<응용논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.5.567 ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

# 진행파를 이용한 압전 마이크로 펌프의 설계와 해석

나영민* · 이현석* · 박종규*†
* 창원대학교 기계공학부

# Design and Analysis of Piezoelectric Micro-Pump Using Traveling-Wave

Yeong Min Na*, Hyun Seok Lee* and Jong Kyu Park*†
* Dept. of Mechanical Engineering, Changwon Nat'l Univ.

(Received October 10, 2013 ; Revised February 27, 2014 ; Accepted March 3, 2014)

**Key Words**: Micropump(마이크로펌프), Valeless(밸브리스), Traveling-Wave(진행파), Stomach(위장), Piezoelectric Actuator(압전 작동기)

**초록**: 최근에, 의학 분야의 MEMS 기술이 발전하면서 다양한 미세 유체 이송 시스템이 연구되고 있다. 본 논문에서는 기존의 펌프와는 다른, 두 개의 분리된 압전 판을 이용해 위장의 연동 운동을 모방한 마이크로 압전 펌프를 제안한다. 본 펌프는 진행파를 이용해 연동 운동을 일으켜 작동된다. 특히, 압전판에서 인가된 입력 전압에 의해 발생된 변위에 의해 동작된다. 이에 두 판 사이에서 진행파가 일어나며 유체는 진행파에 의해 생성된 압력차에 의해 이동된다. 압전 소자, 탄성체, 유체가 복합된 시스템을 이해하기 위해서 유한 요소 해석을 사용하였다. 챔버의 높이, 세라믹 개수 등의 설계 변수들을 변화시켜 유체의 유량을 확인하였다.

**Abstract**: Since the development of microelectromechanical systems (MEMS) technology for the medical field, various micro-fluid transfer systems have been studied. This paper proposes a micro-piezoelectric pump that imitates a stomach's peristalsis by using two separate piezoelectric elements, in contrast to existing micro-pumps. This piezoelectric pump is operated by using the valve-less traveling wave of peristalsis movement. If the piezoelectric plates at the two separated plates are actuated at the input voltage, a traveling wave occurs between the two plates. Then, the fluid migrates by the pressure difference generated by the traveling wave. Finite element analysis was performed to understand the mechanics of the combined system with piezoelectric elements, elastic structures, and fluids. The effects of design variables such as the chamber height and number of ceramics on the flow rate of the fluid were examined.

- 기호설명 -

$k$ : 파수
$c_g$ : 열두 개의 압전 세라믹군을 이용한 구동
$c_3$ : 세 개의 압전 세라믹을 이용한 3상구동
$c_4$ : 네 개의 압전 세라믹을 이용한 2상구동
$\lambda$ : 파장 (m)
$\varphi$ : PZT1에 대한 PZT2의 위상차각 ( ° )
$h$ : 압전체의 두께 (m)
$d$ : 탄성체의 두께 (m)
$w_1$ : 탄성체의 총길이 (m)
$w_2$ : 압전체의 길이 (m)
$A, B$ : PZT1과 PZT2의 진폭 (m)
a : 두 압전체 중심간의 거리 (m)
a' : 두 압전체 끝점간의 거리 (m)
$\omega$ : 구동 주파수 (Hz)
$u_{x,z}$ : x 및 z 방향으로 발생되는 변위
$\omega_o$ : 매질 입자의 회전운동

† Corresponding Author, chong@changwon.ac.kr
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

## 1. 서 론

최근 의료, 고분자 화학 분야에 적용되는 MEMS 기술의 발전에 따라 마이크로 유체 이송 시스템 연구와 수요가 증가하고 있다. 이러한 마이크로 유체 이송시스템의 핵심요소인 마이크로 펌프는 사용 목적에 따라 정량의 미세 유체와 더불어 기체화된 연료의 공급 및 시료의 분석, 전달 등을 제어하게 된다. 그러나 기존의 모터구동 펌프의 경우 소형화, 소비 전력 등의 한계로 인하여 성능 및 크기의 제약을 가진다. 이에 주변 환경에 특성이 크게 변하지 않고, 마이크로 단위의 소형화가 가능하며, 빠른 반응성 및 전력 소모가 적은 장점을 가진 압전 펌프의 활용분야가 늘어가는 추세이다. 이러한 분야에 적용되는 압전 구동 방식은 압전소자에 전계를 가하면 기계적인 변위를 발생시키는 역압전 효과를 이용한 것으로, 탄성체와 압전체의 결합방식에 따라 유니모프, 바이모프, 적층형 등이 있다.

일반적으로 사용되는 체크 밸브식의 압전펌프는 유체의 역류현상을 능동 밸브를 사용하여 차단한다.[1~3] 이는 챔버와 챔버 사이에서 액츄에이터의 동작에 따라 압력이 변화하여 반복적으로 열리고 닫히는 방식에서 채택되고 있지만, 유체의 흐름, 반복 동작 등의 요인으로 발생하는 피로 및 마모로 인해 펌프 전체의 효율을 떨어뜨리는 요인이 된다. 이러한 문제점에 대한 해결방안으로 체크밸브 제거식 마이크로 펌프(Valveless Micro Pump) 연구가 진행되고 있다.[4~8]

기존에 연구된 방식들은 체크 밸브를 제거하기 위하여 형상이 다소 복잡하고 1차원적인 단순 반복 동작으로 유체 이송을 구현한다. 그러한 이유로 펌프 자체가 하나의 모듈로써 존재 할 수밖에 없기 때문에 연속적인 유체 이송에 문제가 따른다. 따라서 본 논문에서 제안하는 밸브리스 마이크로 압전 펌프는 일반적으로 진행파를 이용하여 로터를 회전시켜 동작하는 전동기의 원리를 적용하였다.[9] 진행파의 동작 원리는 압전체에 사인파와 코사인파를 인가해 시간적, 공간적 위상차가 90도 다른 두 정재파를 합성해 진행파를 생성시켜 유체를 이동케 하는 방식이다. 이는 Fig. 1과 같이 관내부 탄성체의 굴곡면이 상하대칭으로 이루어져, 여기서 발생되는 180° 위상차의 진행파로 인한 챔버의 수축 및 확장이 이루어진다. 즉, 위장의 연동운동의 모방을 통해 체크 밸브와 같은 추가적 장치를 배제하면서 유동이 연속적으로 이루어지는 새로운 형태의 압전 펌프이다. 이러한 체크 밸브가 없는 방식은 역류 현상을 제거하기가 상당히 난해하므로 다물리 해석 및 성능 예측이 필수이다. 마이크로 펌프의 유체 유동 해석에는 압전소자의 진동 해석 및 CFD(Computational fluid dynamics)와 구조해석이 이루어져야 한다. 이러한 해석을 위해 고체-전기-유체의 연성해석이 가능한 COMSOL Multi-physics를 사용하였으며 펌프의 성능에 해당되는 인자들을 변화시켜 작동 성능을 해석하였다.

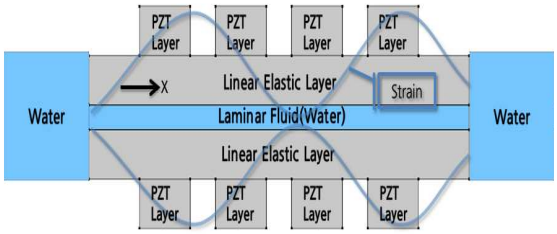


**Fig. 1** The concept of the piezoelectirc pump

## 2. 마이크로펌프의 동작이론[10]

본 마이크로 펌프의 동작은 압전의 진행파 여진 방법과 그 조건에 관한 식에 따라 공간적으로 파장/4만큼 위상차를 가지는 네 개의 압전체에 전극 인가 방향을 조건식에 따라서 배치시킨다. 이후 세라믹 진동자의 시간적으로 주기/4의 위상차가 나는 교류전압을 인가하면 두 정재파의 합성파인 진행파가 만들어진다. 이러한 진행파에 의해 생성되는 굴곡면에 180° 대칭되는 진행파를 서로 마주보게 하면 계면 사이에 존재하는 마이크로 챔버가 진행하게 되고 유체 이송에 적용할 수 있다. 직선 진동체에서는 반무한매체에서의 레일리(Rayleigh)파 및 무한 평면에서의 램(Lamb)파의 주파수가 높은 경우에 자유 경계면에서 매질의 움직임이 Fig. 2와 같다. 매질 입자가 반시계 방향으로 회전하면서 x축 방향으로 파동이 전달되는 변위 타원 운동의 전형적인 동작이다. 또한 주파수가 낮은 영역에서의 평판 굴곡 운동은 진동 및 진폭이 큰 것이 특징이며 이는 Fig. 3과 같은 변위타원운동이 형성됨을 알 수 있다. 수식적으로는

$$u_z = u_0 \sin(\omega t - kx) \tag{1}$$

$$u_x = (-z)\frac{\partial u_z}{\partial x} = (kz)u_0 \cos(\omega t - kx) \tag{2}$$

$$\dot{u}_x = \frac{\partial u_x}{\partial t} = (-kzw)u_0 \sin(\omega t - kx) \quad (3)$$

가 되어 Fig. 4와 같은 타원 운동이 형성된다. 위의 수식으로 알 수 있듯이 타원 운동 형성의 기본 식은 식 (1)로 표현되며, 이는 진행파형 파동으로 형성된다. 다음은 위 수식을 바탕으로 하여 본 논문에 적용된 정재파의 합성이 진행파가 되는 과정을 수식적으로 표현한 것이다. 임의의 자유평면에 PZT1을 탄성체에 접착시키면 아래의 수식에 따라 PZT2의 위치 값이 결정된다. 각 압전체와 탄성체는 완전 결합 형태로 이루어져 있으며 유기되는 굴곡 진동파는

$$Asin(wt-kx)+Asin(wt+kx) \quad (4)$$

$$Bsin(wt-k(x+a)+\varphi) + Bsin(wt+k(x+a)+\varphi) \quad (5)$$

이고, 여기서 a만큼 후에 만들어진 위상차각을

$$-ka+\varphi=\varphi_1,\ ka+\varphi=\varphi_2 \quad (6)$$

으로 놓으면 식 (5)는 식 (7)로 정리되며

$$Bsin(wt-kx+\varphi_1)+Bsin(wt+kx+\varphi_2) \quad (7)$$

이 된다. PZT1, 2에서 여진되는 굴곡파는 식 (4)와 식 (7)의 합이며, 그 합성 굴곡파 가운데 진행파만이 존재하기 위한 조건은 다음과 같다. 즉,

$$\varphi_1 = m\pi,\ m\text{은 짝수}\ (m=0, \pm 2, \pm 4\cdots)$$

$$\varphi_2 = n\pi,\ n\text{은 홀수}(n=\pm 1, \pm 3\cdots) \quad (8)$$

$$\therefore \varphi_1 = -ka+\varphi = m\pi,\ \varphi_2 = +ka+\varphi = n\pi \quad (9)$$

$$2ka=(n-m)\pi$$

$$a=\lambda(n-m)/4\ \ (m\neq n),\ \varphi=\pi(m+n)/2 \quad (10)$$

으로 설정하면 식 (4)와 식 (7)의 합성식은 식 (11)로 표현되어진다.

$$Asin(wt-kx)+Asin(wt+kx) + Bsin(wt-kx+m\pi)+Bsin(wt-kx+n\pi) = (A+B)\sin(wt-kx)+(A-B)\sin(wt+kx) \quad (11)$$

두 압전체에 가해지는 전압의 크기는 같으므로, 즉 A=B가 식 (12)에 적용된다.

$$2Asin(wt-kx) \quad (12)$$

이러한 진행파를 만들어내기 위해서는 세라믹의 배치 및 극성의 설정이 이루어져야 한다.

이는 Fig. 5에서와 같이 사용하는 압전의 개수, 파장의 길이, 압전체의 길이, 압전체와 압전체 사이의 거리 등을 설정하고, Fig. 6과 같이 서로 90도 위상차를 가진 사인(Sine), 코사인(Cosine)의 구동 여진으로 생성된다. Fig. 6에서 (−)부호의 여진은 압전체의 극성을 반전시켜 탄성체에 접착함으로써 구현된다.

이런 형식은 두 개의 정재파를 여진하기 위해

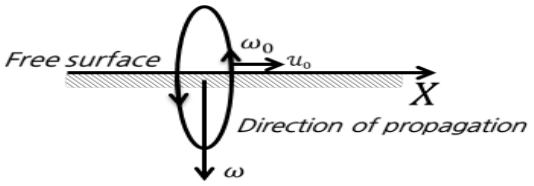


**Fig. 2** The elliptical motion of displacement due to surface wave

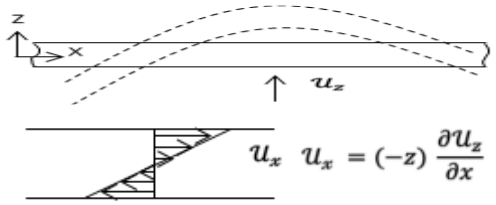


**Fig. 3** The bending motion of the plate at the low frequency range

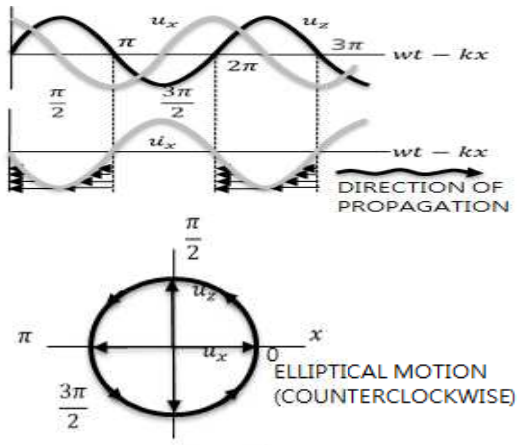


**Fig. 4** The elliptic motion and displacement of the flexural traveling wave

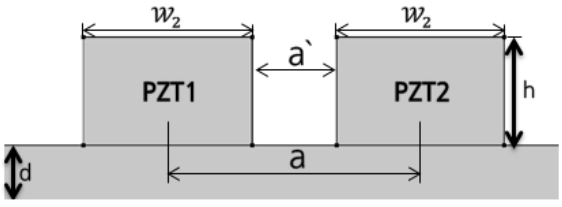


**Fig. 5** The design parameters of piezo devices

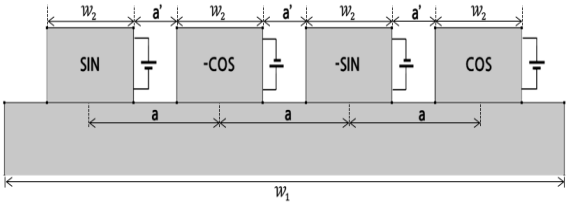


**Fig. 6** The input waveform of piezoelectric plates

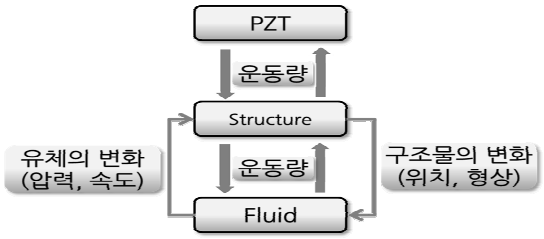


**Fig. 7** The interaction of the multi-physical phenomenon

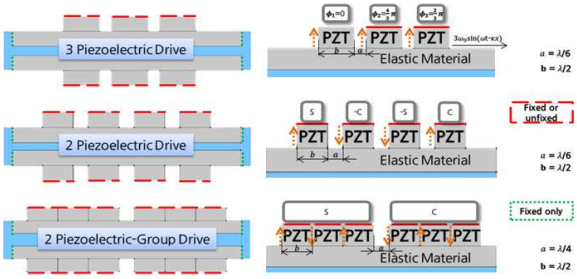


**Fig. 8** The analysis models

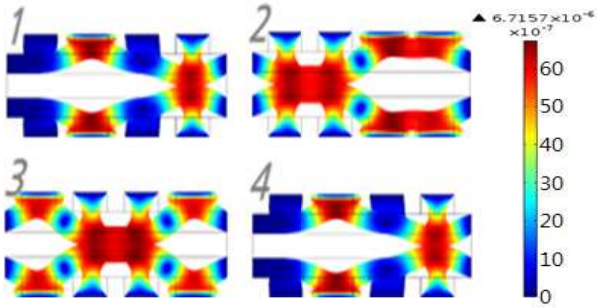


**Fig. 9** The traveling wave-shaped motion

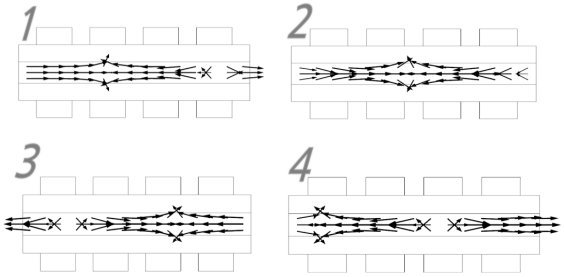


**Fig. 10** The flow direction of fluid

두 개의 진동원을 필요로 하기 때문에 효율이 50% 이하로 높지 않지만 위상차와 유체의 출입 방향을 쉽게 바꿀 수 있다는 장점이 있다.

## 3. 마이크로펌프의 다물리 모델

제안된 마이크로펌프는 부드러운 진행파의 형성 및 위장의 연동운동 형태로 설계를 하였다. 또한 다물리 모델로서 압전체와 탄성체의 변형이 유체에 전달되는 방식으로, 압전체에 교류전압을 인가하게 되면 분극 방향에 따라 인장 및 수축 변형이 반복적으로 발생된다. 이에 탄성체 굴곡면에서 생성된 진행파가 챔버의 볼륨량을 시간에 따라 변화시키면 유체의 위치 및 속도변화에 의한 편향유동이 형성된다. 즉, 교류전압의 진폭이 압전의 변형률에 영향을 주고, 그에 따른 탄성체의 변형이 챔버 안 유속의 변화에 영향을 줌으로써, 결과적으로 챔버의 부피 및 유량의 변화율의 상관관계를 형성한다.

Fig. 7은 유한요소해석 프로그램인 COMSOL Multi-physics를 사용한 연계 해석 절차를 나타내고 있다.[11] 먼저 압전체에서 발생된 압전 변위량을 탄성체와 유체에 커플링 하였다. 이는 구조물의 변위에 따른 속도 변화 값을 관내 유체의 속도와 상호작용을 수행하기 위한 것으로 각 모듈은 유체와 구조물간의 경계면에서 운동량을 주고받게 된다. 또한 시간에 따른 해석을 진행하여 매 시간 간격으로 해가 수렴 될 때까지 반복 계산하는 동안, 압전체에서의 물리적 해를 도출하여 탄성체와 유체로 전달한 후 최종적인 유체의 유량을 산출하였다. 그리고 유체와 구조물간의 경계면은 no-slip으로 설정하여 압전체에서 발생된 진행파에 의한 속도에 의해서만 유체가 이동되게 하였다. Table 1은 해석에 사용된 압전 소자 PZT-4의 물성치를 나타내고, 유체는 물, 탄성체는 알루미늄을 사용하였다. 본 해석을 수행한 워크스테이션의 메모리 사양은 48GB이며 해석 시 사용된 메모리는 평균 1GB이다. 해석 시 적용된 격자는 Mapped-mesh 기법을 사용하였으며 개수는 10,000개에서 시작하여 30,000개 까지 적용 하였다. 해석을 수행한 결과, 격자 개수가 16,200개와 30,000개의 유량 값을 비교 하였을 시 상대오차가 0.017%로 해석 결과 값에 큰 영향을 미치지 않아 16,200개를 격자 개수로 선정하였으며 격자 최대 크기는 0.0583$mm$, 최소 크기는 0.000174$mm$이

**Table 1** The properties of materials

| Material | Property | Value |
|---|---|---|
| PZT-4[12] | Density $[kg/m^3]$ | 7,500 |
| | Elastic stiffness $[N/m^2]$ | $c_{11}=1.39\times10^{11}$<br>$c_{12}=7.78\times10^{10}$<br>$c_{12}=7.43\times10^{10}$<br>$c_{33}=1.15\times10^{11}$<br>$c_{44}=3.06\times10^{10}$<br>$c_{66}=2.56\times10^{10}$ |
| | Piezo electric constants $[C/m^2]$ | $e_{31}=-5.2$<br>$e_{33}=15.1$<br>$e_{15}=12.7$ |
| | Permittivity constants $[F/m]$ | $\varepsilon_{11}=6.74\times10^{-9}$<br>$\varepsilon_{33}=5.87\times10^{-9}$ |
| Aluminum | Density $[kg/m^3]$ | 2,700 |
| | Young's modulus $[GPa]$ | 70 |
| | Poisson's ratio | 0.33 |
| Chamber[13] (water) | Density $[kg/m^3]$ | 997.0479 |
| | Speed of sound $[m/s]$ | 1,480 (@ 25℃) |

다. Fig. 8은 자유 평면에서 압전 소자를 이용해 진행파를 발생시킬 수 있는 대표적 방식 세가지 해석 모델의 형상을 나타내었다. Fig. 9와 Fig. 10은 진행파에 의한 탄성체의 움직임과 그에 따른 유체의 유동방향을 시간에 따라(좌측 상단 1~4) 나타내었다.

## 4. 다물리 시뮬레이션 결과 및 분석

Table 2는 진행파 여진 조건식에 따른 압전 마이크로 펌프의 크기를 나타내었다. 압전에 인가하는 전원의 각 주파수는 160$Hz$, 구동전압은 sin, cos 두 정재파를 각각 100$V$의 진폭으로 적용하였고, 챔버의 입출구의 경우 양방향성을 가진 대기상태로 가정하고 1$atm$을 초기압력으로 가정하였다. 또한 설계 변수는 각 압전체 바닥면을 고정, 비고정으로 나누고 구동방식에 따라 2상($c_4$), 3상($c_3$), 2상 그룹 구동($c_g$)을 적용시키는 실험조건을 설정하여 그에 따른 유량 및 압력특성을 살펴보았다. 그리고 압전체가 인장과 수축을 반복할 때, 최대 거리를 탄성체의 정지 상태와 계산하여 최대 변위의 평균을 구하였다.

**Table 2** The dimensions of materials

| | Width $[mm]$ | Length $[mm]$ | Height $[mm]$ |
|---|---|---|---|
| PZT-4 | 10 | 3.14 | 2 |
| Chamber | 10 | 25 | 0.1~1.3 |
| Alumi-num | 10 | 25 | 2 |

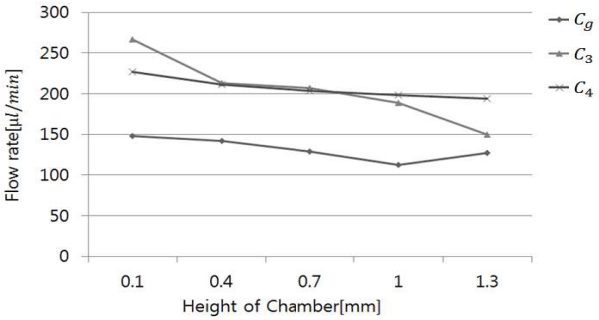


**Fig. 11** The flow rate of the fixed-system

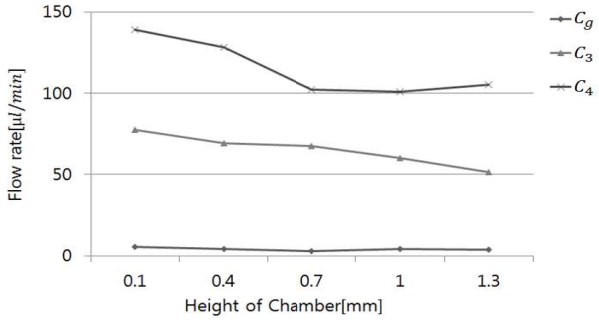


**Fig. 12** The flow rate of the unfixed-system

Fig. 11은 각 압전체의 바닥면을 고정한 후 3가지 형상과 챔버 높이변화에 따른 유량특성을 나타낸다. 2상의 경우 최대변위의 평균은 8.32$\mu m$이며, 챔버의 높이가 0.1$mm$에서 최대 227$\mu\ell$/min의 유량을 나타내었으며, 3상의 경우 최대변위의 평균은 8.96$\mu m$이며, 챔버의 크기가 0.1$mm$에서 최대 267$\mu\ell$/min의 유량을 나타내었다. 2상 그룹의 경우 최대변위의 평균은 3.4$\mu m$이며, 챔버의 크기가 0.1$mm$에서 148$\mu\ell$/min의 유량을 나타내었다. 최대유량의 경우 3상 그룹의 0.1$mm$의 경우가 가장 우수한 유량 특성을 보였고, 지속적인 유량의 경우 2상이 상대적으로 우수한 유량특성을 보인다.

Fig. 12는 각 압전체의 바닥면을 비고정한 후 3가지 형상과 챔버 높이변화에 따른 유량특성을 나타낸다. 2상의 경우 최대변위의 평균은 8.03$\mu m$이며, 챔버의 크기가 0.1$mm$에서 최대 139

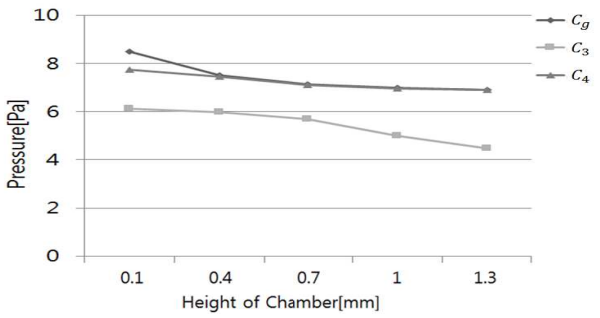


**Fig. 13** The pressure difference depending on the height of the chamber

$\mu\ell$/min의 유량을 나타내었으며, 3상의 경우 최대 변위의 평균은 5.1$\mu m$이며, 챔버의 크기가 0.1$mm$에서 최대 77.4$\mu\ell$/min의 유량을 나타내었다. 2상 그룹의 경우 최대변위의 평균은 3.97$\mu m$이며, 챔버의 크기가 1$mm$에서 4.26$\mu\ell$/min의 유량을 보였다. 최대유량의 경우 2상 구동의 0.1$mm$의 경우가 가장 우수한 유량 특성을 보였고, 지속적인 유량의 경우 3상이 상대적으로 우수한 유량특성을 보인다.

Fig. 13은 3가지 형상에 따른 배압과 챔버 높이 변화의 유량특성을 나타낸다. 2상 경우 0.1$mm$에서 최대 6.13Pa, 3상의 경우 챔버의 크기가 0.1mm에서 7.75Pa의 압력을 나타내었으며, 2상 그룹의 경우 0.1mm에서 8.5Pa의 최대 압력을 보였다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 마이크로 유체 이송시스템의 핵심요소인 마이크로 펌프의 정량의 미세 유체 및 기체의 전달 제어 방법을 제안하였고, 다물리 시뮬레이션을 통하여 마이크로 압전펌프의 활용 및 응용 가능성을 검증하였다.

시뮬레이션 결과, 전체 압전체를 고정하지 않았을 조건보다 압전체 바닥을 고정 하였을 때의 유량이 전반적으로 높았다. 이는 압전 소자의 상단을 고정함으로써 변위량 대부분이 유동관의 수직한 방향으로 집중될 수 있는 반면에, 비 고정식의 경우 변위량이 분산되기 때문에 유량이 줄어드는 것으로 분석되었다. 또한 상단 고정방식에서 2상, 3상의 경우 평균 변위량은 유사하였으나 배압에서의 차이로 인해 유량차이가 나타났다. 또한 유동관의 높이가 높아질수록 토출 압력이 낮아져 유량이 줄어드는 경향을 보였다.

제작비용 및 유량을 감안하였을 때에 구동 방식이 2상이면서 챔버의 높이가 0.1$mm$인 압전 펌프가 효율적일 것으로 판단되므로, 이에 따른 실험 환경을 구축하고 챔버의 크기변화에 따른 유량 측정한다. 그리고 실제 모델에 성능 인자를 시뮬레이션 결과와 비교 분석하여 압전 펌프를 최적화할 계획이다.

## 후 기

이 논문은 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (NO. 2012-0009458)

This research is financially supported by Changwon National University in 2012~2013.

## 참고문헌
(References)

(1) Choi, J. P., Cho, K. C., Kim, H. Y. and Kim, B. H., "Development of Backflow Evented Micropump," *Proceedings of the Korean Society For Technology of Plasticity Conference,* 2005 May 01:229-232

(2) Kang, J. H., 2005, "A High Power Micropump Using Active Check Valves Driven by Piezoelectric Actuators," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology,* 4(4), pp. 39~47.

(3) Cho, W. Y., Ham, Y. B., Seo, W. S., Park, J. H., Yun, S. N. and Choi, B. O., 2007, "Development of a PZT Pump for Liquid Cooling of High Heat Emission Electronic Devices," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering,* June 20, pp. 601~602

(4) Ogawa, J., Kannoa, I. and Kotera, H., 2009, "Development of Liquid Pumping Devices Using Vibrating Microchannel Walls," *Sensors and actuators A: Physical*, 152(2) pp. 211~218.

(5) Oh, J. H., Lim, J. N. and Jeong, E. H., 2009, "Valveless Piezoelectric Micro-Pump Exploiting Two Sided Disk Type Vibrator," *Journal of The Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, 10(18) pp. 159~159.

(6) Yoon, J. S., Choi, J. W., Lee, I. H. and Kim, M.

S., 2007, "A Valveless Micropump for Bidirectional Applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, 135(2) pp. 833~838.

(7) Jang, L. S., Yu, Y. C., 2008, "Peristaltic Micropump System with Piezoelectric Actuators," *Microsystem Technologies : Sensors, Actuators, Systems Integration*, 14(2) pp. 241~248.

(8) Yang, H., Tsai, T.-H. and Hu, C.-C., 2008, "Portable Valve-Less Peristaltic Micropump Design and Fabrication," *Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS*, pp. 273~278.

(9) Ueha, S. and Tomikawa, Y., 1991, "Ultrasonic Motor New Edition," pp. 6~12.

(10) Ueha, S. and Tomikawa, Y., 1991, "Ultrasonic Motor New Edition," pp. 8~12.

(11) Shim, J. S., Kim, H. C. and Jo, M. K., 2011, "COMSOL MULTIPHYSICS Introduction," pp. 436~436.

(12) Ham, Y. B., Oh, S. J., Seo, W. S., Park, J. H. and Yun, S. N., 2009, "A Piezoelectric Micropump for Microscale Pumping Systems," *Journal of the Korea Fluid Power Systems Society*, Vol. 6 No. 2, pp. 17~25.

(13) White, F. M., 2011, "Fluid Mechanics," 7/e, McGraw-Hill, pp. 840~840.