

유중 부분방전의 음향검출에 관한 연구

A Study on the Acoustic Detection of Partial Discharges in Insulation Oil

길경석^{1,a}, 김성욱¹, 박대원¹, 김선재¹, 송재만²

(Gyung-Suk Kil^{1,a}, Sung-Wook Kim¹, Dae-Won Park¹, Sun-Jae Kim¹, and Jae-Man Song²)

Abstract

This paper dealt with the acoustic detection of partial discharge (PD) in insulation oil for insulation diagnostics of oil immersed transformers. Electrode systems such as needle to plane, plane to plane, and floating were fabricated to simulate some defects in transformers. A wide band acoustic emission(AE) sensor with the frequency ranges of 100 kHz~1 MHz and a narrow band AE sensor with the resonant frequency of 140 kHz were used in the experiment. Also, a decoupler and an amplifier were designed to detect and amplify the acoustic signal only. The decoupler separates acoustic signal from DC source without any distortion, and the amplifier has the gain of 40 dB in frequency ranges of 11 kHz~4 MHz. In the experiment, frequency components and propagation characteristics of acoustic signal were analyzed, and an algorithm of positioning of PD occurrence by the time difference of arrival was proposed. From the results, the frequency components of the acoustic signal exist from 50 kHz to 200 kHz and the positioning error of PD calculated by three AE sensors was within 1%.

Key Words : Acoustic detection, Partial discharge (PD), Oil immersed transformer, Insulation diagnostic, Frequency component, Positioning, Propagation

1. 서론

산업의 고도화로 전력수요가 급증하였고 전력공급의 신뢰성이 요구됨에 따라 절연진단기술에 대한 필요성도 증가하고 있다. 현재 전력설비의 유지보수 및 절연진단 분야의 세계적 추이는 미국, 일본 및 캐나다를 비롯한 선진국을 중심으로 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 기술은 기기의 절연열화 및 이상 유무를 상시 감시하여 향후 발생 가능한 사고를 조기에 발견하고 유지 보수함으로써, 전력공급의 안정성과 신뢰성을 확보하기 위한 것이다[1-6].

특고압 배전선로에는 변압기, 차단기, 피뢰기 등과 같은 전력기기가 설치되어 있으며, 전력기기를 장기간 사용하게 되거나 운전 중 이상전압이 발생하면 절연물의 절연열화에 의한 기기의 고장이 발생한다. 절연은 기기의 수명과 성능에 직접적 관련이 있으며 전기적, 열적, 화학적, 기계적 스트레스로 인해 열화가 진전되어 부분방전이 발생한다[7].

부분방전이 지속적으로 발생하면 절연과피로로 이어지는데, 특히 전력용 변압기 내부에서 발생하는 부분방전은 변압기 고장의 주요 원인으로 사고 시 그 파급영향이 매우 크기 때문에 안정적인 전력공급을 위해 부분방전 측정이 요구된다[8].

고압변압기의 대부분은 유입변압기로 국내·외적으로 유입변압기의 부분방전 측정에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 유입변압기의 대표적인 부분방전 측정법에는 전기적인 방법과 비전기적인 방법이 있으며, 전기적인 방법은 감도가 좋지만 주변 전자계에 의한 영향을 받기 쉬우며 초고압인

1. 한국해양대학교 전기전자공학부
(부산시 영도구 동삼동 1)
2. 부산테크노파크 자동차부품기술지원센터
a. Corresponding Author : kilgs@hhu.ac.kr
접수일자 : 2009. 11. 12
1차 심사 : 2009. 12. 14
심사완료 : 2009. 12. 16

경우 장비의 절연전압이 높아져야 하기 때문에 운전 중 설치가 어렵다는 단점이 있다[9]. 비전기적인 방법에는 음향검출법이 있으며 센서의 설치가 간편하고 전기적으로 절연되어 있어 주변 전자계의 노이즈에 강하다. 또한 다수의 센서를 설치하여 음향신호의 도달시간차를 측정하면 결함의 위치를 추정할 수 있다.

특히 변압기의 운전 상태에서도 절연이상을 검출할 수 있으므로 변압기의 이상징후를 조기에 발견하여 고장을 미연에 방지할 수 있다. 그러나 음향신호 검출의 고감도 검출을 위해서는 부분방전에 의해 발생하는 음향신호의 특성을 분석할 필요가 있다.

본 논문에서는 전력용 유입변압기의 상시 절연 진단을 위한 음향검출기술의 적용에 대하여 기술하였으며 절연결함에 따른 부분방전 발생을 모의하고 음향신호 검출 및 주파수 스펙트럼 분석과 부분방전의 위치검출 및 음향신호와 방전전하량의 관계에 관하여 분석하였다.

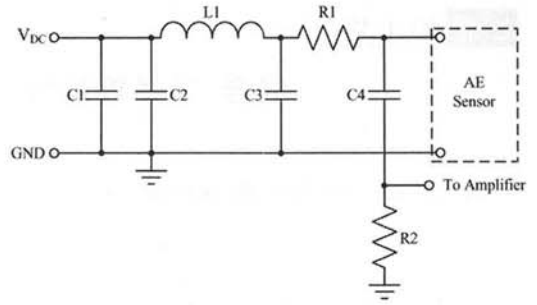
2. 음향신호의 검출

절연체 내부에 기포나 균열이 발생하는 등 결함이 존재하게 되면 전계가 집중되고 자체의 절연내력이 상대적으로 약한 결함부분에서 절연열화로 인한 부분방전이 발생하게 된다. 특히 유중에서 부분방전이 발생하면 절연유의 절연에 영향을 미치게 되며, 동시에 수 십 kHz~수 백 kHz의 주파수 대역을 갖는 음향적 신호가 수반된다[10,11].

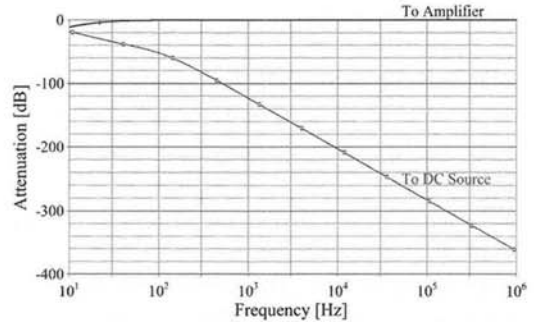
유중 부분방전에 의한 음향신호의 검출을 위하여 측정주파수대역이 100 kHz~1 MHz인 광대역 AE센서와 50 kHz~250 kHz인 협대역 AE센서를 사용하였다. AE센서는 마그네트 홀더와 세트로 구성되어 변압기 외함에 취부가 용이하지만 전원선과 신호선을 공통으로 사용하므로 직류 전압원과 음향신호를 분리하기 위한 필터특성의 역결합 회로가 필요하다.

따라서 음향신호만을 검출하기 위하여 그림 1(a)와 같이 역결합 회로를 설계 및 제작하였다. 직류전원의 고주파 성분은 L1-C2에 의해 차단되고, 순수한 직류전원만 센서에 공급된다.

또한 AE센서에서 검출된 음향신호는 R1-C3-L1에 의해 직류전원 측으로는 차단되며, 오직 콘덴서 C4를 통해 검출될 수 있도록 설계하였다. 역결합 회로의 주파수 특성은 그림 1(b)와 같으며, AE센서에서 직류전원 측으로 10 kHz이상의 음향신호는 200 dB이상 감쇄시키며, 증폭회로의 입력단, 즉 R2로는 감쇄없이 전달하는 특성을 갖는다.



(a) 회로



(b) 주파수 응답

그림 1. 시제작 역결합 회로.

Fig. 1. Prototype decoupler.

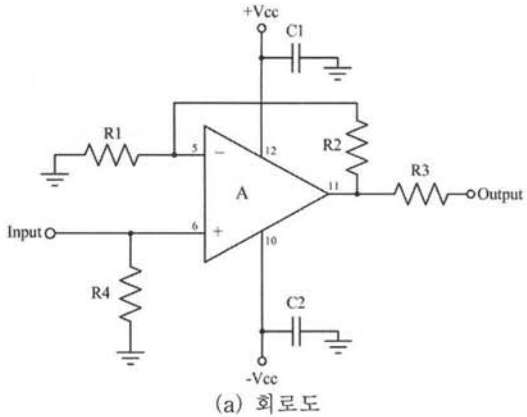
측정된 음향신호는 매우 미소하기 때문에 그림 2와 같이 증폭회로를 설계하여 측정감도를 개선하였다. 증폭회로는 연산증폭기(DC~140 MHz)를 사용하여 이득 40 dB로 하였다.

제작된 음향신호 검출회로의 주파수 특성은 합수발생기로 1 kHz에서 10 MHz까지 정현파 입력 전압에 대한 출력전압의 비율로서 분석하였으며, 그림 2(b)와 같이 -3 dB의 고역차단주파수는 4 MHz, 저역차단주파수는 11 kHz로 AE센서의 주파수대역을 충분히 포함한다.

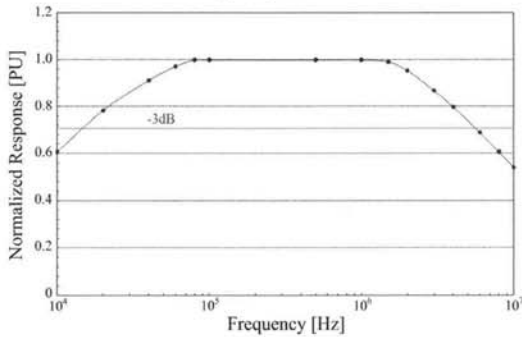
3. 모의 전극계

유입변압기는 철심이나 코일과 같은 구조물이 운전 중 진동과 충격에 의해 기계적으로 파괴되어 부분방전이 발생된다. 또한 제조시 결함이나 내부 오손 등에 의해 먼지나 이물질이 절연물 표면에 부착되어 연면 절연저항의 저하를 발생시켜 2차적인 열화로 진전되는 경우가 많다.

유입변압기 내부에서 발생 가능한 결함을 모의하기 위하여 침-평판, 평판-평판, Floating 전극계를 그림 3과 같이 제작하였다.



(a) 회로도



(b) 주파수 응답

그림 2. 시제작 증폭회로.

Fig. 2. Prototype amplifier.

평판전극은 텅스텐과 구리의 합금으로 지름 60 mm, 두께 15 mm로 가장자리를 둥글게 처리하여 전계 집중이 발생하지 않도록 설계하였으며, 침의 곡률반경은 10 μm 이다. 또한 전극사이에 실제 유입변압기에서 사용하는 두께 1.6 mm의 프레스보 드지를 삽입하였다.

4. 측정 및 분석

4.1 주파수 스펙트럼

음향신호 검출을 위하여 그림 4와 같이 실험계를 구성하였으며 제작된 전극계를 절연유 내에 위치시키고 전압조정기로 인가전압을 가변시켜 유중 부분방전 발생을 모의하였다.

광대역 AE센서와 협대역 AE센서를 금속제 외함 외벽의 동일한 위치에 부착하여 음향신호를 검출하였다. 검출된 음향신호는 역결합 회로와 증폭회로를 통해 오실로스코프에 의해 측정된다. 각각의 AE센서에서 측정된 부분방전 음향신호를 그림 5에 나타내었으며, 주파수 스펙트럼은 그림 6과 같다.

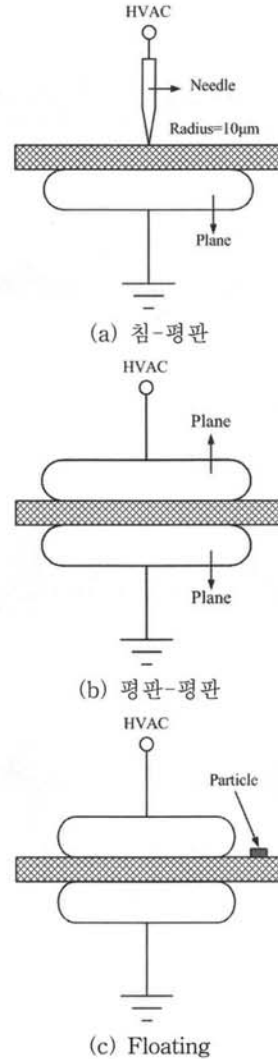


그림 3. 전극계의 구성.

Fig. 3. Configuration of the electrode system.

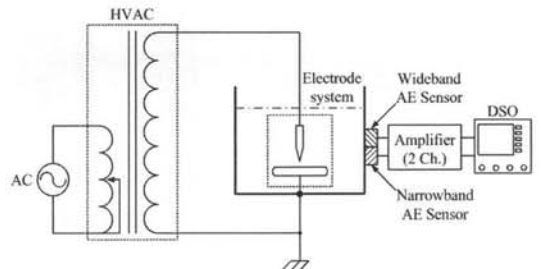
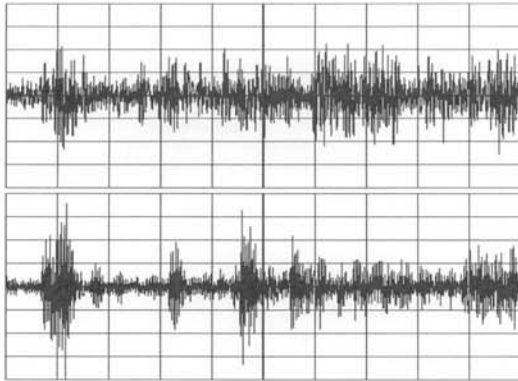
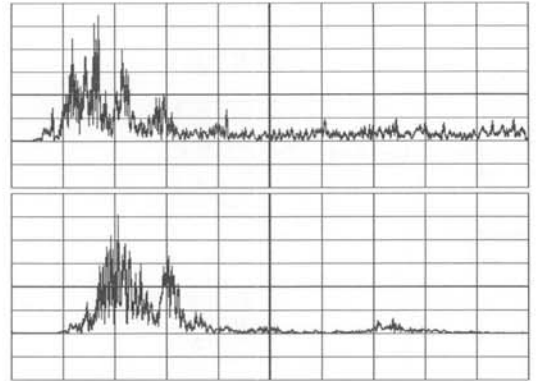


그림 4. 실험계의 구성.

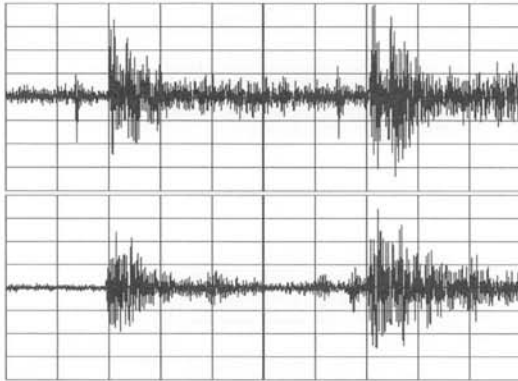
Fig. 4. Configuration of the experimental setup.



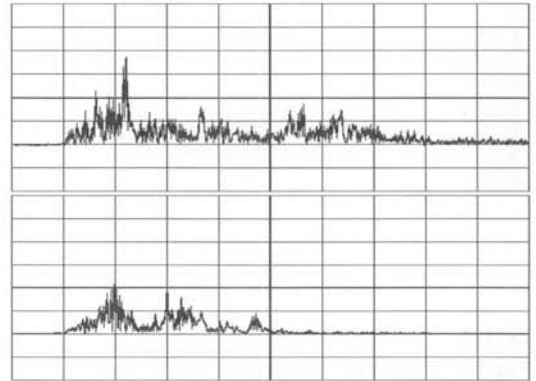
상 : 광대역 AE센서 [0.5 V/div, 2 ms/div]
 하 : 협대역 AE센서 [0.5 V/div, 2 ms/div]
 (a) 침-평판



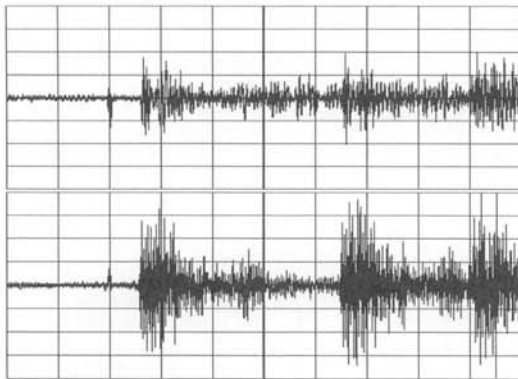
상 : 광대역 AE센서 [20 mV/div, 50 kHz/div]
 하 : 협대역 AE센서 [20 mV/div, 50 kHz/div]
 (a) 침-평판



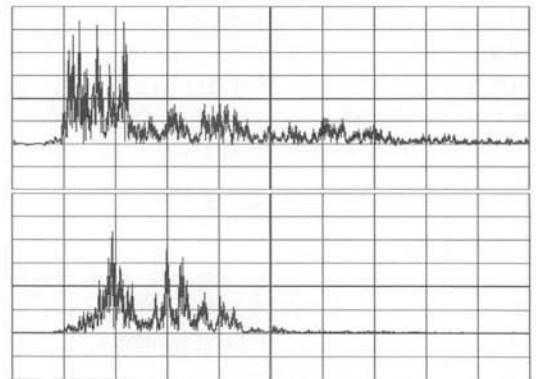
상 : 광대역 AE센서 [0.5 V/div, 2 ms/div]
 하 : 협대역 AE센서 [0.5 V/div, 2 ms/div]
 (b) 평판-평판



상 : 광대역 AE센서 [20 mV/div, 50 kHz/div]
 하 : 협대역 AE센서 [30 mV/div, 50 kHz/div]
 (b) 평판-평판



상 : 광대역 AE센서 [0.5 V/div, 2 ms/div]
 하 : 협대역 AE센서 [0.5 V/div, 2 ms/div]
 (c) Floating



상 : 광대역 AE센서 [10 mV/div, 50 kHz/div]
 하 : 협대역 AE센서 [30 mV/div, 50 kHz/div]
 (c) Floating

그림 5. 음향신호파형의 예.
 Fig. 5. Typical acoustic signal waveforms.

그림 6. 주파수 스펙트럼의 예.
 Fig. 6. Typical frequency spectrum.

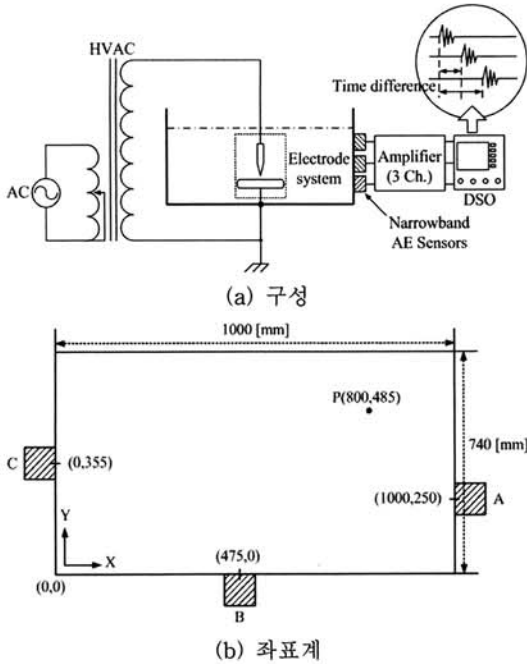


그림 7. 부분방전의 위치검출.
Fig. 7. Positioning of partial discharges.

유중에서 발생한 부분방전 음향신호의 주파수 스펙트럼 분석결과, 침-평판 전극에서 발생한 음향신호의 주파수는 50 kHz~150 kHz, 평판-평판 전극에서는 50 kHz~200 kHz, Floating 전극에서는 50 kHz~180 kHz에 분포하였고, 평판-평판 전극에서 주파수 범위가 가장 넓게 나타났다. 광대역과 협대역 AE센서에 측정된 음향신호의 주파수대역을 비교한 결과, 광대역 AE센서에서 측정된 음향신호의 주파수 범위가 협대역 AE센서로 측정된 주파수범위보다 넓게 나타났지만 400 kHz 이상에서는 음향신호의 주파수 성분이 나타나지 않았다.

4.2 부분방전의 위치검출

일반적으로 유입변압기 내부에서 발생하는 부분방전 위치측정은 3개 이상의 AE센서를 설치하여 음향신호들 간의 도달시간차를 이용하여 부분방전 발생위치를 추정할 수 있다[12-15].

유중 부분방전을 발생시키기 위하여 그림 7과 같이 실험계를 구성하였으며 부분방전의 위치를 검출하기 위하여 금속제 외함에 3개의 AE센서를 설치하였다. 유중 부분방전에서 발생하는 음향신호의 주파수 스펙트럼 분석을 통해 50 kHz~200

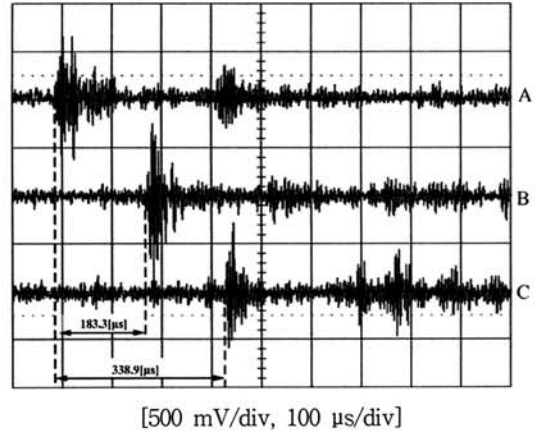


그림 8. 음향신호의 검출.
Fig. 8. Detection of acoustic signals.

kHz의 주파수대역을 확인하였으므로 AE센서는 협대역 센서를 사용하였다. 음향신호를 사용하여 방전위치를 계산하기 위해 외함에 좌표를 부여하였으며, 침-평판 전극계는 P점에 설치하였다.

3개의 AE센서에서 측정된 음향신호를 그림 8에 나타내었으며, 도달시간차는 AE센서 A와 B에서 183.3 μs, A와 C에서 338.9 μs로 측정되었다.

그림 7의 평면좌표와 도달시간차로부터 다음 식 (1)와 (2)를 만들 수 있다.

$$t_{B-A} = \frac{1}{v} \cdot \left(\sqrt{(x-475)^2 + y^2} - \sqrt{(x-1000)^2 + (y-250)^2} \right) \quad (1)$$

$$t_{C-A} = \frac{1}{v} \cdot \left(\sqrt{x^2 + (y-355)^2} - \sqrt{(x-1000)^2 + (y-250)^2} \right) \quad (2)$$

여기서,

t_{B-A} : AE센서 A와 B사이의 도달시간차 [s]

t_{C-A} : AE센서 A와 C사이의 도달시간차 [s]

v : 음향신호의 전파속도 [m/s]

상기 식으로부터 산출된 방전점의 좌표는 $x = 797.18$ mm와 $y = 477.83$ mm이다. 실제 방전전극의 설치위치가 $x = 800$ mm와 $y = 485$ mm이므로, 금속제외함의 크기가 1000 mm × 740 mm임을 고려하면 1%이내의 오차로 위치를 추정할 수 있었다.

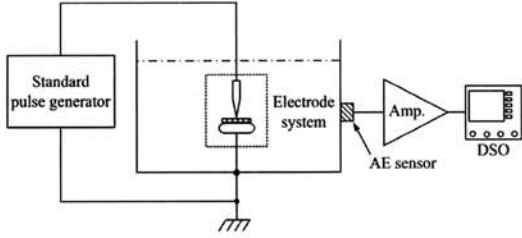


그림 9. 교정실험계의 구성.
 Fig. 9. Configuration of the calibration experiment system.

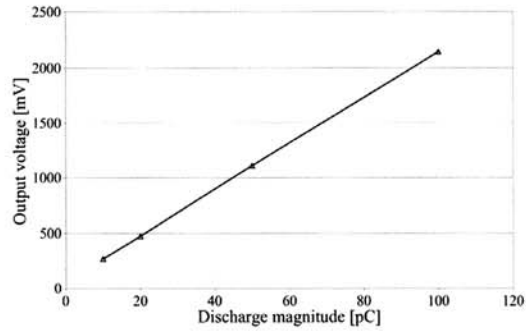


그림 10. 방전전하량과 출력전압의 관계.
 Fig. 10. Correlation between discharge magnitude and output voltage.

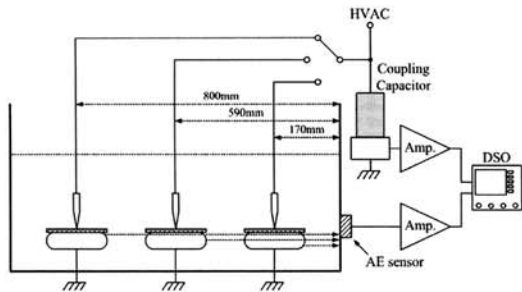
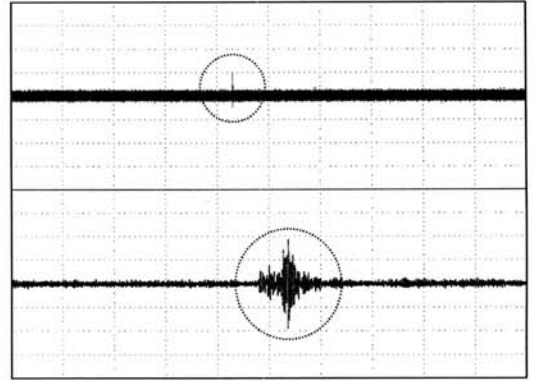


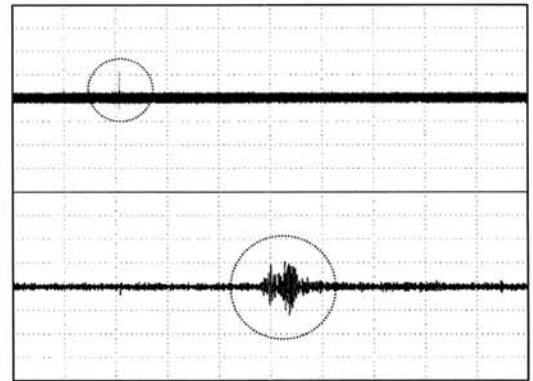
그림 11. 거리에 따른 유중 음향신호 측정.
 Fig. 11. Measurement of acoustic signals as function of distance in insulation oil.

4.3 음향신호와 방전전하량

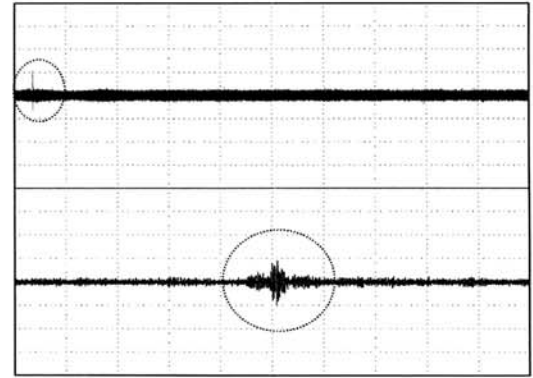
음향검출법은 음향신호만으로는 부분방전 전하량을 검출할 수 없기 때문에 커플링 콘덴서와 함께 음향신호를 검출해야 하는 단점이 있다. 따라서 음향신호와 방전전하량의 관계를 분석하기 위하여



상 : 방전펄스신호 [500 mV/div, 200 μs/div]
 하 : 음향신호 [500 mV/div, 200 μs/div]
 (a) 170 mm



상 : 방전펄스신호 [500 mV/div, 200 μs/div]
 하 : 음향신호 [500 mV/div, 200 μs/div]
 (b) 590 mm



상 : 방전펄스신호 [500 mV/div, 200 μs/div]
 하 : 음향신호 [500 mV/div, 200 μs/div]
 (c) 800 mm

그림 12. 검출파형의 예.
 Fig. 12. Typical detection waveform.

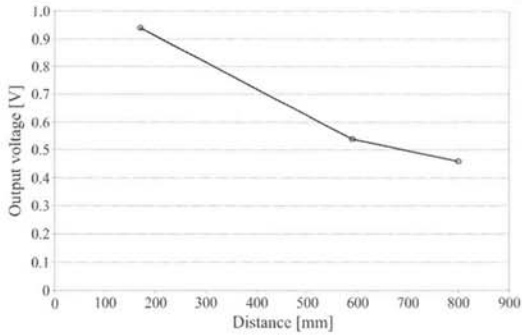


그림 13. 거리에 따른 음향신호의 전파특성.

Fig. 13. Propagation characteristics of acoustic signal as a function of distance.

그림 9와 같이 표준펄스발생기(CAL 1A, PD Diagnostix, 1 pC~100 pC)를 이용한 교정실험을 수행하였다.

부분방전펄스를 측정하기 위하여 결합회로망과 증폭회로를 이용하였다. 절연유내에 제작된 전극을 배치하고 표준펄스발생기를 이용하여 인가전하량에 따른 출력전압을 산출한 결과, 그림 10과 같이 10 pC~100 pC까지 선형적인 출력특성을 가지며 감도는 23.65 mV/pC로 나타났다.

실험계의 구성은 그림 11과 같으며 인가전압을 가변시켜 유중 부분방전 발생을 모의하였다.

유중 부분방전 음향신호의 전달특성을 분석하기 위하여 전극과 센서와의 거리를 각각 170 mm, 590 mm, 800 mm로 변화시켰다. 동일한 부분방전이 발생하였을 때 방전펄스신호(커패시터)와 음향신호(AE센서)를 측정하였으며 그림 12에 검출 파형의 예를 나타내었다.

23.3 pC의 동일한 부분방전 발생시, 유중 음향신호의 크기는 170 mm, 590 mm, 800 mm에 따라 각각 940 mV, 540 mV, 460 mV로 측정되었다. 거리에 따른 전달특성은 그림 13과 같이 나타났으며, 실험결과로부터 거리에 따른 음향신호의 전달특성을 이용하여 방전전하량의 추정이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 전력용 유입변압기의 절연진단 기술로 음향검출기법을 적용하기 위하여 유중 부분방전 발생을 모의하고 음향신호 검출 및 주파수

스펙트럼 분석과 부분방전의 위치검출 및 음향신호의 전파특성에 관하여 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유중 침-평판, 평판-평판, Floating 전극계에서 발생한 음향신호의 주파수 성분은 50 kHz~200 kHz이므로, 유입변압기의 절연진단에 음향검출기법을 적용시 상기 주파수대역의 측정계를 구성하면 부분방전의 검출이 가능하다.

2. 3개의 협대역 AE센서에 의해 도달시간차법으로 방전위치의 추정이 가능하며, 2차원 평면상에서 평가한 결과, 1%이내로 추정할 수 있었다.

3. 음향신호와 방전전하량의 관계를 분석하기 위하여 표준펄스발생기를 이용한 교정실험을 수행한 결과, 10 pC~100 pC까지 선형적인 특성을 나타내었으며 본 실험계의 감도는 23.65 mV/pC이었다.

이상의 결과로부터 전력용 유입변압기의 상시 절연진단에 음향검출기법의 적용이 충분히 가능함을 확인하였다. 유중에서 발생하는 음향신호를 검출하여 절연결함에 따른 부분방전 발생 및 분석기법을 확보하였고, 부분방전의 위치검출 및 음향신호와 방전전하량의 관계를 분석함으로써 전력용 유입변압기의 절연설계 및 평가에 활용도가 높을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고 문헌

- [1] S. Tenbohlen, D. Uhde, and J. Poittevin, "Enhanced diagnosis of power transformers using on- and off-line methods: Results, examples and future trends", CIGRE Paris, No. 12-204, 2000.
- [2] T. Leibfried and K. Feser, "Off-line- and on-line-monitoring of power transformers using the transfer function method", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, p. 34, 1996.
- [3] T. Aschwanden, M. Hassig, J. Fuhr, P. Lorin, V. Der Houhnessian, W. Zaengl, A. Schenk,

- P. Zweickacker, and A. Piras, "Development and application of new condition assessment methods for power transformers", CIGRE Paris, No. 12-207, 1998.
- [4] P. Guuinic and J. Aubin, "Cigre's work on power transformers", EPRI, Substation Equipment Diagnostics Conference IX, New Orleans, Louisiana, USA, 2001.
- [5] 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.
- [6] 권동진, 박재준, "변압기 부분방전 상시 감시기법에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 14권, 12호, p. 1032, 2001.
- [7] 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.
- [8] 길경석, 박대원, 최수연, 길일권, 박찬용, "가스절연개폐기에서 용량성 전압프로브를 이용한 부분방전 측정", 전기전자재료학회논문지, 21권, 1호, p. 85, 2008.
- [9] L. Ghirelli and W. Koltunowicz, "Acoustic method for partial discharge detection in high power capacitors", IEE International Conference on Partial Discharge, p. 92, 1993.
- [10] Harrop, P. J., "Dielectrics", Butterworths, London, 1972.
- [11] 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. 2, p. 422, 1984.
- [12] 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.
- [13] P. M. Eleftherion, "Acoustic emissionbased PD source location in transformers", Electrical Insulation Magazine, IEEE, Vol. 11, Issue 6, p. 22, 1995.
- [14] Y. Lu, X. Tan, and X. Hu, "PD detection and localization by acoustic measurements in an oil-filled transformer", IEE proceeding-Science, Measurement and Technology, Vol. 147, No. 2, p. 81, 2000.
- [15] 길경석, 송재용, 서황동, 김용주, 강동식, 황돈하, "저압유도전동기에서 미소부분방전 측정에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 18권, 10호, p. 960, 2005.