

압전 재료를 이용한 선형 액추에이터 설계

최요한, 김경호, *이승엽
서강대학교 기계공학과

Design of a Linear Actuator using Piezoelectric Materials

Y. H. Choi, K.H. Kim, *S.-Y. Lee
Dept. of Mechanical Engineering, Sogang University

Key words : Piezoelectric material, Ultrasonic motor, Actuator, Vibration mode

1. 서론

최근 일본을 비롯한 미국과 유럽 등 세계 여러 나라에서는 압전모터를 개발하여 여러 분야에 응용하고 있다. 기존의 압전모터는 대부분이 Stator(Vibrator)와 Slider(rotor)의 구성으로 운동을 발생시킨다. Stator가 표면 또는 끝 단에서 타원운동을 발생시켜 마찰력에 의해 Slider에 운동을 전달시키게 되는데 타원운동은 정형파(standing wave)와 진행파(traveling wave)의 중첩으로 발생시킬 수 있다.

본 논문에서는 압전 액추에이터의 변위를 증폭하기 위하여 두 가지 공진 모드를 동시에 사용하고자 한다. 이는 외팔보의 형태로 설계된 압전재료의 형상과 관련된 적절한 설계변수들을 조절하여 직육면체 형상의 두 가지 공진모드를 동일한 주파수 대역에서 공진이 일어나게 한다.

2. 압전모터의 이론과 설계

대부분의 타원형 운동을 발생시키는 압전모터는 공통적으로 타원형 운동에 대한 고찰이 필요하다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 타원형 운동을 발생시키기 위해서 설계한 PMN-PT 단결정 액추에이터의 끝 단과 표면에서의 운동을 길이 방향과 폭 방향으로 나누어 각 성분의 응답을 수학적으로 표현할 필요가 있다. 여기서 u_w 는 액추에이터의 폭 방향 변위를 나타내며 u_l 는 길이방향으로의 변위를 나타낸다. 외팔보의 간단한 수식을 이용하면 길이방향 진동모드에 관한 다음과 같은 수식을 도출할 수 있다.

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

경계조건은 양쪽을 자유단으로 적용하였다. (3)번 식에서 단면적(A)과 길이당 질량(m)을 일정하다고 가정하면 길이(L)의 함수로 표현되는데 이것은 종방향(Longitudinal) 모드는 길이를 조절함으로써 원하는 대역으로 쉽게 튜닝이 가능함을 의미한다. 폭 방향 굽힘 모드는 단순한 오일러 보로 가정하면 상당한 오차를 보이기 때문에 Timoshenko 보로 가정하거나 FEM 프로그램을 이용하여 계산한다. 타원 운동의 두 변위 성분을 각각 길이(L; axial-direction)방향의 종방향(longitudinal)모드와 폭 방향(W; y-direction)의 2 차 굽힘모드를 이용하게 된다. 두 가지 공진 모드를 적절한 길이(L)과 폭(W) 및 두께(T)의 조절을 통하여 같은 주파수 대역으로 설계할 수 있다.

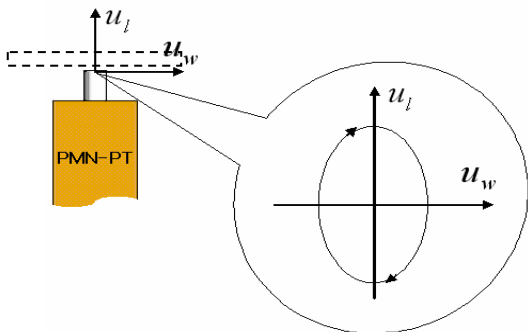


Fig 1. Elliptical motion on Alumina Ceramic tip

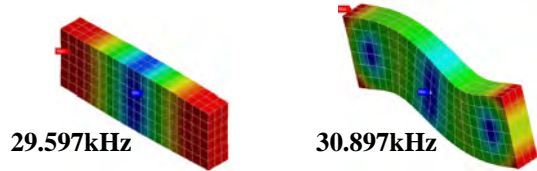


Fig 2. 1st longitudinal and 2nd bending mode

Fig. 1에서 외팔보 형태로 설계된 PMN-PT 단결정 액추에이터의 끝 단에 Alumina ceramic tip을 통해 slider에 타원운동을 전달하게 된다. 여기서 사용하고자 하는 모드형상은 Fig. 2과 같다.

사이즈를 결정하기 전에 1st 종방향모드는 식 (3)을 통해 간단히 구할 수 있다. 다음과 같이 PMN-PT의 물성을 사용하여 액추에이터의 사이즈를 25(L)×7.5(W)×3(T)mm로 하였을 때 식(3)과 같이 29.4kHz의 결과를 보인다.

$$\omega_{11} = \pi \sqrt{\frac{EA}{mL^2}} = \pi \sqrt{\frac{(17 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2 / \text{m}^2)}{(7843 \text{ kg} / \text{m}^3)(0.025 \text{ m})}} = 29.44 \text{ kHz} \quad (3)$$

각각의 모드 형상은 Fig. 2와 같다. PMN-PT 단결정의 사이즈를 25(L)×7.5(W)×3(T)mm로 설계하면 두 모드의 주파수를 거의 30kHz로 일치시키는 것이 가능하기 때문에 입력신호를 30kHz로 가진하게 되면 두 모드가 동시에 발생하게 되어 액추에이터 끝 단과 단결정의 표면에서 타원 운동(Elliptical motion)을 형성한다.

두 모드를 효과적으로 발생시키기 위해서는 액추에이터의 가진을 최적화시킬 필요가 있다. 따라서 본 논문에서 설계한 액추에이터는 Fig. 3과 같이 사분할 된 면의 전극을 대각 위치의 면의 전극을 연결하고 서로 다른 대각 위치의 면끼리는 전극을 분할(Isolation)시켜 입력신호가 대각 면끼리 같은 신호를 입력 받게 되어 횡 방향의 굽힘모드를 발생시킨다. 또한 사분할 된 면과 마주 보고 있는 반대편 면에는 별도의 분할 면을 만들지 않아 종방향모드를 형성하게끔 하였다.

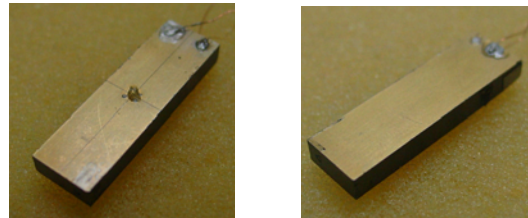


Fig 3. PMN-PT Single Crystal Actuator, left ; front isolated side, right ; back side

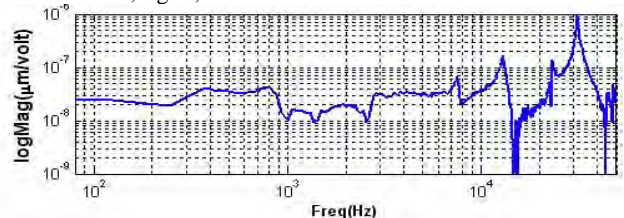


Fig 4. Frequency Response of PMN Actuator

3. 액추에이터의 제작과 선형구동 실험

측정한 실험결과(Fig. 4)를 살펴보면 앞서 해석한 모드와 상당수 일치함을 알 수 있다. 특히 종방향모드와 굽힘모드가 연성되어 나타나는 30 kHz 부근에서 가장 높은 peak 가 나타나 액추에이터의 구동은 앞서 예상한 바와 같다고 할 수 있다. 선형구동 액추에이터로서 구동원리는 Fig. 5의 (a)와 같이 끝 단의 세라믹 팁을 부착하여 타원운동을 이용하는 방법(type1)과 (b)와 같이 굽힘모드발생시 옆 면의 절점에 팁을 부착하여 양 옆면에서 타원운동을 전달하는 방식(type2)으로 간단한 선형 구동 실험을 실행하였다. 스프링에 의한 Pre-load 에 구동여부가 민감하기 때문에 정밀스테이지를 이용하여 스프링의 압축력을 조절하여 Pre-load 를 인가하였다. 측정은 Polytec LDV 센서를 이용하여 속도와 변위를 동시에 측정하였으며 입력 전압과 Preload 에 따른 결과를 Fig. 8 과 9로 나타내었다.

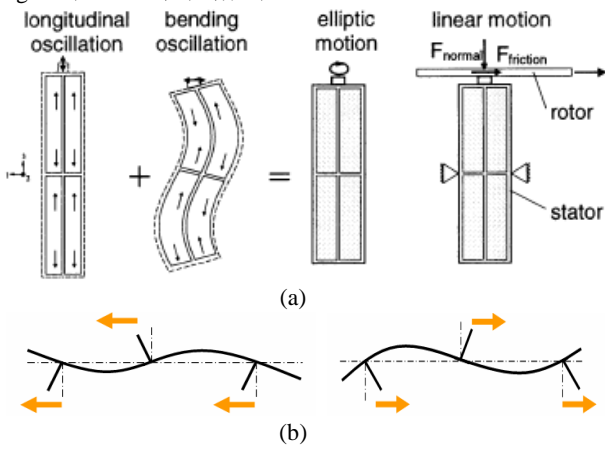


Fig 5. (a)Working Principles of Experiment type1: (b) type2:

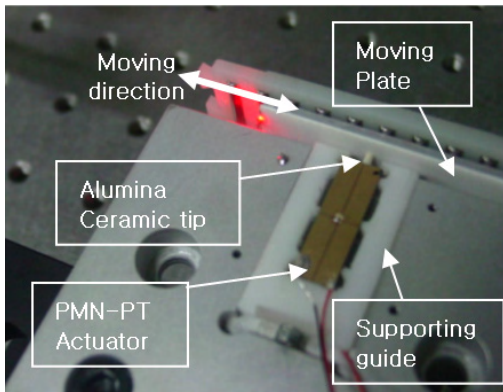


Fig 6. Linear Actuator Experiment : type 1

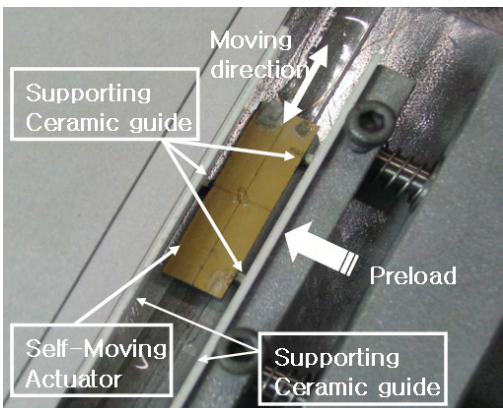


Fig 7. Linear Actuator Experiment : type 2

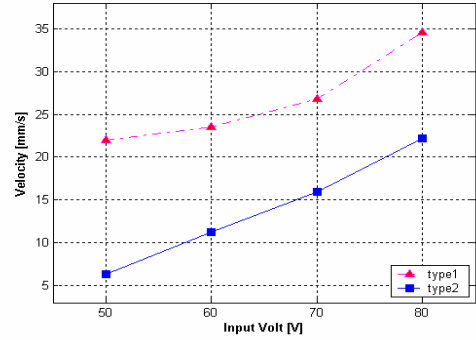


Fig 8. Velocity depending on the input voltages

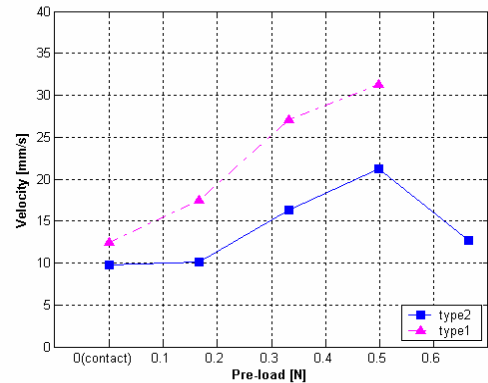


Fig 9. Velocity depending on the Pre-loads

4. 결론

본 연구를 통해서 압전 액추에이터의 두 진동모드를 동시에 사용하여 더욱 큰 변위를 얻어낼 수 있음을 확인하였으며 운동의 전달을 위해서는 Pre-load 의 적절한 조절을 필요로 하게 된다. 결과적으로 두 시스템 모두 입력 전압이 증가할수록 빠른 속도로 구동하는 경향을 보이고 있으며 입력 신호주파수는 30 kHz 부근에서 벗어나면 구동이 불가능하거나 연속적이지 못한 운동의 전달을 보인다. Fig. 9에서 그래프에 표현되지 않은 Pre-load 영역은 운동의 전달이 이루어지지 않아 구동하지 않은 경우이다. 따라서 구동 영역의 Pre-load 를 이용하면 앞서 사용된 두 방식의 선형 구동기로서 사용이 가능하다고 할 수 있겠다.

후기

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

참고문헌

1. Thilo Bein, Elmar J Breitbach, Kenji Uchino, 1997, "A linear ultrasonic motor using the first longitudinal and the fourth bending mode", Smart Mater. Struct. Vol.6, pp.619-627.
2. Lee, S.-Y., Ko, B. and Yang, W.-S., December 2005, "Theoretical Modeling, Experiments and Optimization of Piezoelectric Multimorph", Smart Materials and Structures, Vol. 14, pp. 1343-1352.
3. K. Uchino, 1997, "Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors", Kluwer, Academic Publishers, Boston, London.
4. 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.