한국음향학회지 제20권 제8호 pp. 38~43 (2001)

정재파형 초음파 리니어 모터에 관한 연구

A Study on Standing Wave Type Ultrasonic Linear Motors

권 재 화*, 이 수 성*, 강 국 진*, 노 용 래**
(Jaehwa Kwon*, Susung Lee*, Kukjin Kang*, Yongrae Roh**)

*경북대학교 센서공학과, **경북대학교 기계공학부

(접수일자: 2001년 9월 14일; 채택일자: 2001년 10월 11일)

본 연구에서는 정재파를 이용하여 양방향 구동이 가능한 새로운 형태의 초음파 리니어 모터를 개발하였다. 이론적으로 모터의 작동 구조를 도출한 다음, 유한요소법을 이용하여 모터의 구체적인 구조를 설계하였다. 위 결과를 바탕으로 초음파 리니어 모터 시험편과 구동회로를 제작하여 구동실험을 행함으로써, 본 연구에서 제안한 새로운 구조의 타당성을 확인하였다.

핵심용어: 초음파 모터, 리니어 모터, 정재파, 유한요소법, 양방향성
투고분야: 초음파 및 탄성파 분야 (4.2)

We developed a new standing wave type ultrasonic linear motor that can be driven bi-directionally. The operation principle of the motor was derived in an analytical form, and the detailed structure was designed by the finite element method. Based on the design, a motor sample and a driving circuit were fabricated, and validity of the structure was verified through experiments.

Keywords: *Ultrasonic motor, Linear motor, Standing wave, FEM, Bi-directional*
ASK subject classification: *Ultrasonic and elastic waves (4.2)*

I. 서 론

초음파 모터는 구조가 단순하고, 소형, 경량이며, 빠른 응답성과 저속회전에서 높은 토크를 가지고, 소음을 거의 무시할 수 있다. 또한 속도제어를 단순한 알고리즘으로 쉽게 구현할 수 있고, 강한 자기장과 전기장에도 영향을 받지 않는 등 많은 장점을 가지고 있기 때문에 로봇팔의 액추에이터나 정밀위치제어 등 여러 분야에서 활용되고 있다[1,2].

현재 사용 중인 초음파 모터는 회전형인 로터리 모터가 주종을 이루고 있으며, 직선형인 리니어 모터는 아직 초보적인 단계에 있다[3]. 현재 개발된 리니어 초음파 모터로는 진행파형 리니어 모터[4-6], 하이브리드 트랜스듀서형[7-8], 멀티모드 진동자를 이용한 것[9-10] 등이 있다. 진행파를 이용한 것과 하이브리드형은 모두 두 성분의 압전체로 이루어져 위상이 서로 다른 두 개의 정재파로 진행파를 생성시키거나, 타원운동을 발생시킨다. 그러나, 진행파의 경우, 유한한 길이의 스테이터에서 순수한 진행파의 생성이 어렵고, 효율이 낮은 단점이 있으며[7], 하이브리드형은 구조와 구동이 복잡하기 때문에 활용하기가 어렵다. 멀티모드 진동자형은 이에 비해 구조나 구동이 좀 더 간단하나, 굴곡모드와 종방향모드가 동시에 존재해야 하기 때문에, 이 두 모드의 고유주파수를 일치시켜야 하는 정확한 설계가 필요하므로 적용에 제한이 따른다.

또한 기존에 개발된 정재파를 이용하는 양방향 구동 모터로는 두 개의 서로 다른 진동 모드 (B4 모드와 B5 모드)를 이용하여 양방향 구동이 가능하도록 한 것이 있다[11]. 이 모터는 비교적 단순한 구조를 가지고 있으나, 구동 방향별로 다른 진동 모드를 이용하므로 구동 주파수가 달라지고, 따라서 속도와 추력 특성이 크게 달라지므로,

책임저자: 권재화 (jhkwon@ultrasound.knu.ac.kr)
702-010 대구광역시 북구 산격동 1370
경북대학교 대학원 센서공학과
(전화: 053-943-8716 ; 팩스: 053-950-6827)

구동 방향에 따라 동일한 특성을 얻기가 어렵다.

본 연구에서는 이상의 문제점들을 해결할 수 있도록 하나의 스테이터 상하부에 두 층의 압전체를 부착하고 두 압전체를 동시에 구동하여 정재파를 생성하는 새로운 구조로, 동일한 특성으로 양방향 구동이 가능한 초음파 리니어 모터를 개발하였다. 본 연구에서 제안하는 초음파 리니어 모터의 타당성을 유한요소법으로 검증하고, 이에 따라 모터를 설계, 제작하고, 전용 구동회로에 의한 구동실험을 하였다. 구동실험의 결과로 본 연구에서 제안한 새로운 구조의 초음파 리니어 모터의 타당성을 확인하였다.

II. 정재파형 초음파 모터의 구동원리

본 연구에서 제시하는 정재파형 초음파 리니어 모터의 구조는 그림 1과 같다. 이 모터의 구조는 금속 스테이터의 상하부에 각각 분극된 압전소자를 분극방향이 서로 반대가 되도록 교대로 부착하는데, 하부 소자는 상부 소자와 $\lambda/4$의 위치위상차를 두고 부착한다. 또한, 동위상과 180° 위상차를 갖는 두 종류의 고주파 고전압 신호를 스테이터 상, 하부에 부착된 압전소자에 각각 인가한다. 그러면, 상부 압전소자에 의해 발생하는 정재파와 하부 압전소자에 의해 발생하는 정재파가 서로 합성이 되어 새로운 정재파가 발생하는데, 상부와 하부 소자 사이의 인가전압의 위상차가 동위상일 때와 역위상일 때, 각각의 정재파에 의해 합성되는 정재파의 node점이 이동하게 된다. 이 node점이 이동하는 경로상에 이빨을 위치시키면, 그 이빨의 운동 방향이 node점의 이동에 따라 변하게 되는 것이다.

이와 같은 동작을 자세히 살펴보면, 그림 2에서 스테이터 표면에 수직하게 부착된 한 이빨 위의 임의의 점 P에서 P'로 변위할 때 Y방향의 변위를 y, X 방향의 변위를 x, 그리고 굴곡각을 θ라 하면 굴곡 탄성파의 식은 다음과 같이 나타난다.

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

여기서, ξ_0, λ, t, ω는 각각 초기 진폭, 파장, 시간, 각주파수이다. 이빨 끝의 한 점 x_1에서 Y 방향의 변위는 다음과 같고,

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

X방향 변위는 이빨의 길이를 T_n, 굴곡각를 $\theta(x_1)$라고 하면, 다음과 같다.

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

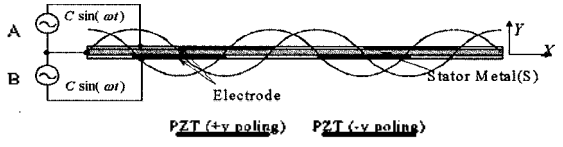
또한, 굴곡각 $\theta(x_1)$은 정재파의 접선의 기울기와 같다.

$$\theta(x_1) = \frac{dy}{dx}\Big|_{x=x_1} = \frac{2\pi}{\lambda} \xi_0 \cdot \cos(\frac{2\pi}{\lambda} x_1) \cdot \sin(\omega t) \quad (4)$$

따라서, X방향 변위는 다음과 같다.

$$x(x_1) = T_n \cdot \theta(x_1) =$$
$$-T_n \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \xi_0 \cos(\frac{2\pi}{\lambda} x_1) \cdot \sin(\omega t) \quad (5)$$

위 식 (2)와 식 (5)에서 나타낸 변위가 스테이터 상부 소자에 의해 발생하는 정재파에 의한 변위라면, 스테이터의 하부에도 이와 같은 정재파를 생성시킬 수 있는데, 상부에 대해 $\lambda/4$의 위치위상차를 가지고, 0°, 180°의 시간 위상차를 가지는 전압을 인가하면, 스테이터의 상, 하



(a) 상부와 하부의 압전소자에 동위상의 교류전압을 인가할 때

(b) 상부와 하부의 압전소자에 역위상의 교류전압을 인가할 때

그림 1. 초음파 리니어 모터의 구조와 원리
Fig. 1. Structure and principle of the ultrasonic linear motor.

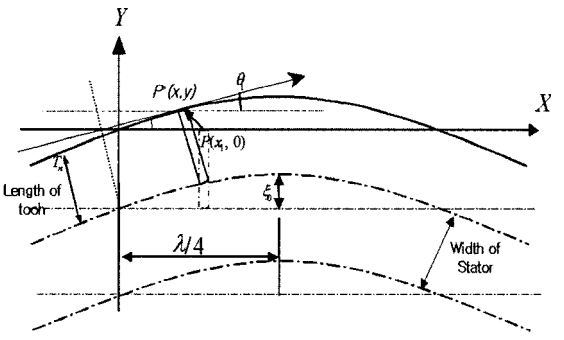


그림 2. 스테이터 상의 한 점에서의 운동원리
Fig. 2. Deformantion of a point at the stator.

부에 각각 전압신호에 대응하는 2개의 정재파가 생성된다. 이들 정재파가 스테이터에서 서로 합성되어 새로운 정재파가 발생된다.

즉, 스테이터 상부의 압전소자를 A, 스테이터 하부의 압전소자를 B라고 하면, 상, 하부 압전소자에 가해지는 전기신호가 동위상 일 때 A에 의한 X방향의 변위 x와 Y 방향의 변위 y는 각각 다음과 같다.

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

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

마찬가지로 B에 의한 변위는 다음과 같이 나타난다.

$$x_B(x_1) = -T_n \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \xi_0 \cos(\frac{2\pi}{\lambda} x_1 + 90^\circ) \cdot \sin(\omega t)$$
$$= T_n \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \xi_0 \sin(\frac{2\pi}{\lambda} x_1) \cdot \sin(\omega t) \quad (8)$$

$$y_B(x_1) = \xi_0 \cos(\frac{2\pi}{\lambda} x) \cdot \sin(\omega t) \quad (9)$$

따라서, 두 정재파에 의해 합성된 변위는 다음과 같다.

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

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

한편, 상, 하부 압전소자에 가해지는 전기신호 사이에 180° 위상차 (역위상)가 있을 때를 보면, A에 의한 변위는 식 (6), (7)과 같고, B에 의한 변위는

$$x_B(x_1) = -T_n \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \xi_0 \cos(\frac{2\pi}{\lambda} x_1 + 90^\circ) \cdot \sin(\omega t + 180)$$
$$= -T_n \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \xi_0 \sin(\frac{2\pi}{\lambda} x_1) \cdot \sin(\omega t) \quad (12)$$

$$y_B(x_1) = -\xi_0 \cos(\frac{2\pi}{\lambda} x) \cdot \sin(\omega t) \quad (13)$$

이다. 이 두 정재파에 의해 합성된 변위는 다음과 같다.

$$x(x_1) = -T_n \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \xi_0 \sin(\omega t)\left\{\cos(\frac{2\pi}{\lambda} x_1) + \sin(\frac{2\pi}{\lambda} x_1)\right\} \quad (14)$$

$$y(x_1) = \xi_0 \sin(\omega t)\left\{\sin(\frac{2\pi}{\lambda} x_1) - \cos(\frac{2\pi}{\lambda} x_1)\right\} \quad (15)$$

식 (11)와 식 (15)에서 Y방향의 변위를 보면, 동위상일 때는 x_1이 $(\frac{n}{2} + \frac{3}{8})\lambda$; $n = 0, 1, 2\ldots$일 때 node가 되고, 역위상일 때는 x_1이 $(\frac{n}{2} + \frac{1}{8})\lambda$에서 node가 된다. 또한, 동위상일 때는 x_1이 $(\frac{n}{2} + \frac{1}{8})\lambda$에서 antinode가 되고, 역위상일 때는 x_1이 $(\frac{n}{2} + \frac{3}{8})\lambda$에서 antinode가 된다. 즉, 동위상일 때와 역위상일 때, 각각의 node와 antinode점이 서로 반대로 이동하는 것을 알 수 있다. 이 때 y의 최대 변위는 $\sqrt{2}\xi_0$가 된다. 한편, X방향에 대한 변위는 동위상일 때나 역위상일 때나 마찬가지로, Y방향의 변위가 node인 지점에서 최대 변위 $(\sqrt{2}T_n \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \xi_0)$를 가지고, antinode일 때 변위가 없는 것을 알 수 있다.

이상에서 볼 수 있듯이, Y방향의 변위가 동위상에서 node인 점과 역위상에서 node인 점 사이에서 X방향의 변위가 하부소자의 인가 전압의 위상이 바뀜에 따라 방향이 달라지는 것을 알 수 있고, 따라서 방향전환이 가능하게 된다. 즉, x_1이 $\frac{2n+1}{4}\lambda$와 $\frac{n+1}{2}\lambda$인 지점에서 양방향 구동이 가능하다. P점이 $\frac{2n+1}{4}\lambda$지점에 위치한다면 (↘)방향의 운동을 하게 되고, $\frac{n+1}{2}\lambda$지점에 위치한다면 (↗)방향의 운동을 하게 된다.

III. 정재파형 초음파 리니어 모터의 유한요소 해석

이상의 이론을 바탕으로 새로운 형태의 정재파형 초음파 리니어 모터 구조를 유한요소법을 이용하여 설계하였다. 앞의 그림 1과 같은 구조로 스테이터의 상하에 압전소자를 분극 방향이 서로 교대로 반대가 되고, 상, 하 소자의 위치 위상차가 $\lambda/4$가 되게 배열하여 부착하였다. 다음으로 스테이터에 부착되는 이빨은 정재파에 의해 발생하는 변위에 의해 모터 레일에 직접 마찰력을 발생시키는 부분으로서 앞절의 식에서 보았던 것과 같이 이빨 길이 T_n이 길면 길수록 X방향으로의 변위가 크므로, 되도록 길게 하였다. 이빨이 길면 스테이터에서 발생되어 레일로 전달되는 힘은 감소하겠지만, 큰 변위를 발생시켜 속도는 빨라진다. 압전 소자는 고출력에 적합한 PZT-4를 사용하여 $\lambda/2$ 크기로 분극 방향이 서로 반대가 되도록 교대로 총 4개를 부착하여 2파장 모드를 이용하도록 하되, 하부의 압전 소자에는 2파장 길이로, 상부와 $\lambda/4$의 위치 위상차를 두기 위해 양끝에는 $\lambda/4$ 크기의 압전소자를 부착하였다. 이빨의 위치는 앞절의 수식에서 보였

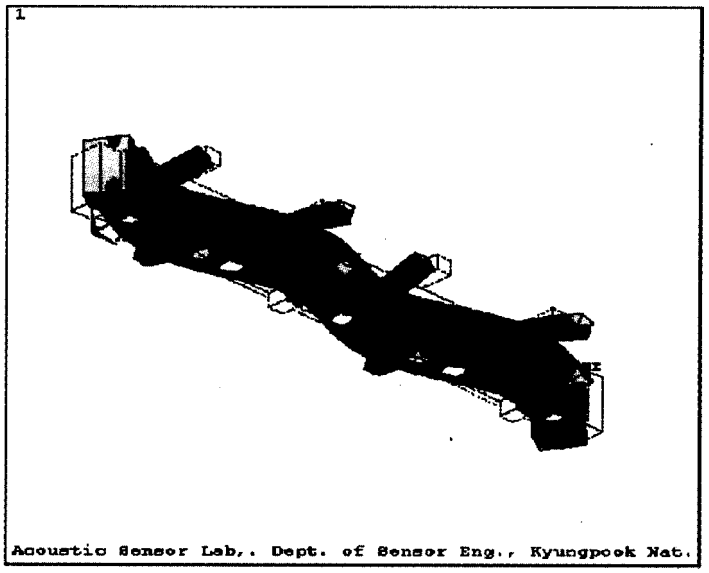


그림 3. Modal 해석 결과
Fig. 3. Result of the modal analysis.

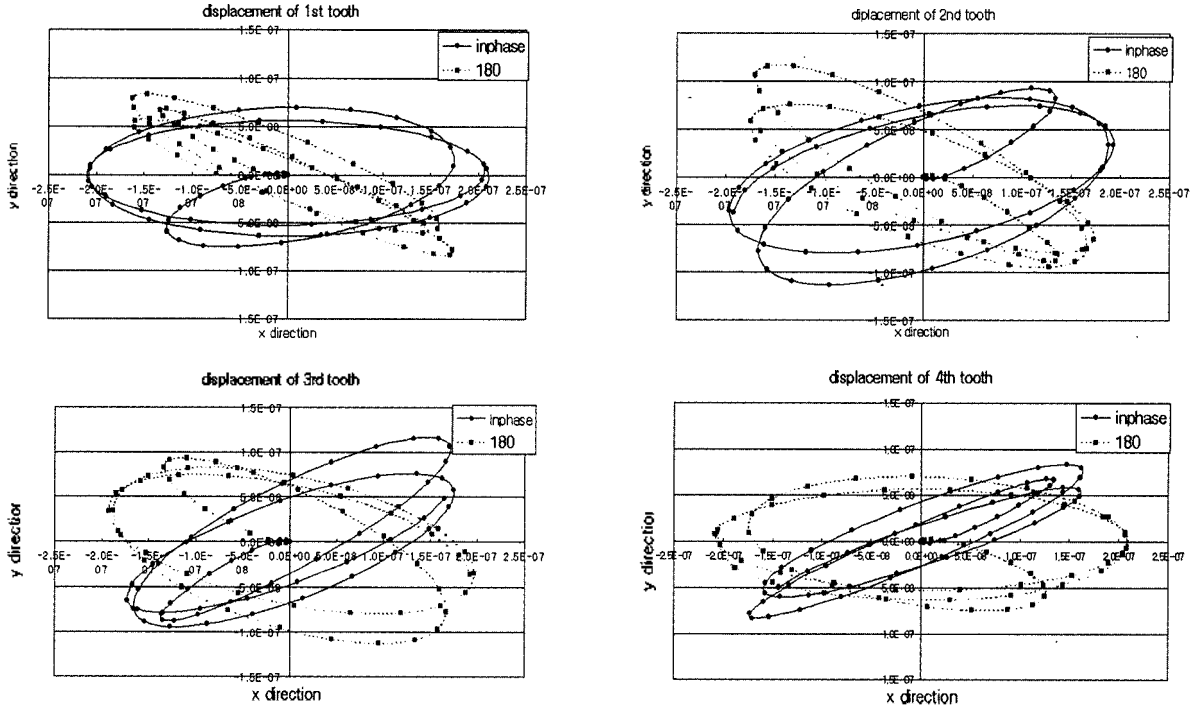


그림 4. Transient 해석 결과 각 이빨의 변위
Fig. 4. Deformation of each tooth from the transient analysis.

던 것과 같이 $x_1 = \frac{n+1}{2}\lambda$의 위치가 상부 소자의 연결면에 오게 하였다.

고안된 구조의 타당성을 유한 요소법을 이용하여 검증하여 보았다. 해석은 유한요소 상용 해석도구인 ANSYS를 이용하였고, 모델은 총 7,860개의 요소와 10,480개의 노드로 구성되었다. 이 모델를 이용한 모달 (modal) 해석을 통해 그림 3과 같이 27.7 kHz의 공진주파수를 찾았다.

본 연구에서 제안한 구조에서 원활한 정재파의 생성과, 각 이빨에서 양방향성을 확인하기 위하여, 이 공진주파수에서 상, 하부 압전 소자에 인가되는 전기신호가 동위상일 경우와 역위상일 경우에 대해서 각각 과도해석을 통하여 각 이빨에서의 변위를 관찰하였다. 그림 4에 보이는 것과 같이, 각 이빨들은 동위상과 역위상일 때 서로 진행방향이 다른 양방향성을 가지는 것을 알 수 있다.

그림 5. 제작된 초음파 리니어 모터
Fig. 5. Fabricated ultrasonic linear motor.

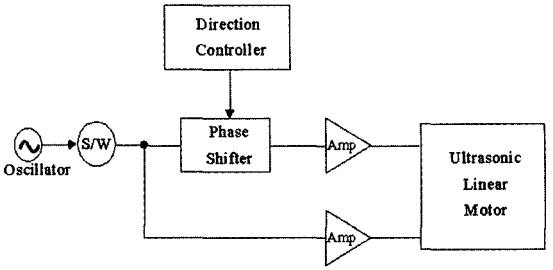


그림 6. 구동회로의 개략도
Fig. 6. Block diagram of the driving circuit.

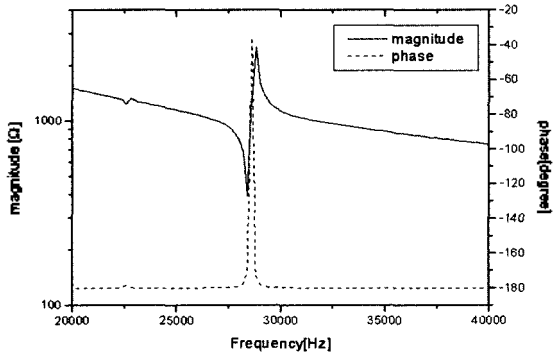


그림 7. 제작된 초음파 모터의 임피던스 특성
Fig. 7. Impedance spectrum of the fabricated motor.

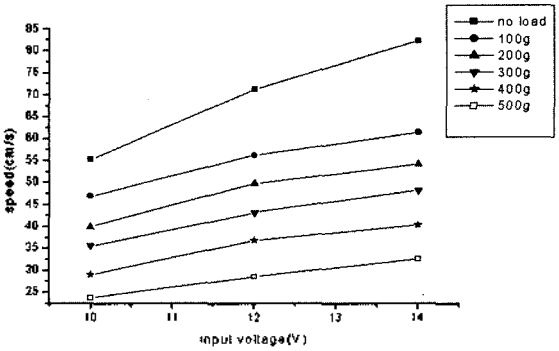


그림 8. 부하 질량과 인가 전압에 따른 속도 변화
Fig. 8. Variation of the speed in relation to load masses and input voltages.

IV. 초음파 모터의 제작 및 구동실험

이상의 설계 결과에 따라 모터 시험편을 제작하였으며, 그림 5는 제작한 모터의 사진이다. 그림 6은 구동회로의 개략도인데, 전·후 구동이 가능하도록 방향제어기를 이용하였고, 발진기에서 나오는 교류 신호의 위상을 위상지연기를 통해 조절할 수 있도록 하였다. 또한, 구동할 때 고전압을 필요로 하기 때문에 변압기를 이용하여 증폭하였다.

그림 7은 제작된 모터의 임피던스 특성으로 28.6 kHz의 공진주파수를 가진다. 따라서, 제작된 모터는 설계사양이 충분히 반영되었으며, 실제로 이 주파수에서 가장 빠르게 양방향으로 구동되었다. 모터의 성능평가를 위해 모터에 인가되는 부하 질량과 인가되는 전압에 따른 속도와 추력을 측정하였다. 그림 8은 모터의 속도 측정결과인데, 속도는 입력전압이 높을수록 증가하고, 부하 질량이 증가할수록 낮아지는 것을 알 수 있다. 이 모터는 부하질량이 없을 때, 14V에서 가장 빠른 속도를 보였으며, 그때의 속도는 82.4 cm/s였다.

다음으로 모터의 추력을 측정한 결과는 그림 9와 같이 입력 전압이 클수록, 부하 질량이 클수록 모터의 추력도 증가하였다. 추력은 입력전압 14V, 부하질량 500g일 때 0.46N으로 측정되었다. 이 결과에서 제작된 모터는 부하질량이 클수록 발생 추력도 증가하나, 속도는 반대로 감소하는 경향을 보이는데, 저속에서 큰 출력을 가지는 초음파 모터의 공통적인 특성임을 확인할 수 있다.

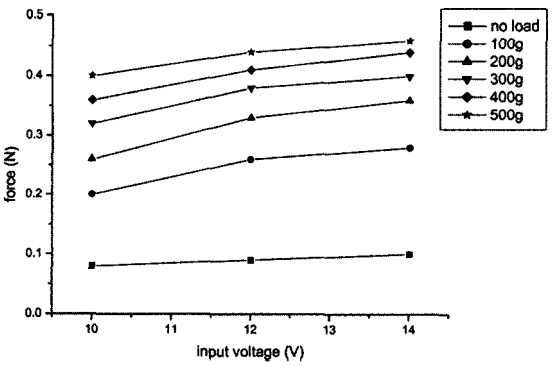


그림 9. 부하 질량과 인가 전압에 따른 추력 변화.
Fig. 9. Variation of the force in relation to load masses and input voltages.

V. 결 론

본 연구에서는 성능이 향상된 정재파형 초음파 리니어 모터의 새로운 구조를 제시하였고, 제시한 모터 구조의 타당성을 유한요소해석과 실험을 통해 검증하였다. 설계 결과에 따라 제작된 모터 시험편은 구동실험결과 인가전압 14V에서 82.4 cm/s의 최고 속도를 가지고 양방향으로 구동되었으며, 인가전압 14V에서 500g의 부하질량을 주었을 때 0.46N의 추력을 가졌고, 저속에서 큰 추력을 가지므로 본 연구에서 제안한 양방향 초음파 모터의 구조의 타당성을 확인할 수 있었다.

본 모터는 기존의 권선형 모터의 단점을 보완하여 정밀한 위치제어가 필요한 곳이나 단순한 구조로 직선운동을 필요로 하는 곳에 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2001-00367)지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. K. Uchino, *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors*, Kluwer Academic Publishers Boston, London, 1997.
2. T. Sashida, and T. Kenjo, *An Introduction to Ultrasonic Motors*, Oxford, Clarendon Press, 1993.
3. T. Hemsel, and J. Wallaschek, "Survey of the present state of the art of piezoelectric linear motors," *Ultrasonics*, **38**, pp. 37-40, 2000.
4. M. Kuribayashi, S. Ueha, and E. Mori, "Excitation conditions of flexural traveling waves for a reversible ultrasonic linear motor," *J. Acoust. Soc. Am.*, **77**(4), pp. 1431-1435, 1985.
5. M. Nagai, N. Endo, and T. Yamada, "Fundamental characteristic of linear ultrasonic motor driven by traveling wave," *IEEE Int.* Workshop Intell. Mot. Contr. 1990.
6. Y. R. Roh, S. S. Lee and W. S. Ha, "Design and fabrication of a new traveling wave-type ultrasonic linear motor," *Sensors and Actuators A*, **94**(3), pp. 205-210, 2001.
7. K. Nakamura, M. Kurosawa, and S. Ueha, "Characteristics of a hybrid transducer-type ultrasonic motore," *IEEE Trans. Ultrason.*, Ferroelect., Freq. Contr., **38**(3), pp. 188-193, 1991.
8. M. Kurosawa and S. Ueha, "Hybrid transducer type ultrasonuc motor," *IEEE Trans. Ultrason.*, Ferroelect., Freq. Contr., **38**(2), pp. 89-92, 1991.
9. B. Zhai, S. Piang, K. H. Lee, S. Dong, and P. Lu, "A modified linear motor," *Sensors and Actuators A*, **86**, pp. 154-158, 2000.
10. T. Takano, Y. Tomikawa, M. Yaginuma, and T. Ogasawara, "A linearly moving ultrasonic motor using a longitudinal and bending multi-mode vibrator," *IEEE 7th Int. Symp. App. Ferro.*, pp. 521-524, 1991.
11. S. He, W. Chen, X. Tao, and Z. Chen, "Standing Wave Bi-directional Linearly Moving Ultrasonic Motor," *IEEE Trans. Ultrason.*, Ferroelect., Freq. Contr., 45(5), pp. 1133-1138, 1998.

저자 약력

● 권 재 화 (Jaehwa Kwon)
1999년 8월: 경북대학교 천문대기과학과 (이학사)
2000년 8월~현재: 경북대학교 센서공학과 석사과정
※ 주관심분야: 초음파 모터, 초음파 트랜스듀서

● 이 수 성 (Susung Lee)
1999년 2월: 인제대학교 의용공학과 (공학사)
2001년 2월: 경북대학교 센서공학과 (공학석사)
2001년 3월~현재: 경북대학교 센서공학과 박사과정
※ 주관심분야: 초음파 트랜스듀서, 의료용 초음파

● 강 국 진 (Kukjin Kang)
1998년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
2000년 2월: 경북대학교 센서공학과 (공학석사)
2000년 3월~현재: 경북대학교 센서공학과 박사과정
※ 주관심분야: 초음파 트랜스듀서, 수중음향센서

● 노 용 래 (Yongrae Roh)
한국음향학회지 제20권 제4호 참조