

두께와 직경 비에 따른 두께진동모드 압전소자의 공진 변위 궤적

정영호^{1,a}

¹ 충주대학교 전기공학과

Trajectory of Resonant Displacement of Thickness Vibration Mode Piezoelectric Devices According to Diameter/Thickness Ratio

Yeongho Jeong^{1,a}

¹ Department of Electrical Engineering, Chungju National University, Chungju 380-702, Korea

(Received January 11, 2012; Revised January 17, 2012; Accepted January 20, 2012)

Abstract: In this study, thickness vibration mode piezoelectric devices for AE sensor application were simulated using ATILA FEM program, and then fabricated. Trajectory resonant displacement and electro mechanical coupling factors of the piezoelectric devices were investigated. The simulation results showed that excellent displacement and electro mechanical coupling factor was obtained when the ratio of diameter/thickness(Φ/T) was 0.75. The piezoelectric device of $\Phi/T=0.75$ exhibited the optimum values of $f_r=183$ kHz, displacement= 4.44×10^{-7} [m], $k_{33}=0.69$, which were suitable for the application of AE sensor piezoelectric device.

Keywords: AE sensor, Thickness mode, Piezoelectric device

1. 서론

음향방출 (acoustic emission)은 탄성체 표면이나 내부의 국부에서 불연속적이고 돌발적이며 과도적인 운동이 생길 때 그 에너지가 탄성파로 방출되는 현상이며, 물질 내부의 급격하고도 과도적인 왜형에너지의 변화로 인해 탄성파 또는 충격파가 방출되는 현상이다 [1]. 음향방출의 원천에서 발생한 탄성파의 진동 주파수는 수 KHz에서 수 MHz까지 광범위하다. 일반적으로 AE (acoustic emission)센서는 음향방출로 인해 발생하는 탄성파의 동적 운동을 감지하여 이를 전기적 신호로 변환하는데 사용되는 센서이다. 음향검출 기술은 각종 물체가 파괴되거나 파괴 직전의 응력 집중 시에 발생하는 초음파를 탐지하여 전기설비, 기

계장치 등의 손상 사고를 방지하는 일종의 비파괴 안전보호 기술이다 [2].

최근, 특정 주파수에서 감도가 높은 고감도 AE센서를 개발하고자 두께진동모드 압전소자를 제작하여 그에 관한 변위 및 압전특성을 조사하여 발표한 연구결과가 있다 [3]. 압전착화소자, 초음파진동자 등에 두께진동모드를 이용하는 연구가 활발히 진행되어 왔으나 두께진동모드를 이용한 AE센서에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 두께진동모드의 전기기계결합계수 K_{33} 는 두께진동모드의 전기기계결합계수 K_{15} 에 필적하거나 조성에 따라서는 더 클 수 있기 때문에 두께진동모드를 이용한 AE센서 개발 가능성을 조사하고자 한다. 유한요소 프로그램인 ATILA (재우기술)로 AE센서용 압전소자를 시뮬레이션하여 압전소자의 직경과 두께 비(Φ/T)의 변화에 따른 공진 주파수에서의 최대 변위값과 압전특성을 조사하고 압전소자를 제작하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

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

2. 실험 방법

2.1 AE센서용 두께진동모드 압전소자의 설계

AE센서의 구동은 압전 직접효과를 이용하여 기계적 신호를 탐지하여 전기적인 신호로 바꾸어주는 일반적인 방식이 이용되고 있기 때문에 우수한 압전 특성을 가지는 압전세라믹스를 요구하고 있다. 사용되는 재료로는 PMN, LiNbO₃, PZT 등이 있으나 PZT 세라믹스가 다른 재료에 비하여 가장 우수한 특성을 가지고 있기 때문에 일반적으로 PZT세라믹스를 사용하고 있으며 PMN (Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃)이나 LiNbO₃과 같은 재료는 고온이나 다른 특수한 상황에서 주로 사용되고 있다. 유한요소프로그램인 ATILA를 사용하여 압전소자를 시뮬레이션하였고, 본 연구에서는 PZT4 세라믹스의 물성을 적용하여 시뮬레이션을 하였다 [4]. 소자의 제작은 소프트 PZT (Pb(Zr,Ti)O₃)계 조성을 사용하였다.

또한, k₃₃는 시뮬레이션에서 얻어진 공진 및 반공진 주파수를 이용하여 계산하였다. 다음 식(1)은 k₃₃의 계산에 적용된 식이다 [5].

$$k_{33}^2 = \frac{\pi f_r}{2 f_a} \tan\left(\frac{\pi f_a - f_r}{2 f_a}\right) \tag{1}$$

식 (1)을 사용하여 0.5 이상의 우수한 전기기계결합 계수를 가지며 두께방향진동모드를 갖는 압전소자를 설계하였다. AE센서 적용을 위한 두께방향 진동모드를 갖는 압전소자는 그림 1과 같은 원통형의 형태로 설계하였다.

표 1은 PZT4의 물성을 나타낸다.

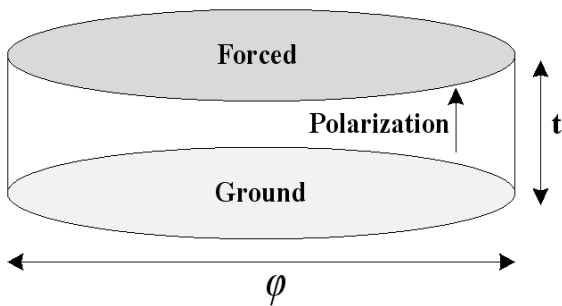


Fig. 1. Specification of thickness vibration mode piezoelectric device.

Table 1. Physical properties of PZT4.

Material constants	PZT4
Density(kg/cm ³)	7,500
s ^E ₁₁ (10 ⁻¹² N/m ²)	12.3
s ^E ₁₂ (10 ⁻¹² N/m ²)	-4.05
s ^E ₁₃ (10 ⁻¹² N/m ²)	-5.31
s ^E ₃₃ (10 ⁻¹² N/m ²)	15.5
s ^E ₄₄ (10 ⁻¹² N/m ²)	39.0
d ₁₅ (10 ⁻¹² C/m ²)	496
d ₃₁ (10 ⁻¹² C/m ²)	-123
d ₃₃ (10 ⁻¹² C/m ²)	289

3. 결과 및 고찰

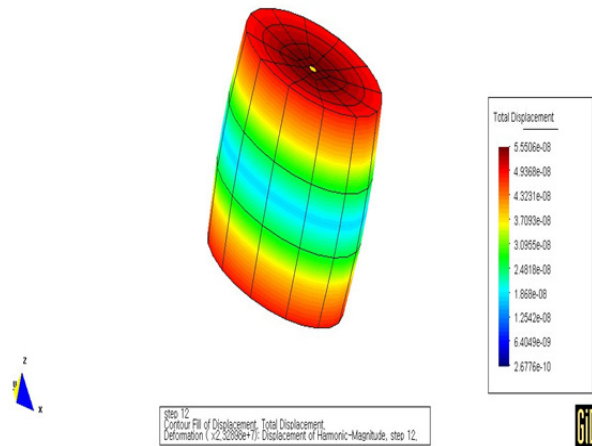


Fig. 2. Simulation of thickness vibration mode piezoelectric device.

그림 2는 ATILA 시뮬레이션을 통하여 구현한 두께방향 진동모드로 동작하는 압전소자의 진동 형태이다. 시뮬레이션의 결과 정상적으로 두께 진동모드로 동작하는 결과를 확인할 수 있었다.

표 2, 3은 두께를 5.05 mm, 8 mm로 고정하고 직경을 변화시킬 때 이에 따른 두께방향 진동모드 압전소자의 공진주파수, 변위 및 k₃₃를 나타낸 것이다. 직경의 변화에 따른 시뮬레이션의 결과만으로는 특성 측정의 정확도가 부족하기 때문에 두께의 변화에 따른 압전소자의 변위특성을 조사하였다. 표 4는 직경을 10 mm로 고정한 후 두께를 변화시켜 직경/두께비의 변화에 따른 두께방향진동모드 압전소자의 공진주파수, 변위 및 k₃₃를 나타낸 것이다.

Table 2. Resonant frequency, displacement and k_{33} as a function of Φ/T (thickness:5.05 mm).

Diameter [φ]	Thickness [T]	ϕ/T	Resonant Frequency [KHz]	Anti-Resonant Frequency [KHz]	Maximum Displacement [m]	k_{33}	Volume [mm ³]
2.5	5.05	0.50	298	394	2.38×10^{-7}	0.691	24
3.8	5.05	0.75	290	385	2.66×10^{-7}	0.686	101
5.05	5.05	1.00	277	364	2.05×10^{-7}	0.609	225
7.55	5.05	1.50	240	292	2.03×10^{-7}	0.592	404
10.1	5.05	2.00	200	240	1.50×10^{-7}	0.574	629
12.6	5.05	2.50	169	200	1.86×10^{-7}	0.562	909

Table 3. Resonant frequency, displacement and k_{33} as a function of Φ/T (thickness:8 mm).

Diameter [φ]	Thickness [T]	ϕ/T	Resonant Frequency [KHz]	Anti-Resonant Frequency [KHz]	Maximum Displacement [m]	k_{33}	Volume [mm ³]
2	8	0.25	191	251	4.03×10^{-7}	0.686	25
4	8	0.50	188	246	3.58×10^{-7}	0.682	100
6	8	0.75	183	243	4.44×10^{-7}	0.695	226
8	8	1.00	175	230	4.43×10^{-7}	0.686	401
10	8	1.25	164	207	3.44×10^{-7}	0.649	628
12	8	1.50	151	184	1.90×10^{-7}	0.610	904

Table 4. Resonant frequency, displacement and k_{33} as a function of Φ/T (diameter:10 mm).

Diameter [φ]	Thickness [T]	ϕ/T	Resonant Frequency [KHz]	Anti-Resonant Frequency [KHz]	Maximum Displacement [m]	k_{33}	Volume [mm ³]
10	20	0.50	75	99	3.65×10^{-7}	0.690	1570
10	13.3	0.75	110	146	6.72×10^{-7}	0.694	1044
10	10	1	140	184	5.54×10^{-7}	0.686	785
10	5	2	202	242	1.48×10^{-7}	0.590	392
10	3	3.33	220	258	1.43×10^{-7}	0.561	235
10	2	5	226	262	1.13×10^{-7}	0.545	157
10	1	10	228	264	1.04×10^{-7}	0.543	78

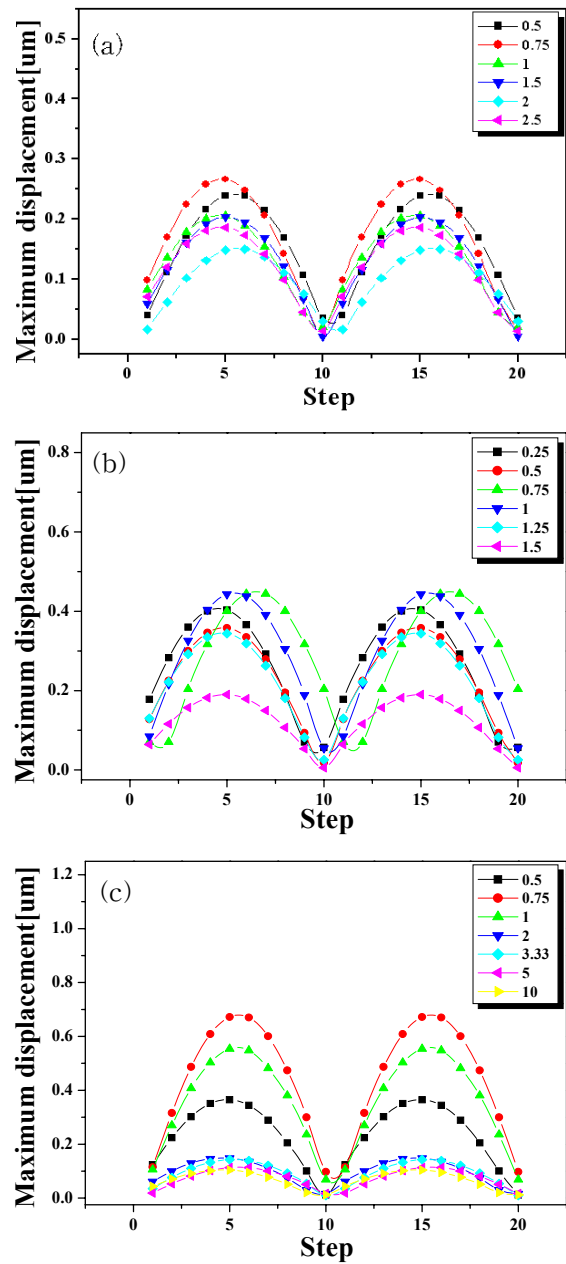


Fig. 3. Displacement trajectory of thickness vibration mode piezoelectric device (a) thickness= 5.05, (b) thickness= 8 mm, (c) diameter=10 mm.

그림 3(a), (b)는 두께를 5.05 mm, 8 mm로 고정 후 직경비의 변화에 따른 두께방향진동모드 압전소자의 변위궤적이다. 이 그림에서 횡축의 Step이란 변위의 단계를 나타내는 것으로써 Step 0~10은 압전소자를 공진주파수에서 구동할 때 반파장 ($\lambda/2$) 동안의

변위의 단계이고 Step 10~20은 나머지 반과장 동안의 변위의 단계를 나타낸다. 시뮬레이션 결과, 변위의 오차는 각각 어느 정도 있지만 두 가지 시뮬레이션 모두에서 $\Phi/T = 0.75$ 의 비율을 보유한 압전소자의 변위가 가장 크게 나타나는 것을 확인하였다. 이 결과로부터 $\Phi/T = 0.75$ 가 최적의 비율로 사료된다. 또한 시뮬레이션으로부터 두께를 8 mm로 고정하였을 때 5.05 mm일 때에 비하여 전체적으로 우수한 변위가 나타났다.

그림 3(c)는 직경을 고정한 후 두께의 변화에 따른 압전소자의 변위특성이다. 시뮬레이션의 결과 직경뿐만 아니라 두께의 변화시켰을 경우에도 $\Phi/T = 0.75$ 의 비율에서 가장 우수한 변위 특성이 나타나는 것을 확인하였다. 시뮬레이션 결과를 활용하여 압전소자를 제작하였다. 압전소자의 제작은 3가지 시뮬레이션의 결과 가장 우수한 변위특성을 나타낸 두께 8 mm 일 때 직경 6 mm ($\Phi/T = 0.75$)인 규격으로 하였다.

여기서, $\Phi/T = 0.75$ 일 때 두께진동모드에서 우수한 변위특성이 나타나는 이유는 전속밀도 D 가 일정할 때 왜형 S 와 응력 T 의 관계 $S_3 = s_{33}T_3$ 에서, 같은 응력에서 최대 왜형이 발생할 수 있는 적절한 조건이 $\Phi/T = 0.75$ 에서 형성되기 때문으로 생각된다.

그림 4는 최적의 변위특성을 갖는다고 사료되는 두께 8 mm일 때 $\Phi/T = 0.75$ 의 비율인 압전소자에 대한 시뮬레이션 임피던스커브 그래프이다. 이때 공진 및 반공진 주파수는 각각 183 kHz, 243 kHz로 나타났다.

그림 5과 표 5는 시뮬레이션의 결과와 시제작 압전소자와의 비교를 위하여 최적의 사이즈로 사료되는 두께 8 mm일 때 $\Phi/T = 0.75$ 비율인 압전소자를 제작한 후 측정된 임피던스커브 그래프이다. 이때 측정된 공진 및 반공진 주파수는 각각 162 kHz, 207 kHz로 나타났으며 전기기계결합계수는 0.66으로 나타났다. 이 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 보면 약간의 오차가 있는데 이는 시뮬레이션 소자의 물성과 실제 제작 소자의 물성 차이, 압전소자의 가공정밀도 등으로 생긴 것으로 사료된다. 두 조성의 물성이 다름에 따라 같은 소자를 만들더라도 공진 및 반공진 주파수에 차이가 있게 되며 이 결과는 유사한 다른 실험에서도 시뮬레이션과 실제 제작된 소자의 주파수에서 차이를 보였다 [6,7].

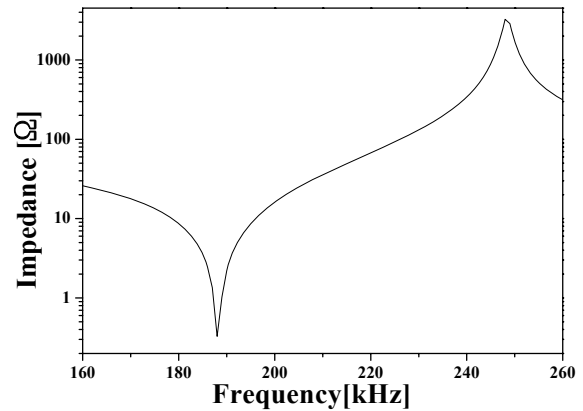


Fig. 4. Impedance characteristic curve of simulated specimen ($\Phi/T = 0.75$).

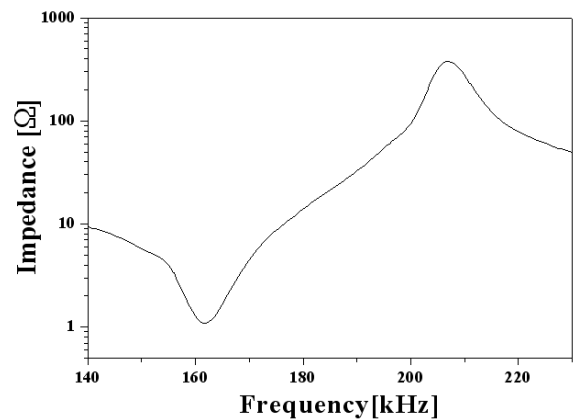


Fig. 5. Impedance characteristic curve of fabricated specimen ($\Phi/T = 0.75$).

Table 5. Physical properties of fabricated specimen ($\Phi/T = 0.75$).

	f_r [kHz]	f_a [kHz]	C [nF]	k_{33}
Piezoelectric element	162.39	207.39	0.063	0.660

4. 결론

본 연구에서는 두께와 직경비에 따른 두께진동모드 AE센서용 압전소자의 가장 우수한 변위 및 압전특성 조건을 조사하고자 공진 및 반공진주파수, 변위, 전기기계결합계수, 체적을 비교하였다. 압전소자의 물성은 PZT4의 값을 적용하였으며 유한요소해석프로그램인

ATILA를 적용하여 시뮬레이션으로 최적의 비율을 찾은 후 압전소자를 제작하여 그 특성을 비교하였다.

1. 두께 진동모드를 갖는 압전소자의 직경과 두께의 비가 $\Phi/T=0.75$ 일 때 가장 우수한 변위와 전기기계결합계수 값이 나타나는 것을 확인하였으며, 이 비율의 증가에 따라 변위 및 전기기계결합계수 값은 감소하는 경향을 보였다.

2. $\Phi/T=0.75$ 비율의 압전소자를 제작한 후 시뮬레이션 결과와 특성을 비교할 때 약간의 오차가 존재하였다. 공진주파수, 반공진주파수, 변위 그리고 전기기계결합계수는 시뮬레이션된 소자의 경우 각각 183 kHz, 243 kHz, 4.44×10^{-7} , 0.69으로 나타났고, 제작된 압전소자의 경우 각각 162 kHz, 207 kHz, 0.66으로 나타났다. 이 오차는 시뮬레이션과 제작된 소자의 물성의 차이, 가공정밀도 등으로 인한 것으로 생각된다.

3. 이러한 규격의 두께진동모드 소자는 AE센서로 응용이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

“이 논문은 2011년도 충주대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.”

REFERENCES

- [1] Annual Book of ASTM Standards, E610-89a, “Standard Terminology Relating to Acoustic Emission”, 269 (1990).
- [2] J. Yoo, G. Lee, and J. I. Hong, *J. KIEEME*, **20**, 218 (2007).
- [3] M. Park, J. Yoo, J. Hong, and Y. Jeong, *J. KIEEME*, **24**, 463 (2011).
- [4] Z. Ruzhong, W. Min, M. Bing, F. Jian, and L. Tao, *J. Phys. Chem. Solids*, **70**, 750 (2009).
- [5] P. Jue, C. Jinghong, L. Haosu, H. Tianhou, H. Haiqing, and L. D. Jeong, *Solid State Commun.*, **130**, 53 (2004).
- [6] J. Kim, J. Lee, and Y. Cho, *the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, **10**, 1211 (2005).
- [7] H. Shin, J. Kim, and J. Im, *J. Ceram. Soc.*, **48**, 648 (2011).