

## 진행파형 초음파 리니어 모터 설계 및 제작

한우석\*, 김연보\*, 노용래\*\*

\* 대구대학교 정보통신공학부

\*\* 경북대학교 센서공학과/전자전기공학부

## Travelling wave Type Ultrasonic Linear Motor Design and Fabrication

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

\* Dept. of Computer and Communication Eng., Taegu University

\*\* Dept. of Sensor Eng./School of Electronic and Electrical Eng., Kyungpook National University

\*cowoo@biho.taegu.ac.kr, \*ybkim@biho.taegu.ac.kr, \*\*yryong@eeg.kyungpook.ac.kr

### 요 약

현재까지 초음파 모터는 소형 경량이면서도 저속에서 큰 출력을 가지며 정확한 위치 제어가 가능하다는 점에서 큰 관심을 끌고 있다. 대부분 회전형 로우터리 모터가 주종을 이루고 있으며 특수한 용도로 초음파 리니어 모터가 일부 사용되고 있다.

본 연구에서는 진행파를 이용하여 쌍방향으로 움직일 수 있는 새로운 구조의 진행파형 초음파 리니어 모터를 설계하고 제작하였다. 설계는 유한요소해석법을 이용하여 구조의 가능성과 진행파가 왜곡되지 않는 최적구조, 재질, 크기, 경계조건을 결정하였다. 그 결과에 따라 리니어 모터를 실제로 제작하여 알루미늄판 위에서 주파수 변화 및 부하질량 변화에 대한 모터의 성능을 측정하였는데, 제작된 모터는 부하질량이 100 g일 때 14.6 cm/s로 가장 빠른 속도특성을 보였다. 본 모터는 다양한 정밀위치제어 및 이동 소자로서 활용될 수 있을 것이다.

하여 구조가 간단한 직선형 초음파 모터를 필요로 하게 되었다.

본 연구의 목적은 기어와 같은 부수적인 장치가 없이도 직선상에서 쌍방향으로 이동할 수 있는 진행파(Travelling wave)형 초음파 리니어 모터를 개발하고자 한다. 이것은 높은 에너지 효율과 간단한 구조[5-6], 그리고 직선운동을 하기 때문에 소형화가 가능하다는 이점이 있다. 따라서 본 연구에서는 진행파를 이용한 새로운 형태의 쌍방향 초음파 리니어 모터의 구조를 모델링하고, 이 모델의 역학적 타당성과 최적 구조를 유한요소법(FEM)으로 검증하였다. 그 결과에 따라 초음파 리니어 모터를 설계하여 제작하고, 본 모터의 구동특성을 고려하여 간단한 구동장치를 제작한 후, 적외선 측정장비로 속도를 측정하여 본 연구에서 제작된 쌍방향 초음파 리니어 모터의 구동 특성을 평가하여 구동 능력 및 실용 가능성을 제시하였다.

### I. 서 론

압전소자를 이용한 초음파 모터는 저속에서의 큰 출력을 가지며 정확한 위치 제어가 가능하다는 점에서 큰 관심을 끌고 있을 뿐만 아니라 높은 자기장과 전기장에도 영향을 받지 않는다는 이점이 있다[1-2]. 또한, 초음파 모터는 무게가 가벼울 뿐만 아니라 구조가 간단하여 소형화 할 수 있으며, 동작 시 소음을 무시할 수 있는 정도로 좋은 특성을 가지고 있다. 또한, 정밀 위치제어는 물론 동시에 토오크 제어를 단순한 알고리즘에 의해 손쉽게 구현할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점 때문에 카메라나 시계와 같은 정밀기기, 복사기나 프린터와 같은 정밀 사무기기, 자동차의 측면경, 그리고 산업용 로봇 등 여러 분야에 활용되어지고 있다.

현재 주로 사용되고 있는 초음파 모터는 회전형인 로우터리 모터가 주종을 이루고 있으며 특수한 용도로 직선형 초음파 모터가 일부 사용되고 있으나 아직 초보적인 단계이다[3-4]. 회전형 모터는 직선운동을 필요로 하는 산업 현장에 적용시키기 위해서는 기어와 같은 부수적인 매체를 통하여 회전운동을 직선운동으로 전환해야 하는 복잡성이 있다. 따라서 큰 부피와 중량을 피할 수 없으므로 소형화는 불가능한 실정이다. 따라서 자동화 시스템의 소형화와 작업현장의 생산성을 높이기 위

### II. 이 론

#### 2. 1. 진행파형 초음파 모터의 구동 방식

초음파 모터의 구동원은 위치위상과 구동위상이 서로 다른 2개의 정제파를 합성하여 하나의 진행파를 생성시켜서 사용하였다.

그림 1과 같이 스테이터의 한 질점의 동작을 살펴보면 스테이터 표면상의 임의의 기준점 P에서 P'로 변위할 때 Y방향의 변위를 y, X방향의 변위를 x, 그리고 굴곡각을  $\theta$ 라 하면 평판 탄성체의 굴곡 탄성파의 식은 일반적으로 식 (1)과 같이 나타난다.

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

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

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

이고, X방향 변위는 스테이터의 Neutral Plane에서 표면까지의 두께인  $T_n$ 에 굴곡각인  $\theta(x_1)$ 을 곱한

$$x(x_1) = T_n \cdot \theta(x_1) \quad (3)$$

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

이며, Y방향의 변위는

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

로 된다.

진행파형 모터에  $\pm 90^\circ$ 의 위상차이를 가지는 2종의 고주파 정현파 전압(A, B)을 인가하면 각 전압신호에 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 결정되어, 필요에 따라 쌍방향으로 생성시킬 수 있다. 즉, 정현파 전압A에 의해 생성되어지는 기준 정재파( $0^\circ$ )에 의한 P점의 변위는

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

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

이다. 또한 A에 대한 시간위상차  $+90^\circ$ 를 가지는 정현파 전압 B에 의해 생성되어지는 다른 정재파에 의한 P점의 변위는 시간위상이  $+90^\circ$  차이가 나며, 위치위상이  $+90^\circ$  차이를 가지고 있기 때문에

$$y_B(x_1) = \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + 90^\circ\right) \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (7)$$

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

$$x_B(x_1) = -T_n \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1\right) \cdot \cos \omega t \quad (8)$$

이 된다. 이상으로부터 P점에서는 이 2개의 파가 합성되기 때문에

$$x(x_1) = x_A(x_1) + x_B(x_1)$$

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

$$- T_n \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1\right) \cos \omega t \quad (9)$$

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

$$y(x_1) = y_A(x_1) + y_B(x_1)$$

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

$$+ \xi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1\right) \cos \omega t \quad (10)$$

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

로 되며 이것은 x, y방향 성분이 진행파임을 나타낸다. 또한

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

$$= \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1 - \omega t\right) + \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1 - \omega t\right) \quad (11)$$

$$= 1$$

으로 됨을 알 수 있다. 위 식은 2개의 파가 합성되어 횡진폭  $\xi_0$ , 종진폭  $T_n \cdot 2\pi/\lambda \cdot \xi_0$ 의 타원운동을 하고 있음을 알 수 있다.

### III. Ultrasonic Linear Motor의 최적 구조설계

#### 3. 1. Ultrasonic Linear Motor의 구조설계

초음파 리니어 모터는 2절의 이론과 원리를 이용하여 새로운 진행파형 초음파 리니어 모터의 구조를 모델링하였다. 또한, 진행파의 생성은 그림 2와 같이 탄성체(aluminum)를 중심으로하여 압전소자를 분극방향이 반대되도록 교대로 배열하고 상하로도 위치 위상이 1/4 파장 차이가 나게 압전소자를 배열하였다. 또한 물체에 힘을 전달하기 위하여 이빨(teeth) 구조와 비슷하게 하였고, 감쇠재질을 적당한 크기로 두어 진행파가 완만하게 감쇠하여 상쇄되게 하였다.

#### 3. 2. 유한요소 해석

##### 3. 2. 1. 모터 모델링(Motor modeling)

이상의 구조의 초음파 모터의 작동 상태를 검증하기 위해 유한요소법을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 모델을 구성하는 요소종류는 hexahedrons형 orthorhombic 소자를 사용하였으며, 총 431개의 요소(element)와 992개의 노드(node)로 형성되어 있다. 그리고, 양 끝단을 단순지지 경계조건으로 두어 모델링 하였으며, 그림 3에 완성된 모델을 나타내었다.

모달해석 결과 구조체의 공진주파수는 23.5 kHz이었다. 모터의 실현 가능성을 관찰하기 위해 공진 주파수에서 Transient해석 방법을 행하였으며, 그림 4는 임의의 한 구간에서 변형상태를 보이고 있다.

##### 3. 2. 2. 최적구조 설정

이상으로 본 연구에서 제안한 구조가 진행파를 발생시킬 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과로 진행파형 초음파 리니어 모터가 안정된 진행파를 생성하고, 소형이면서도 우수한 효율을 가지기 위한 모터의 최적 구조를 설정하였다. 즉, 구동 주파수, 압전재료 두께, 알루미늄 두께, 감쇠층 두께 등을 설계변수로 설정하고, 실제 제작성을 고려하여 유한요소법으로 시뮬레이션 한 결과로부터 23.5 kHz, 0.5 mm, 1.0 mm, 0.5 mm로 설계변수들의 값을 결정하였다. 감쇠층 두께(e)의 변화에 따라 진행파의 안정성의 변화는 식(12)에 의해 그림 5와 같이 나타내었다.

$$\%(\text{Stability}) = \frac{\lambda_{\text{travelling wave}}}{\lambda_{\text{standard wave}}} \times 100 \quad (12)$$

여기서,

$\lambda_{\text{travelling wave}}$  : 스테이터의 끝단에서의 진행파의 파장

$\lambda_{\text{standard wave}}$  : 23.5 kHz에서의 파장

이상의 결과는 본 논문에서 설정한 값이고, 주어진 경계조건과 압전소자와 알루미늄의 두께와 감쇠층의 두께에 따라 공진주파수 및 파형의 형태가 달라질 것이다.

### IV. Ultrasonic Linear Motor 제작 및 실험

#### 4. 1. Ultrasonic Linear Motor 시스템 제작

3절의 결과를 토대로 Ultrasonic Linear Motor 시스템을 실제로 제작하였다. 그림 6은 실제 제작된 초음파 리니어 모터의 사진이다.

그림 7은 제작된 구동회로의 개략도를 나타내는데, 발진기에서 나오는 신호는 스위치(S/W)의 신호에 의해 동

기 되면서 구동하게 되어진다. 그리고 위상 차이를 조절하기 위한 phase shifter를 사용하였고, 구동시 고전압을 필요로 하기 때문에 변압기를 이용하여 증폭하였다. 또한 전·후 구동을 위하여 쌍방향 제어를 사용하였다.

#### 4. 2. 구동 실험 및 특성

##### 4. 2. 1. Non-Self-Moving 실험 및 특성

제작된 초음파 모터와 구동회로를 사용하여 구동 주파수 특성을 측정한 결과 그림 8에서 나타난 것과 같이 구조체의 공진주파수는 23.5 kHz이었다. 또한 그림 8은 모터의 Non-Self moving 실험방법으로 주파수에 대한 속도 변화 특성을 나타내고 있는데, 이것으로 구조체가 공진을 이용한 진행과형 초음파 모터임을 증명할 수 있다.

##### 4. 2. 2. Self-Moving 실험 및 특성

또한 그림 9는 본 연구에서 Self-Moving 실험을 한 결과인 인가되어지는 부하질량에 대한 최적의 조건, 구조체의 공진주파수에서 인가전압 변화에 대한 속도 특성 및 능률 특성을 나타내었다.

그림 10은 구동주파수 23.5 kHz에서 부하질량이 100 g 일 경우 인가전압에 대한 속도변화와 능률 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 인가전압이 100 V 일 경우가 가장 우수한 특성을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 여기서 능률이란 모터에 인가되어진 전압에 대한 일의 에너지 비를 뜻하며, 식 (13)에 의해 구해진 값이다.

$$\text{Efficiency}(\%) = \frac{\text{Output mechanical energy}}{\text{Input electrical energy}} \times 100 \quad (13)$$

여기서, Output mechanical energy는 부하 질량을 움직인 운동 에너지, Input electrical energy는 모터로 입력된 전력이다.

그림 11은 제작한 초음파 리니어 모터의 응답특성을 측정한 것으로서 부하질량이 100 g인 경우와 300g인 경우보다 응답속도가 빠르다는 것을 보이고 있다. 그림에서  $S_A$ 와  $S_B$ 까지는 가속구간이며,  $S_B$ 에서  $S_C$ 까지는 등속구간을 나타내고 있다. 이상의 실험 및 특성 결과로 볼 때 새롭게 설계, 제작되어진 쌍방향 초음파 리니어 모터는 초음파 모터로서의 성능을 잘 발휘하고 있음을 알 수 있다.

### V. 결 론

압전 세라믹을 이용한 초음파 리니어 모터를 설계하여 제작하여 그것의 성능을 측정하였다. 압전 세라믹을 구동체에 다층구조로 부착하여 고주파 전압을 인가하면 진행파가 생성되며, 이것이 효율적으로 작동하여 응답시간이 10 ms정도로 우수하였으며 생성된 진행파가 간섭을 받지 않았다.

최적구조의 설계는 유한요소법을 사용하였으며, 이 때 구동주파수는 초음파 영역인 23.5 kHz로 하였다. 모터의 속도는 인가전압이 200 V에서 25.57 cm/s로 가장 빠르며, 능률은 100 V에서 23.1 %로 가장 우수하게 나타났다. 그리고 위상차로 이동방향으로 제어할 수 있었다.

본 모터의 이용 및 응용 분야로는 기존의 권선형 모터에 비해 부피가 작으므로 좁은 설치 공간을 요구하는 시스템인 프린터의 용지 리더, 신용카드 및 전화카드 등의 카드 리더에 사용할 수 있을 뿐만 아니라 응답속도가 빠

르고 정확성이 요구되는 탐침 및 플레이트 미소위치 제어에 사용할 수 있을 것으로 생각되어진다.

### 참 고 문 헌

1. T. Sashida, T. Kenjo, : An Introduction to Ultrasonic Motors, Oxford, Clarendon Press, 1993
2. S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa, N. Nakamura, : Ultrasonic Motors ; Theory and Applications, Oxford, Clarendon Press, 1993.
3. 伊勢悠紀彦, "超音波 モーター", 日本音響學會紙, 43권, 3호, pp.184-188, 1987.
4. 大トルクで底速回轉する表面波モータまず自動無点カメラで實用へ, Nikkei Mechanical, 1983.
5. 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.
6. H. Hirata, S. Ueha, "Characteristics Estimation of a Traveling-Wave Type Ultrasonic Motor", IEEE Tran. on Ultra. Ferro. & Freq. control, pp.402-406, 1993.

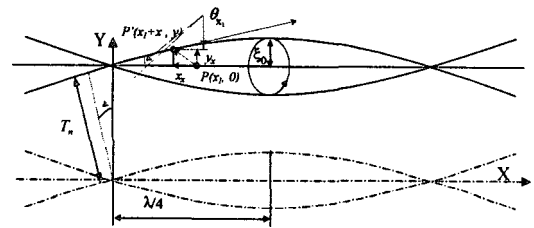
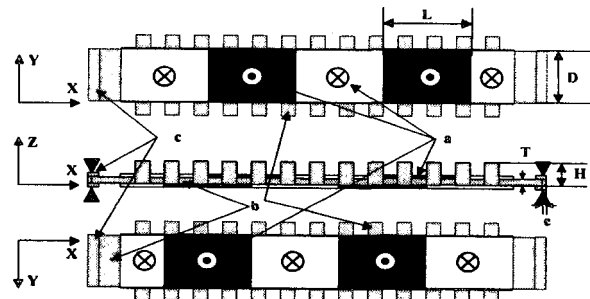


Fig. 1. Deformation of a point on the stator.



- ⊙ Poling direction (+Z)
- ⊗ Poling direction (-Z)
- ▼ Simply supported
- a: PZT
- b: stator (Aluminum)
- c: damping material (Rubber)
- c: thickness of rubber
- L: length of PZT
- D: width of PZT
- H: height of tooth
- T: thickness of stator

Fig. 2. Structure of the bi-directional ultrasonic linear motor.



Fig. 3. Mesh configuration of the ultrasonic linear motor.



Fig. 4. Result of the transient analysis.

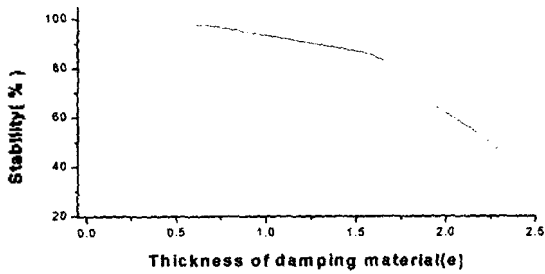


Fig. 5. Variation of the stability of the travelling wave in relation to damping material thickness.

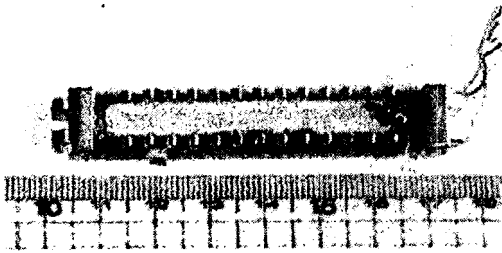


Fig. 6. Fabricated ultrasonic linear motor.

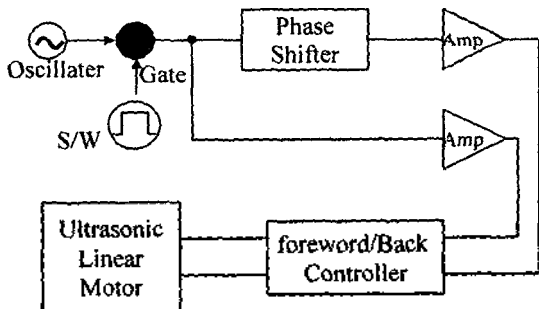


Fig. 7. Block diagram of the driving-circuit.

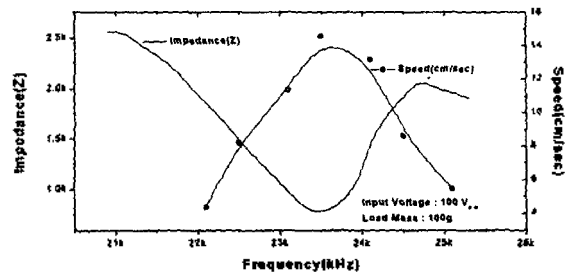


Fig. 8. Frequency spectrum of the motor impedance and speed at the non-self moving test.

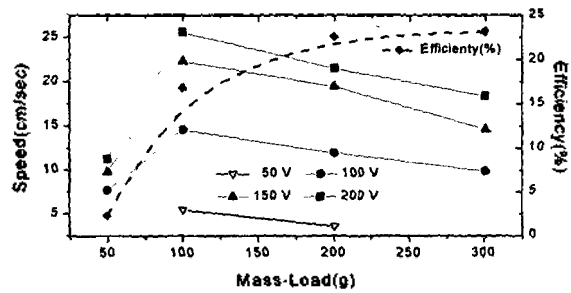


Fig. 9. Variation of the speed in relation to load mass and input voltage, and efficiency in relation to load mass with 100 V input voltage.

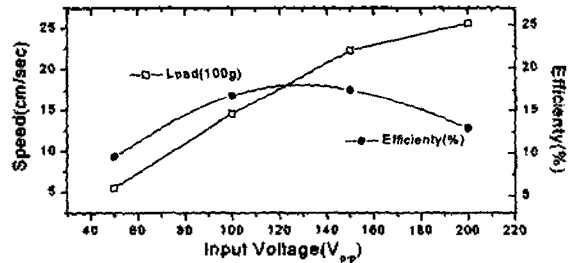


Fig. 10. The variation of speed and efficiency in relation to input voltage with 100g load mass.

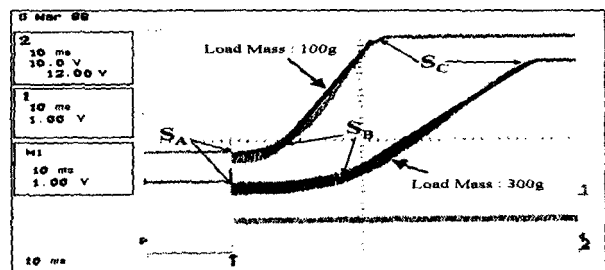


Fig. 11. The response characteristic of the ultrasonic linear motor.