



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](#)

工學碩士 學位論文

부분방전 분석에 의한  
진공 인터럽터(Vacuum Interrupter)의  
절연 진단에 관한 연구

A Study on the Insulation Diagnosis of Vacuum Interrupter  
by the analysis of Partial Discharge



指導教授 吉 暻 碩

2020年 8月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

李 京 烈

本 論 文 을 李 京 烈 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

委 員 長 : 工 學 博 士 李 成 根 ㉠

委 員 : 工 學 博 士 吉 暻 碩 ㉠

委 員 : 工 學 博 士 朱 良 翊 ㉠



2020年 7月

韓國海洋大學校 大學院

# 목 차

목 차 .....	i
그림 및 표 목차 .....	ii
Abstract .....	iv
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 이 론 .....	4
2.1 수배전반 .....	4
2.2 부분방전 .....	11
제 3 장 실험 및 방법 .....	18
3.1 실험계 .....	18
3.2 부분방전 측정 .....	23
제 4 장 결과 및 분석 .....	25
4.1 정상 상태 .....	25
4.2 결함별 특성 .....	29
4.3 결과 고찰 .....	50
제 5 장 결 론 .....	55
참 고 문 헌 .....	57

## 그림 및 표 목차

### <그림 목차>

그림 1.1	고압 차단기의 시장 경향 .....	1
그림 1.2	진공 차단기 사고로 인한 인명/재산피해 통계 .....	2
그림 2.1	고압 수배전반 단선결선도 및 도면 .....	4
그림 2.2	진공 차단기 .....	5
그림 2.3	진공 인터럽터 단면 .....	7
그림 2.4	손상된 진공 인터럽터 .....	8
그림 2.5	건조한 공기의 파센 곡선 .....	9
그림 2.6	부분방전 종류 .....	11
그림 2.7	전자사태 진전과정 .....	13
그림 2.8	IEC 60270에 따른 검출회로 .....	15
그림 2.9	신호처리 시스템 구조 .....	16
그림 2.10	부분방전 펄스 파라미터 .....	17
그림 3.1	부분방전 측정시스템 .....	19
그림 3.2	응답 신호 비교 .....	20
그림 3.3	전극계 .....	22
그림 4.1	정상상태의 PRPD (기준 데이터) .....	26
그림 4.2	정상상태의 PRPD 특성 (기준 데이터) .....	28
그림 4.3	진공누설 결함의 PRPD .....	30
그림 4.4	진공누설 결함의 PRPD 특성 .....	32
그림 4.5	점점 불완전 개방의 PRPD .....	34
그림 4.6	점점 불완전 개방의 PRPD 특성 .....	36
그림 4.7	진공누설 및 점점 불완전 개방의 PRPD .....	37

그림 4.8	진공누설 및 접점 불완전 개방의 PRPD 특성 .....	39
그림 4.9	접점표면 손상상태에서 진공누설 결함의 PRPD .....	42
그림 4.10	접점표면 손상상태에서 진공누설 결함의 PRPD 특성 .....	44
그림 4.11	접점표면 손상상태에서 진공누설 결함 및 접점 불완전 개방의 PRPD .....	47
그림 4.12	접점표면 손상상태에서 진공누설 결함 및 접점 불완전 개방의 PRPD 특성 .....	49
그림 4.13	결함별 방전개시전압 비교 .....	51
그림 4.14	인가전압에 따른 각 결함별 최대 방전전하량 비교 .....	52
그림 4.15	결함별 방전개시전압에서 부분방전 위상분포 비교 .....	53

<표 목차>

표 2.1	진공 차단기 내부 구성 품목 .....	6
표 3.1	입력 펄스에 대한 출력 펄스 및 전압 .....	20
표 3.2	진공 인터럽터 제원 .....	21
표 3.3	부분방전 검출 실험 조건 .....	23
표 4.1	결함 별 방전개시전압 비교 .....	50
표 4.2	결함 별 방전개시전압과 방전개시전압의 120%에서 극성비 비교 .....	54

# **A Study on the Insulation Diagnosis of Vacuum Interrupter by the analysis of Partial Discharge**

*Gyeong-Yeol Lee*

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

## **Abstract**

Personal injuries and property damages are significantly being increased due to electrical accidents related to vacuum circuit breakers (VCB) in switchgear. Therefore, researches on a diagnostic technique for vacuum interrupters (VI) which is a core part of the VCB and quenching an arc generated during opening and closing has been actively conducted both domestic and abroad.

In order to the insulation performance of the VI in the open state, partial discharge (PD) signals of each defect according to the applied voltage were measured using the KS C IEC 60270 method. The main defects that weaken the dielectric strength of the VI were classified into three types: leakage of vacuum, incomplete opening of the contact, and damage to the contact surface.

The measurement system consists of a maximum voltage 50 kV mold transformer, a 10,000: 1 voltage divider, an oscilloscope, and an MPD 600. A VI for the rated voltage 25.8 kV and an electrode system made of internal contacts from the same VI were used in the experiment. A 50 $\Omega$  non-inductive

resistance (Oscilloscope) and an  $1\text{nF}$  coupling capacitor (MPD 600) were used to detect PD signal. The phase-resolved partial discharge (PRPD) method was used to analyze the PD characteristics such as discharge inception voltage (DIV), apparent discharge ( $q$ ), the number of pulses ( $n$ ), phase distribution ( $\varnothing$ ), and polarity ratio. Based on the PD characteristics of the open stated normal VI, the changes of the PD characteristics for each defect were analyzed and the effects of each defect on the deterioration of dielectric strength were derived.

Through the diagnostic methods and techniques proposed in this paper, it is possible to diagnose insulation of the VI in an open state in operation. Accordingly, it is expected that the safety of the VCB, which is most often used in the switchgear of high-voltage customers, can be secured to improve the reliability of power facilities.



# 부분방전 분석에 의한 진공 인터럽터(Vacuum Interrupter)의 절연 진단에 관한 연구

이 경 렬

대한민국, 부산  
한국해양대학교 대학원  
전기전자공학과

## 초 록

수배전반 내 진공 차단기와 관련된 사고 증가로 인명피해와 재산피해가 늘어나고 있다. 이에 진공 차단기의 핵심 부품으로써 개폐 시 발생하는 아크를 소호하는 진공 인터럽터에 대한 진단기술(Diagnostic technique) 연구가 국·내외에서 활발히 진행되고 있다.

진공 인터럽터의 개방 상태에서 절연성능 건전여부를 진단하기 위해 KS C IEC 60270 부분방전 검출법을 이용하여 인가전압에 따른 결함 별 부분방전을 측정하였다. 진공 인터럽터의 절연내력을 약화시키는 주요 결함을 진공누설 및 접점의 불완전한 개방, 접점표면의 손상의 3가지로 분류하였다.

측정 시스템은 최대 출력전압 50kV 몰드 변압기, 10,000:1 분압기, 오실로스코프 및 MPD 600 등으로 구성하였다. 실험에는 정격전압 25.8kV 진공 인터럽터와 동일 제품의 내부 접점으로 제작한 전극계를 사용하였다. 부분방전 검출에는 50Ω 비유도성저항(Oscilloscope)과 1nF 커플링 커패시터(MPD 600)를 사용하였다. 방전개시전압(DIV), 방전전하량( $q$ ), 펄스개수( $n$ ), 위상분포( $\emptyset$ ) 및 극성비와 같은 부분방전 특성을 PRPD(Phase-resolved

partial discharge) 법으로 분석하였다. 정상 진공 인터럽터에서 검출되는 신호를 기준으로, 결함 별 부분방전 검출특성 변화를 분석하여 각 결함의 절연성능 영향 정도를 도출하였다.

본 논문에서 제안된 진단 방법 및 기술을 통해 운용 중인 개방 상태의 진공 인터럽터의 절연 진단이 가능하다. 이를 통해 고압 수용가의 수배 전반에 가장 많이 사용되는 진공 차단기의 안전성을 확보하여 전력 설비의 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.



# 제 1 장 서 론

전기는 21세기에서 가장 필수적인 재화로써 의식주와 같은 일상생활부터 건설, 의료, 생산, 운송 등 다양한 분야까지 밀접하게 연관되어있다. 그만큼 전기에 대한 삶의 의존도가 높기 때문에 전기 사고가 발생하면 막대한 인명·재산 피해를 입게 된다. 특히, 최근 고압을 직접 수전하는 고압수용가의 수가 증가하고 있어 전력설비 진단기법 및 설비 관리기법에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

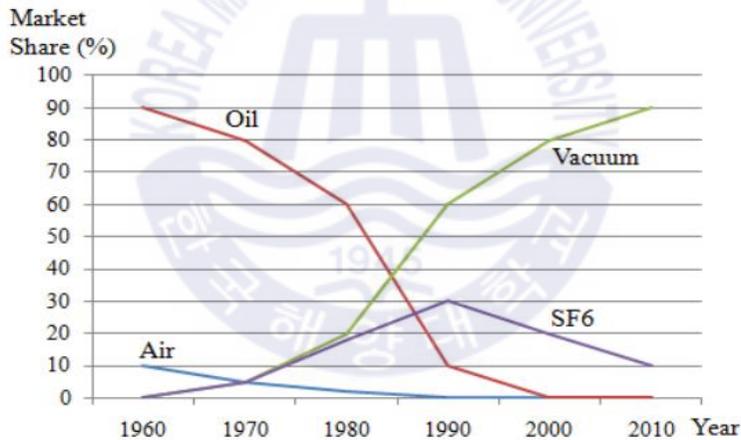


그림 1.1 고압 차단기의 시장 경향

Fig. 1.1 Trend of high voltage circuit breakers

그림 1.1은 50여 년간 전 세계 차단 매질별 고압 차단기의 시장 점유율을 나타낸 그래프이다<sup>[1]</sup>. 고압 전력계통에는 목적에 따라 공기, 절연유, 진공, 가스(SF<sub>6</sub>) 등 다양한 절연 매질을 이용한 차단기가 사용되고 왔다. 일반적

으로 수배전반에 사용되는 차단기는 한정된 공간에 설치되어야하기 때문에 가스절연차단기(Gas insulated circuit breaker, GCB) 또는 진공 차단기(Vacuum circuit breaker, VCB)가 주로 사용되고 있다. 하지만 최근 20~30여 년 전부터는 진공 차단기의 핵심 부품인 진공 인터럽터(Vacuum interrupter, VI)의 진공기밀 및 아크소호 등 제작기술의 발달에 더불어 SF<sub>6</sub>(Sulfur hexafluoride)가스의 지구 온난화 촉진 문제로 인해 가스절연 차단기가 진공 차단기로 대체되고 있어 진공 차단기의 시장 점유율은 약 90%에 육박하고 있다<sup>[2]</sup>. 또한 과거 선박 및 플랜트 분야에서 사용된 차단기는 다른 절연매질에 비해 상대적으로 긴 차단시간으로 유기되는 역전압이 작으며 단락 용량이 큰 가스절연차단기가 주로 사용되어 왔다. 하지만 최근에는 위와 같은 진공 인터럽터의 기술 발달로 한정된 공간에서도 큰 단락 용량을 가질 수 있는 진공 차단기의 사용이 증가하고 있다.



그림 1.2 진공 차단기 사고로 인한 인명/재산피해 통계

Fig. 1.2 Casualties & property damage statistics related VCB accidents

그림 1.2은 소방청 국가화재정보시스템의 2014년도부터 2018년도까지 진공 차단기와 관련된 사고로 인해 발생한 인명피해(명)와 재산피해(억 원) 통계 자료다<sup>[3]</sup>. 인명피해는 해마다 비슷한 추이로 발생되었지만, 재산피해는 2014년도 약 17.2억 원에서 지속적으로 상승하여 2018년도에는 약 71.8억 원으로 5년 만에 약 4.2배 증가되었다. 이러한 현상은 고압수용가 수의 증가 영향으로, 수배전반은 일반적으로 제한된 인원만 접근이 가능하기에 재산피해 증가율이 인명피해보다 상당히 높게 형성된 것으로 분석된다.

수배전반에서 발생하는 전기사고의 원인은 제작 및 설치 중 이물질 침투로 인한 결함, 사용 중 부품 손상 또는 외부 충격 누적 등으로 인한 결함, 및 자연 열화에 의한 결함으로 크게 세 가지로 나누어진다. 이러한 원인에 의해 생성된 결함 또는 열화 부위에 전계가 집중되면 부분방전(Partial discharge, PD)이 발생되며, 지속될 경우 최종적으로 전력설비의 절연시스템을 파괴시켜 전기사고가 일어날 수 있다. 하지만 초기에 미소 결함 부위에서 발생하는 부분방전 신호의 검출을 통해 전력설비의 절연 진단이 가능하다. 이를 통해 전기사고로 인한 재산 피해 및 인명피해를 사전에 예방할 수 있으며, 나아가 전력수급의 안전성과 설비 신뢰도를 높일 수 있기 때문에 초기에 부분방전 신호 검출 및 분석을 통해 다양한 수배전반의 진단 기법이 제안되고 적용되어 왔다<sup>[4-6]</sup>. 특히 수배전반에 가장 많이 설치되고 있는 진공 차단기의 핵심 부품인 진공 인터럽터에 대한 절연 진단은 매우 중요하다. 하지만, 진공 차단기 또는 진공 인터럽터의 건전성 진단의 일률적 지표 부재로 고압 수용가에서는 다수 제작사의 진공 차단기에 대한 절연 진단이 어려운 실정이다. 따라서 본 논문에서는 진공 인터럽터의 진공누설 및 접점의 불완전한 개방, 접점표면의 손상과 같은 결함에 따른 부분방전 특성을 분석하여 전력설비의 절연 진단에 대한 기준을 제시하고자 한다.

## 제 2 장 이 론

### 2.1 수배전반

수배전반은 고압수용가에 설치된 금속제 수전 및 배전설비로써, 큐비클(Cubicle) 또는 스위치기어(Switchgear, SWGR) 등으로 불린다. 수배전반은 일반적으로 그림 2.1과 같이 차단기(CB), 단로기(DS), 피뢰기(LA), 계기용 변성기함(MOF), 및 제어·보호기기 등 설비로 구성되어 있으며, 각 품목들은 접지된 금속함 또는 절연격벽에 의해 분리되어 있다.

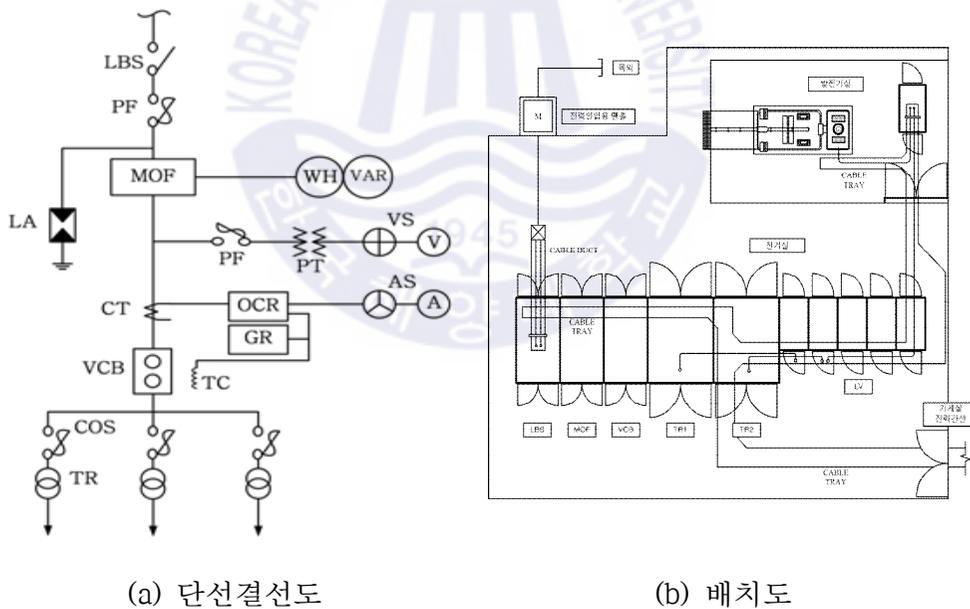


그림 2.1 고압 수배전반 단선결선도 및 도면

Fig. 2.1 The typical configuration of a substation

수배전반은 다양한 원인에 의해 전기사고가 발생되기 때문에 전력설비의

안전성 확보와 신뢰도 향상을 위해 단계별 정밀진단이 필요하다. 따라서 제작 중에는 내전압 시험, 절연내력 시험, 및 절연저항 측정 등을 하고 있으며, 설비 운용 중에는 지속적인 유지보수 활동과 예방점검을 하고 있다.

### 2.1.1 진공 차단기와 진공 인터럽터

진공 차단기는 수배전반에서 가장 보편적으로 사용되는 고압 차단기로, 그림 2.2와 표 2.1과 같이 상·하단자부, 진공차단부, 및 조작·제어부 등으로 구성되어 있다. 상·하단자부 및 진공차단부는 아크에 의한 전기적 스트레스와 진동, 충격에 의한 기계적 스트레스에 견뎌야하기 때문에 절연 프레임(Insulation frame) 안에 위치하고 있다. 특히, 진공 차단기 성능은 개폐 동작 시 발생하는 아크를 소호하는 진공 인터럽터 성능과 밀접하게 연관되어 있기에, 진공 인터럽터의 절연 진단은 반드시 필요하다.

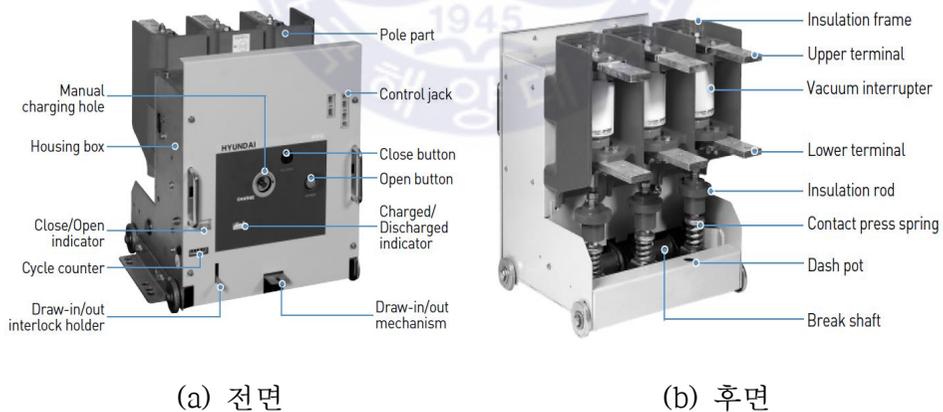


그림 2.2 진공 차단기

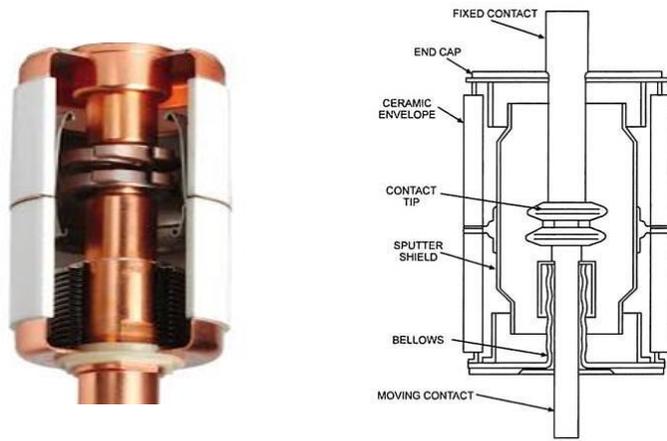
Fig. 2.2 An example of a Vacuum Circuit Breaker

표 2.1 진공 차단기 내부 구성 품목

Table 2.1 Internal parts of Vacuum Circuit Breaker

Division	Main components
Terminal section	Plug-in contacts, Upper & Lower terminal
Vacuum section	Vacuum interrupter
Operation and control section	Breaker shaft, Breaking spring, Contact press spring, Charging motor, etc

그림 2.3은 진공 인터럽터의 단면사진과 단면도이다. 진공 인터럽터는 가동접점(Moving contact), 고정접점(Fixed contact), 벨로우즈(Bellows), 및 세라믹절연물(Ceramic insulator) 등으로 구성되어 있다. 진공기밀기술과 아크제어기술 발달로 진공도  $5 \times 10^{-5}$  torr 이상, 접점간격 6~20mm로 모듈화, 소형화 제작되어 수배전반의 공간 활용도를 높였다. 가동접점 하단부에는 진공 차단기의 투입스프링(Contact press spring) 및 충전 모터(Charging motor)가 연결되어 있어 정상전류 또는 이상전류 차단 시 진공 인터럽터의 내부 접점을 빠르게 동작시켜 아크를 효과적으로 소호시킨다<sup>[7-9]</sup>.



(a) 단면사진

(b) 단면도

그림 2.3 진공 인터럽터 단면

Fig. 2.3 Cross-sectional diagram of vacuum interrupter

하지만 진공 인터럽터 내부에 전기적 및 기계적 스트레스가 누적된다면 벨로우즈와 기밀용기에 미세한 균열이 발생될 수 있다. 미세균열에 의해 진공이 누설된다면 순식간에 기밀용기 내부는 대기압 수준까지 저하된다. 이처럼 진공이 누설된다면(Leakage of vacuum) 일부 진공구간에서는 절연 내력이 1kV 이하로 매우 낮아지기 때문에 전력설비에 심각한 영향을 끼치게 된다<sup>[10]</sup>. 투입스프링과 차징모터 고장 또는 진공 인터럽터와 조작부 간 연결부위 결함으로 접점이 불완전하게 개방되면 접점간격이 축소되어 절연 내력이 저하된다. 접점 개폐 시 발생하는 아크와 진동 및 충격 등으로 접점 표면이 불균일하게 마모된다면 국부적 전계집중 현상으로 불평등 전계가 형성되어 설비의 절연내력에 큰 영향을 끼친다. 하지만 이와 같은 진공 인터럽터의 내부 결함에 대한 절연 진단 기술은 아직 미흡한 실정이다<sup>[11,12]</sup>.

현장에서 활용되고 있는 진공 차단기와 진공 인터럽터 진단법은 크게

세 가지이다. 첫 번째는 제작사 사양 기반 진단방법으로 제작사가 제시하는 시험전압을 인가하여 각 상별 누설전류를 비교하거나 DC전류를 인가하여 각 상별 접촉저항을 비교하는 방법이다. 두 번째는 국제규격 IEEE Std. C37.09(Test procedures for AC High-voltage circuit breakers with rated maximum voltage above 1000V) 및 IEC 62271-100(High-voltage switchgear and controlgear - Part 100: Alternating-current circuit-breakers)에 따라 진공 건전성 확인을 위해 절연내력시험을 하는 것이다. 하지만 이 방법은 정격전압 보다 상당히 높은 전압을 인가해야하기 때문에 운용 중인 제품에는 적용하기는 어렵다. 세 번째는 CVM(Continuous vacuum monitoring) Tester 또는 MAC(Magnetron atmospheric condition) Tester를 이용하여 내부 진공도를 확인하는 방법이다<sup>[13]</sup>. 이와 같은 방법들은 진공 차단기가 인출(Rack-out)된 상태이거나 진공 인터럽터가 분리된 상태에서 실시해야 하기 때문에 전력설비 미운용이라는 기회비용이 수반된다. 그리하여 본 논문에서는 부분방전 신호 검출 및 분석법을 통해 운용 중인 진공 인터럽터의 활선상태(On-line)에서 진공누설 및 접점의 불완전한 개방, 접점표면 손상에 따른 절연 진단 연구를 실시하였다.



그림 2.4 손상된 진공 인터럽터

Fig. 2.4 An example of a failed vacuum interrupter

## 2.1.2 Paschen' s Curve

진공 차단기 및 진공 인터럽터의 아크소호 원리는 파셴법칙(Paschen' s law)으로 설명된다. 1889년 Louis Heinrich Friedrich Paschen(1865~1947)에 의해 실험적으로 입증된 이론으로써, 기체 절연내력의 크기를 압력 $p$ 과 전극간격 $d$ , 그리고 기체 종류에 따라 나타낸 법칙으로 식(2.1)과 같다.

$$V = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln\left[\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma_{se}}\right)\right]} \quad (2.1)$$

이때  $V$ 는 절연내력(Dielectric Strength),  $p$ 는 기체압력,  $d$ 는 전극간격,  $\gamma_{se}$ 는 2차 전자방출계수,  $A$ 는 포화이온화계수,  $B$ 는 이온화 에너지이다. 위 식을 그래프로 나타낸 것이 파셴 곡선(Paschen' s curve)이며, 그림2.5는 파셴 곡선의 예시로 건조한 공기의 파셴 곡선을 나타낸 것이다<sup>[14]</sup>.

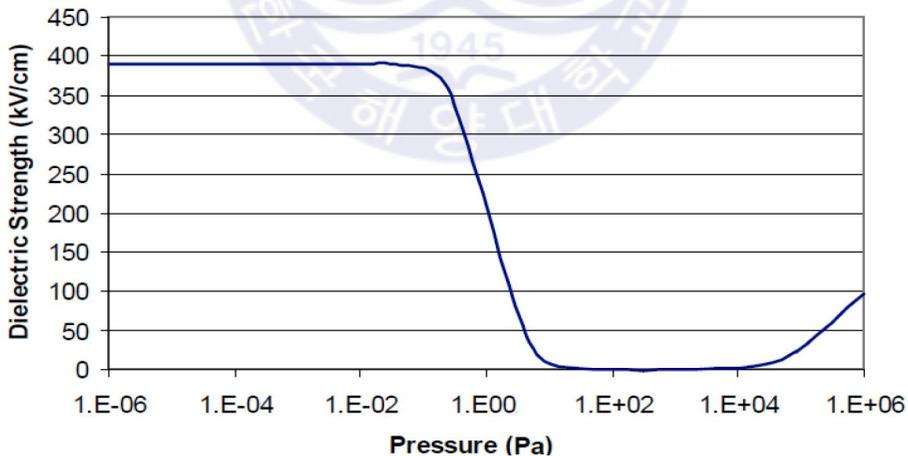
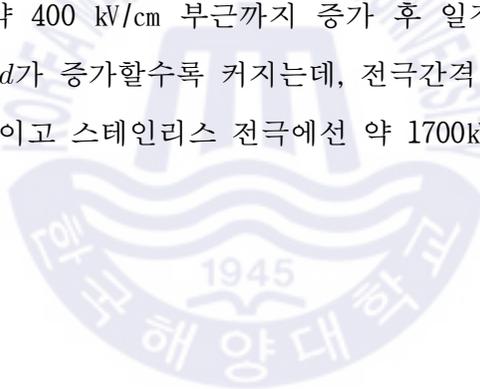


그림 2.5 건조한 공기의 파셴 곡선

Fig. 2.5 Paschen' s curve for dry air

기체압력과 전극간격의 곱인  $pd$ 가 작아지는 파셴 곡선의 왼쪽 부분에서는 절연내력  $V$ 가 낮아지다가 다시 급격하게 상승하는 것을 볼 수 있다. 중간진공영역에서 절연내력이 낮아지는 이유는 기체압력의 감소로 기체 분자의 개수가 감소하여 분자 이동성(Mobility)이 증가하기 때문이다. 하지만  $pd$ 가 더 낮아지는 고진공영역에서  $V$ 가 급격하게 상승하는 이유는 기체 분자의 평균자유경로(Mean free path)가 증가하여 전자사태(Electronic avalanche)의 발생 확률이 낮아지기 때문이다. 일반적으로 건조한 공기의 절연내력은 진공도 약  $10^{-1}$  torr 이상에서 급격하게 상승하기 시작한다.

식 (2.1)에 따르면 이 영역에서는  $pd$ 가 작을수록  $V$ 가 무한으로 상승하는 것처럼 계산되지만 실제로는 무한이 되지 않는다. 건조한 공기에서는 약  $10^{-3}$  torr에서 약 400 kV/cm 부근까지 증가 후 일정하게 유지된다. 또한  $V$ 는 전극간격  $d$ 가 증가할수록 커지는데, 전극간격  $d$ 가 1cm일 때 구리 전극에선 약 700kV이고 스테인리스 전극에선 약 1700kV가 된다<sup>[15]</sup>.



## 2.2 부분방전

IEC 60270에서는 부분방전(PD)을 ‘절연물 내부 또는 표면에 국부적인 전계 집중으로 발생하는 것’으로 정의하며 일반적으로  $1\mu\text{s}$  보다 짧은 펄스형태를 띄며 소리, 빛, 열 및 화학적 반응 등을 수반한다<sup>[16]</sup>. 표면 손상 또는 도전성 이물질 등으로 인해 불균일한 전계가 형성되어 부분방전이 발생된다. 초기의 부분방전은 에너지가 매우 작아 설비와 기기에 미치는 영향이 매우 미비하다. 하지만 부분방전이 지속 발생되면 절연체의 열화가 누적되며, 최종적으로 기기의 절연을 파괴시켜 전기사고를 일으키게 된다.

### 2.2.1 부분방전의 발생

부분방전은 발생위치에 따라 절연물 외부에서 발생하는 연면 방전(Surface discharge)과 코로나 방전(Corona discharge), 절연물 내부에서 발생하는 내부 방전(Internal discharge) 등으로 구분된다<sup>[17]</sup>.

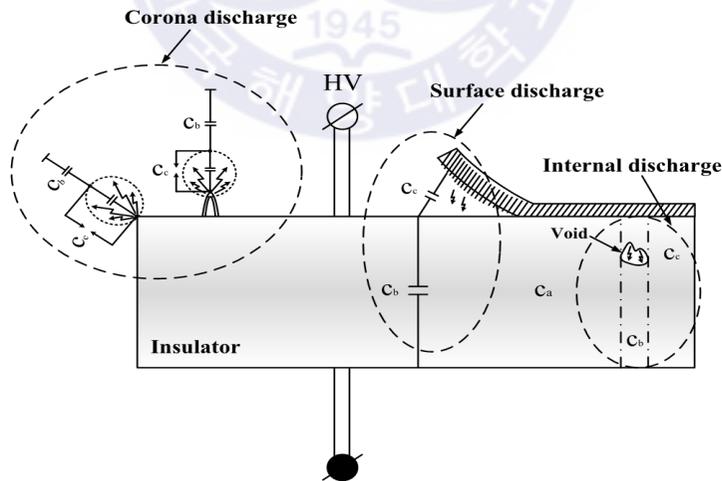


그림 2.6 부분방전 종류

Fig. 2.6 Sort of partial discharge

진공 인터럽터에서 발생하는 부분방전은 고정접점과 가동접점 사이에서 발생하는 평판 대 평판의 부분방전 형태를 띠기 때문에 접점표면 상태에 따라 크게 평등전계와 불평등전계로 분류된다. 접점표면 정상상태에서는 국부적 전계집중 현상이 없기에 접점표면에 전하가 고르게 분포되어 평등전계가 형성된다. 이때, 인가전압을 상승시키면 접점표면에 축적된 다량의 전자가 일시에 방출되며 일시에 전로가 파괴되는 섬락(Flash-over)현상이 나타난다<sup>[19]</sup>. 반면, 접점 개방 시 높은 아크에너지와 개폐충격에 의해 접점표면이 불균일하게 마모되는 접점표면 손상상태에서는 해당 부위에 국부적인 전계집중이 발생되어 부분방전이 쉽게 일어난다. 불평등전계에 의한 부분방전은 일반적으로 연면 방전 또는 코로나 방전의 형태를 가진다. 이때 지속적으로 전기적·기계적 스트레스가 누적된다면 손상범위가 확장되어 최종적으로 절연성능에 심각한 영향을 끼치게 된다<sup>[20]</sup>.

연면 방전은 그림 2.6와 같이 부적절한 절연 설계 또는 절연물 표면에 먼지, 습기와 같은 이물질 등에 의한 누설거리 감소로 발생한다. 절연물 표면에 생긴 열화에 의해 발생되기에 초기에는 설비에 끼치는 영향이 거의 없지만 연면 방전에 의해 수반되는 진동성 고주파 펄스가 교류 인가전압과 중첩되면 절연물에 심각한 손상을 끼친다. 또한 지속적으로 발생되면 절연물 표면 오손 또는 발열로 탄화도전로(Carbonized conductive-path)가 형성되며 전기적·기계적 특성을 저하시킬 수 있다. 연면 방전은 인가 전원에 따라 다르지만 대부분 글로우 방전을 띄며 최종적으로는 섬락(Flash-over) 또는 아크 방전으로 진전된다<sup>[20]</sup>. 코로나 방전은 그림 2.6과 같이 참여한 부분에 전계 집중으로 발생되며 국부적인 절연 파괴로 인해 빛 또는 소리 등을 수반한다. 코로나 방전은 크게 전극 표면에서만 빛이 나는 글로우 코로나(Glow corona), 전극에서 신장하는 브러시 코로나(Brush corona), 상대 극(Polarity) 부근까지 신장하는 스트리머 코로나(Streamer corona)로 나뉜다.

코로나 방전의 메커니즘은 그림 2.7의 전자사태 진전과정으로 설명된다. 초기에는 그림 2.7 (a)과 같이 전계에 의해 에너지를 얻은 전자가 원자와 충돌하여 이온이 생성되며 방전이 개시된다. 그 후 그림 2.7 (b)와 같이 양이온에 의해 전자쌍이 형성되는데, 이때 전자가 지속 공급되어 전자 수가 계속 증가되면 그림 2.7 (c)처럼 전자사태가 일어난다.

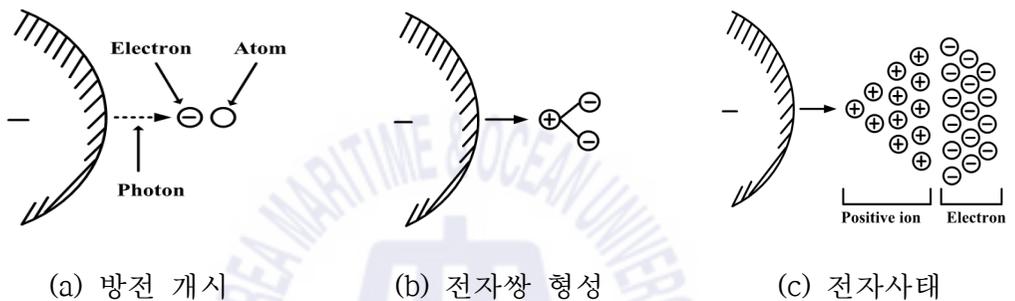


그림 2.7 전자사태 진전과정

Fig. 2.7 Development processes of the electron avalanche

외부 전계에 의해 생성된 전자의 방전에 적용되는 이온화 과정은 식(2.2)와 같으며,  $A$ 는 원자,  $A^+$ 는 양이온,  $e$ 는 전자이다.



식 (2.2)에서와 같이 중성원자에 전자가 충돌하면 양이온과 전자를 발생시키는데, 이로 인해 두 개 이상의 전자를 추가로 발생시킨다. 이 과정이 연쇄적으로 일어나 전자 숫자가 급속히 증가되는 것을 전자 사태(Electron avalanche)라고 하며, 이때 방전 전류의 크기는 식(2.3)과 같다.

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (2.3)$$

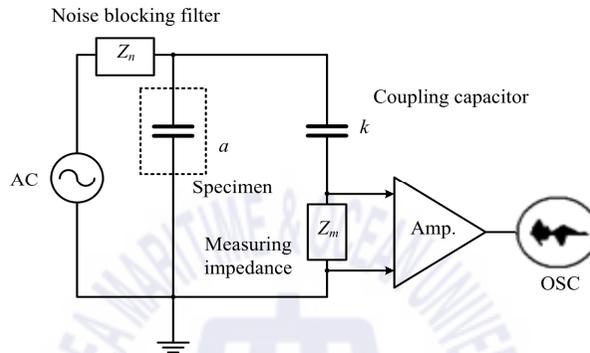
여기서  $d$ 는 갭(Gap)의 간격,  $\alpha$ 는 Townsend 방전의 1차 전리 계수다. 이때,  $\alpha$ 는 일정한 전계에서 전자가 1cm 이동 시 생성된 전자 개수를 의미한다. 이를 통해 전자 개수가 급격히 증가하는 과정을 ‘1차 전리’, 양이온과 광자가 전극과 충돌하여 전자가 방출되는 과정을 ‘2차 전리’라고 한다. 1차 또는 2차 전리로 방출된 전자가 극성에 따라 전극으로 흡수되거나 중성자에 부착되면 음이온이 형성되며, 이후 이온이 모두 소멸될 때까지 전계세기가 일부 변화된다.

## 2.2.2 부분방전 측정

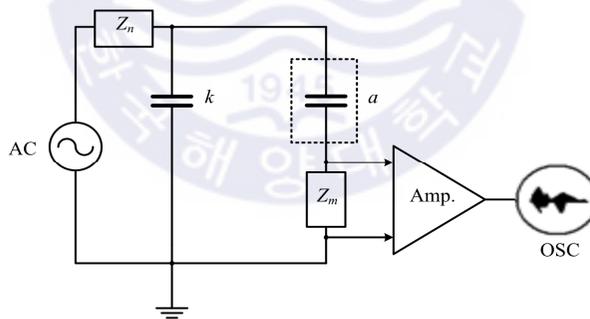
전력설비 진단법은 크게 정전진단(Off-line)과 무정전진단(On-line)으로 나눌 수 있다. 정전진단이란 진단대상 설비의 전원을 차단한 상태에서 진단하는 방법이고, 무정전진단이란 진단대상 설비가 원래 사용목적에 맞게 운영하고 있는 상태에서 진단하는 방법이다. 정전진단은 상당히 정밀한 진단이 가능하다는 장점이 있지만 설비의 전원을 차단한 상태에서 진단하기 때문에 본래의 사용목적에 달성하지 못하는 문제가 있다. 반면, 무정전진단은 정전진단에서 발생하는 기회비용을 줄여주는 장점을 가지고 있어 최근 많은 각광을 받고 있다. 특히 부분방전 검출법은 진단대상 설비에 아무영향 없이 절연물에 대한 정밀진단이 가능하기 때문에 국내외에서 관련 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[21]</sup>. 부분방전 검출법으로는 ‘IEC 60270 검출법’, ‘UHF 검출법’ 및 ‘음향 검출법’ 등이 있다. 본 연구에서는 IEC 60270 부분방전 검출법을 적용하였으며, 검출회로는 그림 2.8과 같다.

부분방전 신호는 전류펄스 형태로 발생되기 때문에 커플링 커패시터, 검출 임피던스 등으로 검출할 수 있다. 검출회로는 검출 임피던스의 위치에

따라 그림 2.8과 같이 커플링 커패시터 또는 시료와 직렬연결로 나누어진다. 현장에서는 진단 중 큰 방전에 의한 과전류로부터 측정기기를 보호할 수 있는 그림 2.8(a)이 주로 사용되고 있다. 커플링 커패시터에서 부분방전이 발생되면 시료의 부분방전과 구분하는 것이 어렵기 때문에 정확한 측정을 위해 인가전압 범위 내에서 내부방전이 발생되지 않아야 한다.



(a) 커플링 커패시터와 직렬연결



(b) 시료와 임피던스 직렬연결

그림 2.8 IEC 60270에 따른 검출회로

Fig. 2.8 Detection circuit based on IEC 60270

## 2.2.3 부분방전 신호 분석

### 가. PRPD (Phase-resolved partial discharge) 분석법

PRPD 분석법은 교류전원 인가 시 전력설비 또는 기기에서 발생하는 방전전하량( $q$ ), 펄스개수( $n$ ) 및 위상분포( $\theta$ ) 등 부분방전의 특성을 분석하는 방법으로 현재 가장 널리 사용되는 방법이다. 일반적으로 결함에서 발생하는 부분방전 신호는 인가전압의 위상에 따라 고유한 패턴을 가지고 있기 때문에 부분방전 발생 원인을 분석할 수 있어 기기 결함의 원인을 도출해낼 수 있다.

### 나. T-F map 분석법

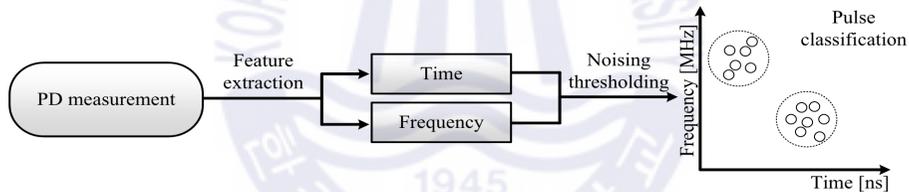


그림 2.9 신호처리 시스템 구조

Fig. 2.9 Architecture of a signal processing system

T-F map 분석법은 일정한 시간동안 발생하는 부분방전의 주파수와 시간에 따른 진폭변화를 분석하는 방법으로, 처리속도가 빠르고 노이즈 검출이 용이하여 결함판별이 쉬운 장점을 가지고 있다<sup>[22-24]</sup>. 그림 2.9는 T-F map을 통한 부분방전 신호의 분석 과정을 구조적으로 나타낸 것이다. 부분방전 신호의 정규화를 통해 노이즈가 제거된 부분방전 펄스의 주파수와 시간에 대한 특징을 확인할 수 있으며, 이에 따라 결함 판별이 가능하다.

## 다. 펄스파형 분석

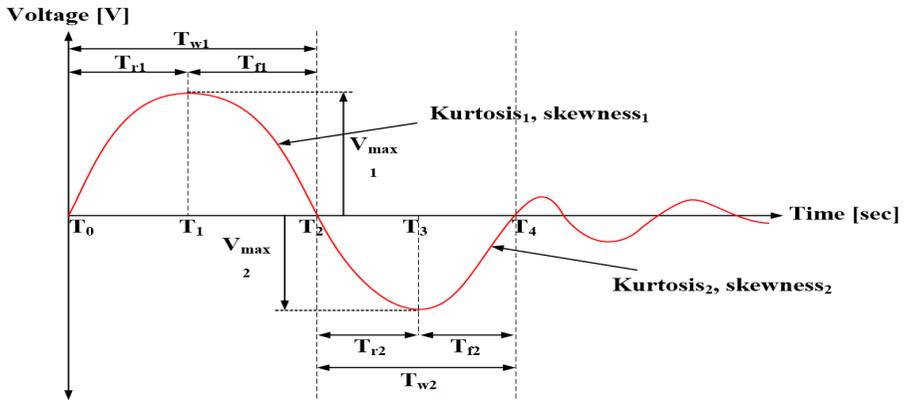


그림 2.10 부분방전 펄스 파라미터

Fig. 2.10 Parameters of the PD pulse

인가전원의 정극성( $0^\circ \sim 180^\circ$ )과 부극성( $180^\circ \sim 360^\circ$ )에서 측정된 부분방전 펄스를 시간적·물리적 특징분석으로 결함을 판별하는 방법이다. 일반적으로 부분방전 펄스는 그림 2.10과 같이 첫 파형이 발생한 뒤 감쇄 진동한다. 각 펄스에 대해 0%에서 100%( $V_{\max}$ )까지 걸린 상승시간  $T_r$ 과 100%( $V_{\max}$ )에서 0%까지 걸린 하강시간  $T_f$ 을 분석한다. 또한  $T_r$ 과  $T_f$ 합을 진동폭  $T_w$ 으로 하여 시간에 따른 파형을 분석한다.

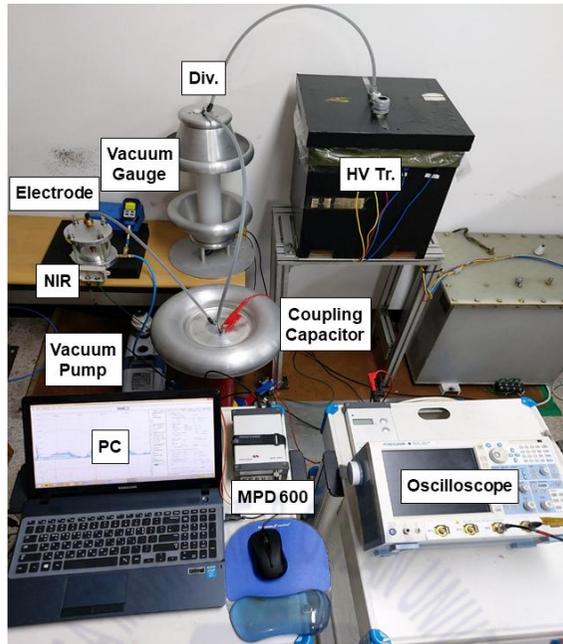
## 제 3 장 실험 및 방법

### 3.1 실험계

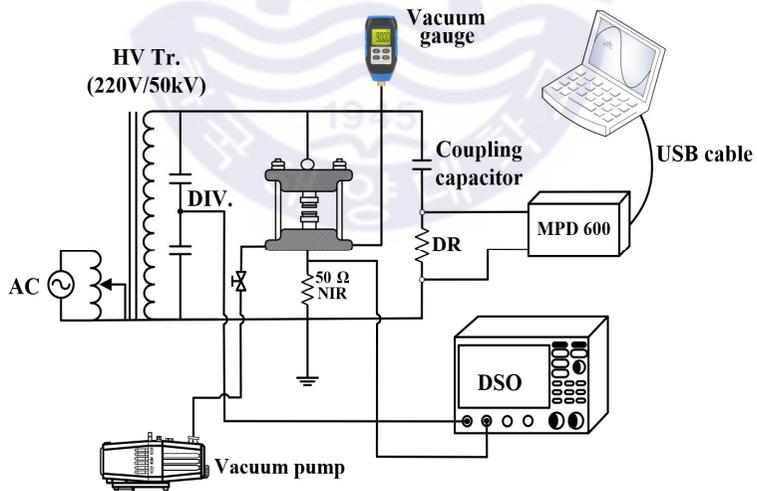
#### 3.1.1 측정 시스템의 구성

진공 인터럽터의 결함 별 부분방전 신호를 검출하기 위해 그림 3.1의 측정시스템을 구성하였다. 최대 출력전압 50kV, 최대 출력전류 30mA의 몰드 변압기를 사용하여 고압을 인가하였으며, 변압기는 광유에 함침(含浸)하여 접속부의 코로나 방전 발생을 최소화하였다. 또한 전원에서 유입되는 노이즈를 최소화하기 위해 NCT(Noise cut transformer)를 설치하였다. 직경 30mm의 황동 재질의 금구를 설치하여 전극계와 고압 전원케이블 간 접속부위에서 발생할 수 있는 코로나 방전을 최소화하였다. 측정 장비의 전단에 가스튜브(Gas tube)를 설치하여 실험 중 발생될 수 있는 과전압으로부터 보호하였다. 전극계 내부를 진공상태로 만들고 진공도를 측정하기 위해 진공 펌프와 디지털 진공계를 설치하였다.

변압기 고압측 단자에 10,000:1 분압기를 설치하여 인가전압을 측정하였으며, 전극계와 접지선 사이에 오차율 1%의  $50\Omega$  비유도성저항(Non-inductive resistance, NIR)과 1nF 커플링 커패시터를 설치하여 부분방전 신호를 검출하였다. 이때 비유도성저항의 크기는 오실로스코프와 임피던스 정렬을 위해  $50\Omega$ 으로 선정하였다. 부분방전 신호를 분석하기 위해 오실로스코프(샘플링 속도: 5GS/s, 주파수대역: 1GHz)와 MPD 600 기반 DAQ를 이용하였다.



(a) 사진



(b) 구성도

그림 3.1 부분방전 측정시스템

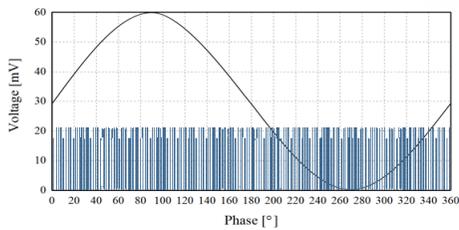
Fig. 3.1 Partial discharge measurement system

표준펄스 발생장치(CAL 1A, Power diagnostix)를 이용하여 두 측정 장비를 교정하였다. 두 측정 장비를 교정한 후 전극계에서 발생할 것으로 예상되는 방전전하량인 5~100pC를 입력하여 응답을 비교한 결과, 두 측정 장비는 선형적인 결과를 보였으며, 환산 감도는 4mV/pC이었다.

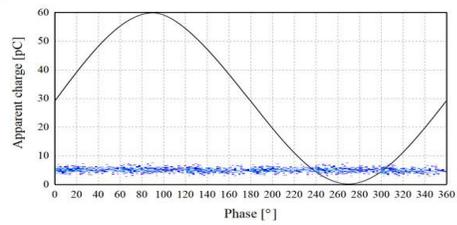
표 3.1 입력 펄스에 대한 출력 펄스 및 전압

Table 3.1 Output pulse and voltage to input pulse

Input signal	Output signal	
CAL 1A [pC]	Oscilloscope [mV]	MPD 600 [pC]
5 pC	19.8	5.0
10 pC	40.2	10.1
20 pC	79.8	20.3
50 pC	203.1	50.1
100 pC	399.2	99.8



(a) 오실로스코프



(b) MPD 600

그림 3.2 응답 신호 비교

Fig. 3.2 Output signal comparison

### 3.1.2 측정 대상

#### 가. 진공 인터럽터 (Vacuum Interrupter)

모의실험에 사용된 진공 인터럽터는 시판 중인 정격전압 25.8kV(22.9kV 급)을 사용하였다. 정상 상태에서 내부 진공도는 약  $5 \times 10^{-5}$  torr 이상이며, 내부 접점 간격은  $12 \pm 1$  mm이다.

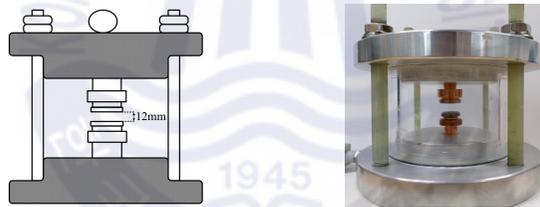
표 3.2 진공 인터럽터 제원

Table 3.2 Specification of a vacuum interrupter

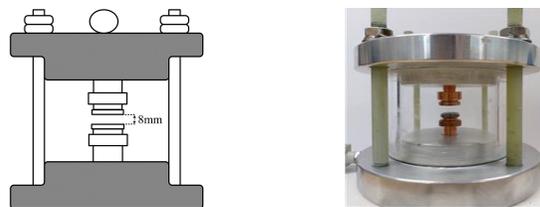
Appearance	Specification	
	Rated voltage	25.8kV
	Power frequency withstand voltage	50kV
	Rated lightning impulse voltage	135kV
	Rated current	630A
	Short circuit making current	16kA
	Contact gap	$12 \pm 1$ mm
	Over-travel	2mm
	Allowable contact consumption	3mm
	Standard	IEC 62271-100

## 나. 전극계

진공 인터럽터의 진공누설, 접점의 불완전한 개방 및 접점표면의 손상 결함에 대한 부분방전을 모의하기 위해 그림 3.3과 같은 전극계를 제작하였다. 전극계 내부 전극은 앞서 언급한 진공 인터럽터와 동일한 제품의 내부 접점을 사용하였다. 접점 간격 변화에 의한 부분방전을 검출하기 위해 그림 3.3 (a)와 그림 3.3 (b) 두 가지 전극계를 제작하였다. 그림 3.3 (a)는 정상 진공 인터럽터의 접점이 완전하게 개방된 상태에서의 정상 접점 간격인 12mm를 적용한 모습이며, 그림 3.3 (b)는 벨로우즈 경화 또는 투입 스프링, 차징모터의 고장 등으로 인해 접점이 67% 수준으로 불완전하게 개방된 상태에서의 전극 간격인 8mm를 적용한 모습이다.



(a) 전극 간격 12mm



(b) 전극 간격 8mm

그림 3.3 전극계

Fig. 3.3 Electrode system

### 3.2 부분방전 측정

부분방전 모의실험의 최대 인가전압은 IEC 62271-100 6.2.9항(Partial discharge tests)을 적용하여, 정격전압의 110%인 28.4kV로 하였다. 결합 모의실험에 앞서, 기준데이터로 활용하기 위해 정상 진공 인터럽터에서 발생하는 부분방전을 취득하였다. 이때 검출된 부분방전의 전기적 특성은 정상 진공( $5 \times 10^{-5}$  torr) 상태의 12mm 전극계에서 검출된 부분방전 특성과 유사하였다. 이를 기반으로 진공누설 및 접점의 불완전한 개방, 점점표면 손상 결합에서 검출되는 부분방전 신호와 비교 분석하였다. 모의실험의 상세 조건은 표 3.3에 서술하였다.

표 3.3 부분방전 검출 실험 조건

Table 3.3 Experimental conditions for partial discharge measurement

Division		Normal vacuum ( $5 \times 10^{-5}$ torr)	No Vacuum (Atmosphere)
Normal contact surface	Complete opening (12mm)	Reference data	Condition 1
	Incomplete opening (8mm)	Condition 2	Condition 3
Damaged contact surface	Complete opening (12mm)	-	Condition 4
	Incomplete opening (8mm)	-	Condition 5

결합 조건의 선정근거는 다음과 같다.

첫째, 진공도 선정이다. 일반적으로 진공 인터럽터는 충분한 절연내력을 확보하기 위해 내부 진공도가 약  $5 \times 10^{-5}$  torr 이상으로 제작된다. 하지만 벨로우즈 경화 또는 기밀 용기 균열 등으로 인해 미소결합이 생기면 진공도는 순식간에 대기압까지 저하된다. 따라서 진공도 조건은 정상진공 상태와 진공이 완전하게 누설된 상태인 대기압으로 선정하였다.

둘째, 접점간격 선정이다. 정격전압 25.4kV용 진공 인터럽터는 개방 시 접점 간격이 12mm가 되도록 제작된다. 하지만 투입스프링 또는 차징모터 고장, 벨로우즈 경화 및 결합부위 열화 등으로 인해 접점이 불완전하게 개방된다면 접점간격이 축소되어 절연내력이 감소되기 때문에 절연성능에 상당한 영향을 끼치게 된다. 이를 방지하기 위해 폐로 동작에는 오버트래블이 적용되어 있지만, 개방 동작에는 추가적인 장치가 없다. 그러므로 접점의 불완전한 개방에 따른 절연 진단을 위해 정상 접점간격인 12mm와 불완전한 개방(67%)으로 축소된 접점간격인 8mm으로 선정하여 모의실험을 하였다.

셋째, 접점표면 선정이다. 진공 인터럽터는 정상 및 이상전류 차단 발생되는 높은 아크에너지에 의해 접점표면이 변형되는 것을 방지하기 위해 동-크롬의 특수합금으로 제작되어있다. 하지만 지속된 차단기 개폐 동작으로 인한 스트레스 누적에 의해 접점표면은 점차 마모되며, 동시에 높은 아크에너지로 인해 접점표면 금속의 증발로 금속증기가 발생되어 접점표면이 국부적으로 손상되면서 동시에 진공도가 저하된다. 그림 2.5 건조한 공기의 파센곡선에 따라 중간진공 영역에서의 절연내력은 1kV 이하로 낮아지기 때문에 절연 진단이 무의미하다. 그러므로 접점표면의 정상상태와 손상상태에서의 부분방전 모의실험을 진행하였으며, 손상상태에서는 상기 이유로 대기압에서만 진행하였다.

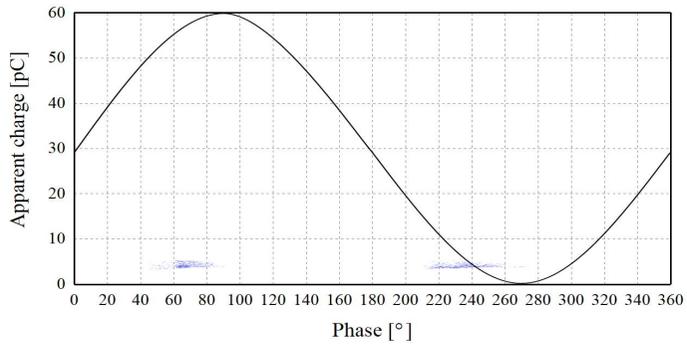
## 제 4 장 결과 및 분석

진공 인터럽터의 진공누설, 접점의 불완전한 개방 및 접점표면 손상과 같은 내부 결함이 발생되면 내부 접점 사이의 절연내력이 저하되어 제품에 심각한 영향을 끼치게 된다. 그러므로 이를 사전에 검출하는 것은 매우 중요하다. 특히, 방전개시전압(DIV)과 같이 상용 전압보다 낮은 전압에서 검출되는 부분방전 신호 분석을 통해 절연 진단을 명확하게 할 수 있다.

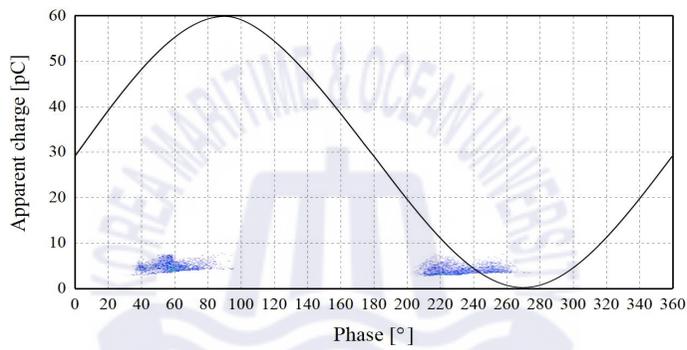
### 4.1 정상 상태 (Reference data)

정상 진공 인터럽터에서 발생하는 부분방전을 검출하였다. 인가전압을 정격전압의 110%인 28.4kV까지 상승시키면서 방전개시전압(DIV) 및 방전전하량( $q$ ), 펄스개수( $n$ ) 및 위상분포( $\theta$ )를 분석하였다.

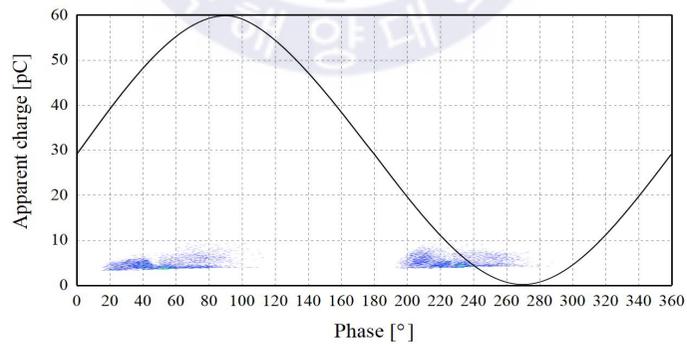
정상 진공 인터럽터의 방전개시전압은 23kV이었으며, 이때의 부분방전 검출 파형을 그림 4.1 (a)에 나타내었다. 정극성  $43^{\circ}\sim 93^{\circ}$  구간에서 최대 방전전하량 4.3pC이었으며 부극성  $217^{\circ}\sim 268^{\circ}$  구간에서 최대 방전전하량은 4.1pC이었다. 펄스개수는 정극성에서 123개, 부극성에서 118개가 검출되었다. 그림 4.1 (b)는 정격전압 25.8kV에서의 부분방전 검출 파형을 나타낸 것이다. 이때, 정극성  $28^{\circ}\sim 96^{\circ}$  에서 최대 6.8pC, 부극성  $201^{\circ}\sim 274^{\circ}$  에서 최대 7.2pC이 검출되었다. 펄스개수는 정극성에서 143개, 부극성에서 142개가 검출되었다. 그림 4.1 (c)는 정격전압의 110%인 28.4kV에서의 부분방전 검출 파형을 나타낸 것이다. 28.4kV에서는 정극성  $16^{\circ}\sim 113^{\circ}$  에서 최대 9.3pC, 부극성  $193^{\circ}\sim 283^{\circ}$  에서 최대 9.5pC이 검출되었다. 펄스개수는 정극성에서 236개, 부극성에서 245개가 검출되었다.



(a) 방전개시전압



(b) 정격전압

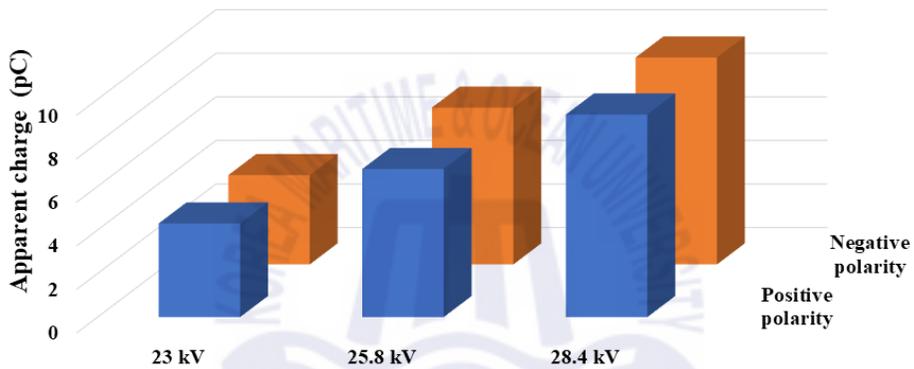


(c) 정격전압의 110%

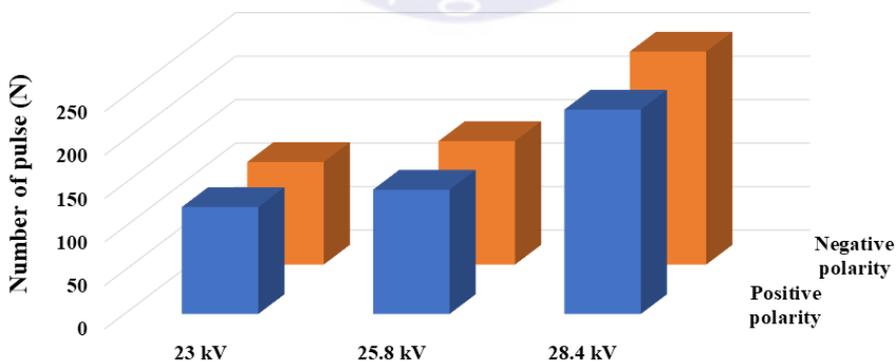
그림 4.1 정상상태의 PRPD (기준 데이터)

Fig. 4.1 PRPD under a normal condition (ref. data)

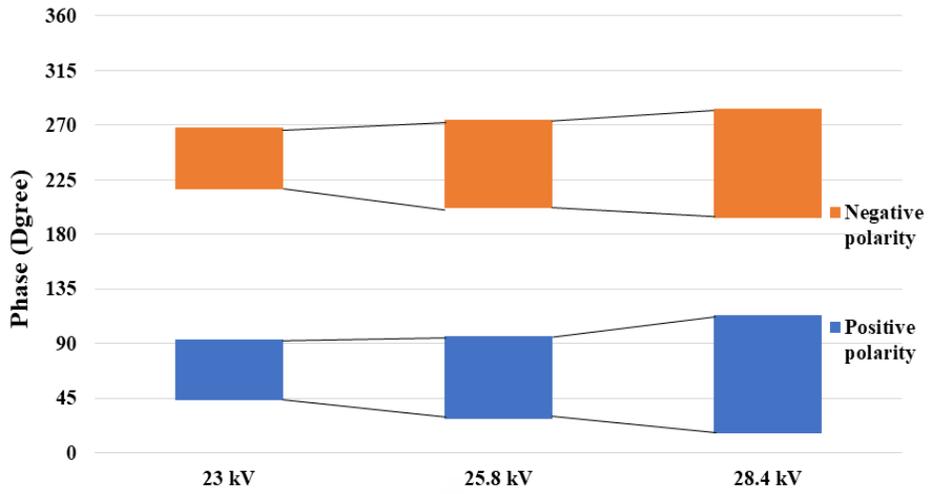
정상 진공 인터럽터의 인가전압에 따른 방전전하량, 펄스개수 및 위상 분포와 같은 PRPD 특성을 비교하여 그림 4.2에 나타내었다. 정격전압 및 정격전압의 110%에서의 최대 방전전하량은 방전개시전압에서 보다 1.6배, 2.3배 높아졌다. 펄스개수는 각각 1.2배, 2.0배 증가하였으며, 위상분포는 1.4배, 1.8배 넓어졌다. 인가전압과 관계없이 위상패턴은 유사하게 나타났다.



(a) 최대 방전전하량



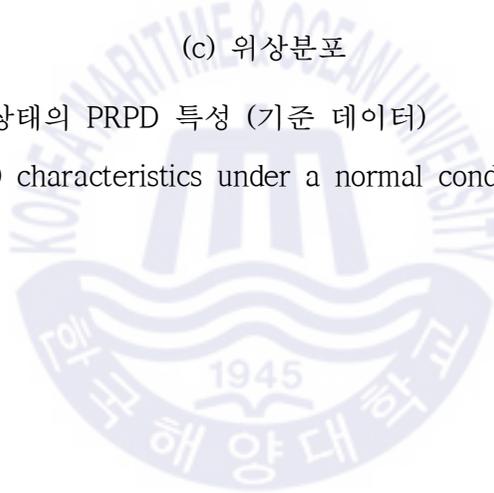
(b) 펄스개수



(c) 위상분포

그림 4.2 정상상태의 PRPD 특성 (기준 데이터)

Fig. 4.2 PRPD characteristics under a normal condition (ref. data)



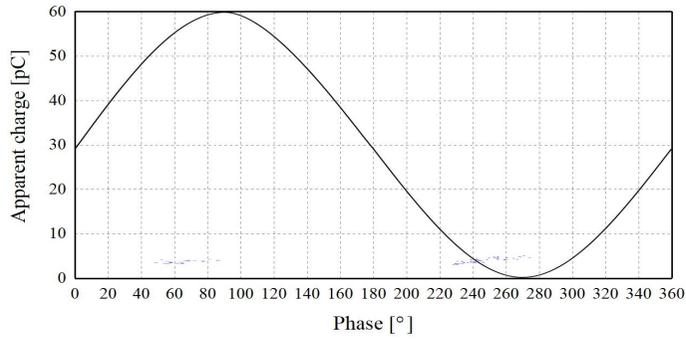
## 4.2 결합별 특성

### 4.2.1. 접점표면 정상 (평등 전계)

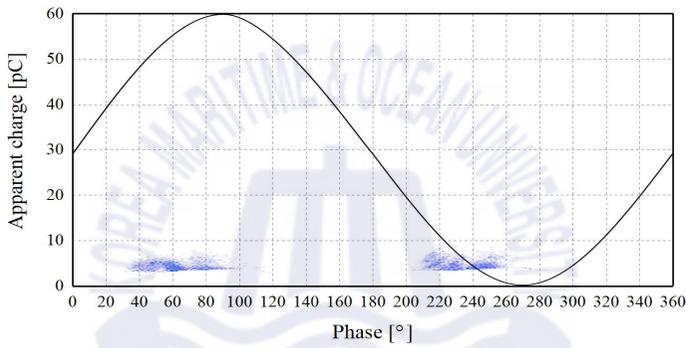
정상 진공 인터럽터의 방전개시전압과 정격전압인 25.8kV, 정격전압의 110%인 28.4kV에서 검출된 PRPD 특성을 기준으로 절연성능 영향을 비교 분석하였다.

#### 가. 진공누설 결합 (Condition 1)

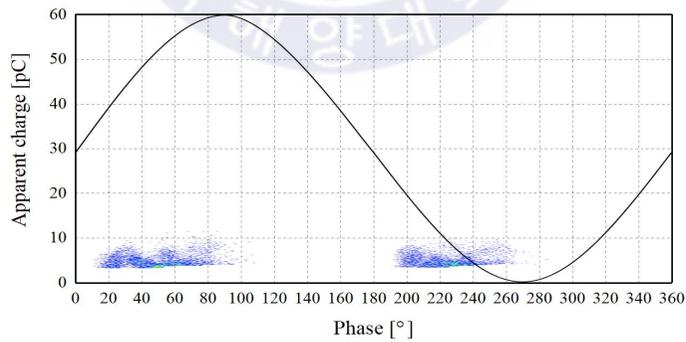
진공누설상태에서의 방전개시전압은 정상 진공 인터럽터의 방전개시 전압 보다 2kV 낮은 21kV이었다. 여기서 정극성  $46^{\circ}\sim 91^{\circ}$  에서 최대 방전 전하량은 4.3pC, 부극성  $227^{\circ}\sim 276^{\circ}$  에서 최대 방전전하량은 5.6pC으로 검출되었다. 또한 펄스개수는 정극성에서 95개, 부극성에서 102개가 검출 되었다. 이때 검출된 부분방전 파형을 그림 4.3 (a)에 나타내었다. 정격 전압 25.8kV 인가 시 정극성  $22^{\circ}\sim 101^{\circ}$  에서 최대 방전전하량은 8.3pC, 부극성  $197^{\circ}\sim 282^{\circ}$  에서 최대 방전전하량은 8.7pC이었으며, 펄스개수는 정극성에서 201개, 부극성에서 245개가 검출되었다. 이때 검출된 부분방전 파형을 그림 4.3 (b)에 나타내었다. 정격전압의 110%인 28.4kV를 인가하였을 때는 정극성  $11^{\circ}\sim 107^{\circ}$  에서 최대 방전전하량 12.6pC, 부극성  $188^{\circ}\sim 285^{\circ}$  에서 최대 방전전하량 10.7pC이 검출되었다. 이때 정극성에서 384개, 부극성에서 402개의 부분방전 펄스개수가 검출되었다. 이때 검출된 부분방전 파형을 그림 4.3 (c)에 나타내었다.



(a) 방전개시전압



(b) 정격전압

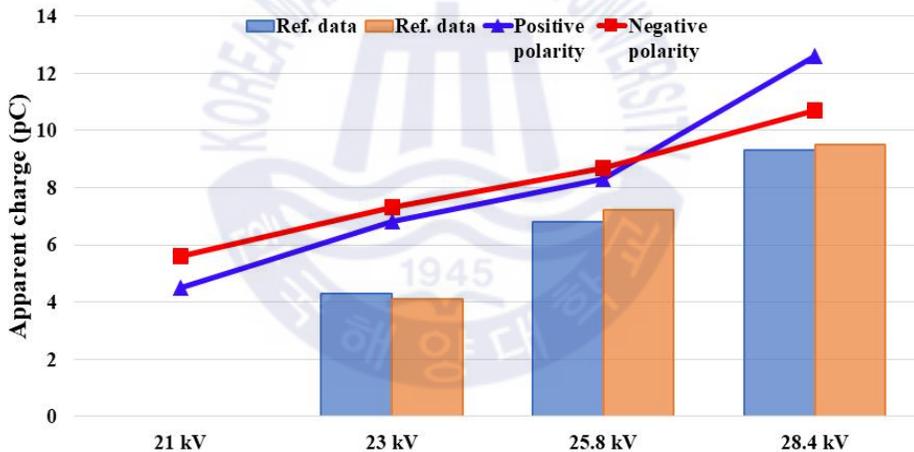


(c) 정격전압의 110%

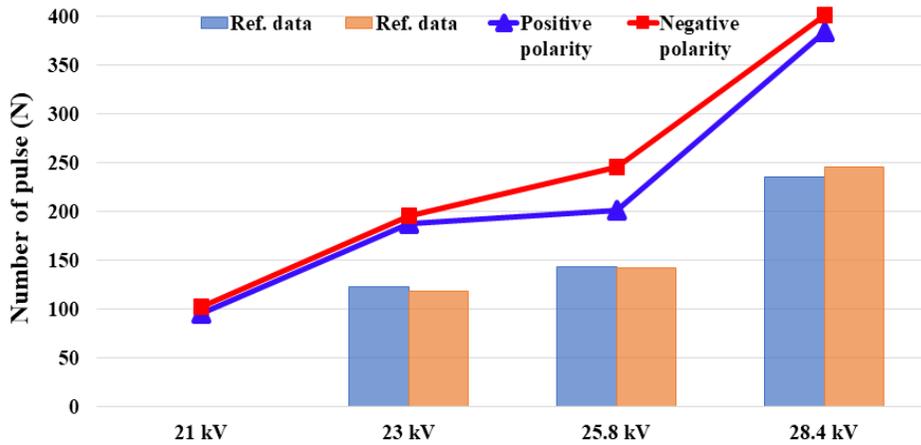
그림 4.3 진공누설 결함의 PRPD

Fig. 4.3 PRPD of vacuum leakage defect

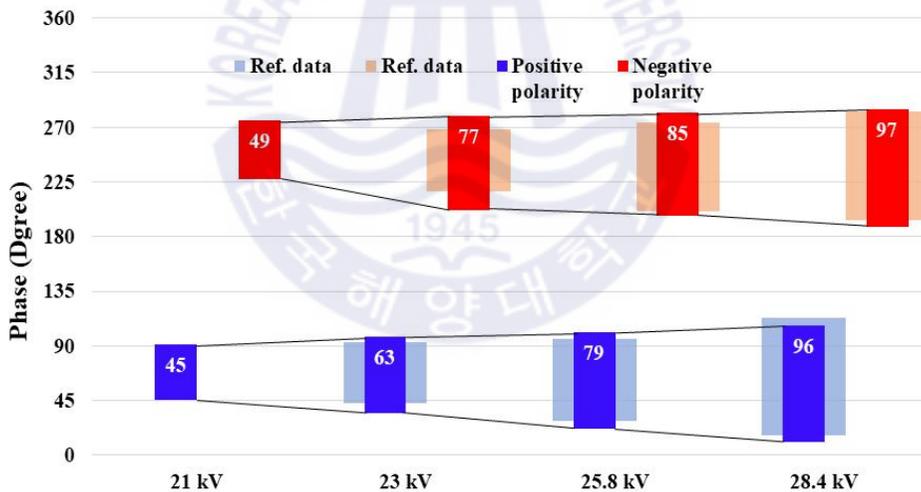
정상 진공 인터럽터의 PRPD 특성을 기준으로 진공누설 결합에서 검출된 PRPD 특성을 인가전압에 따라 비교분석하여 그림 4.4에 나타내었다. 인가전압이 커질수록 PRPD 검출 특성은 정상 진공 인터럽터의 PRPD 특성보다 모두 증가하였다. 정상상태의 방전개시전압인 23kV에서 검출된 최대 방전전하량은 기준데이터 보다 약 1.7배 높아졌으며, 정격전압과 정격전압의 110%에서는 약 1.2배 커졌다. 펄스개수는 23kV, 정격전압과 정격전압의 110%에서 평균적으로 약 1.6배 많아졌다. 또한 위상분포는 23kV에서 약 1.4배, 정격전압과 정격전압의 110%에서 약 1.1배 넓어졌다. 그림 4.4 (c) 안의 숫자는 위상범위를 표시한 것이다.



(a) 최대 방전전하량



(b) 펄스개수 변화 추이



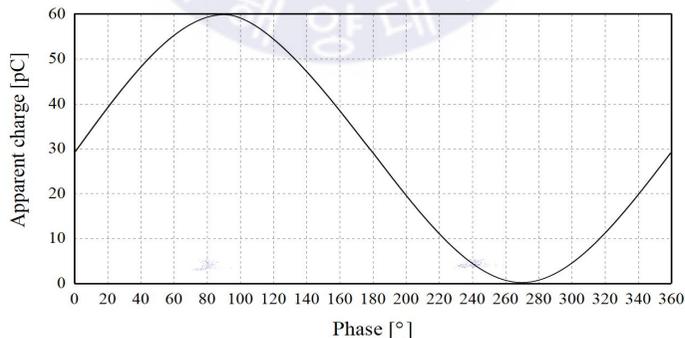
(c) 위상분포 변화 추이

그림 4.4 진공누설 결함의 PRPD 특성

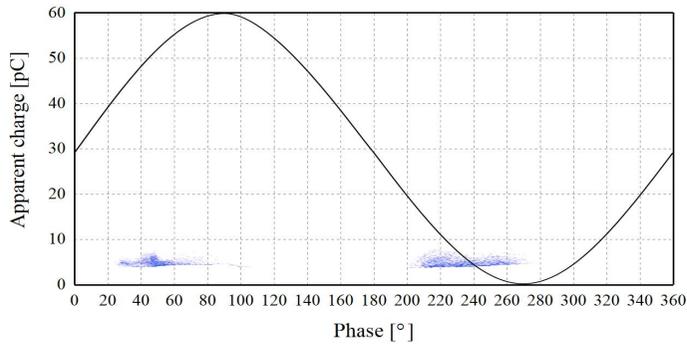
Fig. 4.4 PRPD characteristics of vacuum leakage defect

## 나. 점점의 불완전한 개방 (Condition 2)

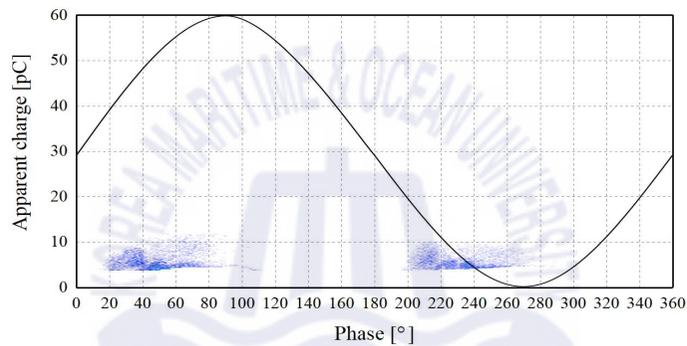
점점이 67%로 불완전하게 개방된 상태인 점점간격 8mm에서의 방전개시 전압은 정상 상태보다 2kV 낮아진 21kV로 검출되었다. 방전개시전압에서 정극성  $67^{\circ} \sim 100^{\circ}$  에서 최대 방전전하량 4.3pC, 부극성  $224^{\circ} \sim 263^{\circ}$  에서 최대 방전전하량 4.4pC이었으며, 정극성에서 71개의 펄스개수와 부극성에서 79개의 펄스개수가 검출되었다. 그림 4.5 (a)는 방전개시전압에서 검출된 부분방전 파형을 나타낸 것이다. 정격전압 25.8kV를 인가했을 때의 검출 특성은 정극성  $21^{\circ} \sim 107^{\circ}$  에서 최대 방전전하량 7.3pC, 부극성  $200^{\circ} \sim 281^{\circ}$  에서 최대 방전전하량 8.1pC이었다. 정극성에서는 206개의 펄스와 부극성에서 212개의 펄스가 검출되었다. 그림 4.5 (b)는 이때 검출된 부분방전 파형을 나타낸 것이다. 정격전압의 110%인 28.4kV에서는 정극성  $14^{\circ} \sim 118^{\circ}$  에서 최대 방전전하량 11.3pC, 부극성  $189^{\circ} \sim 291^{\circ}$  에서 최대 방전전하량 10.2pC이 검출되었다. 펄스개수는 정극성에서 354개, 부극성에서 344개였다. 그림 4.5 (c)는 이때 검출된 부분방전 파형을 나타낸 것이다.



(a) 방전개시전압



(b) 정격전압



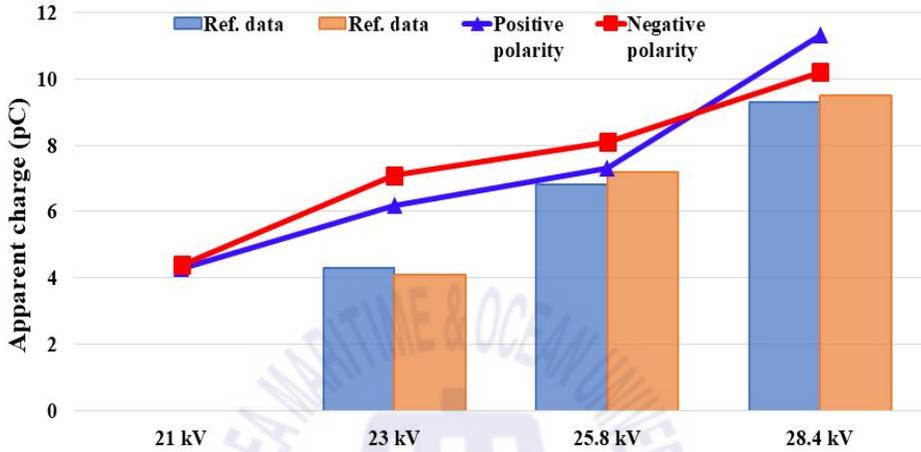
(c) 정격전압의 110%

그림 4.5 점점 불완전 개방의 PRPD

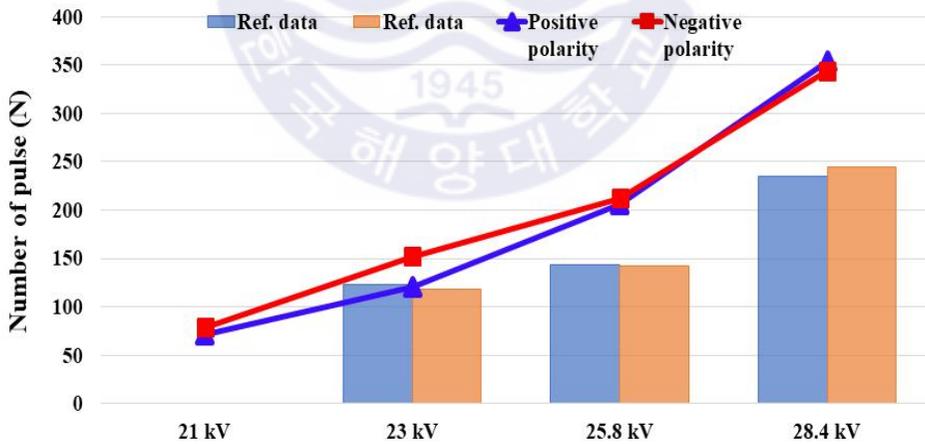
Fig. 4.5 PRPD of incomplete contact opening

정상상태와 비교하여 점점의 불완전한 개방 결함에서의 PRPD 특성을 인가전압에 따라 비교분석하여 그림 4.6에 나타내었다. 정상상태의 방전 개시전압인 23kV에서는 검출된 최대 방전전하량은 기준데이터 보다 약 1.6배 커졌으며, 정격전압과 정격전압의 110%에서는 약 1.1배 높아졌다. 펄스 개수는 23kV에서 약 1.1배, 정격전압과 정격전압의 110%에서는 약 1.5배 많아졌다. 또한 위상분포는 23kV에서 약 1.3배, 정격전압과 정격전압의

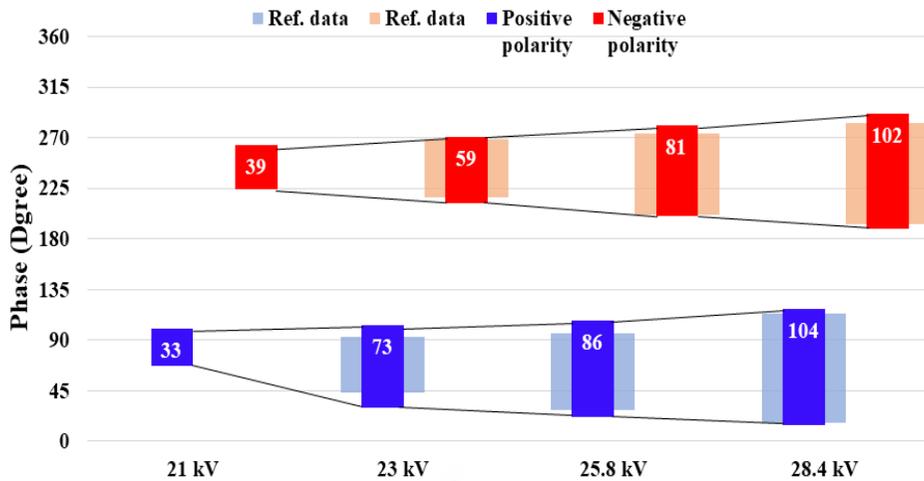
110%에서 약 1.1배 넓어졌다. 그림 4.6 (c) 안의 숫자는 위상범위를 표시한 것이다.



(a) 최대 방전전하량



(b) 펄스개수



(c) 위상분포

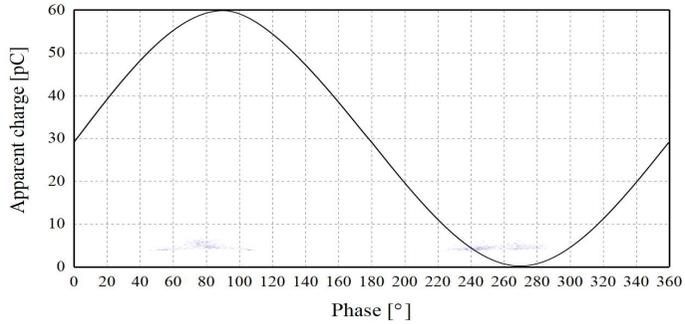
그림 4.6 점접 불완전 개방의 PRPD 특성

Fig. 4.6 PRPD characteristics of incomplete contact opening

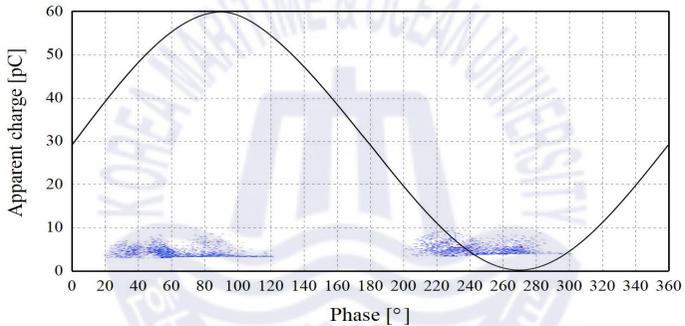
#### 다. 진공누설 및 점접 불완전 개방 (Condition 3, 복합 결함)

진공누설 및 점접의 불완전 개방 결함에서의 방전개시전압은 정상보다 4kV 낮아진 19kV이었다. 이때 정극성 42°~109° 에서 최대 방전전하량 5.1pC, 부극성 220°~284° 에서 최대 방전전하량 5.5pC이었다. 이때 정극성에서 58개 펄스와 부극성에서 67개 펄스가 검출되었다. 이때 검출된 부분방전 패턴은 그림 4.7 (a)와 같다. 정격전압인 25.8kV에서는 정극성 19°~121° 에서 최대 방전전하량 9.0pC, 부극성 200°~302° 에서 최대 방전전하량 9.8pC이었다. 이때 정극성에서 452개 펄스와 부극성에서 481개 펄스가 검출되었다. 이때 검출된 부분방전 패턴은 그림 4.7 (b)와 같다. 정격전압의 110%인 28.4kV에서는 정극성 10°~128° 에서 최대 방전전하량 14.5pC, 부극성 185°~306° 에서 최대 방전전하량 14.9pC이었다. 이때 정극성에서

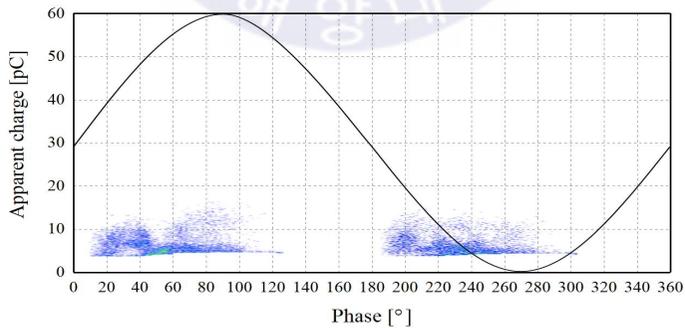
724개 펄스와 부극성에서 851개 펄스가 검출되었다. 이때 검출된 부분방전 패턴은 그림 4.7 (c)와 같다.



(a) 방전개시전압



(b) 정격전압

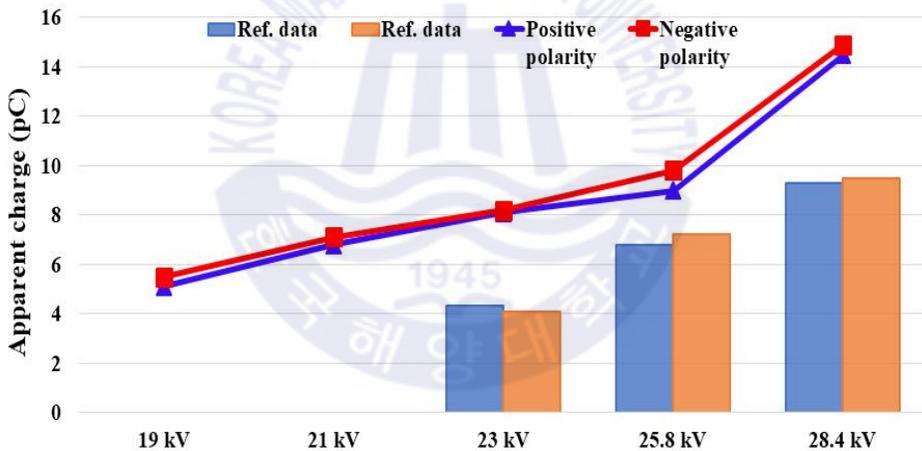


(c) 정격전압의 110%

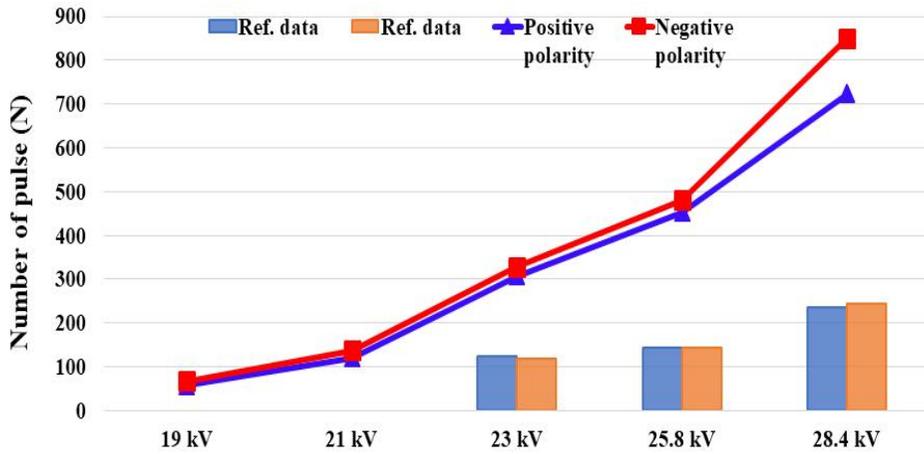
그림 4.7 진공 누설 및 점접 불완전 개방의 PRPD

Fig. 4.7 PRPD of vacuum leakage & incomplete contact opening

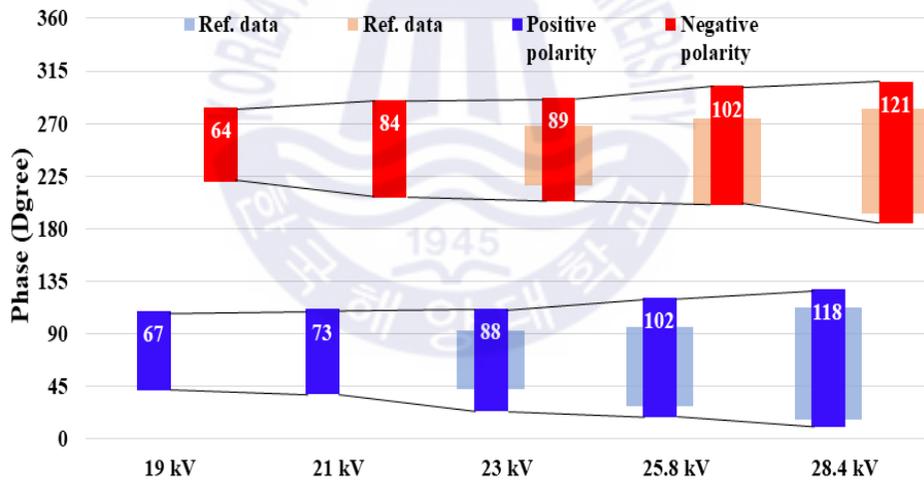
정격전압과 정격전압의 110%에서 검출된 최대 방전전하량은 방전개시 전압에서 보다 각각 약 1.3배와 약 1.6배 높아졌으며, 펄스개수는 방전개시 전압보다 약 3.3배 증가하였다. 또한 위상분포는 평균적으로 약 1.4배와 약 1.6배 넓어졌다. 기준데이터인 정상 상태의 PRPD 특성을 기준으로 진공 누설 및 접점의 불완전한 개폐 결합에서 검출된 PRPD 특성 변화를 인가 전압에 따라 그림 4.8과 같이 비교분석하였다. 인가전압이 높아질수록 기준데이터와 많은 차이를 나타내는 것으로 확인되었다. 그림 4.8 (c) 안의 숫자는 위상범위를 표시한 것이다.



(a) 최대 방전전하량



(b) 펄스개수



(c) 위상분포

그림 4.8 진공누설 및 접점 불완전 개방의 PRPD 특성

Fig. 4.8 PRPD characteristics of vacuum leakage & incomplete contact opening

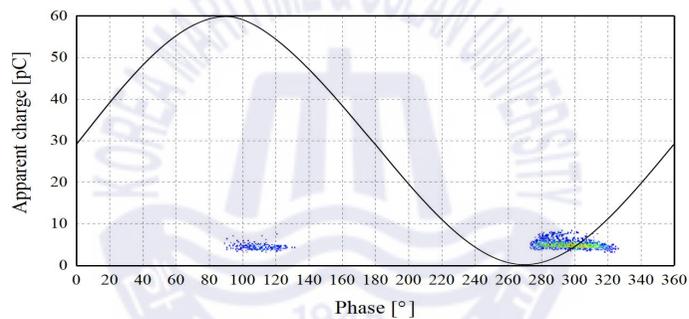
## 4.2.2 접점표면 손상 (불평등 전계)

진공 인터럽터의 개폐 시 발생하는 높은 아크 전류로 인한 전기적 스트레스와 충격, 진동으로 인한 기계적 스트레스에 의해 접점표면은 불균일하게 마모될 수 있다. 접점표면이 불균일하게 손상된다면 접점 사이의 전계는 평등 전계에서 불평등 전계로 바뀌기 때문에 부분방전 검출특성이 접점표면 정상상태와는 다르게 검출된다. 접점표면 손상 시 절연 성능에 대한 영향을 분석하기 위해 정상상태에서 진공누설 결함의 PRPD 특성과 비교분석하였다. 이때 분석 기준 전압은 각 결함의 방전개시전압 및 방전개시전압의 110%~135%, 고압전력계통 전압인 22.9kV까지 선별적으로 적용하였다.

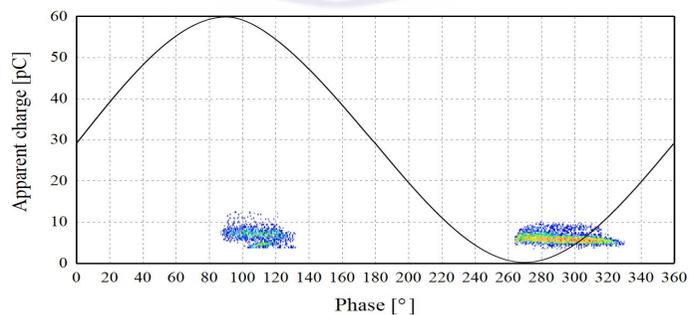
### 가. 진공누설 결함 (Condition 4)

접점표면 손상상태에서 진공누설 결함으로 인해 내부가 대기압이 될 경우 방전전하가 최초로 검출된 전압은 12kV이었다. 이는 정상상태 보다 11kV 낮으며, 접점표면 정상상태에서 진공누설 결함인 Condition 1의 방전개시전압보다 9kV 낮은 63.1% 수준이다. 이때 정극성  $96^{\circ}\sim 136^{\circ}$  구간에서 최대 방전전하량 8.2pC, 부극성  $272^{\circ}\sim 324^{\circ}$  구간에서 최대 방전전하량 9.5pC가 검출되었다. 또한 정극성에서는 31개의 펄스와 부극성에서는 245개의 펄스가 검출되었다. 방전개시전압에서 검출된 부분방전 파형을 그림 4.9 (a)에 나타내었다. 방전개시전압의 110%인 약 13kV에서는 정극성  $84^{\circ}\sim 142^{\circ}$  구간에서 최대 방전전하량 12.3pC, 부극성  $262^{\circ}\sim 330^{\circ}$  구간에서 최대 방전전하량 10.7pC이었다. 이때 정극성에서 29개의 펄스와 부극성에서 867개의 펄스가 검출되었으며, 검출된 부분방전 파형을 그림 4.9 (b)에 나타내었다. 방전개시전압의 120%인 약 14kV에서는 정극성  $71^{\circ}\sim 147^{\circ}$  구간에서 최대

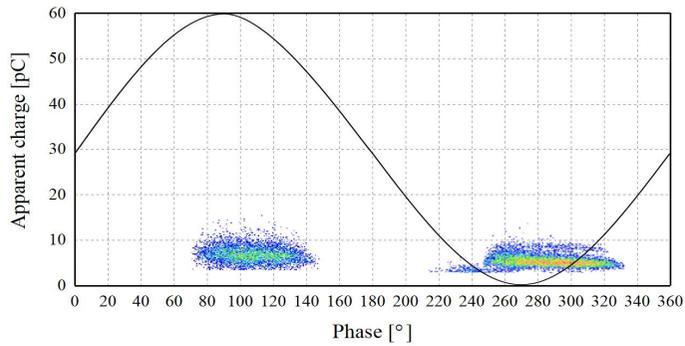
방전전하량 15.8pC, 부극성 214°~335° 구간에서 최대 방전전하량 13.5pC 이었다. 정극성에서 1,029개의 펄스와 부극성에서 1,962개의 펄스가 검출되었다. 이때 검출된 부분방전 파형을 그림 4.9 (c)에 나타내었다. 고압배전 계통 전압인 22.9kV에서는 모든 위상에서 부분방전이 검출되었으며, 최대 방전전하량은 정극성에서 53.5pC, 부극성에서 52.1pC이었다. 정극성에서 3,751개의 펄스와 부극성에서 3,962개의 펄스가 검출되었다. 이때 검출된 부분방전 파형을 그림 4.9 (c)에 나타내었다. 또한, 정격전압 25.8kV의 90.7% 수준인 23.4kV에서 절연파괴인 섬락(Flash-over)이 일어났다.



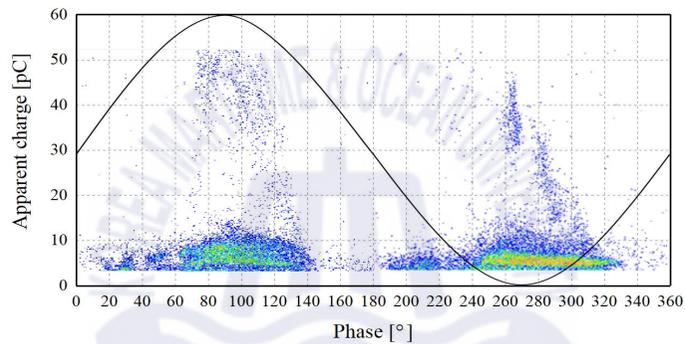
(a) 방전개시전압



(b) 방전개시전압의 110%



(c) 방전개시전압의 120%



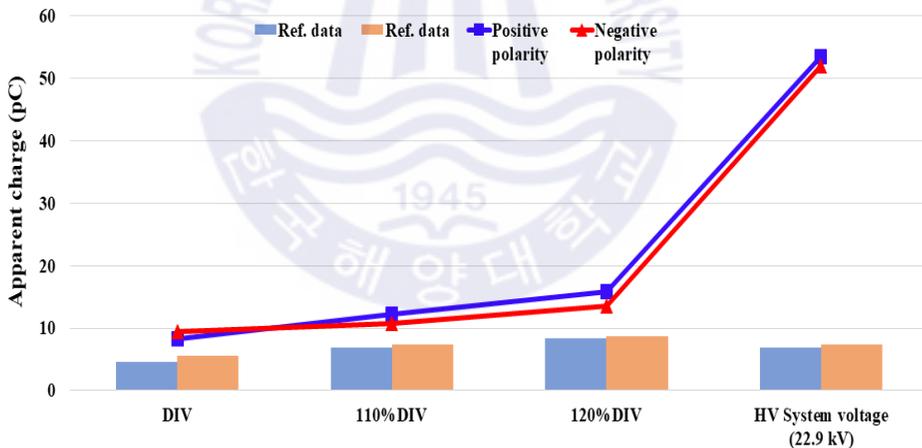
(d) 고압전력계통 전압 22.9kV

그림 4.9 접점표면 손상상태에서 진공누설 결함의 PRPD

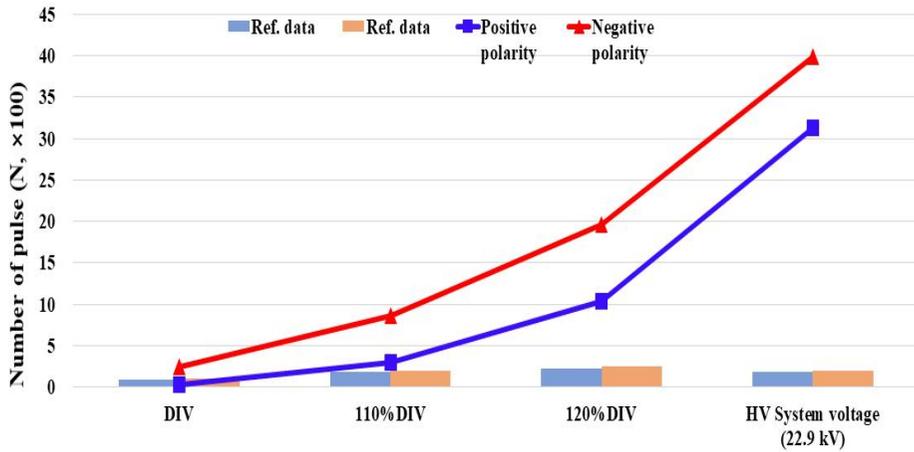
Fig. 4.9 PRPD of vacuum leakage defect at damaged contact surface

진공 인터럽터의 접점표면 손상 결함이 절연 성능에 끼치는 영향을 분석하기 위해, 접점표면 정상상태에서 진공누설 결함인 Condition 1과 접점표면 손상상태에서 진공누설 결함인 Condition 4를 방전개시전압, 방전개시전압의 110% ~ 120% 및 고압전력계통인 22.9kV에서의 최대 방전전하량과 펄스 개수, 위상분포를 비교하였다. 최대 방전전하량은 그림 4.10 (a)와 같이 방전

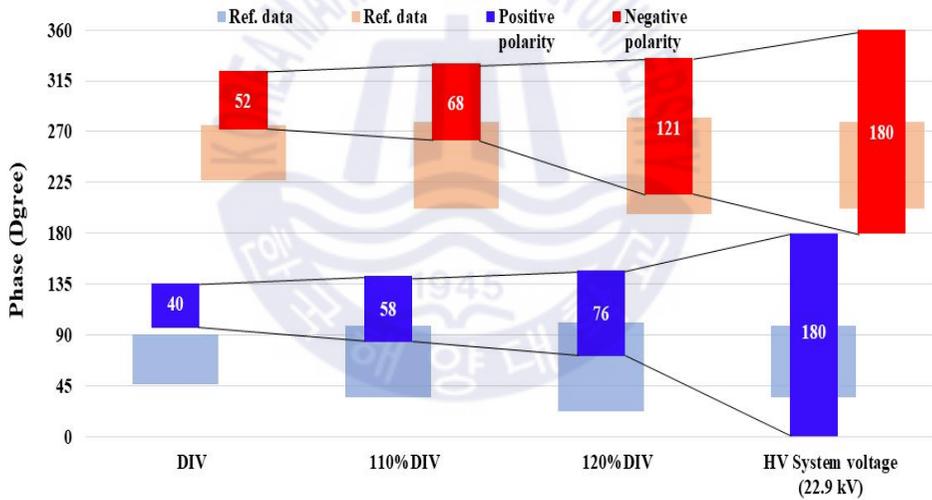
개시전압과 방전개시전압의 110%와 120%에서는 접점표면 정상상태보다 약 1.7배 높아졌으며, 고압전력계통인 22.9kV에서는 약 7.5배 높아졌다. 또한 펄스개수는 그림 4.10 (b)와 같이 접점표면 정상상태보다 방전개시전압에서는 약 1.4배 증가, 방전개시전압의 110%에서는 약 3.0배 증가, 방전개시전압의 약 120%에서는 6.4배 증가하였다. 특히, 22.9kV에서는 18.6배 증가하였다. 또한 위상분포는 그림 4.10 (c)와 같이 접점표면 정상상태보다 방전개시전압과 방전개시전압의 110%에서는 90% 수준으로 좁아졌으며 방전개시전압의 120%에서는 1.2배 넓어졌다. 특히 고압전력계통인 22.9kV에서는 모든 구간에서 부분방전이 검출되었다. 그림 4.10 (c) 안의 숫자는 위상 범위를 표시한 것이다.



(a) 최대 방전전하량



(b) 펄스개수



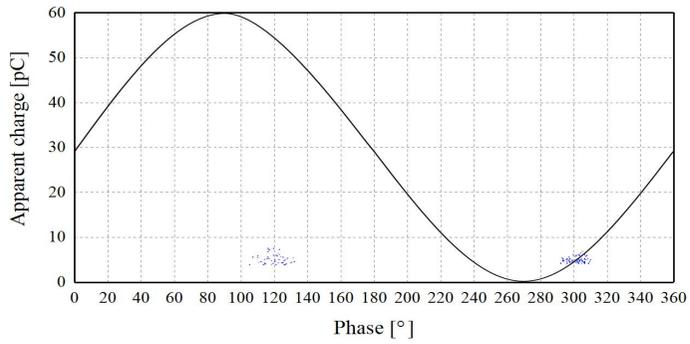
(c) 위상분포

그림 4.10 접점표면 손상상태에서 진공누설 결함의 PRPD 특성

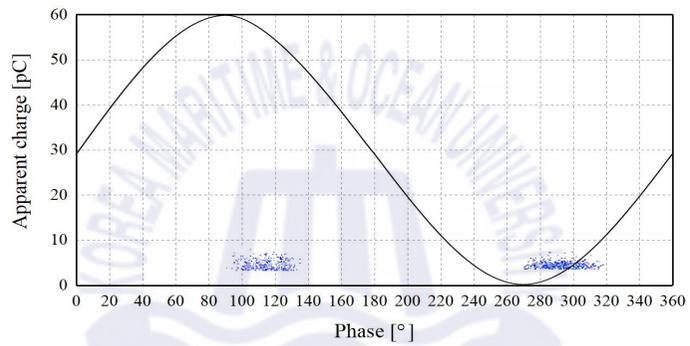
Fig. 4.10 PRPD characteristics of vacuum leakage defect at damaged contact surface

## 나. 진공누설 및 점점 불완전 개방 (Condition 5, 복합 결합)

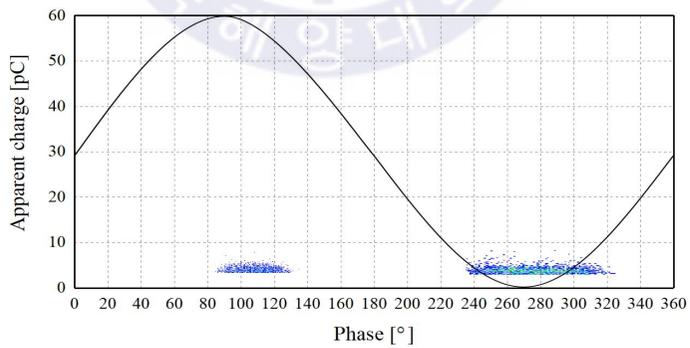
점점표면 손상상태에서 진공누설 결합 및 점점의 불완전한 개방의 복합 결합에서의 방전개시전압은 11kV이었다. 이는 정상상태 보다 12kV 낮으며, 점점표면 정상상태에서 진공누설 결합 및 점점 불완전 개방인 Condition 3에 비해 8kV 낮은 57.9% 수준이다. 이때 정극성 105°~134° 구간에서 최대 방전전하량 7.9pC, 부극성 292°~312° 구간에서 최대 방전전하량 6.4pC이 검출되었다. 정극성에서 10개의 펄스와 부극성에서 15개의 펄스가 검출되었다. 방전개시전압에서 검출된 부분방전 패턴은 그림 4.11 (a)에 나타내었다. 방전개시전압의 110%인 약 12kV에서는 정극성 90°~138° 구간에서 최대 방전전하량 8.1pC, 부극성 273°~320° 구간에서 최대 방전전하량 7.3pC이 검출되었다. 이때 정극성에서 83개의 펄스와 부극성에서 257개의 펄스가 검출되었으며, 검출파형은 그림 4.11 (b)에 나타내었다. 방전개시전압의 120%인 약 13kV에서는 정극성 83°~142° 구간에서 최대 방전전하량 8.6pC, 부극성 257°~328° 구간에서 최대 방전전하량 9.1pC이 검출되었다. 이때 정극성에서 283개의 펄스와 부극성에서 490개의 펄스가 검출되었으며, 검출 파형은 그림 4.11 (c)에 나타내었다. 방전개시전압의 135%인 약 15kV에서는 정극성 78°~149° 구간에서 최대 방전전하량 14.7pC, 부극성 236°~325° 구간에서 최대 방전전하량 10.2pC이 검출되었다. 이때 정극성에서 509개의 펄스와 부극성에서 638개의 펄스가 검출되었으며, 검출 파형은 그림 4.11 (d)에 나타내었다. 또한, 정격전압 25.8kV의 60.8%인 15.7kV에서 절연이 파괴되는 섬락(Flash-over) 현상이 일어났다.



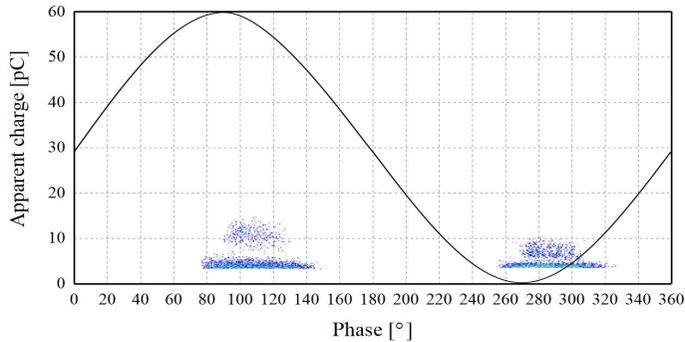
(a) 방전개시전압



(b) 방전개시전압의 110%



(c) 방전개시전압의 120%



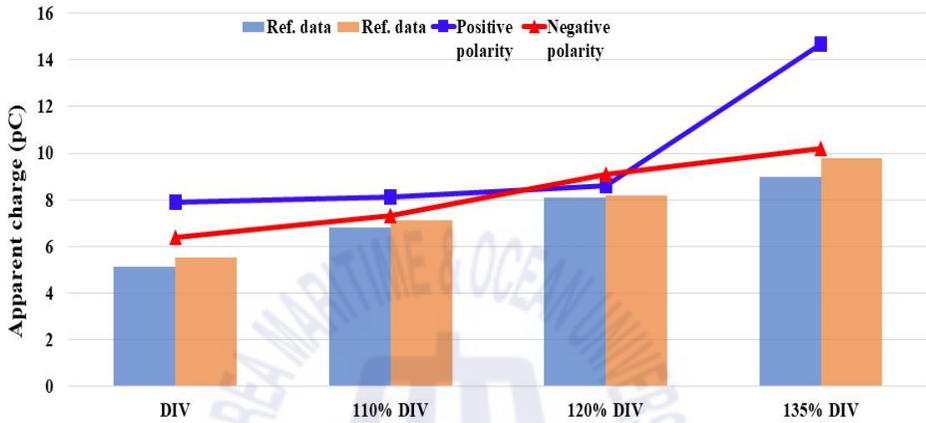
(d) 방전개시전압의 135%

그림 4.11 접점표면 손상상태에서 진공누설 결함 및 접점 불완전  
개방의 PRPD

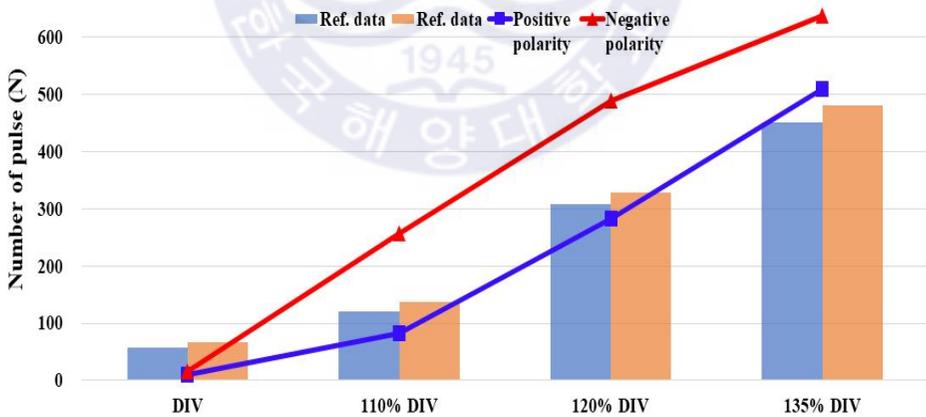
Fig. 4.11 PRPD of vacuum leakage defect at a damaged contact  
surface

진공 인터럽터의 접점표면 손상에서 진공누설 결함이 절연 성능에 끼치는 영향을 분석하기 위해, 접점표면 정상상태의 복합 결함인 Condition 3와 손상상태의 복합결함인 Condition 5를 방전개시전압, 방전개시전압의 110%, 방전개시전압의 120% 및 방전개시전압의 135%에서의 최대 방전전하량과 펄스개수, 위상분포와 같은 부분방전 검출특성을 비교하였다. 최대 방전전하량은 그림 4.12 (a)와 같이 접점표면 정상상태보다 방전개시전압과 방전개시전압의 135%에서는 1.3배 크게, 방전개시전압의 110%와 방전개시전압120%에서는 1.1배 크게 검출되었다. 또한 펄스개수는 그림 4.12 (b)와 같이 방전개시전압에서는 접점표면 정상상태의 20% 수준 정도로 검출된 개수가 낮았지만, 방전개시전압의 110%에서는 1.3배 많이, 방전개시전압의 135%에서는 1.2배 증가하였다. 또한 위상분포는 그림 4.12 (c)와 같이 접점표면 정상상태에서 보다 방전개시전압에서는 40% 수준으로 좁게, 방전

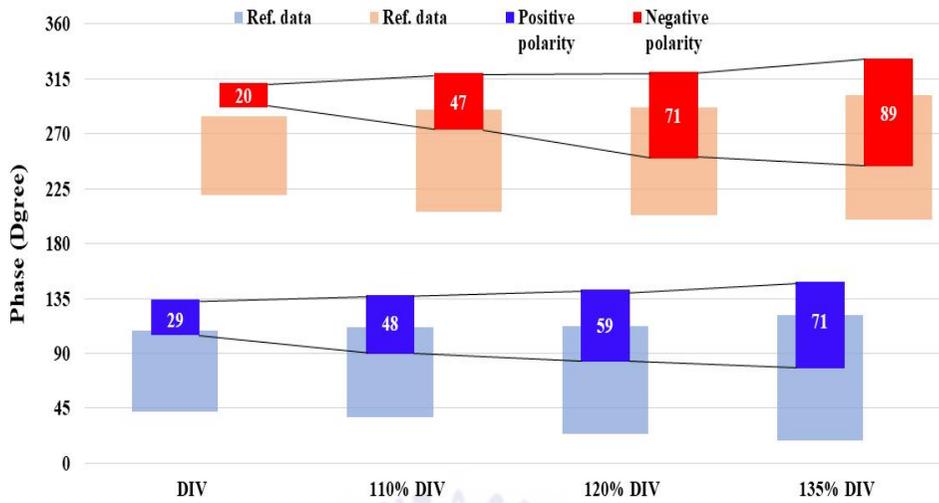
개시전압의 110%에서는 60% 수준으로 좁게, 방전개시전압의 120%에서는 70% 수준으로 좁게, 방전개시전압의 135%에서는 80% 수준으로 좁게 검출되었다. 그림 4.12 (c) 안의 숫자는 위상범위를 표시한 것이다.



(a) 최대 방전전하량



(b) 펄스개수



(c) 위상분포

그림 4.12 접점표면 손상상태에서 진공누설 결함 및 접점 불완전 개방의 PRPD 특성

Fig. 4.12 PRPD characteristics of vacuum leakage defect at a damaged contact surface

### 4.3 결과 고찰

진공 인터럽터의 진공누설 및 접점의 불완전한 개방, 접점표면 손상 결함에서 각각 검출된 부분방전 특성을 상호 비교분석하였다.

#### 4.3.1 방전개시전압

각 결함에서의 방전개시전압은 표 4.1 및 그림 4.13과 같이 검출되었다. 접점표면 정상상태에서의 방전개시전압은 진공누설 및 불완전개방 결함마다 2kV씩 낮아졌으며, 진공누설과 불완전 개방 결함이 동시에 적용된 복합 결함에서의 방전개시전압은 정격전압 25.8kV의 73.6% 수준인 19kV로 검출되었다. 반면 접점표면 손상상태에서의 방전개시전압은 정상 상태보다 11~12kV 낮게 검출되어, 진공누설 결함에서는 12kV, 진공누설 및 불완전 개방 결함이 동시에 적용된 복합 결함에서는 정격전압의 42.6% 수준인 11kV이었다. 이는 접점표면 정상상태에서 복합 결함의 57.9% 수준이었다. 그림 4.13 안의 숫자는 방전개시전압의 크기를 표시한 것이다.

표 4.1 결함 별 방전개시전압 비교

Table 4.1 Comparison of DIV by each defect

Division	Normal contact surface				Damaged contact surface	
	Normal vacuum ( $5 \times 10^{-5}$ torr)		No vacuum (Atm.)		No vacuum (Atm.)	
	12 mm	8 mm	12 mm	8 mm	12 mm	8 mm
DIV	23 kV Ref.	21 kV (-2 kV)	21 kV (-2 kV)	19 kV (-4 kV)	12 kV (-11 kV)	11 kV (-12 kV)

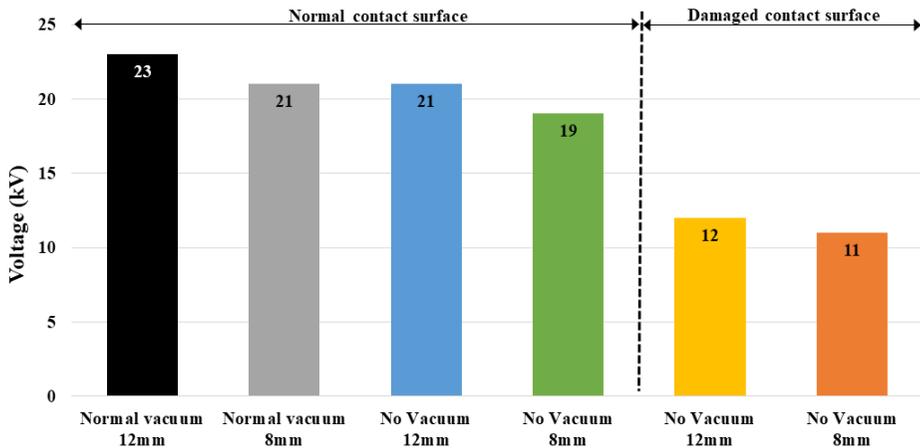


그림 4.13 결함별 방전개시전압 비교

Fig. 4.13 Comparison of DIV by each defect

### 4.3.2 최대 방전전하량

각 결함의 인가전압에 따른 최대 방전전하량은 접점표면 상태에 따라 확연하게 다른 결과가 확인되었다. 각 결함별 최대 방전전하량 비교를 그림 4.14에 정리하여 나타내었다. 최대 방전전하량은 진공누설과 접점의 불완전 개방 결함에 따라 증가되었다. 접점표면 정상상태에서는 특히 복합 결함인 진공누설 및 접점의 불완전한 개방 결함에 최대 인가전압인 정격전압의 110%인 28.4kV에서도 절연파괴 현상이 발생되지 않았다. 즉, 일반적으로 알려진 교류전압의 대기 중 절연내력인 21kV/cm 보다 높은 인가전압에서도 절연파괴가 발생되지 않았다. 그 이유는 손상이 없는 매끄러운 평판 대 평판에서는 전계집중 현상이 일어나기 어렵기 때문에 대기 중 절연내력 보다 더 높은 전압이 인가되더라도 절연파괴가 쉽게 발생되지 않는 것으로 분석된다.

반면, 접점표면 손상상태에서는 손상부위에 전계집중 현상이 발생되기

때문에 부분방전 현상이 쉽게 나타나서 낮은 인가전압에서도 다량의 방전 전하가 검출되었다. 이로 인해 인가전압 상승에 대한 최대 방전전하량의 상승률은 접점표면 표면 정상상태보다 최대 3배 높게 나타났다. 특히, 접점 표면 손상상태에서는 접점의 개방정도와 관계없이 완전 개방과 불완전 개방 상태 모두에서 정격전압보다 낮은 인가전압에서 섬락(Flash-over)이 일어나며 절연파괴(Break-down)가 일어났으며, 복합결함인 진공누설 및 불완전 개방에서는 정격전압의 60.8% 수준인 15.7kV에서 섬락이 일어났다.

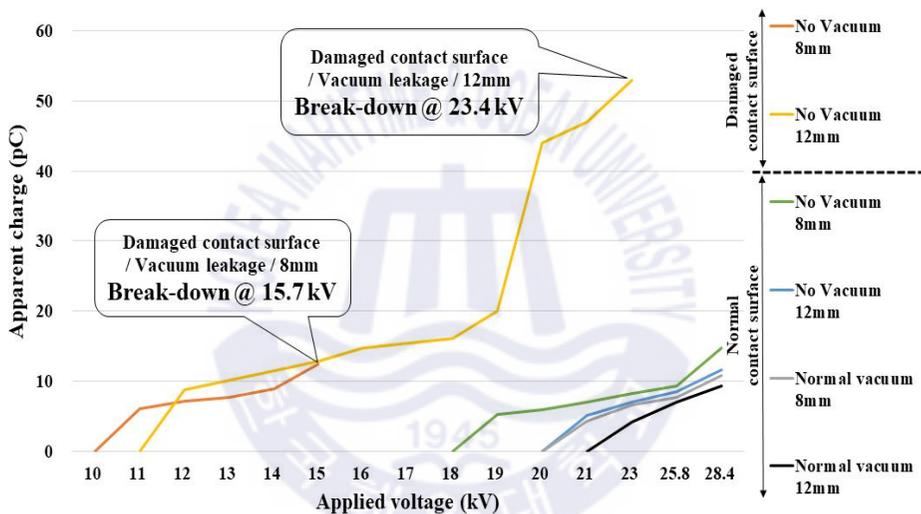


그림 4.14 인가전압에 따른 각 결함별 최대 방전전하량 비교

Fig. 4.14 Comparison of maximum apparent discharge according to applied voltage for each defect

### 4.3.3 위상분포

접점표면 상태에 따라 부분방전의 위상분포도 다른 형상을 보였다. 각 결함별 방전개시전압에서 검출된 부분방전의 위상분포를 그림 4.15에 나타내었다. 접점표면 정상상태에서는 정극성 45°~90° 구간과 부극성

225°~270° 구간에서 부분방전이 주로 검출되었다. 하지만 접점표면 손상 상태에서는 이와 다른 정극성 90°~135° 와 부극성 270°~315° 에서 부분방전이 주로 검출되었다.

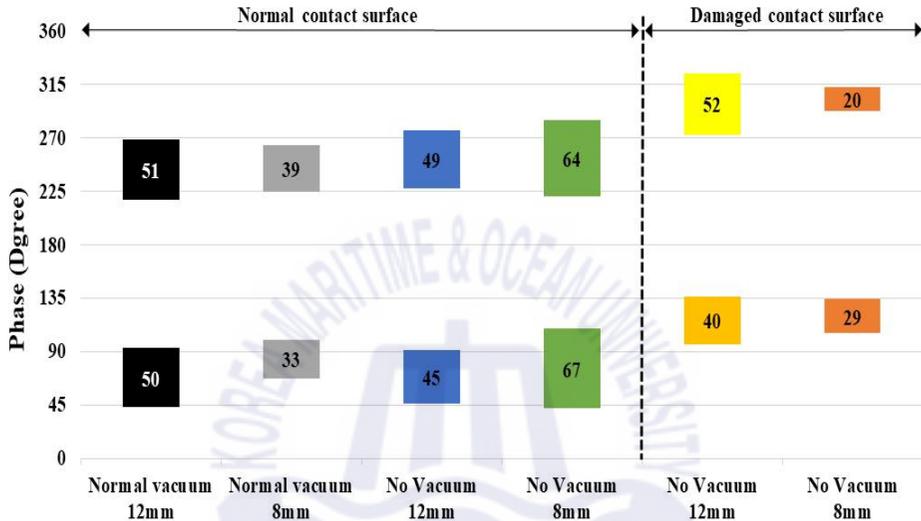


그림 4.15 결함별 방전개시전압에서 부분방전 위상분포 비교

Fig. 4.15 Comparison of PD phase distribution at DIV for each defect

#### 4.3.4 극성비

결함 별 인가전압에 따라 검출되는 부분방전의 극성비를 분석한 결과, 접점표면 정상상태와 손상상태는 서로 극명한 차이를 보였다. 표 4.2는 결함 별 방전개시전압과 방전개시전압의 120%에서 검출된 부분방전 펄스를 극성에 따라 비율로 정리한 것이다. 접점표면 정상상태에서는 진공누설 및 접점 개방 정도에 상관없이 모든 결함에서 정극성과 부극성에서 검출

되는 펄스개수가 거의 동일하게 50:50의 비율로 검출되었다. 하지만 접점 표면 손상상태에서는 정극성보다 부극성에서 상당히 많은 펄스가 검출되었으며, 특히 진공누설 및 완전개방상태의 방전개시전압에서는 부극성이 정극성 보다 8배 이상 높게 나왔다. 부극성에서 많은 방전펄스가 검출되는 이유는 전자의 물리적 특성인 이동성(Mobility)이 큰 영향이다.

표 4.2 결함 별 방전개시전압과 방전개시전압의 120%에서 극성비 비교

Table 4.2 Comparison of polarity ratio at DIV & 120% DIV for each defect

Division		Normal contact surface				Damaged contact surface	
		Normal vacuum ( $5 \times 10^{-5}$ torr)		No vacuum (Atm.)		No vacuum (Atm.)	
		12 mm	8 mm	12 mm	8 mm	12 mm	8 mm
DIV	Positive polarity	0.51	0.47	0.48	0.47	<b>0.11</b>	<b>0.40</b>
	Negative polarity	0.49	0.53	0.52	0.53	<b>0.89</b>	<b>0.60</b>
120% DIV	Positive polarity	0.49	0.49	0.49	0.48	<b>0.25</b>	<b>0.24</b>
	Negative polarity	0.51	0.51	0.51	0.52	<b>0.75</b>	<b>0.76</b>

## 제 5 장 결 론

본 논문에서는 수배전반에 주로 사용되는 진공 차단기의 신뢰도 및 안전성 향상을 위해 진공 차단기의 핵심 부품인 진공 인터럽터의 결함별 부분방전 특성 연구를 실시하였다.

정격전압 25.8kV용 진공 인터럽터와 동일 제품의 내부 접점을 이용한 전극계로 실험계를 구성하였다. 진공 인터럽터의 주요 결함을 진공누설, 접점의 불완전 개방 및 접점표면 손상으로 선정하여 연구를 실시하였다. 이때 발생하는 부분방전 신호는 IEC 60270 법을 기반으로 검출하였으며, 검출된 방전개시전압(DIV), 방전전하량( $q$ ), 펄스개수( $n$ ), 위상분포( $\theta$ ) 및 극성비와 같은 부분방전 특성을 PRPD 법으로 분석하였다. 정상 진공 인터럽터는 인가전압 23kV에서 부분방전 펄스가 최초로 검출되었으며, 정격전압에서의 최대 방전전하량, 펄스개수 및 위상분포는 방전개시전압 보다 평균적으로 각각 1.6배, 1.2배 및 1.4배 증가되어 검출되었다. 부분방전 검출과형은 인가전압과 상관없이 유사하였다.

진공 인터럽터의 결함별 부분방전 검출특성을 상호 분석하여, 각 결함이 절연에 미치는 영향 정도를 분석하였다. 접점표면 정상상태에서의 진공누설 결함과 접점의 불완전한 개방 결함에서 검출된 방전개시전압은 동일하게 19kV이었다. 하지만 최대 방전전하량은 접점의 불완전한 개방 결함보다 진공누설 결함에서 1.1배 높게 검출되었으며, 부분방전의 위상분포는 1.3배 넓은 분포로 검출되었다. 이를 통해 접점표면 정상상태에서는 진공누설 결함이 접점의 불완전한 개방 결함보다 절연성능에 더 큰 영향을 끼치는 것으로 분석되었다. 반면, 접점표면 손상상태에서의 방전개시전압은 진공누설 단일 결함에서 12kV, 진공누설 및 접점의 불완전한 개방 복합

결함에서 11kV로 검출되었다. 또한, 최대 방전전하량은 단일 결함이 복합 결함 보다 1.4배 높게 검출되었으며, 부분방전의 위상분포는 단일 결함이 복합결함 보다 1.5배 넓은 영역에서 검출되었다. 그리고 절연 파괴현상은 단일 결함에서 23.4kV, 복합결함에서 15.7kV에서 일어났다. 이를 통해, 접점표면 손상상태에서는 진공누설 단일 결함 보다 진공누설 및 접점의 불완전 개방 복합 결함이 절연성능에 큰 영향을 끼치는 것으로 분석되었다.

결함 모의실험에서 검출된 부분방전 특성분석으로 각 결함이 절연에 미치는 영향 정도를 순서를 다음과 같이 도출하였다. 접점표면 정상상태에서는 첫째 진공누설, 둘째 접점의 불완전 개방, 접점표면 손상상태에서는 첫째 접점의 불완전한 개방, 둘째, 진공누설로 도출하였다.

진공 인터럽터의 인가전압에 따라 검출되는 방전개시전압, 최대 방전 전하량, 위상분포 및 극성비와 같은 부분방전 검출 특성을 종합적으로 분석한다면 제품의 공장출하 전 최종시험 뿐만 아니라, 활선(On-line) 상태에서 운용 중인 제품의 절연 진단에도 적용 가능할 것으로 기대된다. 특히, 부분방전 펄스의 극성비와 위상분포를 최우선으로 분석한다면 절연 성능에 가장 많은 영향을 끼치는 접점표면 손상여부를 확인할 수 있어 제품의 절연파괴를 사전에 방지할 수 있어 전기사고를 저감시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 이를 통해 고압 수용가의 수배전반에 설치된 다양한 제작사의 제품에 대하여 일률적인 절연 진단을 할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] Juan Tobias, Jean-Marc Biasse, Philippe Picot, Denis Perrin, Marc Bonjean Eduardo Pujadas, “IMPACT OF OPERATING MECHANISM TYPE ON MV VACUUM CIRCUITBREAKER RELIABILITY” , CIRED 23rd International Conference on Electricity Distribution, Paper 0777, 2015.
- [2] Yusuke Nakano, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, Tsuyoshi Tanaka, Masato Kobayashi “Estimation Method of Degraded Vacuum in Vacuum Interrupter based on Partial Discharge Measurement” , IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 26, Issue. 5, pp. 1520-1526, 2019.
- [3] 소방청 국가화재정보센터, <https://nfds.go.kr>
- [4] G. Wang, H. E. Jo, S. J. Kim, S. W. Kim, G. S. Kil, “Measurement and analysis of partial discharges in SF6 gas under HVDC” , Measurement, 91, pp. 351-359, 2016.
- [5] 김성욱, 김선재, 박대원, 길경석, 류길수, “유중부분방전 음향신호의 주파수특성 분석” , 한국철도학회 춘계학술대회, pp. 1407-1413, 2009.
- [6] 김선재, 왕국명, 윤민영, 길경석, “SF6가스 중 파티클 형태에 따른 부분방전의 특성” , 한국철도학회 추계학술대회, pp. 1474-1479, 2015.
- [7] 현대 일렉트릭, 진공 인터럽터 매뉴얼, H\_77.
- [8] LS 산전, 진공 인터럽터 매뉴얼, K-3.
- [9] 비츠로EM, 진공 인터럽터 매뉴얼, B7-4.

- [10] Yusuke Nakano, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, Tsuyoshi Tanaka, Masato Kobayashi, “Partial Discharge Detection Method for Vacuum Leakage Diagnosis of a Vacuum Interrupter” , IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Revised 30, p. 819-824, 2019.
- [11] Leslie T. Falkingham, “Vacuum Switchgear; Past, Present, and Future” , 5<sup>th</sup> International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology, pp. 788-793, 2019.
- [12] Leslie T. Falkingham, “Vacuum 101” , 2016 Autumn IEEE Switchgear Committee, Pittsburgh.
- [13] Hans Schellekens, “Continuous Vacuum Monitoring in Vacuum Circuit Breakers” , 2014 IEEE XXVI Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum - Mumbai, India, pp. 465-468, 2014.
- [14] John Cadick, Finley Ledbetter, “PREDICTING THE REMAINING LIFE OF VACUUM INTERRUPTERS IN THE FIELD” , 81st International Conference of Doble Clients, pp. 2, 2014.
- [15] 이승수, 허준, 윤재훈, 임기조, 강성화. “진공에서 전극 재질에 따른 절연과괴 전압 특성 파악” , 대한전기학회 추계학술대회 논문집, p. 101-102, 2008.
- [16] F. H. Kreuger, “Partial discharge detection in high-voltage equipment“, Butterworth, pp.1-14, pp.129 ~ 152, 1989.
- [17] G. C. Stone, “Partial Discharge - Part VII : Practical Techniques for Measuring PD in Operating Equipment“, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 7, No. 4, pp.9-19, 1991.

- [18] 엄무수, “평대 평판전극하에서 글로우 방전의 특성 및 진단에 관한 연구”, Vol. 23, No. 1, 울산과학대학교 연구논문집, p.99-120, 1996
- [19] C. Laurent, C. Mayoux, “Partial Discharge - Part XI : Limitations to PD as Diagnostics for Deterioration and Remaining Life“, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 2, pp.14-17, 1992.
- [20] Paul G. Slade, “The Vacuum Interrupter: Theory, Design, and Application” , CRC Press, 2018.
- [21] S. A. Boggs, “Partial Discharge - Part III : Cavity-Induced PD in Solid Dielectric“, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 6, No. 6, pp.11-20, 1990.
- [22] A. Contin, A. Cavallini, G. C. Montanari, F. Puletti, “Advanced PD Inference in on-Field Measurements, Part I. Noise Rejection“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 10(2), pp.216-224, 2003.
- [23] A. Contin, A. Cavallini, G. C. Montanari, G. Pasini, F. Puletti, “Advanced PD inference in on-field measurements. Part II. Identification of defects in solid insulation systems“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 10(3), pp.528-538, 2003.
- [24] A. Cavallini, G. C. Montanari, D. Fabiani, L. Testa, “Advanced technique for partial discharge detection and analysis in power cables“, Int conf. on condition Monitoring & Diagnostic Engineering Management of Power Station/Substation Equipment, pp.1-4, 2009.