

## 2개의 란쥬반형 압전 진동자를 이용한 초음파 리니어 모터의 설계와 유한요소해석

### Design and FEA of Ultrasonic Linear Motor Using Two Langevin Piezoelectirc Vibrator

최명일\*, 박태근\*, 정현호\*, 이재형\*, 정영호\*\*

(Myeong-Il Choi\*, Tae-Gone Park\*, Hyon-Ho Chong\*, Jae-Hyung Lee\*, and Yeong-Ho Jeong\*\*)

#### Abstract

Transducer for ultrasonic linear motor with symmetric and anti-symmetric modes was studied. The ultrasonic linear motor consists of two Langevin type piezoelectric vibrators that cross at right angles with each other in tip. In order to excite symmetric and anti-symmetric modes, the transducer must have a phase shift of 90 degree in space and time. As a result, the tip of transducer moves on an elliptical motion. In this paper, the finite element analysis was used to optimize dimension and displacement of the transducer.

**Key Words** : Ultrasonic linear motor, Piezoelectric ceramics, Elliptical trajectory, Finite element analysis

#### 1. 서론

최근 압전세라믹의 신속한 발전에 따라 압전 액추에이터는 매우 빠른 속도로 발전하고 있다. 압전 액추에이터의 많은 장점을 계승한 초음파 모터는 기존의 전자기 모터의 메커니즘과는 전혀 다르게 초음파 대역의 탄성진동을 구동원으로 하고, 진동에 왕복운동을 마찰력으로 하여 회전운동 또는 직선운동을 발생시킨다. 이러한 초음파 모터는 전자기식 모터에 비하여 소형, 경량이고, 구조가 간단하고 수하특성에서 응답성이 좋고, 저속에서 높은 토크를 발생한다. 반면에 초음파 전원이 필요하고 마찰에 의한 고정자와 회전자의 마모가 발생한다는 단점도 가지고 있다. 초음파 리니어 모터는 정

밀 위치제어가 [ $\mu\text{m}$ ] 단위까지 되는 장점을 이용하여 반도체 제조 및 정밀선반 장비에 필요한 X-Y 스테이지용 리니어 모터로서 응용될 수 있다. 특히, 소음과 전자파가 전혀 없는 장점을 이용하여 전자파에 예민한 좁은 공간용의 리니어 모터로서의 응용분야에 적용이 기대된다[1-3].

본 연구에서는 초정밀제어 리니어 모터 개발을 위한 목적으로 2개의 란쥬반형 압전 세라믹으로 구성된 초음파 리니어 모터에 대해 연구하였다 [4,5]. 이 초음파 리니어 모터를 최적설계를 하기 위하여 공진모드에서의 다원진동을 주로 해석하였다. 초음파 모터의 유한요소해석은 주로 공진주파수와 공진모드에 따른 변위량 해석 및 모델설계에 유용하게 이용되고 있다. 유한요소해석 프로그램은 ANSYS 5.5를 사용하였다[6-10].

\* : 창원대학교 전기공학과  
(경남 창원시 사림동 9번지  
Fax: 055-263-9956

Corresponding Author : leppard94@hanmail.net)

\*\* : 한전전력연구원 기술개발센터  
2002년 12월 30일 접수, 2003년 3월 17일 1차 심사완료,  
2003년 4월 7일 최종 심사완료

#### 2. 실험 및 고찰

##### 2.1 모터의 구성과 구동원리

그림 1은 초음파 리니어 모터의 기본구성을 나

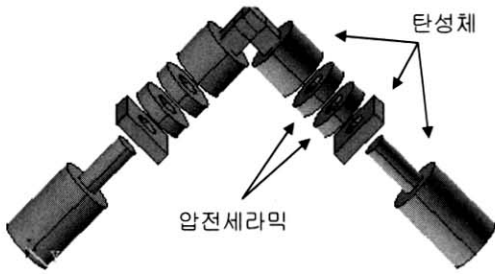


그림 1. 초음파 리니어 모터의 구조.  
Fig. 1. Structure of ultrasonic linear motor.

타내고 있다. 두께방향으로 분극 되어진 압전 세라믹과 알루미늄이 볼트에 의해 결합된 2개의 란쥬반형 진동자가 팁(tip) 부분에서 서로 직각으로 구성된다. 각각의 란쥬반형 진동자의 압전 세라믹에 교류전압을 인가하면, 란쥬반형 진동자는 각각 두께 방향으로 진동을 하게 된다. 압전소자의 진동은 알루미늄 탄성체에 전달되고 2개의 란쥬반형 진동자가 만나는 tip 부분에서 슬라이더를 이동시킨다[4,5].

이 초음파 리니어 모터는 대칭, 비대칭 진동모드를 이용하는데, 두 란쥬반형 진동자가 서로 같은 구동전압의 위상에서 동작하면 tip 부분이 슬라이더의 법선방향으로 진동을 하는 모드를 대칭모드라 하고, 서로 다른 위상의 전압이 인가되는 경우에 슬라이더의 접선방향으로 굴곡 진동하는 모드를 비대칭모드라 한다[4].

즉, 압전 세라믹에 90° 위상이 다른 전압(sin파, cos파)을 인가하게 되면 대칭, 비대칭모드가 합성된 결과로서 두 진동자가 만나는 tip부분에서 타원운동이 일어나게 되고, 이 타원운동에 의해 슬라이더가 구동하게 된다[5].

그림 2는 두 진동모드가 합성된 tip에서의 타원

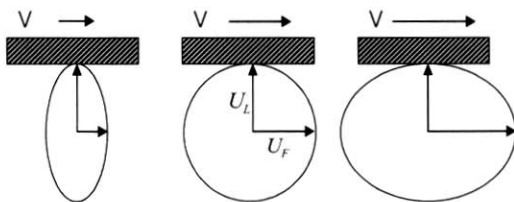


그림 2. 진동의 타원궤적.  
Fig. 2. Elliptical trajectory of vibration.

궤적을 보이고 있다. 슬라이더의 접선방향의 성분이 클수록 슬라이더를 이동시키는 속도가 높은 것을 알 수 있다. 또한 여기서 궤적의 진폭을 조절하여 슬라이더의 이동속도를 제어 할 수 있음을 유추할 수 있다[3]. 이러한 이론을 바탕으로 하여 본 연구에서는 실제 리니어 모터에 적합한 타원궤적을 중점적으로 해석하였고, 궤적의 진폭을 조절하기 위하여 구동전압의 가변과 세라믹 적층 수 등의 조건 속에서 시뮬레이션을 실시하였다.

식 (1)과 (2)처럼 위상차  $\theta$  를 갖는 2개의 sin파는 위상차 일 때의 식 (3)의 궤적 방정식(trjectory equation)을 유도 할 수 있고, 타원운동이 발생함을 수식에서도 알 수 있다.

$$\phi = \frac{\pi}{2} \tag{1}$$

$$u_x = u_{x0} \sin \omega t \tag{2}$$

$$u_y = u_{y0} \sin(\omega t + \phi) \tag{3}$$

## 2.2 ANSYS를 이용한 유한요소해석

### 2.2.1 해석 모델의 설계

모터의 진동해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 압전 소자는 SOLID5, 탄성체인 알루미늄은 SOLID45를 사용하여 3차원적으로 설계하였고, 요소분할은 mapped meshing을 하였다. 그림 3은 유한요소해석 순서도이다. 전압을 인가하지 않은 무부하 상태에서 공진주파수 해석(modal analysis)을 시행하였고, 이 공진주파수를 가진 교류전압을 인가하여 진동자의 정상상태 해석(harmonic analysis)으로 변위량을 해석할 수 있었다. 경계조건은 free-free를 기본조건으로 하였다[11-13].

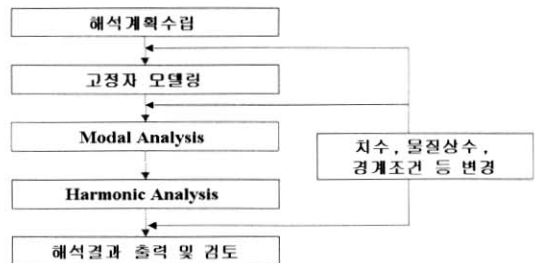


그림 3. 유한요소해석의 순서도.  
Fig. 3. Flow chart of FEA.

그림 4는 유한요소해석을 통해 초음파 리니어 모터의 3차원 모델이다. 압전 세라믹에 100 V의 교류전압을 인가시 기본모델의 공진주파수 24.9 kHz를 얻었다. 두 란쥬반형 진동자가 만나는 tip의 노드(node)에서 변위량을 측정하였다.

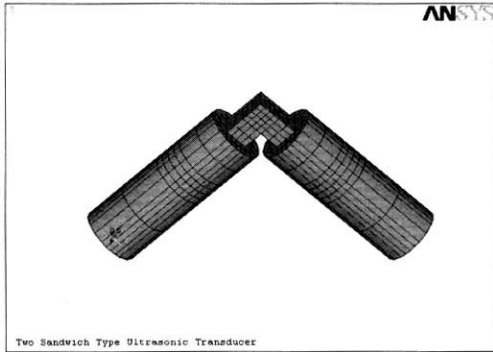


그림 4. 유한요소해석 모델.

Fig. 4. FEA model.

2.2.2 재료 물성치와 모델의 치수

압전 세라믹은 Tokin사의 NEPEC 6을 사용하였고, 표 1과 같다. 세라믹의 두께는 5 mm이고, 지경은 20 mm이다. 탄성체의 알루미늄(Alloy6055)을 사용하였고 재질의 물성치는 표 2와 같다, 그림 5는 해석에 사용된 모델의 치수이다. 압전소자와 탄성체를 결합한 전체길이는 70 mm로 설계하였다. 두 란쥬반형 진동자의 변위확대 부분인 tip의 높이는 15 mm로 정하였다. 그리고 탄성체를 a, b, c로 구분하여 시뮬레이션을 하였고 그림에서의 이 점쇄선

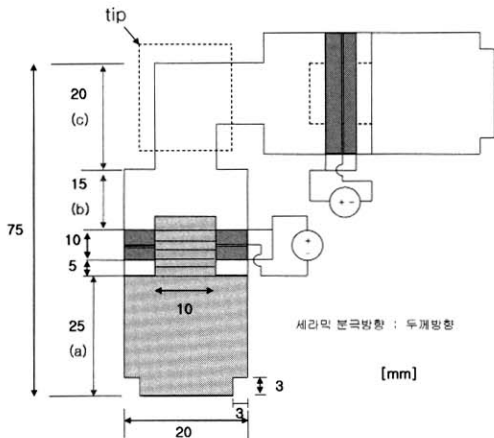


그림 5. 설계모델의 치수.

Fig. 5. Size of design model.

부분이 transducer의 tip부분이다. 실제 모터의 설계에서는 볼트형태로 세라믹과 탄성체가 연결되지만 유한요소해석을 좀 더 쉽게 하기 위하여 디스크형으로 단순히 접촉하는 구조로서 모델을 설계하였다.

표 1. 압전세라믹의 물질상수.

Table 1. Material property of piezoelectric ceramics.

$c_{11}^E (\times 10^{10} [N/m^2])$	13.2	$c_{12}^E$	7.1
$c_{13}^E$	7.3	$c_{22}^E$	13.2
$c_{23}^E$	7.3	$c_{33}^E$	11.5
$c_{44}^E$	3.0	$c_{55}^E$	2.6
$c_{11}^E$	2.6		
$e_{13} (C/m^2)$	-4.1	$e_{23}$	-4.1
$e_{33}$	14.1	$e_{32}$	10.5
$e_{61}$	10.5		
$\epsilon_{11} (\times 10^9 [F/m])$	7.214	$\epsilon_{22}$	7.214
$\epsilon_{33}$	5.841		
Density	7730 [kg/m <sup>3</sup> ]		

표 2. 탄성체의 물질상수 (Aluminum 6055).

Table 2. Material properties of elastic body (Aluminum 6055).

Young's modulus	$7.6 \times 10^{10} [N/m^2]$
Poisson's ratio	0.3
Density	2700 [kg/m <sup>3</sup> ]

2.3 결과 및 고찰

2.3.1 ANSYS에 의한 변위의 크기와 방향

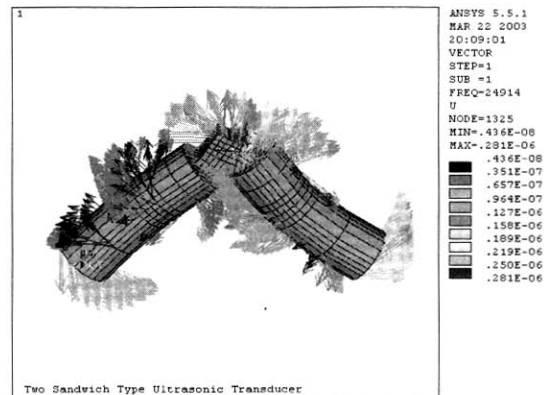


그림 6. 유한요소해석에 의한 변위의 크기와 방향.

Fig. 6. Volume and direction of displacement by FEA.

그림 6은 공진주파수 24.9 kHz에서 모터의 변위 형상의 크기와 방향을 보이고 있다. 그림에서 화살표의 방향은 변위의 진동방향을 의미하고, 화살표의 색깔이 적색에 가까울수록 변위의 진동성분이 크다는 것을 나타낸다.

2.3.2 한 주기 동안 tip에서의 변화 해석

그림 8은 초음파 리니어 모터의 tip부분을 그림 7과 같이 한 주기  $t$ 를  $t_0 \sim t_8$ 까지의 구간별로 나누고 각 구간의 순간에서 진동형상을 살펴 볼 수 있다.  $t_1$ 과  $t_4$ 일 때는 대칭모드로, 나머지 구간은 비대칭 모드로 동작되고 있다. 이러한 대칭-비대칭 모드가 합성된 결과로서 전체적인 타원케적이 형성됨을 그림에서 알 수 있다.

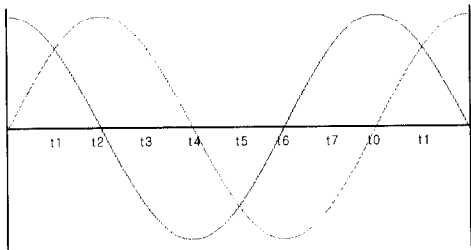


그림 7. 주기  $n/\pi$  ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ )에서의 두 개의 정현파.

Fig. 7. Sin wave and cos wave at cycle.

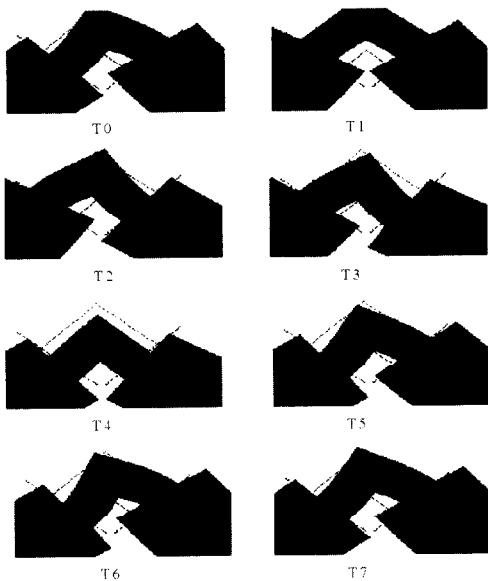


그림 8. Tip에서 한 주기동안의 진동 변화.  
Fig. 8. Change of vibration at cycle.

2.3.3 압전 세라믹의 적층 수에 의한 변위량 해석

세라믹을 포함한 전체 진동자의 크기와 세라믹의 전체 두께를 10 mm로 유지하는 조건하에서 세라믹을 2, 4, 8층으로 가변하여 표 3과 같이 공진주파수를 얻었고, 층수별 각각의 공진주파수에서 타원변위가 크게 증가함을 보이고 있다. 여기서 세라믹의 층수가 증가 할수록 tip부분의 타원변위가 크게 증가함을 보이고 있다. 여기서 세라믹의 층수와 슬라이더를 움직이는 모터의 추력이 비례함을 유추할 수 있다. 표 3은 유한요소해석에 사용된 세라믹의 층수, 두께 그리고 공진주파수를 나타낸다.

2.3.4 압전 세라믹의 인가전압에 의한 변위량 해석

그림 4의 모델을 기본 시뮬레이션 모델로 하여 세라믹의 두께를 5 mm로 하였을 경우에 인가전압에 의한 변위량을 그림 10에 나타내었다. 인가전압이 50 V에서 250 V까지 증가한 경우에 전압에 비례하여 변위량이 커짐을 할 수 있다. 이것은 전압과 변위는 비례하는 압전 역효과에 의하여 추력이 커지므로 인가전압이 증가 할수록 속도도 비례하여 커짐을 알 수 있다. 이로서 구동전압을 조절하면 초음파 리니어 모터의 속도를 제어 할 수 있음을 확인 하였다.

표 3. 세라믹 적층에 의한 공진주파수.

Table 3. Resonance frequency with accordance of ceramic layer.

Number of ceramic layer	2	4	8
Thickness of ceramic [mm]	2.5	1.25	0.625
Resonant frequency [kHz]	24.9	24.8	30.0

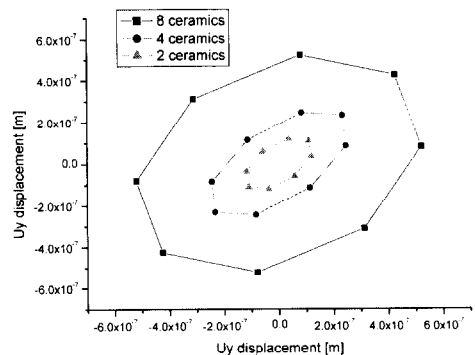


그림 9. 세라믹의 층수에 의한 변위량.

Fig. 9. The displacement with accordance of ceramic layer.

2.3.5 타원궤적의 운동방향 해석

그림 11은 구동전압의 위상을 인가한 경우와 위상을 서로 바꾸어 인가한 경우의 변위량을 나타내고 있다. 구동전압의 위상이 반대가 되면 y축과 z축의 변위는 같지만, 화살표의 방향처럼 타원운동의 방향이 역전됨을 알 수 있다. 이것은 초음파 리니어 모터의 전압을 제어하므로써 슬라이더의 이동방향을 정, 역 방향으로 바꿀 수 있음을 나타내고 있다[8]. 그리고 각각의 란쥬반형 진동자의 압전 세라믹 분극방향을 다르게 시뮬레이션을 한 경우에 타원변위량과 타원운동의 회전방향은 바뀌지 않고, 단지 타원운동의 출발점만 바뀌는 것도 확인하였다.

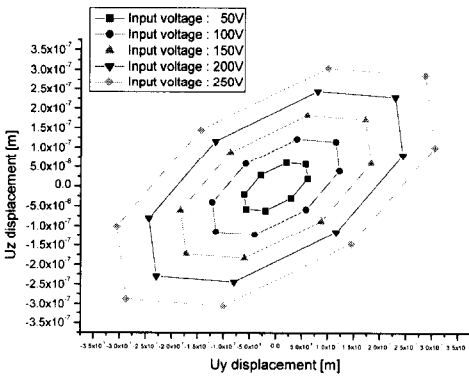


그림 10. 인가전압에 의한 변위량.  
Fig. 10. The displacement with accordance of driving voltage.

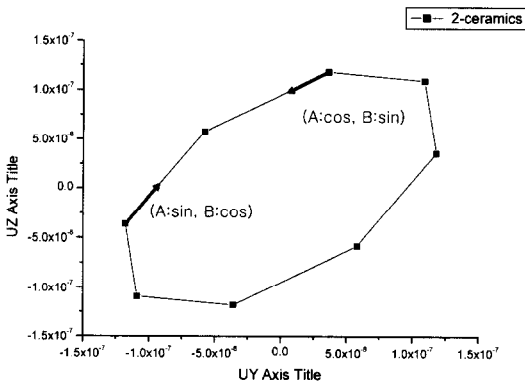


그림 11. 구동전압의 위상에 의한 타원운동의 방향.  
Fig. 11. Direction of elliptical motion with accordance of voltage phase.

2.3.6 세라믹과 탄성체의 길이에 따른 변위량 해석

리니어 모터에 맞는 효율적인 타원궤적을 얻기 위해서 란쥬반형 진동자의 크기를 그림 5에서처럼 a, b, c로 나누어서 각각의 크기를 변화시키며 타원변위를 관찰하였다. 그림 12는 해석 시뮬레이션 결과의 타원변위량을 나타낸다. 그림에서처럼 a:b:c의 길이를 1:1:1에서 1:1:2까지의 타원궤적을 살펴보면 a:b:c의 길이가 1:1:2인 경우는 transducer의 진동 성분은 크지만 슬라이더를 움직일 수 있는 추력이 너무 작아서 실제 초음파 리니어 모터에는 적합하지 않은 것으로 보인다. 반면에 길이의 비가 2:1:1의 경우에는 y축과 z축의 비례하는 타원운동을 얻음으로서 실제 진동에 효과적이라 할 수 있다.

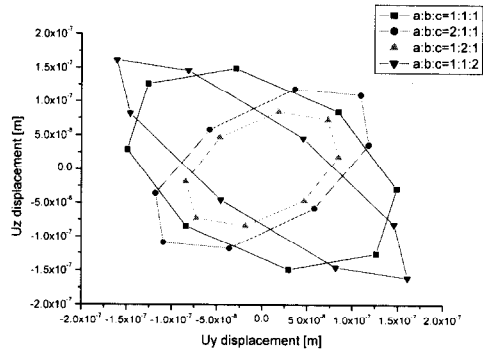


그림 12. 진동자 a, b, c의 길이 비율에 따른 변위.  
Fig. 12. The displacement with accordance of length rate of a, b, c.

2.3.7 탄성체의 길이 a에 따른 변위량과 공진주파수 해석

그림 12에서 a:b:c 길이의 비에서 a의 길이가 이상적인 타원궤적을 얻는데 관련됨을 알 수 있었고 이러한 결과에 의해서 이번에는 a의 길이만을 변화시켜 보았다. 그림 13은 시뮬레이션 결과 a의 길이가 증가 할수록 타원변위가 증가함을 설명하고 있다. 또한 그림 14는 a의 길이가 증가 할수록 공진주파수는 감소하는 것을 알 수 있었다.

2.3.8 경계조건에 따른 변위량 해석

모터의 실제 제작 전에 있어서 초음파 리니어 모터의 경계조건은 아주 중요하다. 유한요소해석에 각각의 란쥬반형 진동자의 고정 위치에 따라서 타원변위가 크게 변화됨을 그림 15에서 알 수 있다.

초기의 free-free 상태의 경계조건과 란쥬반형 진동자의 중간(세라믹 아래 부근), 바닥 부분을 고정 한 경우를 각각 시뮬레이션 할 결과 란쥬반형 진동자의 중간부근을 고정한 경우에 가장 큰 변위를 얻을 수 있었다. 즉, 중간 부근을  $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$  방향으로 고정하는 것이 전체적인 타원체적이 커지므로 초음파 리니어 모터로서 효율적임을 알 수 있었다.

그러나 란쥬반형 진동자의 중간(세라믹 위 부근)을 고정한 경우에는 세라믹의 진동의 tip 지점까지 전달이 되지 않아서 타원운동이 발생하지 않았다. 따라서 세라믹 위 지점을 고정하는 경우에는 리니어 모터의 조건에는 맞지 않는다.

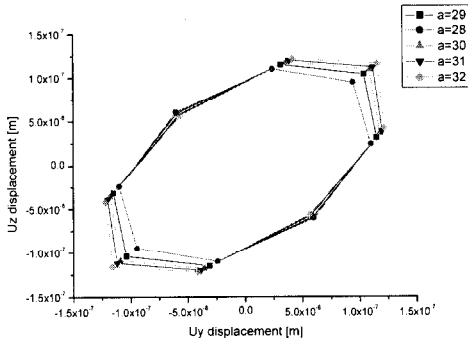


그림 13. 진동자의 a 길이에 따른 변위량.  
Fig. 13. The displacement with accordance of length a.

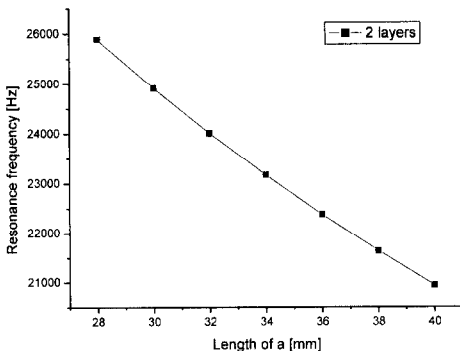


그림 14. 진동자의 a 길이에 따른 공진주파수.  
Fig. 14. Resonance frequency with accordance of length a.

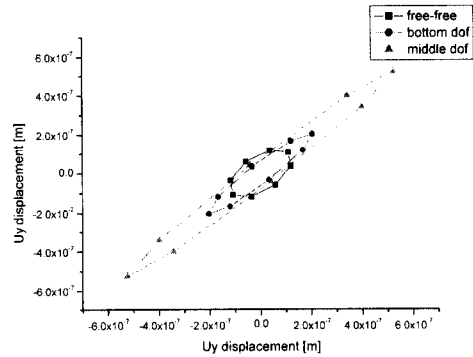


그림 15. 경계조건에 따른 변위량.  
Fig. 15. The displacement with accordance of boundary condition.

### 3. 결론

본 연구에서는 2개의 란쥬반형 압전 세라믹을 이용한 초음파 리니어 모터를 유한요소해석을 통해 설계모델을 생성하고, 해석을 하였다. modal 해석과 harmonic 해석을 통해 설계모델의 공진주파수가 24.9 [khz]임을 알 수 있었고, 고정자의 진동형상을 확인하였고, tip부분의 타원체적을 관찰하였다.

압전 세라믹을 적층(multi layers) 할수록 모터의 변위량이 커지는 것을 알 수 있었다. 그리고 인가 전압과 변위량이 비례하므로 구동전압을 조절하여 초음파 리니어 모터의 속도를 제어 할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 구동전압의 위상을 서로 바꾸어 인가한 경우, 타원운동의 방향이 역전되어 슬라이더의 진행방향을 제어 할 수 있음을 확인하였고, 란쥬반형 진동자의 a, b, c 중에 a의 길이를 변화시키면서 이상적인 타원체적을 얻을 수 있었다. 그리고 각각의 란쥬반형 진동자의 중간부근에서 고정하는 경계조건이 다른 조건보다 큰 변위를 얻음을 확인하였다.

지금까지 모터의 최적 설계를 위해 여러 조건으로 시뮬레이션을 하였다. 이런 해석 값이 실제 초음파 리니어 모터를 제작하는데 큰 자료가 될 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R05-2002-00927-0)지원으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] 박창엽, “전기전자용 압전세라믹스”, 반도체출판사, p. 146, 1994.
- [2] Toshiiku Sashida and Takashi Kenjo, “An Introduction to Ultrasonic Motors”, OXFORD, p. 1, 1993.
- [3] S. Ueha and Y. Tomikawa, “Ultrasonic Motors Theory and Application”, OXFORD, p. 93, 1993.
- [4] Minoru Kuribayashi Kurosawa “Transducer for high speed and large thrust ultrasonic linear motor using two sandwich-type vibrators”, IEEE, Vol. 45, No. 5, p. 1188, 1998.
- [5] Kenhi Mori, Tomoko Kumagae, and Hiromu Hirai, “Ultrasonic linear motor for a high precision X-Y stage”, IEEE Ultrason. Symp., p. 3, 1989.
- [6] 박민호, 김태열, 박태곤, 김명호, “관류반형 진동자의 유한요소해석 및 세라믹 적층특성 비교”, 한국전기전자재료학회 2000하계학술대회 논문집, Vol. 1, No. 2, p. 415, 2000.
- [7] 김태열, 김범진, 박태곤, 김명호, “초음파 리니어 모터의 타원궤적 해석”, 한국전기전자재료학회 2000하계학술대회논문집, Vol. 1, No. 2, p. 411, 2000.
- [8] 김태열, 김범진, 박태곤, 김명호, Kenjo Uchino, “L1-B4 샌드위치형 진동자를 이용한 선형 초음파 모터의 설계 및 특성”, 전기전자재료학회논문지, 13권, 12호, p. 1025, 2000.
- [9] 김범진, 정동석, 김태열, 박태곤, 김명호, Kenji Uchino, “L1-B4 모드 유니몰프형과 바이몰프형 진동자를 이용한 선형 초음파 모터의 특성”, 전기학회논문지, 50권, 9호, p. 427, 2000.
- [10] 손창현, “유한요소해석 입문과 선형해석”, 태성에스앤이, p. 424, 1999.
- [11] 박형진, “ANSYS를 이용한 유한요소해석”, 광문각, p. 306, 2001.
- [12] ANSYS 5.5 Manual.