

GIS 내의 금속이물 탐지용 AE 센서의 설계와 특성

Design and Characteristics of AE Sensor for Detection of Metallic particle in GIS

홍재일*, 정영호**, 류주현***
Jae-Il Hong*, Yeong-Ho Jeong**, Ju-Hyun Yoo***

Abstract

In order to detect the partial discharge with the metallic particle in GIS, the AE(Acoustic Emission) sensor was designed and simulated by ANSYS 5.5, and manufactured as the coupled vibration mode. The measured resonant frequency and the maximum sensitivity frequency of three coupled AE sensors were as follows ; 147.88 kHz and 67.5 kHz in 8.1 mm ϕ \times 8.1 mm, 128.82 kHz and 58.8 kHz in 9.5 mm ϕ \times 9.5 mm, 85.22 kHz and 32.6 kHz in 14.3 mm ϕ \times 14.3 mm, repectively. The former was about $\lambda/2$ resonant frequency and the latter was about $\lambda/4$ resonant frequency of the AE sensor. The AE sensor of 9.5 mm ϕ \times 9.5 mm responded higher than the other coupled vibration mode AE sensor at the partial discharge detection in GIS.

Key Words(중요용어) : Coupled vibration mode(결합진동모드), AE sensor(음향방출센서), Partial discharge detection(부분방전검출), Metallic particle(금속이물), GIS(가스절연개폐장치)

1. 서론

오늘날 각종 산업이 발달함에 따라 산업의 기본이 되는 전력 수요는 급속하게 증가하고 있으며 이와 함께 전력계통의 안정화와 송배전의 신뢰성이 크게 요구되고 있다. 전력설비 중에서 GIS(Gas Insulated Switchgear)는 모선, 차단기, 단로기, 접지장치 등을 조합하여 설치한 설비로서 공기나 절연유 대신 절연내력이 우수한 SF₆ 가스를 금속용기에 밀폐시킨 간결하고 안전한 기기로 절연내력이 높으면서도 소형으로 제작 가능하며 신뢰성이 높고 보

수가 간편하다는 장점이 있어 최근 초고압 대용량 전력설비에 많이 사용되고 있다^[1,2,3].

GIS의 제작 기술도 그동안 획기적으로 발전되어 왔으나 제작과정과 운송, 설치 중 또는 운전도중의 기계적 응축 등으로 내부에 발생하는 금속이물로 인해 시스템의 절연내력이 치명적으로 감소하여 사고에 이르는 경우가 많이 있다^[4,5]. 이에 따라 GIS의 신뢰성을 향상하기 위하여 절연성능의 심각한 저하를 초래하는 금속이물의 영향을 극복하려는 연구가 선진 외국에서 많이 행해지고 있다.

GIS의 내부 금속이물을 검출하는 방법으로는 전기적, 기계적, 음향적, 화학적 및 광학적인 방법이 있는데 그 중에서 내부 금속이물에 의해 부분방전이 발생되기 전에 측정이 가능한 음향법을 예방진단차원에서 많이 사용하고 있다. 음향법으로 가속도 센서가 사용되기도 하였으나 주위의 기계적인 음향소음에 영향을 받는 단점으로 인해 소음에 강한 AE 센서로 많이 대체되고 있는 실정이다^[6].

따라서 본 논문에서는 EC-65 압전 소자로 된 결

* 동서울대학 전기과
(경기도 성남시 수정구 복정동 423,
Fax : 0342-720-2060,
E-mail : jihong@haksan.dsc.ac.kr)

** 한전 전력연구원 전력계통연구소실

*** 세명대학교 전기공학과

2000년 3월 18일 접수, 2000년 5월 10일 심사완료

합 진동모드의 공진형 AE 센서를 ANSYS 프로그램으로 설계한 후 제작하였으며, 모의 GIS 내에 금속이물을 넣은 후 발생하는 초음파 신호를 AE 센서로 측정하고 고찰하였다.

2. 실험

2.1 AE 센서의 구조설계 및 시뮬레이션

GIS 내의 금속이물 탐지용 공진형 AE 센서를 설계하려면 먼저 공진주파수를 알아야 하고 그에 따른 압전 소자의 진동모드와 크기를 결정해야 한다. 압전 소자의 진동모드는 비교적 우수한 감도를 갖는 결합 진동모드^[7,8]로 하였으며 GIS 내의 금속이물 감지에 적합한 공진 주파수 범위는 40~250 kHz 이므로^[9] 압전 소자의 크기는 표 1에 나타낸 것과 같은 세가지로 하였다.

표 1. AE 센서의 분류

Table 1. Classification of AE sensors

센서번호	압전 소자 크기	후면층
AE-1	8.1 mm ϕ × 8.1 mm	공기
AE-2	9.5 mm ϕ × 9.5 mm	공기
AE-3	14.3 mm ϕ × 14.3 mm	공기

그리고 정합층(matching layer)역활을 하는 알루미늄이나 보호판(wear plate), 공기 후면층(air backing layer), 스텐레스 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 예폭시로 하지 않고 공기로 한 것은 예폭시의 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.

2.2 AE 센서의 제작

AE 센서의 구조설계 및 시뮬레이션을 바탕으로 표 1에 나타낸 것과 같은 세가지 결합 진동모드의 AE 센서를 제작하였다. 압전 소자는 PZT-5A계 세

라믹인 EC-65(Edo사)를 사용하여 1150 ℃에서 2시간 소성하여 만든 후 120 ℃의 실리콘유에서 30 [kV/cm]의 전계로 분극하였고 그림 1과 같은 공기 후면층(air backing) 구조의 AE센서를 제작하였다.

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

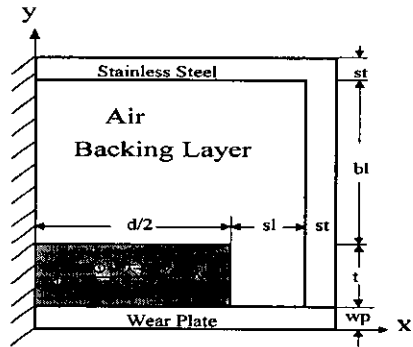


그림 1. 공진형 AE 센서 모델

Fig. 1. Resonant type AE sensor model

표 2. AE센서의 재료정수

Table 2. Material constants of AE sensor

재 료	항 목	정 수
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
	ϵ_r	9.7
Air	ρ (kg/m ³)	1.293
	영률 E(N/m ²)	1.49 × 10 ⁵
	G(N/m ²)	1 × 10 ⁻⁵
	ϵ_r	1.0
Stainless Steel	ρ (kg/m ³)	8470
	영률 E(N/m ²)	21.5 × 10 ¹⁰
	G(N/m ²)	8.39 × 10 ¹⁰

2.2 AE 센서의 전기적 임피던스 및 감도 측정

ANSYS 프로그램을 이용한 시뮬레이션으로 나온 공진주파수와 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)^[10]을 이용한 간이 감도측정 시스템을 사용하였다^[11]. 탄성과원으로는 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 탄성과원의 측면 20 cm에 글리세린 couplant로 접촉하였다.

AE 센서의 응답 파형을 디지털 오실로스코프(LeCroy 9354A)로 측정한 후 0.2 μs 간격으로된 510개의 데이터를 디스켓에 저장한 후 다음 식을 이용하여 이론적으로 계산된 Green 함수의 속도^[12]와 비교하여 감도를 구하였으며 데이터 처리는 MATLAB 프로그램을 사용하였다.

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

2.3 모의 GIS 및 부분방전 응답 특성

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.

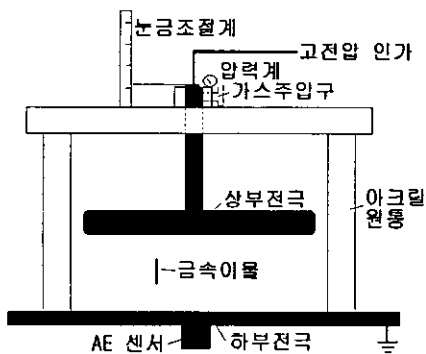


그림 2. 모의 GIS

Fig. 2. Gas Insulated Switchgear

부분방전의 검출특성 시험을 실시하기 위하여, 고전압 발생장치, 평판-평판 전극, AE 센서, 전치중폭기, 부분방전 검출기, 오실로스코프 등의 부분방전 검출시스템을 구성하여 측정하였다.^[13] 고전압 발

생장치는 30 kV까지 고전압을 발생할 수 있는 것으로 본 시험에서는 평판-평판 전극에 15 kV의 고전압을 인가하여 부분방전이 지속적으로 유지되도록 하였다. GIS의 금속이물은 고전압에 의해 움직이면서 강철로 된 외함에 부딪혀 초음파를 발생하고 이는 외함을 따라 AE 센서에 도달한다.

모의 GIS 내에는 평판전극을 설치하였는데 상부전극의 지름은 100 mm, 두께 10 mm로 제작하였으며 전극의 끝 부분은 부분방전 발생을 억제하기 위해 라운드(round) 처리하였다. 전극간의 간격은 눈금조절계를 이용하여 0에서 60 mm까지 mm 단위로 조절할 수 있게 하였다. 챔버 내 금속이물의 왕복운동(bouncing)시 금속이물이 전극에서 이탈하는 것을 방지하기 위해 원통형 투명 아크릴을 만들어 그 안에 전극을 놓았다. 금속이물에는 볼, 나사, 철사 등의 모양이 있는데 본 논문에서는 철사 모양(0.5 mmφ×6 mm)의 구리선을 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

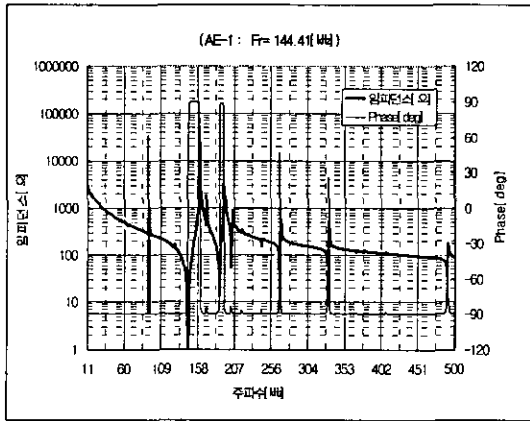
AE-1(8.1 mmφ×8.1 mm), AE-2(9.5 mmφ×9.5 mm), AE-3(14.3 mmφ×14.3 mm) 세가지 종류의 AE 센서 모델을 설계한 후, 공진 주파수를 확인하기 위하여 ANSYS 프로그램으로 시뮬레이션한 결과를 그림 3에 나타내었다.

AE-1 센서의 경우 144.41 kHz에서 최저의 임피던스를 나타내어 공진특성을 보였으며 AE-2 센서의 경우 122.42 kHz에서, AE-3 센서의 경우 82.09 kHz에서 공진 특성을 나타내었다.

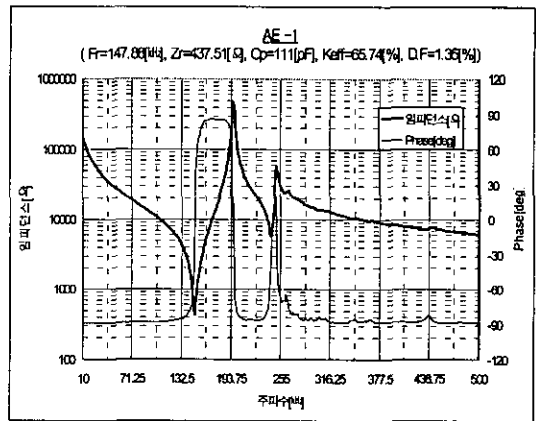
3.2 AE 센서의 전기적 특성

결합 진동모드의 세 가지 압전 소자를 케이스에 각각 장착하여 AE 센서를 완성한 후에 전기 임피던스 측정을 통하여 공진 주파수를 알아보았으며 그 결과를 그림 4에 나타내었다.

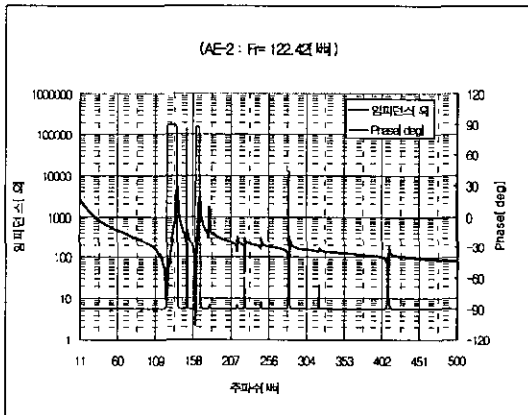
AE-1 센서의 경우는 147.88 kHz, AE-2 센서의 경우는 128.82 kHz, AE-3 센서의 경우는 85.22 kHz로 측정되었다. 이 결과는 앞에서 살펴본 시뮬레이션으로 구한 공진주파수와 거의 일치하고 있다.



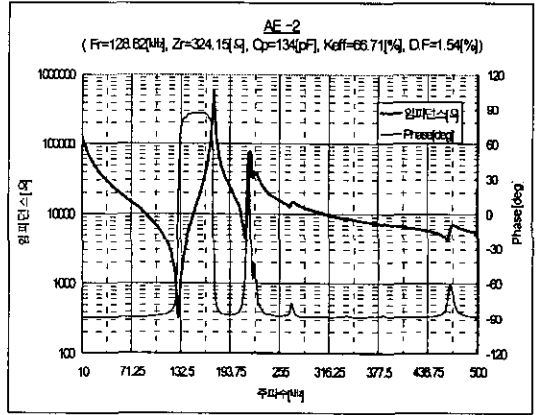
(a) AE-1(8.1 mm ϕ \times 8.1 mm) 센서



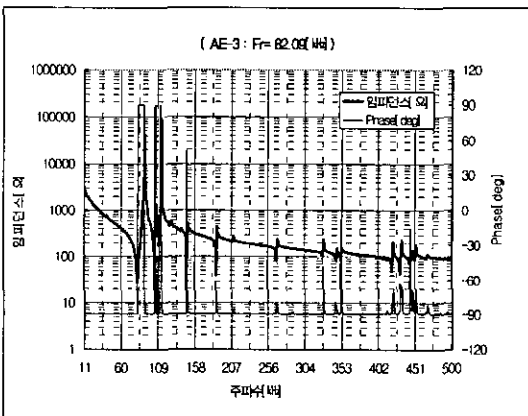
(a) AE-1(8.1 mm ϕ \times 8.1 mm) 센서



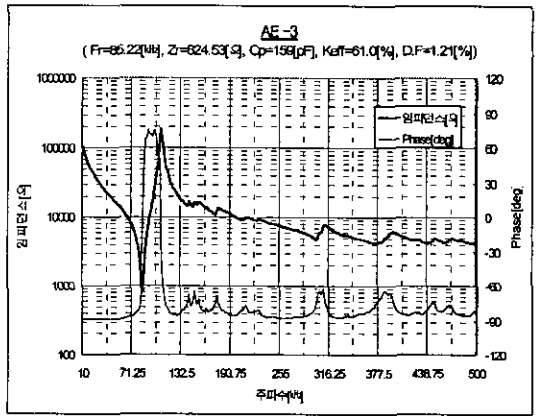
(b) AE-2(9.5 mm ϕ \times 9.5 mm) 센서



(b) AE-2(9.5 mm ϕ \times 9.5 mm) 센서



(c) AE-3(14.3 mm ϕ \times 14.3 mm) 센서



(c) AE-3(14.3 mm ϕ \times 14.3 mm) 센서

그림 3. 압전 소자의 크기에 따른 시뮬레이션 결과
Fig. 3. Simulation results with the piezoelectric device size

그림 4. 압전 소자의 크기에 따른 임피던스 곡선
Fig. 4. Impedance plot with the piezoelectric device size

세가지 센서 전부 두께 진동과 경방향 진동이 같이 나타나는 결합 진동모드를 보이고 있으며 이는 압전 소자의 $\lambda/2$ 공진주파수에 해당된다.

3.3 AE 센서의 감도 특성

AE 센서의 감도는 과도 탄성과 측정법으로 측정 한 후, MATLAB 프로그램으로 데이터 처리하였으며 그 결과를 그림 5에 나타내었다.

AE-1 센서의 경우 최고 감도를 나타내는 주파수는 67.5 kHz이며 그때의 감도는 71.3 dB이었으며 AE-2 센서의 경우 58.8 kHz, 78.6 dB, AE-3 센서의 경우 32.6 kHz, 73.6 dB이었다. 이것은 결합 진동모드 계산식^[7]의 결과와 유사하였다.

즉, 결합 진동모드는 두께진동모드의 공진주파수

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

$$\text{파수}(f_p^u = \sum_{n=1}^n \frac{(2n-1)N_p}{4p})$$

가 같을 때이므로 AE-1 센서의 경우 f_p 만 계산해보면 $n=1$, 주파수 상수 $N_p=1993$, 압전 소자의 직경 $p=8.1$ 을 대입하면 $f_p=61.51$ kHz이다. 그러나 보통 실제의 공진주파수는 $f_m=f_p(1+\Gamma)^{1/2}$ 이며 $(1+\Gamma)^{1/2}$ 는 약 1.127이므로 $f_m=69.3$ kHz가 되는데 측정치 67.5 kHz와 비슷하였다. AE-2 센서의 경우도 $f_m=59.1$ kHz으로 측정치 58.8 kHz와 비슷하였고 AE-3 센서의 경우는 $f_m=39.2$ kHz로 측정치 32.6 kHz와 다소 차이가 있으나 모두 다 $\lambda/4$ 주파수에 가까운 값이었다.

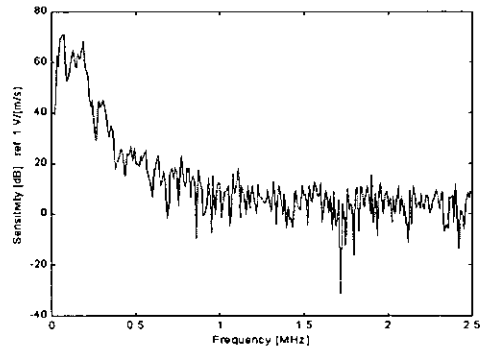
세가지 센서 중에서 감도가 가장 크고 20 dB 이상인 부분이 가장 많은 센서는 AE-2(9.5 mm ϕ \times 9.5 mm) 센서이었고 주파수 범위는 대략 0에서 300 kHz이었다. 이는 GIS 내의 금속이물 감지에 적합한 공진 주파수 범위가 40~250 kHz라고 한 것과 거의 일치하는 것이다.

이제까지 고찰한 것을 정리하여 표 3에 나타내었는데 ANSYS 프로그램으로 시뮬레이션한 공진주파수와 Network Analyzer로 측정한 공진주파수는 거의 비슷하게 $\lambda/2$ 주파수에 해당하며 최대감도 주파수는 $\lambda/4$ 주파수에 해당됨을 알 수 있었다.

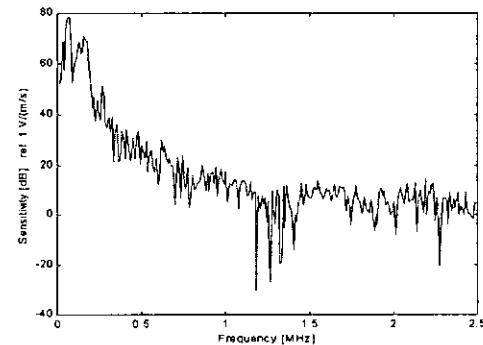
표 3. AE 센서의 공진주파수와 최대감도 주파수

Table 3. Resonant freq. and maximum sensitivity freq. of AE sensor

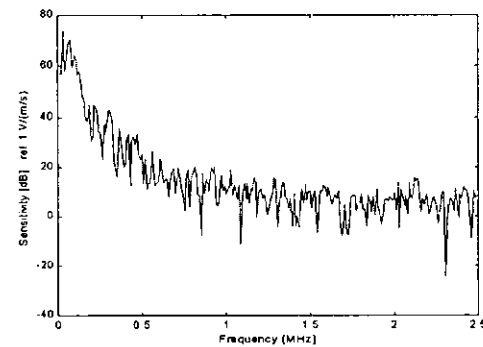
센서 번호	시뮬레이션 결과[kHz]	임피던스 측정치[kHz]	최대감도 주파수[kHz]	최대감도 [dB]
AE-1	144.41	147.88	67.5	71.3
AE-2	122.42	128.82	58.8	78.6
AE-3	82.09	85.22	32.6	73.6



(a) AE-1(8.1 mm ϕ \times 8.1 mm) 센서



(b) AE-2(9.5 mm ϕ \times 9.5 mm) 센서



(c) AE-3(14.3 mm ϕ \times 14.3 mm) 센서

그림 5. 압전 소자의 크기에 따른 감도 특성
Fig. 5. Sensitivity characteristics with piezoelectric element size

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, 세 가지 AE 센서의 최대 감도 주파수가 모두 100 kHz 이하이므로 부분방전 파형은 비교적 양호하게 나타났다.

AE-1 센서의 경우 50 kHz 부근에서 최대 검출 특성을 보였으며 AE-3 센서의 경우 40 kHz 부근에서 최대 검출특성을 보였다. 그러나 AE-2(9.5 mm ϕ \times 9.5 mm) 센서의 경우에는 20 kHz에서 50 kHz 까지 최대 검출특성을 보일 뿐만 아니라 그 크기도 가장 크게 나타났다.

이는 최대 감도 주파수가 58.8 kHz인 AE-2 센서가 다른 AE 센서에 비해 GIS 내의 금속이물에 의한 부분방전의 중심주파수에 더 근접하고 감도가 78.6 dB로 우수하기 때문으로 생각된다.

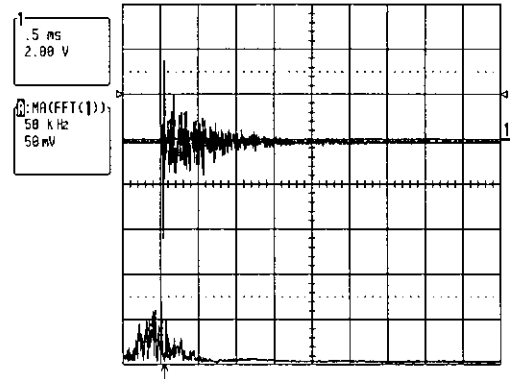
이 결과는 최대감도주파수가 100 kHz이하인 AE 센서는 GIS 내의 금속이물에 의한 부분방전을 잘 검출할 수 있음을 보여준 것이다.

4. 결 론

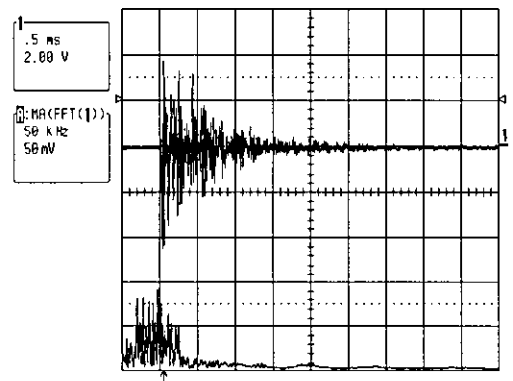
GIS 내의 금속이물을 진단하기 위하여 최대감도 주파수가 100 kHz 이하인 세 가지 결합 진동모드 (8.1 mm ϕ \times 8.1 mm, 9.5 mm ϕ \times 9.5 mm, 14.3 mm ϕ \times 14.3 mm)의 AE 센서를 ANSYS 프로그램으로 설계하여 제작한 후 전기적 임피던스를 측정된 결과, 측정 공진주파수는 시뮬레이션치와 비슷하였다.

또한 모의 GIS 내의 금속이물에 의한 부분방전을 측정된 결과, 최대감도 주파수가 모두 100 kHz 이하인 세가지 AE 센서의 부분방전 파형은 비교적 양호하게 나타났으며, 그 중에서 AE-2(9.5 mm ϕ \times 9.5 mm) 센서가 보다 더 우수한 검출 특성을 나타내었다.

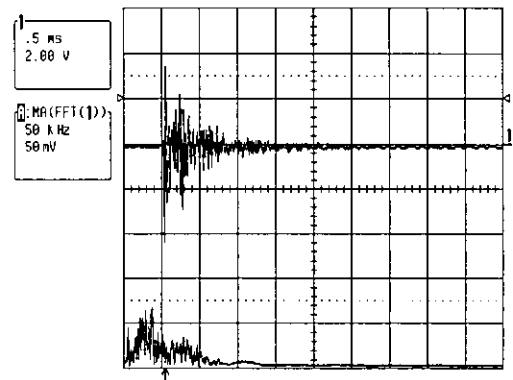
따라서 GIS 내의 금속이물에 의한 부분방전 검출에 적합한 AE 센서는 최대감도 주파수가 100 kHz 이하인 결합 진동모드의 공진형 AE 센서임을 확인하였고, 이에 관한 구조 설계 및 시뮬레이션은 ANSYS 프로그램으로 가능함을 알 수 있었다.



(a) AE-1(8.1 mm ϕ \times 8.1 mm) 센서



(b) AE-2(9.5 mm ϕ \times 9.5 mm)센서



(c) AE-3(14.3 mm ϕ \times 14.3 mm) 센서

그림 6. 압전 소자의 크기에 따른 부분방전 파형
Fig. 6. Partial discharge waves with the piezoelectric element size

감사의 글

본 논문은 1998년도 한국전력공사의 연구비 지원에 기초전력공학공동연구소 주관으로 연구된 것이며 이에 감사드립니다.(과제번호:98-지정-02)

참고문헌

- [1] N. Kiyokuni et al., "Fundamental Techniques for Gas Insulated Apparatus", Fuji Denki Giho, Vol.56, No.11, pp.23-28, 1983(in Japanese)
- [2] K. Mori et al., "Development of 500kV Gas-Insulated Switchgear and Its Application", IEEE Trans., T73, pp.33-38, 1973
- [3] L.E.Lundgaard, M. Runde, B. Skyberg, "Acoustic Diagnosis of Gas Insulated Substations: A Technical and Experimental Basis", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.5, No.4, pp.1751-1759,1990
- [4] C.M. Cook et al., "Influence of Particles on AC and DC Electrical Performance of Gas Insulated System at Extra High Voltage", IEEE PAS-96, No.3, 1977
- [5] 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
- [6] L.E.Lundgaard, R.Hergersberg, and B.Skyberg, " Partial Discharge and Particle Detection in GIS using acoustic emission technique", Proc. 5th Int. Symp. High Voltage Eng., Braunschweig, 1987
- [7] 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
- [8] 정영호, 홍재일, 유주현, 박창엽, "부분방전 검출용 결합진동모드 음향방출센서의 특성", 전기전자재료학회 논문지, 제 12 권, 제 12 호, pp.1097-1098, 1999
- [9] 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
- [10] ASTM E1106-86, "Standard Method for Primary Calibration of AE Sensors"
- [11] 김영환, 윤동진, 이세경, 김호철, "과도파를 이용한 음향방출 시험용 센서 특성 측정", 응용물리, 제3권 제4호, pp.374-380, 1990
- [12] N.N.Hsu, "Dynamic Green's function of an infinite plate - a computer program", NBSIR 85-3234, Nat'l Bur. Stds, 1985
- [13] 권동진, "초음파 경향분석에 의한 전력용 변압기의 예방진단에 관한 연구", 박사학위논문, 숭실대학교 대학원, 1995