

유한요소해석 시뮬레이션을 이용한 평판형 L_1-B_8 모드 초음파 전동기의 최적 설계

An Optimum Design of Flat-type L_1-B_8 Mode Ultrasonic Motors Using FEM Simulation

우상호*, 김우태*, 신순인*, 김진수**, 사정우***, 김기수****

(Sang-Ho U, Woo-Tae Kim, Soon-In Shin, Jin-Soo Kim, Jeong-Woo Sa, Ki-Soo Kim)

Abstract

A flat-type L_1-B_8 mode Ultrasonic motor(USM) uses longitudinal-bending multi-mode vibrator which is constructed with the metal-piezoceramic composite thin plate vibrator. Especially, the characteristics of vibrating displacement of the vibrator are important for the fabrication of USM. So, in this study, we tried to analyze them by the FEM(finite element method) simulation program. ANSYS 5.6 we used is a finite element software enabling the analysis of 2 or 3 dimensional structure of piezoelectric materials. Using this made us analyzing the resonance frequency and calculating displacement of vibrator and then the position of the projection.

Key Words : Flat-type L_1-B_8 mode Ultrasonic Motors, FEM, vibrating displacement, Piezoelectric ceramics, ANSYS program

1. 서 론

초음파 전동기(Ultrasonic Motors : USM)는 압전 세라믹에 의한 초음파 진동을 구동원으로 하고 회전자와 진동자 사이의 마찰에 의해 얻어지는 추진력을 이용하는 것으로, 전통적인 전자식 전동기에 비해 중량당 높은 토크, 기동 및 정지시의 좋은 제어 특성, 간단한 구조 및 형태의 다양한 변형 및 특히, 전자계 유도에 의한 영향을 피할 수 있는 잇점 등의 특징이 있다[1][2][3].

1973년 처음으로 초음파 전동기가 제안된 이후,

* : 한국교원대학교 기술교육과 석사과정
** : 한국교원대학교 기술교육과 교수
*** : 기초과학지원연구소 연구원
**** : 충남대학교 기술교육과 교수
(충북 청원군 강내면 다락리, 한국교원대학교 기술교육과
Fax : 043-230-3787
E-mail : <http://cc.knue.ac.kr/~jskim>)

T. Sashida에 의한 고효율 진행파형 초음파 전동기의 실험적인 제작을 거쳐, 최근 상업적 응용을 위한 개발에 이르기까지 많은 특성의 개선과 제어 설계가 이루어지고 있다[4].

특히, 최근에는 초음파 전동기의 설계를 위해 유한요소해석(Finite Element Method : FEM) 시뮬레이션 프로그램을 이용해 설계가 시도되어지고 있다[5]. 따라서, 이 논문에서도 유한요소해석 프로그램을 사용한 시뮬레이션에 의해, 압전세라믹스와 금속 탄성체로 구성된 진동자의 공진주파수와 공진 모드에 따른 변위량 등을 구하여 L_1 (종)- B_8 (굴곡) 모드를 이용한 평판형 초음파 전동기의 최적 설계를 꾀하였다.

본 연구의 L_1-B_8 모드 초음파 전동기는 종이나 전자식 카드 등의 이송체를 선형 운동이 가능케 하는 이송 장치용 전동기로 사용함으로써 디바이스의 소형 경량화 추세에 부응할 수 있다[6].

2. 평판형 L_1-B_8 모드 초음파 전동기의 설계

2.1 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기의 동작 원리

그림 1과 같이 평판형의 금속 탄성체에 압전 세라믹을 접착하여 교류전원을 인가하면 압전특성에 의해 그림 1(a)와 같이 종진동으로 1차 모드(L₁) 및 굴곡진동으로 8차 모드(B₈)이 여진된다[6]. 여기에 회전자를 진동 변위특성이 가장 우수한 곳에 위치시키면 탄성진동이 초당 수 만회의 속도로 타원형 진동을 발생하여 그림 1(b)와 같이 회전자를 마찰시켜 회전하게 된다[7]. 또한, 고정자 위에 변위 확대기구 (projection)를 설치하여 타원형 회전운동의 효율을 높일 수 있다[8].

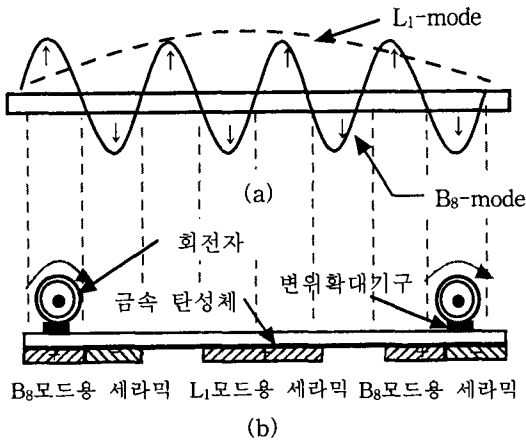


그림 1. 종(L₁)- 굴곡(B₈) 모드 USM 동작원리

2.2 고정자의 설계

평판형 초음파 전동기의 고정자는 진동자인 압전 세라믹과 금속 탄성체로 구성되어 있다. 설계시 탄성체의 길이(*l*)는 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기가 공진 현상을 이용하므로 1차 종진동과 8차 굴곡진동의 공진주파수를 일치시켜 구할 수 있다. 즉 Euler-Bernoulli의 기본이론에 의해, 종진동과 굴곡진동의 공진주파수는 식 (1)과 같다[9],[10].

$$f_{L1} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [\text{Hz}]$$

$$f_{Bn} = \frac{\alpha^2 t}{4\pi \sqrt{3} l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [\text{Hz}], \quad \alpha = \left(\frac{2n+1}{2}\right)\pi$$

여기서 *E*는 영률, ρ 는 밀도, *l*은 탄성체의 길이, *t*는 탄성체의 두께이다. 공진조건($f_{L1} = f_{B8}$)으로부터 다음과 같은 식 (2)를 구할 수 있다.

$$l = \frac{\alpha^2 t}{2\pi \sqrt{3}} \quad [\text{mm}] \quad (2)$$

따라서, 탄성체의 두께(*t*)에 의해 탄성체의 길이(*l*)를 구할 수 있다. 여기서, 고정자의 여진용 압전세라믹의 접착방법에 따라 발생하는 주파수의 변동 영향을 고려하여 *l*을 보정할 필요가 있다^[11]. 이에 본 연구에서는 탄성체의 크기를 70×24×1[mm]로 하였고, 압전세라믹은 두께 0.5[mm]와 1[mm]로 달리하여 L₁ 및 B₈ 모드용의 크기를 각각 20×24[mm] 및 10×24[mm] (가로×세로)로 그림 2와 같은 구조로 설계하여 FEM 시뮬레이션 하였다. 그림에서 +, -는 분극의 방향을 나타낸다.

설계한 고정자를 유한요소해석 시뮬레이션에 의해 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기의 최적 설계를 위한 진동 변위특성을 해석하였다.

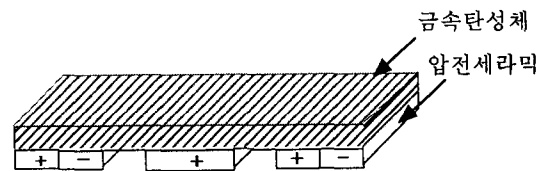


그림 2. 고정자의 구조

3. FEM 시뮬레이션 방법

유한요소해석 시뮬레이션 프로그램으로 압전 현상을 지닌 2, 3차원 구조물의 진동해석이 가능한 ANSYS 5.6을 사용하였다.

3.1 FEM 시뮬레이션의 과정

ANSYS를 통한 FEM 시뮬레이션은 그림 3과 같은 절차를 따라 해석하게 된다[12].

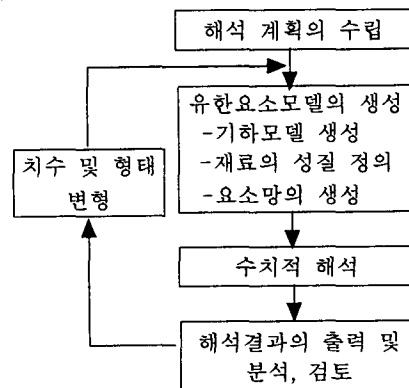


그림 3. 유한요소해석의 순서도

이때 탄성체와 압전세라믹의 재료 특성은 표 1 및 표 2와 같다.

표 1. 탄성체의 재료 정수

특 성	값	단 위
Young's modulus	19.7×10^{10}	N/m ²
Poisson's ratio	0.3	
Density	7913	kg/m ³

표 2. 압전 세라믹스의 재료 정수

특 성	값	단 위
Density	0.775E+04	kg/m ³
S ₁₁ ^E	0.164E-10	N/m ²
S ₁₂ ^E	-0.574E-11	N/m ²
S ₁₃ ^E	-0.722E-11	N/m ²
S ₃₃ ^E	0.188E-10	N/m ²
S ₄₄ ^E	0.475E-10	N/m ²
S ₆₆ ^E	0.443E-10	N/m ²
D ₁₅	0.584E-09	C/N
D ₃₁	-0.171E-09	C/N
D ₃₃	0.374E-09	C/N
ε ₁₁ ^S	0.916E-08	F/m
ε ₃₃ ^S	0.830E-08	F/m

수와 압전세라믹의 두께에 따른 다양한 변위 특성을 살펴보았다. 여기서는 압전세라믹의 두께에 따른 변위특성이 가장 좋은 것만 각각 1개씩 살펴보았다. 각 그림에서 변위량은 색지수로 나타내었고, U_x 축을 기준으로 +는 위쪽, -는 아래쪽을 나타낸다.

그림 5는 압전세라믹의 두께가 0.5[mm]인 경우로 공진주파수가 35.659[kHz]에서 L₁-B₈ 모드의 진동을 나타내고 있다. 좌측에서 두 번째 골과 세 번째 마루에서 진동 변위가 가장 크게 나타남을 확인할 수 있다.

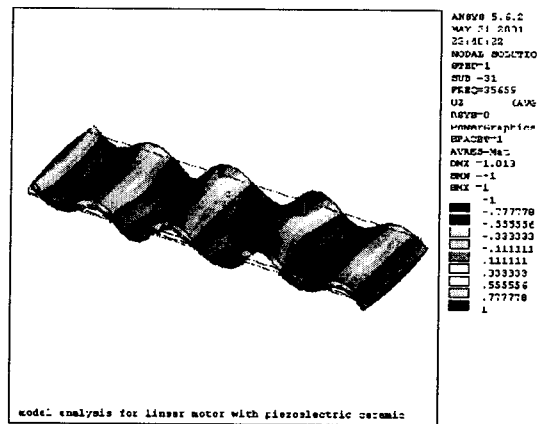


그림 5. 고정자의 진동특성(0.5[mm]일때)

그림 4는 고정자의 진동 변위특성 해석을 위해 사용된 모델이며 총 요소의 수 510개이다. 공진주파수의 분석을 위해 고정자의 중간 지점의 라인을 따라 모든 변위(X, Y, Z)를 구속시켰다.

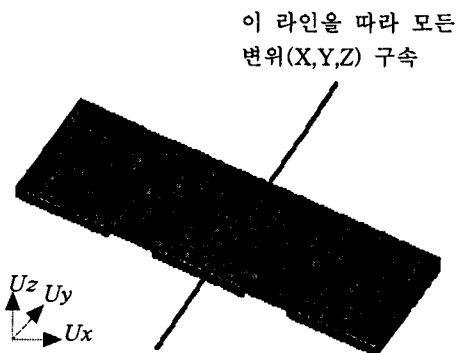


그림 4. 유한요소 모델

그림 6은 압전세라믹의 두께가 1[mm]인 경우로 공진주파수가 42.266[kHz]에서 L₁-B₈ 모드의 진동을 나타내고 있다. 진동 변위특성은 색지수에서 보듯이 그림 5에서와 거의 유사함을 알 수 있었다.

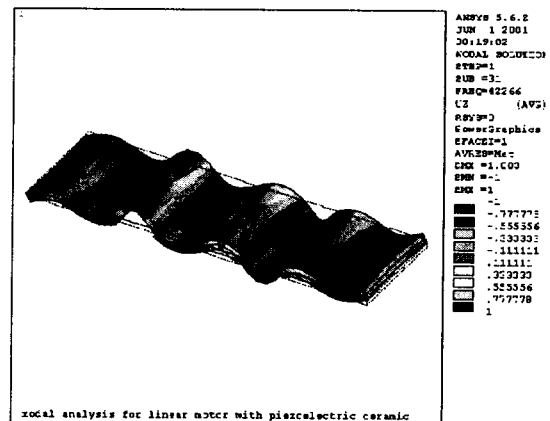


그림 6. 고정자의 진동특성(1.0[mm]일때)

3.2 ANSYS Simulation을 통한 변위 특성 분석
본 연구에서는 FEM 시뮬레이션을 통해 공진주파

4. 결 론

본 연구의 FEM 시뮬레이션에 의한 변위 분석을 통하여, 그림 5, 6 에서 보듯이 L_1 - B_8 모드의 공진주파수는 압전세라믹이 1[mm]인 경우 42.226[kHz], 0.5[mm]인 경우 32.659[kHz]로 압전세라믹의 두께가 낮을수록 주파수가 낮아짐을 분석할 수 있었고, 이때 고정자의 변위량은 거의 유사함을 알 수 있었다. 아울러 변위량이 가장 큰 점에 설치할 변위 확대기구의 위치를 파악할 수 있었다[13]. 비록, 실제 제작시에 압전세라믹의 접착조건 등에서 발생할 수 있는 차이를 고려해야하지만 이러한 시뮬레이션 결과를 고찰하여 설계한 평판형 L_1 - B_8 모드 USM은 최적의 초음파 전동기 제작에 도움이 될 것이다.

참고 문헌

- [1] 김진수, 이명훈, "초음파 전동기의 이론과 응용", 성안당, pp. 3-5, 2000.
- [2] K. Uchino, "Piezoelectric Actuators And Ultrasonic Motors", Kluwer Academic Publishers, Boston, p. 267, 1997.
- [3] Jin-Soo Kim, Man-Ju Park and KENJI UCHINO, "Composite Ultrasonic Motors using a Piezoelectric Disc and an Elastic Body of "Windmill" Type", *Ferroelectrics*, Vol. 232, pp. 185-190, 1999.
- [4] 김영균, 김진수, "풍차형 초음파 전동기의 제작과 토크 및 정·역 회전특성", *대한전기학회 논문지*, Vol. 50C, No. 3, pp. 105-109, 2001.
- [5] H. A. KUNKEL, "Finite-Element Analysis of Vibrational Modes in Piezoelectric Ceramic Disks" *IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS. FEROELECTRICS. AND FREQUENCY CONTROL. VOL. 37. NO. 4, p. 317, 1990.*
- [6] Y. Tomikawa, T. Nishitsuka, T. Ogasawara, and T. Takano, "A Paper or Card Forwarding Device Using a Flat-Type Ultrasonic Motor", *Sensors and Materials*, 1-6, pp. 359-379, 1989.
- [7] 이명훈, 김진수, " L_1 - B_4 모드 선형 초음파 전동기 제작과 운전특성", *대한전기학회 논문지*(2001.6 accepted).
- [8] Sashida, T, "Applied Physics of Japan", 51, pp, 713-720, 1982.
- [9] T, Kosawada, K. Suzuki, T. Tomikawa, "A Card sending Linear Ultrasonic Motor using Multi-Beam Piezoelectric Vibrators", *International Journal of Applied Electromagnetics in Materials* 2, pp. 285-290, 1992.
- [10] 이명훈, 이상호, 김영균, 김진수, "선형 초음파 전동기의 제작과 특성에 미치는 회전자의 가압력", *대한전기학회 하계학술대회 논문집*, pp. 741-743, 2000. 7.
- [11] 이동균, 조봉희, 김현재, 한득영, 윤석진, "Atila를 이용한 원환형 초음파 모터의 설계", *한국전기전자재료학회 추계학술대회 논문집*, Vol. 13, No. 1, pp. 186, 2000.
- [12] 고재용, "ANSYS와 유한요소법", 시그마프레스, pp. 12-14, 2001.
- [13] Siyuan He, Weishan Chen, Xie Tao, Zaili Chen, "Standing Wave Bi-directional Linearly Moving Ultrasonic Motor", *IEEE*, Vol. 45, No. 5, pp. 1133-1139, 1998.