



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

SF<sub>6</sub> 가스중 결함별 부분방전 펄스의  
패턴분석

Pattern Analysis of Partial Discharge Pulse Depending on Defects  
in SF<sub>6</sub> Gas



2014年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

朴 熙 喆

本 論文을 朴熙喆의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長：工學博士 徐 東 煥 ㉠

委 員：工學博士 吉 暻 碩 ㉠

委 員：工學博士 張 樂 元 ㉠



2013年 12月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

朴 熙 喆

# 목 차

목 차 .....	i
그림 및 표 목차 .....	iii
Abstract .....	v
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 이 론 .....	3
2.1 절연열화와 부분방전 .....	3
2.2 절연결합과 검출방법 .....	13
제 3 장 설계 및 제작 .....	20
3.1 절연결합계 .....	20
3.2 PRPD 측정 프로그램 .....	24
제 4 장 실험 및 방법 .....	28
4.1 실험계의 구성 .....	28
4.2 교정 실험 .....	30
4.3 결합별 PD 패턴 .....	32

제 5 장 결과 및 분석 .....	40
제 6 장 결 론 .....	43
참 고 문 헌 .....	45



## 그림 및 표 목차

### <그림 목차>

그림 2.1	코로나 방전	7
그림 2.2	연면 방전	8
그림 2.3	내부 방전	9
그림 2.4	결함의 증가회로	10
그림 2.5	교류전압에서 PD 발생	11
그림 2.6	UHF 센서에 의한 PD 측정	16
그림 2.7	음향 센서에 의한 PD 측정	17
그림 3.1	결함계의 구조	24
그림 3.2	측정 프로그램의 순서도	25
그림 3.3	PRPD 측정 프로그램	27
그림 4.1	실험계	29
그림 4.2	검출저항과 HFCT의 설치	29
그림 4.3	PD 파형의 예(10 kV)	30
그림 4.4	교정펄스에 대한 출력전압	31
그림 4.5	전하량에 따른 출력전압	32
그림 4.6	도체 돌출	33
그림 4.7	외함 돌출	34
그림 4.8	자유 입자	35
그림 4.9	에폭시 표면 돌출	36
그림 4.10	에폭시 내부 보이드	37
그림 4.11	스페이서 크랙	38
그림 4.12	부유 금속	39

<표 목차>

표 2.1	절연열화 .....	4
표 5.1	부분방진 펄스의 위상분포 .....	40
표 5.2	결함별 극성 비율 .....	41



# Pattern Analysis of Partial Discharge Pulse Depending on Defects in SF<sub>6</sub> Gas

*by Hee-Chul Park*

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



## Abstract

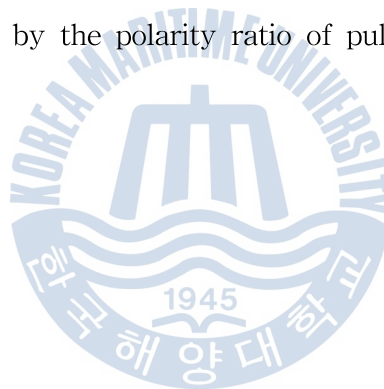
Partial Discharges (PDs) produced by insulation deterioration of power facilities can lead to failure if not detected earlier, so PD monitoring is essential to assess insulation condition in also Gas Insulated Switchgear (GIS). This thesis dealt with the analysis of Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) depending on the types of defects which may occur in GIS for an on-line insulation diagnosis of GIS.

Seven types of PD cells; protrusion on conductor (POC), protrusion on enclosure (POE), free particle (FP), particle on epoxy surface (PES), void inside epoxy (VE), spacer crack (SC) and floating metal (FM) were designed and fabricated to simulate the insulation defects in GIS. PD pulses were detected by a non-inductive resistor of 50 Ω



which was connected to the ground of a PD cell in series inside a shielding enclosure, and were transmitted to a personal computer through a data acquisition module with a 2-channel input of 125 MS/s, 8 bit, and 250 MHz high cut-off frequency for an applied voltage and a PD pulse.

A PRPD analysis algorithm was designed using a LabVIEW program, and PD patterns depending on defects were identified by parameters: phase distribution, magnitude, counts, and polarity ratio of pulses. PD patterns were completely different from or similar with each other, however the recognition of defect types was possible using these parameters, especially by the polarity ratio of pulses.



## 제 1 장 서 론

고전압 전력기기의 열화 또는 고장의 징후로 부분방전현상이 발생하는데 이러한 현상을 조기에 검출, 측정하고 진단할 필요성이 있다. 특히 고전압 전력기기는 국가 기간산업뿐 아니라, 민수용에서도 매우 중요한 시설로 취급되고 있으며 전력기기의 사고는 인명의 피해, 전력 시설의 직접적 손실과 함께 정보통신망에도 영향을 미치는 국가적으로도 중차대한 사안이다. 특히, 대용량 초고압 변압기, 가스절연개폐장치(Gas Insulated Switchgear, GIS), 발전기 등은 단위 설비당 공급전력이 매우 크기 때문에 고장시 과급 영향이 광범위하므로, 이들 설비의 예방진단기술에 대한 연구개발이 60년 이상 지속되고 있으며, 반도체기술과 계측기 성능의 향상에 따라 진단의 정확도도 높아지고 있다<sup>[1]~[4]</sup>.

GIS 예방진단기술에는 전 세계적으로 적용되고 있는 Phase Resolved Partial Discharge (PRPD)분석법이 있으며, 노이즈 제거와 고감도 검출 및 PD 발생원인을 명확히 규명하기 위한 연구개발이 지속되고 있다<sup>[5]~[7]</sup>. 가스절연개폐장치 예방진단기술의 연구·개발은 오래전부터 지속되어 왔으며, 최근 반도체기술 및 계측장치의 성능 향상과 프로그램 개발로 인하여 더욱 신뢰성 있는 진단이 가능해졌다. 현재 국내의 많은 대학과 기업에서도 연구·개발이 지속적으로 이루어지고 있으며, 다양한 예방진단기술들이 제안되고 있다. 하지만, 이러한 노력에도 불구하고 현재 국내 전력설비 진단 및 부분방전 측정 기술의 대부분은 해외 유명 업체들의 장비를 사용하고 있는 실정이며 대부분의 장비들은 부분방전의 유무, 크기 및 위상 등의 정보를 알려주지만 이러한 정보만으로는 현장에서 절연열화의 원인 판별에 어려움이 있다<sup>[8]</sup>.

따라서 본 논문에서는 GIS 진단분야에서 필요한 기술로 GIS에서 발생 가능한 각종 결함을 모의하여, 부분방전(Partial Discharge, PD) 펄스의 측정과 분석을 통해 결함에 따른 특징을 도출하였다.



## 제 2 장 이 론

### 2.1 절연열화와 부분방전

전기기기에 전력설비 중 개폐장치는 선로의 분기와 연계로 구성이 복잡한 부하설비에서 계통을 구성, 분리 및 변경을 목적으로 사용되며, 그 중에서도 높은 절연성을 갖는 GIS가 많이 사용되고 있다. 가스절연개폐장치는 내부에 모선, 개폐장치, 변성기 및 피뢰기 등이 설치되고 SF<sub>6</sub>가스로 충전, 밀폐하여 절연을 유지시키는 장치를 말하며, SF<sub>6</sub>가스의 절연내력이 1기압에서 공기의 2.5 ~ 3.5배 가량 높은 장점 때문에 소형화가 가능하여 대도시의 도심지 또는 좁은 지역에 대용량의 전력소비가 요구되는 곳에 사용되고 있다<sup>[9]~[12]</sup>.

하지만 사고가 발생할 경우 단위 설비당 공급전력이 매우 크기 때문에 피해 범위가 광범위하므로 사고의 예방이 필수적이다. 가스절연개폐장치의 사고는 제작, 운반 및 조립과정 시 생성된 결함에 의해 발생하며, 대부분 장치 내부에서 발생하기 때문에 육안으로 확인하기 어렵다. 이러한 이유로 절연열화의 감시 및 진단을 통하여 사고를 미리 예방하기 위한 연구가 국외뿐만 아니라 국내에서도 오래전부터 수행되어져 왔으며, PD 측정에 의한 절연진단 방법은 초기에 절연열화를 측정할 수 있기 때문에 예방진단에 가장 많이 적용되고 있는 방법이다<sup>[13],[14]</sup>.

절연체 내부에 공극, 전기트리, 표면 오손 등의 결함이 존재하게 되면 전계가 집중되고 자체의 절연내력이 상대적으로 약화되어 결함에서 부분방전이 발생한다. 이러한 부분방전의 발생이 지속되면 절연성능이 더욱 약화되어 결과적으로 절연파괴를 초래하게 된다<sup>[15]~[17]</sup>. 절연체의 절연열화 요인으로는 열적 요인, 전기적 요인, 기계적 요인 및 환경적 요인 등이

있으며, 이에 의한 열화발생과 진전기구는 절연방식, 절연재료, 전기기기 등의 종류 및 용량에 따라 달라진다. 몰드변압기의 경우 과부하시 과전류에 의한 열적 열화와 이상전압 등에 의한 전기적 열화가 주된 절연열화 요인이라고 할 수 있다<sup>[18]~[20]</sup>.

절연체의 절연열화는 위에서 언급한 각각의 열화요인이 단독적으로 작용하는 경우보다는 복합적으로 작용하여 열화가 진행되는 경우가 많다. 표 2.1에는 고체 절연체의 일반적인 열화요인과 열화현상을 개략적으로 나타내었다<sup>[4]~[6]</sup>.

표 2.1 절연열화

Table 2.1 Insulation Deterioration

열화요인		열화현상
열적 스트레스	연속	화학적 변질
	주기적	박리, 균열, 마찰
전기적 스트레스	정격전압	PD, 침식, 트래킹
	이상전압	전기트리
기계적 스트레스	굽힘	박리, 균열
	진동	마모
	충격	박리, 균열
수분	흡습, 침수	누설전류 증대, 트래킹
	결로	
오손	도전물질	누설전류 증대, 트래킹, 화학적 변질
	약품	

절연체의 열적 열화는 운전 중에 발생하는 과전류로 인한 온도상승이나 기후의 변화 또는 외부 열원 등의 방사열에 의한 경우가 대부분이며 동일한 열에너지의 스트레스가 전달되어도 절연재료의 내열성이나 온도상승률 등에 의하여 열화 정도가 달라진다. 몰드변압기의 경우 일시적인 과부하 등에 의한 급격한 온도상승은 열적 열화를 촉진시키는 원인이 된다. 열적 스트레스 하에 놓인 절연체 내부에는 공극(Void)의 생성, 부분방전의 발생, 기계적 강도의 저하 및 흡습 등 외부의 영향을 받기 쉬운 상태가 되어 다른 열화 원인의 활성화에 영향을 미치며, 절연층 내부 및 권선 단말부나 출력케이블의 손상 등으로 나타나기도 한다. 특히 온도상승은 화학적 반응을 촉진하여 열화의 속도를 증가시키며, 절연재료 수명을 단축시키는 가장 일반적인 열화요인이다<sup>[21],[22]</sup>.

전기적 열화는 절연체에 외부로부터 인가되는 전계에 의한 것으로 다음과 같은 각종 열화현상이 발생하게 된다. 일반적으로 절연물의 공극에서 방전이 발생하면, 공극의 표면은 침식된다. PD에 의한 침식은 공극의 확대 또는 공극 간의 교락을 발생시켜 큰 방전으로 이행되며 절연 손상은 전계가 집중하기 쉬운 도체 주위에서 시작하는 경우가 많다<sup>[23]</sup>.

기계적인 열화의 주요 원인으로는 기기의 기동이나 정지시의 전자력, 운전 중의 진동, 열사이클에 의한 응력 등이 있으며 주로 전동기나 발전기 같은 회전기에서 주로 발생한다. 기계적 열화는 절연층의 박리, 균열, 마모에 의한 손상으로 나타나며, 그 결과 전기적인 열화로 촉진되어 절연 파괴를 발생시킨다.

환경적인 열화는 화학약품이나 기름, 먼지 등의 이물에 의한 오손 및 습기에 의한 것으로 절연물의 부식이나 용해 또는 팽창에 의한 박리현상으로 나타난다. 절연물 표면에 기름이나 먼지 등이 존재할 경우 연면 절연저항의 저하를 발생시켜 2차적인 열화로 진전되는 경우가 많다. 먼지에

의한 오손은 탄소분, 철분 등의 도전성 물질의 부착으로 인해 연면 절연 저항을 저하시키고, 흡습에 의하여 절연저항은 더욱 저하된다. 결로는 절연파괴의 직접적인 원인이 되기도 하며, 흡습상태에서 운전하게 되면 열에 의한 가수분해가 촉진된다. 또한 연면저항이 저하된 상태에서 고전압이 인가되면 누설전류와 미소방전에 의하여 트래킹 열화가 발생한다. 트래킹 열화는 탄화도전로를 형성하기 때문에 연면 절연파괴를 동반하기도 한다. 그러나 환경적 열화는 일반적인 경우 절연층 표면에서 발생하므로 절연재료의 직접적인 수명에는 큰 영향을 미치지 않고, 대부분 세정에 의하여 절연성능을 회복하는 것이 가능하며 육안으로도 열화정도를 추정할 수 있는 경우가 많다<sup>[24]~[26]</sup>.

전력설비에서 발생하는 부분방전은 절연물 내부에 부분적인 전계의 집중에서 기인한다. 일반적으로 동일한 정전용량을 가지는 자유공간 또는 매질에 균일하게 전계가 분포하는 경우 공간이나 매질이 가지는 절연내력 이상의 전압이 유기되면 모든 영역의 절연이 파괴되고 방전이 일어나게 된다. 하지만 공간적으로 불균일한 전계를 형성시키는 전극이나 불순물이 존재할 경우 정전용량의 차이로 인해 불균일한 전계의 집중을 초래하여 다른 부분과 비교해 볼 때 국부적으로 강한 집중이 발생하게 되고 부분적인 절연 파괴로 인하여 PD가 발생하게 된다. 초기단계에서의 PD는 그 에너지량이 매우 미소하다. 하지만 PD가 장기간 지속될 경우 방전 전하량이 지속적으로 증가하여 마침내는 전기 트리를 생성하게 된다. 절연물에 트리가 생성되면 방전전하량은 단기간에 급속도로 증가하여 트리를 성장시키고 결국 전체 절연이 파괴되어 단락 등의 사고로 이어지게 된다. 실제 절연체에서 발생하는 방전은 전력설비의 금구류 및 연결부위에서의 코로나 방전, 절연체 표면을 통해 방전이 발생하는 연면 방전, 절연체 내부의 내부방전으로 구분된다<sup>[27],[28]</sup>.

코로나 방전은 그림 2.1과 같으며 전력기기 외부의 충전부나 측정금구류 등에서 발생하는 것으로 PD펄스와는 구분되어야 하는데 대부분의 경우 구분이 쉽지 않기 때문에 PD로 오인하는 경우가 있다.

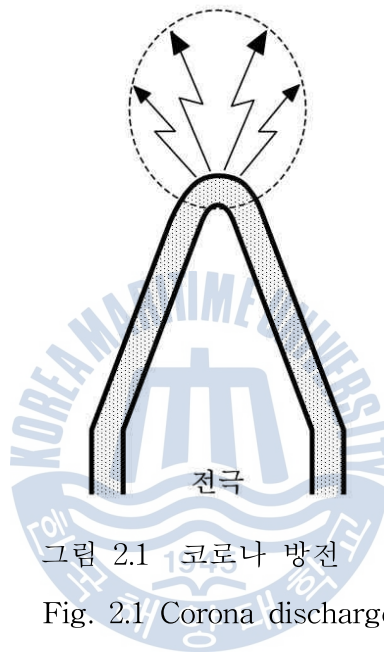


그림 2.1 코로나 방전

Fig. 2.1 Corona discharge

연면 방전이란 그림 2.2와 같이 부적절한 절연설계에 의한 누설거리의 부족이나 절연체 표면의 오손에 기인한 유효 누설거리 감소로 인하여 발생하는 방전형상을 말한다. 연면 방전은 절연체 표면에 열화를 발생 및 촉진하기 때문에 초기에는 절연체 자체에 많은 영향을 미치지 않는다. 그러나 연면 방전에 의한 고주파 진동전압이 교류전압에 중첩되면 설비의 절연물에 과도한 전기적 스트레스를 가하게 되므로 고체절연체에 손상을 준다. 또한 장기간 지속될 경우 열화과정을 거쳐 절연체 표면의 결함부위에 열화가 집중되고 침식이나 부식이 발생되어 절연체의 전기적·기계적



성능을 저하시킨다. 더욱 열화가 진행되면 연면 방전으로 인한 발열과 오손이 촉진되고 탄화도전료가 형성되어 절연이 파괴되는 경우도 있다. 연면 방전의 장기적인 열화에 의한 절연파괴는 전원용량의 차이에 따라 다르지만, 일반적으로 글로우 방전(Glow Discharge)의 형식으로 이루어지며 아크방전(Arc Discharge)으로 진전되기도 한다. 아크방전은 강한 빛과 열, 자외선 등을 동반하기 때문에 절연재료가 심각하게 손상될 수 있다<sup>[29],[30]</sup>.

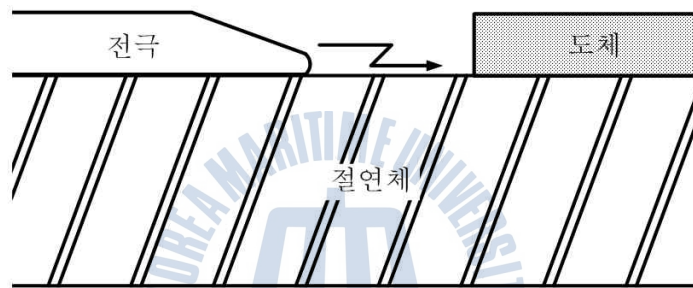


그림 2.2 연면 방전

Fig. 2.2 Surface discharge

측정된 PD를 분석한 결과가 잡음이나 코로나 방전, 연면 방전이 아니라면 절연체 내부에서 발생한 내부 방전일 가능성이 높다. 고분자 절연 케이블의 절연층이나 몰드변압기의 절연층과 같이 사출 과정에서 발생하는 절연체는 그림 2.3에 나타낸 것과 같이 공극(Void)이 내부에 생성될 수 있는데, 이 공극은 주로 공기와 같은 가스로 채워져 있다. 공극을 가지는 절연물에 전계가 인가되면 전체 절연물에 비해 유전율이 낮은 공극에 전계가 집중된다. 가해지는 전기적인 스트레스의 세기가 공극을 채우고 있는 물질의 절연내력보다 크게 되면 기체 방전이 일어나는데 이를 내부 방전이라고 한다. 기체방전에 의하여 공극의 외벽은 열적, 화학적 열화가

축진되어 공극의 크기는 점차 증가되며 이로 인해 전체 고체 절연체의 유효 절연성능 또한 점차 감소하게 된다.

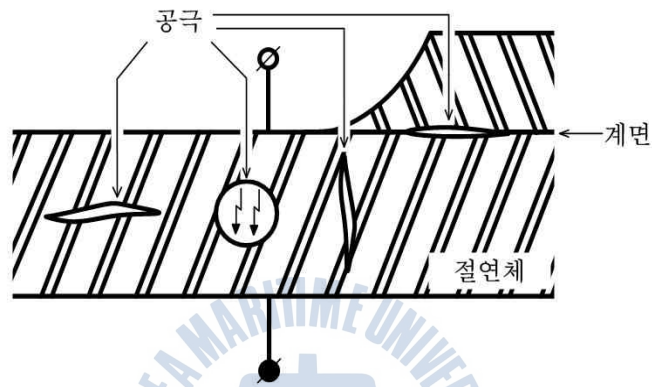
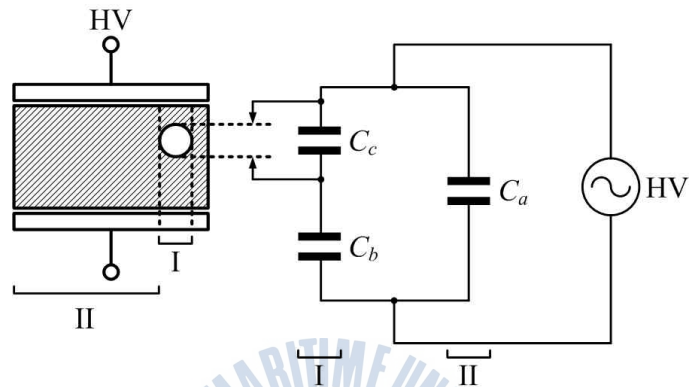


그림 2.3 내부 방전

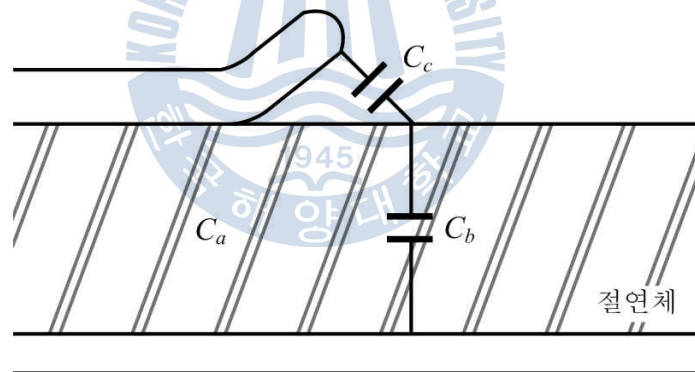
Fig. 2.3 Internal discharge

PD의 발생 메커니즘은 그림 2.4의 등가회로를 통해 설명할 수 있다. 그림 2.4(a)에서 I은 공극이 존재하는 절연체 부분을 나타내며, II는 결함이 없는 나머지 전체 절연체의 부분을 나타낸다. 결함부분에서 공극의 정전용량은  $C_c$ 로 PD발생시 방전의 통로로써 작용하게 되며,  $C_b$ 는 공극과 직렬로 접속되는 나머지 부분의 정전용량을 나타내고,  $C_a$ 는 결함이 없는 나머지 전체 절연체 부분의 정전용량을 나타낸다. 그림 2.4(b)는 연면 방전의 등가회로를 나타낸 것으로 그림 2.4(a)와 동일하게 표현된다. 표면에서 발생하는 방전은 전극의 정전용량  $C_c$ 와 절연체를 통한 정전용량  $C_b$ , 그리고 나머지 절연체 부분은 정전용량  $C_a$ 로 표현된다. 절연체에 공극과 같은 결함이 존재하는 경우 교류 운전전압이 인가되면 결함내의 정전용량

$C_c$ 에 전계가 집중되고 공극이 가지는 절연내력 이상의 전계가 유기되면 강한 빛과 열을 동반하며 PD현상이 발생한다<sup>[15],[31]</sup>.



(a) 공극 방전



(b) 연면 방전

그림 2.4 결함의 등가회로

Fig. 2.4 Equivalent circuit of defects

그림 2.5는 대칭형 공극이 존재하는 절연물에서 교류전압을 인가 후, 한 주기 동안의 PD발생 패턴을 나타낸 것이다.

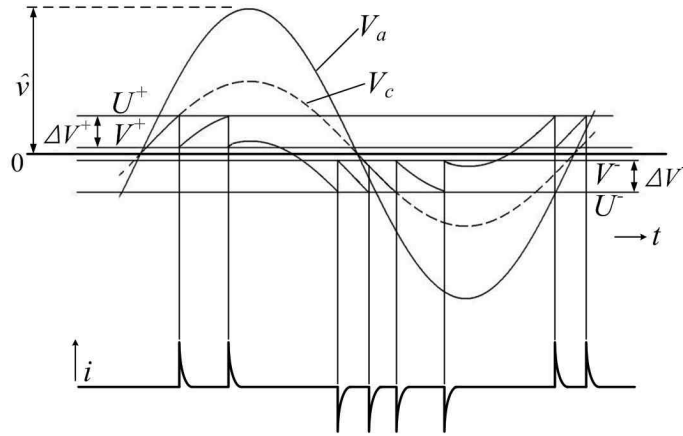


그림 2.5 교류전압에서 PD 발생

Fig. 2.5 PD occurrence in AC voltage

일반적인 PD펄스의 형태는 인가전압이 상승하는 부분에서 일정 시점에 도달할 때 방전펄스가 발생되며 전압이 감소하면 사라지는 형태를 가지게 된다. 운전전압이 서서히 증가하면 전압  $U$ 의 범위에서 공극 내에 방전이 발생하고, 다시 감소하는 시점에서 인가전압이  $V$ 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 2.5와 같은 방전 과정에서 공극 내에 발생하는 방전전하량  $q_l$ 은 식 (2.1)과 같이 표현된다.

$$q_l \simeq (b+c)\Delta V \quad (2.1)$$

여기서,  $\Delta V = U - V$ 로 공극 내의 전압강하 성분이다. 그러나  $q_l$ 은 직

접점출이 불가능한 값이므로 PD 발생시 리드선을 통해 흐르는 걸보기 전 하  $q$ 는

$$q = b\Delta V \quad (2.2)$$

와 같이 표현할 수 있다. 실제 시료에서의 전압강하는  $\frac{b\Delta V}{a+b}$ 이고, 방전 검출기에서는  $q$ 의 값이 측정된다. 방전전하량  $q$ 가 존재할 때, 이때의 방전 에너지는

$$P = \frac{1}{2}c(U^2 - V^2) = \frac{1}{2}c \times \Delta V \times (U + V) \quad (2.3)$$

가 되는데, 여기서  $V$ 가  $U$ 에 비해 매우 작다면 식 (2.3)은 다음과 같이 표현된다.

$$P = \frac{1}{2}c \times \Delta V \times U \quad (2.4)$$

그리고 방전개시전압은  $U = \frac{b}{(b+c)} V_i$ 와 같이 표현되며, 이때  $V_i$ 는 시료에서 방전이 발생하는 외부방전의 개시전압이다. 따라서 식 (2.4)는 다음과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$P = \frac{1}{2}c \times \Delta V \times \frac{b}{(b+c)} V_i \quad (2.5)$$

식 (2.5)에서  $b$ 는  $c$ 에 비해 무시될 수 있을 만큼 작으므로

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

과 같다<sup>[15]</sup>.

## 2.2 절연결합과 검출방법

가스절연개폐장치(GIS)는 높은 절연내력으로 소형화의 장점이 있지만 절연열화 등의 고장 발생 시 광범위한 피해를 발생시키며, 사고 복구에 많은 시간이 소요되는 문제가 있다. 가스절연개폐장치 사고는 접촉 불량, 고체 절연물 결함 및 조립설치 과정중의 불충분한 품질관리에 기인한다. 대부분은 제작, 조립, 설치 및 운전과정에서 도전성 이물질의 혼입을 완전히 피할 수 없으며, 현장시험과정에서 측정되는 것이 일반적이지만 발견하지 못할 경우, 절연파괴사고의 주된 원인이 되고 있다<sup>[32]~[34]</sup>.

가. 주요 결함의 종류

### ① 도전성 파티클

가스절연개폐장치의 결함 중 가장 주된 원인이 되는 결함으로써 도전성 파티클은 장치의 제작시 또는 현장조립시 만들어지거나 혼입되며, 혹은 운전과정에서 만들어지는 것이 일반적이다. 가스절연개폐장치는 절연거리의 축소로 고전계 상태를 유지하므로 파티클이 절연물 표면에 부착되면 절연성능을 현저히 저하시켜 위험도가 더욱 커진다. 파티클은 재질, 형상, 위치 등의 영향을 받아 활동하게 되며, 이것이 사고발생 위험도를 결정하게 된다.

## ② 돌출부

제작과정이나 조립과정 또는 운송 중 충돌 등으로 기계적 손상이나 파손 등으로 인하여 도체표면 또는 외함표면에 부분적으로 돌기 등이 형성된다. 가스절연개폐장치의 전극현상은 통상의 운전 상태에서 부분방전이 발생하지 않는 충분한 전계강도를 갖도록 설계되어 정상 운전 상태에서는 사고로 이어지는 경우는 드물지만, 뇌 충격전압이나 과도전압과 같은 급준파 전압이 발생할 경우 전계가 크게 집중되어 사고로 이어진다.

## ③ 플로팅 및 접촉불량

운전 중 진동이나 설치작업 중의 잘못으로 개폐기의 접촉부 및 모선의 접속부분에서 불완전한 접촉이 발생할 경우 접촉부에서 아크가 발생함에 따라 온도 상승을 초래한다. 이 경우 산화작용을 일으켜 전기적 결함이 점점 심하게 진행되며 시간이 경과하면서 전극과 분리되어 부유전극으로 작용하게 된다. 방전과정에서 도전성 입자를 생산하기도 하고 인접하고 있는 절연물 표면에 손상을 가하여 사고를 유발한다.

## ④ 고체 절연물

고체 절연물의 결함으로는 절연물 표면에 존재하는 것과 절연물 내부에 존재하는 결함으로 나뉜다. 표면결함은 가스 분해물질이나 도전성 파티클 등에 의한 부분방전으로 인해 절연물 표면이 고유성능을 잃게 되는 경우이며, 섬락에 의한 트래킹 결함이 대표적인 사례이다. 내부결함으로는 전극표면이 거칠거나 금속입자가 혼입될 경우, 또는 전극과 에폭시 열팽창 성질이 달라서 생기는 내부결함 등이 대표적인 예이다.

## ⑤ 수분

과도한 수분이 존재할 경우 갑작스런 온도변화에 의해 주변 불순물과 결합한 응축된 수분이 절연물 표면에 도전성을 증가시켜 직접적인 절연사고를 일으키며, 에폭시에 흡수되어 절연성능을 크게 저하시킨다. 따라서 SF<sub>6</sub> 가스에 수분이 침투한 경우 수분함량 허용기준을 근거로 사고유발 위험도를 결정한다.

### 나. 검출방법

가스절연개폐장치의 각종 이상상태를 감지하는 진단기술이 여러 방면에서 연구되고 있다. 가스절연개폐장치의 절연파괴를 야기하는 각종 이상은 부분방전을 측정함으로써 사고를 미연에 방지 할 수 있으며, 여기에는 전기적 및 기계적 직접 측정법이 있으며, 부분방전에 의해 발생하는 SF<sub>6</sub> 가스의 분해생성물을 측정하거나 방전시 발생하는 전자파를 측정하는 간접측정법이 있다<sup>[4],[5],[35]~[38]</sup>,

#### ① 전자파 측정

가스절연개폐장치의 내부결함에 의한 부분방전 발생 시 고주파 전압과 전류, 음향신호, 빛, 분해가스, 전자파 등이 발생하게 된다. 부분방전에 의해 발생하는 전자파는 저주파에서 GHz 대역의 고주파에 이르기까지 주파수 대역이 광범위하게 분포되어 있다. 전자파 측정법은 그림 2.6과 같이 외부의 센서를 이용하여 전자파를 측정함으로써 가스절연개폐장치 내부에서 발생하는 부분방전을 측정하는 방법이다. 이러한 측정법은 신뢰도가 확보된 수준까지 기술개발이 되어 있어 많은 현장에서 적용 중에 있다. 또한, 센서를 다수 설치하여 부분방전의 발생위치를 추정하는 연구가 활발히 진행되고 있다.



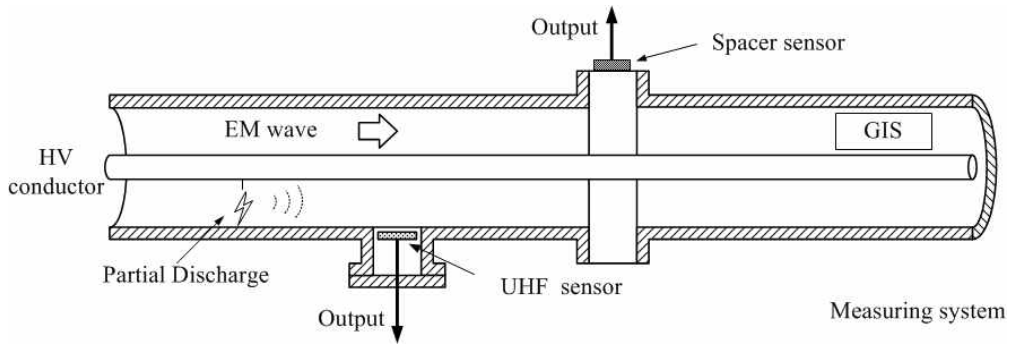


그림 2.6 UHF 센서에 의한 PD 측정

Fig. 2.6 PD measurement by a UHF sensor

### ② Coupling 법

고주파 펄스가 접지선에 흐르는 상용주파 전류에 중첩되어 나타나며, 접지선이 관통하도록 설치된 페라이트 코어(Ferrite core)에 코일을 감고, 이것에 의해 부분방전 신호를 측정한다. 부분방전 주파수 대역만을 선택적으로 증폭하는 방식이다.

### ③ 진동·음향 측정

기계적 측정법으로 가스절연개폐장치 내부에서 발생한 부분방전에 의해 기계적인 미소진동을 탱크외벽에 부착한 고감도의 초음파센서를 이용하여 측정하는 방법이다. 초음파센서로 측정한 신호는 평균화 처리 등에 의해서 노이즈를 제거하고 부분방전에 의한 진동가속도가 식별된다. 또한 탱크 내에 미소금속 이물질이 있을 경우 이물질은 탱크 내 표면의 전계에 대응한 정전력을 받아 이동하고 탱크 내 표면과 충돌하며 이때, 탱크 벽

에 발생하는 미약한 초음파를 측정하는 방법이 개발되어 있고, 원리도는 그림 2.7과 같다.

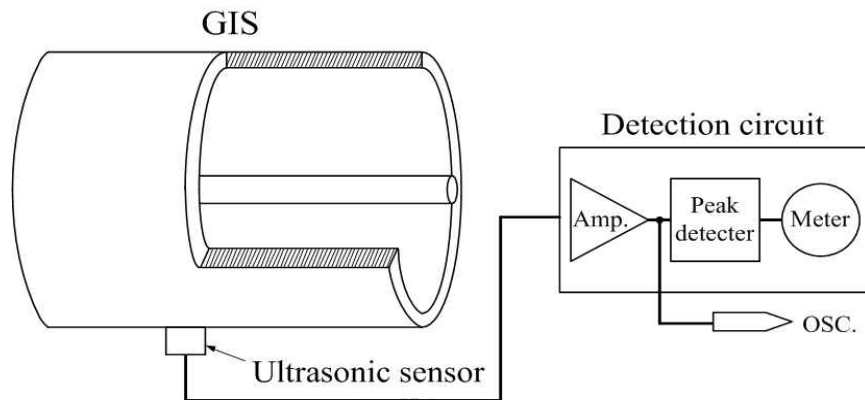


그림 2.7 음향 센서에 의한 PD 측정

Fig. 2.7 PD measurement by an acoustic emission sensor

다. 국내·외 기술현황

부분방전 검출 및 진단 기술은 60여년간 지속되어 오면서 국내외 기술 수준은 크게 다르지 않다고 볼 수 있으며, 특히 우리나라의 중전기 산업이 세계적 수준으로 이와 병행하여 진단기술도 빠르게 발전하고 있다.

- TOM-E(폐쇄배전반 온라인 진단 시스템)

전력설비 열화 및 접촉 불량 시 방사되는 UHF 전자파를 검출하고, 크기, 검출량, 펄스간격 등을 측정하여 전력설비의 열화정도 및 상태를 활성 상태에서 온라인으로 감시 진단하여 사고를 미연에 방지하는 시스템.(On-Line 상시 감시, 사고예측 및 예방 보전, 이상 시 경보 표시)

- AMoS(GIS On-Line 진단시스템)

가스절연개폐장치(GIS) 절연 이상시 발생하는 부분방전 신호를 초고주파(UHF) 센서로 검출하여 GIS 이상 여부를 On-Line으로 감시, 진단하는 시스템.(On Line 상시 감시, 사고예측 및 예방 보전, 이상시 경보 표시, GIS열화 Trend 관리)

- TOID(절연유 열화 온라인 진단시스템)

변압기의 절연유 내 도전성 입자에 의한 미세전류 변화를 PCS센서로 측정, 절연유 열화상태를 온라인 진단 감시하여 사고를 미연에 방지할 수 있는 예방보전 시스템.(활선상태에서 점검, On Line 상시감시, Real Time 측정, 사고예측 및 예방보전, 이상시 경보 표시)

- AMID(AE 측정, 변압기 예방진단시스템)

AE(Acoustic Emission)검출 기법을 적용하여 변압기 내부 결함을 실시간 감시함으로써, 부분방전 및 아크에 의한 변압기 절연파괴 사고를 예방진단.

- CMID(몰드변압기 부분방전 시스템)

국제 부분방전 측정 규격인 IEC 60270을 적용한 몰드변압기 부분방전 진단방법으로 세라믹 커플링 센서를 적용한 부분방전 진단 시스템.

- DDX-7000/8003(변압기 및 고압케이블 부분방전 진단장치)

기존의 아날로그 방식의 부분방전시험기를 디지털화한 시험기로써 아날로그의 측정기술과 디지털의 분석 및 저장기능을 복합한 최첨단의 부분방전시험기이다. PC를 탑재하고 있어 빠르고 쉽게 시험 및 분석을 진행

할 수 있다. 시험기 종류로는 유차폐방식의 7000타입과 무차폐방식의 8003타입이 있어 시료의 종류 및 시험 환경에 따라 선택할 수 있다.

- ICM System(부분방전 진단 및 위치 표정)

디지털 전력설비 진단 장비 업체인 Power Diagnostix ICM series의 일부분으로써 ICM system은 중간과 고전압 절연체의 상태 평가를 위한 계측장치이다. ICM system은 전원 시스템 주파수 (50/60 Hz)와 VLF(0.1 Hz)를 포함하여 적용되는 전압의 주파수의 범위에 유용하다. PRPDA 알고리즘이 탑재되어 있다.

- MPD 600(커플링 캐패시터, 방전 분석장치)

MPD 600은 전력설비 진단업체인 OMICRON의 부분방전 측정을 위한 장치로써 매우 작은 PD 펄스와 노이즈의 분리가 가능하며, PRPDA, 3PARD 등 부분방전 분석 어플리케이션으로 전력설비에서 발생하는 부분방전을 분석할 수 있다.

- PD Check mk III(변압기 및 케이블 부분방전 분석)

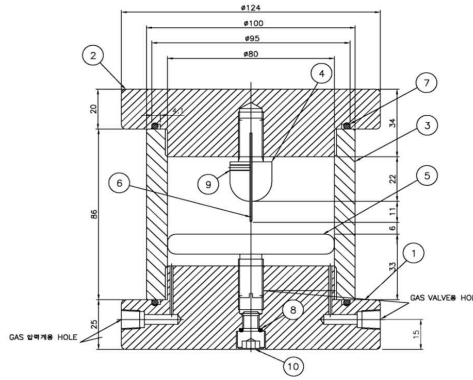
PD(부분방전), DGA(유중가스 분석),  $\tan\delta$ (유전정접), Vib.(진동감시), DTS(온도분포감시)를 측정할 수 있으며, 서로 다른 진단 기술들에 의해 확장된 진단 범위를 제공한다. 부분방전 측정, 저장 및 분석을 위한 장비이며 빠른 데이터 처리가 가능하고 저장이 가능한 데이터 취득을 할 수 있다. 3상 전력설비의 주기 점검 및 상시 감시에 적합하고 부분 방전 펄스 감지기와 파형 분석이 가능하다. 동시에 3채널 디지털 데이터를 취득할 수 있다.

## 제 3 장 설계 및 제작

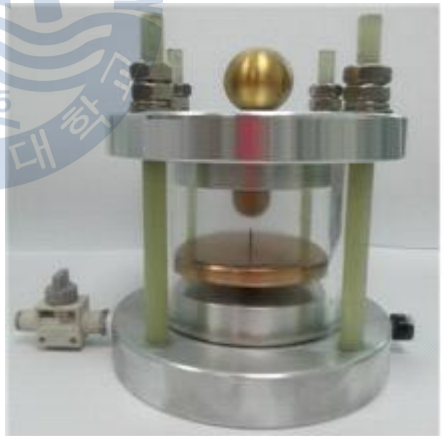
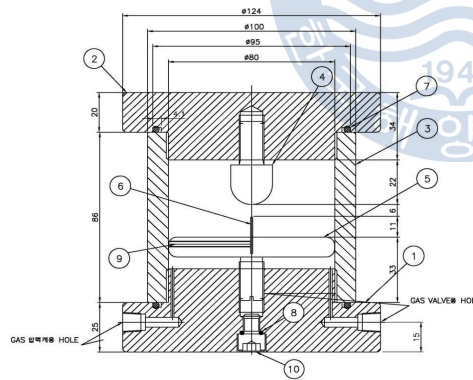
GIS에서 발생 가능한 결함을 모의하기 위하여 7개의 절연결함계(PD cell)를 제작하였으며, LabVIEW기반 PRPD 분석프로그램을 설계하였다.

### 3.1 절연결함계

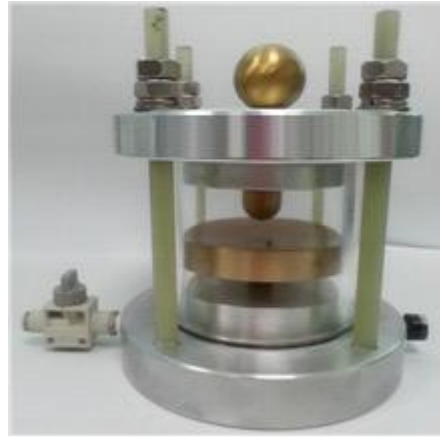
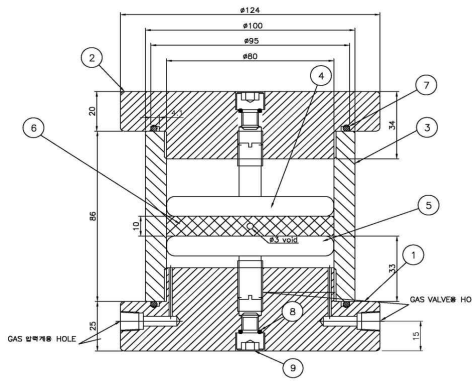
가스절연개폐장치의 사고는 접촉 불량, 고체 절연물의 결함 및 조립설치 과정중의 불충분한 품질관리에 의해 발생하며, 운전과정이나 제작시 도전성 이물질의 혼입에 의해 절연파괴 사고를 일으키는 경우가 많다. 사고의 주요원인이 되는 부분방전은 절연물 및 결함의 종류에 따라 고유의 방전특성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 가스절연개폐장치 내부에서 발생 가능한 결함을 모의하기 위하여 그림 3.1과 같이 도체 돌출(Protrusion on conductor, POC), 외함 돌출(Protrusion on enclosure, POE), 자유 입자(Free particle, FP), 에폭시 표면 돌출(Particle on epoxy surface, PES), 에폭시 내부 보이드(Void inside epoxy, VE), 스페이서 크랙(Spacer crack, SC) 및 부유 금속(Floating metal, FM)으로 구성된 7종의 PD cell을 설계하였다. 평판전극은 지름 80 mm, 두께 10 mm로 가장자리를 둥글게 처리하여 전계의 집중이 발생하지 않도록 하였으며, 돌출부에는 곡률반경이 10  $\mu\text{m}$ 인 침전극을 사용하여 돌출부에서만 방전이 발생하도록 구성하였다. POC와 POE는 전극간격을 3 mm로 하였다.



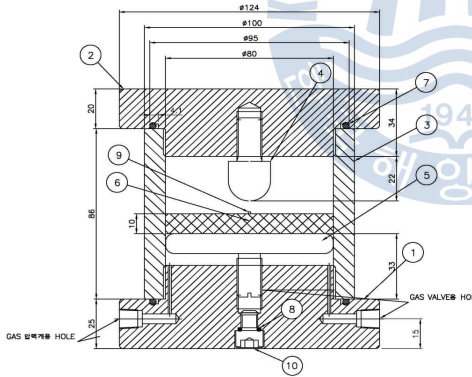
(a) POC



(b) POE



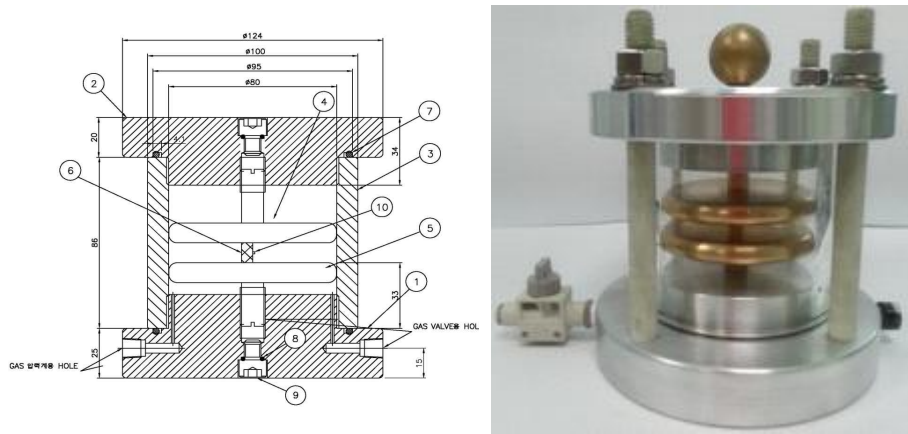
(c) FP



(d) PES







(g) FM

그림 3.1 결합계의 구조

Fig. 3.1 Structure of PD cells

POE는 지름 80 mm, 두께 10 mm의 표면에 금속 이물질을 부착시켰으며, FP는 직경 1 mm인 알루미늄 볼을 사용하고, 전극간의 간격은 5 mm로 설정하였다. VE는 지름 80 mm, 두께 10 mm의 에폭시 절연물에 직경 1 mm, 높이 5 mm의 원기둥 형태의 보이드가 형성되도록 하였으며, SC는 지름 80 mm, 두께 5 mm의 에폭시 절연물을 임의의 형태로 절단하여 접착시킨 구조이다.

### 3.2 PRPD 측정 프로그램

부분방전 신호를 측정하고 위상에 따른 PRPD 분석 알고리즘 VI(Virtual instrument)를 설계하였다. VI는 부분방전 신호의 측정과 실시

간  $\phi$ - $q$  분석을 위하여 RTOS(Real-time operating system) 기반으로 작성하였다.

측정 오차를 최소화하기 위하여 Fetch Record 기능을 사용하여, On-board 메모리에 일시적으로 데이터를 저장한 후 호출하는 형태로 설계하였다. 검출된 신호는 Peak hold 기능을 이용하여, 방전 펄스를 추출하였으며, PRPD 분석을 위해 인가전압의 위상( $\phi$ ), 부분방전 펄스의 크기( $q$ ) 그리고 발생 횟수( $n$ )를 일률적으로 처리하기 위하여 Dynamic-sequence 기능을 가지는 'Standard state machine' 구조를 사용하였다. PD 측정 순서는 그림 3.2와 같은 순서로 진행된다<sup>[38]~[40]</sup>.

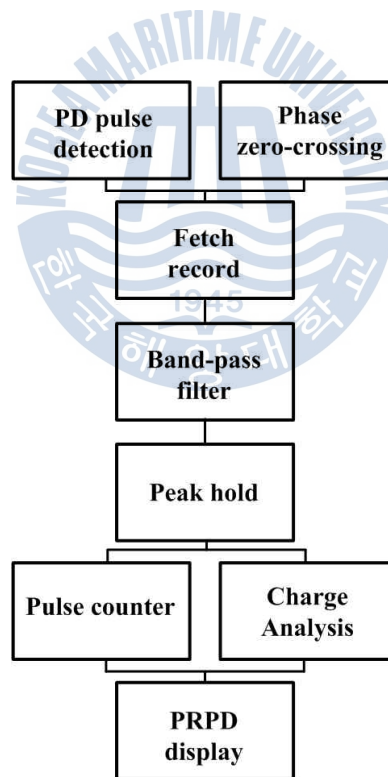


그림 3.2 측정 프로그램의 순서도

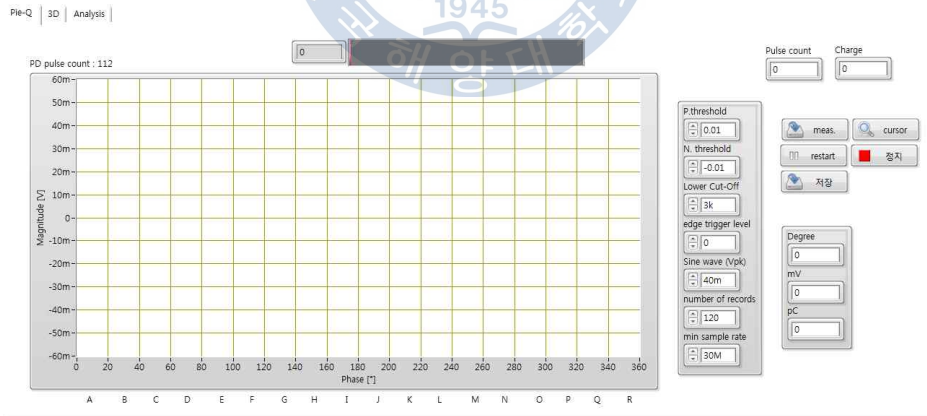
Fig. 3.2 Flow chart of the measurement program

PRPD 측정 프로그램은 그림 3.3(a)와 같이 클라이언트의 측정부에 의해  $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$  위상의 한 주기 동안 발생한 부분방전 신호를 30 MS/s의 Sampling rate로 수집하고, 500,000의 크기를 갖는 Record length로 각 주기단위의 신호를 표현하여 펄스간 간격은  $0.00072^{\circ}$  로 측정할 수 있다.

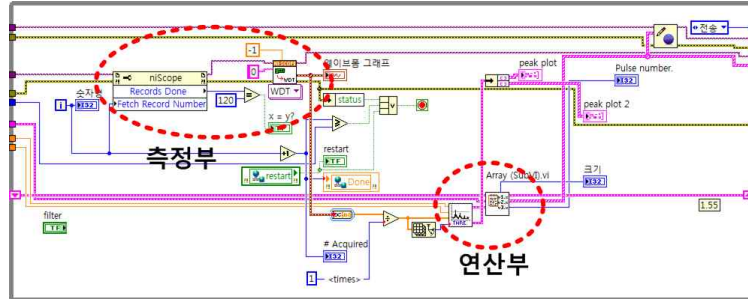
수집된 신호는 그림 3.3(b)에 나타낸 피크 홀드(Peak hold)기법을 이용하여 설계한 Sub VI의 PD 측정부를 통해 연산되고 서버로 전송된다.

서버에서는 클라이언트로부터 수집된 데이터를 누적하여 그림 3.5(c)의 배열화 과정을 거친후 그래프로 표시되고, 방전과형 분석 및 확인을 위해 그림 3.5(d)의 알고리즘에 따라 측정 결과를 각각의 그래프와 데이터를 .csv 및 그래픽 파일로 저장하게 된다.

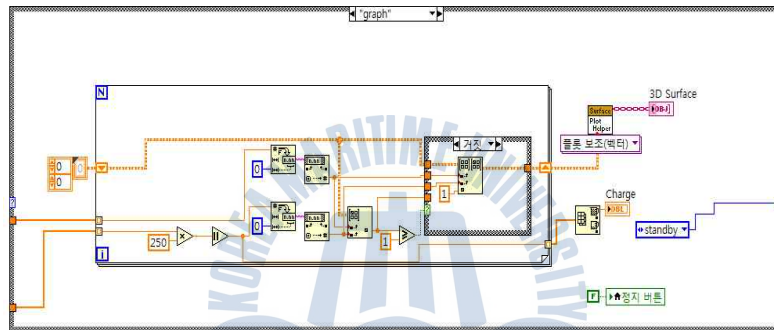
각각의 알고리즘은 연산 수행의 효율성을 높이고자 각각의 Sub VI를 적용하여 부분방전 신호의 측정과 분석이 최적화되도록 하였다.



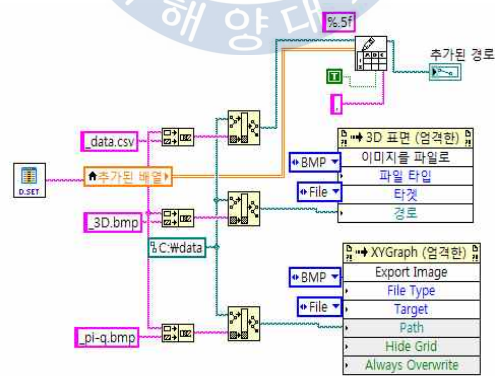
(a) 프런트 패널



(b) 측정부 및 연산부



(c) 표시부



(d) 데이터 저장부

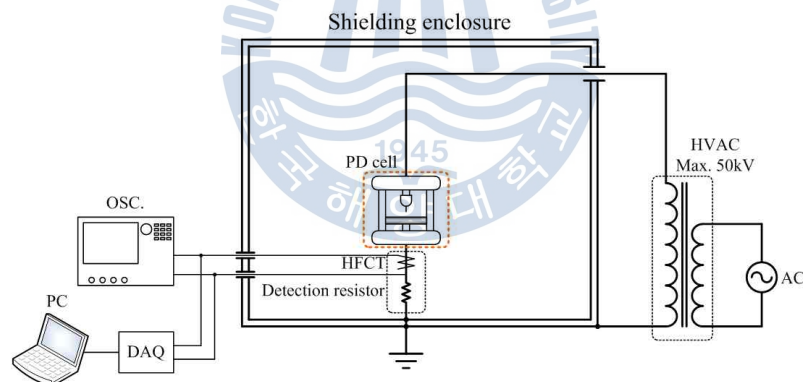
그림 3.3 PRPD 측정 프로그램

Fig. 3.3 PRPD measurement program

## 제 4 장 실험 및 방법

### 4.1 실험계의 구성

결함에 따른 부분방전 펄스를 검출하고 패턴을 분석하기 위하여 차폐함(Shielding enclosure)을 이용하여 실험계를 구성하였다. 차폐함을 이용한 실험계는 그림 4.1과 같은 구성으로, 크기는 1,020 mm(L)×720 mm(W)×760 mm(H)이며, 내부에 PD cell을 설치하고 고전압을 인가할 수 있는 구조이다. 최대 출력전압 50 kV, 출력전류가 5 mA인 몰드형 고압 변압기를 사용하여 PD cell에 전압을 인가하였으며, 변압기는 절연유 내부에 함침(含浸)시켜 접속부에서의 코로나 발생을 방지하였다.



(a) 구성도



(b) 사진

그림 4.1 실험계

Fig. 4.1 Experiment system

고압 변압기의 측정단자에서 인가전압의 위상을 측정하였으며, 그림 4.2에 나타낸 것과 같이 오차율 1%의 50Ω 정밀저항 및 주파수 대역이 1.2 kHz ~ 200 MHz, 1 mV/mA의 출력특성을 갖는 고주파 변류기(High Frequency Current Transformer, HFCT)를 PD cell과 접지선 사이에 설치하여 부분방전 펄스를 검출하였다.



그림 4.2 검출저항과 HFCT의 설치

Fig. 4.2 Installation of a detection resistor and a HFCT

## 4.2 교정 실험

PD 검출에 사용한 검출저항과 HFCT의 감도를 비교하기 위하여 차폐함 내부에 PD cell을 위치시키고 전압을 인가하여 부분방전을 모의하였으며, 동시에 부분방전 펄스를 측정하였다. PD cell은 POC를 사용하였으며, SF<sub>6</sub> 가스를 3 bar로 봉입하였다. 교류 10 kV를 인가하였을 때 측정된 부분방전 펄스파형의 예를 그림 4.3에 나타내었다.

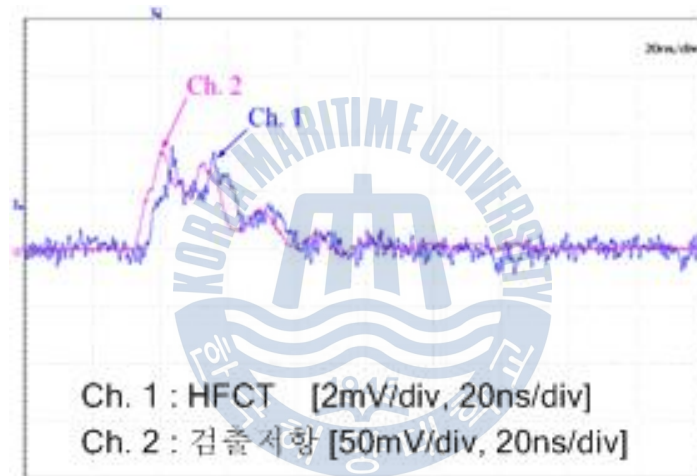


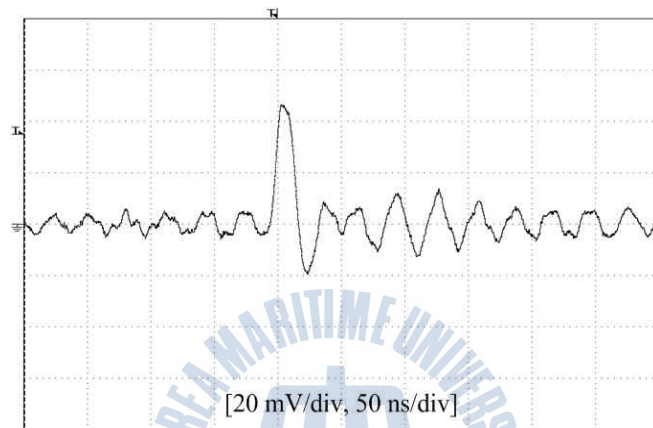
그림 4.3 PD 파형의 예(10 kV)

Fig. 4.3 Typical PD waveform(10 kV)

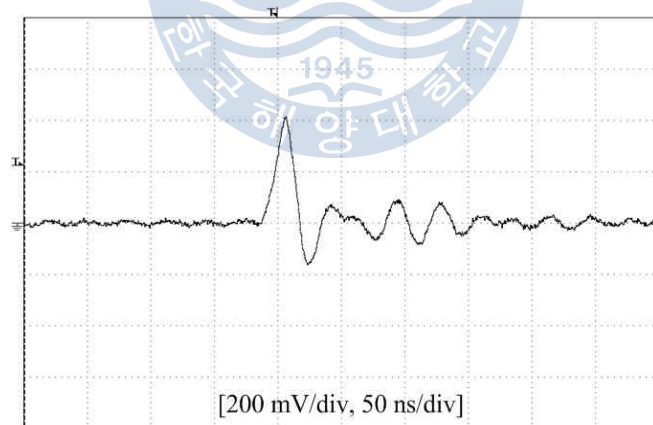
HFCT에서는 3.57 mV<sub>p</sub>이고 검출저항에서는 85 mV<sub>p</sub>가 측정되었다. 또한 HFCT 출력파형이 검출저항의 파형과 비교하여 약 4 ns 정도 위상 지연이 발생하였다. HFCT보다 검출저항의 감도가 약 20배 정도 높게 나타나므로 부분방전 펄스의 측정에는 검출저항을 사용하였다.

검출저항에 의한 감도를 평가하기 위하여 표준펄스 발생장치(CAL 1A,

Power Diagnostix)를 이용하여 교정실험을 수행하였다. 10 pC~100 pC까지의 입력펄스에 대한 시스템의 응답전압을 측정하였으며, 그림 4.4에 파형의 예를 나타내었다.



(a) 10 pC



(b) 100 pC

그림 4.4 교정펄스에 대한 출력전압

Fig. 4.4 Output voltage as a function of calibration pulse



입력펄스에 대한 측정 시스템의 출력전압은 그림 4.5와 같이 10 pC에서 100 pC까지 선형적인 출력특성을 나타내었으며, 환산 감도는 4 mV/pC이다.

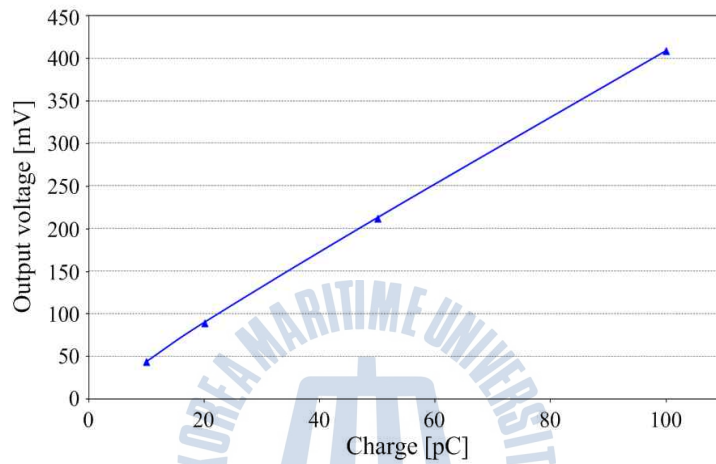


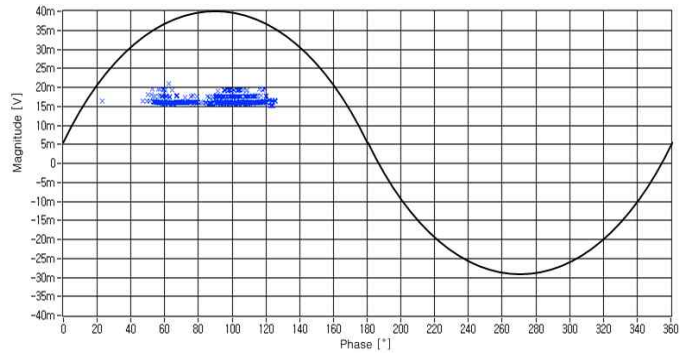
그림 4.5 전하량에 따른 출력전압

Fig. 4.5 Output voltage as a function of charge

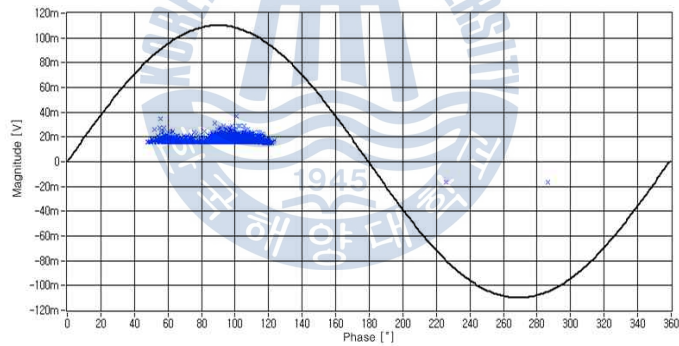
#### 4.3 결함별 PD 패턴

결함에 따른 PD 패턴을 분석하기 위하여 제작된 PD cell에서 PD 펄스의 위상분포를 측정하였다. 2 초(120 cycle) 동안 부분방전 펄스의 위상분포를 누적하여 패턴을 분석하였다.

SF<sub>6</sub> 가스의 압력에 따른 PD 패턴은 현재 운용하는 가스절연개폐장치(SGIS)의 SF<sub>6</sub> 압력이 전압등급과 3상 일괄 또는 단상용에 따라 3 bar 또는 5 bar에서 운용되기 때문에 이들 압력에서 측정하였으며, 각각의 PD cell에 대한 PRPD의 예를 그림 4.6 ~ 그림 4.12에 나타내었다.



(a) 3 bar, 9 kV



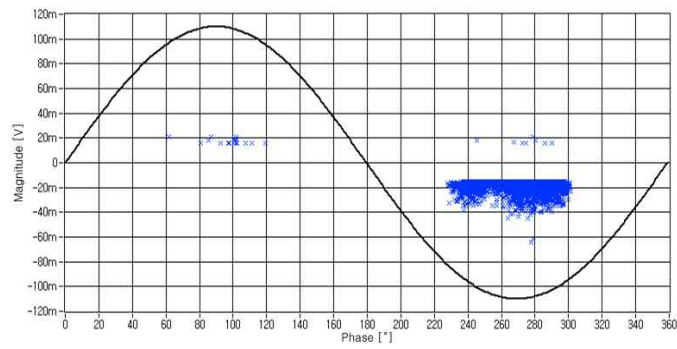
(b) 5 bar, 14 kV

그림 4.6 도체 들출

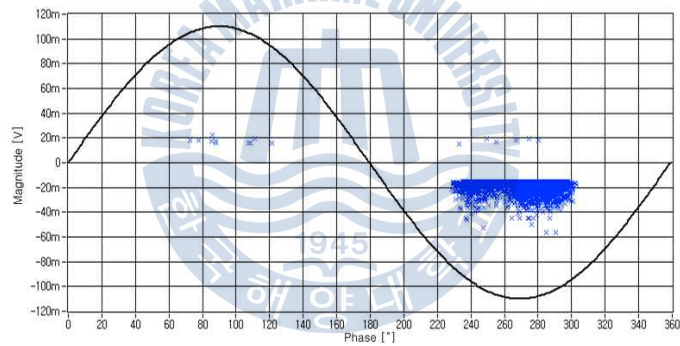
Fig. 4.6 POC

POC 결함은 3 bar 및 5 bar 에서  $50^{\circ} \sim 135^{\circ}$  에 동일하게 분포하였으며, 부극성 위상에서는 소수의 펄스만 측정되었다. 부분방전 펄스는 3 bar에서 최대 23 mV(전하량 5.75 pC) 및 5 bar에서 최대 40 mV(전하량 10 pC)로

나타났다.



(a) 3 bar, 9 kV

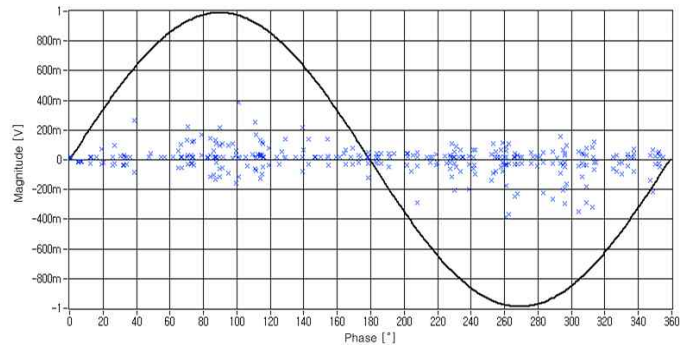


(b) 5 bar, 17 kV

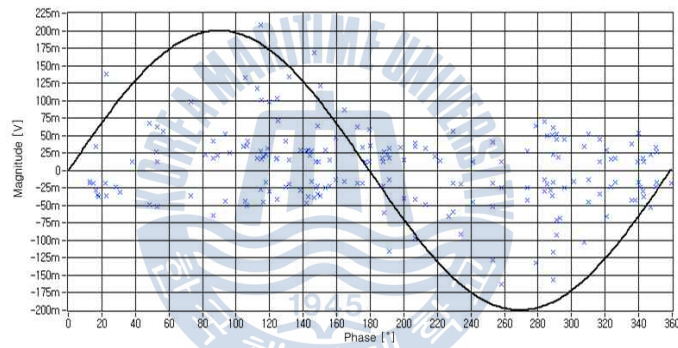
그림 4.7 외함 돌출

Fig. 4.7 POE

POE에서는 3 bar 및 5 bar에서  $220^{\circ} \sim 310^{\circ}$  위상에서 동일하게 부분방전 펄스가 분포하였으며, POC와는 반대로 정극성 위상에서는  $60^{\circ} \sim 120^{\circ}$  구간에서 소수의 펄스만 측정되었다. 부분방전 펄스는 3 bar에서는 65 mV(전하량 16.25 pC) 및 5 bar에서는 56 mV(전하량 14 pC)로 나타났다.



(a) 3 bar, 11 kV

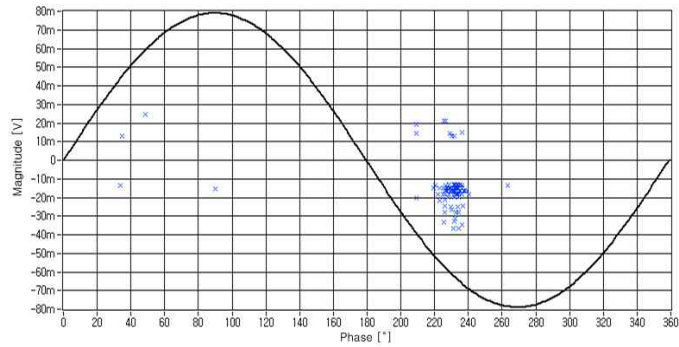


(b) 5 bar, 18 kV

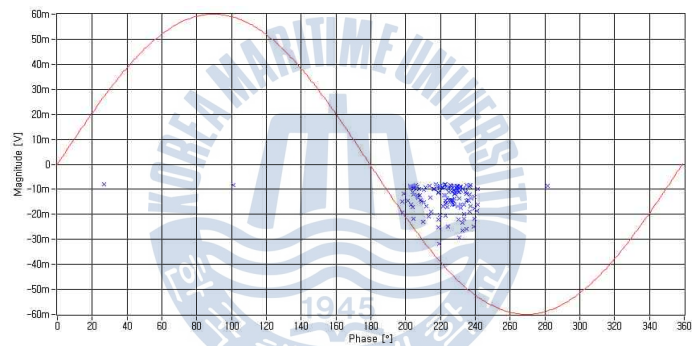
그림 4.8 자유 입자

Fig. 4.8 FP

FP에서는 다른 결함과는 달리 측정시마다 발생빈도는 수 십~수 천 회로 편차가 컸으나 발생 분포는 전 위상에 걸쳐 나타났으며, 인가전압의 최댓값인  $180^\circ$ 와  $270^\circ$  부근에서 전하량이 높게 나타났다. 부분방전 펄스는 3 bar에서 400 mV(전하량 100 pC) 및 5 bar에서 215 mV(전하량 53.75 pC) 로 다른 결함보다 큰 전하량이 측정되었다.



(a) 3 bar, 11 kV

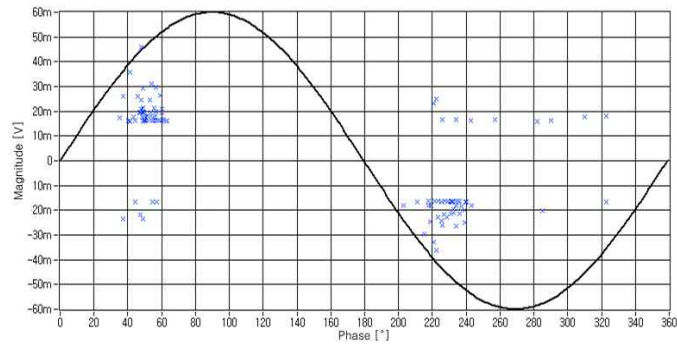


(b) 5 bar, 17 kV

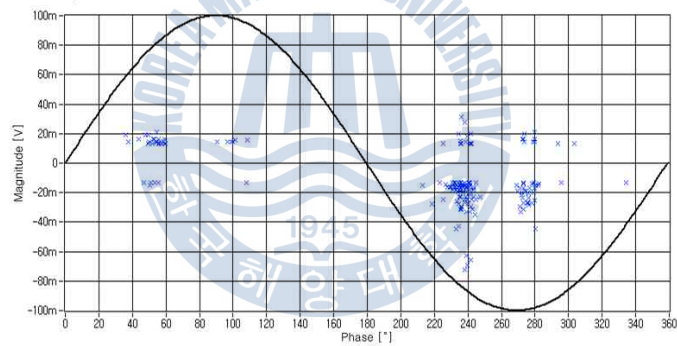
그림 4.9 에폭시 표면 들출

Fig. 4.9 PES

PES에서는 POE와 유사하게 부극성에서만 부분방전 펄스가 분포하였으나  $200^{\circ} \sim 240^{\circ}$  구간에서만 측정되었다. 3 bar에서는  $220^{\circ} \sim 240^{\circ}$  구간에서 부분방전 펄스가 주로 발생하는 반면, 5 bar에서는  $200^{\circ} \sim 240^{\circ}$  구간에서 발생하여 압력이 증가함에 따라 분포 구간이 넓어지는 특성이 나타났다. 부분방전 펄스의 크기는 3 bar에서 37 mV(전하량 9.25 pC) 및 5 bar에서 32 mV(전하량 8 pC)로 나타났다.



(a) 3 bar, 12 kV

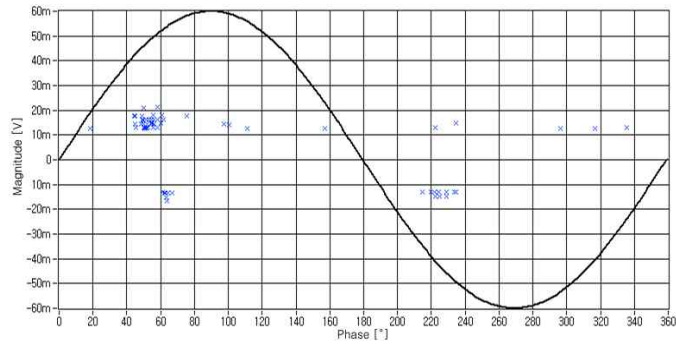


(b) 5 bar, 21 kV

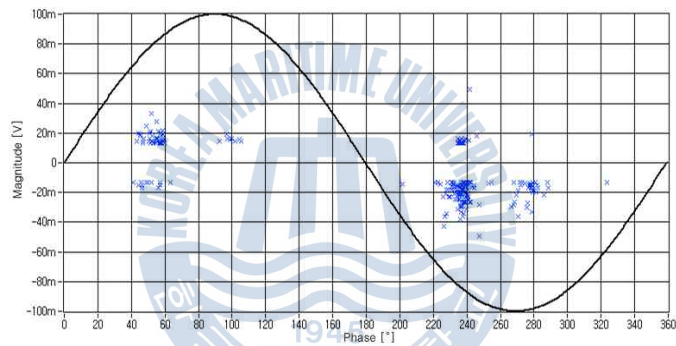
그림 4.10 에폭시 내부 보이드

Fig. 4.10 VE

VE에서는 정·부극성에서 부분방전 펄스가 발생하였고 3 bar에서는  $35^{\circ} \sim 65^{\circ}$  및  $200^{\circ} \sim 330^{\circ}$  구간에서 발생하는 반면, 5 bar에서는  $35^{\circ} \sim 110^{\circ}$  및  $210^{\circ} \sim 310^{\circ}$  구간에서 분포하였다. 부분방전 펄스는 3 bar에서 45 mV(전하량 11.25 pC) 및 5 bar에서 70 mV(전하량 17.5 pC)로 나타났다.



(a) 3 bar, 11 kV

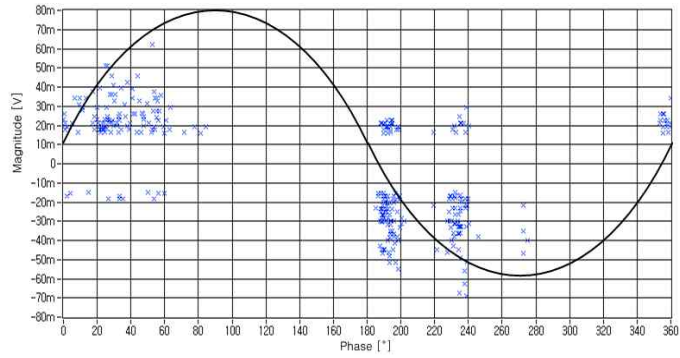


(b) 5 bar, 21 kV

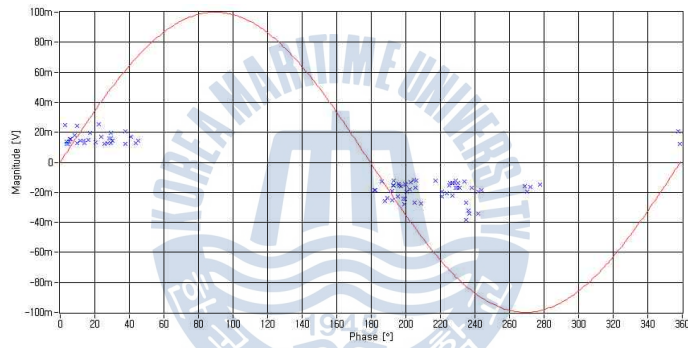
그림 4.11 스페이서 크랙

Fig. 4.11 SC

SC에서도 VE와 유사한 위상에서 부분방전 펄스가 분포하였으며, 3 bar에서  $40^{\circ} \sim 120^{\circ}$  및  $210^{\circ} \sim 310^{\circ}$  위상에서 나타났으며, 5 bar에서는  $40^{\circ} \sim 110^{\circ}$  및  $220^{\circ} \sim 300^{\circ}$ 에서 분포하였다. 부분방전 펄스는 3 bar에서 21 mV(전하량 5.25 pC) 및 5 bar에서 50 mV(전하량 12.5 pC)로 나타났다.



(a) 3 bar, 13 kV



(b) 5 bar, 15 kV

그림 4.12 부유 금속

Fig. 4.12 FM

FM에서도 정·부극성에서 부분방전 펄스가 분포하였으며, 3 bar와 5 bar에서  $0^{\circ} \sim 110^{\circ}$  및  $180^{\circ} \sim 290^{\circ}$ 로 동일한 위상에서 부분방전 펄스가 분포하였다. 부분방전 펄스는 3 bar에서 70 mV(전하량 17.5 pC) 및 5 bar에서 40 mV(전하량 10 pC)로 나타났다.



## 제 5 장 결과 및 분석

측정 결과로부터 결합별 특징을 도출하기 위하여 부분방전 펄스의 위상분포와 부분방전 펄스의 비율을 산출하고, 표 5.1에 나타내었다.

표 5.1 부분방전 펄스의 위상분포

Table 5.1 Phase distribution of PD pulse

결합 \ 위상	0~180												180~360											
	0~60				60~120				120~180				180~240				240~300				300~360			
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	100~120	120~140	140~160	160~180	180~200	200~220	220~240	240~260	260~280	280~300	300~320	320~340	340~360						
POC																								
POE																								
FP																								
PES																								
VE																								
SC																								
FM																								

0~3%	3~5%	5~10%	10~15%	15~20%	20~25%	25~30%	30% 이상
------	------	-------	--------	--------	--------	--------	--------

POC에서는 40°~140°에서 분포하였으며, 전체 펄스의 95% 이상이 40°~120°에서 발생하였다. POE에서는 220°~320° 위상에서 분포하였고, 전체 펄스 중 90% 이상이 220°~300°에서 발생하였다. FP에서 PD 펄스는 전 범위에 분포하였고, 180° 및 270° 부근에서 최대값이 나타났다. PES에서는 180°~240°에서 분포하였으며, 전체 펄스 중 85% 이상이 200°~240° 위상에서 발생하였다. VE에서는 0°~120° 및 200°~300°에 분포하였으며, 0°~40° 및 220°~240°에서 각각 20% 이상의 펄스가 발생하였다. SC에서는 20°~80° 및 200°~300°에 분포하였고, VE와 유사한 특성을 나타내었

다. FM에서는 0°~60° 및 180°~240°에서 발생하였으며, 0°~40° 및 180°~220°에서 각각 20%이상이 분포하였다.

또한 결함별 전체 펄스 수와 전체 펄스 수 대비 정극성 및 부극성 펄스 수를 표 5.2에 나타내었다. POC는 정극성에서 발생하는 PD가 전체의 95% 이상이었으며, POE와 PES의 경우 부극성에서 전체의 95% 이상의 부분방전 펄스가 발생하였다. 이 세가지 결함은 판별 알고리즘 제작시 초기 분류에 이용가능하다. FP, VE, SC 및 FM의 경우에는 정, 부극성의 발생 비율이 30%~60% 비율로써 양극성에서 발생하는 비율이 유사하게 나타났다.

표 5.2 결함별 극성 비율  
Table 5.2 Polarity ratio by PD cell

결함	N <sub>P</sub> /N <sub>T</sub> (%)	N <sub>N</sub> /N <sub>T</sub> (%)	비고
POC	98.64	1.34	
POE	1.7	98.28	
FP	49.87	50.13	
PES	2.8	97.14	
VE	49.53	50.42	
SC	37.74	62.24	
FM	43.98	56.05	

(\*N<sub>P</sub>: 정극성 발생횟수, N<sub>N</sub>: 부극성 발생횟수)

POC, POE 및 PES의 경우, 전체 펄스 수 대비 각 극성의 펄스 수 비율을 분석하는 방법으로 결함 원인을 판단할 수 있었다. 그러나 정, 부극성의 발생비율이 30%~60%로 유사한 기타 결함의 경우에는 펄스 수 비

을 분석만으로는 정확한 판별이 어려웠다.

유사한 펄스 수 발생 비율을 갖는 경우에는 VE와 SC를 제외한 결함은 위상분포해석을 통한 방법을 적용하면 원인별 특징을 분석할 수 있었다. 에폭시 절연물 내부에 공극 혹은 크랙이 발생한 VE와 SC의 경우에는 동일한 발생조건에 의해 생성되었으므로 판별할 수 없었다.



## 제 6 장 결 론

GIS의 절연진단 시 결함의 종류를 인식하기 위한 알고리즘 개발에 활용할 목적으로, GIS에서 발생 가능한 각종 결함을 모의하고 PD펄스의 측정과 패턴분석을 통해 다음의 결론을 얻었다.

GIS에서 발생 가능한 결함으로 7종의 PD cell을 제작하고, LabVIEW 기반 PRPD 측정 프로그램을 설계하였다. PD 펄스 측정시간은 120사이클로 설정하였으며, 펄스의 위상분포, 크기, 펄스 수 및 극성 비율 등 결함인식에 필요한 특징을 도출하였다.

POC에서는  $40^{\circ}\sim 140^{\circ}$ 에서 분포하였으며, 전체 펄스의 95% 이상이  $40^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 에서 발생하였다. POE에서는  $220^{\circ}\sim 320^{\circ}$  위상에서 분포하였고, 전체 펄스 중 90% 이상이  $220^{\circ}\sim 300^{\circ}$ 에서 발생하였다. FP에서 PD 펄스는 전 범위에 분포하였고,  $180^{\circ}$  및  $270^{\circ}$  부근에서 최대값이 나타났다. PES에서는  $180^{\circ}\sim 240^{\circ}$ 에서 분포하였으며, 전체 펄스 중 85% 이상이  $200^{\circ}\sim 240^{\circ}$  위상에서 발생하였다. VE에서는  $0^{\circ}\sim 120^{\circ}$  및  $200^{\circ}\sim 300^{\circ}$ 에 분포하였으며,  $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$  및  $220^{\circ}\sim 240^{\circ}$ 에서 각각 20% 이상의 펄스가 발생하였다. SC에서는  $20^{\circ}\sim 80^{\circ}$  및  $200^{\circ}\sim 300^{\circ}$ 에 분포하였고, VE와 유사한 특성을 나타내었다. FM에서는  $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$  및  $180^{\circ}\sim 240^{\circ}$ 에서 발생하였으며,  $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$  및  $180^{\circ}\sim 220^{\circ}$ 에서 각각 20%이상 분포하였다.

또한 결함별 전체 펄스 수와 전체 펄스 수 대비 정극성 및 부극성 펄스 수를 표 4.2에 나타내었다. POC는 정극성에서 발생하는 PD가 전체의 95% 이상이었으며, POE와 PES의 경우 부극성에서 전체의 95% 이상의 부분방전 펄스가 발생하였다. 이 세 가지 결함은 판별 알고리즘 제작시

초기 분류에 이용가능하다. FP, VE, SC 및 FM의 경우에는 정, 부극성의 발생 비율이 30%~60% 비율로써 양극성에서 발생하는 비율이 유사하게 나타났다.

이와 같이 결함별로 완전히 다르거나 또는 유사한 패턴을 나타내지만, 최종적으로 펄스의 극성 비율을 고려하면 결함의 종류를 충분히 인식할 수 있다.



## 참 고 문 헌

- [1] N. C. Sahoo, M. M. A. Salama and R. Bartnikas, "Trends in partial discharge pattern classification: a survey", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.12, No. 2, pp.248-264, 2005.
- [2] T. K. Abdel-Galil, R. M. Sharkawy, M. M. Salama, and R. Bartnikas, "Partial Discharge Pulse Pattern Recognition Using an Inductive Inference Algorithm", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, No. 2, pp.320-327, 2005.
- [3] M. S. Naidu, V. Kamaraju, High voltage engineering fourth edition, McGraw-Hill, p.364, 2009.
- [4] "개폐기 건전성 평가 및 진단기준 제정", 전력연구원, pp.37-39, 2007.
- [5] "電氣設備의 診斷技術", 日本電氣學會, pp.167-178, 1994.
- [6] L. A. Dissado and J. C. Fothergill, "Electrical Degradation and Breakdown in Polymers", Redwood Press, pp.242-262, 1992.
- [7] J. C. Fothergill, L. A. Dissado and P. J. J. Sweeney, "A Discharge Avalanche Theory for the Propagation of Electrical Tree", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No. 2, pp.474-486, 1994.
- [8] A. Cavallini, G. C. Montanari, F. Puletti, A. Contin, "A new methodology for the identification of PD in electrical apparatus: properties and applications", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 2, pp.203-215, 2005.
- [9] R. M. Eichhorn, "Treeing in Solid Extruded Electrical Insulation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. E I-12, No. 1, pp.2-18, 1976.
- [10] E. J. McMahon, "A Tutorial on Treeing", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. EI-13, No 4, 1978.
- [11] L. A. Dissado, S. J. Dodd, J. V. Champion, P. I. Williams and J. M. Alison, "Propagation of Electrical Tree Structures in Solid Polymeric Insulation", IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4,

No. 3, pp.259-279, 1997.

[12] T. Tsurimoto, H. Muto, M. Doi, K. Ito, H. Fujii, "Correlation Between Two Frequency Components Of Various PD Pulses in GIS", Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), pp.653-656, 1998.

[13] E. Gulski and A. Krivda, "Neural Networks as a Tool for Recognition of Partial Discharges", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28, No. 6, pp.984-1001, 1993.

[14] N. Achatz, J. Gorablenkow, U. Schichler, B. Hampton, J. Pearson, "Features and Benefits of UHF Partial Discharge Monitoring Systems for GIS", Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), pp.722-725, 2005.

[15] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", Butterworth, 1989.

[16] H. Ogihara, "Detection and location of coronas in oil immersed transformer with corona detector", Electrical Engineering in Japan, Vol. 84, No. 9, pp.12-21, 1984.

[17] Masayuki Hikita, "Fundamental Principles and Application of Diagnosis for GIS using Partial Discharge Measurements", 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), pp.1-6, 2011.

[18] A. Belkov, W. Koltunowicz, A. Obralic, R. Plath, R. "Advanced approach for automatic PRPD pattern recognition in monitoring of HV assets", Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (SEI), pp.1-5, 2010.

[19] Alan H. Cookson, Owen Farish, George M. L. Sommerman, "Effect of Conducting Particles on AC Corona and Breakdown in Compressed SF<sub>6</sub>", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Issue 4, Vol.PAS-91, pp.1329-1338, 1972.

[20] Alan H. Cookson, Owen Farish, "Particle-Initiated Breakdown between Coaxial Electrodes in Compressed SF<sub>6</sub>", IEEE Transactions on Power

Apparatus and Systems, Issue 3, Vol.PAS-92, pp.871-876, 1973.

[21] S. Okabe, T. Yamagiwa and H. Okubo, "Detection of Harmful Metallic Particles inside Gas Insulated Switchgear Using UHF Sensor", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 3, pp.701-709, 2008.

[22] K. Dreibusch, K. Weinheim, G. Hans-Gerd A. Schnettler, "Determination of a failure probability prognosis based on PD - diagnostics in gis", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 6, pp.1707-1714, 2008.

[23] M. M. Salama and R. Bartnikas, "Fuzzy Logic Applied to PD Pattern Classification", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 1, pp.118-123, 2000.

[24] T. Hoshino, K. Nojima, and M. Hanai, "Real-time PD identification in diagnosis of GIS using symmetric and asymmetric UHF sensors", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 3, pp.1072-1077, 2004.

[25] M. D. Judd, O. Farish, and B. F. Hampton, "The Excitation of UHF Signals by Partial Discharges in GIS", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, No. 2, pp.213-228, 1996.

[26] W. Ziomek, M. Reformat, E. Kuffel, "Application of genetic algorithms to pattern recognition of defects in GIS", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 2, pp.161-168, 2000.

[27] A. A. Mazroua, M. M. A. Salama, and R. Bartnikas, "PD Pattern Recognition with Neural Networks using the Multilayer Perceptron Technique", IEEE IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28, No. 6, pp.1082-1089, 1993.

[28] A. Krivda, "Automated Recognition of Partial Discharges", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp.796-821, 1995.

[29] J. S. Pearson, O. Farish, B. F. Hampton, M. D. Judd, D. Templeton, B. M. Pryor, and I. M. Welch, "Partial discharge diagnostics for gas insulated



substations”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp.893-905, 1995.

[30] T. Hoshino, H. Koyama, S. Maruyama, and M. Hanai, “Comparison of sensitivity between UHF method and IEC 60270 for onsite calibration in various GIS”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 4, pp.1948-1953, 2006.

[31] A. J. Reid, M. D. Judd, R. A. Fouracre, B. G. Stewart and D. M. Hepburn, “Simultaneous Measurement of Partial Discharges using IEC60270 and Radio-frequency Techniques”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.18, No.2, pp. 444-455, April 2011

[32] S. M. Hoek, S. Coenen, M. Bornowski and S. Tenbohlen, “Fundamental Differences of the PD Measurement according to IEC 60270 and in UHF range”, CMD, Vol. 18, Issue 2, 2008

[33] S. Coenen, S. Tenbohlen, S. M. Markalous, T. Strehl, “Sensitivity of UHF PD Measurements in Power Transformers”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 6, pp.1553-1558 2008.

[34] T. Hoshino, S. Maruyama and T. Sakakibara, “New Approach to Calibration of PD Magnitude Regarding GIS Using Three-Dimensional Electromagnetic Analysis”, Proceeding of the International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, pp.866-869, 2010.

[35] Masahito Miyata, Norihiro Kusaka and Nobuhiro Kuroda, “Development of a Diagnostic Device for Malfunctions of Distribution Facilities Using Acoustic Emission Testing”, Proceeding of the International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, pp.533-536, 2010.

[36] N. Achatz, J. Gorablenkow, U. Schichler, B. Hampton, J. Pearson, “Features and Benefits of UHF Partial Discharge Monitoring Systems for GIS”, Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Vol. 3, pp. 722-725, 2005.

[37] T. KATO, F. ENDO, S. HIRONAKA, “Sensitivity Calibration of UHF Partial Discharge Monitoring System in GIS”, Transactions of the Institute of

Electrical Engineers of Japan. B, Vol. 122-B, NO. 11, pp. 1226-1231, 2002.

[38] National Instruments Corporation, "Application Design Patterns", 2006.

[39] National Instruments Corporation, "Application Architecture and Design Patterns in LabVIEW", 2010.

[40] National Instruments Corporation, "Application Architecture and Design Patterns in LabVIEW", 2010.

