

X-Y 스테이지를 위한 초음파 리니어 모터의 설계

Design of Ultrasonic Linear Motor for X-Y Stage

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. The motors were designed by varying the width of stator vibrator and the thickness, the length and the position of piezoceramics.

1. 서론

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.^[1] 전자파를 발생

하지 않기 때문에 주사형 전자현미경의 스테이지, 전자노이즈를 피하는 측정기구의 스테이지 구동으로 적합하다. 또 후진이 적고 조동과 마동이 서로 가능하고 단순한 구조로 되기 때문에 고속으로 고정도의 위치를 정하는 것이 가능하다. 초음파 모터의 실용화를 위해서는 압전세라믹의 변위가 마이크로 범위(micron order)이기 때문에 작은 변위를 이용하여 고효율을 얻기 위하여 마찰면의 가공이 좋아야 하고, 마모가 적은 마찰재료, 기계적으로 강한 압전재료 등의 개발이 요구되어진다.

유한요소법에 의한 초음파 모터의 해석은 주로 공진 주파수 해석과 공진 모드에 따른 변위량 해석 및 모델설계에 유용하게 사용이 되고 있다.^[2] 유한요소 프로그램인 ANSYS 5.5.1을 이용하여 탄성체와 고정진동자의 공진주파수를 해석하였고, 고정진동자의 폭과 압전세라믹의 폭, 길이, 두께를 변경하여 공진주파수에서 구동할 때 변위량을 해석하여 초음파 리니어 모터의 최적설계를 하였다.

2. L₁-B₄ 리니어 모터의 설계

2.1 탄성체의 이론식에 의한 설계

1차 종진동과 4차 굴곡진동을 이용하여 초음파 리니어 모터의 설계시 고려하여야 할 사항은 고정진동자의 기하학적 크기이다. n차 굴곡진동

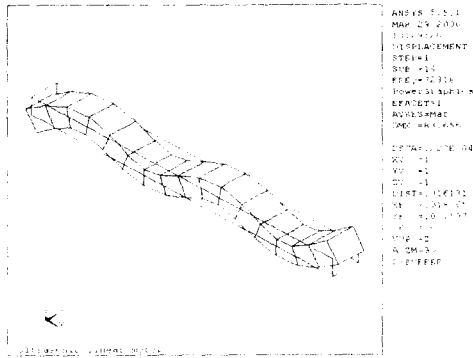


Fig. 1. Fourth Bending Mode of Aluminum

모드의 공진주파수는 보의 굽힘에 관한 기본이론 (Euler-Bernoulli theory)을 이용하였고 회전관성과 전단변형의 영향을 무시하였다.^[3] n차 종진동 모드의 공진주파수는 봉이나 막대의 x방향 힘의 합 운동방정식에서 유도할 수 있다.^[4] 각각의 공식은

$$f_{Bn} = \frac{\alpha^2 t}{4\pi\sqrt{3}l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} : \alpha_n \approx \left(-\frac{2n+1}{2}\right)\pi \quad (1)$$

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

E, ρ, l, t는 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.

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

식 (4)로부터 탄성체의 길이와 두께 그리고 공진주파수를 결정할 수 있다. 실제 제작할 진동자는 압전세라믹과 전선(electric wires)의 접촉 때문에 공진주파수가 변경되므로 미세한 수정이 필요하다.^[5] 위의 식에서 설계한 알루미늄 탄성체의 치수는 36.7293×3.19409×2[mm]이고 공진주파수의 이론치는 72.224[kHz]이다. 그리고 압전세라믹의 치수는 11.01883×3.19409×0.8[mm]이다.

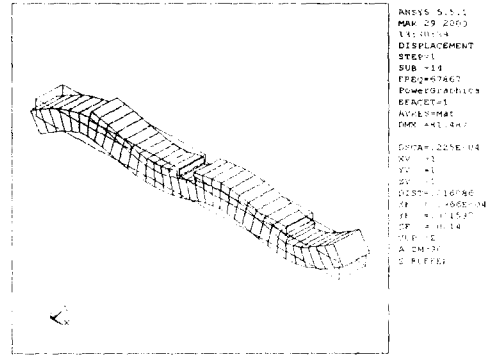


Fig. 2. Fourth bending mode of stator vibrator

2.2 FEM을 이용한 알루미늄 탄성체의 공진주파수 해석

이론치로써 계산한 알루미늄의 4차 굴곡진동의 공진주파수와 유한요소법으로써 해석한 주파수와 비교를 하기 위해서 유한요소 프로그램인 ANSYS 5.5.1을 이용하였다. 유한요소법 해석에 이용된 요소는 프로그램에서 제공하는 SOLID45를 사용하였다.^[6] 양쪽이 free-free한 경계조건일 때의 4차 굴곡진동 공진주파수를 해석하였다. 이때 주파수가 72.318[kHz]였다. Fig. 1은 알루미늄의 4차 굴곡진동모드를 나타내었다. 따라서 이론치로써 계산한 주파수와 유한요소법으로써 해석한 공진주파수가 근사치임을 알 수 있었다.

2.3 압전세라믹이 부착되었을 때 공진주파수 해석

압전세라믹이 탄성체에 부착되었을 때 공진주파수 측정은 고정진동자를 free-free한 조건으로 하였다. 해석에 이용된 요소는 프로그램에서 제공하는 SOLID45와 SOLID5를 사용하였다. Fig. 2는 고정진동자의 4차 굴곡진동을 나타내었다. 이때 4차 굴곡진동의 공진주파수는 67.867[kHz]였다. 세라믹과 알루미늄의 이상적인 접촉을 고려했을 때의 공진주파수이다. 그러나 실제로 구동시킬 때는 압전세라믹과 전선(electric wires)때문에 공진주파수가 변할 수 있기 때문에 주파수를 보상해줄 필요가 있다. 이 논문에서 앞으로 변위량을 해석할때의 주파수는 각각의 고정진동자 모델 공진주파수를 입력하게된다.

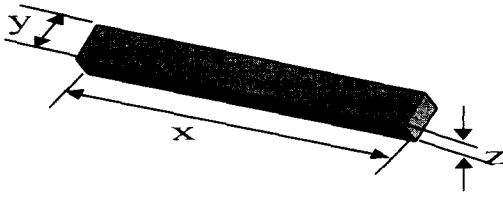


Fig. 3. Piezoelectric transverse mode

3. ANSYS를 이용한 변위량 해석

3.1 탄성체와 압전세라믹의 폭에 따른 변위량 해석

고정진동자의 최적설계를 위해서 탄성체와 압전세라믹의 폭을 같이 변화시키면서 변위량을 해석하였다.

압전세라믹의 횡진동 모드(transverse mode)는 d_{31} 효과를 이용하는 진동 모드로써 분극방향의 두께가 얇아 분극방향과 수직인 방향으로의 변위가 우세한 경우이다. 즉 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 $(x/z)^2$ 과 $(x/y)^2$ 모두 10이상일 경우에 나타나는 모드이다.^[7] 탄성체의 길이를 36.7293 [mm], 두께 2 [mm], 압전세라믹의 길이 10.1006 [mm], 두께 1 [mm], 세라믹과 세라믹의 간격을 2 [mm]로 일정하게 하고 폭을 $(x/y)^2$ 이 5, 10, 15, 20일 때 변위량을 비교하였다. 앞으로 변위량을 비교하는 노드는 Fig. 2에서 우측의 마루 부분으로서 진동을 최대화 할 수 있는 부분이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 변위량의 차이는 크지 않지만 $(x/y)^2$ 이 10일 경우에 변위량이 미소하게 큼을 알 수 있었다. 그리고 $(x/y)^2$ 이 10보다 큰 경우라고 항상 변위량이 최대가 아님을 알 수 있었다.

3.2 압전세라믹 두께에 따른 변위량 해석

압전세라믹의 두께에 따른 최적설계를 위해서 변위량을 비교하였다. 탄성체의 길이를 36.7293 [mm], 두께 2 [mm], 폭 3.19409 [mm], 압전세라믹의 길이 10.1006 [mm], 폭 3.19409 [mm], 세라믹과 세라믹의 간격을 2 [mm]로 일정하게 하고 압전세라믹의 두께가 0.3, 0.5 [mm], 0.8, 1.0, 1.5 [mm] 일때를 비교하였다. 압전세라믹의 두

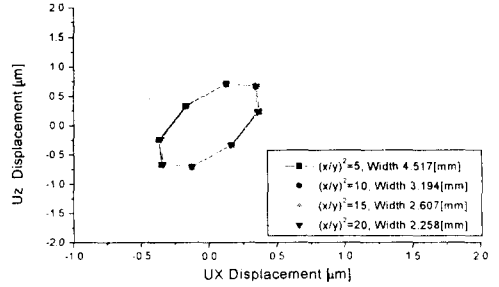


Fig. 4. Comparison of displacement by varying width of stator vibrator

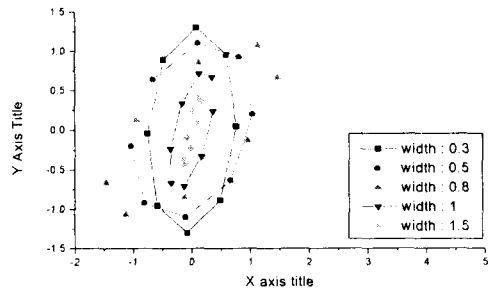


Fig. 5. Comparison of displacement by varying thickness of piezoceramics

께에 따른 변위량을 Fig. 5에 나타내었다. Ux 방향의 변위는 초음파 리니어 모터의 슬라이드의 방향과 일치하므로 Uz 방향의 변위보다 더 중요하다. 따라서 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 압전세라믹의 두께가 0.8 [mm]일 때 z 방향의 변위도 클뿐 아니라 x 방향으로의 변위가 가장 크다. 따라서 압전세라믹의 두께가 0.8 [mm]일 때 가장 효율적이라 할 수 있고, 압전세라믹의 두께가 클수록 진동에 방해가 됨을 알 수 있다.

3.3 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], 압전세라믹의 폭 3.19409 [mm], 두께 0.8 [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. 여기

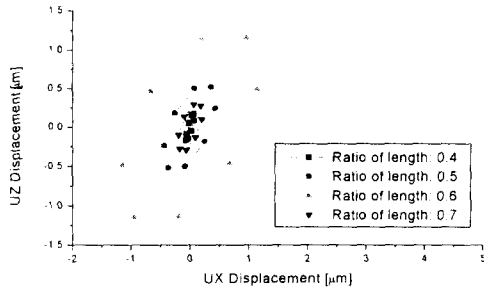


Fig. 6. Comparison of displacement by varying length of piezoceramics

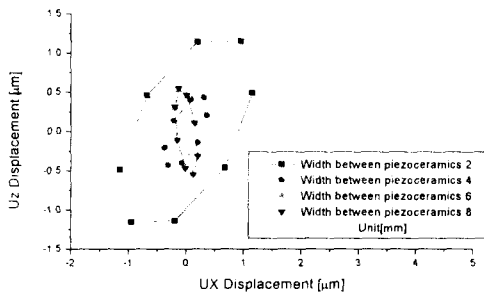


Fig. 7. Comparison of displacement by varying distance between piezoceramics

서는 l_c 는 두 압전세라믹을 합한 길이, l 은 탄성체의 길이를 의미한다. Fig. 6은 이때의 변위량을 나타낸다. l_c/l 의 비가 0.6일 경우에 변위량이 가장 큼을 알 수 있다. 그러나 l_c/l 의 비가 0.7일 경우는 변위량이 작아진다. 따라서 고정진동자의 효과적인 진동을 위해서는 Fig. 6에서 알 수 있듯이 l_c/l 의 비가 0.5~0.6 일때이다^[4]

3.4 세라믹과 세라믹사이의 간격에 따른 고정진동자의 변위량 해석

탄성체에 부착되는 압전세라믹과 압전세라믹 사이의 간격에 따른 최적설계를 위해서 탄성체의 길이를 36.7293[mm], 두께 2[mm], 폭 3.19409[mm], 압전세라믹의 폭 3.19409[mm], 두께 0.8[mm], 길이 11.01883[mm]로 일정하게 하고 압전세라믹과 압전세라믹 사이의 간격을 2, 4, 6, 8[mm]로 했을 때 변위량을 해석하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 압전세라믹과 압전세라

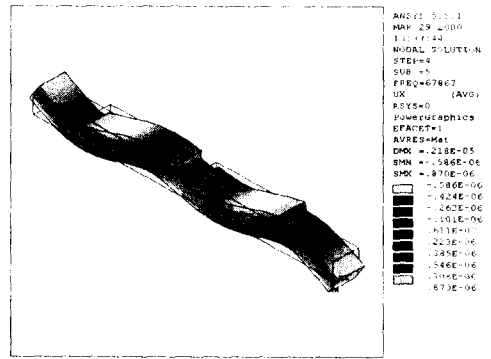


Fig. 8. Displacement of Ux at stator vibrator

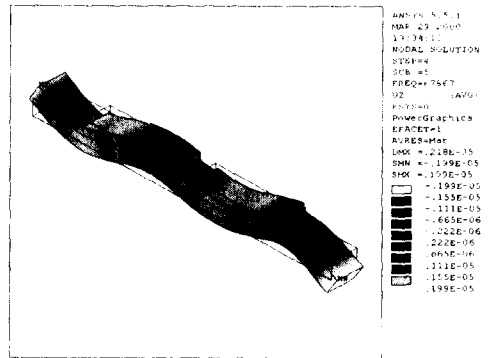


Fig. 9. Displacement of Uz at stator vibrator

믹 사이의 간격이 2[mm]일 때 변위량이 가장 큼을 알 수 있었다. 따라서 알루미늄 탄성체의 치수는 $36.7293 \times 3.19409 \times 2$ (mm), 압전세라믹의 치수는 $11.01883 \times 3.19409 \times 0.8$ (mm)로 설계를 하였다.

Fig. 8, 9는 Ux, Uz방향의 변위량을 공진 주파수에서 색깔로서 xy, xz, xyz평면에 표현하였다. Fig. 8은 Ux방향으로의 변위량을 나타내고, Fig. 9는 Uz방향으로의 변위량을 나타낸다. +는 양의 변위를, -는 음의 변위를 나타낸다.

3.5 변위 확대기구(projection)의 위치

초음파 리니어 모터의 진동자는 두개의 변위 확대기구(Projection)와 두 개의 압전세라믹, 탄성체인 알루미늄으로 구성되어졌다. 초음파 리니어 모터설계의 중요한 포인트는 변위 확대기구(projection)의 위치를 정하는 방법이다. 이 논문

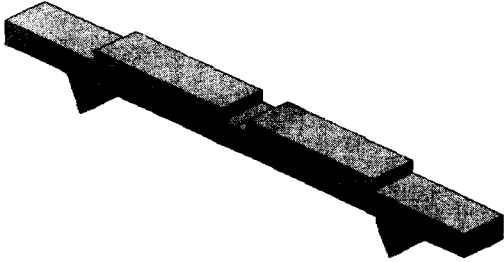


Fig. 10. Vibrator with projection

에서는 유한요소 프로그램인 ANSYS로써 4차 굴곡진동의 공진주파수에서 Z방향으로 최대변위를 일으키는 지점, 즉 Fig. 2에서 좌측에서는 굴곡진동의 골(valley)부분에 우측에서는 굴곡진동의 마루(crest)부분에 변위 확대기구(projection)를 위치시켜 진동을 최대화하였다.^[2] Fig. 10은 변위 확대기구(projection)를 부착한 진동자의 모델이다. 이와같은 설계에 따라서 초음파 리니어 모터는 전자파를 발생하지 않기 때문에 주사형 전자현미경의 스테이지, 전자 노이즈를 피하는 측정기구의 스테이지 구동으로 적합하다.

결론

알루미늄바의 이론값과 FEM에 의한 해석값을 비교한 결과, FEM에서 구한 4차 굴곡진동 공진주파수가 Euler-Bernoulli 이론에서 계산한 알루미늄의 이론주파수의 근사값임을 알 수 있었다. 탄성체와 압전세라믹 폭에 따른 변위량 해석 결과 $(x/y)^2$ 이 10일 경우에 미소하게나마 변위량이 큼을 알 수 있었고, 압전세라믹의 두께가 0.8[mm]인 경우가 효율적이고, 압전세라믹의 길이는 l_c/l 의 비가 0.6일 경우에 변위량이 가장 큼을 알 수 있었다. 그리고 압전세라믹과 압전세라믹 사이의 간격이 2[mm]일 때 변위량이 가장 큼을 알 수 있었다.

[Acknowledgement]

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다

[참 고 문 헌]

- [1] Toshiiku sashida, Takashi Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors", OXFORD, 1993.
- [2] 임태빈, 성하경, "Atila에 의한 평판형 고정진동자의 변위량 해석", 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 Multi-Beam Piezoelectric Vibrators", International Journal of Applied Electro magnetics in Materials 2, pp. 285-290, 1992.
- [6] ANSYS 5.5 Manual
- [7] 신병철, "압전특성 평가기술", 과학과기술, Vol. 6, No. 1, 1991.