

## L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> 샌드위치형 진동자를 이용한 선형 초음파 모터의 설계 및 특성

### Design and Characteristics of Ultrasonic Linear Motor Using L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> Sandwich-type Vibrator

김태열, 김범진, 박태근, 김명호\*, Kenji Uchino\*\*

(Tae-Yoal Kim, Beom-Jin Kim, Tae-Gone Park, Myong-Ho Kim\*, Kenji Uchino\*\*)

#### Abstract

An ultrasonic linear motors consist of a slider and an ultrasonic vibrator which generates an elliptical oscillations. The ultrasonic linear motors mainly consist of an ultrasonic vibrator which generates elliptical oscillations. The ultrasonic linear motor fabricated in this paper was the use of the 1st longitudinal(L1) and 4th bending vibrations(B4). In order to low driving voltage and improve the life time of the ultrasonic motor, 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 0.204[m/s] when applied voltage was 70[V<sub>rms</sub>] in resonance frequency.

**Key Words** : Ultrasonic Linear Motor, Finite Element Method, ANSYS, Stacked Piezoceramics, Longitudinal Mode, Bending Mode

#### 1. 서론

압전세라믹을 사용하는 초음파 모터는 반도체의 고집적화와 정밀위치제어의 필요성에 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 선형 모터는 기어를 사용하지 않고 정밀위치 제어가 가능한 X-Y 스테이지 등의 구성에 유용하다.[1] 초음파 모터의 원리는 수평과 수직방향(X 그리고 Y축)에서의 변위가 타원형 운동을 형성하는 것이다. 따라서 선택한 타원운동의 방식에 의해서 모터의 형상이 달라진다.[2] 그리고 적층 압전세라믹은 낮은 구동전압에서 구동되고 큰 힘을 갖기 때문에 고정진동자의 수명향상과 구동전압을 낮추기 위해서 사용되어진다.[3] L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> 샌드위치형 진동자를 이용한 선형 초음파 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.[4] 3가지

창원대학교 전기공학과

(경남 창원시 사림동 창원대학교,

Fax: 055-263-9956

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

\* : 창원대학교 세라믹공학과

\*\* : The Pennsylvania State University

2000년 10월 6일 접수, 2000년 12월 6일 심사완료

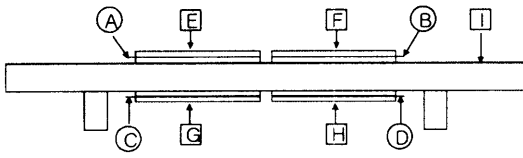


그림 1 L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> 샌드위치형 고정진동자  
Fig. 1 L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> sandwich-type stator vibrator

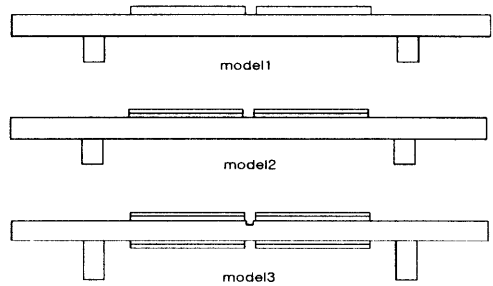


그림 3 L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> 고정진동자의 3가지 모델  
Fig. 3 Three model of L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> stator vibrator

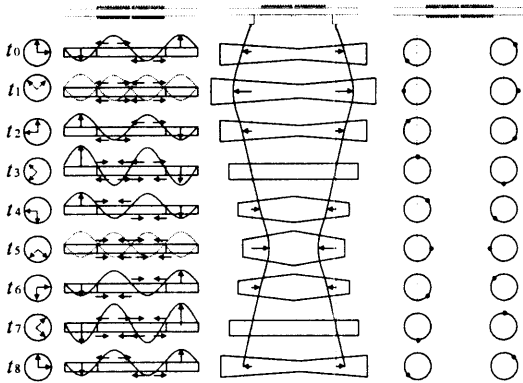


그림 2 L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> 선형 초음파 모터의 동작원리  
Fig. 2 Operation principle of L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> ultrasonic linear motor

고정진동자 모델이 공진주파수로 구동될 때 탄성체 표면의 변위량을 해석하여 최대 변위의 모델을 결정하였으며, 최대의 변위점에 변위확대기구를 부착하여 더욱 향상된 선형 초음파 모터를 개발하였다.

## 2. 이론

### 2.1 Euler-Bernoulli 이론식에 의한 L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> 샌드위치형 진동자의 탄성체 설계

1차 종진동과 4차 굴곡진동을 이용하여 선형 초음파 모터의 설계시 고려하여야 할 사항은 고정진동자의 기하학적 크기이다. n차 굴곡진동모드의 공진주파수는 보의 굽힘에 관한 기본이론(Euler-Bernoulli theory)을 이용하였고 회전관성과 전단변형의 영향을 무시하였다.[5] n차 종진동모드의 공진주파수는 봉이나 막대의 x방향 힘의 합 운동방정식에서 유도할 수 있다. 각각의 공식은 다음과 같다.

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

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

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

$$f_{L1} = f_{B4} \quad (3)$$

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. 위의 식에서 설계한 알루미늄 탄성체의 치수는 45.91×3.47×2.5[mm]이다.

### 2.2 L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> 샌드위치형 진동자를 이용한 선형 초음파 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, F, G, H, I를 접지로 하였다. 즉 A, D: cos θ, B, C: sin θ를 인가하였다. 그림 2는 선형 초음파 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(L<sub>1</sub>모드)과 4차의 굴곡진동(B<sub>4</sub>모드)가 동시에 일어나고, 이 두 모드가 합성된 결과로 두 변위확대기구에서 타원진동을 일으킬 수 있다. 이 타원진동에 의해 슬라이드를 이동시키게 된다.

### 3. 실험

#### 3.1 ANSYS에 의한 설계

그림 3은 변위량을 비교할 모델들이다. 모델 1의 압전세라믹 두께는 1[mm]이고, 모델 2와 3은 압전세라믹 두께 0.5[mm] 2개를 적층한 것이다. 그림 4는 유한요소 프로그램인 ANSYS로써 모델의 변위량 해석을 하였다. 이때 사용된 요소는 프로그램에서 제공하는 solid 5와 solid 45이다. 해석순서는 modal 해석에서 공진주파수를 해석한후 harmonic 해석에서 전압을 인가하여 변위량을 해석하였다. 그림 4에서 알 수 있듯이 전압 70[V<sub>rms</sub>]를 인가했을 때 모델 3의 변위량이 가장 크음을 알 수 있었고, 타원 진동하는 것을 알 수 있었다. 그리고 적층한 모델 2에 전압 50[V<sub>rms</sub>]를 인가했을 때의 변위량이 모델 1에 전압 70[V<sub>rms</sub>]를 인가했을 때의 변위량과 거의 같음을 알 수 있었다. 압전세라믹의 두께, 폭, 길이 그리고 탄성체의 폭은 ANSYS로써 해석한 결과 최대의 변위량을 가진 치수에서 결정되었다. 이와같이 샌드위치형 진동자를 제작함으로써 더욱 향상된 선형 초음파 모터를 개발 할 수 있었다. 그림 7은 ANSYS로써 선형 초음파 모터의 구동원리를 한 주기 동안 나타낸 것이다. 그림 2와 동일한 동작순서를 나타냄을 알 수 있었다. 그림 5는 A, D:  $\cos \theta$ , B, C:  $\sin \theta$ , 그림 6은 A, D:  $\sin \theta$ , B, C:  $\cos \theta$  전압을 인가했을 때 탄성체 좌우에서의 골과 마루부분 타원운동의 방향을 나타낸 것이다. 따라서 전압의 극성을 바꾸면 L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> 선형 초음파 모터의 진행방향을 바꿀 수 있다.[6]

#### 3.2 L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> 샌드위치형 진동자 제작

그림 8은 적층 압전세라믹을 보여준다. 압전세라믹은 PAN-PZT(경원철타이트(주))를 사용하였다. 적층 압전세라믹은 두께 0.5[mm] 2개를 각각은 전극(DT1402, Heraeus)으로 600[°C]에서 10분동안 열처리하여 전극을 형성하였으며, 전극을 부착후 시료를 실리콘 오일에 넣어 온도 110[°C]를 유지하면서 DC 전계를 30,000[V/cm] 인가하여 40분간 분극처리 하였다. 그리고 경시변화를 고려하여 분극 후 24시간이 경과된 후 측정하였고 구동전압을 인가하기 위해서 세라믹과 세라믹 사이에 0.03[mm]의 동판을 넣고 도전성 접착제(ECCOBOND 56C, ABLESTIK)를 고르게 바른 후, 진공오븐에서 압력을 가하지 않고 60[°C] 1시간 열처리하여 접착시켰다. 그림 1의 고정진동자는 그림 8과 같은 적층 세라믹을 제조한 후 도전성 접착제로 60[°C]에서 1시간 열처리하여 탄성체

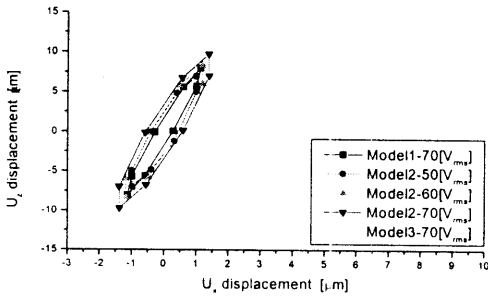


그림 4 L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> 고정진동자의 3가지 모델에 따른 변위량

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

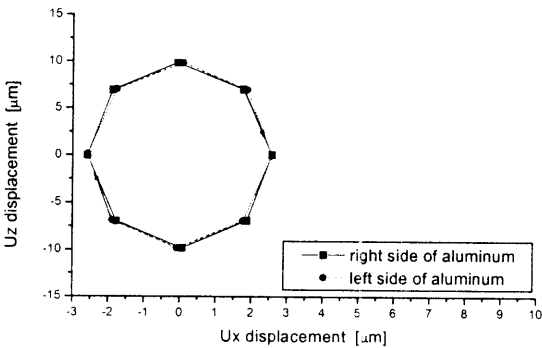


그림 5 A, D:  $\cos \theta$ , B, C:  $\sin \theta$  일 때 타원운동 방향  
Fig. 5 Direction of elliptical motion at A, D:  $\cos \theta$ , B, C:  $\sin \theta$

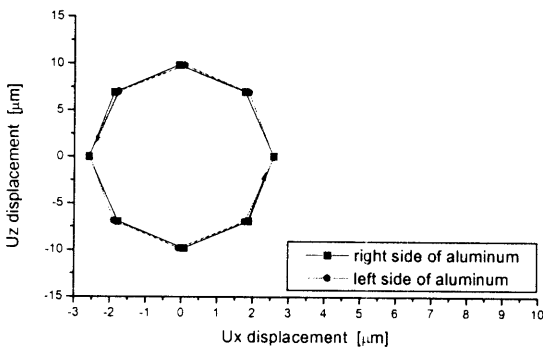


그림 6 A, D:  $\sin \theta$ , B, C:  $\cos \theta$  일 때 타원운동 방향  
Fig. 6 Direction of elliptical motion at A, D:  $\sin \theta$ , B, C:  $\cos \theta$

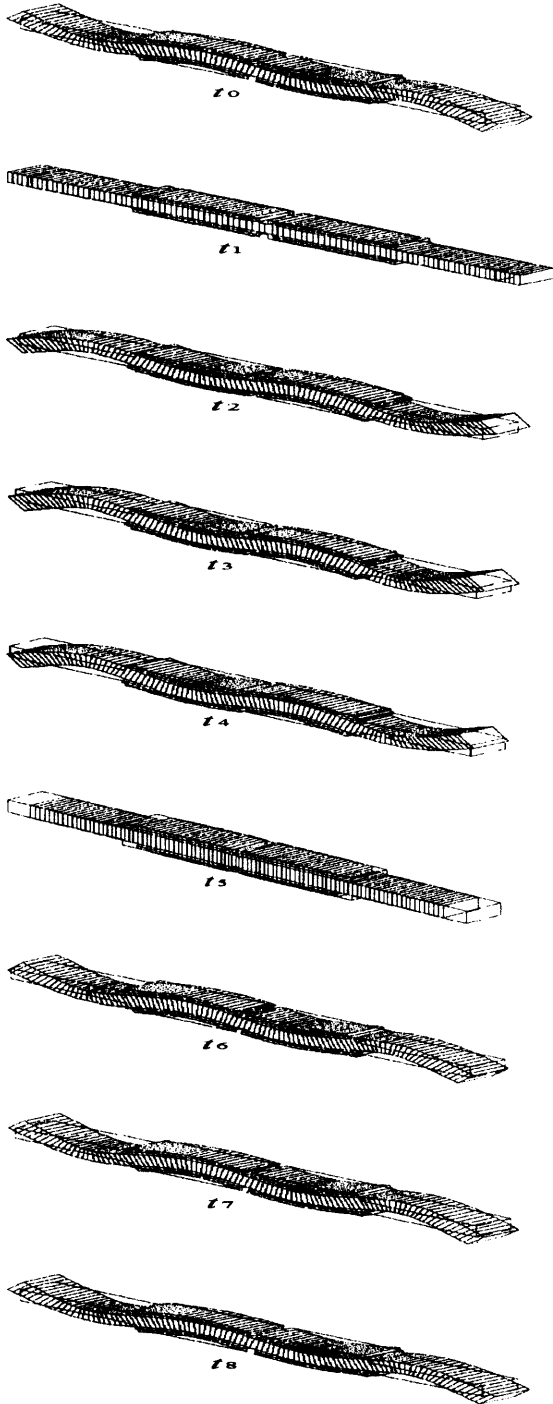


그림 7 주기 동안의 고정진동자의 변화  
 Fig. 7 Transformation of stator vibrator for one cycle

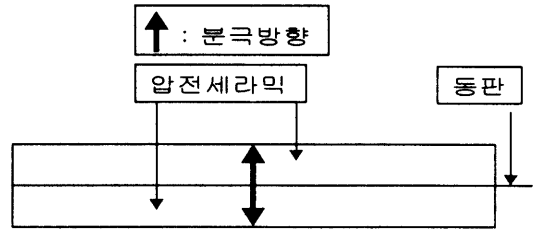


그림 8 적층 세라믹의 구조  
 Fig. 8 Structure of stacked ceramics

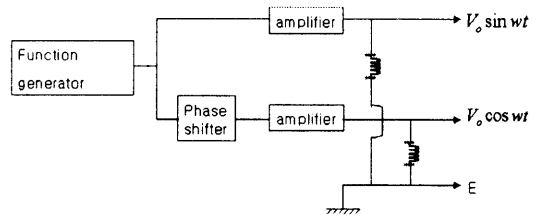


그림 9 초음파 모터의 구동회로  
 Fig. 9 Block diagram of the drive circuit

의 위아래에 부착하였다. 전선도 위와 같은 방법으로 접착하였고, 변위확대기구는 에폭시로 접착하였다. 변위확대기구와 슬라이드의 마찰에서 소음을 없애기 위해서 백그라이트(Bakelite)를 사용하였다.

### 3.3 선형 초음파 모터의 구동시스템

초음파모터의 구동회로를 그림 9에 나타내었다. 초음파모터는  $\pi/2$ 만큼 다른 위상을 갖는  $\sin$ 파와  $\cos$ 파를 압전세라믹에 각각 인가함으로써  $L_1$ - $B_4$ 모드를 야기시킨다. 따라서 함수발생기에서 전기적 신호를 발생시켜  $\sin$ 파는 Power amplifier(NF 4011)로 증폭시키고,  $\cos$ 파는 Phase shifter를 거치고 Power amplifier(NF 4025)로 증폭을 하였다.[7] 초음파모터를 안정하게 구동하기 위해서는 구동주파수를 항상 최적의 주파수로 유지하도록 온도와 압력변화에 의한 공진주파수의 변화를 자동적으로 맞추어 줄 필요가 있다.

### 3.4 선형 초음파 모터의 측정

- ① 속도측정  
 : 속도측정은 타코미터(tachometer)로 전압, 주파수, 프리로드(preload), 부하(load)를 가변하면서 측정하였다.
- ② 부하측정  
 : 부하측정은 슬라이드 끝부분에 추를 부착하여

측정하였다.

③ 추력(thrust)측정

: 추력은 리니어 모터의 힘으로서 로드 셀(load cell)을 사용하여 측정하였다.

④ 전류측정

: 전류측정은 HP 34401A 멀티미터(multimeter)로 측정하였다.

⑤ 효율

: 모터의 효율은 인가되는 공급 전력에 대한 슬라이드의 추력과 속도에 의한 출력의 비로써 결정되는데 다음과 같은 식으로 된다.

$$P_{in} = V \cdot i \quad (5)$$

$$P_{out} = F_x \cdot v \quad (6)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100(\%) \quad (7)$$

여기서  $P_{in}$ 은 공급 전원의 전력,  $V$ 는 입력전압,  $i$ 는 입력전류,  $P_{out}$ 은 모터의 출력,  $F_x$ 는 추력,  $v$ 는 속도 그리고  $\eta$ 은 효율을 나타내고 있다

4. 실험결과 및 고찰

4.1 프리로드(preload)에 따른 속도

프리로드(preload)란 고정진동자의 노달(nodal) 포인트를 눌러주는 부하를 말한다. 그림 10은 인가전압 70[V<sub>rms</sub>], 주파수 46.7[kHz]일때 속도를 나타내고 있다. 프리로드를 100~350[gf]로 가변했을 때 150[gf]에서 속도는 0.204[m/s]로 최고 속도였으며 프리로드가 증가할수록 속도가 감소하는 것을 알 수 있었다.

4.2 전압에 따른 속도

그림 11은 주파수 46.7[kHz], 프리로드 150[gf]일 때 전압(30~70 [V<sub>rms</sub>])에 따른 속도를 나타내었다. 인가전압이 증가할수록 속도도 선형적으로 증가하였다. 하지만 인가전압이 더 높아지면 한계치가 있을 것으로 사료된다.<sup>[6]</sup> 전압이 70[V<sub>rms</sub>]에서 속도가 0.204[m/s]로써 가장 빨랐고 인가전압이 70[V<sub>rms</sub>]일 때 전류는 28.5[mA]였다. 따라서 입력전력은 1.995[w]이다.

4.3 주파수에 따른 속도

그림 12는 전압을 70[V<sub>rms</sub>], 프리로드 150[gf]로 일정하게 하고 주파수에 따른 속도와 전류를 나타내고 있다. 주파수가 증가하면 속도는 선형적으로 증가하

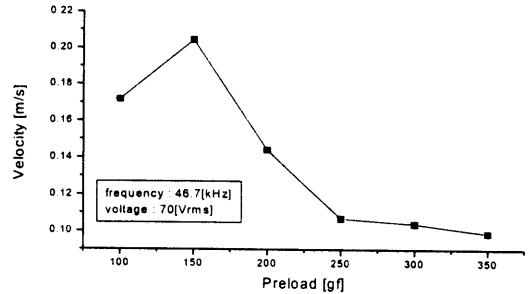


그림 10 프리로드에 따른 속도

Fig. 10 Velocity according to preload

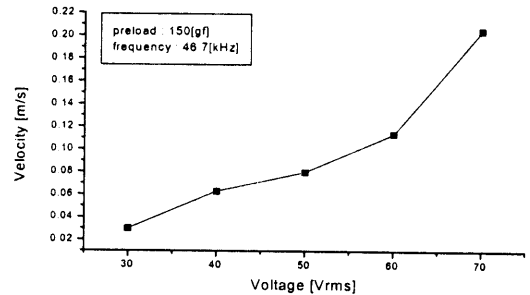


그림 11 전압에 따른 속도

Fig. 11 Velocity according to voltage

고 46.7[kHz]에서 속도 0.204[m/s]로 최대치를 나타내었다. 그리고 주파수를 더욱 증가시키면 어느 한 시점에서 갑자기 역방향으로 움직임을 알 수 있었고, 49.1[kHz]에서 속도는 역방향으로 0.1[m/s]인 최대치를 나타내었으며 주파수를 더욱더 증가시키면 속도는 서서히 감소하면서 멈추는 것을 알 수 있었다. 그림 12와 같이 주파수 변화에 따라 이동방향이 역전되었으나, 경계조건을 free-free로 한 경우 ANSYS 해석에서는 역전되는 현상을 찾을 수 없었다. 그러나 프리로드가 주어진 중심부의 노드를 fix하는 조건으로 해석한 결과 주파수에 따라 이동방향이 역전되는 현상을 찾을 수 있었다. 이 현상에 대한 정확한 원인을 규명하기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다고 사료된다. 그리고 전류는 주파수를 증가시키면 선형적으로 증가하고, 슬라이드가 역방향으로 전환할 때 최대치를 나타내었다. 그리고 역방향으로 최대의 속도에서 전류는 최소치를 나타내었고 주파수를 더욱

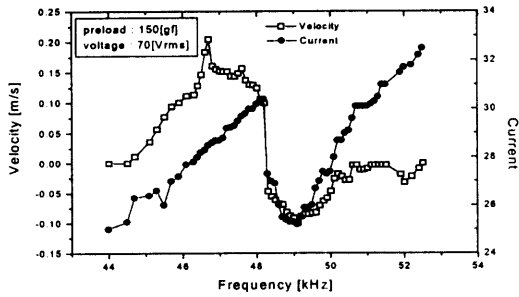


그림 12 구동 주파수에 따른 전류 및 속도  
Fig. 12 Input current and velocity according to driving frequency

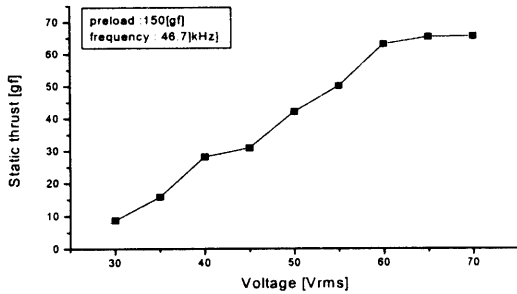


그림 13 전압에 따른 정추력  
Fig. 13 The static thrust according to voltage

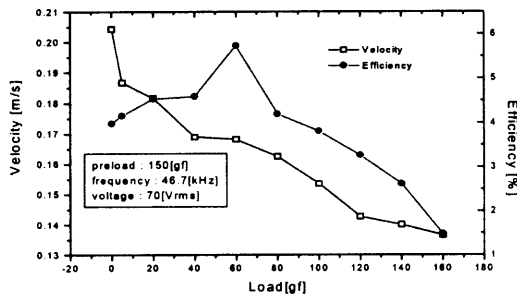


그림 14 부하에 따른 속도 및 효율  
Fig. 14 Velocity and efficiency according to load

더 증가시키면 전류도 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 그림 12에서 알 수 있듯이 주파수를 변화함으로써 속도제어를 할 수 있었다.

#### 4.4 전압에 따른 추력

그림 13은 주파수 46.7[kHz], 프리로드 150[gf]일 때 전압(30~70[V<sub>rms</sub>])에 따른 추력을 나타내었다. 그리고 전압은 5[V<sub>rms</sub>]간격으로 측정하였고 전압 60[V<sub>rms</sub>] 근방에서 포화됨을 알 수 있었다. 전압 70[V<sub>rms</sub>]에서 추력은 65.5[gf]이었다.

#### 4.5 부하에 따른 속도 및 효율

그림 14는 주파수 46.7[kHz], 프리로드 150[gf], 전압 70[V<sub>rms</sub>]일 때 부하를 20[gf]씩 증가시킬때의 속도와 효율을 나타내었다. 부하의 증가에 따라서 속도는 거의 선형적으로 감소하였다. 무부하시 속도는 0.204[m/s]이었다. 부하가 60[gf]일 때 효율이 5.73[%]로 가장 좋으며 이때 속도 0.168[m/s], 전류 28.36[ $\mu$ A], 추력 69[gf]이었다.

### 5. 결론

L<sub>1</sub>-B<sub>4</sub> 샌드위치형 진동자를 이용한 선형 초음파 모터를 유한요소 프로그램인 ANSYS로 해석을 함으로써 타원케지의 변위량과 타원운동방향, 한 주기동안의 고정진동자의 변화를 알 수 있었고, 선형 초음파 모터의 제조 시 압전세라믹을 적층하여 탄성체의 위와 아래에 접착했을 때 변위량이 가장 큼을 ANSYS로써 확인하였다. 압전세라믹을 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], 공진주파수 46.7[kHz]에서 전압 70[V<sub>rms</sub>]로 구동하였을 때 무부하시 속도는 0.204 [m/s]였고, 같은 조건에서 부하가 60[gf]일 때 속도 0.168[m/s], 효율 5.73[%]이었다. 선형 초음파 모터는 전자파를 발생하지 않기 때문에 주사형 전자현미경의 스테이지로 전자노이즈가 없는 측정기구의 스테이지 구동으로 적합하고, 물러으로써 직선운동을 회전 운동으로 변환시키면 카드전송 장치로도 적합하다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기 계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

### 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", JJAP, Vol. 27, pp. 195-197, 1988
- [3] Tomoki Funakubo, Toshiharu Tsubata, Yoshihisa Taniguchi, Kazuhiro Kumei, "Ultrasonic Linear Motor Using Multilayer Piezoelectric Actuators", JJAP. Vol. 34, pp. 2756-2759, 1995
- [4] 이동준, 임태빈, 성하경, "Atila에 의한 평판형 고정진 동자의 변위량 해석", 전기전자재료, Vol. 11, No. 11, pp. 122-125, 1998.
- [5] Singiresu S. Rao, "Mechanical Vibrations", Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- [6] 이종섭, 정수현, 임기조, 임태빈, 강성택, 채홍인, "L1-B4 진동모드를 이용한 평판형 선형 초음파 모터의 설계 및 시제작", 전기전자재료학회 논문지, Vol. 11, No. 10, pp. 861-865, 1998
- [7] 김연보, 한우석, 노용래, "압전 초음파 선형 모터 개발", 한국전기전자재료학회부산·경남·울산지부, pp. 279-282, 2000.