

압전 플레이트의 모드 튜닝을 이용한 선형 액추에이터 설계

Linear Actuator using Tuned Modes of a Piezoelectric Plate

최요한† · 이승엽* · 이상구**

Yohan Choi, Seung-Yop Lee and Sanggu Lee

Key Words : Piezoelectric motor(압전모터), Actuator(구동기), Vibration mode(진동모드)

ABSTRACT

In this paper, linear ultrasonic actuators are designed using two dimensional motions of a PMN-PT piezoelectric plate. By equalizing the natural frequencies of longitudinal and transverse vibration modes in the cantilever structure, the ultrasonic motion of the combined vibration modes are generated. We have designed two different PMN-PT actuators: one uses a tip attached on the edge of the actuator and it drives the object in the perpendicular direction of the tip. In other model, the actuator plate moves itself through stationary guides. Prototypes of the two models are manufactured and experiments results are compared to the theoretical and numerical results. The effects of structural characteristics and the friction force existing between the actuator tip and the moving object are considered. Experiments show the possibility of small size ultrasonic linear motors which can be applicable to small form factor information storage and phone camera actuators.

1. 서론

최근 일본을 비롯한 미국과 유럽 등 세계 여러 나라에서는 압전모터를 개발하여 여러 분야에 응용하고 있다. 압전모터란 압전재료(Piezoelectric material)에 전압을 인가하여 발생하는 작은 변위가 초음파 대역에서 축적, 증폭되어 이를 구동기로서 사용하는 기기를 말한다. 전자기력을 이용하는 구동기와는 달리 압전모터는 초소형 부품설계나 높은 응답성의 측면에서 가지는 장점을 갖는다. 압전모터는 다양한 분야에 적용되고 있다. 디지털 카메라에서 렌즈군의 미세한 구동을 통하여 정밀한 포커싱을 하기 위해 압전모터가 사용되기도 하며 손목시계의 바늘을 움직이기 위해 압전모터가 사용되기도 한다.

기존의 압전모터는 대부분이 Stator(Vibrator)와 Slider(rotor)의 구성으로 운동을 발생시킨다. Stator가 표면 또는 끝단에서 타원운동을 발생시켜 마찰력에 의해 Slider에 운동을 전달시키게 되는데 타원운동은 정형파(standing wave)와 진행파(traveling wave)의 중첩으로 발생시킬 수 있다. 이밖에 마찰력을 적절히 조절하여 톱니파를 이용한 관성력을 이용한 형태가 사용되기도 한다. 이러한 압전모터는 대부분이 공진모드에서 구동되

는데 인가하는 신호 대역이 대부분 20~200kHz의 초음파 대역으로 사용된다. 이 때문에 압전모터는 초음파모터로 불리기도 한다. 가진 신호는 대부분 structure의 공진 모드를 사용한다.

본 논문에서는 압전 액추에이터의 변위를 증폭하기 위하여 두 가지 공진 모드를 동시에 사용하고자 한다. 이는 외팔보의 형태로 설계된 압전재료의 적절한 설계변수(L, W, T)의 조절을 통하여 두 가지 공진모드를 동일한 주파수 대역으로 튜닝할 수 있게 된다.

2. 압전 플레이트의 이론과 설계

2.1 압전모터의 구동 원리

대부분의 타원형 운동을 발생시키는 압전모터는 공통적으로 타원형 운동에 대한 고찰이 필요하다. Fig.1에서 볼 수 있듯이 타원형 운동을 발생시키기 위해서 본 논문에서 설계한 PMN-PT 단결정 액추에이터의 끝단에서의 운동 성분을 u_w 와 u_l 로 나누어 각 성분의 응답을 수학적으로 표현할 필요가 있다. 여기서 u_w 는 액추에이터의 횡방향으로의 변위를 나타내며 u_l 는 길이방향으로의 변위를 나타낸다. 외팔보의 간단한 수식을 이용하면 길이방향 진동모드에 관한 다음과 같은 수식을 도출할 수 있다.

$$u_{l,r}(x,t) = C_1 \cos(\beta_r x) \sin(\omega_r t) \quad (1)$$

단면적(A)과 길이당 질량(m)을 일정하다고 가

† 최요한; 서강대학교 기계공학과
E-mail : johan1108@sogang.ac.kr
Tel : (02) 706-8280, Fax : (02) 712-0799

* 서강대학교 기계공학과 교수

** ㈜아이블포토닉스

정하면 길이(L)의 함수로 표현되는데 이것은 길이방향(Longitudinal) 모드는 길이를 조절함으로써 원하는 주파수로 튜닝이 가능함을 의미한다. 또한 횡방향 진동모드는 FEM 을 통한 예측이 가능하다.

본 논문에서 제시하고자 하는 모델은 타원 운동의 두 변위 성분을 각각 길이 방향의 모드와 횡방향의 2 차 굽힘방향 모드를 이용하게 된다. 두 가지 공진 모드를 적절한 길이(L)과 폭(W) 및 두께(T)의 조절을 통하여 같은 주파수를 갖도록 설계한다.

Fig 1 에서 외관보 형태로 설계된 PMN-PT 단결정 액추에이터의 끝단에 Alumina ceramic tip 을 통해 slider 에 타원운동을 전달하게 된다. 여기서 사용하고자 하는 모드형상은 Fig. 2 와 같다.

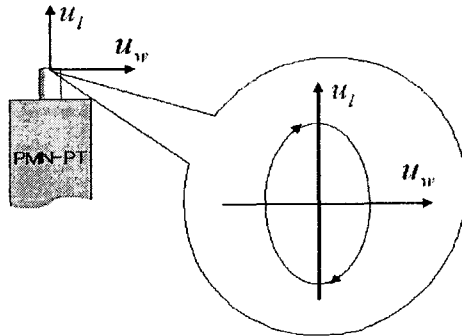


Fig 1 Elliptical motion around the PMN-PT tip

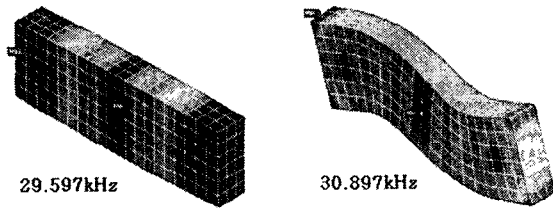


Fig 2 1st Longitudinal mode and 2nd Bending mode

2.2 PMN-PT 액추에이터의 사이즈 튜닝

첫번째 길이방향 모드는 식 (2)를 통해 간단히 구할 수 있다. 액추에이터의 사이즈를 25(L) × 7.5(W) × 3(T)mm 로 하였을 때 다음과 같이 29.4kHz 의 결과를 보인다.

$$\omega_{11} = \pi \sqrt{\frac{EA}{mL^2}} = 29.445kHz \quad (2)$$

또한 굽힘방향 모드를 알아보기 위해 모드해석을 수행하였다. 모드해석 결과는 Table 2 와 같다. Table 2 에서 29.597kHz 의 첫번째 길이방향 모드(axial-direction)와 30.897kHz 의 두번째 굽힘

방향 모드(y-direction)가 매우 근접하고 있기 때문에 입력신호를 약 30kHz 의 입력신호를 가진 하게 되면 두 모드가 동시에 발생하게 되어 액추에이터 끝단의 세라믹 팁은 타원 운동(Elliptical motion)을 발생시키게 된다.

Table 1 Mechanical Properties of PMN-PT material

Density	7843 kg/m ³
Young's Modulus	17 GPa

Table 2 Modal Analysis Result of PMN-PT Actuator

Frequency (kHz)	Mode shape
6.7	1 st Bending mode(z-direction)
11.887	1 st Torsion mode
14.563	1 st Bending mode(y-direction)
17.916	2 nd Bending mode(z-direction)
24.018	2 nd Torsion mode
29.597	1 st Longitudinal mode(axial-direction)
30.897	2 nd Bending mode(y-direction)
32.102	3 rd Bending mode(z-direction)

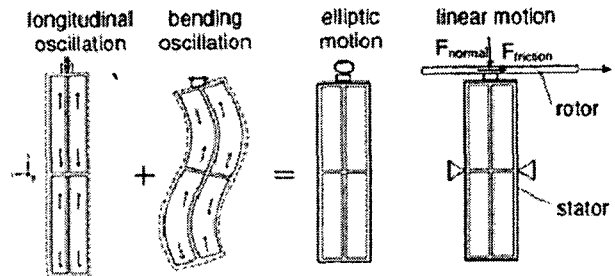


Fig 3 Working principle of the elliptical motion

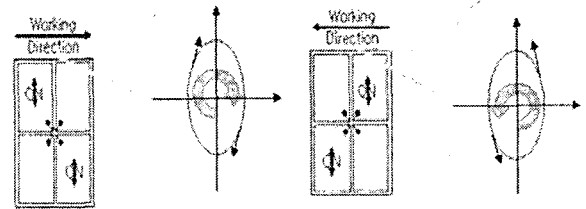


Fig 4 Elliptical motion clockwise and counter-clockwise by excitation

두 모드를 효과적으로 발생시키기 위해서는 액추에이터를 가진을 최적화시킬 필요가 있다. 따라서 본 논문에서 설계한 액추에이터는 Fig. 4 와 같이 사분할 된 면의 전극을 대각 위치의 면의 전

극을 연결하고 서로 다른 대각 위치의 면끼리는 전극을 분할(Isolation)시켜 입력신호가 대각 면끼리 같은 신호를 입력 받게 되어 횡방향의 굽힘방향 모드를 발생시킨다. 또한 사분할 된 면과 마주보고 있는 반대편 면에는 별도의 분할면을 만들지 않아 길이방향 모드를 형성하게끔 해야 한다.

2.3 PMN-PT 액츄에이터의 제작 및 성능

앞서 이론적, 수치적인 해석 결과를 바탕으로 액츄에이터를 제작하였으며 주파수 응답을 통한 이론의 검증과 두 모드를 동시에 발생시키기 위한 30kHz의 입력신호를 인가하였을 때 길이 방향과 직각 방향의 변위를 측정하였다.

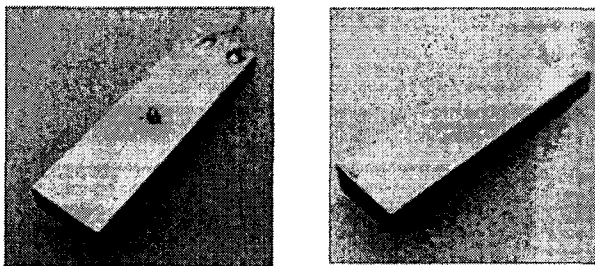


Fig 5 PMN-PT Single crystal actuator: front side view (left) and back side view (right)

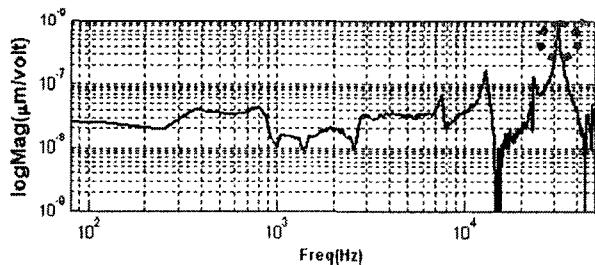


Fig 6 Frequency Response of PMN-PT Actuator

Table 3 Comparison of axial and perpendicular strokes

Input sine Signal frequency	29.5kHz	30kHz
y-direction(μm)	0.230	0.304
Axial direction(μm)	0.324	0.498

* LDV sensitivity : 2μm/V

횡방향 변위를 측정한 실험결과(Fig 6)를 살펴 보면 앞서 해석한 모드와 상당수 일치함을 알 수 있다. 특히 길이방향 모드와 굽힘방향 모드가 연성되어 나타나는 30kHz 부근에서 가장 높은 peak를 보이고 있다. 또한 30kHz 부근의 입력에 대한 횡방향 변위와 길이방향의 변위를 비교하면 Table 3과 같다.

3. 액츄에이터의 선형 구동 실험

앞서 설계된 PMN-PT 단결정 액츄에이터를 이용하여 선형 구동을 하기 위한 실험 지그를 제작하였다. 액츄에이터의 끝단에서 발생하는 타원 운동을 이용하는 방법과 옆면에서 발생하는 타원 운동을 이용하는 두가지 모델을 따로 구현하였으며, 이후 전자를 액츄에이터 type1 그리고 후자를 type2라 하겠다.

3.1 선형구동 실험 (type1)

Fig 7와 같이 제작된 액츄에이터의 끝단에 세라믹 팁을 부착하여 타원운동을 slider로 제작된 plate에 전달하기 위해 slider 역시 세라믹(Alumina)를 사용하였으며 효과적인 운동의 전달을 위해 스프링과 정밀 스테이지에 의한 pre-load를 가하여 실험을 수행하였다. 구동원리는 Fig 3과 같다.

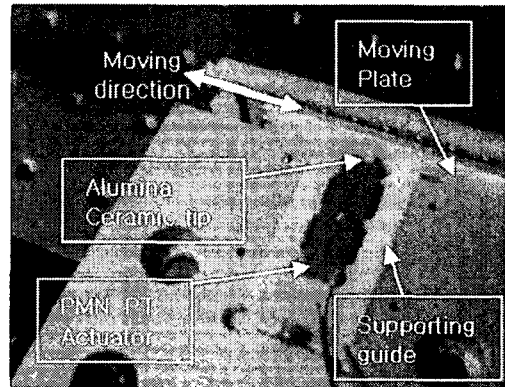


Fig 7 Linear actuator experiment: type1

3.2 선형구동 실험 (type2)

PMN-PT 끝단에서 발생하는 타원형 운동은 액츄에이터의 주위를 타고 같은 방향으로 발생하게 된다. 이를 이용하여 사용하는 진동 모드인 2차 bending 모드 형상을 길이방향의 옆면에 세라믹 팁을 부착하면 액츄에이터 스스로 움직이는 형태의 선형구동이 가능하게 된다. 구동원리는 Fig 8과 같다.

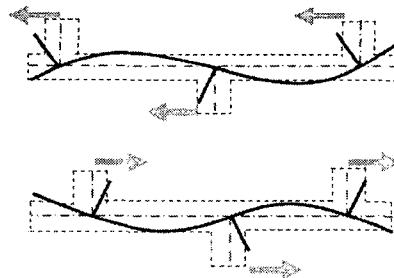


Fig 8 Working principle of PMN-PT actuator for self-moving

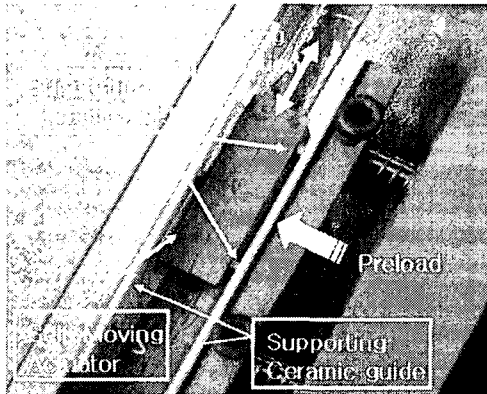


Fig 9 Linear self-moving actuator experiment: type2

3.3 실험 결과 및 고찰

스프링에 의한 Pre-load 가 구동여부에 민감하게 작용하기 때문에 정밀스테이지를 이용하여 스프링의 압축력을 조절하여 Pre-load 를 인가하였다. 측정은 LDV 센서를 이용하여 변위를 측정하였으며 다음과 같은 그래프로 정리된다.

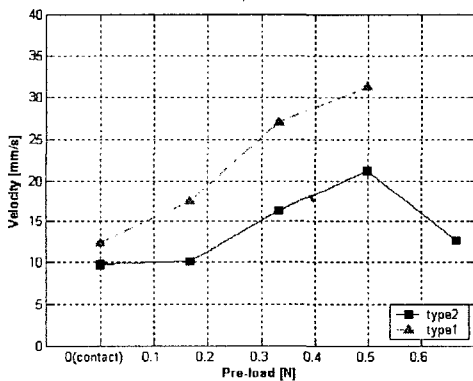


Fig 10 Velocity profile depending on the pre-loads (Input voltage: 70 V)

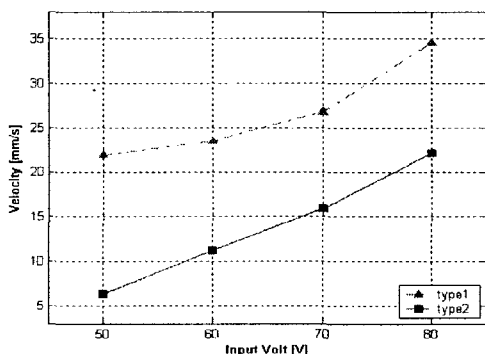


Fig 11 Velocity profile depending on input voltage (applied pre-load: 0.322 N)

Fig 10 을 통해 알 수 있듯이 pre-load 가 가해지지 않고 단지 접촉하고 있는 경우 접촉면에서 운동이 제대로 전달되지 않아 선형적인 구동이 일어나지 않았으며 반면 너무 크게 작용하면 마찰이

오히려 운동을 방해하여 구동하지 않게 된다. 적절한 마찰의 증가는 타원운동을 더욱 확실하게 선형구동에 반영할 수 있기 때문에 속도가 증가함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구를 통하여 압전 플레이트의 길이(L)와 폭(W) 두께(T)를 적절히 조절하면 두 진동모드를 동시에 사용하여 더욱 큰 변위를 얻어낼 수 있음을 확인하였으며 좀더 확실한 운동의 전달을 위해서는 Pre-load 의 적절한 조절을 필요로 해야 한다. 결과적으로 두 시스템 모두 입력 전압이 증가할수록 빠른 속도로 구동하는 경향을 보이고 있으며 입력 신호주파수는 30kHz 부근에서 벗어나면 구동이 불가능하거나 연속적이지 못한 운동의 전달을 보인다. Fig 10 에서 그래프에 표현되지 않은 Pre-load 영역은 운동의 전달이 이루어지지 않아 구동하지 않은 경우이다. 따라서 구동이 가능한 영역의 Pre-load 를 인가하면 앞서 사용된 두 방식의 새로운 개념을 이용한 선형 구동기로서 사용이 가능하다고 할 수 있겠다.

후 기

본 연구는 산자부 차세대신기술개발사업 (과제번호 10006623-2005-21)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) T. Bein, E. J Breitbach, K. Uchino, 1997, "A linear ultrasonic motor using the first longitudinal and the fourth bending mode", Smart Mater. Struct. Vol.6, pp.619-627
- (2) Y. Roh, J. Kwon, 2004, "Development of a new standing wave type ultrasonic linear motor", Sensors and Actuators, Vol. A, No. 112, pp.196-202
- (3) K. Uchino, 1997, "Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors", Kluwer, Academic Publishers, Boston, London.
- (4) M. Kuribayashi, S. Ueha, E. Mori, 1985, "Excitation conditions of flexural traveling waves for a reversible ultrasonic linear motor", J. Acoust. Soc. Am. 77, pp. 1431-1435.
- (5) W. Seemann, 1996, "Ultrasonic traveling wave linear motor with improved efficiency", SPIE Proc. 2717, pp. 554-564.
- (6) S.-Y. Lee, H. Lee and T. Kwon, 2006, "Design and Analysis of inchworm type focusing actuator using ring-type piezoelectric materials", MIPE 2006, Santa Clara CA, USA, pp. 312-314
- (7) S.-Y. Lee, B. Ko, and W.-S. Yang, December 2005, "Theoretical Modeling, Experiments and Optimization of Piezoelectric Multimorph", Smart Materials and Structures, Vol. 14, pp. 1343-1352