



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원 저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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

## 부분방전검출에 의한 절연진단 시스템의 설계 및 제작

Design and Fabrication of an Insulation Diagnosis System

by Detection of Partial Discharges



2012年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

車 現 圭

本 論文을 車現圭의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長 : 工學博士 金 潤 植 (印)

委 員 : 工學博士 吉 曜 碩 (印)

委 員 : 工學博士 徐 東 煥 (印)



2011年 12月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

車 現 圭

## 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 절연열화 .....	3
2.2 부분방전 .....	7
2.3 TF map .....	10
2.4 검출기술 .....	13
제 3 장 설계 및 제작 .....	16
3.1 가상계측 시스템 .....	16
3.2 저잡음 증폭기 .....	23
3.3 결함전극계 .....	25

제 4 장 실험 및 분석 .....	28
4.1 실험 장치 .....	28
4.2 결과 분석 .....	29
제 5 장 결    론 .....	42
참 고 문 헌 .....	44



## 그림 및 표 목차

### <그림 목차>

그림 1.1	고전압 전력기기의 사고원인	1
그림 2.1	내부 부분방전 등가회로	8
그림 2.2	교류전압에서 부분방전의 발생	8
그림 2.3	신호처리 시스템의 구조	11
그림 2.4	IEC 60270의 부분방전 검출회로	15
그림 3.1	가상계측 시스템의 순서도	17
그림 3.2	TF 맵 알고리즘	17
그림 3.3	필터 알고리즘	19
그림 3.4	부분방전 분석 알고리즘의 순서도	20
그림 3.5	부분방전 분석 알고리즘	21
그림 3.6	저잡음 증폭기	24
그림 3.7	증폭기의 주파수 응답	25
그림 3.8	평판-평판 전극계	26
그림 3.9	침-평판 전극계	27
그림 4.1	실험계의 구성	28
그림 4.2	결합회로망의 주파수 응답	29
그림 4.3	TF 맵을 이용한 신호 검출	30
그림 4.4	필터 알고리즘에 의한 신호 검출 (평판-평판 전극)	31
그림 4.5	평판-평판 전극계에서 부분방전 펄스의 위상분포( $\phi-q$ )	32
그림 4.6	평판-평판 전극계에서 부분방전 펄스의 위상분포( $\phi-q-n$ )	33
그림 4.7	평판-평판 전극계에서 부분방전 펄스의 위상분포 ( $\phi-q-n$ )	34
그림 4.8	평판-평판 전극계에서 부분방전 펄스의 위상분포 비교	35
그림 4.9	필터 알고리즘에 의한 신호 검출 (침-평판 전극)	36

그림 4.10	침-평판 전극계에서 부분방전 펄스의 위상분포( $\phi-q$ )	37
그림 4.11	침-평판 전극계에서 부분방전 펄스의 위상분포( $\phi-q$ )	38
그림 4.12	침-평판 전극계에서 부분방전 펄스의 위상분포 ( $\phi-q-n$ )	39
그림 4.13	침-평판 전극계에서 부분방전 펄스의 위상분포 비교	40

### <표 목차>

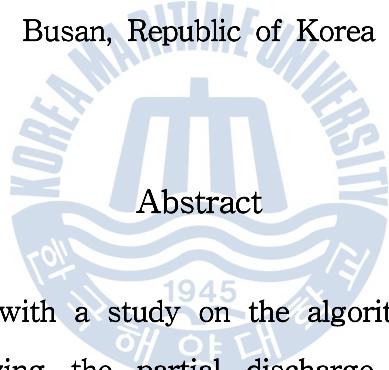
표 2.1	열화 원인 및 현상	3
표 2.2	부분방전 검출 기술	13
표 4.1	결합별 부분방전 패턴	41



# **Design and Fabrication of an Insulation Diagnosis System by Detection of Partial Discharges**

*by HYEONKYU CHA*

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



## **Abstract**

This thesis dealt with a study on the algorithm design capable of detecting and analyzing the partial discharge pulses for insulation diagnosis of power facilities. Also, the proposed a TF map(Time frequency map) algorithm which can easily detect noises and discriminate the partial discharge pulse by analyzing the alteration of amplitude by time and frequency of signal.

The measurement system consists of a coupling capacitor of coupling network, and a low noise amplifier. In order to simulate a inner discharge, a point-plane and a plane-plane electrode system were fabricated. The data acquisition module consists of a differential mode of a 2-channel analog input with the horizontal resolution of 100 MS/s,

vertical resolution of 8bit, and measurement range of  $\pm 20$  V.

The measured partial discharge pulses are input to a data acquisition device and performed through an fabricated TF map, filter application and phase resolved partial discharge analysis(PRCPDA) algorithm. The analysis graph is shown on a display unit.

The experiment for evaluating the fabricated algorithm was conducted in accordance with IEC 60270 and the characteristics of discharges such as partial discharge magnitude( $q$ ), phase distribution ( $\phi$ ), and the repetition rate( $n$ ) were also analyzed.

According to the experiment results, the noise and partial discharge pulse signal were discriminated, and  $\phi-q$  and  $\phi-q-n$  were also analyzed.

The phase distribution of partial discharge pulse at each electrode system was  $12^\circ \sim 132^\circ$ ,  $191^\circ \sim 308^\circ$  in plane-plane electrode and  $7^\circ \sim 90^\circ$ ,  $195^\circ \sim 282^\circ$  in point-plane electrode.

Therefore, it was confirmed that the proposed algorithm was efficient enough in analyzing and detecting the partial discharge pulse.

## 제 1 장 서 론

산업의 발달로 인하여 전력수요가 급증함에 따라 전력공급의 신뢰성이 요구되어지며, 절연진단기술의 필요성도 증대되고 있다. 전력기기에서 사고가 발생하면 수리와 교체에 대한 막대한 비용이 소요되며, 전력중단에 따른 사회의 기술 및 경제적 손실이 발생한다. 또한 전기화재와 인명사고 같은 2차 사고를 유발하므로 전력의 안정적인 공급 및 신뢰성 있는 운전을 위해 주기적인 점검과 온라인 진단이 요구된다<sup>[1,2]</sup>.

IEEE의 통계자료에 의하면 고전압 전력기기 사고 원인 중 85 %가 절연파괴로 파악되고 있으며 그림 1.1에 나타내었다<sup>[3]</sup>.

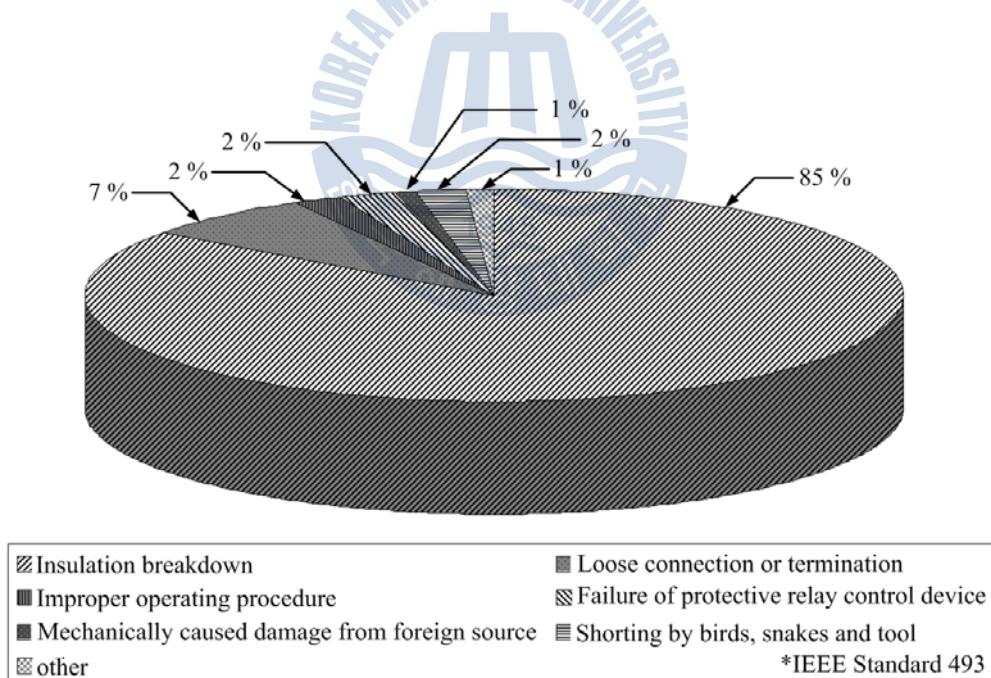


그림 1.1 고전압 전력기기의 사고원인

Fig. 1.1 Causes of accident in high voltage power facilities

절연파괴를 발생시키는 주원인으로는 열적, 기계적, 전기적 그리고 환경적 열화 요인이 있다. 이중 전기적 열화 원인으로는 부분방전(Partial discharge, PD), 침식, 트래킹 등이 있으며, 여기서 부분방전은 절연물 내부의 보이드나 연면에 국부적으로 전기적 스트레스가 집중되어 발생하는 것을 뜻한다<sup>[4,5]</sup>.

전력기기 제조시, 이물질이나 불필요한 수분 함유 또는 충격 및 진동에 의해 절연물의 결함이 생성되며, 이러한 결함부분에 전계가 집중되어 부분방전이 발생되고 절연파괴를 일으키게 된다.

부분방전 발생 초기시 방전 전하량의 크기가 미소하여 절연물의 성능에 영향을 미치지 못하지만, 장시간 지속될 경우 전기트리를 성장시키고, 방전 전하량이 급속히 증가하여, 최종적으로 절연파괴를 일으킨다<sup>[6-9]</sup>.

따라서 부분방전 측정은 전력기기의 절연물 평가에 중요한 요소이며, 기기의 절연열화와 이상유무를 감시하여 발생 가능한 사고를 조기에 발견하고 유지보수함으로써 기기의 신뢰성을 향상 시킬 수 있으므로 이들의 측정 및 분석에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다<sup>[10,11]</sup>.

본 논문에서는 전력기기의 절연진단을 위한 가상계측 시스템 설계에 대하여 연구하였다. 부분방전 펄스를 검출하고 분석할 수 있는 알고리즘을 설계하였으며, 신호의 시간 및 주파수에 대한 진폭의 변화를 분석하여 노이즈 검출에 용이하고 부분방전 펄스를 판별할 수 있는 TF 맵(Time frequency map) 알고리즘을 제안하였다. 제 2장에서는 부분방전의 발생 과정 및 각 이론에 대하여 설명하였으며, 제 3장에서는 검출계 및 가상계측 시스템을 설계하였다. 제 4장에서는 부분방전 펄스 측정 및 분석을 통한 가상계측 시스템의 신뢰도를 평가하였으며, 제 5장에서 결론을 내렸다.

## 제 2 장 이 론

### 2.1 절연열화

절연열화란 전력설비에 사용되는 절연재료가 전기적, 기계적, 열적, 그리고 환경과 같은 요인들에 장기간 노출되어 초기의 물성 값이 변질되어 절연재료의 수명이 줄어들거나 파손되는 현상을 의미하며 표 2.1에 열화 원인 및 현상을 나타내었다.

표 2.1 열화 원인 및 현상

Table 2.1 Causes and phenomena of deterioration

열화 원인		열화 현상
기계적	진동	마모
	충격	박리, 균열
열적	연속	화학적 변질
	주기적	박리, 균열, 마모
전기적	정격전압	부분방전, 침식
	이상전압	전기트리
환경적	수분	트래킹, 누설전류 증대
	화학	화학적 변질
	오손	접속불량

열화의 발생과 진전기구는 절연방식, 절연재료, 전력설비 등의 종류 및 용량에 따라 달라진다. 따라서 전력설비들의 전기절연은 일반적으로 다양한 구조체에서 전기적, 기계적, 열적, 그리고 환경적으로 발생되어지는 스

트레스를 견뎌낼 수 있게 만들어져야하며, 전력설비에 필요한 유지보수의 수준은 절연재료의 자체 절연강도와 서비스 환경에 대한 물리적 지원의 효과에 따라 달라진다. 그러므로 절연재료의 수명은 각 개별요소의 배치 상태, 다른 요소와의 상호작용, 시스템의 전기 및 기계적 무결성, 그리고 전력설비의 제조공정에 따라 달라진다.

절연물의 성능을 평가할 때 주로 열적 스트레스를 기반으로 하였으나, 최근 측정 장비의 다양성으로 인하여 전기적, 기계적, 열적 그리고 환경과 같은 요인들을 측정하여 평가하며, 아래에 절연열화 및 사고의 주요원인을 설명하였다<sup>[12-14]</sup>.

1. 기계적 스트레스는 전동기 또는 변압기와 같은 전력기기들을 스위칭 할 때 과도전류가 발생되어지며 스트레스를 받는다. 전동기의 경우 과도전류는 정상전류보다 6배 높게 나타나며, 변압기의 경우 정상전류의 10~12배 높게 과도전류가 나타난다<sup>[15]</sup>.

기기의 자기 유도 물리력은 과도전류의 제곱으로 표현되어지며, 정상상태에 비하여 전동기는 36회 이상, 변압기는 100회 이상의 물리력을 받는다. 이러한 과도현상이 빈번하게 발생한다면, 절연재료의 파손이 일어나 고장으로 이어진다. 또한 절연재료는 기계적 진동과 전원 주파수의 상승 또는 하강으로 손상될 수 있으며 이러한 상황에 노출되어 있을 때, 전동기 권선의 끝부분은 비틀림이 발생되어진다. 만약 비틀림이 절연 바니시의 결합을 깰 정도로 강하게 작용하면, 자성선층이 서로 마모되어 충간단락이 발생되어지며, 폐쇄회로에 전류 유도가 발생되어 국부적으로 열이 발생되어진다. 이 열은 빠른 속도로 주위의 절연을 저하시키고, 시간이 지남에 따라 절연을 파괴한다. 변압기도 유사하게 돌입전류 또는 고장전류를 통하여 권선결합으로 기계적 손상이 발생하고 절연을 파괴한다. 또한 전력설비들은 내·외부의 전압 또는 서지의 영향을 받는다. 절연의 물리적

파열은 큰 유도성 부하로의 변경 또는 낙뢰 때문에 생성된 서지로 인하여 발생될 수 있다. 이 일시적인 과전압은 절연재료의 이온화와 절연 실패를 야기하는 스트레스를 받게 한다.

2. 전기적 스트레스에는 코로나, 서지, 부분방전이 있으며, 이 중 코로나 방전은 대기의 절연파괴를 일으키는 임계(코로나 개시)전압에 도달하여 발생되는 전기 방전의 형태로 정의되어진다. 코로나 자체는 절연에 유해하지 않지만, 절연물의 유기물질을 산화 촉진하는 오존을 발생시킨다. 코로나에 의해 발생된 산화질소는 대기 중의 수분과 결합하여 절연을 약화시키는 물질을 생성한다.

또한 절연물 내부에 있는 보이드에 전계가 집중되면 전기를 전도하게 되고 보이드는 성장을 시작한다. 시간이 지남에 따라 보이드는 더 크게 성장하여 결국 사고를 발생시키며, 이러한 현상은 부분방전으로 알려져 있다.

3. 시간이 지남에 따라 절연을 저하시키는 환경적 스트레스의 요인으로는 수분, 오물, 먼지, 오일, 알칼리 및 산류가 있다. 수분은 불순물을 포함하고 있어 전도성을 띠게 되며, 절연물이 수분을 흡수한다면 절연 저항을 감소시키게 되며, 특히 오래된 절연물의 균열된 곳 또는 구멍을 통하여 침투한다. 이는 낮은 저항경로를 만들어 누설전류와 절연실패를 야기하는 잡재요인이다.

산업현장에서는 산과 알칼리성의 화학물질들이 자주 발견되어지며, 이것 또한 절연저항을 영구히 낮추는 역할을 한다.

주변 환경이나 베어링에서 유출된 오일은 기계의 절연 내부표면을 덮게 된다. 이것은 화학물질과 유사하게 열 분산 능력을 감소시키고 절연저항을 낮추어 열적 열화를 발생시키며 최종적으로 절연실패를 야기한다. 그리고 수분을 포함하는 오물과 먼지는 전도성이 되므로, 누설전류 및 절연

열화의 원인이며 절연의 열 분산 능력을 감소시킨다. 따라서 장비의 수명은 절연 구조의 내부에서 산소, 수분, 먼지 등의 화학 물질의 배제의 정도에 의존하게 되며, 절연물이 산업체의 오염된 대기로부터 충분히 보호되고 있다면 기기의 수명은 더 길어질 것이다.

4. 절연의 수명은 온도에 의해서도 결정되며, 절연물이 고온의 상태에서 유지되는 시간에 따라 점차적으로 열화가 일어난다. 시간-온도의 관계는 절연물의 기계적 강도를 감소시키는 비율을 결정하며, 절연물의 강도가 감소된 이후 물리적 붕괴 때문에 전기사고를 유발시킨다. 따라서 열적 스트레스 역시 절연 열화의 중요한 원인이 되며, 일반적인 열적 열화 메커니즘은 다음과 같다.

- (a) 휘발성 성분의 손실
- (b) 절연재료 분자 상호결합 및 취화하는 산화작용
- (c) 분자 열화를 야기하는 수분이 열 및 압력 등의 영향아래 절연재료 와 반응하는 가수분해의 저항
- (d) 절연물을 형성하는 구성요소에 대해 염산과 같은 물질의 열화작용으로 사고 발생

또한 절연 저항은 기본적으로 부저항 온도 계수 값을 가지며 작은 온도의 증가에도 절연저항은 크게 감소한다. 만약 전류분포가 균일하지 않다면, 절연이 약한 부분으로 더 많은 전류와 온도가 전달된다. 하지만 주위에 열을 방출시킬 수 있는 구조체가 있다면 열은 빠른 속도로 방열이 되어 안정적으로 유지되지만, 열을 빨리 방열시키지 못한다면 절연이 약한 곳은 더욱 뜨거워져 화학적 변화나 균열 등의 고장이 발생된다.

열적 열화는 절연재료의 연신율을 점차 감소시켜 크랙킹을 발생시키며

전기사고가 발생된다. 따라서 절연의 수명은 절연에 사용되는 재료뿐만 아니라 절연의 물리적 효과와 절연에 영향을 미치는 요인들에 따라 달라진다.

## 2.2 부분방전

부분방전은 절연파괴의 전구현상이라 할 수 있으며, 경미한 상태의 절연 열화는 부분방전을 측정함으로써 추정할 수 있다. 부분방전이 발생하면 방전에 따른 전하의 이동에 의해 펄스형태의 전압·전류변화가 발생하면서 전자파나 초음파가 발생한다. 또한 강한 빛과 열을 동반하므로 절연물 등의 산화에 의한 가스나 오존을 발생시킬 수 있다<sup>[16]</sup>.

고체 절연물에서의 내부 부분방전은 그림 2.1과 같이 a-b-c 모델을 이용하여 등가회로로 나타낼 수 있다. 그림 2.1에서의 I 영역은 절연물의 결합부분이며, II 영역은 정상부분이다. 보이드의 정전용량은 c로 표기되며, 이는 절연파괴 경로를 만든다. 절연물의 정전용량은 b로 나타내며 정전용량 c에 직렬로 연결되어 표현된다. 고전압이 절연물에 가해지는 전압은 V이며, 보이드에 가해지는 전압은 방전을 발생하지 않는다면 전압은 sV로 그림 2.2와 같이 나타낼 수 있다<sup>[17-19]</sup>.

전압 sV가  $V_i$ 에 도달하면 보이드 c에서 방전이 발생하며, 수 ns~수 십 ns 시간 동안 방전이 발생된 후, 전압 sV는  $V_e$ 까지 저하한다. 방전개시전압  $V_i$ 와  $V_i'$ 는 결합의 상태와 위치에 따라 크기가 결정되므로 같은 값을 가지지는 않는다. 그리고 방전이 발생하는 전압  $V_i$ 를 방전개시전압 (Discharge inception voltage, DIV)이라고 방전이 사라지는 전압  $V_e$ 를 방전소멸전압 (Discharge extinction voltage, DEV)이라 한다<sup>[20,21]</sup>.

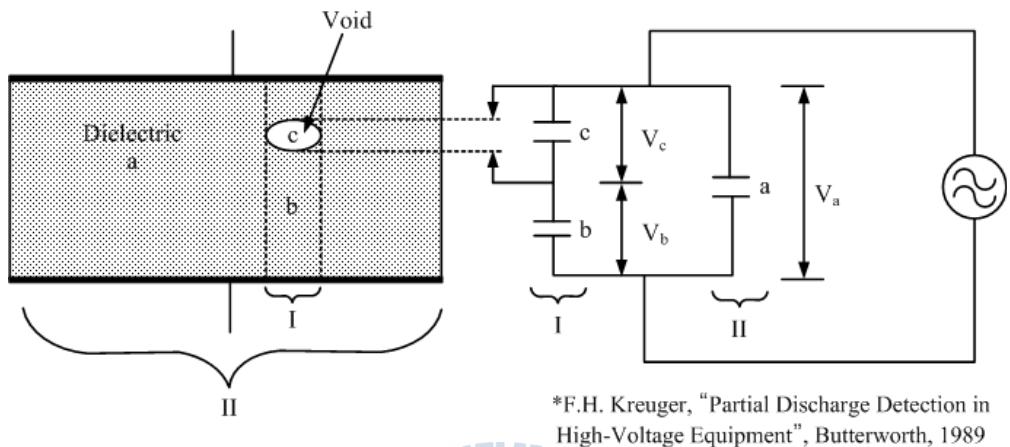


그림 2.1 내부 부분방전 등가회로

Fig. 2.1 Equivalent circuit of internal partial discharge

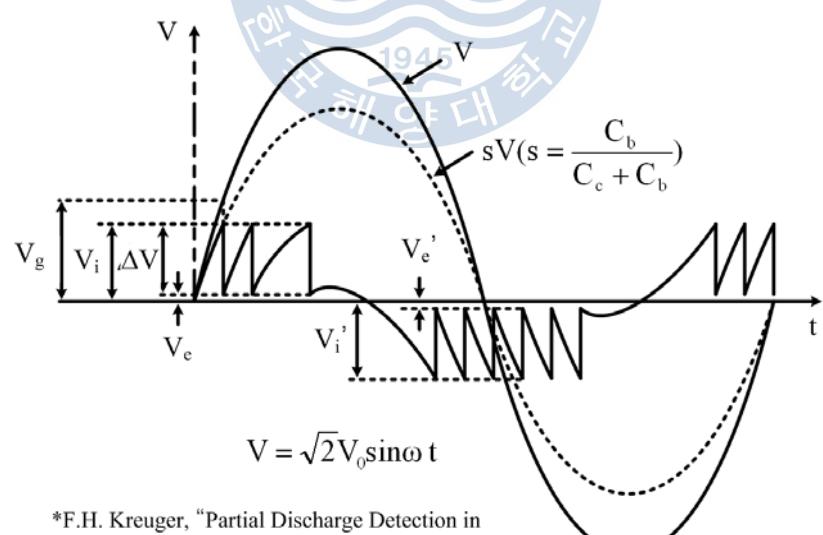


그림 2.2 교류전압에서 부분방전의 발생

Fig. 2.2 Occurrence of partial discharges in AC voltage

그림 2.2와 같은 방전파형에서 절연시료 내부에서 발생하는 방전전하량  $q_1$ 은 식 (2.3)과 같이 표현된다.

$$q_1 \approx (b + c) \Delta V \quad (2.3)$$

여기서,  $\Delta V = U - V$ 로 시료에서의 전압강하분이다. 그러나  $q_1$ 은 방전검출기로 측정이 불가능한 값이므로 방전 발생 시 리드선을 통해 흐르는 방전전하를 측정함으로써 방전의 크기를 정의한다.

이 때 방전전하량  $q$ 는

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

와 같이 표현할 수 있다.

실제 시료에서의 전압강하는  $(b \Delta V) / (a + b)$ 이고, 방전 검출기에서는  $q$ 의 값이 측정된다. 방전에 의해 소비되는 에너지는  $P$ 로 나타내며, 방전의 특성과 관련된다. 시료의 양단 전압이  $U+$ 에서  $V+$ 로 떨어질 때, 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서  $V$ 는  $U$ 에 비하여 약 10% 정도로 작기 때문에 식 (2.5)은 아래와 같이 표현할 수 있다.

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

그리고, DIV는  $U = \frac{b}{(b + c)} V_i$  와 같이 표현되는데 여기서,  $V_i$  는 시료에서 방전이 발생하는 DIV이다. 그러므로 식 (2.6)은 아래와 같이 다시 정리할 수 있다.

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

c와 비교하여 b는 매우 작은 값이므로 무시하면,

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

일반적으로 DIV는 실효값으로 표현되므로,

$$P \approx 0.7 q V_i \quad (2.9)$$

가 된다.

### 2.3 TF 맵

부분방전 현상을 측정함에 있어 외부 노이즈로 인하여 부분방전 현상을 분석하는데 어려운 점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Neural network, fuzzy, wavelet 등 다양한 방법으로 신호를 분석하고 있다.

하지만 이러한 기준의 신호를 분석하는 방법은 처리과정이 복잡하고 신호를 분석하는데 어려운 점이 있으며, 시간의 영역과 주파수 영역 중 단 하나의 영역에서만 신호를 분석하는 단점이 있다.

하지만 TF 맵은 정해진 시간동안 신호의 주파수 구성요소 또는 주파수 스펙트럼을 표현한다. 즉, 주파수 구성요소와 시간에 대한 진폭의 변화를 보여준다.

또한 기준 신호처리 방법에 비하여 메모리 작업을 감소시켜 처리속도가 빠르고 측정된 신호 크기, 극성 및 변화 등에 독립적인 장점이 있다. 또한 노이즈 검출에 용이하고, 절연물 결함의 종류를 구분할 수 있다는 장점이 있다<sup>[22-26]</sup>.

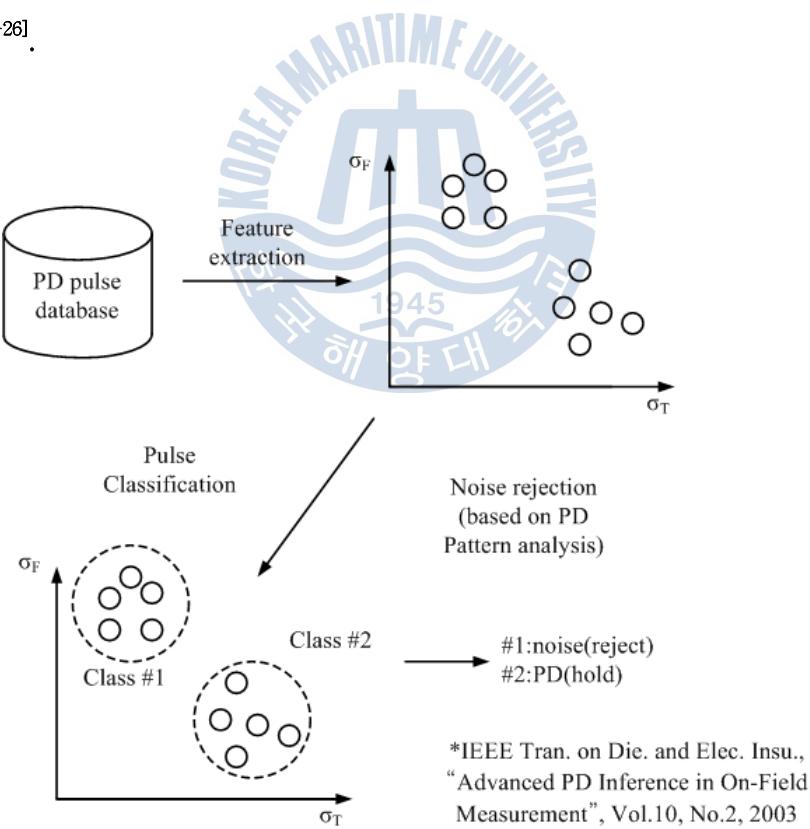


그림 2.3 신호처리 시스템의 구조

Fig. 2.3 Architecture of a signal processing system

그림 2.3은 TF 맵의 신호 처리과정을 나타내었다. 첫 번째로 부분방전 신호를 측정하고 신호의 정규화 과정을 통하여 처리한다. 정규화된 신호는 다음 식 2.10과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{s}(t) = \frac{s(t)}{\sqrt{\int_0^T s(t)^2 dt}} \quad \because (s(t) \in [0, T]) \quad (2.10)$$

펄스 파형을 이차함수로 표현하기 위하여, 통계학의 표준편차 수식을 이용하였으며, 다음 식 2.11과 2.12로 표현된다.

$$\sigma_T = \sqrt{\int_0^T (t - t_0)^2 \tilde{s}(t)^2 dt} \quad (2.11)$$

$$\sigma_F = \sqrt{\int_0^\infty f^2 |\tilde{S}(f)|^2 df} \quad (2.12)$$

여기서  $\sigma_T$ ,  $\sigma_F$ 는 시간과 주파수 도메인에서 신호의 표준편차이며,  $\tilde{s}(f)$ 는  $\tilde{s}(t)$ 의 푸리에 변환품이다.

$t_0$ 는 정규화된 신호의 무게 중심이며 다음 식 2.13과 같이 표현된다.

$$t_0 = \int_0^T t \tilde{s}(t)^2 dt \quad (2.13)$$

상기의 식을 이용하여 부분방전 신호의 시간 및 주파수에 대한 특징정보를 보존하고 TF 맵을 표현한다.

## 2.4 검출 기술

표 2.2에 대표적인 부분방전 검출 기술과 개요를 나타내었으며, 부분방전을 측정하는 방법에는 펄스형태의 전압·전류의 변화를 커플링 커패시터나 변류기(Current transformer, CT)를 이용한 전기적 측정법, 전자파에 의한 방사신호를 안테나로 검출하는 전자파 측정법, 초음파 센서를 이용한 음향측정법 그리고 가스분석법이 주로 이용된다. 이외에도 부분방전이나 아크 발생시 동반되는 빛을 검출하는 광학 측정법 등이 있다. 이들 측정법들은 모두 각자의 장단점과 적용이 용이한 변압기의 종류나 구조가 정해져 있으므로 측정 대상에 알맞은 측정법을 선정하는 것이 중요하다.

표 2.2 부분방전 검출 기술

Table 2.2 PD detection techniques

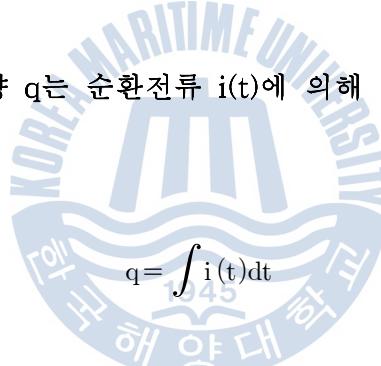
검출 기술	개 요
전기적 검출법	부분방전에 의해 발생하는 펄스성 방전전류를 CT, 커플링 커패시터 등 전기적 장치를 이용하여 검출
전자파 검출법	부분방전시 발생하는 방사전자파를 안테나 등으로 전기적 신호로 변환하여 검출
광학적 검출법	국부과열에 의해 발생한 적외선이나 부분방전에 의한 발광 등을 수광소자 및 광센서 등으로 검출
기계적 검출법	부분방전에 의해 변압기 내부압력이 급격하게 증가할 경우 압력의 변형을 외형 게이지로 검출
가스 분석법	변압기 내부에서 발생한 부분방전에 의한 가스를 분석하여 절연유 및 변압기의 열화 상태를 진단

본 연구에서는 절연물에서 발생한 부분방전을 검출하고 온라인 절연진단을 위한 방법으로 IEC 60270에 따른 전기적 검출방법을 적용하였다.

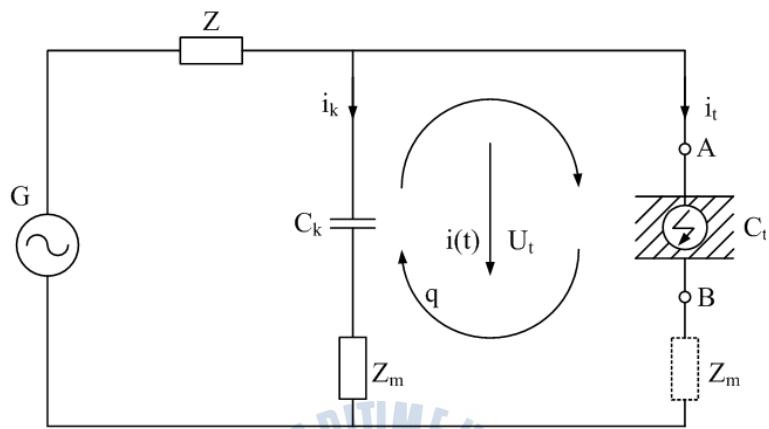
IEC 60270에 의하면 부분방전 검출의 전기적 등가회로는 그림 2.14와 같이 나타낼 수 있으며, 시료의 절연열화로 인해 발생된 부분방전 펄스를 커플링 커패시터와 검출임피던스를 이용하여 측정하는 방법이다.<sup>[27-29]</sup>

결합의 정전용량  $C_t$ 와 함께 커플링 커패시터  $C_k$ 가 외부 결합을 통하여 연결되어 있는 경우, 결합 정전용량  $C_t$ 에서의 전하 이동은 외부 커플링 커패시터  $C_k$ 에도 반영되어지며, 부분방전 전류 펄스에 의한 ‘겉보기 전하량  $q$ ’ 역시 결합 정전용량  $C_t$ 와 병렬로 연결된 커플링 커패시터  $C_k$ 로 전달된다.

전달되어지는 전하량  $q$ 는 순환전류  $i(t)$ 에 의해 다음 식 2.14와 같이 나타낼 수 있다.


$$q = \int i(t) dt \quad (2.14)$$

IEC Standards (IEC 60270) 에서는 부분방전 전류 임펄스를 측정하기 위해서 광대역 밴드 패스 필터 ( $30\text{ kHz} \leq f_1 \leq 100\text{ kHz}$ ,  $f_2 \leq 500\text{ kHz}$ ,  $100\text{ kHz} \leq \Delta f \leq 400\text{ kHz}$ ) 또는 협대역 밴드 패스 필터 ( $9\text{ kHz} \leq \Delta f \leq 30\text{ kHz}$ ,  $50\text{ kHz} \leq f_m \leq 1\text{ MHz}$ ) 를 사용하도록 권장하고 있다.



$G$  = Voltage source

$i(t)$  = PD current pulses

$I_{k,t}$  = Displacement current

$Q$  = Transferred charge

$U_t$  = Voltage at parallel-connected capacitors

$C_t$  = Test object capacitance

$C_k$  = Coupling capacitor

$Z$  = Voltage source connectors

$Z_m$  = Measuring impedance

\*IEEE Tran. on Die. and Elec. Insu., "Procedure for Identification and Localization of Dangerous PD Sources in Power Transformers", Vol.12, No.5, 2005

그림 2.4 IEC 60270의 부분방전 검출회로

Fig. 2.4 PD detection circuit specified in the IEC 60270

## 제 3 장 설계 및 제작

제 3 장에서는 노이즈와 부분방전 펄스를 판별할 수 있는 TF 맵 및 부분방전 펄스를 분석하는 알고리즘을 제안하고, 미소한 부분방전 신호의 증폭을 위해서 낮은 잡음 특성을 가지는 저잡음 증폭기를 설계하였다. 사용하는 데이터 취득 모듈의 특징으로는 수평분해능 100 MS/s, 수직분해능은 8 bit, 측정범위  $\pm 20$  V, 2채널 차동모드의 아날로그 입력부로 구성된다. 또한 설계한 알고리즘 모듈을 적용 평가하기 위하여 내부 방전을 모의할 수 있는 평판-평판 및 침-평판 전극계를 제작하였다.

### 3.1 가상계측 시스템(Virtual Instrument System, VIS)

가상계측 시스템은 다음 그림 3.1과 같이 TF 맵, Filter 그리고 부분방전 분석 VI(Virtual Instrument)로 구성되어진다.

알고리즘의 실행순서는 첫 번째, TF 맵 VI를 이용하여 신호를 측정하고 신호의 특징정보를 연산하여 분류된 클러스터를 확인한다.

두 번째, Filter VI에서 필터 topology (베셀, 체비세프, 버터워스, 타원), 필터의 종류, 필터의 탭 및 차수 등을 설정하여 측정되는 신호의 대역이 사용자가 원하는 신호인지 확인한다.

최종적으로 부분방전 분석 VI를 사용하여 PD 신호를 측정하고  $\Phi-q$  및  $\Phi-q-n$  분석을 수행한다.

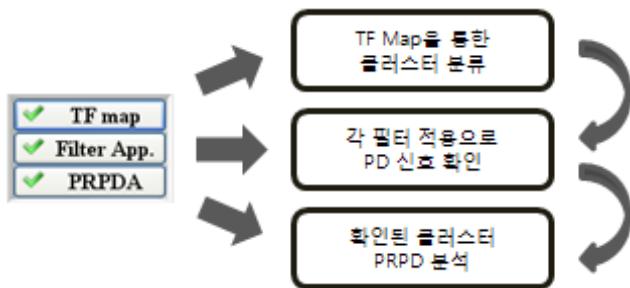


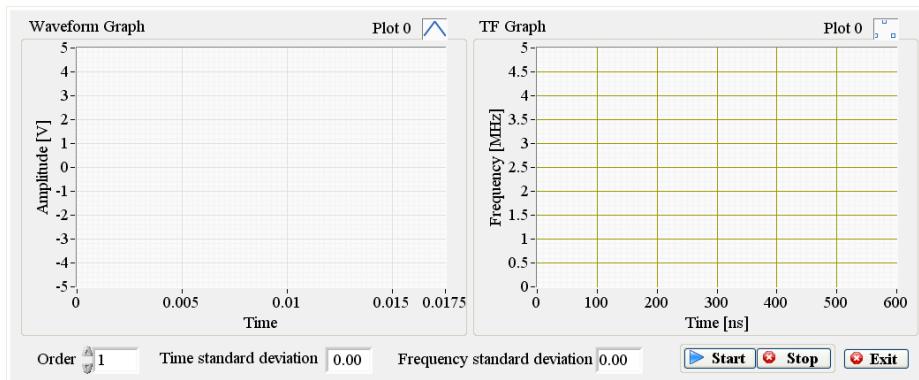
그림 3.1 가상계측 시스템의 순서도

Fig. 3.1 Flow chart of virtual instrument system

### 3.1.1 TF 맵 및 Filter VI

측정하는 신호의 클러스터를 형성시키기 위하여 이론에서 설명한 TF 맵의 수식을 사용하여 측정 신호를 정규화하고, 정규화된 신호의 표준편차 및 주파수 영역으로 변화시킨 후 주파수 영역에서의 표준편차를 계산하는 VI를 설계하였다.

설계한 VI는 그림 3.2에 나타내었으며, 측정부에서 실시간으로 신호를 측정하며, 연산부에서 분석하여 신호의 특징 정보를 보존하고 화면에 출력한다. 설계한 VI는 다음 그림 3.2에 나타내었다.



(a) 프런트페널

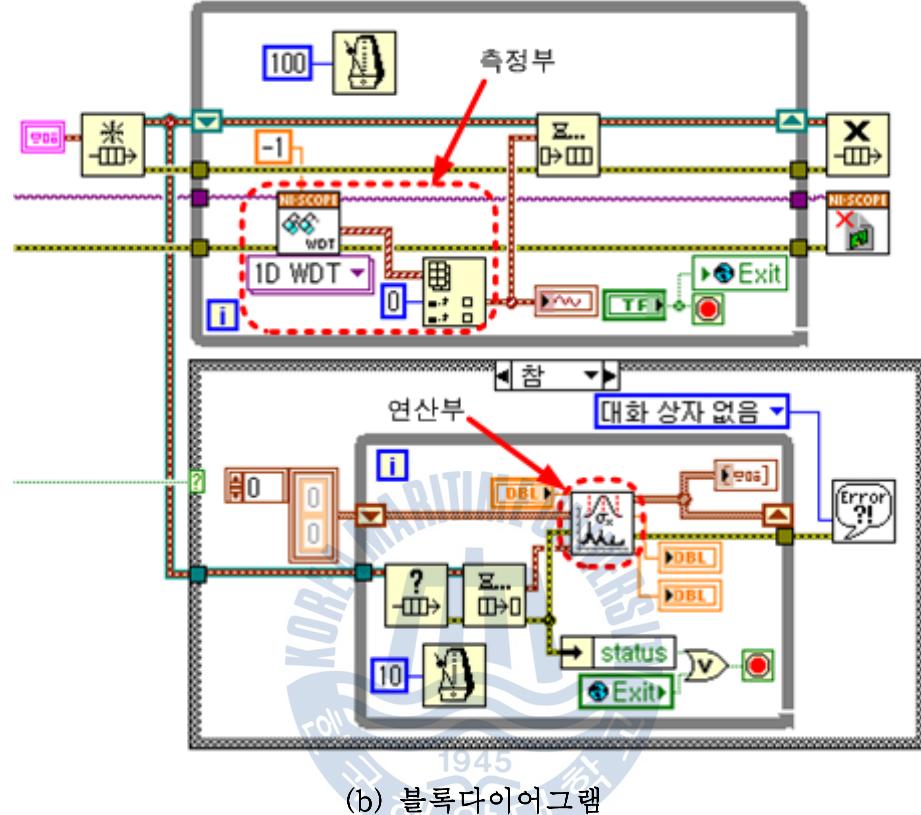
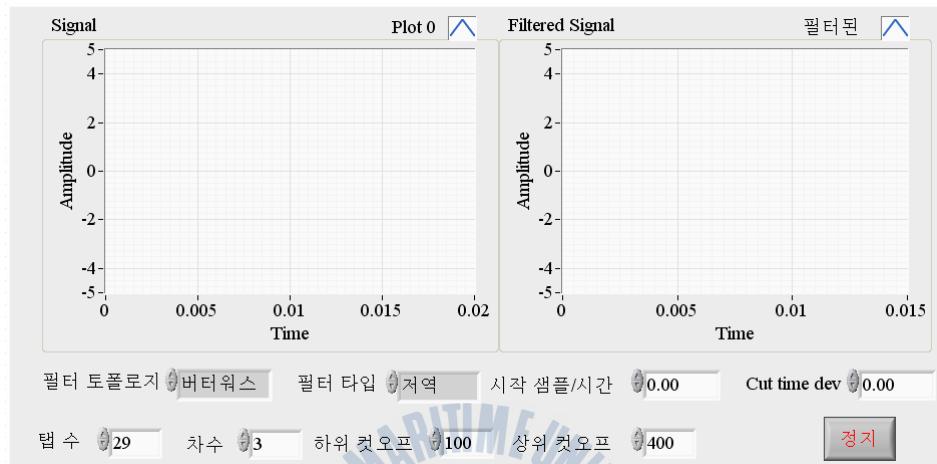


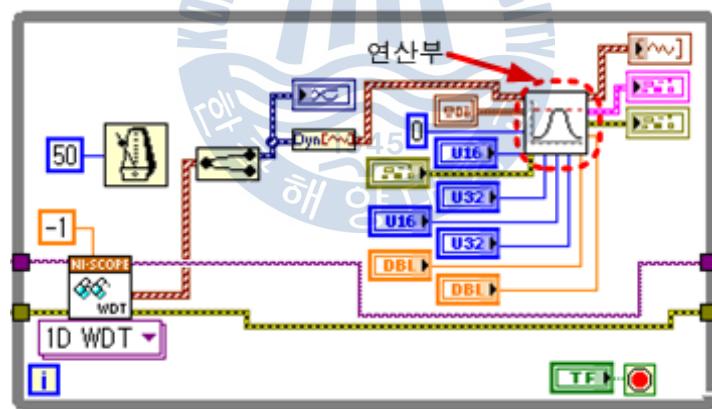
그림 3.2 TF 맵 알고리즘

Fig. 3.2 Algorithm for TF map

설계한 Filter VI를 그림 3.3에 나타내었으며, 유한 임펄스 응답(Finite Impulse Response, FIR) 필터 및 무한 임펄스 응답 (Infinite Impulse Response, IIR) 필터를 선택할 수 있다. 또한 각 필터의 종류, 차수 및 텁수 등을 설정이 가능하게 설계하였으며 사용자가 설정한 필터의 종류 및 특성에 대해 연산된 신호를 확인할 수 있고, 취득하고자하는 클러스터의 신호를 선택할 수 있다.



(a) 프런트페널



(b) 블록다이어그램

그림 3.3 필터 알고리즘

Fig. 3.3 Algorithm for filter

### 3.1.2 부분방전 분석 VI

부분방전 신호를 측정하고 PRPD 분석을 위해 VI를 설계하였다. 부분방전 측정 및 분석 알고리즘은 부분방전 신호의 정확한 측정과 실시간  $\Phi$ - $q$  분석을 위하여 Multi-threading 기능을 가지는 ‘Producer-Consumer’ 구조를 사용하였다. 측정이 끝난 후 신호의 위상( $\Phi$ ), 크기( $q$ ) 그리고 횟수( $n$ )에 대해 빠르고 일률적인 처리를 위하여 Dynamic-sequence 기능을 가지는 ‘Standard State Machine’ 구조를 사용하였다<sup>[30,31]</sup>. 또한 알고리즘의 수행 순서는 그림 3.4에 나타낸 것과 같은 순서로 수행되어진다.

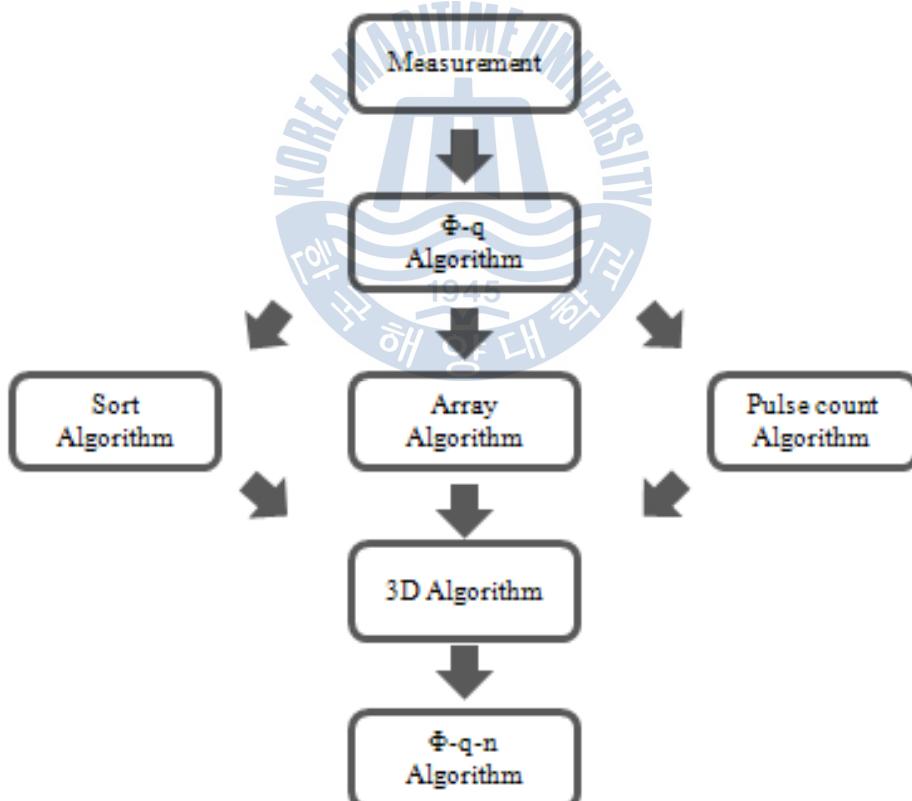


그림 3.4 부분방전 분석 알고리즘의 순서도

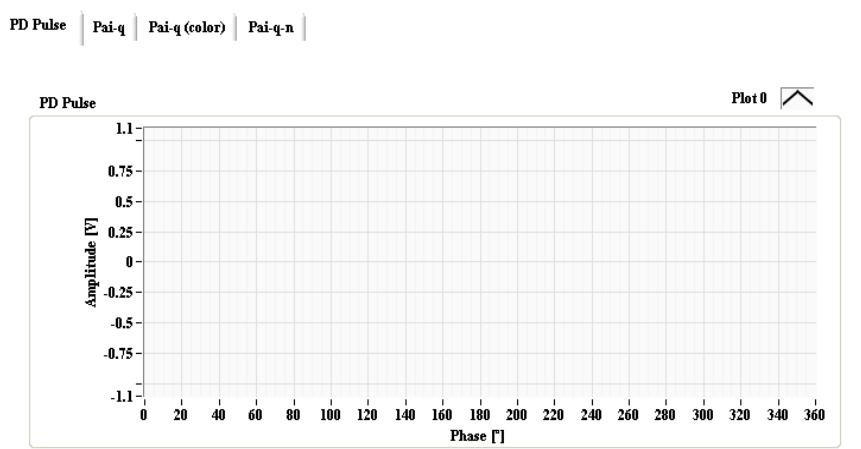
Fig. 3.4 Flow chart of a PD analysis algorithm

부분방전 알고리즘은 그림 3.5(b)의 신호 측정부에 의해  $0^\circ \sim 360^\circ$  위상 까지 한 주기 동안 발생한 부분방전 신호를 수집하고 분석한다. 각 주기 단위의 신호는 104000 window로 표현하고 2 window의 간격은  $0.0034615^\circ$ 로써, 부분방전 신호를 정밀하게 측정 할 수 있다.

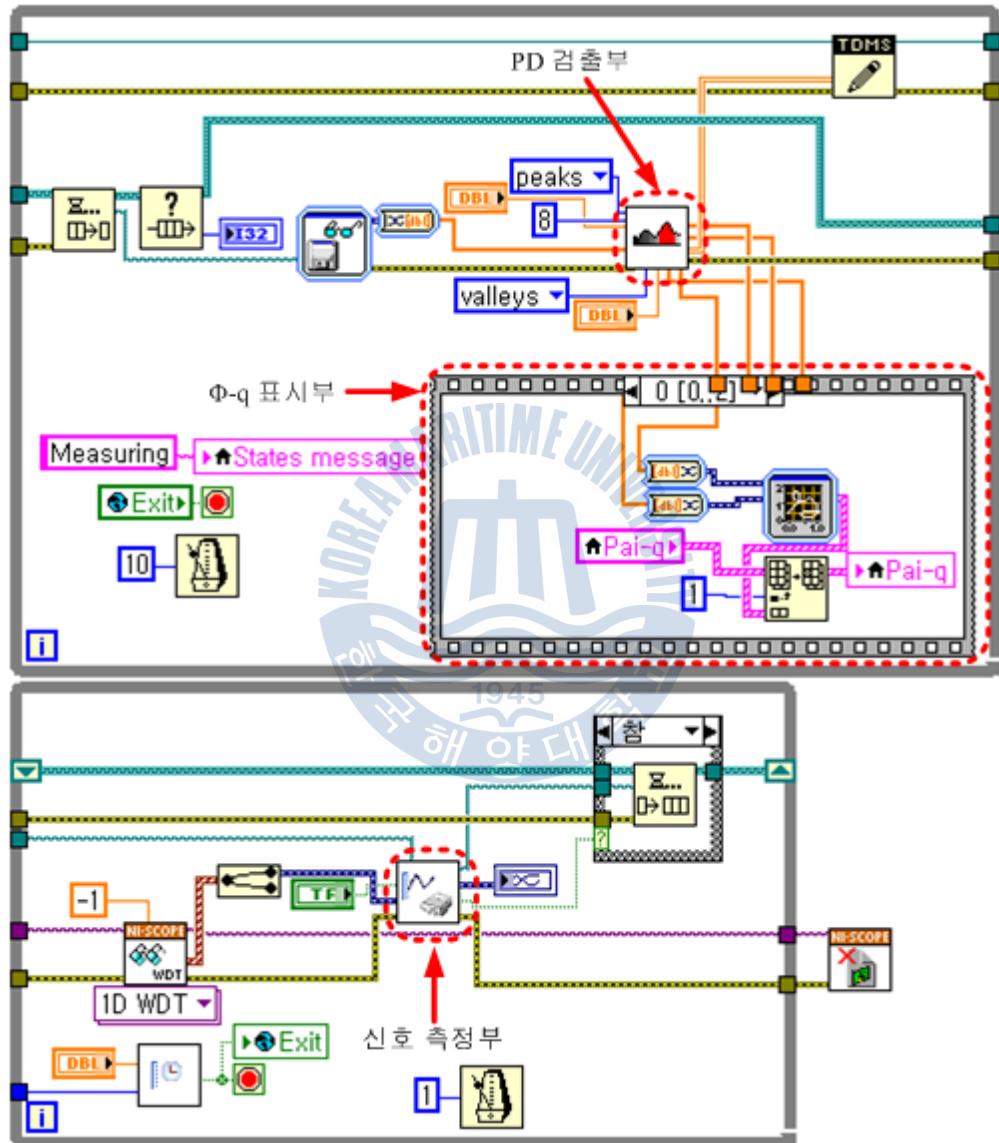
수집된 신호는 그림 3.5(b)의 Peakholder 기법을 이용하여 설계한 PD 검출부 Sub VI를 통해 연산되고 실시간으로  $\phi-q$  표시부에 의하여 프린트페널의 그래프에 표현되어지며 연산된 데이터는 누적하여 저장한다.

데이터 수집이 끝난 후, 누적 저장된 신호를 재호출하여 그림 3.5(c)의 정렬 및 카운팅, 방전량 처리 및 총 방전횟수 카운트 Sub VI를 통하여 각각의 수집된 데이터를 연산하고 배열화 한다. 또한  $\phi-q-n$  그래프를 연산하기 위해 및 3D 처리 Sub VI를 사용하여 연산수행하며, 최종적으로 그림 3.5(d)의 연산 알고리즘에 따라  $\phi-q-n$  결과를 프린트페널에 나타내며, 각각의 그래프들은 그래픽파일로 저장하게 된다.

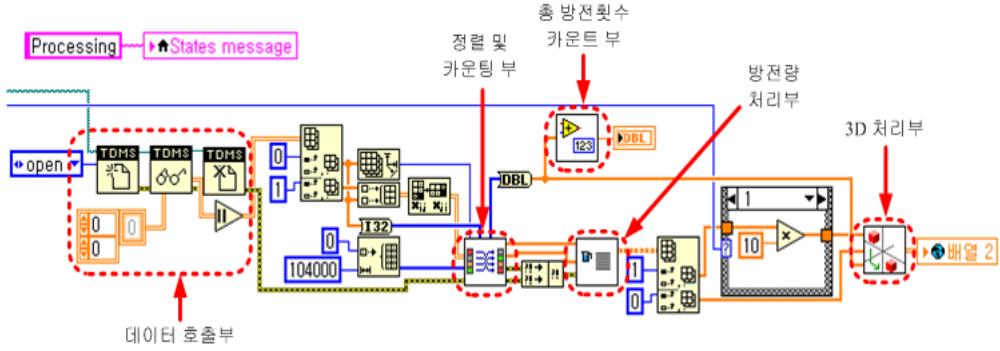
각각의 알고리즘은 연산 수행의 효율성을 높이고자 Sub VI를 이용하여 부분방전 신호 분석에 최적화하였다.



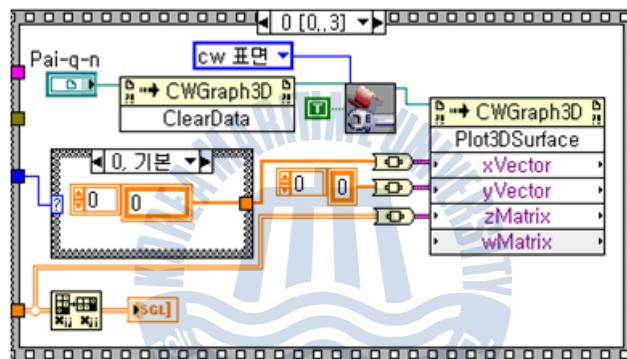
(a) 프린트 패널



(b) 측정부



(c) 연산 처리부

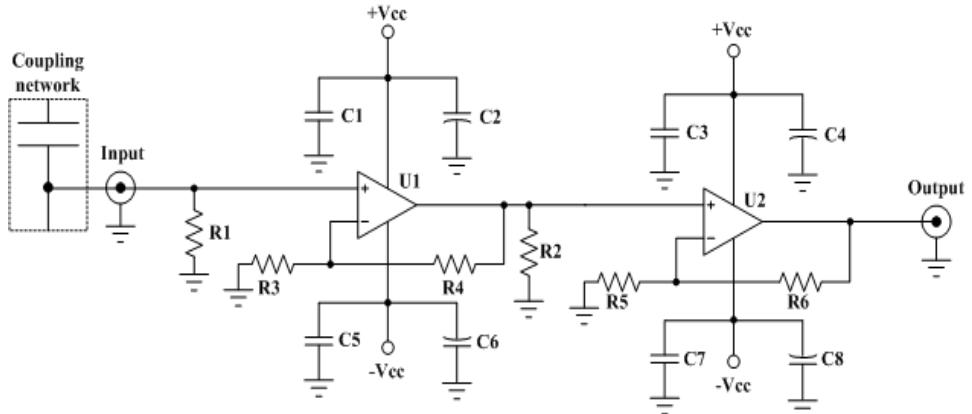


(d) 표시부

그림 3.5 부분방전 분석 알고리즘  
Fig. 3.5 Algorithm for PD analysis

### 3.2 저잡음 증폭기

부분방전 신호는 pC 단위로 그 크기가 매우 미소하고 10 ns ~ 20 ns 정도의 빠른 상승시간을 가진다. 이러한 미소 PD 신호의 측정을 위해서는 넓은 주파수대역의 저잡음 증폭기를 출력단에 접속해주어야 한다. 실험을 위해 설계 및 제작한 증폭기는 충분한 주파수 대역과 낮은 잡음특성을 갖도록 그림 3.6과 같이 연산증폭기(THS-3001, DC ~ 420 MHz)를 2단으로 구성하였다.



(a) 회로도

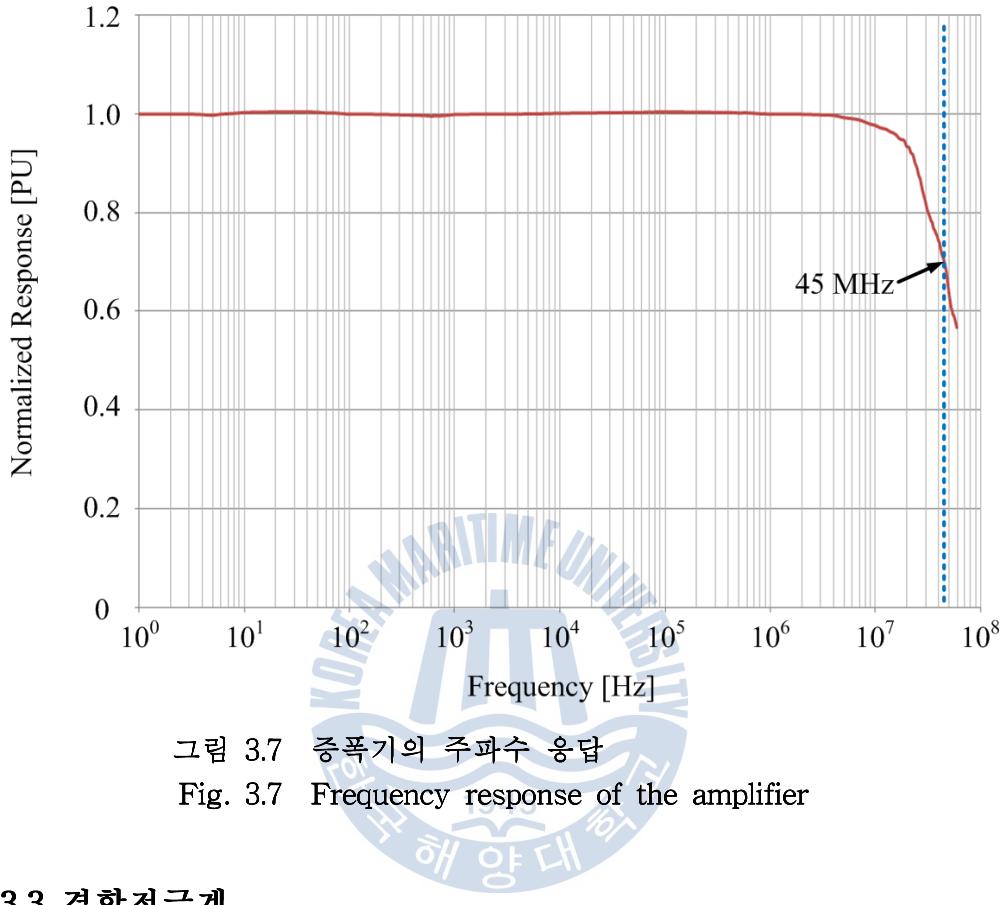


(b) 사진

그림 3.6 저잡음 증폭기

Fig. 3.6 Low noise amplifier

함수 발생기를 이용하여 제작한 증폭기의 주파수 응답을 평가하였으며, 응답특성은 그림 3.7에 나타내었다. 평가 결과, 증폭기의 전압이득은 40 dB이며,  $-3\text{ dB}$  주파수 대역은 DC~45 MHz로 10~20 ns의 상승시간을 가지는 부분방전 신호를 검출하는데 적합함을 알 수 있다.



### 3.3 결합전극계

절연결합을 모의하기 위한 평판-평판 및 침-평판 전극계는 그림 3.8, 그림 3.9와 같다. 침전극의 끈률반경은  $10 \mu\text{m}$ 이며, 평판 전극은 지름 50 mm, 두께 13 mm 및 지름 60 mm, 두께 15 mm의 텡스텐-구리합금 재질로 가장자리를 둥글게 처리하여 전계의 집중이 발생하지 않도록 제작하였다. 또한 평판-평판, 침-평판 전극 사이에는 두께 3 mm의 난연성 에폭시 글라스 적층판(Flame retardant epoxy glass laminate)을 삽입하였다.

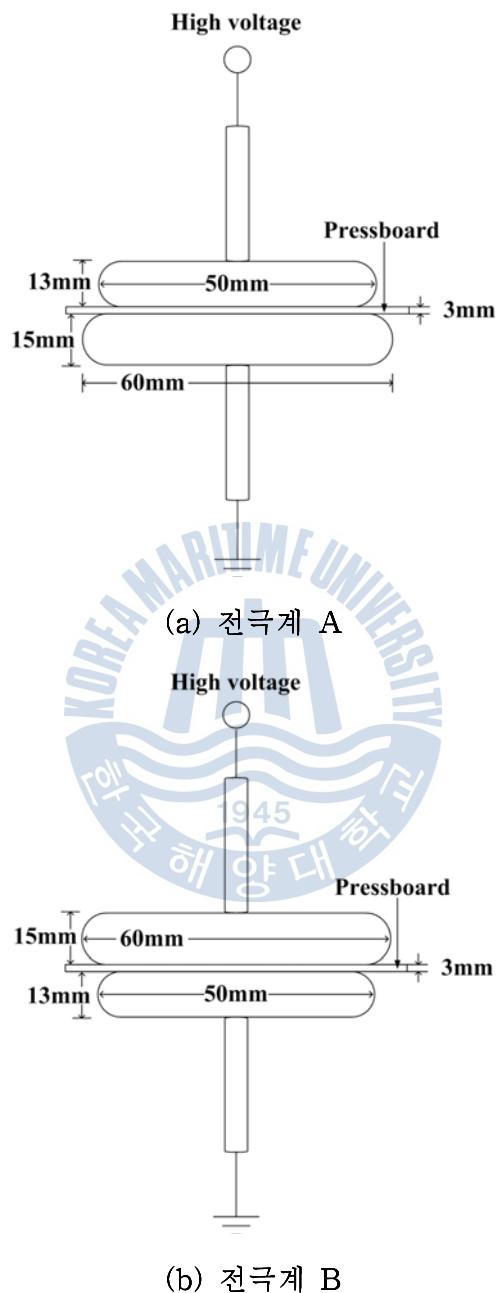


그림 3.8 평판-평판 전극계  
Fig. 3.8 Plane-plane electrode systems

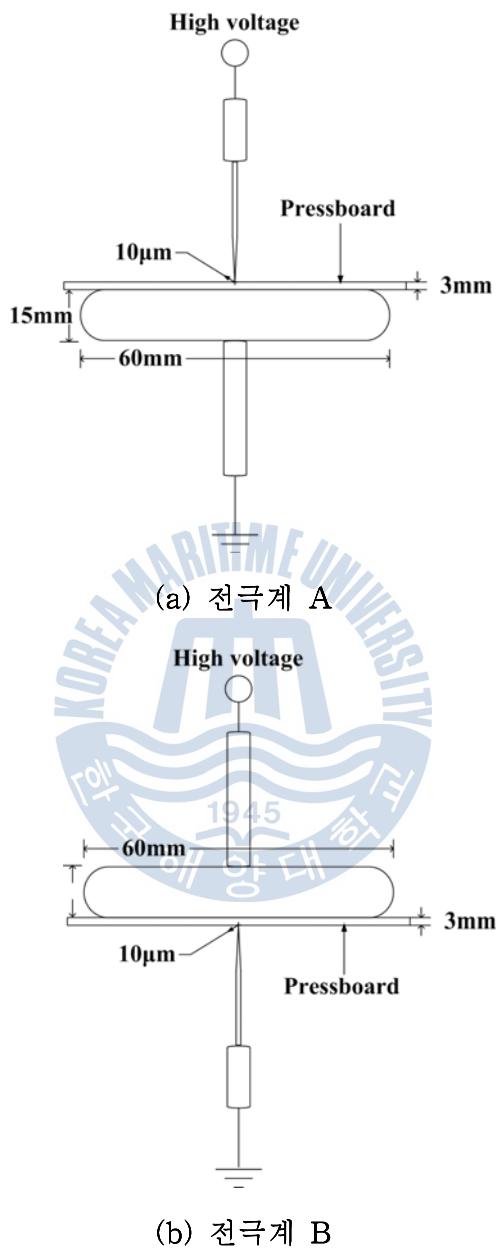


그림 3.9 침-평판 전극계  
Fig. 3.9 Point-plane electrode systems

## 제 4 장 실험 및 분석

부분방전 펄스의 위상분포는 절연열화를 판단함에 있어 결합의 형태를 파악할 수 있다. 따라서 IEC 60270에 의거하여 결합에 따른 부분방전을 측정하고 위상 분포를 확인함으로써, 설계한 부분방전 분석 알고리즘의 신뢰도를 평가하였다.

### 4.1 실험 장치

실험계의 구성은 그림 4.1과 같으며 실험은 온도 ( $23^{\circ}\text{C}$ ), 습도 (31 %)에서 수행하였다.

PD free 고전압 발생장치를 사용하여 최대 AC  $5\text{ kV}_{\text{rms}}$ 까지 조정하며 부분방전을 발생시켰으며, 부분방전의 검출에는 AC  $25\text{ kV}_{\text{rms}}$ 까지 방전이 발생하지 않는 커플링 커패시터(Ceramic capacitor type 07761 1 nF)를 사용하였다. 또한 전압의 검출에는 1000:1 분압기를 사용하였다.

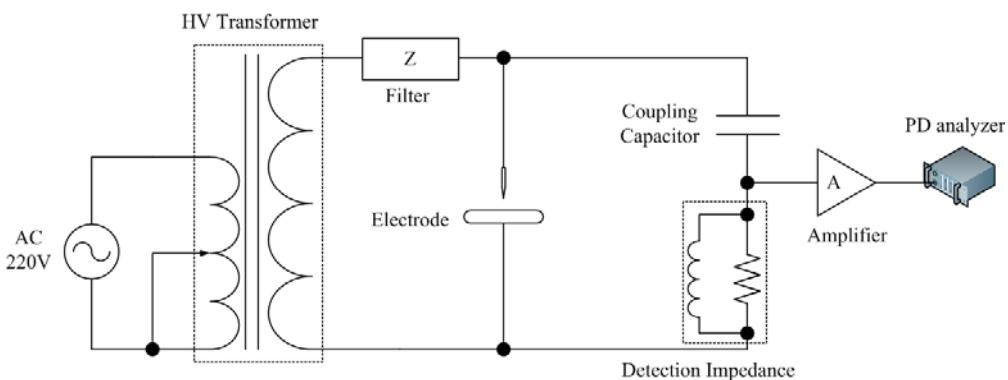


그림 4.1 실험계의 구성

Fig. 4.1 Configuration of the experimental system

부분방전은 고주파 전류펄스 형태로 발생하므로 검출임피던스와 증폭기의 입력임피던스로 구성되는 결합회로망이 필요하다. 결합회로망은 상용 주파수는 차단하고 고주파 성분만을 검출하는 고역통과필터의 역할을 하며 주파수 응답의 결과를 그림 4.2에 나타내었다. -3 dB cut-off frequency는 150 kHz로 부분방전을 충분히 검출할 수 있으며, 상용주파수인 60 Hz는 약 70 dB 감쇄시켜 차단하는 것을 확인하였다.

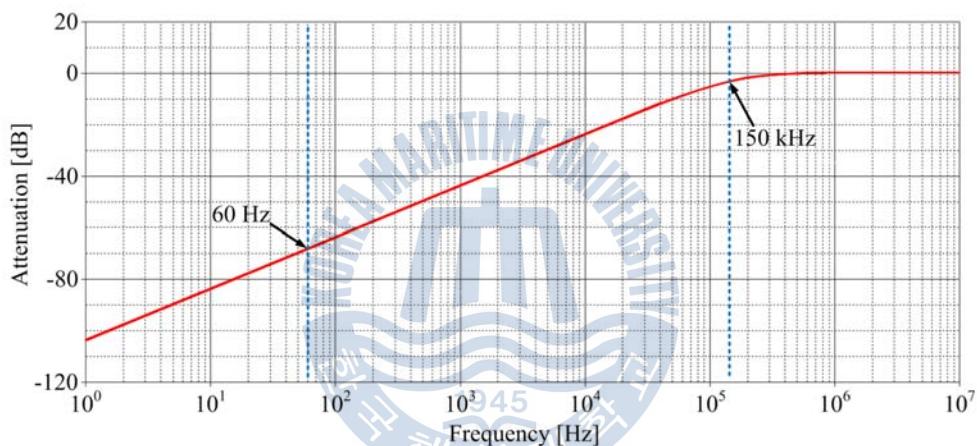


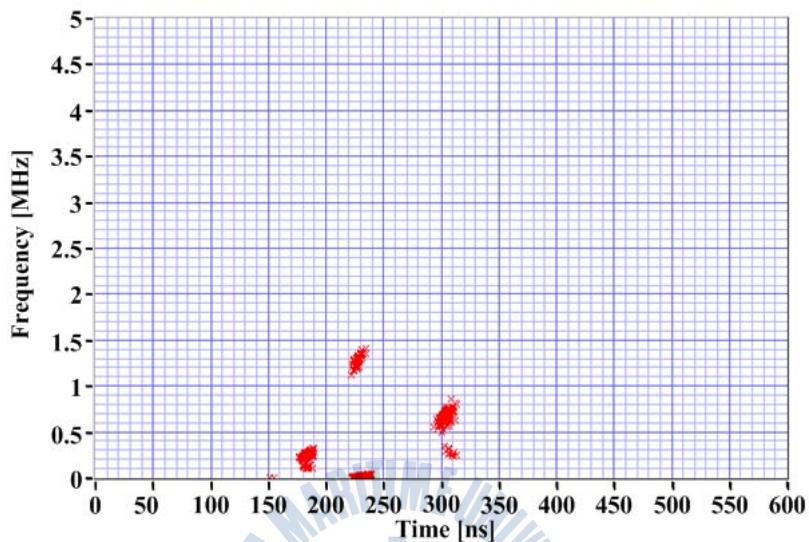
그림 4.2 결합회로망의 주파수 응답

Fig. 4.2 Frequency response of the coupling network

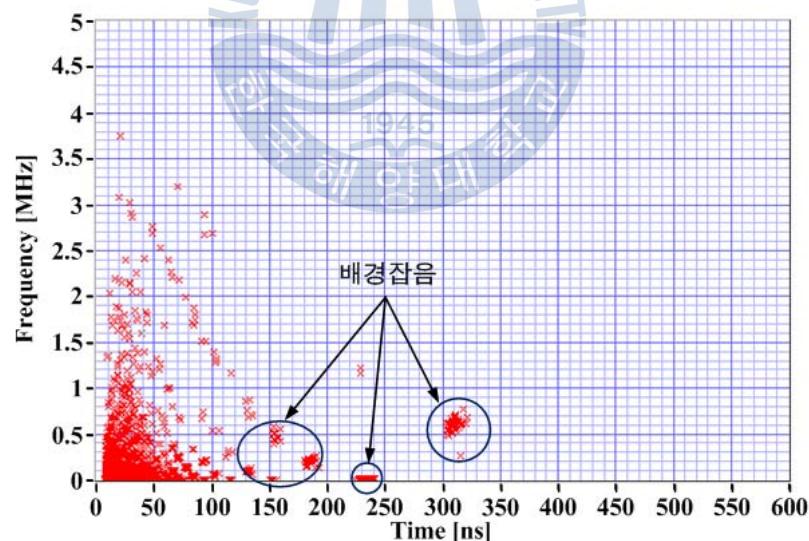
## 4.2 결과 분석

### 4.2.1 평판-평판 전극계

평판-평판 전극계에서 부분방전을 발생시키지 않고 TF 맵 알고리즘을 이용하여 배경잡음을 측정한 결과, 그림 4.3(a)와 같은 클러스터를 형성하였다. 부분방전을 발생시켰을 때 DIV는 3.4 kV이며, TF 맵 알고리즘 결과는 그림 4.3(b)와 같이 배경잡음 클러스터와 부분방전에 의한 클러스터로 나누어짐을 확인할 수 있다.



(a) 배경잡음



(b) 부분방전 펄스

그림 4.3 TF 맵을 이용한 신호 검출

Fig. 4.3 Signal detection by the TF map

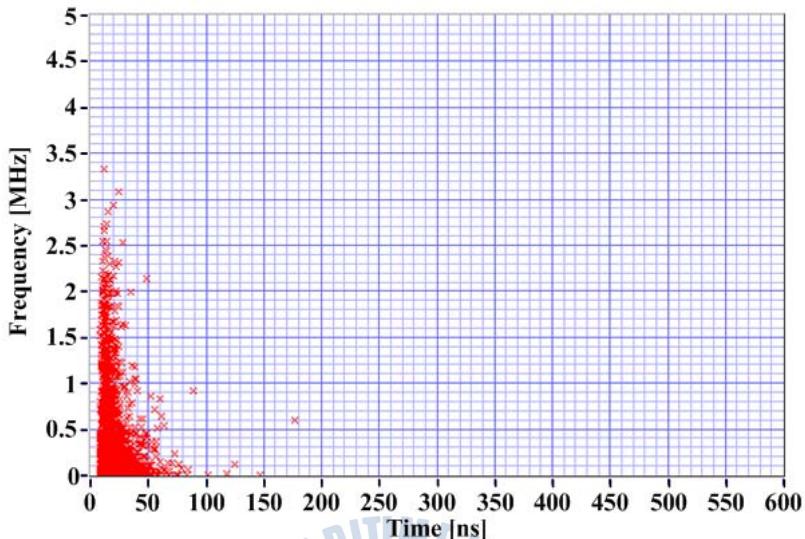
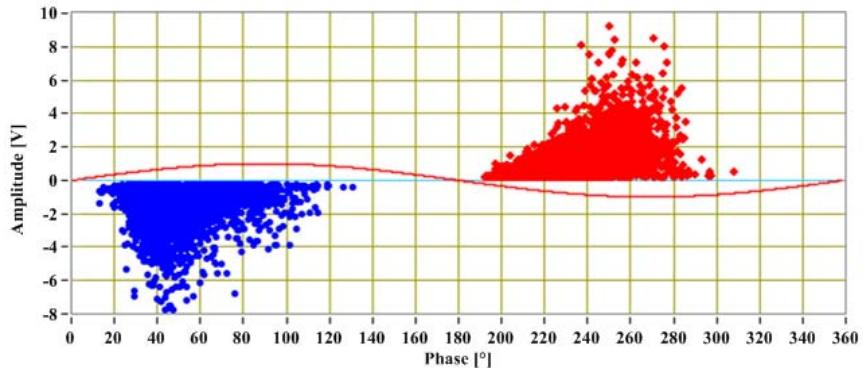


그림 4.4 필터 알고리즘에 의한 신호 검출 (평판-평판 전극)

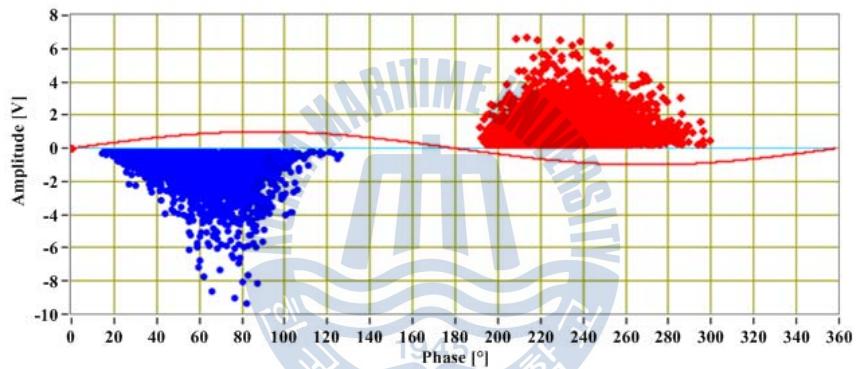
Fig. 4.4 Signal detection by the filter algorithm (plane-plane electrode)

부분방전 신호만을 측정하기 위하여 배경잡음 클러스터가 가지는 시간 표준 편차 대역을 Filter 알고리즘에 적용하여 처리 한 결과를 그림 4.4에 나타내었다. 실험 결과로부터 배경잡음 클러스터는 제거되고 부분방전 펄스 신호의 클러스터만 존재함을 알 수 있다.

부분방전 분석 알고리즘을 사용하여, 5분간 부분방전 펄스를 측정하고 분석하였다. 평판-평판 전극계 A에서 부분방전은  $12^\circ \sim 132^\circ$ ,  $191^\circ \sim 308^\circ$ 의 위상에서 분포하였으며 총 발생 횟수는 7,960회이다. 평판-평판 전극 계 B에서 부분방전의 총 발생 횟수는 3,984회이며  $13^\circ \sim 127^\circ$ ,  $192^\circ \sim 300^\circ$ 의 위상에 분포하였다.



(a) 전극계 A



(b) 전극계 B

그림 4.5 평판-평판 전극계에서 부분방전 펄스의 위상분포( $\Phi$ -q)

Fig. 4.5 Phase distribution of PD pulses in plane-plane electrode( $\Phi$ -q)

누적 저장된 부분방전 펄스신호를 재 호출하여, 방전의 총 발생 횟수, 각 위상에 따른 발생 횟수 및 방전 크기를 정렬하는 알고리즘을 수행·연산한다. 이후, 3D 알고리즘을 통하여 배열화 및 연산하여  $\Phi$ -q color 및  $\Phi$ -q-n 결과를 프린트패널에 출력하며, 결과는 그림 4.6 및 4.7과 같다.

그림 4.6의 위상분포는 각 위상에서 발생한 부분방전 펄스의 발생 횟수를 카운팅하여 발생빈도에 따라 색으로 표현하는 알고리즘이다.

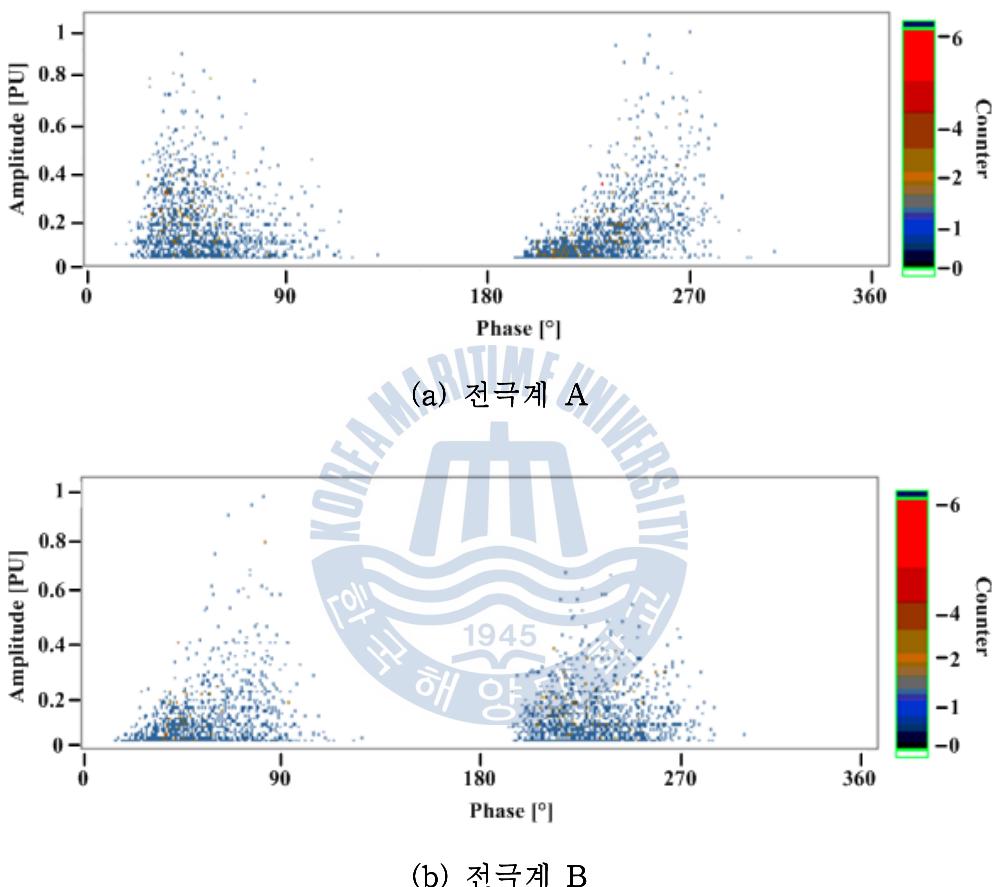
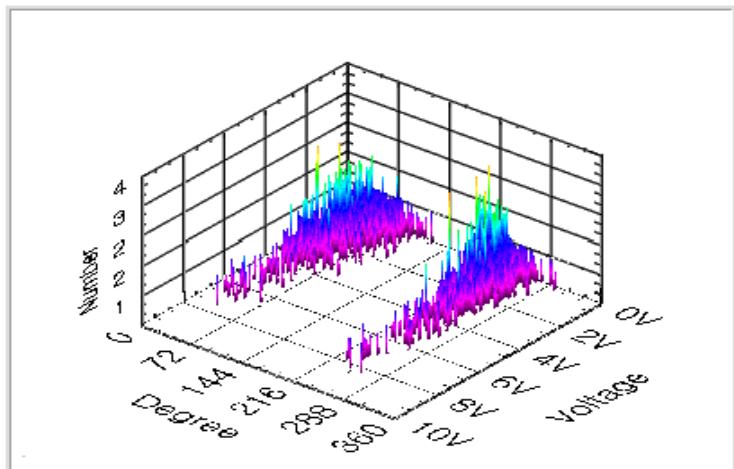
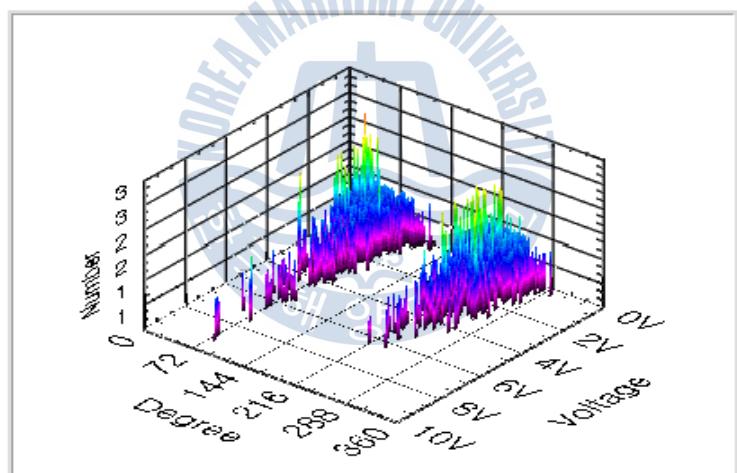


그림. 4.6 평판-평판 전극계에서 부분방전 펄스의 위상분포 ( $\phi$ -q)

Fig. 4.6 Phase distribution of PD pulses in plane-plane electrode ( $\phi$ -q)



(a) 전극계 A

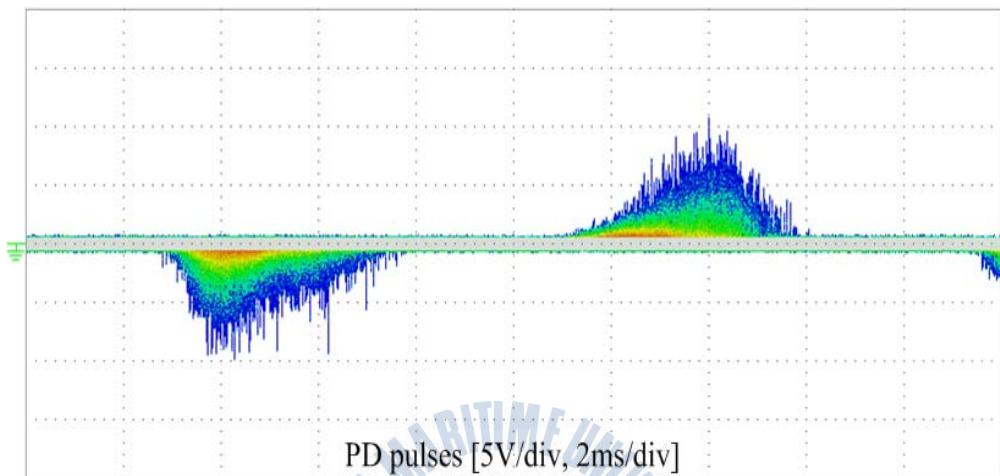


(b) 전극계 B

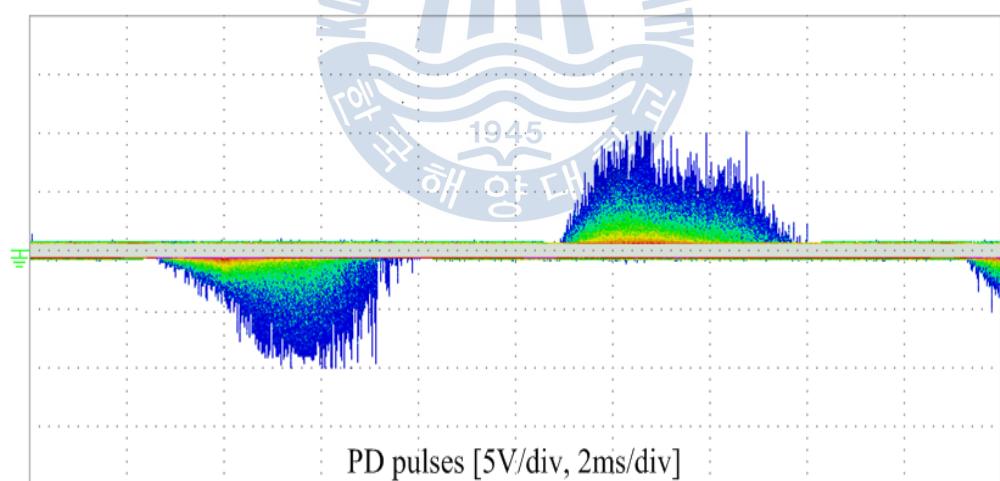
그림 4.7 평판-평판 전극계에서 부분방전 펄스의 위상분포 ( $\phi-q-n$ )

Fig. 4.7 Phase distribution of PD pulses in plane-plane electrode ( $\phi-q-n$ )

설계한 부분방전 분석 알고리즘을 검증하기 위해 오실로스코프를 사용하여 비교 측정하였다. 측정된 결과는 그림 4.8과 같으며 부분방전 분석 알고리즘과 동일한 위상에서 측정됨을 확인하였다.



(a) 전극계 A



(b) 전극계 B

그림 4.8 평판-평판 전극계에서 부분방전 펄스의 위상분포 비교

Fig. 4.8 Comparison of phase distribution of PD pulses in plane-plane electrode system

#### 4.2.2 침-평판 전극계

침-평판 전극계에서 부분방전이 발생하지 않을 때의 TF 맵 알고리즘 결과는 평판-평판 전극계의 결과와 동일하였다. 따라서 평판-평판 전극계에 사용하였던 Filter 알고리즘을 적용하여 처리 한 TF 맵의 결과를 그림 4.9에 나타내었다.

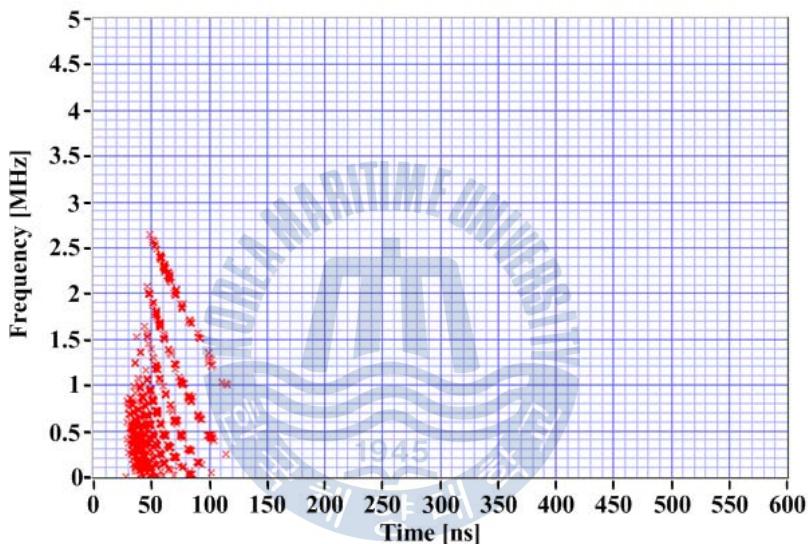
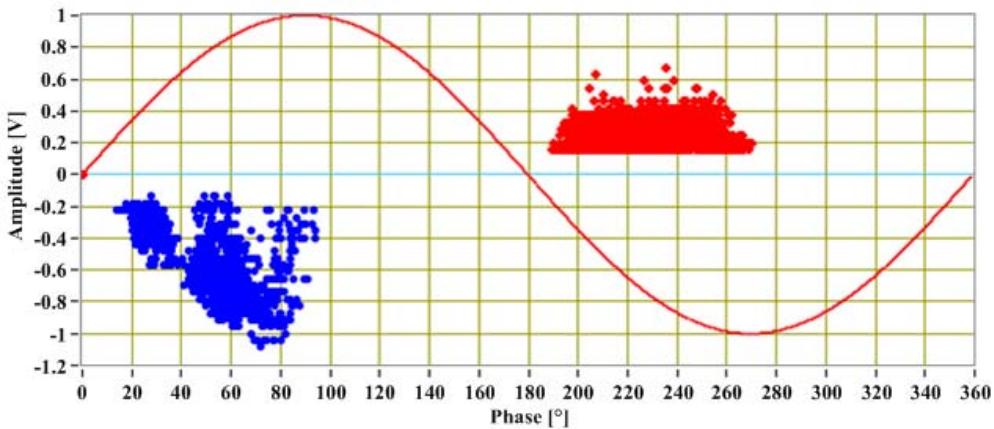


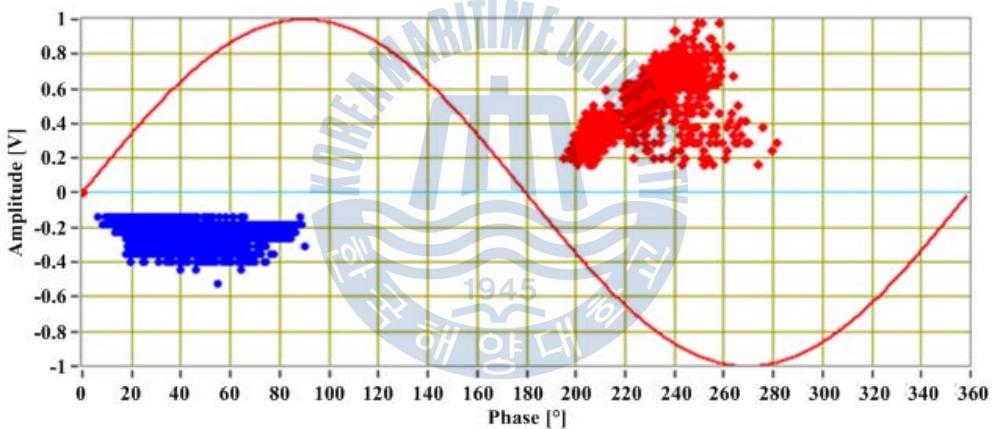
그림 4.9 필터 알고리즘에 의한 신호 검출 (침-평판 전극)

Fig. 4.9 Signal detection by the filter algorithm (point-plane electrode)

침-평판 전극계의 DIV는 2.2 kV이며, 부분방전 분석 알고리즘을 사용하여 부분방전 펄스를 5분간 측정하고 분석하였다. 침-평판 전극계 A에서 부분방전의 총 발생 횟수는 6,011회이며,  $13^\circ \sim 94^\circ$ ,  $189^\circ \sim 272^\circ$ 의 위상에 분포하였다. 또한 그림 침-평판 전극계 B에서는  $7^\circ \sim 90^\circ$ ,  $195^\circ \sim 282^\circ$ 의 위상에 분포하였으며, 총 발생 횟수는 3,858회이다.



(a) 전극계 A

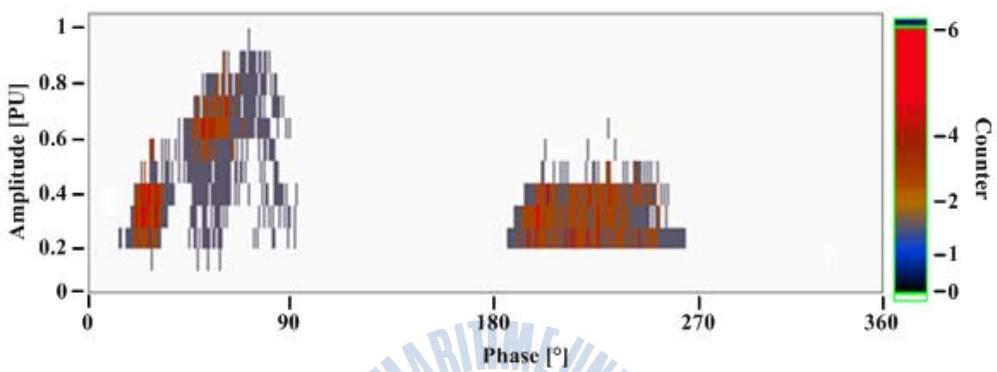


(b) 전극계 B

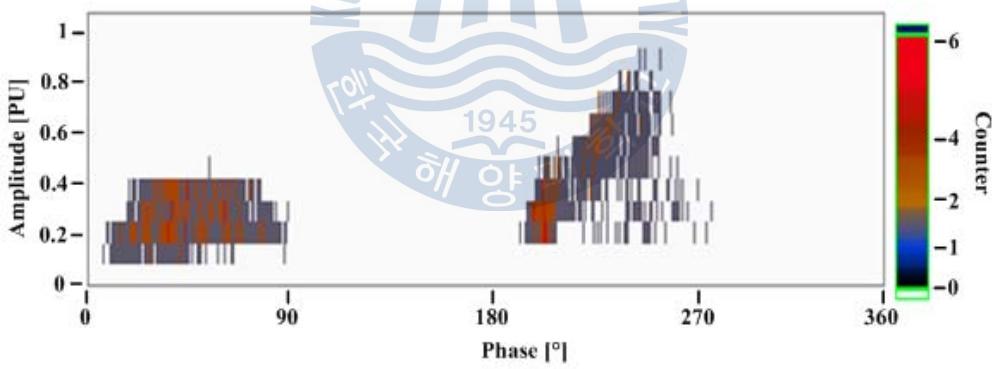
그림 4.10 침-평판 전극계에서 부분방전 펄스의 위상분포( $\phi-q$ )

Fig. 4.10 Phase distribution of PD pulses in point-plane electrode( $\phi-q$ )

앞서 4.2.1절과 같이 저장된 부분방전 펄스 신호를 재 호출하여, 각각의 설계한 알고리즘을 수행한 후 분석된 결과를 프린트패널에 나타내며, 결과는 그림 4.11 및 4.12와 같다.



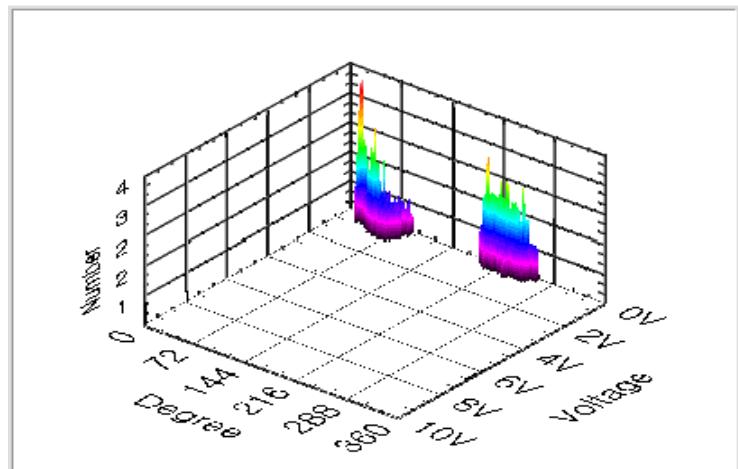
(a) 전극계 A



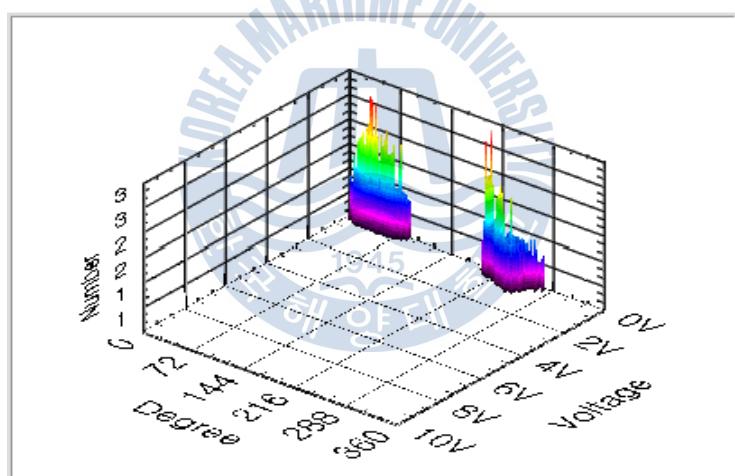
(b) 전극계 B

그림 4.11 침-평판 전극계에서 부분방전 펄스의 위상분포 ( $\phi-q$ )

Fig. 4.11 Phase distribution of PD pulses in point-plane electrode ( $\phi-q$ )



(a) 전극계 A



(b) 전극계 B

그림 4.12 침-평판 전극계에서 부분방전 펄스의 위상분포 ( $\phi-q-n$ )

Fig. 4.12 Phase distribution of PD pulses in point-plane electrode( $\phi-q-n$ )

침-평판 전극계의 비교대상 또한 오실로스코프를 사용하였다. 측정된 결과는 그림 4.13과 같으며, 부분방전 분석 알고리즘과 동일한 위상에서 측정됨을 확인하였다.

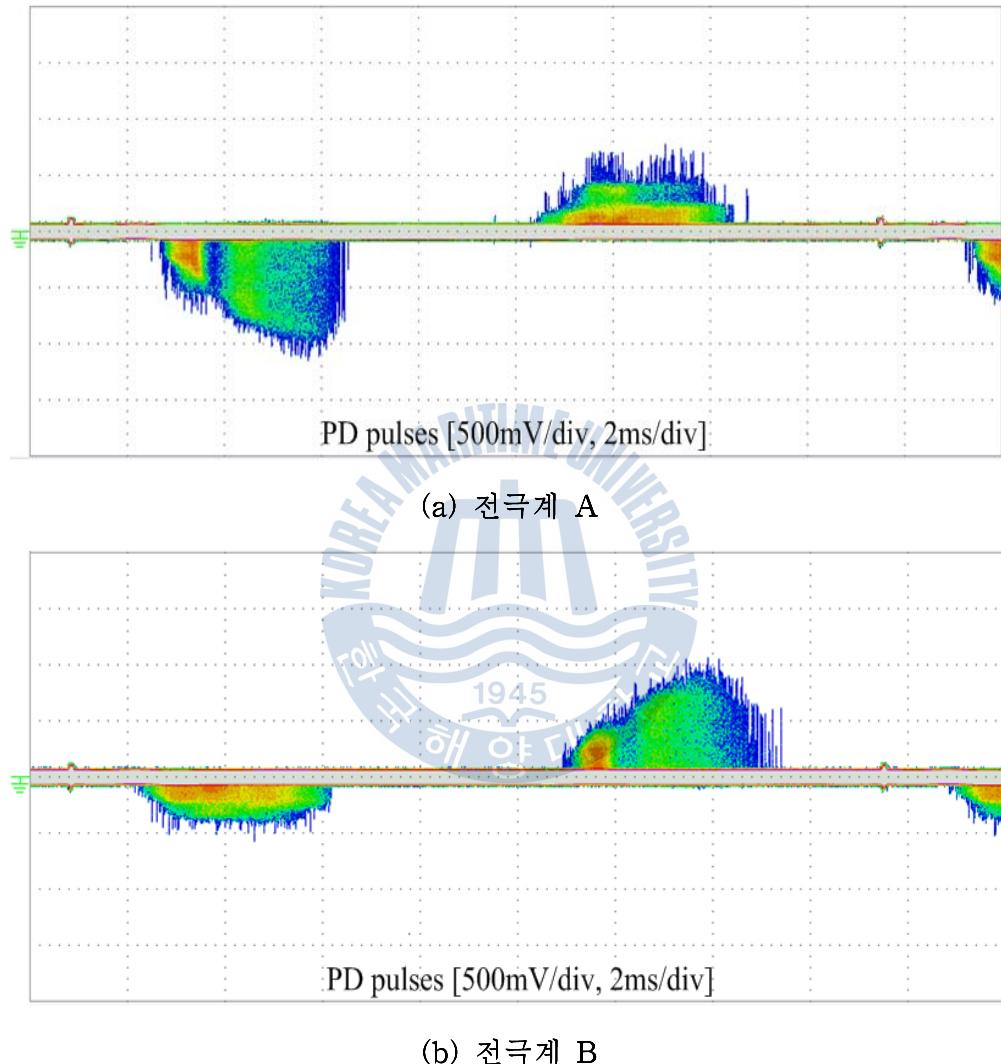


그림 4.13 침-평판 전극계에서 부분방전 펄스의 위상분포 비교

Fig. 4.13 Comparison of phase distribution of PD pulses in point-plane electrode system

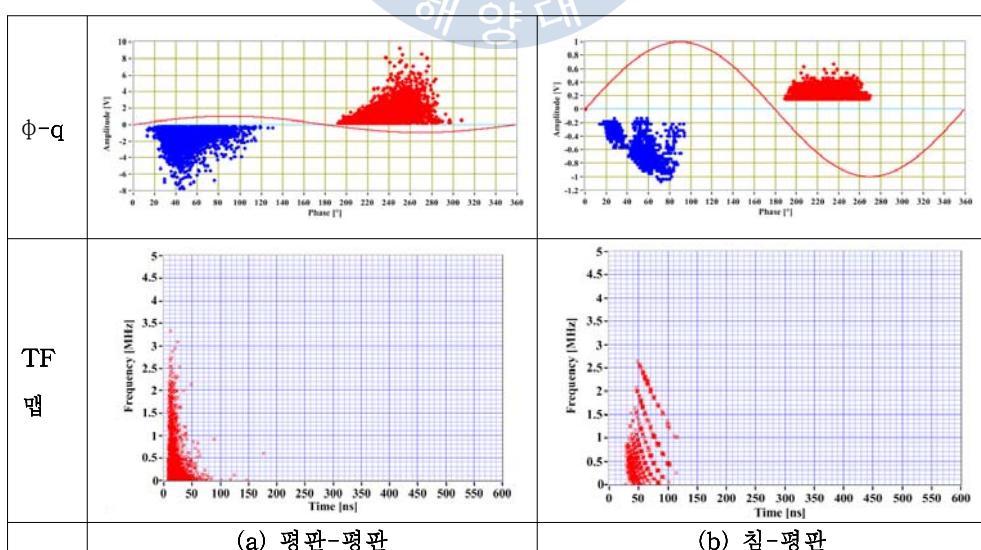
### 4.2.3 결함에 따른 부분방전 분포 패턴

결함계에 따른 부분방전 펄스의 위상 분포는 표 4.1에 나타내었으며, 결함의 종류에 따라 위상분포가 달라짐을 알 수 있었다. 따라서 부분방전의 위상 분포 패턴을 분석하여 부분방전을 발생시키는 결함의 종류를 파악할 수 있는 것을 확인하였다.

TF 맵 알고리즘의 실험 결과를 확인한 결과, 결함의 종류에 따라 일정한 클러스터 패턴을 형성하는 것을 알 수 있었다. 이 분석 결과로부터 TF 맵에 나타나는 패턴을 통하여 결함의 형태를 파악 할 수 있다는 결론을 얻었다. 그러므로,  $\Phi-q$ ,  $\Phi-q-n$  및 TF 맵 알고리즘을 부분방전 분석에 적용하면 노이즈에 대한 영향을 제거하고 부분방전 펄스를 측정할 수 있으며, 부분방전 발생의 원인이 되는 결함의 종류를 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

표 4.1 결함별 부분방전 패턴

Table 4.1 PD patterns by defects



## 제 5 장 결 론

본 논문에서는 전력기기의 절연진단을 위한 부분방전 분석 알고리즘을 연구하고 설계하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 부분방전 신호를 측정하기 위해 사용된 데이터 취득 모듈은 수평 분해능 100 MS/s, 수직분해능은 8 bit이며 차동모드의 2채널의 아날로 그 입력부로 구성된다. 측정된 부분방전 펄스는 데이터 취득 장치에 입력되고, 설계한 알고리즘을 통해 PC에서 연산하여 프런트패널에 그래프로 나타내어진다.
2. 미소한 부분방전 신호의 측정을 위해 낮은 잡음 특성과 넓은 주파수대역의 특성을 가질 수 있는 연산증폭기를 2단으로 구성하고 전압 이득은 40 dB로 설계하였으며, -3 dB 주파수 대역은 DC~45 MHz로 10~20 ns의 상승시간을 가지는 부분방전 신호를 검출하는데 적합하였다. 또한 결합회로망의 주파수 응답 결과 -3 dB cut-off frequency 는 150 kHz로 부분방전을 충분히 검출할 수 있으며, 상용주파수인 60 Hz는 약 70 dB 감쇄시킨다.
3. 내부 방전을 모의하기 위하여 침-평판 및 평판-평판 전극계를 제작하였고 IEC 60270에 의거한 검출법에 따라 실험한 결과, 결함에 따른 부분방전 펄스 검출이 가능하였다.
4. 설계한 TF 맵 및 필터 알고리즘을 적용한 결과, 노이즈에 대한 영향을 제거하여 부분방전 펄스를 정확하게 측정할 수 있었다.
5.  $\phi-q$  및  $\phi-q-n$  분석 알고리즘을 적용하여 결함에 따른 부분방전의 위상분포의 분석이 가능하였다. 방전개시전압 3.4 kV 일 때 평판-평판

전극계에서 발생한 부분방전은 전극계 A 타입의 경우  $12^\circ \sim 132^\circ$ ,  $191^\circ \sim 308^\circ$ , 전극계 B 타입은  $13^\circ \sim 127^\circ$ ,  $192^\circ \sim 300^\circ$ 의 위상에 분포하였다. 침-평판 전극계의 경우 방전개시전압 2.2 kV일 때, 전극계 A 타입의 경우  $13^\circ \sim 94^\circ$ ,  $189^\circ \sim 272^\circ$ , 전극계 B 타입은  $7^\circ \sim 90^\circ$ ,  $195^\circ \sim 282^\circ$ 에 분포하였다. 또한 Oscilloscope를 이용한 부분방전 측정에서도 동일한 위상에서 부분방전 펄스가 분포함을 알 수 있었다.

6.  $\Phi-q$  및  $\Phi-q-n$  분석법뿐만 아니라 TF 맵의 분석에서도 결함에 따른 부분방전 패턴을 형성하였다. 따라서  $\Phi-q$ ,  $\Phi-q-n$  및 TF 맵 알고리즘을 부분방전 분석에 적용하면, 노이즈에 대한 영향을 제거하고 부분방전 펄스를 측정할 수 있었으며 부분방전 발생의 원인이 되는 결함의 종류를 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

7. 실험결과로부터, 제작된 부분방전 측정시스템은 노이즈가 존재하는 현장에서 부분방전 펄스를 검출할 수 있는 것을 확인하였다.

상기 결과로부터 본 논문에서 설계한 가상계측 시스템은 전력설비의 절연상태를 진단에 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 신뢰성 확보를 위해 현장에서 발생할 수 있는 환경적 요인을 고려한 연구가 더 수행되어야 될 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] T. Leibfried and K. Feser, "Off-line and On-line Monitoring of Power Transformers using the Transfer Function Method", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp.34, June, 1996.
- [2] J. P. van Bolhuis, E. Gulski, J. J. Smit, "On-line detection, requirements for practical use", Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, April, 2002.
- [3] IEEE standard 493, IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers(IEEE), Gold book, 2007
- [4] IEC International Standard 60270, High Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements, International Electrotechnical Commission(IEC), 3rd Edition, 2000.
- [5] Peter H.F. Morshuis, "Degradation of Solid Dielectrics due to Internal Partial Discharge: Some thoughts on progress made and where to go now", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.12, No.5, October, 2005.
- [6] Steven A. Boggs, "Partial Discharge: Overview and Signal Generation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.6, No.4, 1990.
- [7] P. Cichecki, P. Agoris, Sander Meijer, Edward Gulski, Johan J. Smit, "Analysis of Artificial Defects in Transformer Insulation Using the UHF Technique", Proc. 15th Int. Symp. on High voltage Engineering, 2007.

- [8] G. S. Kil, S. W. Kim, D. W. Park, S. J. Kim, and J. M. Song, "A Study on the Acoustic Detection of Partial Discharges in Insulation Oil", J. KIEEME, Vol.23, No.1, 2011.
- [9] F. H. Kreuger, Industrial High Voltage, Vol.1, Delft University Press, 1991.
- [10] K. S. Jung, D. W. Park, H. K. Cha, S. W. Cha, G. S. Kil, "Detection Technique of Partial Discharge by a Capacitive Probe in Cast-resin Transformers", J. KIEEME, Vol.24, No.4, 2011.
- [11] S. Tenbohlen, D. Uhde, J. Poittevin, H. Borsi, P. Werle, U. Sundermann, H. Matthes, "Enhanced Diagnosis of Power Transformers using On- and Off-line Methods: Results, Examples and Future Trends", CIGRE Paris, 2000.
- [12] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, High Voltage Engineering - Fundamentals 2nd Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.
- [13] 이철호, "고분자 절연재료의 특성 및 평가 <II>", Journal of the Electrical World Magazine, pp.46-49, August, 2011.
- [14] C. L. WADHWA, HIGH VOLTAGE ENGINEERING Second Edition, NEW AGE INTERNATIONAL (P) LIMITED, New Delhi, 2007.
- [15] H. Lee Willis, Muhammad H. Rashid, Electrical Power Equipment Maintenance and Testing 2nd Edition, CRC Press, New York, 2008.
- [16] F. Gutfleisch and L. Niemeyer, "Measurement and Simulation of PD in Epoxy Voids", IEEE Trans. DEIS, pp.729-743, Vol.2, No.5, 1995.
- [17] T.W. Dakin, "Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon", AIEE Transaction, 67 (Part 1), pp.113 - 122, 1948.
- [18] Steven A. Boggs, "Partial Discharge - Part III: Cavity-Induced PD in

Solid Dielectrics”, IEEE Electrical Insulation Magazine, November/December, Vol.6, No.6, 1990.

- [19] S. Das and P. Purkait, “ $\phi$ -q-n Pattern Analysis for Understanding Partial Discharge Phenomena in Narrow Voids”, Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008.
- [20] F. H. Kreuger, Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment , Butterworth, London, 1989.
- [21] Th. Aschwanden, M. Hässig, V. Der Houhessian, W. Zaengl, J. Fuhr, P. Lorin, A. Schenk, P. Zweicker, A. Piras, J. Dutoit, “Development and Application of New Condition Assessment Methods for Power Transformers”, CIGRE, Paris, Paper 12-207, 1998.
- [22] A. Contin, A. Cavallini, G. C. Montanari, G. Pasini, F. Puletti, “Digital Detection and Fuzzy Classification of Partial Discharge Signals”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.9, No.3, 2002.
- [23] A. Cavallini, A. Contin, Gian Carlo Montanari, F. Puletti, “Advanced PD Inference in On-Field Measurements, Part I Noise Rejection”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.10, No.2, 2003.
- [24] A. Cavallini, M. Conti, A. Contin, G. C. Montanari, “Advanced PD Inference in On-Field Measurements, Part 2 Identification of Defects in Solid Insulation Systems”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.10, No.3, 2003.
- [25] A. Cavallini, G. C. Montanari, D. Fabiani and 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.

- [26] 정승용, “가스절연 전력기기에 적용 가능한 향상된 PD 진단 기술개발; TF Map 을 고려한 CAPD 기법 및 고장위치추정 알고리즘”, 한양대학교 대학원, 박사학위논문, pp.11-13, 2010.
- [27] Jitka Fuhr “Procedure for Identification and Localization of Dangerous PD Sources in Power Transformers”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.12, No.5, 2005.
- [28] Dr. Colin Smith, “PARTIAL DISCHARGE & INSUALTION FAILURE”, IPEC Ltd, 2005.
- [29] Eberhard Lemke, Sonja Berlijn, Edward Gulski, Michael Muhr, Edwin Pultrum, Thomas Strehl, Wolfgang Hauschild, Johannes Rickmann, Giuseppe Rizzi, “Guide for Electrical Partial Discharge Measurements in compliance to IEC 60270”, ELECTRA, TECHNICAL BROCHURE, No.241, December, 2008.
- [30] National Instruments Corporation, “Application Design Patterns”, 2006.
- [31] National Instruments Corporation, “Application Architecture and Design Patterns in LabVIEW”, 2010.