

초음파 리니어 모터의 설계와 유한요소 해석

Design and FEM Analysis of Ultrasonic Linear Motor

김태열*, 강도원*, 김범진*, 박태곤*, 김명호**

*창원대학교 전기공학과 **창원대학교 세라믹공학과

*Tae-Yoal Kim, *Do-Won Kang, *Beom-Jin Kim,
*Tae-Gone Park, **Myong-Ho Kim

* Dept. of Electrical Eng., Changwon National Univ.

** Dept. of Ceramic Eng., Changwon National Univ.

Abstract

The standing waves of the fourth bending mode of vibration and the first longitudinal mode of vibration were utilized to construct a ultrasonic linear motor. The geometrical dimensions of the vibrator were determined by Euler-Bernoulli theory. FEM(finite element method) employed to calculate the vibration mode of the metal-piezoceramic composite thin plate vibrator. ANSYS was used to design positions of the projections and calculate displacement of vibrator.

한 진동모드를 사용한 초음파 리니어 모터의 제조가 이루어졌다.

이 논문에서는 L1-B4 진동모드를 이용한 초음파 리니어 모터를 제조하였다. 유한요소법에 의한 해석은 ANSYS를 이용하여 공진주파수를 해석을 하였다. 압전세라믹의 위치에 따라 공진주파수로 구동되는 고정진동자에서 탄성체 표면의 변위량을 해석하여 탄성체의 최대 변위점을 찾고, 그곳에서 변위 확대기구(projection)의 위치를 결정하였으며 또한 변위량을 harmonic analysis로 비교하여 실제의 변위를 알아보았다.

1. 서론

압전세라믹을 사용하는 초음파 모터는 압전 세라믹의 신속한 발전에 따라 매우 빠른 속도로 발전하고 있다. 초음파 모터는 압전 현상에 의해 발생하는 변위를 기계적인 구동원으로 이용하여 적당한 마찰력에 의해 회전운동을 발생시키는 것으로서 수직, 수평방향 변위의 타원적 움직임을 이용한다. 이러한 초음파 모터는 전자기식 모터에 비하여 소형이며 간단한 구조를 이루고 저속에서 높은 토크를 발생한다. 특히 리니어 모터는 기어를 사용하지 않고 정밀위치 제어가 가능한 x-y스테이지 등의 구성에 유용하다. 또한 자계의 영향을 받지 않으며 자계를 만들지 않는다는 큰 장점을 가지고 있다.^[1] 국내외에서 지금까지 다양

2. L1-B4 리니어 모터의 설계

2.1 Euler-Bernoulli 이론식에 의한 설계

초음파 리니어 모터의 설계시 고려해야할 사항은 고정자진동자의 기하학적 크기이다. 4차 굽곡진동과 1차 종진동을 이용하여 초음파 리니어 모터를 제조하였다. 보의 굽힘에 관한 기본이론(Euler-Bernoulli theory)을 이용하였고 회전관성과 전단변형의 영향을 무시하였다.^[2,3] n번째 횡진동과 종진동의 고유진동수는 각각 다음 공식과 같다.

$$\omega_n = (\beta_n l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \quad (1)$$

$$\omega_n = \frac{n\pi c}{l} \quad (2)$$

l, I, A, E 그리고 ρ는 각각 고정진동자의 길이,

면적 2차 모멘트, 면적, 영률, 밀도이다.

$$\cos \beta_1 l \cdot \cos \beta_2 l = 1 \quad (3)$$

$$\beta_1 l = 4.730041, \beta_2 l = 7.853205, \beta_3 l = 10.995608, \dots$$

인 자유진동방정식은 방정식 (3)이다. 탄성체의 기하학적 치수는 방정식(4)에 의해서 구할 수 있다.

$$\omega_{B1} = \omega_{L1} \quad (4)$$

방정식(1)과 (2)를 방정식(4)에 대입함으로써 방정식(5)를 구할 수 있다.

$$l = \frac{(\beta_4 l)^2 \cdot h}{2\sqrt{3}\pi} \quad (5)$$

방정식(5)로부터 탄성체의 길이와 두께를 결정할 수 있다. 그러나 실제로 제작할 때는 압전세라믹과 전선(electric wires) 때문에 변할 수 있는 고유주파수를 보상해줄 필요가 있다. 이로부터 구한 알루미늄 탄성체의 크기는 $50 \times 5.6 \times 2.7[\text{mm}]$ 이다. 따라서 알루미늄의 4차 굴곡진동 주파수와 1차 종진동 공진주파수의 이론치가 구하여 질 수 있고 이때 계산된 값은 $53.499[\text{kHz}]$ 이다. 그리고 초음파 리니어 모터의 진동자는 두개의 변위 확대기구(Projection)와 두 개의 압전세라믹($10 \times 5.6 \times 1.42[\text{mm}]$), 알루미늄($50 \times 5.6 \times 2.7[\text{mm}]$)으로 구성되어 있다.

2.2 FEM에 의한 4차 굴곡진동의 공진주파수 해석

2.2.1 알루미늄의 공진주파수 해석

이론치로써 구한 알루미늄의 4차 굴곡진동의 공진주파수와 유한요소법으로써 구한 주파수와 비교를 하기위해서 유한요소 프로그램인 ANSYS 5.5.1을 이용하였다. 해석에 이용된 요소는 프로그램에서 제공하는 SOLID45를 사용하였다. 요소수는 16개를 사용하였고 양쪽이 free-free한 경계조건일때의 4차 굴곡진동 공진주파수를 해석하였다. 이때 주파수가 $52.852[\text{kHz}]$ 였다. 그림 1은 알루미늄의 4차 굴곡진동모드이다. 따라서 이론치로써 구한 주파수와 유한요소법으로써 구한 주파수가 근사치임을 알 수 있었다.

2.3 초음파 리니어 모터의 공진주파수 해석

2.3.1 압전세라믹의 간격이 $\lambda/4$ 인 경우 초음파 리니어 모터의 공진주파수 측정

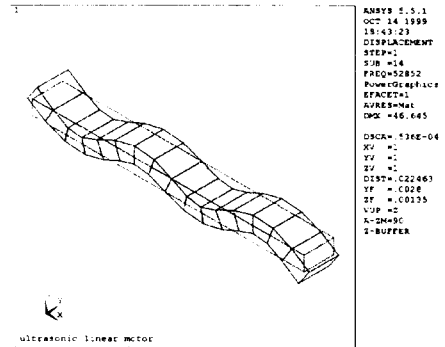


그림 1. 알루미늄의 4차 굴곡진동모드

Fig. 1. Fourth Bending Mode of Aluminum

압전세라믹의 위치는 4차 굴곡진동에서 세라믹과 세라믹까지의 거리를 $\lambda/4$ 와 $3\lambda/4$ 를 하였고 세라믹의 길이는 $\lambda/2$ 로 일정하게 하였다.^[4] 그림 2는 두 개의 압전세라믹까지의 거리가 $\lambda/4$ 인 경우 해석에 이용된 유한요소 모델로써 프로그램에서 제공하는 SOLID5와 SOLID45요소를 사용하였고 요소의 총수는 26개이다.^[5] 알루미늄과 압전 세라믹의 물질상수는 표1에 나타나있다. 두 압전세라믹의 간격이 $\lambda/4$ 인 경우 초음파 리니어 모터의 4차 굴곡진동 공진주파수를 해석하기위한 조건으로서 고정진동자를 free-free한 경계조건하에서 측정을 하였다.

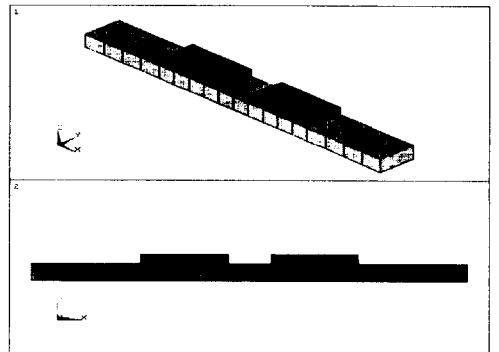


그림 2. 압전세라믹의 간격이 $\lambda/4$ 일 때 유한 요소 모델

Fig. 2. FEM Model at $\lambda/4$ Distance between Piezoelectric Ceramics

Aluminum material		
Young's modulus	76E+9	N/m ²
Poisson's ratio	0.33	
Density	2700	kg/m ³
Piezoelectric material		
Density	7600	kg/m ³
S ^t ₁₁	11.7E-12	m ² /N
S ^t ₃₃	17.4E-12	m ² /N
g ₁₅	35E-3	m ² /C
g ₃₁	10.5E-3	m ² /C
g ₃₃	25.5E-3	m ² /C
ε ^t ₃₃	1.1953E-3	F/m

표 1. 재료의 물리적 특성

TABLE 1. Material Properties

그림 3은 압전세라믹의 간격이 $\lambda/4$ 인 경우 4차 굴곡진동을 나타낸다. 이때 4차 굴곡진동의 공진 주파수는 55.055[kHz]였다. 세라믹과 알루미늄의 접촉부분 때문에 알루미늄의 4차 굴곡진동 공진 주파수의 이론치와 차이가 생기게 되었다.

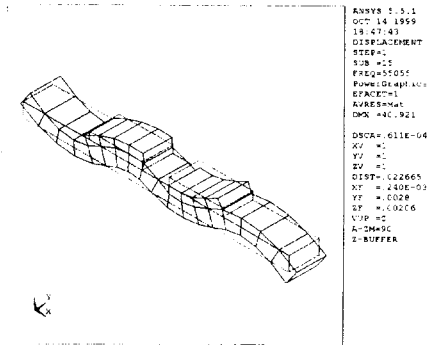


그림 3. 압전세라믹간격이 $\lambda/4$ 인 경우 4차 굴곡진동모드

Fig. 3. Fourth Bending Mode at $\lambda/4$ Distance between Piezoelectric Ceramics

2.3.1 압전세라믹의 간격이 $3\lambda/4$ 인 경우 초음파 리니어 모터의 공진주파수측정

압전세라믹의 간격이 $\lambda/4$ 인 경우와 같은 조건에서 압전세라믹의 간격이 $3\lambda/4$ 인 경우, 초음파 리니어 모터의 4차 굴곡진동 공진주파수를 해석하였다. 이때 주파수가 49.707[kHz]였다. 따라서 압전세라믹의 부착부위에 따라서 공진주파수

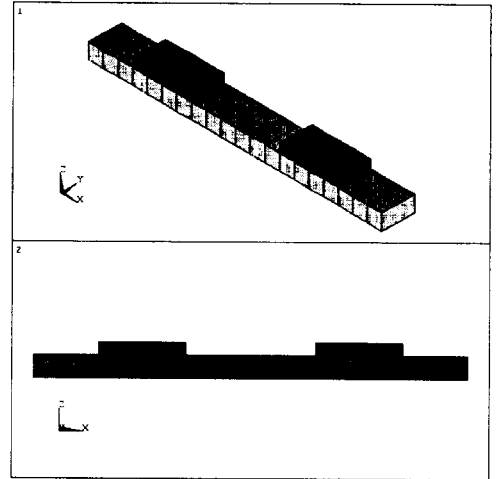


그림4 압전세라믹의 간격이 $3\lambda/4$ 일 때 유한 요소 모델

Fig. 4. FEM Model at $3\lambda/4$ Distance between Piezoelectric Ceramics

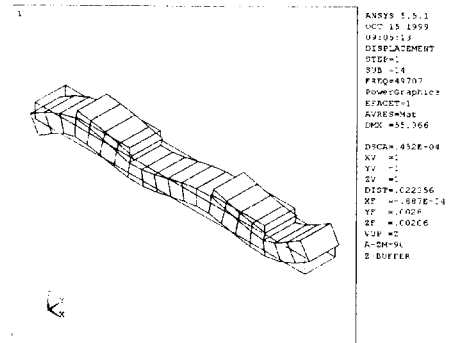


그림 5. 압전세라믹의 간격이 $3\lambda/4$ 인 경우 4차 굴곡진동모드

Fig. 5. Fourth Bending Mode at $3\lambda/4$ Distance between Piezoelectric Ceramics

가 틀려짐을 알수있었다. 그림 4, 그림 5는 각각 압전세라믹의 간격이 $3\lambda/4$ 일 때 유한요소 모델과 4차 굴곡진동모드이다.

2.2.2 변위 확대기구(projection)의 위치

초음파 리니어 모터설계의 중요한 포인트는 변위 확대기구(projection)의 위치를 정하는 방법이다. 이 논문에서는 유한요소 프로그램인

ANSYS로써 4차 굴곡진동의 공진주파수에서 Z 방향으로 최대변위를 일으키는 지점에 변위 확대기구(projection)를 위치시켰다. 즉 그림 3에서의 좌측에서는 굴곡진동의 골(valley)부분에 우측에서는 굴곡진동의 마루(crest)부분에 변위 확대기구(projection)를 위치시켜 진동을 최대화하였다. 그림 5 또한 좌측에서는 굴곡진동 골(valley)부분과 우측에서의 마루(crest)부분에 변위 확대기구(projection)를 위치시켰다. 그림 6은 각각의 경우 변위 확대기구(projection)를 접착한 것이다.^[6]

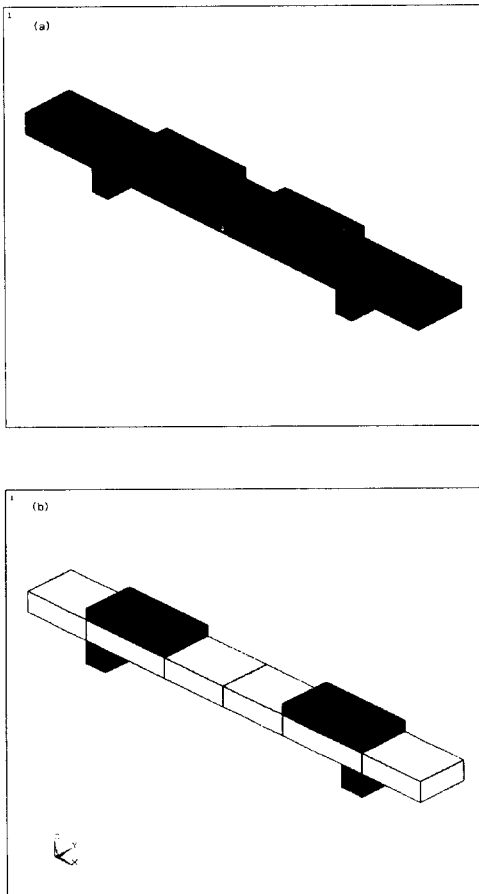


그림 6. 압전세라믹의 간격이 (a) $\lambda/4$ (b) $3\lambda/4$ 일때 변위 확대기구(projection)의 위치

Fig. 6. Projection Position at (a) $\lambda/4$ (b) $3\lambda/4$ Distance between Piezoelectric Ceramics

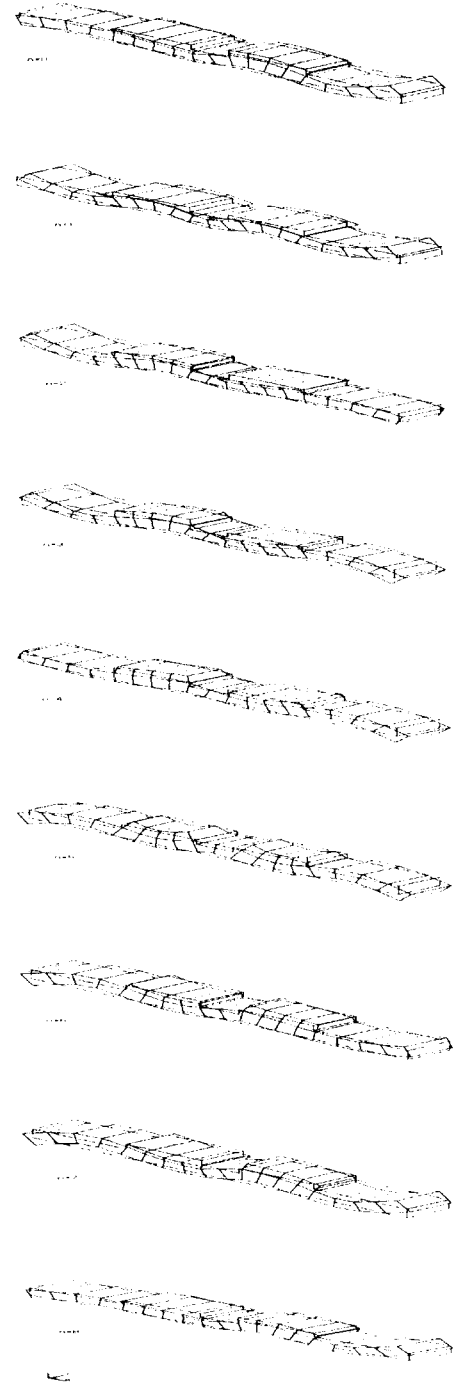


그림 7. 1주기 동안의 고정진동자의 변화
Fig. 7. Transformation of Vibrator for One Cycle

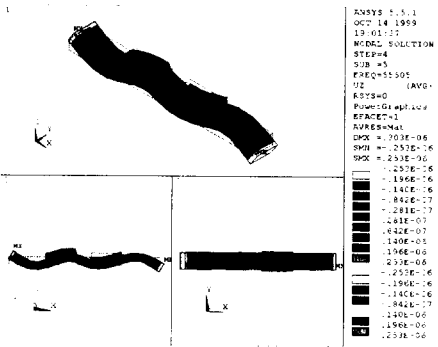
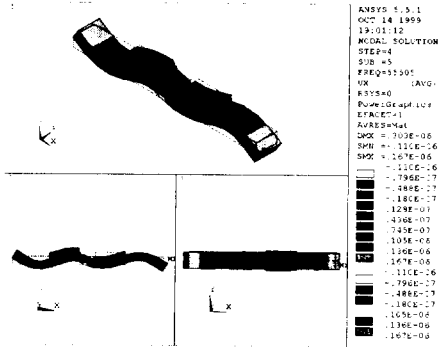


그림 8. 압전세라믹의 간격이 $\lambda/4$ 일 때 FEM에 의한 (a) UX (b) UZ 방향의 변위량 해석
 Fig. 8. Displacement of (a) UX (b) UZ at $\lambda/4$ Distance between Piezoelectric Ceramics

3. ANSYS를 이용한 변위량 해석

유한요소 프로그램 ANSYS로써 실제변위를 예상하기 위해서 입력된 고정진동자의 공진주파수를 분석한후, 4차 굴곡진동에서의 공진주파수를 가진 교류전압을 인가하여 진동정상상태의 변위를 해석하였다.^[7] 그림 7은 두 압전세라믹의 간격이 $\lambda/4$ 인 경우 1주기동안의 고정진동자의 변화를 나타내었다. 주기는 $n\pi/8$ ($n=0, 1, 2, \dots$)이다. 따라서 초음파 리니어 모터의 진동형상을 알 수 있다.

그림 8은 두 압전세라믹의 간격이 $\lambda/4$ 인 초음파 리니어 모터의 주파수가 55.505[kHz]일 때 변

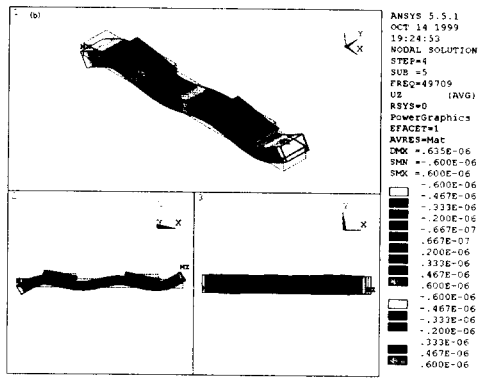
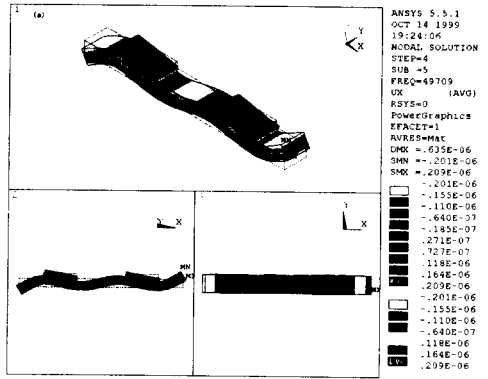


그림 9. 압전세라믹의 간격이 $3\lambda/4$ 일 때 FEM에 의한 (a) UX (b) UZ 방향의 변위량 해석
 Fig. 9. Displacement of (a) UX (b) UZ at $3\lambda/4$ Distance between Piezoelectric Ceramics

위량을 색으로써 xy, xz, xyz평면에 표현하였다. 그림 8은 두 압전세라믹의 간격이 $7\lambda/4$ 인 초음파 리니어 모터의 주파수가 49.709[kHz]일 때 변위량을 나타낸다. 그림 8, 그림 9의 (a)는 ux방향으로 의 변위를 나타내고, (b)는 uz방향으로의 변위를 나타낸다. 두 경우의 변위량 비교해본 결과 세라믹 간격의 차에 따라 변위량의 차이가 있음을 알 수 있었고, 압전세라믹의 간격이 $\lambda/4$ 인 경우는 x방향으로 변위량이 미소하게나마 크음을 알 수 있었고 z 방향으로로는 $3\lambda/4$ 인 경우가 변위량이다 크음을 확인할 수 있었다.

4. 결론

알루미늄 바(bar)의 이론값과 FEM에 의한 해석값을 비교한 결과, FEM에서 구한 4차 굴곡진동 공진주파수가 Euler-Bernoulli 이론에서 구한 알루미늄의 이론주파수의 근사값임을 알수있었다. 그리고 FEM으로 4차 굴곡진동모드를 해석한 결과 굴곡진동의 골(valley)부분과 마루(crest)부분에 변위 확대기구(Projection)를 위치시킴으로써 L1-B4모드의 진동을 최대화 할 수 있음을 알수 있다. 압전세라믹 부착 위치에 따라서 변위량을 해석해본 결과 압전세라믹 간격이 $\lambda/4$ 일 경우는 x방향의 변위량이 큼을 알수 있었고 $3\lambda/4$ 인 경우는 z 향의 변위량이 큼을 알수 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]. T. Kosawada, K. Suzuki, T. Tomikawa, "A Card sending Linear Ultrasonic Motor using Multi-Beam Piezoelectric Vibrators", International Journal of Applied Electromagnetics in Materials 2, pp. 285-290, 1992.
- [3]. Singiresu S. Rao, "Mechanical Vibrations", Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- [4] S.Ueha, Y. Tomikawa, "Ultrasonic Motors Theory and Applications", OXFORD, 1993
- [5]. ANSYS 5.5 Manual
- [6]. Siyuan He, Weishan Chen, Xie Tao, Zaili Chen, "Standing Wave Bi-directional Linearly Moving Ultrasonic Motor", IEEE, Vol. 45, No. 5, pp.1133-1139, 1998
- [7]. 임태빈, 성하경, "Atila에 의한 평판형 고정진동자의 변위량 해석", 전기전자재료 제11권, 제11호, pp.122-125, 1998.