

디퓨저와 노즐을 이용한 열공압형 마이크로 펌프의 입력 전압과 주파수에 따른 펌핑 특성에 관한 실험적 연구

정 진, 채 회 문, 김 창 녭^{*†}

경희대학교 기계공학과, *경희대학교 테크노공학대학(산학협력기술연구원)

An Experimental Study on the Pumping Characteristics of Diffuser-Nozzle Based Thermopneumatic Micropumps with Different Input Voltages and Frequencies

Jin Jeong, Hee Moon Chae, Chang Nyung Kim^{*†}

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

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

(Received February 16, 2007; revision received August 29, 2007)

ABSTRACT: This study has been conducted to investigate the pumping characteristics of diffuser-nozzle based thermopneumatic micropumps with different input voltages and frequencies. In this study, the displacements of the membrane have been obtained changing the input voltage and frequency in load-free state because it is very difficult to measure the displacement of the membrane in an actual load state. It has been found that the amplitude of the membrane displacement increases as the input voltage increases. The pressure head of the thermopneumatic micropump increases almost linearly over some range of the input voltage and decreases almost linearly as the frequency increases. Also, the results show that the thermopneumatic micropump can pump the fluid over a certain input voltage. This study can be utilized as basic data for design and evaluation of thermopneumatic micropumps.

Key words: Thermopneumatic micropump(열공압형 마이크로 펌프), Diffuser(디퓨저), Nozzle(노즐), Membrane(박막), Input voltage(입력 전압), Frequency(주파수)

1. 서 론

최근 마이크로 유체시스템과 소자부품에 대한 연구개발이 국제적으로 매우 활발한 양상을 보이고 있다. 특히 화학·의학분야에 있어서 마이크로 유체기기는 기술 및 경제적 측면 모두 기존의 시스템에 비해 훨씬 유리하다. 또한, 마이크로 유

체기기의 핵심소자인 마이크로 펌프와 마이크로 밸브는 최근들어 그 응용가능성이 확대됨에 따라 연구가 크게 증가하고 있다.⁽¹⁾

마이크로 펌프는 일반 펌프와 달리 그 크기가 매우 작고 미소유량을 마이크로 채널을 통해 이송하기 때문에 점성효과가 크게 부각된다. 또한 마이크로 펌프는 마이크로 단위의 시스템 설계기술, 각종 요소 부품들의 마이크로 가공기술, 유동 특성과 관련된 마이크로 유체역학 등 다양한 지식과 첨단기술을 필요로 하는 유체시스템이며⁽²⁾ 바이오/의료 응용 기기의 연구에 응용될 수 있다.

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2578; fax: +82-31-201-8106

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

마이크로 펌프는 구동방식에 따라서 정전형, 압전형, 전자기형, 열공압형, 비동형, 전기분해형 등으로 분류된다. 이중에서 열공압형은 온도에 따른 공기의 팽창/수축 효과를 이용한 방식으로 펌프 자체의 온도가 상승한다는 단점은 있지만 다른 방식에 비해 비교적 구동 전압이 낮고 구동기 박막의 변위가 크다는 장점이 있으며 구조 및 작동원리가 간단하여 실용성이 크게 부각되고 있다.⁽³⁾

마이크로 펌프와 관련된 연구내용을 살펴보면 다음과 같다. Patrick et al.⁽⁴⁾은 열공압형 마이크로 펌프의 구동기(actuator)에 사용되는 주름진 원형 실리콘 박막의 변위를 압력에 따라 측정하여 평평한 박막의 변위와 비교하였다. Yang et al.⁽⁵⁾은 주름진 박막과 평평한 박막을 사용하는 2개의 열공압형 마이크로 펌프에 대하여 동적 테스트를 수행하여, 정전형 마이크로 펌프에서는 형상의 제약 때문에 주름진 박막이 큰 이점이 없음을 보였다. Stemme and Stemme⁽⁶⁾는 디퓨저와 노즐의 원리를 이용한 새로운 형태의 valveless 마이크로 펌프와 동일한 사이즈의 수동형 체크 밸브를 갖는 펌프를 제작하여 valveless 펌프의 장점을 제시하였다. Nguyen and Huang^(7,8)은 PCB (Printed Circuit Board)를 사용하여 mini-ature valveless pump를 제작하였으며, 디퓨저/노즐 마이크로 펌프에 대하여 수치 시뮬레이션을 수행하여 실험치와 비교하였다. Olsson et al.^(9,10)은 DRIE (Deep Reactive Ion Etching)법을 이용하여 valveless 마이크로 펌프를 제작하여 디퓨저 목의 너비, 디퓨저의 길이, 발산각 등에 따른 펌핑 특성을 연구하였으며, 전산유체역학을 이용하여 디퓨저와 노즐에서의 유동특성을 파악하였다. Jeong and Yang^(11~13)은 디퓨저/노즐 방식 밸브와 알루미늄 플랩 밸브를 갖는 열공압형 마이크로 펌프의 유동특성을 비교 평가하였다. Van De Pol et al.⁽¹⁴⁾은 열공압형 microminiature 펌프를 제작하여 공동(cavity) 내의 공기의 압력에 의한 박막의 변위측정값과 수치해석 결과값과 비교하였다. Schulte et al.⁽¹⁵⁾은 마이크로 펌프에서 유체-고체 상호작용의 coupled problem에 대한 수학적 처리 방법을 제시하였다.

그러나 지금까지의 열공압형 마이크로 펌프에 관한 연구들은 박막의 형태, 디퓨저와 노즐의 발산각 및 길이, valve 유무 등에 관한 연구가 대부

분이었다. 그러나 실제로 열공압형 마이크로 펌프의 연구에 있어서 펌프의 구동력이 되는 입력 전압과 연속적인 가열 시간을 결정하는 주파수에 따른 펌핑 특성을 규명하는 것이 더욱 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 마이크로 펌프의 본체에서 수평 방향으로 입출구가 설치되어 있지 않고 챔버(chamber)의 윗쪽에 입출구(디퓨저/노즐)가 설치되어 있는 마이크로 펌프를 제작하고 입력 전압과 주파수에 따른 열공압형 마이크로 펌프의 펌핑 특성을 여러 주기에 걸쳐 파악하고자 한다. 기존의 연구와는 달리 고정도(high precision)의 레이저 변위계를 사용하여 실시간으로 여러 주기에 걸쳐 박막의 거동을 모니터링하고, 고배율 카메라를 이용하여 유량을 측정하여 디퓨저/노즐을 이용한 열공압형 마이크로 펌프의 설계변수를 도출하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 디퓨저와 노즐에 기초한 열공압형 마이크로 펌프의 구성 및 작동원리

Fig. 1은 디퓨저와 노즐에 기초한 열공압형 마이크로 펌프의 단면을 나타낸 것이다. 아랫부분에는 공기로 채워져 있는 공동(cavity)이 있으며, 공동의 윗부분은 재질이 아세테이트인 박막(membrane)으로 덮여 있고, 아랫부분에는 니크롬선으로 만들어진 히터(heater)가 바닥에 부착되어 있는데 이것이 액츄에이터(actuator) 부분이다. 액츄에이터의 위에는 디퓨저(diffuser)와 노즐(nozzle)

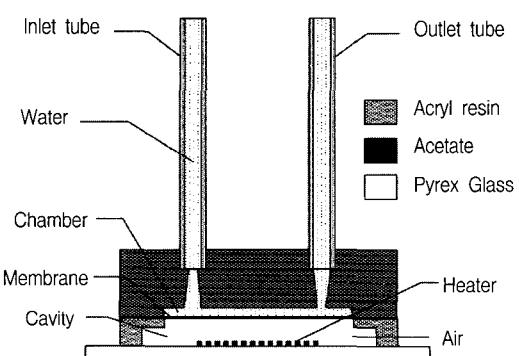


Fig. 1 Cross-sectional view of the diffuser-nozzle based thermopneumatic micropump.

및 챕버(chamber)로 구성된 본체가 입·출구의튜브에 연결되어 있다.

열공압형 마이크로 펌프의 작동 원리는 다음과 같다. 히터에 전압을 인가하면, 공기의 온도는 상승하며 공동 내부의 공기가 팽창하게 된다. 이에 따라 윗방향으로 박막의 변위가 일어나게 되며, 이때 챕버의 체적이 감소하여, 챕버 내의 압력이 증가하여 작동유체가 밖으로 나가게 된다. 이와 반대로 인가한 전압을 끊게 되면, 공동 내의 온도와 압력은 떨어진다. 따라서 박막은 아래 방향으로 하강하게 되고 유체는 챕버 내로 유입된다. 여기서 디퓨저와 노즐에서의 유동 저항의 차이로 인해 유체는 실질적으로 입구에서 출구로 흐르게 된다.

2.2 마이크로 펌프의 제작

Fig. 2는 열공압형 마이크로 펌프의 각각의 구성요소를 보여주고 있다. 액츄에이터는 base, body, 히터, 박막 부분으로 구성되어 있다. base의 재질은 Pyrex glass이며 1 mm의 두께로 제작되었다. body의 크기는 $15\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 이며, acrylic resin plate로 제작되었다. Body는 CNC(Computerized Numerical Control) machine과 ATC(Automatic Tool Changer)로 구성된 고정밀 MC(Ma-

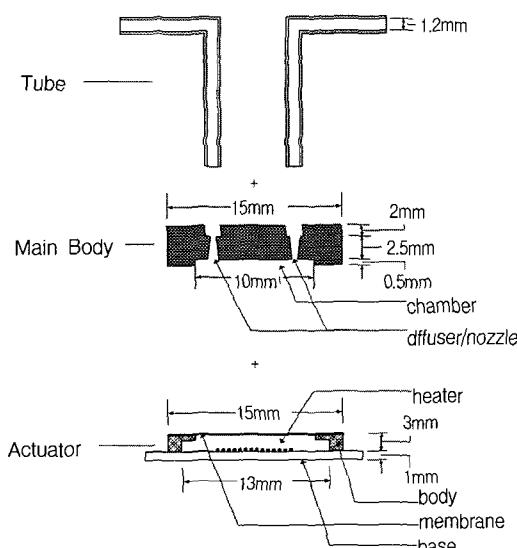


Fig. 2 The structure of the diffuser-nozzle based thermopneumatic micropump.

ching Center)[model : LCV-50A]로 가공되었다. 공기로 채워질 공동 내부의 크기는 $13\text{ mm} \times 13\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 이다. 히터는 직경이 0.29 mm, 길이가 75 mm인 니크롬선을 사용하였으며, 상온 상태에서 전기 저항은 2Ω 이다. 박막의 재질은 아세테이트 합성수지이며, 두께는 0.08 mm이다. 또한, 박막, base, body 등의 각 파트는 에폭시를 이용하여 접착되었다.

챕버 파트는 직경 10 mm, 높이 $500\mu\text{m}$ 이며, 고정밀 MC로 가공되었다. 디퓨저와 노즐의 발산 각도는 약 7.3° 이며 디퓨저와 노즐의 끝 부분에서의 반경이 각각 0.36 mm, 0.52 mm이다.

디퓨저와 노즐에 연결된 입·출구 튜브는 태프론 합성수지로 만들어졌으며, 튜브의 내경은 1.2 mm, 외경은 2 mm이다. 본 실험에서 각 파트의 크기(길이)는 측정 소프트웨어를 포함한 고정밀 디지털 마이크로스코프를 이용하여 측정되었다. 제작된 마이크로 펌프의 사진이 Fig. 3에 제시되어 있다.

2.3 실험 방법

마이크로 펌프를 구동하는 방법은 다음과 같다. DC 파워 서플라이[Model : INSTEK GPS-3303]에 의해 발생된 전기를 합수발생기[Model : AGILENT 33220A]로 보내 합수발생기에서 만들어진 주기적인 전기 신호를 FET 드라이버에 보낸다. FET 드라이버를 통한 주기적인 전기 신호는 마이크로 펌프를 구동하게 된다. 이때 모든 실험 기구는 외부적인 요인으로부터의 영향을 피하기 위해 무진동판 위에 설치되었다.

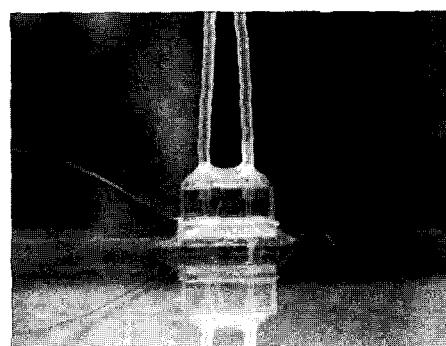


Fig. 3 The photograph of the diffuser-nozzle based thermopneumatic micropump.

2.3.1 박막 거동 특성에 관한 실험

레이저 센서를 이용한 변위 측정 기구를 이용하여 박막의 변위를 측정하였다. 반경 방향에 따른 박막의 최대 변위는 0부터 10 mm까지 XYZ 스테이지를 500 μm 씩 이동하면서 변위를 측정하였다. 이때 박막의 변위는 챔버와 투브를 제거한 액츄에이터에서 측정하였다. 이는 챔버, 투브, 액츄에이터가 결합된 상태에서는 박막의 변위를 측정할 수 없기 때문이다.

측정한 변위 데이터는 실시간으로 컴퓨터에 저장되며, 변위 측정 프로그램에 의해 분석된다. 여기서 DC 파워 서플라이에 의해 발생된 전압, 함수 발생기에 의해 만들어진 신호, 히터에 인가된 전압 등 실험 조건에 관한 데이터가 4개의 입력 채널을 가진 oscilloscope[Model: YOKOGAWA DL 1640]에 저장되었다.

열공압형 마이크로 펌프에서 박막의 거동 특성을 파악하기 위해, 입력 전압과 주파수에 따른 박막 중심의 변위를 측정하였다. 전압은 1 V에서 6 V까지 1 V의 간격으로 증가시키면서, 주파수는 1 Hz에서 1.5 Hz까지 0.1 Hz씩 증가시키면서 실험하였다. 본 실험에 사용된 duty ratio(히터에 전류가 흐르는 시간 간격을 1주기의 시간 간격으로 나눈 값)는 20%이다. 그 이유는 duty ratio의 값이 20%보다 클 경우에는 공통 내 공기가 가열되어 상승했던 박막이 냉각되는 동안 충분히 하강하지 못하기 때문이다. 즉, 가열시간 이후의 냉각 시간의 길이가 박막이 초기 위치로 되돌아오게 하는 중요한 인자이다.

2.3.2 마이크로 펌프의 압력 수두 측정

압력 수두는 입·출구 투브의 수두 차에 의해 평가되었다. 수두 차는 디지털 비디오카메라를 이용하여 입·출구 투브에서 유체의 높이 차이를 측정함으로써 얻어질 수 있다. 본 실험에 사용된 작동유체인 물은 실험 직전에 입·출구 투브에 각각 300 mm의 높이만큼 채워졌다.

입력전압과 주파수에 따른 열공압형 마이크로 펌프의 수두 차를 측정하기 위한 순서는 다음과 같다. XYZ 스테이지에 열공압형 마이크로 펌프를 설치하고 입·출구 투브를 수직하게 설치한다. 함수발생기에서 만들어진 주기적인 신호를 마이크로 펌프로 보내어 펌프의 운전을 시작하고, 펌프의 운전이 정상상태에 도달하면 시험을

마친다. 그 다음에 디지털 비디오카메라에 의해 기록된 영상을 분석하여 입·출구 투브 사이의 수두 차를 측정한다.

2.3.3 마이크로 펌프의 유량 측정

입력전압과 주파수에 따른 열공압형 마이크로 펌프의 유량을 측정하는 순서는 다음과 같다. 마이크로 XYZ 스테이지에 열공압형 마이크로 펌프를 설치한 후, 입·출구 투브와 자를 스테이지 위에 수평으로 고정시킨다. 그 다음 펌프의 운전을 시작하고, 박막의 변위가 안정되는 15초 이후에 1분 동안의 유체의 유동을 디지털 비디오카메라로 기록한 후에 비디오 분석을 통하여 유량을 평가한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 박막의 거동 특성

입력 전압이 4 V, 주파수가 1 Hz일 때 시간에 따른 박막 중심에서의 변위를 Fig. 4에 나타내었다. 박막 중심에서의 최고점과 최저점은 시간에 따라 미세한 차이를 나타내지만, 한 사이클에 대한 변위의 진폭은 매 사이클마다 거의 일정하였다.

입력 전압과 주파수에 따른 박막의 중심에서의 최대 변위가 Fig. 5에 나타나 있는데, 1 V~3 V까지는 입력 전압이 증가함에 따라서 박막의 최대 변위가 거의 선형적으로 증가하였다. 그러나 입력 전압이 3 V 이상이 되면 최대 변위는 입력 전압이 증가함에 따라서 크게 증가하지는 않았다. 박막의 중심부가 초기 상태에서 박막둘레(가장자리)의 위치보다 445 μm 만큼 아래로 처져 있기

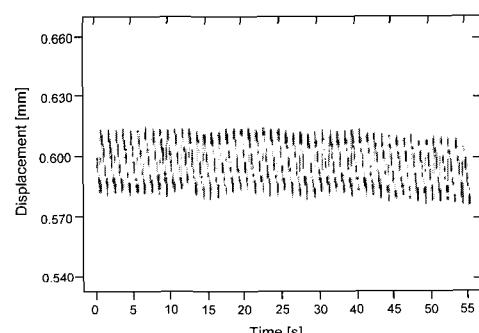


Fig. 4 Displacement at the center of the membrane with time at 4 V, 1 Hz.

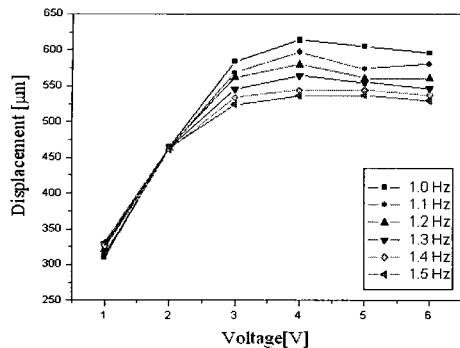


Fig. 5 Maximum displacement at the center of the membrane with input voltage.

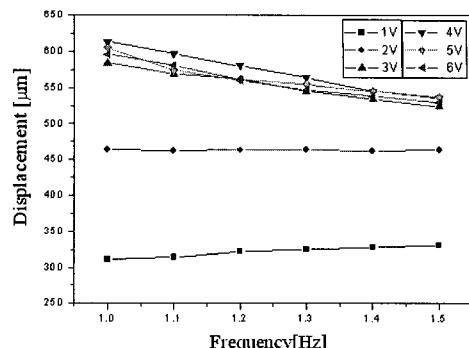


Fig. 6 Maximum displacement at the center of the membrane with frequency.

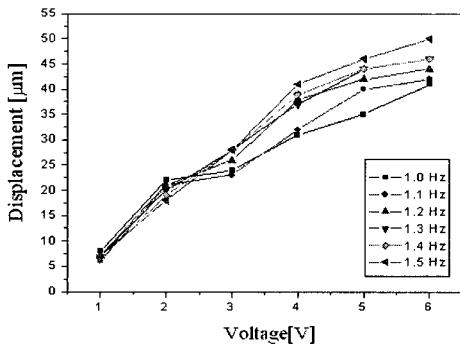


Fig. 7 The displacement(two times of the amplitude) at the center of the membrane with input voltage.

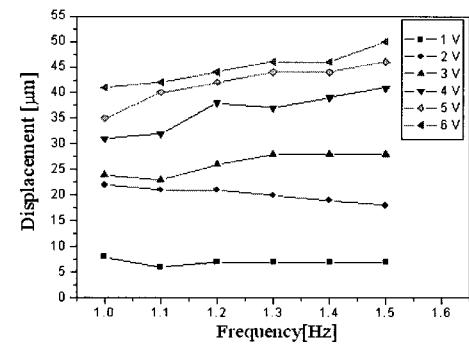


Fig. 8 The displacement(two times of the amplitude) at the center of the membrane with frequency.

때문에 최대 변위가 $500\mu\text{m}$ 이상이 되어도 펌프 챔버의 윗면과 접촉하지 않는다.

주파수에 따른 박막 중심에서의 최대 변위가 Fig. 6에 제시되어 있다. 입력 전압이 1V와 2V 일 때의 박막 중심의 최대 변위는 주파수에 따라 크게 변화하지 않았고, 입력 전압 3V에서 6V 사이에서는 주파수가 증가함에 따라 최대 변위는 오히려 감소하였다.

Fig. 7은 입력 전압과 주파수에 따른 박막 중심에서의 변위의 크기(진폭의 2배)를 보여주고 있다. 주파수가 일정할 때 입력 전압이 1V에서 6V로 증가함에 따라 진폭이 거의 선형적으로 증가한다. 또한, Fig. 8에 나타낸 바와 같이 주어진 입력 전압이 일정하고 주파수가 1.0 Hz에서 1.5 Hz까지 증가할 때 박막의 변위의 크기는 크게 변화하지 않았다.

입력 전압이 3V, 주파수가 1Hz일 때 반경 방향에 따른 박막의 최대 변위가 Fig. 9에 제시되

어 있다. 여기서, 최대변위의 값은 Fig. 5~Fig. 6 과 달리 박막 둘레(가장자리)의 위치를 기준으로 나타낸 것이다. 또한, 반경 방향에 따른 최대 변위 곡선이 부드럽지 않은 이유는 각각의 위치에서의 최대 변위를 동시에 측정하지 않았기 때문이다. 즉, 박막의 최대 변위는 시간에 따라서 매우 조금씩 변하기 때문에 부드러운 변위 곡선을 구할 수 없었다. 비록 변위 곡선이 부드럽진 않아도 곡선의 모양을 대략적으로 포물선의 형태로 볼 수 있다.

3.2 열공압형 마이크로 펌프의 성능 특성

열공압형 마이크로 펌프의 펌핑 성능은 유량과 입출구의 압력 수두 차이를 이용하여 평가할 수 있다. 디퓨저와 노즐에 기초한 열공압형 마이크로 펌프의 압력 수두 값은 입력 전압과 주파수에 따라서 각각 측정되었다.

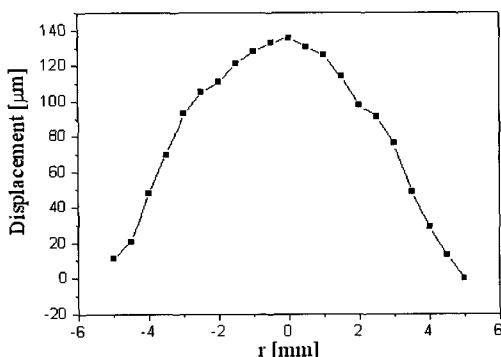


Fig. 9 Maximum displacement of the membrane.

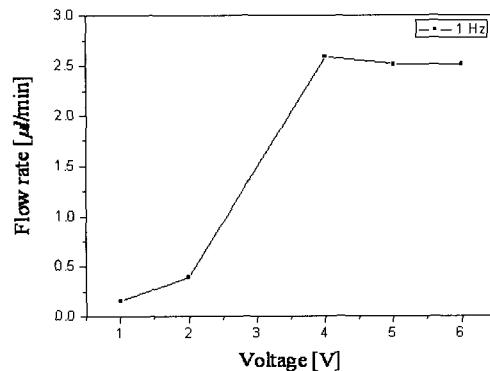


Fig. 12 Flow rate of the thermopneumatic micropump with voltage.

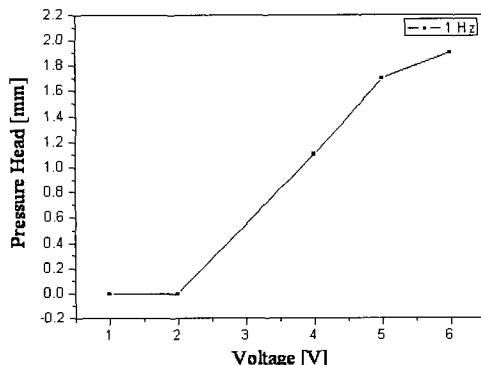


Fig. 10 Difference in pressure head between inlet and outlet with input voltage at 1 Hz.

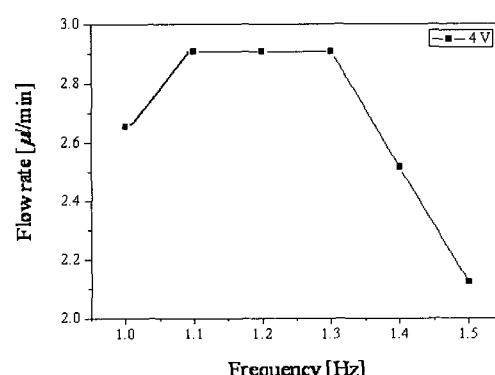


Fig. 13 Flow rate of the thermopneumatic micropump with frequency.

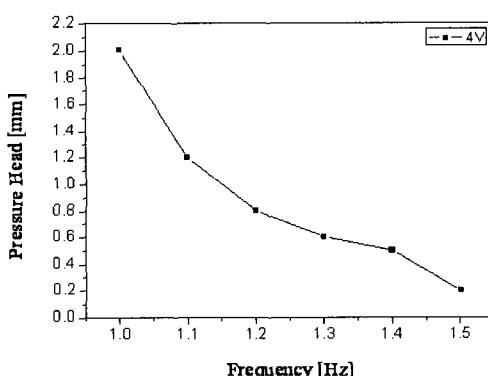


Fig. 11 Difference in pressure head between inlet and outlet with frequency at 4 V.

Fig. 10에 나타낸 바와 같이 주파수가 1 Hz이고 입력전압이 1 V와 2 V일 때는 압력 수두 차가 거의 0에 가까우며, 입력 전압이 2 V에서 6 V까-

지 증가함에 따라 압력 수두 차는 거의 선형적으로 증가하였다. Fig. 11에서 보듯이 입력 전압이 4 V일 때 주파수가 1.0 Hz에서 1.5 Hz까지 증가함에 따라 압력 수두 차는 감소한다. 이것은 주파수가 증가함에 따라 연속적으로 가열해 주는 시간이 감소하기 때문이다.

열공압형 마이크로 펌프의 유량은 펌프가 운전을 시작한 후, 60초 동안 tube 내의 작동유체가 움직인 거리를 측정하여 유량을 계산하였다.

Fig. 12는 주파수가 1 Hz일 때 입력 전압에 따른 유량의 변화를 보여주고 있다. 입력 전압이 자을 때에는 유량의 크기가 작았으며, 4 V일 때 최대 유량을 나타냈으며, 이때의 유량은 약 2.65 $\mu\text{l}/\text{min}$ 였다. 4 V 이상의 입력 전압에서는 4 V일 때의 유량보다 약간 작게 나타났다. 본 결과로 볼 때, 입력 전압이 증가한다고 해서 열공압형

마이크로 펌프의 유량이 항상 증가하는 것이 아님을 알 수 있다. 그 이유는 박막의 진폭이 입력 전압이 증가함에 따라 무한정으로 증가하지 않기 때문이다.

Fig. 13은 입력 전압이 4V일 때 주파수에 따른 유량을 나타내고 있다. 여기에서 주파수가 1.1 ~ 1.3 Hz일 때, 유량이 $2.9 \mu\text{l}/\text{min}$ 로 최대가 되었으며, 그 이상으로 주파수가 증가할 때 유량은 급격히 감소하였다. 이는 디퓨저와 노즐에 기초한 열공압형 마이크로 펌프의 펌핑 성능에 영향을 미치는 특정 주파수가 존재함을 의미한다.

본 연구에서 유량측정의 오차는 실험조건이 4V, 1Hz일 때를 기준으로 계산하였다. 마이크로 펌프의 유량 \dot{Q} 의 오차는 1분 동안에 튜브 내의 유체가 움직인 거리(s)를 측정하는 과정에서 생긴 측정 오차에 의존한다. 그 오차는 약 0.1 mm로 평가되었다. 따라서 유량의 오차 $\delta\dot{Q}$ 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta\dot{Q} = \left| \frac{\partial \dot{Q}}{\partial s} \right| \quad (1)$$

결과적으로 본 열공압형 마이크로 펌프에서 유량 오차($\delta\dot{Q}$)는 약 $0.11 \mu\text{l}/\text{min}$ 이며, 이것은 유량(\dot{Q})의 약 4.3%이다.

4. 결 론

본 연구에서는 디퓨저와 노즐에 기초한 열공압형 마이크로 펌프를 제작하여, 그 성능 특성을 입력 전압과 주파수에 대하여 실험을 통해 파악하였다. 여기에서 입력 전압과 주파수에 따른 박막의 변위, 압력 수두, 유량 등이 고정밀도를 갖는 기기들을 이용하여 측정되었다.

실험과정에서 박막의 변위는 작동유체에 의하여 아랫방향으로 작용하는 힘이 없는 상태에서 입력 전압과 주파수를 변화시켜 가면서 측정하였다. 이는 실제적으로 박막의 위에 작동유체가 있는 상태에서 박막의 변위를 측정하는 것은 매우 어렵기 때문이다.

박막의 중심점에서 변위의 진폭은 입력 전압이 증가할수록 증가하였다. 그리고 마이크로 펌프의 압력 수두는 특정 입력 전압 이상에서는 입력 전압이 증가함에 따라 증가하였으며, 주파수가 증

가함에 따라 거의 선형적으로 감소하였다. 열공압형 마이크로 펌프에서 송출할 수 있는 유량은 특정 범위의 입력 전압에 대하여 증가하는 경향을 보였으며, 높은 주파수 영역에서는 주파수의 증가에 따라 감소함을 알 수 있다. 본 연구에서 사용된 마이크로 펌프에 대하여 최대의 유량을 제공하는 주파수 영역이 얻어졌는데, 이 주파수는 사용된 마이크로 펌프가 갖는 고유의 주파수로서 본 마이크로 펌프의 성능에 중요한 의미를 가지고 있다.

본 연구의 결과는 디퓨저와 노즐에 기초한 고성능의 열공압형 마이크로 펌프에 관한 연구 및 개발을 위한 기초 자료로 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-041-D00119).

참고문헌

- Chang, J. K., Chung, S. and Han, D. C., 2000, Application of Bio-MEMS Technology on Medicine and Biology, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 7, pp. 45-51.
- Park, J. S., 2002, Technology trends in the micro-devices and components, Korea Institute of Science and Technology Information
- Lee, S. W. and Yang, S. S., 1998, The fabrication and application of micropump, ICASE, pp. 26-32.
- Patrick R. S., Wouter, O. and Piet, B., 1994, The design, fabrication, and testing of corrugated silicon nitride diaphragms, Journal of Microelectro Mechanical Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 36-42.
- Yang, E. H., Yang, S. S., Han, S. W. and Kim, S. Y., 1995, Fabrication and dynamic testing of electrostatic actuators with p+ silicon diaphragms, Sensors and Actuators A, Vol. 50, pp. 151-156.
- Stemme, E. and Stemme G., A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump, 1993, Sensors

- and Actuators A, Vol. 39, pp. 159–167.
7. Nguyen, N. T. and Huang, X. Y., 2000, Numerical simulation of pulse-width-modulated micropumps with diffuser/nozzle elements, Nanyang Technological University.
 8. Nguyen, N. T. and Huang, X. Y., 2001, Miniature valveless pumps based on printed circuit board technique, Sensors and Actuators A, Vol. 88, pp. 104–111.
 9. 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.
 10. Olsson, A., Stemme, G. and Stemme, E., 2000, Numerical and experimental studies of flat-walled diffuser elements for valve-less micropumps, Sensors and Actuators A, Vol. 84, pp. 165–175.
 11. Jeong, O. C. and Yang, S. S., 2000, Fabrication and test of a thermopneumatic micro-pump with a corrugateddp + silicon diaphragm, Sensors and Actuators A, Vol. 80, pp. 62–67.
 12. Jeong, O. C. and Yang, S. S., 2000, Fabrication and test of a thermopneumatic micro-pump with a corrugateddp+diaphragm, Sensors and Actuators A, Vol. 83, pp. 249–255.
 13. Jeong, O. C. and Yang, S. S., 2000, Fabrication of a thermopneumatic micropump with a aluminum flap valves, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 37, No. 6, pp. 873–877.
 14. Van De Pol, F. C. M., Wonnink, D. G. J., Elewenspoek, M. and Fluitman, J. H. J., 1989, A thermopneumatic actuation principal for a microminiature pump and other micromechanical devices, Sensors and Actuators A, Vol. 17, pp. 139–143.
 15. Schulte, S., Maurer, A. and Bungartz, H., 1995, Modular solution approach for simulation of coupled physical phenomena, in Simulation and Design of Microsystems and Micro-structures, Computational Mechanics Publications, Southampton, pp. 201–210.