

절연물의 열화에 의한 AE신호와 변압기 외함의 AE노이즈 분포

이상우* · 김인식** · 김이국** · 박원주* · 이광식*
*영남대학교 전기공학과 · **경일대학교 전기전자공학부

Distribution Characteristics of AE Signals in Insulation Deterioration and AE Noise in Cast Resin transformer

Sang-Woo Lee* · In-Sik Kim** · Lee-Kook Kim** · Won-Zoo Park* · Kwang-Sik Lee*

School of Electrical and Electronic Engineering, Yeungnam University*, School of Electrical and Electronic Engineering, Kyungil University**

Abstract - In this paper, frequency spectra of AE signals detected from respective the insulation deterioration were analysed to under ac high-voltage application using epoxy resin sample and insulation oil. Also, frequency spectra of AE signals generated from the load currents in the actual operating transformer of 500(kVA) under distribution system of 22.9(kV) were also analysed to distinguish the AE signals due to void discharges from the magnetic circuit noises in transformer. As the experimental results, we could distinguish the AE signals whether those signals were caused due to the void discharges or due to the magnetic circuit noises by analyzing the frequency spectrum of AE signals.

1. 서 론

전력변압기는 절연유를 절연매체로 하는 유입식과 고체 절연체를 절연매체로 하는 몰드식으로 크게 분류할 수 있다. 그중 몰드변압기는 유입변압기에 비해 환경적인 문제점을 고려하고 동일 용량에서도 그 규모를 축소할 수 있는 에폭시수지를 절연체로 사용하고 있다[1]. 그리고 몰드식은 유입식에 비해 BIL(충격전압 절연강도)이 낮아 서지흡수기(Surge Absorber)를 부착해야 하지만 동일 용량의 경우, 유지보수나 에너지 절약 측면을 고려하여 많이 사용되고 있다. 유입식은 절연물에 기포의 존재나 불순물의 함유, 몰드식은 절연체에 미세 균열이나 보이드가 존재하면 절연물의 내부에서 방전이 일어난다. 이러한 방전이 계속 발생되면 주변의 절연물에 대해서도 절연열화를 일으키고, 에폭시수지의 경우에는 전기적 트리(electrical tree)가 성장하여 절연열화에 의한 전로파괴가 발생된다[2].

유입 및 몰드변압기의 절연물에서 방전이 발생하면 방전의 발생원으로부터 음향방출신호가 발생된다[3]. 이러한 음향방출신호는 주위 매질에 압축을 일으켜 진동파의 형태로 전파되므로 이를 검출하여 방전 발생원과 같은 음향방출신호의 상태를 조사하는 기법을 음향방출(acoustic emission; 이하 AE라 함)법이라 한다. AE법의 이점으로는 측정장치가 간단하여 현장 적용에 용이하고, 전기적 측정법과 상호간섭을 일으키지 않으며, 운전 중에도 열화진단이 가능하다는 점이다[4]. AE법이 운전 중인 유입 및 몰드변압기의 절연열화 상태를 진단하기 위해서는 절연열화를 일으키는 방전에 의한 AE신호 성분과 변압기에서 상시 발생하는 AE노이즈 성분을 구분하여야 한다. 왜냐하면 AE센서에서는 이들 AE신호 성분이 중첩되어 동시에 검출됨으로써 측정에 있어서 오류가 발생할 수 있기 때문이다. 또한 방전에 의한 AE신호의 크기는 매우 작기 때문에 이를 효율적으로 검출하여 감도가 높은 측정 시스템을 구성하기 위해서는 내부방전과 AE노이즈에 대한 AE신호의 주파수

분석이 절실히 요구되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 유입변압기의 절연물과 몰드변압기의 에폭시수지 시료에 교류전압을 인가하였을 때, 각각의 절연열화에 따른 AE신호를 검출하여 주파수 스펙트럼으로 분석하였다. 그리고 운전 중인 몰드변압기의 AE노이즈를 분석하기 위해 용량 500(kVA)인 변압기의 외함으로부터 AE노이즈를 검출하여 주파수 스펙트럼으로 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 AE신호의 측정 방법

2.1.1 유종

본 실험에서 사용된 전극은 스테인레스강(stainless steel)으로 제작하였으며, 전극의 배치는 침대 평판전극으로 구성하였다. 사용된 침전극의 선단각은 약 30도이며, 선단 곡률 반경은 약 20(μ m)이다. 그리고 평판전극의 지름은 약 40.0(mm)이고, 전극의 두께는 약 10.0(mm)이며, 전극의 가장자리는 둥근 형상으로 제작하였다. 실험에 사용된 절연물은 현재 유입변압기에서 사용하고 있는 천연 광유인 1종 2호의 절연물을 사용하였다. 유종 AE신호를 원활하게 검출하기 위해 AE센서는 유종내에 부착하여 AE신호를 검출하였으며, 그 AE신호를 주파수 스펙트럼으로 분석하였다.

2.1.2 에폭시수지

본 실험에서 사용한 에폭시수지는 고온 경화용 주형수지로 상온에서 액상인 비스페놀-A형(Bisphenol A type, Ciba-Geigy Co. Swiss)을 사용하였다. 경화제는 가사시간이 길고 반응시 발열량이 적은 산무수물 계통의 MeTHPA(Methly Tetra Hydro Phthalic Anhydride)를 사용하였다. 에폭시수지를 100(%)으로 하였을 때, 경화제(Hardner HT 903)는 35(%)의 비율로 배합하여 시료를 제작하였다. 에폭시수지 시료에서 전기적인 트리를 용이하게 형성시키기 위해 침대 평판전극으로 구성하였다. 시료의 크기는 30×40×6(mm)으로 하였으며, 시료의 하부에는 직경 100.0(mm), 두께 10.0(mm)인 황동제의 평판전극을 설치하였다. 침전극은 직경 4.0(mm)인 스테인레스강(stainless steel)을 사용하였으며, 침의 선단 각은 약 30도, 선단 곡률 반경은 약 20(μ m)으로 되도록 연마하였다. 또한 침전극은 에폭시수지가 경화되기 전에 미리 삽입하였으며, 경화후, 침전극을 빼어 길이 1.0(mm)인 인공 보이드를 형성하였다. 따라서 침전극 선단에서 평판전극까지의 거리는 3.0(mm)이다. 보이드방전으로부터 발생하는 AE신호를 효과적으로 검출하기 위해 AE센서는 평판전극의 밑면에 절연용 폴리에틸렌 필름을 사용하여 부착하였다. 보이드방전에 의한 트리의 진행을 관찰하기 위해 상용주파수 교류전압을 20(kV)까지 인가한 후 절연파괴시까지 유지하였다.

2.1.3 몰드변압기

운전 중인 몰드변압기는 여러 가지 AE노이즈가 전파되어 배경 노이즈(background noise)로 나타나므로 AE센서를 사용하여 방전에 의한 절연열화를 진단할 경우, 각종 AE노이즈에 대한 분석이 요구되고 있다. 그러나 가장 현저한 영향을 미치는 AE노이즈는 변압기의 철심에서 발생하는 노이즈이다. 따라서 본 실험에서 정격용량 500(kVA), 정격전압 22.900/380(V)인 몰드변압기를 모델로 선정하여 무부하 및 부하에 따른 AE노이즈를 측정하고, 이를 주파수 스펙트럼으로 분석하였다.

무부하 상태에서의 AE노이즈 측정법은 변압기의 고압측 단자를 배전전압 22.9(kV)의 신호에 접속하고, 변압기의 저압측 단자는 무부하로 하였을 때, 몰드변압기의 외함에 직접 부착된 AE센서를 사용하여 AE노이즈를 측정하고 이를 주파수 스펙트럼으로 분석하였다.

부하 상태에서의 AE노이즈 측정법은 변압기의 2차측 단자에 정격부하의 약 10.6(%)인 53(kVA)의 부하를 사용하고 있을 때, 각 상의 변압기 외함으로부터 AE노이즈를 측정하고, 주파수 스펙트럼으로 분석하였다. 이 경우에 있어서 변압기 각상에 흐르는 2차측의 선전류는 약 81(A)인 것으로 나타났다.

2.2 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 AE센서의 주파수 범위는 약 100(kHz)~2.0(MHz)이며, AE-912 증폭기의 주파수 범위는 약 100(kHz)~1.5(MHz)이다. 각종 매질에 따라 전파되는 AE신호는 디지털 오실로스코프(LeCroy 9350AL)를 사용하여 검출하였으며, 또한 검출된 AE신호를 동일 기종의 오실로스코프를 사용하여 주파수 스펙트럼으로 분석하였다. 고전압 발생장치는 코로나 측정 시스템(Corona detecting apparatus system set, 일본 Pultec Electronics Co.)을 사용하였으며, 이 장치의 주파수는 60(Hz), 1차 입력전압은 220(V), 2차 최대 출력전압은 30(kV)이다. 인가된 출력 고전압을 정밀하게 측정하기 위해 분압비가 2000 : 1인 고압프로브(High Voltage Probe, type: EP-50K, 일본 Pulse Electronic Engineering Co.)를 사용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 절연유의 코로나방전 및 에폭시수지의 보이드 방전에 의한 주파수 분포

그림 1은 절연유에서 갭길이 4.0(mm)인 침대 평판전극에서 교류전압 13(kV)을 인가하였을 때, 대표적인 절연유의 코로나 방전에 의한 AE신호 파형을 관측하여 나타난 것이며, 그에 따른 주파수 스펙트럼 분포 특성을 그림 2는 나타낸 것이다. 그림 3은 에폭시수지의 침전극에서 교류전압 20(kV)을 인가하였을 때, 대표적인 에폭시수지의 보이드 방전에 의한 AE신호 파형을 관측하여 나타난 것이며, 그에 따른 주파수 스펙트럼 분포 특성을 그림 4에 나타낸 것이다.

AE신호는 매질의 압력 변화를 시간 경과에 따른 파형으로 나타낼 수 있으며, AE신호의 형태가 사인적(sinusoidal)으로 변하는 것은 단일 주파수 성분을 가지고 있으며, 사인적으로 변하지 않은 것은 여러 개의 주파수 성분으로 구성되어 있다. 그림 1 및 그림 3은 오실로스코프의 시간 스케일(time scale)은 50(μ s/div)으로 고정하여 AE신호 파형을 측정하였다. 그림 1 및 그림 3의 AE신호는 방전 에너지가 압전 진동자(PZT)에 작용함으로써 그림에 나타난 바와 같이 고주파 밴드의 감쇠 진동 형태와 유사하였다. 그리고 절연유 및 에폭시수지의 부분방전에 의한 높은 충격 에너지가 주변 매질에 전파되어 AE신호의 형상이 발생되는 것으로 생각된다.

3.1.1 코로나방전에 의한 AE신호의 주파수 분포

그림 2는 그림 1에 나타난 인가전압이 13(kV)일 때,

대표적인 AE신호를 주파수 스펙트럼 분포로 나타낸 것이다. 그림 2에서 나타난 바와 같이 AE신호의 주파수 영역은 대략 90~230(kHz)에서 검출되었다.

그 중에서 가장 주된 주파수 대역은 대략 130(kHz)인 것으로 나타났다. 그리고 전압이 상승하여 코로나 방전이 불안정해지면 이 범위의 주파수 대역에서 많은 피크치가 나타나고 있는 것으로 관측되었다.

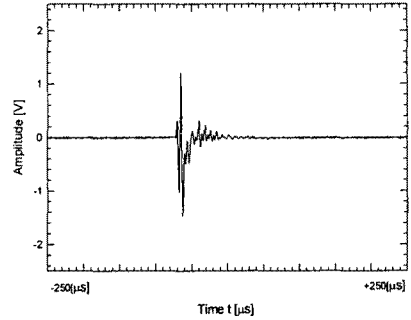


그림 1 코로나방전에 의한 AE신호 파형
Fig. 1 AE signal waveform for corona discharge in typical oil transformer

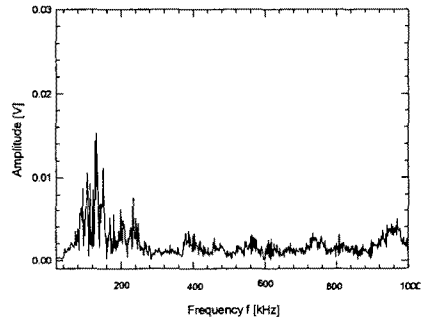


그림 2 AE신호 파형의 주파수 분포
Fig. 2 Frequency distribution of AE signal waveform

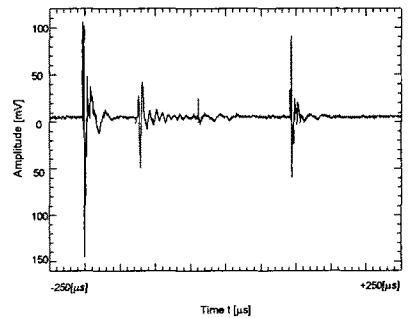


그림 3 보이드방전에 의한 AE신호 파형
Fig. 3 AE signal waveform for void discharge in typical epoxy resin sample

3.1.2 보이드방전에 의한 AE신호의 주파수 분포

그림 4는 그림 3에 나타난 열화중기의 대표적인 AE신호를 주파수 스펙트럼 분포로 나타낸 것이다.

그림 8에서 나타난 바와 같이 열화중기 영역에 대한 AE신호의 주파수 영역은 열화초기와 같이 대략 50~230(kHz) 범위에 분포되어 있다. 그리고 열화말기의 주파수 분포도 대략 50~230(kHz) 대역인 것으로 관측되

었다.

열화중기의 AE신호에 대한 주파수 분포는 열화초기에 비해 AE신호의 크기는 대략 2배로 증가하였으며, 보이드방전에 의한 AE신호의 주파수 분포는 트리의 성장에 따라 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 트리가 진행됨으로써 AE신호의 펄스 크기는 트리의 길이에 비례하여 증가된 것으로 나타났다. 그리고 AE신호에 의해 절연열화를 진단할 경우, 부분방전의 패턴에 따라 AE신호의 주파수 대역은 상이함을 알 수 있다.

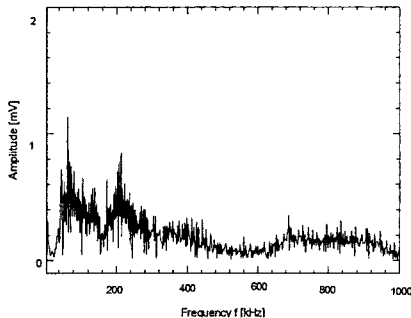


그림 4 AE신호 파형의 주파수 분포
Fig. 4 Frequency distribution of AE signal waveform

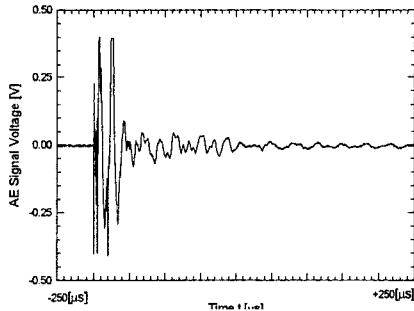


그림 5 부하전류에 의한 AE신호 파형
Fig. 5 AE signal waveform for typical load current

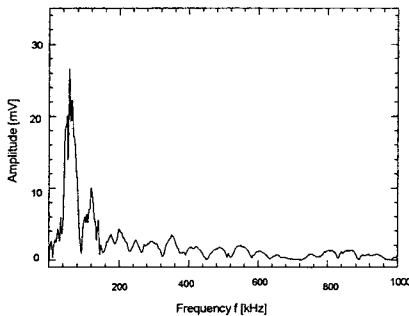


그림 6 부하전류에 의한 AE신호의 주파수 분포
Fig. 6 Frequency distribution of AE signal for load current

3.2 몰드변압기의 AE노이즈에 대한 주파수 분포
절연유 및 에폭시수지의 방전에 의한 AE신호를 분석함으로써 변압기의 절연열화 상태를 파악할 수 있으나, 실제 운전 중인 몰드변압기에서는 여러 가지 AE신호가 배경 노이즈로 발생됨으로 이에 대한 분석이 요구된다.

따라서 몰드변압기의 내부 도체에서 방전이 발생되지 않은 것을 선형하여 변압기 외부에 AE센서를 부착하여 부하가 인가된 경우, 변압기 권선의 전자력에 의한 AE노이즈를 주파수 스펙트럼으로 분석하였다.

그림 5는 대표적인 부하전류에 의한 AE신호를 나타낸 것이다. 그림 5는 몰드변압기의 2차측 B상에 정격부하의 10.6[%]인 53[kVA]의 부하를 연결하였을 때, B상에 나타난 대표적인 AE신호이다.

부하전류에 의한 변압기 B상의 AE신호에 대한 주파수 분포는 그림 6에 나타내었으며, 주된 주파수 대역은 대략 40-120[kHz]인 것으로 나타났다. 그리고 그림에서 나타난 바와 같이 약 50-60[kHz] 부근에서 AE신호는 가장 크게 나타나고 있으며, 이는 무부하 운전시의 특성과 일치되었다.

부하전류에 의한 AE신호의 주파수 분포는 자화전류에 의한 분포와 거의 동일하게 나타나고 있으나, 자화전류에 비해 부하전류의 값이 매우 크기 때문에 스펙트럼의 진폭은 각상에서 모두 증가된 것으로 관측되었다. 특히, B상의 경우에는 자화전류에 의한 최대 진폭보다 대략 2.6배 높은 것으로 나타났다. 이는 부하전류의 불평등에 기인하며, 변압기의 철심에서 공진 조건이 상이하기 때문이라고 생각된다.

자화 및 부하전류에 의한 주파수 분포는 비교적 단순한 형태로써 나타나고 있으므로, 보이드방전과 음향노이즈 구별은 주파수 분포에서 뚜렷한 차이가 있을 뿐만 아니라 주파수 분포의 외관에서도 차이가 나타나고 있다.

4. 결 론

본 연구는 유중, 에폭시수지 및 몰드변압기의 AE신호와 AE노이즈를 주파수 스펙트럼으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 절연유의 코로나방전에 의한 AE신호의 주파수 분포는 대략 90-230[kHz]이었으며, 그에 따른 주된 주파수 분포는 대략 130[kHz]인 것으로 관측되었다.
- 2) 에폭시수지의 보이드방전에 의한 AE신호의 주파수 분포는 대략 50-230[kHz]에서 나타났다.
- 3) 운전 중인 몰드변압기의 자화전류에 의한 AE노이즈의 주파수 분포는 대략 40-120[kHz]이었으며, 주된 주파수 분포는 대략 50-60[kHz]인 것으로 나타났다.
- 4) 운전 중인 몰드식 변압기의 부하전류에 의한 AE노이즈의 주파수 분포는 자화전류인 경우와 동일한 대역에서 분포되어 있으나, 변압기 정격의 약 10% 부하전류에 의한 스펙트럼의 진폭은 자화전류만에 의한 진폭보다 대략 2.6배 증가되었다.

참 고 문 헌

- [1] 電力設備の絶縁余壽命推定法調査委員會, "電力設備の絶縁余壽命推定法", 電氣學會技術報告 第502号, pp. 3-114, 1994.
- [2] C. Mayoux and C. Laurent, "Contribution of Partial Discharges to Electrical Breakdown of Solid Insulating Materials", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp. 641-652, 1995.
- [3] E. Howells, "Acoustic Emission from Stressed Dielectric Liquids", I. S. A. 20th International Symposium, pp. 63-66, 1974.
- [4] L. E. Lundgaard, "Acoustic Partial Discharge Detection Practical Application", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 5, pp. 34-43, 1992.