

## SF<sub>6</sub> 가스절연에서 부분방전의 특성분석

김선재<sup>1</sup>, 왕국명<sup>1</sup>, 박서준<sup>1</sup>, 길경석<sup>1,a</sup>, 안창환<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국해양대학교 전기전자공학과

<sup>2</sup> 인하공업전문대학교 디지털전자과

### Analysis of Partial Discharge Characteristics in SF<sub>6</sub> Gas Insulation

Sun-Jae Kim<sup>1</sup>, Guoming Wang<sup>1</sup>, Seo-Jun Park<sup>1</sup>, Gyung-Suk Kil<sup>1,a</sup>, and Chang-Hwan An<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

<sup>2</sup> Department of Digital Electronics, Inha Technical College, Incheon 22212, Korea

(Received May 13, 2016; Revised June 4, 2016; Accepted June 13, 2016)

**Abstract:** This paper deals with the characteristics of partial discharge (PD) for the purpose of a condition based maintenance (CBM) of gas insulated switchgears (GIS) in power equipment. Four types of electrode systems such as a protrusion on enclosure (POE), a particle on spacer (POS), a free particle (FP) and a Floating were designed and fabricated. PD pulses were measured using UHF sensor with a frequency range of 300 MHz~1.4 GHz and a DAQ with a sampling rate of 250 MS/s. Discharge inception voltage (DIV), discharge extinction voltage (DEV), and phase resolved partial discharge (PRPD) were analyzed depending on electrode systems. The average DIV in the POS was 28.8 kV. It was about 1.7 times higher than that in the FP, which was the lowest value of 17.2 kV. The FP shuffled and jumped at the applied voltage of 23.5 kV. Over 95% of PD pulses in the POE were generated in the negative polarity (181°~360°) of applied voltage. The results showed the phase (Φ)-magnitude (dBm) of PD pulses by UHF sensor, a cluster was formed separately depending on electrode systems.

**Keywords:** DIV, DEV, PRPD, Electrode system, SF<sub>6</sub> gas

### 1. 서 론

전력설비는 전기를 공급하기 위해 변압기, 정류기 및 차단기 등 여러 가지 전력기기로 구성되어 있다. 현대사회의 대용량 전기 공급을 위해서는 전력설비의 안정성과 신뢰성에 관한 진단이 필요하다. 고전압 전력기기는

국가 기간산업뿐 아니라, 제조 공장과 병원 등의 민수용에서도 매우 중요한 시설이다. 여러 종류의 전력설비 중 높은 절연성을 갖는 큐비클형 가스절연개폐장치 (cubicle-gas insulated switchgear, C-GIS)가 많이 사용되고 있다. C-GIS에 사용되는 SF<sub>6</sub> 가스는 공기 대비 절연 내력이 1기압에서 2.5~3.5배 높기 때문에 소형화가 가능하며, 안전하다 [1]. 그러나 C-GIS 내부에 금속 파티클의 유입 또는 크랙 등으로 인하여 전계가 집중되면 부분방전 (Partial Discharge, PD)이 발생한다. 이와 같이 전력설비의 고장을 예방하기 위하여 상태진단(condition based maintenance, CBM) 기술이 적용되고 있다. 상태진단기술은 활선상태에서 대상설비의 고장여부 및 징후를

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

사전에 검출하는 것으로 전력설비의 유지보수에 적합하다 [2-4].

따라서 본 논문에서는 UHF 센서를 사용하여 SF<sub>6</sub> 가스 절연구조의 상태진단을 위한 목적으로 전극계의 형태에 따른 방전개시전압 (discharge inception voltage, DIV), 방전소멸전압 (discharge extinction voltage, DEV) 및 PRPD (phase resolved partial discharge)를 분석하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 전극계 및 분석 알고리즘

가스절연개폐장치는 부분방전이 발생하지 않는 충분한 전계강도로 설계된다. 그러나 제작과정, 금속가공, 운반, 설치 및 운전 시, 파티클의 유입 또는 크랙 등으로 인하여 절연이 파괴된다. 절연열화는 대부분 설비 내부에서 나타나기 때문에 육안으로 확인하기 어렵다. 가스절연개폐장치에서 발생 가능한 결함을 모의하기 위하여 외함 돌출(protrusion on enclosure, POE), 스페이스 파티클(particle on spacer, POS), 자유입자(free particle, FP) 및 부유입자(floating) 등의 전극계를 그림 1과 같이 제작하였다 [5,6].

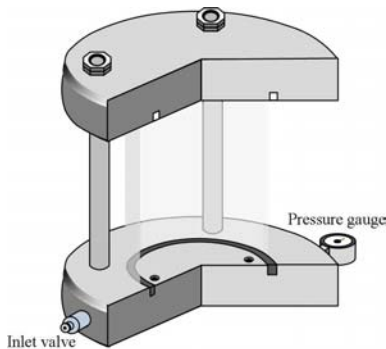


Fig. 1. Configuration of electrode system.

전극계는 지름 144 mm, 높이 131 mm의 밀폐 구조이며, SF<sub>6</sub> 가스를 최대 0.6 MPa까지 봉입할 수 있다. 코로나를 방지하기 위하여 고전압이 인가되는 접속부 상부에 직경 30 mm의 구갯을 설치하였다. 전극계별 내부를 그림 2에 나타내었다. (a)는 외함 돌출로서, 파티클이 가스절연개폐장치의 내부 벽면에 부착된 경우이다. 침 전극은 곡률 반경 10 μm, 높이 5 mm 및 지름

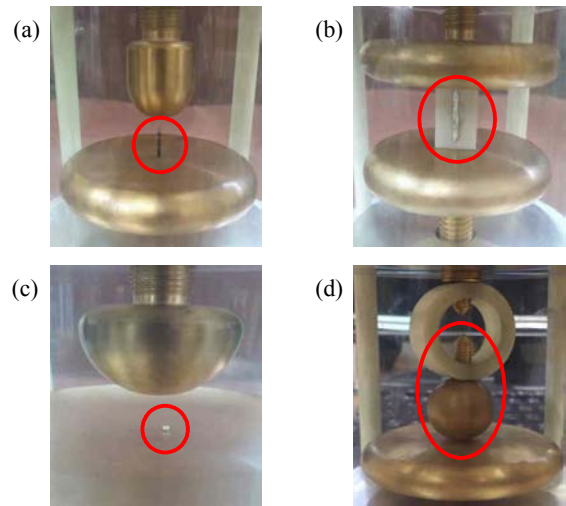


Fig. 2. Internal electrode systems. (a) POE, (b) POS, (c) FP, and (d) floating.

1 mm이다. 평판전극은 지름 70 mm, 두께 10 mm 및 곡률 반경 80 mm로 가장자리를 둥글게 제작하여 전계 집중을 방지하였다. 침과 고압 전극과의 거리는 10 mm이다. (b)는 스페이스에서 파티클이 부착된 것을 나타낸 것으로 평판전극은 외함 돌출에 사용된 것과 동일하며, 가로 10 mm, 세로 10 mm 및 높이 15 mm의 에폭시 고체절연물에 10 mm의 알루미늄 파티클을 부착시켰다. (c)는 자유입자로 인한 결함을 모의한 것으로 입자의 직경은 2 mm이다. 구 형태의 알루미늄을 사용하였으며, 고압측과 저압측의 전극 간격은 10 mm이다. 제작 과정에서 알루미늄의 사용 빈도가 높기 때문에 파티클의 재질로 선택하였다. 하부전극을 오목하게 설계하여 입자의 자유 운동이 용이하도록 평판 전극계를 제작하였다. (d)는 부유입자를 나타낸 것으로 지름 20 mm의 구 전극이 고압과 저압 사이에 떠있는 현상을 모의한 것이다 [7-9].

분석 알고리즘은 전극계에서 검출되는 부분방전 신호를 실시간으로 처리하기 위하여 multi-threading 기능의 “Producer-Consumer” 구조로 그림 3과 같이 프로그래밍 하였다. Producer는 발생된 부분방전 신호를 수집한다. Consumer는 Filter, Peak detection 및 Arrangement 순서로 신호를 분석한다. 수집된 부분방전 펄스는 “대역통과필터 (band pass filter, BPF)”를 통해서 통신 (800 MHz~2,300 MHz)과 방송 (470 MHz~800 MHz) 장애 등의 주변 노이즈를 제거한다. UHF 센서에서 검출되는 부분방전의 크기와 위상을 “Peak

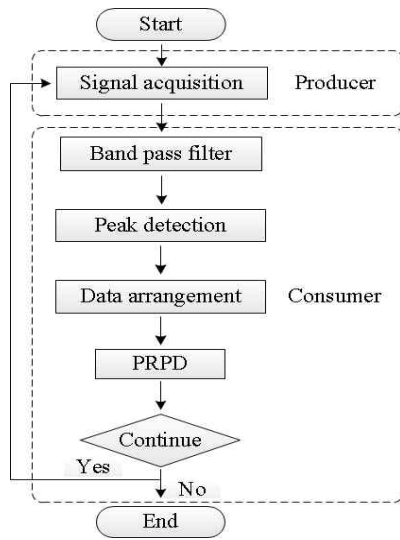


Fig. 3. Flow chart.

detection”으로 검출하고, “Data arrangement” 방식으로 PRPD 패턴을 Intensity graph에 나타낸다. 설계된 알고리즘은 지정된 주기의 신호를 수집할 수 있고, 부분방전 펄스의 발생 횟수를 측정한다. 또한 알고리즘은 “Dynamic-sequence” 기능을 가지는 “Standard state machine” 형태이다. 이는 “While 루프와 Case 구조”를 조합한 구성으로서, 다음 상태를 어떤 상태로든 이동할 수 있다. While 루프의 시프트 레지스터 기능을 적용함으로써, 부분방전 펄스 신호를 효율적으로 측정, 분석 및 저장할 수 있다 [10,11].

## 2.2 실험계

가스절연개폐장치 챔버에 전극계를 설치한 후, 그림 4와 같이 실험을 수행하였다. 최대 출력전압 및 출력전류는 각각 50 kV, 30 mA인 몰드형 고압 변압기를 사용하였다. 광유 (Mineral oil)에 변압기를 함침(含浸)시켜 접촉 부에서 발생될 수 있는 코로나를 방지하였다. 분압기 (VD-100)를 사용하여 인가전압의 위상 및 크기를 측정하였다. 진공펌프 (120 l/min)를 통해 전극계 내부를  $10^{-3}$  torr까지 진공한 후, SF<sub>6</sub> 가스를 0.5 MPa 봉입하였다. 자유입자는 파티클의 움직임을 분석하기 위하여 1,000 프레임 (1,280×1,024 pixels) 초고속 카메라를 사용하여 전극계 내부를 관찰하였다. 가스절연개폐장치 챔버의 윈도우에 UHF 센서 (300 MHz~1.4 GHz)를 설치한 후, 250 MS/s DAQ를 사용하여 부분방전 펄스를 분석하였다.

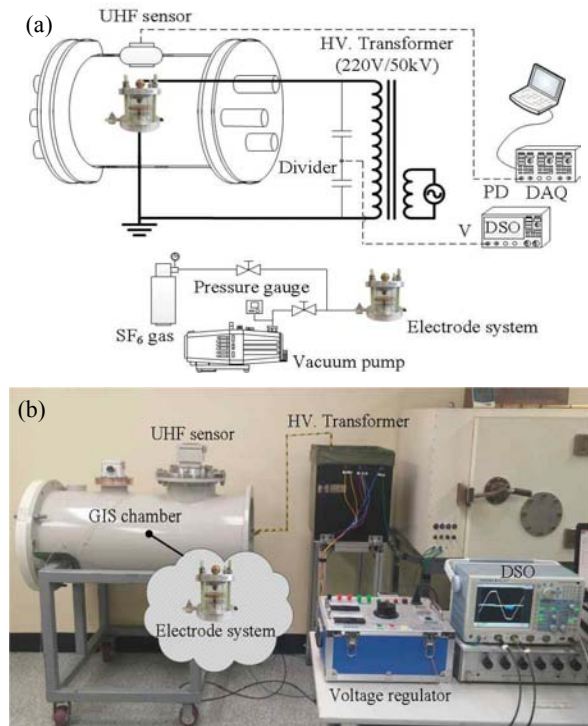


Fig. 4. Experimental setup. (a) configuration, (b) photograph.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 측정 및 분석

#### 3.1.1 방전개시전압과 방전소멸전압

방전개시전압과 방전소멸전압을 각각 10회씩 측정하여 최소, 최대 및 평균을 그림 5에 나타내었다. 평균 방전개시전압은 외함 돌출 20.4 kV, 스페이서 파티클 28.8 kV, 자유입자 17.2 kV 및 부유입자는 18.5 kV로 분석되었다. 4종의 전극계 중 스페이서 파티클의 평균 방전개시전압이 가장 높았다. 부유입자는 최댓값과 최솟값의 차이가 작았다. 스페이서 파티클은 절연물에 부착된 곳에서 부분방전이 발생되기 때문에 3종의 전극계와는 다르게 평균 방전개시전압이 높은 것으로 판단된다. 평균 방전소멸전압도 스페이서 파티클이 26 kV로 가장 높았고, 자유입자가 15.3 kV로 낮게 검출되었다. 직경 2mm 알루미늄 볼 파티클의 자유입자는 인가전압 23.5 kV에서 움직임을 관찰되었다. 이는 평균 방전개시전압 값의 1.3배이다.

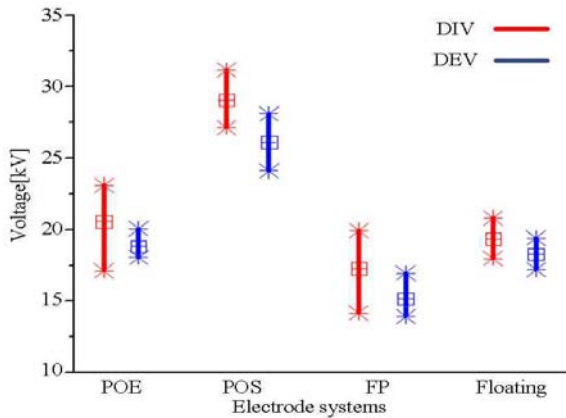


Fig. 5. DIV and DEV.

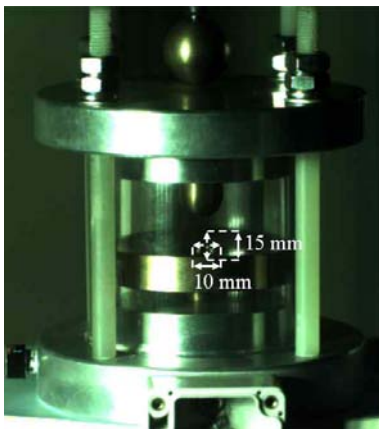


Fig. 6. Moving path of a FP.

23.5 kV 이하에서 부분방전은 검출되었지만 움직임은 없었다. 초고속 카메라로 분석한 결과, 볼 파티클은 그림 6과 같이 가로 10 mm, 세로 15 mm 내에서 셔플과 점핑을 병행하였다.

3.2 PRPD

UHF 센서로 검출된 부분방전 펄스를 위상(X축,  $\Phi$ )과 크기(Y축, dBm)에 대하여 분석하였다.

그림 7은 클러스터를 분석하기 전의 과정으로서, 전극계별 부분방전 펄스를 나타낸 것이다. 부유입자의 크기가 -29 dBm ~ -23 dBm으로 가장 크게 분석되었다. 전극계별 피크 값을 추출하여 클러스터의 분포를 그림 8에 나타내었다. 외함 돌출은 부극성 ( $181^\circ \sim 360^\circ$ )에서 피크 값이

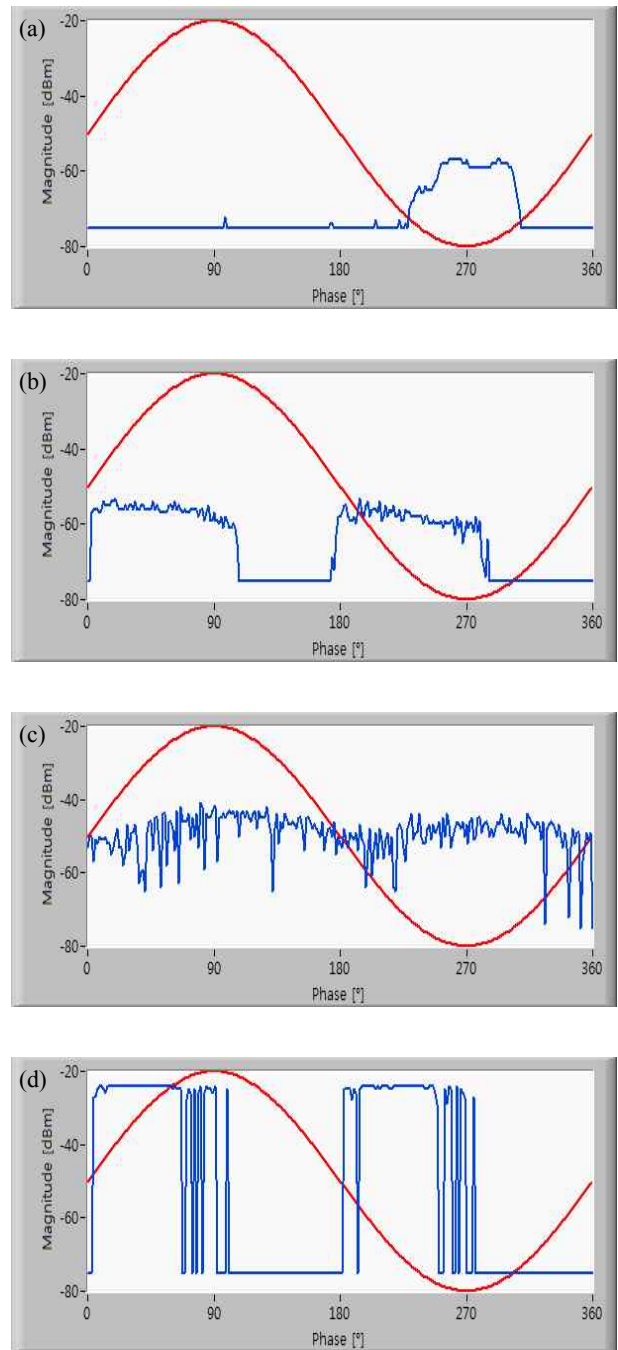
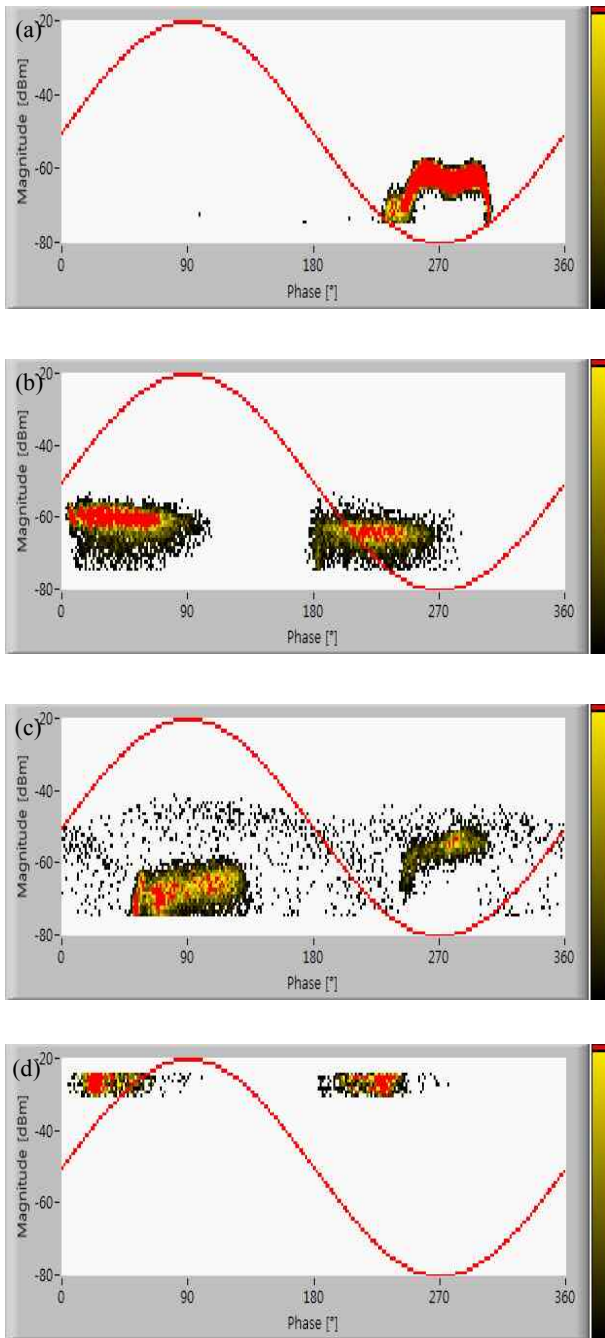


Fig. 7. Phase spectrum. (a) POE, (b) POS, (c) FP, and (d) floating.

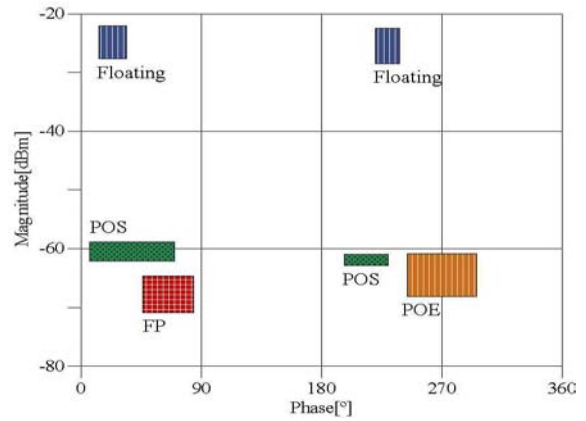
검출되었다. 스페이서 파티클은 부극성 보다는 정극성 ( $0^\circ \sim 180^\circ$ )에서 피크 값이 형성되었다.

자유입자는 움직임으로 인하여 전(全) 대역에서 부분방전 펄스가 검출되었지만, 최댓값은 정극성에서 분석되



**Fig. 8.** PRPD intensity. (a) POE, (b) POS, (c) FP, and (d) floating.

었다. 부분방전의 펄스 수는 외함 돌출 37,699개, 스페이서 파티클 323개, 자유입자 1,602개 및 부유입자는 2,013개로 측정되었다. 외함 돌출은 부극성에서 97% 부분방전이 발생하였다. 부극성에서 부분방전이 95% 이상



**Fig. 9.** Cluster distribution.

발생하는 것은 10  $\mu\text{m}$ 의 침 전극계가 저압에 설치되어 있기 때문에 전계집중이 높은 것으로 판단된다. 부유입자는 정극성과 부극성에서 약 50%씩 분포하였다. 전극계별 PRPD의 크기를 그림 8에 나타내었다.

위상과 크기에 대하여 부분방전의 최댓값에 대한 클러스터 분포를 그림 9에 나타내었다. 외함 돌출은 부극성 246° ~ 296°, -72 dBm ~ -61 dBm에서 부분방전 펄스가 검출되었다. 스페이서 파티클은 정극성 6° ~ 72°, 크기 -58 dBm ~ -63 dBm이며, 204° ~ 234°, -61 dBm ~ -65 dBm이다. 자유입자는 46° ~ 86°, -74 dBm ~ -67 dBm에서 부분방전 클러스터가 형성되었다. 부유입자는 21° ~ 34°, -28 dBm ~ -23 dBm이며, 226° ~ 232°, -29 dBm ~ -26 dBm에서 부분방전 펄스가 분포하였다.

#### 4. 결론

UHF 센서를 사용하여 전극계의 형태에 따른 방전개시전압, 방전소멸전압 및 PRPD를 분석하였다. 평균 방전개시전압은 스페이서 돌출이 28.8 kV로서, 가장 낮은 자유입자보다 약 1.7배 높았다. 스페이서 파티클은 3종의 전극계와는 다른 구조로서, 절연물에서 부분방전이 발생되기 때문에 상대적으로 방전개시전압이 높은 것으로 판단된다. 평균 방전소멸전압도 스페이서 파티클이 26 kV로 가장 높았다. 자유입자는 평균 방전개시전압의 1.3배에서 가로 10 mm, 세로 15 mm 내에서 셔플과 점핑을 병행하였다. 부유입자는 방전개시전압과 방전소멸전압의 최댓값과 최솟값의 차가 가장 작게 분석되었다. 외함 돌출은 부극성에서 부분방전이 95% 이상 발

생하였다. 이는 10  $\mu\text{m}$ 의 침 전극계가 저압에 설치되어 있기 때문에 부극성에서 부분방전이 집중된 것으로 분석된다. UHF 센서로 검출된 부분방전 펄스를 위상( $\Phi$ )과 크기 (dBm)에 대하여 분석한 결과, 전극계에 따라 개별적인 클러스터가 형성되었다. 특정 지역의 클러스터 분포는 가스절연에서 발생할 수 있는 결함을 판별하기 위한 자료로 활용할 수 있다.

## REFERENCES

- [1] S. J. Kim, G. Wang, M. Y. Yun, and G. S. Kil, *2015 Autumn Conference of the Korean Society for Railway*, (The Korean Society for Railway, Yeosu, 2015) p. 1474-1479.
- [2] S. J. Kim, H. E. Jo, G. W. Jeong, G. S. Kil, and S. W. Kim, *Journal of the Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 1 (2015).
- [3] F. H. Kreuger, *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment the 1<sup>st</sup> ed.* (Butterworth-Heinemann, United Kingdom, 1989) p. 140-143.
- [4] M. S. Naidu and V. Kamaraju, *High Voltage Engineering* (McGraw-Hill, India, 2009) p. 364-366.
- [5] M. S. Kim, G. W. Jeong, G. S. Kil, and D. W. Park, *2013 Autumn Conference of the Korean Society for Railway* (The Korean Society for Railway, Daegu, 2013) p. 459-464.
- [6] G. Wang, S. J. Kim, H. E. Jo, G. W. Jeong, and G. S. Kil, *2015 19th International Symposium on High Voltage Engineering* (ISH 2015, Czech Republic, 2015) p. 165(1)-165(5).
- [7] S. J. Kim, H. E. Jo, G. Wang, M. Y. Yun, and G. S. Kil, *Journal of the Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 12 (2015).
- [8] K. H. Kim, D. Z. Lee, and H. R. Kwak, *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, **17**, 1 (2003).
- [9] F. N. Budiman, Y. Khan, N. H. Malik, and A. A. Al-Arainy, *IEEE Transactions of Dielectrics and Electrical Insulation*, **20**, 6 (2013).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2013.6678863>]
- [10] G. W. Jeong, *M. E. Thesis*, p. 24-26, National Korea Maritime and Ocean University, Busan (2015).
- [11] G. Wang, *M. E. Thesis*, p. 21, 22, National Korea Maritime and Ocean University, Busan (2015).