

길이와 두께 비에 따른 두께 전단모드 압전소자의 공진 변위 및 압전특성

박민호¹, 류주현¹, 홍재일², 정영호^{3,a}

¹ 세명대학교 전기공학과

² 동서울대학교 전기정보제어과

³ 충주대학교 전기공학과

Resonant Displacement and Piezoelectric Properties of Thickness Shear Mode Piezoelectric Devices According to Length/Thickness Ratio

Minho Park¹, Juhyun Yoo¹, Jaeil Hong³, and Yeongho Jeong^{3,a}

¹ Department of Electrical Engineering, Semyung University, Jecheon 390-711, Korea

² Department of Electrical Information Control, Dongseoul College, Seongnam 461-714, Korea

³ Department of Electrical Engineering, Chungju National University, Chungju 380-702, Korea

(Received May 6, 2011; Revised May 17, 2011; Accepted May 24, 2011)

Abstract: In this study, thickness shear mode piezoelectric devices for AE sensor with excellent displacement and sensitivity characteristics were simulated using ATILA FEM program, and then fabricated. Displacement and electro mechanical coupling factors of the piezoelectric devices were investigated. The simulation results showed that excellent displacement and electromechanical coupling factor was obtained when the ratio of Length/Thickness was 1. The piezoelectric device of $L/T = 1$ exhibited the optimum values of $f_r = 150$ kHz, $\text{displacement} = 6.23 \times 10^{-8}$ [m], $k_{15} = 0.598$. The results show that the thickness shear mode piezoelectric device is a promising candidate for the application of AE sensor piezoelectric device.

Keywords: AE sensor, Shear mode, PZT, ATILA

1. 서 론

최근, 스마트그리드와 녹색에너지 기술에 대한 관심이 고조되고 있는 가운데 전력생산 및 전력수송 설비의 신뢰성 확보는 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 전기 설비 예방 진단 응용기술 중 하나가 음향방출 (acoustic emission, AE) 기술이고, 이를 이용하여 발전설비, 고전압설비 등의 전력설비를 진단하려는

기술적 시도가 이루어지고 있다. 음향방출기술은 전력설비 이외에도 저비용 고품질이 요구되는 일반적 기계장비시스템의 사고 방지 및 상태감시에도 이용되고 있다 [1]. 이 기술은 각종 물체가 파괴 혹은 파괴 직전의 응력 집중 시에 발생하는 초음파를 탐지 하여 전기설비, 기계장치 등의 손상 사고를 방지하는 일종의 안전 보호 기술이다 [2]. 이 기술의 핵심 역할을 하는 AE센서는 사후 진단보다 예방 진단에 활용이 가능하다는 점에서 주목을 받고 있으며 결함 탐지 감

a. Corresponding author: ykjeong@cjnu.ac.kr

도가 매우 높을 뿐만 아니라 대상물의 구조나 결함의 크기에 구애받지 않고 결함을 탐지할 수 있는 장점을 가지고 있다. AE센서의 핵심인 감지소자는 압전세라믹스를 사용하고 있으며, AE센서의 종류로는 공진형(resonant type) 센서와 광대역(wide band type) 센서가 있다. 공진형 센서는 특정한 주파수에서 감도가 높은 반면에, 광대역센서는 감도가 낮지만 넓은 주파수 범위에서 신호탐지가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 기계장치 등의 안전검사와 같은 용도로 사용하기 위해서는 특정한 주파수에서 감도가 높은 공진형 센서가 더 적합한 것으로 알려져 있다 [3]

일반적으로, 전단모드의 전기기계결합계수 K_{15} 는 경방향모드의 전기기계결합계수 k_p 보다 크므로, 전단모드를 이용하여 압전소자를 제작하면 에너지변환 효율이 우수하게 된다. 이런 장점으로 인하여 전단모드를 이용한 압전변압기, 초음파모터 등에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 전단모드를 이용한 AE센서에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 전단모드는 일반적으로 길이 전단모드(length shear mode)와 두께 전단모드(thickness shear mode)가 있다 [4]. 본 연구에서는 L/T 에서 두께를 더욱 늘린 구조인 두께 전단모드(thickness shear mode)를 이용하였다. 또한, AE센서를 제작하기 위하여 유한요소 프로그램인 ATILA로 AE센서용 압전소자를 시뮬레이션 하여 압전소자의 길이와 두께 비의 변화에 따른 공진 주파수에서의 최대 변위 값과 압전특성을 조사하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 AE센서용 전단모드 압전소자의 설계

AE센서의 구동은 압전 직접효과를 이용하여 기계적 신호를 탐지하여 전기적인 신호로 바꾸어주는 일반적인 방식이 이용되고 있기 때문에 우수한 압전 특성을 가지는 압전세라믹스가 요구되고 있다. 압전세라믹스용 재료로는 PMN, LiNbO_3 , PZT 등이 있으나 PZT세라믹스가 다른 재료에 비하여 가장 우수한 특성을 가지고 있기 때문에 일반적으로 PZT세라믹스를 사용하고 있으며 PMN이나 LiNbO_3 과 같은 재료는 고온이나 다른 특수한 상황에서 주로 사용되어지고 있다. 본 연구에서는 무연 압전세라믹스와 유사한 유전상수 값과 압전정수 d_{33} 를 가지는 PZT4세라믹스를

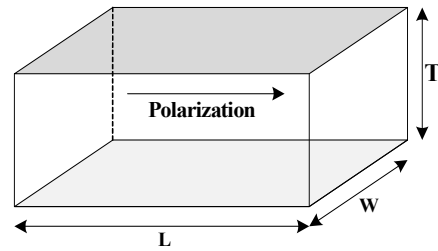


Fig. 1. Specification of thickness shear mode piezoelectric device.

Table 1. Physical properties of PZT4.

Material constants	P Z T 4
Density (kg/cm^3)	7500
$s_{11}^E (10^{-12} \text{N/m}^2)$	12.3
$s_{12}^E (10^{-12} \text{N/m}^2)$	-4.05
$s_{13}^E (10^{-12} \text{N/m}^2)$	-5.31
$s_{33}^E (10^{-12} \text{N/m}^2)$	15.5
$s_{44}^E (10^{-12} \text{N/m}^2)$	39.0
$d_{15} (10^{-12} \text{C/m}^2)$	496
$d_{31} (10^{-12} \text{C/m}^2)$	-123
$d_{33} (10^{-12} \text{C/m}^2)$	289

적용하여 시뮬레이션 하였다[5].

AE센서의 시뮬레이션에 있어 압전소자의 진동모드는 전기기계결합 계수가 높은 전단모드를 사용하였다. 또한, 시뮬레이션에서 얻어진 공진 및 반공진주파수를 이용하여 k_{15} 를 계산하였다. 다음 (1)식은 k_{15} 의 계산에 적용된 식이다 [6].

$$k_{15}^2 = \frac{\pi}{2} \frac{f_r}{f_a} \cot\left(\frac{\pi}{2} \frac{f_r}{f_a}\right) \quad (1)$$

(1)식을 사용하여 0.5이상의 우수한 전기기계결합계수를 가지며 두께 전단모드를 갖는 압전소자를 설계하였으며 유사한 체적을 갖는 경방향모드 압전소자를 제작하여 변위와 전기기계결합계수를 비교하였다.

AE센서 적용을 위한 두께 전단모드를 갖는 압전소자는 그림 1과 같은 형태로 설계하였으며, 유한요소 해석 프로그램인 ATILA를 사용하여 세로(W)6 mm, 두께(T)8 mm를 고정 후 L/T 의 비율의 관점에서 가로(L)의 변화에 따른 공진주파수, 변위 그리고 전기기계결합계수의 변화에 대하여 연구가 이루어졌다.

Table 2. Resonant frequency, displacement and k_{15} as a function of L/T .

L/T	Resonant Frequency [KHz]	Anti-Resonant Frequency [KHz]	Maximum Displacement [m]	k_{15}	Volume [mm ³]
0.5	249	260	3.61×10^{-8}	0.311	192
1	150	181	6.23×10^{-8}	0.598	384
1.2	137	149	3.97×10^{-8}	0.428	460
1.4	127	133	3.44×10^{-8}	0.326	537
1.6	118	123	1.29×10^{-8}	0.310	614
1.8	110	116	1.21×10^{-8}	0.348	691
2	103	108	5.04×10^{-8}	0.330	768

3. 결과 및 고찰

길이와 두께의 비는 L/T ($8 \text{ mm}/8 \text{ mm}$)= 1을 기준으로 0.5, 1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2 배로 변화시키고 그에 따른 변위와 압전특성을 조사하였다. 시뮬레이션에 적용된 재료는 PZT4이며 표 1은 PZT4의 물성이다. 공진주파수에 따른 동작모드를 확인하기 위하여 압전소자 상단에 1 V의 전압을 인가해주었다. 그림 2는 유한요소해석 프로그램인 ATILA를 사용하여 그림 1과 같이 설계하여 전단모드로 동작하는 압전소자의 그림으로써 전단모드에 대한 이론과 같이 좌우로 변형이 일어나며 동작하고 있는 것을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다.

표 2는 압전소자의 L/T 의 비에 따른 공진주파수, 변위, 체적 그리고 전기기계결합계수의 값을 나타낸 것이다. L/T 비율이 0.5에서 1로 증가함에 따른 체적의 증가로 인하여 공진 및 반공진주파수는 감소하는 경향이 나타났으며 $L/T=1$ 일 때 $6.23 \times 10^{-8} \text{ [m]}$ 의 변위와 0.598의 k_{15} 가 되는 우수한 특성 값을 얻었다.

그림 3은 L/T 의 변화에 따른 압전소자의 변위 궤적을 나타낸 것이다. 압전소자의 변위는 L/T 의 증가에 따라 상승하였으며 L/T 의 비가 1에서 최대의 변위 값에 도달 후 비율의 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이 결과로부터 길이와 두께의 비 L/T 가 1인 압전소자가 두께 전단모드로 동작하는 AE센서용 압전소자로 최적의 것으로 사료된다.

그림 4는 최적의 특성으로 사료되는 $L/T=1$ 일 때의 임피던스 커브이다. 여기서 임피던스 커브는 공진 및 반공진 주파수 값이 150 kHz와 181 kHz에서 각각 나타났다.

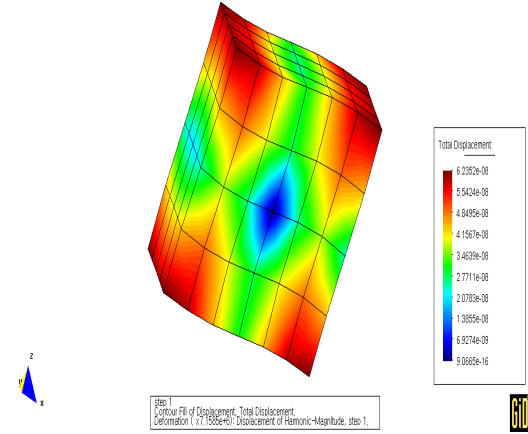
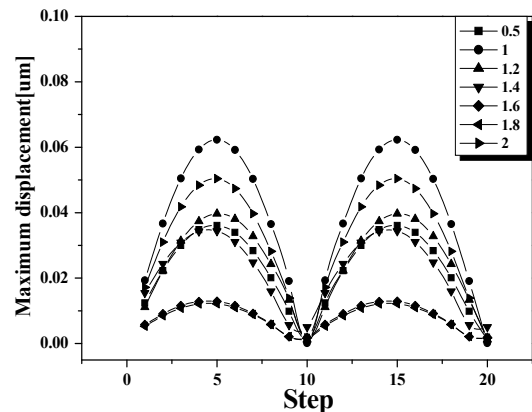
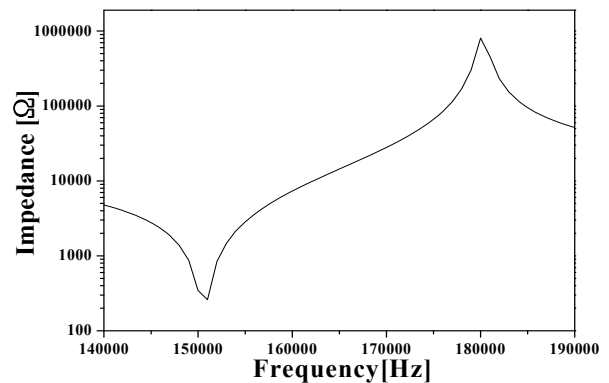
**Fig. 2.** Simulation of thickness shear mode piezoelectric device.**Fig. 3.** Displacement trajectory of thickness shear mode piezoelectric device.**Fig. 4.** Impedance curve of simulated specimen ($L/T=1$).

Table 3. Resonant frequency, displacement and k_p of radial vibration mode piezoelectric device.

L×T (mm)	Resonant Frequency (kHz)	Anti- Resonant Frequency (kHz)	Maximim Displace- ment(m)	k_p	Volume (mm ³)
10.1×5.05	205	239	9.62×10^{-9}	0.58	404.59

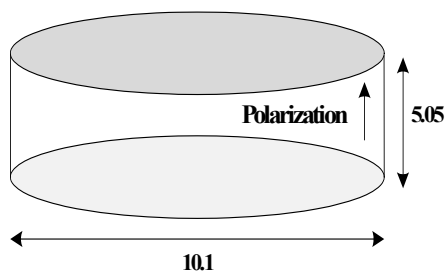
**Fig. 5.** Specification of radial vibration mode piezoelectric device.

그림 5는 유사한 체적일 때의 경방향모드와 두께 전단모드의 변위 및 전기기계결합계수를 비교하기 위하여 설계된 경방향모드를 갖는 압전소자의 설계 모델이다. 경방향모드의 설계에는 두께 전단모드와 동일하게 PZT4의 물성을 적용하였으며 같은 조건에서의 특성값을 비교하기 위하여 동일한 1 V의 전압을 인가하여 주파수 및 변위 그리고 전기기계결합계수 등을 조사하였다. 전단모드 동작 압전소자의 체적을 384 mm^3 , 경방향 모드 소자의 체적을 404 mm^3 로 유사하게 설계하여 시뮬레이션 하였다.

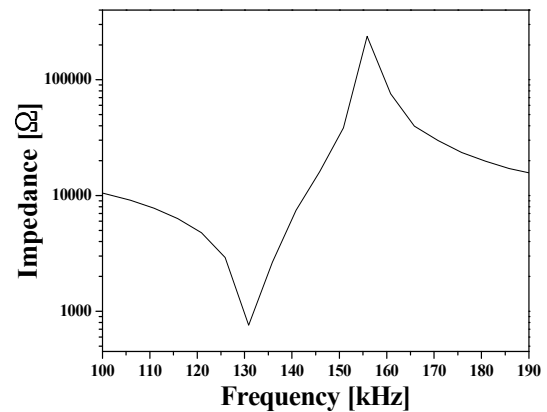
(2)식은 경방향모드의 k_p 의 계산에 적용된 식 이다 [6].

$$k_p = \sqrt{\frac{f_r}{f_a - f_r}} \times 0.395 + 0.574 \quad (2)$$

표 3은 경방향모드 압전소자의 주파수 및 변위, 전기기계결합계수, 체적을 나타낸다. 가장 우수한 특성인 $L/T = 1 (8 \text{ mm}/8 \text{ mm})$ 의 두께 전단모드 압전소자와 경방향모드 압전소자를 비교할 때 두께 전단모드 압전소자의 최대 변위, 전기기계결합계수가 더 우수한

Table 4. Physical properties of fabricated specimen ($\frac{L}{T}=1$).

	f_r [kHz]	f_a [kHz]	C[nF]	k_{15}
piezoelectric element	131.92	157.42	1.22	0.584

**Fig. 6.** Impedance curve of fabricated specimen ($\frac{L}{T}=1$).

값을 보여줌에 따라 유사한 체적일 때 경방향모드에 비하여 두께 전단모드가 AE센서용 압전소자 적용에 더 적합하다고 사료된다.

표 4는 가로와 높이의 최적 비로 사료되는 $L/T = 1$ 인 두께 전단모드 압전소자를 제작하여 특성을 측정한 결과이고 k_{15} 는 시뮬레이션에서와 유사한 값이 나타남을 확인하였다.

공진 및 반공진 주파수의 경우 시뮬레이션과 약간의 오차가 있었으나 이것은 시뮬레이션에 적용된 물성값과 압전소자 제작에 사용된 물성값의 차이 및 수제작으로 인한 가공정밀도의 차이 등에 따른 것으로 사료된다.

그림 6은 제작된 압전소자의 임피던스 커브를 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 두께 전단모드로 동작하는 AE센서용 압전소자의 가장 우수한 변위 및 압전특성 조건을 찾고자 세로(W)와 두께(T)를 각각 6 mm, 8 mm로

고정 후 길이 대 두께(L/T)의 비를 변화시켜 가며 압전특성에 대한 시뮬레이션을 한 후 압전소자를 제작하여 특성을 측정하였다. 물성은 PZT4의 값을 적용하였고 유한요소 해석 프로그램인 Atila 로 시뮬레이션을 하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 두께 전단모드를 갖는 압전소자의 길이 대 두께의 비가 L/T (8 mm/8 mm)= 1일 때 가장 우수한 변위와 전기기계결합계수 값이 나타나는 것을 확인하였으며, 이 비율의 증감에 따라 변위 및 전기기계결합계수 값은 감소하는 경향을 보였다.

2. 유사한 체적을 가지는 경방향모드 압전소자와 두께 전단모드 압전소자를 비교할 때 두께 전단모드에서 더 우수한 변위 (6.23×10^{-8}) 값과 전기기계결합계수($k_{15} = 0.598$) 값이 나타났다.

3. 최적의 길이 대 두께의 비인 L/T= 1로 제작된 압전소자의 공진 및 반공진 주파수의 경우 시뮬레이션과 약간의 오차가 있었으나 이것은 시뮬레이션에 적용된 물성값과 압전소자 제작에 사용된 물성값의 차이, 가공정밀도 등에 따른 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 전력산업원천기술개발사업(과제번호:2010T100100816)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] J. Hong, Y. Jeong, and J. Yoo, *J. KIEEME*, **13**, 502 (2000).
- [2] J. Yoo, G. Lee, and J. I. Hong, *J. KIEEME*, **20**, 218 (2007).
- [3] B. Kim and Y. Kim, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, **12**, 4 (1992).
- [4] H. Manabu, H. Takuya, T. Hiroaki, and T. Takaaki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **49**, 09MD04 (2010).
- [5] Z. Ruzhong, W. Min, M. Bing, F. Jian, and L. Tao, *J. Phys. Chem. Solids.*, **70**, 750 (2009).
- [6] P. Jue, C. Jinghong, L. Haosu, H. Tianhou, H. Haiqing, and L. D. Jeong, *Solid. State. Commun.*, **130**, 53 (2004).