

## 초음파리니어 모터의 설계 및 해석

### Design and FEM Analysis of Ultrasonic Linear Motor

김행식, 박태곤

창원대학교

Hang-Sik. Kim and Tae-Gone. Park

#### Abstract

This paper deals with a flat type ultrasonic motor, which uses a longitudinal-bending multi mode vibrator of rectangular form. A linear ultrasonic motor was designed by combination of the first longitudinal and eighth bending mode, and the motor consisted of a straight alluminum alloy bar bonded with piezoelectric ceramic elements as a driving element. The geometrical dimensions of the rectangular aluminum vibrator were determined by Euler-Bernoulli theory

ANSYS was used to analyze the resonance frequency and the displacement of the stator vibrator. The resonance frequency of the motor provides the elliptical motion. and ANSYS was used to analyze elliptical motion and elliptical trajectory of stator vibrator when thickness of piezoelectric ceramics was varied respectively 0.763, 1.526, 2.289[mm] and width of stator vibrator was varied respectively 16, 12, 8, 4[mm].

When thickness of piezoelectric ceramics was decreased, the displacement of the stator vibrator was increased. And when width of stator vibrator was decreased, the displacement of the stator vibrator was increased.

**Key Words** : Ultrasonic linear motor, L1-B8, Finite Element Method, Elliptical motion

#### 1. 서론

초음파 전동기는 고정진동자의 초음파 진동을 회전자 사이의 마찰을 이용하여 추진력을 얻는 모터이다. 초음파 전동기는 전자식 전동기와 비교해 고주파 전원이 필요하고 마찰로 인한 내구성이 떨어진다는 단점이 있는 반면, 저속에서 고토크를 발생하고 응답속도가 빠르며, 제동이 견고하고 소음이 전혀 없고 소형·경량·단순구조 및 전·자계로부터 영향을 받지 않으며 역으로 발생하지도 않는다는 장점을 보유하고 있다. 특히 리니어 모터는 기어를 사용하지 않고 정밀위치 제어가 가능한 x-y스테이지 등의 구성에 유용하다.[1] 초음파 모터의 실용화를 위해서는 압전세라믹의 변위가 마이크로 범위(micro order)이기 때문에 작은 변위를 이용하여 고효율을 얻기 위해 고정진동자의 변위

의 형성을 향상시키고, 마찰에 의한 에너지 전달을 좋게 하기 위한 노력이 요구되어 진다.

본 논문에서는 고정진동자의 Euler-Bernoulli theory를 이용하여 탄성체를 설계하고 탄성체와 세라믹의 접착시 폭의 변화에 따른 변위량과 압전세라믹의 두께 변화에 따른 변위량의 변화를 유한요소해석을 통해 살펴보았다.

#### 2. 평판형 L1-B8 모드 초음파 전동기의 설계

##### 2.1 구조와 동작원리

1차 종진동모드(L1)와 8차 굴곡진동모드(B8)의 두개의 진동 모드를 이용한 선형 초음파 전동기의 구조를 그림 1에 나타내었다. 진동원인 압전소

자는 각 진동모드의 공간적으로 위상이 다른 위치에 접합하고, 분극방향의 조정을 하여, 고주파의 90° 위상차가 나는 두개의 교류 전원을 인가하면 압전 특성에 의해 그림 1과 같이 1차 종방향진동(L1)모드와 8차 굴곡진동(B8)모드가 동시에 발생하고, 이 두 모드가 합성된 결과로써, 타원진동이 발생한다.[2] 이 타원진동에 의해 초음파 리니어 전동기로서 응용되어 질 수 있다.

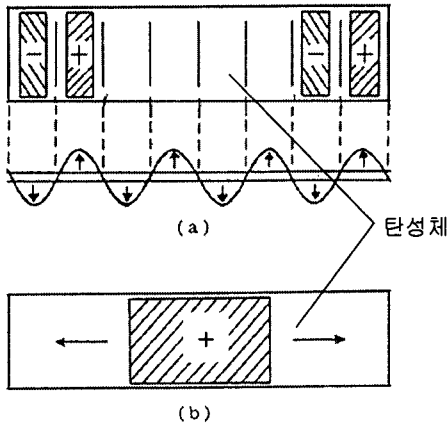


그림 1. (a) 8차 굴곡진동모드.  
(b) 1차 종방향진동모드.  
Fig. 1 (a) Eighth bending vibration mode.  
(b) First longitudinal vibration mode.

## 2.2 고정자의 설계

1차 종진동과 8차 굴곡진동을 이용하여 초음파 리니어 전동기의 설계시 고려하여야 할 사항은 고정진동자의 기하학적 크기이다. n차 굴곡진동모드의 공진주파수는 보의 굽힘에 관한 기본이론(Euler-Bernoulli theory)을 이용하였고, 회전관성과 전단변형의 영향을 무시하였다.[3] n차 종진동모드의 공진 주파수는 봉이나 막대의 x방향 힘의 합 운동방정식에서 유도할 수 있다.[4] 각각의 공식은

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

$$f_{L1} = \left(\frac{1}{2l}\right) \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

이다. 단, E, ρ, l, t는 각각 탄성체의 영률, 밀도, 길이, 두께를 의미한다.

$$f_{L1} = f_{B8} \quad (3)$$

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 접착 때문에 공진주파수가 변경되므로 미세한 수정이 필요하다.[5] 위의 식에서 설계한 알루미늄 탄성체의 크기(X×Y×Z)는 100 × 1.1526 × Z[mm]이다. 압전세라믹의 두께는 알루미늄 탄성체와 동일한 두께로 하여 고정진동자의 폭(Z)을 각각 16, 12, 8, 4[mm]로 하여 고정진동자의 폭의 변화에 따른 변위량을 유한요소 해석을 통해 해석하였으며, 또한 압전세라믹의 두께의 변화에 따른 변위량의 변동을 알아보기 위해 고정진동자의 폭은 4[mm]로 고정하고, 두께를 각각 2.289, 1.526, 0.763[mm]로 변화시켜 유한요소 해석을 하였다.

## 3. 유한 요소 해석

### 3.1 요소유형과 재료 물성치

해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하였다. 모터의 동작은 고정 진동자에 의해 결정되기 때문에 고정진동자만이 해석의 모델이 되었다.

표 1. 재료물성치.

Table 1. Material Property.

재료	밀도 [kg/m <sup>3</sup> ]	유전율 [F/M]	탄성계수 [N/m <sup>2</sup> ]	프와송비
압전세라믹	7730	8.7969 E-9		
알루미늄	2690		7.03 E10	0.345

ANSYS에서는 해석하려는 목적에 따라 권장하는 요소의 유형이 있다. 3차원 압전 해석 시, 논문에서는 압전 세라믹은 SOLID5, 금속 탄성체는 SOLID45를 선택하였다.[6]

표 1은 해석에 사용된 압전 세라믹과 알루미늄 탄성체의 재료물성치를 보여준다. 행렬의 형태로 입력되는 압전정수와 stiffness에 관한 데이터는 생략하였다.

우선 FEM 해석을 통해 모드해석을 하여 고정진동자의 폭의 변화와 압전세라믹의 두께 변화에 따른 공진주파수를 확인하고, 각각의 공진주파수에서 100V의 전압을 인가하여 하모닉 해석을 하였다.

### 3.2 탄성체와 압전세라믹의 폭의 변화에 따른 변위량 해석

FEM으로 진동모드를 해석한 결과 굴곡진동의 골(valley)부분과 마루(crest)부분에 변위 확대기구(projection)를 위치시킴으로써 L1-B8모드의 진동을 최대화 할 수 있기 때문에 절점(node) 1126(그림 2에서 두번째 골의 중심 절점)에서 변위량을 해석하였다.[7]

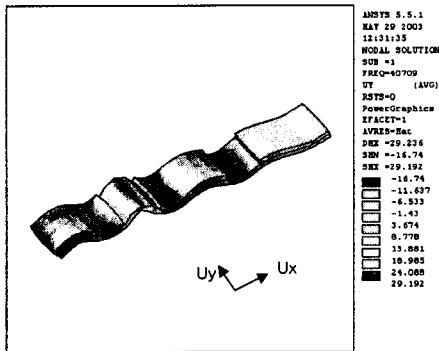


그림 2. 고정진동자의 Y축 방향 변위 분포.  
Fig. 2. Distribution of Y axis direction displacement of stator vibrator.

고정진동자의 최적설계를 위해서 탄성체와 압전세라믹의 폭을 같이 변화시키면서 변위량을 해석하였다. 폭을 16[mm], 12[mm], 8[mm], 4[mm]로 변화시키면서 변위량을 비교하였다. 동일 절점에서의 변위량을 그림 3과 최대 변위량을 표 2에 나타내었다. 압전세라믹의 횡진동 모드(transverse mode)는 d31효과를 이용하는 진동 모드로서 분극

방향의 두께가 얇아 분극방향과 수직인 방향으로의 변위가 우세한 경우이다. 즉 그림 4에서 압전세라믹의 치수에서  $(X/Z)^2$ 과  $(X/Y)^2$  모두 10이상일 경우에 나타나는 모드이다.[8] 따라서 표2에서 알 수 있듯이 횡진동 모드조건을 만족하는 폭이 작아질수록 X, Y축 방향의 변위가 커짐을 알 수 있었다.

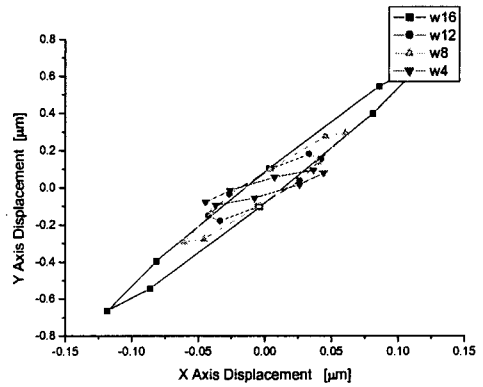


그림 3. 한 절점에서의 변위.  
Fig. 3. Displacement of the same node.

표 2. 고정진동자의 폭의 변화에 따른 절점에서의 변위.

Table 2. Displacement of the same node by width of the stator vibrator.

[단위 : m]

고정자의 폭	Ux 최대변위량	Uy 최대변위량
16[mm]	0.3830E-07	0.1245E-06
12[mm]	0.4222E-07	0.1800E-06
8[mm]	0.6058E-07	0.2925E-06
4[mm]	0.1182E-06	0.6641E-06

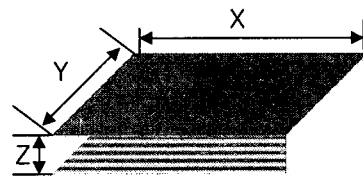


그림 4. 압전세라믹의 치수.  
Fig. 4 Size of piezoelectric ceramic.

### 3.3 압전세라믹의 두께의 변화에 따른 변위량 해석

압전세라믹의 두께에 따른 최적설계를 위해서 변위량을 비교하였다. 탄성체의 두께는 1.526[mm]로 고정시키고 압전세라믹의 두께를 탄성체의 두께의 1.5배, 1배, 0.5배인 2.289[mm], 1.526[mm], 0.763[mm]로 변화시키며 한 노드점에서의 변위량을 해석하였다. 압전세라믹과 탄성체의 폭은 4[mm]로 하여, 압전세라믹의 두께에 따른 변위량을 표 3에 나타내었다. 압전세라믹의 두께가 두꺼워 질수록 변위량이 감소하였다.

표 3. 압전세라믹의 두께에 따른 절점에서의 변위.

Table 3. Displacement of the same node by thickness of the piezoelectric ceramics.

압전세라믹의두께	UX 변위량	UY 변위량
2.289[mm]	0.2217E-06	0.2434E-05
1.526[mm]	0.2702E-06	0.2694E-05
0.763[mm]	0.4004E-06	0.1615E-04

## 4. 결 론

본 연구의 FEM 해석을 통해 고정진동자의 폭의 변화에 따라 L1-B8모드 공진주파수가 16[mm]일 때 40709[kHz], 4[mm]일 때 39850[kHz]로 폭이 좁아질수록 공진주파수가 조금씩 낮아짐을 알 수 있었고, 고정진동자의 변위량은 그림 3에서와 같이 미세하게 약간씩 증가함을 알 수 있었다.

압전 세라믹의 두께 변화에 따라 공진주파수가 2.289[mm]일 때 44469[kHz], 1.1526[mm]일 때 39850[kHz], 0.763[mm]일 때 30652[kHz]로 두께가 얇아질수록 주파수가 크게 낮아지며 변위량은 미세하게 증가함을 알 수 있었다.

FEM 해석을 통해 L1-B8 초음파 전동기의 고정진동자의 치수에 의한 공진주파수와 변위량의 변화를 고찰 하였으며, 전동기의 설계 및 제작시 고려 되어질 수 있었다.

## 참고 문헌

- [1] Toshiiku Sashida, Tokashi Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors", OXPORD, 1993.
- [2] Yoshiro Tomikawa, Takashi Nishitsuka,

Toshiharu Ogas-awara and Takehiro Takano, "A Paper or Card Forwarding Device using a Flat-Type Ultrasonic Motor, S&A vol. 1,2 p. 359-379, 1989.

- [3] Singiresu S. Rao, 'Mechanical Vibratoins", Addison Wesley Publishing Company, 1990.
- [4] S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa and N. Nakamura, "Ultrasonic Motors Theory and Application", OXPORD, 1993.
- [5] T. Kosawada, K. Suzuki, T. Tomikawa, "A Card Sending Linear Ultrasonic Motor using Multi-Beam Piezoelectric Vibrator", International Journal of Applied Electromagnetics in Materials Vol. 2, p. 285-290, 1992.
- [6] 손창현, "유한요소해석 입문과 선형해석", (주) 태성에스엔이, p. 424-438, 1999.
- [7] Siyuan He, Weishan Chen, Xie Tao, ZAili Chen, "Standing Wave Bi-directional Learly Moving Ultrasonic Motor", IEEE, Vol. 45, No. 5, p. 1133, 1998
- [8] 신병철, "압전특성 평가기술", 과학과 기술, Vol. 6, No. 1, 1991