

< 논문 >

압전식 구동기를 이용한 양방향 마이크로 펌프의 성능에 관한 연구

최종원* · 윤재성* · 김민수*

(2005년 12월 3일 접수, 2006년 3월 3일 심사완료)

A Study on the Performance Characteristics of a New Bi-directional Micropump Using Piezoelectric Actuator

Jong Won Choi, Jae Sung Yoon and Min Soo Kim

Key Words : Micropump(마이크로 펌프), Piezoelectric Ceramic(압전 세라믹), Valve(밸브), Oblique Channel(경사 유로)

Abstract

A new valveless micropump for bi-directional application has been developed and tested. The micropump was fabricated on silicon and glass substrates by micromachining process. The micropump in this study consists of a membrane actuator, a pumping chamber, fluidic channels and two piezoelectric ceramic films. The channels and pumping chamber were etched on a glass wafer and the membrane was made on a silicon wafer which is actuated by a piezoelectric ceramic (PZT) film. The geometry of the micropump was optimized by numerical analysis and the performance of the micropump was investigated by the experiments. The maximum flow rate was 323 $\mu\text{L}/\text{min}$ and the maximum back pressure was 294 Pa when the membrane actuator of $10 \times 10 \text{ mm}^2$ was driven at 130 Hz and 385 V.

기호설명

- Q : 체적 유량, [$\mu\text{L}/\text{min}$]
- f : 주파수, [Hz]
- V_{pp} : 전압, [V]
- θ : 유로 경사각, [$^\circ$]
- V_o : 보조유로의 유속, [m/sec]

1. 서론

반도체 제조공정의 발달에 힘입어 이를 이용한

다양한 MEMS(microelectromechanical system) 장치들이 개발되고 있는데, 그 중 마이크로 펌프는 그 응용범위가 광범위하기 때문에 이와 관련된 연구 개발이 활발히 진행 중이다. 마이크로 펌프는 그 유동 형태에 따라서 크게 맥동식 유동과 연속식 유동으로 나눌 수 있고,⁽¹⁾ 구동 방식(actuator)에 따라서는 박막 구동식, 전기장 혹은 자기장 유도방식 등으로 분류될 수 있다.⁽²⁾ 그 중 박막 구동식 마이크로 펌프는 그 구동 원리에 따라서 전하의 인력 및 척력을 이용하는 정전식(electrostatic), 내부 유체의 열팽창을 이용하는 열공압식(thermopneumatic), 압전소자에 전기를 직접 공급하여 움직임을 얻어내는 압전식(piezoelectric) 등으로 다시 분류될 수 있다. 밸브는 구동기와 더불어 마이크로 펌프를 구성하는 중요한 요소인데, 별도의 구

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : minskim@snu.ac.kr

TEL : (02)880-8362 FAX : (02)883-0179

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

동기를 이용하는 능동형 밸브(active valve)와 구동기가 없이 밸브 전후의 압력 차이에 의해 열고 닫힘이 가능한 외팔보(cantilever)와 같은 수동형 밸브(passive valve)가 있다. 그러나 마이크로 밸브는 유체의 이송 시 역류를 방지할 수 있다는 장점이 있는 반면에, 작은 입자에 의해 유로가 막히거나 장시간 사용 후 밸브의 오염에 의해 성능이 저하될 가능성이 있다. 이를 극복하기 위한 방안으로 노즐(nozzle)과 디퓨저(diffuser)를 이용하여 밸브 없이 구동되는 마이크로 펌프도 개발되고 있다.

Koch 등⁽²⁾은 실리콘 박막에 접합된 압전 세라믹(PZT) 구동기 및 외팔보 체크밸브 등으로 구성되어 있는 마이크로 펌프를 제작하여 그 성능을 실험하였는데, 약 120 μ L/min의 유량이 측정되었다. Richter 등⁽³⁾은 이와 유사한 구조의 마이크로 펌프에 대해서 펌프 내부의 박막에 의한 행정 체적(stroke volume)이 무효 체적(dead volume)의 7.5% 이상이면 액체 뿐 아니라 기체에도 사용이 가능하다는 것을 실험을 통하여 밝혔다. 한편 Li와 Chen,⁽⁴⁾ Pan 등,⁽⁵⁾ Singhal 등⁽⁶⁾은 밸브가 없이 노즐(nozzle)과 디퓨저(diffuser)만을 이용하여 유체를 한 방향으로 이송하는 마이크로 펌프에 대해서 이론적인 해석을 수행하였다. Andersson 등⁽⁷⁾은 이와 유사한 구조의 노즐-디퓨저 펌프를 제작하여 다양한 종류의 액체에 대해서 실험을 수행하였으며, Zengerle 등,⁽⁸⁾ Hayamizu 등,⁽⁹⁾ Lee 등⁽¹⁰⁾은 양방향으로 유체를 이송시키는 양방향 마이크로 펌프의 이론적인 해석 및 실험을 수행하였다.

이 연구에서는 빠른 응답성과 높은 구동력을 얻을 수 있는 압전 세라믹을 이용하여 실리콘 박막을 구동하는 방식을 택하였으며, 주 유로에 경사진 보조 유로를 연결하여 유체를 흡입 및 토출시킴으로써 밸브가 없이도 원하는 방향으로 유체의 이송이 가능하도록 설계하였다. 또한, 두 개의 보조 유로를 반대 방향으로 배치하고 각각의 유동을 별도의 구동기로 제어함으로써 양방향으로 운전이 가능하도록 고안하였다. 따라서 기존의 마이크로 펌프보다 더욱 폭넓게 응용될 수 있다.

2. 작동원리 및 수치해석

합류시키고 보조 유로에서 주 유로로 유체를 흡입, 토출 시킨다면, 흡입 과정에서보다는 토출 과정에서의 유동이 주 유동의 방향에 더 많은 영향을 미칠 것으로 예상된다. 보조 유로에서의 흡입, 토출 유동은 보조유로와 연결된 별도의 가압실(pumping chamber) 및 압전식 구동기를 이용하여 발생시킬 수 있는데, 이 과정을 반복한다면 주 유로에서는 일정한 방향으로 유체의 이송이 이루어진다. 이러한 원리로 가동되는 마이크로 펌프의 성능에 영향을 미치는 주요 인자로는 주 유로와 보조 유로 사이의 각도, 압전소자의 구동 전압, 그리고 주파수 등이 있다. 두 유로 사이의 각도는 분기점에서 유동의 상호작용에 직접적으로 영향을 미치므로 우선 고려되어야 한다. Fig. 1에서 보듯 보조유로의 흡입 및 토출 유동이 주 유로의 하류 방향으로 전달하는 운동량은 $V_0 \cos \theta$ 로 표시할 수 있다. 토출 과정에서는 채널 경사각(θ)이 작을수록 주 유로의 하류 방향으로 전달할 수 있는 운동량이 증가하므로, 하류방향 유량($Q_{dis,down}$)이 증가하게 된다. 그러나 작은 경사각에서는 흡입 과정에서 상류 방향 유체의 보조 채널로의 흡입량($Q_{suc,up}$)이 줄어들 것으로 예상된다. 반면에 경사각이 클수록

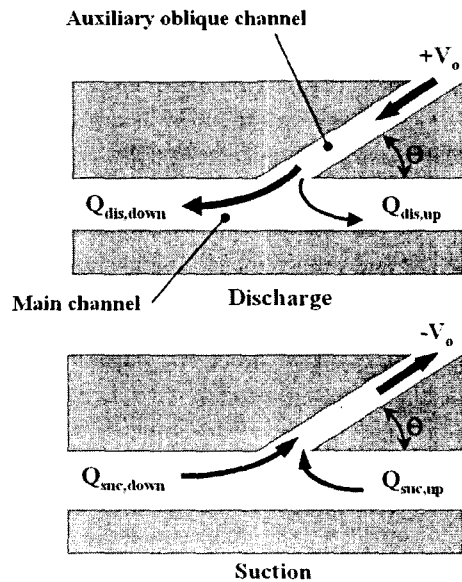


Fig. 1 Working principle of the micropump

Fig. 1과 같이 주 유로와 보조 유로를 경사지게

보조유로에서 토출된 유동이 주 유로로 전달할 수 있는 운동량이 감소하므로, 하류방향 유량 ($Q_{dis,down}$)이 감소하게 된다. 그러나 큰 경사각에서는 흡입 과정에서 상류의 유체가 보조 유로로 보다 쉽게 유입된다. 이 두 가지 효과가 서로 상충되는 작용을 하므로, 보조유로의 경사에 따른

전체 유량의 변화를 관찰하면 최적의 경사각을 구할 수 있다. 한편, 압전소자를 구동시키기 위한 전압 또한 펌프의 성능에 큰 영향을 미치는데, 입력되는 전압이 증가할수록 압전 구동기의 변형 폭(stroke)이 증가하므로 펌프의 성능 또한 향상될 것으로 예상된다. 그러나 이 실험에서 사용된 압전소자의 허용 전압이 $400V_{pp}$ (peak to peak)로 제한되므로, 전압을 이용한 성능 최적화에는 한계가 있다. 마지막으로 입력 주파수 또한 주요한 변수인데, 주파수가 증가할수록 보조 유로의 유속($\pm V_0$)이 증가할 것이므로 펌프의 성능 향상이 기대된다.

우선, 두 유로 사이의 각도가 펌프 성능에 미치는 영향을 조사하기 위하여 본 연구에서는 상용 코드인 *Fluent™*를 사용하여 토출 과정과 흡입 과정에서의 하류 유량의 비율($Q_{dis,down}/Q_{suc,down}$)을 보조 유로의 각도를 달리하여 비교해 보았다. 그 결과, Fig. 2에서와 같이 유로의 경사각이 약 10° 일 때 펌프의 성능이 최대가 되며, 그보다 각도가 증가하면 펌프의 성능이 급격히 감소함을 알 수 있다. 이러한 현상은 보조 유로에서의 속도 조건을 달리하여도 동일한 경향을 나타내므로, 본 연구에서는 10° 의 경사각이 최적임을 예상할 수 있었다.

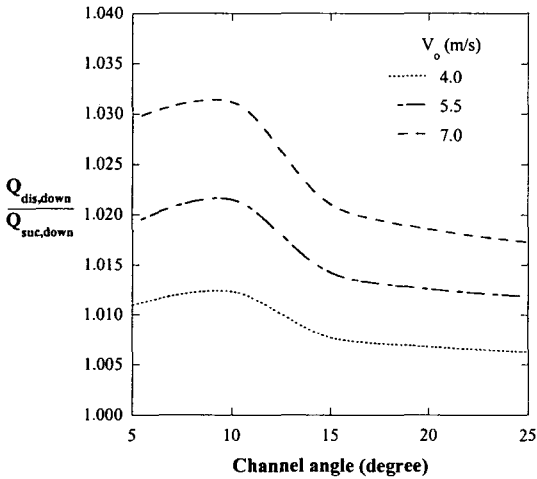


Fig. 2 Ratio of discharge and suction flow rate under various channel angles

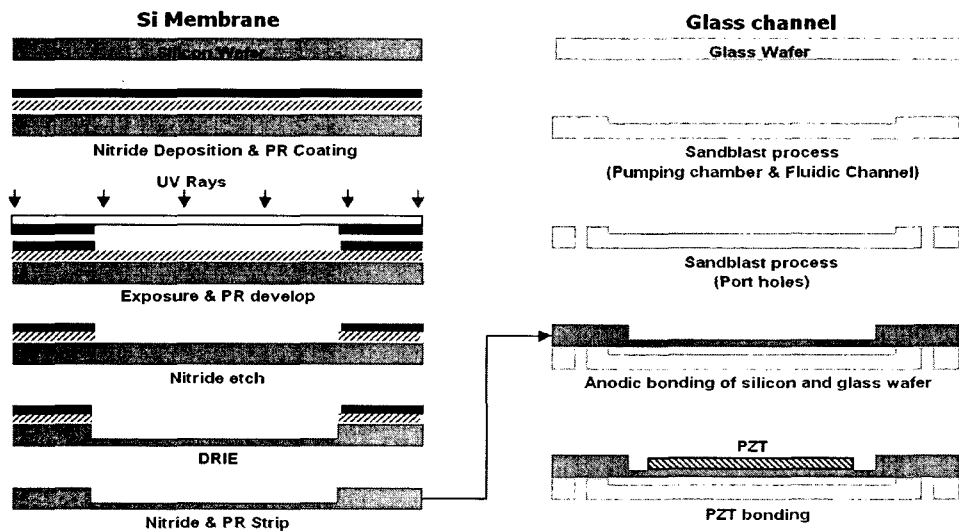


Fig. 3 Schematic of the fabrication process

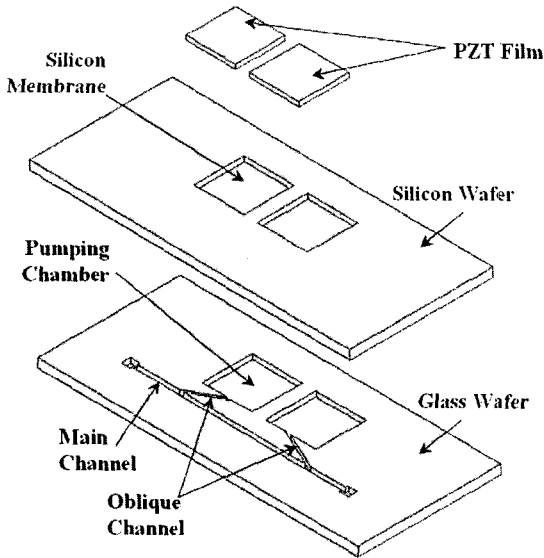


Fig. 4 Schematic of the micropump

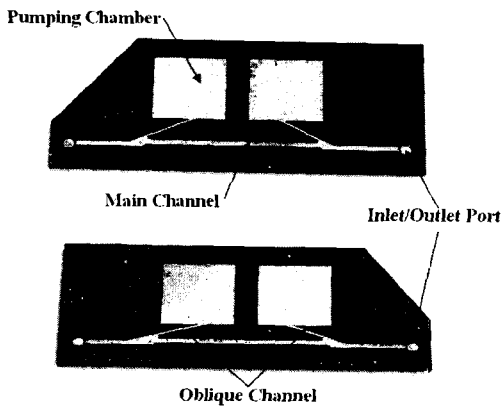


Fig. 5 Photograph of the micropumps with various channel angles after anodic bonding process

3. 실험장치 및 방법

3.1 시험부

본 연구에서 설계한 마이크로 펌프는 유리 웨이퍼와 실리콘 웨이퍼를 서로 접합하여 만든 구조인데, 개략적인 공정의 절차는 Fig. 3과 같으며 유리 웨이퍼에는 가압실 (pumping chamber), 유로

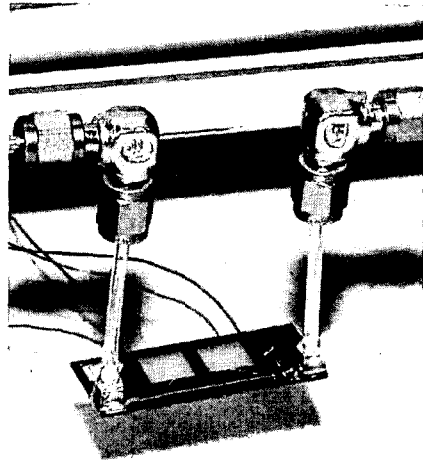


Fig. 6 Photograph of the test section

(channels) 및 입출구 (port holes) 등이 식각되어 있으며 실리콘 웨이퍼에는 박막(membrane)이 식각되어 있다. 유리 웨이퍼의 가압실 및 유로는 샌드블라스트 (sand blast) 공정에 의해 $200\mu\text{m}$ 의 깊이로 식각되었으며, 입출구는 동일 공정으로 관통하여 가공하였다. 실리콘 웨이퍼는 산화막 증착 (depositor)에 이은 노광 및 식각 (deep reactive ion etch)의 공정을 거쳐서 가공하였는데, $500\mu\text{m}$ 의 웨이퍼를 사용하여 한방향으로 $400\mu\text{m}$ 를 식각함으로써 약 $100\mu\text{m}$ 두께의 박막을 형성하였다. 상기의 공정이 완료된 두 장의 웨이퍼를 양극 접합법 (anodic bonding)을 이용하여 접합시킨 후, 박막 위에 압전 세라믹을 부착하였다. 가압실 및 박막의 넓이는 $11\times 11(\text{mm}^2)$ 이며, 주 유로 및 보조 유로의 폭은 각각 1mm , 0.5mm 이다. 사용된 압전 세라믹은 넓이 및 두께는 각각 $10\times 10(\text{mm}^2)$, $200\mu\text{m}$ 이다. 한편, Fig. 4에서 보듯이 하나의 주 유로에 서로 다른 방향의 보조 유로 2개와 압전 세라믹 구동기를 각각 배치하여 밸브가 없음에도 불구하고 압전 세라믹의 선택적인 구동을 통해 원하는 방향으로 유체를 이송시킬 수 있도록, 즉 양방향 운전이 가능하도록 제작하였다. 또한, 설계단계에서 수행된 시뮬레이션 결과에 근거하여, 보조 유로의 각도가 5° , 10° , 15° 인 세 종류의 마이크로 펌프를 각각 제작하여 각도에 따른 성능 비교를 할 수 있도록 하였다. Fig. 5는 접합 공정 후의 사진이며, Fig. 6은 제작이 완료되어 성능시험 장치에 부착된 마이크로 펌프의 사진이다.

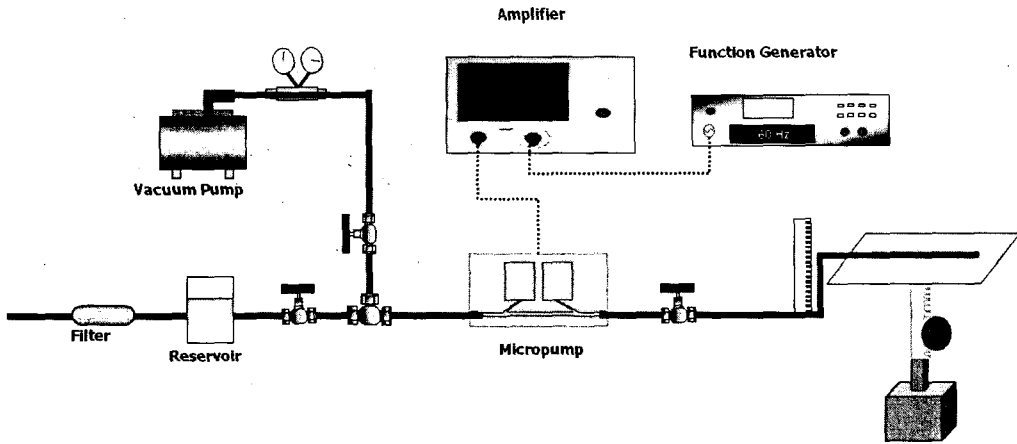


Fig. 7 Schematic diagram of the experimental setup

3.2 실험장치

Fig. 7은 마이크로 펌프 성능 실험장치의 개략도이다. 실험 장치는 함수 발생기(function generator), 신호 증폭기(amplifier), 여과기, 저수조(reservoir) 및 진공 펌프 등으로 구성되어 있다. 함수 발생기(HP 3325B)는 다양한 종류의 신호를 최대 20 MHz 까지 발생시킬 수 있는 장치인데 본 실험에서는 입력 신호로써 정현파(sinusoidal wave)만을 사용하였다. 신호 증폭기(PI E-507)는 입력된 신호를 증폭시켜서 압전 세라믹(PZT)을 구동시키기 위한 장치이다. 실험에서는 여과기에서 여과된 물을 사용하였으며, 유체가 흐르는 배관은 테플론 (teflon) 튜브를 사용하여 순환하지 않는 개방 루프의 형태로 시스템을 만들었다. 장치의 구성이 완료된 후, 진공펌프를 이용하여 실험장치 및 마이크로 펌프 내부의 공기를 제거한 후 물을 주입하여 펌프를 초기화 하였다. 물은 대기 중에 개방된 저수조에서 밸브를 거쳐 마이크로 펌프로 유입될 수 있도록 하였다. 압전 소자에 적절한 전압 및 주파수를 이용한 신호를 공급하여 마이크로 펌프가 가동되면, 하류 배관 내부의 물기둥(水柱)이 진행하는데 이 때 60초 동안 이동한 거리를 반복 측정하여 평균값으로 유량을 환산 하였다. 한편, 펌프 전 후의 수두차에 의한 성능 변화를 관찰하기 위하여 펌프 전 후의 배관 높이를 다르게 함으로써 수두차에 의한 성능 실험을 수행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 유로 경사각에 따른 성능특성

Fig. 8은 보조 유로의 경사각이 각각 5°, 10°, 15° 인 마이크로 펌프에 대해서 적용 전압이 320 V_{pp} 일 때의 유량의 변화를 각 주파수 별로 측정 한 결과이다. Fig. 2의 시뮬레이션에서 예상 하였듯이, 흡입대 토출의 유량 비율이 가장 크게 나타났던 10°의 마이크로 펌프가 가장 큰 유량을 보였다. 이는 유로 경사각이 5°인 펌프의 경우 보조 유로에서 토출된 유체가 주 유로의 하류방향으로 운동량을 잘 전달할 수는 있지만, 흡입 과정에서 주 유로의 상류로부터 유체를 흡입함에 있어서는 상대적으로 불리하기 때문에 판단된다. 유로 경사각이 15°인 마이크로 펌프의 성능 저하는 그 반대로 설명될 수 있다. 각각의 시험부에 입력전압을 다르게 했을 경우에도 이와 동일한 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 흡입 과정에서 상류방향으로부터 최대한 많은 양의 유체가 흡입되며 토출 과정에서 하류방향으로 최대한 많은 양의 유체가 토출되는 최적화된 보조채널의 경사각은 10°임을 알 수 있었다.

4.2 가동 주파수와 전압에 따른 성능특성

Mulling 등⁽¹¹⁾은 압전 세라믹의 구동 특성을 결정하는 요소는 크게 구동기의 끝단 경계조건과 부하의 크기이라는 것을 제시하였다. 본 실험

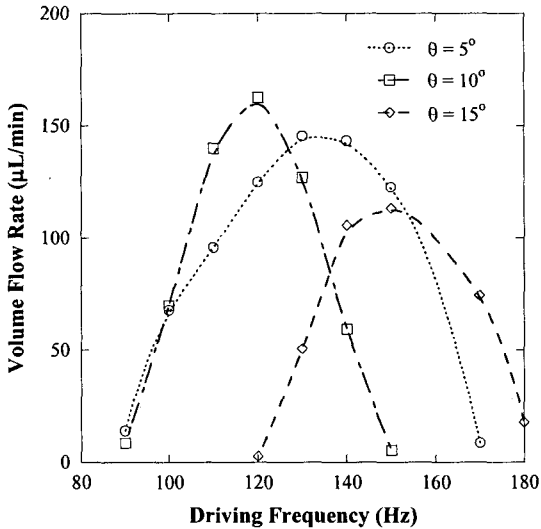


Fig. 8 Flow rate variation with different channel angles under various driving frequency ($V_{pp}=320$ V)

에서는 위의 두 가지 조건이 크게 변하지 않으므로 전압 혹은 주파수의 변화로 인해 구동 특성 자체가 변화하리라고는 생각되지 않는다.

Fig. 9는 유로 경사각 10° 인 마이크로 펌프에 대해서 구동 전압과 주파수를 변화시키면서 측정된 결과이다. 유량은 전압이 증가함에 따라 상승함을 알 수 있다. 이는 압전 세라믹에 가해지는 전압의 크기에 따라 박막의 상하 운동 진폭이 커짐으로서 가압실 내의 행정 체적(stroke volume)이 증가하였기 때문이라고 해석된다. 한편 동일 전압에서 주파수의 변화에 대한 유량의 변화를 살펴보면, 비교적 낮은 주파수에서는 주파수가 증가함에 따라 유량도 증가하지만, 특정 주파수 이상에서는 오히려 감소함을 알 수 있다. 이는, 주파수가 증가하면 보조 유로에서 흡입, 토출되는 유속이 증가하므로 주 유로에서의 유량이 증가하지만, 주파수가 과도하게 높아지면 주 유로에서의 유체가 압전소자의 구동 속도와 동기화되지 못하는 것으로 해석될 수 있다. 즉, 전압과는 달리 주파수는 최적값이 존재함을 알 수 있는데, 각각의 경우에 대해서 최대유량을 나타내는 주파수는 약 110 ~ 130 Hz 사이에 존재하며 그 값은 전압이 높아질수록 다소 증가하는 경향이 있다. 본 실험에서 측정된 유량의

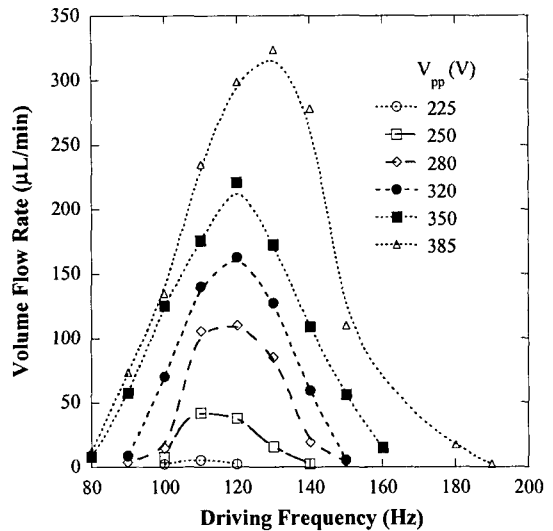


Fig. 9 Flow rate variation under various driving frequency and voltage ($\theta=10^\circ$)

최대값은 경사채널이 10° 이고, 구동 전압이 385V(peak to peak)이며 운전 주파수가 130Hz인 조건에서 약 $323\mu\text{L}/\text{min}$ 으로 기록되었다.

4.3 전 후 압력차에 따른 성능특성

펌프 입출구의 압력 차이에 의한 성능 변화를 실험하기 위해서, 보조 채널의 경사각이 10° 인 마이크로 펌프를 다양한 압력조건 하에서 실험하였고, 그 결과는 Fig. 10과 같다. 전반적으로 유량은 압력의 변화에 대하여 선형적으로 감소하였다. 한편, 동일한 압력 조건 하에서 주파수와 입력 전압을 변화시켰을 때에는, 주파수 보다는 입력 전압에 의한 유량의 변화가 더 커짐을 알 수 있었다. 그러므로 본 펌프의 실질적인 응용을 위해서는 전압의 변화를 통한 유량의 제어보다는 주파수의 변화를 이용한 유량의 제어가 더 효과적이라고 판단된다.

실험에 사용된 마이크로 펌프의 최대 배압은 385V, 130Hz의 조건에서 약 300Pa로 측정되었다.

4.4 펌프의 양방향성 실험

본 연구의 마이크로 펌프는 밸브가 없는 비교적 간단한 구조임에도 불구하고, 구동기의 선택적인 운용을 통하여 양방향 운전이 가능한

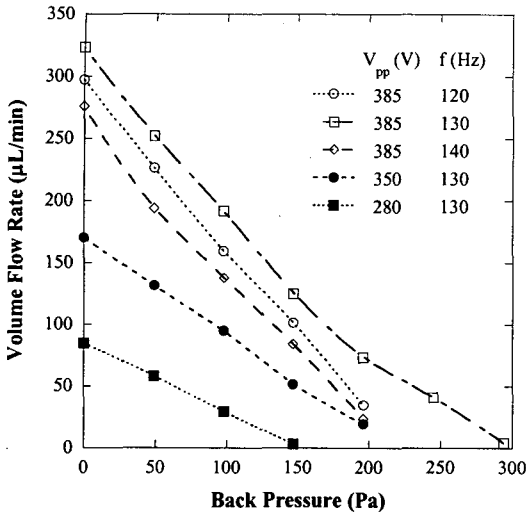


Fig. 10 Flow rate variation under various back pressure ($\theta=10^\circ$)

장점이 있다. 이를 확인하기 위하여 Fig. 11과 같이 양방향 운전 실험을 수행하였다. 결과에서 보는 바와 같이 순방향과 역방향의 성능 특성이 매우 유사함을 알 수 있다. 이는 양방향의 운전이 필요한 응용분야에 사용될 경우 큰 장점으로 부각될 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 밸브 없이 양방향 운전이 가능한 마이크로 펌프를 설계하였고, 이를 토대로 반도체 제조공정을 이용하여 시제품을 제작하였으며 다양한 조건 하에서 성능 특성을 실험하였다. 제작된 마이크로 펌프의 성능 실험 결과, 보조 채널 경사각의 최적값은 수치해석의 결과와 일치함을 확인하였으며, 그 밖에 구동 주파수와 입력 전압에 따른 성능의 변화를 실험을 통하여 고찰하였다. 또한, 다양한 압력 조건 하에서도 실험을 수행하였으며, 전방 및 후방의 양방향으로 운전할 때의 특성을 비교하였다.

본 연구에서는 밸브 없이 구동이 가능한 펌프를 개발함으로써 기존 마이크로 펌프에서 밸브로 인해 야기되는 문제점에 대한 대안을

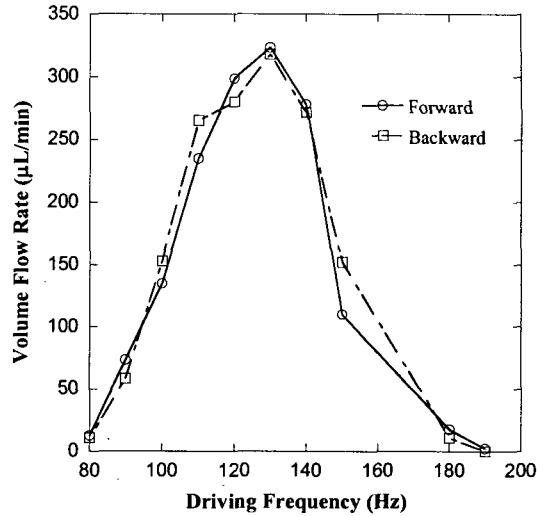


Fig. 11 Comparison of the flow rates on both directions ($\theta=10^\circ$)

제시하였다. 그리고 별도의 보조기구 없이 유로와 구동기를 추가함으로써 양방향으로 운전이 가능하도록 설계하였다. 그리고 여기에서 확장하여 유로와 구동기를 더 추가시키면 양방향 뿐만 아니라 다수의 출구(multi-outlet)를 갖는 마이크로 펌프를 설계할 수 있는 가능성을 제시하였다. 한편, 펌프의 전, 후 방향에 따른 성능 특성이 매우 유사하게 측정되었으므로, 양방향 유체 이송이 필요한 분야에서는 큰 장점이 될 수 있다. 그러나 전후 압력차에 따른 실험 결과, 펌프의 최대 배압이 300Pa로서 비교적 낮은 값을 나타내었는데, 이는 보다 다양한 분야에 응용되기 위해서 개선해야 할 부분이다.

후 기

본 연구는 서울대학교 마이크로 열시스템 연구 센터의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사하는 바이다.

참고문헌

(1) Woias, P., 2005, "Micropumps - Past, Progress and Future Prospects," *Sensors and Actuators B*,

- Vol. 105, pp. 28~38.
- (2) Koch, M., Harris, N., Evans, A., White, N. and Brunnschweiler, A., 1998, "A Novel Micro-machined Pump Based on Thick-film Piezoelectric Actuation," *Sensors and Actuators A*, Vol. 70, pp. 98~103.
- (3) Richter, M., Linnemann, R. and Woias, P., 1998, "Robust Design of Gas and Liquid Micropumps," *Sensors and Actuators A*, Vol. 68, pp. 480~486.
- (4) Li, S. and Chen, S., 2003, "Analytical Analysis of a Circular PZT Actuator for Valveless Micropumps," *Sensors and Actuators A*, Vol. 104, pp. 151~161.
- (5) Pan, L. S., Ng, T. Y., Wu, X. H. and Lee, H. P., 2003, "Analysis of Valveless Micropumps with Inertial Effects," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 13, pp. 390~399.
- (6) Singhal, V., Garimella, S. and Murthy, J., 2004, "Low Reynolds Number Flow Through Nozzle-diffuser Elements in Valveless Micropumps," *Sensors and Actuators A*, Vol. 113, pp. 226~235.
- (7) Andersson, H., Wijngaart, W., Nilsson, P., Enoksson, P. and Stemme, G., 2001, "A Valve-less Diffuser Micropump for Microfluidic Analytical Systems," *Sensors and Actuators B*, Vol. 72, pp. 259~265.
- (8) Zengerle, R., Ulrich, J., Kluge, S., Rither, M. and Richter, A., 1995, "A Bidirectional Silicon Micropump," *Sensors and Actuators A*, Vol. 50, pp. 81~86.
- (9) Hayamizu, S., Higashino, K., Fujii, Y., Sando, Y. and Yamamoto, K., 2003, "Development of a Bi-directional Valve-less Silicon Micro Pump Controlled by Driving Waveform," *Sensors and Actuators A*, Vol. 103, pp. 83~87.
- (10) Lee, D. S., Ko, J. S. and Kim, Y. T., 2004, "Bidirectional Pumping Properties of a Peristaltic Piezoelectric Micropump with Simple Design and Chemical Resistance," *Thin Solid Films*, Vol. 468, pp. 285~290.
- (11) Mulling, J., Usher, T., Dessent, B., Palmer, J., Franzon, P., Grant, E. and Kingon, A., 2001, "Load Characterization of High Displacement Piezoelectric Actuators with Various end Conditions," *Sensors and Actuators A*, Vol. 94, pp. 19~24.