

## 적층 압전세라믹을 이용한 초음파 리니어 모터의 설계 및 해석

### Design and Analysis of Ultrasonic Linear Motor Using Multilayer Piezoceramics

김태열, 김범진, 박태곤, 김명호\*  
창원대학교 전기공학과, \*창원대학교 세라믹공학과  
Tae-Yoal Kim, Beom-Jin Kim, Tae-Gone Park, Myong-Ho Kim  
Dept. of Electrical Eng., Changwon National Univ.  
\*Dept. of Ceramic Eng., Changwon National Univ.

#### Abstract

An ultrasonic linear motor was composed of a slider and a stator vibrator including piezoelectric material and elastic material. The ultrasonic linear motors mainly consist of an ultrasonic oscillator which generates elliptical oscillations. Elliptical oscillations are generated by synthesizing two degenerated modes. The design of a stator for an ultrasonic linear motor was optimized with respect to vibration mode and direction of vibratory displacement by employing the finite element method. Applying multilayer piezoelectric ceramics, we found larger elliptical oscillations. The motors were designed by varying the width of stator vibrator and the thickness, the length and the position of multilayer piezoelectric ceramics.

**Key Words(중요용어) :** Ultrasonic Linear Motor, Finite Element Method, ANSYS

#### 1. 서론

압전세라믹을 사용하는 초음파 모터는 압전세라믹의 신속한 발전에 따라 매우 빠른 속도로 발전하고 있다. 초음파 모터는 압전 액츄에이터의 새로운 개념으로 여러 가지 특징이 있다. 전자기 모터와는 메커니즘이 전혀 다른 초음파 모터는 전기입력에 의하여 진동체에 미소한 탄성진동을 일으키고, 이 탄성진동을 이용한 마찰력에 의하여 회전운동을 발생시키는 모터이다. 전자기식 모터에 비하여 소형이며 간단한 구조를 이루고 저속에서 높은 토크를 발생한다. 특히 리니어 모터는 기어를 사용하지 않고 정밀위치 제어가 가능한 X-Y 스테이지 등의 구성에 유용하다.<sup>[1]</sup> 전자파를 발생하지 않기 때문에 주사형 전자현미경의 스테이지, 전자노이즈를 피하는 측정기구의 스테이지 구동으로 적합하다. 적층(multilayer)의 압전세라믹을 사용함으로써 초음파 진동자의 수명을 향상시키고 구동전압을 낮출수 있다.

유한요소법에 의한 초음파 모터의 해석은 주로 공진 주파수 해석과 공진 모드에 따른 변위량 해석 및 모델설계에 유용하게 사용이 되고 있다.<sup>[2]</sup> 유한

요소 프로그램인 ANSYS 5.5.1을 이용하여 압전세라믹의 두께를 고정된 상태에서 층수를 변화시켜서 가장 효율적인 모델에서 고정진동자의 폭과 압전세라믹의 폭 그리고 압전세라믹의 길이, 두께, 부착 위치를 변화시켜 각각의 모델이 공진주파수에서 구동할 때의 변위량을 해석하여 초음파 리니어 모터의 최적설계를 하였다. 그리고 압전세라믹을 적층함으로써 고정진동자의 변위량이 증가함을 알수 있었다.

#### 2. Euler-Bernoulli 이론식에 의한 L1-B4 리니어 모터의 설계

1차 종진동과 4차 굴곡진동을 이용하여 초음파 리니어 모터의 설계시 고려하여야할 사항은 고정진동자의 기하학적 크기이다. n차 굴곡진동모드의 공진주파수는 보의 굽힘에 관한 기본이론(Euler-Bernoulli theory)을 이용하였고 회전관성과 전단 변형의 영향을 무시하였다.<sup>[3]</sup> n차 종진동모드의 공진주파수는 봉이나 막대의 x방향 힘의 합 운동방정식에서 유도할 수 있다.<sup>[4]</sup> 각각의 공식은

$$f_{Bn} = \frac{a^2 f}{4\pi\sqrt{3}l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \alpha_n \approx \left(\frac{2n+1}{2}\right)\pi \quad (1)$$

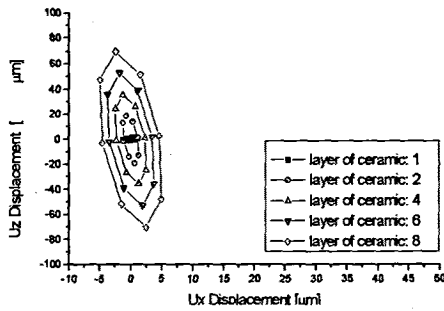


Fig. 1. Comparison of displacement by varying layer of piezoceramics

$$f_{Ln} = \left( \frac{n}{2l} \right) \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

$E, \rho, l, n$ 는 각각 탄성체의 영률, 밀도, 길이, 두께를 의미한다.

$$f_{Ln} = f_{Bn} \quad (3)$$

식 (3)조건에서 탄성체를 설계하여야 가장 좋은 효율을 얻을 수 있다. 따라서 식(1)과 (2)를 식(3)에 대입함으로써 식(4)를 구할 수 있다.

$$l = \frac{a^2 t}{2\pi\sqrt{3}} \quad (4)$$

식 (4)로부터 탄성체의 길이와 두께 그리고 공진주파수를 결정할 수 있다. 실제 제작할 진동자는 압전세라믹과 전극니드선의 접착 때문에 공진주파수가 변경되므로 미세한 수정이 필요하다.<sup>(5)</sup> 위의 식에서 설계한 알루미늄 탄성체의 치수는  $36.7293 \times 3.19409 \times 2(\text{mm})$ 이고 공진주파수의 이론치는  $72.224(\text{kHz})$ 이다.

### 3. ANSYS를 이용한 변위량 해석

#### 3.1 압전세라믹의 적층(multilayer)에 따른 변위량 해석

초음파 모터는 공진주파수에서 구동시키는데 실제로 구동시킬때는 압전세라믹과 전극니드선과의 접착때문에 공진주파수가 변할 수 있다. 따라서 주파수를 보상해줄 필요가 있다. 그리고 이 논문에서는 앞으로 변위량을 해석할때의 주파수를 각각의 고정진동자 공진주파수를 입력하였다.

초음파 진동자의 수명을 향상시키고 구동전압을 낮추기 위해서 초음파 진동자의 진동근원으로서 적층 압전액추에이타를 사용하면 된다. 왜냐하면 적층 압전액추에이타는 일반적으로 낮은 전압에서 구동할 수 있고 큰 힘을 가지기 때문이다.<sup>(6)</sup> 여기서 압전세라믹의 치수는  $11.01883 \times 3.19409 \times 1(\text{mm})$ 이다. 압전세라믹의 두께를  $1(\text{mm})$ , 두 세라믹 사이의 간격을  $2(\text{mm})$ 로 고정하고 층수를 2, 4, 6, 8층

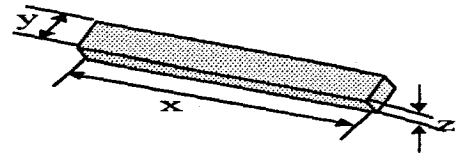


Fig. 2. Piezoelectric transverse mode

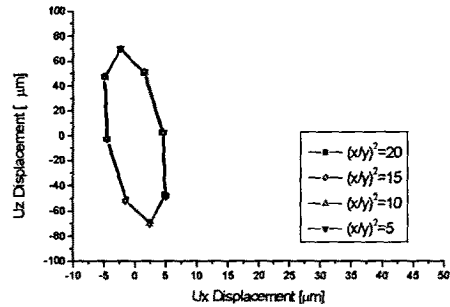


Fig. 3. Comparison of displacement by varying width of stator vibrator

으로 증가시켜서 변위량을 해석하였다. Fig. 1에서 알수있듯이 압전세라믹의 층수와 변위량이 비례함을 알 수 있었다. 따라서 비교하는 변위량은 압전세라믹의 층수가 8층인 경우에 압전세라믹과 탄성체의 폭 그리고 압전세라믹의 두께, 길이, 부착위치에 따라서 변위량을 해석하여 최적의 초음파 리니어 모터를 설계하였다.

#### 3.2 탄성체와 압전세라믹의 폭에 따른 변위량 해석

압전세라믹의 횡진동 모드(transverse mode)는  $d_{31}$ 효과를 이용하는 진동 모드로써 분극방향의 두께가 얇아 분극방향과 수직인 방향으로의 변위가 우세한 경우이다. 즉 Fig. 2에서 볼 수 있듯이  $(x/z)^2$ 과  $(x/y)^2$  모두 10이상일 경우에 나타나는 모드이다.<sup>(7)</sup>

고정진동자의 최적설계를 위해서 탄성체와 압전세라믹의 폭을 변화시키면서 변위량을 해석하였다. 탄성체의 길이를  $36.7293(\text{mm})$ , 두께  $2(\text{mm})$ , 압전세라믹의 길이  $10.1006(\text{mm})$ , 두께  $1(\text{mm})$ , 세라믹과 세라믹의 간격을  $2(\text{mm})$ 로 일정하게 하고 폭을  $(x/y)^2$ 이 5, 10, 15, 20일 때의 변위량을 비교하였다. 변위량을 비교하는 노드는 고정진동자의 글 꼭진동 우측 마루부분이다. 왜냐하면 이 부분이 진동을 최대화 할 수 있는 부분이기 때문이다. Fig. 3에서 알 수 있듯이  $(x/y)^2$ 이 클수록 변위량이 미소하게 증가함을 알 수 있었다. 이때 변위량의 차이가 적기 때문에  $(x/y)^2$ 이 10인 경우를 선택하였다.

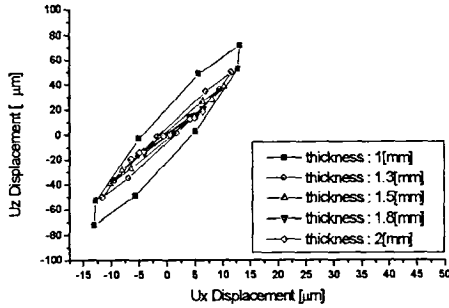


Fig. 4. Comparison of displacement by varying thickness of piezoceramics

$(x/y)^2$ 이 10일 때 탄성체와 압전세라믹의 폭은 3.19409[mm]이다.

### 3.3 압전세라믹 두께에 따른 변위량 해석

세라믹의 두께에 따른 최적설계를 위해서 변위량을 비교하였다. 탄성체의 길이를 36.7293[mm], 두께 2[mm], 폭 3.19409[mm], 세라믹의 길이 10.1006[mm], 폭 3.19409[mm], 세라믹과 세라믹의 간격을 2[mm]로 일정하게 하고 세라믹의 두께가 1, 1.3, 1.5, 1.8, 2[mm]일때를 비교하였다. 세라믹의 두께에 따른 변위량을 Fig. 4에 나타내었다.  $U_x$ 방향의 변위는 초음파 리니어 모터의 슬라이드의 방향과 일치하므로,  $U_z$ 방향보다  $U_x$ 방향이 큰 것이 더 효율적이다. 따라서 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 세라믹의 층수가 8층인 경우 세라믹의 두께가 1[mm]일 때  $z$ 방향의 변위도 클뿐만아나  $x$ 방향으로의 변위도 가장 크다. 따라서 세라믹의 두께가 1[mm]일 때 가장 효율적이라 할 수 있고, 세라믹의 두께가 클수록 진동에 방해가 됨을 알 수 있다.

### 3.4 압전세라믹의 길이에 따른 고정진동자의 변위량 해석

탄성체에 부착되는 압전세라믹의 길이에 따른 최적설계를 위해서  $l_c/l$ 의 비에 따른 해석을 하였다. 탄성체의 길이를 36.7293[mm], 두께 2[mm], 폭 3.19409[mm], 세라믹의 폭 3.19409[mm], 두께 1[mm], 세라믹과 세라믹의 간격을 2[mm]로 일정하게 하고  $l_c/l$ 의 비가 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 일 때 각각의 고정진동자의 우측 마루(crest)부분의 변위량을 해석하였다. 여기서는  $l_c$ 는 두 세라믹을 합한 길이,  $l$ 은 탄성체의 길이를 의미한다.  $l_c/l$ 의 비가 0.5와 0.6일 경우에 변위량이 가장 크고, 반면에  $l_c/l$ 의 비가 0.7일 경우는 변위량이 작아진다. 따라서 고정진동자의 효과적인 진동을 위해서는 Fig.

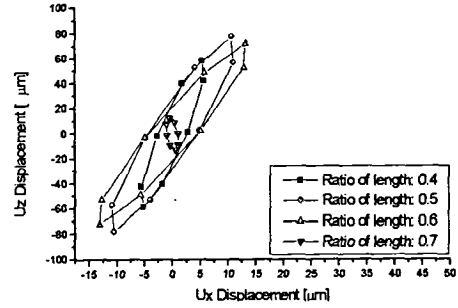


Fig. 5. Comparison of displacement by varying length of piezoceramics

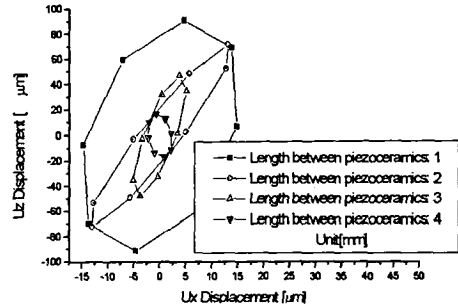


Fig. 6. Comparison of displacement by varying distance between piezoceramics

5에서 알 수 있듯이  $l_c/l$ 의 비가 0.5~0.6 일때이다.<sup>(4)</sup>  $l_c/l$ 이 0.6일 때 압전세라믹의 길이는 11.01883[mm]이다.

### 3.5 세라믹과 세라믹사이의 간격에 따른 고정진동자의 변위량 해석

탄성체에 부착되는 세라믹과 세라믹사이의 간격에 따른 최적설계를 위해서 탄성체의 길이를 36.7293[mm], 두께 2[mm], 폭 3.19409[mm], 세라믹의 폭 3.19409[mm], 두께 1[mm], 길이 11.01883[mm]로 일정하게 하고 세라믹과 세라믹사이의 간격을 1, 2, 3, 4[mm]로 했을 때의 변위량을 해석하였다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 세라믹과 세라믹사이의 간격이 1[mm]일 때 변위량이 가장 큼을 알 수 있었다. 따라서 세라믹과 세라믹사이의 간격이 작을수록 진동에 방해를 적게 줌을 알 수 있다. 세라믹이 8층일경우의 알루미늄 탄성체의 치수는  $36.7293 \times 3.19409 \times 2$ [mm], 세라믹의 치수는  $11.01883 \times 3.19409 \times 1$ [mm]로 설계를 하였다.

### 3.6 인가전압에 따른 변위량 해석

두 개의 세라믹에 90° 위상차를 갖는 인가전압을

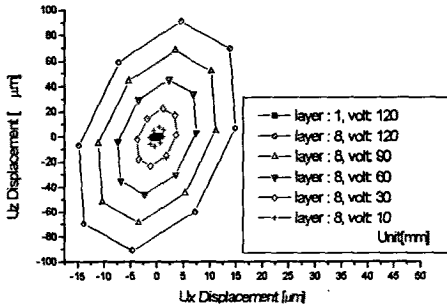


Fig. 7. Comparison of displacement by varying voltage

인가한 경우의 변위량을 해석하기 위해서 알루미늄 탄성체의 치수는  $36.7293 \times 3.19409 \times 2$  (mm), 압전세라믹의 치수는 층수가 8층인  $11.01883 \times 3.19409 \times 1$  (mm)로 일정하게 하고 세라믹과 세라믹 사이의 간격을 1(mm)로 일정하게하여 인가전압을 10, 30, 60, 90, 120(V)로 변화시켰다. Fig. 7에서 보던 인가전압과 변위량은 비례함을 알 수 있었다. 그리고 압전세라믹의 층수가 단층이며 인가전압이 120(V)와 층수가 8층이며 인가전압이 10(V)일 때 변위량을 비교한 결과 층수가 8층이며 인가전압이 10(V)인 경우가 변위량이 더 크울 알 수 있다. 따라서 적층 압전액추에이터는 일반적인 로 낮은 전압에서 구동할 수 있다.

### 3.7 변위 확대기구(projection)의 위치

초음파 리니어 모터의 진동자는 두개의 변위 확대기구(projection)와 두 개의 압전세라믹, 탄성체인 알루미늄으로 구성되어졌다. 초음파 리니어 모터 설계의 중요한 포인트는 변위 확대기구(projection)의 위치를 정하는 방법이다. 이 논문에서는 유한요소 프로그램인 ANSYS로써 4차 굴곡진동의 공진주파수에서 Z방향으로 최대변위를 일으키는 지점, 즉 고정진동자의 좌측에서는 굴곡진동의 골(valley)부분에 우측에서는 굴곡진동의 마루(crest)부분에 변위 확대기구(projection)를 위치시켜 진동을 최대화하였다.<sup>(2)</sup> Fig.8은 변위확대기구(projection)을 부착한 고정진동자의 형태이다.

### 4. 결론

고정진동자의 고정진동자의 공진주파수에서 변위량을 측정 한 결과 압전세라믹의 층수의 증가에 따라 변위량이 증가함을 알 수 있었다. 또한 탄성체와 압전세라믹 폭에 따른 변위량 해석결과  $(x/y)^2$ 이 10이상인 경우에 변위량이 미소하게 증가함을 알 수 있었고, 압전세라믹의 두께가 일정할 경우 층수

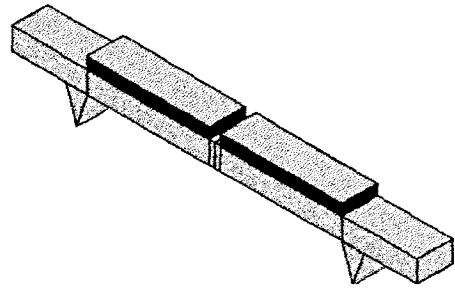


Fig 8. Vibrator with projection and multilayer piezoceramics

가 클수록 효율적이고, 압전세라믹의 길이는  $l/d$ 의 비가 0.5~0.6일 경우에 변위량이 가장 크고, 압전세라믹과 압전세라믹 사이의 간격이 작을수록 변위량이 커짐을 알 수 있었다.

### [Acknowledgement]

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계 기술연구센터의 지원에 의한 것입니다

### [참고 문헌]

- [1] Toshiiku Sashida, Takashi Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors", OXFORD, 1993.
- [2] 임태빈, 성하경, "Atila에 의한 평판형 고정진동자의 변위량해석", 전기전자재료 제11권,제11호, pp.122-125,1998.
- [3] Singiresu S. Rao, "Mechanical Vibrations", Addison Wesley Publishing Company, 1990.
- [4] S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa and N.Nakamura, "Ultrasonic Motors Theory and Applications", OXFORD, 1993.
- [5] T. Kosawada, K. Suzuki, T. Tomikawa, "A Card Sending Linear Ultrasonic Motor using MultiBeam Piezoelectric Vibrators", International Journal of Applied Electromagnetics in Materials 2, pp. 285-290, 1992.
- [6] T. Funakubo, T. Tsubata, Y. Taniguchi, "Ultrasonic Linear Motor Using Multilayer Piezoelectric Actuators", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 34, pp.2756-2759, 1995
- [7] 신병철, "압전특성 평가기술", 과학과기술, Vol. 6, No.1, 1991.