

유중 부분방전의 위치 추정

Positioning of Partial Discharge in Insulation Oil

길경석† 박대원* 장운용** 서동환*** 박희철 §
Gyung-Suk Kil Dae-Won Park Un-Yong Jang Dong-Hoan Seo Hee-Chul Park

ABSTRACT

This paper described the positioning algorithm of partial discharge in insulation oil by acoustic method for the application of an on-line diagnosis in oil-immersed transformers. In the experiment, five AE sensors having the resonant frequency of 150 kHz were used, and a signal conditioner was fabricated. A needle-plane electrode system which is composed of a needle with a curvature radius of 10 μm and a plane electrode with a diameter of 60 mm was installed to simulate partial discharges in insulation oil. From the time difference of arrival (TOA) of acoustic signal, we calculated the location of partial discharge in insulation oil. In the experiment, an algorithm of positioning of PD occurrence by the time difference of arrival was proposed. From the experimental results, the positioning error of PD calculated by three AE sensors was within 4 %.

1. 서 론

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 고압 변압기는 사고시 정전범위가 넓고 수리나 교체에 막대한 비용이 소요되는 등 기술적·경제적 손실이 발생하므로 안정적인 전력공급을 위해 주기적인 진단과 온라인 모니터링이 필요하다[2].

절연진단을 위한 최근의 기술로는 부분방전측정법이 주류를 이루고 있으며, 이는 절연물에 결함이 생기면 이 부분에서 전계가 집중되어 부분방전이 발생하게 되어 열화를 초기에 검출할 수 있는 특징이 있다[8]. 고압변압기의 대부분은 유입변압기로 국내·외적으로 유입변압기의 부분방전 측정에 의한 절연진단기술에 대한 많은 연구가 수행되고 있다.

부분방전측정에는 전기적 방법과 비전기적 방법이 있으며, 전기적 방법은 감도가 우수하여 정밀 측정이 가능하지만 주변 전자계에 의한 영향을 받기 쉬우며, 운전 중 결합회로망의 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[9]. 또한 다수의 센서를 설치하여 음향신호의 도달시간차를 측정하면 부분방전 즉, 결함의 위치를 추정할 수 있다.

본 논문에서는 유입변압기의 온라인 절연진단에 적용하기 위한 기술로 음향신호검출에 의한 부분방전의 위치 추정에 대한 연구를 수행하였다.

† 책임저자 : 정희원, 한국해양대학교 전기전자공학부, 교수
E-mail : kilgs@hhu.ac.kr
TEL : (051)410-4414 FAX : (051)403-1127

* 정희원, 한국해양대학교 전기전자공학부, 박사과정

** 정희원, 한국해양대학교 전기전자공학부, 석사과정

*** 정희원, 한국해양대학교 전기전자공학부, 부교수

§ 정희원, 부산교통공사 운영본부, 실장

2. 음향신호의 검출

절연체 내부에 결함이 존재하게 되면 전계가 집중되고 자체의 절연내력이 상대적으로 약한 부분에서 절연열화로 인한 부분방전이 발생하게 된다. 특히 유중에서 부분방전이 발생하면 수 십 kHz~수 백 kHz의 주파수대역을 갖는 음향신호가 수반된다[3],[4]. 유중 부분방전에 의한 음향신호의 검출을 위하여 측정주파수대역이 50 kHz~200 kHz인 협대역 AE센서를 사용하였다. AE센서는 마그네트 홀더와 세트 구성되어 변압기 외함에 취부가 용이하지만 전원선과 신호선을 공통으로 사용하므로 직류 전압원과 음향신호를 분리하기 위한 필터특성의 역결합기가 필요하다. 따라서 직류전압에 포함된 음향신호만을 검출하기 위하여 그림 1과 같이 역결합기를 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.

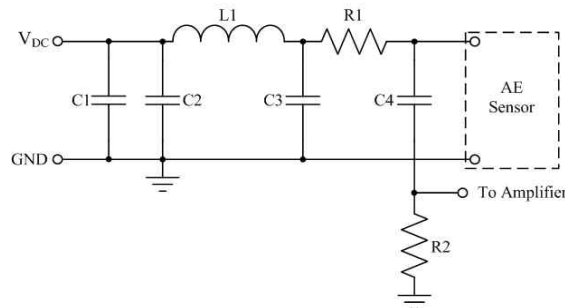


그림 1 역결합기

역결합기의 주파수 특성은 그림 2와 같으며, AE센서에서 직류전원 측으로 10 kHz이상의 음향신호는 200 dB 이상 감쇄시키며, 증폭회로의 입력단, 즉 R2로는 감쇄없이 전달하는 특성을 갖는다.

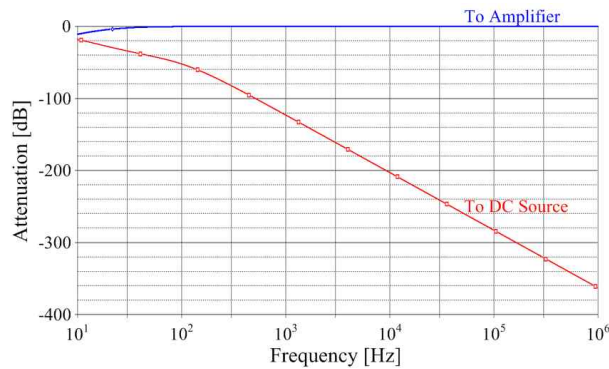
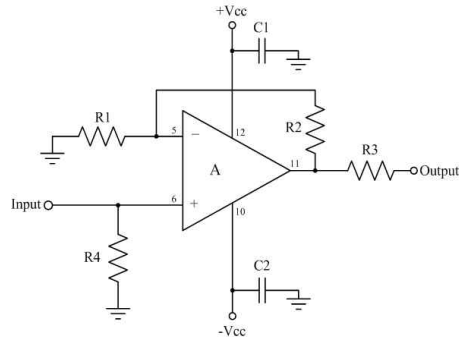
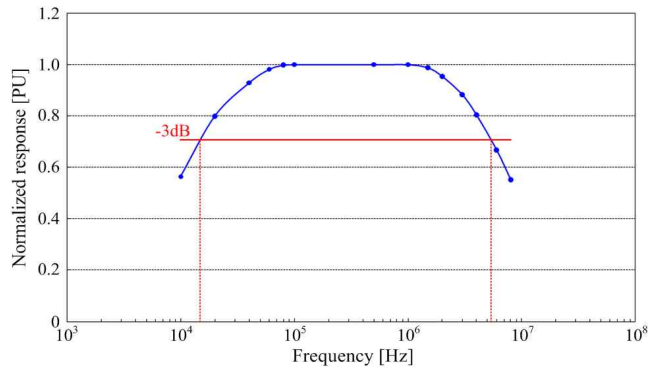


그림 2 역결합기의 주파수 응답특성

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 응답특성은 함수발생기로 1 kHz에서 10 MHz까지 정현파 입력전압에 대한 출력전압의 비율로서 분석하였으며, 그림 3(b)와 같이 -3 dB의 고역차단주파수는 5.2 MHz, 저역차단주파수는 10.3 kHz로 AE센서의 주파수대역을 충분히 포함한다.



(a) 회로도



(b) 주파수 응답

그림 3 시제작 증폭회로

3. 부분방전 위치추정

음향신호의 측정에 의한 변압기 진단기술은 절연상태와 결함 즉, 부분방전 발생위치의 추정도 가능하다[8]. 결함의 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 발생위치를 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 다수의 AE센서를 설치하여 음향신호들 간의 도달시간차(Time difference of arrival, TOA)를 이용하여 부분방전 발생위치를 추정하는 방법이다[5].

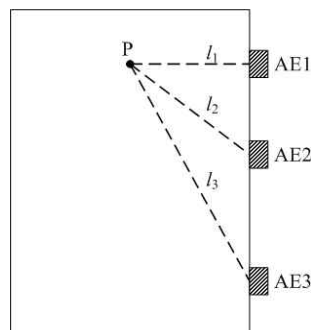


그림 4 위치추정 알고리즘

그림 4에서 음파의 전파속도를 v 라고 하면 음향센서 AE1, AE2 및 AE3에서 부분방전 발생점 P까지

의 거리 l_1 , l_2 , l_3 은 다음과 같이 표현된다.

$$l_1 = v \cdot t \quad (1)$$

$$l_2 = v \cdot (t + \Delta t_1) \quad (2)$$

$$l_3 = v \cdot (t + \Delta t_2) \quad (3)$$

유중 부분방전을 모의하기 위한 전극계를 그림 5과 같이 제작하였으며 평판전극은 텅스텐과 구리의 합금으로 지름 60 mm, 두께 15 mm로 가장자리를 등갈게 처리하여 전계 집중이 발생하지 않도록 설계하였으며, 침의 곡률반경은 10 μm 이다. 또한 전극사이에 실제 유입변압기에서 사용하는 두께 1.6 mm의 프레스보드지를 삽입하였다.

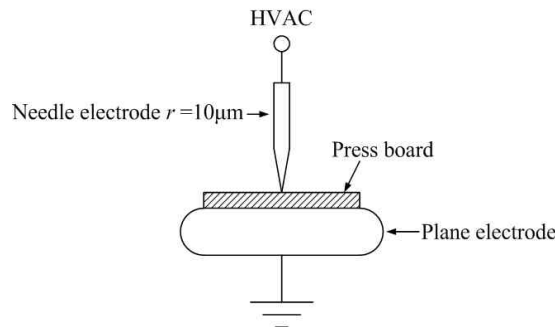


그림 5 침-평판 전극계

일반적으로 유입변압기 내부에서 발생하는 부분방전 위치측정은 3개 이상의 AE센서를 설치하여 음향 신호들 간의 도달시간차를 이용하여 부분방전 발생위치를 추정할 수 있다[12-15]. 본 논문에서는 5개의 AE센서를 그림 6과 같이 외함 표면에 부착시키고 설치위치에 대한 좌표를 부여하였으며 제작된 침-평판 전극계를 P점에 위치하였다.

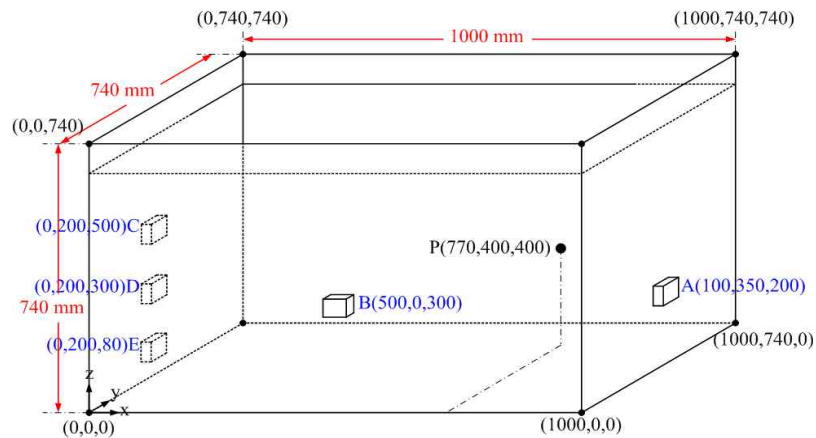


그림 6 좌표계의 구성

유중 부분방전을 발생시키기 위하여 그림 7과 같이 실험계를 구성하였으며 제작된 전극계를 절연유 내에 위치시키고 전압조정기로 인가전압을 가변시켜 유중 부분방전 발생을 모의하였다.

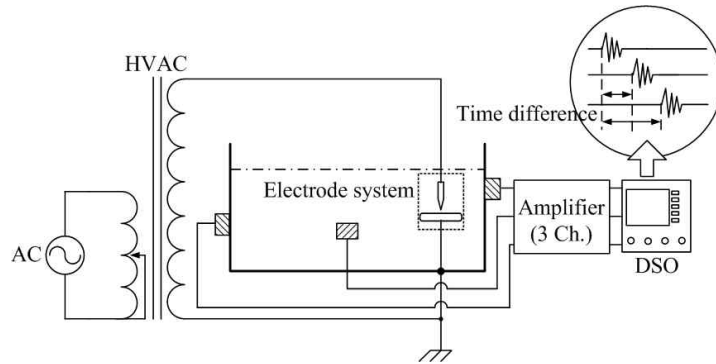
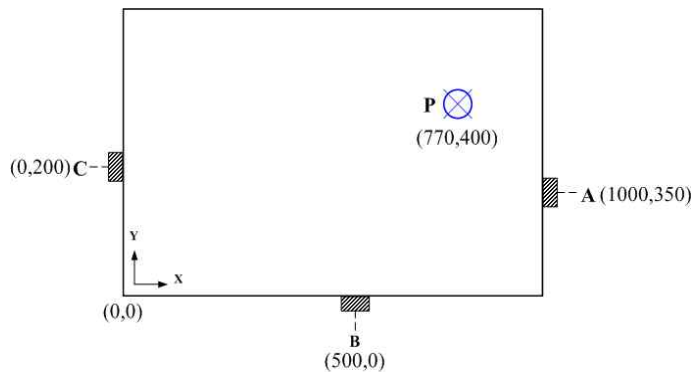
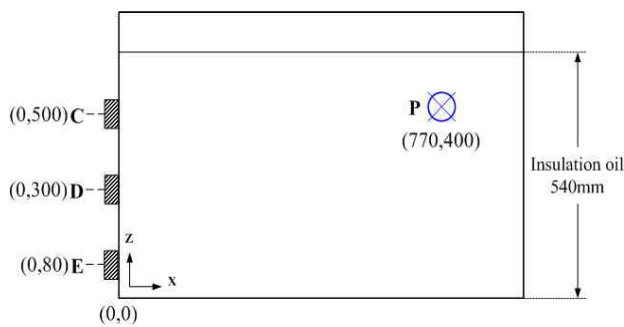


그림 7 실험계의 구성

부분방전 위치추정은 그림 8과 같이 수평면과 수직면으로 나누어 음향신호를 측정하고 도달시간차를 이용하여 부분방전 발생지점 P의 위치를 추정하였다.



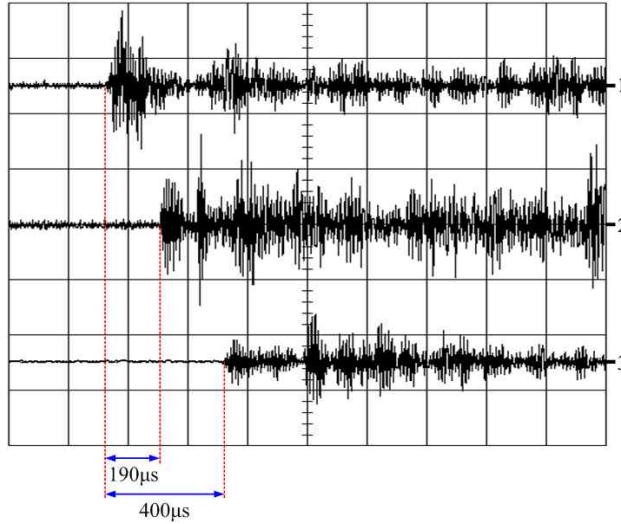
(a) 수평면



(b) 수평면

그림 8 AE센서의 설치

외함 표면에 설치된 각각의 AE센서에서 측정된 파형을 그림 9에 나타내었다. 센서 A와 B에서 측정된 부분방전 음향신호의 도달시간차는 $190 \mu\text{s}$ 로 나타났으며, A와 C에서는 도달시간차가 $400 \mu\text{s}$ 로 측정되었다. 또한 AE센서 C와 D, C와 E에서 측정된 부분방전 음향신호의 도달시간차는 각각 $4 \mu\text{s}$, $40 \mu\text{s}$ 로 측정되었다.

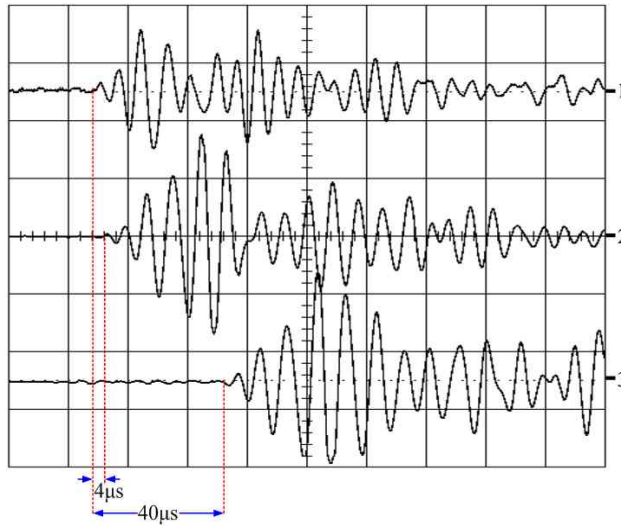


Ch.1 : AE센서 A [1 V/div, 200 µs/div]

Ch.2 : AE센서 B [1 V/div, 200 µs/div]

Ch.3 : AE센서 C [2 V/div, 200 µs/div]

(a) 수평면



Ch.1 : AE센서 C [2 V/div, 20 µs/div]

Ch.2 : AE센서 D [2 V/div, 20 µs/div]

Ch.3 : AE센서 E [5 V/div, 20 µs/div]

(b) 수직면

그림 9 측정 파형의 예

그림 6에 나타낸 좌표계와 각각의 센서로부터 측정된 도달시간차로부터 다음 식을 만들 수 있다.

$$t_{B-A} = \frac{1}{v} \cdot (\sqrt{(x-500)^2 + y^2} - \sqrt{(x-1000)^2 + (y-350)^2}) \quad (4)$$

$$t_{C-A} = \frac{1}{v} \cdot (\sqrt{x^2 + (y-200)^2} - \sqrt{(x-1000)^2 + (y-350)^2}) \quad (5)$$

$$t_{D-C} = \frac{1}{v} \cdot (\sqrt{x^2 + (z-300)^2} - \sqrt{x^2 + (z-500)^2}) \quad (6)$$

$$t_{E-C} = \frac{1}{v} \cdot (\sqrt{x^2 + (z-80)^2} - \sqrt{x^2 + (z-500)^2}) \quad (7)$$

여기서,

t_{B-A} : AE센서 A와 B사이의 도달시간차 [s]

t_{C-A} : AE센서 A와 C사이의 도달시간차 [s]

t_{D-C} : AE센서 C와 D사이의 도달시간차 [s]

t_{E-C} : AE센서 C와 E사이의 도달시간차 [s]

v : 음향신호의 전파속도 [m/s]

상기 식으로부터 산출된 부분방전 발생점의 좌표는 $x=786.41$ mm와 $y=415.42$ mm, $z=428.27$ 이다. 실제 방전전극의 설치위치가 $x=800$ mm, $y=400$ mm, $z=428.27$ mm이며, 금속제외함의 크기가 1000 mm \times 740 mm \times 740 mm임을 고려하면 최대 4%이내의 오차로 위치추정이 가능하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 전력용 유입변압기의 온라인 절연진단 기술로 음향검출기법을 적용하여 부분방전의 위치검출에 대한 연구를 수행하였다. AE센서의 음향신호를 검출하기 위하여 역결합기와 증폭회로를 제작하였으며 유증 부분방전을 발생시키기 위하여 침-평판 전극계를 제작하였다. 부분방전 발생위치를 3차원으로 추정하기 위하여 금속제 외함에 좌표를 부여하고 AE센서를 설치하였으며 수평면과 수직면으로 나누어 음향신호의 도달시간차를 측정하였다. 측정 음향신호의 도달시간차로부터 산출된 부분방전 발생점은 $x=786.41$ mm와 $y=415.42$ mm, $z=428.27$ 로 나타났으며 최대 4% 이내로 위치를 추정할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

1. S. Tenbohlen, D. Uhde, and J. Pointhevin, "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, pp.34-37, 1996.
3. P. Guinic and J. Aubin, "Cigre's Work on Power Transformers", EPRI, Substation Equipment Diagnostics Conference IX, New Orleans, Louisiana, USA, 2001.
4. 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, pp.1045-1048, 1986.
5. 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.