Journal of the Korean Ceramic Society
Vol. 40, No. 10, pp. 981~984, 2003.

선형초음파 모터의 설계 및 제작

이동균 · 한득영 · 윤석진*†
건국대학교 전기공학과
*한국과학기술연구원 박막재료연구센터
(2003년 8월 28일 접수; 2003년 9월 4일 승인)

Design and Fabrication of Novel Linear Ultrasonic Motor

Dong-Kyun Lee, Deuk-Young Han, and Seok-Jin Yoon*†
Department of Electrical Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea
*Thin Film Materials Research Center, KIST, Seoul 130-650, Korea
(Received August 28, 2003; Accepted September 4, 2003)

초 록

본 논문에서는 고정민 위치제어가 가능한 선형초음과 모터를 설계 및 제작하였다. 제안된 선형 초음파 모터의 발파장 진동자에 진계(Usinwt, Ucoswt)를 인가했을때 진동법의 불출부에서 발생하는 타원궤직은 이동자를 구동시킨다. 제작된 선형 초음파 모터의 면위궤적은 시뮬레이션 결과와 일치했으며, 압차력이 50 N일 때 이동자에서 발생하는 최대 힘은 9 N, 최대속도는 0.9 m/s이고 20 N일 때 최대 힘은 2.4 N, 최대 속도는 0.38 m/s의 특성을 나타냈다.

ABSTRACT

A novel linear ultrasonic motor for precision position control was designed and fabricated. It was composed of two piezoelectric actuators with longitudinal ultrasonic fluctuations and shaking beam. When two AC electric fields (Usinwt, Ucoswt) were applied to piezoelectric actuators respectively, the middle part of shaking beam had an elliptical trajectory. According to experimental results, the generative force was proportional to pre-load force but the speed of slider was in inverse proportion. And the bar of shaking beam had a same trajectory with simulation result.

Key words* : *Linear ultrasonic motor, Shaking beam, Precision position control, Elliptical trajectory

1. 서 론

최근 정보사회의 급속한 발달로 보다 빠르고, 정밀한 전자 및 광학기기의 필요성이 크게 대두되고 있으며, 이러한 기기에서 요구되는 높은 정밀성 때문에 서브 미크론 크기의 위치제어를 위한 변위 소자가 필요하다. 이에 부합되는 특성을 갖는 변위소자로서 압전세라믹을 이용한 초음파 모터가 있다. 압전 초음파 모터는 기존의 전자기적 구동을 하는 모터에 비해 질량대비 힘이 우수하며 직접구동방식이고 윤활유 등이 필요없는 장점을 가지고 있다. 특히 선형 초음파 모터는 속도와 위치제어를 전기적으로 제어할 수 있음은 물론 정 또는 역방향으로 움직임이 가능하고 빠른 속도로 nm의 높은 위치 정밀도를 가지고 있어서 XYZ stage와 반도체 소자의 집적을 위한 얼라인먼트 기기인 stepper 등에 부착되어 정밀한 위치제어를 위한 액츄에이터 소자로 응용이 가능하다.

일반적으로 선형 초음파 모터를 구동하기 위해서 란쥬반(langevin) 진동자에서 발생된 진행파를 이용하는 방법[1]과 서로 다른 동작 모드를 갖는 진동자를 결합하여 발생하는 복수 진동을 이용하는 방법[2,3] 등이 사용된다. 이외에 진동전달에는 여러가지 방법이 제안되고 있지만 효율적으로 구동력을 전달하는 메카니즘과 연속 구동시 마모 등으로 인해 일정한 진동 진폭을 확보하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 압전 세라믹스에서 발생하는 종방향 진동을 확대하여 효율적으로 이동자에 타원형의 진동을 전달할 수 있는 새로운 구조의 선형 모터를 제안하였다.

2. 반파장 진동자

란쥬반(langevin) 진동자는 2개의 압전체 양쪽에 탄성체를 볼트로 결합한 구조로서 $\lambda/2$ 모드로 동작을 하면 압전 세라믹스에서 발생하는 진동(< 0.1 μm)이 진동자의

†Corresponding author : Seok-Jin Yoon
E-mail : sjyoon@kist.re.kr
Tel : +82-2-958-5550 Fax : +82-2-958-6720

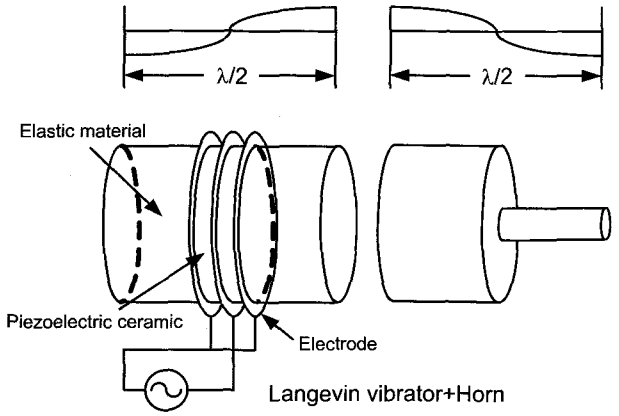


Fig. 1. Half-wave vibrator composed of langevin vibrator and horn.

끝에서 약 5 μm 확대된다. 또한 Fig. 1에서와 같이 란쥬반 진동자와 동일한 $\lambda/2$ 길이의 혼(horn)을 연결하면 혼의 위, 아래 단면적의 비율만큼 진동이 더욱 증폭된다.[4] 이상적인 혼의 구조는 지수(expoential) 구조이지만 제작상의 편의때문에 스텝(step) 구조가 일반적으로 사용된다. 이와 같이 전체 길이가 λ인 진동자가 $\lambda/2$ 모드로 구동하면 동작주파수가 감소하기 때문에 발생력이 커지고 진동속도는 감소하게 된다. 따라서 선형 초음파 모터를 정밀 위치제어에 사용하기 위해서는 동작속도에 반비례하는 관성(inertial) 특성이 적은 $\lambda/2$ 모드가 적합하다.

3. 선형모터 동작원리

본 연구에서 제안된 압전 선형모터는 압전 세라믹스에서 발생하는 초음파 진동(>20 kHz)을 이용하여 이와 연결된 진동빔(shaking beam)에서 높은 구동력을 발생시키는 모터이다(Fig. 2).

Fig. 3은 두께방향 초음파진동을 하는 2개의 압전 액츄에이터에 위상차가 90°인 sin과 cos 교류전원을 인가했을 때 이와 연결된 진동빔의 동작원리이다. 양쪽 액츄에이터(a, b)로 구성된 진동빔은 $t=T/4$일 때 시계 방향으로 회전

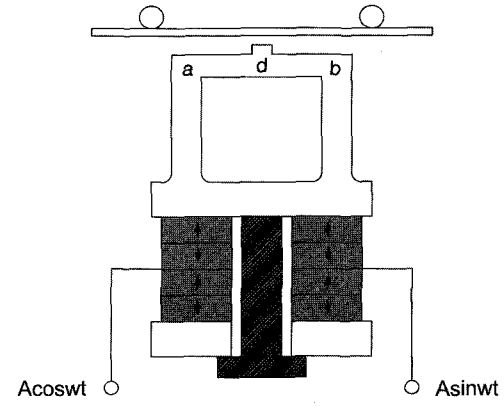


Fig. 2. Mechanical structure of linear motor.

하고 $t=T/2$에서는 아래로, 그리고 $t=3T/4$에서 반시계 방향으로 회전한 후 $t=0$에서 다시 처음 상태로 되돌아온다. 이와 같은 진동빔의 움직임에 의해 중간지점(d)에서 타원형 기계적 변위가 발생한다.

진동빔의 돌출부에서 발생하는 타원궤적은 파동방정식으로부터 식 (1)와 같이 표현된다.

$$\sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}x-wt\right)+\cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}x-wt\right)=\frac{X^2}{\left(\xi_0\frac{2\pi d}{\lambda}\right)^2}+\frac{Y^2}{\xi_0^2}=1 \qquad (1)$$

이와 같이 진동빔과 평행한 횡진동(ξ_0)과 원주방향의 종진동($\xi_0\frac{2\pi d}{\lambda}$)으로 인해 타원궤적이 발생한다.

4. 설계 및 제작 결과

Fig. 4는 FEM 프로그램(Atila 5.2.1)을 이용하여 선형 초음파 모터의 동작특성을 분석한 결과이다. 반파장 진동자의 동작주파수는 65 kHz로 설정하였고 크기를 결정하기 위해 필요한 재료상수는 Table 1에 나타내었다.

그림에서 AB-CD 구간은 2 mm 두께의 압전 세라믹스 4개와 금속판으로 이뤄진 란쥬반 진동자이고 EF는 진동의 크기를 확대시키는 스텝구조의 혼(horn)이다.

금속판의 길이 L_1은 식 (2)으로부터 구해진다.

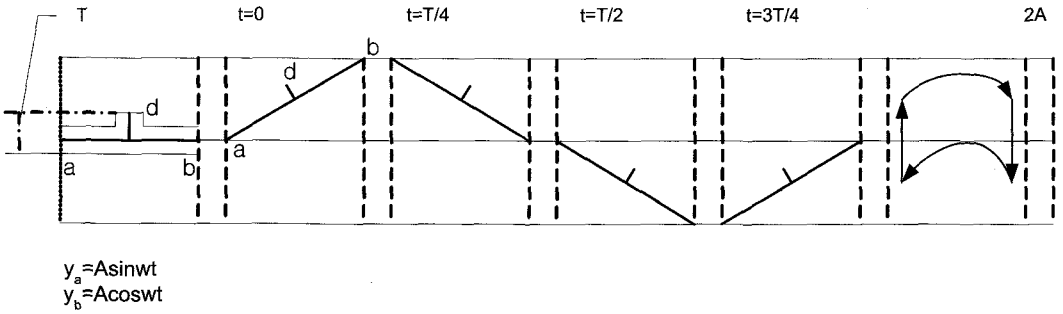


Fig. 3. Position of the beam through every quarter of the vibrations period.

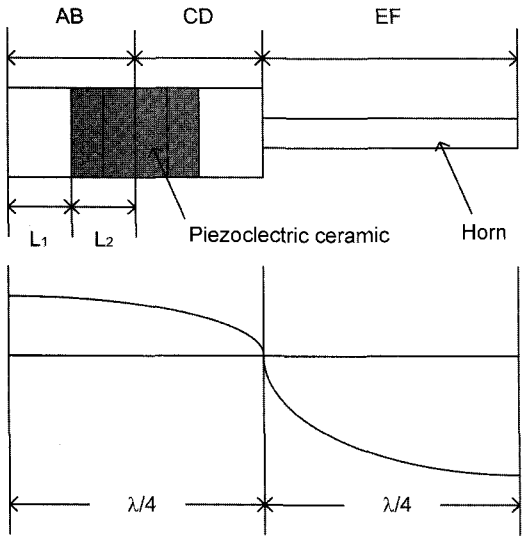


Fig. 4. Structure of half-wave vibrator.

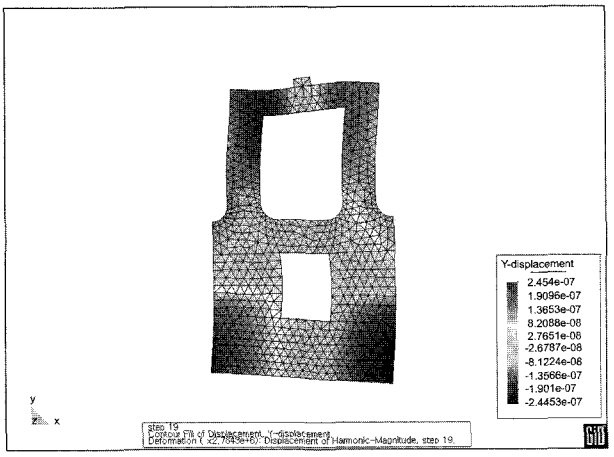
Table 1. Material Properties of Metal and Piezoelectric Materials

Metal		
Density	7800	Kg/m^3
Poisson's ratio	0.285	
Young's modulus	2.1E+11	N/m^2
Piezoelectric material		
Density	7500	Kg/m^3
S^E_{11}	12.3E-12	m^2/N
S^E_{12}	−4.05E-12	m^2/N
S^E_{13}	−5.31 E-12	m^2/N
S^E_{33}	15.5 E-12	m^2/N
S^E_{44}	39.0 E-12	m^2/N
d_{15}	496 E-12	C/N
d_{31}	−123 E-12	C/N
d_{33}	289 E-12	C/N
$\varepsilon^S_{11}/\varepsilon_0$	762	
$\varepsilon^S_{33}/\varepsilon_0$	662	

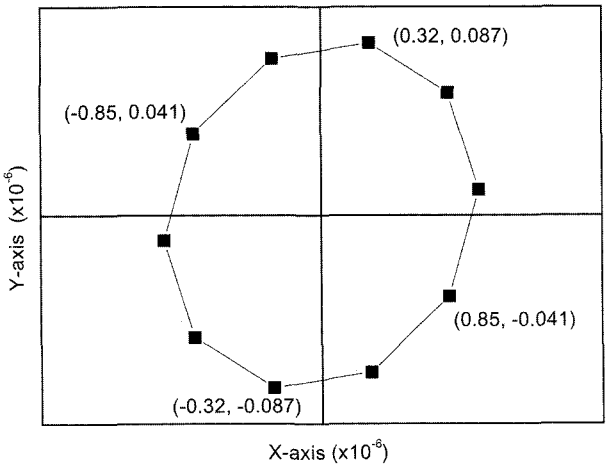
$$L_1 = \left(\frac{1}{k_1}\right)\tan^{-1}\left\{\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)/\tan(k_2 L_2)\right\} \tag{2}$$

여기서 k는 파장정수, Z는 파동임피던스이고 L_2는 세라믹의 두께이다. 계산한 결과 L_1은 3 mm, L_2는 4 mm이므로 란쥬반 진동자의 전체 길이는 14 mm이고 $\lambda/4$ 길이의 혼은 $\lambda=c/f$ 관계식으로부터 20 mm가 구해진다.

Fig. 5(a)는 61 kHz에서 동작하는 선형모터의 변위를 색지수로 나타낸 것이다. 그리고 주기별로 진동빔의 돌출부에서 발생하는 변위를 연속적으로 연결하면 Fig. 5(b)에서와 같이 타원궤적을 형성한다. 이와 같은 궤적은 돌출부의 길이가 길어짐에 따라 커지기 때문에 이동자의 속도를 증가시킨다.



(a) Displacement of linear motor (61 kHz)



(b) Trajectory of contact point

Fig. 5. Harmonic analysis of two dimensional motor.

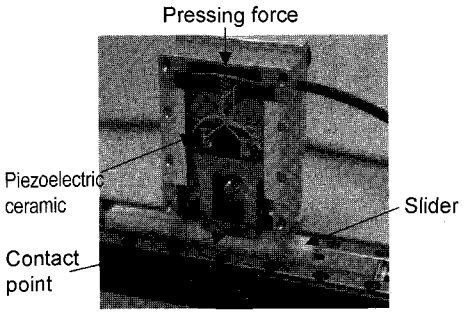
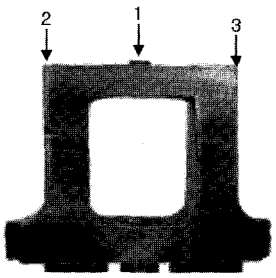
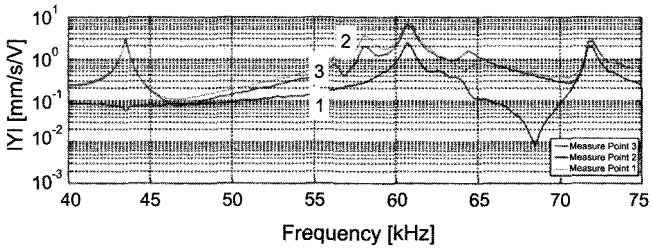


Fig. 6. Fabricated linear motor.

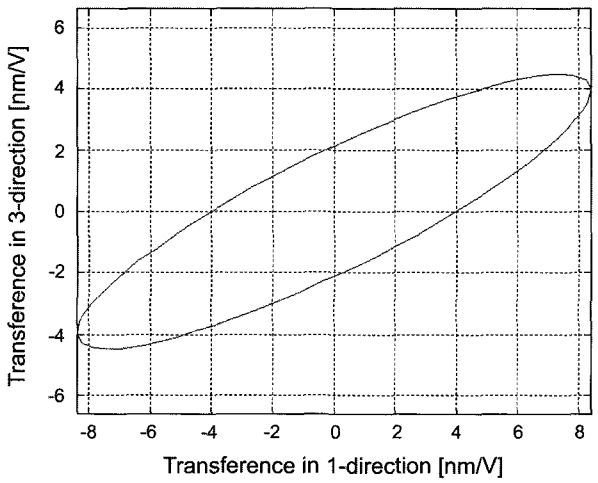
Fig. 6은 위에서 설명한 구동원리에 의해 동작하는 선형 초음파 모터이다. 압전 세라믹스는 액츄에이터에 적합한 압전 특성을 갖는 경원 훼라이트사의 KPZ12 (d_{33}= 289×10^{-12} N/C, Q_m=2000)를 사용해 $8\times8\times2$ mm^3 크기로 제작하였으며 각각 4개씩 2개의 묶음(package)으로 구성하여 분극방향이 서로 교번되도록 적층한 후 압전 액츄에이터에 볼트로 고정하였다. 또한 타원궤적이 발생하는



(a) Measuring points of shaking beam



(b) Displacement of measuring points of the actuator



(c) Elliptical trajectory of the point 1

Fig. 7. Movement characteristics of shaking beam.

돌출부는 지름 2 mm, 길이 0.7 mm의 바(bar)형태를 가지며 이동자와의 마찰에 의한 마모발생을 억제하기 위해 기계적 강도가 높은 Al_2O_3를 사용하였다.

Fig. 7은 액츄에이터의 진동빔에서 발생하는 변위를 측정한 결과이다. Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)에서 표시된 진동빔의 점 1, 2, 3의 주파수에 따른 변위크기를 측정한 결과로서 대칭구조를 갖는 양쪽 압전 액츄에이터(점 2, 3)의 변위는 거의 일치했으며 돌출부(점 1)는 공진주파수(약 62 kHz)에서 최대 변위특성을 나타냈다. 또한 Fig. 7(c)는 주기(T) 동안 이동자와 압착되는 돌출부에서 발생하는 변위 궤적을 나타낸 것으로 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 타원 궤적을 이룬다.

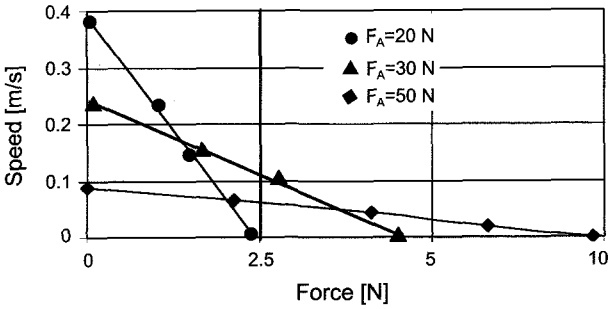


Fig. 8. Characteristics of generative force and speed.

Fig. 8은 제작된 선형 압전 액츄에이터의 특성이다. 그림에서 선형 모터를 이동자에 압착시키는 힘(F_A)이 증가함에 따라 이동자에서 발생하는 최대 발생력은 증가하고 최대 속도는 감소한다. 즉 압착력이 50 N일 때 최대 힘은 9 N, 최대 속도는 0.09 m/s이고 압착력이 20 N일 때는 최대 힘은 2.4 N, 최대 속도 0.38 m/s의 특성을 나타냈다.

5. 결 론

본 연구에서 제안된 선형 초음파 모터는 두께방향으로 초음파진동을 하는 2개의 압전 액츄에이터에 각각 위상차가 90°인 sin과 cos 교류전원을 인가함으로써 직접 직선운동을 얻을 수 있었다. 또한 압전 세라믹스에서 발생하는 종방향 진동을 확대하여 효율적으로 이동자에 타원형 변위를 전달할 수 있는 구조와 내마모성 물질로 이뤄진 돌출부는 선형 초음파 모터의 신뢰도를 향상시킬 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. M. Kuribayshi, S. Ueha, and E. Mori, "Excitation Conditions of Flexural Travelling Waves for a Reversible Ultrasonic Linear Motor," *J. Acoust. Soc. Amer.*, **77** [4] 1431-35 (1985).
2. H. Saigoh, M. Kawasaki, N. Maruko, and K. Kanayama, "Multilayer Piezoelectric Motor Using the First Longitudinal and the Second Bending Vibrations," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** [Pt. 1-5B] 2760-64 (1995).
3. Y. Tomikawa, T. Takano, and H. Umeda, "Thin Rotory and Linear Ultrasonic Motors Using a Double-mode Piezoelectric Vibrator of the First Longitudinal and Secong Bending Modes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** [Pt. 1-9B] 3073-76 (1992).
4. T. Sashida and T. Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors," *Clarendon press*, 62-4 (1993).