

대칭-비대칭 공진모드를 이용한 초음파 리니어 모터의 구동특성 연구

論 文
56-11-13

A Study on The Driving Characteristics of Ultrasonic Linear Motor Using Symmetric And Anti-Symmetric Resonance Modes

崔 明 日[†] · 裴 錫 銘^{*} · 朴 泰 坤^{**}
(Myeong-Il Choi · Seok-Myeong Bae · Tae-Gone Park)

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 resonance 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 : Piezoelectric ceramic, Langevin piezoelectric vibrator, Ultrasonic linear motor, Resonance Mode, Finite element analysis.

1. 서 론

전자기 모터에 비해 짧은 역사를 갖고 있음에도 불구하고 최근들어 IT분야에서 가장 큰 시장인 휴대전화에서 카메라용 초소형 압전 액추에이터의 필요성이 급격히 증가하는 것은 압전 세라믹의 압전 변압기 이후 새로운 기회임에는 의심할 여지가 없을 것이다. 압전 액추에이터에 대한 연구 개발은 1980년대에 들어서 Toshiiku Sashida, Kenjo Uchino 등 일본의 소수 연구자들에 의해 본격적으로 이루어졌으며 초음파 모터를 이미 '차세대 모터'로 선정하여 압전 변압기와 함께 그 연구와 개발이 매우 활발히 진행되고 있다. 국내에서는 그 필요성에 대한 인식이 크게 부족한 상황이며 연구 인력도 매우 부족한 편이나 최근 몇개의 벤처기업에서 초음파 모터가 일부 상용화 되었고, 카메라 제조업체인 한 대기업에서 자동초점용 렌즈구동장치로 초음파 리니어 모터를 양상하고 있는 정도이다.

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.[1-3]

이러한 초음파 모터는 전자기식 모터에 비하여 소형, 경량이고, 구조가 간단하고 저속에서 높은 토크를 발생한다. 또한 전자기 노이즈를 발생시키지 않으며 전자기 노이즈에

영향을 받지 않는다. 접촉력에 구동되므로 강한 정지토크를 지니고 있어 브레이크를 필요로 하지 않으며 응답속도가 매우 빠르다. 그러나 토크가 커짐에 따른 열 발생, 마모의 증가, 소형에 따른 토크의 감소 등의 문제점을 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.[6-8]

본 연구에서는 초정밀제어용 리니어 모터 개발을 위한 목적으로 2개의 란쥬반형 압전 세라믹으로 구성된 간단한 구조의 초음파 리니어 모터에 대해 연구하였다. 이 초음파 리니어 모터를 최적설계를 위해 유한요소해석을 이용하여 공진모드에서의 타원진동을 주로 해석하였다. 초음파 모터의 유한요소해석은 주로 공진주파수와 공진모드에 따른 변위량 해석 및 모델설계에 유용하게 이용되고 있다. 유한요소해석을 이용하여 공진모드에서의 공진주파수, 최대변위, stress를 살펴보고, 최적의 설계조건을 구하였다.

유한요소해석 프로그램은 ANSYS를 사용하였다.[9]

2. 본 론

2.1 초음파 모터의 구조와 원리

그림 1에서는 본 연구에서 제작된 초음파 리니어 모터의 기본구성을 나타내고 있다. 두께방향으로 분극 되어진 압전 세라믹과 알루미늄이 볼트에 의해 결합된 2개의 란쥬반형 진동자가 팁(tip) 부분에서 서로 직각으로 구성된다. 각각의 란쥬반형 진동자의 압전 세라믹에 교류전압을 인가하면, 란

† 교신저자, 正會員 : 韓國電氣安全公社 電氣安全研究院

E-mail : ken2003@kesco.or.kr

* 正會員 : 韓國電氣安全公社 電氣安全研究院

** 正會員 : 昌原大學 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2007年 8月 29日

最終完了 : 2007年 9月 17日

쥬반형 진동자는 각각 두께 방향으로 진동을 하게 된다. 압전소자의 진동은 알루미늄 탄성체에 전달되고 2개의 란쥬반형 진동자가 만나는 tip 부분에서 슬라이더를 이동시킨다.

본 논문의 초음파 리니어 모터는 대칭, 비대칭 공진 진동 모드를 이용하는데, 그림 2와 같이 두 란쥬반형 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.[4-5]

즉, 각각의 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.

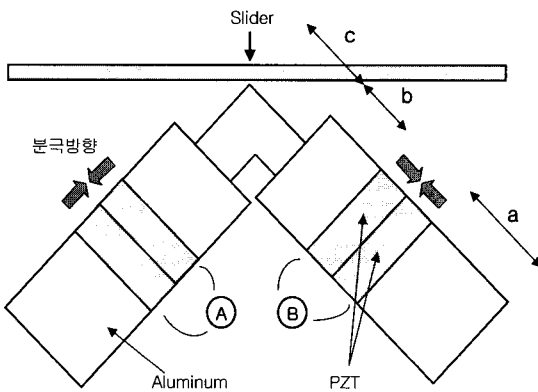


그림 1 초음파 리니어 모터의 구조
Fig. 1 Structure of ultrasonic linear moto

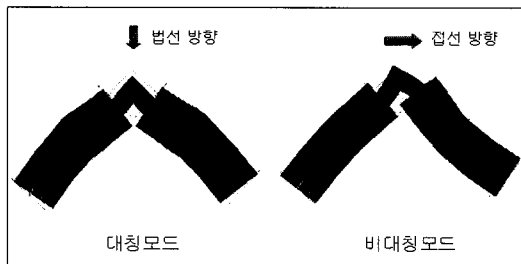


그림 2 대칭-비대칭 공진모드
Fig. 2 symmetric and anti-symmetric resonance modes

그림 3은 두 진동모드가 합성된 tip에서의 타원궤적의 원리를 설명하고 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 일 때의 식 (3)의 궤적 방정식(trajecory equation)을 유도 할 수 있고, 타원운동이 발생함을 수식에서도 알 수 있다.

$$\Phi = \frac{\pi}{2} \tag{1}$$

$$u_x = u_{x0} \sin \omega t \tag{2}$$

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

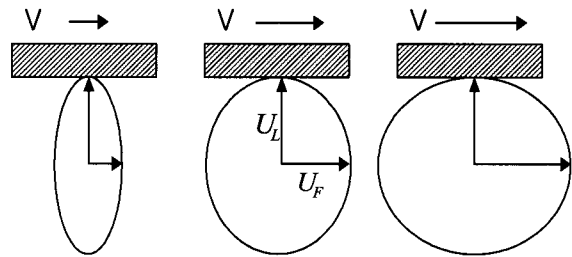


그림 3 진동의 타원궤적
Fig. 3 Elliptical trajectory of vibration

2.2 유한요소해석 및 실험

설계된 초음파 모터의 진동해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 시뮬레이션을 하였다. 압전소자는 SOLID5, 탄성체인 알루미늄은 SOLID45를 사용하여 3차원적으로 설계하였고 해석을 위해 사용된 압전세라믹은 Tokin 사의 NEFEC-6을 사용하였으며 탄성체의 재료의 물질상수는 표 1과 같다.

표 1 탄성체의 물질상수 (Aluminum 6055)
Table 1 Material properties of elastic body (Aluminum 6055)

Young's modulus[N/m ²]	Poisson's ratio	Density[kg/m ³]
7.6 × 10 ¹⁰	0.3	2700

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.[9]

그림 4는 초음파 리니어 모터의 3차원 시뮬레이션 결과로서 공진주파수에서 최대변위의 크기와 진동방향을 나타내고 있다. harmonic 해석에서 압전 세라믹에 100[Vpp]의 교류전압을 인가시 기본모델의 공진주파수 24.9[kHz]를 얻었다.

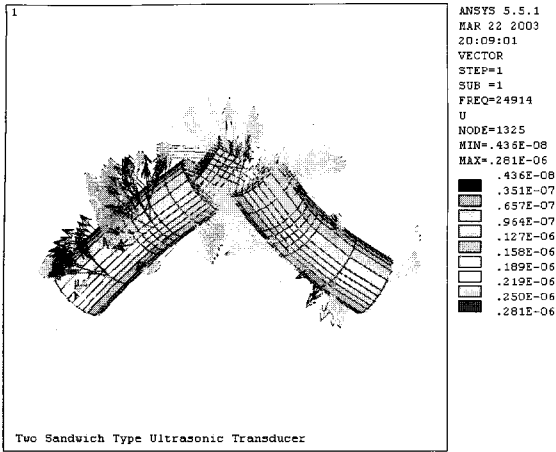


그림 4 유한요소해석에 의한 변위의 크기와 방향
Fig. 4 Volume and direction of displacement by FEA

압전세라믹을 이용한 초음파 리니어 모터의 진동자는 두께방향으로 분극된 압전세라믹을 탄성체인 알루미늄과 볼트로 결합하였고, 두 압전진동자는 직각으로 구성된다. 그림 5는 실제 제작한 고정 진동자의 사진이다. 초음파 모터는 90°의 위상차를 갖는 2상의 정현파 전원인 sin파와 cos파를 압전세라믹에 각각 인가함으로써 두 관류반형 진동자가 만나는 tip부분에서 타원궤적이 형성되고 슬라이드를 구동시킨다.

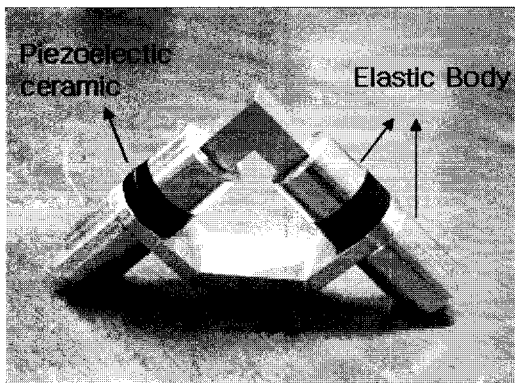


그림 5 제작된 고정 진동자의 사진
Fig. 5 The photograph of stator vibrator

그림 6은 초음파 모터를 구동시키기 위한 드라이버의 회로 구성으로 전원부와 센서 출력부, 피드백 회로 등으로 구성하였다. 발진회로는 MC14046B를 사용하여 저항값을 변화시켜 주파수를 가변하게 하였고 Binary Up/Down counter와 아날로그 Multiplexers를 사용하여 2상 게이트 펄스신호를 만들었다. 출력단은 MOSFET IRF840을 사용하여 2상 공진형 인버터를 구성하여 승압변압기에 연결하여 모터와 직렬로 연결된 인덕터와 LC 직렬공진에 의해 정현파로 변환되어 초음파 모터에 인가되도록 구성하였다. 본 논문에서 설계된 구동 드라이버는 그림 7과 같다.

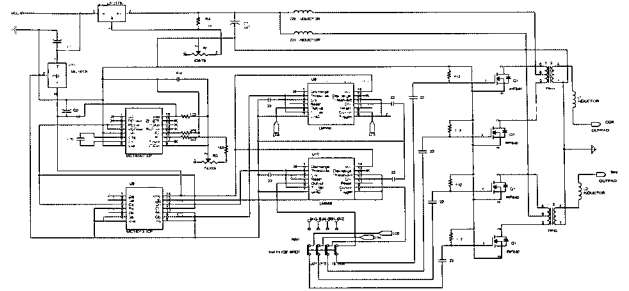


그림 6 구동 드라이버 회로도
Fig. 6 Drive circuit for USM

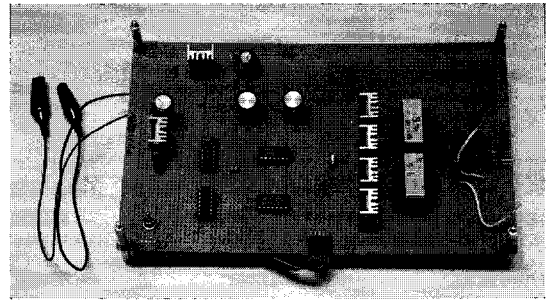


그림 7 구동 드라이버
Fig. 7 Driver for Ultrasonic motor

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.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Preload의 변화에 의한 속도와 전류

그림 8은 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 preload가 300p[gf]에서 최대였다.

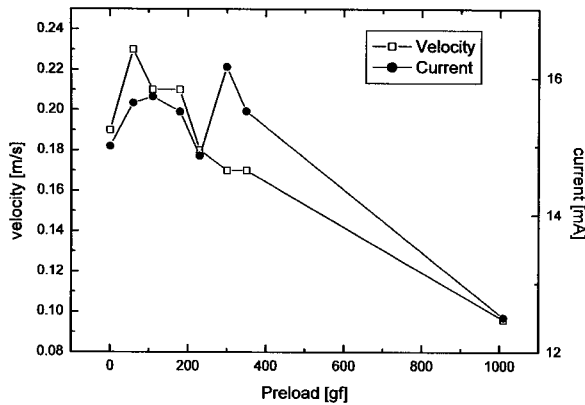


그림 8 Preload의 변화에 의한 속도와 전류
Fig. 8 Velocity and current with the changes of preload

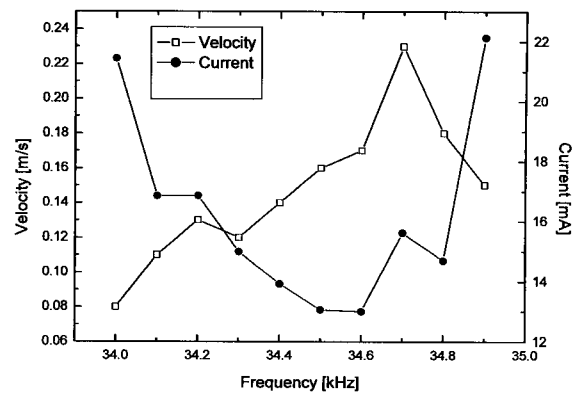


그림 10 구동 주파수의 변화에 의한 속도와 전류
Fig. 10 Velocity and current with the changes of driving frequency

3.2 전압의 변화에 의한 속도와 전류

그림 9는 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 최댓값은 80[Vrms]에서 속도는 0.24[Vrms], 전류는 20.17[mA]이었다.

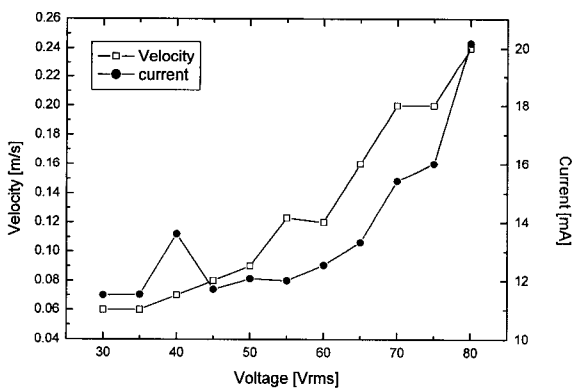


그림 9 전압의 변화에 의한 속도와 전류
Fig. 9 Velocity and current with changes of voltage

3.3 구동주파수에 의한 속도와 전류

그림 10은 전압 60[Vrms], prelaod 60[gf]일때, 공진주파수 34.7[kHz]부근에서의 속도와 전류를 측정된 결과이다. 공진주파수 부근에서 속도와 주파수가 비례적임을 알 수 있다. 이로써 초음파 리니어 모터의 공진주파수를 변화함으로써 슬라이더의 이동속도를 제어할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 33.7[kHz]에서는 슬라이더가 반대방향으로 이동하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 란쥬반형 압전진동자를 가지고 대칭-비대칭 공진모드를 이용한 초음파모터에 대하여 설계하고 제작하였다. 또한 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 설계된 초음파 리니어 모터를 시뮬레이션을 통해 대칭-비대칭 공진모드에서 모터의 구동을 확인 할 수 있었고, tip부분에서 최대변위를 가지는 공진주파수를 얻었다. 이 해석 결과를 바탕으로 실제 고정 진동자를 제작하고 모터의 구동특성을 연구하였다. 시뮬레이션에 의한 공진주파수는 24.9[kHz]이었지만, 실제 제작한 모델을 실험한 결과의 구동된 공진주파수는 34.7[kHz]로써 약간의 차이가 있었다. 이는 진동자의 제작시 세라믹과 전극의 접착 등의 과정이 다소 불안정하여 생긴 차이라고 생각된다. 또한 유한요소해석 프로그램을 이용하여 공진모드시 모터의 진동-열전달 연석해석을 통하여 더욱 최적화 된 시뮬레이션이 필요하였다.

제작된 압전 초음파 모터의 구동특성은 공진주파수 34.7[kHz]일때 전압 80[Vrms], 전류 18.5[Vrms], 추력 0.107[kgf] 그리고 속도가 0.20[m/s]이었으며, 모터의 최대효율은 30.09[%]였다.

본 논문에서 연구된 초음파 리니어 모터는 기존의 초음파 리니어 모터들보다 효율과 추력이 우수하였고, 반도체 제조 및 정밀선반 장비에 필요한 X-Y 스테이지용 리니어 모터로서 응용될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 박창엽, "전기전자용 압전세라믹스", 반도체출판사, pp. 146-161, 1994.
- [2] Toshiiku Sashida, Takashi Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors", OXFORD, pp. 1-24, 1993.
- [3] S. Ueha, Y. Tomikawa, "Ultrasonic Motors Theory and Application", OXFORD, pp. 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, pp. 1188-1998.

- [5] Kenhi Mori, Tomoko Kumagae, Hiromu Hirai, "Ultrasonic Linear Motor for a High Precision X-Y stage", IEEE Ultrason. Symp., pp. 3-6, 1989.
- [6] 김태열, 김법진, 박태곤, 김명호, Kenjo Uchino, "L1-B4 샌드위치형 진동자를 이용한 선형 초음파 모터의 설계 및 특성", 전기전자재료학회논문지, 12호, 제13권, pp. 1025-1031, 2000.
- [7] 이재형, 박태곤, "볼트조임 란주반형 진동자를 이용한 모드변환형-단일공진모드 초음파 모터에 관한 연구", 전기학회논문지, 3호, 제53C권, pp. 123-127, 2004.
- [8] 정현호, 박태곤, "스테이터의 형태에 따른 Cross형 초음파 회전모터의 구동특성", 대한전기학회 논문지, 10호, 제54C권, pp. 433-437, 2005.
- [9] 태성에스엔이 FEA사업부, "유한요소해석 입문과 선형 해석", 태성에스엔이, p. 537-628, 2007

저 자 소 개



최 명 일 (崔 明 日)

1975년 5월 30일생. 2002년 창원대학교 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 졸업(석사). 2000~2001년 한국전기연구원 재직. 2003년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원

Tel : 031-580-3058

Fax : 031-580-3052

E-mail : ken2003@kesco.or.kr



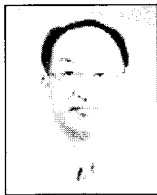
배 석 명 (裒 錫 銘)

1956년 10월 22일생. 1984년 창원기능대학 전기기기과 졸업. 1981~1998년 한국전기안전공사 재직, 1998년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 부원장

Tel : 031-580-3050

Fax : 031-580-3052

E-mail : sukmyong@hanmir.com



박 태 곤 (朴 泰 坤)

1954년 2월 20일생. 1976년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1985년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1989~1990 일본 동경공대 객원연구원. 1998~1999 미국 Pennsylvania주립대 객원교수. 1987년~현재 창원대학교 전기공학과 교수.

Tel : 055-279-7511

Fax : 055-263-9956

E-mail : tgpark@changwon.ac.kr