

외팔보 직교형 초음파 모터 개발

서정우, 허진, 성하경  
전자부품연구원

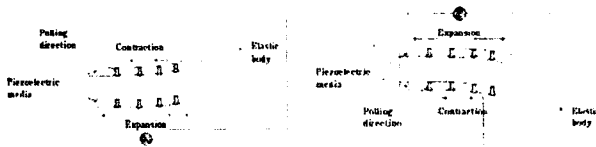
Ultrasonic motor using orthogonal bending modes

Jung-Moo Seo, Jin Hur, Ha-Gyung Sung  
Korea Electronics Technology Institute

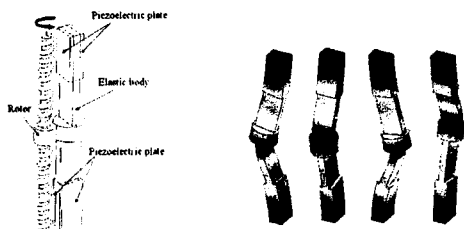
**Abstract** - The main purpose of this paper is to describe a novel ultrasonic motor which is suitable for small information devices. With a bending mode of a bimorph structure having relatively large displacement, the input voltage and frequency could be reduced. The overall shape of the motor is very simple, so it could be manufactured and miniaturized with ease. From the simulated results, such as mode and harmonic analysis, resonance mode, operating frequency, and displacement are determined. The experimental results are compared with the simulated one finally.

1. 서 론

기존의 전자계 모터와 더불어 진왜 및 자왜 소자, 폴리머, 형상기억합금 등을 이용하는 새로운 방식의 액추에이터에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 압전체를 이용한 액추에이터는 일반적으로 소형에서도 효율이 높고 토크 및 위치 정밀도가 우수하며, 백래시가 거의 없는 장점이 있다[1-2]. 본 연구는 이와 같은 압전 액추에이터의 특성을 이용한 새로운 타입의 초음파 모터를 제안한다. 제안된 초음파 모터는 압전 바이모프의 동작 원리를 기본으로 한다. 그림 1과 같이 탄성체를 맞대고 서로 마주보게 접합된 압전 세라믹에 전압을 인가하면 시스템의 고유진동수와 일치하는 주파수 대역에서 공진현상을 일으켜 위아래 방향으로 진동하게 된다. 그림 2와 같이 중간 부분에 실린더 형태의 마찰재를 두고 두 개의 바이모프를 서로 직교하게 연결한 후, 90도의 위상차를 갖는 전원을 두 쌍의 압전체에 각각 인가하면 중간 마찰재는 원의 궤적을 따라 회전하게 된다. 결과적으로 마찰재에 회전자를 접촉시켜 구동함으로써 원하는 회전운동을 얻게 되는 것이다.



〈그림 1〉 압전 바이모프의 동작원리



〈그림 2〉 제안된 초음파모터의 구조 및 위상차를 갖는 전압 인가에 따른 연속적인 동작 형태

2. 본 론

2.1 시뮬레이션에 의한 특성 해석

초음파 모터의 구동주파수 및 변위, 형상 최적화를 위하여 유한요소법을 이용하여 특성을 해석하였다. 압전현상은 전기 및 기계의 연성 해석을 요구하며 이를 위한 지배방정식을 식 (1)에 나타내었다 [3].

$$\begin{aligned} T &= c^T S - e^T E \\ D &= e S + \epsilon E \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서  $T$ 는 기계적인 응력벡터를 나타내며,  $S$ 는 기계적 변형 벡터,  $E$ 와  $D$ 는 전기 및 변위 벡터를 의미한다.  $c^T, e, \epsilon$ 는 각각 탄성계수, 압전상수, 유전상수를 나타낸다. 본 논문에 적용된 압전 세라

믹은 단층 형태로서 인가전압은 20V p-p으로 제한을 두었으며, 이는 향후 적층 세라믹으로 대체할 경우 인가전압을 5V p-p 이하로 낮추어 소형 정보기기 등에 응용될 것으로 전망된다. 변위 증대를 위하여 탄성체로는 스테인리스 스틸 403 계열을 이용하였고[4], 이용된 압전체의 물질계수는 표 1에 나타내었다. 임피던스 해석을 통하여 초음파 모터의 공진 주파수를 확인한 후, 주파수에 따른 변위를 계산하였다.

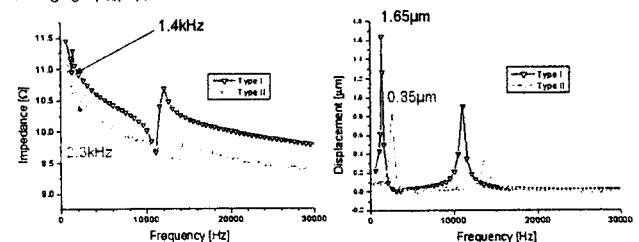
〈표 1〉 초음파 모터에 적용된 압전 세라믹의 물질계수

Item	Value	Unit
Relative dielectric constant $\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	1450	-
Dielectric loss factor at low field & 1kHz $\tan \delta$	0.003	-
Electromechanical coupling coefficient $k_{p,radial}$	0.61	-
Piezoelectric constant $d_{33}$	360	$10^{-12}m/V$
Piezoelectric constant $g_{33}$	28	$10^3Vm/N$
Mechanical quality factor $Q_m$	900	-
Density $\rho$	7.6	$10^3kg/m^3$

〈표 2〉 탄성체와 압전 세라믹의 형상

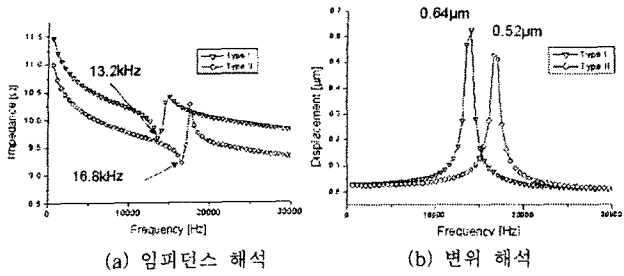
dimension		Type I	Type II
elastic body	width[mm]	1.5	1
	length[mm]	3	3
	thickness[mm]	0.5	1
piezoelectric ceramic	width[mm]	1.5	1
	length[mm]	3	3
	thickness[mm]	0.25	0.25

두 가지 형태의 탄성체를 갖는 모델에 대하여 해석하였다. 직사각형 단면 모양의 바이모프를 갖는 탄성체 모델(Type I)과 정사각형 단면을 갖는 모델(Type II)로서, 양방향에서 결합되는 압전 세라믹의 형상에 해당 탄성체의 접촉면에 따라 다르게 설계 하였다. 표 2에 두 모델의 탄성체 및 세라믹의 형상 정보를 나타내었다. 우선 초음파 모터의 한쪽 끝 부분만을 고정 한 상태에서 공진주파수 및 변위를 해석하였다. 구조상 바이모프 두 부분이 결합된 형태이기 때문에 한 쪽을 고정시킨 후 동작시킴으로써 압전 외팔보의 기본 동작을 확인하기 위해서이다. 그림 3에 의하면 Type I과 II는 각각 1.4kHz와 2.3kHz 근방에서 1차 모드를 갖게 되며 그때의 마찰부 변위는 각각 1.65 $\mu$ m, 0.85 $\mu$ m 정도인 것을 확인할 수 있다. 일반적인 경우 압전 바이모프 세라믹의 두께가 탄성체의 0.8 $\sim$ 1 정도의 비율을 유지할 때 최대 변위를 갖게 되므로, Type I이 더욱 커다란 변위를 갖게 되는 것은 당연하다고 할 수 있다. 하지만 제안된 초음파 모터의 경우, 구조상 기존 바이모프의 일반적 변형 방향뿐 아니라 직교하는 방향의 변형을 추가적으로 요구하기 때문에 Type II의 해석도 병행하였다.



(a) 임피던스 해석 (b) 변위 해석

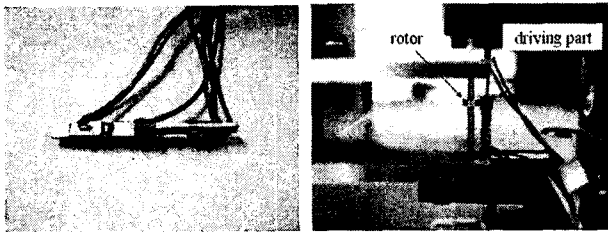
〈그림 3〉 한쪽 끝을 고정 한 상태에서의 공진주파수 및 변위 특성



〈그림 4〉 양쪽 끝을 고정 한 상태에서의 공진주파수 및 변위 특성

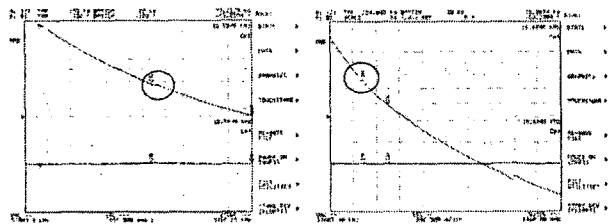
## 2.2 실험 및 고찰

해석 결과를 기반으로 제작된 초음파 모터와 회전자를 그림 5(a)에 나타내었다. 양 끝 부분의 고정을 위하여 탄성체 끝에 2mm의 여유길이를 두었으며, 이액형 애폭시를 이용하여 압전 세라믹을 탄성체에 접착하였다. 그림 5(b)는 구동부인 초음파 모터와 회전자를 결합시킨 측정 세트로서, 회전자 양단은 오일리스 베어링을 이용하여 지그에 고정하였고 마이크로 스테이지를 이용하여 모터와 회전자 사이의 접촉 위치와 정도를 조정 가능하게 하였다. 우선 임피던스 분석기(Agilent 4294A)를 이용하여 초음파 모터의 임피던스를 측정하였다. 측정결과 Type I과 Type II는 각각 10.5 및 15.6kHz 에서 공진 특성을 보였으며 이는 해석 결과와 약 15%정도의 차이를 보였다. 임피던스 측정시 양 끝단을 개방한 상태였기 때문에 캐패시턴스 차이가 발생하였거나 세라믹 접착 과정에서의 임피던스 차이 때문에 발생한 오차라고 판단된다.



(a) 구동부 (b) 구동부와 회전자 결합된 모습

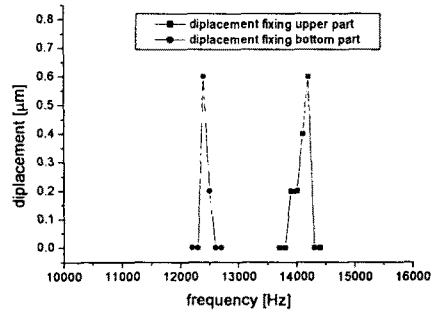
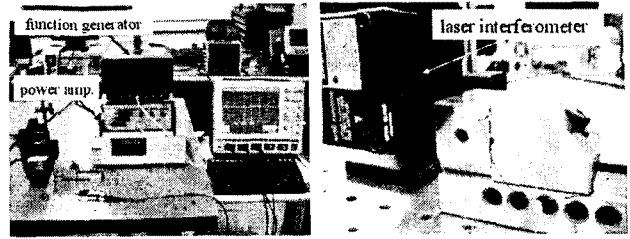
〈그림 5〉 초음파모터 시작품



(a) Type I (b) Type II

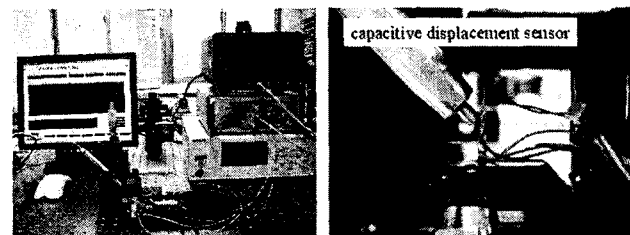
〈그림 6〉 임피던스 분석기를 이용한 초음파모터의 임피던스 측정

초음파 모터의 변위를 측정하기 위하여 그림 7과 같은 실험 장치를 구축하였다. 우선 Type I을 측정대상으로 하였다. 2채널 함수 발생기(NF wave factory 1942)에 전압 증폭기(PI E663)를 연결하여, 주파수를 변화시키면서 90도의 위상차를 갖는 정현파 전압을 두 쌍의 압전 세라믹 전극에 각각 인가하였다. 마찰부의 변위측정은 레이저 변위계(LC-2440)를 이용하였다. 우선 한쪽 끝단을 고정 한 상태에서의 변위를 측정하기 위하여 그림에서와 같이 바이스에 초음파 모터의 한쪽 끝을 고정 한 후 중앙의 마찰재 부분의 변위를 측정하여 그 결과를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 최대 변위는 양 방향 모두 0.6 μm 으로 측정되었으며 주파수 대역에서도 해석값과 다소 차이를 보였다. 편의상 중심 마찰부분을 기준으로 접지라인이 연결되어 있는 부분을 초음파 모터의 하단부, 그 반대를 상단부라고 정의할 때, 상단부의 최대 변위 주파수는 하단부와 비교하여 약 180Hz 정도의 차이를 보였다. 이는 압전 세라믹 접합시의 부정확한 정렬과 틀어짐, 그리고 고정시 압전 세라믹과 바이스 끝단 간의 간격 차이로 인한 오차라고 판단된다. 실제로 압전 바이모프의 경우 최대 변위를 얻기 위한 고정 조건은 압전 세라믹과 고정부 끝단간 간격을 최대한 작게, 그러나 일치하지 않을 만큼 부여하는 것으로 알려져 있다[4]. 다시 말해, 조립 및 고정 과정에서 발생하는 오차로 인하여, 최대 변위와 공진 주파수는 해석값과 차이를 보이게 되며, 제작된 초음파 모터의 상단부와 하단부의 비대칭성으로 인해 각 끝단을 고정했을 경우의 특성도 차이를 보인 것으로 여겨진다.



〈그림 7〉 한쪽 끝을 고정 한 상태에서의 변위 측정 장면 및 결과

양쪽 끝을 고정 한 상태에서의 초음파 모터의 변위를 측정하기 위하여 그림 8과 같이 정전센서를 이용하였다. 이는 앞서 사용된 레이저 변위계의 경우 측정 정밀도가 약 0.2 μm 정도이기 때문에 측정의 신뢰도를 높이기 위함이다. 초음파 모터의 양 끝을 고정 지그에 결합 시킨 후 센서 탐침을 구동부의 마찰재 측면에 접근 시켰다. 13kHz 부근에서 약 0.2 μm의 기계적 진동이 감지되었다. 이는 시뮬레이션 결과와 비교할 때 3분의 1수준의 변위로서, 제작과정에서의 조립 오차 및 고정 지그에 의한 감쇄 등의 영향으로 평가된다. 회전자를 구동부의 마찰재에 접촉시켰으나 위치 조정에 따라 미세한 진동만 발생 한 회전운동이 발생하지는 않았다. 마찰부분에 박막의 고무재질을 붙여 마찰력을 증대시켰으나 작은 변위로 인해 원하는 결과를 얻지 못했다.



〈그림 8〉 양쪽 끝을 고정 한 상태에서의 변위 측정

## 3. 결 론

본 연구에서는 새로운 타입의 초음파 모터를 제안하고 유한요소법을 통해 임피던스 및 변위 특성을 해석하였다. 시뮬레이션을 기반으로 초음파 모터를 제작하였으나 제작과정의 조립 및 구속조건 등의 오차 등으로 인해 궁극적인 모터의 회전운동은 이루어지지 못했다. 향후에는 조립오차를 줄일 수 있는 방법 개발과 적층 세라믹의 적용, 변위 확대를 위한 탄성체 구조개선 등의 연구가 추가적으로 요구된다.

### [참고 문헌]

- [1] James Friend, Kentaro Nakamura, and Sadayuki Ueha, "A Traveling-Wave, Modified Ring Linear Piezoelectric Microactuator with Enclosed Piezoelectric Elements-The "Scream" Actuator," IEEE Transactions on UFFC, Vol. 52, No. 8, pp. 1343-1353, 2005
- [2] Minoru Kurosawa, Takeshi Morita, and Toshiro Higuchi, "A Cylindrical Ultrasonic Micro Motor Based on PZT Thin Film," in Proc. of 1990 IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 549-552, 1990.
- [3] R. Lerch, "Simulation of piezoelectric devices by two- and three dimensional finite elements," IEEE Transactions on UFFC, Vol. 37, pp. 233247, 1990.
- [4] M. J. Cunningham, D. F. L. Jenkins, M. M. Bakush, "Experimental investigation of optimum thickness of a piezoelectric element for cantilever actuator," IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 144, No. 1, pp. 45-48, 1997