

# 음향기술을 이용한 전력용 변압기 예방진단

황선주\* · 각희로 · 전희중 · 김재철 · 박재완 · 최수안

송실대학교 전기공학과

## Diagnoses of Power Transformer Using Acoustic Emission Techniques

S.J. Hwang, H.R. Kwak, H.J. Jeon, J.C. Kim, J.W. Park, S.A. Choi

Dept. of Electrical Eng. Soongsil University

### Abstract

This paper presents an acoustic emission(AE) technique using ultrasonic sensors to diagnose power transformers. Conventional methods detect and measure the electrical signal of the partial discharge(PD) of transformers in operation.

The proposed techniques measures the acoustic signal generated by the partial discharge, and counts the number of the waveforms above a threshold to diagnose transformers.

Experiments showed that the proposed method improved diagnosis capability over the conventional PD method.

### 1. 서론

최근들어 산업 및 경제의 성장에 따라 전력의 수요는 급증하였고, 정보화 및 정밀 산업기기의 운용 등으로 인하여 고신뢰도의 전력 공급이 필요하게 되었다. 이에따라 전력계통의 확장은 관련 전력기기의 대형화를 이루었고, 사고 발생시에는 그 규모가 매우 크며 복구에도 상당한 시간을 필요로 하게 되어 사회전반에 걸쳐 커다란 영향을 미치게 되었다.

전력기기의 사고중 전력용 변압기에 의한 사고는 파급효과가 매우 크기때문에 이와 관련된 사고예방 진단기술이 절실하게 되었다. 전력용 변압기의 사고는 절연열화에 의해 발생되며, 이는 열, 산소의 흡수, 부분방전, 기계적 응력 등에 의해 발생된다. 특히, 변압기내의 부분방전은 변압기 사고의 주된 원인으로 알려져 있으며 1950년대 중반부터 관련연구가 활발히 진행되고 있다.

부분방전과 관련된 국내외의 연구는 부분방전 위치검출 및 방전량 검출이 대부분을 이루고 있으며, 이들 연구에는 부분방전에 의한 전기신호의 검출이 필요하다. [1][2] 그러나 전기신호의 검출 장치는 규모가 크고, 고가이며 외부 잡음에 대한 영향이 크다는 단점 때문에 실제 현장 적용시 많은 어려움을 지니고 있다. 전기신호 측정의 단점을 보완하기 위하여 특정분야에 음향센서 및 광센서를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. [3]

본 논문에서는 현장 적용시 변압기 주변의 외부잡음과 발생신호와의 구별이 용이하며 설치가 간편한 음향신호 측정 장치의 이용, 운전중인 변압기에 음향센서를 부착하여 부분방전에 따른 기준레벨 이상의 음향신호를 계수하여 음향신호의 지속성도 및 변화상태를 분석함으로써 위험수준 이상의 경우 운영자에게 경고신호를 나타내 주며 부분방전 위치측정의 수행 기준으로 삼고자 한다.

한편 부분방전시 발생하는 음향신호는 지향성의 특성이 강하며 실변압기는 크고 구조가 복잡하기 때문에 센서 부착 위치에 따라 음향신호 측정감도가 좌우되므로 부착위치 선정이 중요하다. 이를위해 이동이 간편하고 설치가 간단한 위치선정기를 제작하여 음향측정법의 신뢰도를 높여 고려한다.

본 연구방법과 다른 진단기법을 적절히 조합하여 운용한다면 운전중인 변압기의 상시감시 및 예방진단 장치로 이용할 수 있다.

### 2. 관련이론

#### 2-1. 부분방전

부분방전이란 전극간에 전압을 인가 했을때, 전극사이의 절연층 완전고락이 아닌 부분적인 방전을 말하며, 절연재료의 절연파괴나 금속재료의 부식을 일으켜 기기의 사고원인으로 작용한다.

전력용 변압기와 관련된 부분방전의 대표적 발생 형태는 다음과 같다.

- 금속의 돌출부분등의 전극 선단 방전
- 금속 접속부의 접촉불량에 의한 방전
- 절연유 또는 수지의 함침 불량에 의한 기포종의 방전
- 고체 절연부에서의 균열 및 공극(Void)에 의한 방전

이와같은 부분방전의 발생은 변압기 내부 절연열화의 주된 요인으로 평가되고 있으며 부분방전 발생시에는 전기적 고락과 초음파가 발생하게 된다.

#### 2-2. 부분방전에 의한 음향신호

부분방전 발생시 전기적인 고락 이외에도 발생부에서는 초음파가 발생하게 되는데 변압기 외벽에 음향신호 측정센서를 부착함으로써 발생원으로부터 전파된 음향신호를 측정할 수 있다.

전기신호 측정에 의한 부분방전 관련 연구는 외부잡음등에 의해 신호구별이 어려우므로 전기신호측정법 보다는 사용이 간편하고 조작성이 쉬운 음향신호측정 연구가 신호처리기술과 마이크로프로세서의 발달에 의해 활발히 진행되고 있다.

그림1은 부분방전시 발생하는 음향신호를 변압기 외벽에 설치한 음향신호 측정장치로 검출하여 신호처리한 파형이다. 그림에서와 같이 음향신호는 외관상 신호(Envelope Signal)의 형태로 변환하여 파형을 적분하거나 기준레벨(Threshold Level)을 설정하여, 레벨 이상의 파형갯수를 계수한다면 전기신호의 측정 없이도 부분방전량의 유추가 가능하다. [4][5]

이를 이용함으로써 변압기 내부의 부분방전에 의한 방전량의 변화상태를 음향신호 만으로도 추정이 가능하며 발생 음향신호수의 시간적 변화상태와 기준범위 이상의 음향신호수의 지속시간등을 분석하여 부분방전에 의한 사고의 발생을 예지할 수 있다.

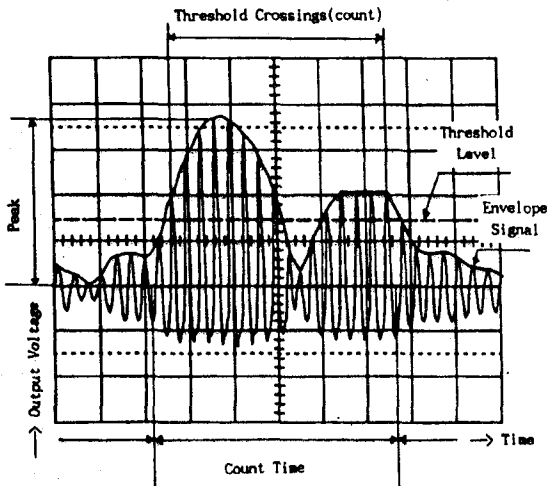


그림 1. 초음파 신호의 분석

부분방전시 발생하는 초음파의 주파수는 100-300[kHz]로 알려져 있으며[6], 본 연구수행시에서도 발생 초음파 신호의 주파수를 분석한 결과 그림 2와 같이 음향신호의 공진주파수가 160[kHz]를 나타내고 있다. 실험시 신호의 측정감도 향상을 위해 공진주파수가 100-500[kHz]인 PZT-5A 압전센서 (Piezoelectric Sensor)를 이용 음향신호의 측정을 실시하였다.

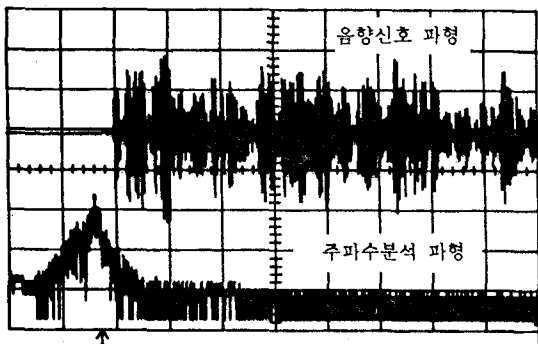


그림 2. 부분방전시 음향신호의 주파수 분석

### 2-3. 위치 선정기

그림3과 같이 초음파 음원의 중심으로부터 거리 r 만큼 떨어져 있고 중심축에서  $\theta$ 만큼 지연된 P점의 음압은 중심축상 같은 거리의 음압을 1로하면 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

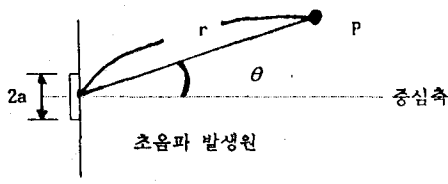


그림 3. P 위치에서의 음압

$$D = \frac{2J_1\left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sin\theta\right)}{\frac{2\pi a}{\lambda} \sin\theta} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $J_1$ 는 제 1차의 베셀함수이고,  $\lambda$ 는 파장이며 D는 지향성 함수이다. 즉, 초음파의 발생 중심축으로부터 각  $\theta$ 에 따라 검출할 수 있는 음향신호의 레벨은 다르게 된다.

그러므로 부분방전시 발생하는 초음파의 감도높은 측정위치 선정을 위해 위치선정기를 제작하였으며, 부분방전에 의한 음향신호의 존재 유무 및 검출신호의 정도를 다음과 같은 사항을 고려하여 제작 하였다.

- 발생신호와 외부 잡음과의 구별
- 부분방전의 발생횟수와 크기에 따른 문제
- 이동과 설치의 간편성

위의 사항을 종합하여 음향신호의 크기와 관련된 사항은 Peak 검출 회로를 사용하였고, 잡음의 구별 및 연속적인 소신호를 고려하기 위하여 적분회로를 첨가 하였다. 구성장치는 Peak 검출 회로와 적분회로의 값을 나타내주며, 동시에 설정기준 이상의 레벨을 나타낸다면 적절한 부착위치로 판단 할 수 있다.

관련 신호의 처리를 위해 잡음제거용 필터와 신호의 증폭을 위한 계장용 증폭기(Instrument Amp.)를 사용하였으며 관련 회로의 구성은 그림 4와 같다.

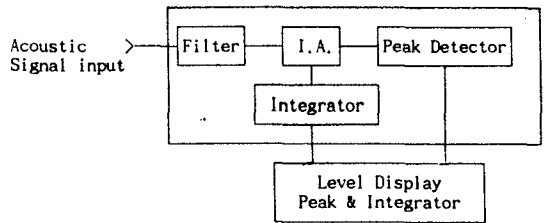


그림 4. 위치 선정기의 구성도

## 3. 실험장치의 구성 및 실험방법

### 3-1. 실험장치의 구성

그림5는 실험장치의 전체적인 구성으로서 다음과 같이 다섯 부분으로 나눌 수 있다.

- 고전압 제어부 ( High Voltage Control Unit )

부분방전 발생을 위한 고전압 발생장치와 부분방전 발생시 부분방전량을 검출하기 위한 장치로 Hipotronics社의 Corona Detector, AC Dielectric Test Set, High Voltage 발생기로 구성되어 있으며 실험시 8 - 12 [kV] 정도의 전압을 인가하였다.

- 모델 변압기 ( Model Transformer )

여러 응용실험을 실시하기 위해 80×50×120 [cm]의 모델 변압기를 사용 하였다. 온도에 따른 초음파의 영향을 고찰하기 위하여 모델 변압기내에 절연유의 온도를 조절할 수 있도록 히터를 내장하였으며, 부분방전 발생 전극으로는 침 대 평판 전극을 이용하였다.

- 부분방전 검출부 ( Partial Discharge Detector )

초음파 센서와 로고스키 코일(Rogowski Coil)을 이용한 음향신호와 전기신호를 처리 가능한 수준으로 변환시킬 수 있는 장치로서, 잡음제거를 위한 대역통과 필터(Band-Pass Filter : 100-300 [kHz])와 신호증폭을 위한 증폭기(Main-Amp. : 20 - 40 [dB]), 명확한 신호의 구분을 위한 제곱회로(Square Circuit)로 구성하였다. 검출된 신호는 기준레벨과 비교하여 단위 시간당 기준이상의 신호수를 나타내주며, 관련신호의 진행상태와 기록을 위해 마이크로프로세서와 디지털 오실로 스코프(Digital Oscilloscope : 200 [MHz]), 플롯터(X-Y Plotter)를 이용하였다. 또한 음향신호센서의 부착위치 선정을 위한 위치 선정기와 시스템의 이상유무 진단을 위한 자기 진단장치를 추가하였다.

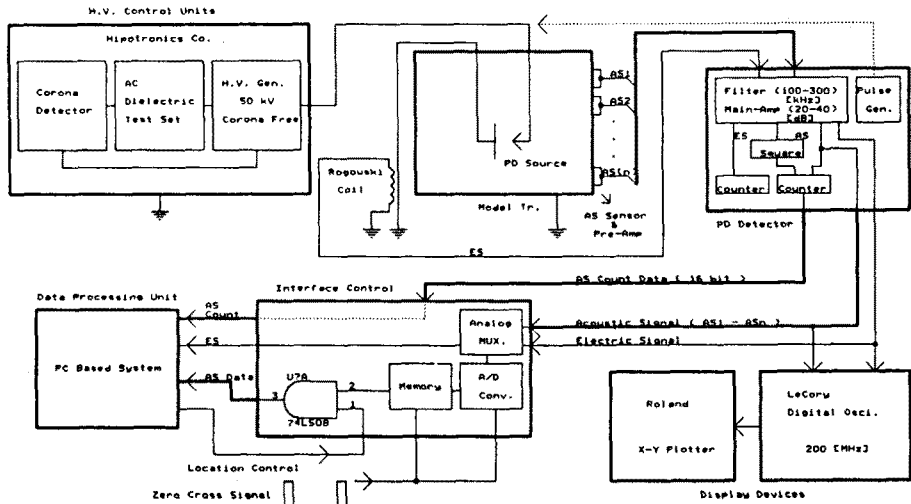


그림 5. 부분방전 측정 시스템

o 변환 제어부 (Interface Control Unit)

검출된 음향신호 및 전기신호를 컴퓨터와 연계하여 사용가능하도록 디지털 신호로 변환하거나 계수된 음향신호수를 컴퓨터에 전송시켜줄 부분으로서, A/D 변환기와 A/D 변환된 데이터를 임시로 저장할 메모리로 구성되어 있으며, A/D 변환의 시작 시간 결정을 위해 Zero Crossing 검출회로를 첨가하였다.

o 데이터 처리부 (Data Processing Unit)

관련정보를 수집하여 그 결과에 따른 제어신호를 발생시키기 위한 부분으로 음향신호수의 변화에 따른 변압기 이상유무의 판별과 이상시 경고의 발생 및 부분방전의 위치측정을 위해 사용되었다.

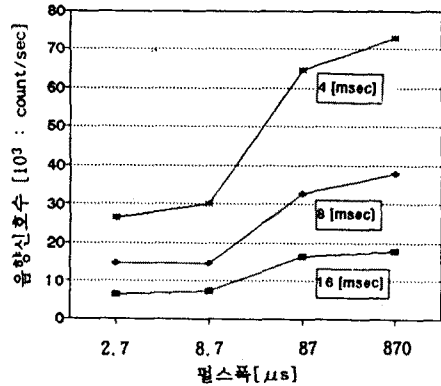


그림 6. 펄스발생간격에 따른 음향신호수(0.4[V]인경우)

3-2. 실험방법

실험은 변압기 내부에 초음파 발생원(초음파 발생기, 침 대 평판전극)을 두고 초음파 발생을 위한 펄스나 부분방전 발생을 위한 전압을 인가하여 변압기 외벽에 부착한 음향센서를 이용하여 관련 신호를 측정하였다. 검출된 신호는 매우 미약한 신호이므로 Pre-Amp. (40[db])로 증폭하여 전송하며 부분방전 검출기를 통해 처리 가능한 형태로 변환하였고, 계수한 음향신호의 데이터를 컴퓨터로 전송하여 방전량과 비교하였다.

초음파 신호 응용을 위해 초음파 발생 펄스폭, 간격, 펄스 출력 레벨에 따른 검출 신호수의 관계를 고찰 하였으며, 모델변압기 내부에 침 대 평판 전극을 두고 8-12[kV] 전압을 인가하여 방전량과 검출 음향신호수를 비교하였다.

표 1. 음향신호의 Count Level 변화에 따른 음향신호수

발생간격 \ 펄스폭		2 [μs]	8.7 [μs]	87 [μs]	870 [μs]	
음향신호의 기준레벨	0.4 [V]	16[ms]	6414.36	7407.48	16560.04	17934.26
		8[ms]	14774.42	14775.35	32666.36	37826.56
		4[ms]	26377.48	30032.30	64634.38	72728.62
	0.8 [V]	16[ms]	2530.82	3140.02	10681.94	11154.50
		8[ms]	4732.36	6339.34	21371.18	23181.81
		4[ms]	10230.54	13132.66	47863.52	47978.16
1.2 [V]	1.6 [V]	16[ms]	990.4	1318.92	6735.48	6629.80
		8[ms]	1824.04	2662.24	13340.00	13243.10
		4[ms]	3322.68	5314.38	27863.52	26862.66
	2.0 [V]	16[ms]	417.62	445.34	3505.98	3548.74
		8[ms]	731.48	894.44	7157.16	6627.42
		4[ms]	1554.82	1555.12	14747.24	11966.66
2.0 [V]	16[ms]	100.54	122.42	1959.86	1777.74	
	8[ms]	186.12	232.02	3811.92	3168.68	
	4[ms]	422.66	508.46	7711.94	7599.62	

4. 실험 결과

4-1. 음향신호 발생장치를 이용한 경우

자체 제작한 음향신호 발생장치를 이용하여 발생펄스의 폭(2, 8.7, 87, 870 [μs])과 발생간격(4, 8, 16[ms]) 변화하여 기준레벨에 따른 영향을 고찰하였으며, 발생펄스의 출력레벨에 따른 음향신호수의 상관관계를 고찰하였다.

실험의 진행은 모의 변압기 내부에 음향신호 발생장치를 두고 입력펄스를 변화시켜 발생된 초음파를 모의 변압기 외벽에 부착한 음향신호센서로 검출하여 음향신호수의 데이터를 수집하였다. 이때 수집된 정보는 PC를 통해 저장되었고 각 경우마다 100개의 데이터를 선정하였다. 실험결과 기준레벨이 0.4[V]일때 결과를 그림6에 나타내었으며 전체적인 결과는 표 1.과 같다.

실험결과 기준레벨의 변화에 따라 음향신호수는 비례하지만 특정부분에 있어서 약간의 차이를 보이고 있다. 이러한 경우는 투성을 고려하여 적절한 보상이 필요하다.

음향신호 발생장치의 입력펄스의 레벨에 따른 음향신호수에 대한 실험은 펄스폭이 8.7[μs], 펄스 발생간격이 16[ms]인 경우 입력레벨을 2 - 4[V] 범위에서 0.4[V] 단계로 앞의 실험과 같은 방법으로 수행하였다. 실험결과는 그림7과 같다.

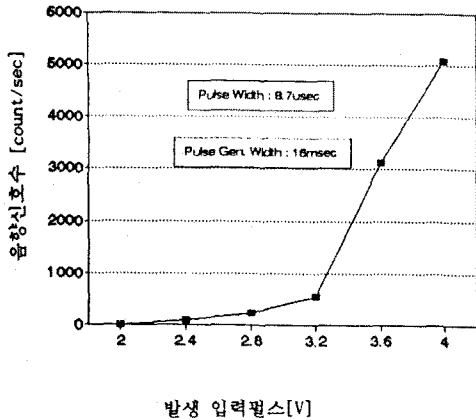


그림 7. 발생 입력펄스전압의 변화에 따른 음향신호수

그림 7.에서 볼 수 있듯이 입력레벨에 따라 측정신호수가 비례적으로 변화함을 볼 수 있다. 이는 방전시 방전량과 그에따른 음향신호수로 연관지을 수 있다.

#### 4-2. 부분방전에 의한 음향신호수의 검출

모의 변압기 내부에 침 대 평판 전극을 두고 고전압 발생장치를 이용하여 직접 전압을 인가하였을 경우 부분방전에 따른 방전량과 음향신호수를 측정하여 상관관계를 고찰하였다. 인가전압의 범위는 9.3 - 10.5 [kV]였으며, 0.1[kV]단계로 변화하였다.

사용된 침 대 평판 전극의 간격은 10[mm]였으며, 각 경우당 1,000개의 데이터를 선정하여 컴퓨터로 전송하여 평균값과 표준편차를 계산하였다. 음향신호수와 방전량의 관계를 그림8에 나타내었고, 결과는 표 2.와 같다.

표 2. 부분방전시 방전량과 음향신호 Count 수의 비교

Item 전압	방 전 량[pC]		음 향 신 호 수	
	평균	표준편차	평균	표준편차
9.3 [kV]	2.95	0.59	2.33	0.47
9.4 [kV]	4.61	7.28	22.63	47.51
9.5 [kV]	4.52	7.72	47.00	83.96
9.6 [kV]	7.18	11.77	155.75	200.55
9.7 [kV]	4.97	8.90	132.46	252.95
9.8 [kV]	30.55	18.65*	301.95	56.43
9.9 [kV]	30.82	15.81	509.43	82.52

실험의 결과 방전량과 음향신호수는 비례적인 관계를 나타내고 있다. 입력전압이 9.8[kV]인 경우에는 차이를 보이고 있으나 이는 표준편차[1]에서 볼 수 있듯이 데이터의 변화폭이 크기 때문이다. 이는 적절한 비교레벨의 조정으로 보정이 가능하다.

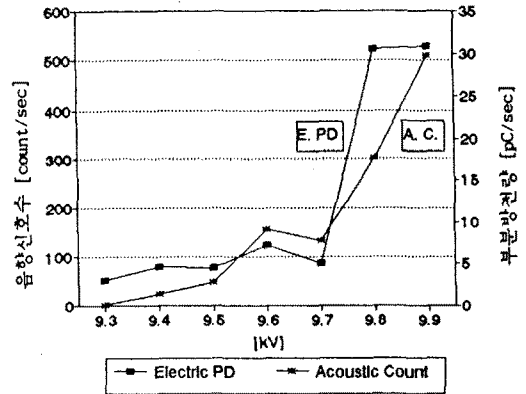


그림 8. 방전량과 음향신호수의 비교

#### 5. 결론 및 고찰사항

음향기술을 이용한 전력용 변압기의 예방진단 연구를 통하여 얻은 결과와 향후 고찰사항은 다음과 같다.

- 현장적용시 부분방전에 의한 음향신호 측정에는 센서 부착위치에 따라 음향신호의 측정감도가 좌우된다. 본 연구에서 제시한 위치 선정기를 이용하여 적절한 음향탐지기 위치를 선정할 수 있다.

- 음향신호 측정기술을 이용하여 전력용 변압기의 부분방전 상태를 분석함으로써 전력 시스템 운용자에게 변압기내의 부분방전 진행상태에 관한 정보의 제공과 부분방전의 위치측정의 수행시점을 제시할 수 있다.

- 외부잡음에 의한 전기적측정법 대신 설치 및 측정이 간단한 음향신호수 검출장치와 관련신호의 전송 시스템을 구성하여 전력용변압기 사고예방의 주요자료로 이용할 수 있다.

#### 참고 문헌

- [1]. E.Hiironniemi, J.Takala, "Location of Partial Discharges and Electrical Failures in Power Transformers by means of Automatic Ultrasonic Method", Cigre, International Con. on Large High Voltage E.S., 1-9. Sept. 1982. pp 12-07.
- [2]. J.Slangen, "Investigations on the acoustic emission techniques for locating partial discharge during transformer testing", Elektrotechnik 67, April, 1989. pp 12-07.
- [3]. E.F.Kelley, M.Nehmadi, R.Hebner, "Measurement of Partial Discharges in Hexane under dc voltage", IEEE Trans. Elec. Ins. Vol. 24 NO. 6, Dec. 1989. pp 1109.
- [4]. R.Dukes, E.A.Culpan, "Acoustic Emission : Its techniques and applications", IEE Proc., Vol. 131, Pt. A, NO. 4, June 1984. pp 241.
- [5]. S.L.Jones, "The Detection of Partial Discharge in Power Transformers Using Computer Aided Acoustic Emission Techniques", IEEE Int. Sym. EI, Toronto, Canada, June 3-6, 1990. pp 106.
- [6]. E.Howells, E.T.Norton, "Detection of Partial Discharge in Transformers Using Acoustic Emission Techniques", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-97, NO. 5, Sept/Oct, 1978. pp 1538.