

란주반형 진동자의 유한요소해석 및 세라믹 적층특성 비교

FEA of Langevin Type Ultrasonic Vibrator and Comparison of Stacking Characteristic of Ceramics

박민호, 김태열, 박태곤, 김명호*
(Min-Ho Park, Tae-Yoal Kim, Tae-Gone Park, Myong-Ho Kim)

Abstract

In this paper, we calculated equivalent circuit of Langevin type ultrasonic vibrator and designed a vibrator whose resonant frequency is 50[kHz]. FEA (Finite Element Analysis) was employed to calculate the resonant frequencies and maximum displacements of designed vibrators. The computer calculated resonant frequencies were approached to the designed one. As AC voltage input, the maximum displacements were shown sinusoidal changes. Terminal input admittance over a frequency range spanning the resonant frequency were calculated. ANSYS was employed to calculate resonant frequencies, displacements and terminal input admittance of vibrators

Key word(중요용어): Langevin type ultrasonic vibrator, Piezoelectric ceramics, FEM, ANSYS

1. 서론

본 논문에서는 붕의 1차 종진동 모드를 이용한 란주반형 초음파 진동자의 등가회로를 계산하였다. 진동자의 설계수식에 따라 설계를하고 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 설계모델의 공진 주파수를 해석하였다. 교류전압 인가시 최대변위를 확인하였으며, 주파수 변화에 따른 입력측 어드미턴스를 계산하였다. 세라믹의 층수를 2, 4, 6, 8층으로 가변하여 최대변위 및 공진주파수의 변화를 계산하였다.

2. 란주반형 진동자의 구조와 특징

2.1 진동자의 구조와 적용

PZT 세라믹의 종진동 변위는 대개 0.1 마이크로미터 이하로 아주 작다. 따라서 란주반형 진동자는 이러한 작은 변위를 증폭시키기 위해서 알루미늄 실

린더 사이에 디스크 모양의 세라믹을 분극방향이 마주보도록 겹쳐서 적층시키고 그 사이에 전극을 연결하여 전체가 볼트로 조여진 형태이다. 이 진동자는 큰 출력을 요구하는 초음파 가공기와 고온에서 사용되는 초음파 세정기 등에 많이 적용된다.

2.2 진동자의 등가회로

진동자의 구동원리는 변위, 전압, 힘, 토크 등의 용어들로 설명된다. 이들의 연관관계는 power factor A 를 도입하면 쉽게 설명할 수 있다.

압전상대방정식의 e형식으로부터 power factor A 는 식(1)로 정의된다. Fig. 1은 압전진동자를 일반전자기모터와 같은 형식의 전기적 등가회로로 표현한 것이다. 압전진동자의 구동원리는 식 (2)와 (3)으로 설명이 가능하다.

$$A = e_{33}S/b \quad (1)$$

$$-F = AV - Zv \quad (2)$$

$$I = Y_d V + Av \quad (3)$$

여기서, b 와 S 는 세라믹 두께 및 넓이, e_{33} 은 압

창원대학교 전기공학과 *창원대학교 세라믹공학과
(경남 창원시 사림동 창원대학교)
Fax : 0551-263-9956
E-mail : mino23@dreamwiz.com

전 용력상수, F 와 v 는 진동자 기계적인 힘과 진동 속도, V 는 전압, I 는 전류, Y_d 는 blocking 어드미턴스, Z 는 진동을 나타내는 기계적 임피던스를 의미한다.

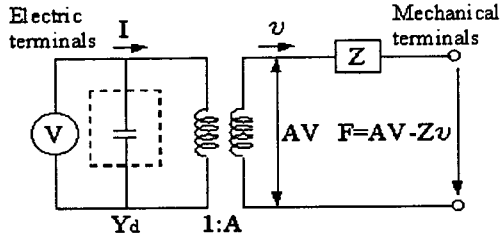


Fig. 1. Equivalent circuit of vibrator

압전세라믹에 직류전압이 인가되면 진동자는 식(4)와 같이 일정한 스프링 상수 K 의 값을 가지고 변형을 일으킨다. 무부하 상태에서는 압전세라믹에서 발생하는 힘은 식(2)에서 기계적 임피던스 Z 가 생략된 식(5)와 같이 표현된다. 그리고 변위 x 에 의해 세라믹에 발생하는 전하 q 는 식(6)과 같다. 식(4)-(6)으로부터 식(7)을 구할 수 있다. 이 때 K 는 세라믹 자체의 특성뿐만 아니라 금속의 특성까지 고려된 값이다. 또한 교류전압인가시 압전세라믹 진동의 크기와 위상은 스프링 상수뿐만 아니라 세라믹과 금속의 질량에도 영향을 받는다. Fig. 2는 간이화된 등가회로를 나타냈다. 그림에서 질량 m 을 인덕턴스 L_m 로 표현하고 식(8)과 같이 나타내었다. 란쥬반형 진동자의 운동방정식은 식(9)와 같이 주어진다. 식(5)-(9)로부터 Fig.3를 설명하는 등가정전용량 C_m , 등가인덕턴스 L_m , 인가전압 V 를 포함한 식(10)을 구할 수 있다.

$$F = Kx \quad (4)$$

$$F = AV \quad (5)$$

$$q = Ax \quad (6)$$

$$C_m = A^2 / K \quad (7)$$

$$L_m = m / A^2 \quad (8)$$

$$m \frac{d^2 q}{dt^2} + Kx = f(x) \quad (9)$$

$$L_m \frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{1}{C_m} q = V \quad (10)$$

여기서 Blocking 커패시턴스, C_d 는 세라믹의 유전성질에 의한 것으로 세라믹이 진동할 수 없도록 고

정된 상태에서 정전용량을 의미하고, r_0 는 세라믹에서의 인가전압에 대한 변위의 히스테리시스 손실과 세라믹과 금속의 결합부분에서의 손실 등을 모두 포함하는 내부손실을 나타낸다. 직류전압인가시 전기 에너지는 C_d 와 C_m 에 저장되고 이 때 전기기계결합 계수 k 는 식 (11)로 표시된다. 압전세라믹에 전압을 인가하면 변위가 일어나지만 그 크기는 아주 작다. 그러나 공진현상을 이용하면 아주 큰 변위를 얻을 수 있다. 식(12)와 (13)은 각각 LC회로에서 각주파수 ω_0 와 고유주파수 f_0 를 나타냈다.

$$k = \sqrt{\frac{C_m}{C_d + C_m}} \quad (11)$$

$$\omega_0 = 1/\sqrt{CL} = \sqrt{K/m} \quad (12)$$

$$f_0 = \omega_0 / 2\pi \quad (13)$$

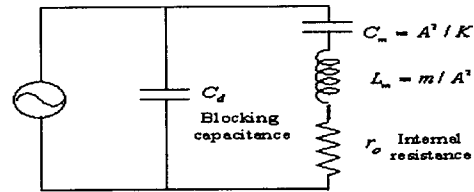


Fig. 2. Simplified equivalent circuit

3. 진동자의 설계과정

3.1 봉의 1차 종진동

봉의 길이를 l 이라 할 때 이 값이 봉의 반파장의 정수배와 같으면 공진한다. 봉 내부에서의 음속과 n 번째 공진 주파수 f_n 은 식(14), (15)와 같다. 이 때 알루미늄 실린더의 끝 부분에서 최대의 변위를 얻기 위해 전체 길이는 $n=1$ 인 1차 종진동 진행파의 1/2 되는 지점으로 결정한다.

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (14)$$

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{E/\rho} \quad (15)$$

여기서 c , ρ 그리고 E 는 각각 봉 내부의 전파속도, 밀도, 영률(Young's modulus)이다.

3.2 진동자의 설계식

$$k = \frac{c_1 \rho_1 S_1}{c_2 \rho_2 S_2} \quad (16)$$

$$\lambda_1 = c_1 / f_n, \lambda_2 = c_2 / f_n \quad (17)$$

$$a = \alpha \frac{\lambda_2}{4}, \quad b = \beta \frac{\lambda_1}{4} \quad (18)$$

$$\tan \alpha \frac{\pi}{2} \cdot \tan \beta \frac{\pi}{2} = k \quad (19)$$

여기서 c_1, c_2, S_1, S_2, a, b 는 각각 PZT와 Aluminum의 음속, 단면적, 두께이다. 진동자의 설계식은 식(16)-(19)와 같고 설계에 사용된 알루미늄과 PZT의 재료정수는 Table 1과 같다.

3.3 진동자의 설계

재료정수로부터 식(14)에서 PZT의 음속 c_1 과 알루미늄의 음속 c_2 을 구하고 원하는 공진주파수 f_n 에서 PZT세라믹의 두께 b 를 결정하면 식(16)-(19)로부터 알루미늄의 두께 a 를 구할 수 있다. 본 논문에서는 공진주파수 50[kHz]의 란쥬반형 진동자를 설계하였고 앞의 식들에 의하여 구한 값들은 Table 2와 같고 그 형상은 Fig. 3과 같다.

4. 유한요소 해석

4.1 고유주파수 계산

진동자의 크기가 결정되면 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 진동자의 공진주파수를 계산할 수 있다. ANSYS에서 계산된 공진주파수를 설계수순에 따라 결정한 공진주파수와 비교하고 알루미늄 끝부분의 중심에서 최대변위를 확인하였다.

Table 1. Material characteristics

Characteristics	Aluminum	PZT
Young's modulus E [N/m ²]	76×10^9	76×10^9
Density ρ [kg/m ³]	2700	7730
Poisson's ratio μ	0.3	0.33
Velocity c [m/s]	5305	3162

Table 2. The size of vibrator [mm]

Frequency	a	b	d_1	d_2	l
40[kHz]	22.058	3	5	28	50.117

Table 3. Resonant frequency and maximum displacement

Number of ceramics	2	4	6	8
Thickness[mm]	3	1.5	1	0.75
Resonant frequency[Hz]	50322	50282	50382	50349
Maximum displacement[μm]	6.3398	16.2685	25.6310	45.3153

Fig. 4는 ANSYS로 해석한 세라믹층수 8층 모델의 공진주파수 50[kHz]에서 전압 100[V] 인가시 최대변위의 형상을 나타내었다. Table 3은 전체 세라믹의 두께를 6[mm]로 일정하게 유지하고 세라믹의 층수를 2층에서 8층까지 2층씩 증가시킨 4가지 모델의 진동자의 세라믹 두께를 나타내고, 설계수순에 의한 공진주파수와 ANSYS로 해석된 공진주파수를 비교하고 최대변위를 나타내었다. 위 결과에서 세라믹의 층수가 증가할수록 공진주파수는 거의 비슷하였으며, 최대변위는 증가함을 확인하였다. Fig. 5는 설계 공진주파수 50[kHz] 부근에서 최대변위의 변화를 나타내었다.

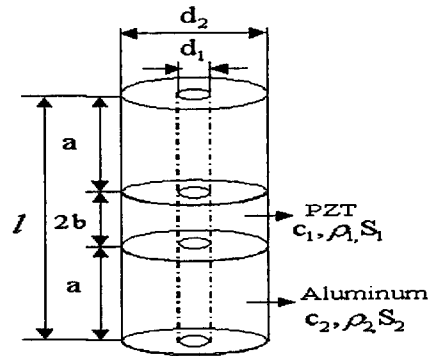


Fig.3. Size and properties of vibrator

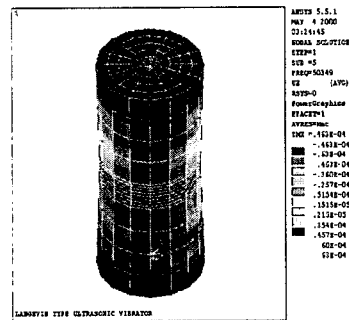


Fig. 4. Vibration mode at resonant frequency

4.2 어드미턴스 계산

진동자의 공진주파수 부근에서 입력측의 어드미턴스를 계산한 결과 Fig. 6과 같이 공진주파수 주변에서 최대 및 최소 어드미턴스가 나타났다.

4.3 인가전압가변시 최대변위의 변화

Fig. 7에서는 인가전압을 25[V]에서 125[V]까지

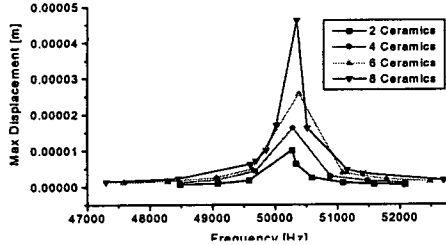


Fig. 5. Maximum displacement at resonant frequencies

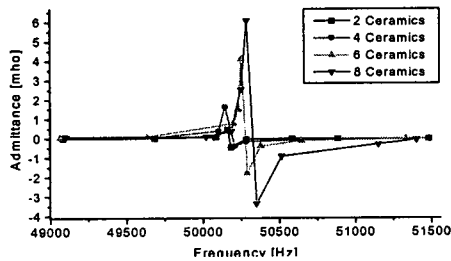


Fig. 6. Input admittance near resonant frequencies

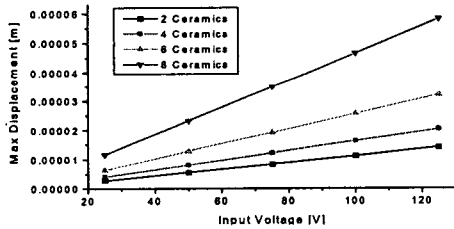


Fig. 7. Maximum displacement as functions of input voltages

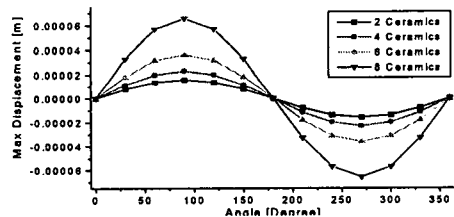


Fig. 8. Maximum displacement when AC voltage was applied

25[V]씩 증가시켜서 최대변위를 계산한 결과 최대변위도 증가함을 알 수 있었다.

4.3 교류전압 인가시 최대변위의 변화

란쥬반형 진동자에서는 교류전압을 인가하여 진동력을 얻으므로 실제적용에 있어서 교류전압을 인가

하므로 이때의 최대변위의 변화를 알아 볼 필요가 있다. Fig. 8은 교류 100[V] 실효치 전압을 인가하여 0° 에서 360° 까지 30° 씩 변화를 주어 최대변위량을 알아본 결과, 인가전압과 비슷한 형상의 정현적인 변위의 변화가 나타났다.

5. 결 론

란쥬반형 진동자의 전기적 등가회로를 구했고, 설계수식에 따라 공진주파수 50[kHz] 모델의 란쥬반형 진동자를 설계하였다. ANSYS 해석결과 공진주파수는 설계수식 계산치와 해석치가 근사한 값으로 나타났다. 전체 세라믹의 두께를 일정하게 유지한 상태에서 층수를 가변하여 해석한 결과 공진주파수의 변화는 거의 없었으며, 층수의 증가에 따라 변위 또한 증가함을 보였다. 따라서 강력진동을 얻기 위해서는 세라믹을 적층, 또는 multilayer화하는 것이 바람직한 것으로 예상된다. 공진주파수 근처에서 진동자의 입력측 어드미턴스를 계산한 결과 공진주파수 부근에서 최대 및 최소 임피던스를 확인하였고, 이 값 또한 층수의 증가에 따라 증가된 값이 나타났다. 이 결과로부터 어드미턴스의 최대 및 최소점이 각각 공진, 반공진점임을 예상할 수 있다. 또한 100[V] 교류전압을 인가하여 최대변위를 확인한 결과 정현적인 최대변위의 변화를 나타냈다.

[Acknowledgement]

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기 기술 연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고 문헌

- [1]. S. Ueha, Y. Tomikawa, "Ultrasonic Motors Theory and Applications", OXFORD, 1993
- [2]. Toshiiku Sashida, Takashi Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors", OXFORD, 1993.
- [3]. 阿部, 田中ほか: 電気三學會連合大會 講演論文集, 1,(1952, 5), 80.
- [4]. Yoshikazu Koike, Takeshi Tamura, Sadayuki Ueha "Derivation of a Force Factor Equation for a Langevin Type Flexural Mode Transducer" Jpn. J. Phys. Vol. 35, pp.3274 - 3280, 1990
- [5]. Singiresu S. Rao, "Mechanical Vibrations", Addison-Wesley Publishing Company, 1990.