

무연 (Na,K)NbO₃ 계 세라믹스를 이용한 AE센서의 감도특성

Sensitivity Characteristics of Acoustic Emission(AE) Sensor using the Lead-free (Na,K)NbO₃ Ceramics

류주현^{1,a}, 이갑수¹, 홍재일²
(Juhyun Yoo^{1,a}, Gabsoo Lee¹, and Jaeil Hong²)

Abstract

In this study, Acoustic emission(AE) sensors were fabricated using lead-free piezoelectric ceramics for prohibiting environmental pollution. Structure of AE sensors were designed as Langvin type air backing form. Here, the piezoelectric element was used as PZT(EC-65)(AE1) and NKN(AE2), respectively. The measured resonant frequency, the maximum sensitivity frequency and sensitivity of AE sensors were as follows ; 143 kHz, 29.4 kHz and 69.3 dB in AE1 and 179 kHz, 29.4 kHz and 66.3 dB in AE2, respectively.

Key Words : Langevin type, Acoustic emission, Sensor, Sensitivity, Lead-free ceramics

1. 서 론

최근 들어, 산업화가 가속화됨에 따라 전력수요가 급증하고 있으며 이에 따라서 전력설비가 증가하면서 전력설비의 예방진단이 더욱 중요시 되고 있다. 전력설비의 예방진단법에는 직류특성, 교류특성, 가스검출 등에 대한 직접검출법과 부분방진 특성, 초음파, 전자파 등을 이용한 간접검출법이 있다[1]. 간접검출법 중 음향방출(acoustic emission : AE)법이 각광받고 있으며 이는 전력설비의 내부에서 발생하는 미소한 음향의 초음파 성분을 검출함으로써 전력설비의 이상 진단 및 위치를 측정하는 것을 말한다[2]. 전력설비 중 발전소에는 수많은 밸브가 사용되고 있으며 밸브누설로 인한 유량증가나 밸브 1차측 압력저하, 냉각기능 상실 및 방사선 물질 방출 등은 안전계통에 신뢰성 저하를 가져오게 되어 발전소운전에 막대한 손상 및 사고를 초래하게 된다. 밸브누설검사에는 압력계를 이용한

입출구 압력차, 온도변화 및 습도 측정, 내압시험 등을 이용하여 왔으나 미소 누설상태의 정보에 대한 실시간 측정이 불가능하고 압력계 보정 및 압력측정시의 절차의 복잡성 및 간접적인 측정에 의한 측정값 신뢰도등 많은 문제점이 있어 신속하며 측정 정밀도가 높으며, 미소 누설상태의 실시간 측정 및 평가가 가능한 음향방출법(acoustic emission : AE) 도입에 의한 밸브누설 감지시스템 개발이 시급히 필요하다. AE법에 의한 밸브내부 누설검사법은 밸브내부의 누설에 따라 발생하는 음향을 밸브 외부에서 검출하는 간편한 방법으로 최근 발전소 밸브에 실용화하기 위한 연구가 진행되고 있다[3, 4]. 음향방출은 재료내부의 국부적인 에너지원으로 부터 급격한 해방에 의해 발생하는 과도 탄성파 현상을 의미하며 AE센서는 이러한 탄성파를 전기적인 신호로 변환하는 감지소자로서 대부분 압전 세라믹을 사용한다[5]. 압전세라믹은 음향방출 센서의 주파수특성 및 수신감도를 좌우하는 가장 중요한 요소이다.

따라서, 본 연구에서는 발전소 밸브누설의 감지와 예방진단을 위한 AE센서를 PZT계 세라믹과 무연 세라믹을 이용해 제작하여 감도 특성을 고찰하고자 한다.

1. 세명대학교 전기공학과

(충북 제천시 신월동 산21)

2. 동서울대 전기정보제어과

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

접수일자 : 2006. 12. 27

1차 심사 : 2007. 1. 19

심사완료 : 2007. 2. 12

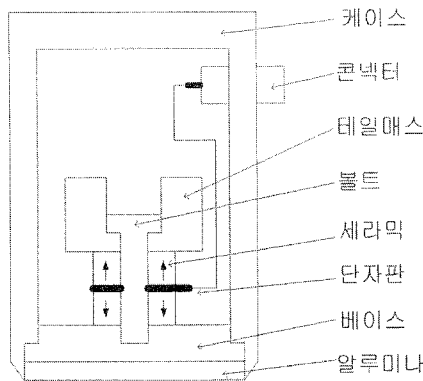


그림 1. AE센서의 구조.
Fig. 1. Structure of the AE sensor.

2. 실험

2.1 압전세라믹의 제조

압전세라믹의 압전특성은 음향방출 센서의 주파수특성 및 수신감도를 좌우하는 가장 중요한 요소이다. 본 실험에서는 PZT 압전세라믹의 조성을 PZT-5A계 세라믹인 EC-65(Edo사 제품)의 것으로 1150 °C에서 90분간 소성하여 제조하였고, 무연 압전세라믹은 다음의 조성 $[(Li_{0.04} (Na_{0.54} K_{0.46})_{0.96}] (Nb_{0.86} Ta_{0.1} Sb_{0.04}) O_3 + 0.1 \text{ wt\% } K_2CO_3$)으로 1080 °C에서 2시간 소성하여 제조하였다.

2.2 AE센서의 제작

제조된 PZT와 무연 압전세라믹을 그림 1과 같이 공기 후면층(air backing) 구조의 란쥬반형(Langevin type) AE센서로 제작하였다.

보호판(알루미늄)은 초음파탐촉자나 초음파센서에서는 피측정체질과 압전세라믹과의 임피던스 정합층(impedance matching layer)에 해당되는 부분으로서 피측정체질로부터 발생하는 신호가 압전세라믹에 잘 전달되도록 하며, 압전세라믹을 기계적으로 보호한다.

2.3 AE센서의 감도 측정

제작된 AE 센서의 감도특성을 측정하기 위하여 그림 2와 같은 과도 탄성과 측정법(ASTM 1106-86)[6]을 이용한 간이 감도 측정 시스템을 사용하였다. 탄성파원으로는 샤프심을 사용하였고, 전달 매질로는 감쇄와 분산이 적은 단조강(직경 50 cm, 두께 5 cm)을 사용하였으며, 센서는 탄성파원의 측면 10 cm에 글리세린 접촉매질(couplant)로 접촉하였다.

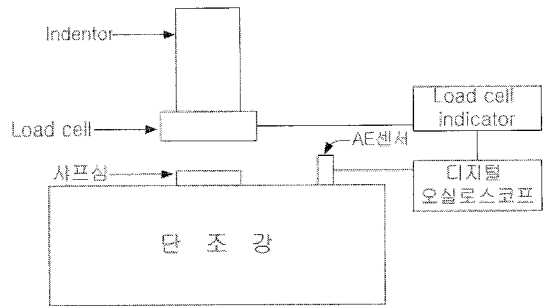


그림 2. AE센서의 감도측정 시스템.
Fig. 2. Sensitivity measurement system of AE sensor.

측정방법은 조절장치(Indentor)를 서서히 내려서 면도날로 샤프심을 절단하므로써 탄성파원을 발생시키고, 이때 받는 힘을 로드셀 기록기(load cell indicator)로 기록하여 단위 N당 센서응답 파형을 디지털 오실로스코프(LeCroy 9354A)로 측정후 0.2 μs 간격으로 데이터를 저장하였다. 이렇게 저장된 데이터를 다음 식을 이용하여 이론적으로 계산된 그린함수의 속도와 비교하여 감도를 구하였으며 데이터 처리는 MATLAB 프로그램을 사용하였다.

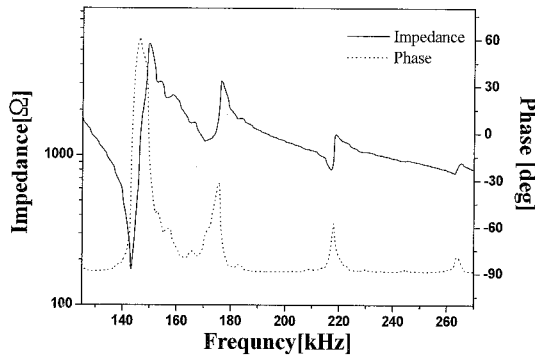
$$dB = 20 \log_{10} \frac{\text{센서응답} [V]}{\text{이론속도} [m/s]}$$

3. 결과 및 고찰

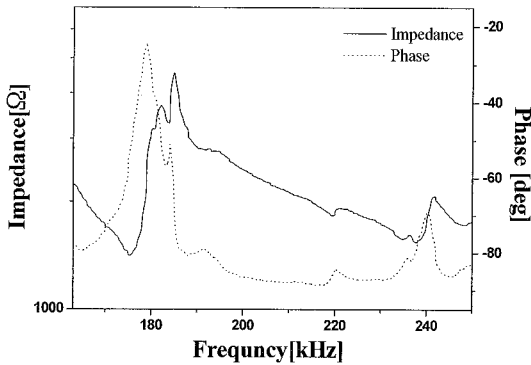
3.1 AE 센서의 전기적 특성

표 1은 AE 센서의 핵심 부품인 각 압전세라믹 시편의 압전특성을 나타낸 것이다.(AE1:PZT계 압전세라믹을 이용한 센서, AE2:무연 압전세라믹을 이용한 센서) 표 1에서 알 수 있는 것처럼 AE1이 AE2에 비해 밀도 전기기계결합계수, 압전d상수, 기계적품질계수등에서 우수한 특성을 나타내었다.

그림 3은 AE 센서 각각의 임피던스 특성곡선을 나타낸 것이다. 공진주파수는 AE1은 143 kHz, AE2은 178 kHz에서 나타났다. 이와 같이 AE2의 공진주파수가 증가한 이유는 무연압전세라믹조성이 밀도가 낮아 주파수상수가 증가하기 때문으로 해석된다. 표 2는 AE 센서 각각의 전기적특성과 감도를 나타낸 것이다. AE1이 AE2에 비해서, 전기기계결합계수 및 기계적 품질계수가 높아 유효전기기계결합계수 keff 및 최대감도가 다소 높았다.



(a) AE1



(b) AE2

그림 3. AE센서의 임피던스 특성.

Fig. 3. Impedance characteristics of AE sensor.

표 1. 시편의 압전특성.

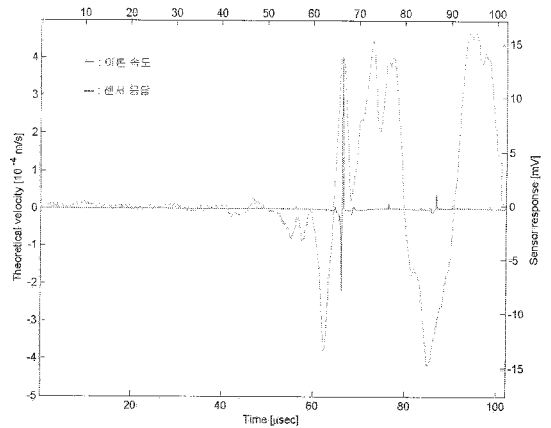
Table 1. Piezoelectric properties of specimens.

조성	Density [g/cm ³]	kp	Qm	d ₃₃ [pC/N]	g ₃₃ [mV · m/N]
AE1	7.50	0.62	100	380	25.0
AE2	4.60	0.49	54.76	300	27.02

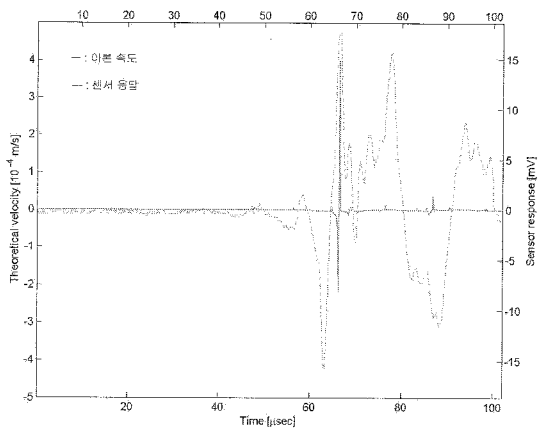
표 2. AE센서의 특성.

Table 2. Characteristics of AE sensor.

조성	Fr[kHz]	Fa[kHz]	C[nF]	k _{eff}	최대감도 [dB]
AE1	143.38	149.75	1.01	0.289	69.3
AE2	178.10	175.00	0.49	0.271	66.3



(a) AE1



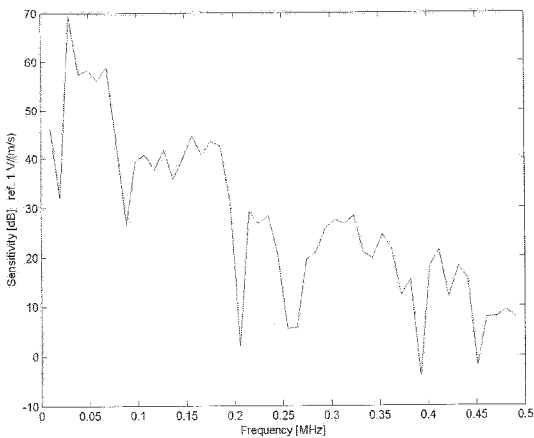
(b) AE2

그림 4. AE센서의 이론속도와 센서응답.

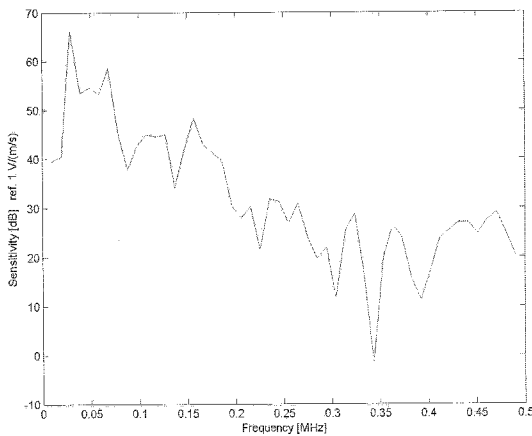
Fig. 4. Theoretical velocity and sensor response of AE sensor.

3.2 AE 센서의 감도 특성

그림 4는 AE 센서응답을 이론 속도와 함께 나타낸 것이다. 이론속도와 센서응답의 주된 피크를 나타내는 것은 종파나 횡파보다는 표면파(Rayleigh Wave)에 의한 것이다. 또한, 이론속도의 파형에 비해 센서응답의 파형이 더 많이 나타나는 것은 단조강 원판의 크기가 작기 때문에 음향방출센서가 한번의 탄성파원외에 단조강의 경계면에서 반사되어 되돌아오는 여러개의 파를 감지했기 때문이다. AE1이 AE2에 비해서 응답이 큰 폭으로 나타났다. 이 역시 압전특성이 우수했기 때문으로 생각된다.



(b) AE1



(c) AE2

그림 5. AE센서의 감도 특성.

Fig. 5. Sensitivity characteristics of AE sensor.

그림 5는 AE 센서의 감도를 과도 탄성과 측정 방법으로 측정 한 후, MATLAB 프로그램으로 데이터 처리하여 나타낸 것이다. AE1이 AE2에 비해 저주파영역에서 감도특성이 다소 우수함을 알 수 있었다.

AE 센서의 출력전압은 다음 식으로 표시된다.

$$V(t) = \sum_{n=i,j,k} g_{ij} u_{ij}(t) c_{ij}^E$$

여기서, 분극 방향의 첨자는 i , 변위 방향을 j , 압전 정수를 g_{ij} , 압전 소자의 전계일정의 탄성 정

수를 c_{ij}^E , 압전 소자의 변위를 u_{ij} 로 표기하였다. 본 연구에서 측정된 압전 g 상수와 소자의 변위와 상관성이 있는 압전 d 상수에 비례하여 AE센서의 감도특성이 나타난다.

AE1 센서의 경우 최고 감도를 나타내는 주파수는 29.4 kHz, 감도 69.3 dB, AE2센서의 경우 29.4 kHz, 66.3 dB 이었다. 최고감도를 나타내는 주파수는 모두 동일하였다. 최고감도주파수는 탄성파의 주요 주파수로서, 본 실험에서는 샤프트를 절단하여 탄성파원을 만들기 때문에 동일한 주파수에서 최대 감도가 나타난 것으로 생각된다. 최대감도특성으로만 볼 때 AE1과 AE2가 큰 차이를 보이지 않은 것으로 보아 환경 친화적인 무연 압전세라믹을 이용한 AE센서도 응용가능할것으로 생각된다. 그러나, 본연구팀을 위시하여 현재까지 세계적으로 개발된[7,8] 우수한 특성을 보이는 대부분의 무연 압전세라믹스가 AE센서, 초음파센서등의 압전센서로 응용 가능한 우수한 특성을 보이는 조성은 약 50~80 °C의 1차 상전이 온도를 가지기 때문에 온도안정성이 떨어지는 문제를 내포하여 상온에서는 사용가능하나, 가혹한 조건에서 사용되는 경우에는 크게 신뢰성이 떨어지게 된다. 따라서, 추후에 이런 보완 연구가 절실히 필요하다 하겠다.

4. 결론

본 논문은 PZT계 세라믹과 무연 압전세라믹을 제조하여 air backing 으로 란주반형 음향방출(AE)센서를 제작하여 감도 특성을 측정된 결과는 다음과 같다.

1. AE센서 각각의 공진주파수는 AE1은 143 kHz, AE2는 178 kHz에서 나타났다.
2. AE센서의 최고 감도를 나타내는 주파수는 모두 29.4 kHz이며, 그때의 감도는 AE1은 69.3 dB, AE2는 66.3 dB를 나타내었다.

이상의 결과를 토대로 감도특성이 PZT계와 무연 세라믹을 이용할 경우 큰 차이를 보이지 않은 것으로 보아 환경 친화적인 무연 압전세라믹을 이용한 AE센서도 상용화가 가능할 것으로 사료된다. 그러나, AE2의 조성은 온도 70~80 °C의 정도에서 1차 상전이 온도를 갖고, 55 °C이후에 압전특성이 현저하게 떨어지기 때문에[8] 온도안정성이 양호한 문제를 내포하여 상온에서는 사용가능하나, 가혹한 조건에서 사용되는 경우에는 크게 신뢰성이 떨어

지게 된다. 따라서, 추후에 이런 보완 연구가 절실히 필요하다.

감사의 글

본 연구는 전력산업 연구개발 산업 (과제번호 : No.R-2005-7-097)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 대한전기협회 역편, "전기설비의 진단기술", 일본전기학회, p. 3, 1991.
- [2] R. T. Harrold, "Acoustical technology applications in electrical insulation and dielectrics", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 20, No. 1, p. 3, 1985.
- [3] Allen, J. W., Hartman, W.F., and Robinson, J. C., "Acoustic Monitoring of Power Plant Valves", EPRINP-2444, p. 22, 1988.
- [4] Kumagai, H. and Suzuki, A., "The Evaluation for Application of the Detection Method of Internal Valve Leak Using Acoustic Method", CTEIPI Report NO. T89011, p. 1, 1990.
- [5] ASTM E610-89a, "Standard Terminology Relating to Acoustic Emission".
- [6] ASTM E1106-86, "Standard Method for Primary Calibration of AE sensor".
- [7] 이갑수, 류주현, 홍재일, 이석태, 김용운, 정희승, "Na/K 비 변화에 따른 무연 $[\text{Li}_{0.04}(\text{Na}_y\text{K}_{1-y})_{0.96}](\text{Nb}_{0.85}\text{Ta}_{0.1}\text{Sb}_{0.04})\text{O}_3$ 세라믹스의 압전 및 유전특성", 전기전자재료학회논문지, 20권, 1호, p. 25, 2007.
- [8] J. H. Yoo, K. S. Lee, K. H. Chung, S. H. Lee, K. J. Kim, J. I. Hong, S. L. Ryu and Chingook Lhee "Piezoelectric and dielectric properties of $(\text{LiNaK})(\text{NbTaSb})\text{O}_3$ ceramics with variation in poling temperature", J.J.A.P., Vol. 45, No. 9B, p. 7444, 2006.