate Glass)층을 제거한다. BSG층을 완전히 제거한 후, 습식 산화 공정을 이용한 후산화 공정을

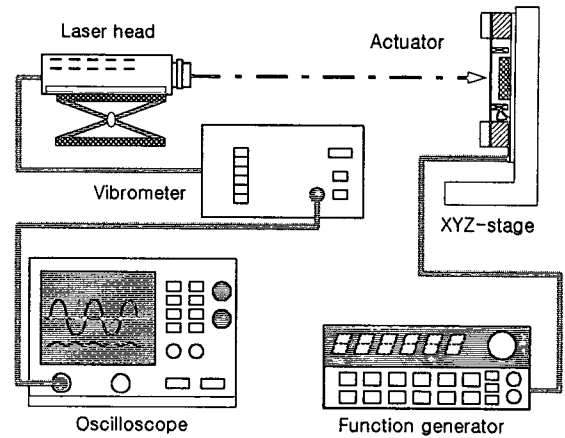


그림 3 구동기 박막 변위 측정 장치도
Fig. 3 The actuator deflection measurement setup

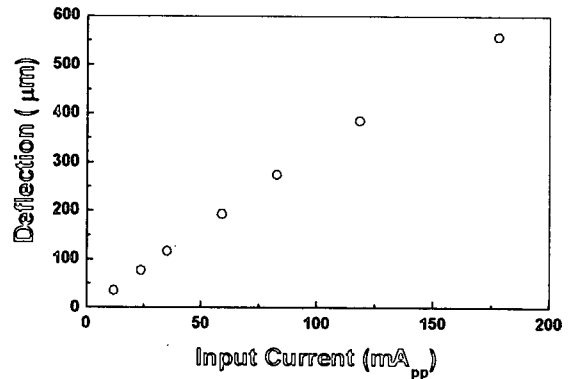


그림 4 전압에 따른 박막 변위
Fig. 4 The diaphragm deflection for various input voltages

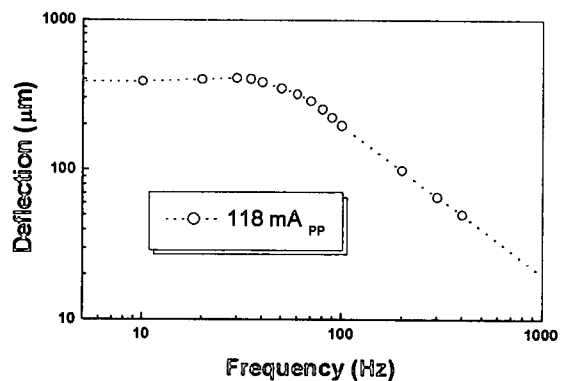
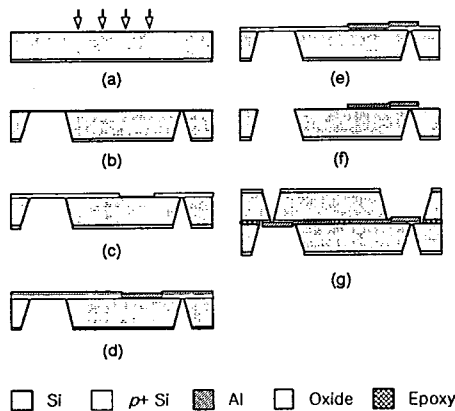


그림 5 주파수에 따른 박막 변위
Fig. 5 The diaphragm deflection for various frequencies

1100 $^{\circ}\text{C}$ 에서 90 분 동안 수행한다.

후산화 공정 후 실리콘 웨이퍼 뒷면에 밸브의 입·출구 구멍을 패터닝하고, 115 \pm 2 $^{\circ}\text{C}$ 에서 EPW (Ethylendiamine : pyrocatechol : DI water = 250 ml : 40 g : 80 ml)용액으로 자동 식각 정지가 될 때까지 식각한다.



(a) boron doping (b) etching (c) PR patterning
(d) Al evaporation (e) Al etching (f) p+ & PR removing (g) epoxy bonding

그림 6 알루미늄 플랩 밸브의 제작 공정

Fig. 6 The fabrication process of the aluminum flap valve

제작된 p+ 막 위에 알루미늄 플랩 밸브를 제작하기 위하여 희생층으로 쓰일 감광제 (Photo Resist)를 스핀 코팅한다. 밸브의 앵커 (anchor)부분을 제거하고, 2 μm 두께의 알루미늄을 증착한다. 알루미늄 식각 보호막으로 사용할 감광제를 스핀 코팅한다. 밸브를 패터닝하고 알루미늄 식각액 (HNO₃ : CH₃COOH : H₃PO₄ : H₂O = 5 ml : 5 ml : 85 ml : 5 ml)을 사용하여 알루미늄 플랩퍼를 형성한다. 마지막 공정으로 p+ 박막을 등방성 식각액 (HNO₃ : CH₃COOH : HF = 85 ml : 10 ml : 5 ml)으로 제거하고, 아세톤을 이용하여 희생층인 감광막을 제거한다. 이와 같이 제작된 밸브 기판 두 장에 에폭시 수지를 롤러로 도포하고 입·출구부를 정렬하여 접합함으로써 수동형 밸브를 완성한다.

6. 펌프 조립 및 특성 시험

3 절과 5 절에서 제작된 구동기와 수동형 밸브 기판을 에폭시수지로 접합하여 펌프를 완성한다. 그림 7은 제작된 펌프의 사진이다.

그림 8은 펌프의 유량 측정 장치를 나타낸다. 펌프의 유량 시험을 위하여 내경 1.2 mm인 ‘┌’ 자형 모세관을 밸브의 입·출구에 각각 연결한다. 메탄올을 펌프 내에 유입시켜 챔버 내에 기포를 제거한 후, 물을 챔버 내로 유입을 시켜 챔버를 채운다. 전자 구동기에 구형파 전류(peak-to-peak)를 인가한 후, 임의의 시간 동안 모세관 내에서의 수면의 수평 이동거리를 측정하여 펌프의 평균 유량을 계산한다. 밸브의 입·출구의 압력차는 XYZ-stage를 이용하여 수위차로 조정한다. 입·출구에 연결된 관 속에 물이 채워진 길이는 약 25 cm이다.

그림 9는 밸브 입·출구의 압력차가 없고, 듀티비가 50 %인 구형파 전류를 인가하였을 때 인가전류와 주파수에 따른 펌프 유량을 보여준다. 주파수가 증가함에 따라 유량은 증가하나 5 Hz이상에서 유량이 점차적으로 감소한다. 주파수가 높아짐에 따라 유량이 감소하는 것은 관속에 채워진 물의 관성질량 때문이다. 인가 전류가 118 mA_{PP}일 때 최대 유량은 5 Hz에서 51 μl/min이고, 59 mA_{PP}일 때는 11 μl/min이다.

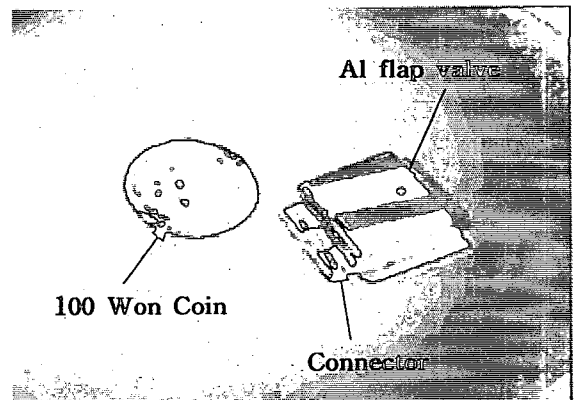


그림 7 제작된 펌프의 사진

Fig. 7 The photograph of the fabricated micropump

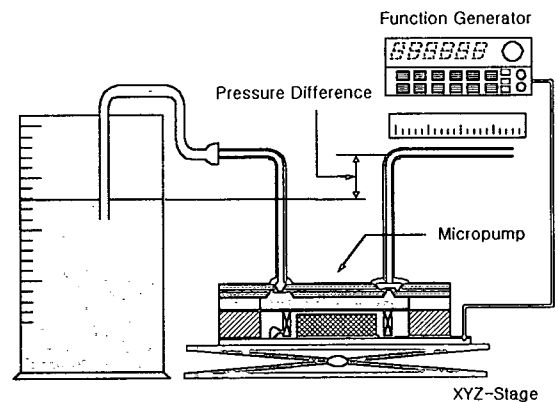


그림 8 펌프의 유량 측정 장치도

Fig. 8 The micropump flow measurement setup

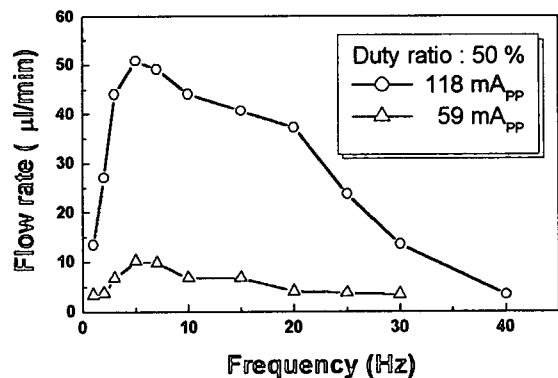


그림 9 주파수에 따른 펌프의 유량

Fig. 9 The measured flow rate of the micropump for various frequencies

그림 10은 듀티비가 50 %, 주파수가 5 Hz이고 인가전압이 118 mA_{PP}일 때, 입·출구의 압력차에 따른 유량시험 결과이다. 역방향 압력이 증가하면 유량이 감소하고 역방향 압력이 약 10 mmH₂O일 때 유량의 흐름이 없다.

참 고 문 헌

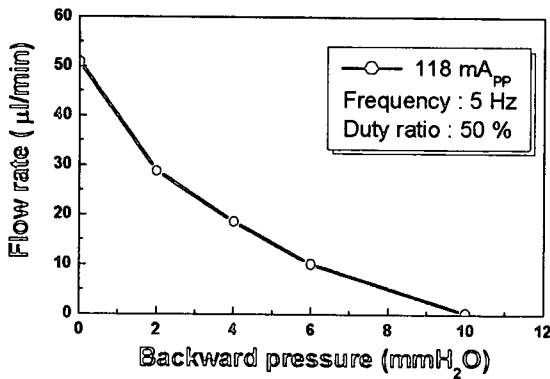


그림 10 역방향 압력차에 대한 펌프의 유량

Fig. 10 The measured flow rate of the micropump for various backward pressure differences

7. 결 론

본 논문에서는 전자 구동 방식을 이용하여 펌프를 제작하였다. 펌프는 전자 구동 방식의 구동기와 알루미늄 플랩 밸브로 구성된다. 구동기는 솔레노이드 코일과 영구자석 그리고 실리코온 러버로 제작되었다. 제작된 구동기의 변위 특성 시험을 수행하였고 전압과 주파수에 따른 펌프의 유량 시험을 수행하였다.

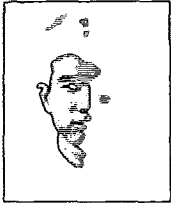
향후, 펌프의 소형화를 위하여 전해 도금 방법으로 평면 코일을 제작하고, 구동기 박막의 방수성을 보장하기 위해 파릴린을 실리코온 러버막 위에 증착하거나 파릴린만으로 구동기 박막을 제작할 계획이다. 특히, 파릴린은 생체 적합 물질이기 때문에 의료기기의 재질로 적합하다. 또, 구동기 박막의 변위가 최대가 되도록 전자 구동 펌프의 구조를 최적화 하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단이 지원하는 마이크로/나노 시스템 집적화 연구센터의 초소형 면역분석기 개발과제(97K4-0900-00-01-3과제)의 연구비 지원에 의한 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

- [1] T.S.J. Lammerink, V.L. Spiering, M. Elwenspoek, J.H.J. Fluitman and A.van den Berg, "Modular Concept for Fluid Handling Systems: A Demonstrator Micro System", Proceedings of IEEE, The 9th Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '96), San Diego, USA, pp. 389-394, Feb 11-15, 1996.
- [2] E. H. Yang, S. S. Yang and O. C. Jeong, "Fabrication and Electrostatic Actuation of Thin Diaphragms," KSME Int. Journal, Vol. 12, No. 2 pp. 161-169, 1998.
- [3] O. C. Jeong and S. S. Yang, "Fabrication of a Thermopneumatic Micropump with a Corrugated p+ Diaphragm," The 10th International Conference on Solid-State Sensor and Actuators (TRANSDUCERS '99), Vol 2, Sendai, Japan, June 7-10, pp. 1780-1783, 1999.
- [4] 이상우, 심우영, 양상식, "알루미늄 플랩 밸브와 상변화 구동 마이크로 펌프의 제작," 대한전기학회 추계학술대회, pp. 1023-1025, 1998. 11.
- [5] B. Wagner, W. Benecke, "Microfabricated Actuator with Moving Permanent Magnet," Proc. Micro Electro Mechanical Systems, Nara Japan pp. 27-32, Jan 30-Feb 2, 1991
- [6] Qiulian Gong and Zhaoying Zhou, "Design, Optimization and Simulation on Micro Electromagnetic Pump," The 10th International Conference on Solid-State Sensor and Actuators (TRANSDUCERS '99), Vol. 1, Sendai, Japan, pp. 466-469, June 7-10, 1999.

저 자 소 개



김기훈 (金基勳)

1973년 10월 5일 생. 1999년 아주대 전기 전자공학부 졸업(학사). 현재 동 대학원 석사과정. 주관심분야 : 미세 유량 제어 마이크로 펌프용 전자 구동기의 설계, 제작 및 측정

Tel : 0331-219-2488, Fax : 0331-212-9531
E-mail : hoonsoo@mems.ajou.ac.kr



김순영 (金舜榮)

1973년 10월 11일 생. 1999년 아주대 전기 전자공학부 졸업(학사). 현재 동 대학원 석사과정. 주관심분야 : 인체삽입용 원격측정 마이크로 압력센서 설계 및 제작

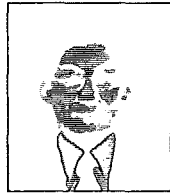
Tel : 0331-219-2488, Fax : 0331-212-9531
E-mail : over4u@mems.ajou.ac.kr



정옥찬 (鄭玉贊)

1972년 6월 28일 생. 1997년 아주대 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정. 주관심분야 : 박막의 잔류응력 해석 및 측정과 마이크로 펌프용 구동기의 설계, 제작 및 측정

Tel : 0331-219-2488, Fax : 0331-212-9531
E-mail : over4u@mems.ajou.ac.kr



양상식 (梁翔植)

1958년 1월 16일 생. 1980년 서울대 공대 기계공학과 졸업. 1983년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1988년 U. C. Berkeley 졸업(공학박). New jersey Institute of Technology 연구 조교수. 현재 아주대 공대 전자공학부 교수. 주관심분야 : 마이크로 소자의 Mechanism과

Actuation, Motion Control과 Nonlinear Control
Tel : 0331-219-2481, Fax : 0331-212-9531
E-mail : ssyang@madang.ajou.ac.kr