

## 초음파 리니어 모터의 구동특성

### Driving characteristic of ultrasonic linear motor

김태열, 김범진, 박태곤, 김명호\*, 권오영\*\*

(Tae-Yoal Kim, Beom-Jin Kim, Tae-Gone Park, Myong-Ho Kim\*, Oh-Young Kwon\*\*)

#### 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 vibrator which generates elliptical oscillations. L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> ultrasonic linear motor use longitudinal and bending multi-vibration. In order to low driving voltage and improve the life time of the ultrasonic oscillator, we used stacked piezoceramics. Stacked piezoceramics are adhered to aluminum elastic material. The finite element method was used to optimize dimension of ultrasonic vibrator and direction of vibratory displacement. As a result of estimating the characteristics of the ultrasonic linear motor, no-load velocity was 2.04[m/s] when applied voltage was 70[V<sub>rms</sub>] in resonance frequency.

**Key Words(중요용어)** : Ultrasonic Linear Motor, Finite Element Method, ANSYS, Stacked Piezoceramics,

Longitudinal Mode, Bending Mode

#### 1. 서 론

압전세라믹을 사용하는 초음파 모터는 압전세라믹의 신속한 발전에 따라 매우 빠른 속도로 발전하고 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.<sup>[1]</sup> 초음파 모터의 원리는 수평과 수직방향(X 그리고 Y축)에서의 변위가 타원형 운동을 형성하는 것이다. 따라서 선택한 타원운동의 방식에 의해서 모터의 형상이 달라진다.<sup>[2]</sup>

그리고 적층 압전세라믹은 낮은 구동전압에서 구동되고 큰 힘을 갖기 때문에 고정진동자의 수명향상과 구동전압을 낮추기 위해서 사용되어진다.<sup>[3]</sup> L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> 초음파 리니어 모터는 공진주파수에서 종진동과 횡진동의 결합에 의해서 만들어졌다. 유한요소 프로그램인 ANSYS에 의한 초음파 모터의 해석은 주로 공진주파수 해석과 공진 모드에 따른 변위량 해석으로써 최적 모델설계에 유용하게 사용이 되었다.<sup>[4]</sup> 3가지 고정진동자 모델이 공진주파수로 구동될 때 탄성체 표면의 변위량을 해석하여 최대 변위의 모델을 결정하였으며, 최대의 변위점에 변위확대기구를 부착하여 더욱 향상된 초음파 리니어 모터를 개발하였다.

#### 2. 이 론

##### 2.1 Euler-Bernoulli 이론식에 의한 L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> 리니어 모터의 설계

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

창원대학교 전기공학과

\*창원대학교 세라믹공학과, \*\* (주)영광

(경남 창원시 삼립동 창원대학교,

Fax: 055-263-9956

E-mail : kty10@cosmos.changwon.ac.kr

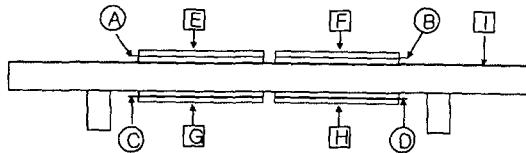


그림 1. L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> 고정진동자

Fig. 1. L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> stator vibrator

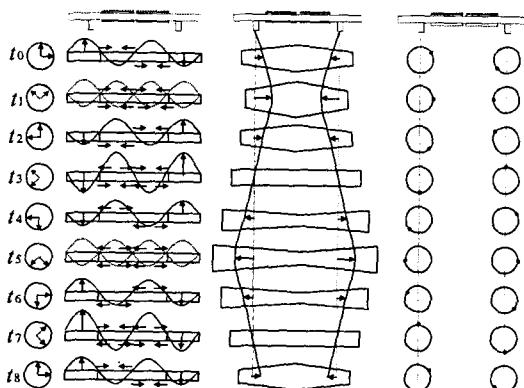


그림 2. L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> 초음파 리니어 모터의 동작원리

Fig. 2. Operation principle of L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> ultrasonic linear motor

진주파수는 보의 굽힘에 관한 기본이론(Euler-Bernoulli theory)을 이용하였고 회전관성과 전단변형의 영향을 무시하였다.<sup>[5]</sup> n차 종진동모드의 공진주파수는 봉이나 막대의 x방향 힘의 합 운동방정식에서 유도할 수 있다. 각각의 공식은

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

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

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

$$f_{Ln} = f_{Bn} \quad (3)$$

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

식 (3) 조건에서 탄성체를 설계하여야 가장 좋은 효율을 얻을 수 있다. 따라서 식(1)과 (2)를 식(3)에 대

입함으로써 식(4)를 구할 수 있다. 식 (4)로부터 탄성체의 길이와 두께 그리고 공진주파수를 결정할 수 있다. 위의 식에서 설계한 알루미늄 탄성체의 치수

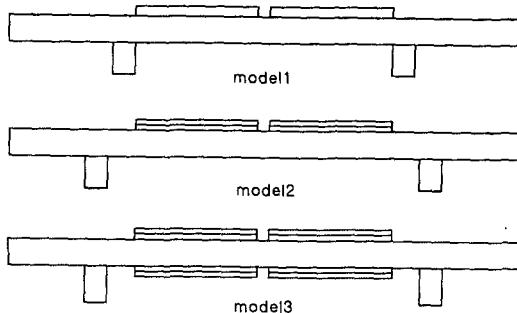


그림 3. L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> 고정진동자의 3가지 모델

Fig. 3. Three model of L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> stator vibrator

는 45.91×3.47×2.5[mm]이다.

## 2.2 L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> 리니어 모터의 동작원리

그림 1은 고정진동자이다. 적층 압전소자의 인가 전압은 A와 D에 같은 위상의 전압을 인가하고, B와 C에는 A, D와 90도 위상차 전압을 인가한다. 그리고 E, G, G, H, I를 접지로 하였다. 즉 A, D: cos θ, B, C: sin θ를 인가하였다. 그림 2는 초음파 리니어 모터의 동작원리를 보여준다. 여기서는 탄성체의 1차 종진동모드(L<sub>1</sub>)와 4차 굴곡진동모드(B<sub>4</sub>)의 두 진동모드를 이용하고 있다. 진동원인 적층 압전소자는 각 모드의 공간적 위상이 다른 위치에서 위와 아래에 접합시켰고, 전압을 인가하면 L<sub>1</sub>모드의 진동과 B<sub>4</sub>모드의 진동을 동시에 발생시킬 수 있다. 따라서 종진동(L1모드)과 4차의 굴곡진동(B4모드)이 동시에 일어나고, 이 두 모드가 합성된 결과로 두 변위확대기구에서 타원진동을 일으킬 수 있다. 이 타원진동에 의해 슬라이드를 이동시키게 된다.

## 3. ANSYS에 의한 설계

유한요소 프로그램인 ANSYS로써 그림 3의 3가지 모델을 변위량 해석을 하였다. 이때 사용된 요소는 프로그램에서 제공하는 solid 5와 solid 45이다. 해석 순서는 modal 해석에서 공진주파수를 해석한 후 harmonic 해석에서 전압 70[V<sub>rms</sub>]를 인가하여 변위량을 해석하였다. 그림 4에서 알 수 있듯이 모델3의 변위량이 가장 큼을 알 수 있었고, 타원 진동하는 것을 알 수 있었다. 압전세라믹의 두께, 폭, 길이 그리고 탄성체의 폭은 ANSYS로써 해석한 결과 최대의 변위량을 가진 치수에서 결정되었다. 이와같은 형상으로 제작함으로서 더욱 향상된 초음파 리니어

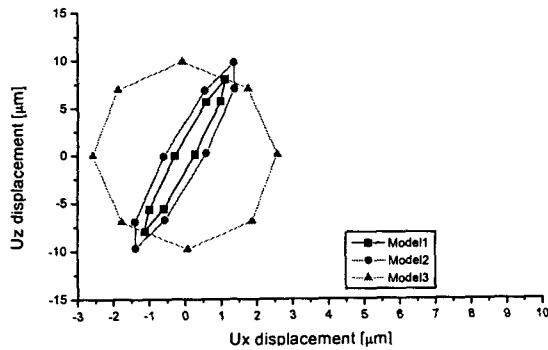


그림 4. L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> 고정진동자의 3가지 모델에 따른 변위량

Fig. 4. Displacement of L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> stator vibrator

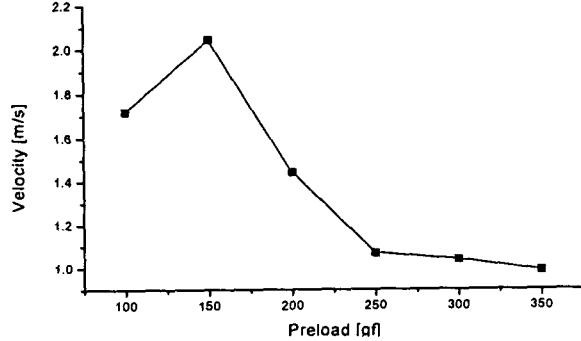


그림 5. 프리로드에 따른 속도

Fig. 5. Velocity according to preload

모터를 개발 할 수 있었다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 프리로드(preload)에 따른 속도

프리로드(preload)란 고정진동자의 노달(nodal) 포인트를 눌러주는 부하를 말한다. 그림 5는 인가전압 70[Vrms], 주파수 46.4[kHz]일 때 속도를 나타내고 있다. 프리로드를 100~350[gf]로 가변했을 때 150[gf]에서 속도는 2.04[m/s]로 최고 속도였으며 프리로드가 증가할수록 속도가 감소하는 것을 알 수 있었다.

##### 4.2 전압에 따른 속도

그림 6은 주파수 46.7[kHz], 프리로드 150[gf]일 때 전압(30~70 [Vrms])에 따른 속도를 나타내었다. 인가전압이 증가할수록 속도도 선형적으로 증가하였다. 하지만 인가전압이 더 높아지면 한계치가 있을 것으로 사료된다.<sup>[6]</sup> 전압이 70[Vrms]에서 속도가

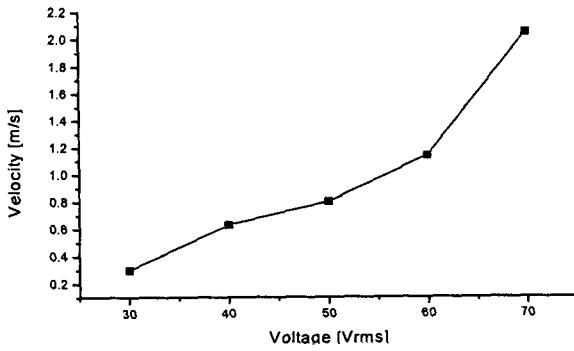


그림 6. 전압에 따른 속도

Fig. 6. Velocity according to voltage

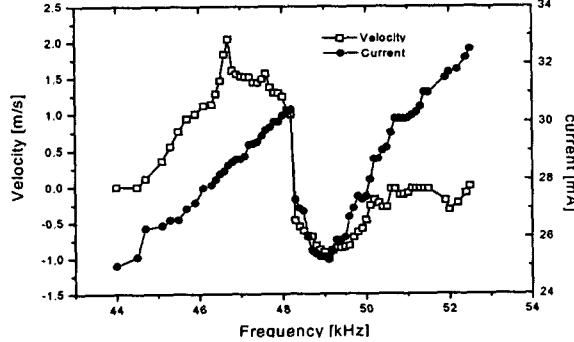


그림 7. 구동 주파수에 따른 전류 및 속도

Fig. 7. Input current and velocity according to driving frequency

2.04[m/s]로써 가장 빨랐고 인가전압이 70[Vrms]일 때 전류는 28.5[mA]였다. 따라서 입력전력은 1.995[w]이다.

##### 4.3 주파수에 따른 속도

그림 7은 전압을 70[Vrms], 프리로드 150[gf]로 일정하게 하고 주파수에 따른 속도와 전류를 나타내고 있다. 주파수가 증가하면 속도는 선형적으로 증가하고 공진주파수에서 최대 피크치를 나타내었다. 그리고 주파수를 더욱 더 증가시키면 어느한 시점에서 갑자기 역방향으로 움직임을 알 수 있었고, 49.1[kHz]에서 역방향으로 최고의 속도이며 주파수를 더욱 더 증가시키면 속도는 서서히 감소하면서 멈추는 것을 알 수 있었다. 전류의 경우에는 주파수를 증가시키면 선형적으로 증가하고 역방향으로 전환하기 전에 가장 많이 흘렀다. 역방향으로 최고의 속도에서 전류는 가장 적게 흘렸고 주파수를 점점 더 증가시키면 전류가 증가함을 알 수 있었다. 그림 7에서 알 수

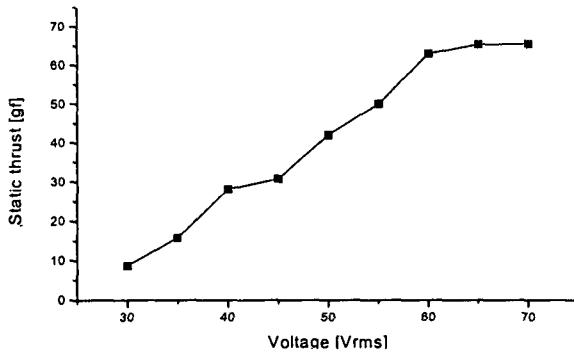


그림 8. 전압에 따른 정추력

Fig. 8. The static thrust according to voltage

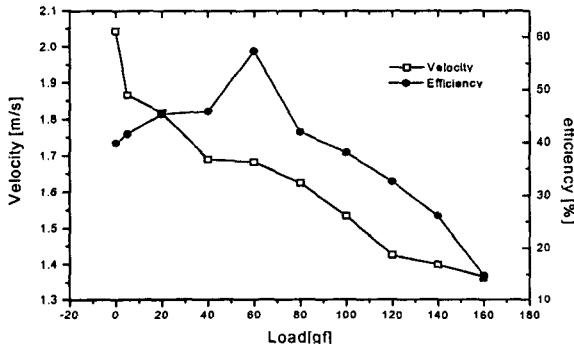


그림 9. 부하에 따른 속도 및 효율

Fig. 9. Velocity and efficiency according to load

있듯이 주파수를 변화함으로써 속도제어를 할 수 있고 슬라이드의 방향도 바꿀 수 있었다.

#### 4.4 전압에 따른 추력

그림 8은 주파수 46.7[kHz], 프리로드 150[gf]일 때 전압(30~70[Vrms])에 따른 추력을 나타내었다. 그리고 전압을 5[Vrms]간격으로 측정하였고 전압 60[Vrms] 근방에서 포화됨을 알 수 있었다. 전압 70[Vrms]에서 추력은 65.5[gf]이였다.

#### 4.5.5 부하에 따른 속도 및 효율

그림 9는 주파수 46.7[kHz], 프리로드 150[gf], 전압 70[Vrms]일 때 부하를 20[gf]씩 증가시키면서 속도와 효율을 나타내었다. 부하의 증가에 따라서 속도는 거의 선형적으로 감소하였다. 무부하시 속도는 2.04[m/s]이었다. 부하가 60[gf]일 때 효율이 57.28[%]로 가장 좋으며 이때 속도 1.68[m/s], 전류 28.36[mA], 추력 69[gf]이였다.

## 5. 결론

$L_1-B_4$  초음파 리니어 모터를 유한요소 프로그램인 ANSYS로서 해석을 함으로써  $L_1-B_4$  초음파 리니어 모터를 제조할 때 압전세라믹을 적층하여 탄성체의 위와 아래에 접착했을 때 변위량이 가장 큼을 ANSYS로써 확인하였다. 세라믹을 적층함으로써 낮은 구동전압에서도 구동되었고, 탄성체의 공진주파수는 57.7[kHz]인데 세라믹과 전선을 부착함으로써 공진주파수는 46.7[kHz]로 변화함을 알 수 있었다. 프리로드 150[gf] 공진주파수에서 전압 70[Vrms]로 구동하였을 때 무부하시 속도는 2.04[m/s]였고, 같은 조건에서 부하가 60[gf]일 때 속도 1.68[m/s]이고 효율은 57.28[%]였다.  $L_1-B_4$  초음파 리니어 모터는 전자파를 발생하지 않기 때문에 주사형 전자현미경의 스테이지로 전자노이즈가 없는 측정기구의 스테이지 구동으로 적합하고 롤러로써 직선운동을 회전운동으로 변환시키면 카드전송 장치로도 적합하다.

## 참고 문헌

- [1]. Toshiiku Sashida, Takashi Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors", OXFORD, 1993
- [2] Yoshiro Tomikawa, Toshiharu Ogasawara, Sumio Sugawara, Masashi Konno and Takehiro Takano, "Construction of Ultrasonic Motors and their Application", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 27, pp. 195-197, 1988
- [3]. Tomoki Funakubo, Toshiharu Tsubata, Yoshihisa Taniguchi, Kazuhiro Kumei, "Ultrasonic Linear Motor Using Multilayer Piezoelectric Actuators", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 34, pp. 2756-2759 part 1. No. 5B, May 1995
- [4]. 임태빈, 성하경, "Atila에 의한 평판형 고정진동자의 변위량 해석", 전기전자재료 제11권, 제11호, pp.122-125, 1998.
- [5]. Singiresu S. Rao, "Mechanical Vibrations", Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- [6]. 이종섭, 정수현, 임기조, 강성택, 채홍인, "L1-B4 진동모드를 이용한 평판형 선형 초음파 모터의 설계 및 시제작", 전기전자학회논문지, Vol.11. No.10, pp. 861-865, 1998