



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

SF₆가스중 HVDC에서 부분방전
특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Partial Discharges
under HVDC in SF₆ Gas



2014年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

金 珉 秀

本 論文을 金珉秀의 工學碩士 學位論文으로 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 張 樂 元 ㉠



2013年 12月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

金 珉 秀

목 차

목 차	i
그림 및 표 목차	ii
Abstract	iv
제 1 장 서 론	1
제 2 장 이 론	3
2.1 절연열화 및 부분방전	3
2.2 검출 기술	9
2.3 T - F map	15
제 3 장 실험 및 분석	18
3.1 실험계 구성	18
3.1.1 전극계	19
3.1.2 분석시스템	22
3.2 부분방전 특성분석	24
제 4 장 결 론	36
참 고 문 헌	38

그림 및 표 목차

<그림 목차>

그림 1.1	전기설비 사고통계(2012년)	2
그림 2.1	절연결함의 종류	4
그림 2.2	내부방전의 등가회로	5
그림 2.3	전자사태 과정	7
그림 2.4	비전기적 측정법	10
그림 2.5	전기적 측정법	12
그림 2.6	부분방전 검출회로	14
그림 2.7	신호처리 시스템 구조	16
그림 3.1	실험계 구성	18
그림 3.2	도체 돌출	20
그림 3.3	외함 돌출	20
그림 3.4	자유 입자	21
그림 3.5	크랙	21
그림 3.6	부분방전 분석시스템 블록선도	22
그림 3.7	부분방전 펄스 분석시스템	24
그림 3.8	POC에서 펄스 측정 및 분석 (3 bar, 17 kV)	26
그림 3.9	POC에서 펄스 측정 및 분석 (5 bar, 30 kV)	27
그림 3.10	POE에서 펄스 측정 및 분석 (3 bar, 17 kV)	28
그림 3.11	POE에서 펄스 측정 및 분석 (5 bar, 30 kV)	29
그림 3.12	Crack에서 펄스 측정 및 분석 (3 bar, 13 kV)	30
그림 3.13	Crack에서 펄스 측정 및 분석 (5 bar, 26 kV)	31
그림 3.14	FP에서 펄스 측정 및 분석 (3 bar, 21.5 kV)	32
그림 3.15	FP에서 펄스 측정 및 분석 (5 bar, 22 kV)	33

그림 3.16 전극별 분포도 35

<표 목차>

표 2.1 절연물의 열화 3

표 3.1 HVDC에서 부분방전 특성 34



**A Study on the Characteristics of Partial Discharges
under HVDC in SF₆ Gas**

by Min-Su, Kim

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



Abstract

This thesis dealt with the characteristics of partial discharge (PD) on High Voltage Direct Current (HVDC) in SF₆ Gas. Electrode systems such as a protrusion on conductor (POC), a protrusion on enclosure (POE), a crack on epoxy plate and a free particle (FP) were fabricated to simulate insulation defects. Analysis system was designed with T-F (Time-Frequency) map algorithm programed by LabVIEW. This can analyze the measured signal into frequency and time domain.

A HVDC power supply is composed of a transformer (220 V/50 kV) and a diode (100 kV), and a capacitor (50 kV, 0.5 μF). The gap between the electrodes is 3 mm, and the gas pressure of SF₆ was set at 3 bar and 5 bar. PD pulses were detected with a 50 Ω resistor and their

characteristics were analyzed by a digital storage oscilloscope (DSO) with the resolution of 2.5 GS/s and a DAQ system with the resolution of 30 MS/s.

PD pulses were distributed below 0.5 MHz and 20 ~ 40 ns for POC, below 1.7 MHz and 10 ~ 125 ns for POE, below 0.1 MHz and 135 ~ 250 ns for crack, and below 1.6 MHz and 260 ns for FP electrode system, respectively.

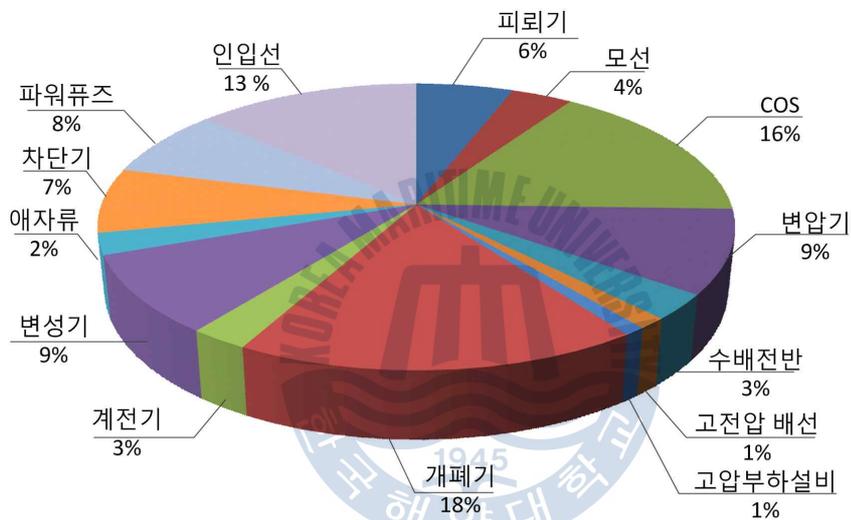


제 1 장 서 론

증가하는 전력수요에 대비하고 전력수송비 절감, 전력공급의 신뢰도 향상 및 국토의 효율적인 이용 등을 고려하기 위해서는 전력계통을 신설 및 증설하고 송전전압을 격상해야 한다. 이처럼 국내도 765 kV 송전선이 확장되고 전력설비에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 그뿐만 아니라 최근에 스마트 그리드의 관심이 증대되면서 DC송전에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그 예로 제주도는 송전탑을 건설하여 송전하기에는 제한적이며 송전손실이 많이 발생하므로 HVDC를 사용하여 송전을 하고 있다. 북유럽의 경우 여러 나라가 밀집해 있으며, 대부분이 섬나라로 구성되어 있어 송전탑을 건설하여 계통연계를 하기가 쉽지 않고 효율적인 전력공급을 위해 HVDC 송전을 시행하고 있다. 이와 같은 방식은 장거리 송전 시 전력손실이 적고, AC에 비해 절연이 용이하기 때문에, 다른 상용 주파수를 사용하는 나라와 연계가 가능할 것이다. 또한, 해양풍력발전단지의 증가로 HVDC 수요가 증가하는 추세이다^{[1]~[5]}. 이처럼 추후에는 HVDC의 상용화가 이루어지면 전력설비들의 초고압화, 대용량화가 될 수 있을 것이며, 사전에 사고를 방지하기 위하여 진단에 관한 연구가 이루어져야 할 것이다. 현재 외국의 경우 HVDC용 전력설비에서 발생하는 문제를 진단하기 위한 연구가 이루어지고 있으나, 국내의 진단 기술은 아직 초보적인 단계이다.

따라서 본 논문에서는 HVDC에서 발생가능한 부분방전의 특성을 분석하였다. 그림 1.1은 한국전기안전공사에서 제시한 2012년 전기설비 사고의 통계자료를 나타낸 것이다. 이 중 총사고 건수가 18%로 높은 비중을 차지한 개폐기에서 HVDC로 인한 사고 예방 진단을 위한 연구를 수행하였

다. 개폐기 중에서도 가스절연방식을 사용하는 설비를 선정하였으며, 실제로 발생 가능한 결함으로 외함돌출, 도체돌출, 크랙, 자유 입자 등 총 4종의 전극계를 제작하였다. HVDC를 전극계에 인가하였을 때, 발생된 부분 방전 펄스는 LabVIEW로 설계한 T-F map을 기반으로 그 특성을 분석하였다.



※ 출처 : 전기설비사고통계('12년)_한국전기안전공사

그림 1.1 전기설비 사고통계(2012년)

Fig. 1.1 Statistics of electrical facilities faults(2012년)

제 2 장 이 론

2.1 절연열화 및 부분방전

절연열화는 전력설비의 절연물이 기계적, 전기적, 열적, 환경적인 요인들로 인하여 발생된다. 이로 인해 초기의 물성 값이 변질되어 절연물의 수명이 줄어들거나 파손되는 현상을 의미하며, 표 2.1에 원인과 현상을 나타내었다^[6].

표 2.1 절연물의 열화
Table 2.1 Degradation of dielectric materials

원 인			현 상
열적	연 속		화학적 변질
	주기적		박리, 균열, 마찰
전기적	정격전압		부분방전, 침식, 트래킹
	이상전압		전기트리
기계적	충 격		박리, 균열
	진 동		마모
환경적	수 분	흡 습, 침 수	누설전류 증대, 트래킹
		결 로	
	오 손	도전물질	누설전류 증대, 트래킹, 화학적 변질
		약 품	

절연열화의 스트레스가 지속되면 절연물 내부의 공극, 도전성 입자로 인하여 결함이 발생된다. 이는 하나의 유전체로 볼 수 있으며, 전압이 인가되면 결함이 있는 곳의 전계가 불균일하게 분포되어 전계의 집중도가 큰 곳에서부터 절연이 파괴되는 것을 부분방전이라 한다. 초기의 미소 부분방전은 절연물에 큰 영향을 주지 않지만 지속적으로 발생되면 방전전하량이 증가하게 되어 최종적으로 전기트리를 생성하게 된다. 이로 인해 정상상태의 절연물이 전기적 스트레스로 물성값이 변질되어 절연파괴 사고로 이어지게 된다. 대표적인 방전으로는 코로나방전, 내부방전, 연면방전으로 나눌 수 있다^[7].

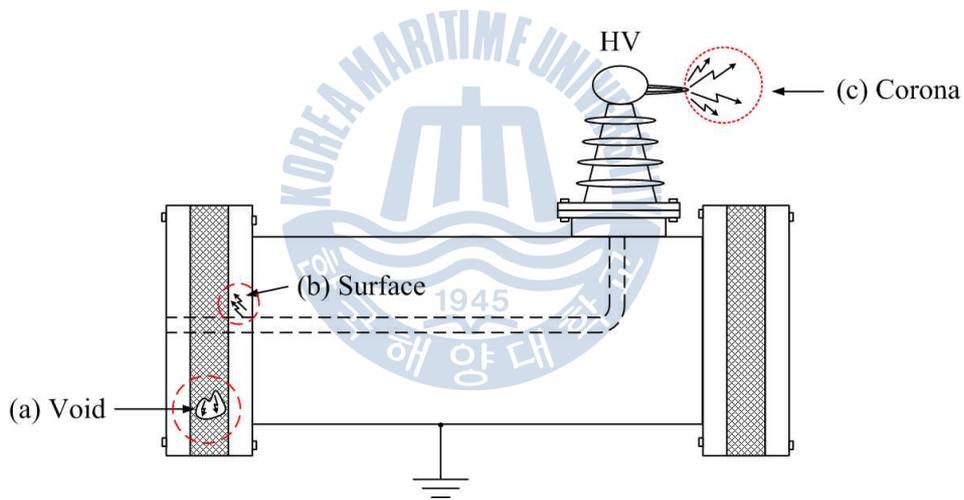


그림 2.1 절연결함의 종류

Fig. 2.1 Types of partial discharges

내부방전은 설비의 제작공정 중 고체절연물 내에 공극이 포함되거나, 운전 중 전기적, 열적, 기계적 스트레스로 인하여 발생하는 경우가 있다. 정상상태의 절연물에 전압을 인가하면 전계가 균등하게 분포하지만 내부

의 공극이 존재하는 고체절연물은 공기의 유전율이 절연물보다 낮으므로 전계의 집중도가 높아지게 된다. 그리고 일정전계 이상이 되면 공기의 절연이 파괴되어 부분방전이 발생된다. 그림 2.2는 HVDC에서 발생될 수 있는 내부방전의 등가회로를 나타내었다.

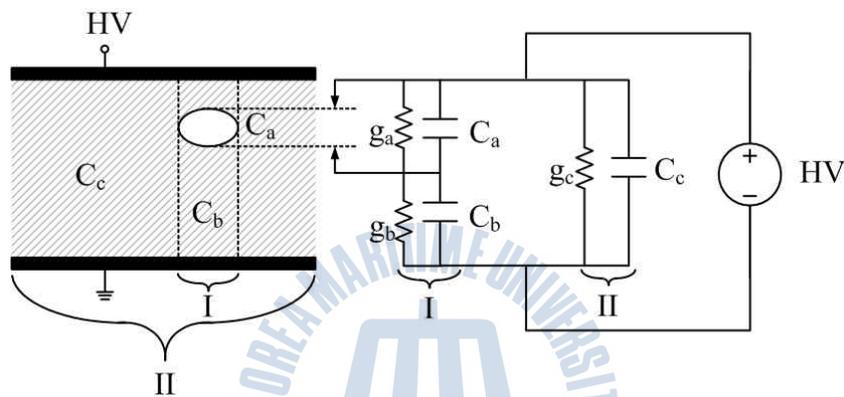


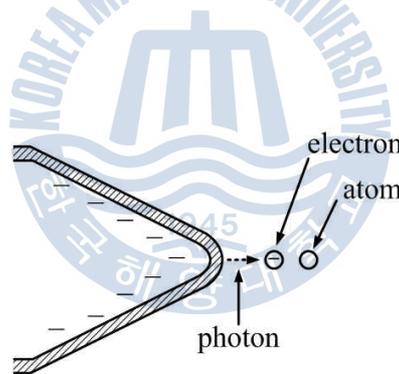
그림 2.2 내부방전의 등가회로

Fig. 2.2 Equivalent circuit of a internal discharge

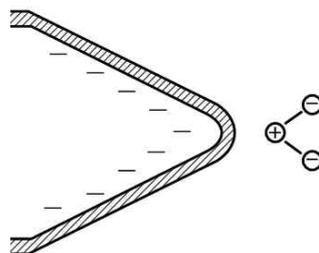
그림 2.2와 같이 I 영역은 절연물의 결함이 포함된 부분, II 영역은 정상 부분으로 나눌 수 있으며, I 영역에서 공극의 정전용량(C_a)과 누설컨덕턴스(g_a)는 병렬형태로 절연물의 정전용량(C_b), 누설컨덕턴스(g_b)와는 직렬로 나타낼 수 있다. II 영역에서 절연물의 정전용량(C_c)과 누설컨덕턴스(g_c)가 병렬로 구성된다. I 영역과 II 영역은 병렬형태의 접속으로 나타낼 수 있다. 여기에 일정전압 이상이 인가하게 되면 누설컨덕턴스로 미소 전류가 흐르다가 전압이 더 상승 되면 정전용량이 작은 C_a 에 전압이 C_b 보다 많이 인가되며, 서서히 절연이 파괴되어 부분방전이 발생된다^[8].

코로나 방전은 그림 2.1과 같이 첨예한 전극의 주위에 불균일한 전계가 집중되어 발생하는 국부방전이다. 이는 절연물의 표면에 이온빔이나 소리를 수반하는 현상으로 껍의 도중 신장하는 스트리머 코로나(Streamer corona), 전극표면 근방에서만 빛이 나는 글로우 코로나(Glow corona) 등 여러 가지 종류가 있다^[9].

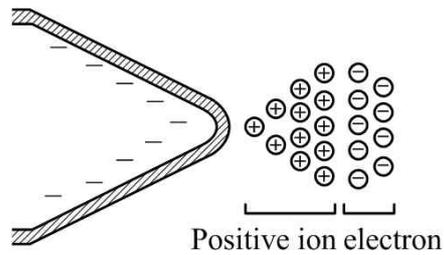
발생과정으로는 공기 중에 있는 자유전자가 전계에 의해 가속되는 것이 첫 단계이다. 전계에 의해 충분한 에너지를 얻은 전자들은 다른 분자와 충돌로 이온(ion)을 생성시킨다. 그림 2.3에 이러한 과정을 나타내었으며, 양이온들에 의해 전극에서 전자를 공급해 방전이 지속적으로 이루어질 때까지 전자들의 수는 계속 증가한다. 이때 초기전자는 광전리에 의해 생성된다^{[11],[12]}.



(a) 개시



(b) 전자쌍 형성



(c) 전자사태

그림 2.3 전자사태 과정

Fig. 2.3 Process of electron avalanche

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



여기서, A 는 원자, A^+ 는 양이온, e 는 전자이다.

식 (2.1)에서와 같이 중성원자에 어떤 전자가 충돌하면 양이온과 전자가 생기고, 이때 전자들은 각각 두개 이상의 전자들을 생성시킨다. 이러한 과정이 연쇄적으로 일어나 전자들의 양이 급속하게 증가하는 것을 전자사태(Electron avalanche)라 하며, 이때의 방전전류는 식 (2.2)와 같다.

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

여기서 d 는 갭(gap) 간격, α 는 Townsend의 1차 이온화 계수이다. 식 (2.2)에서 Townsend의 1차 이온화 계수 α 는 일정한 전계에서 하나의 전

자가 1 cm의 거리를 이동할 때 생성된 전자의 수를 나타내는 계수(Coefficient)이다. 이상의 과정을 거치면서 전자들의 양이 급속히 증가하는 이온화 과정을 1차 과정(Primary process)이라 하고, 양이온과 광자들이 전극을 강타해 전자들이 방출되는 과정은 2차 과정(Secondary process)이라고 한다.

1차 및 2차 과정을 거쳐 방출된 전자들은 전극의 극성에 따라 전극에 흡수되거나 중성원자에 부착하여 음이온을 형성한다. 이후 이온들이 모두 소멸할 때까지 전계의 세기는 이온의 영향으로 변하게 된다. 국부적으로 전계가 다시 집중되면 위에서 설명한 일련의 과정이 반복된다. 이와 같이 전계가 집중된 부분에서만 절연파괴가 일어나고 다른 부분에서는 절연이 파괴되지 않은 상태로 남게 되는 현상을 국부방전 또는 코로나(Corona)라고 한다. 전계의 집중은 전선표면 상태에 따라 결정되는데 물방울(Water drops)이나 곤충, 먼지 등이 부착된 부분에서 보다 집중되며, 전선의 경년 정도에 따라서도 집중의 정도가 크게 차이 난다. 전계가 집중되는 부분에서의 코로나 발생은 식 (2.3)의 임계값(E_o) 이상이 되면 시작한다.

$$E_o = 30 \delta M \quad (2.3)$$

여기서, E_o : 코로나 방전개시 전계강도, [kV_{peak}/cm]

$\delta = 2.94 P / (273 + \theta)$: 상대공기밀도

P : 기압, [kPa]

θ : 온도, [$^{\circ}C$]

M : 도체표면상태계수 (≈ 0.5)

이러한 코로나방전은 전력기기 외부의 충전부나 측정 금구류 등에서

발생되는 것으로 절연물 내부에서 발생하는 부분방전 펄스와는 구분되어야 하지만 대부분의 경우 코로나방전과 부분방전의 구분이 쉽지 않기 때문에 부분방전 펄스로 오인하는 경우가 발생한다.

연면방전이란 그림 2.1과 같이 부적절한 절연설계에 의한 누설거리 부족으로 절연물 표면에 전계가 집중되어 도전로를 형성하여 방전하는 현상을 말한다. 절연물 표면에 열화가 발생 및 촉진하기 때문에 초기에는 절연물 자체에 많은 영향을 미치지 않는다. 연면방전으로 의해 발생하는 고조파전압이 교류전압에 중첩되면 설비의 절연물에 과도한 전기적 스트레스를 가하게 되므로 절연물에 손상을 준다. 장기간 지속될 경우 열화가 집중되며, 이로 인해 침식이나 부식이 발생되어 절연물의 성능이 저하 또는 발열 및 오손이 촉진 되고 탄화도전로가 형성되어 절연이 파괴되는 경우도 있다.

2.2 검출 기술

전력설비의 이상상태를 감지하는 진단기술은 여러 분야에서 연구되고 있으며, 많은 기술들이 현장에 적용되거나 실용화를 위한 개발과정에 있다. 그 중 운전상태를 항시 모니터링하는 기술로는 비전기적 검출법과 전기적 검출법으로 분류가 가능하다. 비전기적 검출법은 UHF(Ultra high frequency)센서와 음향신호 검출로 운전상태 모니터링에 사용된다. 이는 전기적 검출법에 비해 외부노이즈의 영향을 받기 쉬우나, 운전 중 설치가 가능하다는 장점을 가지고 있다.

전기적 검출법으로는 IEC 60270에 제시된 부분방전을 검출하는 방식으로 운전 중에 설치 및 초고압에 적용하기에는 어렵다. 하지만 설치 후 운전상태 모니터링이 가능하고 외부노이즈의 영향이 적은 장점이 있다.

(1) 전자파 검출법

부분방전은 수 ns 정도의 상승시간을 가지며, 수 백 kHz ~ 수 GHz 이상의 주파수 성분이 존재한다. 이러한 부분방전 펄스에 의해 발생하는 전자파를 검출하면서 부분방전의 발생여부를 확인 할 수 있다. 전자파 검출법은 대부분 UHF 대역(300 MHz ~ 3 GHz)의 전자파를 검출하는 것으로 높은 공진도와 민감도를 나타낸다. 하지만 외부전자파 노이즈에 의한 영향을 받기 쉬우며 검출 안테나에 하나의 주파수 분석기만 사용이 가능하고, 수 ns의 펄스를 측정하므로 측정계기의 수평분해능이 높아야 하는 단점이 있다^{[13],[14]}.

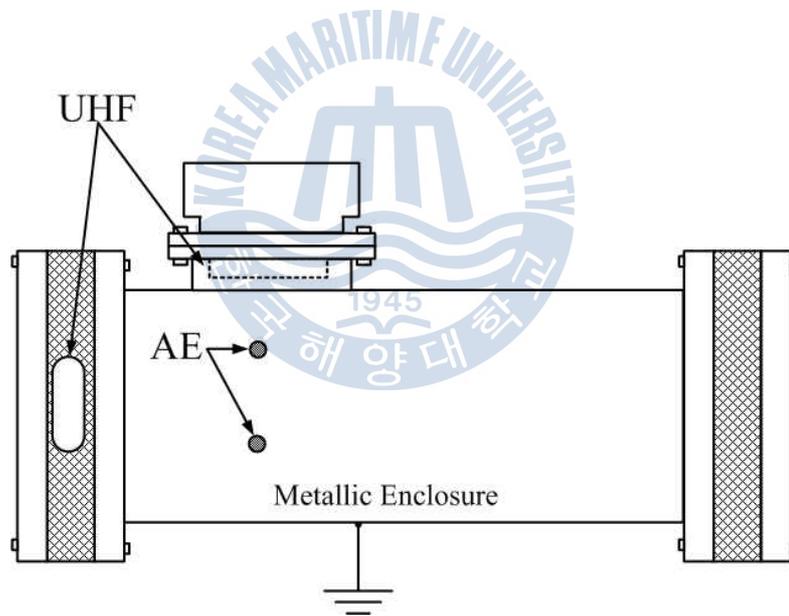


그림 2.4 비전기적 측정법

Fig. 2.4 Method of a non-electrical measurement

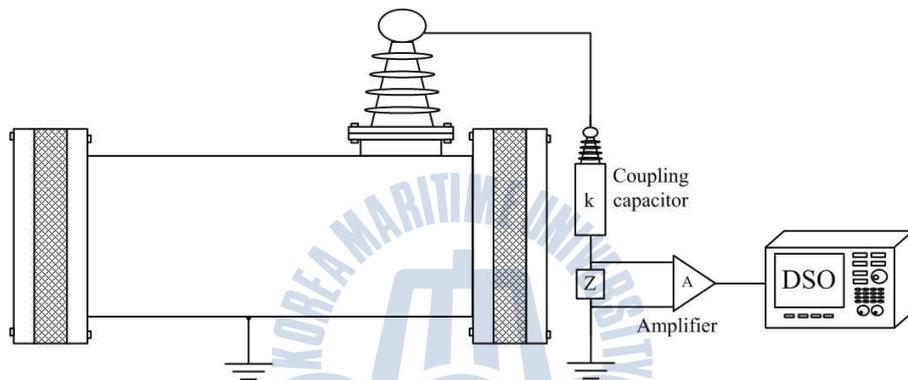
(2) 음향신호 검출법

부분방전에 의해 발생하는 음향신호는 외함으로 전달되기 때문에 그림 2.4에 나타낸 것과 같이 AE(Acoustic emission)센서를 금속 외함에 부착하여 검출할 수 있다. AE센서는 압전 소자가 이용되어 기계적 진동을 전기신호로 변환한다. 내부구조나 전달 경로에 의한 음향신호의 감쇄가 있기 때문에 부분방전의 정량적인 측정은 어렵다. 음향신호가 전파되는 속도만큼 도달시간의 지연이 있기 때문에 전기적인 측정법과 병용하면 부분방전이 발생하는 부분까지의 거리가 계산될 수 있다는 특징이 있으며 더욱이 복수의 AE센서를 이용함으로써 부분방전의 위치추정이 가능하다^[15].

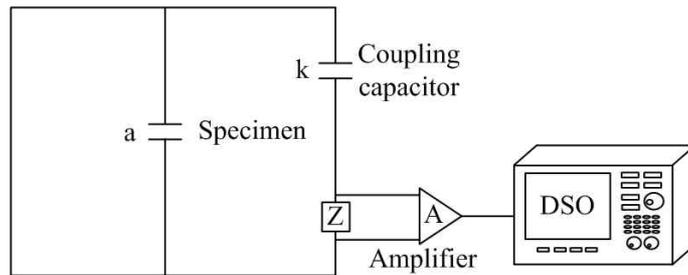
(3) 전기적 검출법

센서를 전력설비에 직접 설치하기 때문에 운전을 정지 후 측정하는 진단방식이다. 절연상태를 평가하기 위하여 커플링 캐패시터와 검출임피던스를 시료와 병렬로 접속시키고 시료에서 발생하는 부분방전펄스를 검출하는 것으로 그림 2.5에 나타내었다. 검출회로에서 고전압 발생원과 커플링 캐패시터(Coupling capacitor) k 에서는 부분방전이 발생되지 않아야 한다. 검출임피던스 Z 양단에는 시료에서 발생하는 부분방전펄스에 의해 전압신호로 변환되며 증폭기 A 를 통해 관측된다. 검출임피던스는 기기의 접지방식에 따라 시료에 직접 연결하는 방식과 커플링 캐패시터를 병렬연결하는 두 가지 방법을 고려할 수 있으며, 고전압 발생원의 임피던스가 충분히 크다면 전기적으로 같은 전압이 발생한다. 만일 시료의 정전용량이 크다면 충전전류는 검출임피던스를 통하여 흐르지 않으므로 커플링 캐패시터에 접속하게 된다^[16].

그림 2.5와 같이 커플링 캐패시터와 직렬로 검출임피던스를 접속하는 방법이 주로 사용되는데 이는 시료에서 큰 방전이 발생할 경우 검출회로에 과도전류가 흐르게 되어 회로를 소손, 파괴시킬 수 있기 때문이다. 따라서 검출회로의 입력단에는 과도전류에 대한 보호회로의 설계가 요구된다.



(a) 구성도



(b) 등가회로

그림 2.5 전기적 측정법

Fig. 2.5 Method of an electrical measurement

검출회로의 적용에 있어서는 그림 2.6과 같이 표류정전용량이 병렬 접속된 RC 적분회로와 RLC 동조회로의 두 가지 방법이 있다. 그림 2.6(a)와 같은 RC 회로에서 임펄스 전압은

$$V = \frac{q}{a + C(1 + \frac{a}{k})} \exp(-\frac{t}{Rm}) \quad (2.4)$$

와 같이 발생하며, 여기서 q 는 방전의 크기로 $q = b \cdot \Delta V$ 이다. 회로의 합성정전용량 m 은

$$m = \frac{ak}{a + k} + C \quad (2.5)$$

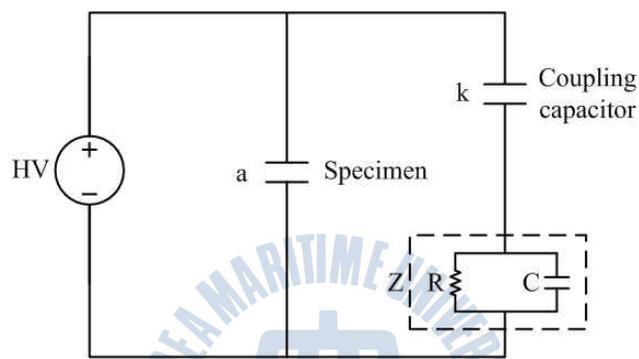
와 같다.

그림 2.6(b)의 RLC 회로에서 임펄스는 RC 회로와 같은 파고치로부터 감쇄 진동하게 되고 출력 전압은 다음과 같이 주어진다.

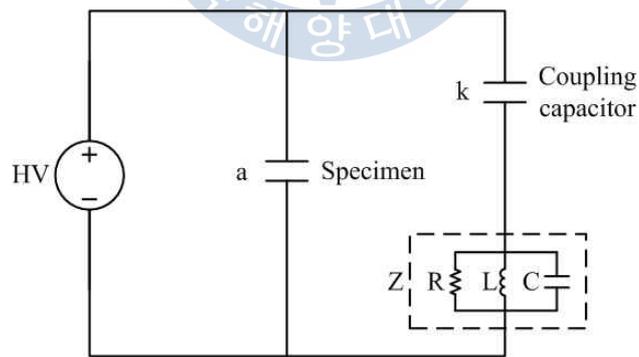
$$V = \frac{q}{a + C(1 + \frac{a}{k})} \exp(-\frac{t}{2Rm}) \cos\omega t \quad (2.6)$$

여기서, $\omega = \sqrt{\frac{1}{Lm} - \frac{1}{4R^2m^2}}$ 이고, m 은 회로의 합성 정전용량으로 식 (2.5)와 같은 값을 갖는다. 식 (2.4) 및 식 (2.6)에서와 같이 검출저항 양단의 임펄스 전압은 방전전하 q 와 커플링 캐패시터 k 에 비례하며, 이 출력 전압 측정을 통해 방전전하의 크기를 구할 수 있다.

검출대상에 따라 부분방전 펄스의 주파수가 달라지기 때문에 부분방전 검출에 적용하기 위해서는 그림 2.6의 구성을 그대로 적용하는 것이 아니라 RLC 정수를 적절히 조합하여 부분방전 검출에 필요한 주파수 대역을 선정하여야한다.



(a) RC 회로



(b) RLC 회로

그림 2.6 부분방전 검출회로

Fig. 2.6 PD detection circuits

부분방전은 수 MHz 범위의 고주파 전류펄스 형태로 발생하기 때문에 커플링 캐패시터와 검출임피던스로 구성되는 결합회로망이 필요하며, 커플링 캐패시터 및 RLC 소자로 이루어진 검출임피던스는 인가전압 범위에서 방전이 발생하지 않는 안정적인 소자를 사용해야 한다. 만일 인가전압 범위에서 내부방전이 발생하면 피시험체에서 발생하는 부분방전 펄스와 구분되지 않기 때문에 정확한 측정이 어렵다^[17].

2.3 T - F map

부분방전 분석 요소는 위상, 펄스, 방전전하량, 방전횟수 등으로 특성을 분석한다. DC는 AC와 같이 위상으로 부분방전 특성을 분석할 수가 없기 때문에 본 논문에서는 HVDC에서 발생하는 부분방전 펄스를 분석 요소로 선정하였다. 기존의 분석방법인 와이블 함수는 신호 처리과정이 복잡하고 신호를 분석하는데 어려운 점이 있으며, 시간영역과 주파수영역 중 하나의 영역에서 신호를 분석하는 단점이 있다. 반면에 T - F map은 정해진 시간동안 신호의 주파수성분과 시간에 대한 진폭의 변화를 보여준다. 또한, 기존 신호처리 방법에 비하여 메모리 작업을 감소시켜 처리속도가 빠르고 측정된 신호크기, 극성 및 변화, 노이즈 검출에 용이하고, 절연물 결함의 종류를 구분할 수 있는 장점이 있다^{[18]~[21]}.

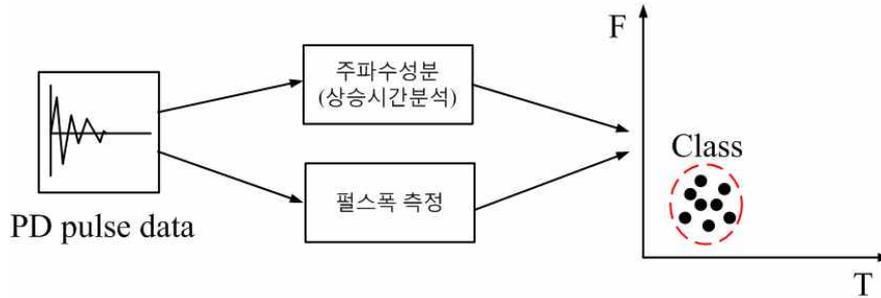


그림 2.7 신호처리 시스템 구조

Fig. 2.7 Architecture of a signal processing system

그림 2.7은 T - F map의 신호처리 과정을 나타내었다. 첫 번째로 부분 방진 신호를 측정하고 신호의 정규화 과정을 통하여 처리한다. 정규화 된 신호는 다음 식 2.7과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{s}(t) = \frac{s(t)}{\sqrt{\int_0^T s(t)^2 dt}} \quad \because s(t) \in [0, T] \quad (2.7)$$

펄스 파형을 이차함수로 나타내기 위하여, 통계학의 표준편차 수식을 이용하였으며, 식 2.8, 2.9로 표현된다.

$$\sigma_T = \sqrt{\int_0^T (t - t_0)^2 \tilde{s}(t)^2 dt} \quad (2.8)$$

$$\sigma_F = \sqrt{\int_0^\infty f^2 |\tilde{s}(f)|^2 df} \quad (2.9)$$

여기서 σ_T, σ_F 는 시간과 주파수 도메인에서 신호의 표준편차이며, $\tilde{s}(f)$ 는 $\tilde{s}(t)$ 의 푸리에 변환폼이다. t_0 는 정규화 된 신호의 무게 중심이며 다음 식 2.10과 같이 표현된다.

$$t_0 = \int_0^T t \tilde{s}(t)^2 dt \quad (2.10)$$

상기의 식을 이용하여 부분방전 신호의 시간 및 주파수에 대한 특징정보를 보존하고 T - F map을 표현한다.



제 3 장 실험 및 분석

3.1 실험계 구성

그림 3.1과 같이 실험계를 구성하였으며, 최대 50kVrms까지 승압이 가능한 AC변압기에 고압다이오드와 캐패시터로 HVDC 공급장치를 설계하였다. 또한, 충전되어 있는 캐패시터를 일정시간내에 방전하기 위한 회로를 구성하였다. 외부노이즈의 영향을 감소시키기 위해 차폐함 내부에서 실험하였으며, 고전압 인입부는 코로나를 방지하기 위하여 충분한 절연내력을 가지도록 설계하였다. 전극계에 인가되는 전압은 최대 50 kV까지 가변하여 부분방전을 모의하였다. 결함계에서 발생하는 부분방전 펄스는 검출저항(50Ω)으로 측정하여 오실로스코프와 LabVIEW로 설계한 T-F map으로 분석하였다.

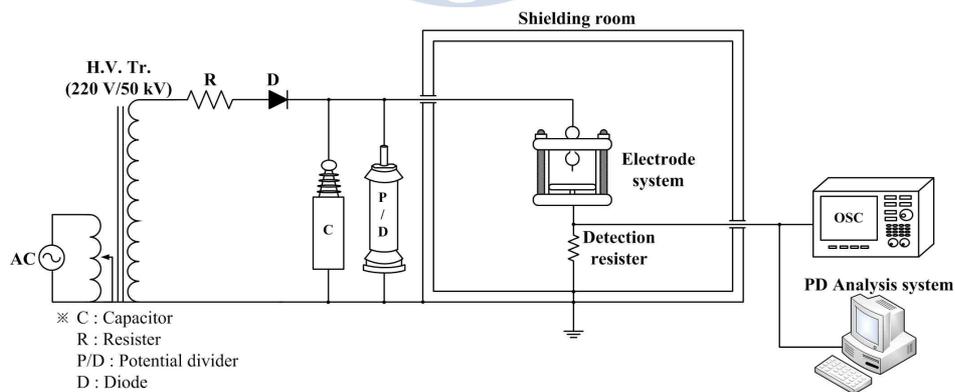


그림 3.1 실험계 구성

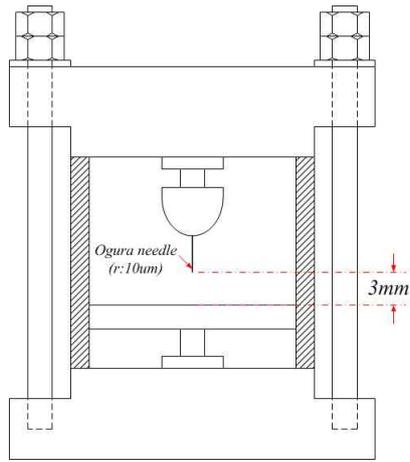
Fig. 3.1 Configuration of the experimental set-up

3.1.1 전극계

운송 또는 제조과정에서는 고체절연물 내부의 공극층이나 이물질, 수분 등의 문제로 결함이 발생된다. 이와 같은 원인으로 인하여 발생하는 결함 중 도체 돌출(POC, Protrusion on conductor), 외함 돌출(POE, Protrusion on enclosure), 자유입자(FP, Free particle), 크랙(Crack)으로 총 4종의 결함을 선정하였다.

본 논문에서는 HVDC에서 부분방전 특성을 분석하기 위하여 전극계를 그림 3.2 ~ 3.5와 같이 설계 및 제작하였다. 전극계는 지름 125 mm 높이가 86 mm인 원기둥 형태이며, SF₆의 압력 6 bar까지 충전 가능하도록 설계하였다. 전극의 간격은 3 mm, 고전압 인입부는 전계의 집중 방지를 위하여 황동재질로 직경 30 mm인 구 형태로 제작하였다.

그림 3.2, 3.3은 도체 돌출(POC)과 외함 돌출(POE) 결함을 모의한 것이며, 칩 전극의 곡률 반경은 10 μ m, 평판전극은 지름 80 mm, 두께 10 mm로 가장자리를 둥글게 제작하여 전계의 집중을 방지하였다. 그림 3.4의 자유입자는 직경 1 mm인 구 형태이며, 평판전극은 오목한 형태로 제작하여 전압이 인가되지 않을시 평판의 중심부로 향하게 설계하였다. 그림 3.5는 고체절연물의 크랙을 모의한 것으로 평판전극의 직경은 다른 전극계와 동일하며, 고체절연물은 에폭시로 직경 70 mm, 두께 5 mm로 설계하였다.



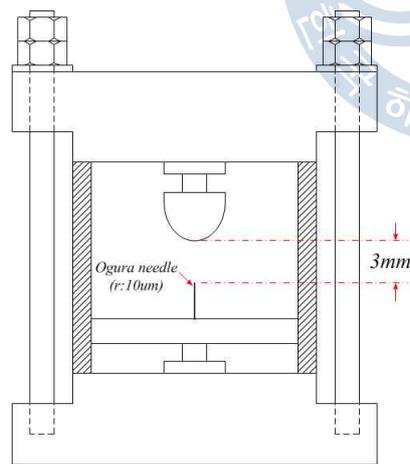
(a) Drawing



(b) Photograph

그림 3.2 도체 돌출

Fig. 3.2 Protrusion on conductor



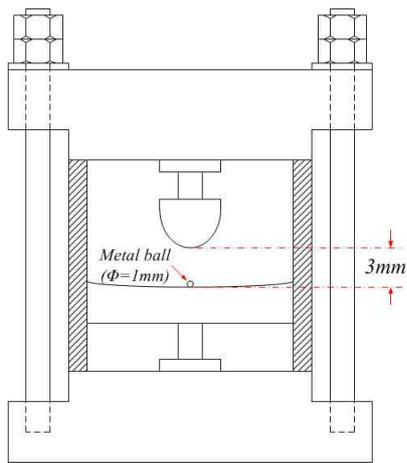
(a) Drawing



(b) Photograph

그림 3.3 외함 돌출

Fig. 3.3 Protrusion on enclosure



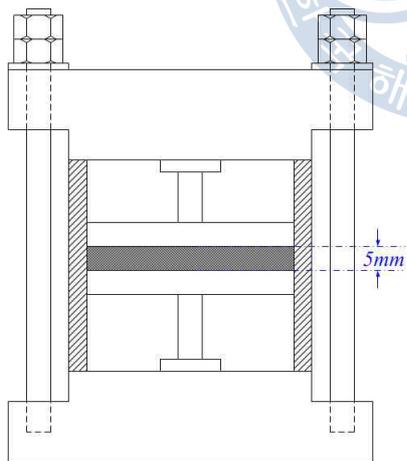
(a) Drawing



(b) Photograph

그림 3.4 자유 입자

Fig. 3.4 Free particle



(a) Drawing



(b) Photograph

그림 3.5 크랙

Fig. 3.5 Crack on epoxy plate

3.1.2 분석시스템

부분방전 신호의 측정과 분석을 위한 T-F map은 LabVIEW로 VI (Virtual instrument)를 설계 하였으며, 그림 3.6에 그 구성을 나타내었다. 실시간으로 부분방전 펄스의 측정과 T-F분석을 위하여 Multi-threading 기능을 가지는 Producer-consumer 구조를 사용하였다.

측정이 끝난 후 부분방전의 크기 및 발생횟수의 빠르고 일률적인 처리를 위하여 Dynamic - sequence기능을 가지는 ‘Standard State Machine’ 구조를 사용하였다.

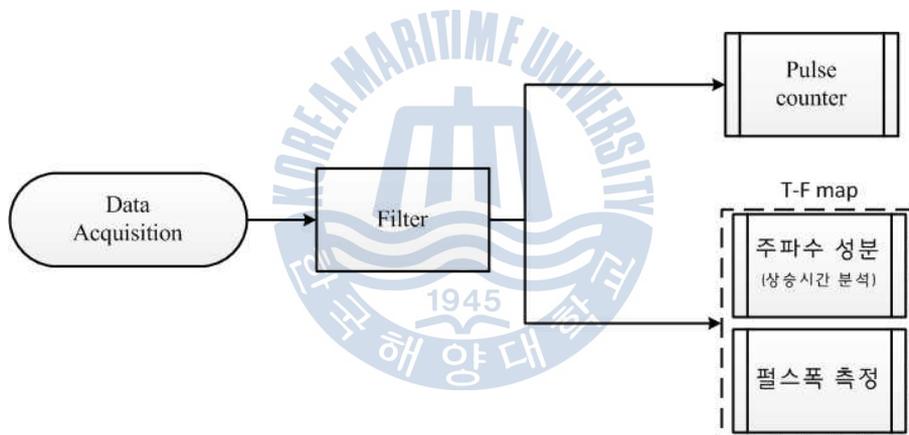
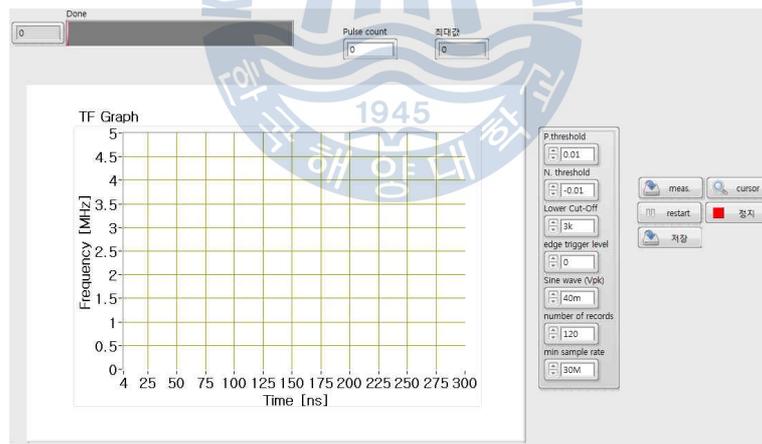


그림 3.6 부분방전 분석시스템의 블록선도

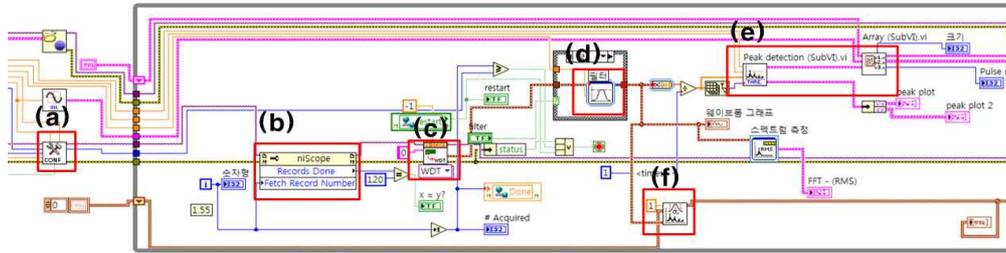
Fig. 3.6 Block diagram of a PD analysis system

분석시스템의 하드웨어 구성은 부분방전 펄스 신호를 RTOS(Real time operating system)가 탑재된 NI PXI-1042Q로 분석하고 PC로 디스플레이 하는 시스템이다. 설계한 분석시스템의 소프트웨어 구성을 그림 3.7 (b)에 나타내었으며, a ~ f로 총 여섯 부분으로 분류할 수 있다. a에서 입력포트

를 지정하고, b에서 신호를 분석하기 위해 시스템을 설정한다. Sampling 30 Ms/s, Record length 500 k, 2초간 측정으로 설정하였다^[22]. 또한, c에서 분석이 완료될 때까지 PXI 내부 메모리에 데이터를 저장하여 측정시간을 줄이기 위하여 Fetch number of record 방식을 사용하였다. 부분방전 펄스는 상승시간이 ns으로 매우 빠르기 때문에 저주파성분을 제거하기 위한 디지털 HPF (High pass filter)를 d에 적용하였다. 연속적으로 검출하는 방식은 메모리의 소모가 많으므로 최대, 최소만을 검출하고 이를 시간영역에 맞추어 재배열하여 펄스의 발생수는 e에서 검출하였다. 또한, f에서 측정된 신호의 주파수영역과 시간영역에서 클러스트를 형성시키기 위하여 T - F map의 수식으로 정규화 시키고, 이를 표준편차 및 주파수영역으로 변환시킨 후 주파수영역에서의 표준편차를 계산하는 VI를 설계하였다.



(a) 프런트 패널



(b) 블록 다이어그램

그림 3.7 부분방전 펄스 분석시스템

Fig. 3.7 Analysis system of PD pulse

3.2 부분방전 특성분석

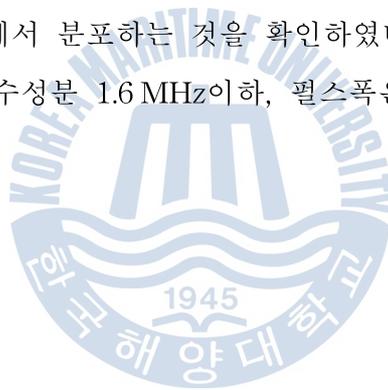
본 논문에서는 전극계의 SF₆가스 압력은 가스절연설비에 사용되고 있는 3 ~ 5 bar중 3 bar, 5 bar로 선정하였으며, 결합별 부분방전을 모의하였다. 부분방전 펄스는 LabVIEW로 설계한 T-F map으로 분석하였다.

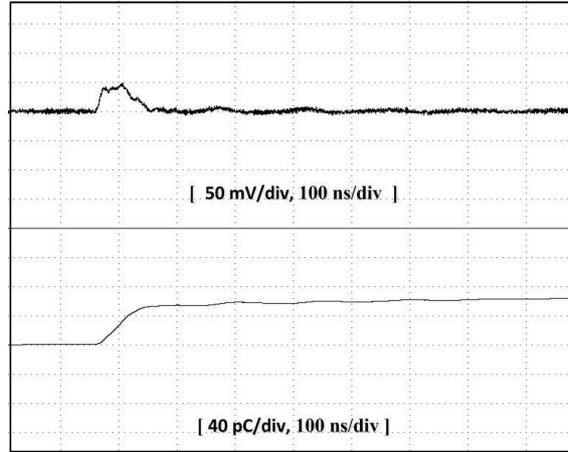
POC의 부분방전 펄스는 그림 3.8, 그림 3.9와 같이 나타났다. 3 bar, 17 kV에서 방전펄스는 504개가 발생하였다. 이를 T-F map으로 분석한 주파수 성분은 0.4 MHz이하, 펄스폭은 25 ~ 40 ns, 시간영역에서 분포하는 것을 확인 하였다. 5 bar, 30 kV에서 방전펄스 수는 2410개, 주파수성분 0.5 MHz이하, 펄스폭은 20 ns ~ 30 ns 시간에서 분포한다.

POE의 부분방전 펄스는 그림 3.10, 그림 3.11과 같이 나타났다. 3 bar, 17 kV에서 방전펄스는 445개로 이를 T-F map으로 분석한 주파수 성분은 0.5 ~ 1.6 MHz, 펄스폭은 23 ns ~ 85 ns 시간영역에서 분포하는 것을 확인 하였다. 5 bar, 30 kV에서는 방전펄스는 400개, 주파수성분 0.7 ~ 1.7 MHz, 0.6 MHz이하, 펄스폭은 10 ~ 40 ns, 60 ~ 125 ns 시간영역에 각각 분포한다.

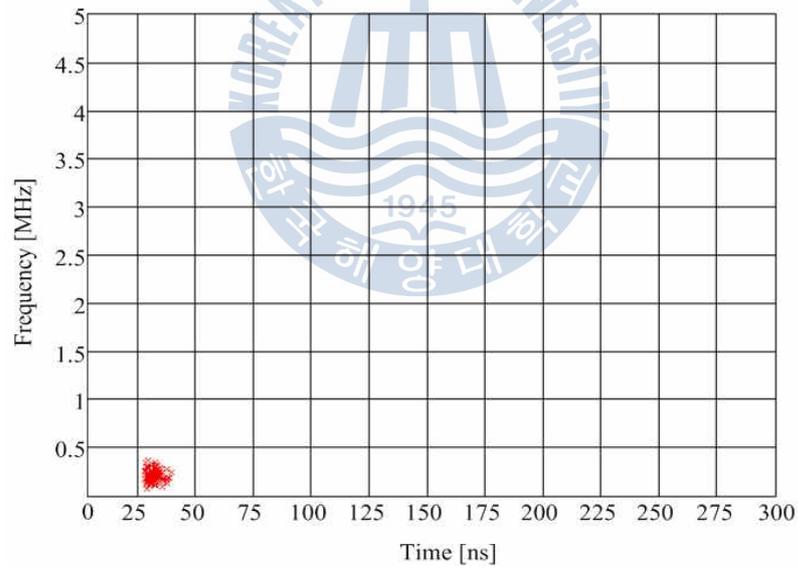
Crack의 부분방전 펄스는 그림 3.12, 그림 3.13과 같이 나타났다. 3 bar, 13 kV에서 방전펄스는 2,062개가 발생하였다. 이를 T-F map으로 분석한 주파수 성분은 0.1 MHz이하 대역에서 분포하고 펄스폭은 160 ~ 250 ns 시간에서 분포하는 것을 확인하였다. 5 bar, 26 kV에서는 방전펄스는 196개, 주파수성분 0.1 MHz이하, 펄스폭은 135 ~ 215 ns 시간영역에서 분포한다.

FP의 부분방전 펄스는 그림 3.14, 그림 3.15와 같이 나타났다. 3 bar, 21.5 kV에서 방전펄스의 수는 182개 발생하였다. 이를 T-F map으로 분석한 주파수 성분은 1.5 MHz이하 대역에서 분포하고 펄스폭은 75 ns이하, 135 ns ~ 260 ns 시간에서 분포하는 것을 확인하였다. 5 bar, 22 kV에서 방전펄스는 199개, 주파수성분 1.6 MHz이하, 펄스폭은 250 ns이하 시간에서 분포한다.





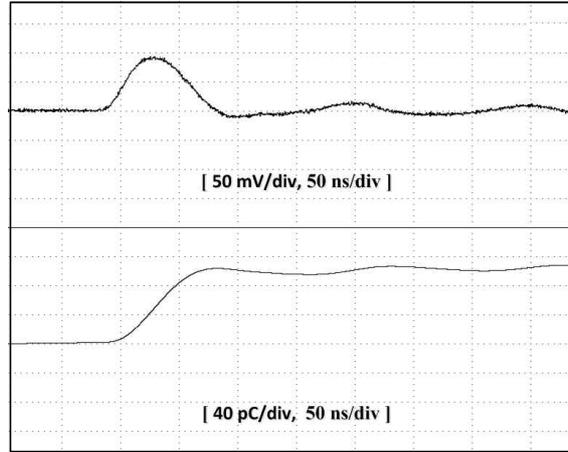
(a) 파형



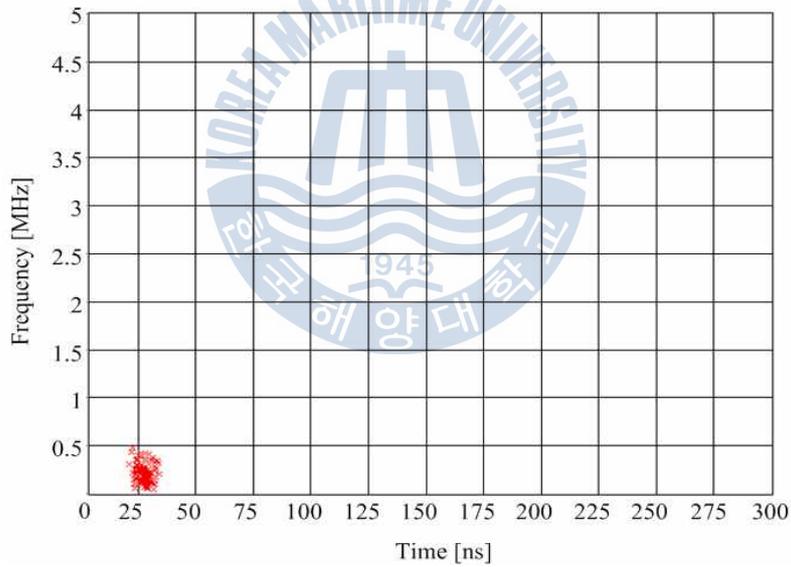
(b) T - F map

그림 3.8 POC에서 측정 및 분석 (3 bar, 17 kV)

Fig. 3.8 Measurement and Analysis in POC (3 bar, 17 kV)



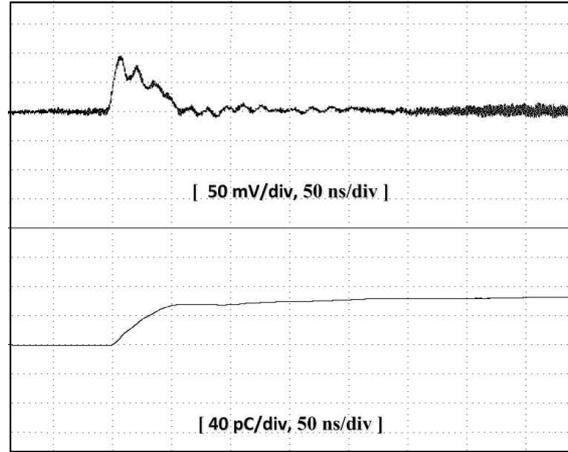
(a) 파형



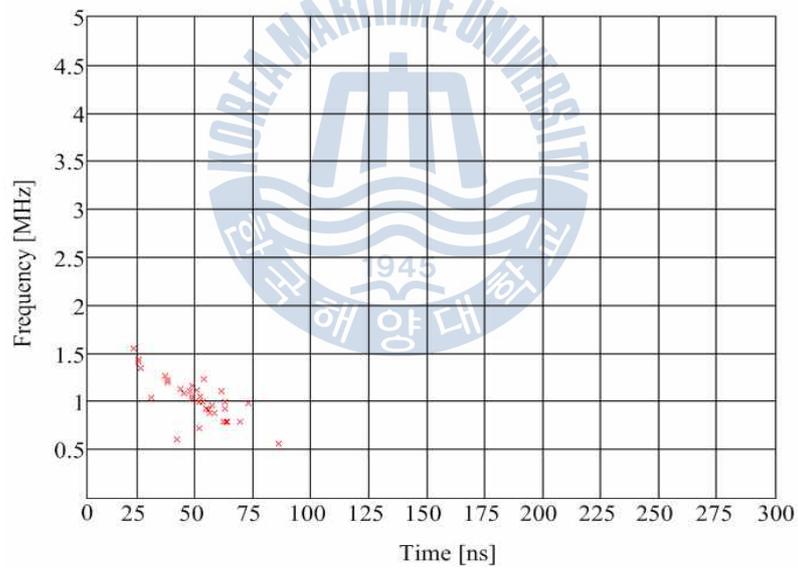
(b) T - F map

그림 3.9 POC에서 측정 및 분석 (5 bar, 30 kV)

Fig. 3.9 Measurement and Analysis of POC (5 bar, 30 kV)



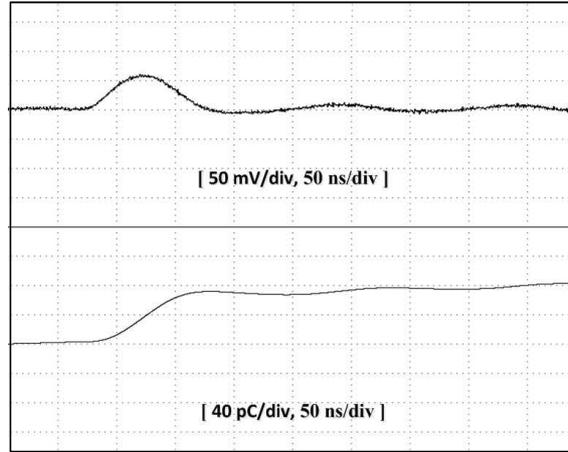
(a) 파형



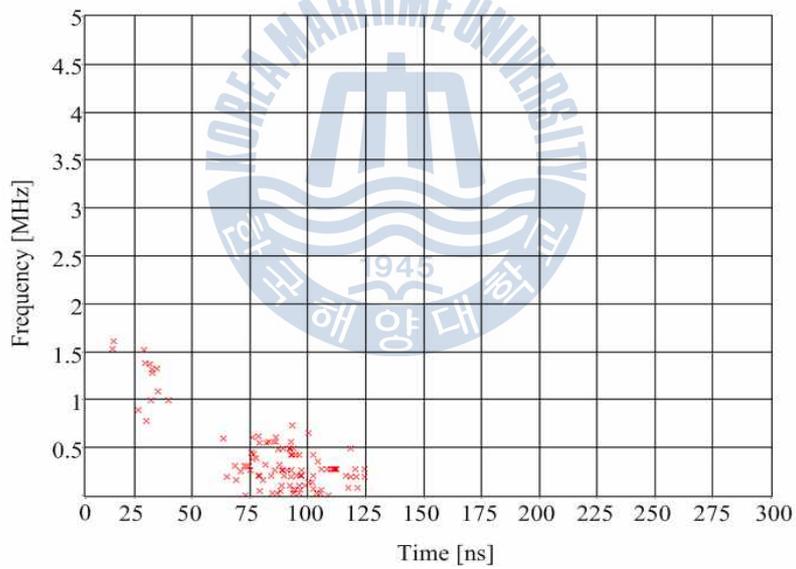
(b) T - F map

그림 3.10 POE에서 측정 및 분석 (3 bar, 17 kV)

Fig. 3.10 Measurement and Analysis in POE (3 bar, 17 kV)



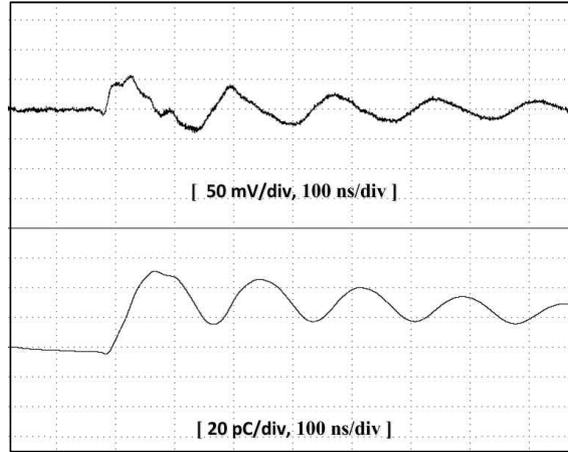
(a) 파형



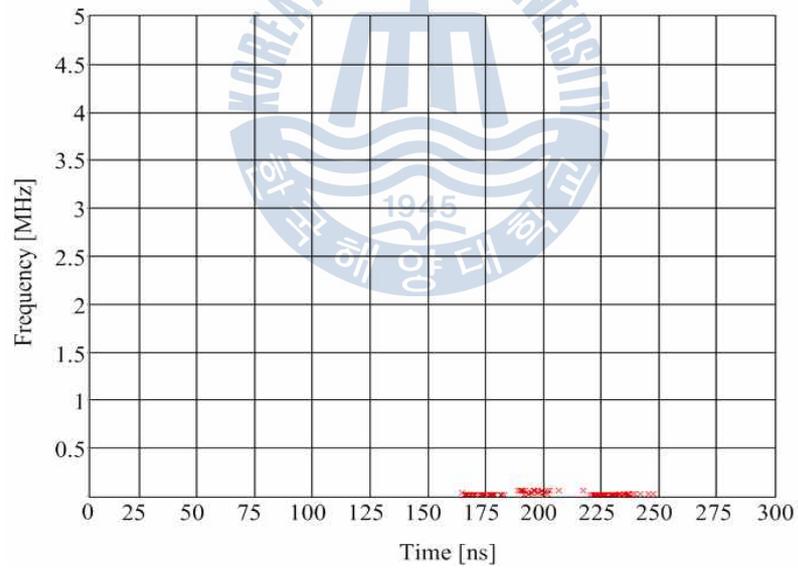
(b) T - F map

그림 3.11 POE에서 측정 및 분석 (5 bar, 30 kV)

Fig. 3.11 Measurement and Analysis in POE (5 bar, 30 kV)



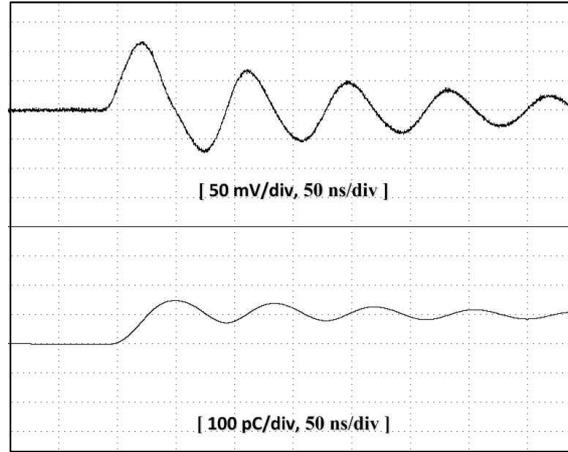
(a) 파형



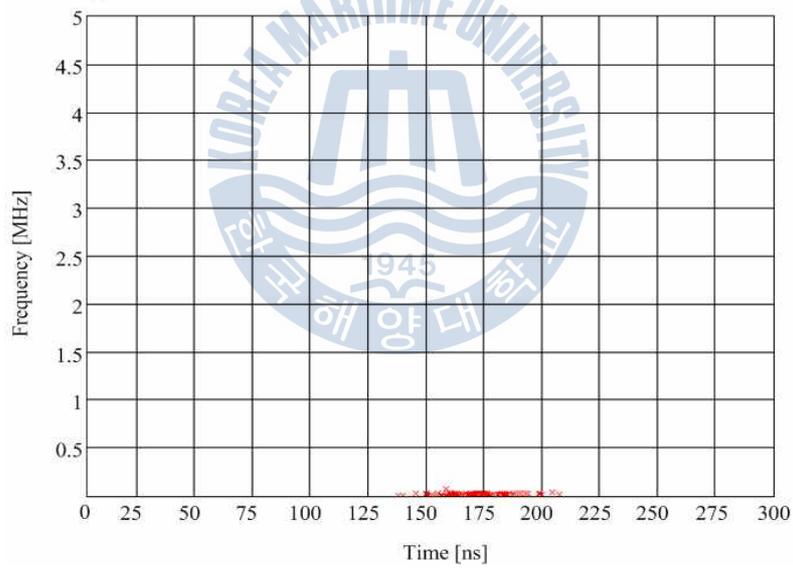
(b) T - F map

그림 3.12 Crack에서 측정 및 분석 (3 bar, 13 kV)

Fig. 3.12 Measurement and Analysis in Crack (3 bar, 13 kV)



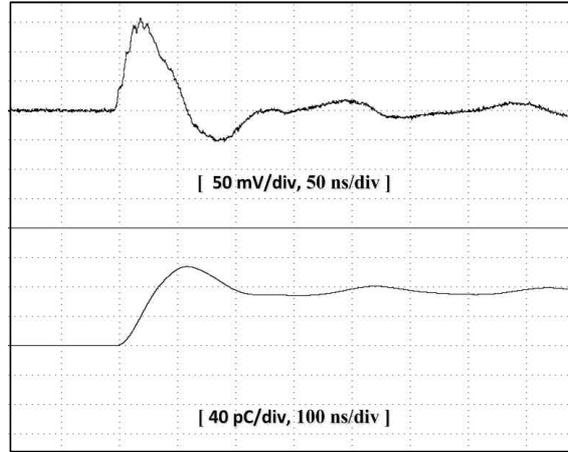
(a) 파형



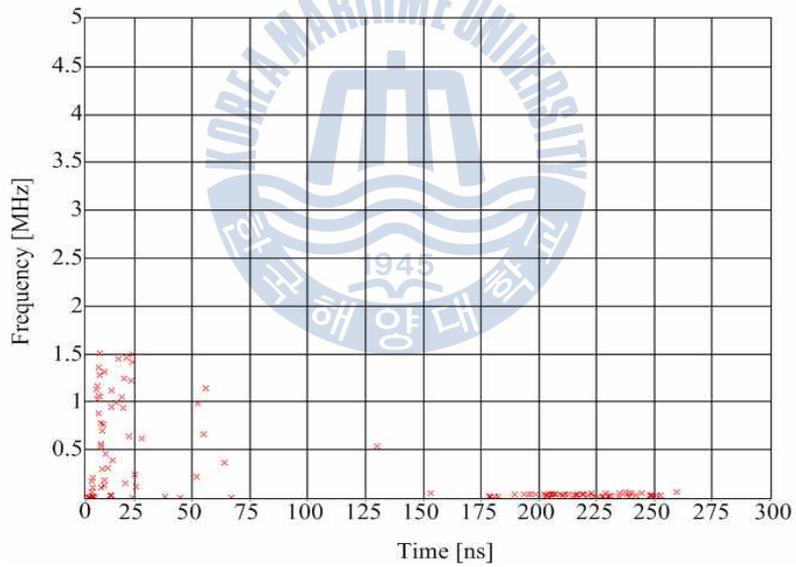
(b) T - F map

그림 3.13 Crack에서 측정 및 분석 (5 bar, 26 kV)

Fig. 3.13 Measurement and Analysis in Crack (5 bar, 26 kV)



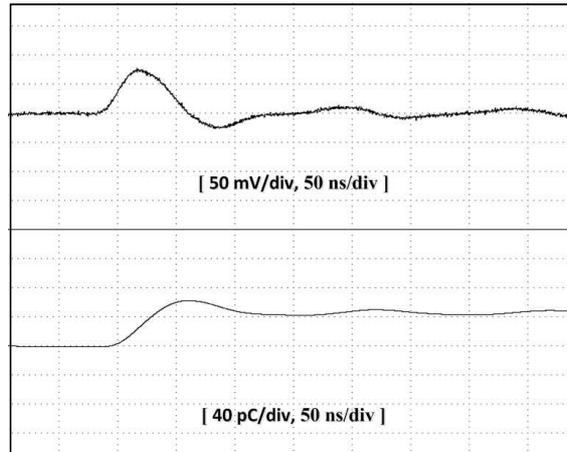
(a) 파형



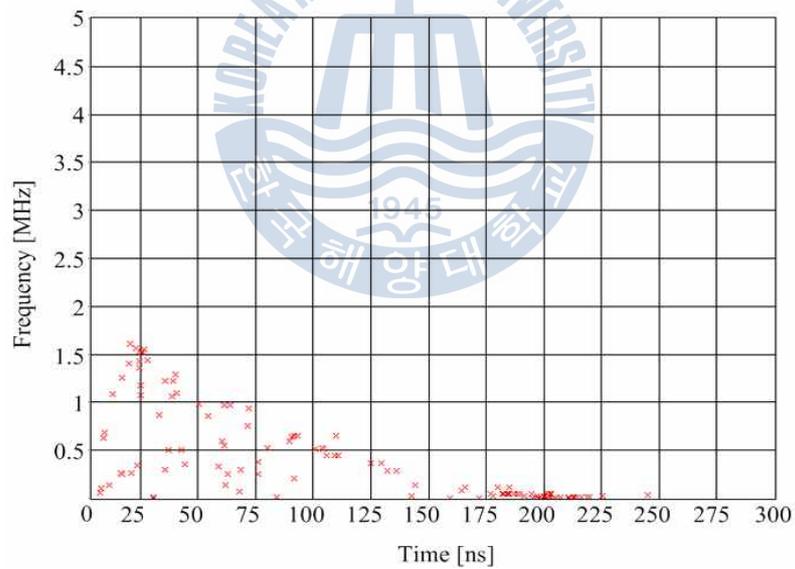
(b) T - F map

그림 3.14 FP에서 측정 및 분석 (3 bar, 21.5 kV)

Fig. 3.14 Measurement and Analysis in FP(3 bar, 21.5 kV)



(a) 파형



(b) T - F map

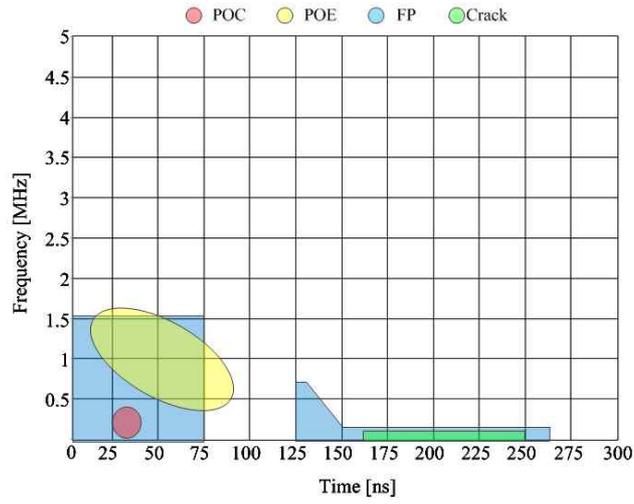
그림 3.15 FP에서 측정 및 분석 (5 bar, 22 kV)

Fig. 3.15 Measurement and Analysis in FP (5 bar, 22 kV)

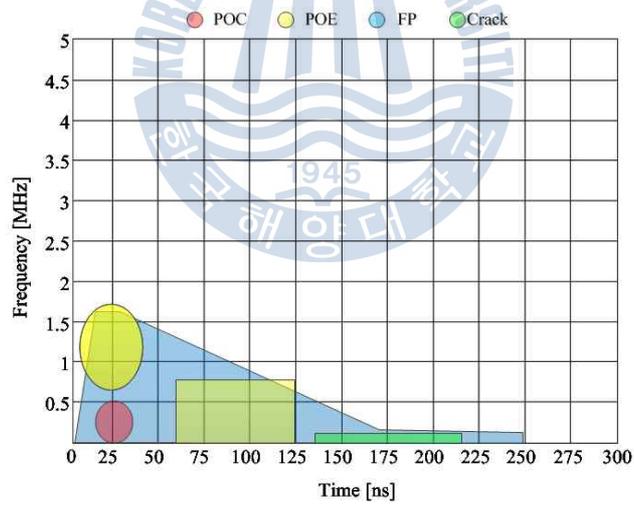
실험결과, HVDC에서 결함별 부분방전 특성을 표 3.1과 그림 3.16에 나타냈다. 기압이 증가함에 따라 POC의 클러스트는 20% 감소하였고, 펄스폭은 5 ns 앞선 영역에서 발생되었다. Crack은 클러스트가 15% 감소하였으며, 펄스폭은 약 30 ns 작게 발생되었다. FP는 3 bar에서 0 ~ 260 ns 중 75 ~ 125 ns대역을 제외한 영역에 분포하였으나, 5 bar에서는 0 ~ 250 ns 대역에 분포하였다. 또한, FP는 이를 제외한 3종의 전극계의 특성을 모두 포함하며 기압이 증가함에 따른 부분방전 발생전압은 유사하게 나타났다.

표 3.1 HVDC에서 부분방전 특성
Table 3.1 Characteristics of partial discharge in HVDC

구분 결함	기압 [bar]	전압 [kV]	펄스폭 [ns]	주파수 [MHz]
POC	3	17	25 ~ 40	0 ~ 0.4
	5	30	20 ~ 30	0 ~ 0.5
POE	3	17	23 ~ 85	0.5 ~ 1.6
	5	30	10 ~ 40 60 ~ 125	0.7 ~ 1.7 0 ~ 0.6
Crack	3	13	160 ~ 250	0 ~ 0.1
	5	26	135 ~ 215	0 ~ 0.1
FP	3	21.5	75이하 125 ~ 260	0 ~ 1.5
	5	22	0 ~ 250	0 ~ 1.6



(a) 3 bar



(b) 5 bar

그림 3.16 전극별 분포도

Fig. 3.16 Distribution chart depend on electrodes

제 4 장 결 론

본 논문에서는 HVDC를 사용하는 가스절연설비의 진단기술을 개발하기 위한 목적으로 결합별 부분방전의 특성을 분석하기 위한 기초연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

HVDC 전압을 발생시키기 위해 220 V/50 kV 변압기에서 고압다이오드로 반파정류를 하였으며 이를 캐패시터로 평활하여 HVDC 공급장치를 설계하였다. 가스절연설비에서 발생될 수 있는 도체와 외함의 표면에 돌출부, 운전중 발생될 수 있는 도전성 입자, 고체 절연물의 소손으로 인한 크랙, 결합을 모의하기 위한 전극계를 제작하였다. 지름 125 mm, 높이 86 mm인 원기둥 형태이며, 침전극의 곡률반경은 10 μ m로 전계가 집중될 수 있는 구조로 설계하였다. 평판전극은 지름 80 mm, 두께 10 mm로 둥글게 처리하여 전계의 집중을 방지할 수 있도록 설계 하였다. 부분방전 펄스 신호를 RTOS기반의 Sampling 30 Ms/s, Record length 500k, 2초간 측정이 가능한 분석시스템을 설계하여 분석하였다.

HVDC에서 부분방전 특성분석은 AC와 달리 위상을 가지고 있지 않아 분석할 수 있는 요소는 q-n, 방전펄스, 펄스 간격 등으로 제한적이다. 분석 요소 중 펄스분석을 통하여 HVDC에서 부분방전 특성을 분석하였다.

SF₆ 가스의 압력이 3 bar에서 5 bar로 증가하게 되면 전체적인 방전펄스는 상승시간이 짧은 형태로 발생되었다. 또한, 각 전극계의 특성은 다음과 같이 나타났다. POC는 전체 클러스트 영역은 약 20%로 증가하였으며, 펄스폭은 약 5 ns 앞선 영역에서 나타났다. POE는 3 bar에서는 클러스트가 0.5 ~ 1.6 MHz, 23 ~ 86 ns 영역에 분포하였으며, 기압이 증가함에

따라 두 부분에서 클러스트를 형성하였다. 다른 결함과 중첩되지 않는 범위에서 클러스트가 나타났다. Crack은 다른 결함과 달리 방전펄스폭 130 ns 이상의 갖으며, 주파수 대역은 0.1 MHz 이하에서 발생 하였다. 또한, 클러스트의 면적은 약 15% 감소하였으며, 시간영역에서 30 ns 쉬프트 되었다. FP의 특성은 본 논문에서 제시한 전극계의 특성을 포함하고 있으며, 3 bar에서는 5 bar와 달리 260 ns이하에서 75 ~ 125 ns대역을 제외한 영역에서 클러스트를 형성하였다.

최종적으로 HVDC에서 발생하는 부분방전 특성은 T-F map을 통하여 결함의 구분이 가능하다. 하지만 FP는 다른 결함들의 특성을 포함하고 있으므로 쉽게 구분이 어렵기 때문에 이 정확하게 분석 할 수 있도록 펄스 간격과 같은 요소의 연구가 추가적으로 이루어 져야 할 것이다. 본 논문에서 연구한 부분방전 특성 분석은 추후에 HVDC에서 발생하는 부분방전을 분석하는데 기초연구가 될 것이라 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] H. Q. Niu, A. Cavallini, G. C. Montanari, "IDENTIFICATION OF PARTIAL DISCHARGE PHENOMENA IN HVDC APPARATUS", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp.373-376, 2008.
- [2] R. Sarathi, G Koperundevi, "UHF Technique for Identification of Partial Discharge in a Composite Insulation Under AC and DC voltages", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 15, pp.1724-1730, 2008.
- [3] U. Schicher, M. Kuschel, J. Gorablenkow, "DPARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT ON GAS-INSULATED HVDC EQUIPMENT", International Symposium on High Voltage Engineering, pp.136-141, 2013.
- [4] Kyeho Jon, Daejeong Kim, Mikyoung Ahn, Jungnyun Kim, Bo Zhang, "STUDY ON ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENTAL EFFECTS OF HVDC OVERHEAD TRANSMISSION LINE", International Symposium on High Voltage Engineering, pp.2313-2316, 2013.
- [5] 주문노, "HVDC 가공 송전선로의 최적 도체방식 선정을 위한 전기환경 특성평가에 관한 연구", 박사학위논문, 한국해양대학교 대학원, pp.1-3, 2007.
- [6] 차현규, 이정윤, 박대원, 길경석, "LabVIEW 기반 부분방전 분석장치의 설계 및 제작", Journal of Korean institute of electronic material engineers, Vol. 25 no. 3, pp.229-235, 2012.

- [7] 최재성, "부분방전분석에 의한 몰드변압기의 절연진단에 관한 연구", 석사학위논문, 한국해양대학교 대학원, pp.9-15, 2010.
- [8] Dr F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", Butterworth, pp.23-24, 1989.
- [9] 정은식, 신중홍, 이용길, "高電壓工學", 출판부, pp.79-80, 1993.
- [10] N. Giao Trinh, "Short Notes on the Physics of Corona Discharge", IEEE/PES Special Course on Corona and Field Effects of High Voltage Transmission Lines, 1981
- [11] 宅間 董・柳父 悟 執筆, 李福熙 譯, "高電壓大電流工學", 靑文閣, 1982.
- [12] 정성계, 이덕출, "고전압 공학", 문운당, 1982.
- [13] 이정윤, 조향은, 박대원, 길경석, 오재근, "절연유중 부분방전 검출을 위한 안테나의 최적설계", Journal of Korean institute of electronic material engineers, V. 26 no. 4, pp.309-314, 2013.
- [14] 차문규, 차현수, "GIS 부분방전 신호와 도착 시간차 분석을 통한 PD 발생 위치 추적", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62 no. 9, pp.1231309-1301, 2013.
- [15] C. M. Pei, N. Q. Shu, L. Li, D. Wang, Z. P. Li, "An Acoustic Emission Method for On-lineMonitoring the Contamination - causing Flashover of Insulator", International Conference on Electrical Machines and Systems, pp.817-822, 2008.
- [16] 박대원, "음향신호 분석에 의한 전력용 유입변압기의 절연진단기술", 박사학위논문, 한국해양대학교 대학원, pp.35-38, 2011.
- [17] KS C IEC 60270, "고전압 시험방법 - 부분 방전 측정", 2006.
- [18] A. Contin, A. Cavallini, G. C. Montanari, F. Puletti, "Advnced PD Inference in on-Field Measurements, Part I Noise Rejection", IEEE

- IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 10, pp.216-224, 2003.
- [19] 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, pp.528-538, 2003.
- [20] 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.
- [21] 정승용, "가스절연 전력기기에 적용 가능한 향상된 PD 진단 기술개발 ; TF Map을 고려한 CAPD 기법 및 고장위치추정 알고리즘", 한양대학교 대학원, 박사학위논문, pp.11-13, 2009.
- [22] JOHN ESSICK, "Hands-On Introduction to LabVIEW for Scientists and Engineers SECOND EDITION", OXFORD UNIVERSITY PRESS, pp.175-184, 2012.