

트리잉 파괴에 따른 전기 및 AE신호의 분석

이상우\*, 김성규\*, 김인식\*\*, 이광식\*, 이동인\*  
 영남대학교 전기전자공학부\*, 경일대학교 전기공학과\*\*

Analysis of Electrical and AE Signals by Treeing Breakdown

Sang-Woo Lee\*, Seung-Gyu Kim\*, In-Sik Kim\*\*, Kwang-Sik Lee\*, Dong-In Lee\*  
 School. of Electrical and Electronic Engineering, Yeungnam University\*  
 Dept. of Electrical Engineering, Kyungil University\*\*

**Abstract** - In this paper, using AE(Acoustic Emission) sensor the electrical and emitted-sound signals are measured by treeing breakdown in the epoxy resin, and the corresponding frequency spectrum of the AE signals are analyzed. We also examined the relationship between partial discharge magnitude and pulse number of AE signals to diagnose the deterioration of the electrical insulation due to treeing breakdown.

From these results, a frequency band of AE signals through treeing breakdown was set to about 230[kHz], and it appeared that pulse number of AE signal was proportional to partial discharge magnitude.

1. 서 론

오늘날 산업기술이 고도로 발달된 사회에서는 전력의 안정적인 공급이 요구되고 있다. 전력공급의 신뢰도를 향상시키기 위해 운전중인 전력설비의 예방진단은 조기 열화상태를 파악하므로 경제적인 측면에서도 매우 유용한 방법이 되고 있다.[1]

고전압 전력기기의 절연열화 판별법은 전류펄스 검출법, 유증가스 분석법, 유전체손실 측정법 및 AE(Acoustic Emission) 신호 검출법 등 여러 가지 방법이 있지만 AE센서를 이용한 부분방전 검출법은 전기적인 측정법과 간섭을 일으키지 않아 상시 절연진단 시스템으로 주목받고 있다.[2][3]

고전압이 인가된 에폭시수지에 보이드 등이 존재하면 유전율의 차이에 의해 보이드 내부에서 전계는 집중되어 부분방전이 발생되고 절연재료는 트리(tree)의 형태로 열화 되어 결국 절연파괴에 이르게 된다. 따라서 고분자 절연재료의 트리잉파괴(treeing breakdown)특성은 절연성능과 기기의 수명에 매우 중요한 영향을 미치고 있으므로 트리의 발생 및 성장에 관한 연구에 많은 관심이 집중되고 있다.[4][5]

음향센서를 이용한 절연진단 연구로서 1978년 E. Howells 등에 의해 전력변압기 내부에서 발생된 부분방전을 간단한 외부측정장치로 검출할 수 있음을 발표하였으며, 1979년 R. T. Harrold는 부분방전 검출시 수신감도를 향상시킬 수 있는 방법을 연구하였다. 그리고 T. Sakoda 등은 부분방전에 의해 발생된 초음파신호의 특성을 조사하기 위해 푸리에 변환법을 사용하여 분석한 결과를 보고하였다.[6]

본 연구에서는 에폭시수지의 시료에 상용주파수 교류전압 20(kV)을 인가하여, 열화시간에 따른 AE 및 전기신호를 측정하여 주된 AE 신호의 주파수 대역을 분석하였다. 또한 열화시간에 따른 방전전하량과 AE 신호의 펄스수를 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 에폭시수지는 고온경화용 주형수지로서 비스페놀-A형(Bisphenol-A type)이며, 경화제는 산무수물 계통의 MeTHPA(Methly Tetra Hydro Phthalic Anhydride)를 사용하였다.

에폭시수지의 시료에 트리를 용이하게 형성시키기 위해 본 실험에서는 침대 평판전극으로 구성하였다. 침전극은 직경 4.0(mm)인 스테인레스강(stainless steel)을 사용하였으며, 침의 선단각은 약30도, 선단곡률반경은 약20(μm)가 되도록 연마하였다. 침전극은 에폭시수지가 경화되기 전에 미리 삽입하였으며, 경화 후에 침전극을 빼어 길이 1.0(mm)의 인공 보이드를 만들었다. 침전극 선단과 평판전극의 거리는 3.0(mm)로 하였으며, 시료의 크기는 30\*40\*6(mm)이고, 시료의 하단에는 직경 100.0(mm), 두께 2.0(mm)인 황동제의 평판전극을 설치하였다. 본 실험장치에 대한 블록선도는 그림1에 나타내었다.

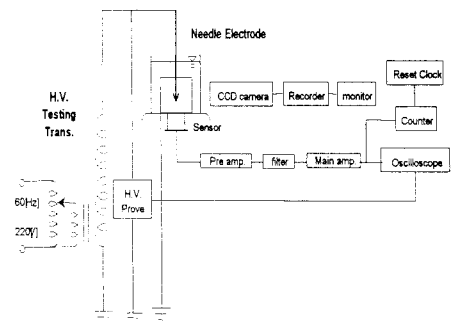


그림 1. 실험장치의 블록선도

시료내부의 음향신호를 검출하기 위해 AE센서는 스프링을 사용하여 평판전극 하부에 설치하였다. AE센서는 100(kHz)~2(MHz) 범위에서 거의 균일한 수신감도를 갖는 광대역 음향방출센서를 사용하였다. AE 신호의 수신회로는 전치증폭기, 고역통과필터 및 주 증폭기로서 구성하였다. 여기서 증폭기회로의 이득은 40(dB)를 갖도록 설계하였다. 기계적 진동 등에 의한 외부 노이즈를 제거하기 위해 차단주파수 약100(kHz)인 고역통과필터를 사용하였다. 그림2는 주파수 변화에 따른 증폭기 회로의 신호 이득을 나타낸 것이다.

부분방전에 의해 발생된 AE 신호의 관측은 디지털 오실로스코프(LeCroy 9350A)를 사용하였다. 트리의 진행은 배율 35인 디지털 카메라(CCD camera)를 통하여 분석하였다.

고전압발생장치는 입력전압 220(V), 60(Hz), 최대출력전압 30(kV)인 코로나 측정시스템(Corona

detecting apparatus system set. 일본 Pultec Electronics Co.)을 사용하였다.

인가전압은 분압비가 2000:1인 고압프로브(High Voltage Probe, type: EP-50K, 일본 Pulse Electronic Engineering Co.)를 사용하여 측정하였다.

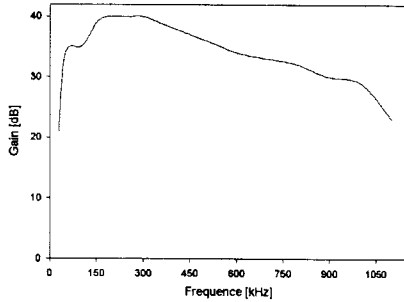


그림 2. 중폭회로의 이득곡선

### 3. 실험결과 및 고찰

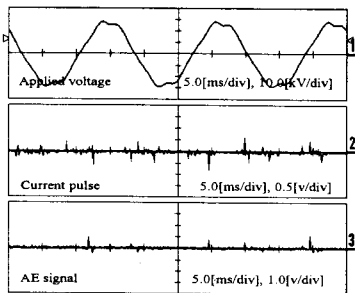
#### 3.1 트리 성장에 따른 AE 신호 특성

그림3은 에폭시수지의 시료에 교류전압 20[kV]을 인가하였을 때, 열화시간에 따른 부분방전 전류펄스 및 AE 신호 파형을 나타낸 것이다. 여기서 채널1은 인가전압, 채널2는 부분방전 전류펄스, 채널3은 AE 신호 파형이다.

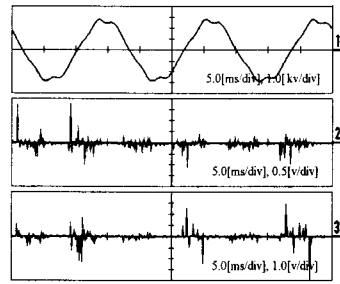
그림3(a)와 같이 열화초기(5분)의 부분방전 전류펄스는 인가전압의 상승 및 하강 부분에서 규칙적으로 발생하고 있으며, 그 크기도 거의 동일하게 나타나고 있다. 그러나 그림3(b)와 같이 열화말기(30분)에서는 인가전압의 상승 및 하강 부분에서 부분방전 전류펄스의 발생 영역이 증가되고 있으며, 트리 채널내부의 방전에너지의 증가로 인해 전류펄스의 크기도 열화초기에 비해 매우 큰 것으로 나타났다.

AE 신호의 경우 그림3(a)와 같이 열화초기(5분)에서는 부분방전 전류펄스의 발생 위치 부근에서 미약한 AE 신호가 검출되고 있으나, 트리가 진전하여 부분방전 전류펄스의 크기가 증가함에 따라 AE 신호의 크기도 증가되는 것으로 나타났다. 그림3(b)와 같이 열화말기(30분)에서는 AE 신호의 발생영역은 열화초기에 비해 확대되었으며, AE 신호의 크기도 부분방전 전류펄스에 비해 하여 큰 것으로 나타났다. 일반적으로 인가전압의 하강 부분 보다 상승부분에서 더 큰 AE 신호가 검출되는 것으로 나타났다.

에폭시수지의 트리 발생은 인공 보이드 내부에서 기중 방전에 의한 높은 방전에너지가 에폭시 절연물에 작용하여 트리가 진전하는 것으로 생각되고 있으나, 트리의 발생 메카니즘은 아직 명확히 구명되어 있지 않다. 그러나 트리의 진전은 트리 채널 내부에서 발생하는 코로나 스트리머에 의해 많은 영향을 받는 것으로 생각된다.



(a) 5분



(b) 30분

그림 3. 열화시간에 따른 전류펄스 및 AE 신호 파형

그림4는 오실로스코프의 시간 스케일(time scale)을 5.0( $\mu$ s/div)로 확대하여 측정한 부분방전 전류펄스 및 AE 신호 파형이다. 여기에서 상부 채널1은 부분방전 전류펄스, 하부 채널2는 AE 신호 파형이다.

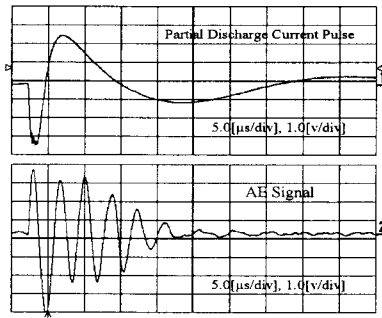
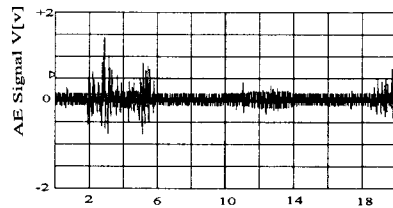


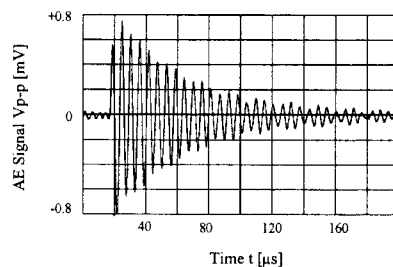
그림 4. 부분방전 전류펄스 신호에 대한 AE 신호 파형

#### 3.2 AE 신호의 주파수 스펙트럼 분석

그림5(a)는 인가된 교류전압의 1주기에 대해 관측된 대표적인 AE 신호 파형을 나타낸 것이다. 부극성 보다 정극성 부분에서 AE 신호는 활발하였으며, 또한 정극성의 상승부분이 하강부분보다 AE 신호는 큰 것으로 나타났다. 그림5(b)는 그림5(a)에서 관측된 AE 신호를 시간스케일을 확대하여 나타낸 것이다.



(a)

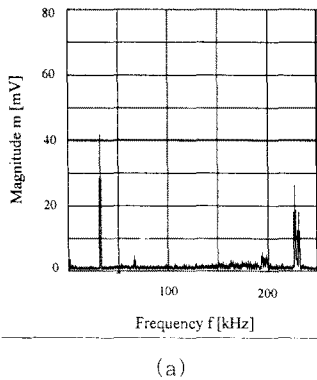


(b)

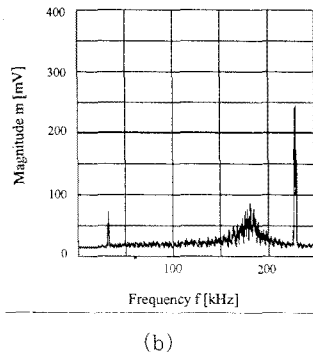
그림 5. 대표적인 AE 신호 파형

그림6은 관측된 AE 신호를 FFT(Fast Fourier Transform)를 사용하여 분석한 것이다. 그림6(a) 및 (b)는 각각 열화초기 약5분 및 30분일 때 발생된 AE 신호의 주파수 대역을 나타낸 것이다. 여기에서 주된 주파수 대역은 그림에서 나타난 바와 같이 약230[kHz]인 것으로 나타났다. 열화초기 약5분일 때 230[kHz]에서 AE 신호의 크기는 26[mV]였으나, 열화가 진전되어 약 30분일 때 동일주파수대에서 신호의 크기는 240[mV]으로 크게 증가한 것으로 나타났다.

한편 그림6에서 약30[kHz]대역에서도 AE 신호는 나타났으나, 이는 열화시간이 경과함에 따라 거의 변화가 없었으므로 이는 증폭회로의 잡음이라고 생각된다.



(a)



(b)

그림 6. AE 신호의 주파수 스펙트럼

### 3.3 방전전하량과 AE 펄스수의 관계

그림7은 AE 펄스수 및 방전전하량의 관계를 나타낸 것이다. 그림과 같이 AE 펄스수는 방전전하량에 거의 비례하여 증가하였다. 또한 방전전하량이 증가함에 따라 AE 펄스수의 증가율은 다소 감소된 것으로 나타났다.

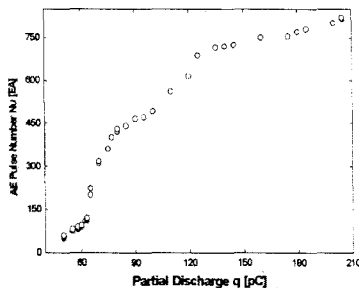


그림 7. AE 신호 펄스수 및 방전전하량의 관계

그림8은 트리의 진전사진을 나타낸 것이다. 그림8(a)는 트리개시후 3분이며, 그림8(b)는 트리개시후 40분

인 경우에 촬영한 사진이다. 발생된 트리는 수지형(branch type)이며, 많은 분기가 방사상으로 성장된 모습을 나타내고 있다.



(a) 3분



(b) 40분

그림 8 대표적인 트리의 사진

## 4. 결 론

열화초기의 부분방전 전류펄스는 인가전압의 상승 및 하강부분에서 거의 동일한 크기로 규칙적으로 발생되었으나, 열화가 진행됨에 따라 열화말기에서는 인가전압의 상승 및 하강부분에서 부분방전 전류펄스의 크기 및 발생영역은 열화초기에 비해 크게 증가되었다.

AE 신호의 경우 열화초기에서는 방전전류펄스의 발생 위치에서 미약한 신호가 검출되었으나, 트리가 진전하여 방전전류펄스의 크기 증가에 따라 AE 신호도 비례하여 증가된 것으로 나타났다. FFT를 사용하여 AE 신호를 분석한 결과 주된 주파수 대역은 약230[kHz]인 것으로 나타났다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 松浦慶士, 岡部成光, 金子英男, "電力機器の絶縁余壽命推定法の現状" 電學論A, 114卷 12号, pp.845-852 平成6年
- [2] 渡部剛士, 笠間一郎, 石井秀和, 高木義之, "受配電設備診断用部分放電檢出裝置" 電學論B, 116卷 1号, pp.65-73 平成8年
- [3] Peter M. Eleftherion, "Acoustic Emission-Based PD Source Location in Transformers" IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 6, November/December 1995.
- [4] Y. Shibuya, S. Zoledziowski, "Void Formation and Electrical Breakdown in Epoxy Resin" IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-96, No. 1, January 1977.
- [5] R. T. Harrold, "Acoustic Technology Applications in Electrical Insulation and Dielectrics," IEEE Trans. EI, Vol. 20, No. 1, pp. 3-19, 1985.
- [6] T. Sakoda, T. Arita, H. Nieda, K. Ando, "Basic Studies of Acoustic Emissions Caused by the Partial Discharge in an Oil-Tank" K-J Joint Symp. on ED and HVE, pp. 16-19, Oct. 1998.