

# 운전중인 몰드형 전력변압기의 음향방출신호에 대한 주파수 스펙트럼 특성

(Frequency Spectra of AE Signal Generated from The Operation of Cast-Resin Power Transformer)

구경철\* · 이상우\* · 이동인\* · 이광식\* · 김인식\*\* · 김이국\*\* · 신용철\*\*\*

Kyung-Chul Cu · Sang-Woo Lee · Dong-In Lee · Kwang-Sik Lee · In-Sik Kim · Lee-Kook Kim · Yong-Chul Shin  
영남대학교\*, 경일대학교\*\*, 영남여공대학\*\*\*

## Abstract

In this paper, Frequency spectra of AE(acoustic emission) signals generated from the magnetizing and the load currents in the actual operating cast-resin power 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 the core of cast-resin power 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. Frequency spectra of AE signals generated from the cast-resin power transformer in operation due to both the magnetizing and the load currents appeared in the range of 40-120[kHz].

## 1. 서론

몰드형 전력변압기는 고압 권선(high voltage winding)과 저압 권선(low voltage winding)을 일체형으로 하여 에폭시수지를 주형 제작함으로써 내부의 방열이 곤란하고, 또한 열 전달율은 물질에 따라 매우 큰 차이가 있으므로 권선의 온도 변화에 따른 수지 또는 철심의 계면에서 열응력(thermal stress)이 증대하여 내부 균열(crack) 또는 보이드(void) 등이 발생될 수 있다. 그리고 고전압 전력기기의 내부에서 균열이나 보이드가 존재하면 부분방전이 발생되며, 이러한 부분방전이 계속되면 주변 절연물에 대해 복합적인 절연열화를 일으킨다.

몰드형 전력변압기는 일반적으로 에폭시수지를 절연물로 사용하고 있기 때문에 보이드 등에 의한 부분방전에 의해 주변 에폭시수지를 절연열화 시키고, 수지 내부에서는 소위 전기적 트리(electrical tree)가 성장하여 결국 절연열화에 의한 전로 파괴가 발생하는 것으로 알려져 있다[1].

운전중인 고전압 전력기기에 있어서 부분방전이 발생되면 방전 점으로부터 음파가 발생하는 것은 주지의 사실이며, 이러한 음파는 주위 매질에 급격한 압축을 일으켜 진동파 형태로 전파되므로 이를 검출하여 방전 점과 같은 음원의 상태를 조사하는 기법을 AE(acoustic

emission)법이라 한다. 최근 고전압 전력기기에 있어서 절연진단에 AE법을 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다[2][3].

고전압 전력기기의 절연진단에 있어서 AE법이 주목 받게 된 이유로서는 측정장치가 간단하여 현장 적용에 용이하고, 전기적 측정법과 상호 간섭을 일으키지 않으며, 운전중인 상태에서도 상시 예방진단(on-line monitoring)이 가능하다는 점이다. 또한 이 방법을 이용하여 부분방전을 측정할 경우 방전 점의 위치를 비교적 정확하게 검출할 수 있으므로 고장 부위의 수리에 소요되는 비용 및 시간을 절약할 수 있는 특징이 있다[4][5].

한편, AE법에 의해 실제 운전중인 몰드형 전력변압기의 절연열화 상태를 진단하기 위해서는 절연열화를 일으키는 부분방전에 의한 AE신호 성분과 변압기의 부하전류 및 자화전류 등에 의해 철심으로부터 상시 발생하는 전자적(電磁的) 음향 노이즈인 AE 성분을 구분할 필요가 있다. 왜냐하면, AE 센서에서는 이들 두 개의 신호 성분이 중첩되어 동시에 검출됨으로써 측정에 있어서 오류가 발생할 수 있기 때문이다.

또한, 부분방전에 의한 AE신호의 크기는 매우 작기 때문에 이를 효율적으로 검출하여 감도가 높은 측정 시스템을 구성하기 위해서는 부분방전과 전자적 음향 노이즈에 대한 AE신호의 주파수 스펙트럼 분석이 요구되고 있으나, 이에 대한 연구는 아직까지 발표되지 않고

있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 몰드형 전력변압기의 철심에서 발생하는 자기회로의 음향 노이즈를 분석하기 위해 용량 500[kVA]인 실용 몰드형 전력변압기를 배전 계통 22.9[kV-y]의 선로에 접속하고, 몰드형 전력변압기의 2차측을 무부하인 경우와 부하를 인가한 경우에 몰드형 전력변압기의 외함으로부터 직접 검출된 각 상의 AE신호에 대한 주파수 스펙트럼을 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

실제 전력 계통에서 운전중인 몰드형 전력변압기는 여러 가지 AE신호가 발생되어 소위 배경 노이즈(background noise)로 나타나므로 AE 센서를 이용하여 부분방전에 의한 절연열화를 진단할 경우 이러한 노이즈에 대한 분석이 요구되고 있다. 이러한 배경 노이즈에는 바람, 모래의 충돌, 빗방울의 영향 및 명판의 진동 등이 있으나, 그 중에서 가장 현저한 영향을 미치는 음향 노이즈는 변압기의 철심에서 발생하는 자화전류 및 부하전류에 의한 자기회로의 음향 노이즈이다.

본 실험에서 전자적인 음향 노이즈를 효율적으로 검출하기 위하여 사용된 광대역 AE센서(wide-band AE sensor)의 주파수 범위는 약 100[kHz]-2[MHz]이며, 이 AE센서의 주파수 응답 특성은 약 100[kHz]-1.5[MHz]까지 거의 평탄한 40[dB]의 이득을 갖고 있다.

표 1과 같이 실제 사용되고 있는 정격용량 500[kVA], 정격전압 22,900/380[V]인 몰드형 전력변압기를 모델로 선정하여 부하 상태에 따른 AE신호를 측정하고, 이를 주파수 스펙트럼으로 분석하였다.

표 1 실험에 사용된 몰드형 전력변압기의 규격  
Table 1 Specification of cast resin power transformer in test

No	Type of Tests	Quantity
1	Rating Frequency	60[Hz]
2	Rating Capacity	500[kVA]
3	Rating Voltage(prim./sec.)	22,900/380[V]
4	Rating Current(prim./sec.)	12.6/760[A]
5	BIL(prim.)	95[kV]
6	Power Frequency Test Voltage(prim./sec.)	50/3[kV]
7	Temperature Rise	80[°C]
8	Total Weight	1,650[kg]

전자적인 음향 노이즈의 측정은 부하의 변동이 비교

적 작을 뿐만 아니라 선로의 개폐 운전 때 다른 주변 음향 노이즈의 영향이 작다고 생각되는 자정부터 새벽 3시경 사이에 실시하였다.

자화전류 및 부하전류의 영향을 조사하기 위해 저압측에 무부하인 경우와 부하가 접속된 경우에 대해 측정하였다.

무부하 상태의 측정은 변압기의 고압측 단자를 1차 배전전압 22.9[kV]의 선로에 접속하고, 변압기 저압측 단자는 무부하로 하였을 때, 몰드형 전력변압기의 외함에 직접 부착된 AE 센서를 사용하여 자화전류에 의한 전자적 음향 노이즈를 측정하고 이를 주파수 스펙트럼으로 분석하였다.

부하전류 인가에 의한 측정은 변압기의 저압측 단자에 정격부하의 약 10.6[%]인 53[kVA]의 부하를 사용하고 있을 때, 각 상의 몰드형 전력변압기 외함으로부터 AE신호를 측정하고, 주파수 스펙트럼으로 분석하였다.

이 경우에 있어서 변압기 각상에 흐르는 저압측의 선전류는 약 8I[A]인 것으로 나타났다.

사진 1은 운전중인 3상 몰드형 전력변압기와 AE 측정시스템을 나타낸 것이다. 사진 1에서는 A상 변압기에 AE 센서가 부착되어 있으며, AE신호 증폭을 위한 전치증폭기(pre-amplifier), 증폭기 회로용 전원장치 및 디지털 오실로스코프가 나타나 있다.



사진 1 몰드형 전력변압기와 AE 측정 시스템  
Photo. 1 AE measurement system and cast resin power transformer

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 몰드형 전력변압기의 전지적 음향노이즈에 대한 주파수 스펙트럼

실제 운전중인 몰드형 전력변압기에서는 여러 가지 AE신호가 배경 노이즈로써 발생됨으로 이에 대한 분석이 요구되고 있다.

본 실험에서는 내부 도체에서 부분방전이 발생되지

않는 몰드형 전력변압기를 선정하여 외함에 AE 센서를 부착하여 무부하인 경우와 실 부하가 가해진 경우 변압기 권선의 전자력에 의한 음향 노이즈를 주파수 스펙트럼으로 분석하였다.

### 3.2 자화전류에 의한 AE신호의 주파수 스펙트럼

그림 1은 실용 몰드형 전력변압기의 저압측에 부하를 접속하지 않고 배전전압 22.9[kV]를 인가하였을 때, 몰드형 전력변압기의 자화전류에 의해 발생된 대표적인 AE 신호 파형이며, 그림 2는 각상에 나타난 AE신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이다.

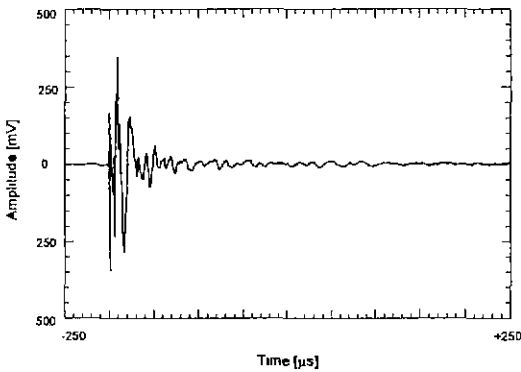


그림 1 자화전류에 의한 대표적인 AE신호 파형  
Fig 1 Typical AE signal due to magnetizing current

그림 1에서 측정된 AE신호 파형 형상은 최대 펄스의 크기가 약 350[mV]으로서 상하 거의 대칭적인 형태로 나타나고 있다. 몰드형 전력변압기의 내부에서 부분방전의 발생 여부는 이전 시험에서 30[kV]까지 조사한 결과 발생하지 않았으나 신뢰성을 고려하여 훨씬 낮은 전압을 인가하였다. 측정된 그림 1의 AE신호는 자화전류에 의한 자기적 음향 노이즈라고 판단된다.

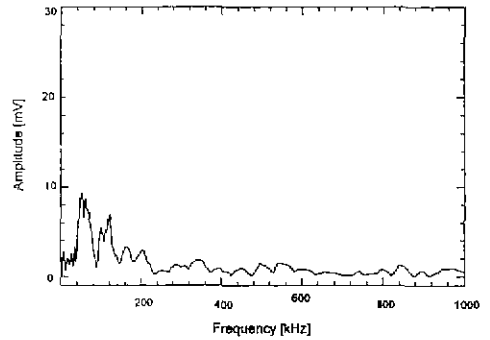
몰드형 전력변압기에 있어서 자화전류는 그 값이 크지 않기 때문에 부하전류가 흐르는 경우에 비해 비교적 낮은 레벨의 AE신호가 검출되었다.

무부하 운전에 대한 변압기 A상의 음향 노이즈에 대한 주파수 대역은 그림 2(a)와 같이 약 40-120[kHz]인 것으로 나타났다. 이 신호의 주된 주파수 스펙트럼은 약 50-60[kHz]이다. 그리고 이 대역의 AE신호는 보이드방전에 의한 신호와 무관한 것으로 생각된다.

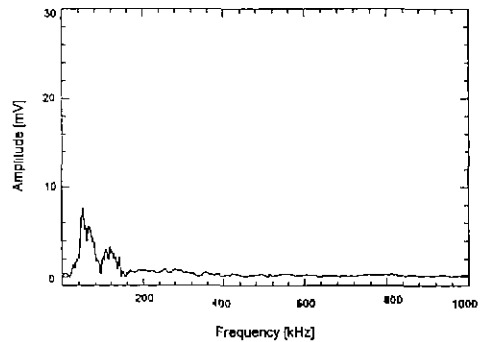
몰드형 전력변압기의 B상 및 C상의 경우에도 그림 2(b) 및 그림 2(c)와 같이 약 40-120[kHz]의 대역에서 검출되었으며, A상의 주파수 스펙트럼 대역과 동일한 것으로 나타났다. 그리고 몰드형 전력변압기의 B상 및 C

상 모두 약 50-60[kHz] 대역에서 가장 높은 신호가 발생되고 있으나, 약 90[kHz] 부근에서는 AE신호가 거의 발생되지 않는 것으로 나타났다.

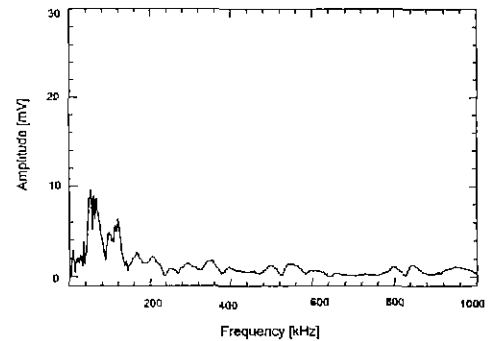
이는 몰드형 전력변압기의 자화전류에 의해 철심의 압축 변형에 따른 공진 작용에 의한 것으로 생각된다.



(a) A상



(b) B상



(c) C상

그림 2 자화전류에 의한 AE신호의 주파수 스펙트럼  
Fig. 2 Frequency spectrum of AE signal due to magnetizing current

### 3.3 부하전류에 의한 AE신호의 주파수 스펙트럼

몰드형 전력변압기의 저압측 각상에 정격부하의 10.6%인 53[kVA]의 부하를 연결하였을 때, 각상에 나타난 대표적인 AE신호는 그림 3에 나타내었다.

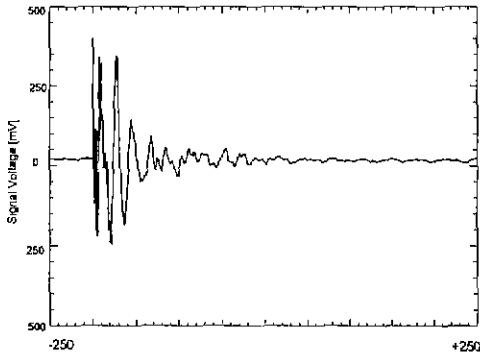
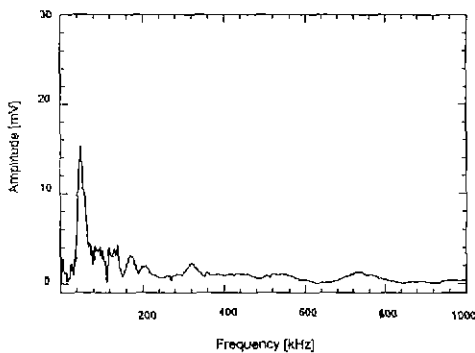
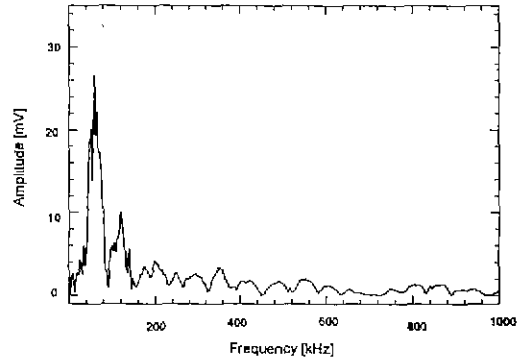


그림 3 부하전류에 의한 대표적인 AE신호 피형  
Fig. 3 Typical AE signal due to load current

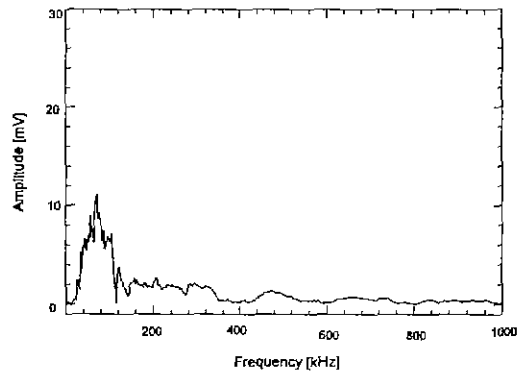
그림 3에서 나타낸 바와 같이 AE신호 파형은 시간 스케일(time scale)을 각각 50[ $\mu$ s/div]으로 검출한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 부하전류에 의한 AE신호의 진향 크기는 큰 것으로 나타났다. 부하전류에 의한 변압기 각상의 AE신호에 대한 주파수 스펙트럼은 그림 4에 나타내었으며, 주된 주파수 대역은 각상에서 모두 약 40-120[kHz]인 것으로 나타났다. 그리고 그림에서 나타난 바와 같이 약 50-60[kHz] 부근에서 AE신호는 가장 크게 나타나고 있으며, 이는 무부하 운전시의 특성과 일치되고 있다. 부하전류에 의한 AE신호의 주파수 스펙트럼 특성은 자화전류에 의한 분포와 거의 동일하게 나타나고 있으나, 자화전류에 비해 부하전류의 값이 매우 크기 때문에 스펙트럼의 진폭은 각상에서 모두 증가된 것으로 나타났다. 특히 A상 및 B상의 경우에는 자화전류에 의한 최대 진폭보다 약 1.6배 및 2.6배 높은 것으로 나타났다. 이는 부하전류의 불평등에 기인하며, 변압기의 철심에서 공진 조건이 상이하기 때문이라고 생각된다.



(a) A상



(b) B상



(c) C상

그림 4 부하전류에 의한 AE신호의 주파수 스펙트럼  
Fig. 4 Frequency spectrum of AE signal due to load current

#### 4. 결론

본 연구에서는 운전중인 몰드형 전력변압기의 자화전류 및 부하전류에 의해 변압기 내부로부터 전자기적 음향 노이즈가 발생되므로 이를 구분하여 측정하기 위해 실용 몰드형 전력변압기 500[kVA]를 배전선로 22.9[kV]를 고압측에 접속하여 저압측이 무부하인 경우와 실 부하가 가해진 경우 각상에서 나타난 AE신호에 대한 주파수 스펙트럼을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실용 몰드형 전력변압기의 저압측이 무부하인 경우, 자화전류에 의한 AE 노이즈 신호의 주파수 스펙트럼은 약 40-120[kHz]인 것으로 나타났으며, 주된 주파수 스펙트럼은 약 50-60[kHz] 대역에서 분포되고 있다.

2) 실용 몰드형 전력변압기의 저압측이 부하가 인가된 경우, 부하전류에 의한 AE 노이즈 신호의 주파수 스펙트럼은 자화전류인 경우와 동일한 대역에서 분포되어 있으나, 변압기 정격의 약 10% 부하전류에 의한 주파수 스펙트럼의 진폭은 자화전류만에 의한 진폭보다 각상 모두 높게 나타났으며, 본 실험에서는 B상의 경우에 최고 2.6배 높은 것으로 나타났다.

따라서, 실용 몰드형 전력변압기의 절연진단시, 보이드 방전에 의한 음향방출신호의 주파수 스펙트럼 분석에 있어서 자화전류 및 부하전류에 의한 전자적인 음향 노이즈의 주파수 대역을 필터링 함으로써 절연진단을 최적화 할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] L. E. Lundgaard, "Acoustic Partial Discharge Detection Practical Application", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 5, pp. 34-43, 1992.
- [3] E. Howells. "Acoustic Emission from Stressed Dielectric Liquids", I. S. A. 20th International Symposium, pp 63-66, 1974.
- [4] P. M. Eleftherion, "Acoustic Emission-Based PD Source Location in Transformers", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 6, pp. 22-26, 1995
- [5] E. Howells and E. T. Norton, "Detection of Partial Discharges in Transformers using Acoustic Emission Techniques", IEEE Trans., Vol. PAS-97, No. 5, pp 1538-1549, 1978.