



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學博士 學位論文

가스절연개폐장치에서 부분방전 분석에
의한 결함 판별 알고리즘

Defects Identification Algorithm by Analysis of Partial Discharge
in Gas Insulated Switchgear



2019年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

金 善 宰

本 論文을 金善宰의 工學博士 學位論文으로 認准함

委員長：工學博士 金 潤 植 ㉠

委 員：工學博士 吉 暻 碩 ㉠

委 員：工學博士 李 成 根 ㉠

委 員：工學博士 張 樂 元 ㉠

委 員：工學博士 李 永 植 ㉠

2018年 12月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

金 善 宰

목 차

목 차	i
그림 및 표 목차	iii
Abstract	vii
초 록	x
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 기술 현황	6
1.3 연구 내용	8
제 2 장 부분방전	9
2.1 발생 메커니즘 및 특성	9
2.2 측정 및 분석 기술	19
제 3 장 실험 및 분석	37
3.1 실험계	37
3.2 모의 결합	41
3.3 부분방전 분석	49

제 4 장 결함 판별 알고리즘	88
4.1 알고리즘 설계	88
4.2 적용 평가	110
 제 5 장 결 론	 113
 참 고 문 헌	 115



그림 및 표 목차

그림 목차

그림 1.1	가스절연개폐장치의 구성	1
그림 1.2	가스절연개폐장치의 결함 원인	4
그림 1.3	가스절연개폐장치의 부품별 고장 예방 건수	5
그림 2.1	코로나방전	9
그림 2.2	전자사태의 진전과정	10
그림 2.3	내부방전	12
그림 2.4	연면방전	13
그림 2.5	교류 전압에서 부분방전의 등가회로	14
그림 2.6	교류 전압에서 부분방전의 발생 패턴	14
그림 2.7	직류 전압에서 Void방전의 등가회로	17
그림 2.8	Void에 인가되는 전압	17
그림 2.9	임펄스 전압에서의 부분방전	18
그림 2.10	IEC 60270법 검출회로	20
그림 2.11	직접 검출회로	21
그림 2.12	평형 검출회로	23
그림 2.13	전자파의 발생과 전파	24
그림 2.14	음향 신호의 검출회로	26
그림 2.15	AE센서의 구조	27
그림 2.16	TRPD의 원리	29
그림 2.17	TRPD의 예	30
그림 2.18	신호처리 시스템의 구조	31
그림 2.19	TF법의 예	32
그림 2.20	펄스의 파라미터	33

그림 2.21	첨도와 왜도	33
그림 2.22	3-PARD의 예	34
그림 2.23	$\psi(t)$ 의 척도와 이동	35
그림 2.24	웨이블릿 변환에 의한 노이즈 제거	36
그림 3.1	실험용 가스절연개폐장치	37
그림 3.2	실험계의 구성	38
그림 3.3	UHF센서의 구성	40
그림 3.4	가스절연개폐장치의 절연파괴 원인	41
그림 3.5	POC 및 POE의 침전극	43
그림 3.6	FP의 볼전극	44
그림 3.7	Crack 전극계의 X-ray 사진	45
그림 3.8	Void 전극계의 X-ray 사진	45
그림 3.9	모의 결함의 형상	48
그림 3.10	부분방전의 주파수 대역	50
그림 3.11	부분방전의 검출 감도	52
그림 3.12	20 kV에서 POC의 PRPD	54
그림 3.13	26 kV에서 POC의 PRPD	55
그림 3.14	14 kV에서 POE의 PRPD	56
그림 3.15	17 kV에서 POE의 PRPD	57
그림 3.16	16 kV에서 POS의 PRPD	58
그림 3.17	20 kV에서 POS의 PRPD	59
그림 3.18	8 kV에서 FP의 PRPD	60
그림 3.19	10 kV에서 FP의 PRPD	61
그림 3.20	14 kV에서 Crack의 PRPD	62
그림 3.21	19 kV에서 Crack의 PRPD	63

그림 3.22	10 kV에서 Floating의 PRPD	64
그림 3.23	14 kV에서 Floating의 PRPD	65
그림 3.24	9 kV에서 Void의 PRPD	66
그림 3.25	12 kV에서 Void의 PRPD	67
그림 3.26	dBm-pC의 환산 실험계	69
그림 3.27	교정 펄스	71
그림 3.28	입력 전하량과 검출 전하량의 관계	72
그림 3.29	크기(dBm)-전압(mV)의 관계	72
그림 3.30	POC의 dBm-pC 환산	73
그림 3.31	POE의 dBm-pC 환산	75
그림 3.32	POS의 dBm-pC 환산	77
그림 3.33	FP의 dBm-pC 환산	79
그림 3.34	Crack의 dBm-pC 환산	81
그림 3.35	Floating의 dBm-pC 환산	83
그림 3.36	Void의 dBm-pC 환산	85
그림 3.37	모의 결함 7종의 dBm-pC 환산	87
그림 4.1	결함 판별 알고리즘의 흐름도	88
그림 4.2	20 kV에서 POC의 파라미터	90
그림 4.3	26 kV에서 POC의 파라미터	91
그림 4.4	14 kV에서 POE의 파라미터	93
그림 4.5	17 kV에서 POE의 파라미터	94
그림 4.6	16 kV에서 POS의 파라미터	96
그림 4.7	20 kV에서 POS의 파라미터	97
그림 4.8	8 kV에서 FP의 파라미터	98
그림 4.9	10 kV에서 FP의 파라미터	99
그림 4.10	14 kV에서 Crack의 파라미터	101

그림 4.11	19 kV에서 Crack의 파라미터	102
그림 4.12	10 kV에서 Floating의 파라미터	104
그림 4.13	14 kV에서 Floating의 파라미터	105
그림 4.14	9 kV에서 Void의 파라미터	107
그림 4.15	12 kV에서 Void의 파라미터	108
그림 4.16	다층 신경망의 구조	110
그림 4.17	POC의 적용 평가	111
그림 4.18	결함 판별의 결과	112

표 목차

표 1.1	SF ₆ 가스의 물리적 특성	2
표 1.2	정격전압별 가스절연개폐장치의 사고 현황	2
표 1.3	가스절연개폐장치에서 부분방전 진단에 의한 사고 예방 통계 ..	3
표 2.1	UHF센서의 종류와 특성	25
표 2.2	부분방전 펄스의 위상 분포	28
표 3.1	모의 결함의 종류에 따른 평균 방전개시전압	53
표 3.2	IEC 60270법과 UHF센서의 위상 비교	68
표 3.3	겉보기 전하량	70
표 3.4	POC의 dBm-pC 환산	74
표 3.5	POE의 dBm-pC 환산	76
표 3.6	POS의 dBm-pC 환산	78
표 3.7	FP의 dBm-pC 환산	80
표 3.8	Crack의 dBm-pC 환산	82
표 3.9	Floating의 dBm-pC 환산	84
표 3.10	Void의 dBm-pC 환산	86
표 4.1	모의 결함 7종의 PRPD-12Window	109

Defects Identification Algorithm by Analysis of Partial Discharge in Gas Insulated Switchgear

by Sun Jae, KIM

Department of Electrical & Electronics Engineering
The Graduate School of Korea Maritime and Ocean University
Busan, Republic of Korea

Abstract

Gas insulated switchgear(GIS) is an important apparatus used in power transmission systems. It operates with high reliability owing to filling with SF₆ gas that has high dielectric strength and excellent arc-quenching ability. However accidents of GIS cause serious hazards as its power capacity is as high as tens ~ hundreds MVA per unit. Therefore studies on insulation diagnostic techniques for GIS have been investigated and developed for over 50 years.

This thesis dealt with partial discharge(PD) characteristics depending on defect types and defects identification algorithm in SF₆ gas insulated structure for the purpose of diagnosing causes of insulation breakdown in GIS. The main causes of insulation breakdown in GIS were classified into 7 types, including protrusion on conductor (POC), protrusion on enclosure(POE), protrusion on spacer(POS), free particle(FP), crack inside spacer(Crack), floating metal(Floating), and void inside spacer(Void), all of which were simulated using the fabricated artificial defects.

The experimental setup was composed of a molded-type transformer with a maximum output voltage of 50 kV and a maximum output current of 30 mA, an oscilloscope, a data acquisition unit(DAQ), as well as a high voltage divider. The electrode systems were evacuated to 5×10^{-3} torr and then filled with SF₆ gas at 0.5 MPa.

An ultra-high frequency(UHF) sensor with frequency range of 100 MHz ~ 700 MHz and 1 GHz ~ 1.4 GHz, and detection sensitivity of -70 dBm was used. PD signal was measured simultaneously using the IEC 60270 method and the UHF sensor. Electrical characteristics in terms of discharge phase and magnitude were analyzed. In addition, the relation between the output of UHF sensor(dBm) and the apparent charge(pC) that is used for evaluation of PD was analyzed, which followed the equation of $pC = 10^{(dBm+81.31)/23.32}$.

The PRPD-12Windows that presented discharge occurrence ratio depending on magnitude and phase in $0^\circ \sim 360^\circ$ were analyzed to investigate PD characteristics. In the POC, PD occurrence ratio had the highest value in $0^\circ \sim 180^\circ$ and -80 dBm ~ -60 dBm. PD clusters were formed in $0^\circ \sim 90^\circ/-59 \text{ dBm} \sim -40 \text{ dBm}$ and $181^\circ \sim 270^\circ/-59 \text{ dBm} \sim -40 \text{ dBm}$ in the Void.

The results indicated that PD presented distinguishable clusters in 7 types of simulated detects owing to the different defect structures. To be specific, the concentration of electric field was influenced by the position and shape of defect.

An intelligent defects identification algorithm was developed based on back propagation network. There were 17 parameters including PRPD-12Window, kurtosis, skewness, and correlation coefficient in the input layer. The number of neurons in the hidden layer and the output layer were 20 and 7, respectively. 30 groups data of each defect were used for training the neural networks. From the results, the identification accuracy was 92%~99% depending on the type of defect, which was improved over 5% compared with the existing phase-resolved partial discharge(PRPD), time-frequency(TF), and pulse sequence analysis(PSA) method.

The defects identification algorithm proposed in this thesis discriminated the type of defect in GIS. It was expected to be an advanced diagnostic technique for improving the flexibility of power system operation and the reliability of electric power supply.

Keywords : Gas insulated switchgear, Artificial defects, Partial discharge, Insulation diagnosis, Defects identification algorithm

초 록

가스절연개폐장치(Gas insulated switchgear, GIS)는 절연 성능과 아크 소호 능력이 우수한 SF₆ 가스를 충전하여 높은 안정성을 갖는 송변전 설비의 주요 장치이다. 그러나 단위 설비 당 전송전력이 수 십 ~ 수 백 MVA의 대용량이므로 사고 발생 시, 파급 영향이 크기 때문에 지난 50여 년간 절연진단기술에 대한 연구 개발이 활발히 진행되어 왔다.

본 논문에서는 가스절연개폐장치에서 발생하는 절연파괴의 원인을 진단하기 위한 목적으로, SF₆ 가스절연구조에서 결함별 부분방전의 특성과 판별 알고리즘에 대해 연구하였다. 가스절연개폐장치에서 발생하는 절연파괴의 주요 원인을 도체 돌출(POC), 외함 돌출(POE), 스페이서 돌출(POS), 자유 입자(FP), 크랙(Crack), 부유 금속(Floating) 및 보이드(Void)의 7가지로 분류하고, 모의 결함을 제작하였다.

실험계는 출력전압 최대 50 kV, 출력전류 30 mA의 절연형 몰드 변압기, 오실로스코프, DAQ 및 분압기 등으로 구성하였다. 순수 SF₆ 가스 상태에서 실험을 수행하기 위해 모의 결함계 내부를 5×10^{-3} torr까지 진공시킨 후, SF₆ 가스를 0.5 MPa로 충전하였다.

UHF센서의 측정 대역은 100 MHz ~ 700 MHz, 1 GHz ~ 1.4 GHz 및 검출 감도는 -70 dBm이며, IEC 60270법과 UHF센서로 부분방전을 동시에 측정하여 위상 및 크기 등 전기적 특성을 분석하였다. 또한 절연진단에 있어 부분방전의 크기는 전하량(pC)이 사용되므로 센서의 출력 dBm과 pC의 상관관계 $pC = 10^{(dBm + 81.31)/23.32}$ 를 도출하였다.

부분방전의 특성은 0° ~ 360°의 위상별 부분방전의 크기에 따라 발생 비율(구간/전체)을 나타내는 PRPD-12Window로 분석하였다. POC는 0° ~ 180° 구간의 -80 dBm ~ -60 dBm에서 부분방전의 발생 비율이 가장 높았다.

Void는 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}/-59 \text{ dBm} \sim -40 \text{ dBm}$ 과 $181^{\circ} \sim 270^{\circ}/-59 \text{ dBm} \sim -40 \text{ dBm}$ 에서 클러스터가 밀집되었다. 이와 같이 모의 결함 7종에 대하여 고유의 부분방전 클러스터가 형성되는 이유는 결함의 구조와 관련이 있는 것으로, 결함 입자의 위치 및 형태 등에 따라 전계 집중이 다르기 때문이다.

PRPD-12Window, 왜도, 첨도 및 상관 계수의 파라미터로 입력층의 17개 항목을 구성하고, 은닉층 20개의 뉴런 및 출력층 7종의 역전파 알고리즘을 이용하여 인공지능 기반의 결함 판별 알고리즘을 개발하였으며, 30회씩 파라미터를 입력하여 신경회로망을 학습시켰다. 그 결과, 판별 정확도는 결함별 92% ~ 99%로 기존 PRPD, TF 및 PSA 등 보다 5% 이상 향상시킬 수 있었다.

제안한 결함 판별 알고리즘은 가스절연개폐장치에서 발생하는 결함의 종류를 정확히 제시하고 있어, 전력계통에서 운영 편리성과 전력공급의 안정도를 향상시킬 수 있는 차별화된 진단기술이라고 판단된다.

중요어 : 가스절연개폐장치, 모의 결함, 부분방전, 절연진단, 결함 판별 알고리즘

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

전기에너지는 신속·정확한 공급이 가능하며, 공해가 발생하지 않는 친환경 에너지원으로써, 응용 기술이 지속적으로 증가하고 있다. 이에 따라 시스템의 대형화 및 설치 목적에 부합하는 전력설비의 안정성과 신뢰성이 요구된다. 특히 전력 산업은 국가기간산업에서도 매우 중요한 산업 분야인 바, 설비 고장으로 인한 인명 피해 및 경제적 손실을 예방하기 위해 전력설비의 과학적이고, 체계적인 관리가 필요하다.

여러 종류의 전력설비 중, 가스절연개폐장치(Gas insulated switchgear, GIS)는 그림 1과 같이 전력망의 분리·변경 목적으로 차단기, 단로기 및 부싱 등으로 구성된다. 긴 수명, 고신뢰성 및 협소한 장소에 유용하게 설치를 할 수 있어 가스절연개폐장치를 변전소 및 발전소 등에 많이 적용하고 있다. 또한 절연 성능 및 아크 소호 능력이 우수한 SF₆(Sulfur hexafluoride) 가스를 밀폐된 탱크 내부에 충전하여 높은 안정성을 갖는다.

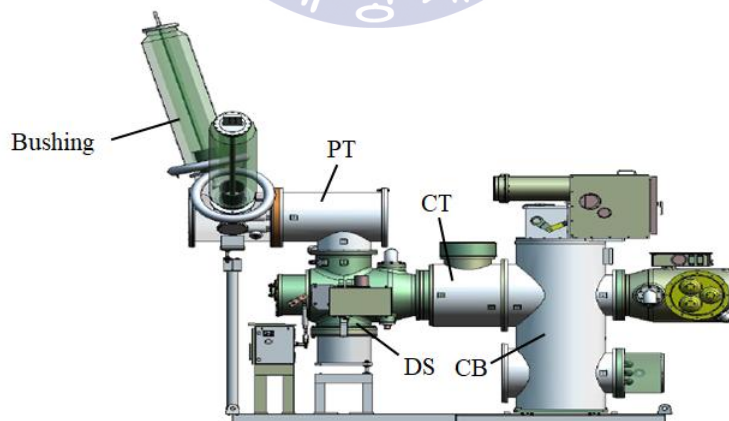


그림 1.1 가스절연개폐장치의 구성

Fig. 1.1 Configuration of a gas insulated switchgear

SF₆ 가스의 물리적 특성은 표 1.1과 같으며, SF₆ 가스의 절연내력이 높은 이유는 전자를 부착하여 부이온(n 작용)으로써, 전자의 전리 능력이 소멸 되기 때문이다.

표 1.1 SF₆ 가스의 물리적 특성

Table 1.1 Physical characteristics of SF₆ gas

분자량	146.06
밀도(대기압 20℃)	6.14 g/ℓ
임계 온도	45.6℃
임계 압력	38.2 atm
임계 밀도	0.725 g/cm ³

그러나 가스절연개폐장치의 사고 발생 시 주요 부품 등이 밀폐된 탱크 내부에 설치되어 있어 보수 및 점검이 어려우며, 단위 설비 당 전송전력이 수 십 ~ 수 백 MVA의 대용량이므로 파급 영향이 크기 때문에 가스절연개폐장치의 절연진단기술에 관한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다.

표 1.2 정격전압별 가스절연개폐장치의 사고 현황

Table 1.2 Accident state of GIS depending on the rated voltages

정격전압(kV)	설치 수(대)	절연 사고(회)	100 bay 당 절연사고(회)
125 ~ 145	9,334	24	0.26
245	6,133	41	0.67
420	3,351	61	1.80
550	1,109	43	3.90
계	19,927	169	6.63

1967년부터 1992년까지 CIGRE 산하 Working Group에서 표 1.2와 같이 가스절연개폐장치에 대한 사고를 분석한 결과, 100bay당 1건의 절연사고가 매년 발생하는 것으로 보고되었다^[1~4].

이와 같이 가스절연개폐장치의 절연과피 원인으로는 설치 전 제조 과정에서 이물질의 혼입, 가공 및 운반 과정에서의 충격 등과 설치 후, 운전 과정에서 이상전압 및 부주의한 관리 등이 있다^[5~7].

가스절연개폐장치의 절연과피를 예방하기 위하여 국·내외 기업과 연구소에서 가스절연개폐장치의 개발 초기인 1960년대부터 부분방전을 측정하고 분석하는 기술을 연구하고 있다. 그 예로 전기적, 화학적, 물리적 및 음향 검출법이 개발되었고, 현재는 다수의 제품으로 상용화가 이루어져 적용되고 있다. 그러나 가스절연개폐장치의 내부에서 발생하는 부분방전을 진단하여도, 넓은 범위의 설비를 분해하여 전체적인 분석과 검사를 통해 결함을 찾아야하는 어려움이 있다^[8,9].

표 1.3 가스절연개폐장치에서 부분방전 진단에 의한 사고 예방 통계

Table 1.3 Statistics of accident prevention by PD diagnosis in GIS

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	합계
온라인	5	0	1	2	0	3	0	11
휴대용	6	12	10	18	25	14	4	89
예방 건수	11	12	11	20	25	17	4	100

우리나라에서 가스절연개폐장치에 부분방전 진단기술을 시범 적용한 2000년도부터 2013년까지 온라인 진단시스템과 휴대용 검출장비를 활용하여 부분방전을 진단한 사례 중, 내부 정밀점검을 실시하여 결함을 발견한 사례를 중심으로 분석하였다. 연도별로 결함을 발견하여 고장을 예방한 결과를 표 1.3에 나타내었다.

2007년부터 휴대용 진단장비를 사용하여 가스절연개폐장치의 상태를 점검한 것이 7년간 온라인 진단보다 약 8배 증가한 사실을 알 수 있다. 또한 2010년 이후에는 설비진단센터 등이 신설되어 전문적인 진단을 통해 전력설비의 고장을 예방한 사례들이 증가하고 있는 추세이다. 표 1.3의 사고 예방 자료를 기반으로 아래와 같이 가스절연개폐장치의 여러 현황 등에 관하여 분석하였다.

가스절연개폐장치의 결함 원인별 비율을 그림 1.2에 나타내었다. 절연체가 46%로 가장 높으며, 돌출전극이 1%로 가장 낮게 분석되었다. 플로팅과 자유도체가 각각 29% 및 23%의 비율을 나타내었다.

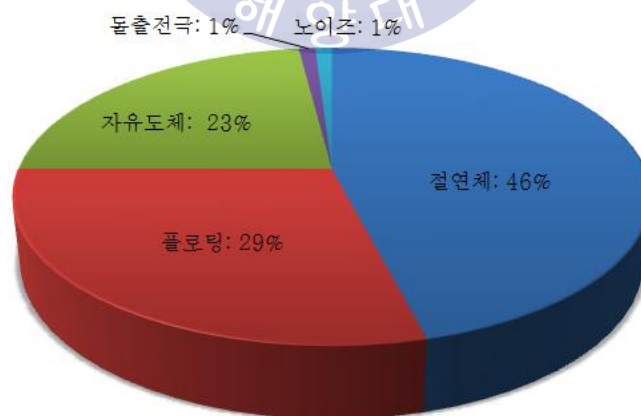


그림 1.2 가스절연개폐장치의 결함 원인
Fig. 1.2 Causes of defects in GIS

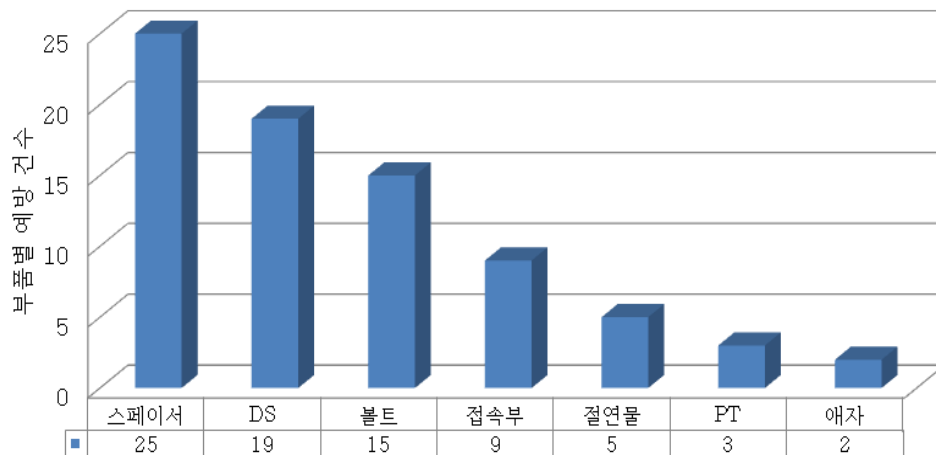


그림 1.3 가스절연개폐장치의 부품별 고장 예방 건수

Fig. 1.3 Incidence of failure prevention depending on component of GIS

1980년대 초부터 가스절연개폐장치가 설치되기 시작하여 운전 중에 있으며, 25년 이상 된 가스절연개폐장치는 사고를 예방하기 위하여 일부 교체되기도 하였다. 운전 중인 설비 중에 가스절연개폐장치의 구성 부품별 결함을 발견하여 고장을 예방한 현황을 그림 1.3에 나타내었다. 스페이서에서 가장 많은 25건이 발견되었으며, 단로기(Disconnection switch, DS), 볼트, 접속부 및 절연물 등에서 부분방전을 진단하였다^[10].

이들 배경을 통해 가스절연개폐장치의 고장을 예방하기 위하여 절연과괴의 원인 및 특성 등에 대한 이해와 현장에 적용할 수 있는 진단기술에 대한 연구가 절실히 필요하다.

1.2 기술 현황

국내에서 상용화된 부분방전의 측정 장비는 해외에 사용 중인 장비를 수입하여 국내에서 개발한 소프트웨어 또는 하드웨어 등을 일부 적용하여 판매하는 실정이다. 과거의 부분방전 진단 장비는 발생 유·무만을 분석하는 것으로, 실질적인 진단이 어려웠지만, 현재는 부분방전의 특성 분석을 통해 전력설비의 상태진단이 가능하다.

그 예로 ‘P社’의 TOM-E, AMOS 및 TOID 등이 있다. TOM-E는 폐쇄 배전반의 온라인 진단 시스템으로, 활선 상태의 전력설비에서 방출되는 방사 전자파를 UHF센서로 검출한다. 전자파의 크기, 전하량 및 펄스 간격 등을 측정하여, 전력설비의 상태를 온라인으로 진단할 수 있다. AMOS는 가스 절연개폐장치의 온라인 진단 시스템이며, 부분방전 신호를 UHF센서로 검출하여 이상 여부를 감시한다. 또한 사고 예측, 경보 표시 및 가스절연개폐 장치의 열화 경향을 지속적으로 관리자에게 제시한다. TOID는 유압 변압기 등 절연유의 열화를 온라인으로 진단하는 시스템이며, 변압기 내 절연유의 도전성 입자에 의한 미세전류를 온라인으로 감시한다.

또한 국내기업의 ‘T社’는 AMID와 CMID 장비를 개발하여 판매 중에 있다. AMID는 AE(Acoustic Emission)센서를 사용하여 변압기 내부에서 발생하는 결함을 실시간으로 감시하여, 아크 및 부분방전에 의한 변압기의 절연파괴를 예방한다. CMID는 IEC 60270법에서 제시하는 진단 방법을 적용한 장치로써, 세라믹 커플링 센서를 적용하여 몰드변압기에서 부분방전을 진단한다.

국외 부분방전의 진단기술은 영국, 독일, 오스트리아, 이탈리아 및 일본 등에서 제품을 개발 중에 있다. 영국 ‘R社’의 DDX-7000/8003은 디지털 부분방전 시험기이며, 유차폐방식의 7000 유형과 무차폐방식의 8003 유형이 있어 시료의 종류 및 시험 환경에 따라 사용자가 선택할 수 있다.

모듈로 제작되어 있어 하드웨어와 소프트웨어의 기능을 쉽게 향상시킬 수 있으며, 시험 설비에 맞춰서 진단을 수행할 수 있다. 또한 주변 노이즈를 제거할 수 있도록 Gating과 Filtering 기능을 설정할 수 있다.

독일 'P社'의 ICM System은 전원 시스템의 주파수와 VLF(0.1 Hz)를 포함하며, PRPDA 알고리즘으로 부분방전을 분석한다. 오스트리아 'O社'의 MPD 600은 측정부, USB 제어부 및 분석 소프트웨어로 구성된다. 크기가 작은 부분방전 펄스와 주변 노이즈의 분리가 가능하며, PRPDA, 3-PARD 등 부분방전 분석 어플리케이션이 다양하다. 또한 멀티채널 기능을 통하여 'O社'의 다양한 장비들과 연동하여 부분방전을 측정할 수 있다.

이탈리아 'T社'의 PD Check mkIII는 부분방전, 유증가스 분석(DGA), 유전정접($\tan\delta$), 진동감시 및 온도분포감시(DTS)를 측정할 수 있다. 또한 3상 전력설비의 점검 및 상시 감시 기능이 있으며, 부분방전 펄스 감지와 파형 분석이 가능하여, 3채널로 동시에 디지털 데이터를 취득할 수 있다.

아시아에서는 일본 및 중국 등에서 부분방전에 관하여 지속적인 연구를 통해 제품을 개발하고 있다. 그 예로 일본 'P社'의 부분방전 분석 장비는 12채널의 중계기를 통해 데이터를 전송하는 Multi-type 통신 방식이며, 검출 대역은 10 ~ 500 MHz이다.

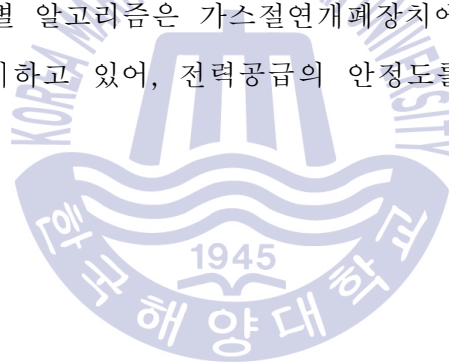
중국은 'H社'의 HZPD-9209A가 부분방전을 검출 및 분석한다. 고주파 전류와 초음파 두 가지 센서를 사용하며, 신호증폭, 필터링, 데이터 수집·처리 및 그래픽 디스플레이로 구성된다. 전력설비의 케이블, 변압기 및 기타 접지선에 활용되어 부분방전을 측정할 수 있다^[11].

1.3 연구 내용

본 논문에서는 가스절연개폐장치에서 발생하는 절연파괴의 주요 원인을 7가지로 분류하고, 동일한 형태의 모의 결함을 제작하여, SF₆ 가스절연 구조에서 결함별 부분방전의 특성과 판별 알고리즘에 대해 연구하였다.

IEC 60270법과 UHF센서로 부분방전을 동시에 측정하여 위상 및 크기 등 전기적 특성을 분석하였다. 절연진단에 있어 부분방전의 크기는 전하량(pC)이 사용되므로 UHF센서의 출력 dBm과 pC의 상관관계를 도출하였다. 또한 결함별 부분방전의 특성을 PRPD-12Window, 왜도 및 첨도 등 17개 항목으로 분석하여, 인공지능 기반의 결함 판별 알고리즘을 설계한 후, 30회씩 파라미터를 입력하여 신경회로망을 학습시켰다.

제안한 결함 판별 알고리즘은 가스절연개폐장치에서 발생하는 결함의 종류를 정확히 제시하고 있어, 전력공급의 안정도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.



제 2 장 부분방전

2.1 발생 메커니즘 및 특성

IEC 60270(High-voltage test techniques: Partial discharge measurements)에서 부분방전(Partial discharge, PD)은 절연물의 내부 또는 표면에 전계가 국부적으로 집중하여 $1\mu\text{s}$ 보다 짧은 펄스형태로 나타난다. 부분방전이 발생하면 소리, 빛, 열 및 화학적 반응 등이 동반된다. 부분방전의 종류는 발생 형태에 따라 코로나방전(Corona discharge), 절연물 내부에서 발생하는 내부방전(Internal discharge) 및 절연물의 표면을 통해 발생하는 연면방전(Surface discharge)으로 구분된다^[12~16].

코로나방전은 그림 2.1과 같이 불평등 전계가 형성될 수 있는 첨예한 부분 등에 전계가 집중되어 절연이 국부적으로 파괴되면서 빛 또는 소리 등이 동반된다. 코로나방전의 종류는 전극 표면에서만 빛이 나는 글로우 코로나(Glow corona), 전극에서 신장하며 글로우 코로나와 같이 불안정한 브러시 코로나(Brush corona), 상대 극(Polarity) 부근까지 신장하는 스트리머 코로나(Streamer corona) 등으로 구별된다.

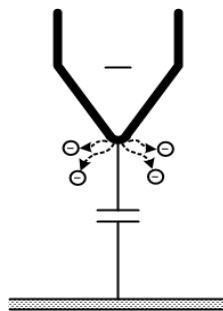


그림 2.1 코로나방전

Fig. 2.1 Corona discharge

그림 2.2와 같이 전계에 의해 충분한 에너지를 얻은 전자들이 원자들과 충돌하여 이온(Ion)을 생성시킨다. 양이온들에 의해 전극에서 전자들을 공급해 방전이 지속적으로 이루어질 때까지 전자들의 수는 계속 증가하며, 초기전자는 광전리에 의해 생성된다.

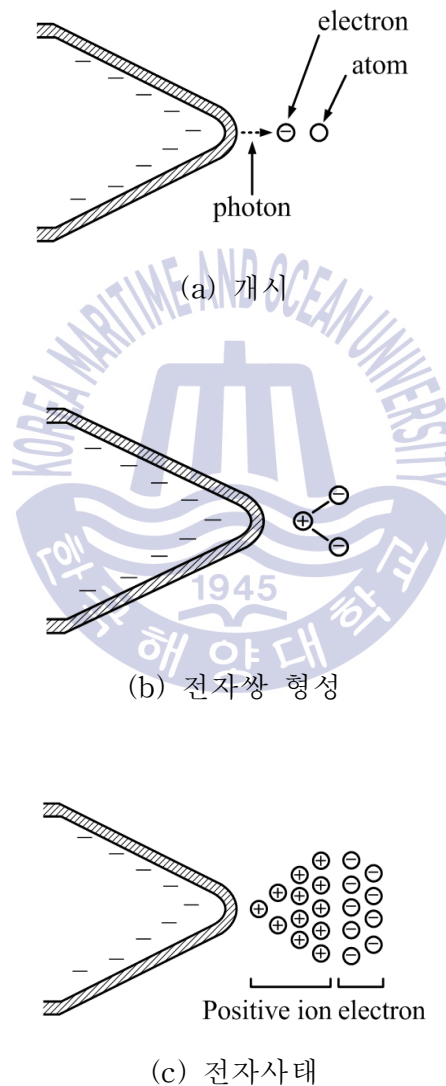


그림 2.2 전자사태의 진전과정

Fig. 2.2 Development process of electron avalanche

전계에 의해 전자들이 기체를 통과할 때 기본적인 이온화 과정은 식 (2.1)과 같다.



A 는 원자, A^+ 는 양이온, e 는 전자이다. 식 (2.1)에서와 같이 중성원자에 어떤 전자가 충돌하면 양이온과 전자가 생기고, 이 때 전자들은 각각 두 개 이상의 전자들을 생성시킨다. 이러한 과정이 연쇄적으로 일어나 전자들의 양이 급속하게 증가하는 것을 전자 사태(Electron avalanche)라 하며, 이때의 방전전류는 식 (2.2)와 같다.

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (2.2)$$

여기서 d 는 갭(Gap) 간격, α 는 Townsend 방전의 1차 전리 계수이다. 식 (2.2)에서 Townsend의 1차 전리 계수 α 는 일정한 전계에서 하나의 전자가 1 cm의 거리를 이동할 때 생성된 전자의 수를 의미한다. 이러한 과정을 거치면서 전자들의 양이 급속히 증가하는 과정을 1차 전리라 하고, 양이온과 광자들이 전극을 충돌해 전자들이 방출되는 과정을 2차 전리라 한다. 1차 및 2차 전리 과정에서 방출된 전자들은 극성에 따라 전극에 흡수되거나, 중성원자에 부착되어 음이온을 형성한다. 이후 이온들이 모두 소멸될 때까지 전계의 세기는 이온의 영향으로 변화한다.

국부적으로 전계가 다시 집중되면 상기 과정이 반복되어 전계가 집중된 부분에서만 절연파괴가 일어나는 현상을 국부방전 또는 코로나 방전이라고 한다^[16, 17].

내부방전은 절연물의 내부에서 발생하는 현상으로, Void방전 및 전기 트리방전으로 구별할 수 있다. 초기 Void방전이 진전되면 절연물 내부에 수지상의 전기 트리가 발생하며, 절연파괴가 진행된다.

절연물의 내부에 Void가 형성될 수 없는 조건으로 설계 및 공정을 하지만, 제조 과정, 운반 및 운전 중에 발생하는 전기적, 열적, 기계적 및 환경적 스트레스 등으로 인해 절연물 내에 Void가 형성되면 절연파괴가 발생한다.

그림 2.3과 같이 고체 절연물 내부에 Void가 있을 경우, 고체 절연물의 유전율이 크기 때문에 상대적으로 절연내력이 낮은 Void에 전계가 집중되며, 방전이 발생한다. 방전에 의하여 Void는 열적, 화학적 열화가 촉진되고 그 크기가 증가하여 절연물의 유효 절연성능이 감소하게 된다.

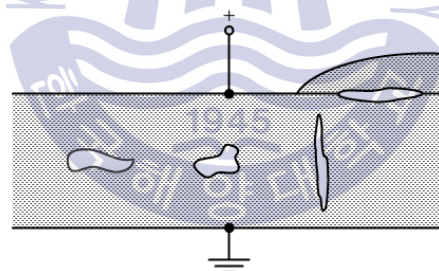


그림 2.3 내부방전

Fig. 2.3 Internal discharge

연면방전은 그림 2.4와 같이 절연물의 표면에 먼지 또는 습기 등이 부착되거나, 부적절한 절연 설계 등에 의해 누설 거리가 감소하여 방전이 발생한다. 절연물 표면에서 열화가 발생되기 때문에 초기에는 절연 성능에 직접적인 문제가 발생하지 않는다.

그러나 연면방전에 의해 발생된 고주파 전압이 교류 전압에 중첩되면 전기적 스트레스가 발생되어 절연물이 손상된다. 또한 지속적으로 연면방전이 발생하면 절연물 표면에 침식 또는 부식이 발생되고, 절연물 표면이 발열되어 탄화 도전로(Carbonized conductive-path)가 형성되면서, 절연물의 전기적·기계적 특성이 저하된다.

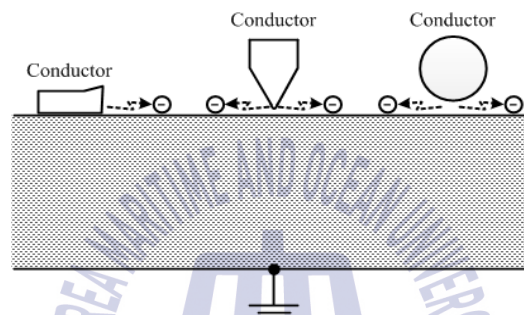


그림 2.4 연면방전

Fig. 2.4 Surface discharge

전원 용량에 따라 차이가 있지만, 연면방전이 지속적으로 발생하면 일반적으로 글로우 방전의 형식으로 이루어지며 최종적으로는 아크방전으로 진전한다.

부분방전은 교류전압, 직류전압 및 임펄스전압 등과 같이 인가되는 전압에 따라 고유의 특성을 가지게 된다. 교류전압에서 절연물 내부에 결함이 있는 경우, 부분방전의 발생 메커니즘은 그림 2.5의 등가회로와 같다. I영역은 절연물에 Void가 존재하는 것이며, II영역은 절연물에 결함이 없는 부분이다. Void의 정전용량은 c 로 결함 부분을 나타내며, b 는 Void와 직렬로 접속되는 나머지 부분의 정전용량이다. a 는 건전한 부분의 정전용량을 나타낸다.

절연물에 Void가 존재하는 경우, 교류 전압이 인가되면 결함내의 c 에 전계가 집중되고, 공기의 절연내력 이상으로 되면 Void 내부에서 부분방전이 발생한다.

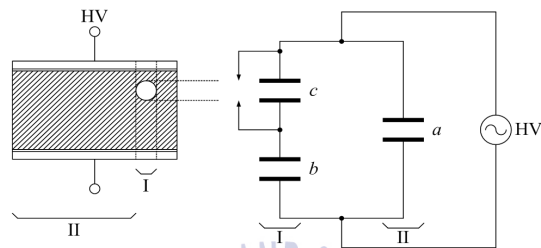


그림 2.5 교류 전압에서 부분방전의 등가회로

Fig. 2.5 Equivalent circuit of PD under AC voltage

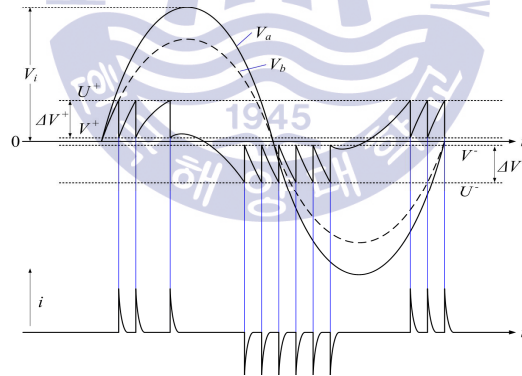


그림 2.6 교류 전압에서 부분방전의 발생 패턴

Fig. 2.6 Occurrence pattern of PD under AC voltage

일반적으로 부분방전은 그림 2.6과 같이 인가 전압이 상승하는 부분에서 일정 시점에 도달할 때 방전 펄스가 발생되며, 전압이 감소하면 소멸된다.

인가 전압이 서서히 증가하면 전압 U 의 범위에서 Void에 방전이 발생하고, 다시 감소하는 시점에서 전압이 V 이하로 되면 방전이 소멸한다. 이와 같이 방전이 발생하는 전압 U 를 방전개시전압(Discharge inception voltage, DIV)이라 하고, 방전이 소멸되는 시점의 전압 V 를 방전소멸전압(Discharge extinction voltage, DEV)이라고 한다.

그림 2.6과 같은 방전 파형에서 Void에서 발생하는 방전 전하량 q_t 은 식 (2.3)과 같이 표현된다.

$$q_t \approx (b+c) \Delta V \quad (2.3)$$

여기서, $\Delta V = U - V$ 로 Void 내부에서 발생하는 전압 강하이다. 그러나 q_t 은 직접 검출이 불가능함으로 겉보기 전하를 측정함으로써 방전의 크기를 정의한다. 겉보기 방전 전하량 q 는

$$q = b \Delta V \quad (2.4)$$

식 (2.4)와 같다. 실제 시료에서의 전압강하는 $(b \Delta V) / (a + b)$ 이고, 부분 방전 검출 장치에서는 q 의 값이 측정된다. 방전 전하량 q 가 존재할 때, 방전 에너지는

$$P = \frac{1}{2} \times c \times (U^2 - V^2) = \frac{1}{2} c \times \Delta V \times (U + V) \quad (2.5)$$

식 (2.5)와 같으며, V 가 U 에 비하여 약 10 % 정도로 작을 경우, 식 (2.5)는 식 (2.6)과 같이 표현할 수 있다.

$$P = \frac{1}{2} \times c \times \Delta V \times U \quad (2.6)$$

그리고 $U = \frac{b}{(b+c)} V_i$ 이며, 여기서 V_i 는 시료에서 방전이 시작되는 방전개시전압이므로 식 (2.7)과 같이 정리된다.

$$P = \frac{1}{2} c \times \Delta V \times \frac{b}{(b+c)} V_i \quad (2.7)$$

식 (2.7)에서 b는 c에 비교하면 무시될 수 있는 값이므로

$$P = \frac{1}{2} \times b \times \Delta V \times V_i = \frac{1}{2} \times q \times V_i \quad (2.8)$$

식 (2.8)로 나타낼 수 있다.

절연물에서 발생하는 부분방전은 내부의 Void 또는 절연물의 경계면 등에서 발생하며 결함의 종류와 위치에 따라 고유의 특성을 갖는다. 절연물 내부에 제한적으로 존재하는 Void방전은 전압이 인가되면 방전개시전압에서 급격하게 방전 전하량이 증가하는 경향이 있다^[14].

직류 전압에서의 부분방전 특성은 교류와 다르게 전압에 크기와 위상의 변화가 없기 때문에 Void에서 부분방전이 발생하게 되면 공간 전하로 인한 반대 방향의 전계 때문에 방전이 소멸된다. 공간 전하가 유전체를 통해 소산되어 유도된 전계가 작아지면 부분방전이 다시 발생할 수 있다. 즉, 공간 전하는 누설에 의해 소멸되며 직류 전압에서 부분방전의 등가 회로는 그림 2.7과 같이 저항분이 포함된다^[18~21].

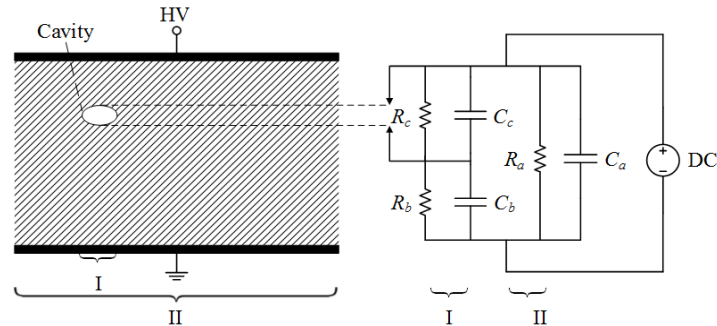


그림 2.7 직류 전압에서 Void방전의 등가회로

Fig. 2.7 Equivalent circuit of Void discharge under DC voltage

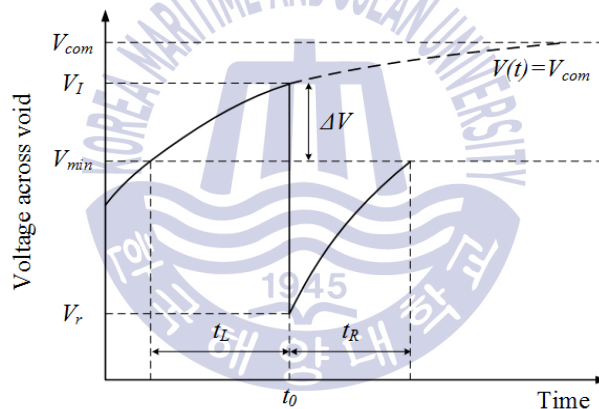


그림 2.8 Void에 인가되는 전압

Fig. 2.8 Applied voltage across Void

직류 전압에서 Void에 인가되는 전압은 그림 2.8과 같다. 부분방전의 발생 조건은 초기 전자 및 전계 강도에 영향을 받는다. 초기 전자는 방사선이나 전계 방출과 같이 외부 또는 이전 방전으로부터 형성된다. Void에 인가되는 전압이 최소 절연파괴 전압(V_{min})에서 실제 방전개시전압까지 상승하는데 걸리는 시간 지연(time lag, t_L)이 필요하다.

t_0 에서 방전이 발생하면 반대 전계로 인해 Void의 전압이 잔류 전압 (residual voltage, V_r)으로 감소한다. 방전이 다시 일어나려면 회복 시간 (recovery time, t_R) 내에 인가 전압이 잔류 전압에서 최소 절연파괴 전압 이상으로 증가해야 한다. 직류 전압 인가 시, 펄스의 반복률은 식 (2.9)와 같이 인가 전압(V)과 유전체의 도전율(δ)에 따라 증가한다.

$$f = 1.13 \times 10^{11} \delta \left(\frac{V}{V_i} \right) \quad (2.9)$$

여기서 V_i 는 방전개시전압이다. 그러나 부분방전은 Void 내 여러 곳에서 발생할 수 있기 때문에 실제로 측정되는 반복률은 Void가 클수록 증가하게 된다.

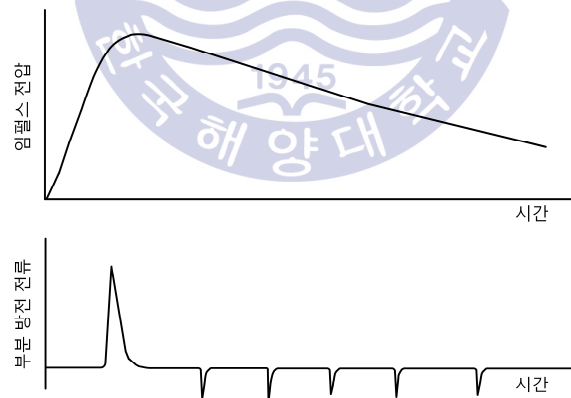


그림 2.9 임펄스 전압에서의 부분방전

Fig. 2.9 PD under impulse voltage

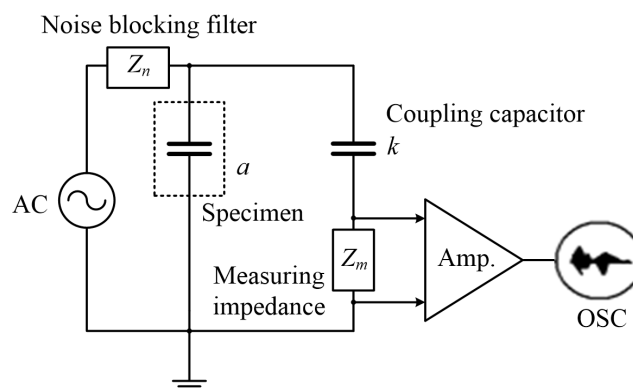
임펄스 전압에서의 부분방전 특성은 파두가 짧고 파미가 길기 때문에 그림 2.9와 같이 교류의 반주기에서 발생한 형태와 유사하다.

첫 번째 부분방전은 Void의 방전개시전압 보다 높은 전압에서 발생한다. 임펄스 전압의 파두가 빨리 상승되기 때문에, 첫 번째 부분방전은 임펄스 파형의 최댓값에 도달할 때까지 지속되며, 정점에 도달한 뒤 방전 펄스의 극성은 바뀌게 된다. Void에서 방전이 발생하는 곳이 많기 때문에, 크기가 다른 펄스가 파미에서 발생하게 된다.

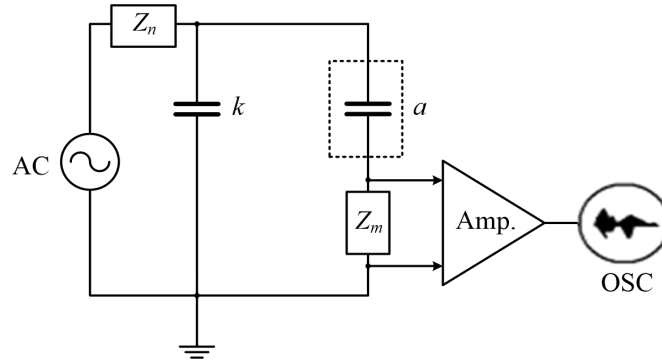
2.2 측정 및 분석 기술

부분방전이 발생하면 전하의 이동으로 인해 전류 형태의 펄스 및 물리·화학적 신호가 형성되며, 이를 측정하는 방법으로 'IEC 60270법에 의한 방법', 'UHF 대역의 전자파 검출' 및 초음파를 측정하는 '음향 검출법' 등이 있다.

IEC 60270법에서 제시하는 검출 방법의 기본 회로는 그림 2.10과 같다. 전류 펄스 형태의 부분방전을 커플링 커패시터와 임피던스를 이용하여 측정한다. 임피던스의 연결 위치는 2.10(a)와 같이 커플링 커패시터 k 와 직렬 또는 (b)와 같이 시료 a 와 직렬 연결하는 방법이 있다.



(a) 커플링 커패시터(k)와 임피던스의 직렬 연결



(b) 시료와 임피던스의 직렬 연결

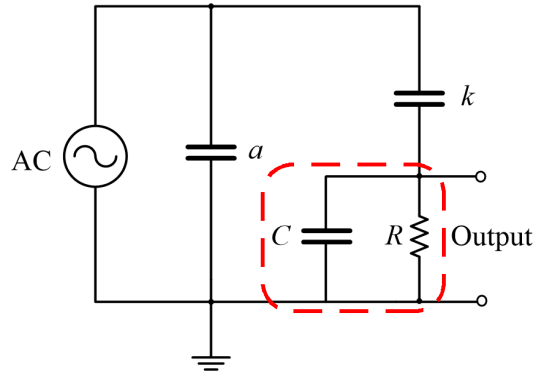
그림 2.10 IEC 60270법 검출회로

Fig. 2.10 Detection circuit of IEC 60270 method

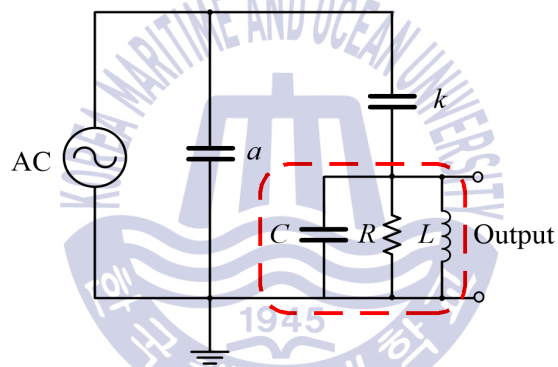
실제 적용률이 높은 방법은 커플링 커패시터와 임피던스를 직렬로 연결하는 그림 2.10(a)의 회로이다. 이는 (b)와 같이 실험할 경우, 시료에서 큰 방전이 발생하여 측정 장치에 과도 전류가 유입되면 회로 및 장비가 소손될 수 있기 때문이다.

측정 시스템은 고전압 발생장치, 노이즈 제거 필터(Noise blocking filter, Z_n), 커플링 커패시터(Coupling capacitor, k), 임피던스(Measuring impedance, Z_m) 및 증폭기(Amplifier) 등으로 구성된다. 외부로부터 유입되는 전도성 노이즈 및 부분방전 신호가 전원으로 유출되는 것을 방지하기 위하여 저항과 인덕턴스를 사용하여 폐회로를 구성한다. 검출회로는 직접 검출회로(Straight detection circuit)와 평형 검출회로(Balanced detection circuit)의 두 가지 방법이 있다.

직접 검출회로는 그림 2.11과 같이 검출 저항 R 에 표류 정전 용량이 병렬 접속된 RC 적분회로와 RLC 동조회로의 두 가지 방법이 있다.



(a) RC 적분 회로



(b) RLC 동조 회로

그림 2.11 직접 검출 회로

Fig. 2.11 Straight detection circuit

그림 2.11(a)와 같은 RC 회로에서 임펄스 전압은 식 (2.10)과 같다.
 q 는 방전의 크기, $q = b \cdot \Delta V$ 이고,

$$V = \frac{q}{a + C(1 + \frac{a}{k})} \exp(-\frac{t}{Rm}) \quad (2.10)$$

회로의 합성정전용량 m 은 식 (2.11)과 같다.

$$m = \frac{ak}{a+k} + C \quad (2.11)$$

그림 2.11(b)의 RLC 동조회로에서 임펄스는 RC 회로와 동일한 파고치로부터 감쇄 진동하게 되고, 출력 전압은 다음과 같다.

$$V = \frac{q}{a + C(1 + \frac{a}{k})} \exp(-\frac{t}{2Rm}) \cos \omega t \quad (2.12)$$

여기서, $\omega = \sqrt{\frac{1}{Lm} - \frac{1}{4R^2m^2}}$ 이고, m 은 회로의 합성 정전 용량으로 식 (2.11)과 같다.

식 (2.10) 및 식 (2.12)에서와 같이 검출 저항 양단의 출력 전압은 방전 전하 q 와 커플링 커패시터 k 에 비례하며, 방전 전하의 크기는 출력 전압으로 산출할 수 있다. 부분방전을 검출하기 위해서는 시료에 따라 부분방전 펄스의 주파수가 다르기 때문에 RLC 정수를 적절히 조절해야 한다.

평형 검출회로는 고압 변압기 및 접속 단자에서 발생하는 방전 또는 코로나 등의 노이즈를 제거할 수 있다. 평형 검출회로는 시료 a 및 커플링 커패시터 k 에 각각 총 2개의 검출 임피던스를 연결하고, 임피던스에서 검출된 신호는 차동 증폭기를 통해 측정된다. 시료와 커플링 커패시터의 용량이 동일하고 검출 임피던스가 같은 경우, 외부 노이즈는 상쇄되고 방전 신호는 반대 극성의 동일한 신호가 검출되므로 최종 출력은 방전 신호의 두 배가 된다. 실제 적용에 있어서는 그림 2.12에 나타난 회로와 같이 응용할 수 있다.

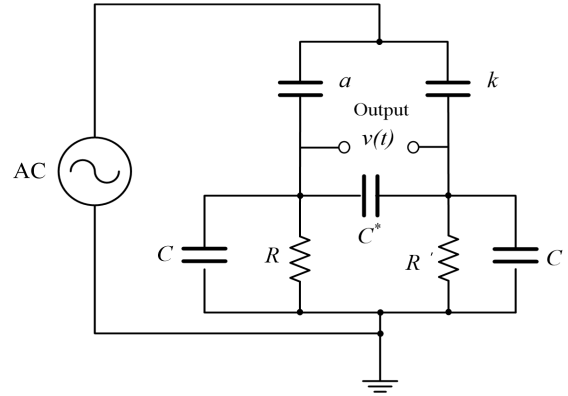


그림 2.12 평형 검출회로

Fig. 2.12 Balanced detection circuit

그림 2.12에서 검출 임피던스에서 측정되는 부분방전의 전압은

$$v(t) = \frac{a}{a + C + (n + 1)C^*} \times e^{-t/\tau} \quad (2.13)$$

식 (2.13)과 같다. 여기서, C 및 C^* 는 회로 사이에 존재하는 표류 정전 용량이고, n 은 검출회로의 평형 정도를 나타내는 값으로 식 (2.14)와 같이 표현되며, τ 는 회로의 시정수로 식 (2.15)와 같다.

$$n = \frac{a}{k} = \frac{R'}{R} = \frac{C'}{C} \quad (2.14)$$

$$\tau = R \times [a + C + (n + 1)C^*] \quad (2.15)$$

평형 검출회로는 직접 검출회로와 비교 시, 외부에서 발생하는 방전 신호 및 노이즈를 상쇄할 수 있는 장점이 있다^[12, 13].

전자파란 그림 2.13과 같이 전기장과 자기장이 수직 방향으로 동반하여 파가 진행되는 방향으로 수직 진동하는 전기적 횡파가 생성되는 것을 의미한다.

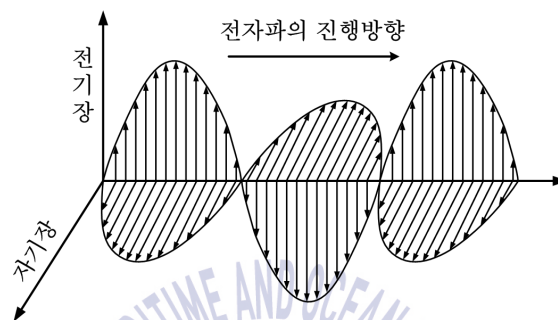


그림 2.13 전자파의 발생과 전파

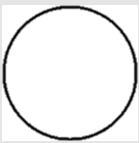
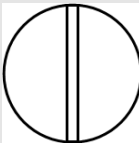
Fig. 2.13 Occurrence and propagation of electromagnetic wave

전자파의 성질은 반사, 산란, 회절 및 굴절의 특성을 가지고 있다. 전자파의 진행 경로에 도체가 있을 경우, 전자파의 성질에 의해 거의 모든 에너지가 전류로 변화하여 도체에 도통하게 된다. 이와 같이 전자파의 특성을 응용하여, 도체로 만들어진 안테나로 300 MHz ~ 3 GHz 범위의 신호를 검출한다. 이는 비접촉식으로 검출 감도가 좋고, 광대역이기 때문에 하나의 센서로 광범위한 측정이 가능하고, 다수의 센서로 위치 추정도 가능하다. 또한 가스절연개폐장치의 탱크 내부에 설치할 경우 외부 노이즈의 영향이 적어 부분방전 검출에 가장 많이 적용되고 있다. UHF센서의 종류와 특성을 표 2.1에 나타내었으며, Semicircular dipole센서가 많이 사용되고 있다. UHF 검출법을 이용할 때 방송(470 MHz ~ 800 MHz) 및 통신(800 MHz ~ 2,300 MHz) 대역의 노이즈를 고려해야 한다^[22~25].

표 2.1 UHF 센서의 종류와 특성

Table 2.1 Types and characteristics of UHF sensors

(●: 우수, ○: 양호, ×: 나쁨)

형 태					
안테나	Disk	Semicircular dipole	Monopole	Logarithmic periodical	Spiral
감 도	○	●	●	●	●
주파수 대역	●	●	×	●	●
지향성	●	○	○	○	○
크 기	○	○	○	×	×
조 합	●	●	×	×	×
평 가	○	●	×	×	×

전력설비에서 부분방전이 발생할 때, 수 십 kHz ~ 1 MHz의 음향 신호가 발생한다. 음향신호는 전력 설비 내 매질을 통해 탄성 진동파로 전파되어, 외부에 설치된 AE센서에 의해 검출된다.

AE센서는 내부 압전 진동자를 이용하여 기계적 진동을 전기적 신호로 변환과 증폭을 통하여 부분방전을 검출 할 수 있다. 마그네틱 홀더를 이용하여 AE센서를 외함에 설치하기 때문에 측정이 간편하고 절연에 대한 문제가 없다.

음향 신호의 측정 회로는 그림 2.14와 같이 AE센서, 역결합 회로 (Decoupler), 증폭 회로 및 필터 등으로 구성된다. 센서를 통해 검출된 음향 신호가 매우 미소하기 때문에 증폭 회로와 필터가 필요하다.

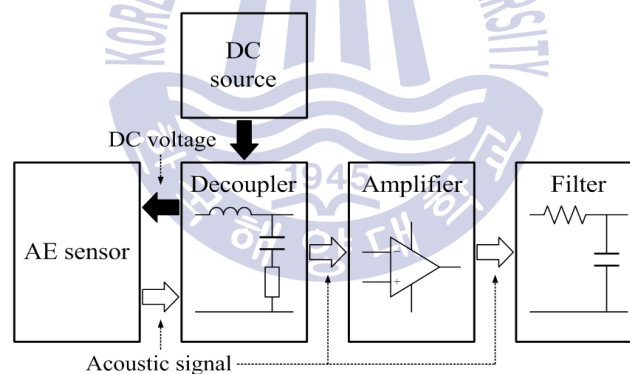


그림 2.14 음향 신호의 검출회로

Fig. 2.14 Detection circuit of AE signal

특히, 음향 검출법은 전력설비에 여러 개의 센서를 설치하여 부분방전 신호의 도달 시간차를 분석함으로써, 방전의 발생위치를 추정할 수 있는 방법이다. 그러나 직접적으로 측정할 수 있는 전기적 검출보다 상대적으로 감도가 낮다.

AE센서의 측정 범위는 20 kHz ~ 1 MHz 정도이다. AE센서의 압전 소자는 일반적으로 페로브스카이트(Perovskite)형으로 불리는 강유전체를 사용한다. 압전 효과는 정(正)압전 효과와 역(逆)압전 효과로 구별된다.

정압전 효과란 압전 소자 양면에 압력을 가하면 위쪽 전극에는 양 전하(+), 아래쪽 전극에는 음 전하(-)가 대전되고, 신장력을 가하면 그 반대의 전하가 대전되어 전압이 발생하는 것을 의미한다.

역압전 효과는 압전 소자 양면에 직류(DC) 전압을 가하면 압전 소자의 내부 전하와 인가 전하 사이에서 인력과 척력이 작용하여 소자의 수축과 신장이 발생하게 된다. 일반적으로 AE센서는 협대역과 광대역으로 구별되며, 협대역은 그림 2.15(a)와 같이 센서의 검출면 내부에 압전 소자를 붙여 전달된 음향신호를 검출한다.

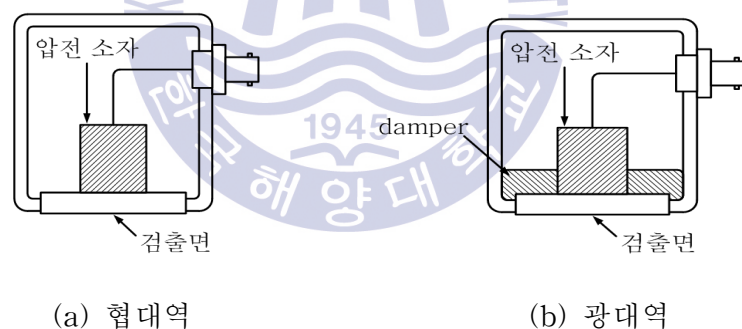


그림 2.15 AE센서의 구조

Fig. 2.15 Structure of AE sensor

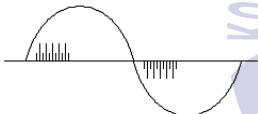
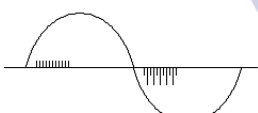
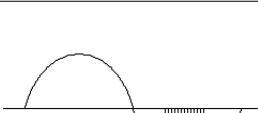
광대역은 그림 (b)와 같이 완충재(Damper)를 사용하여 압전 소자의 주위를 감싸는 구조이며, 공진을 억제시켜 넓은 주파수 대역의 신호를 검출한다^[26~28].

부분방전의 분석 기술은 다양한 방법으로 개발되어 있다. 대표적으로 교류전원에서 사용되는 PRPD(Phase resolved partial discharge) 기술이 있다. PRPD는 교류용 고전압 설비에서 HFCT, UHF 및 AE센서 등을 통하여 부분방전 펄스를 측정하여 분석한다.

인가 전압에 따른 위상(φ), 전하량(q) 및 발생 횟수(n)를 누적하거나, 순차적인 시퀀스로 분석하여 결함 원인을 판별한다. 대표적인 부분방전 펄스의 위상분포는 표 2.2와 같다.

표 2.2 부분방전 펄스의 위상 분포

Table 2.2 Phase distribution of PD pulses

위상 패턴	특 성	원 인
	• 정극성 및 부극성 동일	• Void방전 • 전극의 연면방전
	• 한쪽 극성에서 방전이 크게 발생	• 정극성 : 고압측 • 부극성 : 접지측
	• 동일한 크기의 방전이 한 쪽 극성 침투값에서 발생	• 가스 절연체내 전극의 침예한 부분에서 방전 발생
	• 영점 주변에서 방전 펄스 발생	• 금속 부근이나 반도체층 불완전 접촉으로 발생
	• 극성에 따라 크기 동일, 펄스 수 다름	• 액체 절연체내 전극의 침예한 부분에서 발생

직류 전압은 위상이 없기 때문에 교류의 PRPD 방법을 적용할 수 없다. 따라서 직류 전압에서는 TRPD(Time resolved partial discharge) 분석법을 적용하여 부분방전을 분석한다. TRPD는 방전 크기(q_i)와 방전 발생시간(t_i)을 분석하는 것으로써, 그림 2.16과 같다. 두 번째 측정된 부분방전 펄스를 기준으로 첫 번째, 세 번째 등 연속적으로 발생하는 펄스의 시간 차(Δt)를 분석한다. $q(\Delta t_{pre}) = t_i - t_{i-1}$, $q(\Delta t_{suc}) = t_{i+1} - t_i$ 로 정의되며, $H(q)$ 와 $H(\Delta t)$ 는 방전 크기와 시간차에 대한 밀도를 나타낸다. TRPD 분석법의 예를 그림 2.17에 나타내었다^[21, 29, 30].

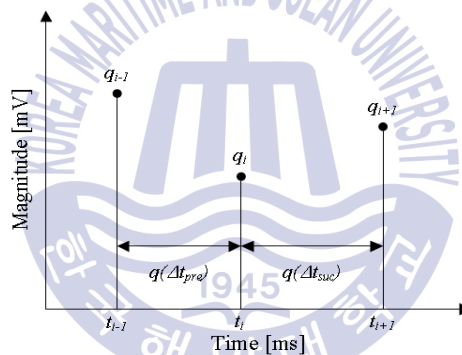
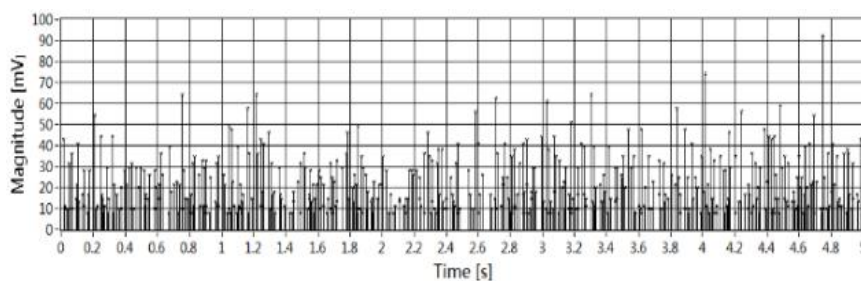
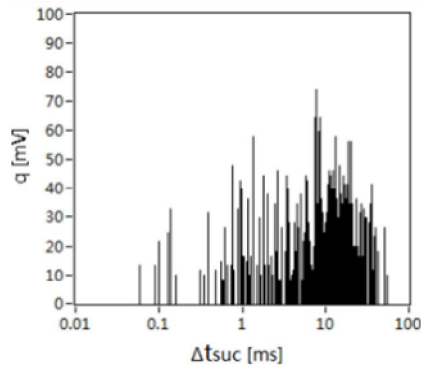


그림 2.16 TRPD의 원리

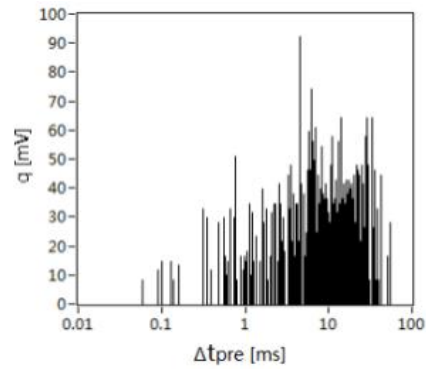
Fig. 2.16 Principle of TRPD



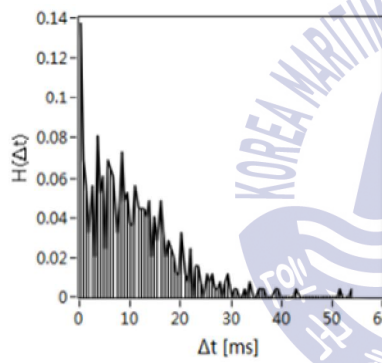
(a) TRPD



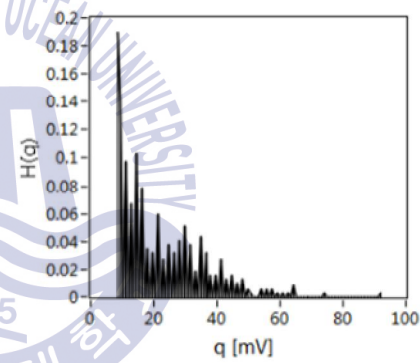
(b) $q(\Delta t_{\text{pre}})$



(c) $q(\Delta t_{\text{suc}})$



(d) $H(q)$



(e) $H(\Delta t)$

그림 2.17 TRPD의 예

Fig. 2.17 Example of TRPD

TF(Time-frequency)법은 정해진 시간동안 신호의 주파수와 시간에 대한 진폭 변화를 분석하는 것으로, 처리속도가 빠르고 측정된 신호의 크기, 극성 및 노이즈 검출에 용이하여 결함 판별이 가능하다.

그림 2.18은 TF법의 신호처리 시스템의 구조이며, 부분방전을 측정하고 정규화 과정을 통해 신호를 처리한다.

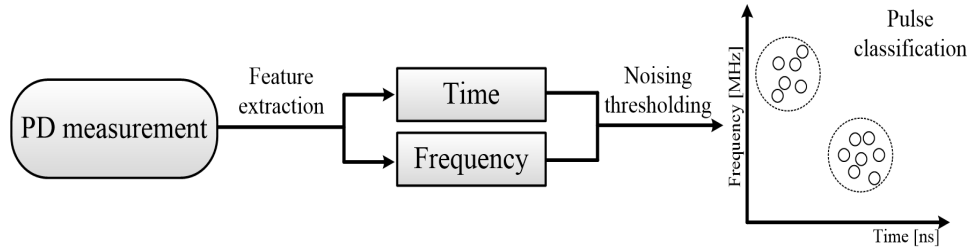


그림 2.18 신호처리 시스템의 구조

Fig. 2.18 Structure of signal processing system

정규화된 신호는 식 (2.16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{s}(t) = \frac{s(t)}{\sqrt{\int_0^T s(t)^2 dt}} \quad \because s(t) \in [0, T] \quad (2.16)$$

통계학의 표준 편차를 이용하여 펄스 파형을 이차 함수로 표현한 식은 (2.17) 및 (2.18)과 같다. 이때 σ_T 와 σ_F 는 각각 시간과 주파수 영역에서의 표준 편차이다.

$$\sigma_T = \sqrt{\int_0^T (t - t_0)^2 \tilde{s}(t)^2 dt} \quad (2.17)$$

$$\sigma_F = \sqrt{\int_0^\infty f^2 |\tilde{s}(f)|^2 df} \quad (2.18)$$

$\tilde{s}(f)$ 는 $\tilde{s}(t)$ 의 푸리에 변환 형식이며, t_0 는 정규화 된 신호의 무게 중심
으로 식 (2.19)와 같이 표현된다.

$$t_0 = \int_0^T t \tilde{s}(t)^2 dt \quad (2.19)$$

상기 식을 이용하여 부분방전 신호를 TF법으로 분석할 수 있으며, 노이즈를 제거한 후, TF법의 예를 그림 2.19에 나타내었다^[31~34].

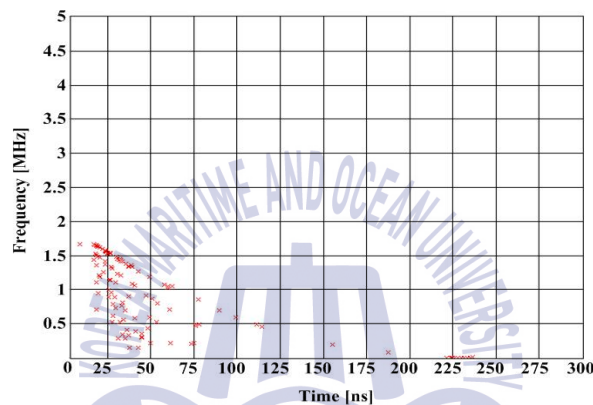


그림 2.19 TF법의 예

Fig. 2.19 Example of TF map

펄스 파형 분석은 인가된 전원 주파수(60 Hz)의 정극성(Positive polarity, $0^\circ \sim 180^\circ$)과 부극성(Negative polarity, $181^\circ \sim 360^\circ$)에서 측정된 부분방전 펄스를 시간과 물리적 형상으로 분석하여 부분방전의 특성을 판별하는 방법이다.

부분방전 펄스는 발생 후, 그림 2.20과 같이 감쇄 진동하는 형태이며, 첫 번째 발생한 제1진동과 두 번째 발생한 제2진동으로 구별한다. 각 진동에 대해 상승 시간(T_r)은 0%에서 최고치(V_{max})의 100%까지 상승하는데 걸린 시간, 하강 시간(T_f)은 100%에서 0%까지 하강하는데 걸린 시간이며, 이들 시간의 합을 진동 폭(T_w)으로 분석한다^[35, 36].

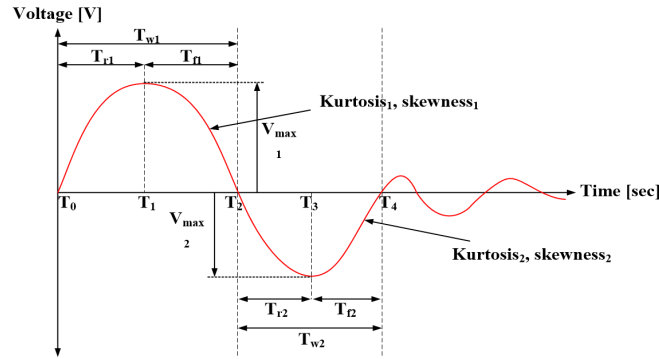


그림 2.20 펄스의 파라미터

Fig. 2.20 Parameters of pulse

또한 첨도(Kurtosis)와 왜도(Skewness)를 이용하여, 부분방전의 펄스를 분석하는 물리적 형상법이 있다.

첨도는 그림 2.21(a)와 같이 펄스 중앙 부분의 첨예(尖銳)한 정도를 분석하는 것으로, 그 값이 양(+)일 경우 급첨(Leptokurtic)이라 하며, 음(-)일 경우 평첨(Platykurtic)이라고 한다. 0일 경우, 정규 분포를 이루며 정상 분포(Mesokurtic)라고 한다.

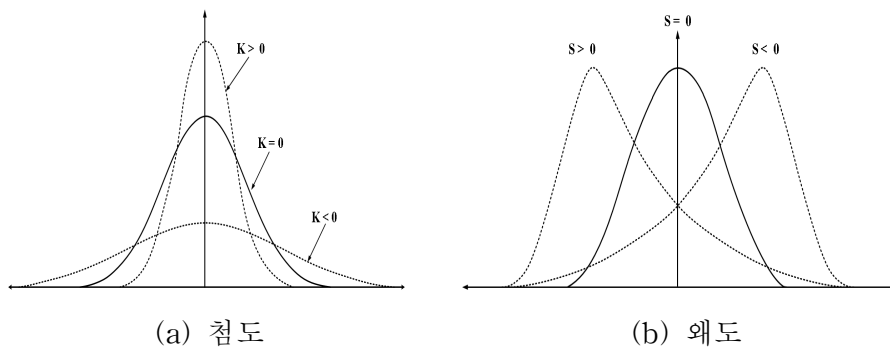


그림 2.21 첨도와 왜도

Fig. 2.21 Kurtosis and skewness

왜도는 그림 2.21(b)와 같이 펄스 형상의 대칭성을 분석하는 것으로, 0보다 크면 우측으로 긴 꼬리를 갖는 양의 왜도(Positive skew)가 되고, 0보다 작으면 좌측으로 긴 꼬리를 갖는 음의 왜도(Negative skew)가 된다. 첨도와 왜도는 각각 다음 식 (2.20), (2.21)로 나타낼 수 있다. 이때 μ 는 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 인 값의 평균이며, σ^2 은 표준 분산이다^[37, 38].

$$K = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(x_i - \mu)^4}{(n-1) \cdot \sigma^4} \right] - 3 \quad (2.20)$$

$$S = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(x_i - \mu)^3}{(n-1) \cdot \sigma^3} \right] \quad (2.21)$$

3-PARD(Phase amplitude relation diagram)는 3상 각각의 부분방전 펄스 크기를 벡터합의 다이어그램으로 나타내는 것이다.

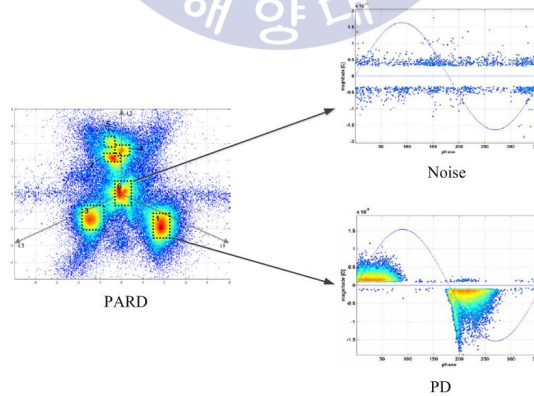


그림 2.22 3-PARD의 예

Fig. 2.22 Example of 3-PARD

3-PARD는 전력 케이블 3상의 동일한 위치에 센서를 설치하여 부분 방전 신호를 측정 후, 각 상의 크기 비교를 통해 부분방전의 신호와 노이즈를 판별하는 기법이다^[39].

웨이블릿 변환은 주어진 기본 함수를 팽창 또는 수축으로 스케일링하고, 이동한 결과로 생기는 함수들을 쌍대 빌딩 블록으로 이용하기 때문에 분석 영역이 시간-주파수 축에 대해 유연하다. 팽창은 스케일링 파라미터에 의해 조절된다. 이동은 시간 축에 대한 것이며 이동 간격은 척도에 따라 다르다.

웨이블릿의 빌딩 블록은 그림 2.23 및 식 (2.22)와 같이 적당하게 선택된 함수 $\psi(t)$ 의 척도와 이동으로 나타낸다.

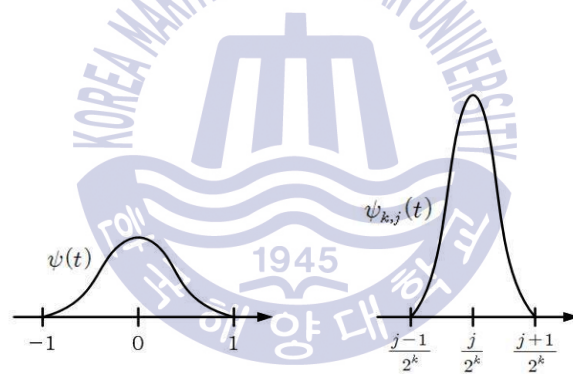


그림 2.23 $\psi(t)$ 의 척도와 이동

Fig. 2.23 Scaling and shift of $\psi(t)$

$$\psi_{k,j}(t) := 2^{k/2} \psi(2^k t - j), \quad k, j \in \mathbb{Z} \quad (2.22)$$

이때 기본함수 $\psi(t)$ 를 웨이블릿 또는 모 웨이블릿(Mother wavelet)이라고 부른다. 최초의 웨이블릿은 정규 직교 웨이블릿으로써 식 (2.23)과 같이 $L^2(\mathbb{R})$ 신호에 대한 완전한 재구성을 제공한다.

$$f(t) = \sum_k \sum_j c_{k,j} \psi_{k,j}(t), \quad c_{k,j} = \langle f, \psi_{k,j} \rangle \quad (2.23)$$

1987년 Daubechies는 매끄러우면서도 옹골 받침을 갖는 모 웨이블릿의 존재성과 구축 법을 개발하였는데 이것이 웨이블릿 발전의 원동력이 되었다. 직교가 아닌 일반적인 웨이블릿은 다음을 만족하며 식 (2.24)의 형태를 갖는 함수열로 정의된다. 임의의 신호 $f \in L^2(\mathbb{R})$ 에 대하여

$$f(t) = \sum_k c_{k,j} \psi_{k,j}(t), \quad \sum_{k,j} |c_{k,j}|^2 \approx \|f\|_2^2 \quad (2.24)$$

여기서 $\|f\|_2^2 := \int_{\mathbb{R}} |f(t)|^2 dt$ 는 신호 $f(t)$ 의 에너지이고, 기호 $A \approx B$ 의 의미는 A, B 에 독립한 어떤 양의 실수 C_1, C_2 가 존재하여 $C_1 \leq A/B \leq C_2$ 를 만족한다는 것이다^[40~43]. 웨이블릿을 이용하여 부분방전 펄스의 배경 노이즈를 제거한 예를 그림 2.24에 나타내었다.

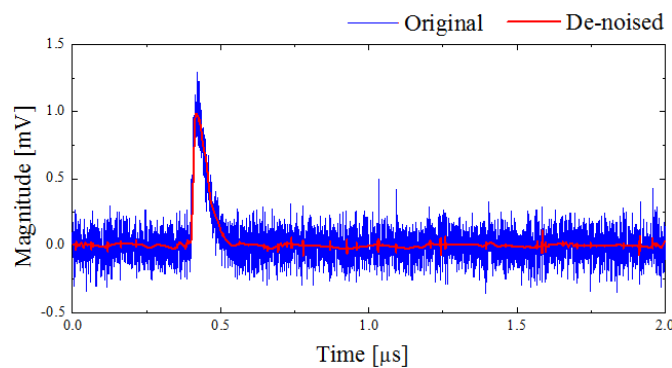


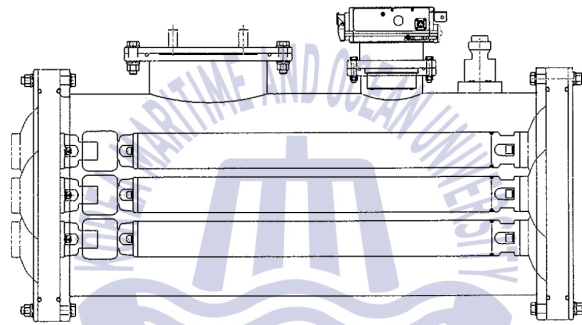
그림 2.24 웨이블릿 변환에 의한 노이즈 제거

Fig. 2.24 Noise elimination by wavelet transform

제 3 장 실험 및 분석

3.1 실험계

가스절연구조에서 발생하는 부분방전을 UHF센서로 검출하기 위하여 실험용 가스절연개폐장치를 그림 3.1과 같이 제작하였다. 직경 460 mm, 길이 1,160 mm이며, 윈도우에 UHF센서를 부착할 수 있는 구조이다.



(a) 도면



(b) 사진

그림 3.1 실험용 가스절연개폐장치

Fig. 3.1 Test chamber of GIS

최대 출력전압 50 kV, 출력전류 30 mA인 몰드형 고압 변압기를 사용하여 그림 3.2와 같이 실험계를 구성하였다. 순수 SF₆ 가스를 채우기 위해 진공 펌프 (120 ℓ/min.)로 모의 결함 내부를 10⁻³ torr까지 진공시켜 SF₆ 가스를 0.5 MPa 봉입하였다. 인가되는 전압은 분압기 (VD-100)를 사용하여 측정하였다.

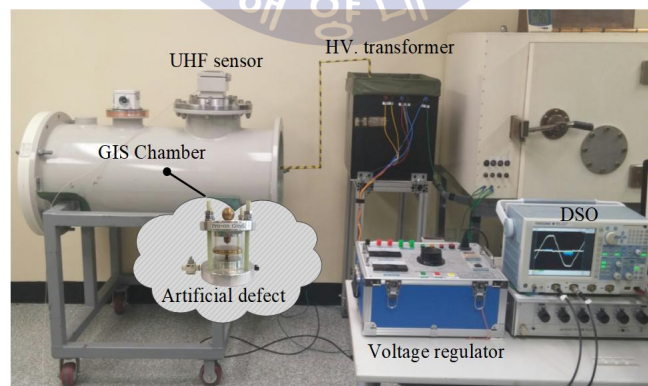
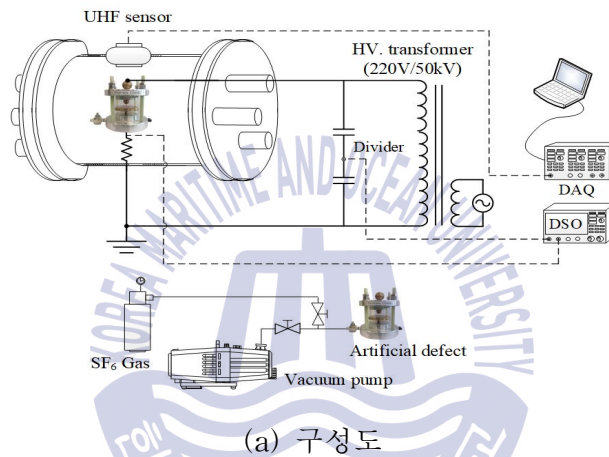


그림 3.2 실험계의 구성

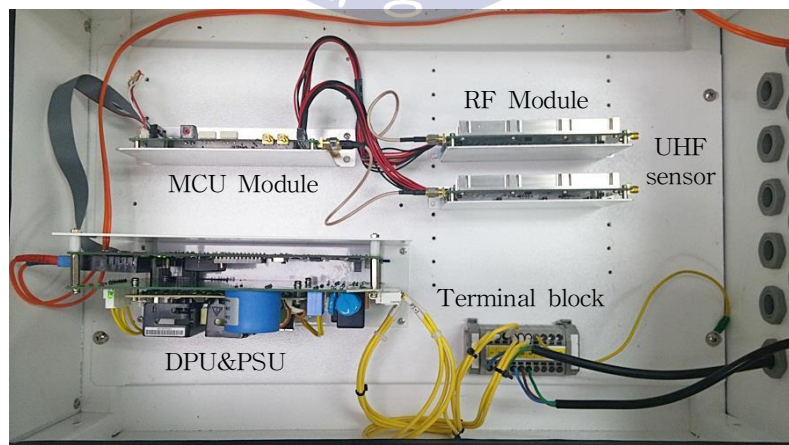
Fig. 3.2 Configuration of experimental setup

몰드형 고압 변압기를 광유(Mineral Oil)에 함침(含浸)시켜 접속부 주변에서 발생될 수 있는 코로나를 예방하였다.

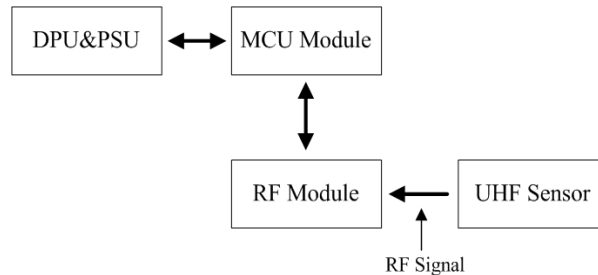
100 MHz ~ 2 GHz의 UHF센서를 그림 3.3(a)와 같이 실험용 가스절연개폐 장치의 윈도우에 설치한 후, 부분방전 펄스를 측정하였다. 실험이 진행되는 기간 동안 실험실 환경은 온도 10℃ ~ 15℃ 및 습도 20% ~ 35%였다.



(a) UHF센서



(b) 구성 모듈



(c) 신호 처리

그림 3.3 UHF센서의 구성

Fig. 3.3 Configuration of UHF sensor

UHF센서의 검출부는 그림 3.3(b), (c)와 같이 DPU & PSU, MCU Module, RF Module 및 UHF sensor로 구성된다.

DPU & PSU에서 DPU(Data process unit)는 MCU(Micro controller unit) Module로부터 수치화된 UHF센서 신호를 입력받고, 데이터 취득과 상위 Ethernet-Optic으로 외부 시스템과 통신하여 정보를 교환한다. 또한 RS422 및 RS232 등으로 구성되어 있어, HMI(Human machine interface)에서 요청하는 설정 및 상태를 관리할 수 있다. PSU(Power supply unit)는 장비에 필요한 전원을 공급한다. 입력전압은 AC 90 V ~ 270 V 또는 DC 120 V ~ 370 V이며, 출력전압은 DC 12 V로, 각 내부 유닛에 필요한 전원을 공급한다.

MCU Module은 RF(Radio frequency) Module에서 측정된 UHF센서의 데이터를 디지털 신호로 변환한다. 또한 측정된 데이터를 통해 DPU와 데이터 전달 및 측정에 필요한 설정을 수행한다.

RF Module은 UHF센서로부터 신호를 입력 받아 이를 아날로그 신호 형태로 출력하여 측정된 데이터 값을 MCU Module로 전송하는 역할을 한다.

3.2 모의 결함

가스절연개폐장치의 절연파괴 원인은 고체 절연물의 결함, 연결 부분간의 접촉 불량, 조립·설치 과정 중 불순물 유입 및 전력망의 변경·분리 과정에서 형성된 파티클 등이 있다. 실제 조립, 설치 및 운반 과정에서 금속 이물질의 혼입을 100% 차단하기는 어려운 실정이다^[44~46]. 이와 같이 가스절연개폐장치의 주요 절연파괴 원인 7종을 그림 3.4에 나타내었다.

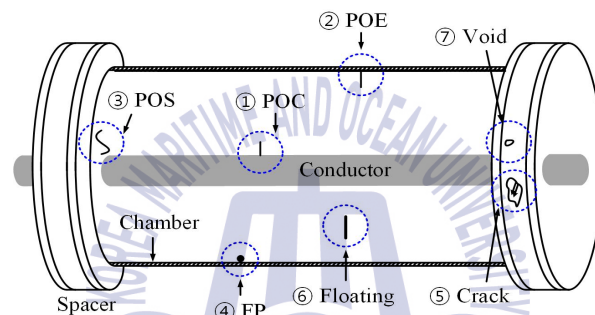


그림 3.4 가스절연개폐장치의 절연파괴 원인

Fig. 3.4 Causes of insulation breakdown in GIS

① Protrusion on conductor, POC(도체 돌출)

가스절연개폐장치의 여러 결함 중, 가장 주된 원인이 되는 것으로써 제작, 현장조립 및 운전과정에서 형성된다. 가스절연개폐장치는 절연거리의 축소를 통해 고전계 상태를 유지하므로 파티클 등의 불순물이 도체에 부착되면 절연능력이 감소하여 위험도가 더욱 커지게 된다.

② Protrusion on enclosure, POE(외함 돌출)

제작, 조립과정 또는 운송 중 충돌 등에 의해 외함 표면에 부분적으로 돌기가 형성되거나 불순물이 외함에 부착되어 결함이 발생한다.

가스절연개폐장치의 절연내력은 운전 상태에서 충분한 전계강도로 설계되어 정상 운전 상태에서는 사고가 거의 발생하지 않는 구조이지만, 뇌 충격전압이나 과도전압과 같은 급준파 전압이 발생하면 외함에 형성된 불순물에 전계가 집중되어 사고가 발생할 수 있다.

③ Protrusion on spacer, POS(스페이서 돌출)

스페이서 표면에 파티클이 부착되는 것으로, 고체 절연물의 결함을 의미한다. 표면 결함은 도전성 파티클 등에서 발생하는 부분방전으로 인해 절연물 표면의 절연내력이 파괴되는 경우이며, 섬락에 의한 트래킹 결함이 대표적인 사례이다.

④ Free particle, FP(자유 입자)

불순물이 가스절연개폐장치 내부로 유입되거나, 개폐 시 발생하는 파티클에 의해 부분방전이 발생하는 것이며, 전하의 이동으로 인하여 가스절연개폐장치 내부에서 파티클이 불규칙적으로 이동한다.

⑤ Crack inside spacer, Crack(크랙)

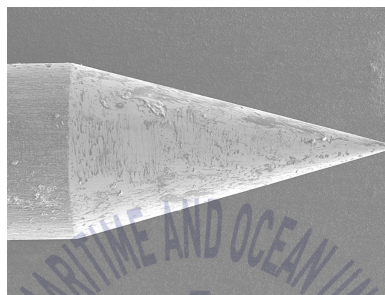
진동, 운반 및 조립 시, 스페이스에 가해진 충격으로 인하여 절연표면에 트래킹이 발생하여 절연물 표면의 고유성능이 저하된다.

⑥ Floating metal, Floating(부유 금속)

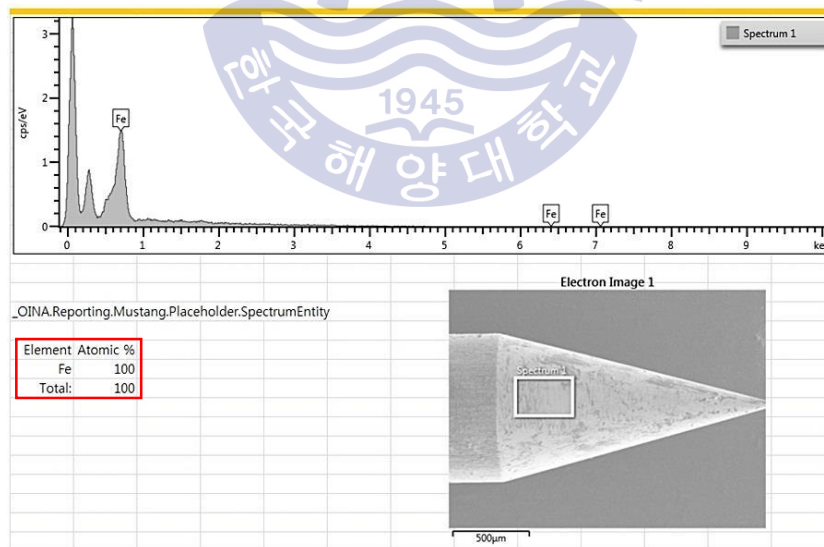
개폐기의 접촉부 또는 모선의 접속부분에서 불완전한 접촉이 발생할 경우 접촉부에서 아크가 발생하여 온도가 상승하게 된다. 이 경우 산화작용으로 인하여 전기적 결함이 진행되며 금속이 전극과 분리되어 부유전극으로 작용하게 된다.

⑦ Void inside spacer, Void(보이드)

스페이서의 밀도가 고르지 않거나, 내부에 공기층이 발생하였을 경우, 전계가 집중하여 부분방전이 발생되며, 제작과정에서 가장 많이 나타나는 결함의 원인이다.



(a) 침전극의 SEM/EDS 사진

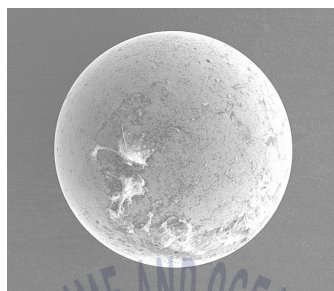


(b) SEM/EDS 성분 결과

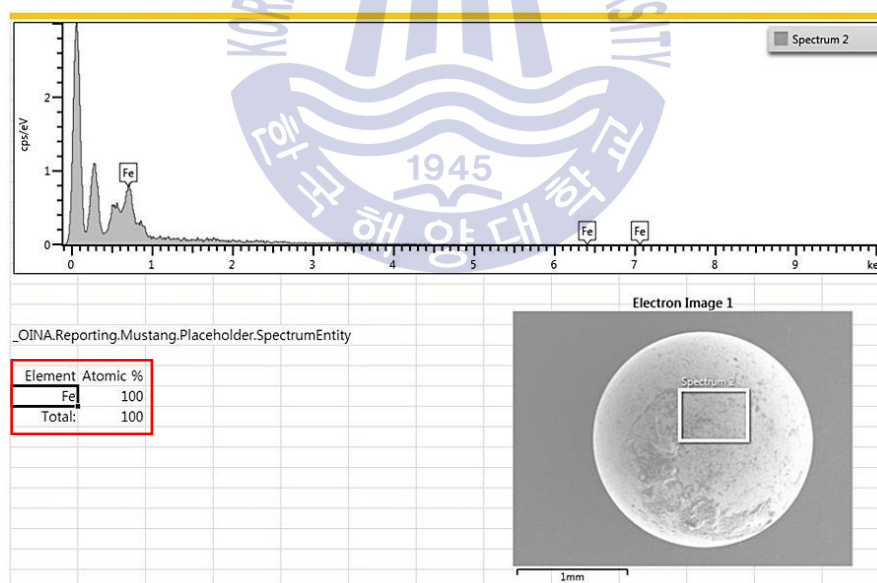
그림 3.5 POC 및 POE의 침전극

Fig. 3.5 Needle electrode of POC and POE

POC와 POE의 돌출부는 그림 3.5와 같이 곡률반경이 $10\ \mu\text{m}$ 침전극을 사용하였으며, SEM(Scanning electron microscopy)/EDS(Energy dispersive spectroscopy) 분석 결과, 100% 철(Fe) 성분이 검출되었다.



(a) 볼전극의 SEM/EDS 사진



(b) SEM/EDS 성분 결과

그림 3.6 FP의 볼전극

Fig. 3.6 Ball electrode of FP

FP의 전극은 그림 3.6과 같이 지름 2 mm, 철(Fe) 성분의 볼 형태를 사용하였다. Crack은 그림 3.7과 같이 지름 80 mm, 두께 5 mm의 에폭시 절연물을 임의의 형태로 절단한 후, 재부착하여 전극계를 제작하였다. Void는 그림 3.8과 같이 지름 80 mm, 두께 10 mm의 에폭시 절연물에 직경 2 mm의 Void를 가공하여 전극계를 제작하였다.



그림 3.7 Crack 전극계의 X-ray 사진

Fig. 3.7 X-ray photograph of Crack electrode

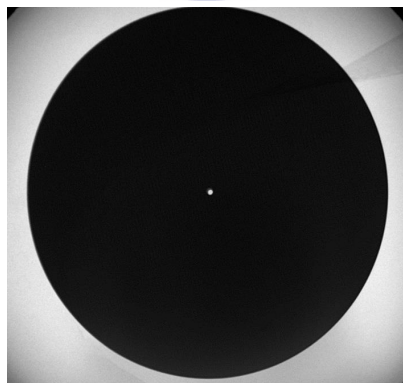
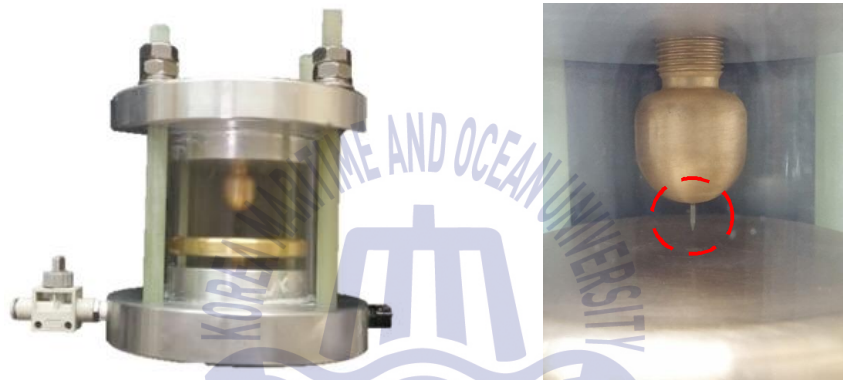


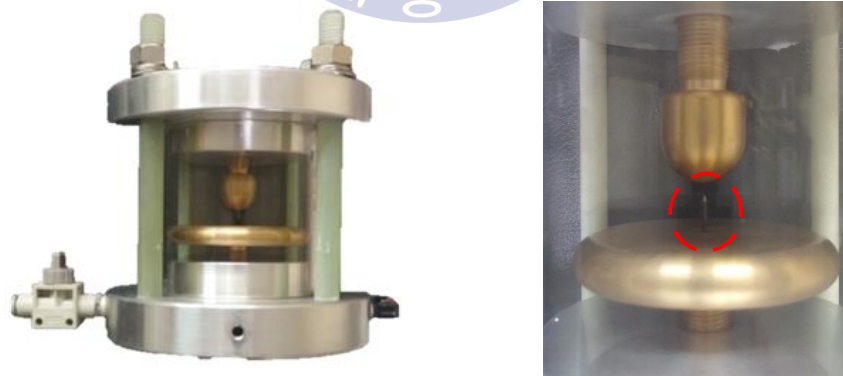
그림 3.8 Void 전극계의 X-ray 사진

Fig. 3.8 X-ray photograph of Void electrode

가스절연개폐장치에서 발생하는 결함을 그림 3.9와 같이 POC, POE, POS, FP, Crack, Floating 및 Void로 제작하였다. SF₆ 가스를 충전할 수 있는 구조이며, POC와 POE는 전극간격을 3 mm, FP는 전극 간격 5 mm로 설정하였다. POS는 스페이서 재질의 표면에 길이 11 mm 알루미늄 파티클을 부착시켰다^[47, 48].



(a) POC



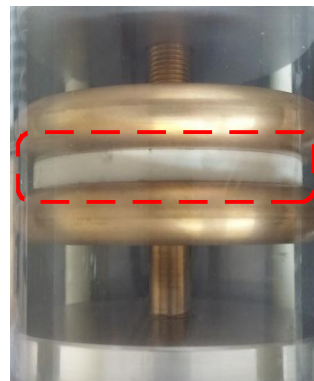
(b) POE



(c) POS



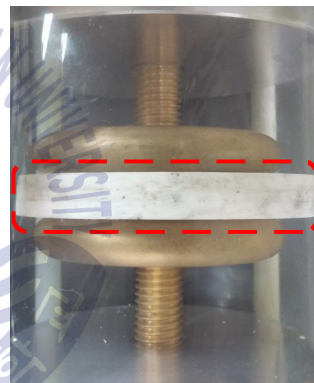
(d) FP



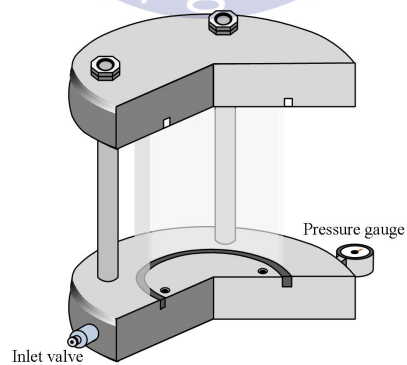
(e) Crack



(f) Floating



(g) Void



(h) 구조

그림 3.9 모의 결함의 형상

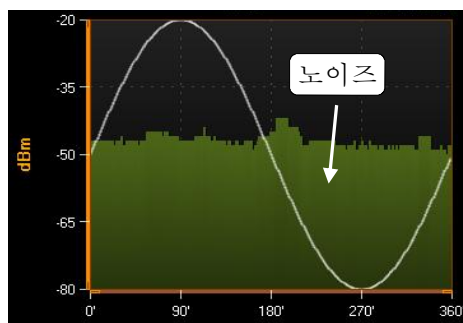
Fig. 3.9 Shapes of the artificial defects

3.3 부분방전 분석

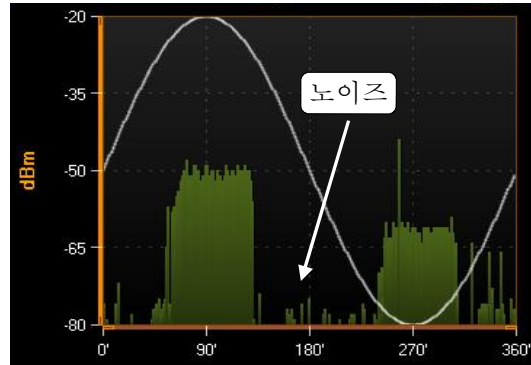
모의 결함 7종의 부분방전 특성을 분석하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 첫 번째, 부분방전을 측정하는 UHF센서의 주파수 대역과 감도를 선정하였다. 설정한 실험 조건에서 상대적으로 노이즈가 검출되지 않는 최적의 주파수 대역과 감도를 분석하였다. 두 번째, IEC 60270법과 UHF 센서의 전기적 특성을 비교하였다. 모의 결함별 방전개시전압을 측정한 후, 전기설비기술기준을 응용하여 방전개시전압에 1.25배 전압을 높였다. 이는 본 논문에서 제안하는 결함 판별 알고리즘의 현장 적용 시, 전압변동에 따른 부분방전의 특성을 분석하기 위한 목적이다. 세 번째, UHF센서의 출력 dBm과 방전 전하량 pC의 상관관계를 도출하였다. 방전개시전압을 기준으로 임의로 전압을 가변하여, 모의 결함별 dBm과 pC의 상관관계를 분석하였다.

가. 주파수 대역 및 감도

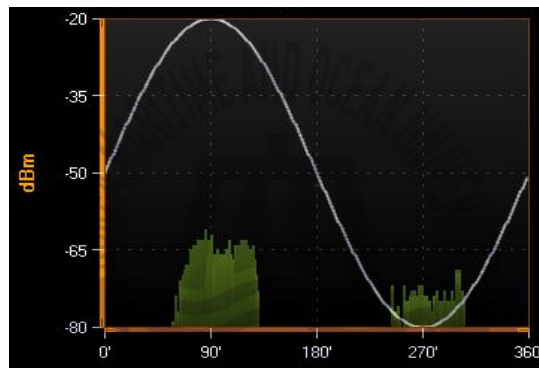
검출부의 BSF(Band stop filter)에 의해 부분방전 펄스와 노이즈가 분리되기 때문에, 최적의 검출 대역을 선정하기 위하여 POC에 23 kV를 인가한 후, 그림 3.10과 같이 주파수 대역을 분석하였다.



(a) 100 MHz ~ 2 GHz



(b) 100 MHz ~ 700 MHz



(c) 100 MHz ~ 700 MHz, 1 GHz ~ 1.4 GHz



(d) 1 GHz ~ 1.4 GHz

그림 3.10 부분방전의 주파수 대역

Fig. 3.10 Frequency band of partial discharge

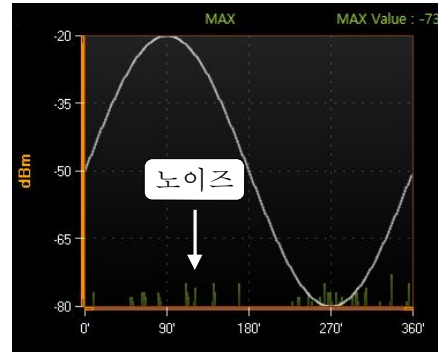
(a) 100 MHz ~ 2 GHz는 UHF센서의 전체 대역에서 부분방전을 측정할 과형이다. 부분방전 신호와 노이즈가 구별 없이 동시에 측정되어 부분방전의 신호를 분석할 수 없는 상태이다.

(b)는 100 MHz ~ 700 MHz 대역으로, POC 고유의 부분방전 클러스터가 형성되나, 노이즈가 상대적으로 많이 검출되어, 부분방전의 펄스 수는 적은 것으로 분석되었다.

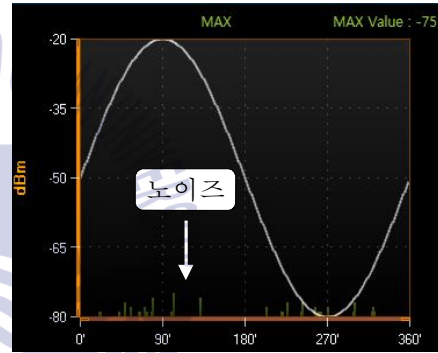
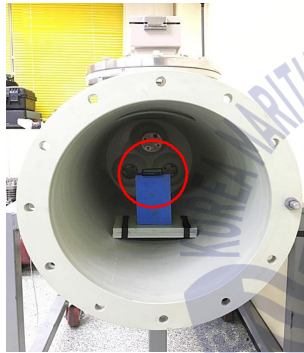
(c)는 100 MHz ~ 700 MHz와 1 GHz ~ 1.4 GHz이며, POC 고유의 부분방전 클러스터가 형성되었다. 또한 부분방전 펄스 수도 (b)보다 약 1.5배 많이 측정되었으며, 노이즈의 검출 비율도 가장 낮았다.

(d)는 1 GHz ~ 1.4 GHz로써, 부분방전 펄스보다 상대적으로 노이즈가 많이 측정되었다.

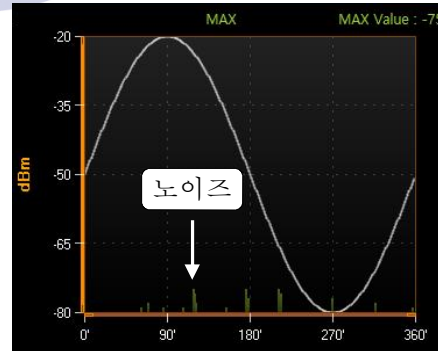
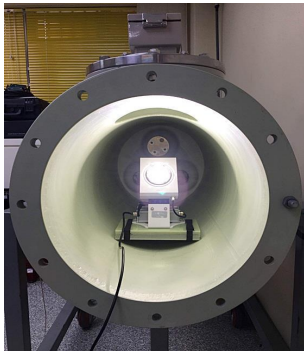
이들 실험을 통하여 BSF 4종의 대역 중, 노이즈의 검출이 가장 낮고, 부분방전의 발생 비율이 상대적으로 높은 (c)를 최적의 주파수 대역으로 선정하였다. 800 MHz ~ 900 MHz 및 1.5 GHz ~ 2 GHz는 각각 휴대폰(LTE) 대역으로 검출 대역에서 제외하였다.



(a) 실험실



(b) 휴대폰 통화 시



(c) LED 등기구 점등 시

그림 3.11 부분방전의 검출 감도

Fig. 3.11 Sensitivity of partial discharge detection

부분방전의 주파수 대역 100 MHz ~ 700 MHz와 1 GHz ~ 1.4 GHz으로 최적의 감도 실험을 그림 3.11과 같이 수행하였다. 그림 3.11(a)는 실험실 고유의 환경에서 UHF센서로 50초 동안 부분방전을 측정된 결과 -73 dBm 이하에서 노이즈가 측정되었다. (b)는 휴대폰 통화 상태에서 실험을 진행한 것으로 -75 dBm 이하에서 노이즈가 발생하였다. (c)와 같이 50 W LED(Light emitting diode) 등기구를 점등한 상태에서 배경 노이즈를 측정된 결과, -75 dBm 이하에서 노이즈가 측정되었다.

감도 실험 결과, 최소 -73 dBm 이하에서는 주변 노이즈가 검출되어, UHF센서에서 -70 dBm 이상 측정되는 신호를 부분방전으로 판단하였다.

나. IEC 60270법 및 UHF센서 측정

모의 결함 7종에 전압을 인가한 후, 방전개시전압을 20회 측정하여 평균 값을 표 3.1에 나타내었다. 방전개시전압은 UHF센서에서 -70 dBm 이상의 부분방전이 측정되는 가장 초기의 전압 값으로 선정하였다. 평균 방전개시 전압은 POC가 20 kV로써, 가장 낮은 FP 보다 약 2.5배 높았다. 현장 적용 시, 전압변동을 고려하여 방전개시전압을 기준으로 1.25배 전압을 높여 실험을 수행하여, IEC 60270법과 UHF센서로 측정된 부분방전의 전기적 특성을 비교하였다^[49].

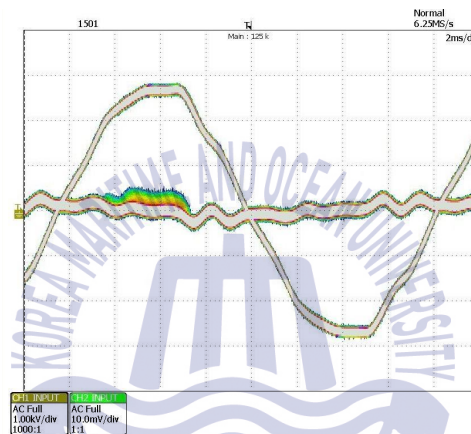
표 3.1 모의 결함의 종류에 따른 평균 방전개시전압

Table 3.1 Average DIV depending on defects

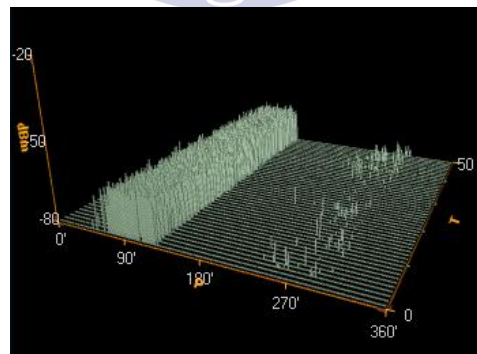
	POC	POE	POS	FP	Crack	Floating	Void
DIV [kV]	20	14	16	8	14	10	9

① Protrusion on conductor, POC

방전개시전압 20 kV 인가 시, 39° ~ 127°에서 부분방전의 클러스터가 형성되었다. UHF센서는 44° ~ 133°, 최댓값 -58 dBm이었다. 부극성 228° ~ 305°에서 부분방전이 일부만 측정되고, 최댓값은 -68 dBm으로 그림 3.12(b)와 같다. 평균 부분방전 펄스 수는 정·부극성에서 623개가 검출되었다.



(a) IEC 60270

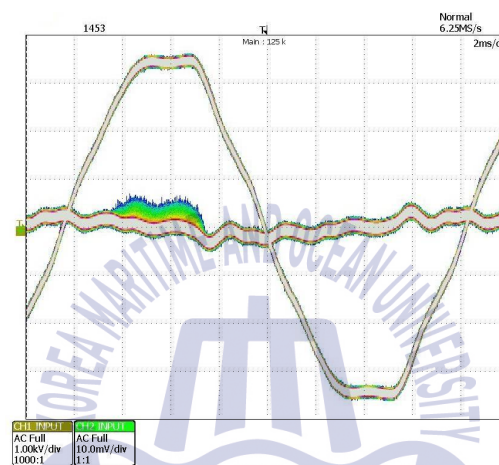


(b) UHF센서

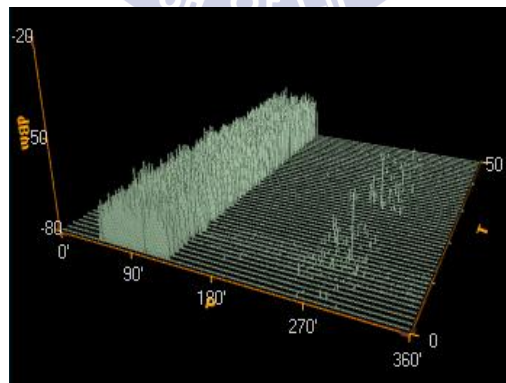
그림 3.12 20 kV에서 POC의 PRPD

Fig. 3.12 PRPD of POC at 20 kV

방전개시전압 20 kV에 1.25배 높은 26 kV를 인가하였을 경우, IEC 60270법에서는 41° ~ 134°에서 그림 3.13(a)와 같이 부분방전이 측정되었다. UHF 센서는 45° ~ 136°로, 최댓값은 -57 dBm이었다. 부극성에서는 236° ~ 307°에서 최댓값 -63 dBm으로 그림 3.13(b)와 같다.



(a) IEC 60270



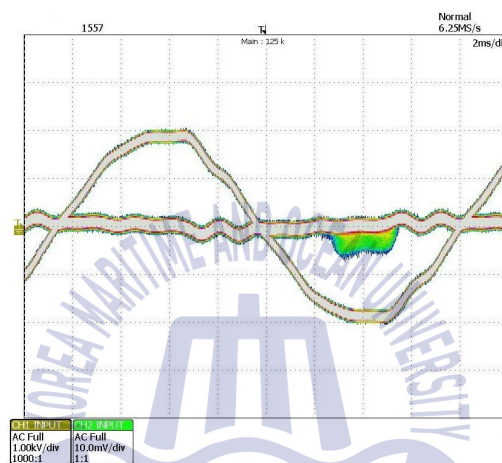
(b) UHF 센서

그림 3.13 26 kV에서 POC의 PRPD

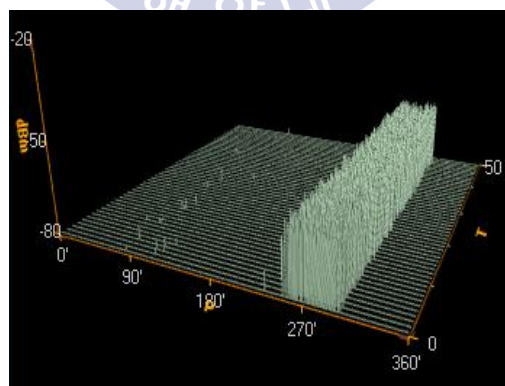
Fig. 3.13 PRPD of POC at 26 kV

② Protrusion on enclosure, POE

14 kV에서 IEC 60270법은 부극성 227° ~ 306°에서 부분방전이 그림 3.14(a)와 같이 측정되었다. UHF센서는 그림 3.14(b)와 같이 부극성 226° ~ 308°에서 최댓값 -55 dBm으로 분석되었다.



(a) IEC 60270

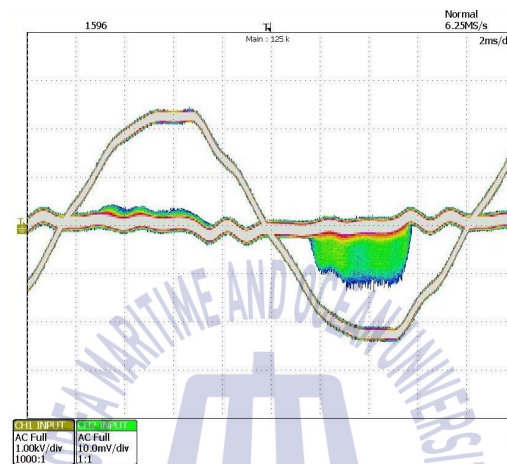


(b) UHF센서

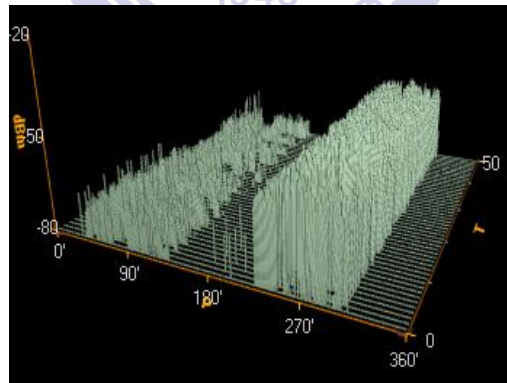
그림 3.14 14 kV에서 POE의 PRPD

Fig. 3.14 PRPD of POE at 14 kV

평균 부분방전 펄스 수는 정·부극성에서 956개가 검출되었다. 17 kV에서 IEC 60270법은 $29^{\circ} \sim 128^{\circ}$, $218^{\circ} \sim 311^{\circ}$ 이며, UHF센서는 $36^{\circ} \sim 132^{\circ}$, 최댓값 -60 dBm이며, $225^{\circ} \sim 304^{\circ}$, 최댓값 -46 dBm으로 그림 3.15와 같다.



(a) IEC 60270



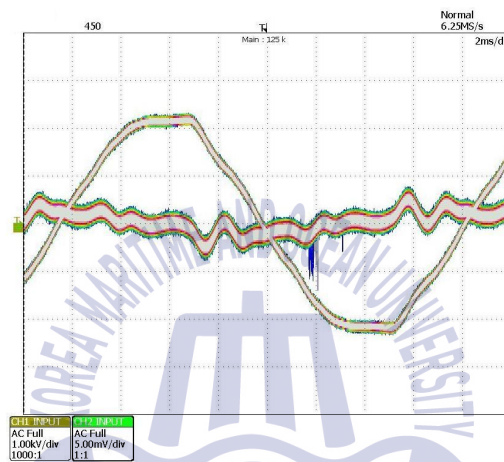
(b) UHF 센서

그림 3.15 17 kV에서 POE의 PRPD

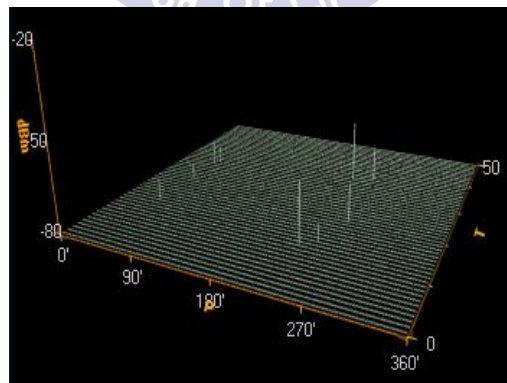
Fig. 3.15 PRPD of POE at 17 kV

③ Protrusion on spacer, POS

16 kV에서 IEC 60270법은 213° ~ 224°의 위상에서 부분방전이 측정되었으며, UHF센서는 217° ~ 230°에서 최댓값 -52 dBm으로 그림 3.16과 같다.



(a) IEC 60270

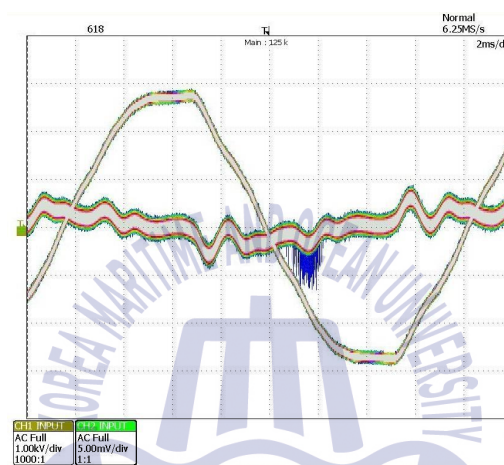


(b) UHF센서

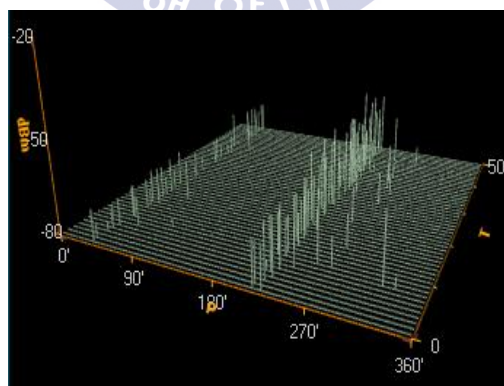
그림 3.16 16 kV에서 POS의 PRPD

Fig. 3.16 PRPD of POS at 16 kV

16 kV에서 1.25배의 전압변동을 고려한 20 kV에서는 IEC 60270법은 204° ~ 231°에서만 측정되었으며, UHF센서는 197° ~ 237°에서 그림 3.17과 같이 검출되었다. 197° ~ 237°에서 측정된 부분방전의 값 중, 최댓값은 -49 dBm으로 그림 3.17과 같다.



(a) IEC 60270



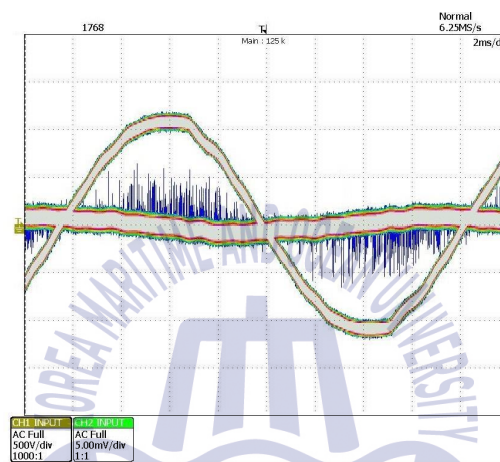
(b) UHF 센서

그림 3.17 20 kV에서 POS의 PRPD

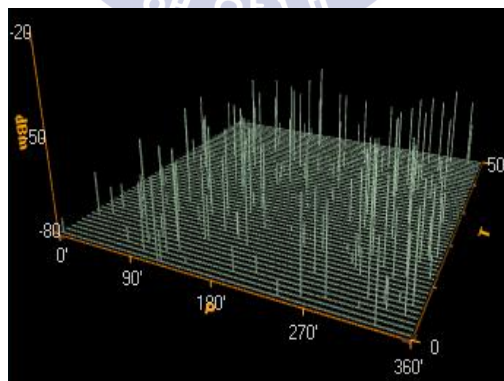
Fig. 3.17 PRPD of POS at 20 kV

④ Free particle, FP

전압 8 kV 및 10 kV 인가 시, 볼 전극계가 SF₆ 가스절연구조 내에서 Shuffle과 Jumping을 병행하여 그림 3.18 및 3.19와 같이 6종의 모의 결함과는 상이하게 전 위상에서 부분방전 펄스가 측정되었다.



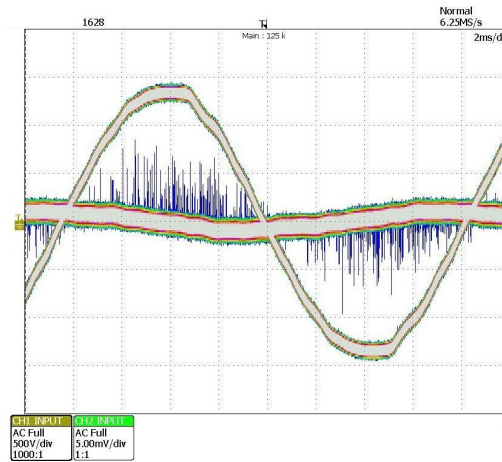
(a) IEC 60270



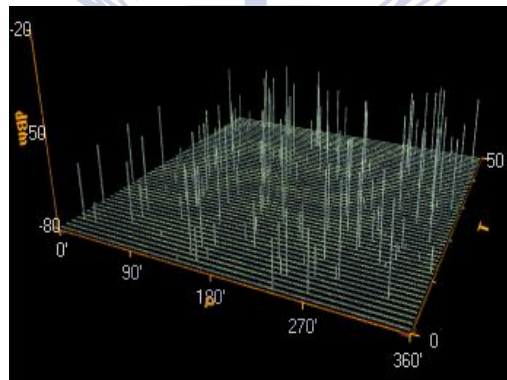
(b) UHF센서

그림 3.18 8 kV에서 FP의 PRPD

Fig. 3.18 PRPD of FP at 8 kV



(a) IEC 60270



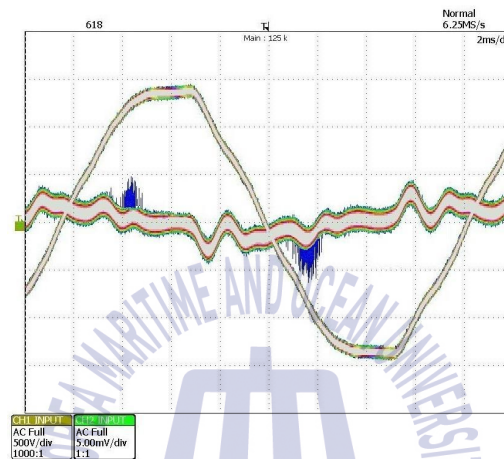
(b) UHF 센서

그림 3.19 10 kV에서 FP의 PRPD

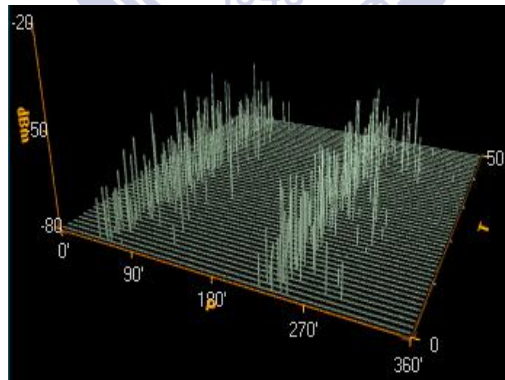
Fig. 3.19 PRPD of FP at 10 kV

⑤ Crack inside spacer, Crack

14 kV에서 IEC 60270법은 $42^{\circ} \sim 61^{\circ}$, $208^{\circ} \sim 237^{\circ}$ 이며, UHF 센서는 $38^{\circ} \sim 61^{\circ}$, $205^{\circ} \sim 242^{\circ}$ 에서 부분방전의 펄스가 그림 3.20과 같이 분포하였다.



(a) IEC 60270

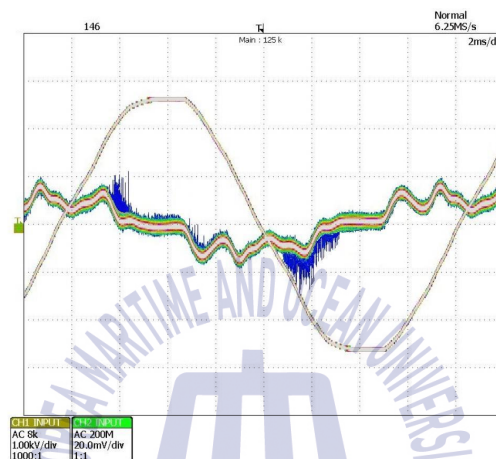


(b) UHF 센서

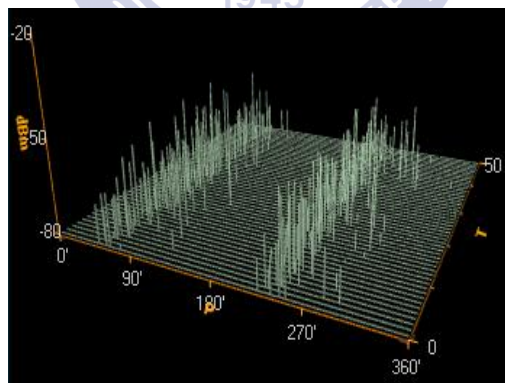
그림 3.20 14 kV에서 Crack의 PRPD

Fig. 3.20 PRPD of Crack at 14 kV

19 kV에서는 IEC 60270법은 $36^{\circ} \sim 59^{\circ}$, $193^{\circ} \sim 255^{\circ}$ 이며, UHF 센서는 $38^{\circ} \sim 65^{\circ}$, $187^{\circ} \sim 248^{\circ}$ 에서 부분방전의 펄스가 그림 3.21과 같이 분포하였으며, 최댓값은 -49 dBm로 측정되었다.



(a) IEC 60270



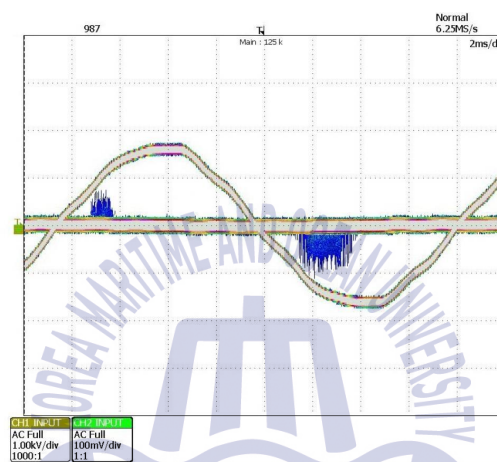
(b) UHF 센서

그림 3.21 19 kV에서 Crack의 PRPD

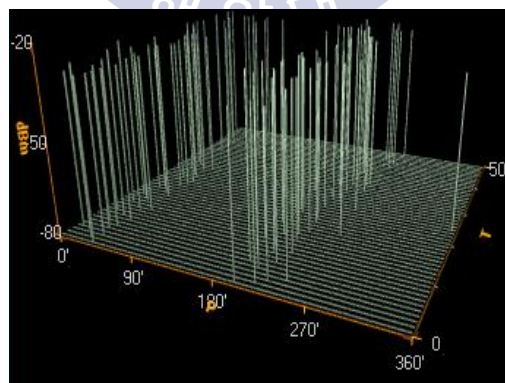
Fig. 3.21 PRPD of Crack at 19 kV

⑥ Floating metal, Floating

10 kV에서 IEC 60270법은 $23^{\circ} \sim 39^{\circ}$, $218^{\circ} \sim 263^{\circ}$ 이며, UHF 센서는 $30^{\circ} \sim 44^{\circ}$, $214^{\circ} \sim 260^{\circ}$ 에서 그림 3.22와 같이 부분방전 펄스가 분포하였다. 최댓값은 -23 dBm로 측정되었다.



(a) IEC 60270

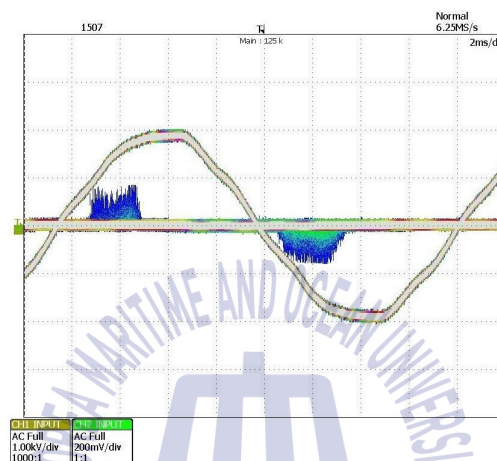


(b) UHF 센서

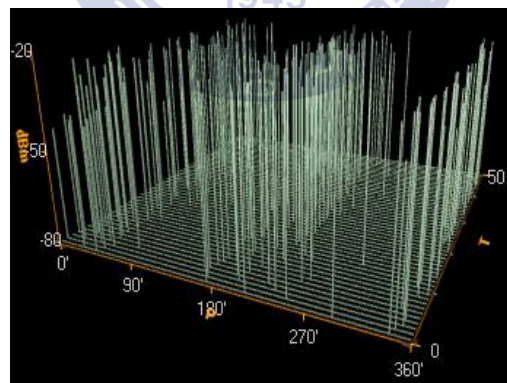
그림 3.22 10 kV에서 Floating의 PRPD

Fig. 3.22 PRPD of Floating at 10 kV

14 kV에서 IEC 60270법은 $25^{\circ} \sim 61^{\circ}$, $201^{\circ} \sim 258^{\circ}$ 이며, UHF센서는 $26^{\circ} \sim 62^{\circ}$, $195^{\circ} \sim 265^{\circ}$ 에서 그림 3.23과 같이 부분방전 펄스가 분포하였다. 10 kV와 비교를 하면 정극성에서의 분포 범위가 확대되었다.



(a) IEC 60270



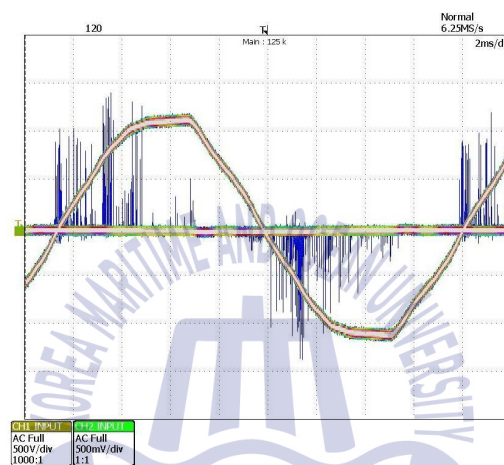
(b) UHF센서

그림 3.23 14 kV에서 Floating의 PRPD

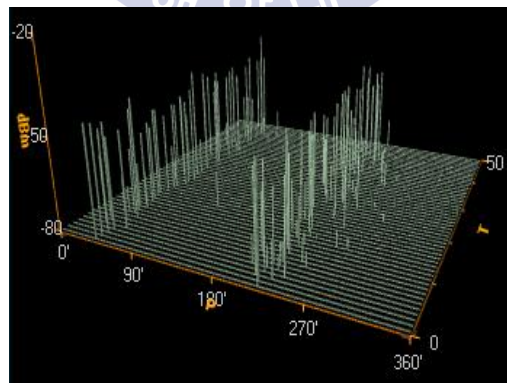
Fig. 3.23 PRPD of Floating at 14 kV

⑦ Void inside spacer, Void

평균 방전개시전압 9 kV에서 IEC 60270법은 $2^{\circ} \sim 62^{\circ}$, $184^{\circ} \sim 263^{\circ}$ 에서 부분방전이 측정되었으며, UHF센서는 정극성의 $9^{\circ} \sim 69^{\circ}$ 와 $187^{\circ} \sim 271^{\circ}$ 에서 클러스터가 분포하였다.



(a) IEC 60270

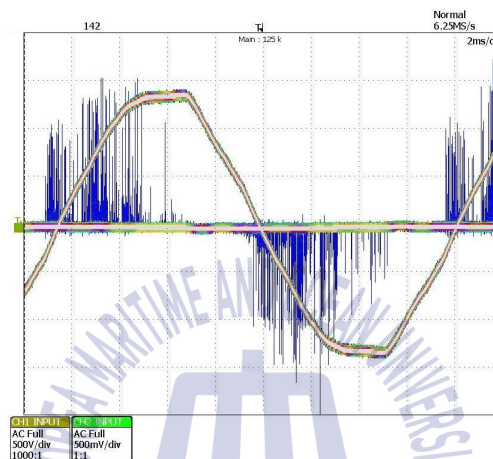


(b) UHF 센서

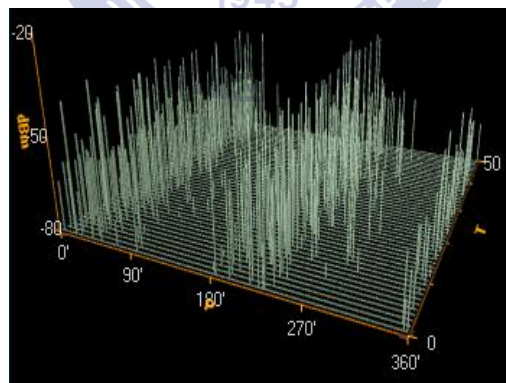
그림 3.24 9 kV에서 Void의 PRPD

Fig. 3.24 PRPD of Void at 9 kV

부분방전의 평균 펄스 수는 정·부극성에서 123개가 검출되었다. 평균 방전개시전압을 1.25배 높인 12 kV에서 IEC 60270법은 $1^{\circ} \sim 64^{\circ}$, $181^{\circ} \sim 266^{\circ}$ 이며, UHF센서는 $3^{\circ} \sim 72^{\circ}$, $182^{\circ} \sim 271^{\circ}$ 에서 부분방전이 각각 분포하였다.



(a) IEC 60270



(b) UHF 센서

그림 3.25 12 kV에서 Void의 PRPD

Fig. 3.25 PRPD of Void at 12 kV

모의 결함 7종에 대하여 IEC 60270법과 UHF센서로 부분방전의 위상을 표 3.2와 같이 비교한 결과, 위상 차이가 발생하였다. 이는 IEC 60270법은 직접 검출인 반면, UHF센서는 방출된 전자파를 검출하여 처리 과정에서 지연시간이 발생(위상 차이의 원인)하는 것으로, 모의 결함별 부분방전의 특성 분석에는 영향을 주지 않는 것으로 판단하였다.

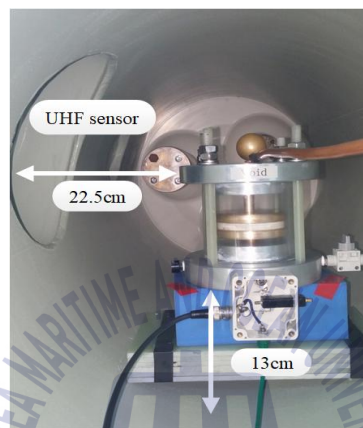
표 3.2 IEC 60270법과 UHF센서의 위상 비교

Table 3.2 Phase comparison between IEC 60270 method and UHF sensor

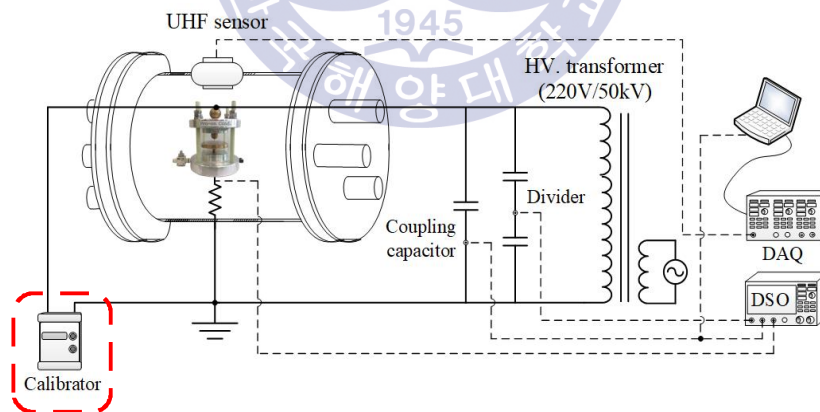
	전 압[kV]	IEC 60270법	UHF센서
POC	20	39° ~ 127°	44° ~ 133°
	26	41° ~ 134°	45° ~ 136°
POE	14	227° ~ 306°	226° ~ 308°
	17	29° ~ 128°	36° ~ 132°
		218° ~ 311°	225° ~ 304°
POS	16	213° ~ 224°	217° ~ 230°
	20	204° ~ 231°	197° ~ 237°
FP	8	1° ~ 360°	1° ~ 360°
	10		
Crack	14	42° ~ 61°	38° ~ 61°
		208° ~ 237°	205° ~ 242°
	19	36° ~ 59°	38° ~ 65°
		193° ~ 255°	187° ~ 248°
Floating	10	23° ~ 39°	30° ~ 44°
		218° ~ 263°	214° ~ 260°
	14	25° ~ 61°	26° ~ 62°
		201° ~ 258°	195° ~ 265°
Void	9	2° ~ 62°	9° ~ 69°
		184° ~ 263°	187° ~ 271°
	12	1° ~ 64°	3° ~ 72°
		181° ~ 266°	182° ~ 271°

다. dBm-pC 환산

UHF센서에서 측정되는 부분방전의 크기(dBm)와 방전 전하량(pC)을 환산하기 위하여 그림 3.26과 같이 실험계를 구성하였다.



(a) 모의 결함의 설치



(b) 교정 실험계

그림 3.26 dBm-pC의 환산 실험계

Fig. 3.26 Experimental setup of dBm-pC conversion

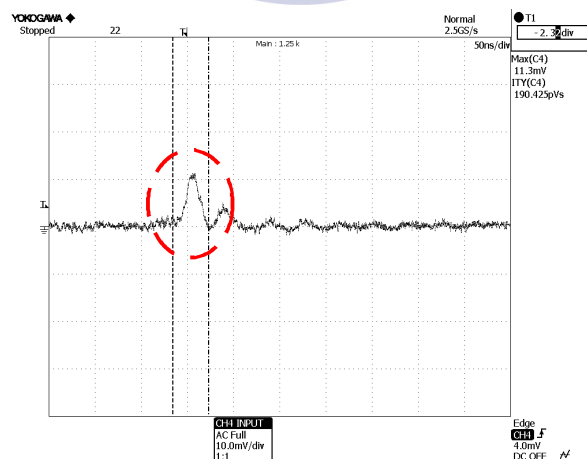
모의 결함을 (a)와 같이 챔버 바닥에서 13 cm, UHF 센서에서 22.5 cm 이격시켜 부분방전 펄스를 측정하였다. 모의 결함에 전압을 인가한 후, UHF 센서와 50 Ω에서 부분방전을 동시에 측정하여 그림 3.26과 같이 dBm과 pC의 상관관계를 도출하였다. 또한 전압변동에 따른 특성 변화를 분석하기 위하여 모의 결함 내부의 SF₆ 가스를 0.3 MPa에서 실험을 수행하였다.

모의 결함에 5 pC, 10 pC, 20 pC, 50 pC 및 100 pC의 부분방전 펄스를 주입한 후, 50 Ω에서 측정된 부분방전 펄스를 적분하였다. 각각 10회씩 측정한 겉보기 전하량을 표 3.3에 나타내었으며, 최소 5 pC과 최대 100 pC에서 측정된 파형은 그림 3.27과 같다.

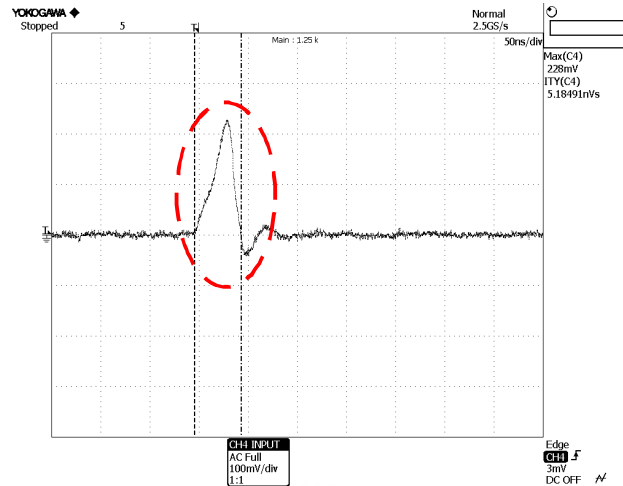
표 3.3 겉보기 전하량

Table 3.3 Apparent charge

교정기 [pC]	5	10	20	50	100
적분값 [pC]	3.85	8.91	19.71	50.66	102.12



(a) 5 pC



(b) 100 pC

그림 3.27 교정 펄스

Fig. 3.27 Calibration pulse

환산방법은 첫 번째, 교정기(CAL 542)로 걸보기 전하(Apparent Charge)를 모의 결함에 주입하여 오실로스코프에서 측정되는 부분방전 펄스의 적분량(pC)과 교정기 전하량(pC)의 선형성을 분석하였다. 두 번째, UHF센서의 크기(dBm)와 센서 처리부에서 측정된 전압(mV)의 선형성을 비교하였다.

교정기로 주입한 5 pC, 10 pC, 20 pC, 50 pC 및 100 pC에 대하여 오실로스코프에서 측정된 부분방전 펄스의 적분값이 그림 3.28과 같이 선형적으로 비례하였다. 이를 통해 50 Ω에서 검출되는 부분방전 펄스의 적분값을 전하량으로 환산하였다.

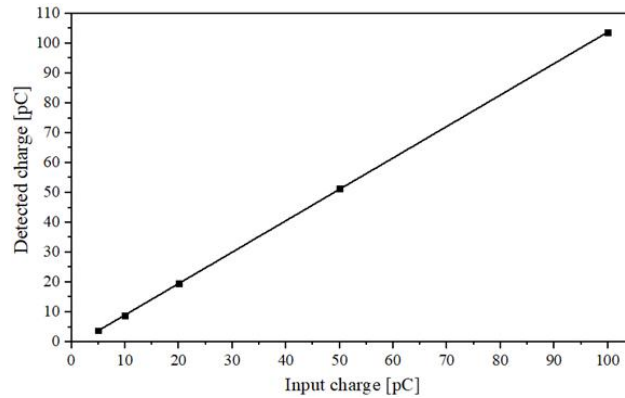


그림 3.28 입력 전하량과 검출 전하량의 관계

Fig. 3.28 Relation between input charge and detected charge

UHF 센서에서 검출되는 전압(V)과 전자파 크기(dBm)의 상관관계를 그림 3.29에 나타내었다. 전압은 0 V ~ 2 V, 전자파 크기는 -80 dBm ~ -18 dBm으로 선형적인 특성을 이용하여 펄스 크기를 dBm으로 환산하였다.

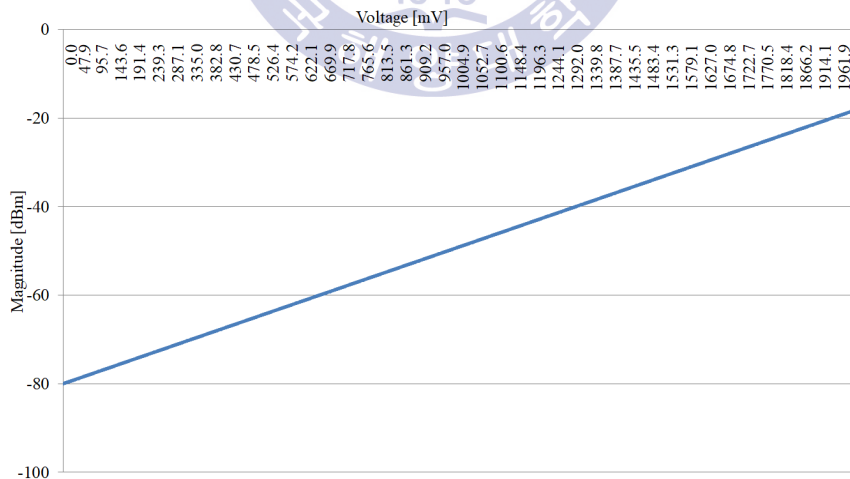
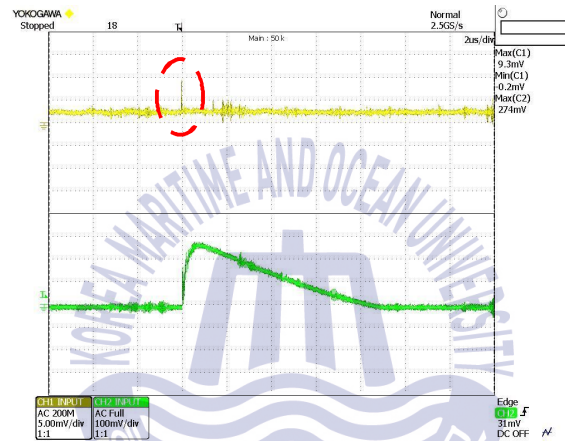


그림 3.29 크기(dBm)-전압(mV)의 관계

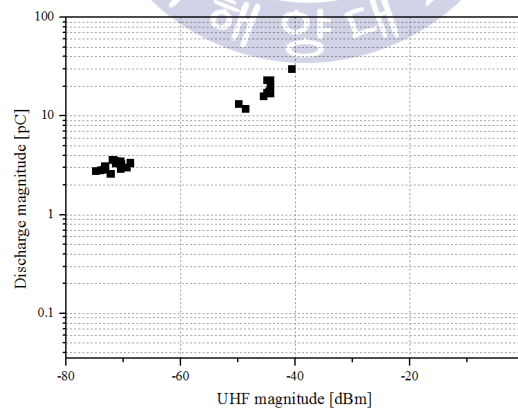
Fig. 3.29 Relation between magnitude(dBm) and voltage(mV)

① Protrusion on conductor, POC

50 Ω 과 UHF센서로 동시 측정된 부분방전 펄스 및 선형적인 특성을 그림 3.30에 나타내었다. 50 Ω 은 최소 2.62 pC, 최대 30.31 pC이며, UHF센서의 크기는 최소 -74.85 dBm, 최대 -40.59 dBm이다. 표 3.4에 dBm-pC의 값을 나타내었고, 선형적인 특성은 그림 (b)와 같다.



(a) 부분방전 펄스 (상: IEC 60270법, 하: UHF 센서)



(b) dBm-pC

그림 3.30 POC의 dBm-pC 환산

Fig. 3.30 dBm-pC conversion of POC

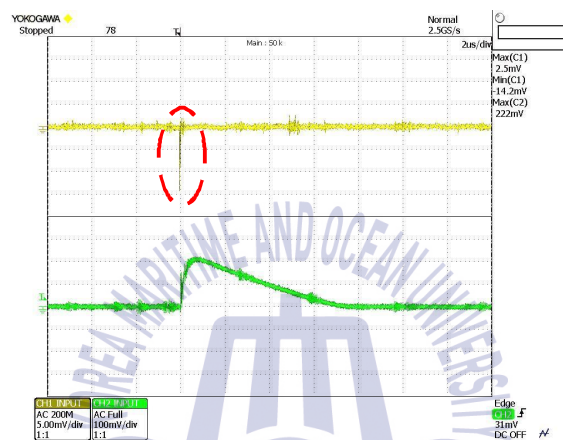
표 3.4 POC의 dBm-pC 환산

Table 3.4 dBm-pC conversion of POC

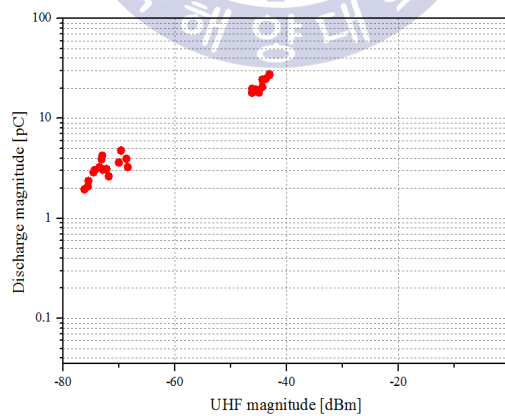
전 압	IEC 60270법	UHF 센서	
	적분-pC	V	dBm
13 kV	2.85	0.194	-73.98
	2.89	0.208	-73.55
	3.10	0.218	-73.24
	2.79	0.166	-72.27
	2.62	0.249	-74.85
15 kV	3.56	0.274	-71.5
	3.03	0.341	-69.42
	3.48	0.306	-70.5
	3.36	0.361	-68.8
17 kV	2.95	0.305	-70.54
	3.61	0.261	-71.9
	3.35	0.278	-71.37
	3.27	0.309	-70.41
23 kV	11.90	1.010	-48.66
	15.95	1.110	-45.56
	13.30	0.970	-49.9
	18.04	1.140	-44.63
26 kV	17.08	1.150	-44.32
	23.18	1.130	-44.94
	23.38	1.150	-44.32
	20.49	1.150	-44.32
	17.33	1.130	-44.94
	30.31	1.270	-40.59

② Protrusion on enclosure, POE

12 kV ~ 28 kV까지 전압을 인가하여 실험을 진행하였다. 전하량은 최소 1.95 pC, 최대 27.74 pC이며, 크기는 최소 -76.21 dBm, 최대 -43.07 dBm이다. dBm-pC 관계를 그림 3.31과 표 3.5에 나타내었다.



(a) 부분방전 펄스 (상: IEC 60270법, 하: UHF 센서)



(b) dBm-pC

그림 3.31 POE의 dBm-pC 환산

Fig. 3.31 dBm-pC conversion of POE

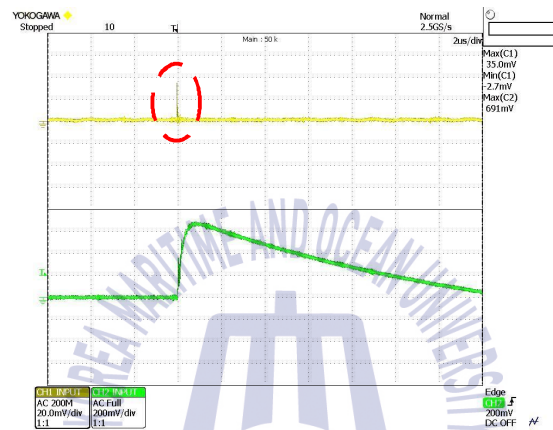
표 3.5 POE의 dBm-pC 환산

Table 3.5 dBm-pC conversion of POE

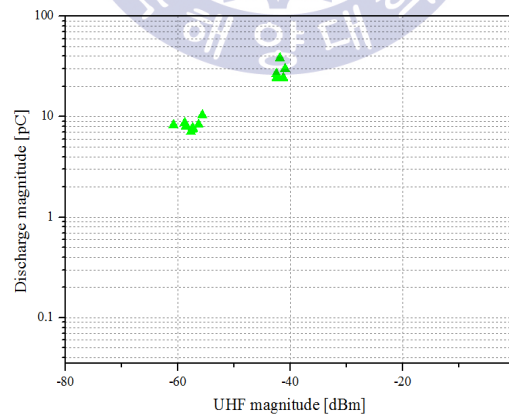
전 압	IEC 60270법	UHF 센서	
	적분-pC	V	dBm
12 kV	4.76	0.334	-69.64
	2.36	0.146	-75.47
	1.95	0.122	-76.21
	2.63	0.263	-71.84
	2.89	0.175	-74.57
14 kV	3.95	0.365	-68.67
	4.24	0.226	-72.99
	3.04	0.182	-74.35
	3.91	0.222	-73.11
	3.62	0.322	-70.01
16 kV	3.06	0.230	-72.86
	3.11	0.250	-72.24
	3.25	0.209	-73.51
	3.26	0.373	-68.43
	2.08	0.207	-75.58
24 kV	20.71	1.150	-44.32
	24.42	1.150	-44.32
	18.15	1.130	-44.94
	18.75	1.110	-45.56
	19.37	1.110	-45.56
28 kV	25.00	1.170	-43.69
	19.76	1.090	-46.18
	27.21	1.190	-43.07
	27.74	1.190	-43.07
	18.07	1.090	-46.18

③ Protrusion on spacer, POS

15 kV ~ 25 kV까지 전압을 인가한 결과, 부분방전의 전하량은 최소 7.12 pC, 최대 38.25 pC이며, UHF센서의 크기는 최소 -60.76 dBm, 최대 -40.9 dBm이다. 그림 3.32와 표 3.6에 dBm-pC 및 선형적 특성을 나타내었다.



(a) 부분방전 펄스 (상: IEC 60270법, 하: UHF 센서)



(b) dBm-pC

그림 3.32 POS의 dBm-pC 환산

Fig. 3.32 dBm-pC conversion of POS

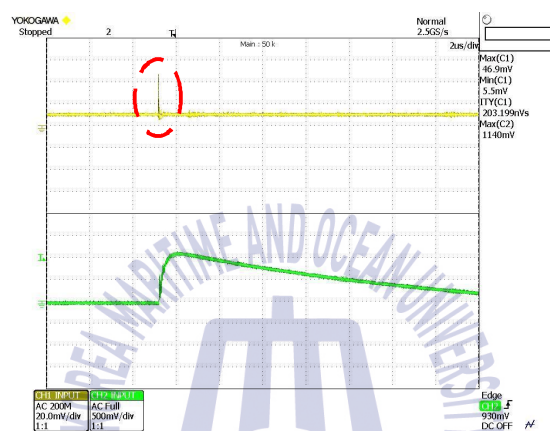
표 3.6 POS의 dBm-pC 환산

Table 3.6 dBm-pC conversion of POS

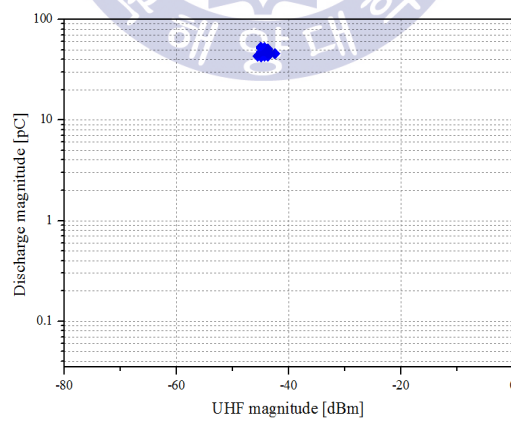
전 압	IEC 60270법	UHF 센서	
	적분-pC	V	dBm
15 kV	8.36	0.764	-56.29
	8.07	0.691	-58.56
	10.36	0.785	-55.64
	8.67	0.684	-58.78
	8.28	0.620	-57.66
20 kV	7.12	0.720	-60.76
	7.59	0.730	-57.35
	7.54	0.730	-57.35
	7.77	0.730	-57.35
	7.72	0.730	-57.35
25 kV	38.25	1.230	-40.9
	24.38	1.250	-41.21
	29.98	1.260	-41.83
	26.73	1.210	-42.45
	24.29	1.210	-42.45

④ Free particle, FP

FP를 제외한 모의 결합 6종은 전극계가 고정되어 있는 구조이지만, FP는 볼이 이동하기 때문에 13 kV와 14 kV에서만 실험을 수행하였다. 그 결과, 그림 3.33과 같이 dBm-pC이 선형적으로 분석되었다.



(a) 부분방전 펄스 (상: IEC 60270법, 하: UHF센서)



(b) dBm-pC

그림 3.33 FP의 dBm-pC 환산

Fig. 3.33 dBm-pC conversion of FP

FP에서 측정된 부분방전의 전하량은 최소 42.11 pC, 최대 53.24 pC이며, UHF센서의 크기는 최소 -45.56 dBm, 최대 -42.45 dBm으로 표 3.7과 같다.

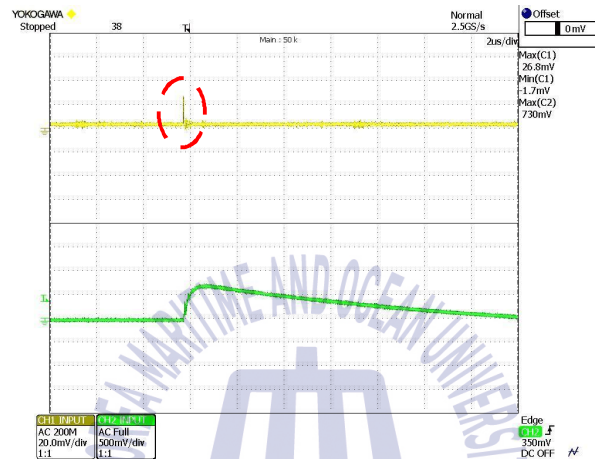
표 3.7 FP의 dBm-pC 환산

Table 3.7 dBm-pC conversion of FP

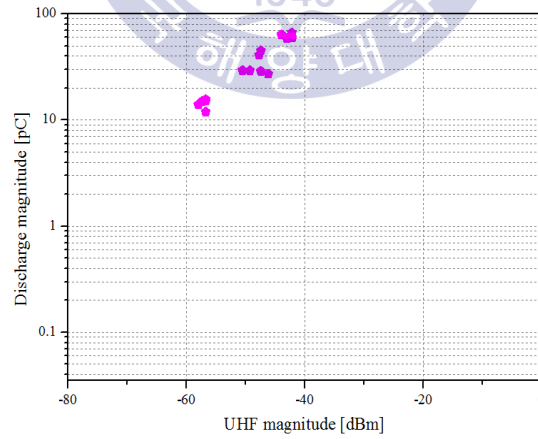
전 압	IEC 60270법	UHF센서	
	적분-pC	V	dBm
13 kV	51.60	1.130	-44.94
	46.56	1.140	-44.63
	47.68	1.130	-44.94
	53.24	1.130	-42.45
	42.11	1.130	-45.56
	44.34	1.170	-43.69
	49.64	1.150	-44.32
	42.87	1.110	-42.94
14 kV	45.65	1.210	-43.92
	52.47	1.150	-44.32
	42.86	1.150	-44.32
	47.20	1.170	-43.69
	44.33	1.160	-44
	50.79	1.170	-43.69
	43.14	1.170	-43.69

⑤ Crack inside spacer, Crack

15 kV, 16 kV 및 18 kV의 전압을 인가하여 부분방전 펄스를 그림 3.34와 같이 측정하였다.



(a) 부분방전 펄스 (상: IEC 60270법, 하: UHF 센서)



(b) dBm-pC

그림 3.34 Crack의 dBm-pC 환산

Fig. 3.34 dBm-pC conversion of Crack

방전 전하량은 최소 11.93 pC, 최대 66.2 pC이며, UHF 센서의 크기는 최소 -57.97 dBm, 최대 -42.11 dBm으로 표 3.8과 같다.

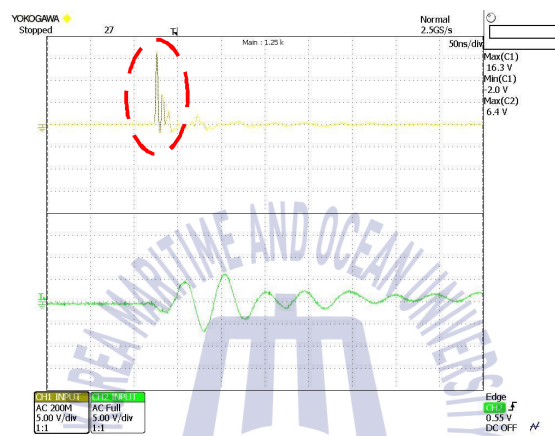
표 3.8 Crack의 dBm-pC 환산

Table 3.8 dBm-pC conversion of Crack

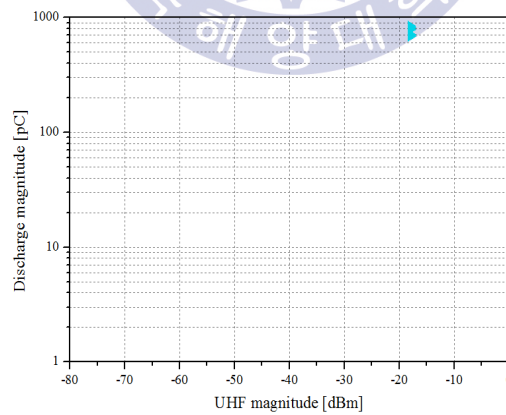
전 압	IEC 60270법	UHF 센서	
	적분-pC	V	dBm
15 kV	15.03	0.730	-57.35
	15.10	0.750	-56.73
	13.98	0.710	-56.73
	15.63	0.750	-56.73
	11.93	0.750	-57.97
16 kV	28.88	1.050	-47.42
	27.13	1.090	-46.18
	29.22	0.990	-49.28
	45.03	1.050	-47.42
	29.38	0.950	-50.52
18 kV	66.20	1.210	-42.11
	63.80	1.160	-43.97
	59.80	1.220	-42.18
	58.70	1.190	-43.04
	40.74	1.040	-47.73

⑥ Floating metal, Floating

Floating은 파티클이 고압과 접지사이에 부양(浮揚)된 구조로, 방전이 발생했을 때, 모의 결함 7종 중, 방전 전하량의 크기가 가장 높게 측정되었다.



(a) 부분방전 펄스 (상: IEC 60270법, 하: UHF센서)



(b) dBm-pC

그림 3.35 Floating의 dBm-pC 환산

Fig. 3.35 dBm-pC conversion of Floating

Floating의 평균 방전 전하량은 767.6 pC으로 산출되었다. UHF센서의 크기는 -17.94 dBm으로 동일하게 검출되었다. dBm-pC의 값은 표 3.9와 같으며, dBm 값이 상대적으로 높게 측정되어, Floating은 전압 가변 없이 실험을 수행하였다. 그 결과, 그림 3.35(b)와 같이 특정지역에서만 클러스터가 형성되었다.

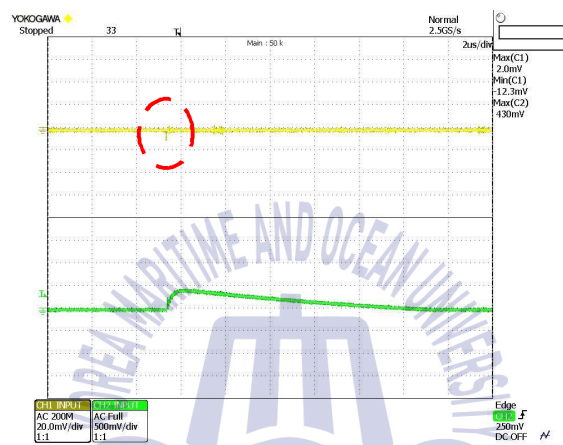
표 3.9 Floating의 dBm-pC 환산

Table 3.9 dBm-pC conversion of Floating

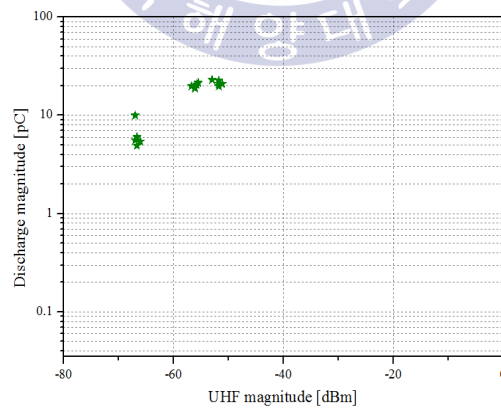
전 압	IEC 60270법	UHF 센서	
	적분-pC	V	dBm
18 kV	840	2	-17.94
	784	2	-17.94
	709	2	-17.94
	820	2	-17.94
	685	2	-17.94

⑦ Void inside spacer, Void

방전 전하량은 최소 4.91 pC, 최대 22.5 pC이며, UHF센서의 크기는 최소 -66.97 dBm, 최대 -51.14 dBm이다. 그림 3.36 및 표 3.10에 선형적인 특성과 dBm-pC의 값을 나타내었다.



(a) 부분방전 펄스 (상: IEC 60270법, 하: UHF센서)



(b) dBm-pC

그림 3.36 Void의 dBm-pC 환산

Fig. 3.36 dBm-pC conversion of Void

표 3.10 Void의 dBm-pC 환산

Table 3.10 dBm-pC conversion of Void

전 압	IEC 60270법	UHF 센서	
	적분-pC	V	dBm
10 kV	9.98	0.420	-66.66
	5.42	0.450	-66.04
	6.02	0.430	-66.66
	4.91	0.430	-66.97
	5.57	0.420	-66.97
11 kV	20.64	0.780	-55.80
	19.82	0.750	-56.73
	21.44	0.790	-55.49
	18.79	0.770	-56.11
	19.40	0.770	-56.11
12 kV	20.90	0.930	-51.76
	22.50	0.910	-51.14
	19.80	0.910	-51.76
	20.94	0.910	-51.76
	23.00	0.870	-53.00

모의 결함 7종에서 측정한 방전 전하량(pC)과 UHF센서의 크기(dBm)의 상관관계를 그림 3.37에 나타내었다. POC와 POE는 10 pC이하에서 부분 방전의 클러스터가 높게 밀집되어 있었다. 그 외 5종의 모의 결함은 20 pC ~ 70 pC에서 클러스터가 분포하였다. Floating은 전극 구조상 방전 발생 횟수가 적고, 한 번 발생할 때 방전 전하량이 6종의 모의 결함보다 7배 이상 큰 700 pC ~ 900 pC에서 분포하였다.

$$pC = 10^{(dBm + 81.31)/23.32} \quad (3.1)$$

분포된 부분방전 펄스의 클러스터를 dBm-pC으로 분석하여 식 (3.1)로 제시하였다. 모의 결함의 구조는 상이하지만, UHF센서에서 검출되는 dBm-pC은 선형성을 나타내었다.

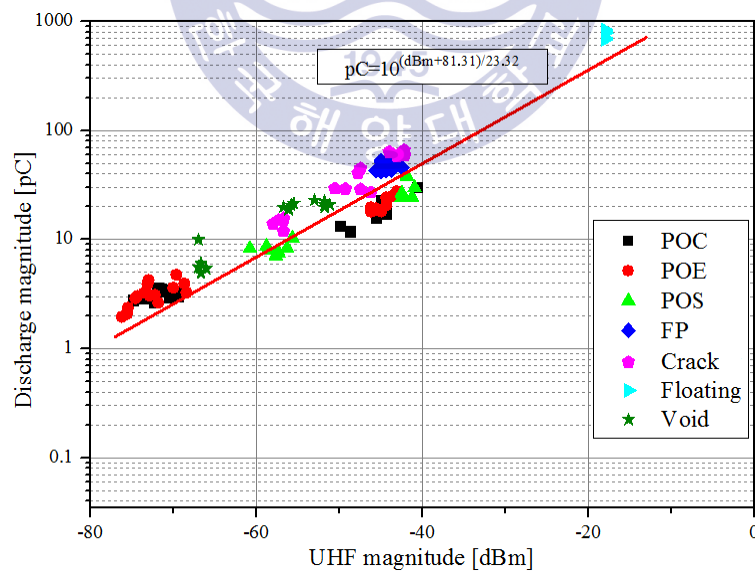


그림 3.37 모의 결함 7종의 dBm-pC 환산

Fig. 3.37 dBm-pC conversion of 7 types of defects

제 4 장 결함 판별 알고리즘

4.1 알고리즘 설계

제 3 장에서 UHF센서로 측정한 부분방전의 데이터를 분석하여 그림 4.1과 같이 부분방전 진단 알고리즘을 설계하였다. DAQ(Data acquisition)에서 수집된 신호는 Peak detection 기법으로 방전의 크기 및 위상 데이터를 연산하여 누적하였다. 또한 DAQ에서 부분방전의 데이터를 정렬 및 카운팅이 완료되면, PC에서 PRPD 패턴을 표현하였다. 실시간으로 분석하기 위하여 On-board 메모리로 일시적으로 데이터를 저장한 후, PC로 전송하여 부분방전의 분포 및 통계적 특성을 분석하였다.

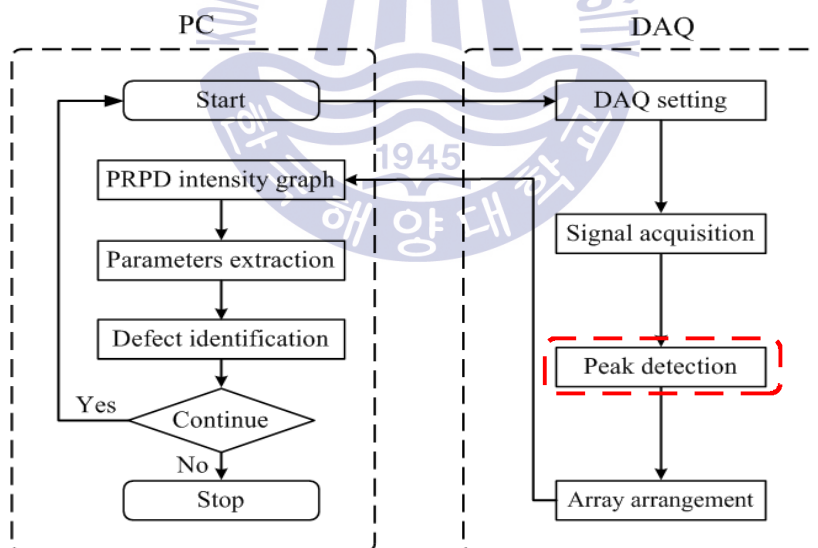


그림 4.1 결함 판별 알고리즘의 흐름도

Fig. 4.1 Flow chart of defects identification algorithm

부분방전의 분포는 모의 결함 7종에서 측정한 UHF센서의 데이터에 대하여 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 의 구간 별 전자파(dBm)의 크기를 12개 항목으로 구별하는 PRPD-12Window법을 적용하였다. 발생한 전체 방전 수(T_n)에서 각 구간 별 발생한 방전 수(S_n)의 비율(S_n/T_n)로 분석하였다.

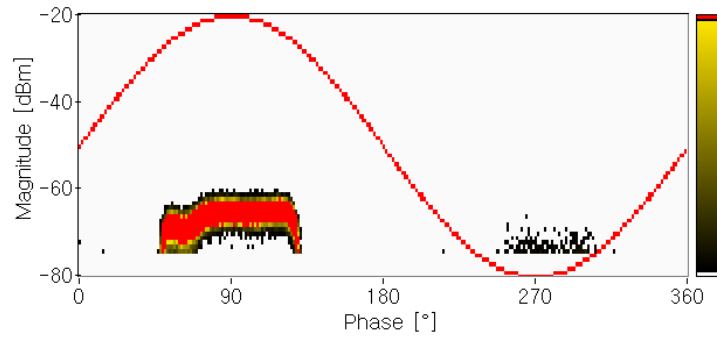
또한 통계적 분석법은 정·부극성에 대한 왜도(Skewness, Ske)/첨도(Kurtosis, Kur)-(4개 항목) 및 정·부극성의 상관관계수(Correlation coefficient, CC)를 진단 파라미터로 선정하였다^[50]. 이 때 상관관계수는 1에 가까울수록 정극성과 부극성의 형태가 동일한 것을 의미한다. 제 3 장에서 측정한 부분방전 데이터를 총 17개 항목으로 분석하여 진단 알고리즘의 파라미터로 도출하였다.

① Protrusion on conductor, POC

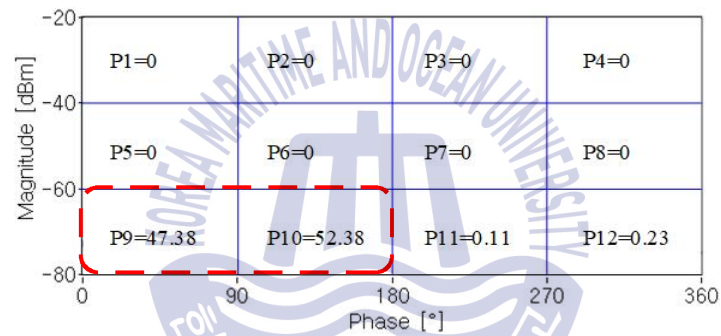
20 kV에서 POC의 알고리즘 파라미터는 그림 4.2와 같다. POC는 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}/-80 \text{ dBm} \sim -60 \text{ dBm}$ 의 정극성에서 부분방전이 가장 높게 밀집되었으며, 부극성에서는 거의 검출되지 않았다. 또한 통계적 분석에서 정극성의 왜도는 0.23, 첨도는 1.14이나, 부극성의 왜도는 1.57, 첨도는 4.49로 분석되었으며, 정극성과 부극성의 상관관계수는 0.72로 나타났다.

26 kV에서 POC의 알고리즘 파라미터는 그림 4.3과 같다. 20 kV와 동일한 형태로, $0^{\circ} \sim 180^{\circ}/-80 \text{ dBm} \sim -60 \text{ dBm}$ 의 정극성에서 부분방전이 가장 높게 밀집되었다.

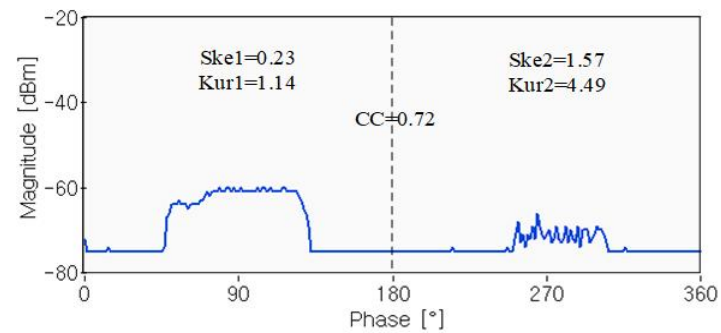
또한 통계적 분석은 정·부극성의 왜도 및 첨도가 20 kV의 특성과 동일하게 분석되었으나, 상관관계수는 0.58로 다소 낮게 분석되었다.



(a) PRPD 패턴



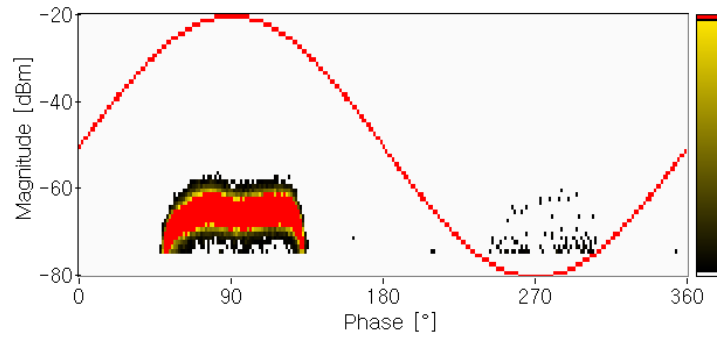
(b) PRPD-12Window



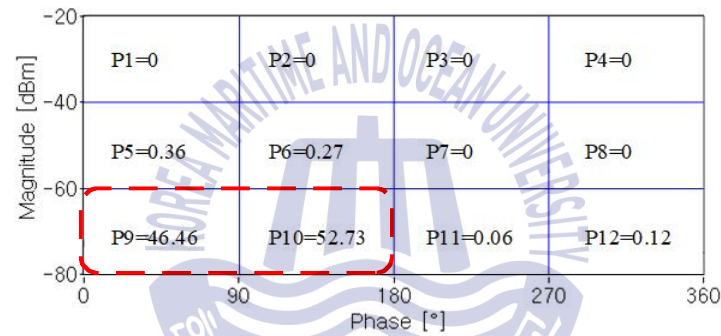
(c) 통계적 특성

그림 4.2 20 kV에서 POC의 파라미터

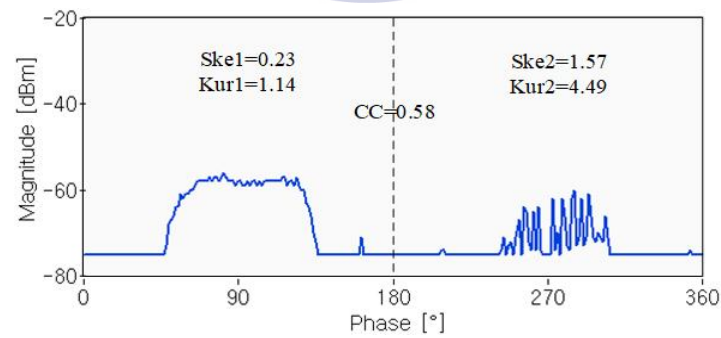
Fig. 4.2 Parameters of POC at 20 kV



(a) PRPD 패턴



(b) PRPD-12Window



(c) 통계적 특성

그림 4.3 26 kV에서 POC의 파라미터

Fig. 4.3 Parameters of POC at 26 kV

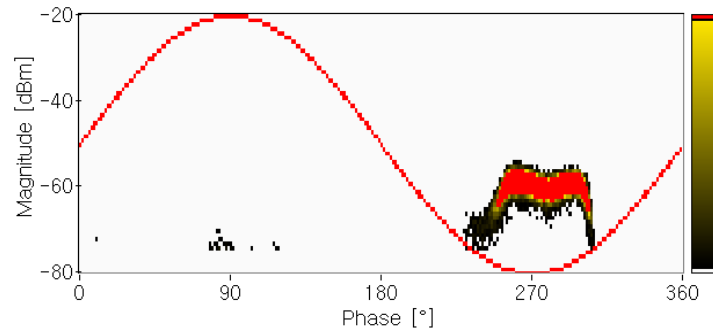
② Protrusion on enclosure, POE

전압 14 kV를 POE에 인가하였을 때, 알고리즘 파라미터는 그림 4.4와 같다. POE는 POC와 다르게 부극성 $181^{\circ} \sim 360^{\circ}/-59 \text{ dBm} \sim -40 \text{ dBm}$ 부분에 부분방전이 가장 높게 밀집되었다. 정극성에서는 거의 검출되지 않았다.

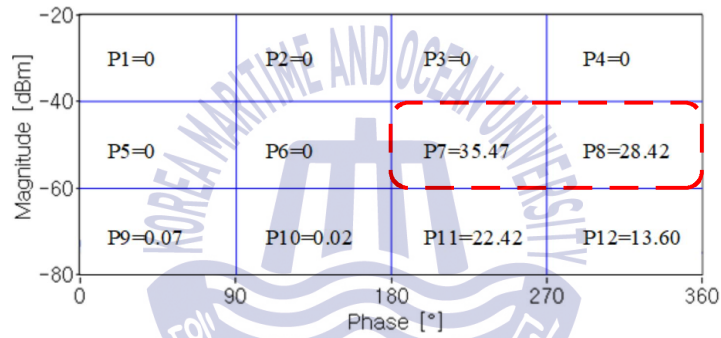
통계적 수치는 정극성의 왜도 3.76, 첨도는 18.6이나, 부극성의 왜도는 0.57, 첨도는 1.47로 분석되었으며, 정극성과 부극성의 상관계수는 0.43으로 산출되었다.

전압 14 kV에서 1.25배한 17 kV에서는 부극성 $181^{\circ} \sim 360^{\circ}/-59 \text{ dBm} \sim -40 \text{ dBm}$ 에서 부분방전의 클러스터가 약 35%로 그림 4.5(b)와 같이 가장 높게 밀집되었다.

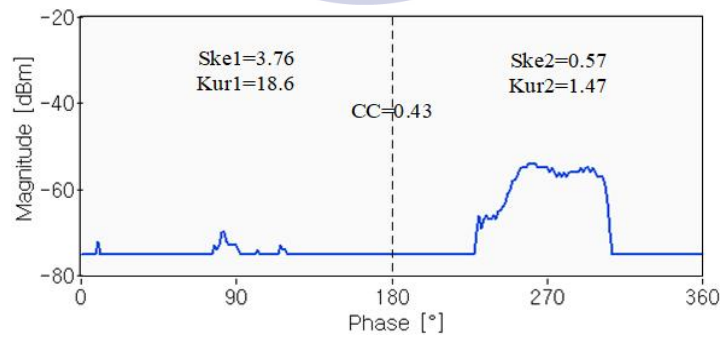
또한 통계적 수치는 정극성의 왜도 -0.94, 첨도는 2.40이나, 부극성의 왜도는 -0.28, 첨도는 1.45로 분석되었으며, 정극성과 부극성의 상관계수는 0.71로 그림 4.5(c)와 같다.



(a) PRPD 패턴



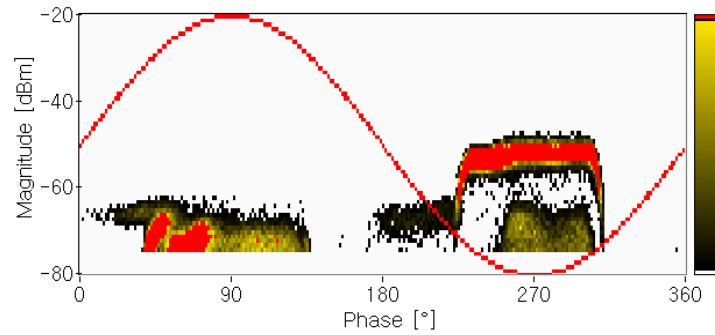
(b) PRPD-12Window



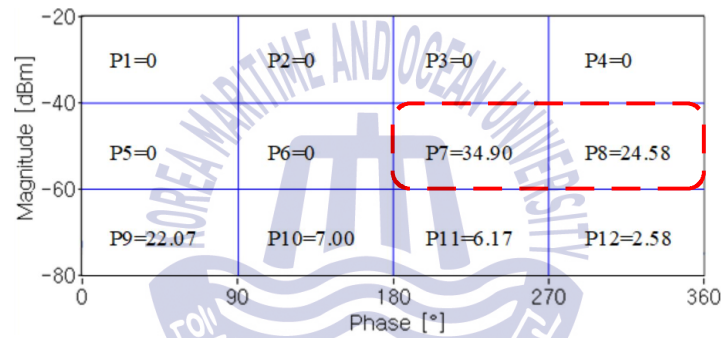
(c) 통계적 특성

그림 4.4 14 kV에서 POE의 파라미터

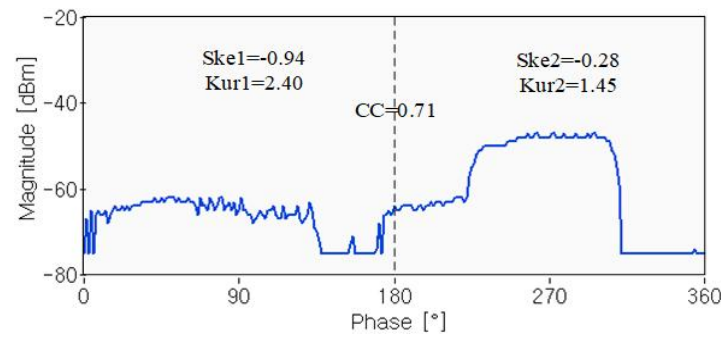
Fig. 4.4 Parameters of POE at 14 kV



(a) PRPD 패턴



(b) PRPD-12Window



(c) 통계적 특성

그림 4.5 17 kV에서 POE의 파라미터

Fig. 4.5 Parameters of POE at 17 kV

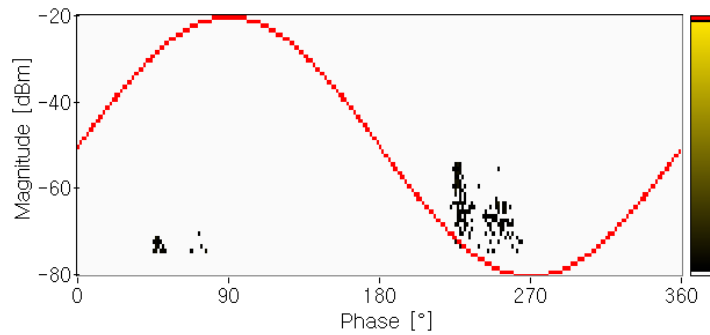
③ Protrusion on spacer, POS

그림 4.6에 전압 16 kV를 POS에 인가한 결과를 나타내었다. 정극성 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 와 부극성 $181^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 의 $-80 \text{ dBm} \sim -60 \text{ dBm}$ 에서 부분방전이 분포하였으며, 정극성보다는 부극성에서 분포율이 약 3배 높았다.

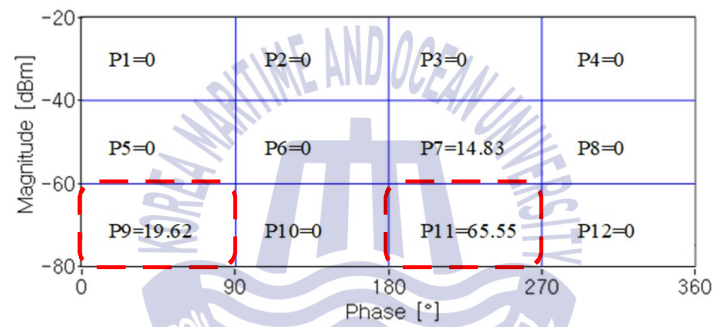
또한 통계적 수치는 정극성의 왜도 4.35, 첨도는 22.2이나, 부극성의 왜도는 2.04, 첨도는 6.09로 부극성에서의 분포율이 정극성보다 높았다.

전압 20 kV를 POS에 인가한 결과를 그림 4.7에 나타내었다. 부분방전의 클러스터는 16 kV를 인가하였을 때와 PRPD-12Window의 분포가 동일하였다. 정극성에서 왜도 1.07, 첨도 2.62이며, 부극성에서 왜도 0.67, 첨도 1.91로 나타났다. 통계적 특성은 16 kV보다 25% 이상 낮게 분석되었다.

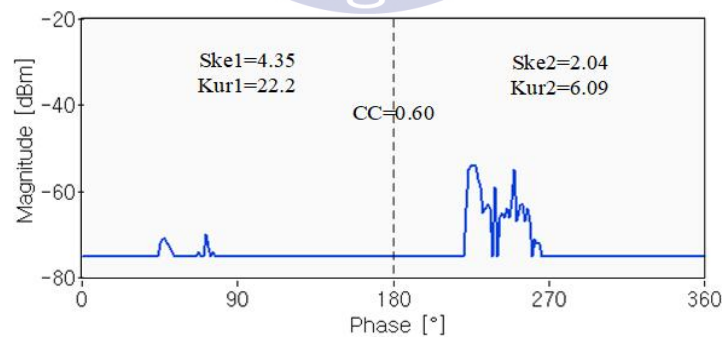




(a) PRPD 패턴



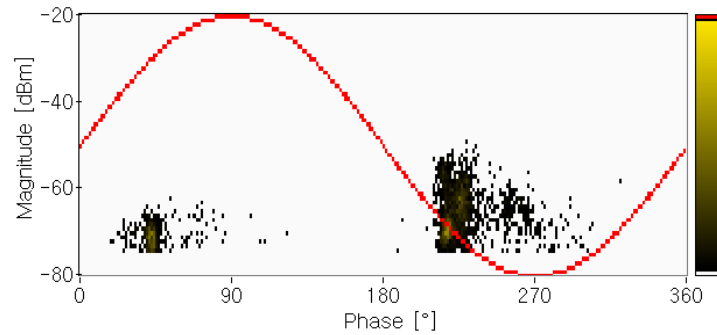
(b) PRPD-12Window



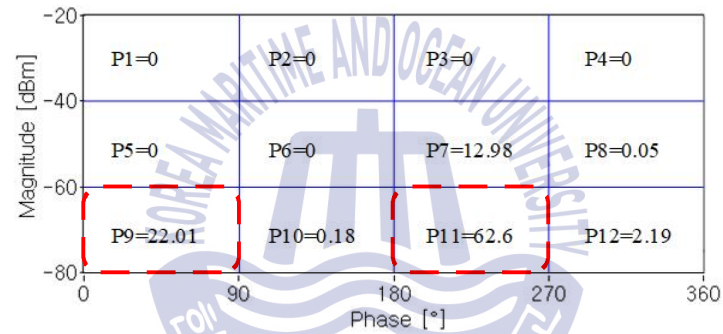
(c) 통계적 특성

그림 4.6 16 kV에서 POS의 파라미터

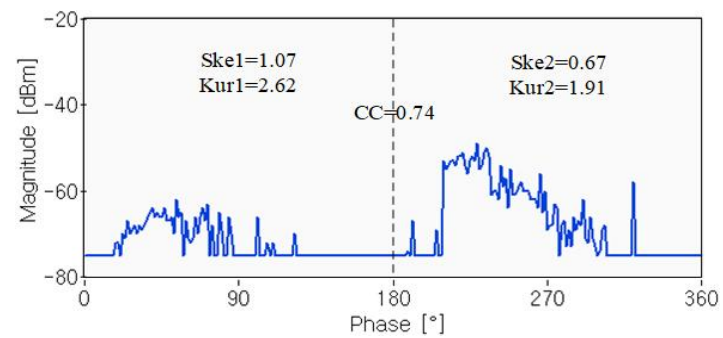
Fig. 4.6 Parameters of POS at 16 kV



(a) PRPD 패턴



(b) PRPD-12Window



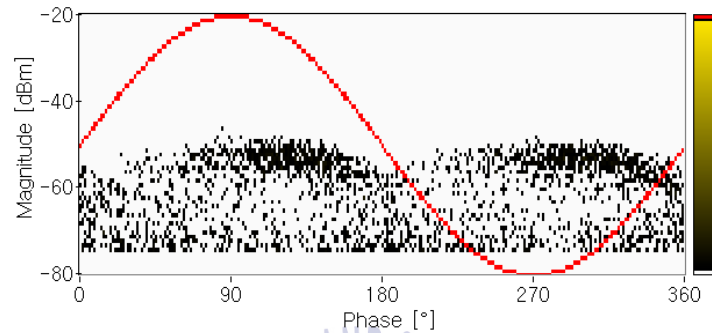
(c) 통계적 특성

그림 4.7 20 kV에서 POS의 파라미터

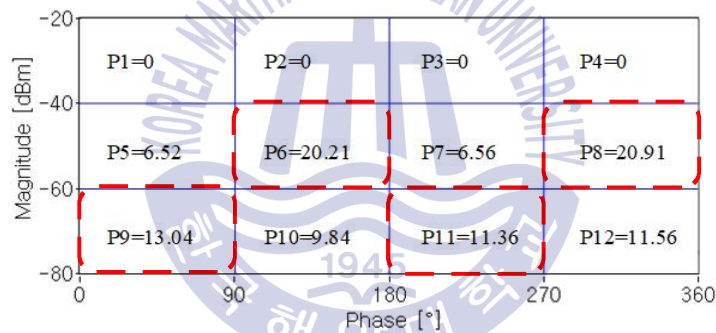
Fig. 4.7 Parameters of POS at 20 kV

④ Free particle, FP

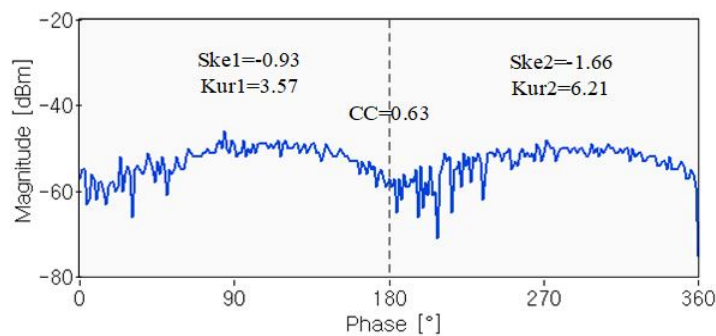
FP의 불이 SF₆ 가스절연구조 내에서 이동하였기 때문에 0° ~ 360°의 전 위상에서 그림 4.8과 같이 부분방전이 분포하였다.



(a) PRPD 패턴



(b) PRPD-12Window

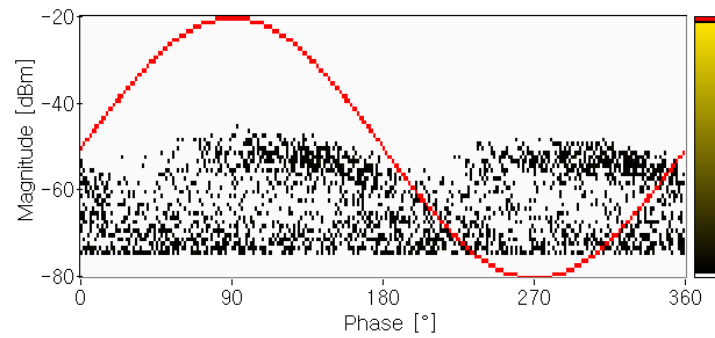


(c) 통계적 특성

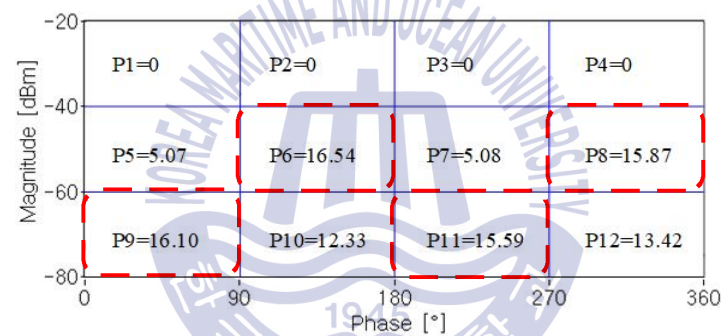
그림 4.8 8 kV에서 FP의 파라미터

Fig. 4.8 Parameters of FP at 8 kV

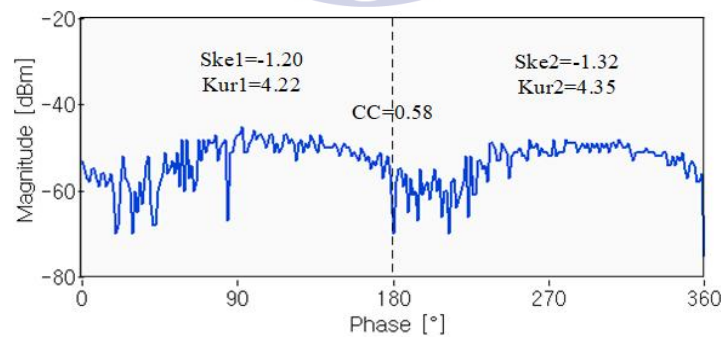
FP 10 kV도 8 kV와 동일하게 전 위상에서 그림 4.9와 같이 부분방전이 분포하였다.



(a) PRPD 패턴



(b) PRPD-12Window



(c) 통계적 특성

그림 4.9 10 kV에서 FP의 파라미터

Fig. 4.9 Parameters of FP at 10 kV

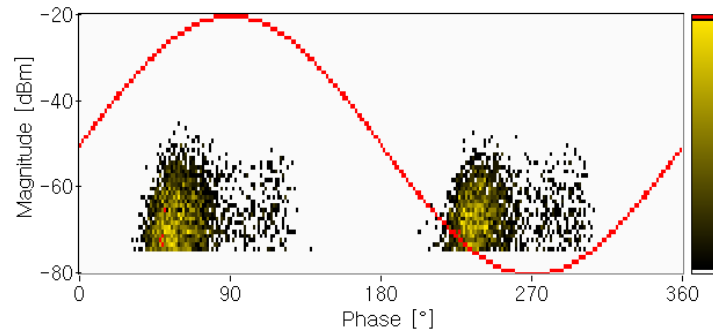
⑤ Crack inside spacer, Crack

전압 14 kV를 Crack에 인가한 결과를 그림 4.7에 나타내었다. 정극성 $0^\circ \sim 90^\circ$ 의 $-80 \text{ dBm} \sim -60 \text{ dBm}$ 과 $181^\circ \sim 270^\circ$ 의 $-80 \text{ dBm} \sim -60 \text{ dBm}$ 에서 부분방전이 높게 밀집하였다.

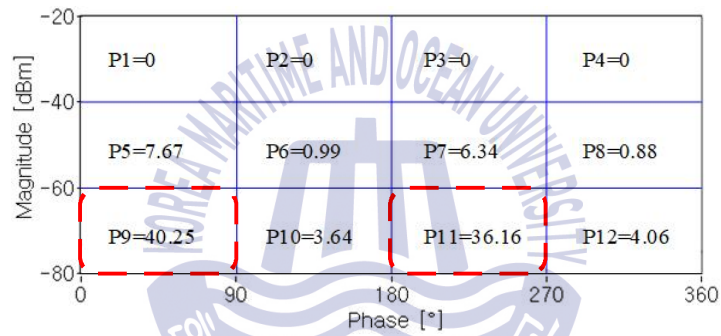
또한 통계적 수치는 그림 4.7(c)와 같이 정극성의 왜도 0.21, 첨도는 1.34이며, 부극성의 왜도는 0.19, 첨도는 1.30으로 정극성과 부극성의 왜도 및 첨도가 유사하게 분석되었다. 또한 두 극성의 상관계수는 0.95로 모의 결함 7종 중, 부분방전의 통계적 특성이 가장 유사하게 나타났다.

전압 19 kV를 인가하였을 때, UHF센서의 크기가 $-80 \text{ dBm} \sim -60 \text{ dBm}$ 에서 다소 높아졌지만 부분방전의 분포 특성은 동일한 경향을 나타내었다.

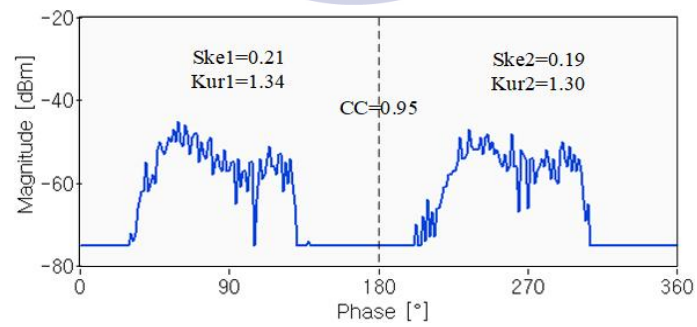




(a) PRPD 패턴



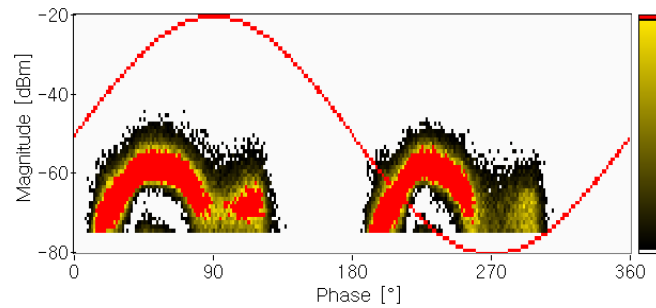
(b) PRPD-12Window



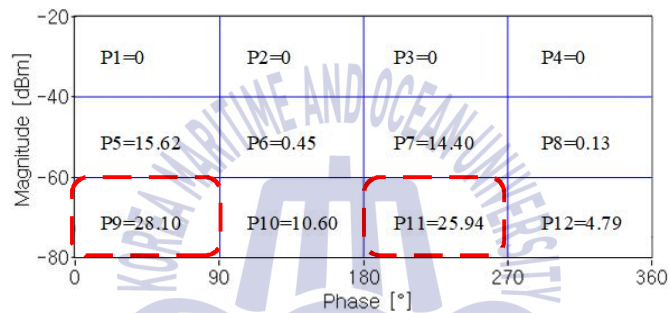
(c) 통계적 특성

그림 4.10 14 kV에서 Crack의 파라미터

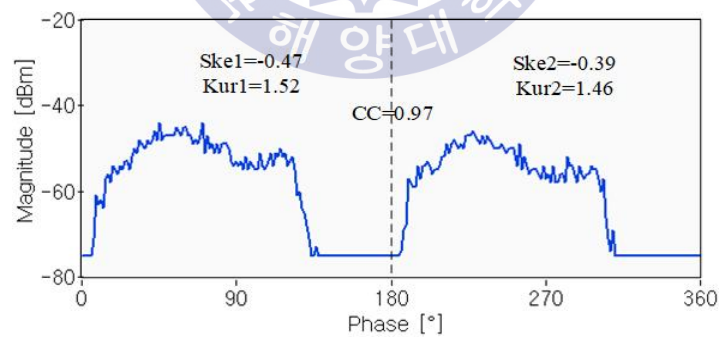
Fig. 4.10 Parameters of Crack at 14 kV



(a) PRPD 패턴



(b) PRPD-12Window



(c) 통계적 특성

그림 4.11 19 kV에서 Crack의 파라미터

Fig. 4.11 Parameters of Crack at 19 kV

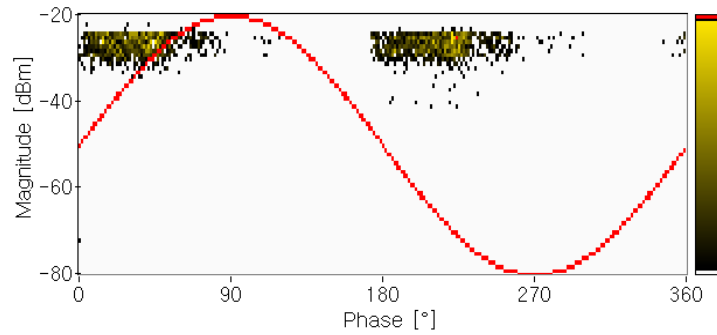
⑥ Floating metal, Floating

10 kV를 Floating에 인가한 결과를 그림 4.12에 나타내었다. 정극성 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 의 $-39 \text{ dBm} \sim -20 \text{ dBm}$ 과 $181^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 의 $-39 \text{ dBm} \sim -20 \text{ dBm}$ 에서 부분방전이 밀집된 형태로 UHF센서의 크기가 가장 높은 영역에서 분포하였다.

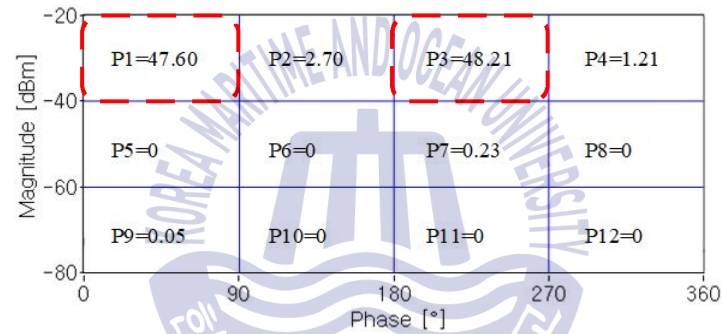
또한 통계적 수치는 그림 4.12(c)와 같이 정·부극성의 형태가 유사한 상태로, 상관계수는 0.74로 분석되었다. 정극성의 왜도는 -0.28, 첨도는 1.05이며, 부극성의 왜도는 -0.32, 첨도는 1.07로 나타났다.

14 kV를 인가하였을 때도 PRPD-12Window에서 부분방전의 클러스터 분포는 10 kV와 동일하였다. 정극성에서 왜도 -0.77, 첨도 1.58이며, 부극성에서 왜도 -1.14, 첨도 2.32로 분석되었다. 정·부극성의 상관계수는 0.75로 나타났다.

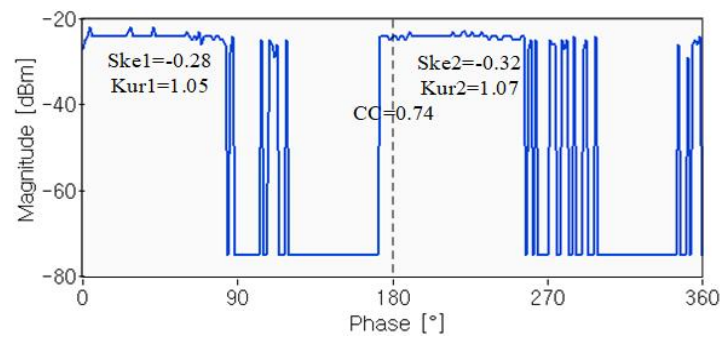




(a) PRPD 패턴



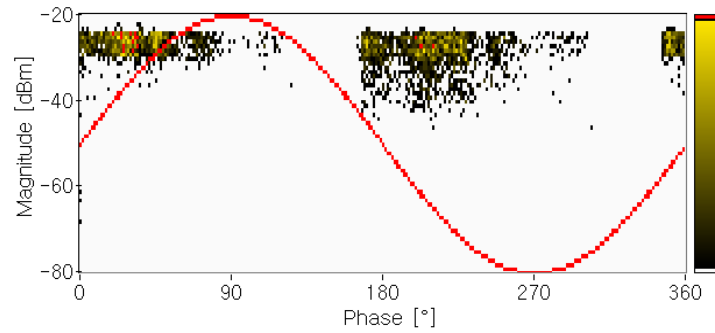
(b) PRPD-12Window



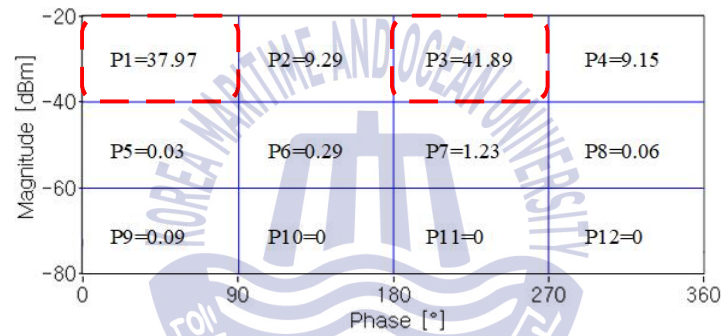
(c) 통계적 특성

그림 4.12 10 kV에서 Floating의 파라미터

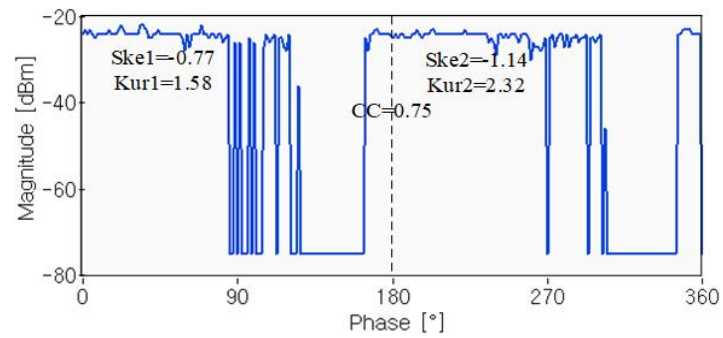
Fig. 4.12 Parameters of Floating at 10 kV



(a) PRPD 패턴



(b) PRPD-12Window



(c) 통계적 특성

그림 4.13 14 kV에서 Floating의 파라미터

Fig. 4.13 Parameters of Floating at 14 kV

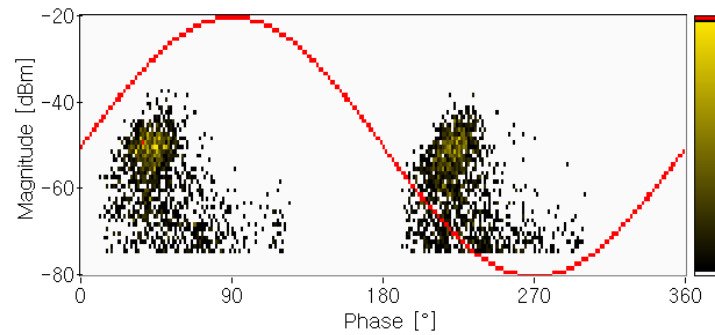
⑦ Void inside spacer, Void

그림 4.14와 같이 Void에 9 kV를 인가하였을 때, 진단 알고리즘의 파라미터를 나타내었다. 정극성 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 의 $-59 \text{ dBm} \sim -40 \text{ dBm}$ 과 부극성 $181^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 의 $-59 \text{ dBm} \sim -40 \text{ dBm}$ 에서 부분방전이 분포하였다.

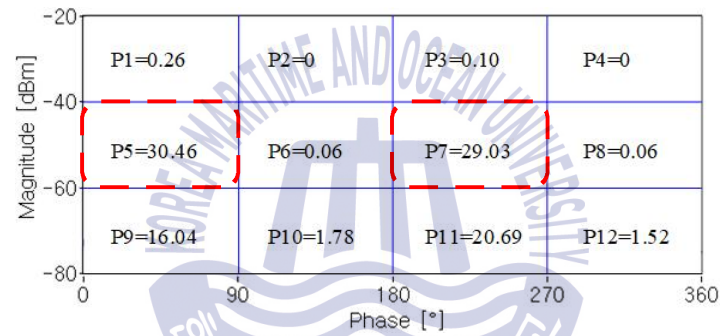
또한 통계적 수치는 그림 4.14(c)와 같이 정극성의 왜도는 0.49, 첨도는 1.69이며, 부극성은 왜도 0.54 및 첨도 1.66으로, 정·부극성에서의 부분방전 특성이 Crack과 유사하였다. 상관계수 또한 0.92로 모의 결함 7종 중, Crack 다음으로 높게 분석되었다.

Void에 12 kV의 전압을 인가하였을 때의 부분방전 특성은 9 kV를 인가한 경우와 상이하게 나타났다. 정극성 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 의 $-59 \text{ dBm} \sim -40 \text{ dBm}$ 과 부극성 $181^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 의 $-59 \text{ dBm} \sim -40 \text{ dBm}$ 에서 부분방전이 분포하였다.

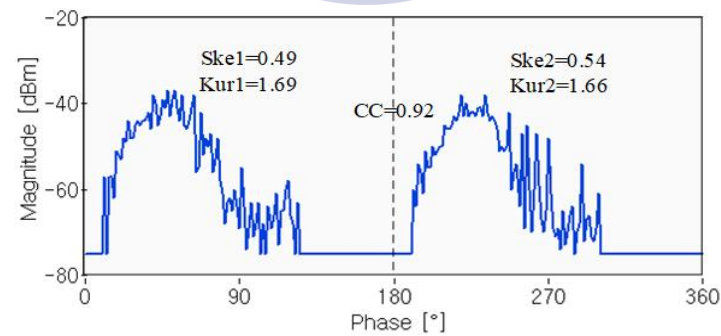
또한 통계적 수치는 그림 4.15(c)와 같이 정극성의 왜도는 0.33, 첨도는 1.72, 부극성은 왜도 0.70 및 첨도 1.81이며, 상관계수는 0.66으로 9 kV보다 다소 낮게 분석되었다.



(a) PRPD 패턴



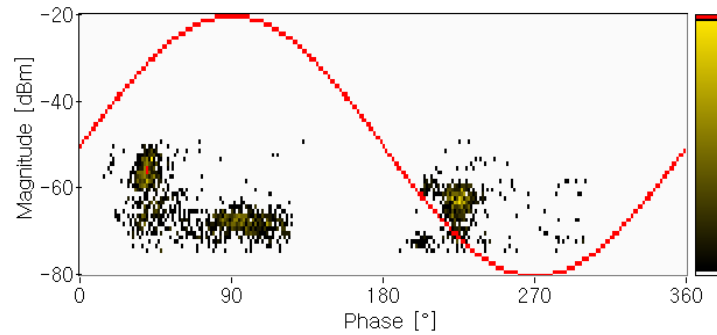
(b) PRPD-12Window



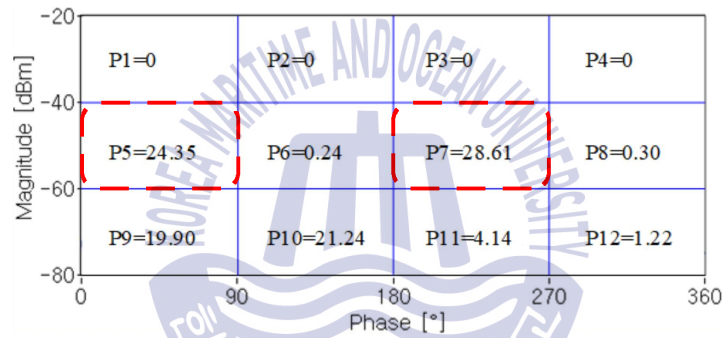
(c) 통계적 특성

그림 4.14 9 kV에서 Void의 파라미터

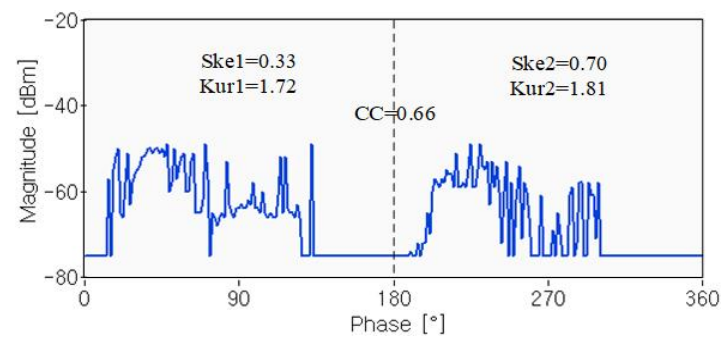
Fig. 4.14 Parameters of Void at 9 kV



(a) PRPD 패턴



(b) PRPD-12Window



(c) 통계적 특성

그림 4.15 12 kV에서 Void의 파라미터

Fig. 4.15 Parameters of Void at 12 kV

모의 결함 7종에서 분석한 PRPD-12Window 데이터를 요약하면 그림 4.16과 같다. POC는 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}/-80 \text{ dBm} \sim -60 \text{ dBm}$ 에서 부분방전의 클러스터가 형성되었고, POE는 $181^{\circ} \sim 360^{\circ}/-59 \text{ dBm} \sim -40 \text{ dBm}$ 에서 부분방전이 분포하였다. POS는 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}/-80 \text{ dBm} \sim -60 \text{ dBm}$, $181^{\circ} \sim 270^{\circ}/-80 \text{ dBm} \sim -60 \text{ dBm}$ 이며, FP는 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}/-80 \text{ dBm} \sim -60 \text{ dBm}$, $91^{\circ} \sim 180^{\circ}/-59 \text{ dBm} \sim -40 \text{ dBm}$, $181^{\circ} \sim 270^{\circ}/-80 \text{ dBm} \sim -60 \text{ dBm}$ 및 $271^{\circ} \sim 360^{\circ}/-59 \text{ dBm} \sim -40 \text{ dBm}$ 의 전 위상에서 부분방전이 분포하였다.

Crack은 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}/-80 \text{ dBm} \sim -60 \text{ dBm}$ 과 $181^{\circ} \sim 270^{\circ}/-80 \text{ dBm} \sim -60 \text{ dBm}$ 이며, Floating은 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}/-39 \text{ dBm} \sim -20 \text{ dBm}$ 과 $181^{\circ} \sim 270^{\circ}/-39 \text{ dBm} \sim -20 \text{ dBm}$ 부분에서 부분방전의 클러스터가 밀집되어 있었다. Void는 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}/-59 \text{ dBm} \sim -40 \text{ dBm}$ 과 $181^{\circ} \sim 270^{\circ}/-59 \text{ dBm} \sim -40 \text{ dBm}$ 에서 부분방전이 분포하였다.

표 4.1 모의 결함 7종의 PRPD-12Window

Table 4.1 PRPD-12Window of 7 types of defects

모의 결함 \ 분류	위상[Φ]-크기[dBm]			
	$0^{\circ} \sim 90^{\circ}$	$91^{\circ} \sim 180^{\circ}$	$181^{\circ} \sim 270^{\circ}$	$271^{\circ} \sim 360^{\circ}$
POC	$-80 \sim -60$			
POE			$-59 \sim -40$	
POS	$-80 \sim -60$		$-80 \sim -60$	
FP	$-80 \sim -60$	$-59 \sim -40$	$-80 \sim -60$	$-59 \sim -40$
Crack	$-80 \sim -60$		$-80 \sim -60$	
Floating	$-39 \sim -20$		$-39 \sim -20$	
Void	$-59 \sim -40$		$-59 \sim -40$	

이와 같이 UHF센서로 검출된 부분방전 펄스를 위상(Φ)과 크기(dBm)에 대하여 분석한 결과, 모의 결함에 따라 개별적인 부분방전의 클러스터가 형성되었다. 이는 결함의 구조와 관련 있는 것으로, 파티클의 부착 위치 및 형태 등과 관련이 있는 것으로 판단된다. 예를 들면 POC의 경우 침전극이 도전체에 부착되어 있기 때문에 정극성($0^\circ \sim 180^\circ$) 부분에서 전계가 집중되어 부분방전의 클러스터가 형성되는 것으로 분석된다.

4.2 적용 평가

다층 신경망(Multi-layer neural network)으로 알고리즘을 설계하여 가스절연구조에서 결함 원인을 판별하였다. Dynamic-sequence 기능을 가진 Standard state machine 구조를 사용하여 데이터를 처리하였다.

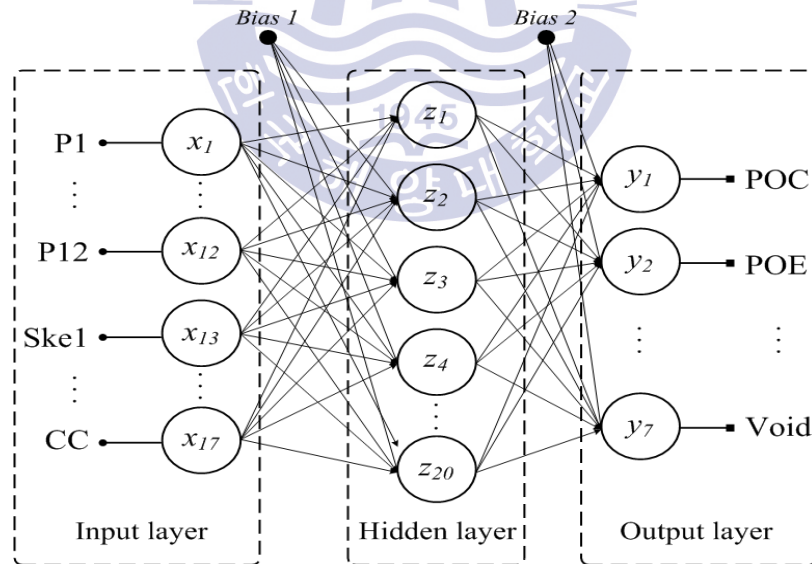


그림 4.16 다층 신경망의 구조

Fig. 4.16 Structure of multi-layer neural network

다층 신경망의 구조는 그림 4.16과 같이 입력층(Input layer), 은닉층(Hidden layer) 및 출력층(Output layer)의 세 부분으로 구성하였다. 입력층은 학습하고자 하는 17개의 파라미터, 은닉층은 20개의 뉴런, 그리고 출력층은 7종의 결함으로 설계하였다^[51, 52].

각 층의 뉴런들은 연결강도(Weight)로 결합되며, 뉴런의 활성화 여부를 제어하기 위하여 은닉층과 출력층에 바이어스를 1개씩 연결하였다. 뉴럴 네트워크를 학습시키기 위하여 역전파 알고리즘을 이용하여 각 모의 결함별로 30회씩 파라미터를 입력하고, 해당 출력 뉴런의 목표 출력이 100%가 나오도록 반복하였다.

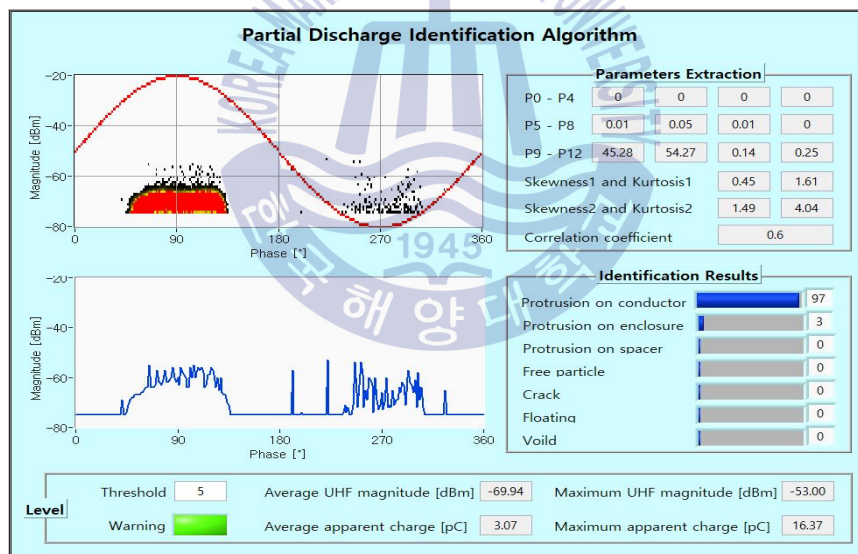


그림 4.17 POC의 적용 평가

Fig. 4.17 Application evaluation of POC

학습을 통해 얻어진 연결강도를 사용하여 모의 결함에서 도출한 17개의 파라미터로 결함 원인을 판별한 처리 영상은 그림 4.17과 같다. UHF 센서에서 측정된 부분방전 펄스를 스펙트럼으로 변환하여 17개 항목으로 특성을 분석하였다. 제안한 결함 판별 알고리즘의 판별 정확도는 그림 4.18과 같다. 최소 92%에서 최대 99%까지 판별을 검증하였다. 기존에 위상(Φ)-방전 개수(n)를 분석하여 결함을 판별하는 기술보다 제안한 판별 알고리즘은 분석 기법을 추가함으로써, 판별률을 약 5% 향상시킬 수 있었다.

Actual output	POC	95.7%	3.8%	0%	0%	0%	0%	0%
	POE	4.3%	96.2%	0%	0%	0%	0%	0%
	POS	0%	0%	92.3%	0.7%	2.7%	0%	2.3%
	FP	0%	0%	0%	99.2%	0%	0%	0%
	Crack	0%	0%	3.4%	0%	93.7%	0%	3.0%
	Floating	0%	0%	0%	0%	0%	99.8%	0%
	Void	0%	0%	4.3%	0.1%	3.6%	0%	94.7%
		POC	POE	POS	FP	Crack	Floating	Void
		Target output						

그림 4.18 결함 판별의 결과

Fig. 4.18 Results of defects identification

제 5 장 결 론

본 논문에서는 가스절연개폐장치(GIS)에서 발생하는 절연파괴의 원인을 진단하기 위한 목적으로, SF₆ 가스절연구조에서 결함별 부분방전의 특성과 판별 알고리즘에 대해 연구하였다. 가스절연개폐장치에서 발생하는 절연파괴의 주요 원인을 도체 돌출(POC), 외함 돌출(POE), 스페이서 돌출(POS), 자유 입자(FP), 크랙(Crack), 부유 금속(Floating) 및 보이드(Void)의 7가지로 구분하였다.

UHF센서의 측정 대역은 100 MHz ~ 700 MHz, 1 GHz ~ 1.4 GHz 및 검출 감도는 -70 dBm이며, IEC 60270법의 검출법과 UHF센서로 부분방전을 동시에 측정하여 위상 및 크기 등 전기적 특성을 분석하였다. 또한 절연진단에 있어 부분방전의 크기는 전하량(pC)이 사용되므로 센서의 출력 dBm과 pC의 상관관계 $pC = 10^{(dBm+81.31)/23.32}$ 를 도출하였다. dBm과 pC의 선형적인 특성을 분석함으로써, 가스절연개폐장치의 진단 과정에서 UHF센서를 사용하여 결함별 방전 전하량을 실시간으로 추정할 수 있다.

부분방전의 특성은 0° ~ 360°의 위상별 부분방전의 크기에 따라 발생 비율(구간/전체)을 나타내는 PRPD-12Window로 분석하였다. POC는 0° ~ 180° 구간의 -80 dBm ~ -60 dBm에서 클러스터가 최대로 형성되었고, POE는 181° ~ 360°/-59 dBm ~ -40 dBm에서 부분방전이 분포하였다. POS는 0° ~ 90°/-80 dBm ~ -60 dBm, 181° ~ 270°/-80 dBm ~ -60 dBm이다.

FP는 0° ~ 90°/-80 dBm ~ -60 dBm, 91° ~ 180°/-59 dBm ~ -40 dBm, 181° ~ 270°/-80 dBm ~ -60 dBm 및 271° ~ 360°/-59 dBm ~ -40 dBm의 전 위상에서 부분방전이 분포하였다. 이는 결함이 고정되어 있는 6종의 전극계와 다르게 파티클이 Shuffle과 Jumping을 병행하며 지속적으로 이동하기 때문이다.

Crack은 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}/-80 \text{ dBm} \sim -60 \text{ dBm}$ 과 $181^{\circ} \sim 270^{\circ}/-80 \text{ dBm} \sim -60 \text{ dBm}$ 이며, Floating은 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}/-39 \text{ dBm} \sim -20 \text{ dBm}$ 과 $181^{\circ} \sim 270^{\circ}/-39 \text{ dBm} \sim -20 \text{ dBm}$ 에서 부분방전의 클러스터가 밀집되었다. Void는 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}/-59 \text{ dBm} \sim -40 \text{ dBm}$ 과 $181^{\circ} \sim 270^{\circ}/-59 \text{ dBm} \sim -40 \text{ dBm}$ 에서 부분방전의 발생 비율이 가장 높았다. 이와 같이 모의 결함에 따라 개별적인 부분방전의 클러스터가 형성되는 이유는 결함의 구조와 관련된 것으로, 결함 입자의 위치 및 형태 등에 따라 전계 집중이 다르기 때문이다.

PRPD-12Window와 통계적 수치를 나타내는 왜도, 첨도 및 상관 계수의 파라미터로 입력층의 17개 항목을 구성하고, 은닉층 20개의 뉴런 및 출력층 7종의 역전파 알고리즘을 적용하여 인공지능 기반의 결함 판별 알고리즘을 설계하였다. 뉴런의 활성화 여부를 제어하기 위하여 은닉층과 출력층에 각각 바이어스를 1개씩 연결하고, 모의 결함 별로 30회씩 파라미터를 입력한 후, 해당 출력 뉴런의 목표 출력이 100%가 되도록 학습시켰다. 그 결과, 판별 정확도는 결함별 92% ~ 99%로 기존 PRPD, TF 및 PSA 등 보다 5% 이상 향상시킬 수 있었다.

본 연구 결과와 제안한 인공지능 기반의 역전파 알고리즘은 국내 중전기 산업에 핵심 기술로 활용되었으며, 가스절연개폐장치에서 발생하는 절연 파괴의 원인을 신속 정확하게 판단할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 전력연구원, '개폐기 건전성 평가 및 진단기준 제정', pp.37~39, 2007.
- [2] M. Hikita, 'Fundamental principles and application of diagnosis for GIS using partial discharge measurements', 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics, pp.1~6, 2011.
- [3] 최길수, 'GIS 설비 예방진단기술', 계장기술, Vol. 8, pp.94~101, 2013.
- [4] S. W. Kim, 'A study on the phase-asynchronous PD diagnosis method for gas insulated switchgear', Korea Maritime and Ocean University, Degree Thesis for Doctor of Philosophy, pp.1~2, 2017.
- [5] J. C. Fothergill, L. A. Dissado, and P. J. J. Sweeney, 'A discharge avalanche theory for the propagation of electrical tree', IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 1, No. 2, pp.474~486, 1994.
- [6] E. Gulski and A. Krivda, 'Neural networks as a tool for recognition of partial discharges', IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 28, No. 6, pp.984~1001, 1993.
- [7] R. M. Eichhorn, 'Treeing in solid extruded electrical insulation', IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. E I-12, No. 1, pp.2~18, 1976.
- [8] 정기우, 'SF₆ 가스중 부분방전펄스 분석에 의한 지능형 결함 판별 알고리즘', 한국해양대학교, 석사학위논문, pp.1~2, 2015.
- [9] D. König, 'Partial discharges in electrical power apparatus', Berlin, VDE-Verlag, 1993.
- [10] 김병현, '가스절연개폐장치 부분방전진단 고장예방 사례분석', 계장기술, pp.114~121, 2013.
- [11] (주)효성중공업 PG, 'GIS 내부 PD 신호에 대한 데이터 취득 및 패턴 분석법 개발', 연구과제 보고서, pp.2~4, 2013.
- [12] IEC 60270, 'High voltage test techniques - partial discharge measurements', 3rd Edition, 2000.

- [13] F. H. Kreuger, 'Partial discharge detection in high voltage equipment', Butterworth, pp.129~152, 1989.
- [14] N. H. Malik, A. A. Al-Arainy, and M. I. Qureshi, 'Electrical insulation in power system', Riyadh, 1998.
- [15] CIGER, 'Risk assessment on defects in GIS based on PD Diagnosis', 2013.
- [16] 한국전력공사(송변전운영처 송전운영실), '지중송전 부분방전 및 진단의 이해', pp.121~159, 2018.
- [17] A. Haddad and D. F. Warne, 'Advances in high voltage engineering', The Institution of Engineering and Technology, pp.37~54, 2004.
- [18] H. M. Ryan, 'High-voltage engineering and testing', The Institution of Engineering and Technology, pp.319~324, 2013.
- [19] P. H. F. Morshuis and J. J. Smit, 'Partial discharges at dc voltage: their mechanism, detection and analysis', IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, No. 2, pp.328~340, 2005.
- [20] R. Piccin, A. R. Mor, P. Morshuis, A. Girodet, and J. Smit, 'Partial discharge analysis of gas insulated systems at high voltage AC and DC', IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 22, No. 1, pp. 218~228, 2015.
- [21] G. M. Wang, H. E. Jo, S. J. Kim, S. W. Kim, and G. S. Kil, 'Measurement and analysis of partial discharges in SF₆ gas under HVDC', Measurement, Vol. 91, pp.351~359, 2016.
- [22] M. Wu, H. Cao, J. Cao, H. L. Nguyen, J. B. Gomes, and S. P. Krishnaswamy, 'An overview of state-of-the-art partial discharge analysis techniques for condition monitoring', IEEE Elect. Insul. Mag., Vol. 31, No. 6, pp.22~35, 2015.

- [23] K. Raja, F. Devaux, and S. Lelaidier, 'Recognition of discharge sources using UHF PD signatures', IEEE Elect. Insul. Mag., Vol. 18, No. 5, pp.8~14, 2002.
- [24] Y. C. Wang, J. D. Wu, Z. Li, Y. Yin, 'Research on a practical de-noising method and the characterization of partial discharge UHF signals', IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul., Vol. 21, No. 5, pp.2206~2216, 2014.
- [25] S. Okabe, G. Ueta, H. Hama, T. Ito. M. Hikita, and H. Okubo, 'New aspects of UHF PD diagnostics on gas-insulated systems', IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul., Vol. 21, No. 5, pp.2245~2258, 2014.
- [26] IEEE C57.127, 'IEEE guide for the detection and location of acoustic emissions from PD in oil-immersed power transformers and reactors', IEEE, 2007.
- [27] E. Lundgaard, 'Partial discharge XIII: acoustic partial discharge detection-fundamental considerations', IEEE Elect. Insul. Mag., Vol. 8, No. 4, pp.25~31, 1992.
- [28] G. S. Kil, I. K. Kim, D. W. Park, S. Y. Choi, and C. Y. Park, 'Measurements and analysis of the acoustic signals produced by partial discharge in insulation oil', Curr. Appl. Phys., Vol. 9, No. 2, pp.296~300, 2009.
- [29] U. Fromm and E. Gulski, 'Statistical behaviour of internal partial discharges at DC voltage', Proc. 1994 4th Int. Conf. Prop. Appl. Dielectr. Mater. 2, 1994.
- [30] S. Wenrong, L. Junhao, Y. Peng, L. Yanming, 'Digital detection, grouping and classification of partial discharge signals at DC voltage', IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol. 15, No. 6, pp.1663~1674, 2008.

- [31] H. E. Jo, G. M. Wang, S. J. Kim, and G. S. Kil, 'Comparison of partial discharge characteristics in SF₆ gas under AC and DC', Trans. Electr. Electron. Mater. Vol. 16, No. 6, pp.323~327, 2015.
- [32] A. Cavallini, A. Contin, Gian Carlo Montanari, and F. Puletti, 'Advanced PD inference in on-field measurements. I. noise rejection', IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul., Vol. 10, No. 2, pp.216~224, 2003.
- [33] H. E. Jo, G. M. Wang, S. J. Kim, and G. S. Kil, 'Partial discharge characteristics in SF₆-N₂ mixture gases under high voltage direct current', Science of Advanced Materials, Vol. 10, No. 2, pp.275~278, 2018.
- [34] 김민수, 'SF₆ 가스중 HVDC에서 부분방전 특성에 관한연구', 한국해양대학교, 석사학위논문, 2014.
- [35] H. E. Jo, G. W. Jeong, G. M. Wang, G. S. Kil, and S. W. Kim, 'Identification of defect types by analysis of PD pulses in SF₆ gas', International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 10, No. 19, pp.40703~40708, 2015.
- [36] N. Sahoo, M. Salama, and R. Bartnikas, 'Trends in partial discharge pattern classification: A survey', IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul., Vol. 12, No. 2, pp.248~264, 2005.
- [37] A. A. Masud, B. G. Stewart, S. G. Mcmeekin, 'Application of an ensemble neural network for classifying partial discharge patterns', Electr. Power Syst. Res., Vol. 110, pp.154~162, 2014.
- [38] C. S. Chang, J. Jin, S. Kumar, Q. Su, T. Hoshino, M. Hanai, and N. Kobayashi, 'Denoising of partial discharge signals in wavelet packets domain', Inst. Elect. Eng. Sci. Measure. Techn., Vol. 152, No. 3, pp.129~140, 2005.

- [39] W. Kalkner, A. Obralic, A. Bethge, and R. Plath, 'Synchronous 3-phase partial discharge detection on rotating machines', Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, G-042, 2005.
- [40] J. Ramirez-Nifio, S. Rivera-Castafieda, V. R. Garcia-Colon, and V. M. Casttio, 'Analysis of partial electrical discharges in insulating materials through the wavelet transform', Comput. Mater. Sci., Vol. 9, No. 3, pp.379~388, 1998.
- [41] X. Zhou, C. Zhou, and I. J. Kemp, 'An improved methodology for application of wavelet transform to partial discharge measurement de-noising', IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, No. 3, pp.586~594, 2005.
- [42] I. Shim, J. J. Soraghan, and W. H. Siew, 'Detection of PD utilizing digital signal processing method. Part 3: open-loop noise reduction', IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 17, No. 1, pp.6~13, 2001.
- [43] G. M. Wang, S. J. Kim, G. S. Kil, and S. W. Kim, 'Optimization of wavelet and thresholding for partial discharge detection under HVDC', IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 24, No. 1, pp.200~208, 2017.
- [44] H. A. Illias, G. Chen, and P. L. Lewin, 'Measurement of partial discharge activities within two artificial spherical voids in an epoxy resin', Annual Conference on CEIDP, pp.489~492, 2011.
- [45] S. W. Kim, J. R. Jung, G. M. Wang, S. J. Kim, and G. S. Kil, 'Classification of PD defects in gas insulated switchgears under HVDC', International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 11, No. 4, pp.2235~2239, 2016.

- [46] N. D. Kock, B. Coric, and R. Pietsch, 'UHF PD detection in gas-insulated switchgear-suitability and sensitivity of the UHF method in comparison with the IEC 270 method', IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 12, No. 6, pp.20~26, 1996.
- [47] 김선재, 왕국명, 박서준, 길경석, 안창환, 'SF₆ 가스절연에서 부분방전의 특성분석', 한국전기전자재료학회, Vol. 29, No. 7, pp.429~434, 2016.
- [48] 김선재, 조향은, 왕국명, 윤민영, 길경석, 'SF₆ 가스 중 HVDC에서 금속 파티클의 부분방전 특성', 한국전기전자재료학회, Vol. 28, No. 12, pp.831~836, 2015.
- [49] (주)효성중공업 PG, 'GIS 내부 PD 신호에 대한 원인별 PRPD 데이터 취득', 연구과제 보고서, 2016.
- [50] L. Yang, M. D. Judd, and C. J. Bennoch, 'Denoising UHF signal for PD detection in transformers based on wavelet technique', In Proceedings of the 2004 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Boulder, USA, 20 October 2004.
- [51] A. Hirata, S. Nakata, and Z. I. Kawasaki, 'Toward automatic classification of partial discharge sources with neural networks', IEEE Trans. Power Del., Vol. 21, No. 1, pp.527~527, 2006.
- [52] A. A. Masud, B. G. Stewart, and S. G. Mcmeekin, 'Application of an ensemble neural network for classifying partial discharge patterns', Electr. Power Syst. Res., Vol. 110, pp.154~162, 2014.