

음향방출 센서 응용을 위한 결합진동 모드 압전소자의 공진 변위 궤적

정영호¹, 신상훈², 류주현^{2,a}

¹ 한국교통대학교 전기공학과

² 세명대학교 전기공학과

Trajectory of Resonant Displacement of Coupled Vibration Mode Piezoelectric Devices for AE Sensor Application

Yeong-Ho Jeong¹, Sang-Hoon Shin², and Ju-Hyun Yoo^{2,a}

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

² Department of Electrical Engineering, Semyung University, Jecheon 390-711, Korea

(Received January 9, 2013; Revised January 17, 2013; Accepted January 21, 2013)

Abstract: In this study, coupled mode piezoelectric devices for AE sensor application with excellent displacement and piezoelectric characteristics were simulated using ATILA FEM program, and then fabricated. Displacements and electromechanical coupling factors of the piezoelectric devices were investigated. The simulation results showed that excellent displacement and electromechanical coupling factor were obtained when the ratio of diameter/thickness was 1.0. The piezoelectric device of $\phi/T = 1.0$ exhibited the optimum values of $f_r = 406$ kHz, displacement = 6.11×10^{-8} [m], $k_{\text{eff}} = 0.648$. The results show that the coupled vibration mode piezoelectric device is a promising candidate for the application of AE sensor piezoelectric device.

Keywords: AE sensor, Coupled mode, Piezoelectric devices, PZT, ATILA

1. 서 론

음향방출 (acoustic emission)은 탄성체 표면이나 내부의 국부에서 불연속적이고 돌발적이며 과도적인 운동이 생길 때 그 에너지가 탄성파로 방출되는 현상

이며, 물질 내부의 급격하고도 과도적인 왜형에너지의 변화로 인해 탄성파 또는 충격파가 방출되는 현상이다 [1]. 이 기술의 핵심 역할을 하는 AE 센서는 사후 진단보다 예방 진단에 활용이 가능하다는 점에서 주목을 받고 있으며 결합 탐지의 감도가 매우 높을 뿐만 아니라 대상물의 구조나 결합의 크기에 구애받지 않고, 결합을 탐지할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이런 장점으로 인하여 전력설비에서 발생하는 부분방전을 탐지하거나 기계 장치의 가공 과정을 감시하는 등에 AE 센서를 활용하는 연구가 이루어지고 있다 [2,3]. AE 센서의 핵심인 감지소자는 압전 세라믹스를

a. Corresponding author: juhyun57@semyung.ac.kr

Copyright ©2013 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

사용하고 있으며, AE 센서의 종류로는 공진형 (resonant type) 센서와 광대역 (wide band type) 센서가 있다. 공진형 센서는 특정한 주파수에서 감도가 높은 반면에, 광대역 센서는 감도가 낮지만 넓은 주파수 범위에서 신호탐지가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 기계 장치 등의 안전 검사와 같은 용도로 사용하기 위해서는 특정한 주파수에서 감도가 높은 공진형 센서가 더 적합한 것으로 알려져 있다 [4]. 압전소자의 특성을 나타내는 중요한 파라미터 중 하나가 전기 기계 에너지 변환 효율을 나타내는 전기기계결합계수 (electromechanical coupling factor)이다. 원통형 압전소자의 경우 직경과 두께의 비에 따라 경방향 진동모드 또는 두께방향 진동모드가 나타난다 [5]. 일반적으로 두께 방향 모드의 전기기계결합계수 K_{33} 는 경방향모드의 전기기계결합계수 k_p 보다 크므로, 두께 방향의 전기기계결합계수가 큰 압전소자를 제작하면 에너지 변환 전기기계결합계수가 우수하게 된다. 이런 장점으로 인하여 두께 방향 진동을 이용한 압전소자에 관한 연구가 이루어지고 있다 [6]. 그러나 두께 방향 진동모드를 이용 소자의 두께가 커지는 단점을 가지고 있다. 따라서 소자의 두께를 작게 하면서 요구하는 압전 특성을 크게 하기 위하여 두께 방향 진동모드와 경방향 진동이 함께 나타나는 결합한 진동모드를 이용한 AE 센서에 관한 연구가 체계적으로 필요하다. 본 연구에서는 결합진동 모드를 이용하여 AE 센서에 응용할 압전소자를 제작하고자 유한요소 프로그램인 ATILA (재우기술)로 압전소자를 시뮬레이션하여 공진 주파수에서 직경과 두께 비의 변화에 따른 압전소자의 최대 변위 값과 압전 특성을 조사하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 AE 센서용 결합진동 모드 압전소자의 설계

AE 센서의 구동은 압전 직접효과를 이용하여 기계적 신호를 탐지하여 전기적인 신호로 바꾸어 주는 일반적인 방식이 이용되고 있기 때문에 우수한 압전 특성을 가지는 압전 세라믹스를 요구하고 있다. 사용되는 재료로는 PMN, LiNbO₃, PZT 등이 있으나 PZT 세라믹스가 다른 재료에 비하여 가장 우수한 특성을 가지고 있기 때문에 일반적으로 PZT 세라믹스를 사용하고 있으며 PMN이나 LiNbO₃과 같은 재료는 고온이나 다른 특수한 상황에서 주로 사용되어지고 있다.

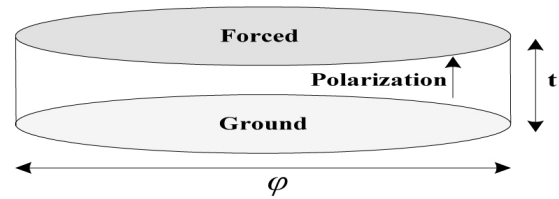


Fig. 1. Specification of piezoelectric devices.

Table 1. Physical properties of PZT4.

Material constants	PZT4
Density (kg/cm³)	7500
s^E₁₁(10⁻¹²N/m²)	12.3
s^E₁₂(10⁻¹²N/m²)	-4.05
s^E₁₃(10⁻¹²N/m²)	-5.31
s^E₃₃(10⁻¹²N/m²)	15.5
s^E₄₄(10⁻¹²N/m²)	39.0
d₁₅(10⁻¹²C/m²)	496
d₃₁(10⁻¹²C/m²)	-123
d₃₃(10⁻¹²C/m²)	289

본 연구에서는 유한요소 해석 프로그램인 ATILA에서 지원되는 세라믹스가 PZT 계열만 지원이 되어, 차세대 조성 세라믹스인 무연 압전 세라믹스와 유사한 유전 상수 값과 압전정수 d_{33} 를 가지는 PZT4 세라믹스를 적용하여 시뮬레이션하였다 [7]. AE 센서의 시뮬레이션에 있어 압전소자의 진동모드는 경방향 진동모드와 두께 방향 진동모드가 결합하여 나타나는 결합 진동 모드를 사용하였다. 또한, 시뮬레이션에서 얻어진 공진 및 반공진 주파수를 이용하여 k_{33} , k_{eff} 와 k_p 를 계산하였다. 다음 식 (1)은 이들의 계산에 적용된 식이다 [8].

$$\begin{aligned}
 k_{33}^2 &= \frac{\pi}{2} \frac{f_r}{f_a} \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{f_a - f_r}{f_a}\right) \\
 k_{eff} &= \sqrt{\frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2}} \\
 \frac{1}{k_p^2} &= 0.395 \times \frac{f_r}{f_a - f_r} + 0.574
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

식 (1)을 사용하여 0.5 이상의 우수한 전기기계결합 계수를 가지며 결합진동 모드를 갖는 압전소자를 그림 1과 같은 원통형 형태로 설계하였다. 표 1은 PZT4의 물성을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 ATILA를 사용하여 구현한 결합진동 모드로 동작하는 압전소자의 진동 형태이다. 시뮬레이션 결과 압전소자는 장구 모양의 형태에서 경방향과 두께방향의 결합진동 모드로 동작하는 것을 확인할 수 있었다.

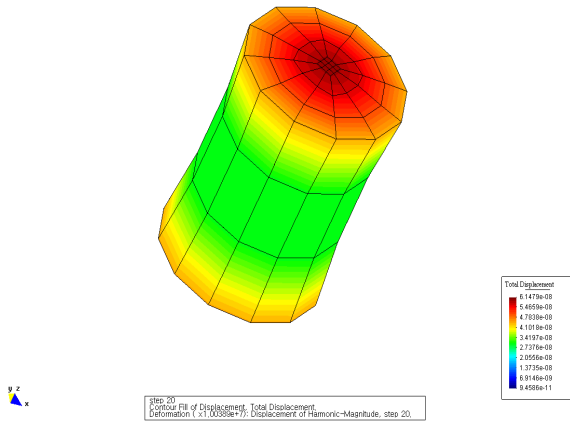


Fig. 2. Simulation of coupled vibration mode piezoelectric device.

표 2는 두께를 3.3, 3.45, 3.7 mm로 고정하고 직경을 변화시킬 때 이에 따른 결합진동 모드 압전소자의 공진주파수, 변위 및 k_{33} 을 나타낸 것이다.

그림 3은 두께를 3.3 mm, 3.45 mm로 고정 후 직경비의 변화에 따른 결합진동 모드 압전소자의 변위 궤적이다. 시뮬레이션의 결과 변위의 오차는 각각 어느 정도 있지만, 두께 3.3 mm 시뮬레이션에서 $\phi/T=1.5$ 의 비율을 보유한 압전소자의 변위가 가장 크게 나타났지만, k_{eff} 가 작게 나타났다, 그러나 두께 3.45 mm이고, $\phi/T=1.0$ 일 때 k_{eff} 와 변위가 둘 다 우수한 특성이 나타났다. 또한 두께를 3.7 mm로 고정된 후 ϕ/T 를 변화시켰을 때, 역시 $\phi/T=1.0$ 일 때 변위가 $5.67 \times 10^{-8}(m)$ 로 큰 값을 나타냈지만 두께 3.45 mm 일 때 보다는 작은 값을 나타냈다.

Table 2. Resonant frequency, displacement and k_p of coupled vibration mode piezoelectric device as a function of Φ/T (thickness= (a) 3.3, (b) 3.45, (c) 3.7 mm).

Diameter [φ]	Thickness [T]	φ/T	Resonant Frequency [KHz]	Anti-Resonant Frequency [KHz]	Maximum Displacement [m]	k_{33}	k_p	k_{eff}	Volume [mm ³]
1.65	3.3	0.5	455	602	3.72×10^{-8}	0.692	0.67	0.655	7
2.475	3.3	0.75	444	587	3.45×10^{-8}	0.691	0.674	0.654	16
3.3	3.3	1	424	557	4.59×10^{-8}	0.686	0.669	0.648	28
4.95	3.3	1.5	367	445	7.02×10^{-8}	0.605	0.594	0.566	63
6.6	3.3	2	307	366	5.49×10^{-8}	0.584	0.575	0.544	113
8.25	3.3	2.5	258	305	4.70×10^{-8}	0.572	0.564	0.533	176

Diameter [φ]	Thickness [T]	φ/T	Resonant Frequency [KHz]	Anti-Resonant Frequency [KHz]	Maximum Displacement [m]	k_{33}	k_p	k_{eff}	Volume [mm ³]
1.752	3.45	0.5	436	576	4.49×10^{-8}	0.691	0.674	0.653	8
2.5875	3.45	0.75	424	563	5.33×10^{-8}	0.695	0.678	0.658	18
3.45	3.45	1	406	533	6.11×10^{-8}	0.685	0.669	0.648	32
5.175	3.45	1.5	351	427	6.11×10^{-8}	0.609	0.598	0.569	73
6.9	3.45	2	293	350	4.98×10^{-8}	0.586	0.577	0.547	129
8.625	3.45	2.5	246	292	3.78×10^{-8}	0.578	0.569	0.539	201

Diameter [φ]	Thickness [T]	φ/T	Resonant Frequency [KHz]	Anti-Resonant Frequency [KHz]	Maximum Displacement [m]	k_{33}	k_p	k_{eff}	Volume [mm ³]
1.85	3.7	0.5	407	536	3.97×10^{-8}	0.688	0.671	0.651	10
2.775	3.7	0.75	396	525	4.36×10^{-8}	0.693	0.677	0.657	22
3.7	3.7	1	378	496	5.67×10^{-8}	0.685	0.668	0.647	40
5.55	3.7	1.5	327	398	5.56×10^{-8}	0.609	0.598	0.570	89
7.4	3.7	2	273	326	3.75×10^{-8}	0.586	0.577	0.547	159
9.25	3.7	2.5	230	272	3.52×10^{-8}	0.573	0.565	0.534	249

그림 4는 두께를 3.7 mm로 고정 후 직경비의 변화에 따른 결합진동 모드 압전소자의 변위 궤적이다. 그림 3과 그림 4에서 횡축의 step이란 변위의 단계를 나타내는 것으로써 step 0~10은 압전소자를 공진주파수에서 구동할 때 반파장 ($\lambda/2$) 동안의 변위의 단계이고 step 10~20은 나머지 반파장 동안의 변위의 단계를 나타낸다. 시뮬레이션의 결과 그림 3의 결과와 동일하게 $\phi/T=1.0$ 의 비율에서 가장 우수한 변위 특성이 나타나는 것을 확인하였다. 이상의 3가지 시

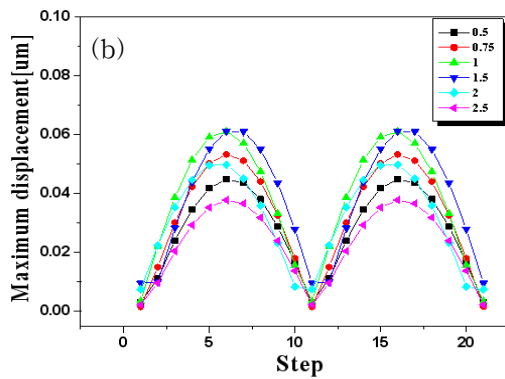
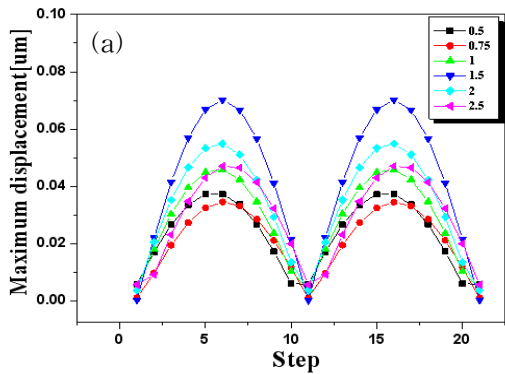


Fig. 3. Displacement trajectory of the coupled vibration mode piezoelectric device (thickness= (a) 3.3, (b) 3.45 mm).

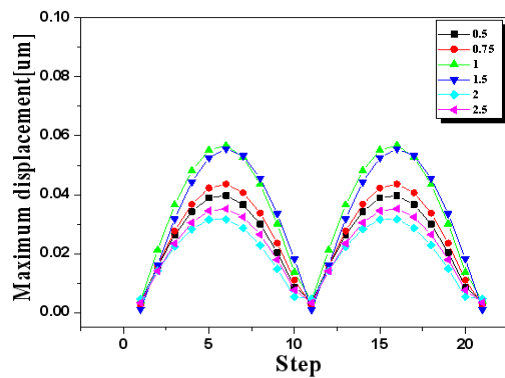


Fig. 4. Displacement trajectory of the coupled vibration mode piezoelectric device (thickness= 3.7 mm).

물레이션의 결과 가장 우수한 변위 특성을 보유한 두께 3.45 mm일 때 $\phi/T=1.0$ 의 비율을 보유한 사이즈

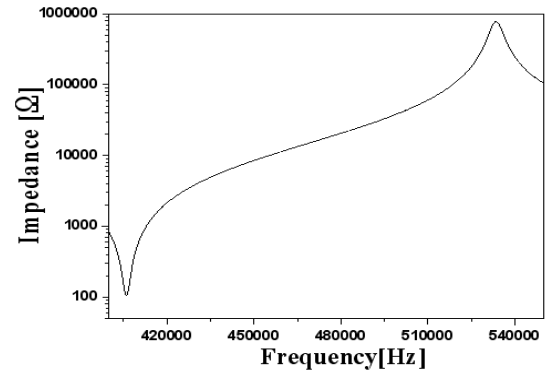


Fig. 5. Impedance characteristic curve of simulated specimen (thickness= 3.45 mm, rate= 1.0).

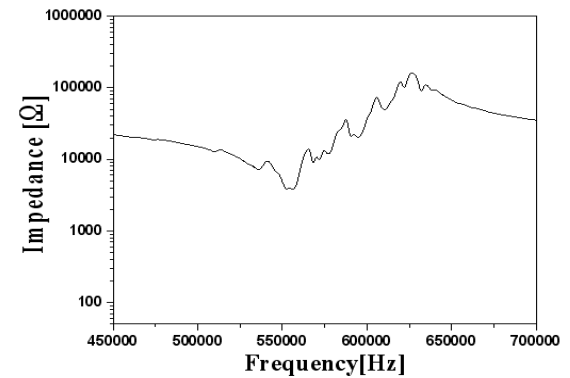


Fig. 6. Impedance characteristic curve of fabricated specimen (thickness= 3.45 mm, rate= 1.0).

로 압전소자를 제작하였다.

그림 5는 최적의 변위 특성이라 사료되는 두께 3.45 mm일 때의 $\phi/T=1.0$ 의 비율을 보유한 압전소자에 대한 시뮬레이션 임피던스커브 그래프이다. 이때 공진 및 반공진 주파수는 각각 406 kHz, 533 kHz로 나타났다.

그림 6은 시뮬레이션에서 나온 결과 중 두께 3.45 mm일 때의 $\phi/T=1.0$ 인 최적의 값을 이용하여 NKN계 무연 압전세라믹 소자로 제작한 세라믹 소자의 임피던스 특성 커브를 나타낸 것이다. 그림 5의 시뮬레이션 결과와 공진 반공진 주파수에서 많은 차이를 보였다. 이것은 시뮬레이션 (PZT-4조성)과 제작된 소자 (무연 NKN계 조성)의 물성의 차이, 수제작으로 인한 가공 정밀도의 차이 등에 따른 것으로 사료된다. 추후에 NKN계 무연 압전소자의 물성을 모두 조

Table 3. Physical properties of fabricated specimen (thickness= 3.45 mm, $\phi/T= 1.0$).

	f_r [kHz]	f_a [kHz]	C[nF]	k_{eff}
Piezoelectric element	556.5	631.1	20.2	0.473

사해서, 이와 같은 차이에 대한 연구가 필요하다 하겠다.

표 3은 두께 3.45 mm, $\phi/T= 1.0$ 로 제작된 결합진동 모드압전 소자의 특성값을 정리하였다.

4. 결론

본 연구에서는 두께와 직경비에 따른 결합진동 모드 AE 센서용 압전소자의 가장 우수한 변위 및 압전 특성 조건을 찾고자 공진 및 반공진 주파수, 변위, 전기기계결합계수, 체적을 비교하였다. 압전소자의 물성은 PZT4의 값을 적용하였으며 유한요소 해석프로그램인 ATILA로 시뮬레이션하여 최적의 비율을 찾은 후 압전소자를 제작하여 그 특성을 비교하였다.

1. 결합진동 모드를 갖는 압전소자의 변위와 k_{eff} 값은 직경과 두께의 비(ϕ/T)에 따라 변화하며, 두께 3.45 mm이고, $\phi/T= 1.0$ 일 때 k_{eff} 와 변위 두 가지 값이 가장 우수하게 나타났으며, 이 비율의 증감에 따라 변위 및 전기기계결합계수 값은 감소하는 경향을 보였다.

2. 최적의 비율로 사료되는 두께 3.45 mm, $\phi/T= 1.0$ 의 비율의 소자를 제작 후 특성을 시뮬레이션의

결과와 비교할 때 약간의 오차가 많이 존재하였는데 이것은 시뮬레이션과 제작된 소자의 물성의 차이, 수제작으로 인한 가공 정밀도의 차이 등에 따른 것으로 사료된다.

3. 두께 3.45 mm, $\phi/T= 1.0$ 인 압전소자의 공진주파수, 반공진주파수, 변위 그리고 k_{eff} 는 각각 406 kHz, 533kHz, 6.11×10^{-8} , 0.648으로 나타났다.

감사의 글

“이 논문은 2012년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.”

REFERENCES

- [1] J. Hong, Y. Jeong, and J. Yoo, *J. KIEEME*, **13**, 502 (2000).
- [2] S. Cho, H. Shin, J. Kim, Y. Lee, and K. Kim, *J. KIEEME*, **22**, 69 (2008).
- [3] S. Sudaram, P. Senthikumar, and N. Manoharan, *J. Eng. Appl. Sci.*, **2**, 1581 (2007).
- [4] B. Kim and Y. Kim, *J. KSNT*, **12**, 4 (1992).
- [5] M. Kim, J. Kim, and W. Cao, *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 132901 (2005).
- [6] Y. Jeong, *J. KIEEME*, **25**, 105 (2012).
- [7] Z. Ruzhong, W. Min, M. Bing, F. Jian, and L. Tao, *J. Phys. Chem. Solids*, **70**, 750 (2009).
- [8] P. Jue, C. Jinghong, L. Haosu, H. Tianhou, H. Haiqing, and L. Di. Jeong, *Solid State Commun.*, **130**, 53 (2004).