

## 절연유중 부분방전 검출을 위한 안테나의 최적 설계

이정윤<sup>1</sup>, 조향은<sup>2</sup>, 박대원<sup>2</sup>, 길경석<sup>2,a</sup>, 오재근<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 이엠아이테크(주)

<sup>2</sup> 한국해양대학교 전기전자공학부

<sup>3</sup> 국립과학수사연구원

### Optimal Design of an Antenna for the Detection of Partial Discharges in Insulation Oil

Jung-Yoon Lee<sup>1</sup>, Hyang-Eun Jo<sup>2</sup>, Dae-Won Park<sup>2</sup>, Gyung-Suk Kil<sup>2,a</sup>, and Jae-Geun Oh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> EMI Tech. Co. Ltd., Seoul 153-862, Korea

<sup>2</sup> Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

<sup>3</sup> National Forensic Service, Busan 626-810, Korea

(Received March 20, 2013; Revised March 24, 2013; Accepted March 24, 2013)

**Abstract:** This paper dealt with the radiated electromagnetic wave detection of partial discharge (PD) in oil for insulation diagnostics of oil-immersed transformers. Three types of electrode system were fabricated to simulate the insulation defects that could occur in oil-immersed transformers. Frequency components of radiated electromagnetic wave in oil was measured by broadband bi-conical antennas of 300 MHz~2 GHz and a spectrum analyzer of 9 kHz~3 GHz. Frequency component of electromagnetic waves from PD in oil were highly distributed at 500 MHz. From the result, a narrow-band monopole antenna with the center frequency of 500 MHz was fabricated. We could detect PD signal in insulation oil without an influence of external noise by a measurement system which consists of the prototype monopole antenna, a LNA (Low Noise Amplifier), an oscilloscope and a spectrum analyzer.

**Keywords:** Electromagnetic wave, Partial discharge, Insulation diagnostics, Oil-immersed transformer, Frequency spectrum, Monopole antenna

#### 1. 서 론

절연은 전력설비의 수명과 성능에 밀접한 관련이 있으며, 절연물의 열화로 인한 사고가 빈번하게 발생

한다 [1-4]. 부분방전은 절연과피로 진전하기 전에 수반되는 현상이며, 절연상태의 진단 및 감시를 위해 온라인 부분방전 검출에 대한 많은 연구가 수행되고 있다 [5-8]. 그 중에서도 변압기 내부에서 UHF 대역의 방사전자파를 측정하는 방법은 높은 감도를 가지며, 외부 잡음에 대한 영향이 적으며 온라인 진단이 가능한 장점이 있다 [9,10]. 최근에는 변압기 외함에 UHF 센서를 직접 설치하거나 드레인 밸브를 통하여 다양한 형태의 센서를 장착하는 연구가 활발히 진행

a. Corresponding author; [kilgs@hhu.ac.kr](mailto:kilgs@hhu.ac.kr)

Copyright ©2013 KIEEME. All rights reserved.  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

되고 있다. 설치된 UHF 센서에서 내부결함에 의한 결함의 부분방전 신호를 취득하고, 그 신호를 해석하여 다양한 결함의 종류를 추정하며, 또한 결함에 의한 전력용 변압기의 고장을 예방하고 나아가 진단 알고리즘 개발에 필요한 자료로 활용할 수 있다 [11,12]. 선행 연구 결과들에서 유중 부분방전에 의한 방사전자파를 검출하는 방법은 나타나 있지만, 최적 검출 주파수 대역에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 전자파 측정법에서 최적의 감도를 갖는 안테나를 설계하기 위하여 유중 부분방전에 의한 방사전자파 주파수 스펙트럼을 분석하였으며, 그 결과로부터 모노폴 안테나를 제작하고 성능을 검증하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 전극계의 구성

유입변압기 내부에서 코일이나 철심과 같은 구조물이 운전 중에 발생하는 진동과 충격 등의 기계적 스트레스에 의해 절연이 파괴되어 부분방전이 발생된다. 본 논문에서는 유입변압기 내부에서 발생 가능한 결함을 모의하기 위하여 침-평판, 평판-평판, 구-구 형태의 전극계를 제작하였으며, 구성을 그림 1에 나타내었다.

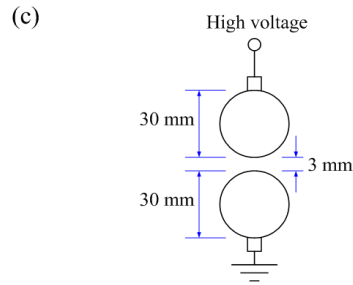
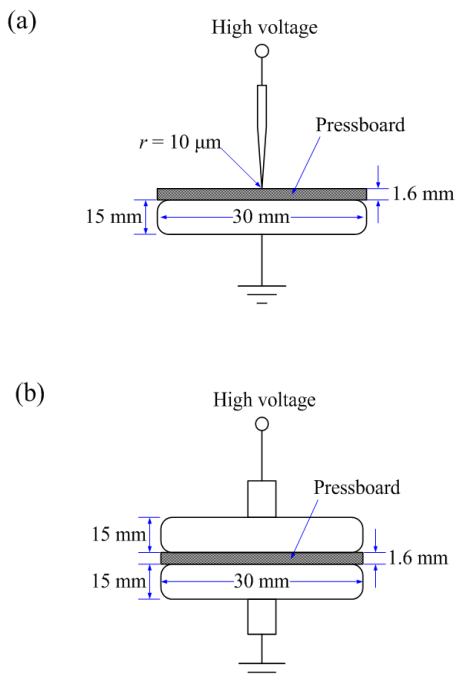


Fig. 1. Configuration of the electrode system. (a) needle-plane, (b) plane-plane, (c) sphere-sphere.

평판 전극은 직경 30 mm, 두께 15 mm로 모서리 부분을 둥글게 처리하여 전계의 집중이 발생하지 않도록 설계하였으며, 구 전극은 지름 30 mm, 침전극의 곡률반경은 약 10 μm이다. 또한, 전극 사이에 유입변압기에서 사용하는 두께 1.6 mm의 프레스보드 (pressboard)를 삽입하였다.

### 2.2 주파수 스펙트럼 분석

유중 부분방전의 방사전자파 측정시스템에 적용할 모노폴 안테나의 중심주파수를 선정하기 위하여 그림 2와 같이 실험계를 구성하고 결함전극별 주파수 스펙트럼을 분석하였다.

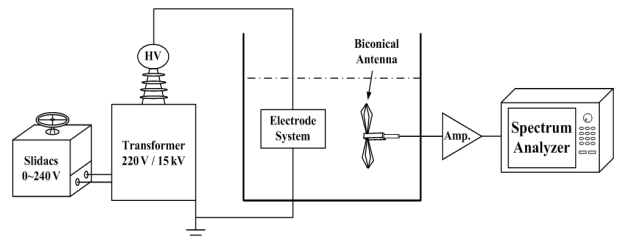


Fig. 2. Configuration of the experimental setup.

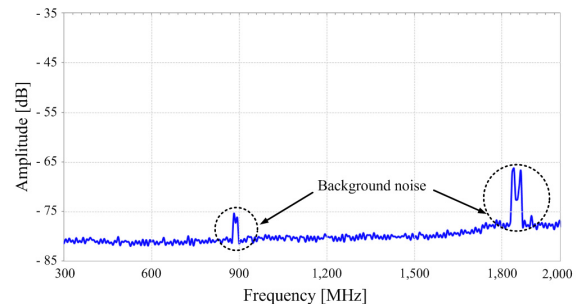
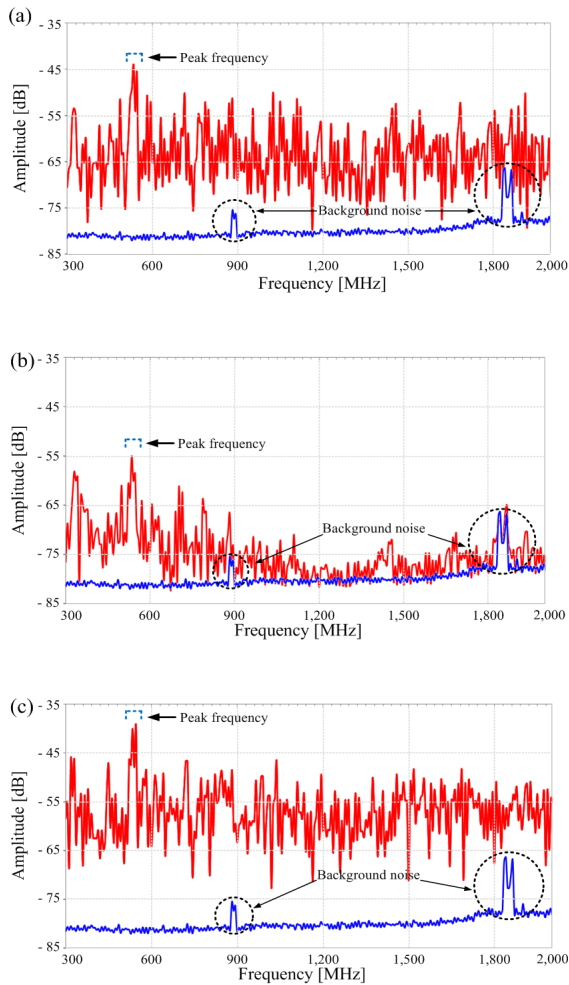


Fig. 3. Frequency spectrum of background noise.



**Fig. 4.** Frequency spectra for the electrode systems. (a) needle-plane, (b) plane-plane, (c) sphere-sphere.

유입변압기를 모의하기 위하여 금속제 외함 (740 mm × 740 mm × 1,000 mm)에 절연유를 채웠으며, 전극계와 주파수대역이 300 MHz~2 GHz인 광대역 바이코니칼 안테나 (bi-conical antenna)를 유중에 설치하였다. 유중에 위치한 전극계에 고전압을 인가하여 부분방전을 발생시켰으며, 스펙트럼 분석기 (9 kHz~3 GHz)를 사용하였다.

먼저, 부분방전이 발생하지 않는 상태에서 배경잡음을 측정하였으며, 그림 3에 주파수 스펙트럼을 나타내었다. 배경잡음은 약 880 MHz 및 1,800~1,900 MHz 대역에 분포하였다.

전극계에서 부분방전을 발생시킨 후 방사전자파의 주파수 스펙트럼 측정 결과를 그림 4에 나타내었으며,

**Table 1.** Peak frequency component for the electrode systems.

Electrode	Peak frequency
Needle-plane	500 MHz~540 MHz
Plane-plane	520 MHz~540 MHz
Sphere-sphere	520 MHz~550 MHz

1,800 MHz~1,900 MHz 대역은 측정 범위에서 제외하였다. 유중 부분방전에 의한 방사전자파의 주파수 성분은 전체 주파수 대역에 걸쳐 분포하였으며, 각각의 결합에 따른 피크 주파수 성분을 표 1에 나타내었다.

3가지 형태의 전극계에서 부분방전 발생 시 전자파 스펙트럼을 분석한 결과, 약 500 MHz 대역의 성분이 가장 높게 나타났다. 따라서 최적의 감도를 갖는 주파수 대역을 500 MHz로 선정하고 유입식 변압기의 부분방전 측정시스템을 구성하기 위하여 중심주파수가 500 MHz인 모노폴 안테나를 제작하였다.

### 2.3 설계 및 제작

모노폴 안테나는 협대역의 주파수 특성을 가지며 길이를 조절하여 측정 주파수 대역을 설정할 수 있다. 구조가 간단하고 소형으로 설계할 수 있으며, 무지향성인 장점이 있기 때문에 유입변압기의 내부에서 발생하는 부분방전의 측정에 적용이 가능하다.

식 (1)으로부터 모노폴 안테나를 설계할 수 있으며, 측정하고자하는 대역의 중심주파수를 선정하면 안테나의 길이를 설정할 수 있다 [13].

$$c = \lambda \cdot f \tag{1}$$

여기서,  $c$  = 광속 [m/s]

$\lambda$  = 파장 [m]

$f$  = 주파수 [Hz]

이다.

중심주파수가 500 MHz인 모노폴 안테나의 길이는 150 mm로 계산되며, 그림 5에 나타낸 것과 같이 모노폴 안테나를 제작하였다.

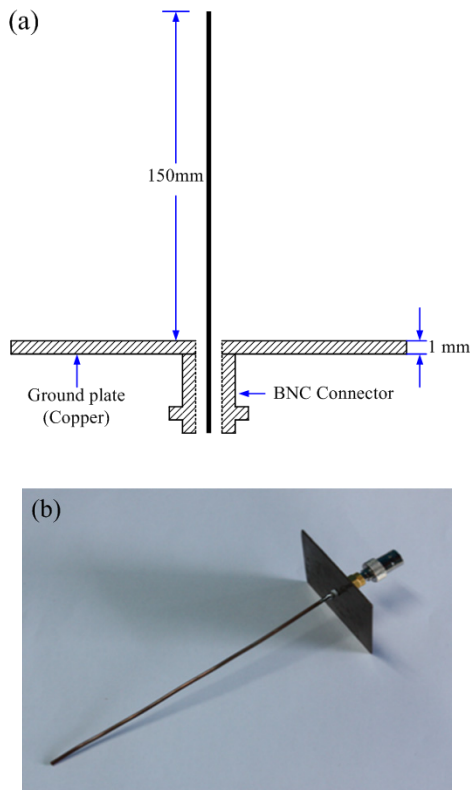


Fig. 5. Prototype monopole antenna. (a) schematic diagram, (b) photograph.

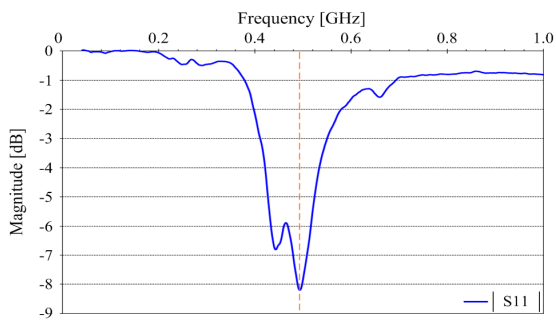


Fig. 6. S11 of the prototype monopole antenna.

안테나는 하나의 입력단을 가진 소사이므로 입력 반사계수를 의미하는 S11만 존재하며, 특정 주파수에서 S11이 낮으면 송·수신 효율이 높아지므로, 이를 측정하면 최대 감도의 주파수 대역을 알 수 있다. 따라서 제작된 모노폴 안테나의 전파 특성을 평가하기 위하여 측정 주파수대역이 40 MHz~40 GHz인 네트

워크 분석기 (Anritsu 37369D)를 사용하여 S11을 측정하였으며, 그림 6에 결과를 나타내었다. 시제작 모노폴 안테나는 설계 이론과 동일한 중심 주파수인 500 MHz 부근에서 최대 감도를 갖는 것으로 나타났다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 실험계의 구성

제작된 모노폴 안테나의 방사전자파 검출 성능을 평가하기 위하여 그림 7과 같이 측정시스템을 구성하였다.

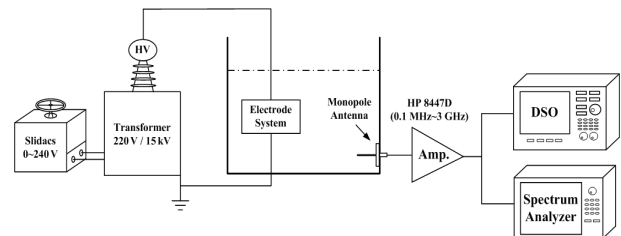


Fig. 7. Configuration of the experimental setup.

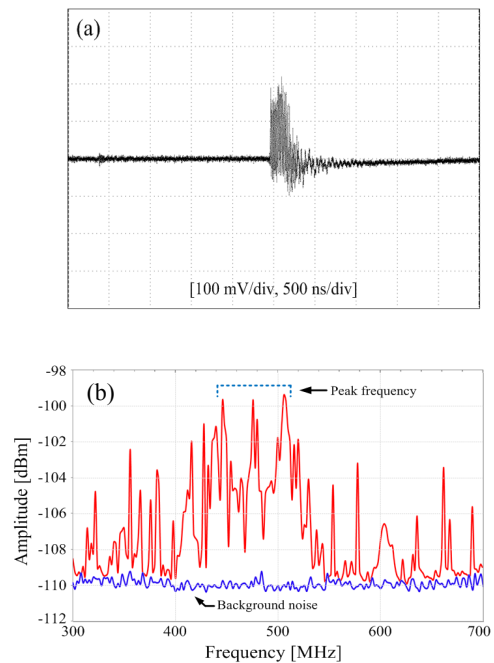


Fig. 8. Result of PD measurement (needle-plane). (a) waveform, (b) frequency spectrum.

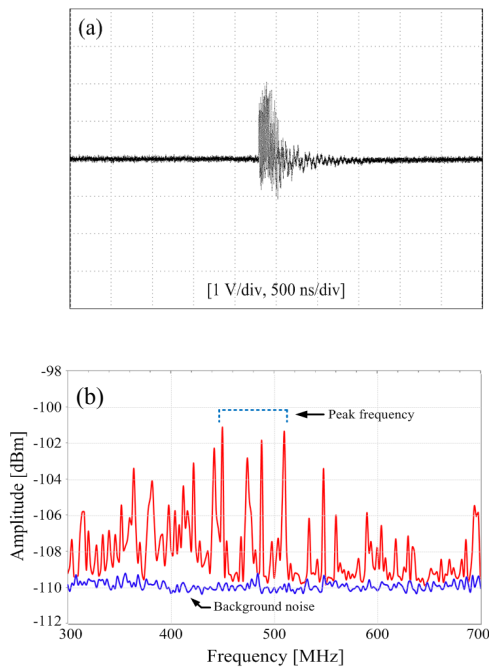


Fig. 9. Result of PD measurement (plane-plane). (a) waveform, (b) frequency spectrum.

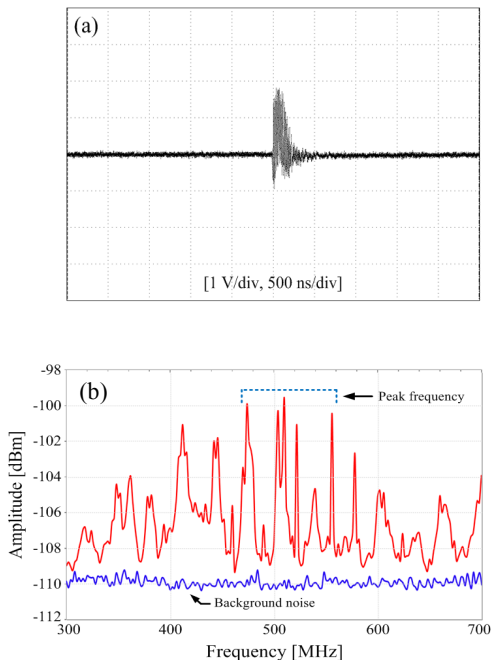


Fig. 10. Result of PD measurement (sphere-sphere). (a) waveform, (b) frequency spectrum.

시제작 모노폴 안테나와 전극계를 유중에 설치하

고, 0~15 kV까지 전압을 인가하면서 부분방전을 발생시켰다. 방사전자파 신호의 검출에는 주파수 대역이 0.1 MHz~1.3 GHz, 이득 25 dB인 저잡음 증폭기를 사용하였다.

오실로스코프와 스펙트럼 분석기를 사용하여 부분방전에 의한 시제작 안테나의 출력신호와 주파수 스펙트럼을 분석하였으며, 그림 8~그림 10에 측정결과를 나타내었다.

침-평판 전극에서 부분방전 발생 시, 445 MHz~535 MHz 대역에서 스펙트럼이 높게 분포하였으며, 평판-평판과 구-구 전극에서는 450 MHz~510 MHz 및 470 MHz~560 MHz 대역에서 스펙트럼이 높게 나타났다. 실험 결과, 시제작 모노폴 안테나를 이용하여 부분방전에 의해 발생하는 방사전자파를 외부 노이즈의 영향없이 검출할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 유입변압기의 절연진단을 위한 기술로 유중 부분방전 검출을 위한 모노폴 안테나의 최적설계에 대하여 기술하였다.

유입변압기의 절연시스템에서 발생할 수 있는 결함들을 모의하기 위하여 침, 평판, 구 및 프레스보드로 구성된 3가지 종류의 전극계를 제작하였고, 유중에 설치하여 부분방전의 발생을 모의하였다. 광대역 바이코니칼 안테나로 검출된 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 분석한 결과, 500 MHz에서 가장 높게 나타났으며, 측정 결과로부터 중심주파수가 500 MHz인 모노폴 안테나를 제작하였다.

모노폴 안테나와 저잡음 증폭기, 오실로스코프 및 스펙트럼 분석기를 사용하여 측정시스템을 구성하였으며, 유중 부분방전을 모의하였다.

시제작 안테나의 출력신호와 주파수 스펙트럼을 분석한 결과, 침-평판 전극에서 445 MHz~535 MHz, 평판-평판과 구-구 전극에서는 각각 450 MHz~510 MHz 및 470 MHz~560 MHz 대역에서 스펙트럼이 크게 나타났으며, 외부 노이즈의 영향없이 유중 부분방전을 검출할 수 있었다.

#### REFERENCES

[1] G. S. Kil, D. W. Park, I. K. Kim, S. Y. Choi, and C. Y. Park,

- J. KIEEME*, **21**, 85 (2008).
- [2] Fruth and L. Niemeyer, *IEEE Trans. on Dielectr. Electr. Insul.*, **23**, 59 (2000).
- [3] H. Kawada, M. Honda, T. Inoue, and T. Amemiya, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **PAS-103**, 422 (1984).
- [4] H. Kawada, M. Honda, T. Inoue, and T. Amemiya, *IEEE Transaction on Power Apparatus and System*, **PAS-103**, 422 (1984).
- [5] M. Pompili, C. Mazzetti, and R. Bartnikas, *IEEE Trans. on Dielectr. Electr. Insul.*, **12**, 395 (2005).
- [6] A. S. Farag, M. H. Shewhdi, X. Jin, C. Wang, T. C. Cheng, X. Dong, S. Gao, W. Jing, and Z. Wang, *Electr. Power Syst. Res.*, **3**, 213 (1990).
- [7] M. D. Judd, O. Farich, and B. F. Hampton, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **3**, 213 (1996).
- [8] J. J. Park, S. Y. Lee, and D. C. Mun, *J. KIEEME*, **19**, 942 (2006).
- [9] S. Coenen, S. Tenbohlen, S. M. Markalous, and T. Strehl, *IEEE Trans. on Dielectr. Electr. Insul.*, **15**, 1553 (2008).
- [10] H. J. Ju, K. S. Han, and J. Y. Yoon, *J. KIEEME*, **23**, 809 (2010).
- [11] G. S. Kil, I. K. Kim, D. W. Park, S. Y. Choi, and C. Y. Park, *Current Appl. Phys.*, **9**, 296 (2009).
- [12] D. W. Park, G. S. Kil, S. G. Cheon, S. J. Kim, and H. K. Cha, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, **7**, 389 (2012).
- [13] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design, 2nd Ed.* (John Wiley & Sons, New York, 1998) p. 8.