

## 압전 초음파 선형 모터 개발

### Development of Ultrasonic Linear Motor using Piezoelectric Ceramics

김연보\*, 한우석\*, 노용래\*\*

Yeon Bo Kim\*, Woo Seok Han\*, Yongrae Roh\*\*

#### Abstract

We have been designed and fabricated a bi-directional ultrasonic linear motor using piezoelectric ceramics. With the finite element method, we design and verify validity of the structure, and determine its optimal structure, size of design variables, material and boundary conditions for proper generation of the ultrasonic waves. Based on the design, a prototype of the ultrasonic linear motor has been fabricated and characterized, which thereby proves practical applicability of this new motor.

#### 1. 서론

일반적으로 사용되는 회전형 모터는 큰부피, 저출력, 긴 응답시간을 요구한다. 그러나 아직 초보적인 단계에 있지만 직선운동을 하는 초음파 선형 모터는 저속에서 큰 출력과 정확한 위치제어가 가능할 뿐만 아니라 구조가 간단하여 소형화가 가능하고 동작소음이 거의 없는 장점을 가지고 있다.<sup>[1],[2]</sup> 일반적으로 초음파 선형 모터는 에너지 효율이 높고 간단한 구조를 가진다.<sup>[3],[4]</sup> 따라서 본 연구는 모터의 재료를 PZT 압전 세라믹스를 사용한 새로운 형태로 쌍방향으로 직선적으로 운동하는 초음파 선형 모터를 개발하고자 한다. 이것의 모델을 설계하고, 역학적 타당성을 유한요소법(Finite Element Method)으로 검증한다. 이러한 설계 결과에 기초하여 초음파 선형 모터를 설계하고 제작하였다. 제작된 모터에 대하여 주파수에 따른 임피던스의 변화 및 속도특성, 부하질량 및 입력전압에 따른 속도의 변화와 이것의 응답 특성을 조사하였다.

#### 2. 초음파 모터의 해석

기존의 회전형 모터와는 달리 본 연구에서 제안한 초음파 모터의 구조는 Fig.1에 나타낸 것처럼 먼저 스테이터(S)의 양쪽에 분극 방향이 서로 반대인 압전소자를 교대로 부착하고, 하단의 압전소자는 상부와  $\lambda/4$ 에 해당하는 위치 차를 두고 부착하여 굴곡파 발생부를 구성한다. 구성된 모터의 발생부에 진행파를 발생시키기 위해서,  $\pm 90^\circ$  위상차를 갖는 두 계통의 고주파 고전압 발생회로를 스테이터에 부착된 상·하 압전소자에 각각 연결한다. 구동회로는 발진기와  $\pm 90^\circ$ 의 위상 시프트 및 두개의 파워 앰프와 전·후 제어기로 구성된다.

Fig.1은 초음파 선형 모터의 원리를 동시에 나타내는데 탄성체(S)의 표면을 종파와 횡파가 합성된 탄성 진행파가 전파하면, 이 표면상의 한 질점은 타원 궤적을 그리며 진동한다.

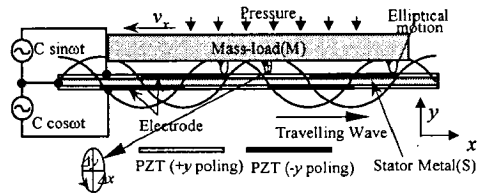


Fig. 1. Structure and principle of a travelling wave ultrasonic motor.

X축을 탄성체 표면의 접선방향, Y축을 법선 방향으로 하면 질점 P는 탄성진행파의 진행방향을 +X방향으로 한 경우에 종진동  $x$ , 횡진동  $y$ 가 합성된 것으로, 반 시계 방향의 타원진동을 한다. 이때 탄성파의 정점에서는  $y=0$ 이므로, 속도성분은 X방향뿐이며  $v_x = dx/dt$ 로 된다. 이와 같은 탄성 굴곡파를 일으키는 평판에 동체(M)를 가압하여 접촉시키면 동체 표면은 각 정점 부근에 접촉한 것이므로 상호 마찰력에 의해 동체(M)는 -X방향으로  $v_x$ 의 속도로 운동한다. 또는 평판한 매질에 탄성 굴곡파를 일으키는 평판을 가압 접촉시키면 정점 부근에서의 상호 마찰력에 의해 평판은 X방향으로  $v_x$ 의 속도로 움직인다. Fig.2에서 평판 표면상의 한 질점의 동작을 살펴보면 평판 표면상의 임의의 기준점 P에서 P'로 변위 할 때 Y방향의 변위를  $y$ , X방향의 변위를  $x$ , 그리고 굴곡각을  $\theta$ 라 하면 평판 탄성체의 굴곡 탄성파는 일반적으로 식(1)과 같이 표현된다.

$$y = \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \sin \omega t \quad (1)$$

\* : 대구대학교 정보통신공학부

(경북 경산시 진량읍 내리리 15,

E-mail : ybkim@biho.taegu.ac.kr)

\*\* : 경북대학교 센서공학과

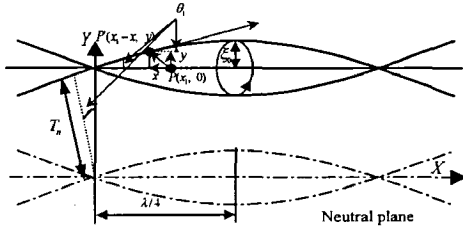


Fig. 2. Deformation of a point on the stator.

여기서,  $\xi_0$ ,  $\lambda$ ,  $t$ ,  $\omega$ 는 각각 진폭, 파장, 시간, 주파수이다. Fig. 2의  $P(x_1, 0)$ 에서  $P'$ 점으로의 굴곡을 고려하면 굴곡각  $\theta(x_1)$ 은 즉 굴곡 탄성파의 접선의 기울기는

$$\theta(x_1) = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_1} = \xi_0 \frac{2\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1\right) \sin \omega t \quad (2)$$

이고, X방향 변위는 스테이터의 Neutral Plane에서 표면까지의 두께인  $T_n$ 에 굴곡각  $\theta(x_1)$ 을 곱한 식(3)과 같으며, Y방향의 변위는 식(4)와 같다.

$$x(x_1) = T_n \theta(x_1) = T_n \frac{2\pi}{\lambda} \xi_0 \cos\left(\frac{\pi}{\lambda} x_1\right) \sin \omega t \quad (3)$$

$$y(x_1) = \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1\right) \sin \omega t \quad (4)$$

Fig. 1에 보인 것처럼  $\pm 90^\circ$ 의 위상차를 가지는 2종의 고주파 정현파 전압(A, B)을 인가하면 각 전압 신호에 대응하는 2개의 정재파가 생성되어지고, 이들 정재파가 서로 합성하여 진행파를 발생시킨다. 이때 진행파의 방향은 인가되어지는 전압 A에 대한 B의 위상차이, 즉  $+90^\circ$  이면  $+X$ 로,  $-90^\circ$  이면  $-X$ 로 결정되며, 필요에 따라 쌍방향으로 생성시킬 수 있다. 즉, 정현파 전압 A에 의해 생성되는 기준 정재파( $0^\circ$ )에 의한 P점의 변위는 식(5), (6)과 같다.

$$x_A(x_1) = T_n \frac{2\pi}{\lambda} \xi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1\right) \sin \omega t \quad (5)$$

$$y_A(x_1) = \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1\right) \sin \omega t \quad (6)$$

또한 A에 대한 시간 위상차  $+90^\circ$ 를 가지는 정현파 전압 B에 의해 생성되어지는 다른 정재파에 의한 P점의 변위는 시간적 위상이  $+90^\circ$  어긋나 있고, 위치 위상이  $+90^\circ$  차이를 가지고 있기 때문에 식(7), (8)과 같다.

$$x_B(x_1) = -T_n \frac{2\pi}{\lambda} \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1\right) \cos \omega t \quad (7)$$

$$y_B(x_1) = \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + 90^\circ\right) \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (8)$$

$$= \xi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \cos \omega t$$

이상으로부터 P점에서는 이 2개의 파가 합성되기 때문에

$$x(x_1) = x_A(x_1) + x_B(x_1) \quad (9)$$

$$= -T_n \frac{2\pi}{\lambda} \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1 - \omega t\right)$$

$$y(x_1) = y_A(x_1) + y_B(x_1) \quad (10)$$

$$= \xi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1 - \omega t\right)$$

로 되며 이것은 x, y방향 성분이 진행파임을 나타낸다. 또한 이것은 식(11)과 같음을 알 수 있다.

$$x(x_1)^2 / (T_n \frac{2\pi}{\lambda} \xi_0)^2 + y(x_1)^2 / \xi_0^2$$

$$= \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1 - \omega t\right) + \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1 - \omega t\right) \quad (12)$$

$$= 1$$

위 식은 2개의 파가 합성되어 횡진폭  $\xi_0$ , 종진폭  $(T_n \frac{2\pi}{\lambda} \xi_0)$ 의 타원진동을 하고 있음을 알 수 있다.

### 3. 초음파 모터의 구조설계

진행형 초음파를 생성하기 위하여 Fig.3과 같이 AI 탄성체(b)의 양면에 압전체(a)의 분극방향이 서로 반대가 되도록 교대로 배열하고 상하로도  $\lambda/4$ 의 위치 차가 있도록 압전체를 배열한다. 또한 AI은 이동체에 힘을 전달하기 위하여 톱니 구조로 하였고, AI의 양끝 경계면에서 진행파가 반사되는 것을 막기 위해 실리콘 고무(c)를 넣어 감쇠되도록 하였다. 경계조건은 실리콘 고무를 단순지지형태를 취하게 하므로, 여기서 감쇠층은 진행파의 에너지를 감쇠시켜 상쇄시키는 역할을 한다. 그리고 압전체의 끝 부분에서 단순지지 경계면까지는 AI을  $\lambda/8$ 을 두어 감쇠층까지 진행파가 잘 전달되게 설계하였다.

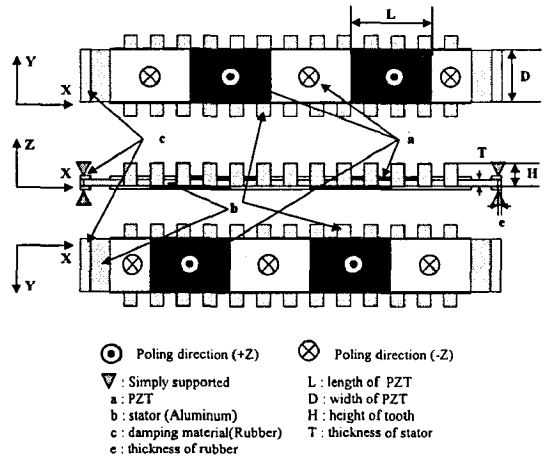


Fig. 3. Structure of the ultrasonic linear motor.

앞에서 고안된 모델의 타당성을 검증하고, 구조의 최적화를 위해 유한요소법[ANSYS 5.3]을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 모델을 구성하는 element 종류는 hexahedrons형 orthorhombic 소자를 사용하였으며, 총 431개의 element와 992개의 노드(node)로 하였다.

유한요소 해석 결과 증명된 초음파 선형 모터가 안정된 진행파를 생성하고, 소형이면서도 우수한 효율을 얻도록 모터의 최적 구조를 설정하였다. 즉, 구동 주파수, 압전소자 두께, 알루미늄 두께, 감쇠층 두께 등을 설계변수로 설정하고, 실험실에서의 제작성과 유한요소법으로 시뮬레이션 한 결과로부터 다음과 같이 설계변수들의 값을 설정하였다.

구동주파수는 구동시 모터의 저소음화를 이루고 구조체의 안정된 진동모드를 구현하기 위한 것으로 구동 주파수를 가칭 주파수 보다 높은 23.5 kHz를 설정하였다. 그리고 압전체의 두께는 구동주파수와 구동 전압 및 변압기의 제작성을 고려하고 실험실에서 안정적으로 구현할 수 있는 최소 값으로 두께를 0.5 mm로 결정하였다. 이상의 결과에 따른 시뮬레이션과 안정성을 고려하여 AI의 두께를 1.0 mm, 감쇠층 두께를 0.5 mm로 하였다.

#### 4. 초음파 선형 모터 제작 및 실험

선형 초음파 모터의 제작은 앞절의 결과를 토대로 하였다. 먼저 Fig. 1에서와 같이 알루미늄 스테이터(b)의 하단에 분극방향을 잘 고려하여 압전소자(a)를 분극방향이 +Z, -Z 순서로 엇갈리게, 순서대로 에폭시(Tevecon) 접착제를 사용하여 적당한 압력을 가하고 이것을 80~90℃에서 30분 동안 경화시킨다. 다음으로 스테이터의 상단에는 전자의 분극방향과 반대로 하며, 부착위치는 아래 배열과 위치가  $\lambda/4$  만큼 차이가 있도록 배열하고 접착하였다. 감쇠재질(c)로는 실리콘 고무(Silicon rubber)를, 압전소자는 PZT 5A, AI은 AI-2024를 사용하였다. 경계면은 단순지형형태로 실리콘 고무를 AI 지지 케이스에 적절한 압력으로 가압하여 접착하였다. 제작되어진 모터의 크기는 75 mm×14 mm×8 mm이었다.

##### (1) 구동회로 설계 및 제작

본 연구의 초음파 선형 모터는 위상차가  $\pm 90^\circ$ 인 두 정재파를 생성하여 이것의 합성에 의해 생성된 진행파를 이용하여 구동하는 것이다. 따라서 이 모터에 필요한 인가전압은 서로 위상이  $\pm 90^\circ$  차이가 나는 고주파의 고전압을 필요로 한다. Fig.4는 제작된 구동회로의 블록도를 나타내는데, Oscillator에서 나오는 신호는 스위치(S/W)의 신호에 의해 동기 되면서 구동하며, 위상차를 조절하기 위한 위상 시프터(phase shifter), 구동 시 고전압을 필요로 하기 때문에 변압기를 이용하였다. 변압기의 튜닝 비(tuning ratio)는 DC 인가전압을 12 V로 하였기 때문에 출력 전압을 100V로 계산하여 15T:145T로 하였다. 그리고  $\pm 90^\circ$ 의 위상차가 되도록 디지털 소자(TTL)를 사용하여 위상 쉬프터를 설계하여 제작하였다. 또한 전·후 구동을 위하여 쌍방향 제어를 사용하였다.

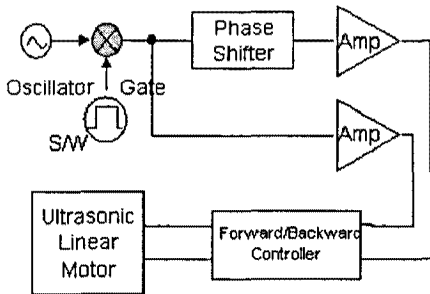


Fig. 4. Block diagram of the driving-circuit.

#### (2) 구동 실험 및 특성

##### 1) Non-Self-Moving 실험 및 특성

제작되어진 초음파 모터와 구동회로를 사용하여 구동 주파수 특성인 임피던스를 측정된 결과 구조체의 공진 주파수가 23.5 kHz에서 가장 낮은 580Ω을 나타내는 것을 Fig.5에서 확인하였다. 모터의 Non-self moving 실험을 위해 초음파 모터에 부하 질량[100g]을 올려놓고 실험하였다.

Non-self-moving이란 모터 자신이 움직이는 것이 아니고, 모터는 고정되어 있는 상태에서 다른 물체를 움직이는 것을 말한다. 그 결과로서 주파수에 대한 속도 변화 특성을 Fig.6에 보인 바와 같이 측정되었으며, 구조체의 공진 주파수(23.5MHz)에서 속도가 14.86 cm/sec로 가장 좋은 것을 알 수 있는데, 이것은 본 모터가 구조체의 공진을 이용한 진행과 형태의 모터임을 증명하는 것이다. 이때 인가된 전압은 100 V<sub>p-p</sub>이며 사용되는 전력은 1 W 정도 이었다.

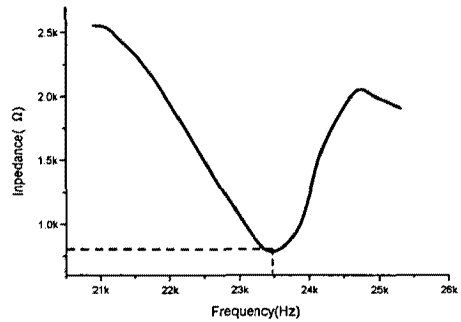


Fig. 5. Frequency spectrum of the motor impedance

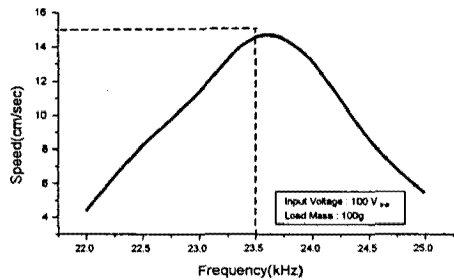


Fig. 6. Characteristic of frequency/speed at the non-self moving test

##### 2) Self-moving 실험 및 특성

제작한 초음파 선형 모터를 이용하여 다른 물체를 이동시키는 것이 아니라, 고정된 바닥을 지지대로 삼아서 모터 자신이 움직이는 Self-moving 실험을 하였다. 이 때에도 인가된 부하질량에 대한 속도 특성의 변화를 측정하였고, 나아가 인가전압 변화에 대한 속도 변화도 함께 조사하였다. 먼저 Fig.7은 인가되는 부하질량과 인가전압에 대한 속도특성을 측정 한 결과를 나타낸다. 결과에서 부하질량이 100g 일

때 가장 높은 속도를 구현할 수 있었다. 따라서 부하 질량을 100g으로 고정하고 인가전압에 대한 속도 특성 및 효율 특성을 측정하여 Fig.8에 나타내었다. 결과로서 어느 정도까지는 인가전압에 비례하여 속도가 높아지는 경향을 보이나 그 이상의 전압에서는 포화되는 현상을 보였다. 그리고 인가전압에 대한 모터의 효율은 100 V<sub>p-p</sub>일 경우 가장 좋게 나타났다.

그러므로 다시 인가전압을 100 V<sub>p-p</sub>로 고정하고 부하질량에 대한 속도와 효율 특성을 측정하였다. 부하 질량이 100g일 경우 효율이 16.8%, 300g일 경우 효율이 23.1% 이었다. 이는 부하질량이 클수록 효율이 높아지는 것을 알 수 있다. 여기서 효율이란 모터에 공급된 전력에 대한 모터가 한 일의 에너지 비를 뜻하며, 식(12)에 의해 구해진다.

$$\text{효율}(\%) = \frac{\text{부하를 움직인 운동에너지}}{\text{모터로 입력된 전력}} \times 100 \quad (12)$$

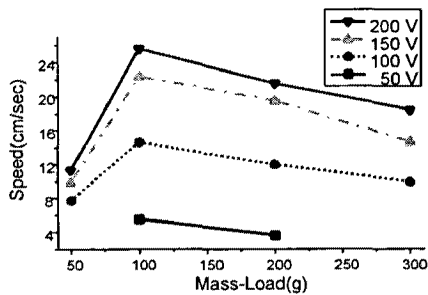


Fig. 7 The Variation of speed with relation to load mass in various input voltage.

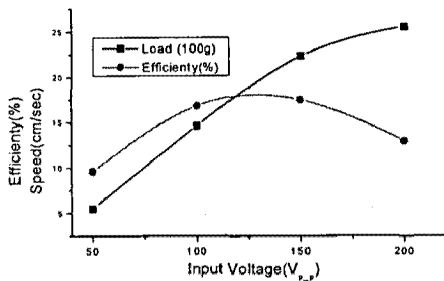


Fig. 8. Variation of the speed and efficiency in relation to input voltage with 100g load mass.

Fig.9는 제작된 초음파 선형 모터의 응답특성을 적외선 측정장비를 이용하여 측정한 결과이다. 그림에서 수평축은 시간, 수직축은 변위를 나타내며  $t_1$ 에서  $t_2$ 까지는 가속도 구간이며,  $t_2$ 에서  $t_3$ 까지는 등속도 구간이다. 그림에서 보는 것 처럼 모터의 응답 시간이 부하질량에 따라 변화함을 알 수 있다. 부하 질량이 100g일 경우 응답시간은 약 14ms정도이고, 300g일 경우 약 27ms임을 보여주고 있다. 일반적으로 권선형 모터인 경우 응답시간은 수십~수백 ms 정도이며, 회전형 초음파 모터의 경우는 수십 ms 정도임을 고려할 때, 본 연구의 초음파 선형 모터가 우수

한 응답특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

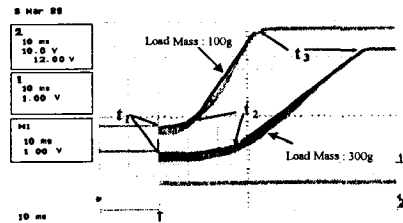


Fig. 9. The response Characteristic of the ultrasonic linear motor

## 5. 결론

압전 세라믹스를 이용하여 쌍방향으로 직선운동을 하는 새로운 구조의 초음파 선형 모터를 설계하고 제작하였다. 이것은 스테이터를 중심으로 상하에 분극방향이 서로 반대인 압전 세라믹스를 교대로 부착한 구조이다. 상용 유한요소 해석 도구 [Ansys 5.3]를 이용한 시뮬레이션을 통하여 이것의 타당성을 검증하였다. 이 결과를 기초로 하여 실제로 초음파 선형 모터와 구동회로를 제작하여 시험한 결과는 다음과 같다.

1. 제작된 초음파 선형 모터는 쌍방향으로 잘 운동하였으며, Non-self moving과 Self moving을 선택적으로 사용할 수 있었다.
2. 최고 속도는 부하질량이 100g, 인가전압이 100V일 때 약 1.5cm/s 이었으며, 효율은 약 23% 이었다.
3. 응답특성은 14~27ms로서 기존의 권선형 모터에 비하여 상당히 우수하였으며, 회전형 초음파 모터보다도 우수하였다

본 모터의 이용 및 응용 분야로는 부피로 인한 공간 문제로 기존의 권선형 모터를 사용하기 어렵거나 정밀한 위치제어가 필요한 다양한 분야에 적용될 수 있을 것이다. 응용 예로 프린터나 신용카드, 전화카드 등과 같은 카드리더에 사용할 수 있으며, 빠른 응답성과 정확성이 요구되는 탐침 및 플레이트 미소위치 제어에 사용할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 단순한 구조로 직선운동을 하므로 기존의 액추에이터를 대응할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

1. T. Sashida, T. Kenjo, An Introduction to Ultrasonic Motors, Oxford, Clarendon Press, 1993
2. S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa, N. Hakamura, Ultrasonic Motors : Theory and Applications, Oxford, 1993.
3. M. Kurosawa, M. Takahashi, T. Higuchi, "Ultrasonic Linear Motor using surface Acoustic-Waves", IEEE Tran. on Ultra. Ferro. & Freq. control, Vol. 43, pp.901-906, 1996.
4. H. Hirata, S. Ueha, "Characteristics Estimation of a Traveling-Wave Type Ultrasonic Motor", IEEB Tran. on Ultra. Ferro. & Freq. control, pp.402-406. 1993.