

압전세라믹을 이용한 초음파 리니어 모터의 특성연구

최명일, 정동석, 정현호, 이재형, 박태곤

창원대학교 전기공학과

A Study on the Characteristics of Ultrasonic Linear Motor Using Piezoelectric Ceramics

Myeong-Il Choi, Dong-Seok Jeong, Hyon-Ho Chong, Jae-Hyung Lee, and Tae-Gone Park

Dept. of Electrical Eng., Changwon National Univ.

Abstract

Transducer for ultrasonic linear motor with the symmetric and anti-symmetric modes was studied. The ultrasonic linear motor consists of two Langevin type piezoelectric vibrators that cross at right angles with each other in tip. In order to excite symmetric and anti-symmetric modes, the transducer must have a phase shift of 90 degree in space and time. Therefore, the tip of transducer moves on an elliptical motion. In this paper, the finite element analysis was used to optimize dimension and displacement of the transducer. The ultrasonic motor was fabricated using the simulated result and the driving characteristics were measured. No-load velocity was 0.28[m/s] and the maximum efficiency was 30[%] in resonance frequency.

Key Words : Ultrasonic linear motor, Piezoelectric Ceramics, Langevin vibrator, ANSYS

1. 서 론

압전세라믹의 신속한 발전에 따라 압전 액추에이터는 매우 빠른 속도로 발전하고 있다. 압전 액추에이터의 많은 장점을 계승한 초음파 모터는 기존의 전자기 모터의 메커니즘과는 전혀 다르게 초음파 대역의 탄성진동을 구동원으로 하고, 진동에 왕복운동을 마찰력으로 하여 회전운동 또는 직선운동을 발생시킨다.

이러한 초음파 모터는 전자기식 모터에 비하여 소형, 경량이고, 구조가 간단하고 수하특성에서 응답성이 좋고, 저속에서 높은 토크를 발생한다. 반면에 초음파 전원이 필요하고 마찰에 의한 고정자와 회전자의 마모가 발생한다는 단점도 가지고 있다. 초음파 리니어 모터는 정밀 위치제어가 [μm] 단위까지 되는 장점을 이용하여 반도체 제조 및 정밀선반 장비에 필요한 X-Y 스테이지용 리니어 모터로서 응용될 수 있다. 특히, 초음파 전자파가 전혀 없는 장점을 이용하여 전자파에 예민한 좁은

공간용의 리니어 모터로서의 응용분야에 적용이 기대된다.[1-3]

본 연구에서는 초정밀제어 리니어 모터 개발을 위한 목적으로 2개의 란쥬반형 압전 세라믹으로 구성된 초음파 리니어 모터에 대해 연구하였다.[4,5] 이 초음파 리니어 모터를 최적설계를 하기 위하여 공진모드에서의 타원진동을 주로 해석하였다. 초음파 모터의 유한요소해석은 주로 공진주파수와 공진모드에 따른 변위량 해석 및 모델설계에 유용하게 이용되고 있다. 유한요소해석 프로그램은 ANSYS 5.5를 사용하였다.[6-10]

2. 구동원리와 설계

그림 1은 초음파 리니어 모터의 기본구성을 나타내고 있다. 두계방향으로 분극 되어진 압전 세라믹과 알루미늄이 볼트에 의해 결합된 2개의 란쥬반형 진동자가 팁(tip) 부분에서 서로 직각으로 구성된다. 각각의 란쥬반형 진동자의 압전 세라믹에

교류전압을 인가하면, 란주반형 진동자는 각각 두께 방향으로 진동을 하게 된다. 압전소자의 진동은 알루미늄 탄성체에 전달되고 2개의 란주반형 진동자가 만나는 tip 부분에서 슬라이더를 이동시킨다.[4.5]

이 초음파 리니어 모터는 대칭, 비대칭 진동모드를 이용하는데, 두 란주반형 진동자가 서로 같은 구동전압의 위상에서 동작하면 tip 부분이 슬라이더의 법선방향으로 진동을 하는 모드를 대칭모드라 하고, 서로 다른 위상의 전압이 인가되는 경우에 슬라이더의 접선방향으로 굴곡 진동하는 모드를 비대칭모드라 한다.[4]

즉, 압전 세라믹에 90° 위상이 다른 전압(sin파, cos파)을 인가하게 되면 대칭, 비대칭모드가 합성된 결과로서 두 진동자가 만나는 tip부분에서 타원운동이 일어나게 되고, 이 타원운동에 의해 슬라이더가 구동하게 된다.[5]

그림 2는 두 진동모드가 합성된 tip에서의 타원궤적을 보이고 있다. 슬라이더의 접선방향의 성분이 클수록 슬라이더를 이동시키는 속도가 높은 것을 알 수 있다. 또한 여기서 궤적의 진폭을 조절하여 슬라이더의 이동속도를 제어 할 수 있음을 유추할 수 있다.[3] 이러한 이론을 바탕으로 하여 본 연구에서는 실제 리니어 모터에 적합한 타원궤적을 중점적으로 해석하였고, 궤적의 진폭을 조절하기 위하여 구동전압의 가변과 세라믹 적층 수 등의 조건 속에서 시뮬레이션을 실시하였다.

식 (1)과 (2)처럼 위상차 θ 를 갖는 2개의 sin파는 위상차 ϕ 일 때의 식 (3)의 궤적 방정식(trajectory equation)을 유도 할 수 있고, 타원운동이 발생함을 수식에서도 알 수 있다.

$$\Phi = \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

$$u_x = u_{x0} \sin \omega t \quad (2)$$

$$u_x = u_{x0} \sin(\omega t + \Phi) \quad (3)$$



그림 1. 초음파 리니어 모터의 구조.

Fig. 1. Structure of ultrasonic linear motor.

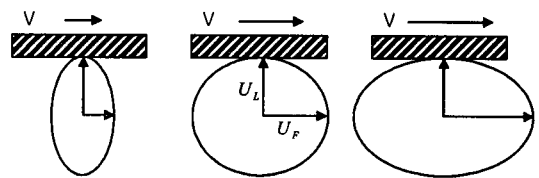


그림 2. 진동의 타원궤적.

Fig. 2. Elliptical trajectory of vibration.

3. 유한요소해석 및 실험

3.1 유한요소해석법에 의한 해석

모터의 진동해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 압전 소자는 SOLID5, 탄성체인 알루미늄은 SOLID45를 사용하여 3차원적으로 설계하였고, 요소분할은 mapped meshing을 하였다. 전압을 인가하지 않은 무부하 상태에서 공진주파수 해석(modal analysis)을 시행하였고, 이 공진주파수를 가진 교류전압을 인가하여 진동자의 정상상태해석(harmonic analysis)으로 변위량을 해석할 수 있었다. 경계조건은 free-free를 기본조건으로 하였다.[11-13]

그림 3은 유한요소해석을 통해 초음파 리니어 모터의 3차원 모델이다. 압전 세라믹에 100[Vpp]의 교류전압을 인가시 기본모델의 공진주파수 24.9[kHz]를 얻었다.

3.2 진동자의 제작 및 구동회로

압전세라믹을 이용한 초음파 리니어 모터의 진동자는 두께방향으로 분극된 압전세라믹을 탄성체인 알루미늄과 볼트로 결합하였고, 두 압전진동자는 직각으로 구성된다. 그림 4는 실제 제작한 고정

진동자의 사진이다. 초음파 모터는 서로 90°의 위상차를 갖는 sin파와 cos파를 압전세라믹에 각각 인가함으로써 타원변위가 발생하여 슬라이드를 구동시킨다. 따라서 Function generator에서 전기적인 신호를 발생시켜 sin파는 Power amplifier(NF 4011)로 증폭시키고, cos파는 Phase shifter를 거쳐 power amplifier(NF 4025)로 증폭하였다. 실험에 사용된 Phase shifter의 회로도는 그림 5에 나타내었다. 초음파 모터의 구동주파수가 주로 20~100[kHz]이므로 초음파 대에서 특성이 좋은 Op amp중 TL084CN을 사용하였고, R5와 C1값을 변환하면서 입력과 출력의 위상차를 90°로 변환하였다.

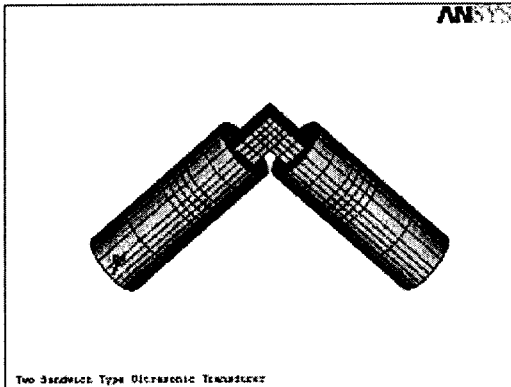


그림 3. 유한요소해석 모델.
Fig. 3. FEA model.

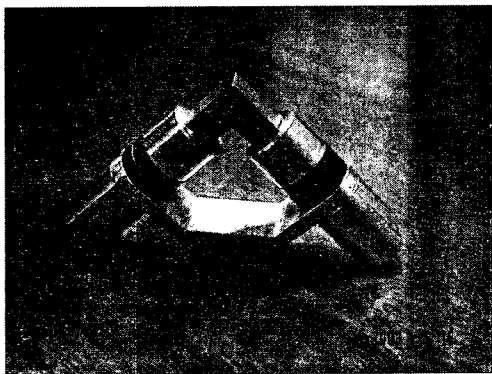


그림 4. 제작된 고정진동자의 사진.
Fig. 4. The photograph of stator vibrator.

3.3 특성 측정

속도 측정은 전압, 주파수, Preload를 가변하면서 측정하였다. 추력(thrust)은 슬라이드를 움직이는 힘이며, 로드 셀(load cell)을 사용하여 측정하였다. 전류측정은 AC current probe를 오실로스코프에 연결하여 측정하였다. 모터의 효율은 인가되는 공급 전력에 대한 슬라이드의 추력과 속도에 의한 출력의 비로 결정되는데, 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$P_i = V \times i \quad (4)$$

$$P_{out} = F_x \times v \quad (5)$$

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN} \times \cos \theta} \times 100 \quad (6)$$

여기서, V는 입력전압[Vrms], I는 입력전류[A], F_x는 추력[N], v는 속도[m/s]이고, η는 효율이다.

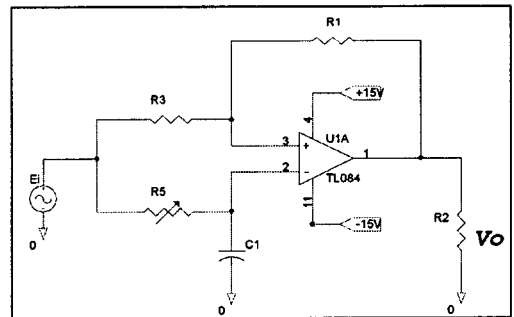


그림 5. 위상 변환기.
Fig. 5. phase shifter circuit.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 Preload의 변화에 의한 속도와 전류

그림 6은 인가전압 60[Vrms], 구동주파수 34.7[kHz]일 때 슬라이드의 이동속도 및 인가전류의 변화를 나타내고 있다. preload를 60~1010[gf]로 가변했을 경우에 60[gf]에서 속도는 0.23[m/s]로 최고의 속도였으며, 60[gf]이상으로 preload를 증가할수록 속도가 감소하였다. 그리고 전류는 preload

가 300[gf]에서 최대였다.

4.2 전압의 변화에 의한 속도와 전류

그림 7은 구동주파수 34.7 [kHz], preload 60[gf] 일 때, 45~80[Vrms]의 인가전압에 따른 속도와 전류변화를 나타내고 있다. 인가전압이 증가할수록 속도와 전류가 비례적으로 증가하였다. Power amplifier의 overload 방지를 위해서 인가전압의 최대한계는 80[Vrms]로 고정하였고, 이 때의 속도는 0.24[Vrms], 전류는 20.17[mA]이었다.

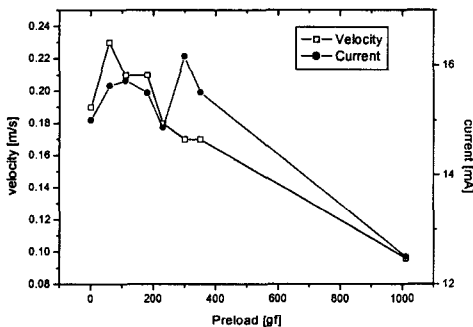


그림 6. Preload의 변화에 의한 속도와 전류.

Fig. 6. Velocity and current with the changes of preload.

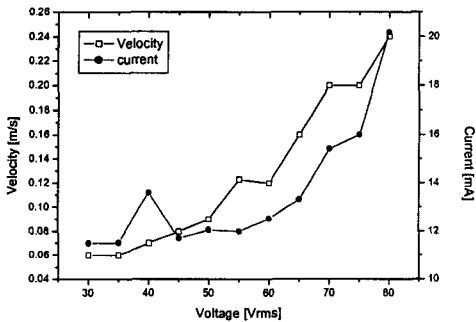


그림 7. 전압의 변화에 의한 속도와 전류.

Fig. 7. Velocity and current with changes of voltage.

4.3 구동주파수에 의한 속도와 전류

그림 8은 전압 60[Vrms], prelaod 60[gf]일때, 공진주파수 34.7[kHz]부근에서의 속도와 전류를 측정 한 결과이다. 공진주파수 부근에서 속도와 주파수

가 비례적임을 알수 있다. 이로써 초음파 리니어 모터의 공진주파수를 변화함으로써 슬라이더의 이동속도를 제어할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 33.7[kHz]에서는 슬라이더가 반대방향으로 이동하였다.

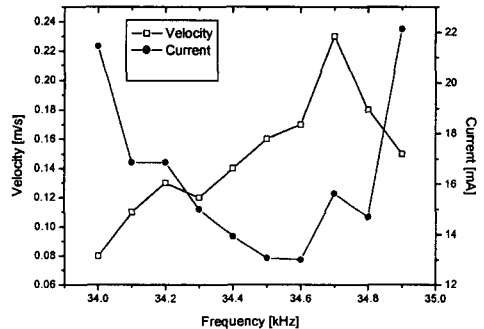


그림 8. 구동 주파수의 변화에 의한 속도와 전류.

Fig. 8. Velocity and current with the changes of driving frequency.

4. 결론

유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 압전세라믹을 이용한 초음파 리니어 모터를 시뮬레이션을 통해 최적설계를 하였고, 이를 바탕으로 고정진동자를 제작하고 실험을 하였다. ANSYS에 의한 공진주파수는 24.9[kHz]이었지만, 실제 제작한 모델을 실험한 결과의 구동주파수는 34.7[kHz]로써 약간의 차이가 있었다. 이는 모터의 제작이 불안정하여 생긴 차이라고 생각된다. 구동주파수 34.7 [kHz], 전압 80[Vrms], 전류 18.5[Vrms], 추력 0.107[kgf] 그리고 속도가 0.20[m/s]일 때, 최대효율은 30.09[%]였다. 본 논문에서 연구된 초음파 리니어 모터는 기존의 초음파 모터보다 효율과 추력이 우수하고, 반도체 제조 및 정밀선반 장비에 필요한 X-Y 스테이지용 리니어 모터로서 응용될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R05-2002-00927-0)지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] 박창엽, "전기전자용 압전세라믹스", 반도체출판사, p. 146-161, 1994.
- [2] Toshiiku Sashida, Takashi Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors", OXFORD, p. 1-24, 1993.
- [3] S. Ueha, Y. Tomikawa, "Ultrasonic Motors Theory and Application", OXFORD, p. 93-196, 1993.
- [4] Minoru Kuribayashi Kurosawa "Transducer for High Speed and Large Thrust Ultrasonic Linear motor Using Two sandwich-type Vibrators", IEEE, Vol. 45, No. 5, p. 1188-1998.
- [5] Kenhi Mori, Tomoko Kumagae, Hiromu Hirai, "Ultrasonic Linear Motor for a High Precision X-Y stage", IEEE Ultrason. Symp., p. 3-6, 1989.
- [6] 박민호, 김태열, 박태곤, 김명호, "관류반형 진동자의 유한요소해석 및 세라믹 적층특성 비교", 한국전기전자재료학회 2000하계학술대회 논문집, Vol. 1, No. 2, p. 415-418, 2000.
- [7] 김태열, 김범진, 박태곤, 김명호, "초음파 리니어 모터의 타원궤적 해석", 한국전기전자재료학회 2000하계학술대회논문집, Vol. 1, No. 2, p. 411-414, 2000.
- [8] 김태열, 김범진, 박태곤, 김명호, Kenjo Uchino, "L1-B4 샌드위치형 진동자를 이용한 선형 초음파 모터의 설계 및 특성", 전기전자재료학회 논문지, 제13권, 12호, p. 1025-1031, 2000.
- [9] 김범진, 정동석, 김태열, 박태곤, 김명호, Kenji Uchino, "L1-B4 모드 유니몰프형과 바이몰프형 진동자를 이용한 선형 초음파 모터의 특성", 전기학회논문지, 제50권, 9호, p. 427-433, 2000.
- [10] 손창현, "유한요소해석 입문과 선형해석", 태성에스엔이, p. 424-438, 1999
- [11] 박형진,m "ANSYS를 이용한 유한요소해석", 광문각, p. 306-309, 2001.
- [12] ANSYS 5.5 Manual