

압전 구동방식 마이크로 펌프에서 기하학적 형상과 작동조건에 따른 펌핑특성에 대한 실험적 연구

용정권, 김창녕^{*†}, 김진욱^{**}

경희대학교 기계공학과, *경희대학교 테크노공학대학, **경희대학교 기계공학과

An Experimental Study on the Pumping Characteristics of Diffuser/Nozzle Based Piezoelectric Micropumps with Different Geometries and Operating Conditions

Jung Kwon Yong, Chang Nyung Kim^{*†}, Chin Uck Kim^{**}

Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea

**College of Advanced Technology, Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea*

***Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea*

(Received September 3, 2008; revision received November 25, 2008)

ABSTRACT: In the present experimental study, the pumping performances of diffuser/nozzle based piezoelectric micropumps are estimated with different operating factors and geometries. Here, the effects of the input voltage and frequency on the pumping performances have been examined together with the influences of the positions of the inlet and outlet. The results show that the flow rate of the micropump is larger with larger input voltage with the largest flow rates for the frequency to be close to 6.0 Hz all through the current experimental study. Also, it has been found that the positions of the inlet and outlet affect much on the performance of the piezoelectric micropumps. Error estimation has been carried out for the evaluation of the pumping performance in association with the uncertainty of the measurement.

Key words: Diffuser/nozzle(디퓨저/노즐), Micropump(마이크로 펌프), Piezoelectric(압전)

기호설명

D	:튜브의 내경 [mm]
f	:Friction factor [-]
Re	:Reynolds 수, $\frac{\rho v D}{\mu}$
ΔP	:Pressure difference [Pa]
\dot{Q}	:체적유량 [$\mu\text{l}/\text{min}$]
v	:평균속도 [mm/min]
\dot{W}	:Pumping power [W]

그리스 문자

μ	: 점성 계수 [$\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$]
ρ	: 유체 밀도 [kg/m^3]

1. 서 론

미소 유체를 제어하는 마이크로 유체기기(micro fluidic device)에 관한 기술은 마이크로 시스템의 가공 및 제작 기술의 발전과 더불어 급속하게 발전하고 있다. 마이크로 기술을 이용한 유체기기와 관련해서 핵심이 되는 소자들 중의 하나

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2869; fax: +82-31-202-9715

E-mail address: cnkim@khu.ac.kr

인 마이크로 펌프는 일반 펌프와 달리 그 크기가 매우 작으면서 마이크로 채널을 통해 미소유량을 이송할 수 있는 이점이 있어서 다양한 방법으로 연구가 진행되어 실용화가 이루어지고 있다.

압전형 마이크로 펌프는 압전 세라믹의 압전효과를 이용하여 구동하는 방식으로 다른 구동 방식에 비해 구조가 간단하면서 상대적으로 큰 동력을 낼 수 있다는 장점으로 인해 MEMS 분야에서 마이크로 유체기기 기술발전에 힘입어 보다 실용적으로 여겨지고 있다.

마이크로 펌프에 대한 여러 가지 연구가 선행되었다. Stemme and Stemme⁽¹⁾는 디퓨저/노즐의 원리를 이용한 새로운 형태의 valveless 마이크로 펌프를 제작하고, 동일한 규격의 수동형 체크 벨브(check valve)를 갖는 펌프와 비교함으로써 디퓨저/노즐을 이용한 valveless 펌프의 장점을 부각하였다. Olsson et al.⁽²⁻³⁾은 압전 구동방식 마이크로 펌프에 대한 실험을 통해서 디퓨저/노즐의 길이와 발산각에 따른 펌핑 유량의 변화와 최적의 발산각을 제시하였다. Anderson et al.⁽⁴⁾은 여러 종류의 유체에 대하여 유체의 밀도와 점도에 따른 디퓨저/노즐을 이용한 마이크로 펌프의 펌핑 특성을 실험을 통하여 연구하였고 챔버 안에서의 유체 유동특성을 관찰하였다.

마이크로 펌프에 대한 연구가 오래 전부터 수행되어 왔으나 압전 구동방식 마이크로 펌프에서 인가되는 교류전류의 특성과 기하학적 특성에 따른 펌프의 성능특성 등이 충분히 연구되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 디퓨저/노즐을 이용한 압전형 마이크로 펌프에서 압전소자에 가해지는 인가교류전압과 인가주파수와 같은 인가조건과 입·출구의 위치와 같은 기하학적 형상조건을 복합적으로 고려하여 펌프의 성능 변화에 관한 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

디퓨저/노즐에 의한 압전형 마이크로 펌프를 이용한 실험을 수행하는 데 있어서 사용된 펌프의 단면이 Fig. 1과 같이 나타나 있다. 압전형 마이크로 펌프는 액츄에이터(actuator)로서 작동되는 압전소자, 디퓨저/노즐이 있는 펌프 상판, 압

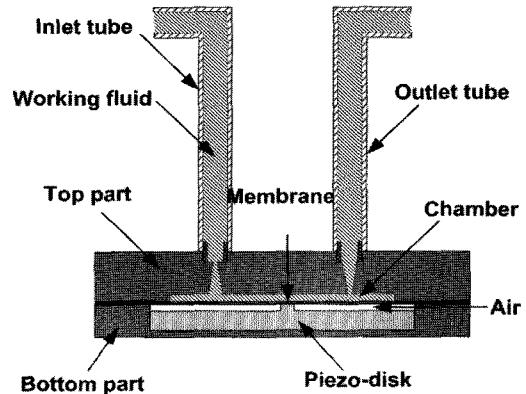


Fig. 1 Cross-sectional view of the diffuser/nozzle based piezoelectric micropump.

전소자에 붙어서 작동유체를 움직이는 역할을 하는 박막, 압전소자를 담고 있는 펌프 하판 그리고 입·출구튜브로 구성되어 있다.

본 실험 연구에서는 pic-153 물질로 제작된 PI사의 P-286.20 모델의 압전소자가 사용되었고 pic-153 물질의 압전상수들이 Table 1에 제시되었다. 입·출구 부분을 고려하지 않은 기본적인 펌프의 크기는 80 mm × 80 mm × 24.55 mm의 직육면체인데 이 안에 있는 piezo-disk와 chamber의 직경은 각각 50 mm, 40 mm이며 챔버의 높이는 0.5 mm이다. 또한 마이크로 펌프의 중심축으로부터 입·출구까지의 거리를 각각 실험 변수로 고려한 실험에서 위의 기본적인 형상이 사용되었다.

디퓨저/노즐의 길이, 발산각과 양끝의 직경은 각각 6 mm, 7°와 0.8 mm, 1.5 mm이고 top part와 bottom part의 재질로는 가공성이 뛰어나고 투명성이 좋아 실험 중 챔버 내부 유체 유동을 쉽게 확인할 수 있는 아크릴을 사용했다. 튜브는 내경과 두께가 각각 4 mm, 1 mm인 투명하고 유연성이 좋은 우레탄으로 제작되었다. 디퓨저/노즐의 구멍

Table 1 The piezoelectric constants of pic-153 material

	unit	value
piezoelectric charge constant(d_{33})	10^{-12} C/N	300
piezoelectric voltage constant(g_{33})	10^{-3} Vm/N	16
frequency constant(N_p)	Hzm	1960
coupling factors(k_p)		0.62



Fig. 2 The photograph of the diffuser/nozzle based piezoelectric micropump.

의 직경이 매우 작기 때문에 펌프 상판의 가공을 용이하게 하기 위해서 상판과 튜브를 연결하는 내경 2 mm, 두께 1 mm, 높이 6 mm인 환형(annulus) 아크릴 요소를 입·출구 양쪽에서 사용했다. 0.05 mm의 두께를 가진 membrane의 재질은 polypropylene이다. 펌프의 모든 부품이 결합되어 있는 디퓨저/노즐을 이용한 압전형 마이크로 펌프의 사진이 Fig. 2에 제시되어 있다.

2.2 실험 방법

디퓨저/노즐을 이용한 압전형 마이크로 펌프의 유동특성 파악을 위한 실험에서 Fig. 3에서 제시된 바와 같이 function generator와 power supply 그리고 oscilloscope 등이 사용되었다. 우선적으로 function generator에서 일정한 주파수의 sine

파를 외부로 출력하고 power supply는 압전소자에 맞도록 음의 전위만을 갖는 교류신호를 압전소자에 인가하는데 이때에 oscilloscope에서 압전소자에 가해지는 인가전압과 인가주파수를 확인할 수 있다. 마이크로 펌프에 교류신호가 인가되면 마이크로 펌프가 작동되어 입출구에서 수면이 이동하게 되는데 자(scale)가 설치되어 있는 출구 쪽 튜브 내 수면의 위치 변화를 디지털 카메라[LAP POLARIS 10]로 촬영하고 촬영된 영상자료를 분석하여 체적유량(volume flow rate)을 평가한다.

디퓨저/노즐을 이용한 압전형 마이크로 펌프에서 액츄에이터 역할을 담당하는 압전소자(piezo-disk)는 압전효과에 의해 외부에서 가해지는 전기에너지를 왕복형태의 운동에너지로 변환시킨다. 본 실험에서 사용된 압전소자 P-286.20은 음의 전위만을 가진 교류신호가 인가될 수 있는데 최대 0 V, 최소 -1,000 V의 전위 범위를 갖는 ppv (peak to peak voltage)가 1,000 V인 sine파 형태의 교류전압이 인가될 수 있다. 최대 ppv 1,000 V에서는 최대 120 μ m의 변위를 가지며 인가전압과 압전소자의 변위가 선형적인 관계를 가진다고 알려져 있다. 본 연구에서 인가전압의 크기에 따른 압전소자의 변위의 크기가 측정되었다. 레이저 광을 이용하여 물체의 움직임을 측정하는 장치인 레이저 변위 센서를 이용하여 membrane과 맞닿는 압전소자의 중앙 돌출부의 변위가 측정되었다. piezo-disk에 허용 가능한 큰 전위를 갖는 교류신호를 인가하여 오랫동안 실험을 수행할 경우에 발생할 가능성이 있는 piezo-disk의 파괴 또

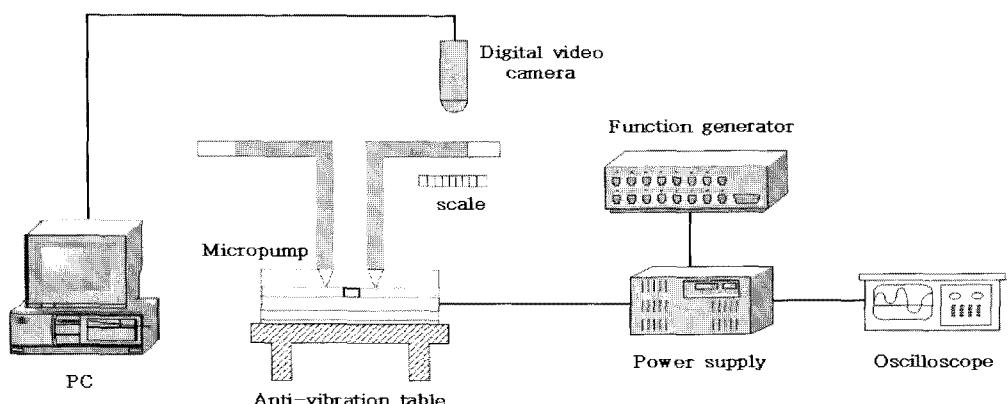


Fig. 3 Experimental apparatus for measuring the flow rate of the diffuser/nozzle based piezoelectric micropump.

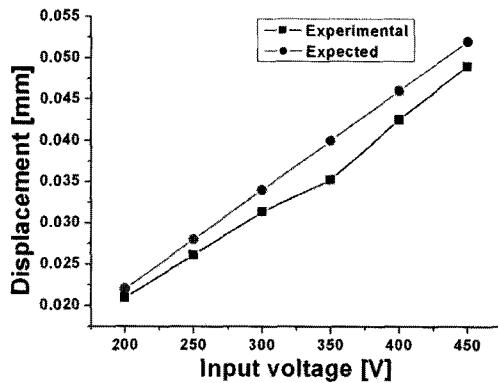


Fig. 4 The displacements of the center of the piezo-disc with input voltages(5.0 Hz).

는 malfunction을 피하기 위하여 입력되는 최저의 전위를 -450 V로 제한되었다. 인가 주파수 5.0 Hz에 대하여 -200~0 V부터 -450~0 V까지의 전위 범위를 갖는 다양한 교류신호가 인가된 상황에서 Peak-to-peak voltage의 크기에 따른 압전소자 중앙 돌출부에서의 최대 변위값이 측정되었으며 이것이 Fig. 4에 제시되었다. 계산된 예측값과 실제 측정된 값은 약간의 차이를 보이고 있는데 결과적으로 약 10% 이내의 오차를 가지며 인가전압의 크기와 변위의 크기가 선형적인 관계를 가지는 것으로 나타났다.

3. 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 디퓨저/노즐을 이용한 압전형 마이크로 펌프의 성능에 영향을 미치는 여러 변수들 중에서 인가전압과 인가주파수, 중심점으로부터 입·출구까지의 거리 등이 펌프의 펌핑특성에 미치는 영향이 과학되었다.

먼저 펌프에 가해지는 인가전압과 인가주파수의 영향이 검토되었다. ppv 200 V(-200~0 V)부터 450 V(-450~0 V)까지 50 V의 ppv 변화를 갖는 6가지의 인가전압이 사용되었고 5.0~8.5 Hz까지 0.5 Hz의 주파수 변화를 갖는 8가지의 인가주파수가 사용되었다. 마이크로 펌프의 중심축으로부터 입·출구까지의 거리가 14.5 mm로 일정하다. 내경이 4 mm인 입구측 튜브와 출구측 튜브에 각각 209 mm의 범위에 물이 채워져 있는 상태에서 실험이 시작되었다.

Fig. 5에서 보인 바와 같이 압전소자에 가해지

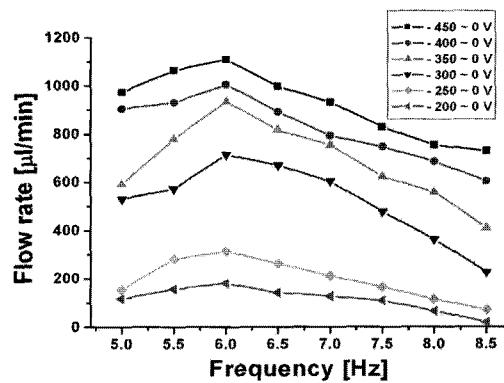


Fig. 5 Influence of the voltage and frequency on the flow rate of the piezoelectric micropump with the chamber height of 0.5 mm.

는 교류신호의 전압이 상승할수록 펌프의 유동률도 증가했는데 이러한 현상은 실험에서 고려된 모든 인가주파수에 대해서 공통적으로 발생하였다. 각각의 인가교류전압마다 인가주파수에 따른 유동률의 경향은 유사하였는데 ppv 250 V와 300 V의 사이에서 유동률이 급격히 변화하였으며 ppv 450 V, 6.0 Hz의 경우에는 1110 $\mu\text{l}/\text{min}$ 의 최대 유동률을 가지지만 그에 비해 인가주파수가 6.0 Hz일 때에 ppv 200 V와 250 V에서는 상대적으로 유동률이 작다. 인가주파수 6.0 Hz일 때 전압이 ppv 200 V에서 ppv 400 V로 2배로 상승하였을 때에 유동률은 약 180 $\mu\text{l}/\text{min}$ 에서 1005 $\mu\text{l}/\text{min}$ 으로 5 배 이상의 값으로 증가하였다. 이는 인가교류전압이 낮을 때보다 인가교류전압이 높을 때에 펌프의 효율이 높다는 것을 의미한다.

인가주파수를 기준으로 살펴볼 때에 본 실험에서 사용된 마이크로펌프에서는 모든 인가전압의 신호에 대하여 6.0 Hz일 때 가장 높은 유동률이 발생했다. 그리고 6.0 Hz를 기준으로 주파수가 증가하거나 감소할 때에 유동률이 작아지는데 이러한 현상은 모든 인가교류전압에 대하여 나타났다. 인가전압이 큰 경우(즉, ppv 400 V와 ppv 450 V)에는 6.0 Hz를 기준으로 주파수가 감소할 때의 유동률의 감소율보다 주파수가 증가할 때의 유동률의 감소율이 더 크다. 그러나 이러한 경향은 ppv 300 V와 ppv 350 V에서는 나타나지 않는다. 이러한 유동률의 특성으로부터 어떤 주어진 압전형 마이크로 펌프에 대하여 펌프의 유동률을 최

대로 만들어 주는 특정 주파수가 존재함을 알 수 있다. 주파수가 5 Hz보다 작을 때에는 function generator로부터 power supply로 보내진 교류신호가 증폭되는 과정에서 왜곡(distortion)되는 현상이 발생하였으므로 5 Hz보다 작은 주파수에서는 실험이 수행되지 않았다. 한편, Fig. 5에 나타나 있는 바와 같이 인가주파수가 매우 높을 때에는 압전소자가 압축 및 팽창하는 데에 주어진 시간이 매우 짧기 때문에 이에 따라 박막이 움직이는 속도가 매우 빨라서 펌프의 유동율이 떨어진다.

마이크로 펌프의 입출구 튜브에서 유체의 마찰에 의한 압력강하(ΔP)는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

여기에서, $f = \frac{64}{Re}$ (충류 유동인 경우의 튜브 벽면의 마찰계수)이고, 평균속도 v 는 $v = l/\Delta t$ 로 주어지는데 l 은 촬영시간 Δt 동안에 수면이 이동한 거리이다. L 은 양쪽 튜브에 채워진 물의 길이의 합이고 그 값은 418 mm으로 항상 일정하다.

튜브 안을 흐르는 물의 유동은 충류이므로 위에서 주어진 식(1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta P = 32 \frac{\mu L}{D^2} \frac{l}{\Delta t} \quad (2)$$

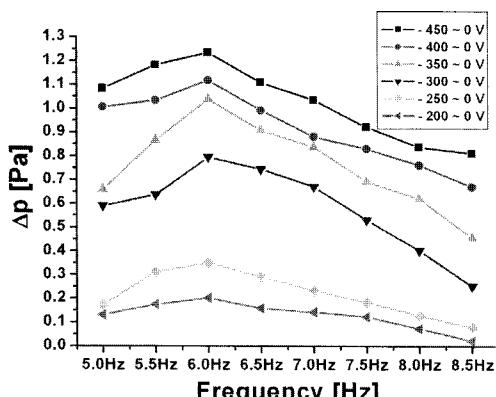


Fig. 6 Influence of the voltage and frequency on the pressure rise of the piezoelectric micropump with the chamber height of 0.5 mm.

식(2)에서 보인 바와 같이 $\Delta P \sim l/\Delta t$ 의 관계를 가지므로 제시되어 있는 압력강하의 특성은 Fig. 6에서 보인 체적유량의 특성과 유사하다.

펌프의 펌핑 동력은 식(3)와 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{W} = \Delta P \times \dot{Q} \quad (3)$$

여기에서, \dot{Q} 는 체적유량($\dot{Q} = \frac{\pi D^2}{4} \frac{l}{\Delta t}$)을 의미한다.

실험에서 사용된 인가교류전압과 인가주파수에서의 펌핑 동력은 Fig. 7에 제시되어 있다. Fig. 5에서 제시된 펌프를 통과하는 유동율과 Fig. 6에서 제시된 마이크로펌프의 압력상승이 수면의 이동속도에 비례하므로 이 두 개의 값이 결합된 펌핑동력의 특성은 수면의 이동속도의 제곱에 비례하는 특성을 갖는다.

입·출구의 위치가 서로 다른 마이크로 펌프의 유동률이 탐구되었다. Fig. 8에서 보인 바와 같이 중심점으로부터 각각 5.5 mm, 10 mm, 14.5 mm 떨어진 3개의 위치를 설정하고, 입구와 출구를 위의 3개의 위치에 서로 다르게 설치하는 9가지의 경우에 대하여 펌프의 펌핑특성이 검토되었다. 인가전압과 인가주파수로는 앞서 수행한 실험적 연구에서 가장 유동율이 높았던 ppv 450 V와 6.0 Hz를 사용하였다.

위의 9가지 경우에 대한 실험에서 입·출구의

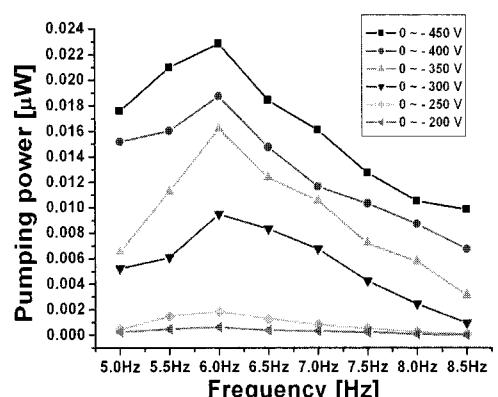


Fig. 7 Influence of the voltage and frequency on the pumping power of the piezoelectric micropump with the chamber height of 0.5 mm.

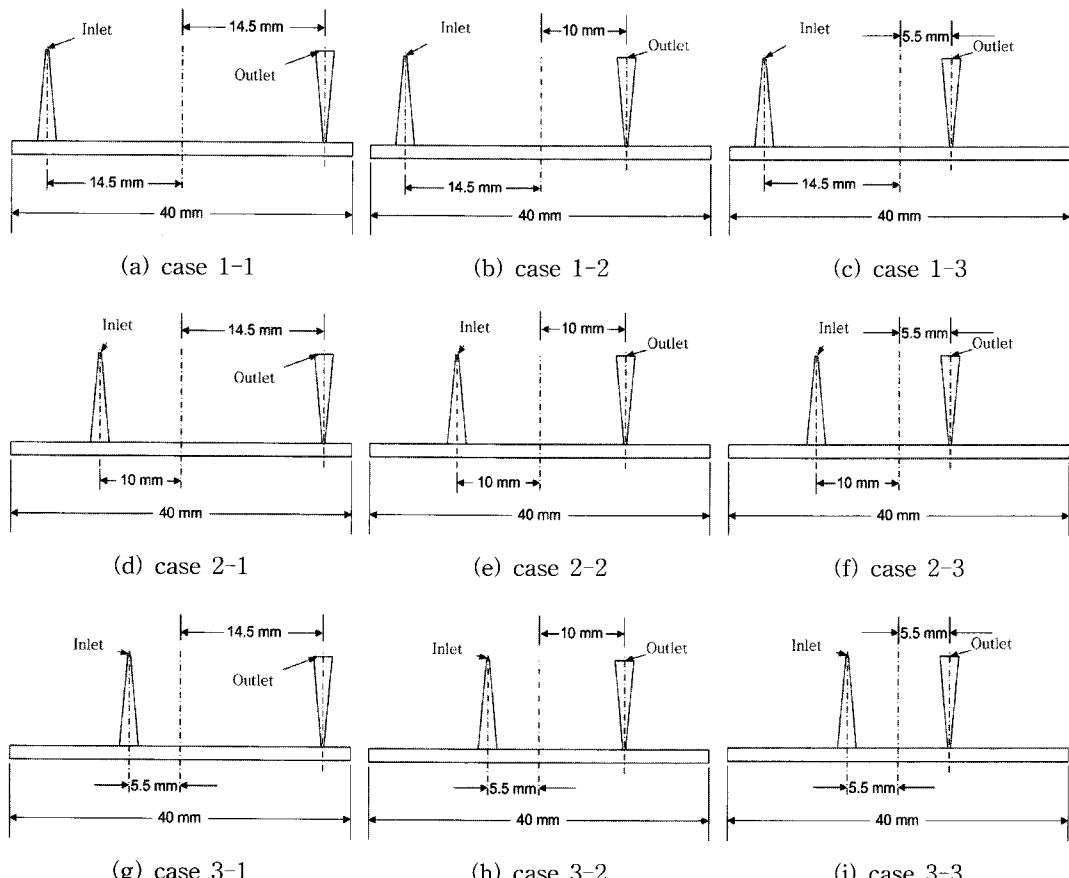


Fig. 8 Schematic diagrams expressing different positions of inlet and outlet in the piezoelectric micropump.

위치가 펌프의 유동률에 큰 영향을 미치고 있음이 밝혀졌다. Fig. 9에 제시되어 있듯이, 최대 유동률과 최소 유동률은 각각 $1110 \mu\text{l}/\text{min}$, $226 \mu\text{l}/\text{min}$ 으로 중심점으로부터 입구와 출구까지의 거리가 각각 증가할수록 유동률이 증가하고 있다. 그리고 중심점으로부터 입구까지의 거리가 클 경우(예를 들어, case 1-1, 1-2, 1-3 참조)에 출구의 위치가 중심점에 가까울수록 유동률이 급격히 감소하여 case 1-3의 유동률은 case 1-1의 유동률의 $1/2$ 에 미치지 못하고 있다. 그 이유는 출구가 챔버의 가장자리에 위치할 경우에 박막의 상승으로 인하여 출구 부근에서 압력이 크게 상승하여 출구에서의 유동율이 커지기 때문이다. 또한 중심점으로부터 출구까지의 거리가 클 경우(예를 들어, case 1-1, 2-1, 3-1 참조)에 입구의 위치가 중심점에 가까울수록 유동율도 현저히 감소하고

있는데 이때의 변화율은 중심점으로부터 입구까

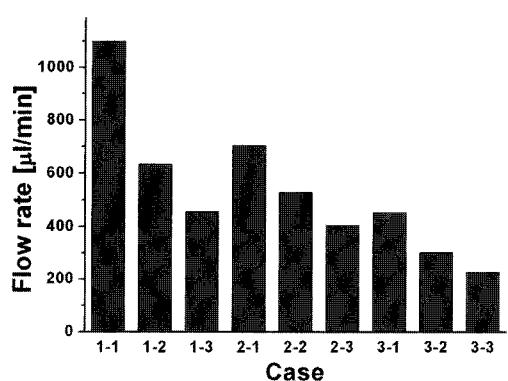


Fig. 9 Net flow rates of micropumps with different positions of the inlet and outlet.

지의 거리가 클 경우에 출구 위치에 따른 유동률의 변화율과 거의 같은 크기를 나타내고 있다.

마이크로 펌프에 관한 실험에서 측정 오차로 인하여 발생하는 펌프의 유동률, 압력강하, 펌핑파워의 특성오차를 각각 구할 수 있다. 먼저, 체적유량의 특성오차 $\delta \dot{Q}$ 는 수면이동 길이(l)의 측정오차와 투브내경(D)의 측정오차에 의하여 발생하므로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta \dot{Q} = f(l, D) \quad (4)$$

따라서 측정된 체적유량의 변화는 아래와 같이 서술될 수 있다.

$$d\dot{Q} = \frac{\partial \dot{Q}}{\partial D} dD + \frac{\partial \dot{Q}}{\partial l} dl \quad (5)$$

여기서, $\frac{\partial \dot{Q}}{\partial D}$ 는 $\frac{l}{\Delta t} \frac{\pi}{4} (2D)$ 이고, $\frac{\partial \dot{Q}}{\partial l}$ 는 $\frac{1}{\Delta t} \frac{\pi}{4} D^2$ 이다.

그리하면 체적유량의 특성오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta \dot{Q} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{Q}}{\partial D} dD \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}}{\partial l} dl \right)^2} \quad (6)$$

둘째, 압력강하의 특성오차 $\delta(\Delta P)$ 는, 식(2)로부터, 투브내경(D)의 측정오차, 수면이동 길이(l)의 측정오차, 투브 안의 물이 채워진 길이(L)의 측정오차에 의하여 발생하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta(\Delta P) = g(D, l, L) \quad (7)$$

따라서 측정된 압력강하의 변화는 아래와 같이 서술될 수 있다.

$$d(\Delta P) = \frac{\partial(\Delta P)}{\partial D} dD + \frac{\partial(\Delta P)}{\partial l} dl + \frac{\partial(\Delta P)}{\partial L} dL \quad (8)$$

여기서, $\frac{\partial(\Delta P)}{\partial D}$ 는 $\frac{l}{\Delta t} \frac{64\mu L}{D^3}$, $\frac{\partial(\Delta P)}{\partial l}$ 는

Table 2 The estimated values and errors in the experiments

	value	error	relative error(%)
\dot{Q}	1110 $\mu l/min$	33.5 $\mu l/min$	3.02
ΔP	1.23 Pa	0.0373 Pa	3.03
\dot{W}	22.9e-9 W	0.978e-9 W	4.27

$\frac{1}{\Delta t} \frac{32\mu L}{D^2}$ 이고 $\frac{\partial(\Delta P)}{\partial D}$ 는 $\frac{1}{\Delta t} \frac{32\mu l}{D^2}$ 이다.

그러므로 압력강하의 특성오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta(\Delta P) = \sqrt{\left(\frac{\partial(\Delta P)}{\partial D} dD \right)^2 + \left(\frac{\partial(\Delta P)}{\partial l} dl \right)^2 + \left(\frac{\partial(\Delta P)}{\partial L} dL \right)^2} \quad (9)$$

한편, 식(3)으로부터 펌핑 파워의 특성오차는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\delta \dot{W} = (\Delta P)(\delta \dot{Q}) + \dot{Q} \{ \delta(\Delta P) \} \quad (10)$$

실험과정에서 수면의 이동거리의 측정 오차 dl 은 1 mm, 투브의 직경 측정 오차 dD 는 0.04 mm, 양쪽 투브 내 유체의 마찰길이의 측정 오차 dL 은 1 mm이다.

ppv 450 V, 6.0 Hz인 경우에 대하여 평가된 측정오차들과 체적유량, 압력강하, 펌핑 파워에 대한 특성오차에 관한 식(6), 식(9), 식(10)로부터 특성오차와 특성오차의 상대적 크기가 계산되었고 Table 2에 제시되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 디퓨저/노즐을 이용한 압전형 마이크로 펌프에서 다양한 기하학적 형상과 작동 조건이 펌프의 펌핑특성에 미치는 영향을 실험적으로 파악하였다. 펌프의 기하학적 변수로서 마이크로 펌프의 중심점으로부터 입·출구까지의 거리를 고려하였고, 작동조건으로 다양한 인가교류전압과 인가주파수를 사용하였다.

먼저 마이크로 펌프의 압전소자에 가해지는 인가교류전압과 압전소자의 변위의 관계가 파악되었다. 인가교류전압에 따른 압전소자 변위의 예

측값과 실제 측정값을 비교한 결과, 10% 이내의 오차를 동반한 채 선형적인 관계를 가지는 것으로 나타났다.

압전소자에는 음의 전위만을 가지는 sine파 형태의 교류신호가 인가되었다. 인가교류전위와 인가주파수에 따른 마이크로 펌프의 유동률이 측정되었는데 인가교류전압이 클수록 유동률이 증가하였으며 같은 인가교류전압에 대하여 인가주파수가 6.0 Hz일 때 유동률이 가장 높았다. 이는 주어진 인가교류전압에 대하여 펌프 능력을 최대로 만들어주는 특정주파수가 존재한다는 것을 의미한다.

그리고 중심점으로부터 입구와 출구까지의 거리가 펌프의 유동률에 큰 영향을 미친다. 중심점으로부터 입구까지의 거리가 큰 경우에는 중심점으로부터 출구까지의 거리가 증가함에 따라 유동률이 크게 증가한다. 또한 중심점으로부터 출구까지의 거리가 클 경우 중심점으로부터 입구까지의 거리가 증가함에 따라 펌프의 유동률도 역시 현저히 증가한다.

연구를 통해 디퓨저/노즐을 이용한 압전형 마이크로 펌프에서 다양한 교류신호의 인가조건 및 기하학적 형상 등에 따른 펌프의 펌핑 특성을 파악할 수 있었다. 위의 연구 결과는 압전형 마이크로 펌프에 대해 정확하고 높은 수준의 실험적 연구를 수행하는 데 있어 기초 데이터로 활용될 수 있을 뿐만 아니라 다양한 마이크로 펌프의 설계와 관련해 유용한 자료로 이용될 것으로 기

대된다.

후기

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-521-D00075).

참고문헌

1. Stemme, E. and Stemme, G., 1993, A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump, *Sensors and Actuators A*, Vol. 39, pp. 159-167.
2. Olsson, A., Enoksson, P., Stemme, G. and Stemme, E., 1997, Micromachined flat-walled valveless diffuser pumps, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 6, No. 2, pp. 161-166.
3. Olsson, A., Stemme, G. and Stemme, E., 2000, Numerical and experimental studies of flat-walled diffuser elements for valveless micropumps, *Sensors and Actuators A*, Vol. 84, pp. 165-175.
4. Anderson, H., van der Wijngaart W., Nilsson P., Enoksson P. and Stemme G., 2001, A valveless diffuser micropump for microfluidic analytical systems, *Sensors and Actuators B*, Vol. 72, pp. 259-265.