

부분방전 검출용 결합진동모드 음향방출센서의 특성

논문
12-12-4

Properties of the Coupled Vibration mode AE Sensor for Partial Discharge Detection

정영호*, 홍재일**, 류주현***, 박창엽****

(Yeong-Ho Jeong*, Jae-Il Hong**, Ju-Hyun Yoo***, Chang-Yub Park****)

Abstract

The properties of coupled vibration mode AE(Acoustic Emission) sensor, and non-coupled vibration mode AE sensor was investigated on high sensitivity. The resonant type of AE sensor for the experiment was fabricated as air backing structure, and the piezoelectric element was composed of EC-65 with 0.1 wt% of WO₃ additives.

The maximum sensitivity of the coupled vibration mode AE sensor was 64.3 dB at the resonant frequency of 166 kHz, and that of the non-coupled mode AE sensor was 58.9 dB at the resonant frequency of 265 kHz. The sensitivity measurement of the AE sensor was made using NIST transient surface wave calibration method(ASTM E1106-86).

The coupled vibration mode AE sensor responded higher than the non-coupled vibration mode AE sensor to the partial discharge occurred in the needle and plate electrode, and the peak frequency of the partial discharge was 150 kHz.

Key Words(중요용어) : Coupled vibration mode(결합진동모드), AE sensor(음향방출센서), High sensitivity(고감도), Partial discharge(부분방전)

1. 서 론

오늘날 산업화가 가속화됨에 따라 전력수요가 급증하고 있으며 이에 따라서 전력설비가 증가하면서 전력설비의 예방진단이 더욱 중요시 되고 있다.

변압기 등의 전력설비의 예방진단법에는 직류특성, 교류특성, 가스검출 등에 대한 직접검출법과 부분방전특성, 초음파, 전자파 등을 이용하는 간접검출법이 있다[1]. 최근에는 부분방전특성의 검출법으로 음향방출(Acoustic Emission)법이 각광받고 있으며 이는 전력설비의 내부에서 부분방전이 발생할 경우 전기적인 펄스와 동시에 발생하는 미소한 음향의 초음

파 성분을 검출함으로써 전력설비의 절연상태 및 이상 발생 위치를 측정하는 것을 말한다[2].

음향방출은 재료내부의 국부적인 에너지원으로부터 급격한 해방에 의해 발생하는 과도 탄성과 현상을 의미하며 음향방출센서는 이러한 탄성파를 전기적인 신호로 변환하는 감지소자로서 대부분 압전세라믹을 사용한다[3].

음향방출은 1940년대에 미국에서 Obert와 Duvall에 의해 기초가 확립된 이래 1950년대에 Kaiser에 의해 확인되었고 1950년대 말에는 Schofield에 의해 음향방출센서에 관한 연구가 시작되었으나 음향신호의 해석 및 전산처리가 어려워서 활용되지 못하다가 최근에 컴퓨터 기술의 발달에 따라서 다시 산업계의 비파괴진단에 많이 사용되고 있다[4].

센서의 구조에 따라서 광대역형과 공진형이 있는데 공진형이 감도가 좋아서 많이 쓰이며 최근에는 비결합진동모드보다 결합진동모드를 이용하여 감도를 높이는 연구가 이뤄지고 있다[5]. 또한 변압기내의 전자력에 의한 초음파 신호는 20~70 kHz에서 발생하고 부분방전에 의한 초음파 신호는 100~250 kHz에서 발생하며 약 150 kHz에서 최대치를 나타낸다[6].

* : 한전 전력연구원 전력계통연구실
(대전광역시 유성구 문지동 103-16, Fax : 042-865-5804 E-mail : jungyouho@dava.kepco.co.kr)

** : 동서대학교 전기과

*** : 세명대학교 전기공학과

**** : 연세대학교 전기·컴퓨터공학과

1999년 8월 9일 접수, 1999년 11월 15일 심사완료

따라서 본 연구에서는 PZT-5A계 세라믹 EC-65에 0.1 wt%의 WO₃를 첨가하여 PZT세라믹을 제조하고 결합 진동모드와 비결합 진동모드의 공진형 AE 센서를 제작하여 그 감도특성과 침-평판전극의 부분방전 응답특성을 고찰하고자 한다.

2. 음향방출현상의 발생 및 검출

음향방출은 탄성체의 표면 혹은 내부에서 불연속적이고 돌발적이며 과도적인 운동이 생길 때 그 에너지가 탄성파로 방출되는 현상이며 이렇게 발생된 탄성파는 탄성체내를 전파하여 탄성체의 표면을 미소하게 진동시키며 이 경우 진동주파수는 수 kHz에서 수 MHz까지 광범위하다.

그림 1은 음향방출의 발생부터 검출까지의 모식도이다. 음향방출 신호를 검출하려면 시험체의 표면에 음향방출센서를 부착하여 탄성체내를 통과한 파동을 전기신호로 변화시켜서 검출한다. 시험체와 센서 사이에는 음향적으로 정합이 잘되도록 접촉매질(couplant)를 쓰며 음향방출신호가 미약할 경우에는 증폭기를 사용한다.

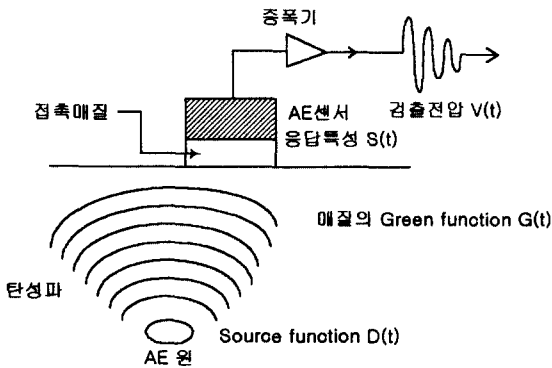


그림 1. 음향방출의 발생 및 검출 과정 모식도
Fig. 1. Schematic of generation and detection of acoustic emission

음향방출의 발생부터 검출까지를 정식화하기 위하여 음향방출원의 운동량 및 양태를 기원함수(source function) D(t)라 하고, 그린함수(green function)를 사용하는 음향방출의 탄성체내의 파동방정식을 G(t), 음향방출 센서의 감도와 주파수특성 등의 응답특성을 S(t)라 하고, 모든 함수가 선형응답을 가

진다고 가정하면, 재료내의 음향방출 파는 탄성체내의 각 방향에 대해서 어떤 음속으로 전해지기 때문에 ⊗를 전달시간과 공간에 관한 콘벌루션(convolution)적분이라고 하면 음향방출 센서에서 검출되는 전기신호 V(t)는 다음 식으로 표현된다[7].

$$V(t) = D(t) \otimes G(t) \otimes S(t) \quad (1)$$

(1)식은 시간영역에서의 표현이며 이 관계를 주파수영역에서 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V(\omega) = D(\omega) \times G(\omega) \times S(\omega) \quad (2)$$

시간영역에서 파형의 변화는 각 함수의 콘벌루션 적분으로서 표현되지만 주파수영역에서는 각 함수의 곱셈으로서 표현된다.

원파형 D(t)는 각 역함수의 콘벌루션 적분(deconvolution)을 하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D(t) = V(t) \otimes G(t)^{-1} \otimes S(t)^{-1} \quad (3)$$

또, D(ω)는 마찬가지로 각 역함수의 곱셈을 하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D(\omega) = V(\omega) \times G(\omega)^{-1} \times S(\omega)^{-1} \quad (4)$$

3. 실험

3.1 PZT세라믹 제조

PZT세라믹은 음향방출 센서의 주파수특성 및 수신 감도를 좌우하는 가장 중요한 요소이다. 본 연구에서는 원주형 압전소자에서 두께 진동모드의 공진주파수와 경방향 진동모드의 공진주파수가 동일하게 나타나는 결합 진동모드(3.45mm ∅ × 3.45mm)와 두 모드의 공진주파수가 동일하지 않은 비결합 진동모드(3.45mm ∅ × 1.725mm)의 두 가지 PZT세라믹을 만들었다.

조성은 PZT-5A계 세라믹인 EC-65(Edo사 제품)에 압전특성 개선을 위해 0.1wt%의 WO₃를 첨가한 것으로 1150℃에서 90분간 소성하여 제조하였다.

3.2 AE센서의 제작

제조된 PZT세라믹을 그림 2과 같이 공기 후면층(air backing) 구조의 음향방출센서로 제작하였다. 보호판(wear plate)은 초음파탐촉자나 초음파센서

에서는 피측정재질과 PZT세라믹과의 임피던스 정합층(impedance matching layer)에 해당되는 부분으로서 피측정재질로부터 발생하는 신호가 PZT세라믹에 잘 전달되도록 하며 PZT세라믹을 기계적으로 보호한다. 피측정재질로는 강철(steel)이 많은데 그 음향 임피던스 Z_1 은 약 $47 \times 10^6 [kg/m^2s]$ 이며 PZT세라믹의 음향 임피던스 Z_3 는 $33 \times 10^6 [kg/m^2s]$ 이다.

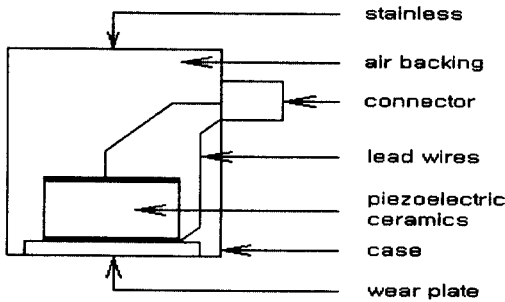


그림 2. 음향방출센서의 구조
Fig. 2. Structure of the acoustic emission sensor

탄성파의 투과율이 1이 되기 위한 조건은 $z_2 = \sqrt{z_1 \cdot z_3}$ 이므로 $39 \times 10^6 [kg/m^2s]$ 이어야 하는데 알루미늄의 경우 $41 \times 10^6 [kg/m^2s]$ 이므로 적당하다.

또한 보호판의 두께는 $\lambda/4$ 보다 작게 하였는데 이는 음향방출 센서의 경우 수신하는 신호가 연속파보다는 펄스파이므로 완전투과효과가 크지 않기 때문이다.

반사파를 흡수하는 후면층(backing layer)에 의한 흡음손실이 감도의 저하를 가져올 수 있기 때문에 후면층을 사용하지 않고 공기 후면층 구조로 만들었으며 스테인레스 스틸(stainless steel)로 된 케이스는 완전 접지 구조로 하여 외부 잡음을 차단하도록 하였다.

3.3 음향방출센서의 감도 측정

제작된 음향방출 센서의 감도특성을 측정하기 위하여 과도 탄성파 측정법(ASM 1106-86) [8]을 이용한 간이 감도측정 시스템을 그림 3과 같이 제작하였다 [9].

탄성파원으로는 유리모세관(내경 0.15mm, 외경 0.25mm, Vitro Dynamics사 제품)을 사용하였고 전달매질로는 감쇄와 분산이 적은 단조강(직경 50cm, 두께 5cm)을 사용하였으며 센서는 탄성파원의 측면

20cm에 글리세린 접촉매질(couplant)로 접촉하였다. 측정방법은 조절장치(Indentor)를 서서히 내려서 면도날로 유리모세관을 절단하므로써 탄성파원을 만들고 이때 받는 힘을 로드셀 기록기(load cell indicator)로 기록하여 단위 N당 센서응답 파형을 디지털 오실로스코프(LeCroy 9354A)로 측정한 후 $0.2 \mu s$ 간격으로된 510개의 데이터로 디스켓에 저장하였다.

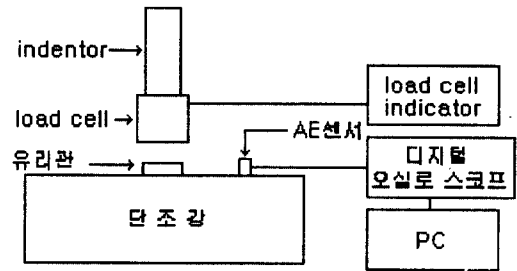


그림 3. 음향방출센서의 감도측정 시스템
Fig. 3. Sensitivity measurement system of acoustic emission sensor

이렇게 저장된 데이터를 다음 식을 이용하여 이론적으로 계산된 그린함수의 속도와 비교하여 감도를 구하였으며 데이터 처리는 MATLAB 프로그램을 사용하였다.

$$dB = 20 \log_{10} \frac{\text{센서응답} [V]}{\text{이론속도} [m/s]} \quad (5)$$

3.4 침-평판 전극의 구성 및 부분방전 응답 특성

본 연구에서 제작한 음향방출 센서의 부분방전에 의한 음향방출신호 검출특성 시험을 실시하기 위하여, 고전압 발생장치, 침-평판 전극, 음향방출 센서, 전치증폭기, 자료분석장치(부분방전 검출기), 오실로스코프 등 일련의 부분방전 검출시스템을 구성하였으며 그림 4에 그 개괄도를 나타내었다.

고전압 발생장치는 50 kV까지 고전압을 발생할 수 있는 것으로써 본 시험에서는 침-평판 전극에 30 kV의 고전압을 인가하여 부분방전이 지속적으로 유지되도록 하였다. 침-평판 전극 장치는 고전압측 전극으로 침을 사용하고, 접지측 전극으로 평판 전극을 사용하였다. 침전극 전체의 길이는 135mm이며, 침 전극에 사용되는 침은 구경 10 μm , 길이 60mm의 것을 사용하였다.

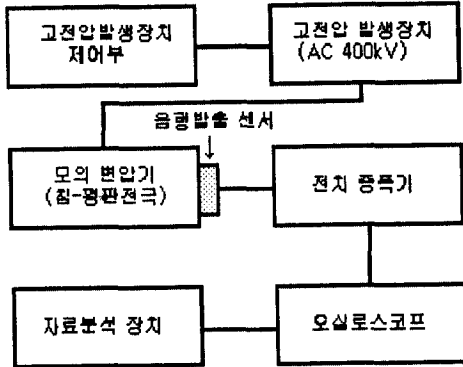


그림 4. 침-평판 전극을 사용한 부분방전 검출 시스템
Fig. 4. Partial discharge detection system with the needle and plate electrode

평판 전극은 간이 로고우스키 코일 형태로 직경은 130mm 이다. 평판전극은 미세한 돌출부를 제거하기 위하여 연마 처리를 하였다. 고전압 전원 리드는 이중 코로나 링 사이에 접속되도록 하여, 접속부에서 부분방전이 발생하지 않도록 하였으며, 전원선은 50 kV까지 부분방전이 발생하지 않도록 하였다.

침-평판 전극 구조물은 절연유로 채워진 탱크 중앙에 위치시켰으며, 탱크는 1,500(W)×1,500(D)×1,200(H)[mm]의 크기로 필요에 따라 모의 변압기를 내장하여 시험할 수 있도록 되어있으며, 탱크 벽면의 두께는 6.0mm이고, 전극 구조물 중심점과 탱크 벽면 간의 거리는 750mm이다.

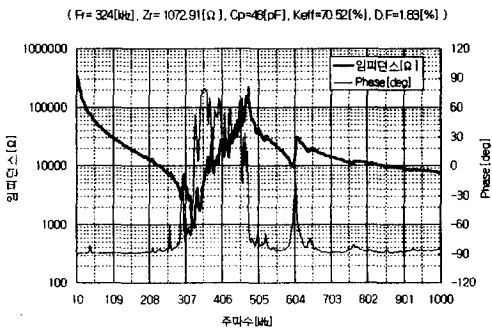
4. 결과 및 고찰

4.1 음향방출 센서의 전기적 특성

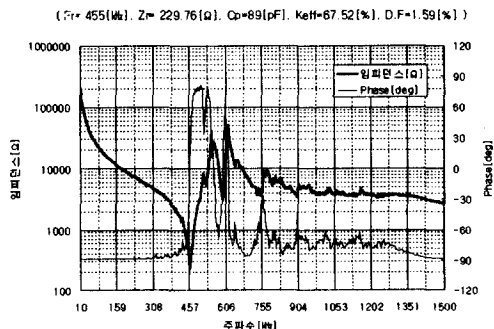
음향방출 센서의 핵심 부품인 PZT세라믹의 재료특성을 표 1에 나타내었다. WO₃를 0.1 wt% 첨가한 시편의 밀도가 WO₃를 첨가하지 않은 시편보다 다소 낮고 압전상수도 거의 비슷하지만 유전상수가 높게 나타나서 음향방출 센서 특성도 우수하리라 생각된다[5].

표 1. 음향방출 센서용 PZT세라믹의 재료물성
Table 1. Material properties of PZT ceramic for acoustic emission sensor

재료물성	EC-65+ 0 wt% WO ₃	EC-65+ 0.1 wt% WO ₃
Density(kg/m ³)	7497	7534
Curie point(°C)	335	324
Mechanical Q	58.67	59.36
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	1880	1931
k ₃₁ (%)	36.41	37.20
k _p (%)	63.25	63.85
d ₃₁ (10 ⁻¹² C/N)	-189.65	-199.55
d ₃₃ (10 ⁻¹² C/N)	493	496
g ₃₁ (10 ⁻³ m ² /C)	-11.39	-11.67
g ₃₃ (10 ⁻³ m ² /C)	29.62	29.01
N _p [Hz.m]	1993	2010



(a) 결합 진동모드



(b) 비결합 진동모드

그림 5. 진동모드에 따른 음향방출센서의 임피던스 특성
Fig. 5. Impedance characteristics of AE sensor according to the vibration mode

두 가지 진동모드의 PZT세라믹을 케이스에 장착하여 음향방출 센서를 완성한 후에 전기 임피던스 측정을 통하여 공진주파수를 알아보았으며 그 결과를 진동모드에 따라 그림 5에 나타내었다.

그림 5(a)에는 공진주파수인 324 kHz 부근에서 두께 진동과 경방향 진동이 같이 나타나는 결합 진동모드를 보이고 있으며 이는 PZT세라믹의 $\lambda/2$ 공진주파수에 해당된다.

그림 5(b)에는 두께를 지름의 1/2로 한 음향방출 센서의 임피던스특성으로 공진주파수가 455 kHz로 나타났으며 비결합 진동모드를 보이고 있다.

4.2 음향방출 센서의 감도특성

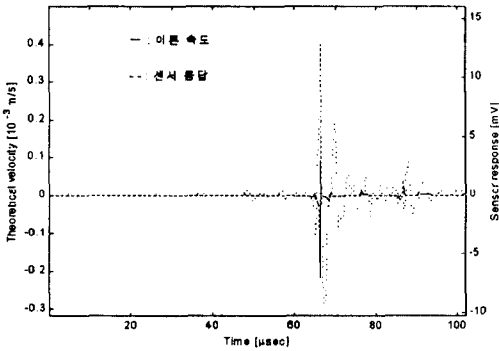
음향방출 센서 측정시스템은 음향방출 센서, 앰프,

음향방출 신호분석 장치로 구성되는데 본 실험에서는 앰프는 사용하지 않았다. 측정장치의 평판으로 사용된 단조강 원판에서의 탄성파 속도는 5 MHz 초음파 펄스 에코 중첩법을 이용하여 측정한 결과 종파의 속도는 5892 m/s, 횡파의 속도는 3256 m/s 이었다.

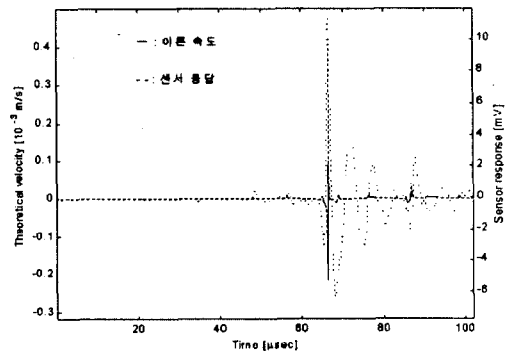
탄성파에 대한 측면에서의 이론적인 변위와 속도는 측정된 단조강의 특성으로부터 그린 함수를 이용하여 계산하였다.

그림 6(a), (b)는 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 단조강



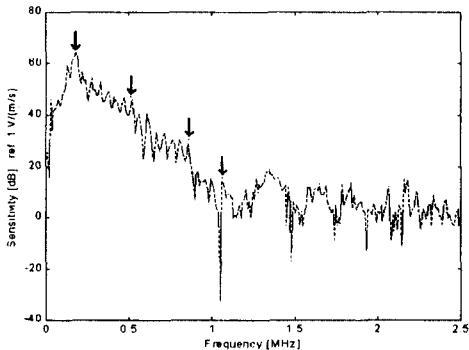
(a) 결합 진동모드



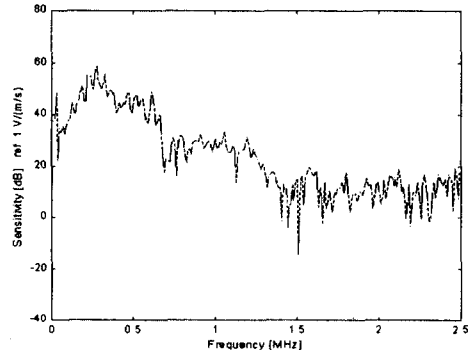
(b) 비결합 진동모드

그림 6. 진동모드에 따른 이론속도와 센서응답

Fig. 6. Theoretical velocity and sensor response according to vibration mode



(a) 결합 진동모드



(b) 비결합 진동모드

그림 7. 진동모드에 따른 감도 특성

Fig. 7. Sensitivity characteristics according to vibration mode

의 경계면에서 반사되어 되돌아오는 여러개의 파를 감지했기 때문이다.

그림 7(a),(b)는 입출력간의 이득을 알아보기 위하여 그림 6에 나타난 계산된 이론속도의 피크와 측정된 음향방출 센서응답의 피크를 일치시킨 후 각각을 FFT하고 (5)식으로 계산하여 그래프로 나타낸 감도특성곡선이다.

결합 진동모드(3.45mmφ×3.45mm PZT)의 경우 그림 7(a)의 감도특성곡선에서 공진주파수 166 kHz로서 이는 λ/4 주파수인 145 kHz보다 다소 높게 나타났으며, 비결합 진동모드(3.45mmφ×1.725mm PZT)의 경우 그림 7(b)의 감도특성곡선에서 공진주파수 265 kHz로서 이는 λ/4 주파수인 292 kHz보다 다소 낮게 나타났다.

감도는 결합 진동모드의 경우 64.3 dB로 비결합 진동모드의 58.9 dB보다 높게 나타났다.

표 2에는 PZT세라믹과 피측정 재질과의 음향임피던스 정합이 이뤄진 편축 정합의 경우 주파수상수 Np와 Nt에 따라 다음 식으로 계산한 공진주파수를 나타내었다.

표 2. Np와 Nt로부터 구한 기본 공진주파수와 고조파

Table 2. Fundamental frequency and harmonics according to Np and Nt

주파수상수		크기	공진주파수 (kHz)			
mm	kHz	mm	1λ/4	3λ/4	5λ/4	7λ/4
Np	2010	3.45	145	435	725	1,015
Nt	2017	3.45	146	438	730	1022
		1.725	292	876	1460	2044

$$f_p = \sum_{n=1}^n \frac{(2n-1)N_p}{4p} \quad (6)$$

$$f_t = \sum_{n=1}^n \frac{(2n-1)N_t}{4t} \quad (7)$$

또한, 최대감도는 $f_p = f_t$ 일 때 얻어지며, f_p 와 f_t 를 f_c 로 하면 결합 진동모드의 공진주파수는 다음 식으로 구해진다.

$$f_m = f_c(1 + \Gamma)^{-1} \quad (8)$$

여기서, Γ 는 결합계수이다.

따라서, f_m 은 f_c 보다도 $(1 + \Gamma)^{-1}$ 높게 되며 그 뒤로 $\lambda/4, 3\lambda/4, 5\lambda/4 \dots$ 에 공진점이 생기게 된다[5].

그림 7(a)에 나타난 것처럼 $t=3.45\text{mm}$ 일 때 설정한 공진주파수 145 kHz보다도 약간 높은 166 kHz에서 최고 감도를 나타내었으므로 $(1 + \Gamma)^{-1}$ 는 1.145가 되고 결합계수 Γ 는 0.311이 된다. 166 kHz의 $n\lambda/4$ 로한 n의 기수배인 고조파 166, 498, 830, 1,162 kHz에서 작은 피크가 나타났다.

일반적으로 공진형 음향방출 센서는 광대역 음향방출 센서에 비해 감도가 1~2 order 정도 크게 나타나며, 공진시에서의 감도(v/m/s)도 크게 나타난다.

두가지 진동모드를 비교해보면 결합 진동모드 음향방출 센서의 감도가 비결합 진동모드 음향방출 센서의 감도보다 우수하다는 것을 알 수 있다.

4.3 침-평판 전극에서의 부분방전 응답특성

그림 8은 침-평판 전극에서 부분방전이 발생할 경우에 침-평판 전극 구조물을 내장한 탱크 외함에 본 연구에서 제작한 음향방출 센서를 부착하고 침-평판전극간의 부분방전 발생에 따라 측정된 초음파 파형이다.

그림 9는 이 초음파 신호의 주파수 스펙트럼이다.

그림 8 및 9에서 각각 2개의 파형이 기록되어 있는데, 위쪽의 파형(오실로스코프의 2번 단자)이 비결합 진동 모드로 동작하는 공진주파수 265 kHz인 음향방출 센서의 응답특성이고, 아래쪽 파형(오실로스코프의 3번 단자)이 비결합 진동모드로 동작하는 공진주파수 166 kHz인 음향방출 센서의 응답특성이다.

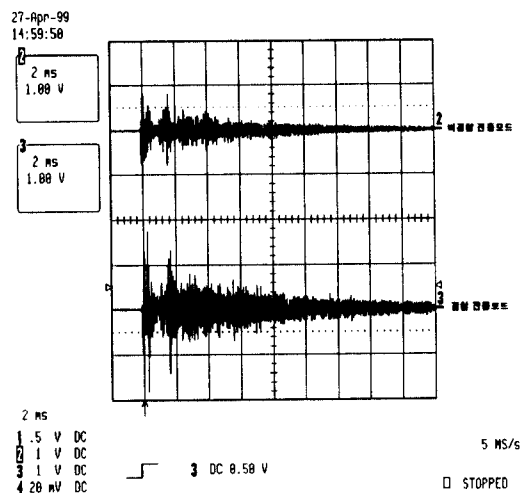


그림 8. 침-평판 전극에서의 부분방전 검출 파형
Fig. 8. Partial discharge detection waveform in the needle and plate electrode

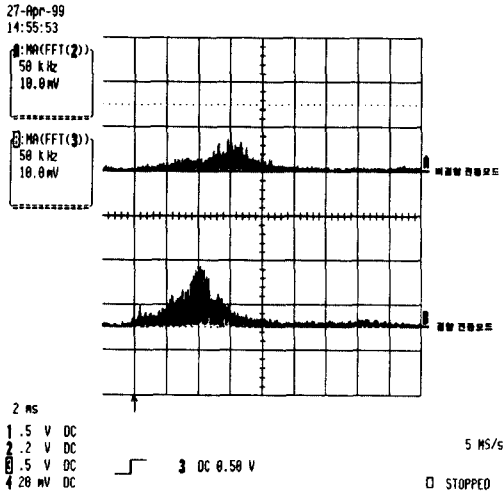


그림 9. 침-평판 전극에서의 부분방전 검출파형 주파수 스펙트럼

Fig. 9. Frequency spectrum for partial discharge detection waveform in needle and plate electrode

그림 8에서 결합 진동모드로 동작하는 음향방출 센서가 비결합 진동모드로 동작하는 음향방출 센서보다 부분방전 검출응답전압이 커서, 미세한 부분방전의 검출에 적합함을 알 수 있다.

또한 그림 9에서 부분방전에 따른 초음파신호의 주파수 스펙트럼은 결합 진동모드 음향방출 센서의 경우 150 kHz를 중심으로 ± 100 kHz 정도까지, 그리고 비결합 진동모드 음향방출 센서의 경우 200 kHz를 중심으로 ± 50 kHz 정도까지 부분방전에 의한 초음파신호에 응답하였으며, 결합 진동모드 음향방출 센서의 출력전압이 더 높았다.

5. 결 론

EC-65에 WO_3 를 0.1 wt% 첨가한 조성으로 PZT 세라믹을 제조하고 공기 후면층으로 공진형 음향방출 센서를 제작하여 특성 측정한 결과는 다음과 같다.

1. 비결합 진동모드를 이용하여 제작된 음향방출센서의 감도특성은 265 kHz에서 58.9 dB이었다.

2. 결합 진동모드를 이용하여 제작된 음향방출센서의 감도특성은 166 kHz에서 64.3 dB이었다.
3. 결합 진동모드로 동작하는 음향방출 센서가 비결합 진동모드로 동작하는 음향방출 센서보다 부분방전 검출응답전압이 커서, 미세한 부분방전의 검출에 적합함을 알 수 있었으며 그 중심 주파수는 150 kHz이었다.

따라서 본 연구에서 결합 진동모드를 이용하여 제작된 음향방출 센서의 특성은 변압기 등의 전력설비의 부분방전 검출에 적합하다고 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 대한전기협회 역편, "전기설비의 진단기술", 일본전기학회, pp. 3-10, 1991.
- [2] R. T. Harrold, "Acoustical Technology Applications in Electrical Insulation and Dielectrics", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 20, No. 1, pp. 3-19, 1985.
- [3] ASTM E610-89a, "Standard Terminology Relating to Acoustic Emission".
- [4] R. Dukes, E. A. Culpan, "Acoustic emission : its techniques and applications", IEEE Proc., Vol. 131, No. 4, pp. 241-251, 1984.
- [5] M. Shiwa, H. Inaba, S. H. Carpenter and T. Kishi, "Development of High-Sensitivity and Low-noise Integrated Acoustic Emission Sensor", Material Evaluation, pp. 868-874, July 1992.
- [6] E. Howells, "Acoustic Emission Detection of Partial Discharge in Power Transformer", EPRI Report, pp. 1-12, 1985.
- [7] J. E. Michaels, "Application of Deconvolution to Acoustic Emission Signal Analysis", Mat. Eval. Vol. 39, pp. 1032-1036, 1981.
- [8] ASTM E1106-86, "Standard Method for Primary Calibration of AE Sensors".
- [9] 김영환, 윤동진, 이세경, 김호철, "과도파를 이용한 음향방출 시험용 센서 특성 측정", 응용물리, 제3권 제4호, pp. 374-380, 1990.