

부분방전에 의한 음향신호의 검출과 위치추정에 관한 연구

A Study on the Detection of Acoustic Signal Produced by Partial Discharges in Insulation Oil and its Positioning

길경석^{1,a}, 박대원¹, 김일권¹, 최수연¹, 박찬용¹

(Gyung-Suk Kil^{1,a}, Dae-Won Park¹, Il-Kwon Kim¹, Su-Yeon Choi¹, and Chan-Yong Park¹)

Abstract

This paper dealt with the frequency spectrum analysis of acoustic signal produced by partial discharge (PD) in insulation oil and the positioning of PD occurrence to apply in diagnosis of oil insulated transformers. Three types of electrode system ; the needle-plane, the plane-plane, and the wire-wire structure were assembled to simulate partial discharges in oil insulated transformers. A low-noise amplifier and a decoupling circuit were designed to detect acoustic signal with high sensitivity. The frequency spectrum of the acoustic signal were 50 kHz~260 kHz in the needle-plane, 50 kHz~250 kHz in the plane-plane, and 45 kHz~195 kHz in the wire-wire electrode system. Their peak frequencies were 145 kHz, 130 kHz and 114 kHz, respectively. The position of PD occurrence was calculated by the time difference of arrival (TOA) using three acoustic emission (AE) sensors, and we could find the position within the error of 1 % in the experimental apparatus.

Key Words : Frequency spectrum, Acoustic signal, Partial discharge (PD), Oil insulated transformer, Acoustic emission (AE), Time difference of arrival (TOA)

1. 서론

전력수요의 증가와 고품질 전력공급의 요구로 전력설비가 초고압·대용량화 되면서 예방진단기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 절연은 전력설비의 성능과 수명에 직접적 관련이 있으며 전기적, 열적, 화학적 스트레스로 인해 열화가 진행된다[1]. 특히 초고압 변압기는 사고시 정전범위가 넓고 수리나 교체에 막대한 비용이 소요되는 등 기술적·경제적 손실이 발생하므로 안정적인 전력공급을 위해 주기적인 진단과 상시 모니터링이 필요하다[2-7].

절연진단을 위한 최근의 기술로는 부분방전측정법이 주류를 이루고 있으며, 이는 절연물에 결합이

생기면 이 부분에서 전계가 집중되어 부분방전이 발생하게 되어 열화를 초기에 검출할 수 있는 특징이 있다[8]. 부분방전측정에는 전기적 방법과 비전기적 방법이 있으며, 전기적 방법은 감도가 우수하여 정밀 측정이 가능하지만 주변 전자계에 의한 영향을 받기 쉬우며, 초고압의 경우 운전 중 결합 회로망의 설치가 불가능한 단점이 있다. 비전기적 방법에는 음향검출, 광학적 검출 및 화학적 검출법이 있으며, 그 중에서 음향검출법은 전기적 방법에 비해 감도는 낮지만, 운전중 센서의 설치가 용이하고 전기적으로 절연되어 있어 주변 전자계 노이즈에 강하다. 또한 다수의 센서를 설치하여 음향신호의 도달시간차를 측정하면 부분방전 즉, 결합의 위치를 추정할 수 있다.

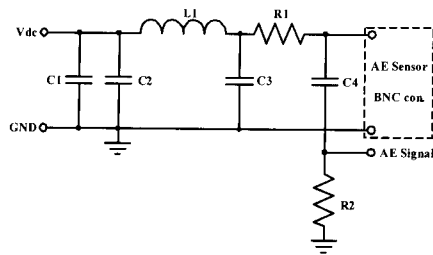
본 논문에서는 초고압 변압기의 상시 절연진단에 음향검출법을 적용하기 위해, 유중에서 부분방전을 모의하고 이 때 발생하는 음향신호의 검출과 주파수 분석, 그리고 부분방전의 위치표정에 관하여 연구하였다.

1. 한국해양대학교 전기전자공학부
(부산시 영도구 동삼동 1)

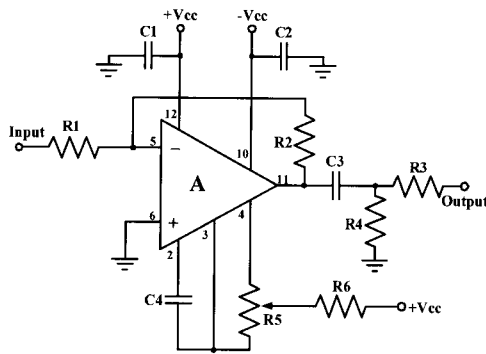
a. Corresponding Author : kilgs@nhu.ac.kr

접수일자 : 2007. 8. 23

심사완료 : 2007. 9. 11



(a) 역결합회로



(b) 저잡음 증폭기

그림 1. 음향신호 검출회로.

Fig. 1. Detection circuit of acoustic signal.

2. 부분방전측정 시스템

2.1 측정회로

유중부분방전에 의해 발생하는 음향신호를 검출하기 위해 AE(Acoustic Emission)센서(R15I-AST, PAC)를 사용하였다. AE센서는 전원선과 신호선을 공통으로 사용하므로 직류 전압원과 음향신호를 분리하기 위한 필터특성의 역결합회로와 음향신호의 고감도 검출을 위한 광대역 증폭기가 필요하다.

본 논문에서는 음향신호의 효과적 검출을 위해 역결합회로와 광대역 증폭회로를 그림 1과 같이 설계하였다.

역결합회로의 주파수응답은 그림 2와 같으며, AE센서에서 직류전원측으로 10 kHz이상의 음향신호는 150 dB 이상 감쇄(attenuation)시키며, 증폭회로의 입력단 즉, R2로는 감쇄없이 전달하는 특성을 갖는다.

광대역 증폭회로에는 이득·주파수 대역이 70 MHz 인 연산증폭기를 사용하였으며, 이득은 40 dB로 설계하였다. 제작된 음향신호 검출회로의 주파수응답은 합수발생기로 1 kHz에서 2 MHz까지 정현파 입력전압에 대한 출력전압의 비율로서 분석하였으

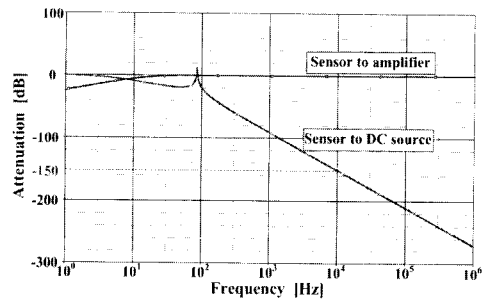


그림 2. 역결합회로의 주파수 응답.

Fig. 2. Frequency response of the decoupling circuit.

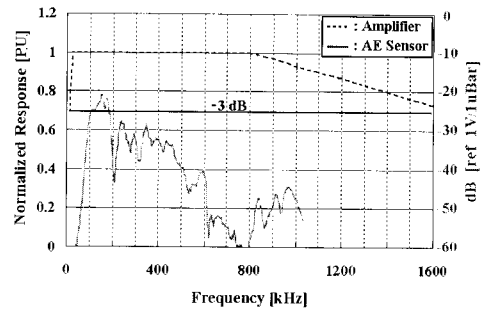


그림 3. 증폭회로의 주파수 응답.

Fig. 3. Frequency response of the amplifying circuit.

며, 그림 3과 같이 -3 dB의 고역차단 주파수는 1.6 MHz, 저역차단 주파수는 1.6 kHz로 AE센서의 주파수대역(50 kHz~200 kHz, -3 dB)을 충분히 포함하고 있음을 알 수 있다.

2.2 실험 및 분석

본 논문에서는 유입변압기의 상시진단을 위한 방법으로 음향신호 검출법을 적용하였으며 유중부분방전 발생패턴에 따른 음향신호의 측정과 주파수 특성을 분석하였다. 우선 유중부분방전을 모의

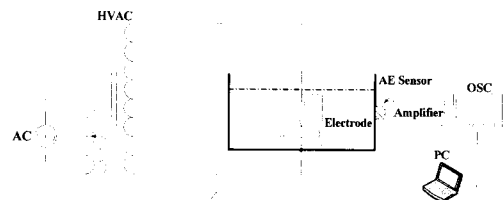
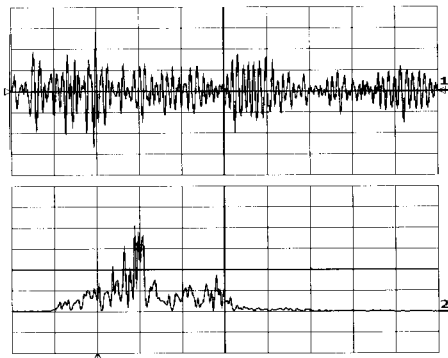
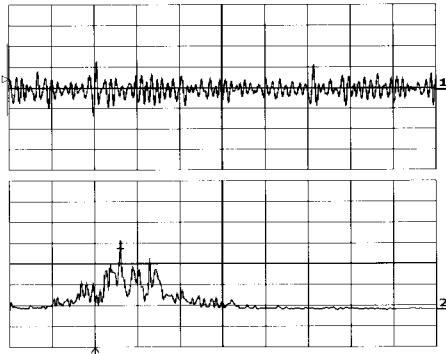


그림 4. 실험장치의 구성.

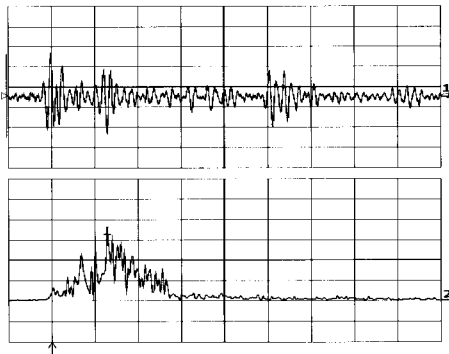
Fig. 4. Configuration of the experimental apparatus.



Ch.1 : Acoustic signal [500 mV/div, 50 μs/div]
 Ch.2 : FFT result [39.5 mV/div, 50 kHz/div]
 (a) 칩-평판



Ch.1 : Acoustic signal [100 mV/div, 50 μs/div]
 Ch.2 : FFT result [4.65 mV/div, 50 kHz/div]
 (b) 평판-평판



Ch.1 : Acoustic signal [500 mV/div, 50 μs/div]
 Ch.2 : FFT result [24.5 mV/div, 50 kHz/div]
 (c) 권선-권선

그림 5. 음향신호와 주파수 스펙트럼.

Fig. 5. Acoustic signals and FFT results.

하기 위하여 금속제 외함(740 mm × 740 mm × 1000 mm)과 절연물의 결합에 의한 방전 발생모델로 칩-평판, 평판-평판 및 권선-권선 구조의 전극계를 제작하였다. 평판전극은 텅스텐과 구리의 합금으로 두께 1.5 mm, 지름 60 mm로 설계하였으며 가장자리를 등글게 처리하여 전계 집중이 발생하지 않도록 하였다. 유입변압기의 모의실험장치는 그림 4와 같이 구성하였으며, 전극계를 유중에 위치시키고 교류전압을 가변(0~50 kV)하여 부분방전을 발생시켰다.

유중부분방전에 의한 음향신호는 금속 외함에 설치된 AE센서로 검출되며 증폭회로를 통해 오실로스코프(LeCroy 9314C, 400 MHz)로 전달된다. 3가지 형태의 전극계에서 측정된 부분방전의 음향신호와 주파수 스펙트럼을 그림 5에 나타내었다.

음향신호의 주파수 스펙트럼 분석결과, 칩-평판 전극에서 발생한 음향신호의 주파수는 50 kHz~260 kHz에 분포하며 피크값은 145 kHz이었다. 평판-평판 전극에서는 50 kHz~250 kHz, 피크값은 130 kHz로 칩-평판 전극에 비해 낮게 나타났으며, 권선-권선 전극에서는 45 kHz~195 kHz, 피크주파수 114 kHz로 칩-평판 전극과 평판-평판 전극에 비해 낮게 분석되었다.

실험결과로부터 AE센서를 이용하여 유중부분방전의 검출이 가능함을 확인하였다. 결합의 종류에 따른 음향신호의 주파수 성분이 달라지므로, 데이터의 분석과 축적을 통하여 변압기 진단에 충분히 활용할 수 있을 뿐만 아니라 진단의 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

3. 방전위치 추정

음향신호의 측정에 의한 변압기 진단기술은 절연상태와 결합 즉, 부분방전 발생위치의 추정도 가능하다[8]. 결합의 위치는 전기신호와 음향신호를 측정함으로써 추정할 수 있으며, 측정방법에 따라 전기-음향법과 음향-음향법이 있다. 전기-음향법은 전기신호를 기준신호로 하고, 음향신호를 측정함으로써 두 신호의 시간차로부터 방전의 발생 위치를 계산하는 방법이다. 그러나 변압기가 설치된 환경은 전자계 노이즈 및 각종 고주파 잡음이 존재하고, 또한 방전펄스의 크기가 매우 작기 때문에 많은 오차가 발생할 수 있다. 반면, 음향-음향법은 초음파대역의 음향신호를 측정함으로써 전자계 노이즈에 강하며 다수의 AE센서를 설치하면 음향신호의 도달시간차를 이용하여 방전의 발생 위치를 추정할 수 있다[9-12].

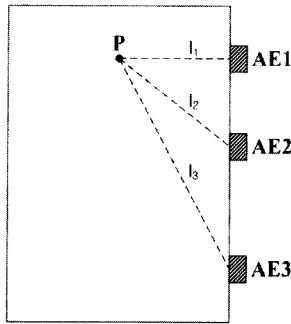


그림 6. AE 센서의 설치.
Fig. 6. Set-up acoustic emission sensors.

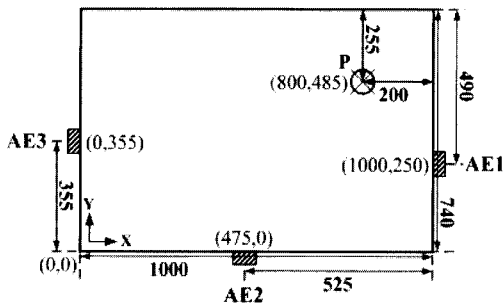


그림 7. 실험장치의 구성.
Fig. 7. Configuration of the experimental apparatus.

본 논문에서는 3개의 AE센서를 이용하여 유층에서 부분방전 음향신호를 측정하고 도달시간차로부터 2차원 평면상에서 방전위치를 산출하였다.

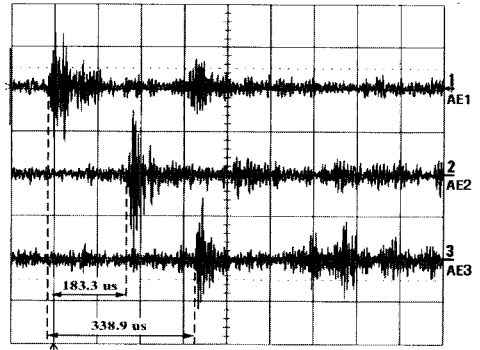
그림 6에서 음파의 전파속도를 v 라고 하면 음향 센서 AE1, AE2 및 AE3에서 부분방전 발생점 P까지의 거리 l_1, l_2, l_3 은 다음과 같이 표현된다.

$$l_1 = v \cdot t \tag{1}$$

$$l_2 = v \cdot (t + \Delta t_1) \tag{2}$$

$$l_3 = v \cdot (t + \Delta t_2) \tag{3}$$

실험장치는 유층부분방전을 발생시키기 위한 금속제 외함, 방전전극 및 3개의 AE센서로 구성된다. 음향신호로 방전위치를 계산하기 위해 외함에 평면 좌표를 부여하였으며, 부분방전 전극계는 그림 7에 나타난 위치(P점)에 설치하였다.



[500 mV/div, 100 μs/div]

그림 8. 음향신호의 측정결과.
Fig. 8. Result of acoustic signal measurement.

3개의 AE센서에서 측정된 음향신호는 그림 8과 같으며 AE1과 AE2사이에서 측정된 도달시간차는 183.3 μs, AE1과 AE3은 338.9 μs이다.

식(1)~(3)과 외함의 평면좌표로부터 다음 식(4)와 (5)를 만들 수 있다.

$$t_{2-1} = \frac{1}{v} \cdot (\sqrt{(x-475)^2 + y^2} - \sqrt{(x-1000)^2 + (y-250)^2}) \tag{4}$$

$$t_{3-1} = \frac{1}{v} \cdot (\sqrt{x^2 + (y-355)^2} - \sqrt{(x-1000)^2 + (y-250)^2}) \tag{5}$$

여기서, t_{2-1} : AE1과 AE2사이의 도달시간차 [s], t_{3-1} : AE1과 AE3사이의 도달시간차 [s], v : 음향신호의 전파속도 [m/s]이다.

상기 식으로부터 산출된 방전점의 좌표는 $x=797.18$ mm와 $y=477.83$ mm이다. 실제 방전전극의 설치위치가 $x=800$ mm와 $y=485$ mm이므로, 금속제 외함의 크기가 1000 mm×740 mm 임을 고려하면 1%이내의 오차로 산출이 가능하였다.

4. 결론

본 논문에서는 유입변압기 진단을 위해 유층부분방전에 의한 음향신호의 분석과 도달시간차를 이용한 부분방전 위치표정에 대해 기술하였다. AE 센서와 증폭회로로 구성된 부분방전 측정회로에서 음향신호만을 고감도로 검출하기 위하여 10 kHz에서 150 dB의 감쇄비를 가지는 역결합회로와 -3 dB의 주파수대역이 1.6 kHz~1.6 MHz인 저잡음

증폭기를 설계하였다. 또한 유중에서 부분방전을 모의하기 위하여 침-평판, 평판-평판 및 권선-권선 구조의 3가지 전극계를 제작하였다.

유중실험에서 검출된 음향신호의 주파수 스펙트럼 분석결과, 침-평판 전극계에서는 50 kHz~260 kHz로 피크주파수는 145 kHz, 평판-평판에서는 50 kHz~250 kHz로 피크주파수는 130 kHz, 권선-권선에서는 45 kHz~195 kHz로 피크주파수는 114 kHz이었다. 또한 3개의 AE센서로 음향신호의 도달시간차로부터 방전의 위치를 1 % 이내의 오차로 추정할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사에서 지원한 전력변환 시스템 신기술 연구센터(과제번호 2006-0273)의 사업으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] P. D. Agoris, S. Meijer, and J. J. Smit, "Evaluation of On-line Insulation Condition Assessment Techniques for power transformers", International Symposium on High-Voltage Engineering(ISH), Beijing, China, 2005.
- [2] S. Tenbohlen, D. Uhde, J. Poittevin, U. Sundermann, H. Borsi, P. Werle, and H. Matthes, "Enhanced Diagnosis of Power Transformers using On- and Off-line Methods: Results, Examples and Future Trends", CIGRE Paris, paper 12-204, 2000.
- [3] T. Leibfried and K. Feser, "Off-line and On-line Monitoring of Power Transformers using the Transfer Function Methode", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, p. 34, 1996.
- [4] Th. Aschwanden, M. Hassig, and V. Der Houhanessoan, "Development and Application of New Condition Assessment Methods for Power Transformers", CIGRE Paris, paper 12-207, 1998.
- [5] P. Guinic and J. Aubin, "Cigre's Work on Power Transformers", EPRI, Substation Equipment Diagnostics Conference IX, New Orleans, Louisiana, USA, 2001.
- [6] H. Kawada, M. Honda, T. inoue, and T. Amemiya, "Partial discharges automatic monitor for oil-filled power transformer", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-103, No. 6, p. 1045, 1986.
- [7] 권동진, 박재준, "변압기 부분방전 상시 감시기법에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 14권, 12호, p. 1032, 2001.
- [8] Ghirelli. L., Koltunowicz. W., Pignini, A., Rama Prasath, S, and Yellaiah, A., "Acoustical method for partial discharge detection in high power capacitors", Proceeding of International Conference on Partial Discharge, IEE, Canterbury, p. 92, 1993.
- [9] E. Howells and E. T. Norton, "Detection of partial discharge in transformers using acoustic emission techniques", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-97, No. 5, p. 1538, 1978.
- [10] P. M. Eleftherion, "Acoustic emission-based PD source location in transformers", Electrical Insulation Magazine, IEEE, Vol. 11, Iss. 6, p. 22, 1995.
- [11] Y. Lu, X. Tan, and X. Hu, "PD detection and localization by acoustic measurements in an oil-filled transformer", IEE Proceeding of Science Measurement Technology, Vol. 147, No. 2, 2000.
- [12] 길경석, 송재용, 서황동, 김용주, 강동식, 황돈하, "저압유도전동기에서 미소부분방전 측정에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 18권, 10호, p. 960, 2005.
- [13] 권태호, 이종길, 이준호, "광섬유 센서를 이용한 절연유내의 부분방전 위치검출에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 16권, 9호, p. 838, 2003.