

진행파를 이용한 직선형 초음파 모터의 최적구조 설계

Design of a optimum structure for Ultrasonic Linear Motor using a travelling wave

김연보*, 한우석*, 노용래**

(Yeon Bo Kim*, Woo Seok Han*, Yongrae Roh**)

Abstract

The conventional ultrasonic linear motors developed so far utilize a standing wave, and are of a pi-type or a hybrid transducer type structure. Traveling wave type bi-directional ultrasonic linear motors have not been developed, yet. This paper describes design of a new bi-directional ultrasonic linear motor working by means of a traveling wave. With the finite element method, we design and verify validity of the new structure. And, we determine its optimal structure, size of design variables, material and boundary conditions for proper generation of the traveling wave.

Key words(중요 용어) : transducer(변환기), traveling wave(진행파), bi-directional ultrasonic linear motor (쌍방향형 초음파 리니어 모터), finite element method(유한요소법)

1. 서 론

압전소자를 이용한 초음파 모터는 저속에서의 큰 출력과 정확한 위치 제어가 가능하다는 점에서 큰 관심을 끌고 있을 뿐만 아니라 높은 자기장과 전기장에도 영향을 받지 않는다는 이점이 있다.^{1)~2)} 또한, 이 초음파 모터는 경량일 뿐만 아니라 구조가 간단하여 소형화 할 수 있으며, 동작 시 소음을 무시 할 수 있는 정도로 작다. 또한, 정밀 위치제어와 함께 토오크 제어를 단순한 알고리즘으로 쉽게 구현할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점으로 정밀기기, 정밀 사무기기, 자동차의 사이드미러 그리고 산업용 로봇 등 여러 분야에 활용되어지고 있다. 현재 주로 사용되고 있는 초음파 모터는 회전형인 로우터리 모터가 주종을 이루고 있으며 특수한 용도로 리니어(linear) 초음파 모터가 일부 사용되고 있으나 아직 초보적인 단계이다.^{3)~4)} 회전형 모터를 직선 운동을 필요로 하는 산업 현장에 적용시키기 위해서는 기어와 같은 부수적인 매체를 통하여 원운동을 직선운동으로 전환해야 하는 복잡성이 있으므로 이것의 소형화에는 상당한 문제점이 있다. 따라서 자동화 시스템의 소형화를 위하여 구조가 간단한 리니어 초음파 모터를

필요로 하게 되었다.

본 연구는 쌍방향 초음파 리니어 모터가 기어와 같은 부수적인 장치가 없이도 일직선상에서 쌍방향으로 쉽게 이동할 수 있는 점에 착안하여 진행파(travelling wave)를 사용한 쌍방향 초음파 리니어 모터를 설계하고자 한다. 일반적으로 진행파를 이용한 초음파 모터는 높은 에너지 효율과 간단한 구조를 가지므로 소형화가 가능하다.^{5)~6)} 또한, 최근에는 제안된 구조에 대한 타당성 및 실현 가능성을 유한요소법으로 검증하고 있다.^{7)~8)} 따라서 본 연구에서는 진행파를 이용한 새로운 형태의 쌍방향 초음파 리니어 모터의 구조를 모델링하고, 설계변수를 선정하여, 이것에 따른 모델의 역학적 타당성과 최적 구조를 유한요소법(FEM)으로 검증하여 초음파 리니어 모터 설계를 위한 기본적인 설계변수를 제시하고 이것의 실현 가능성을 제안한다.

2. 해석적 이론

2.1. 진행파형 초음파 모터의 구동 방식

압전소자는 외부에서 전기신호가 가해지면 그것에 따른 신축 또는 수축 운동이 일어나서 기계적 힘을 발생시킨다. 이 힘이 압전소자와 밀착되어져 있는 탄성체의 한 면에 전달되어 왜형(strain)이 생기며 이것은 탄성체 내부에서 탄성 진동파로 전파한다. 이 파를 탄성파라 부르며 일반적으로 종파와 횡파로 구성되어 있다. 초음파 모터는 압전소자에 의해 발생하는 탄성파를 이용하는 것으로, 진행파

* : 대구대학교 정보통신공학부

(경북 경산시 진량읍 내리리 15, Fax : 053-

850-6619, E-mail : ybkim@biho.taegu.ac.kr)

** : 경북대학교 센서공학과

1999년 11월 7일 접수, 2000년 2월 17일 심사완료

형 초음파 모터에서 주로 사용되는 파는 Rayleigh파 및 굴곡파(bending wave) 2종류가 있다.^{(1),(2),(5)} 전자를 이용한 초음파 SAW형 모터가 있으며, 이것이 저주파 구동 및 큰 출력을 가지기 위해서는 부피를 줄이기 어렵고, 효율이 낮다. 후자는 전자에 비해 모터의 부피를 작게 할 수 있으며, 저주파 구동이 가능하다는 점에서 본 연구에서는 굴곡파를 이용하였다.

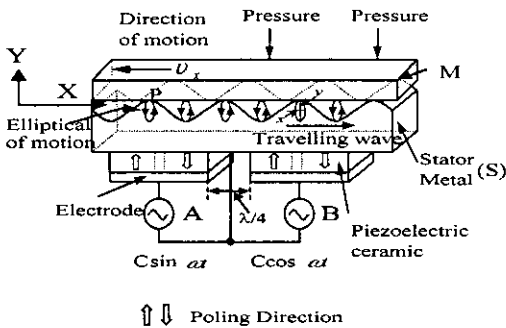


그림 1. 진행파형 모터의 구조와 구동 원리.
Fig. 1. Structure and principle of a travelling wave ultrasonic motor.

초음파 모터의 구조는 그림 1에 나타낸 것처럼 먼저 스테이터(Stator, S)의 양쪽에 분극방향이 서로 반대인 압전소자를 교대로 부착하되, 발생된 굴곡파의 $\lambda/4$ 에 해당하는 간격을 둠으로써 굴곡파 발생부를 구성한다. 스테이터 위에는 발생된 굴곡파에 의해 직선 운동을 하는 이동체(M)를 접촉시킨다. 구성된 초음파 모터의 기구부에 진행파를 구동시키기 위해서 $\pm 90^\circ$ 위상차를 갖는 두 계통의 고주파 고전압을 발생시키는 구동회로를 스테이터에 부착된 좌우 압전소자 부위에 각각 연결한다. 구동회로는 발전기와 $\pm 90^\circ$ 의 위상 시프터 및 두 개의 파워 앰프로 구성되어 있다. 그림 1은 진행파형 모터의 원리를 동시에 나타내는데 탄성체(S)의 표면을 종파와 횡파가 합성된 위상이 서로 다른 2개의 굴곡파가 동일한 스테이터 내에서 합성되어 탄성 진행파가 생성된다. 이때 스테이터 표면상의 한 질점은 파의 진행방향의 반대 방향으로 타원 궤적을 그리며 운동한다. X축을 탄성체 표면의 접선방향, Y축을 법선 방향으로 하면 질점 P는 탄성 진행파의 진행방향을 +X방향으로 한 경우에 종진동 x , 횡진동 y 가 합성된 반 시계 방향의 타원진동을 한다. 이 때 탄성파 정점에서 $y = 0$ 이므로, 속도 성분은 X방향 뿐이며,

$$v_x = \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

로 된다. 이와 같은 탄성 굴곡파를 일으키는 평판에 동체(M)를 가압 접촉시키면 동체 표면은 각 정점 부근에서 접촉한 것이므로 상호 마찰력에 의해 동체(M)는 -X방향으로 v_x 의 속도로 움직인다. 또는 평탄한 매질에 탄성 굴곡파를 일으키는 평판을 가압 접촉시키면 정점 부근에서의 상호 마찰력에 의해 평판은 X방향으로 v_x 의 속도로 움직인다.

그림 2와 같이 평판 표면상의 한 질점의 동작을 살펴보면 평판 표면상의 임의의 기준점 P에서 P'로 변위 할 때 Y방향의 변위를 y , X방향의 변위를 x , 그리고 굴곡각을 θ 라 하면 평판 탄성체의 굴곡 탄성파의 식은 일반적으로 다음과 같이 나타난다.

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

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

$$\theta(x_1) = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_1} = \xi_0 \frac{2\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1\right) \sin \omega t \quad (3)$$

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

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

이며, Y방향의 변위는

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

로 된다.

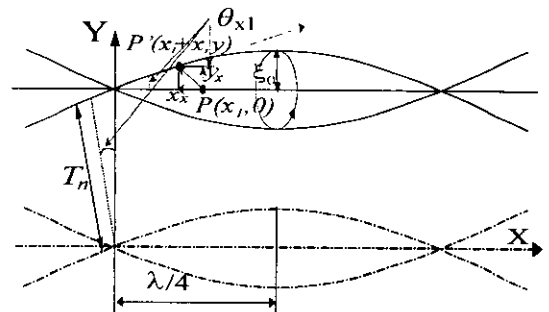


그림 2. 스테이터상의 한 점의 변형
Fig. 2. Deformation of a point on the stator.

그림 1에 보인 것처럼 $\pm 90^\circ$ 의 위상차이를 가지는 2종의 고주파 정현파 전압(A, B)을 인가하면 각 전압신호에 대응하는 2개의 정제파가 생성되어 지고, 이들 정제파가 서로 합성하여 진행파를 발생

시킨다. 이때 진행파의 방향은 인가되어지는 전압 A에 대한 B의 위상차, 즉 +90° 이면 +X로, -90° 이면 -X로 결정되며, 필요에 따라 쌍방향으로 생성시킬 수 있다. 즉, 정현파 전압 A에 의해 생성되어지는 기준 정재파(0°)에 의한 P점의 변위는

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

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

이다. 또한 A에 대한 시간 위상차 +90° 를 가지는 정현파 전압 B에 의해 생성되어지는 다른 정재파에 의한 P점의 변위는 시간적 위상이 +90° 어긋나 있고, 위치위상이 +90° 차이를 가지고 있기 때문에

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

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

이 된다. 이상으로부터 P점에서는 이 2개의 파가 합성되기 때문에

$$\begin{aligned} x(x_1) &= x_A(x_1) + x_B(x_1) \\ &= T_n \frac{2\pi}{\lambda} \xi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1\right) \sin \omega t \\ &\quad - T_n \frac{2\pi}{\lambda} \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1\right) \cos \omega t \\ &= -T_n \frac{2\pi}{\lambda} \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1 - \omega t\right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} y(x_1) &= y_A(x_1) + y_B(x_1) \\ &= \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1\right) \sin \omega t \\ &\quad + \xi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1\right) \cos \omega t \\ &= \xi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1 - \omega t\right) \end{aligned} \quad (11)$$

로 되며 이것은 x, y방향 성분이 진행파임을 나타낸다. 또한

$$\begin{aligned} &\frac{x(x_1)^2}{\left(T_n \frac{2\pi}{\lambda} \xi_0\right)^2} + \frac{y(x_1)^2}{\xi_0^2} \\ &= \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1 - \omega t\right) + \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_1 - \omega t\right) \quad (12) \\ &= 1 \end{aligned}$$

으로 됨을 알 수 있다. 위 식은 2개의 파가 합성되어 횡진폭 ξ_0 , 종진폭 $\left(T_n \frac{2\pi}{\lambda} \xi_0\right)$ 의 타원진동을 하고 있음을 알 수 있다.

2.2. 압전 재료

본 연구에서 이용된 압전 재료는 고효율, 높은

큐리 온도, 상대 내전력이 높은 PZT-5A를 사용하여 모터를 제작하고 그 성능을 평가하였다. 다음은 본 연구에서 사용된 PZT-5A의 유전상수, 압전상수, 강성계수 행렬을 나타내었으며,⁹⁾ 이들은 유한요소 해석(FEM) 및 실험에 사용된다. 그리고 스테이터 재질은 알루미늄(AL-2024), 감쇠재질은 실리콘고무(다우코닝1753)를 사용할 것이다.

유전행렬(dielectric matrix) [ϵ] $\times 10^9$ F/m

$$\begin{bmatrix} 9.16 & 0 & 0 \\ 0 & 9.16 & 0 \\ 0 & 0 & 8.30 \end{bmatrix}$$

압전행렬(piezoelectric matrix) [e] C/m²

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 12.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12.3 & 0 & 0 \\ -5.4 & -5.4 & 15.8 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

강성행렬(stiffness matrix) [c] $\times 10^{-10}$ N/m²

$$\begin{bmatrix} 12.1 & 7.54 & 7.52 & 0 & 0 & 0 \\ & 12.1 & 7.52 & 0 & 0 & 0 \\ & & 11.1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 2.11 & 0 & 0 \\ & & & & 2.11 & 0 \\ & & & & & 2.26 \end{bmatrix}$$

밀도 $\rho = 7,750$ Kg/m³

3. 초음파 Linear Motor의 최적 구조설계

3.1. 초음파 Linear Motor의 구조설계

2장에서 설명한 이론과 원리를 이용하여 새로운 쌍방향 초음파 리니어 모터의 구조를 모델링 하였다. 위와 같은 원리로 진행파를 생성하기 위하여 그림 3에서 볼 수 있듯이 알루미늄 탄성체(b)를 중심으로 압전소자(a)를 분극방향이 반대가 되도록 교대로 배열하고 상하로도 위치 위상이 $\lambda/4$ 의 차이가 나게 압전소자를 배열하였다. 또한 탄성체는 이동체에 힘을 전달하기 위하여 이빨(teeth) 구조와 비슷하게 하였고, 탄성체의 양끝인 경계면에 의해 진행파가 반사 되어오는 것을 막기 위해 감쇠재질인 실리콘 고무(c)를 넣어서 진행파가 완만하게 감쇠하여 상쇄되게 하였다. 경계조건은 실리콘 고무를 단순지지형태를 취하게 하였다. 그러므로, 여기서 감쇠층은 두 개의 정재파를 생성시키는 것에는 좋지 않지만 진행파의 에너지를 감쇠시켜 상쇄시키는 역할을 한다. 그리고 압전소자의 끝 부분에서 단순지지 경계면까지 탄성체의 재질로 $\lambda/8$ 을 두어

감쇠층까지 진행과가 잘 전달되게 설계하였다.

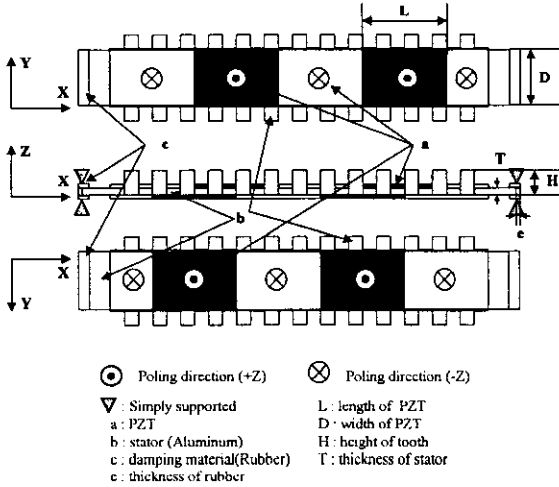


그림 3. 쌍방향 초음파 리니어 모터의 구조
Fig. 3. Structure of the bi-directional ultrasonic linear motor.

3. 2. 유한요소 해석

유한요소 해석은 앞에서 고안된 모델의 타당성을 검증하고, 구조의 최적화를 위해 유한요소법을 이용한 시뮬레이션[ANSYS 5.3]을 수행하였다. 모델을 구성하는 element 종류는 hexahedrons형 orthorhombic 소자를 사용하였으며, 총 431개의 element와 992개의 노드(node)로 형성되어 있다. 그리고, 구조체 양 끝단의 실리콘 고무부분을 단순히 지지 경계조건으로 구동부를 모델링 하였으며, 그림 4는 완성된 모델을 나타낸다.

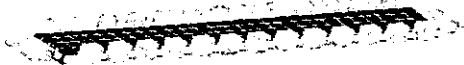


그림 4. 초음파 리니어 모터의 요소분할 형태
Fig. 4. Mesh configuration of the ultrasonic linear motor.

그림4의 모델에 대한 모델해석 결과 구조체의 공진주파수는 23.5kHz이었으며, 본 연구에서 고안한 구조에 굴곡 탄성파의 진행과가 원활히 생성되는가를 알아보기 위해 Transient 해석을 실시하였다. 유한요소법의 모달해석으로 구해진 공진주파수를 이용하여 Transient 해석을 그림 5와 같이 한 주기를 20구간으로 나누고 1.5주기에 대하여 관찰하였으며, 이 때 각 구간별 시간과 인가전압의 크기는 식(13), (14)에 의해 결정되며, 그림 6은 7번째

와 11째 구간에서 변형상태를 보이고 있다.

$$t(i) = \frac{1}{fN} i \quad (13)$$

$$V_A(i) = V_{p-p} \sin\left(\frac{2\pi}{N} i\right) \quad (14)$$

$$V_B(i) = V_{p-p} \sin\left(\frac{2\pi}{N} i \pm \frac{\pi}{2}\right)$$

여기서, t, V, V_{p-p}, N 은 각각 시간, 전압, 피크 전압, 한 주기 동안의 구간 수이며, i 는 0, 1, 2, 3, ..., N , ..., ∞ 이다. 그림6에서 진행과는 오른쪽 방향으로 진행하는 것을 알 수 있고, 이빨구조의 한점 P는 진행과의 반대방향으로 움직이는 것을 알 수 있다. 이것은 이론적인 원리와 잘 일치하며, 구조의 상단에 물체를 놓으면 진행과와 반대 방향으로 움직일 수 있음을 단편적으로 보여주고 있다.

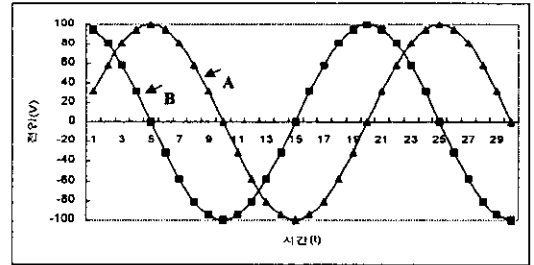


그림 5. Transient 해석에서의 step point
Fig. 5. Step point of transient analysis.

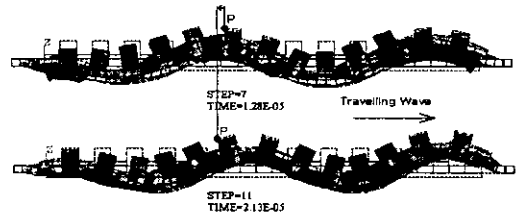


그림 6. Transient 해석 결과
Fig. 6. Result of the transient analysis.

따라서 본 연구에서 제안한 모터의 구조가 진행과를 발생시킬 수 있음을 Transient 해석을 통하여 확인하였다. 다음으로는 쌍방향 초음파 리니어 모터가 안정된 진행과를 생성하기 위한 모터의 최적 구조를 설정하고자 한다. 즉, 구동 주파수, 압전체 두께, 알루미늄 두께, 감쇠층 두께 등을 설계변수로 설정하고, 실제 제작성과 유한요소법으로 시뮬레이션 한 결과로부터 다음과 같이 설계변수들의 값을 설정하였다. 구동주파수는 구동시 모터의 저소음 특성을 고려하고, 제작상의 편의를 위해 구

동주파수를 가청주파수보다 높은 23.5kHz로 설정하였다. 그리고, PZT5A의 두께는 클수록 구동력은 크겠지만 인가전압을 생성하는 구동회로 면에서는 아주 큰 트랜스를 필요로 하고, 두께가 적을수록 인가전압에 대한 트랜스의 제작은 편리하나 구동력은 아주 낮을 것이다. 따라서 구동 전압 및 변압기의 제작을 고려하여 PZT5A의 두께를 0.5mm로 결정하였고, 구동주파수를 23.5kHz로 하기 위해 그림 7에서 알루미늄의 두께를 1.0mm로 결정하였다.

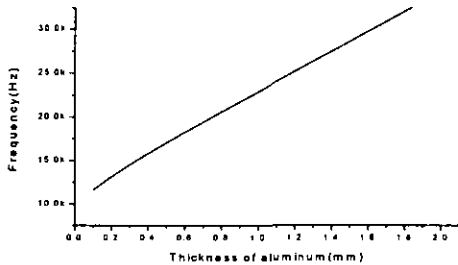


그림 7. 알루미늄판 두께 변화에 대한 공진주파수 변화

Fig. 7. Variation of the resonant frequency in relation to thickness of the aluminum plate.

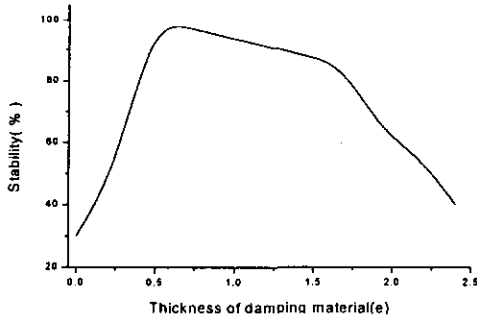


그림 8. 감쇠층의 두께에 대한 진행파의 안정성 변화

Fig. 8. Variation of the stability of the travelling wave in relation to damping material thickness.

또한 감쇠층 두께(e)의 변화에 따라 진행파의 안정성이 변화하는 것을 그림 8에 나타내었다. 여기서 안정성이란 생성된 진행파에 왜곡이 적게 발생하는 정도를 뜻하는 것으로서, 가장 안정된 상태는 스테이터 전역에 걸쳐 설계한 중심주파수 23.5kHz를 정확히 유지하는 상태이며, 왜곡이 심할수록 스테이터의 끝단에서 진행파의 중심주파수가 틀어지게

된다. 따라서 그림 8의 안정성은 다음 식(15)에 의해 평가한 값이다.

$$\text{Stability}(\%) = \frac{\lambda_{\text{travelling}}}{\lambda_{\text{standard}}} \times 100 \quad (15)$$

여기서, $\lambda_{\text{travelling}}$ 은 스테이터의 끝단에서의 진행파의 파장이고, $\lambda_{\text{standard}}$ 는 23.5kHz에서의 파장이다. 감쇠층의 두께는 그림 8에서 알 수 있는 것처럼 안정성이 가장 우수한 0.5mm로 선정하였다. 이상은 본 논문에서 설정한 값이고, 주어진 경계조건, 압전소자와 알루미늄 및 감쇠층의 두께에 따라 공진주파수와 파장의 형태가 달라질 것이다.

속도특성은 앞 절의 결과인 여러 가지의 설계변수를 이용하여 모터의 구조를 모델링하고, 여기에 이상적인 환경에서 인가되는 전압에 대한 속도 변화를 시뮬레이션한 결과를 표1과 그림9에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 인가전압에 비례한 속도 특성을 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 그림에서 알 수 있는 것처럼 인가전압의 크기로서 쉽게 모터의 속도제어가 가능하다는 것을 알 수 있다

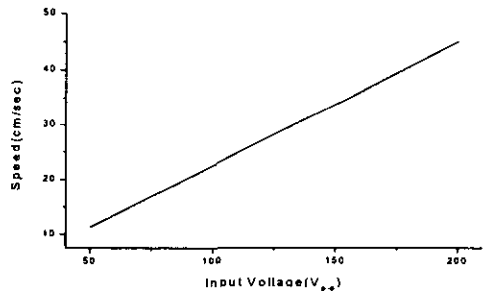


그림 9. 입력전압에 대한 속도 변화

Fig. 9. Variation of the speed in relation to input voltage.

표 1. 입력전압에 대한 속도 변화

Table 1. Variation of the speed in relation to input voltage.

Input voltage (V _{rms})	Speed (cm/sec)
50	11.25
100	22.50
150	33.75
200	45.00

3. 3. 초음파 Linear Motor의 최적구조

이상의 시뮬레이션 결과를 이용하여 그림 3에서

와 같이 알루미늄 탄성체 하단에 압전소자를 분극 방향이 +Z, -Z 방향으로 엇갈리게 하여 순서대로 접착하였다. 다음으로 탄성체의 위 부분에는 전자의 분극방향순서와 반대로 하여, 부착위치는 아래 배열과 위치 위상이 $\lambda/4$ 의 차이를 가지도록 배열하였다. 그림 10은 설계된 모터의 최적구조로서 실제로 제작할 수 있는 구조이다. 그리고, 유한요소법의 경계조건을 만족하게 실리콘 고무를 단순지지 형태로 하여 알루미늄지지 케이스에 고정하였다.

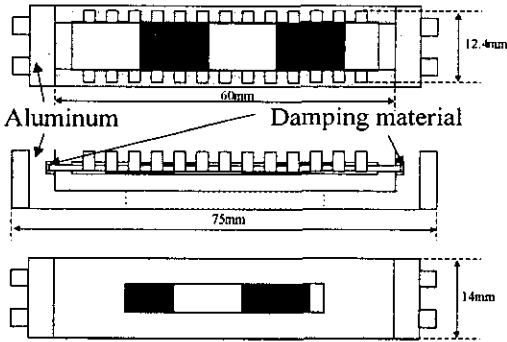


그림 10. 설계된 초음파 모터의 최적 구조
Fig. 10. The designed optimum structure of the ultrasonic motor.

4. 결 론

본 연구에서는 압전세라믹스를 다층구조로 부착하고, 고주파 고전압을 인가하여 진행파를 생성하고, 이것이 간섭을 받지 않는 안정된 구조의 새로운 초음파 리니어 모터를 고안, 설계하였다. 이 구조에 대한 타당성은 유한요소법을 통하여 검증하였고, 모터 구조의 변화에 따른 특성변화를 조사함으로써 실제 제작 시 필요한 변수 값을 얻을 수 있도록 하였다. 그리고 인가전압에 대한 속도특성이 선형적임으로 인가전압의 크기로 초음파 모터의 속도제어가 가능함을 보여주었다. 향후, 본 연구의 결과를 토대로 실제로 초음파 모터를 설계 제작하고, 구동 조건에 맞는 회로를 설계 제작하여 실현 가능성과 구동주파수와 인가전압 및 부하질량에 대한 모터의 성능과 효율을 평가할 것이다.

본 모터의 이용 및 응용 분야로는 기존의 권선형 모터에 비해 부피가 협소하게 작으므로 설치공간을 적게 하기 위한 시스템인 프린터 용지 리더나 현재 많이 이용되는 신용카드 및 전화카드 등과 같은 카드 리더기에 사용할 수 있으며, 응답속도가 빠르고 정확성을 이용한 탐침 및 플레이트 미소위치 제어에 사용할 수 있을 것으로 생각되어진다. 또한, 단순구조로서 직선 운동을 하므로 기

존의 액추에이터를 대용할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 1999학년도 대구대학교 학술연구비 지원(혹은 일부지원)에 의한 논문임

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", 일본음향학회지, 43권, 3호, pp.184-188, 1987.
- [4]. "大トルクで底速回転する表面波モーター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, Vol. 39, pp.402-406, 1993.
- [7]. L. Petit, R. Briot, L. Lebrun, P. Gonnard, "A Piezomotor Using Longitudinal Actuators", IEEE Tran. on Ultra. Ferro. & Freq. control, Vol. 45, pp.277-283, 1998.
- [8]. H. Siyuan, Ch. Weishan, T. Xie, Ch. Zaili, "Standing Wave Bi-directional Linearly Moving Ultrasonic Motor", IEEE Tran. on Ultra. Ferro. & Freq. control, Vol. 45, pp.1133-1139, 1998.
- [9]. O. B. Wilson, "Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers", Peninsula Publishing Los Altos USA, 1988.