

LabView 기반 부분방전 분석장치의 설계 및 제작

차현규¹, 이정윤¹, 박대원¹, 길경석^{1,a}

¹ 한국해양대학교 전기전자공학부

Design and Fabrication of a LabView Based Partial Discharge Analyzer

Hyeon-Kyu Cha¹, Jung-Yoon Lee¹, Dae-Won Park¹, and Gyung-Suk Kil^{1,a}

¹ Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

(Received January 2, 2012; Revised February 18, 2012; Accepted February 20, 2012)

Abstract: This paper dealt with the fabrication of a partial discharge (PD) analyzer for insulation diagnosis of power facilities like transformers, cables and gas-insulated switchgears. An analytic algorithm for the phase (ϕ), the magnitude (q), and the pulse count (n) of PD pulse was designed and a time-frequency (TF) map algorithm was applied in the system to eliminate noises by analyzing the time and the frequency component of signals. All the algorithms were operated by a LabView graphical program. The detection circuit consists of a coupling capacitor, a detection impedance, and a low noise amplifier. A plane-plane and a point-plane electrode system were fabricated to simulate different types of insulation defects. In the experiment, we could easily understand the characteristics of PD pulses using the prototype PD analyzer.

Keywords: Partial discharge (PD), Analyzer, Insulation diagnosis, Power facilities, TF map, ϕ - q - n

1. 서 론

전력수요가 급증함에 따라 전력공급의 신뢰성이 요구되어지며, 상시 절연진단에 대한 필요성도 증대되고 있다. 전력설비에서 사고가 발생하면 수리와 교체에 대한 막대한 비용이 소요되고, 전력중단에 따른 사회적 기술 및 경제적 손실이 발생한다. 또한 전기 화재와 인명사고 같은 2차 사고를 유발하므로 전력의 안정적인 공급 및 신뢰성 있는 운전을 위해 주기적인 점검과 온라인 진단이 요구된다 [1,2].

IEEE에 나타난 고전압 전력설비의 사고 통계자료를 그림 1에 나타내었다. 자료를 살펴보면 사고 원인 중 85%가 절연과피로 발생되는 것을 알 수 있으며

절연과피를 발생시키는 주원인으로는 열적, 기계적, 전기적 그리고 환경적 열화 요인이 있다 [3,4].

전력기기 제조 시, 이물질이나 불필요한 수분 함유 또는 충격 및 진동에 의해 절연결함이 생성되며, 이러한 결함부분에 전계가 집중되어 부분방전이 발생되고 절연과피를 일으키게 된다 [5,6].

부분방전은 초기 발생 시 그 크기가 미소하여 절연물의 성능에 영향을 미치지 못하지만, 장시간 지속될 경우 전기트리를 성장시키고, 방전 전하량이 급속히 증가하여 최종적으로 절연과피를 발생시킨다 [7]. 따라서 부분방전 측정은 전력설비의 상태진단에 중요한 요소이며, 설비의 절연열화와 이상 유무를 감시하여 발생 가능한 사고를 조기에 발견하고 유지 보수함으로써 설비의 신뢰성을 향상시킬 수 있으므로 이들의 측정 및 분석에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다 [8-10].

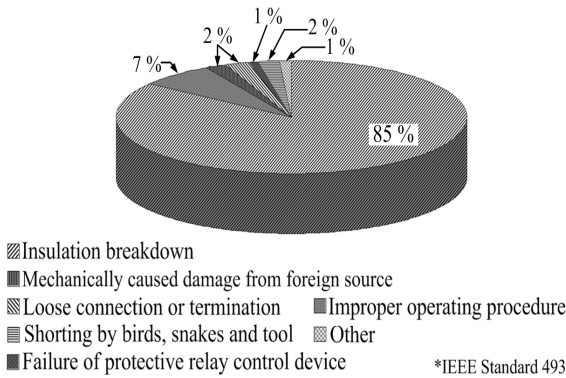


Fig. 1. Causes of accident in high voltage power facilities.

본 논문에서는 전력설비의 상시 절연진단을 위한 부분방전 분석 알고리즘을 설계하였으며, IEC 60270에 의한 검출방법으로 알고리즘을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 TF map

기존의 신호 분석법은 처리과정이 복잡하고 신호를 분석하는데 어려운 점이 있으며, 시간의 영역과 주파수 영역 중 단 하나의 영역에서만 신호를 분석하는 단점이 있다. 하지만 TF (time-frequency) map은 정해진 시간동안 신호의 주파수 구성요소 또는 주파수 스펙트럼을 표현한다. 즉, 주파수 구성요소와 시간에 대한 진폭의 변화를 보여준다 [11,12].

또한 기존 신호분석법에 비하여 메모리 작업을 감소시켜 처리속도가 빠르고 측정된 신호 크기, 극성 및 변화 등에 독립적인 장점이 있다. 또한 노이즈 검출에 용이하고, 절연물 결함의 종류를 구분할 수 있다는 장점이 있다 [13].

그림 2에 TF map의 신호 처리과정을 나타내었으며, PD 신호의 손실이나 불필요한 정보 없이 데이터의 중복성을 최소화하고, 안정성을 확보하기 위하여 다음 식 (1)에 따라 정규화를 거친다 [14].

$$\tilde{s}(t) = \frac{s(t)}{\sqrt{\int_0^T s(t)^2 dt}} \quad \because (s(t) \in [0, T]) \quad (1)$$

PD 펄스는 발생위치 및 결함의 종류에 따라 파형의 형태가 달라진다. 또한 외부에서 발생하는 노이즈 역시 다양한 형태를 가지며, PD 펄스와는 형태가 다르게 나타난다.

따라서, 측정되는 신호들의 특성값 (극성, 크기, 신호의 변화)에 대한 산포도를 다음 식 (2)와 (3)을 사용하여 신호의 시간영역 및 주파수영역에서의 표준편차 σ_T , σ_F 를 구할 수 있다 [15].

$$\sigma_T = \sqrt{\int_0^T (t-t_0)^2 \tilde{s}(t)^2 dt} \quad (2)$$

$$\sigma_F = \sqrt{\int_0^\infty f^2 |\tilde{s}(f)|^2 df} \quad (3)$$

여기서, $\tilde{s}(f)$ 는 $\tilde{s}(t)$ 의 푸리에 변환이다. t_0 는 정규화된 신호의 무게 중심이며, 다음 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$t_0 = \int_0^T t \tilde{s}(t)^2 dt \quad (4)$$

상기의 식들을 이용하여 부분방전 신호의 시간 및 주파수에 대한 정보를 보존하고 TF map을 표현한다.

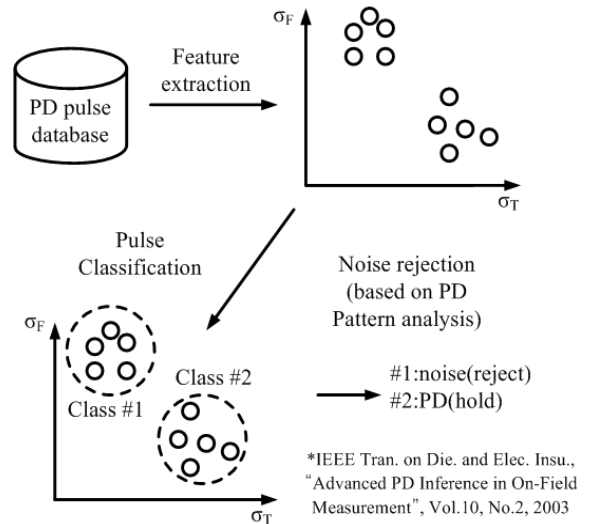


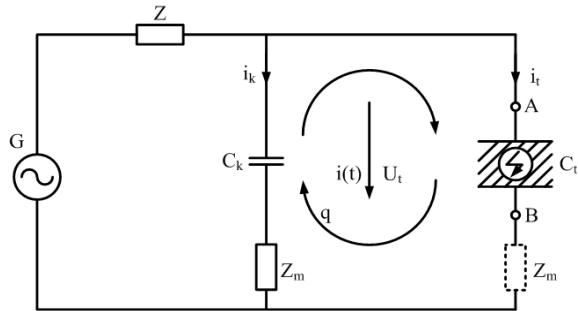
Fig. 2. Architecture of the signal processing.

2.2 부분방전의 검출

본 논문에서는 절연물에서 발생한 부분방전을 검출하기 위하여 IEC 60270에 따른 전기적 검출방법을 적용하였다. 부분방전 검출회로는 그림 3과 같이 나타낼 수 있으며, 시료에서 발생된 부분방전 펄스를 커플링 캐패시터와 검출 임피던스를 이용하여 측정한다 [16,17].

결함의 정전용량 C_t 와 함께 커플링 캐패시터 C_k 가 외부 결함을 통하여 연결되어 있는 경우, 결함의 정전용량 C_t 에서의 전하 이동은 외부 커플링 캐패시터 C_k 에도 반영되어지며, 부분방전 전류 펄스에 의한 “결보기 전하량 q ” 역시 결함 정전용량 C_t 와 병렬로 연결된 C_k 로 전달된다. 전하량 q 는 순환전류 $i(t)$ 에 의해 다음과 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q = \int i(t)dt \tag{5}$$



- G = Voltage source
- $i(t)$ = PD current pulses
- $i_{k,t}$ = Displacement current
- Q = Transferred charge
- U_t = Voltage at parallel-connected capacitors
- C_t = Test object capacitance
- C_k = Coupling capacitor
- Z = Voltage source connectors
- Z_m = Measuring impedance

*IEEE Tran. on Die. and Elec. Insu., "Procedure for Identification and Localization of Dangerous PD Sources in Power Transformers", Vol.12, No.5, 2005

Fig. 3. PD detection circuit specified in the IEC 60270.

2.3 가상계측 시스템

그림 4에 설계한 가상계측 시스템을 나타내었다. 시스템은 그래픽기반의 컴퓨터 프로그래밍 언어인 LabVIEW를 이용하였으며, TF map VI (virtual instrument), Digital filter VI 및 부분방전 분석 VI로 구성된다.

신호의 처리순서는 TF map VI를 통하여 실시간으

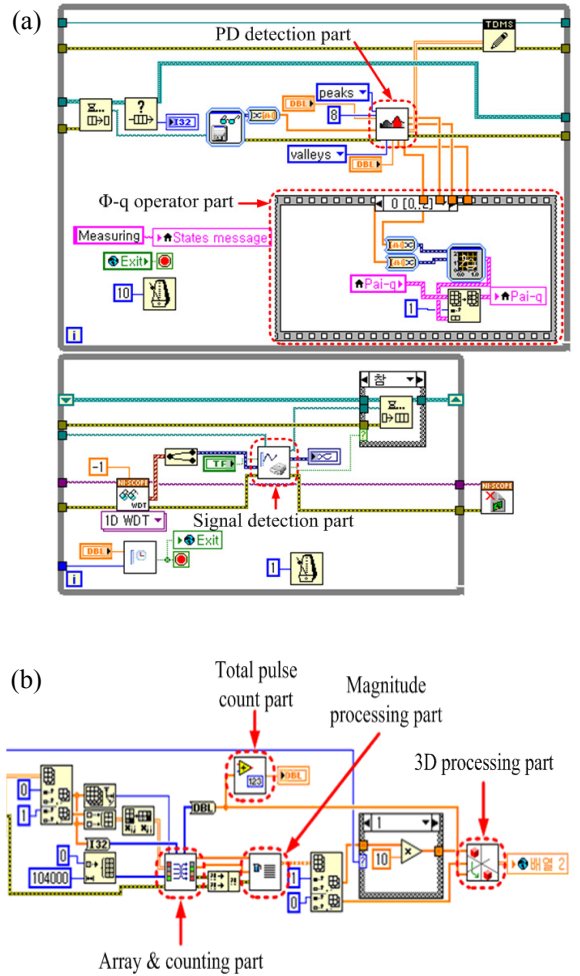


Fig. 4. Example of a virtual instrument. (a) PD detection part (b) processing part.

로 측정 신호를 정규화하고, 신호의 표준편차 및 주파수 영역에서의 표준편차를 계산하여 신호의 정보를 보존하고 화면에 출력한다. 이후 digital filter VI를 통하여 노이즈 제거 알고리즘이 연산 수행되고, 순수한 부분방전 펄스만을 검출한다.

최종적으로 부분방전 분석 VI를 사용하여 부분방전 신호를 측정하고 PRPDA (phase resolved partial discharge analysis)기법을 적용하여 부분방전 신호의 위상 (ϕ), 펄스 크기 (q) 그리고 발생 빈도 (n)를 연산하여 ϕ - q 및 ϕ - q - n 분석을 수행한다.

부분방전 분석 VI는 부분방전 신호의 정확한 측정과 실시간 ϕ - q 분석을 위하여 multi threading 기능

을 가지는 ‘Producer/Consumer’ 구조를 사용하였다. 측정이 끝난 후 신호의 위상분포 (Φ), 크기 (q) 그리고 횟수(n)에 대해 빠르고 일률적인 연산처리를 위하여 dynamic sequence 기능을 가지는 ‘Standard State Machine’ 구조를 사용하여 설계하였다.

부분방전 분석 알고리즘은 신호 측정부에 의해 $0^\circ \sim 360^\circ$ 위상까지 한 주기 동안 발생한 부분방전 신호를 수집하고 분석한다. 각 주기단위의 신호는 104000 window로 표현하고 2 window의 간격은 0.0034615° 로써, 부분방전 신호를 정밀하게 측정 할 수 있다. 각각의 알고리즘은 연산 수행의 효율성을 높이고자 Sub VI를 이용하여 부분방전 신호 분석에 최적화하였다.

2.4 결함 전극계

절연결함을 모의하기 위한 평판-평판 및 침-평판 전극계는 그림 5와 같다. 침전극의 곡률반경은 $10 \mu\text{m}$ 이며, 평판 전극은 지름 50 mm, 두께 13 mm 및 지름 60 mm, 두께 15 mm의 텅스텐-구리합금 재질로 가장자리를 둥글게 처리하여 전계의 집중이 발생하지 않도록 제작하였다. 또한 전극계 사이에는 두께 3 mm의 난연성 에폭시 글라스 적층판 (flame retardant epoxy glass laminate)을 삽입하였다.

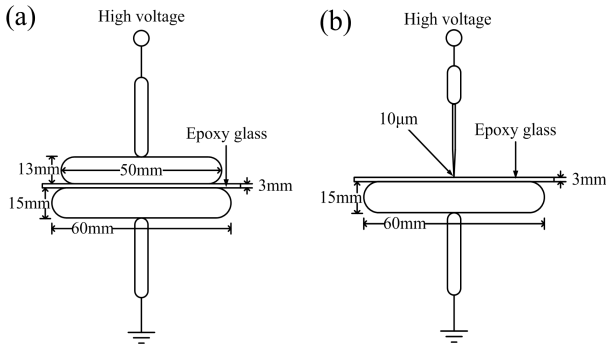


Fig. 5. Electrode system. (a) plane-plane electrode (b) point-plane electrode

2.5 실험계

실험계의 구성은 그림 6과 같으며 실험은 온도 23°C , 습도 31%에서 수행하였다. PD free 고전압 발생장치를 사용하여 최대 AC 5 kV까지 조정하면서 부분방

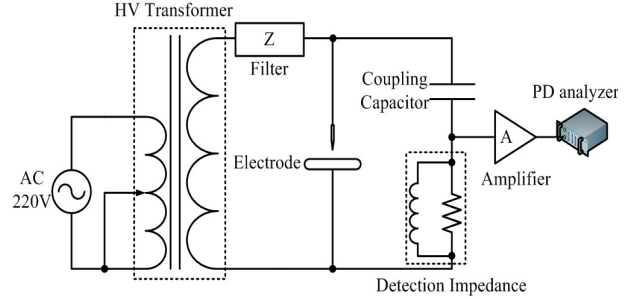


Fig. 6. Configuration of the experimental setup.

전을 발생시켰으며, 부분방전의 검출에는 AC 25 kV까지 방전이 발생하지 않는 커플링 커패시터 (ceramic capacitor type 07761, 1 nF)를 사용하였다. 인가전압은 1,000:1 분압기로 검출하였다.

3. 결과 및 고찰

평판-평판 전극계에서 부분방전이 발생하지 않는 조건하에서 측정한 파형을 그림 7에 나타내었으며, TF map 알고리즘을 이용한 배경잡음의 분석결과를 그림 8(a)에 나타내었다.

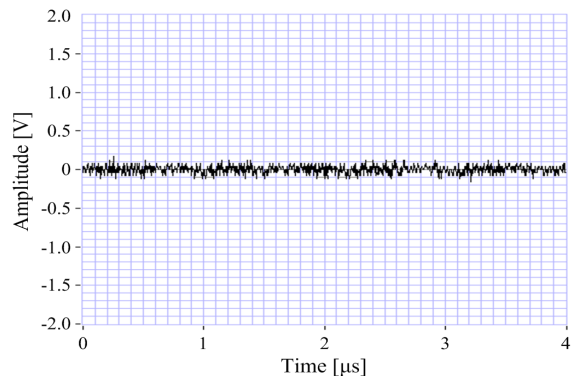


Fig. 7. Example waveform of background noise.

부분방전을 발생시켰을 때, 방전개시전압은 3.4 kV로 측정되었으며, 그림 8(b)와 같이 배경잡음 클러스터와 부분방전에 의한 클러스터로 나누어짐을 확인할 수 있다.

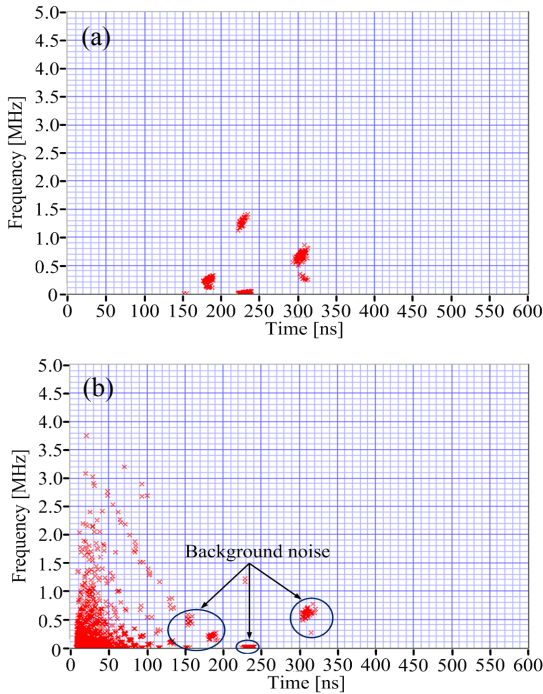


Fig. 8. Signal detection using the TF map (plane-plane electrode). (a) background noise (b) PD pulse

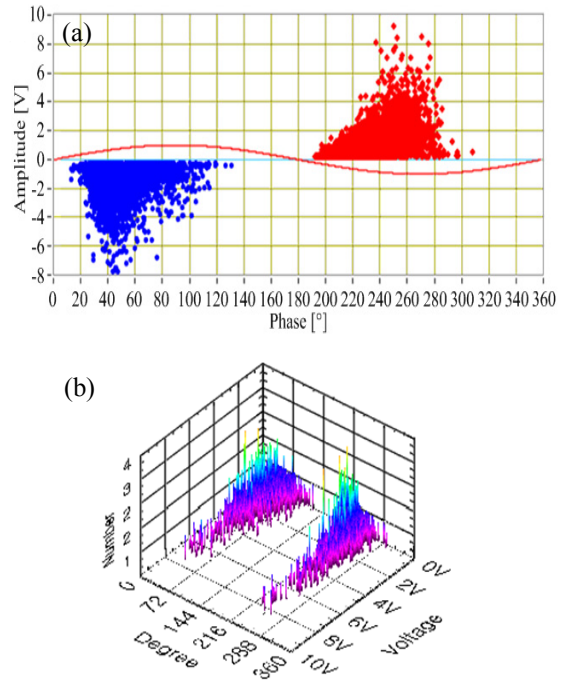


Fig. 10. Phase distribution of PD pulses (plane-plane electrode). (a) ϕ -q (b) ϕ -q-n

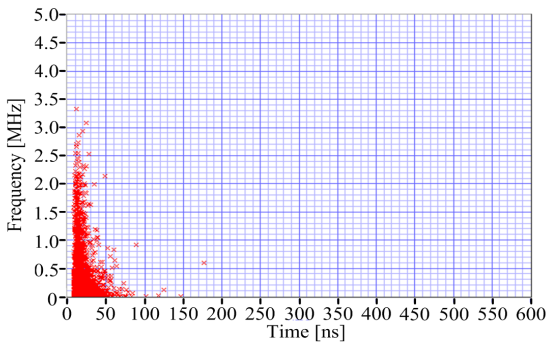


Fig. 9. Signal detection using the filter algorithm (plane-plane electrode).

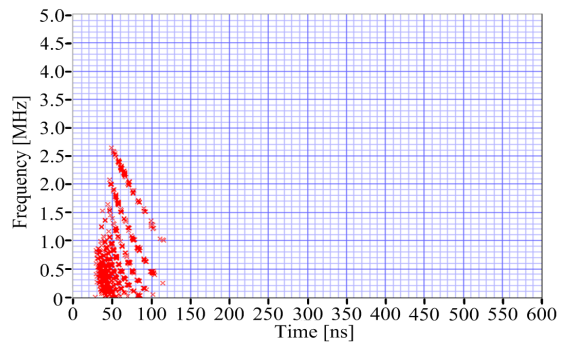


Fig. 11. Signal detection by the filter algorithm (point-plane electrode).

노이즈를 제거하고 부분방전 신호만을 측정하기 위하여 digital filter VI의 노이즈 제거 알고리즘을 적용한 결과를 그림 9에 나타내었다. 실험 결과로부터 배경잡음 클러스터는 제거되고 부분방전 펄스 신호의 클러스터만을 검출할 수 있었다.

부분방전 분석 알고리즘을 사용하여 5분 간 부분방전 펄스를 측정하고 분석하였으며 ϕ -q 및 ϕ -q-n 측정 결과를 그림 10에 나타내었다. 부분방전 펄스신호는

12°~132°, 191°~308°의 위상에서 분포하였으며 총 발생 횟수는 7,960회로 나타났다.

침-평판 전극계에서 TF map 알고리즘을 적용하여 부분방전을 측정한 결과를 그림 11에 나타내었다. 평판-평판 전극계와는 다른 클러스터를 형성하는 것을 알 수 있으며 이와 같이 TF map 알고리즘을 적용하면 외부 노이즈의 제거뿐만 아니라 결함에 따른 정보를 얻을 수 있다.

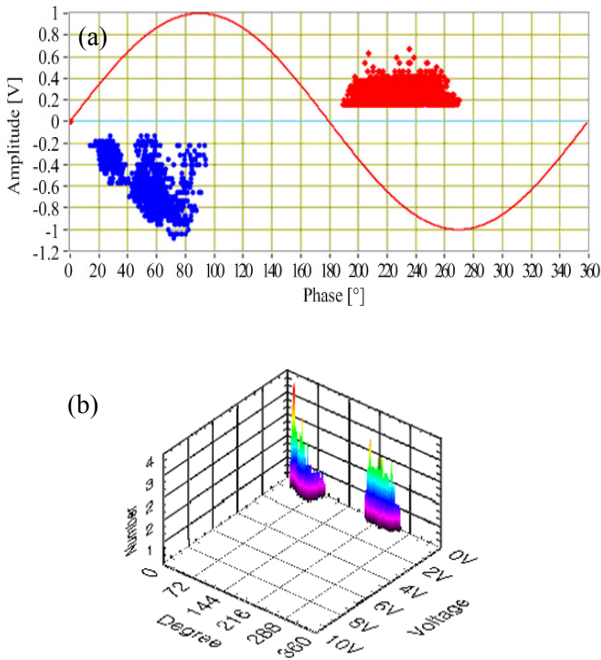


Fig. 12. Phase distribution of PD pulses (point-plane electrode). (a) ϕ - q , (b) ϕ - q - n .

그림 12는 침-평판 전극계에서 측정된 ϕ - q 및 ϕ - q - n 의 측정결과이며 DIV는 2.2 kV로 측정되었다. 부분방전의 총 발생 횟수는 6,011회로 측정되었으며, 부분방전 펄스는 $13^\circ \sim 94^\circ$, $189^\circ \sim 272^\circ$ 의 위상에 분포하고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 전력설비의 절연진단에 적용하기 위한 부분방전 측정시스템에 대하여 기술하였다.

절연결함을 모의하기 위하여 평판-평판 및 침-평판 전극계를 제작하였고 IEC 60270에 의거한 검출법에 따라 실험을 수행하였다. 설계한 TF map 및 노이즈 제거 알고리즘을 적용한 결과, 노이즈에 대한 영향을 제거하고 부분방전 펄스를 측정할 수 있었으며, ϕ - q 및 ϕ - q - n 분석 알고리즘을 적용하여 결함에 따른 부분방전의 위상분포 분석이 가능하였다. 평판-평판 전극계에서 발생한 부분방전 펄스는 $12^\circ \sim 132^\circ$, $191^\circ \sim 308^\circ$ 의 위상에 분포하였으며, 침-평판 전극계의 경우 $13^\circ \sim 94^\circ$, $189^\circ \sim 272^\circ$ 에 분포하였다.

실험 결과로부터, 제작된 부분방전 측정시스템은 노이즈가 존재하는 현장에서 전력설비의 절연상태 진단에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역 혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

REFERENCES

- [1] G. S. Kil, S. W. Kim, D. W. Park, S. J. Kim, and J. M. Song, *J. KIEEME*, **23**, 53 (2010).
- [2] H. J. Ju, J. Y. Yoon, and K. S. Han, *J. KIEEME*, **23**, 809 (2010).
- [3] T. Leibfried and K. Feser, *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 34 (1996).
- [4] IEEE Standard 493, IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems, *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (2007).
- [5] IEC International Standard 60270, High Voltage Test Techniques-Partial Discharge Measurements, *International Electrotechnical Commission, 3rd Ed.* (2000).
- [6] S. I. Lee and Y. C. Kwon, *J. KIEEME*, **24**, 890 (2011).
- [7] Peter H. F. Morshuis, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **12**, 905 (2005).
- [8] Steven A. Boggs, *IEEE Elect. Insul. Mag.*, **6**, 33 (1990).
- [9] P. Cichecki, P. Agoris, S. Meijer, E. Gulski, and J. J. Smit, *Proc. 15th Int. Symp. High Voltage Engineering*, T7 (2007).
- [10] K. S. Jung, D. W. Park, H. K. Cha, S. W. Cha, and G. S. Kil, *J. KIEEME*, **24**, 319 (2011).
- [11] A. Contin, G. C. Montanari, and A. Cavallini, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **7**, 30 (2000).
- [12] A. Cavallini, G. C. Montanari, F. Puletti, and A. Contin, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **12**, 203 (2005).
- [13] A. Contin, A. Cavallini, G. C. Montanari, G. Pasini and F. Puletti, *IEEE Transactions Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **9**, 335 (2002).
- [14] A. Cavallini, M. Conti, A. Contin, and G. C. Montanari, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **10**,

- 528 (2003).
- [15] A. Cavallini, A. Contin, G. C. Montanari, and F. Puletti, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **10**, 216 (2003).
- [16] F. H. Kreuger, *Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment* (Butterworth, London, 1989).
- [17] J. Fuhr, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **12**, 1005 (2005).