

**밸브리스 연동(連動) 압전펌프의 설계 및 특성**

오진현\*, 정의환\*, 임종남\*, 임기조\*  
충북대학교\*

**Design of valveless type peristaltic micro-pump**

Jin-Heon Oh\*, Eui-Hwan Jeong\*, Jong-Nam Lim\*, Kee-Joe Lim\*  
Chungbuk National University\*

**Abstract** - Recently, there has been increased incessantly an interest in research area on micro-fluidic pump for electronic and biological applications. The proposed pump takes an nonobtrusive operation into the simple displacing mechanism using peristaltic traveling waves without the physical moving valves. And, this piezopump makes up a panel type design. The ATILA simulation was performed to estimate the operating frequency of the vibrating wave mode, to optimize the design conditions of piezopump such as structure, elastic body material, piezoelectric ceramics, and to analyze the distribution of vibration displacement. The best measured value of the pumping rate is about 118  $\mu$ l/min under the following parameters : 4-wave mode, 50kHz operating frequency, 200V<sub>p</sub>.

이는 각각 시간적, 공간적 위상차가 90도(파장/4) 다른 두 정재파를 합성하면 진행파 생성을 실현할 수 있다. 공간적으로 파장/4만큼 서로 어긋나게 배치시킨 세라믹 진동자에 시간적으로 주기/4의 위상차가 나는 교류전압(  $V_1 = V\sin wt$ ,  $V_2 = V\cos wt$  ) 인가시 두 정재파의 합성파가 진행파가 만들어진다. 이러한 진행파에 의해 생성되는 굴곡면에 대칭되는 굴곡면을 서로 마주보게 접합시키면 계면사이에 존재하는 마이크로 챔버가 진행하게 되고 유체 이송에 적용할 수 있다. 다음은 정재파의 합성이 진행파가 되는 과정을 간단히 수식적으로 표현한 것이다.

$$z_1 = a \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \cos \omega t \tag{1}$$

$$z_2 = -a \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \sin \omega t \tag{2}$$

**1. 서 론**

액추에이터와 체크밸브로 구성되는 마이크로 펌프에 관한 연구가 1970년대 중반부터 시작된 이래로, 이러한 종류의 펌프는 미세 유체 운송 시스템의 개발에 있어서 매우 중요한 역할을 담당해왔다. 지난 수십 년 동안 다양한 종류의 펌프모델과 구동원리들이 제안되었으며, 마이크로 펌프의 동작은 대체로 액추에이터의 반복적인 왕복운동에 의한 것이었다. 대부분의 마이크로 펌프는 액추에이터의 동작에 따라 압력을 변화시킬 수 있는 챔버와 챔버 내의 압력 변화에 따라 적절히 열리고 닫힘을 반복하여 유체가 이동할 수 있도록 해주는 역할을 하는 체크 밸브를 가지고 있다[1]. 그러나 밸브는 전술한 바와 같이 반복되는 동작, 유체와의 마찰 등으로 인한 기계적 피로와 마모 등이 발생하여 펌프의 수명 및 성능을 저하시키게 된다.

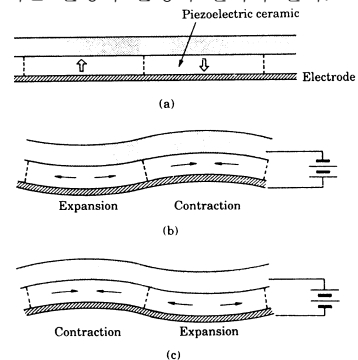
$z_1, z_2$  : standing wave 1, 2  
 $a$  : vibration amplitude  
 $x$  : spatial point of wave  
 $\lambda$  : wave length  
 $\omega$  : circular frequency

$z_1$  과  $z_2$  를 더하면,

$$z = z_1 + z_2 \tag{3}$$

$$z = a \sin\left[\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) - \omega t\right] \tag{4}$$

식 (4)의 진행파를 나타내는 관계식이 최종적으로 얻어진다. 이는 초음파 모터에서 회전자(이동자)의 추력을 얻기 위한 메커니즘으로서 이용되는 진행파 발생의 원리와 같다.



**<그림 1> Principle of producing flexural waves in a beam of monomorphic structure**

**2. 본 론**

**2.1 유체이송 메커니즘**

마이크로 펌프는 구동 방식에 따라 정전형, 열공압형, 전기 삼투압형, 압전형, 형상기억 합금형 펌프 등 여러 가지 종류로 나눌 수 있다. 특히, 압전 세라믹의 진동을 이용하는 압전 구동방식 마이크로 펌프는 액추에이터의 구조가 비교적 단순하며, 변위가 크기 때문에 큰 유체 이송 압력을 실현할 수 있다. 그 밖에도 기계적 응답속도가 빠르고, 인가전압의 변화로 쉽게 유량을 제어할 수 있는 장점을 가지고 있으므로 압전형 마이크로 펌프에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다[2].

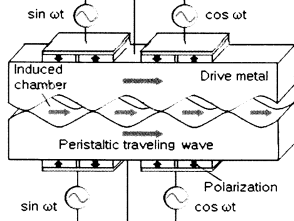
**2.2 마이크로 압전펌프의 설계**

진행파 회전형 초음파 모터의 구동 메커니즘을 고려하면, 압전 세라믹의 진동에 의해 생성되는 진행파의 sin 곡선형태의 굴곡은 마이크로 펌프의 유체 이송용 챔버로 이용될 수 있음을 알 수 있다. 또한 이러한 굴곡 진동은 파형을 그대로 유지하면서 시간에 따라 이동하고, 설계하는 진행파의 파수에 따라 여러 개의 굴곡을 동시에 형성할 수도 있다. 형성된 각각의 챔버는 펌프 본체

<그림 1>은 인가전압에 따른 압전 세라믹의 변형을 나타내는 것으로 분극의 방향에 따라서 신장 및 수축을 일으키게 되어 표면에 굴곡이 나타난다. 즉, 교류전압을 인가하게 되면 분극 처리된 압전 세라믹은 신장과 수축을 반복하여 정재파 진동을 일으키고 이러한 진동에 의해 생성되는 표면의 굴곡은 마이크로 압전 펌프의 유체이송용 공간(챔버)로 이용할 수 있다.  
마이크로 펌프의 가장 큰 이용 목적은 유체의 정밀한 이송에 있으므로 정재파에 의해 생성되는 챔버를 이동시킬 수 있는 방법이 필요하다.

구조에 인가하는 가압력에 의해 서로 차폐되기 때문에 흡입된 유체는 역류 등의 문제를 발생시키지 않고 토출이 가능하다. 따라서 흡입구와 토출구를 적절한 거리로 이격하여 설치하면 체크 밸브 등의 물리적 구동부를 따로 설치하지 않고도 유체의 일방향 이송이 가능하여 마이크로 펌프를 보다 간단한 구조로 제작할 수 있다. 또한 신호 전압이 제거되어 굴곡 진동이 사라지면 펌프 구조 자체에 의한 가압력이 존재하여 흡입구와 토출구는 자동적으로 차폐된다. 따라서 off 동작 유지 상태에서도 유체의 역류 현상은 일어나지 않는다.

<그림 2>는 본 연구에서 설계한 마이크로 압전 펌프의 전체적인 형상을 나타낸 그림이다. 사각형 판 형태의 탄성체 2개를 서로 마주보게 하고 각 판의 반대편 면에는 각각 2장의 판상의 압전 세라믹을 1/4파장만큼 띄워서 부착한 구조이다. 그림에는 나타나 있지 않지만 유체 흡입구, 토출구가 탄성체 판에 있고 유로 양쪽에는 유체의 누설방지를 위해 기밀 되어 있다.



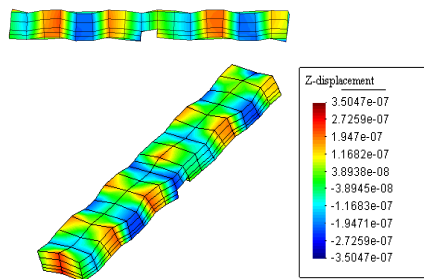
**<그림 2> Principle of peristaltic traveling wave operation for the proposed piezoelectric micro-pump**

**2.3 진동해석 시뮬레이션**

상용화된 유한요소해석 소프트웨어(ATILA)를 사용하여 마이크로 압전 펌프의 형상의 설계 수치와 동작 조건을 도출하였다. 즉, 펌프에 사용되는 부품들의 재질과 동작 모드에 따라 변위 분포 및 동작 주파수, 인가전압 조건 등의 변화를 분석하였다.

<그림 3>은 분석 결과의 한 예로서 4-wave mode일 때의 펌프의 진동 변위 분포를 나타낸 그림이다. 해석의 단순화를 위하여 그림 6의 그림에서 압전 세라믹 판이 부착된 한쪽 탄성체 판만 구형시켰을 때의 결과이며, 탄성체 판 표면에서의 굴곡 진행과 형성이 챔버로 이용될 수 있음을 확인하였다.

<표 1>은 파수 모드의 변화에 따른 진동 진폭의 변화를 나타낸 것이다. 모드의 차수가 증가할수록 진행파의 진폭은 감소하는 경향을 보인다. 전체적으로 동일한 길이일 경우, 차수가 증가할수록 분극에 따른 전극 분할 면적이 감소하기 때문인 것으로 생각된다.



**<그림 3> Vibration analysis result of the proposed piezoelectric micro-pump**

**<표 1> Displacement depending on wave number at 200[V] of input voltage**

	3-wave	4-wave	5-wave
진폭(μm)	0.40	0.35	0.21

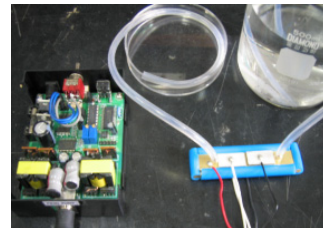
<표 2>는 4-wave mode를 이용하는 펌프에서 인가전압의 크기를 변화시켰을 때 진폭의 변화를 나타낸 것으로 진폭이 전압의 크기에 비례하여 증가함을 확인하였다. 여기에서 진폭의 크기는 챔버의 부피와 관련이 있기 때문에 이는 펌프의 유량제어가 전압을 변화를 통해 손쉽게 구현될 수 있음을 의미하는 것이다. 또한 형상의 modal analysis의 결과 동작 주파수는 약 50 kHz로 계산되었다.

**<표 2> Displacement of 4-wave mode plate depending on input voltage**

	100V	200V	300V
진폭(μm)	0.16	0.35	0.51

**2.4 실험 및 결과**

<그림 4>는 50 kHz, 2상의 정현파(sin ωt, cos ωt)를 동시에 인가할 수 있는 구동회로 시스템에 제작한 펌프를 연결하여 유속 및 배압 특성을 측정하는 모습이다. 유속은 일정한 시간 동안 펌핑된 양을 모은 후 체적을 측정하여 산출하였으며, 최대배압은 토출구에 튜브를 연결하고 수직하게 세운 후 이 튜브에 액체를 채웠을 때, 펌핑이 가능한 최대 액체 높이를 측정하였다. 200 V의 인가전압에서 배압이 영일 때 평균 유속은 118μl/min, 최대 배압(maximum back pressure)은 940 Pa로 측정되었다.



**<그림 4> View of piezoelectric micro-pump driving system**

**3. 결 론**

마이크로 펌프는 액추에이터의 반복적인 왕복운동으로부터 유체의 일방적인 흐름을 얻어내기 위하여 체크 밸브와 같은 별도의 물리적 구동부를 필요로 한다. 하지만 이러한 부품들은 펌프 동작시 반복되는 운동으로 기계적인 마모나 피로를 유발하여 미량의 유체를 정밀하게 제어해야 하는 마이크로 펌프의 특성을 저하시키는 원인으로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 압전체가 부착된 탄성체 판 표면에 생기는 진행 진동파를 이용한 연동운동을 이용함으로써 밸브와 같은 물리적인 구동부를 갖지 않으면서도 유체 흐름의 일방성을 유지할 수 있는 마이크로 펌프를 설계하고 실제 제작하여 성능을 평가하였다. 연동운동을 이용한 마이크로 펌프에서의 유체 이송의 경우, 밸브의 필요성을 고려하지 않아도 된다는 점 이외에도 신호 전압의 변화를 통해 유체 이송 방향의 전환이 용이하다는 점, 챔버 자체의 이동이 내부에서 유체의 대류를 유발하여 유체 혼합 시스템으로의 응용이 가능하다는 점 등 여러 가지 이점을 기대할 수 있다. 따라서 연동운동을 이용하는 미소유체기구의 응용의 확산을 위해서는 후속연구의 지속적 수행이 필요할 것으로 사료된다.

**[감사의 글]**

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원 인력양성사업의 연구결과입니다.

**[참 고 문 헌]**

[1] W. J. Spencer, W. T. Corbett, L. R. Dominguez, B. D. Shafer, "An electrically controlled piezoelectric insulin pump and valves", IEEE Trans. Sonics Ultrason., 1978; SU-25:153-156.  
 [2] P. Gravesen, J. Branebjerg, O. Jensen, "Microfluidics: a review", J. micromech. Microeng. 1993;3:165-182.  
 [3] A. Ullmann, "The piezoelectric valveless pump - performance enhancement analysis", Sens. Actuators, 1998;A69:97-105.  
 [4] J. G. Smits, "Piezoelectric micropump with three valves working peristaltically", Sens. Actuators, 1990;A21 to 23:203-206.  
 [5] K. J. Lim, S. H. Kang, J. S. Lee, "The design and characterization of ultrasonic motor for optical zooming of camera in mobile phones", Ferroelectrics, 2006;338:49-56.