

NKN계 세라믹을 이용한 음향방출 센서의 감도 특성

홍재일¹, 신상훈², 류주현^{2,a}, 정영호³, 이상호¹

¹ 동서울대학교 전기정보제어과

² 세명대학교 전기공학과

³ 한국교통대학교 전기공학과

Sensitivity Properties of Acoustic Emission Sensor Using NKN System Ceramics

Jae-Il Hong¹, Sang-Hoon Shin², Ju-Hyun Yoo^{2,a}, Yeong-Ho Jeong³, and Sang-Ho Lee¹

¹ Department of Electrical Engineering, Dong Seoul College, Seongnam 461-714, Korea

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

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

(Received September 1, 2014; Revised October 17, 2014; Accepted October 22, 2014)

Abstract: In this study, in order to develop coupled vibration mode piezoelectric devices for Acoustic Emission (abbreviated as AE) sensor application with outstanding displacement and piezoelectric properties have been simulated by ATILA FEM program. And, From the results of ATILA simulation, the AE sensor specimen, obtained superior electromechanical coupling factor and displacement, when the size of specimen is 3.45 mm Φ ×3.45 mm with ratio of diameter/thickness(Φ/T)= 1.0. Therefore, AE sensor was fabricated by (Na,K,Li)(Nb,Ta) O₃(abbreviated as NKL-NT) system piezoelectric ceramics using coupled vibration mode. The piezoelectric properties of NKL-NT ceramics was exhibited that piezoelectric constant(d_{33}), piezoelectric voltage constant(g_{33}) and electro mechanical coupling factor(k_p) have the excellent values of 261[pC/N], 40.10[10⁻³Vm/N], and 0.44, respectively. The manufactured piezoelectric device with ratio of Φ/T = 1.0 indicated the optimum values of resonant frequency(f_r)= 556.5[kHz], antiresonant frequency(f_a)= 631.1[kHz], and effective electromechanical coupling factor(k_{eff})= 0.473. The maximum sensitivity of the coupled vibration mode AE sensor was 55[dB] at the resonant frequency of 75[kHz]. The results show that the coupled vibration mode piezoelectric device is a promising candidate for the application AE sensor piezoelectric device.

Keywords: NKN, AE sensor, Coupled vibration mode, Piezoelectric devices, ATILA

1. 서론

최근 전력수요의 증가에 따라 전력설비 (원자력,

수력, 화력 등)들이 증가되면서 전력설비들의 예방진단에 대한 관심과 주목을 받고 있다. 또한, 전력설비에서 발생하는 전기에너지의 안정적인 공급 또한 중요한 부분을 차지한다. 하지만, 현존하는 전력설비들은 대부분이 90년대 이전에 건설하여 지금까지 운영되고 있다. 그러므로 전력설비들의 노후화로 인해 전력설비들이 고장 없이 운영되고 신뢰성 확보를 위하여 예방의 관점에서 새로운 전기설비 열화진단 기술

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

Copyright ©2014 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.

개발의 강조와 안전사고가 발생하기 전에 발전설비의 건전성을 지속적이면서 실시간으로 평가할 수 있는 기술의 개발에 많은 연구가 필요시 되고 있다 [1-4].

이러한 전력설비들이 사고로 이어질 때에는 막대한 경제적인 손실과 더불어 인명 피해에 이르기까지 큰 문제로 야기될 수 있다. 전력설비의 예방 진단법으로는 직류특성과 교류 특성 등에 대한 직접검출법과 부분방전 전하법, 초음파 탐상시험법 (UT), 와전류 탐상법 (ECT) 등 여러 가지 간접 검출법들이 이용된다. 그러나 근래의 방법들은 균열이나 결함 등의 문제점들이 생기고 난 후에 정기검사일 때나, 설비의 준공시에 점검 및 진단이 가능하다는 단점을 가지고 있다. 따라서 가동 중 일 때, 진단이 실시간으로 가능한 검사법들이 필요하다. 최근에는 전력설비에서 부분방전 특성의 검출법들 중에서 음향 방출 (acoustic emission)이 각광을 받고 있다 [5,6].

음향 방출법이란 탄성체 표면이나 내부의 국부에서 불연속적이고 돌발적이며 과도적인 운동이 생길 때, 그 에너지가 탄성파로 방출되는 현상이다. 이러한 특성으로 측정하기 어려웠던 재료 내부에서 진행되는 미시적인 현상들에 대한 정보를 알아내는 재료시험이나 특성 평가의 수단으로 이용될 뿐만 아니라 일반적으로 균열의 탐지와 같은 비파괴 검사 (non-destructive test) 방법 중의 하나이다 [3,7]. AE 센서는 사후 진단보다 예방 진단에 활용을 많이 하고 있으며, 감도특성이 좋으므로, 구조물이나 결함의 크기에 상관없이 탐지가 가능하다는 장점을 가지고 있다. AE 센서의 원리는 탄성파를 전기적인 신호로 변환하는 감지소자로서 핵심소자는 압전세라믹스를 사용하고 있다. 압전세라믹스는 AE 센서의 주파수 특성과 수신감도 등을 좌우하는 가장 중요한 요소이다. 과거에는 PZT계 압전세라믹스를 주로 사용하였지만, 60% 이상이 유독성을 갖는 납으로 이루어져 환경오염과 인체에 유해하기 때문에 전 세계적으로 PZT계 세라믹스의 사용을 규제하는 추세이다 [8-10]. 그래서 납이 들어가지 않는 친환경적인 압전세라믹스의 연구가 활발히 진행되고 있다. 무연 압전세라믹스들 중에서 2004년에 Saito [11] 등에 의해 개발된 (Na,K)NbO₃(NKN)계 세라믹스가 우수한 압전 특성과 높은 큐리온도 때문에 PZT계 압전세라믹스를 대체할 만한 후보자로 주목을 받고 있다 [12,13].

따라서 본 연구에서는 우수한 감도 특성을 갖는 AE 센서를 개발하기 위하여 친환경적인 NKN계 세라믹스를 이용해 제작하여 감도 특성을 조사하고자 한

다. NKN계 무연 압전세라믹스의 소재는 다양하지만 이전의 논문에서 보고한 NKL-NT 조성을 [16] 채택하였다. 이러한 이유는 논문에서 보고한 바와 같이, $V_{out} \propto g_{33}$ 으로 AE 센서에서는 출력값이 높아지면 변위와 감도 특성이 향상되므로 g_{33} 가 크면 V_{out} 또한 같이 커지는 비례 특성을 가진다. AE 센서의 진동 세기에 직접적인 영향을 미치므로 g_{33} 이 큰 조성을 채택하였다.

압전소자는 일반적으로 두께 방향 모드의 전기기계 결합계수 k_{33} 는 경방향 모드의 전기기계결합계수 k_p 보다 우수하므로, 두께 방향의 전기기계결합계수가 우수한 압전소자를 제작하면 그만큼 에너지 변환 전기기계결합계수 또한 우수하게 된다. 하지만, 소자가 커지는 단점을 갖고 있다. 그러므로 소자의 두께는 최소화시키면서 압전 특성이 큰 소자를 제작하기 위하여 두께 방향과 경방향 모드를 합쳐 결합진동모드 소자를 제작하고, 유한요소 해석프로그램인 ATILA를 사용하여 압전소자를 시뮬레이션 하여 압전소자의 특성을 조사하고 AE 센서의 감도를 측정하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 압전세라믹스의 제작

압전세라믹스의 압전 특성은 AE 센서의 주파수 특성 및 수신감도 등이 AE 센서를 제작할 시에 가장 중요한 요소이다. 본 연구에서는 NKN 무연 압전세라믹스의 조성은 다음과 같다.



99% 이상의 순도를 갖는 원료를 10⁻⁴ g까지 칭량하여 24시간 혼합·분쇄하였으며, 900℃에서 6시간 하소하였다. 하소된 파우더는 다시 재혼합·분쇄하였고, 건조된 파우더에 PVA 수용액을 5 wt% 첨가하였다. 정사각 형태의 샘플을 성형하여 1,110℃에서 5시간 소성하였으며, 유한요소 해석프로그램인 ATILA를 통해 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션을 통하여 얻어진 공진 및 반공진 주파수를 이용하여 k_{33} , k_{eff} , k_p 등을 다음의 식 (1)로 산출하였다. 압전세라믹스의 압전 특성과 ATILA 시뮬레이션의 특성을 조합하여 가장 우수한 특성을 갖는 결합진동 모드인 (3.45 mmΦ×3.45 mm) 그림 1과 같은 원통형 형태로 압전세라믹스를 가공하여 제작하였다.

표 1은 NKN-LS [14]의 물성을 나타낸다.

Table 1. Physical properties of NKN-LS.

Material constants	NKN-LS
Density (kg/cm ³)	4,300
S ^E ₁₁ (10 ⁻¹² m ² /N)	12.06
S ^E ₁₂ (10 ⁻¹² m ² /N)	-3.86
S ^E ₁₃ (10 ⁻¹² m ² /N)	-5.45
S ^E ₃₃ (10 ⁻¹² m ² /N)	15.00
S ^E ₄₄ (10 ⁻¹² m ² /N)	33.30
d ₁₅ (10 ⁻¹² C/N)	340
d ₃₁ (10 ⁻¹² C/N)	-114
d ₃₃ (10 ⁻¹² C/N)	265

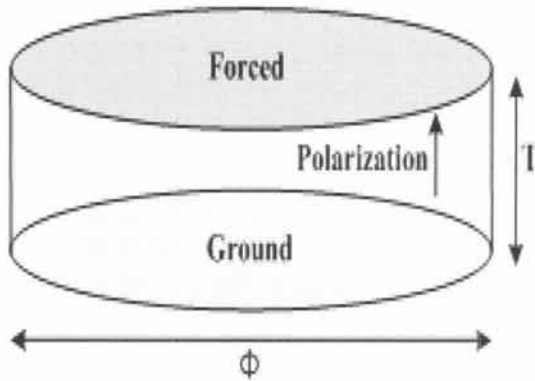


Fig. 1. Thickness coupled vibration mode specimen with polarization direction (Φ/T= 3.45 mmΦ × 3.45 mm).

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

$$k_{eff} = \sqrt{\frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2}} \tag{1}$$

$$\frac{1}{k_p^2} = 0.395 \times \frac{f_r}{f_a - f_r} + 0.574$$

2.2 AE센서 결합진동모드 제작

제작된 NKN 세라믹스는 그림 2와 같이 AE센서를 공기 후면층 (air backing)의 구조로 제작하였다. 스테인레스 스틸 (stainless steel)로 된 케이스를 완전 접지구조로 하여 외부 잡음을 차단하도록 하였다. 보호판 (알루미늄)은 초음파 탐촉자나 초음파센서에서는 피측정 재질과 압전세라믹과의 임피던스 정합층 (impedance matching layer)에 해당되는 부분으로서 피측정 재질로부터 발

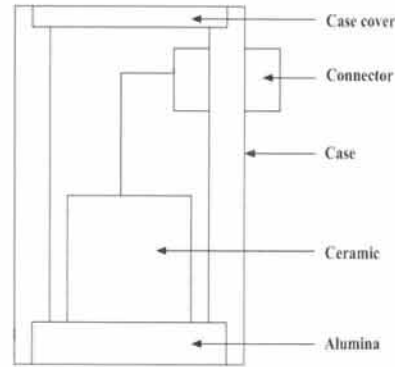


Fig. 2. Structure of AE sensor.

생되는 신호가 압전세라믹스에 잘 전달되도록 하며, 압전세라믹스를 기계적으로 보호한다.

2.3 음향방출센서의 감도 측정

제작된 AE 센서의 감도 특성을 측정하기 위해 그림 3과 같은 과도 탄성과 측정법 (ASTM 1106-86) [15]을 이용한 간이감도측정 시스템을 사용하였다. 탄성파원으로는 샤프심을 사용하였으며, 전달매질로는 감쇄와 분산이 적은 단조강 (직경 50 cm, 두께 5 cm)을 사용하였다. AE센서는 탄성파원의 측면 10 cm에 글리세린 접촉매질 (couplant)로 부착하였다.

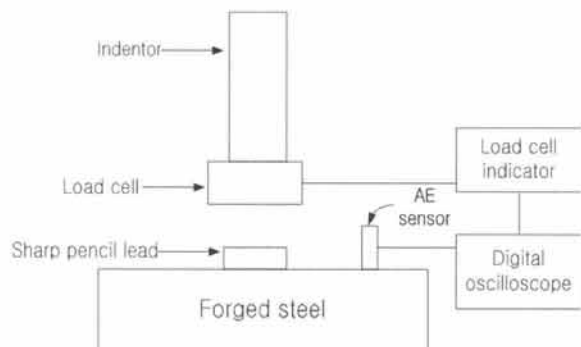


Fig. 3. Sensitivity measurement of AE sensor.

측정 방법으로는 조절장치 (indenter)를 서서히 내려서 면도날로 샤프심을 절단함으로써 탄성파원을 발생시키고 이 때 받는 힘을 로드셀 기록기 (load cell indicator)로 기록하여 단위 N 당 센서응답 파형을 디

$$dB = 20 \log_{10} \frac{\text{센서 응답 [V]}}{\text{이론 속도 [m/s]}} \quad (2)$$

지털 오실로스코프 (LeCroy WS44Mxs-b)로 측정 한 후 0.2 μs 간격으로 데이터를 저장하였다. 저장된 데이터는 식 (2)를 이용하여 이론적으로 계산된 Green 함수의 속도와 비교하여 감도를 구하였고, 데이터 처리는 MATLAB 프로그램을 사용하여 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 유한 요소 해석프로그램인 ATILA를 사용하여 시뮬레이션 한 결합진동모드가 동작하는 압전소자의 진동 형태이다. 시뮬레이션 결과 압전소자는 장구 모양의 형태에서 경방향 모드와 두께방향 모드의 결합진동모드로 동작하는 것을 확인할 수 있었다.

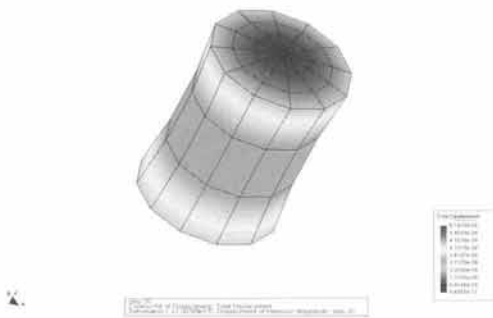


Fig. 4. Simulation of coupled vibration mode piezo electric device.

Table 2. Resonant frequency, displacement and k_p of coupled vibration mode piezoelectric device as a function of Φ/T (thickness= 3.45 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]
1.725	3.45	0.5	583	717	9.89×10^{-8}	0.621	0.372	0.582	8
2.5875	3.45	0.75	560	698	1.73×10^{-8}	0.636	0.388	0.597	18
3.45	3.45	1	553	667	2.54×10^{-8}	0.598	0.346	0.559	32
5.175	3.45	1.5	463	539	3.27×10^{-8}	0.551	0.296	0.512	73
6.9	3.45	2	390	445	9.04×10^{-9}	0.520	0.265	0.482	129
8.625	3.45	2.5	336	388	2.74×10^{-8}	0.539	0.283	0.500	201

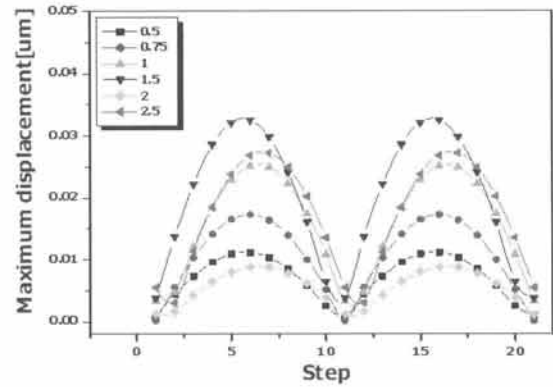


Fig. 5. Displacement trajectory of the coupled vibration mode piezoelectric device (thickness= 3.45 mm).

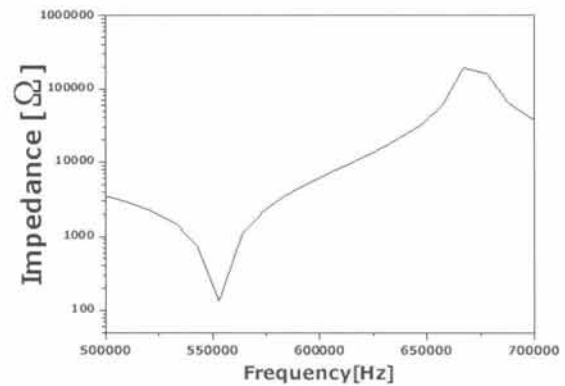


Fig. 6. Impedance characteristic curve of simulated specimen (thickness= 3.45 mm, rate= 1.0).

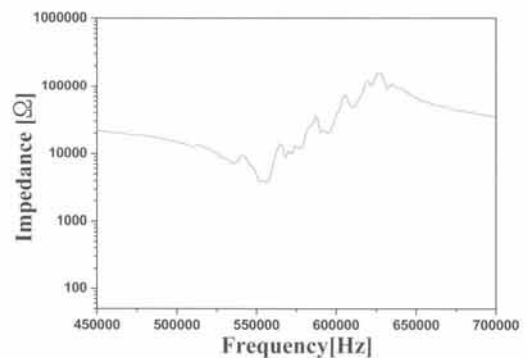


Fig. 7. Impedance characteristic curve of fabricated specimen (thickness= 3.45 mm, rate= 1.0).

표 2는 두께를 3.45 mm로 고정하고 직경을 변화시킬 때, 이에 따른 결합진동모드 압전소자의 공진주파수, 변위 및 k_{33} , k_p , k_{eff} 를 나타낸 것이다. Φ/T 비율은

체적의 증가에 따라서 공진 및 반공진 주파수는 감소하는 경향을 나타내었다. Φ/T 비율이 1일 때, 변위, k_{33} , k_p , k_{eff} , volume은 2.54×10^{-8} [m], 0.598, 0.559, 32로 우수한 특성 값을 얻었다.

그림 5는 두께를 3.45 mm로 고정하고 직경의 변화에 따른 결합진동 모드 AE 센서용 압전 소자의 변위 궤적이다. 유한요소 해석 프로그램인 ATILA를 사용하여 시뮬레이션 한 결과이다. 그림 5에서 보면 횡축에 step이란 변위의 단계를 나타내는 것으로서 step 0~10은 압전소자를 공진주파수에서 구동할 때 반파장($\lambda/2$) 동안의 변위의 단계이고, step 10~20은 나머지 반파장 동안의 변위의 단계를 나타내는 것이다.

압전소자의 변위는 Φ/T 의 비율 증가에 따라 $\Phi/T=1.5$ 일 때, 변위가 가장 크게 나타났고, 비율을 더 증가시킬수록 변위는 감소하는 경향을 나타내었다. Φ/T 비율이 1.5일 때, 변위는 1일 때 보다 우수하게 나왔지만, 일반적으로 두께 방향 모드의 전기기계결합계수 k_{33} 는 경방향 모드의 전기기계결합계수 k_p 보다 우수하므로, 두께 방향의 전기기계결합계수가 우수한 압전소자를 제작하면 그만큼 에너지 변환 전기기계결합계수 또한 우수하게 된다. 이러한 이유 때문에 Φ/T 비율이 1일 때가 변위는 작지만 $k_{33}(=0.598)$, $k_p(=0.346)$, $k_{eff}(=0.559)$ 등이 더 우수하므로 결합진동모드의 AE 센서용 압전소자로 최적의 것으로 사료된다. 시뮬레이션의 결과가 가장 우수한 특성을 갖는 두께 3.45 mm일 때, $\Phi/T=1.0$ 비율의 사이즈로 압전소자를 제작하였다.

그림 6은 AE 센서용 압전소자로서 최적이라고 사료되는 두께 3.45 mm일 때 $\Phi/T=1$ 의 비율을 갖는 압전소자에 대한 유한요소 해석프로그램 ATILA로 시뮬레이션을 한 압전 소자의 임피던스 커브를 나타낸 것이다. 공진 및 반공진 주파수는 553 kHz, 667 kHz로 각각 나타났다.

그림 7은 시뮬레이션에서 두께 3.45 mm로 고정하고 직경의 변화를 주어 구현한 데이터 중에서 3.45 mm일 때의 $\Phi/T=1.0$ 인 최적의 값을 이용하여 NKN계 무연 압전 세라믹 소자로 제작한 세라믹 소자의 임피던스 특성 커브를 나타낸 것이다. 그림 6에서의 시뮬레이션 결과의 임피던스 커브와는 약간의 오차를 보였다. 이는 시뮬레이션 한 것과 제작한 소자는 수제작으로 인하여 가공 정밀도의 차이 등에 의한 이유 때문에 약간의 오차는 있지만 거의 비슷한 주파수 대역을 나타내는 것으로 사료된다.

표 3은 제작된 압전소자의 임피던스 특성을 나타낸 것이다. 공진과 반공진 주파수는 556.6 kHz, 631.1 kHz로 각각 나타났다.

Table 3. Physical properties of coupled vibration mode 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

Table 4. Physical properties of fabricated specimen.

Density [g/cm ³]	k_p	Dielectric Constant	d_{33} [p C/N]	Qm	g_{33} [10^{-3} Vm/N]	$d_{33} \cdot g_{33}$ [p m ² /N]
4.53	0.44	735	261	104.9	40.10	10.47

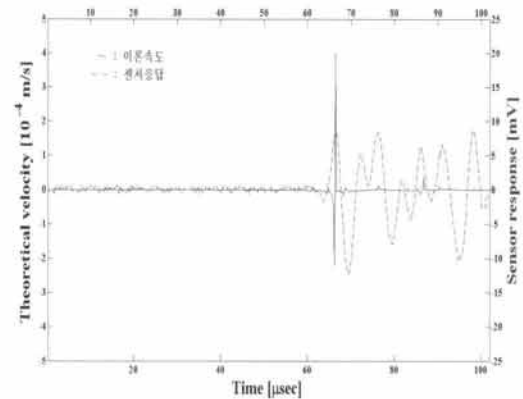


Fig. 8. Theoretical velocity of elastic source and voltage response of AE sensor.

표 4는 AE 센서의 핵심 부품으로 제작에 쓰인 NKN계 무연 압전세라믹스의 압전 특성 [16]을 나타낸 것이다.

그림 8은 AE 센서응답을 이론 속도와 함께 나타낸 것이다. 이론속도와 센서응답의 주된 피크를 나타내는 것은 종파 (longitudinal wave)나 횡파 (transverse wave) 보다는 표면파 (rayleigh wave)에 의한 것이다. 이론 속도의 파형에 비해 센서응답의 파형이 더 많이 관찰되어 지는 것은 단조강에 원판의 크기가 작기 때문으로 사료된다. 이러한 이유 때문에 AE 센서가 한 번의 탄성파원 (샤프심) 외에 단조강의 경계면에서 반사되어 되돌아오는 여러 개의 파형을 감지하는 것으로 사료된다. 여러 가지의 파형을 잡은 것으로 보아 센서의 응답은 예민하게 반응을 한 것으로 사료되며 또한, AE 센서의 제작 시 사용된 압전소자가 우수한 특성을 가지고 있기 때문인 것으로 사료된다.

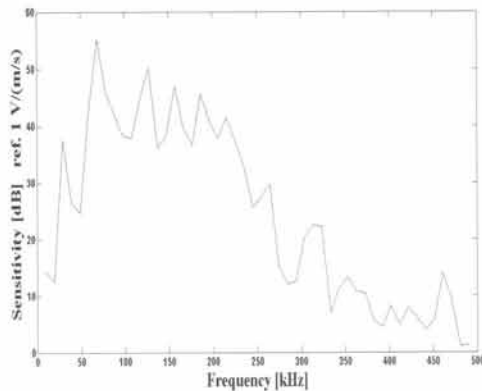


Fig. 9. Sensitivity waveforms of AE sensor.

그림 9는 입출력 간의 이득을 알아보기 위해 이론속도의 피크와 측정된 AE 센서응답의 피크를 일치시킨 후에 각각을 FFT (fast fourier transform)하고 식 (2)로 MATLAB 프로그램에서 데이터 처리하여 나타낸 것이다. AE 센서의 최대 감도는 55[dB], 최대 감도 주파수는 75[kHz]로 각각 나타났다. 따라서 결합진동 모드로 제작한 AE 센서는 다른 모드의 센서보다 감도 특성이 우수하므로 전력설비 보호를 위한 진단 기술의 응용에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 두께를 3.45 mm로 고정시킨 후에 직경에 변화를 주어 그에 따른 결합진동모드 AE 센서용 압전소자의 우수한 변위 및 압전 특성의 조건을 찾고, NKN계의 물성값을 적용하여 유한요소 해석프로그램인 ATILA로 시뮬레이션 하여 압전소자의 최적의 비율 특성을 찾아서 공기 후면층으로 AE 센서를 제작하여 특성을 측정한 결과는 다음과 같다.

1. 두께를 3.45 mm로 고정하고 직경의 변화에 따른 결합진동 모드 AE 센서용 압전 소자의 변위와 keff 값은 $\phi/T=1.5$ 의 비율일 때, 변위가 가장 우수하지만 $\phi/T=1.0$ 의 비율에서 $k_{33}=0.598$, $k_p=0.346$, $k_{eff}=0.559$ 로 나타났으며, 음향방출 (AE) 센서용 압전소자로 최적의 특성으로 사료된다.

2. 두께 3.45 mm 직경 3.45 mm, $\phi/T=1.0$ 비율인 압전소자의 공진주파수, 반공진주파수, 그리고 변위는

각각 553 kHz, 667 kHz, 2.54×10^{-8} 로 나타났다. 또한, 제작한 압전소자의 공진주파수와 반공진주파수, keff는 556.5, 631.1, 0.473으로 각각 나타났다.

3. 결합 진동모드를 이용하여 제작된 AE 센서의 최대 감도와 주파수는 55[dB], 75[kHz]이었다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 동서울대학교 산학협력단 부설 연구지원센터의 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] C. B. Lee, G. W. Kim, and Y. I. Park, *KSNVE*, 24, 429 (2014).
- [2] S. G. Lee, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 24, 396 (2004).
- [3] J. H. Yoo, G. S. Lee, and J. I. Hong, *J. KIEEME*, 20, 218 (2007).
- [4] G. H. Feng and M. Y. Tsai, *Sens Actuator A Phys.*, 162, 100 (2010).
- [5] Y. H. Jeong, *J. KIEEME*, 23, 383 (2010).
- [6] Y. H. Jeong, S. M. Byeon, J. H. Yoo, and J. I. Hong, *Ferroelectric Lett.*, 39, 63 (2012).
- [7] Y. H. Jeong, S. H. Shin, and J. H. Yoo, *J. KIEEME*, 26, 114 (2013).
- [8] Y. H. Jeong, S. M. Byeon, M. H. Park, and J. H. Yoo, *Integr Ferroelectr.*, 140, 123 (2012).
- [9] D. M. Lin, K. W. Kwok, and H.L.W. Chan, *J. Alloy Compd.*, 461, 273 (2008).
- [10] P. Zhano, B. P. Zhang, and J. F. Li, *Appl. Phys. Lett.*, 90, 242909 (2007).
- [11] Y. Saito, H. Takao, T. Tani, T. Nonoama, K. Takatori, T. Homma, T. Nagaya, and M. Nakamura, *Nature*, 432, 84 (2004).
- [12] D. W. Wu, R. M. Chan, Q. F. Zhou, K. K. Shung, D. M. Lin, and H.L.W. Chan, *Ultrasonics*, 49, 395 (2009).
- [13] Z. W. Chan and J. Q. Hu, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 18, 623 (2008).
- [14] J. Zhang, R. Xia, T. R. Shrout, G. Z. Zang, and J. F. Wang, *Solid State Commun.*, 141, 675 (2007).
- [15] ASTM E1106-86, *Standard Method for Primary Calibration of AE Sensors*.
- [16] S. M. Byeon and J. H. Yoo, *J Electroceram.*, 32, s10832 -014-9948-7 (2014).