

유한요소해석을 이용한 GIS용 AE 센서의 설계와 특성

°홍재일*, 이병호*, 김일남*, 조태경*, 류주현**
동서울대학 전기과*, 세명대학교 전기공학과**

Design and Characteristics of AE Sensor for GIS by Finite Element Analysis

°Jae-II Hong*, Byung-Hyo Lee*, Il-Nam Kim*, Tae-Kyung Cho*, Ju-Hyun Yoo**
Dong Seoul College*, Semyung University**

Abstract - In this paper, the coupled and the non-coupled vibration mode AE sensor for GIS were simulated by finite element analysis and manufactured, and characterized. The maximum sensitivity was 64.3 dB when the resonant frequency of the coupled vibration mode AE sensor was 166 kHz and the maximum sensitivity was 58.9 dB when the resonant frequency of the non-coupled mode AE sensor was 265 kHz. The coupled vibration mode AE sensor responded higher than the non-coupled vibration mode AE sensor at the partial discharge detection in GIS.

텐레스 케이스로 이루어진 AE 센서의 구조를 그림 1과 같이 결정하였다. 여기서, d : 압전 소자의 직경(가변), t : 압전 소자의 두께(가변), st : 케이스 두께(0.8 mm), bl : 후면층 두께(11.7 mm), sl : 측면층 두께(1.9 mm), wp : 보호판 두께(0.5 mm)이다.

본 논문에서 후면층을 에폭시로 하지 않고 공기로 한 것은 에폭시의 흡음손실로 인한 센서의 감도 저하를 방지하기 위한 것이다. 이때 AE 센서의 공진주파수를 확인하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.5(ANSYS, Inc.)를 사용하여 AE 센서의 구조설계 및 시뮬레이션을 하였다.

그림 1은 시뮬레이션을 보다 효율적으로 하기 위해 공진형 AE 센서의 y축 대칭 1/2구조를 2차원 모델로 나타내었으며 표 2에는 시뮬레이션에 필요한 각종 재료정수를 기술하였다.

1. 서 론

산업시설물의 안전도 진단을 하는 방법에는 대상물을 손상시키지 않고 검사하는 비파괴검사법이 많이 이용되며 검출원으로는 방사선, 레이저, 초음파 등이 쓰인다. 특히 변압기, GIS(가스절연개폐장치) 등의 전력설비의 예방 진단에는 검출특성이 우수한 AE 센서가 주목을 받고 있다[1,2].

AE(Acoustic Emission)는 재료내부의 국부적인 에너지원으로부터 급격한 해방에 의해 발생하는 과도 탄성과 현상을 의미하며 AE 센서는 이러한 탄성과를 전기적인 신호로 변환하는 감지소자[3]로서 대부분 압전세라믹을 사용한다. AE 센서는 구조에 따라서 광대역형과 공진형이 있는데 공진형이 감도가 좋아서 많이 쓰이며 최근에는 비결합 진동모드보다 결합 진동모드를 이용하여 감도를 높이려는 연구가 이뤄지고 있다[4].

본 연구에서는 PZT-5A계 세라믹 EC-65로 된 결합 진동모드와 비결합 진동모드의 공진형 AE센서를 ANSYS 프로그램으로 설계한 후 제작하여 그 감도특성과 GIS내에 금속이물에 의한 부분방전 검출특성을 고찰하였다.

2. 실험

2.1 AE 센서의 구조설계 및 시뮬레이션

압전 소자의 진동모드는 비교적 우수한 감도를 갖는 결합 진동모드[5,6]로 하였으며 GIS 내의 금속이물 감지에 적합한 공진 주파수 범위는 40~250 kHz이므로[7] 압전 소자의 크기는 표 1에 나타난 것과 같은 두 가지로 하였다.

표 1. AE 센서의 분류

Table 1. Classification of AE sensors

센서번호	압전 소자 크기	후면층
AE1	3.45 mm ϕ × 3.45 mm	공기
AE2	3.45 mm ϕ × 1.725 mm	공기

그리고 정합층(matching layer)역활을 하는 알루미늄 보호판(wear plate), 공기 후면층(air backing layer), 스

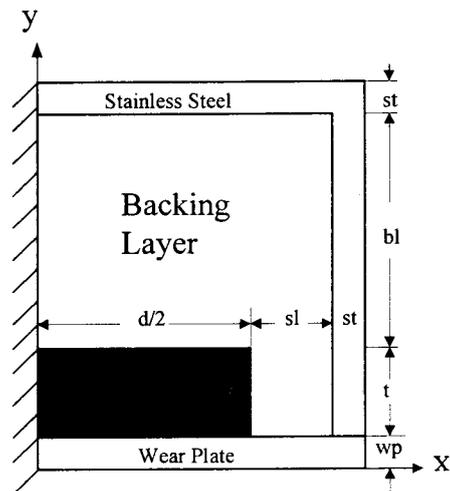


그림 1. 공진형 AE 센서 모델

Fig. 1. Resonant type AE sensor model

2.2 AE 센서의 제작

AE 센서의 구조설계 및 시뮬레이션을 바탕으로 표 1에 나타난 것과 같은 두 가지 AE 센서를 제작하였다. 압전 소자는 PZT-5A계 세라믹인 EC-65(Edo사)를 사용하여 1150 °C에서 2시간 소성하여 만든 후 120 °C의 실리콘유에서 30 [kV/cm]의 전계로 분극하였고 그림 1과 같은 공기 후면층(air backing) 구조의 AE센서를 제작하였다.

보호판과 케이스, 압전 소자와의 접착은 도전성 접착제(59C)를 사용하였으며 전선 접속은 납땀을 하였고 측정을 위하여 AE 센서의 외부 접점은 나사식으로 된 microdot를 부착하였다.

2.3 AE 센서의 전기적 임피던스 및 감도 측정

ANSYS 프로그램을 이용한 시뮬레이션으로 나온 공

표 2. AE센서의 재료정수

Table 2. Material constants of AE sensor

재료	항목	정수
EC-65 (PZT-5A)	ρ (kg/m ³)	7750
	ϵ_{33}^T (10 ⁻⁸ F/m)	1.51
	ϵ_{11}^T (10 ⁻⁸ F/m)	1.53
	c_{11}^E (10 ¹⁰ N/m ²)	12.1
	c_{12}^E (10 ¹⁰ N/m ²)	7.54
	c_{33}^E (10 ¹⁰ N/m ²)	11.1
	c_{13}^E (10 ¹⁰ N/m ²)	7.52
	c_{44}^E (10 ¹⁰ N/m ²)	2.11
	c_{66}^E (10 ¹⁰ N/m ²)	2.26
	e_{33} (C/m ²)	15.8
	e_{31} (C/m ²)	-5.4
e_{15} (C/m ²)	12.3	
Al ₂ O ₃	ρ (kg/m ³)	2073
	영률 E(N/m ²)	1.2×10^{10}
	G(N/m ²)	0.452×10^{10}
Air	ρ (kg/m ³)	1.293
	영률 E(N/m ²)	1.49×10^5
	G(N/m ²)	1×10^{-5}
Stainless Steel	ρ (kg/m ³)	8470
	영률 E(N/m ²)	21.5×10^{10}
	G(N/m ²)	8.39×10^{10}

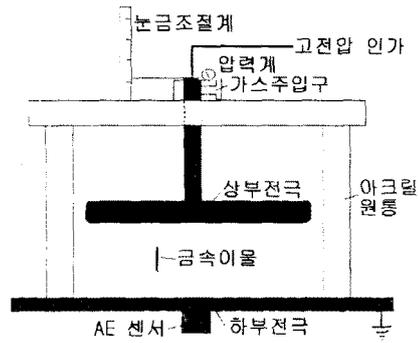


그림 2. 모의 GIS
Fig. 2. Gas Insulated Switchgear

적으로 유지되도록 하였다. GIS의 금속이물은 고전압에 의해 움직이면서 강철로 된 외함에 부딪혀 초음파를 발생하고 이는 외함을 따라 AE 센서에 도달한다. 본 논문에서는 금속이물로서 철사 모양(0.5mm ϕ ×6mm)의 구리 선을 이용하였다.

측정 순서는 금속이물을 모의 GIS 내에 넣고 진공을 10⁻³ torr 정도로 뽑고 SF₆ 가스를 2 kg/cm³ 봉입하였으며 전압을 15 kV 인가하여 부분방전을 일으켜 그때 발생된 초음파 신호를 오실로스코프(LeCroy 9310A)로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 AE 센서의 시뮬레이션 결과

결합 진동모드인 AE1 센서(3.45 mm ϕ ×3.45 mm)와 비결합 진동모드인 AE2 센서(3.45 mm ϕ ×1.725 mm), 두 가지 종류의 AE 센서 2차원 모델을 설계한 후, 공진 주파수를 확인하기 위하여 ANSYS 프로그램으로 시뮬레이션한 결과를 그림 3에 나타내었다.

진주파수와 비교하기 위하여 제작된 AE 센서의 전기적 임피던스를 측정하였으며 사용된 장비는 Network Analyzer(HP 4194A)이었다.

또한 AE센서의 감도특성을 측정하기 위하여 과도 탄성과 측정법(ASTM 1106-86)[8]을 이용한 간이 감도 측정 시스템을 사용하였다[9]. 탄성파원으로는 유리모세관(내경 0.15 mm, 외경 0.25 mm, Vitro Dynamics사)을 사용하였고 전달매질로는 감쇄와 분산이 적은 단조강(직경 50 cm, 두께 5 cm)을 사용하였으며 센서는 탄성파원의 측면 20 cm에 클리셰린 couplant로 접촉하였다.

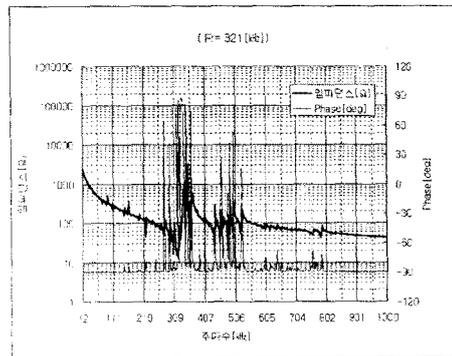
AE 센서의 응답 파형을 디지털 오실로스코프(LeCroy 9354A)로 측정한 후 0.2 μ s 간격으로된 510개의 데이터를 디스켓에 저장한 후 다음 식을 이용하여 이론적으로 계산된 Green 함수의 속도[10]와 비교하여 감도를 구하였으며 데이터 처리는 MATLAB 프로그램을 사용하였다.

$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{\text{센서응답}[V]}{\text{이론속도}[m/s]} \right) \quad (1)$$

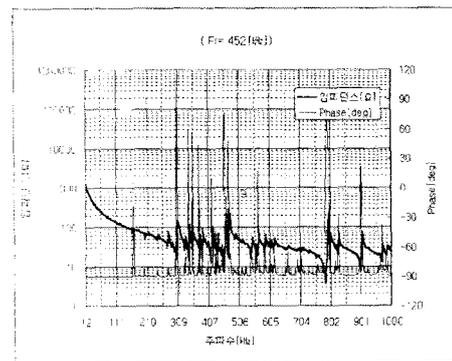
2.3 모의 GIS 및 부분방전 응답 측정

GIS 내의 금속이물에 의한 부분방전을 측정하기 위하여 실제의 GIS를 이용하기에는 SF₆ 가스의 가격이 너무 비싸고 특고압에 의한 위험성을 배제하고자 그림 2와 같은 모의 GIS를 사용하였다.

부분방전의 검출특성 시험을 실시하기 위하여, 고전압 발생장치, 평판-평판 전극, AE 센서, 전치증폭기, 부분방전 검출기, 오실로스코프 등의 부분방전 검출시스템을 구성하여 측정하였다[11]. 고전압 발생장치는 30 kV까지 고전압을 발생할 수 있는 것으로 본 시험에서는 평판-평판 전극에 15 kV의 고전압을 인가하여 부분방전이 지속



(a) AE1 센서



(b) AE2 센서

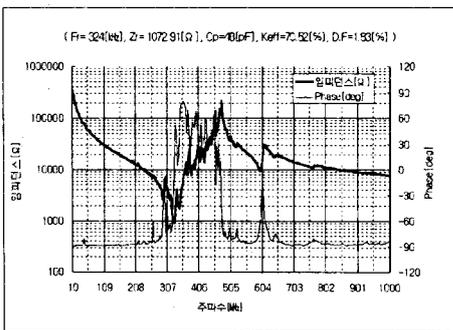
그림 3. 진동모드에 따른 시뮬레이션 결과
Fig. 3. Simulation results with the vibration mode

AE1 센서의 경우 321 kHz에서 최저의 임피던스를 나타내어 공진특성을 보였으며 AE2 센서의 경우 452 kHz에서 공진 특성을 나타내었으며 전체적으로 임피던스곡선이 복잡한 것은 단일 구조가 아닌 복합구조이어서 각 모드간의 matching이 잘 안된 것으로 생각된다..

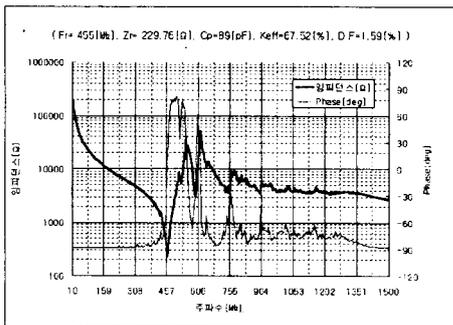
3.2 AE 센서의 전기적 특성

두 가지 진동모드의 PZT세라믹을 케이스에 장착하여 AE 센서를 완성한 후에 전기 임피던스 측정을 통하여 공진주파수를 알아보았으며 그 결과를 진동모드에 따라 그림 4에 나타내었다.

그림 4(a)는 AE1 센서의 임피던스 특성곡선으로 324 kHz 부근에서 두께 진동과 경방향 진동이 같이 나타나는 결합 진동모드를 보이고 있으며 이는 PZT세라믹의 λ/2 공진주파수에 해당된다. 그림4(b)는 두께를 지름의 1/2로 한 AE2 센서의 임피던스 특성곡선으로 공진주파수가 455 kHz로 나타났으며 비결합 진동모드를 보이고 있다. 이러한 결과는 앞에서 살펴본 시뮬레이션으로 구한 공진주파수와 거의 일치하고 있다.



(a) AE1 센서



(b) AE2 센서

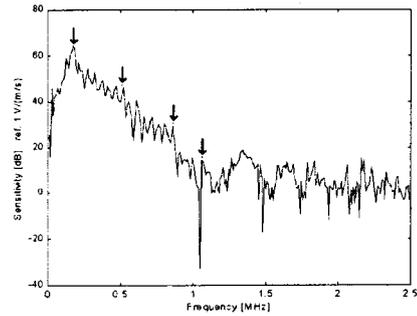
그림 4. 진동모드에 따른 임피던스 곡선
Fig. 4. Impedance plot with the vibration mode

3.3 AE 센서의 감도 특성

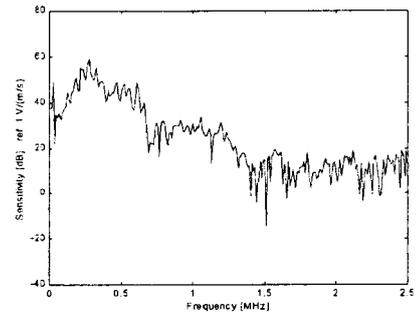
AE 센서 측정시스템은 AE 센서, 앰프, AE 신호분석 장치로 구성되는데 본 실험에서는 앰프는 사용하지 않았다. 측정장치의 평판으로 사용된 단조강 원판에서의 탄성과 속도는 5 MHz 초음파 펄스 에코 중첩법을 이용하여 측정한 결과 종파의 속도는 5892 m/s, 횡파의 속도는 3256 m/s 이었다. 탄성파에 대한 측면에서의 이론적인 변위와 속도는 측정된 단조강의 특성으로부터 그런 함수를 이용하여 계산하였다.

AE 센서의 감도는 파도 탄성과 측정법으로 측정할 후, MATLAB 프로그램으로 데이터 처리하였으며 그 결과를 그림 5에 나타내었다.

AE1 센서의 경우 그림 5(a)의 감도 특성곡선에서 최대감도주파수는 166 kHz로서 이는 λ/4 공진주파수인 145 kHz보다 다소 높게 나타났으며, AE2 센서의 경우 그림 5(b)의 감도 특성곡선에서 265 kHz로서 이는



(a) AE1 센서



(b) AE2 센서

그림 5. 진동모드에 따른 감도 특성
Fig. 5. Sensitivity characteristics with the vibration mode

λ/4 공진주파수인 292 kHz보다 다소 낮게 나타났다. 감도는 AE1 센서의 경우 64.3 dB로 AE2 센서의 58.9 dB보다 높게 나타났다.

표 3에는 PZT세라믹과 피측정 재질과의 음향임피던스 정합이 이뤄진 편측 정합의 경우 주파수상수 Np와 Nt에 따라 다음 식으로 계산한 공진주파수를 나타내었다.

표 3. Np와 Nt로부터 구한 기본 공진주파수와 고조파
Table 3. Fundamental frequency and harmonics according to Np and Nt

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

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

$$f_t = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-1)N_t}{4t} \quad (3)$$

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

$$f_m = f_c(1 + \Gamma)^{1/2} \quad (4)$$

여기서, Γ 는 결합계수이다.

따라서, f_m 은 f_c 보다도 $(1 + \Gamma)^{1/2}$ 높게 되며 그 뒤로

$\frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4} \dots$ 에 공진점이 생기게 된다[5].

그림 5(a)에 나타난 것처럼 $t=3.45\text{mm}$ 일 때 설정한 공진주파수 145 kHz보다도 약간 높은 166 kHz에서 최고 감도를 나타내었으므로 $(1 + \Gamma)^{1/2}$ 는 1.145가 되고 결합계

수 Γ 는 0.311이 된다. 166 kHz의 $n\lambda/4$ 로한 n 의 기수 배인 고조파 166, 498, 830, 1,162 kHz에서 작은 피크가 나타났다.

일반적으로 공진형 AE 센서는 광대역 AE 센서에 비해 감도가 1~2 order 정도 크게 나타나며, 공진시에서의 감도(v/m/s)도 크게 나타난다. 또한 두가지 진동모드를 비교해보면 결합 진동모드 AE1 센서의 감도가 비결합 진동모드 AE2 센서의 감도보다 우수하다는 것을 알 수 있다.

앞에서 고찰한 AE 센서의 시뮬레이션 결과, 측정된 공진 주파수, 최대감도 주파수와 최대 감도를 표 4에 정리하였는데 결합 진동모드인 AE1 센서의 특성이 우수함을 알 수 있었다.

표 4. AE 센서의 공진주파수와 최대감도 주파수
Table 4. Resonant freq. and maximum sensitivity freq. of AE sensor

센서 번호	시뮬레이션 결과[kHz]	측정 공진 주파수[kHz]	최대 감도 주파수[kHz]	최대감도 [dB]
AE1	321	324	166	64.3
AE2	452	455	265	58.9

3.4 모의 GIS에서의 부분방전 응답특성

그림 6은 모의 GIS 내의 평판-평판 전극에서 금속 이물로 인해 부분방전이 발생할 경우 본 논문에서 제작한 AE 센서를 모의 GIS 외함에 부착하고 측정된 초음파 파형과 이 초음파 신호를 FFT 처리한 주파수 스펙트럼이다.

모의 GIS 내의 금속이물에 의한 부분방전을 측정하고 고찰한 결과, 두 가지 AE 센서중에서 최대 감도 주파수가 166 kHz인 결합 진동모드 AE1 센서의 부분방전 검출파형은 비교적 양호하게 나타났으나 최대 감도 주파수가 265 kHz인 비결합 진동모드 AE2 센서의 부분방전 검출파형은 좋지 않았다. 또한 AE1 센서의 경우 24 kHz 부근에서 최대 검출특성을 보였으며 이 결과는 GIS 내의 금속이물에 의한 부분방전을 잘 검출할 수 있음을 보여준 것이다.

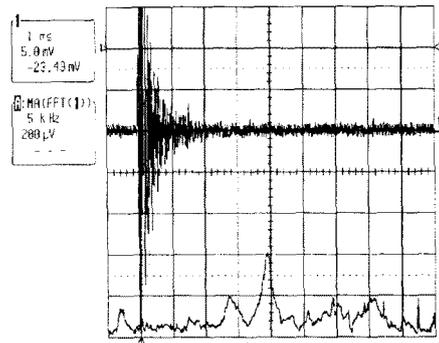
4. 결 론

결합 진동모드 AE1 센서(3.45 mm ϕ × 3.45 mm)와 비결합 진동모드 AE2 센서(3.45 mm ϕ × 1.725 mm)를 ANSYS 프로그램으로 설계하여 제작한 후 특성을 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

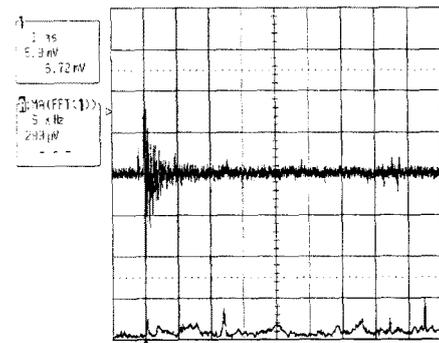
1. 측정 공진주파수는 시뮬레이션치와 비슷하였다.
2. 결합 진동모드 AE1 센서의 감도특성은 166 kHz에서 64.3 dB이었으며 비결합 진동모드 AE2 센서의 감도특성은 265 kHz에서 58.9 dB으로 결합 진동모드가 더 우수하였다.
3. 결합 진동모드 AE1 센서가 비결합 진동모드 AE2 센서보다 부분방전 검출응답전압이 커서, 미세한 부분방전의 검출에 적합함을 알 수 있었다.

[참고문헌]

- [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"



(a) AE1 센서



(b) AE2 센서

그림 6. 진동모드에 따른 부분방전 파형
Fig. 6. Partial discharge waves with the vibration mode

- [4] Li Ming, "Behaviour and Effect of Conducting Spiral Partiales under AC Voltage in a Gas Insulated ElectrodeSystem", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.3, No.1, pp.159-164, 1988
- [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] 정영호, 홍재일, 류주현, 박창엽, "부분방전 검출용 결합진동모드 음향방출센서의 특성", 전기전자재료학회 논문지, 제 12 권, 제 12 호, pp.1097-1098, 1999
- [7] Sparen, P.H., Skyberg, B., Hergersberg, R. and Lundgaard, L.E., Gas Insulated Substations, Technology and Particle, Eds: Boggs, Fujimoto and Chu, Pergamon Press, pp.331-340, 1986
- [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
- [10] N.N.Hsu, "Dynamic Green's function of an infinite plate - a computer program", NBSIR 85-3234, Nat'l Bur. Stds, 1985
- [11] 조국희, "금속이물 검출에 의한 가스절연개폐장치 예방진단에 관한 연구", 박사학위논문, 숭실대학교 대학원, 1998