



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

TEV 검출에 의한 수배전반의
절연진단에 관한 연구

A Study on the Insulation Diagnosis of Switchboard
by Detection of TEV Signals

指導教授 吉 暻 碩

2019年 8月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

金 宇 炫

本 論 文 을 金 宇 炫 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

委 員 長 : 工 學 博 士 李 成 根



委 員 : 工 學 博 士 吉 暻 碩



委 員 : 工 學 博 士 張 樂 元



2019年 6月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

金 宇 炫

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 수배전반	3
2.2 절연열화와 부분방전	6
2.3 TEV의 발생원리	19
제 3 장 TEV 센서	23
3.1 설계 및 제작	23
3.2 센서의 특성 평가	31
제 4 장 적용 평가	40
4.1 실험계	40
4.2 TEV의 주파수 스펙트럼	43
4.3 결함별 PRPD 패턴	47
4.4 TEV의 거리 의존성	51
제 5 장 결 론	52
참 고 문 헌	54

그림 및 표 목차

< 그림 목차 >

그림 1.1 화재 통계	1
그림 2.1 수배전반의 단선결선도와 도면	5
그림 2.2 코로나 방전	11
그림 2.3 연면 방전	12
그림 2.4 내부 방전	13
그림 2.5 결함의 등가회로	14
그림 2.6 교류전압에서 부분방전 발생 패턴	15
그림 2.7 TEV 신호의 발생 원리	20
그림 3.1 TEV 센서의 원리도와 등가회로	23
그림 3.2 TEV 센서	30
그림 3.3 실험계	31
그림 3.4 TEV 센서 직경에 따른 주파수 응답	32
그림 3.5 TEV 센서 직경에 따른 지연시간	34
그림 3.6 TEV 센서 직경에 따른 감도	35
그림 3.7 걸보기 전하량에 따른 TEV 센서의 응답	36
그림 3.8 센서 직경 및 절연 두께에 따른 TEV 신호	39
그림 4.1 실험계	41
그림 4.2 전극계	42
그림 4.3 단일 파형	43
그림 4.4 부분방전 신호의 주파수 스펙트럼	44
그림 4.5 접지 유무에 따른 TEV 신호 파형	45
그림 4.6 접지 유무에 따른 TEV 신호의 주파수 스펙트럼	46

그림 4.7 도체 돌출의 PRPD 패턴	48
그림 4.8 외함 돌출의 PRPD 패턴	49
그림 4.9 도전성 입자의 PRPD 패턴	50
그림 4.10 실험계	51

< 표 목차 >

표 2.1 수배전반의 분류	3
표 2.2 절연체의 열화	7
표 2.3 열화 현상	8
표 2.4 진단 기법	17
표 4.1 방전개시전압과 인가전압	47
표 4.2 거리에 따른 TEV 크기	51

A Study on the Insulation Diagnosis of Switchboard by Detection of TEV Signals

by Woo-Hyun Kim

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

Abstract

Switchboard is a major power facility that is equipped for electricity distribution, switching, metering, and diagnosis. The modern society is highly relies on electrical energy and power outage may cause great economic and technical losses. As a result, it is necessary to diagnosis the condition of switchboard to ensure its reliable operation.

During the operation of power apparatus such as transformers and circuit breakers, partial discharge (PD) may occur due to electric field concentration or insulation deterioration. Accompanying with PD, the transient earth voltage (TEV) will propagate along the metal or ground surface of switchboard. In this paper, for the purpose of insulation diagnosis of switchboard and related power apparatus, a TEV sensor was designed and fabricated for on-line PD detection. The insulation defects that cause insulation breakdown in switchboard were classified

into protrusion on conductor, protrusion on enclosure, and free particle. The simulated TEV experiments were carried out and the characteristics of TEV sensor were analyzed.

The fabricated TEV sensor could detect the signal with a frequency range from 1 MHz to 100 MHz and sample PD signals with a response time less than 8 ns. In addition, the detection sensitivity depending on apparent charge and sensor type were studied. It was verified that the sensor with a diameter of 70 mm and a thickness of 1 mm was optimal for detect PD with a magnitude of 10 pC ~ 100 pC. The sensor used for application and evaluation had a sensitivity of 1.2 mV/pC.

The electrical detection method specified in KS C IEC 60270 is a reference of PD signal acquisition, however, it can not be used for on-line detection of switchboard. The TEV sensor is a non-electrical method that can obtain same discharge patterns as the electrical method and overcome the limitations of existing method. The TEV sensor proposed in this paper had the optimal detection sensitivity and economic advantage, which can be used for condition monitoring and asset management of switchboards.

TEV 검출에 의한 수배전반의 절연진단에 관한 연구

김 우 현

한국해양대학교 대학원
전기전자공학부

초록

수배전반은 각 수용가에 설치되어 변압기, 차단기, 계기 등을 각각 내장한 금속제 함을 의미한다. 전기에너지에 대한 의존도가 높은 현대 사회는 한순간의 정전으로도 막대한 경제적 손실이 발생하기 때문에 수배전반에 대한 관리기법 연구가 절실한 실정이다.

수배전반 내 변압기, 차단기 등 전력기기의 운영 중 결함 부위에 전계 집중이나 절연 성능의 저하로 부분방전이 발생하게 되면, TEV (Transient earth voltage)가 금속 외함 또는 접지를 따라 전파하게 된다. 본 논문에서는 수배전반 내 전력설비의 절연열화를 진단할 목적으로, 활선 상태 (On-line)에서 부분방전 신호를 검출 할 수 있는 비접촉식 TEV 센서를 설계 및 제작하였다. 고압배전반에서 발생하는 절연 파괴의 주요 원인을 도체 돌출, 외함 돌출, 도전성 이물질로 분류하여 TEV 모의실험을 하였다.

제작된 TEV 센서는 1 ~ 100 MHz 대역을 갖는 TEV 신호를 전 대역에서 검출이 가능하였으며, 지연시간은 8 ns 이하로 부분방전 신호를 충분히 샘플링할 수 있다. 또한 결보기 전하량에 따른 감도를 센서별로 도출했으며, 전력기기에서 방전 전하량 10 ~ 100 pC의 일반적인 상황에서는

직경 70 mm, 절연두께 1 mm가 최적합 하였다. 최종적으로 적용·평가에 사용된 센서의 감도는 1.2 mV/pC이다.

KS C IEC 60270에 수록된 전기적 검출법은 부분방전의 신호를 획득함에 있어 기준이 되는 방법이지만, 수배전반의 활선상태 진단에 실적용이 불가능하다. 반면, TEV 센서를 적용한 비전기적 검출 방법은 전기적 검출법과 같은 방전 패턴을 얻을 수 있으며, 기존 방법의 제약에 대한 문제가 없었다. 따라서 본 논문을 통해, 최적 감도 및 경제성을 갖는 TEV 센서를 제작하여 수배전반의 상태진단 및 자산관리에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

제 1 장 서 론

전력통계정보시스템에 따르면, 우리나라는 4차 산업혁명 시대에 진입 한 후 전력수요가 평균 4.2%씩 매년 증가하고 있다^[1]. 국민의 생활에 밀접한 의식주의 생산부터 건설, 의료, 수송, 제조 등 모든 분야에서 전기설비는 빠질 수 없다. 이처럼 현대사회는 전기에너지에 대한 의존성이 높아서 한 순간의 정전으로도 막대한 경제·기술적 손실이 발생하게 된다^[2]. 그림 1.1 은 2018년 한 해 동안 발생한 전력설비 화재통계보고로써, 수배전반에서의 사고 확률이 압도적으로 높음을 알 수 있다^[3]. 주요 사고 원인으로는 수배전반의 제조 및 설치 시에 나타나는 결함과 열, 이물질, 외부충격과 같은 운영상의 스트레스 그리고 시간 경과에 따라 발생하는 자연열화 등이 있다^[4]. 화재 발생률이 높은 수배전반은 여러 가지 관리기법이 제안되어 적용되고 있었으나, 아직까지도 수배전반 내 전력설비에 의한 사고가 빈번한 실정이다^[5].

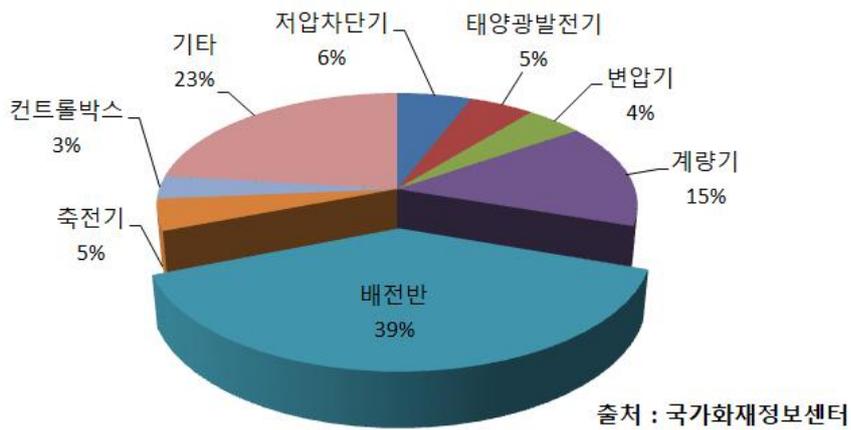


그림 1.1 화재 통계
Fig. 1.1 Statistics of fire accident

국가화재정보시스템의 발화요인별 화재사고 통계치에 따르면, 2018년 한 해 동안 총 42,337건의 화재 중 전기로 인한 화재사고는 10,459건으로 총 24%를 차지했다. 또한 전기화재 중 가장 높은 비율을 차지하는 절연열화 및 트래킹에 의한 단락은 인명 및 재산피해를 가장 많이 입힌 원인으로, 전력설비 절연진단의 필요성이 부각되고 있다^[6]. 전력설비의 단락사고는 기계적 요인을 제외하고는 절연체의 열화, 도전성 이물질, 불필요한 부분함유 또는 충격 및 진동에 의해 발생된다. 이러한 결함부분에 전계가 집중되어 부분방전(Partial Discharge, PD)이 발생되고 최종적으로 절연과괴를 일으키게 된다^[7]. 절연체의 열화과정 초기에 부분방전이 수반되기 때문에 부분방전 신호를 조기에 검출함으로써 전력사고를 예방하여 고가의 장비를 유지·보수하는 자산관리(Asset management)가 가능하다^[8]. 그리고 부분방전을 검출하는 방법 중, 활선 상태(On-line)에서 비접촉식 TEV(Transient earth voltage) 센서를 이용한 방법은 접지되어있는 기기 외함에 탈·부착식으로 간편한 설치가 가능하다^[9]. 또한 부분방전 발생 시 유도되는 TEV 신호를 검출하는 방식으로 절연에 문제가 없다. 과거에는 TEV 센서가 시변공간전계를 측정하기 위해 사용되었으나 근래에 부분방전, 아크 등 고주파 신호를 검출하기 위한 고감도 센서로 사용되어 왔다^[10]. 하지만 TEV 센서의 연구 및 개발은 주로 외국에서 수행되었고 국내에서 TEV 센서는 현재 수입에 의존하고 있다. 따라서 본 논문에서는 TEV의 이론적 해석 및 센서 설계를 통해, 전력설비의 유지보수를 위한 고감도의 부분방전 검출 센서를 제작 및 최적화하여 자산관리에 활용하고자 한다.

제 2 장 이 론

2.1 수배전반

수배전반이란 각 수용가에 설치되어 전기의 배분과 개폐, 점검, 계량 등을 행하기 위해서 개폐기, 차단기, 변압기, 계기 등을 각각 내장한 금속제함을 말한다. 수배전반은 표 2.1과 같이 저압, 고압 및 특고압용으로 분류되며 본 논문에서는 고압 및 특고압용 수배전반을 대상으로 한다. TEV 진단법은 수배전반의 외함에 센서를 부착시켜 절연진단을 수행한다.

표 2.1 수배전반의 분류

Table 2.1 Classification of switchboard

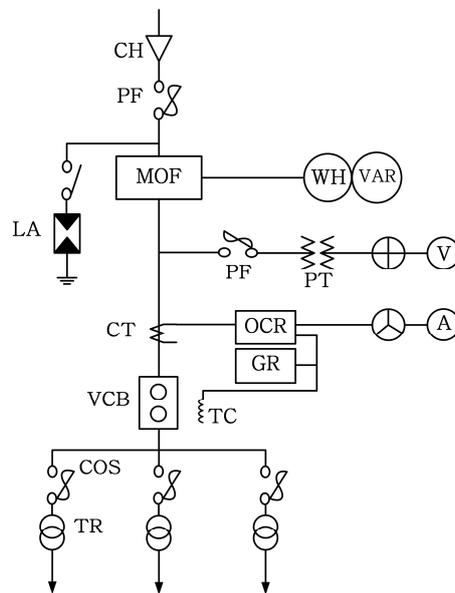
분류	전압 범위
저압용	600 V 이하
고압용	600 V 초과 7kV 이하
특고압용	7kV 초과

고압배전반의 경우 수전실, 폐쇄배전반, 큐비클(Cubicle) 및 메탈 클래드(Metal clad) 등 다양한 명칭으로 불리며, 제조 국가 또는 제조 업체에 따라 명칭이 상이하다. 고압배전반은 그림 2.1 (a)와 같이 차단기, 단로기 등 전력용 개폐기, 계기용 변성기, 모선 접속도체 및 감시제어용 기기와 같은 주회로 설비로 이루어져있으며 단위 회로마다 접지된 금속 격벽 또는 절연 격벽에 의해 격리되어 있다. 이러한 전력설비들은 다양한 원인으로 인해 전기화재의 우려가 있으며 지속적인 유지보수 및 점검이 필요하다. 그림 2.1 (b)는 수배전반의 도면을 나타내었다. TEV 센서의 경우 고압

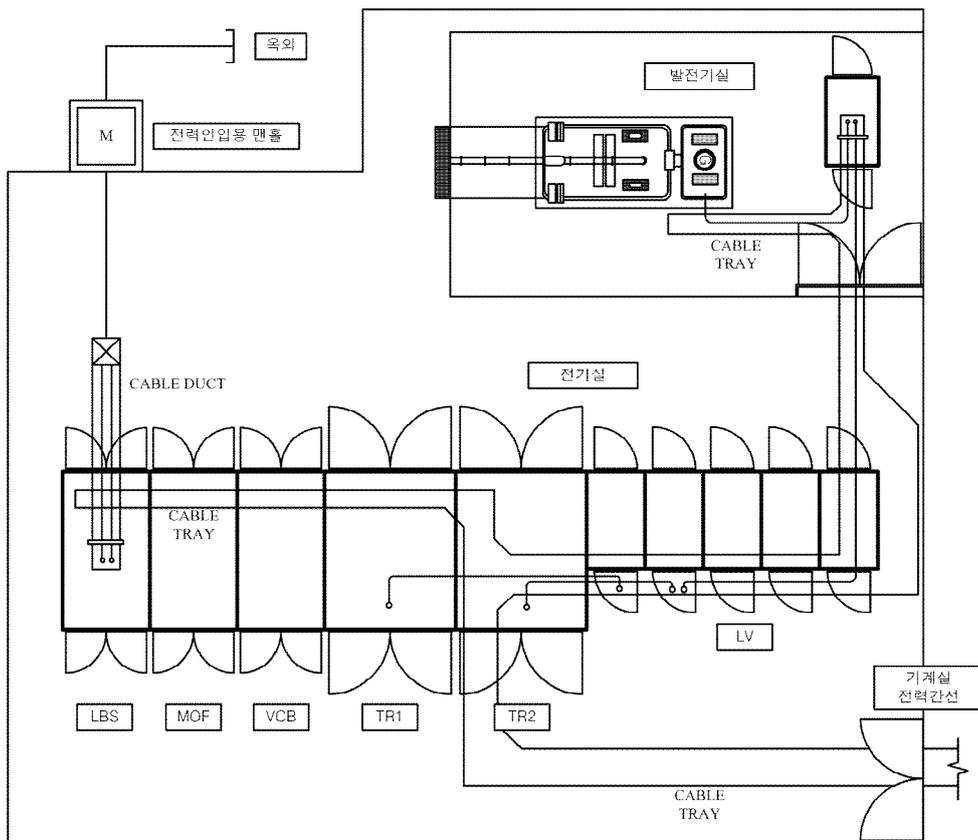
부분인 LBS(Load breaker switch), MOF(Metering out fit) 그리고 TR(Transformer)의 외함에 부착되어 절연진단을 수행한다.

전력설비의 절연진단을 위해, 기존에 시행되고 있는 KS C IEC 60270에 따른 전기적 검출방법은 실제 현장 적용에 있어 절연 문제나 시간적, 공간적 제약 등의 현실적인 문제점을 갖고 있다. 또한 폐쇄배전반에서 발생하는 사고를 예방하기 위해 더욱 정밀하고 손쉬운 측정이 가능한 진단기술 및 장비가 요구되지만, 폐쇄배전반을 구성하는 설비들의 성능이 발전하는 것에 비해 점검 및 유지보수 수준은 상대적으로 미흡한 실정이다.

따라서 고압배전반의 상태 진단을 위해, 내부 전력설비들의 활선(On-line) 상태에서 절연진단을 수행하여 지속적인 점검 및 유지보수가 필요하다. 본 논문에서는 수배전반 외함에 탈·부착식으로 간편한 설치가 가능하며 절연에 대한 문제가 없는 TEV 센서의 최적화 설계를 통해 절연진단을 하고자 한다.



(a) 수배전반의 단선결선도



(b) 수배전반 도면

그림 2.1 수배전반의 단선결선도와 도면

Fig. 2.1 Skeleton diagram and schematic of switchboard

2.2 절연열화와 부분방전

전력기기에 사용되는 여러 고분자 절연재료는 열, 전기, 환경 및 기계적인 요인 등에 의한 스트레스에 장기간 노출되면 초기의 물성이 변질되거나 극단적인 경우 파괴가 되는데 이러한 현상을 절연열화라고 한다. 열화의 발생과 진전은 절연방식, 절연재료, 전력기기 등의 종류 및 용량에 따라 상이하다. 따라서 절연열화의 발생 및 진전을 명확하게 파악하기 위해서는 기기별 운전실적, 사용 환경 및 절연 특성 등의 검토가 행해져야 한다.

절연물의 열화 상태를 진단하기 위한 방법은 크게 정전 진단(Off-line)과 무 정전 진단(On-line)으로 나눌 수 있다. 정전 진단이란 진단 대상의 전원을 차단한 상태에서 수행하는 것이고, 무 정전 진단이란 진단 대상이 본래의 목적을 위해 운영 중인 상태에서 수행하는 것을 의미한다. 고압배전반을 진단 대상으로 할 경우, 정전 진단은 정밀한 진단이 가능하다. 하지만 기기의 운전을 정지하기 때문에 기본 목적을 수행하지 못하는 기회비용의 문제가 발생한다. 따라서 무 정전 진단방법이 각광 받는 이유 중 부분방전 신호측정에 의한 방법은 진단대상에 아무런 영향을 주지 않으며 절연진단이 가능하다. 방전 신호를 직접 측정하기 때문에 상세한 데이터의 정밀한 측정, 국부적인 방전의 측정이 가능하다. 이러한 장점들 때문에 국내·외적으로 활발히 연구가 진행되고 있다^[11].

2.2.1 절연열화

절연체에 공극(Void), 균열과 같은 결함이나 전기트리(Electrical treeing), 표면 오손(Polluted insulating surface) 등의 열화 진전이 되면 결함 부분에 전계가 집중되고 절연물의 절연내력이 상대적으로 약화되어 결함에서 부분방전이 발생한다. 이와 같은 부분방전의 발생이 지속되면 절연성능이

점차 악화되어 최종적으로 절연파괴에 이르게 된다. 폐쇄배전반의 경우, 과전류로 인한 열과 서지(Surge) 등에 의한 전기적 열화가 절연열화 주요 인이라고 할 수 있다.

절연체의 절연열화는 위에서 언급한 열화요인이 단독적으로 작용하는 경우보다, 여러 요인들이 복합적으로 작용하여 열화가 진전되는 경우가 많다. 표 2.2에는 고체 절연체의 열화요인과 열화현상을 나타내었다.

표 2.2 절연체의 열화
Table 2.2 Degradation of dielectric materials

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

절연체의 열화는 정상 운전 중에도 과전류로 인한 온도상승, 기후의 변화 또는 외부 열원 등의 방사열에 의한 경우이며, 동일한 열에너지가 전달되어도 주변 환경이나 절연재료의 내열성, 온도상승률 등에 의하여 열화 진전속도가 달라진다. 전력설비 중 변압기의 경우 일시적인 과부하 등에 의한 온도상승은 열화를 촉진시키는 주원인이 된다. 열적 스트레스에 놓인 절연체 내부에는 부분방전의 발생, 공극의 확장, 기계적 강도의 저하 및

흡습 등 외부 영향을 민감한 상태가 된다. 또한 초기의 열화 원인은 다른 열화 요소의 활성화에 영향을 주며, 전력기기의 절연층 내부 및 권선이나 출력단자의 손상 등으로 인한 나타나기도 한다. 특히 온도상승은 화학적 반응을 촉진하여 열화 진전속도를 증가시키며, 절연재료의 수명을 단축시키는 가장 일반적인 열화요인이다. 절연열화의 주요 원인인, 전기적 열화는 절연체에 가해지는 전계에 의한 것으로 다음과 같은 열화현상이 발생하게 된다^[12].

표 2.3 열화 현상
Table 2.3 Deterioration phenomenon

열화요인	현상
전도전류	Joule 열에 의한 과열이 원인이 되며 이외에 이온성 전도는 전기·화학적 열화를 유발
유전체손	교류전계에서 발생하며, 열적 열화의 원인
정전력 및 전자력	단락에 의한 대전류, 절연내력 이상의 고전압에 의해 발생하는 힘으로 절연체의 열화를 유발
부분방전	고전계에서 절연재료에 부분방전이 발생 시 열적 작용, 입자충격 작용, 여기분자 또는 이온에 의한 화학작용 등을 유발

일반적으로 운전 중인 전력기기의 절연재료 내부에 부분방전이 발생하면, 공극 및 균열 등 결함의 표면은 침식된다. 부분방전에 의한 침식은 공극의 확장 또는 공극 간의 교락을 발생시키며, 방전으로 이행되며 절연내력 하락은 전계가 집중되기 쉬운 돌출전극 주변에서 시작하는 경우가 많다.

변압기, 고압차단기 등, 전력기기의 제조상 결함으로 절연재료 내부에 공극이 존재하여 박리가 발생할 경우, 절연열화로 인한 부분방전이 발생하게 된다. 그러나 절연재료 열화를 촉진하는 유해한 부분방전의 크기와 수명간의 관계는 경우의 수가 많으며 절연파괴에 이르는 지점의 기존 데이터가 필요하다.

기계적인 열화의 주요 원인으로는 기기의 운전이나 정지 시 전자력, 기계적 진동, 열에 의한 응력 등이 있다. 주로 전동기나 발전기 같은 회전기에서 주로 발생하며 폐쇄배전반의 경우 초기 불량이나 시공 시 압력이나 충격에 의한 절연체의 변형이나 손상 등이 발생할 수 있다. 또한 운전 중의 전자 진동은 고분자 입자에 균열을 유발하며, 내부 모선의 고정상태가 느슨할 경우 운전 진동에 의해 철심사이에서 마찰열화가 발생한다. 이러한 현상은 단자 말단에 손상을 주기 때문에 점검 시 육안으로 관측되는 경우가 많다. 기계적 열화는 절연층의 균열, 박리, 마모에 의한 손상으로 나타나며, 최종적으로 전기적인 열화로 촉진되어 절연파괴에 이르게 된다. 또한 계기용변성기의 경우 권선 말단에서의 손상은 오손·흡습 등의 환경적 조건에 의한 열화 때문에 절연저항의 저하나 절연파괴의 원인이 된다.

환경적인 열화는 제작 및 시공 시 화학약품이나 오일, 먼지 등의 불순물에 의한 오손 그리고 사용 중 습기에 의해 발생한다. 또한 환경적 요인은 절연물의 용해나 부식 혹은 팽창에 의한 박리현상으로 나타난다. 절연물 표면에 먼지나 도전성 물질 등이 존재할 경우, 연면 절연저항의 저하로 2차적인 열화가 발생하는 경우가 많다. 먼지에 의한 오손은 철분, 탄소분 등의 도전성 물질의 부착으로 연면 절연저항을 급감시키고, 흡습에 의하여 절연저항은 더욱 저하된다. 절연체 내·외부의 온도차로 인한 결로현상은 절연파괴의 직접적 원인이 되기도 하며 흡습상태에서 운전 시 열에 의한 가수분해가 촉진된다. 그리고 연면저항이 저하된 상태에서 고전압이 가해지면 누설전류와 미소방전에 의하여 트래킹이 발생한다. 트래킹은 탄

화 도전로를 생성하여 연면방전으로 인한 절연파괴를 발생하게 된다. 그러나 환경적 열화는 통상의 경우, 절연층 표면에서 발생하기 때문에 절연체의 수명에는 직접적으로 큰 영향을 미치지 않는다. 대부분 세정과 같은 유지보수로 절연성능을 회복하는 것이 가능하며 환경적 열화는 육안으로도 정도를 추정 가능한 경우가 많다.

2.2.2 부분방전의 발생

전력기기에서 발생하는 부분방전은 국부적인 고전계의 형성에서 기인한다. 동일한 정전용량을 가지는 자유공간이나 매질에 균일하게 전계가 분포할 때 매질이 가지는 절연내력 이상의 전압이 유기되면 해당 영역의 절연이 파괴되고 방전이 발생한다. 하지만 불균일한 전계를 형성시키는 공간이나 도전성 이물질이 존재할 경우, 정전용량의 차이로 인한 국부적인 전계의 집중을 초래한다. 국부적으로 전계 집중이 발생하게 되면 부분적인 절연 파괴로 인하여 부분방전이 발생하게 된다. 초기단계에서의 부분방전은 그 에너지량이 매우 미소하다. 하지만 부분방전이 장시간 지속되면, 방전 전하량이 점차 증가하여 전기 트리를 생성하게 된다. 절연물에 트리가 형성되면 방전 전하량은 단시간에 급속도로 증가하여 탄화도전로를 성장시키고 최종적으로 절연이 파괴되어 단락 및 지락 사고로 이어지게 된다. 그리고 절연체에서 발생하는 방전은 전력설비의 금구류 및 접속부위에서의 코로나 방전, 절연체 표면을 통해 발생하는 연면 방전, 절연체 공극의 내부방전으로 구분된다^[13].

그럼 2.2과 같이 코로나 방전은 절연체의 표면에 이온빔이나 화학반응 등으로 인하여 열화를 발생시키지만 절연체의 절연성능에 직접적으로 미치는 영향은 크지 않으므로 비교적 위험하지 않다. 실제 코로나 방전은 전력설비 외부 충전부나 측정금구류 등에서 발생하는 것으로 부분방전펄스와는 구분되어야 하는데 대부분 구분이 쉽지 않아 부분방전으로 오인하는 경우가 많다.

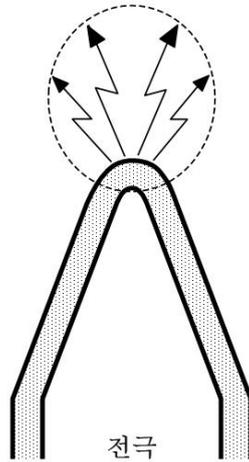


그림 2.2 코로나 방전
 Fig. 2.2 Corona discharges

연면 방전이란 그림 2.3과 같이 부적절한 절연설계에 의한 누설거리의 부족 혹은 절연체 표면오손에 기인한 유효 누설거리 감소로 인해 발생하는 방전 형상을 말한다. 연면 방전은 절연체 표면에 열화를 지속적으로 발생 및 촉진 하지만 초기에는 절연체 자체에 영향을 미치지 않는다. 반면 연면 방전에 의한 고주파 진동성 펄스가 전원전압에 중첩되면 설비의 절연물에 전기적 스트레스를 가하게 되므로 절연체에 손상을 준다^[14]. 또한 장기간 지속될 경우, 열화메커니즘을 거쳐 절연체 표면에 방전이 집중되고 침식이나 부식이 발생되어 절연체의 전기적 성능을 저하시킨다. 열화가 진전되면 연면 방전으로 인한 발열과 오손이 발생하고 전기트리가 형성되어 절연이 파괴되는 경우도 있다. 연면 방전의 절연파괴는 전원용량에 따라 다르지만 통상적으로 글로우 방전(Glow Discharge)으로 이루어지며, 아크방전(Arc Discharge)으로 진행되기도 한다. 아크방전은 강한 열과 빛 그리고 자외선 등을 동반하며 절연체료가 단시간에 심각하게 손상될 수 있다.

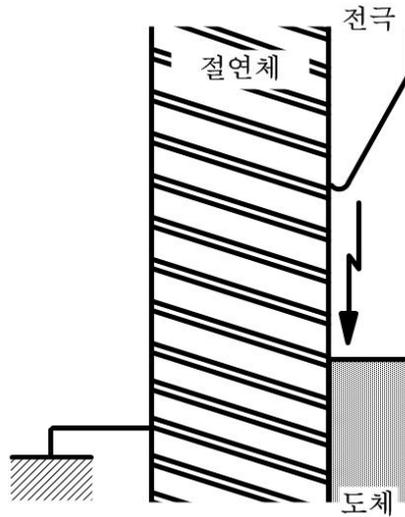


그림 2.3 연면 방전
Fig. 2.3 Surface discharges

측정된 부분방전을 분석한 결과가 노이즈나 코로나 방전, 연면 방전이 아니라면 그림 2.4와 같이 공극에서 발생한 내부 방전일 확률이 높다. 수배전반 내에 있는 고분자절연 케이블의 절연체나 사출 과정으로 제작되는 몰드변압기의 절연층은 공극이 절연체 내부에 생성될 수 있는데, 이 공극은 주로 공기로 채워져 있다. 공극을 가지는 절연물에 고전계가 인가되면 절연물에 비해 유전율이 낮은 공극에 국부적으로 전계가 집중된다. 공극에 가해지는 전압이 공극을 이루고 있는 물질의 절연내력보다 크면 기중 방전이 일어나는데, 이것을 내부 방전이라고 한다. 기체방전에 의하여 공극의 외벽은 열적, 화학적 열화가 진행되어 공극의 크기는 확장되며 이로 인해 고체 절연체의 유효 절연내력 또한 감소하게 된다.

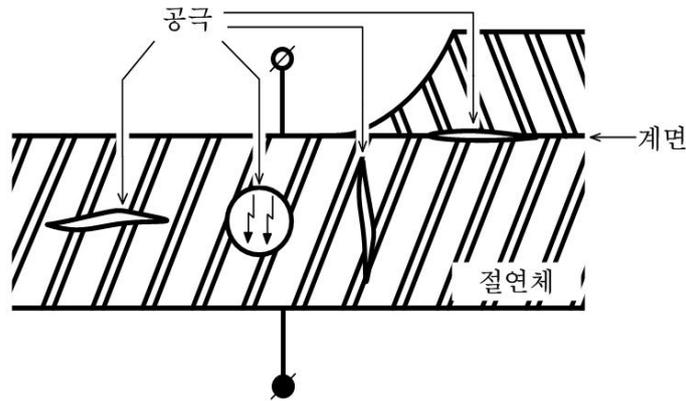
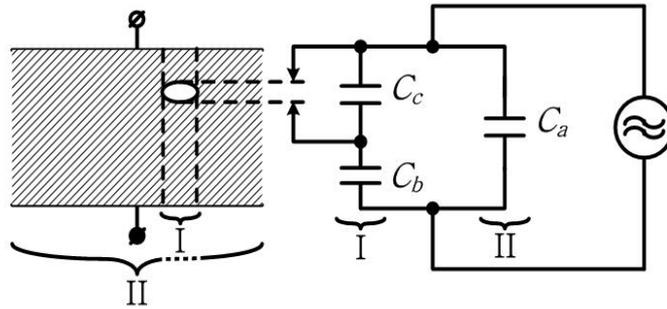
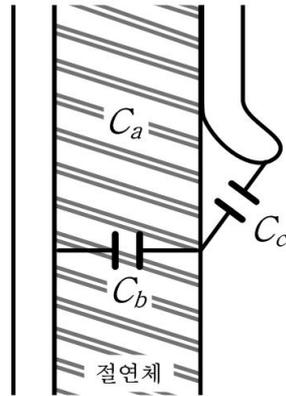


그림 2.4 내부 방전
Fig. 2.4 Internal discharges

부분방전의 발생 메커니즘은 그림 2.5의 등가회로로 설명할 수 있다^[15]. 그림 2.5(a)에서 I은 공극이 존재하는 절연체를 나타내며, II는 공극이 없는 절연체 나머지 부분을 의미한다. 결합부분에서 공극의 정전용량은 C_c 로 부분방전 발생 시 방전의 통로로 작용하게 되고 C_b 는 공극과 직렬로 연결되는 나머지 절연체의 정전용량을 나타내며, C_a 는 결합이 없는 절연체 부분의 정전용량을 의미한다. 그림 2.5(b)는 연면 방전의 등가회로를 나타낸 것으로, 그림 2.5(a)와 동일하다. 부분 방전은 전극과 절연체 사이의 정전용량 C_c , C_c 와 직렬로 연결된 절연체의 정전용량 C_b 그리고 나머지 절연체 부분은 정전용량 C_a 로 표현된다. 절연체에 공극과 같은 결함이 존재하면, 절연체 주변 전극에 교류전압이 인가되면 절연체 결함내의 정전용량 C_c 에 전계가 집중되고 공극이 가지는 절연내력 이상의 전계가 유지되면 빛, 열, 전자기파 등을 수반하는 부분방전이 발생한다. 이때 공극의 절연내력은 대기 중 기체의 절연내력과 같다^[16].



(a) 공극 방전



(b) 연면 방전

그림 2.5 결함의 등가회로

Fig. 2.5 Equivalent circuit of defects

그림 2.6은 대칭형 공극이 존재하는 절연체에서 교류전압의 한 주기 동안의 부분방전의 발생을 나타낸다. 일반적인 부분방전 펄스의 형태는 인가전압이 상승하는 부분에서 일정 시점에 도달할 때 방전되며, 전압이 감소하면 소멸하는 형태를 가지게 된다. 전압이 서서히 증가하면 전압 U 의 범위에서 공극 내에 방전이 발생하고 다시 감소하는 시점에서 전압이 V 이하로 되면 방전 펄스가 소멸한다^[17].

이와 같이 방전이 발생하는 전압 U 를 부분방전 개시 전압(Partial Discharge Inception Voltage, PDIV)이라 하고, 방전이 소멸되는 시점의 전압 V 를 부분방전 소멸 전압(Partial Discharge Extinction Voltage, PDEV)이라고 한다.

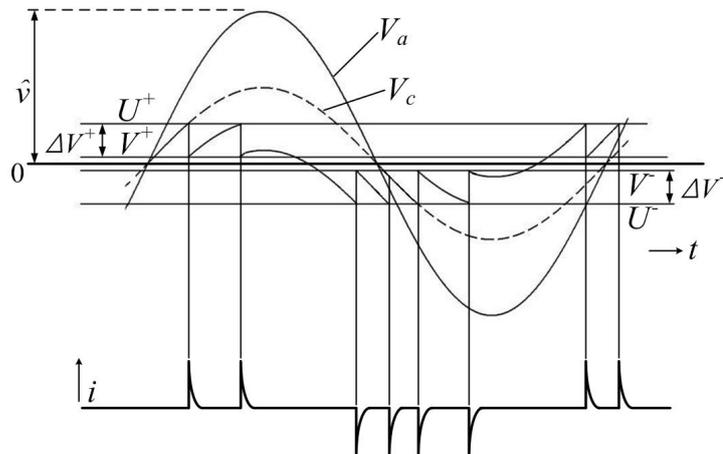


그림 2.6 교류전압에서 부분방전 발생 패턴
Fig. 2.6 Typical PD patterns in AC voltage

방전 파형에서 공극 내에 분포하는 방전전하량 q_l 은 식 (2.1)과 같다.

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

이 때, $\Delta V = U - V$ 로 공극 내의 전압강하이다. 그러나 q_l 은 직접검출이 불가능하므로, 부분방전 발생 시 리드선을 통해 전류 펄스를 검출하여 결보기 전하량 q 를 식 (2.2)처럼 계산하게 된다.

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

실제 절연 시료에서의 전압강하는 $\frac{b \Delta V}{a+b}$ 이고, q 의 값이 측정된다. 방전하량 q 가 존재할 때, 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 같다.

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

또한 방전 개시 전압은 $U = \frac{b}{(b+c)} V_i$ 와 같이 표현되며, 이때 V_i 는 시료에서 방전이 발생하는 부분방전 개시 전압이다. 따라서 식 (2.4)는 다음과 같이 정리가 가능하다.

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

식 (2.5)에서 b 는 c 에 비해 매우 작으므로 최종적으로 아래와 같다.

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

2.2.3 진단기술

산업의 발전으로 전력수요가 급증하고 전력공급의 신뢰성이 요구됨에 따라, 전력설비의 절연진단 기술이 각광받고 있다. 최근 전력설비의 유지 보수 및 절연진단의 세계적 추이는 선진국을 중심으로 활발히 연구가 진행되고 있다. 이러한 기술은 전력설비의 절연열화나 이상 유무를 상시 감시하여 발생 가능한 사고를 조기에 진단하고 유지 보수함으로써, 전력공급의 안정성과 신뢰성을 확보하는 것을 목적으로 한다^[18].

표 2.4 진단 기법

Table 2.4 Diagnostic techniques

종 류	검출 방법
정전 진단	절연저항 측정
	누설전류 측정
	유전정접($\tan\delta$) 측정
	주파수 응답 분석
무 정전 진단	전기적 측정 (커플링 커패시터)
	전자파 측정 (VHF, UHF 안테나)
	광학적 측정 (적외선, 자외선)
	음향신호 측정 (AE, 마이크로폰)
	TEV 측정 (TEV 센서)
	기계적 측정 (진동센서)
	화학적 측정 (연기, 가스)

현재까지 개발 및 상용화된 절연진단 기술은 표 2.4와 같이 크게 정전 진단방법과 무 정전 진단방법으로 나눌 수 있으며, 무 정전 진단방법은 최초 제작 시 또는 정밀진단이 요구될 때 사용된다. 그러나 진단에 필요한 파라미터를 검출하기 위하여 설비를 중단시켜야 하는 단점이 있어 운전 중 설비의 상시진단이 어렵다. 반면 무 정전 진단방법은 전력공급의 중단 없이

현장에서 측정이 가능하여 시간적, 경제적으로 유리하며 운전 중 기기의 상태를 지속 확인할 수 있어서 전력설비에 활발히 적용되고 있다.

전기적 측정법은 폐쇄배전반 내의 전력기기에서 접촉 불량, 절연열화 등으로 인하여 부분방전의 펄스성 전류를 검출하는 방법이다. 부분방전 신호는 커플링 커패시터와 검출 임피던스 및 접지선에 관통형 고주파 변류기 등을 이용하여 검출한다. 검출 임피던스 및 커플링 커패시터를 이용한 방법은 감도가 우수하지만 사용 환경에서 전자계 노이즈의 영향을 쉽게 받으며, 폐쇄배전반의 경우 결합 위치를 파악하기 힘들다. 또한 운전 중 결합회로망의 설치가 불가능하며 장시간 사용할 경우 커플링 커패시터의 절연성능이 저하될 수 있기 때문에 현장 적용이 매우 힘든 실정이다.

전자파 검출법은 부분방전 발생 시 방사되는 전자파를 검출하여 이상여부를 확인하는 방법으로, 주파수는 30 Hz ~ 300 MHz(Very High Frequency, VHF) 또는 300 MHz ~ 3 GHz(Ultra High Frequency, UHF) 대역을 갖는다. 전자파를 검출하는 방법은 감도는 우수하지만 외부 노이즈에 영향을 받기 쉬우며 검출 센서에 하나의 주파수 분석기만 사용이 가능하다. 또한 ns의 펄스를 측정하므로 계측기의 수평 분해능이 높아야 하는 단점이 있다.

광학적 검출법에는 적외선을 측정하는 방법으로 방전에 의해 발생하는 열을 적외선 카메라로 검출하는 방식으로 영상처리 기법이다. 사용자가 쉽고 안전하며 정확하게 측정대상을 선택하여 온도를 확인할 수 있는 장점이 있지만 장비에 대한 의존성이 높으며, 폐쇄배전반과 같이 밀집된 장소에서 사용하기에는 어려움이 많다.

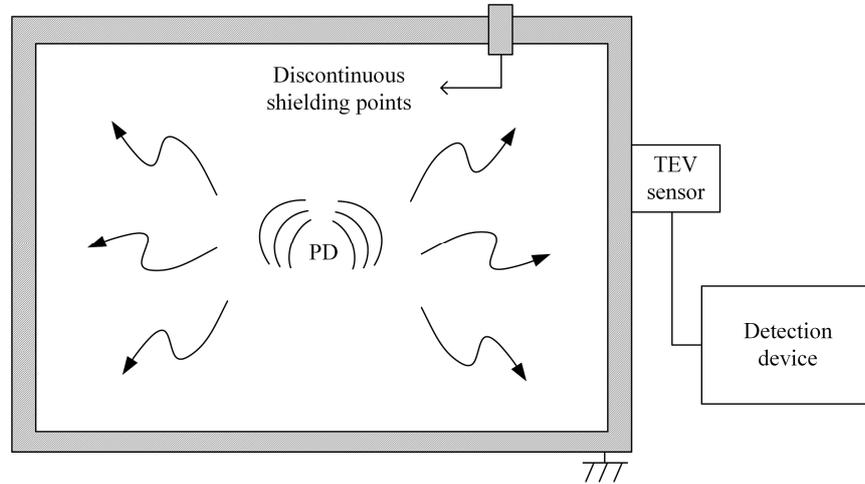
기계적, 화학적 측정법의 경우 부분방전으로 인해 발생하는 진동, 분해가스를 검출하는 방식이다. 기계적 측정법의 경우 설비의 주변 환경에 따라 적용이 불가능한 경우가 많으며 화학적 측정법 역시 절연진단 시 조기 진단이 불가능한 점에서 현장 적용에 무리가 있다.

그 외에 AE 센서나 마이크론을 이용한 음향신호 측정법, 폐쇄배전반 내부의 온도 변화를 측정하여 상태를 감시하는 방법 등이 있지만 아직까지 학술적 연구만 진행되었고 현장 적용은 힘든 실정이다.

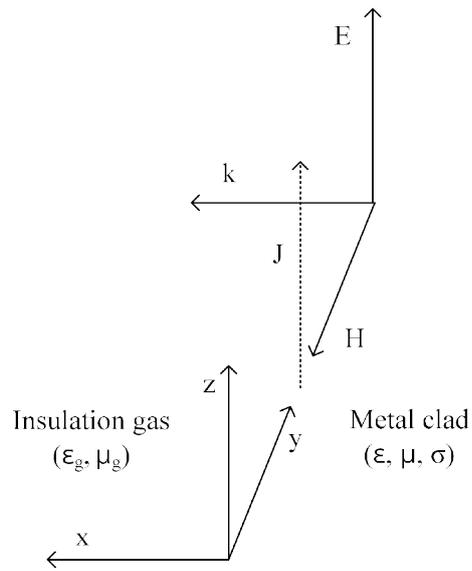
반면 활선 상태에서 비접촉식 TEV 센서를 이용한 방법은 접지되어있는 기기 외함에 탈·부착식으로 간편한 설치가 가능하다. 또한 부분방전 발생 시 유도되는 TEV 신호를 검출하는 방식으로 절연에 문제가 없다. 또한 D·dot 센서로서 높은 커패시턴스로 신호가 적분되어 전자파 측정법에 비해 수평 분해능이 높지 않아도 된다.

2.3 TEV 발생원리

TEV의 발생원리를 그림 2.7에 나타내었다. TEV는 전기기기 및 설비에서 절연 열화로 발생하는 부분방전에 의해 접지된 금속물 표면에 유도된 전압을 의미한다. 부분방전 발생 시 절연체, 절연 기둥 및 플랜지 접합부와 같은 불연속 차폐 지점이 있을 경우 고주파의 전자기파가 누설되고 금속물 표면 임피던스에 의해 유기된다^[19]. 접지된 외함은 안테나 효과로 신호 출력은 있지만 위상 정보는 얻을 수 없다. 그리고 접지된 금속 외함과 수 mm의 절연간격을 띄운 금속 평판으로 표류정전용량을 측정하는 것을 TEV 센서라고 한다. 그림 2.7 (a)와 같이, 절연기체 내에서 방사되는 전자기파를 파동방정식으로 전자계 분석을 하였다. 그림 2.7 (b)에서, ϵ_g 는 절연기체의 유전율, μ_g 는 절연기체의 투자율이며, 금속 외함의 유전율, 투자율 및 도전율을 각각 ϵ , μ , σ 라 한다. 또한 입사 전자파의 전기 성분을 E , 입사 전자파의 자기 성분을 H , 전자기파의 전파 방향을 k 그리고 금속에 유도된 전류밀도를 J 로 나타내었다.



(a) 전자기파의 전파



(b) TEV 신호의 발생

그림 2.7 TEV 신호의 발생 원리
Fig. 2.7 Principle of TEV signal

부분방전 발생 시 방사되는 전자기파를 $x=0$ 인 yz 평면에 수직 입사한다고 가정할 때, 전자기파의 전계성분 및 자계성분은 식 (2.7)과 같다.

$$E_i = \bar{z}E_z = \bar{z}\varepsilon_g^{-j\beta x}, \quad H_i = -\bar{y}H_y = -\bar{y}\frac{\varepsilon_g}{\eta_g}e^{-j\beta x} \quad (2.7)$$

그리고 절연 매질의 임피던스 특성을 η_0 , 전자기파의 위상 상수를 β , 도체에서 전자기파의 표피효과를 δ , 전파 상수를 γ , 전자기파의 각주파수를 ω , 전자기파의 주파수를 f 라 할 때,

$$\eta_0 = \omega \sqrt{\frac{\mu_g}{\varepsilon_g}}, \quad \beta = \omega \sqrt{\mu_g \varepsilon_g}, \quad \gamma = \frac{1+j}{\delta}, \quad \delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.8)$$

로 나타내며 μ_g 는 기체의 투자율, ε_g 는 기체의 유전율을 의미한다. 전계 E_z 에 의해 만족되는 파동 방정식은 (2.9)과 같이 도출된다.

$$\frac{d^2 E_z}{dx^2} - \gamma^2 E_z = 0 \quad (2.9)$$

$x=0$ 에서 전계의 세기는 (2.10)와 같고 E_0 는 금속판 표면과 평행한 전계를 나타낸다.

$$E = \bar{z}E_0 \quad (2.10)$$

파동방정식 (2.9)과 (2.10)로부터 금속표면의 전계 세기는 아래와 같다.

$$E_z = E_0 e^{-\frac{x}{\delta}} e^{-j\frac{x}{\delta}} \quad (2.11)$$

전계로부터 도체에 유도된 전류밀도는 (2.12)으로 계산할 수 있다.

$$J_z = \sigma E_z = \sigma E_0 e^{-\frac{x}{\delta}} e^{-j\frac{x}{\delta}} \quad (2.12)$$

단위 면적당 흐르는 전류는 유도된 전류밀도를 면적에 대해 중적분하면 식 (2.13)과 같고,

$$I_z = \iint J_z dS = \frac{\sigma \delta}{1+j} E_0 = \frac{E_0}{Z_s} \quad (2.13)$$

표류전류에 의해 축적된 전하 Q 와 센서의 커패시턴스 C 로부터 TEV 신호 크기는

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{C} \iint_S I_z dS = \frac{1}{C Z_s} \iint_S E_0 dS \quad (2.14)$$

로 구해진다. 최종적으로 구해진 TEV 신호의 크기는 식 (2.15)와 같다.

$$V = \frac{\sigma \delta}{C(1+j)} \int \left(\iint_S E_0 dS \right) dt \quad (2.15)$$

부분방전 발생 시, TEV 신호의 크기는 금속표면의 임피던스 Z_s 에 반비례하고 금속표면과 평행한 입사전계의 단위면적의 중적분에 비례한다.

제 3 장 TEV 센서

3.1 설계 및 제작

TEV 센서의 원리는 앙페르(Ampere)의 주회법칙의 미분형태인 맥스웰(Maxwell)의 제 2방정식을 기초로 하며, 원리도와 등가회로를 그림 3.1에 나타내었다.

$$\nabla \times H = J + J_d \quad (3.1)$$

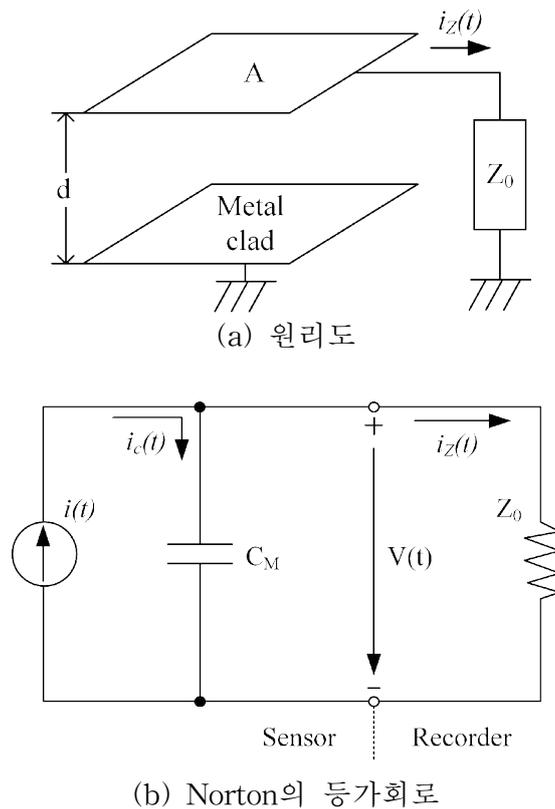


그림 3.1 TEV 센서의 원리도와 등가회로

Fig. 3.1 Principle diagram and the equivalent circuit of TEV sensor

식 (3.1)에서 우변항의 첫째항인 전류밀도 J 는 전하밀도가 0인 공간에서 전하의 이동에 의한 전도전류밀도로써

$$J = \sigma E \quad (3.2)$$

이며, 둘째항인 J_d 는 유전체에 존재하는 변위전류밀도이다. 아래와 같이

$$J_d = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (3.3)$$

로 표현할 수 있고, 전도전류밀도에 비해 위상이 90° 앞선다. 식 (3.1)를 TEV 센서의 입사면적 S 에 대해 적분하여 전계가 시간적인 변화를 가질 때의 앙페르의 주회법칙을 구하면

$$\int_S (\nabla \times H) \cdot dS = \int_S J \cdot dS + \int_S \frac{\partial D}{\partial t} \cdot dS \quad (3.4)$$

가 되고, $I = \int_S J \cdot dS$, $I_d = \int_S \frac{\partial D}{\partial t} \cdot dS$ 이므로

$$\int_S (\nabla \times H) \cdot dS = I + I_d = I + \int_S \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \cdot dS \quad (3.5)$$

로 표현할 수 있다. 위의 식 (3.5)에 스토크스(Stokes)의 정리를 적용하면

$$\oint H \cdot dL = I + I_d = I + \int_S \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \cdot dS \quad (3.6)$$

로 구해진다.

TEV 센서의 검출전극과 급속 외함 사이의 유전체에 의한 정전용량 C_M 과 입사전계의 의해 형성되는 전압 $V(t)$ 는 전위 차에 의해 충전전류 $I(t)$ 를

$$I(t) = C_M \frac{dV(t)}{dt} \quad (3.7)$$

발생시키며, 식 (3.7)을 $V(t)$ 에 관하여 정리하면

$$V(t) = \frac{1}{C_M} \int_t I(t) \cdot dt \quad (3.8)$$

로 표현이 된다. 이때의 센서 전극의 충전전하량 Q_e 은

$$Q_e = C_M V(t) = \int_S D \cdot dS = \int_S \varepsilon E \cdot dS \quad (3.9)$$

와 같으므로, 센서에 입사되는 전계의 세기 E 는

$$E = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial C_e V(t)}{\partial S} \quad (3.10)$$

로 구해진다.

입사전계가 TEV 센서에 도달하는 동안 매질에 의한 손실이 없다고 가정하면, 식 (3.6)과 식 (3.7)에 의해 흐르는 전체 전류는

$$I(t) = C_e \frac{dV(t)}{dt} = I + \int_S \varepsilon \frac{dE}{dt} \cdot dS \quad (3.11)$$

로 표현할 수 있다.

식 (3.10)을 식 (3.11)에 대입하여 센서의 충전전류 $I(t)$ 을 구하면

$$I(t) = I + V(t) \frac{dC_e}{dt} + C_e \frac{dV(t)}{dt} \quad (3.12)$$

가 된다. 따라서 식 (3.12)를 식 (3.7)에 대입하여 전계의 의해 센서 출력에 형성되는 전압 $V(t)$ 을 구하면

$$V(t) = \frac{1}{C_e} \left(\int_t I \cdot dt + V(t) dC_e + C_e dV(t) \right) \quad (3.13)$$

가 된다.

그림 3.1(a)에 나타낸 것과 같이 검출전극과 접지전극(금속 외함) 사이에는 유전체가 존재하므로 전도전류밀도 $J = \sigma E = 0$ 이 되며, $\int_t I \cdot dt = 0$ 이 되고 식 (3.12)과 식 (3.13)는 다음과 같이 정리된다.

$$I(t) = V(t) \frac{dC_e}{dt} + C_e \frac{dV(t)}{dt} \quad (3.14)$$

$$V(t) = \frac{1}{C_e}(V(t)dC_e + C_e dV(t)) \quad (3.15)$$

또한, 계측기기의 입력임피던스를 고려할 때, 그림 3.1(b)에 Norton의 등가회로로부터 전체 전류 $I(t)$ 는

$$I(t) = i_C(t) + i_Z(t) \quad (3.16)$$

로 표현된다.

$I(t)$ 는 센서에 입사되는 변위전류밀도 J_d 와 단면적 S 의 곱으로 표현될 수 있으므로 다음과 같이

$$\varepsilon \frac{dE(t)}{dt} \cdot S = C_e \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{Z_o} \quad (3.17)$$

로 정리된다. 따라서 전체 전류 $I(t)$ 는 TEV 센서를 구성하는 유전체의 유전율 ε 과 계측기기의 입력임피던스 Z_o 의 크기에 영향을 받는 것을 알 수 있으며, 계측기기의 입력임피던스와 출력전압의 관계는 다음과 같다.

(a) 계측기기의 입력임피던스가 클(1 [MΩ]) 경우

식 (3.17)에서 우변항의 둘째 항 $\frac{V(t)}{Z_o}$ 가 무시되어

$$\varepsilon \frac{dE(t)}{dt} \cdot S = C_e \frac{dV(t)}{dt} \quad (3.18)$$

로 표현할 수 있다. 식 (3.18)의 $C_e = \varepsilon \frac{S}{d}$ 이므로 입사전계의 의해 센서에 형성되는 전압 $V(t)$ 는

$$V(t) = d \times E(t) \quad (3.19)$$

로 되어 $V(t)$ 의 크기는 입사전계의 세기와 센서의 절연층의 두께 d 에 비례하게 된다. 이와 같이 검출전압이 입사전계에 의해 결정되는 센서를 이도트(E-dot) 센서라고 한다.

(b) 계측기기의 입력임피던스가 작을(50[Ω]) 경우

식 (3.17)에서 우변항의 첫째항 $C_e \frac{dV(t)}{dt}$ 가 무시되므로

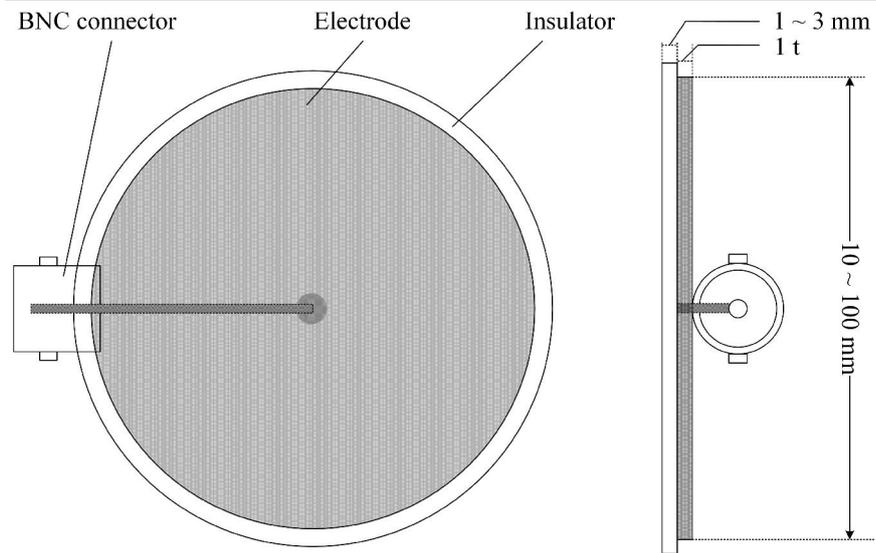
$$S \times \varepsilon \frac{dE(t)}{dt} = \frac{V(t)}{Z_o} \quad (3.20)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (3.20)을 입사전계의 의해 센서 전극에 형성되는 전압 $V(t)$ 로 나타내면

$$V(t) = S \times Z_o \times \varepsilon \frac{dE(t)}{dt} = S \times Z_o \times \frac{dD(t)}{dt} \quad (3.21)$$

로 되어 $V(t)$ 의 크기는 입사전속밀도와 센서의 단면적 S 에 비례하게 된다. 이와 같이 검출전압이 입사전속밀도 즉, 전속밀도의 시간적 변화율에 의해 결정되는 센서를 디도트(D-dot) 센서라고 한다.

본 논문에서의 측정 대상은 10~20 ns의 상승시간을 가지는 부분방전 신호이므로 1 [M Ω] 이상의 입력임피던스를 갖는 계측기기를 사용할 경우 시정수에 의한 영향으로 파형의 왜곡이 발생하므로 정확한 부분방전 신호의 측정을 위해 식 (3.21)에 따라 그림 3.2와 같이 디도트 센서를 설계·제작하였다. TEV 원리를 이용하여 부분방전 신호를 검출하기 위해 제작된 시제작 센서는 1 t 두께에 10 ~ 100 mm 직경의 다수의 동판과 BNC(Bayonet Neill-Concelman) 커넥터를 직접 연결하였고 동판 접촉면에 절연지를 부착했다. 동판의 부착면에는 충분한 절연내력을 갖는 PVC(Polyvinyl chloride) 절연지를 사용하였다. 또한 센서 외함 제작 시 절연층의 두께를 고려하여, PVC 절연지의 장 수를 바꿔 절연층 두께를 1 mm, 2 mm, 3 mm로 모의하여 센서 특성을 모의하였다.



(a) 구조



(b) 시제품 사진

그림 3.2 TEV 센서
Fig. 3.2 TEV sensor

3.2 센서의 특성 평가

TEV 센서의 감도 및 주파수응답을 분석하기 위해, 500 kHz ~ 1 GHz 대역을 갖는 신호 발생장치(Signal generator, SG 1710)를 180 mm * 50 mm의 금속 외함(Metal clad, 함석)에 연결하여 그림 3.3과 같이 TEV 신호를 모의하였다. 신호 발생장치에서 발생한 펄스는 표피효과로 금속 표면에 흐르며 용량성 프로브인 TEV 센서로 검출된다. 신호의 검출 및 분석에는 1 GHz, 5 GS/s의 DSO(Digital storage oscilloscope, DL 9140)를 사용하였다. 또한 센서의 지연시간을 보기 위해 100 pC_{MAX}의 펄스 발생장치(Pulse generator, CAL1A)를 사용하였으며, 커패시턴스의 측정을 위해 임피던스 측정기(RLC meter, 3522)를 사용하였다.

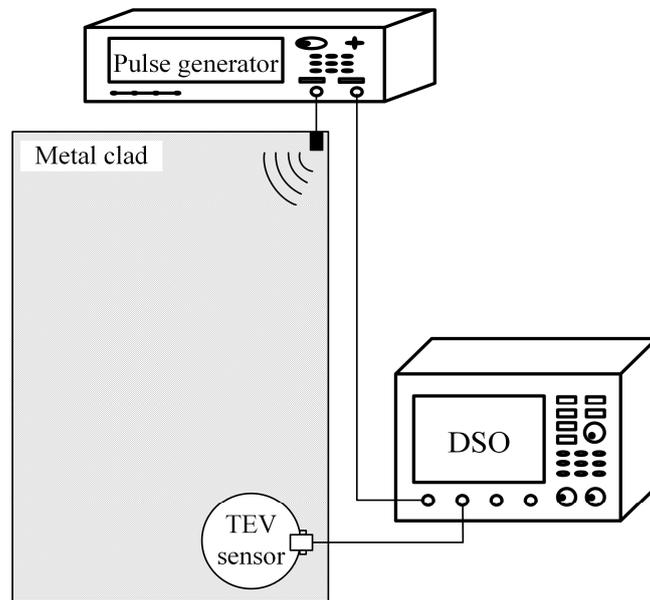


그림 3.3 실험계

Fig. 3.3 Experimental setup

신호 발생장치로 TEV 센서의 직경에 따른 주파수 응답을 확인하였다. 센서별 절연두께는 1 mm로 고정한 상태에서 검출하였다. TEV 신호는 주로 1 ~ 100 MHz영역에 분포하므로, 1000 mV_{rms}(60 dBmV)의 크기를 갖는 정현파의 주파수를 1 Hz에서 100 MHz로 가변하여 센서 별 검출한 값을 그림 3.4에 나타내었다. 식 (3.21)로부터 센서의 단면적이 클수록 측정되는 미지의 전압이 큰 것은 자명한 사실이나, 특정 주파수에서는 공진현상 때문에 면적과는 무관하게 센서의 형상에 따라 검출 크기가 증폭이 된다. 또한 직경 30 mm 센서의 경우, 응답 특성이 우수한 13 ~ 42 MHz 부근에서도 40 ~ 45 dBmV로 감도가 비교적 낮음을 확인할 수 있었다. 용량성 프로브인 TEV 센서의 경우, 부분방전 발생 시 전자기파의 방사 거리, 방사 경로의 매질 그리고 표면 임피던스에 의해 감도의 오차가 발생할 수 있다.

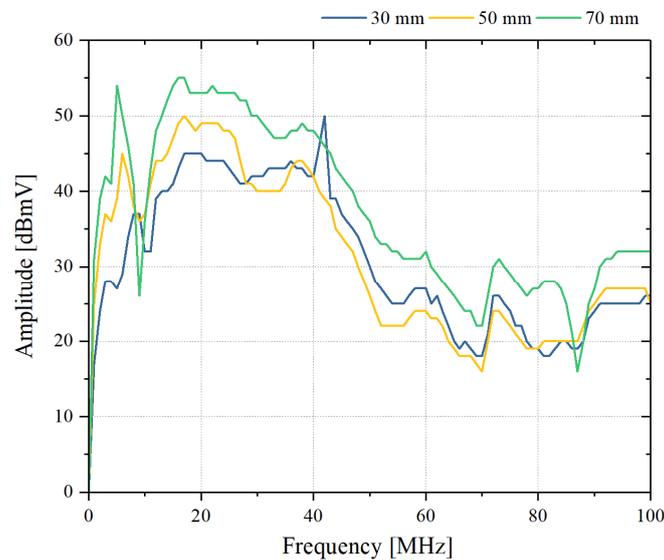
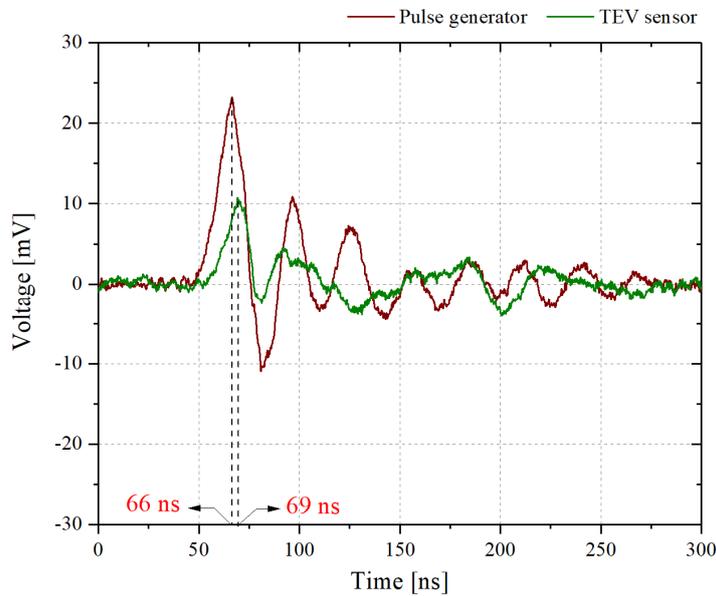


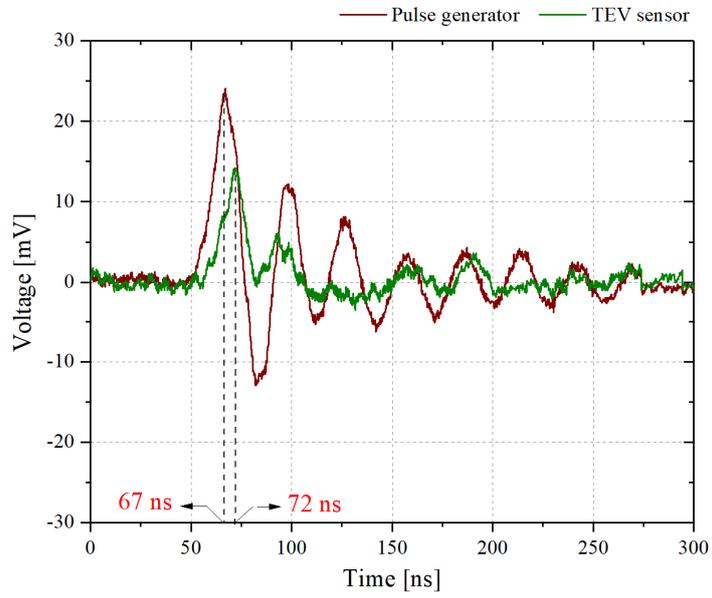
그림 3.4 TEV 센서 직경에 따른 주파수 응답

Fig. 3.4 Frequency responses depending on diameter of TEV sensor

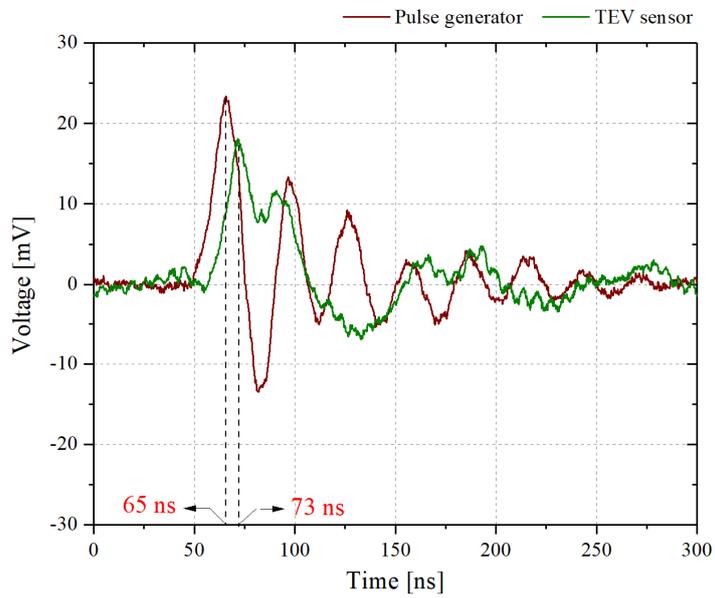
그림 3.5는 펄스 발생장치로 인가한 전류 신호의 직접 검출 파형(갈색 파형)과 TEV 센서로 검출된 신호(녹색 파형)의 시간차를 나타내었다. 펄스 발생장치는 100 pC 크기의 부분방전과 유사한 신호를 일정하게 발생시켜 시스템의 교정을 위한 장비로, 본 실험에서는 센서의 면적에 따른 지연시간을 확인하기 위해 사용되었다. 직접 검출신호에 대한 센서 출력 신호의 시간차는 30 mm 센서의 경우 3 ns 차이가 났고, 50mm 센서와 70 mm 센서의 경우 각각 5 ns, 8 ns 차이가 생겼다. 면적이 클수록 시간 지연이 생기는 이유는, 센서의 정전용량이 면적에 비례하기 때문이다. 즉, 센서의 면적이 커질수록 검출감도는 우수하지만 파형이 늘어져 상승시간과 응답 시간이 길어지게 된다. 부분방전의 펄스 반복률은 수백 ~ 수천 회로, 평균 펄스 반복시간은 수백 us ~ 수 ms이다. 따라서 TEV 센서가 갖는 지연시간인 수 ns의 경우 모든 부분방전을 샘플링함에 문제가 없다.



(a) 30mm 직경 TEV 센서



(b) 50mm 직경 TEV 센서



(c) 70mm 직경 TEV 센서

그림 3.5 TEV 센서 직경에 따른 지연시간

Fig. 3.5 Response time depending on diameter of TEV sensor

그림 3.6은 센서 직경에 따른 감도이다. 센서의 커패시턴스는 절연물의 두께에 반비례하고 절연체의 유전율과 전극의 면적에 비례하게 되는데, 제작된 센서들은 절연체가 PVC 재질로 유전체 및 두께가 모두 동일할 때 센서의 면적(전극)에 비례하여 감도가 우수해졌다. 하지만 센서가 일정 면적 이상 커짐에 따라 감도가 선형적으로 변하지는 않았는데, 그 이유는 동일한 조건에서 전극에 입사되는 단위 시간당 입사변위전류량은 유한하기 때문이다. 센서의 감도는 최대 입사변위전류량까지는 선형적으로 비례하지만 그 후에는 겹보기 전하량에 크기에 비례하게 된다. 이와 같이 센서의 면적이 커질수록, 절연두께가 얇을수록 감도가 우수하지만 겹보기 전하량이 제한된다면 그림 3.6에 나타나듯 일정 면적 이상 커지는 것은 무의미하게 된다.

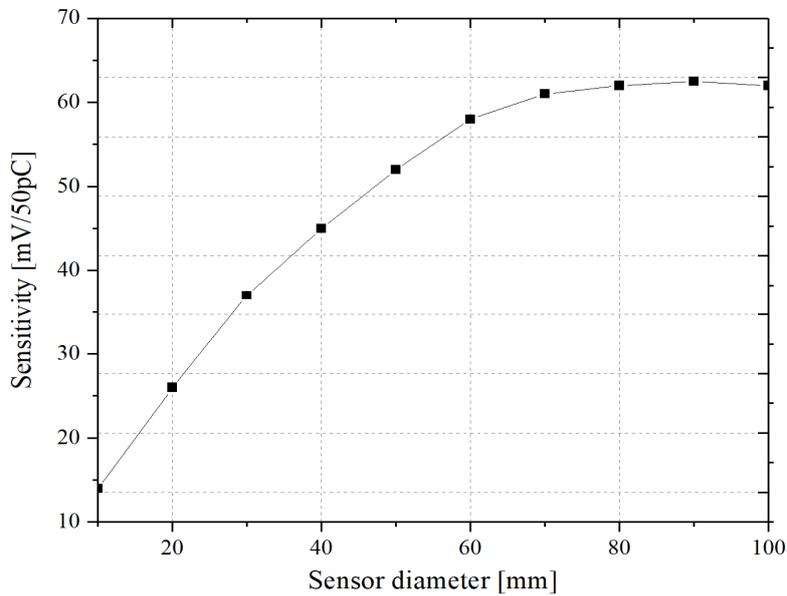


그림 3.6 TEV 센서 직경에 따른 감도
 Fig. 3.6 Sensitivity of TEV sensor depending on diameter

그림 3.7은 겉보기 전하량에 따른 센서별 응답 크기를 나타내었다. 30 mm 직경의 센서는 겉보기 전하량이 80 pC인 지점부터 포화되어 응답크기는 일정하였다. 50 mm 이상의 직경에서는 응답크기가 선형적으로 나타났다.

펄스 발생장치를 통해 50 pC의 일정한 신호가 발생할 때, 센서별로 검출한 TEV 신호를 그림 3.8에 나타내었다. 겉보기 전하량이 50 pC으로 유사할 때, 면적이 클수록 검출되는 신호의 크기는 커지며, 절연두께가 두꺼워질수록 신호의 크기는 작아졌다. 즉, 센서의 감도는 커패시턴스의 크기에 따라 정해진다. 또한 센서로부터 검출된 파형은 1 μ s 정도의 파장을 갖고 있는데, 이는 금속 외함 표면의 저항과 센서의 커패시턴스에 의해 정해지는 시간상수에 따라 주파수가 바뀌기 때문이다. 직경 70 mm, 절연두께 1 mm의 TEV 센서는 검출신호 크기가 62 mV_P이고 직경 30 mm, 절연두께 3 mm의 TEV 센서는 검출신호 크기가 23 mV_P로 평균 3배 이상 차이가 났다.

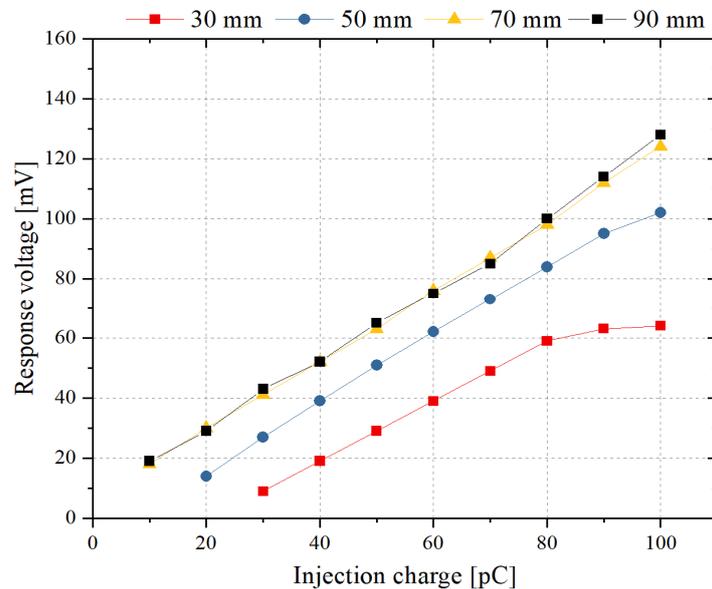
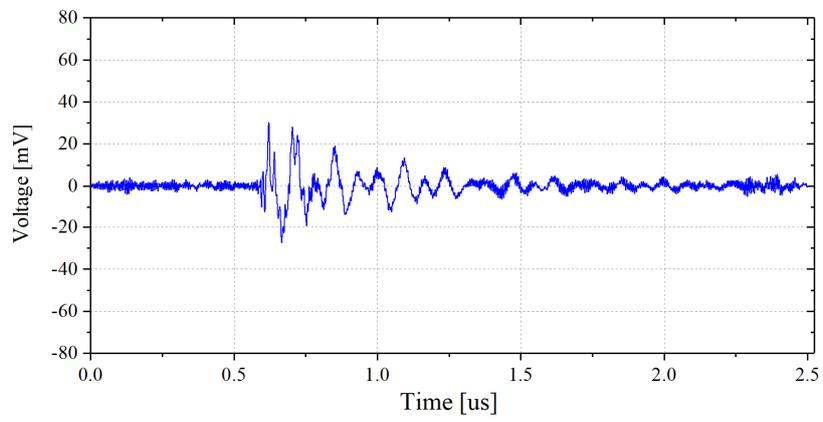
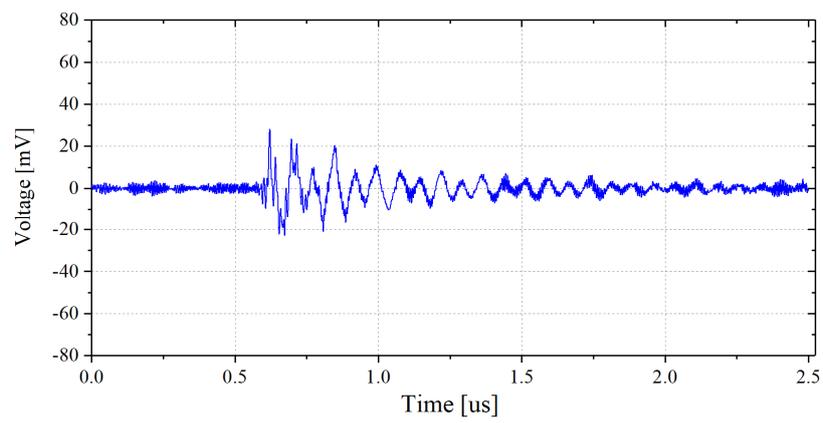


그림 3.7 겉보기 전하량에 따른 TEV 센서의 응답

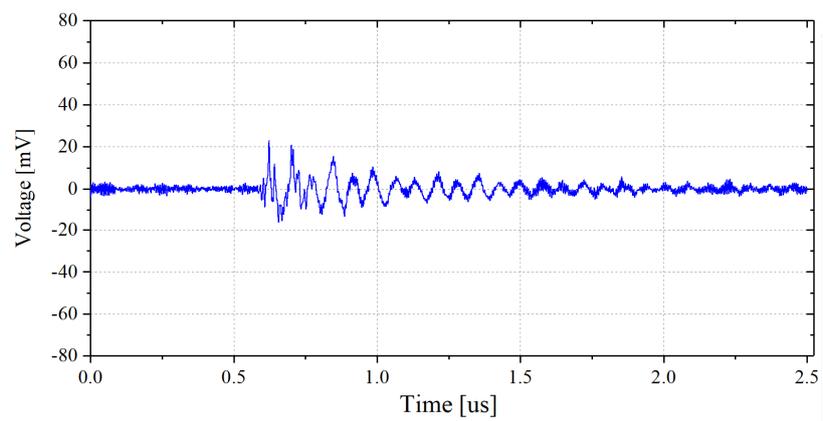
Fig. 3.7 Response of TEV sensor depending on apparent charge



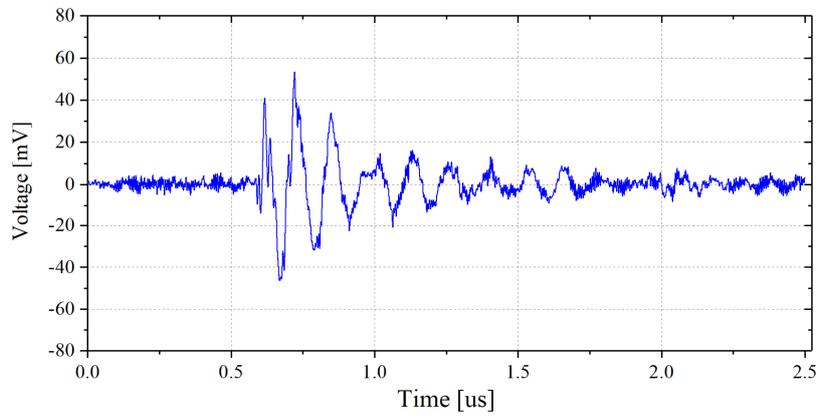
(a) 30Φ , 1 mm



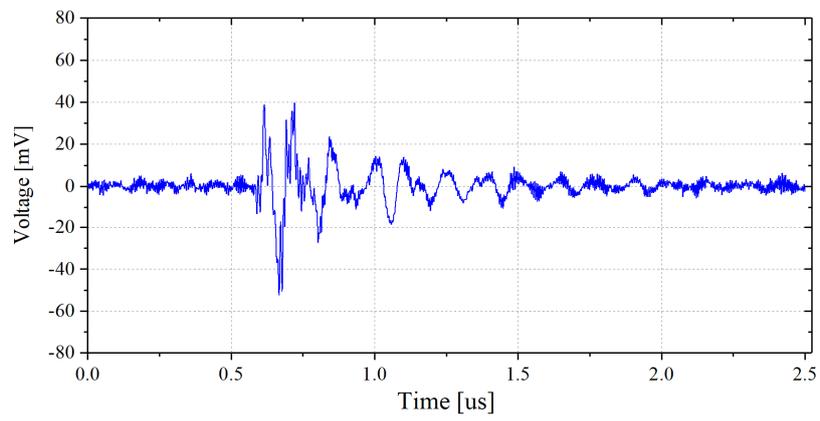
(b) 30Φ , 2 mm



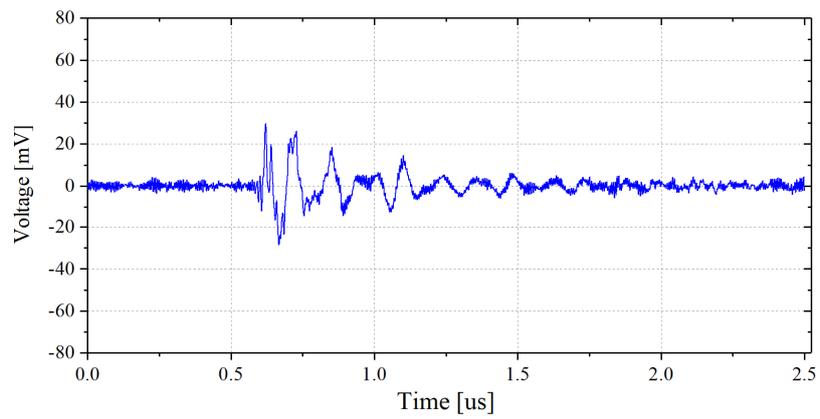
(c) 30Φ , 3 mm



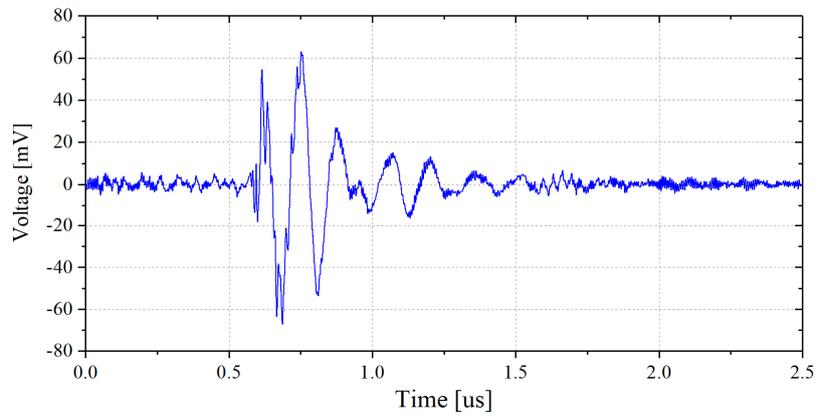
(d) 50 Φ , 1 mm



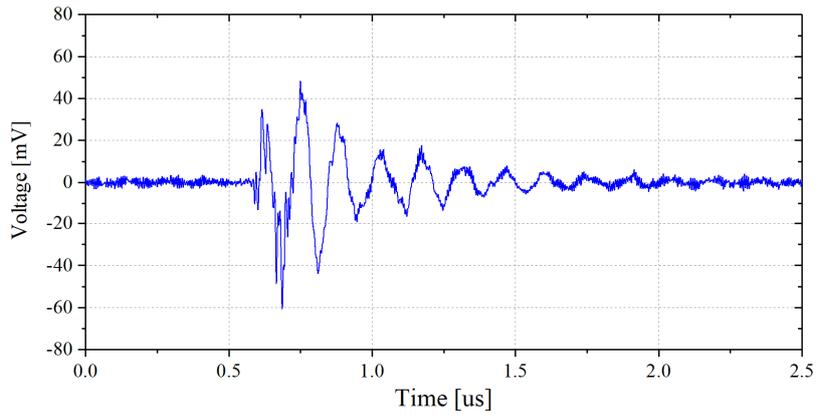
(e) 50 Φ , 2 mm



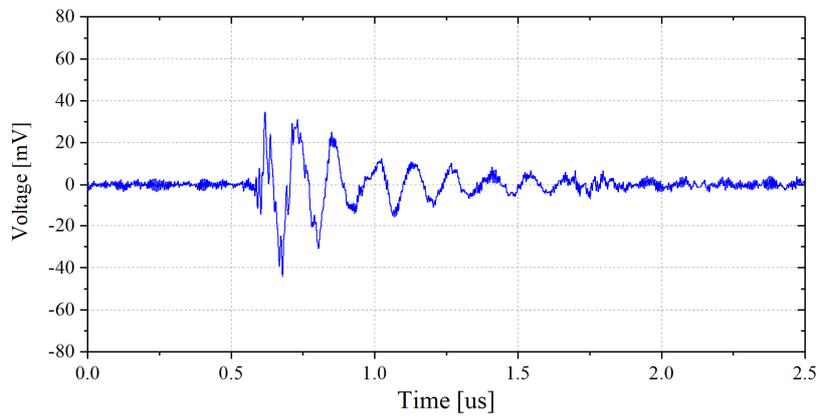
(f) 50 Φ , 3 mm



(g) 70 Φ, 1 mm



(h) 70 Φ, 2 mm



(i) 70 Φ, 3 mm

그림 3.8 센서 직경 및 절연 두께에 따른 TEV 신호

Fig. 3.8 Detected TEV signal depending on sensor diameter and an insulating thickness

제 4 장 적용 평가

4.1 실험계

특고압 전력기기 및 고압배전반에서 절연열화에 의해 발생하는 부분방전을 모의하기 위해 그림 4.1과 같이 실험계를 구성하였다. 실험계는 출력전압 최대 50kV, 출력전류 30mA의 절연형 몰드 변압기를 사용하였다. 전원 인입단에 NCT(Noise cut transformer)를 연결하여 전원으로부터 유입되는 전도 노이즈의 영향을 제거하였다. 또한 외부로부터의 방사노이즈에 대한 영향을 최소화하기 위해 차폐함 내에 부분방전 발생 전극계를 구성하였다. 제작된 TEV 센서의 특성평가를 통해 전력기기에서 방전 전하량이 10 ~ 100 pC의 일반적인 상황에서 최적합한 직경 70 mm, 절연두께 1 mm, 1.2 mV/pC의 센서를 사용하였다. 결함 전극계는 전력기기의 시공·제조상 결함으로 생긴 돌출 전극을 모의하기 위한 침과 평판으로, 철 재질인 침전극의 곡률반경은 10 μm 이며, 평판전극은 50 mm 지름의 텅스텐-구리합금 재질이다. 침전극과 평판전극은 5 mm 거리에 두었으며, 평판 전극은 가장자리를 둥글게 처리하여 전계의 집중이 발생하지 않도록 제작되었다. 그리고 도전성 입자의 경우 2 mm 지름의 철 재질 구이다.

고압배전반의 사고는 고체 절연물의 결함 및 조립·설치 과정 중 품질관리 미흡에 의해 발생하며, 제작이나 운전과정 중 도전성 이물질의 혼입에 의해 사고를 일으키는 경우가 많다. 사고의 주원인이 되는 부분방전은 결함 및 절연물의 종류에 따라 고유한 방전특성을 가진다. 따라서 고압배전반에서 발생 가능한 도체 돌출, 외함 돌출 그리고 도전성 입자를 모의하기 위해 그림 4.2와 같이 기준 전극계를 제작하였다.

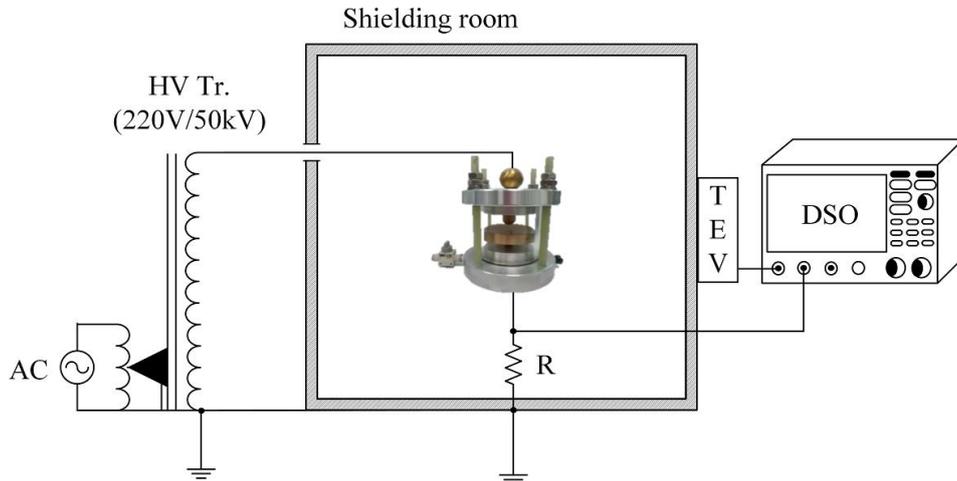
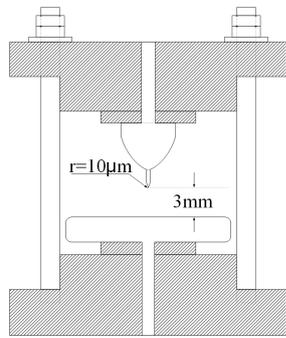


그림 4.1 실험계

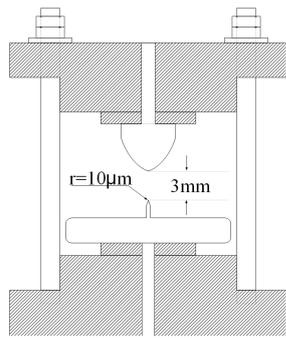
Fig. 4.1 Experimental setup

결함 중 도체 돌출과 외함 돌출의 차이점은 정극성 결함과 부극성 결함을 예로 들 수 있다. 이러한 돌출부는 제작과정이나 운송 또는 조립과정 중 마모 및 충돌 등으로 기계적 손상 때문에 발생한다. 도체 돌출은 고압측 도체 표면 그리고 외함 돌출은 접지되어 있는 외함 표면에 부분적으로 돌기가 형성된다. 고압배전반은 충분한 절연내력을 갖도록 설계되어 정상 운전 상태에서 사고로 이어지는 경우는 드물다. 하지만 과부하, 습기 등 악조건 상황에서나 뇌 충격전압 및 개폐서지와 같은 급준파 전압이 발생할 경우 전계가 국부적으로 집중되어 절연파괴로 이어진다.

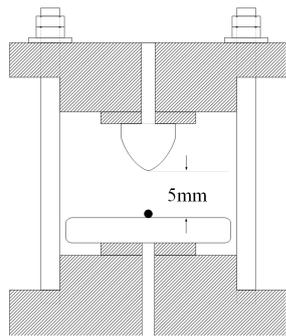
도전성 입자는 고압배전반의 결함 중 가장 주된 원인의 결함으로써 장치의 제작 시 혹은 현장조립 시 생성되거나 혼입되며 운전 과정에서 생성되는 것이 일반적이다. 고압배전반은 절연거리의 축소되어 인입부는 고전계 상태를 유지하므로, 입자가 절연물 표면에 부착되면 절연성능을 현저히 저하시켜 절연파괴 확률이 높아진다. 입자는 재질, 위치, 형상 등에 영향을 받아 활동하게 되며 이러한 파라미터가 사고발생 위험도를 결정하게 된다.



(a) 도체 돌출



(b) 외함 돌출



(c) 도전성 입자

그림 4.2 전극계

Fig. 4.2 Electrode system

4.2 TEV의 주파수 스펙트럼

제작한 전극계에 5.9 ~ 6.5 kV_{rms}의 교류전압을 가변시키며 부분방전을 모의하였고 측정 시스템을 통해 부분방전 펄스를 검출하였다. KS C IEC 60270에서 규정된 전기적 검출방법을 이용하여 획득한 부분방전 펄스와 TEV 센서로 검출한 신호의 단일 파형은 그림 4.3과 같다. 부분방전 신호의 주파수 스펙트럼은 그림 4.4와 같으며, 이때 전기적 검출방법으로 측정된 신호와 센서를 통해 검출된 TEV 신호는 동일한 부분방전 신호이다. 그림 4.4에서 전극계에서 검출저항을 통해 직접 검출한 파형은 주로 1 ~ 60 MHz 영역에 분포하지만, 센서로 검출된 파형의 경우 수 MHz 영역과 100 MHz 영역에서 각각 분포하였다.

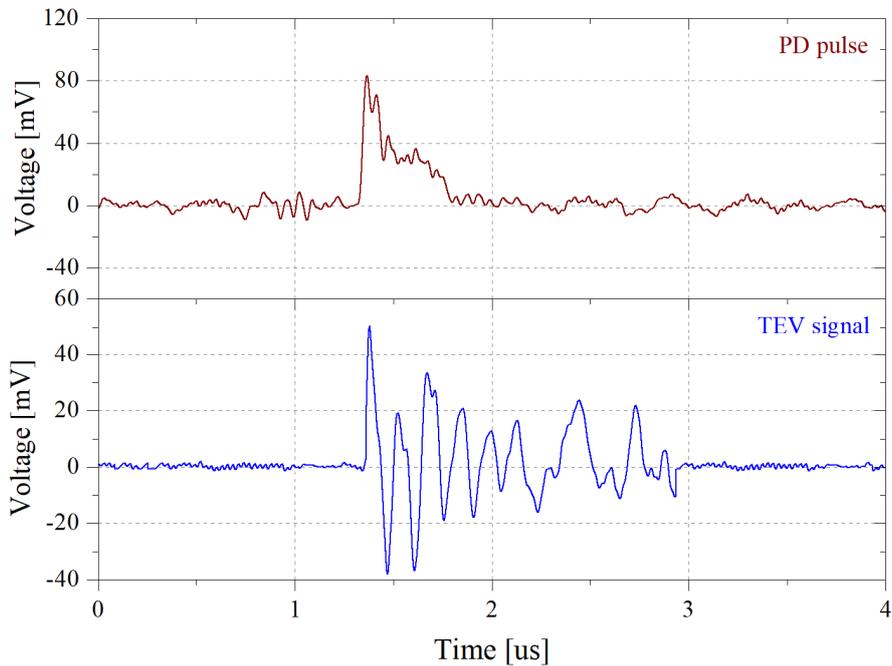
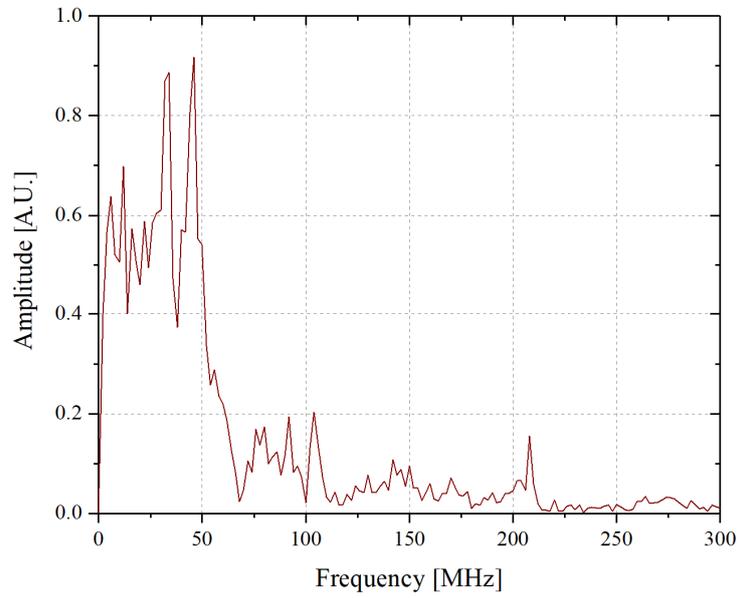
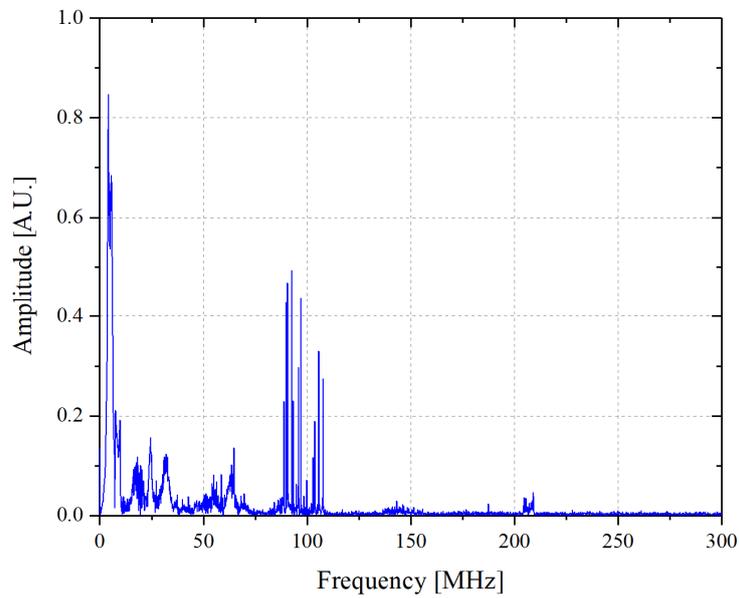


그림 4.3 단일 파형
Fig. 4.3 Single pulse



(a) 부분방전 펄스의 주파수 스펙트럼



(b) TEV 신호의 주파수 스펙트럼

그림 4.4 부분방전 신호의 주파수 스펙트럼

Fig. 4.4 PD signals in frequency domain

그림 4.5 및 4.6에서 접지의 유무에 따른 TEV 신호의 크기와 주파수 스펙트럼이 달라지는 이유는 TEV 신호가 2가지 경로로 검출이 되기 때문이다. 첫 번째는 부분방전 발생지점에서 전자기파가 기체 매질을 통해 방사되고 금속 표면을 타고 흘러 센서로 검출되는 경로이며, 두 번째는 전자기파가 인가전압의 접지극으로 유출되었다가 다시 금속 외함의 접지로 유입되는 경로이다. 전자의 경우 고주파수(100 MHz 부근)이며, 후자의 경우 저주파수(수 ~ 10 MHz)이었다. 그림 4.5에서, 외함을 접지하였을 경우의 신호의 크기는 140 mV_{PP}이고 파형의 길이는 1 us이었지만, 접지를 하지 않은 경우 60 mV_{PP}에 수백 ns였다. 이때 TEV 신호는 접지로 진행하거나 유입되는 신호로써, 비접지 시 검출되는 신호는 전자기파를 검출 한 것이므로 TEV 신호라고 정의할 수 없다.

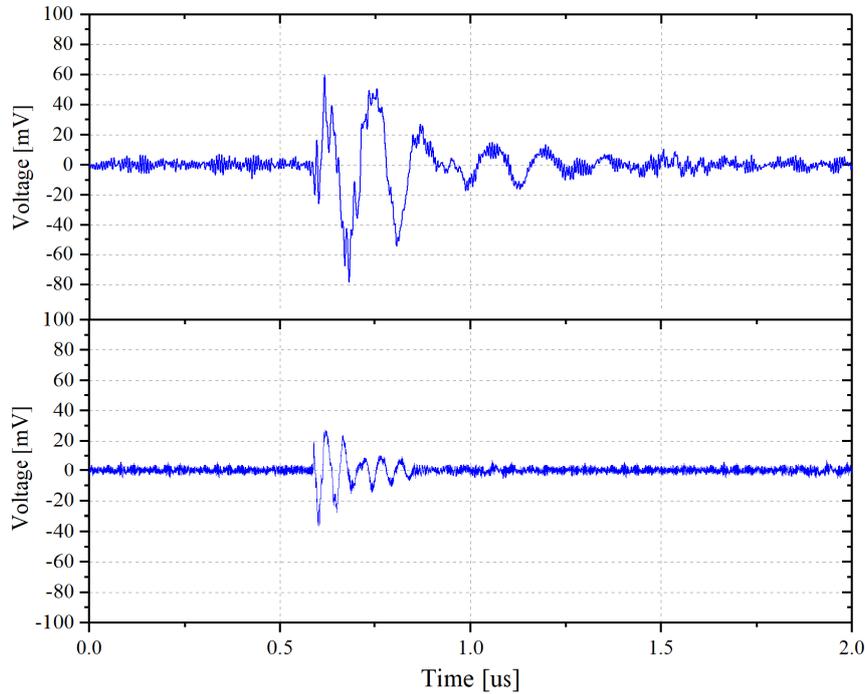
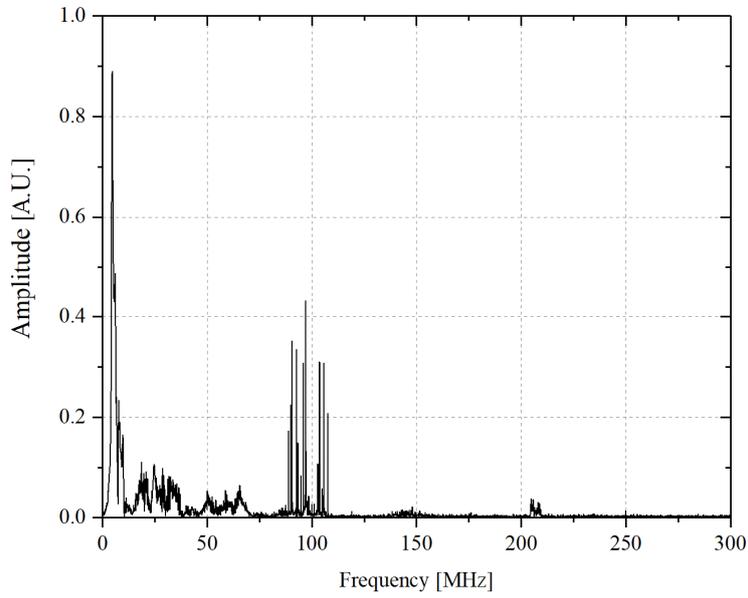
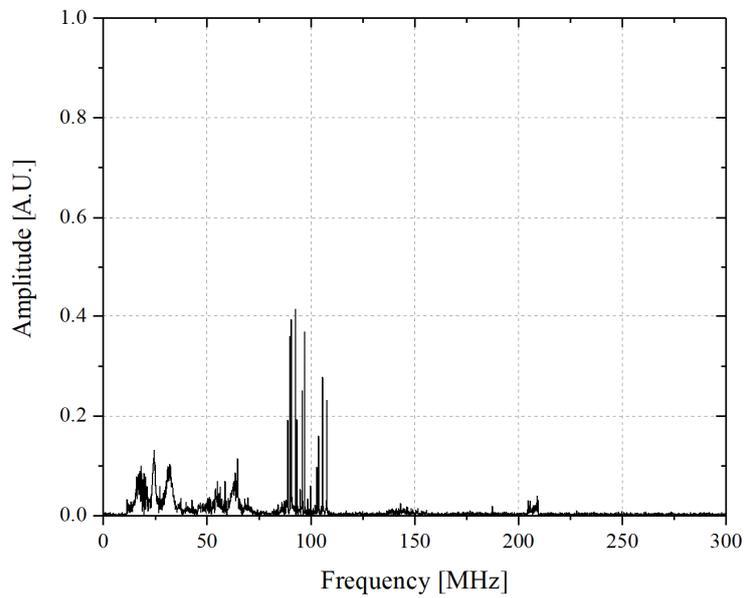


그림 4.5 접지 유무에 따른 TEV 신호 파형

Fig. 4.5 TEV signal waveform depending on grounding



(a) 외함 접지가 있을 때의 TEV 신호



(b) 외함 접지가 없을 때의 TEV 신호

그림 4.6 접지 유무에 따른 TEV 신호 주파수 스펙트럼
 Fig. 4.6 TEV signal in frequency spectrum depending on grounding

4.3 결함별 PRPD 패턴

결함에 따른 고유의 방전 특성을 확인하기 위해 실험계를 통하여 측정된 TEV 신호를 PRPD(Phase resolved partial discharge) 분석법을 이용하여 패턴을 확인하였다. 펄스 위상 분포, 방전 크기, 펄스 개수 등 부분방전 신호의 정보를 반영한 PRPD 패턴은 결함 유형을 파악하는데 다양하게 사용된다. 이것은 숙련된 엔지니어가 부가적인 인공지능 알고리즘 없이도 부분방전의 발생 원인을 구별할 수 있게 해준다. 그림 4.7 ~ 4.9는 전기적 검출법으로 획득한 패턴과 TEV 센서를 통해 획득한 패턴의 비교를 나타낸다. 앞서 언급한대로, 전기적 신호를 직접 검출하는 KS C IEC 60270 법은 부분방전의 신호를 획득함에 있어 기준이 되는 방법이지만, 고압배전반에 실적용이 불가능하다. 반면, TEV 센서 적용한 비전기적 검출 방법은 전기적 검출법과 같은 패턴을 얻을 수 있으며, 기존 방법들의 제약에 대한 문제가 없었다.

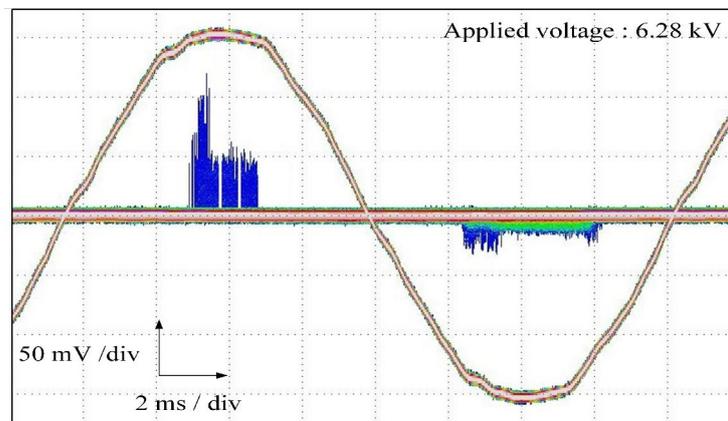
표 4.1은 각 전극계 별 방전개시전압과 모의실험에 적용된 전압 크기를 나타낸다. 인가전압은 방전개시전압에서 부분방전이 지속 발생할 때까지 전압을 상승시킨 값이다. 인가전압에서 2초 동안 전기적 검출법으로 PRPD 패턴을 획득 후, 같은 상황에서 TEV 센서로 다음과 같은 패턴을 획득하였다.

표 4.1 방전개시전압과 인가전압

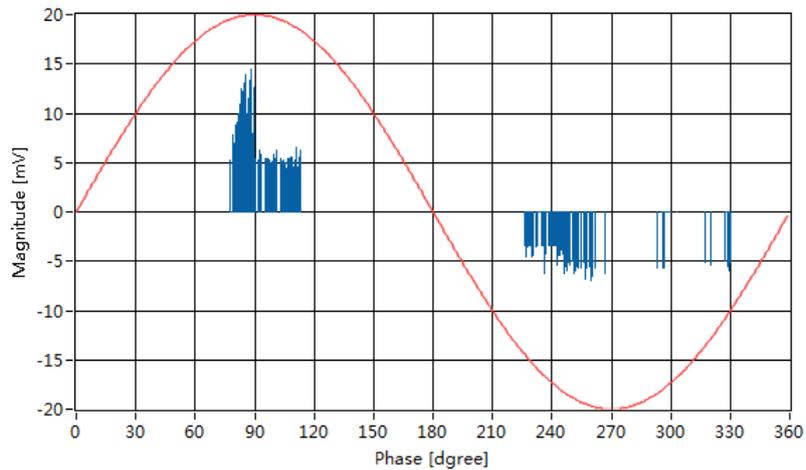
Table 4.1 Discharge inception voltage and applied voltage

결함	방전개시전압 [kV]	인가전압 [kV]
도체 돌출	5.90	6.28
외함 돌출	6.02	6.31
도전성 입자	6.11	6.35

도체 돌출 전극의 PRPD 패턴은 그림 4.7과 같으며, 실험을 통해 도출된 PRPD 패턴은 $78 \sim 113^\circ$ 사이에서 전체 방전 개수의 70%가 분포했으며 $221 \sim 320^\circ$ 사이에서는 30%가 분포했다. 또한 정극성 85° 에 큰 파고치를 갖는 펄스가 집중되어 나타났다.



(a) 전기적 검출법

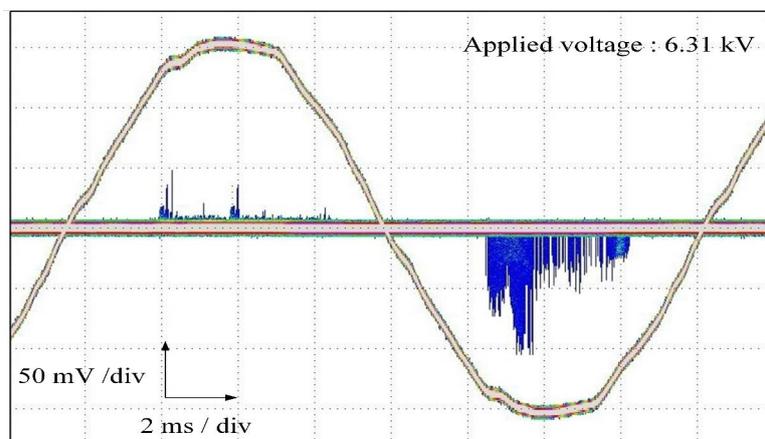


(b) 비전기적 검출법

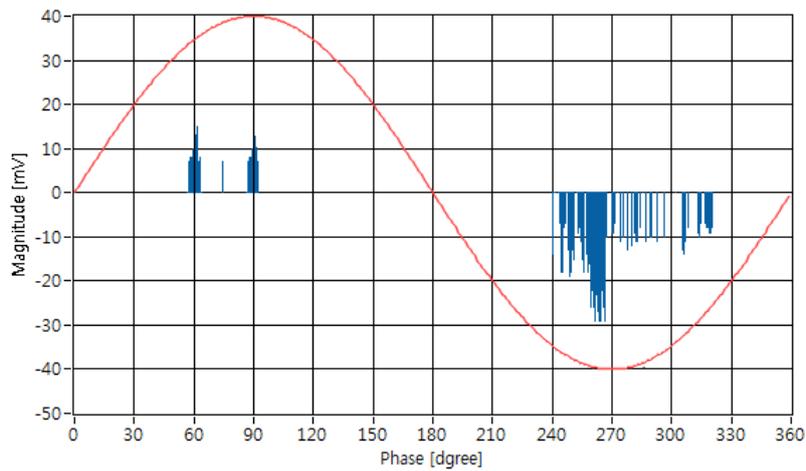
그림 4.7 도체 돌출의 PRPD 패턴

Fig. 4.7 PRPD patterns of POC

외함 돌출 전극의 PRPD 패턴은 그림 4.8과 같으며, 실험을 통해 도출된 PRPD 패턴은 $57 \sim 63^\circ$ 사이에서 전체 방전 개수의 6%가 분포했으며 $243 \sim 320^\circ$ 사이에서는 94%가 분포했다. 또한 부극성 260° 에 큰 파고치를 갖는 펄스가 집중되어 나타났다.



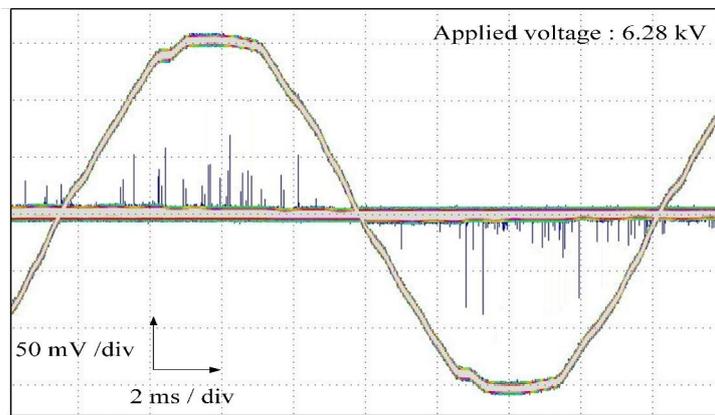
(a) 전기적 검출법



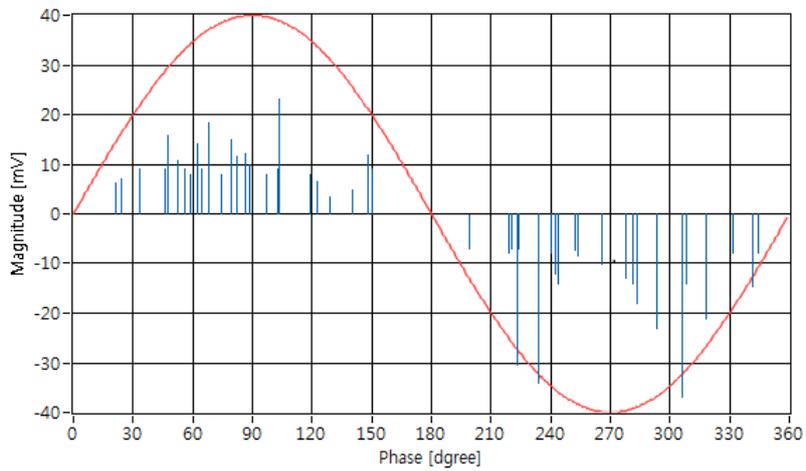
(b) 비전기적 검출법

그림 4.8 외함 돌출의 PRPD 패턴
Fig. 4.8 PRPD patterns of POE

도전성 입자 전극의 PRPD 패턴은 그림 4.9과 같으며, 실험을 통해 도출된 PRPD 패턴은 $23 \sim 148^\circ$ 사이에서 전체 방전 개수의 44%가 분포했으며 $199 \sim 343^\circ$ 사이에서는 56%가 분포했다. 도전성 입자의 경우 철구가 전계에 의해 구르며 방전이 지속되는데 방전 위상 및 크기는 뚜렷하지 않으며, 전 영역에 분포했다.



(a) 전기적 검출법



(b) 전기적 검출법

그림 4.9 도전성 입자의 PRPD 패턴
Fig. 4.9 PRPD patterns of FP

4.4 TEV의 거리 의존성

그림 4.10은 TEV의 거리 의존성에 대해 분석하기 위한 실험계이다. 공통 접지가 되어있으며, 연속적으로 배치되어있는 외함에 TEV 센서를 부착하였다. 전극계 및 외함의 접지선의 길이는 각 100 cm이다. 부분방전이 발생할 때, 각 센서에서 검출되는 TEV의 크기를 표 4.2에 나타내었다. 1 ~ 3번 외함에 부착된 TEV 센서에서는 감쇄된 신호가 검출되었지만, 4번 외함에서는 노이즈와 구별이 불가능했다. 따라서 연속적으로 배치된 큐비클에서 TEV 센서로 부분방전을 검출하면 신호 크기에 따라 위치추정이 가능하다.

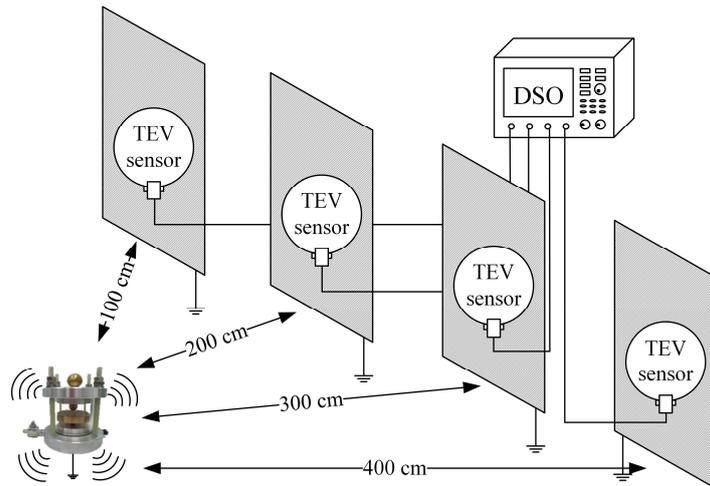


그림 4.10 실험계

Fig. 4.10 Experimental setup

표 4.2 거리에 따른 TEV 크기

Table 4.2 TEV amplitude depending on distance

결함	1번 외함	2번 외함	3번 외함	4번 외함
방사 거리 [cm]	100	200	300	400
전도 거리 [cm]	300	400	500	600
신호 크기 [mV]	89	45	16	-

제 5 장 결 론

본 논문에서는 고압배전반 내 전력설비의 절연진단을 위해 TEV의 이론적 해석, TEV 센서의 최적화 제작 및 특성 분석 그리고 적용평가를 하였다. 제작된 TEV 센서의 형상은 가장자리에서 비선형적 전계 집중을 피하기 위해 원형으로 제작되어야 하며, 검출 감도는 센서의 등가 커패시턴스가 클수록 증가함을 보였다. 센서의 커패시턴스를 증가시키기 위해서는 센서 전극의 직경이 커야하고 절연체의 유전율이 높아야하며, 전극 및 부착면(금속 외함)과의 절연거리가 짧아야 한다. 또한 TEV 센서의 출력 값은 식 (3.21)에 의해 센서의 직경이 클수록, 계측기의 임피던스가 클수록 그리고 단위시간 당 입사전속밀도의 변화량이 클수록 증가하게 된다.

부분방전으로 인한 TEV 신호의 주파수는 1 ~ 100 MHz로 알려져 있는데, 제작된 센서는 해당 주파수 영역에서 모든 신호를 검출 할 수 있었다. 펄스 발생기를 통해 센서의 지연시간을 도출하였고, 직경이 커질수록 지연시간은 수 ns 씩 느려지지만 부분방전의 평균 펄스 반복시간은 수백 us ~ 수 ms이기 때문에 신호 샘플링에 문제가 없음을 보였다. 또한 센서의 전극이 커짐에 따라 등가 커패시턴스도 커지기 때문에 검출 감도는 높아지지만, 시간상수의 변화로 파형이 늘어져 신호의 주파수 대역은 낮아졌다. 따라서 센서의 직경이 클수록 감도가 우수해지며, 계측기에 고속 샘플링이 요구되지 않아 기술적·경제적 이점이 있음을 보였다.

검출된 TEV 신호의 주파수 대역은 수 MHz 영역과 100 MHz 영역 두 곳에서 주로 분포하는데, 이는 TEV 신호가 전도와 방사의 두 가지 경로로 검출되기 때문이다. 그리고 외함 접지의 여부에 따라 검출감도는 3 배 차이가 나므로 TEV 센서를 부착하게 되는 외함은 반드시 접지를 해야 한다. 또한 접지의 여부로 TEV 신호는 파장 및 감도가 상이하게 된다.

제작된 TEV 센서의 적용평가를 위해 도체 돌출, 외함 돌출, 도전성 입자 3개의 전극계를 통해 부분방전 모의실험을 수행하였다. 도체 돌출의 경우 정극성에 펄스가 주로 분포하며 85°에 침투 펄스가 형성되었다. 외함 돌출의 경우 부극성에 펄스가 주로 분포하며 260°에 침투 펄스가 형성되었다. 도전성 입자는 크기 및 위상에 뚜렷한 특징이 없었으며 양극성에 고르게 분포하였다. 부분방전의 신호를 획득함에 있어 기준이 되는 전기적 검출법과 TEV 센서를 적용한 검출법의 패턴이 일치함을 보였다. 또한 TEV 센서의 현장 적용평가를 위해 거리 의존성을 분석하였다. 이로부터 고압배전반에서 절연열화 시, 부분방전 검출로 절연진단이 가능하며 위치 추정까지 가능하다.

최종적으로, 전력설비에서의 방전 전하량이 10 ~ 100 pC인 일반적 상황에서는 직경 70 mm, 절연 간격 1 mm 이하의 센서가 최적합하며, 그 이상의 직경에서는 단위시간당 입사변위전류량이 유한하기 때문에 감도는 향상되지 않는다. 따라서 본 실험을 통해, 진단 대상에서 발생하는 부분방전 전하량의 상·하한선을 기준으로 최적 감도 및 경제성을 갖는 TEV 센서를 제작하여 고가의 전력설비를 유지·보수하는 자산관리가 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 전력통계정보시스템, 전력지표, <http://epsis.kpx.or.kr/>.
- [2] 이정운, 박대원, 길경석, “유중 방사전자파의 주파수 스펙트럼 분석”, 한국철도학회 추계학술대회, pp. 1236-1240, 2012.
- [3] 국가화재정보센터, 화재현황통계, <https://www.nfds.go.kr/>
- [4] 차상욱, “폐쇄배전반 통합감시센서의 설계 및 제작”, 석사학위논문, 한국해양대학교대학원, 2012.
- [5] G. Wang, W. H. Kim, J. B. Kong, G. S. Kil, H. K. Ji, “Analysis of PD Signal for Condition Monitoring of MV Switchboards by the Measurement of Transient Earth Voltage”, Transactions on Electrical and Electronic Materials, Vol. 19, No. 3, pp.195-200, 2018.
- [6] G. Wang, H. E. Jo, S. J. Kim, S. W. Kim, G. S. Kil, “Measurement and analysis of partial discharges in SF6 gas under HVDC”, Measurement, 91, pp. 351-359, 2016.
- [7] 김성욱, 김선재, 박대원, 길경석, 류길수, “유중부분방전 음향신호의 주파수특성 분석”, 한국철도학회 춘계학술대회, pp. 1407-1413, 2009.
- [8] 김선재, 왕국명, 윤민영, 길경석, “SF6가스 중 파티클 형태에 따른 부분방전의 특성”, 한국철도학회 추계학술대회, pp. 1474-1479, 2015.
- [9] 왕국명, 황성철, 김우현, 길경석, “수배전반 내부 전력기기의 부분방전 진단기술”, 한국철도학회 추계학술대회, pp. 419-420, 2017.
- [10] 이복희, 이성현, 길경석, “시변전계 측정용 평판형 전계센서”, 대한전기학회 추계학술대회, pp. 287-289, 1994.
- [11] S. A. Boggs, “Partial Discharge - Part III : Cavity-Induced PD in

- Solid Dielectric", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 6, No. 6, pp.11-20, 1990.
- [12] E. A. Cherney, "Partial Discharge - Part V : PD in Polymer-type Line Insulation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 7, No. 2, pp.28-32, 1991.
- [13] G. C. Stone, "Partial Discharge - Part VII : Practical Techniques for Measuring PD in Operating Equipment", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 7, No. 4, pp.9-19, 1991.
- [14] C. Laurent, C. Mayoux, "Partial Discharge - Part XI : Limitations to PD as Diagnostics for Deterioration and Remaining Life", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 2, pp.14-17, 1992.
- [15] W. Hutter, "Partial Discharge - Part XI : Partial Discharge Detection in Rotating Electrical Machines", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 4, pp.25-31, 1992.
- [16] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", Butterworth, pp.1-2, 1989.
- [17] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", Butterworth, pp.50-52, 1989.
- [18] 최재성, "부분방전분석에 의한 몰드변압기의 절연진단에 관한 연구", 석사학위논문, 한국해양대학교대학원, 2010.
- [19] C. Zhang, M. Dong, M. Ren, W. Huang, J. Zhou, X. Gao, R. Albarracin, "Partial Discharge Monitoring on Metal-Enclosed Switchgear with Distributed Non-Contact Sensors", Sensors, Vol. 18, No. 2, pp. 1-18, 2018.

연구논문 발표실적

◎ 국내전문학술지

- [1] Woo-Hyun Kim, Seong-Cheol Hwang, Guoming Wang, Gyung-Suk Kil, and Chang-Hwan Ahn, “Electrical Characteristic Changes of ZnO Varistors by Energy Absorption”, J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng. Vol. 30, No. 12, pp. 817-821, December 2017.
- [2] 왕국명, 김우현, 강태호, 길경석, “저압용 금속 산화물 바리스터의 가속열화에 관한 연구”, 한국철도학회논문집, Vol. 21, No. 7, pp. 641-648, 2018.08.
- [3] 김우현, 왕국명, 길경석, 지홍근, “옥내 배선계통에서 직렬 아크의 검출과 판별”, 한국전기전자재료학회 논문지, 제31권, 제6호, pp. 412~416, 2018. 09.
- [4] 김우현, 왕국명, 길경석, 김도정, 서봉원, 김수영, 김영문, “수중 가시화 구명줄 시스템의 설계 및 제작”, 한국마린엔지니어링학회 논문지, 제42권, 제9호, pp. 767~771, 2018. 11.
- [5] 김우현, 왕국명, 강태호, 길경석, 김성욱, “부분방전 검출을 위한 TEV 센서의 최적화 설계”, 한국철도학회논문집, Vol. 22, No. 2, pp. 140-149, 2019.02.
- [6] 김우현, 길경석, 김성욱, “디지털 역결상 보호 계전기의 설계 및 제작”, 한국전기전자재료학회, Vol. 32, No. 4, pp. 313-319, 2019.07.

◎ 국제전문학술지

- [1] Guoming Wang, Seong-Cheol Hwang, Woo-Hyun Kim, and

- Gyung-Suk Kil, "Design and Fabrication of an LED Lantern based on Light Condensing technology", Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol. 8, No. 1, pp.14-18, 09 Feb 2018.
- [2] Hong-Keun Ji, Guoming Wang, Woo-Hyun Kim, and Gyung-Suk Kil, "Optimal Design of a Band Pass Filter and an Algorithm for Series Arc Detection", Energies, Vol. 11, No. 4, pp. 992[1]-[13], April 19th, 2018.
- [3] Guoming Wang, Woo-Hyun Kim, Jeong-Bae Kong, Gyung-Suk Kil, and Hong-Keun Ji, "Analysis of PD Signal for Condition Monitoring of MV Switchboards by the Measurement of Transient Earth Voltage", Transactions on Electrical and Electronic Materials, Vol. 19, No. 3, pp.195-200, June 2018.
- [4] Guoming Wang, Woo-Hyun Kim, Hong-Keun Ji, and Gyung-Suk Kil, "Detection and Analysis of Series Arc using Non-conventional Methods in Low-voltage Switchboards", Journal of Electrical Engineering, Vol. 69, No. 4, pp. 317-322, August 2018.
- [5] Guoming Wang, Woo-Hyun Kim, Jong-Hyuk Lee, and Gyung-Suk Kil, "Condition Monitoring and Deterioration Analysis of Metal Oxide Varistor", Journal of Electrical Engineering, Vol. 69, No. 5, pp. 352-358, October 2018.
- [6] Guoming Wang, Woo-Hyun Kim, Gyung-Suk Kil, Sung-Wook Kim, and Jae-Ryong Jung, "Green Gas for a Grid as An Eco-Friendly Alternative Insulation Gas to SF6: From the Perspective of Partial Discharge Under AC", Applied Sciences, Vol. 9, No. 4, pp. 651[1]-[10], February 2019.

[7] Guoming Wang, Woo Hyun Kim, Gyung Suk Kil, Dae Won Park, and Sung Wook Kim, “An Intelligent Lightning Warning System Based on Electromagnetic Field and Neural Network”, *Energies*, Vol. 12, No.7, pp. 1275[1]–[11], April 2019.

◎ 국내 학술회의 논문집

- [1] 왕국명, 황성철, 김우현, 길경석, “수배전반 내부 전력기기의 부분방전 진단기술”, 2017년도 한국철도학회 추계학술대회, pp.KSR2017A175[1]~[2], 2017.10.19.~10.21, 웰리힐리파크, 강원도 횡성.
- [2] 왕국명, 황성철, 김우현, 길경석, “SPD 상태진단을 위한 누설전류 검출법”, 2017년도 한국철도학회 추계학술대회, pp.KSR2017A176[1]~[2], 2017.10.19.~10.21, 웰리힐리파크, 강원도 횡성.
- [3] 왕국명, 김우현, 길경석, 박대원, 김태성, “휴대용 고집광 LED 조사등의 설계 및 평가”, 2018년도 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회, p. 277, 2018.04.26.~28, 코오롱호텔, 경주.
- [4] 김우현, 왕국명, 길경석, 김도정, 서봉원, 김수영, 김영문, “광섬유를 이용한 수중 구멍줄 가시화”, 2018년도 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회, p. 278, 2018.04.26.~28, 코오롱호텔, 경주.
- [5] 왕국명, 김우현, 길경석, “CDN를 이용한 전원 동기 서지발생장치의 설계”, 2018년도 한국철도학회 춘계학술대회, pp.KSR2018S088[1]~[2], 2018.05.17. ~18, 신안비치호텔, 목포.
- [6] 김우현, 왕국명, 길경석, “배선계통에서 직렬아크의 검출방법”, 2018년도 한국철도학회 춘계학술대회, pp. KSR2018S104[1]~[2], 2018.05.17. ~18, 신안비치호텔, 목포.
- [7] 김우현, 왕국명, 길경석, 김도정, 서봉원, 김수영, 김영문, “수중 LED

- 구명줄의 적용 평가”, 2018년도 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회, p. 233, 2018.10.25.~27, [사]한국선급, 부산.
- [8] 김우현, 왕국명, 강태호, 길경석, “프레넬 렌즈를 이용한 LED 랜턴”, 2018 한국전기전자재료학회 추계학술대회, p.45, 2018.11.20.~22, 부여 롯데리조트.
- [9] 왕국명, 김우현, 강태호, 길경석, “온라인 진단을 위한 MOV의 전기적 특성 분석”, 2018 한국전기전자재료학회 추계학술대회, p.46, 2018.11.20.~22, 부여 롯데리조트.
- [10] 왕국명, 김우현, 강태호, 길경석, “전자계 측정 센서를 이용한 낙뢰정보기의 개발”, 2018 한국전기전자재료학회 추계학술대회, p.50, 2018.11.20.~22, 부여 롯데리조트.
- [11] 왕국명, 김우현, 김남훈, 길경석, “루프 안테나를 이용한 낙뢰 위치 표정”, 2019년도 한국철도학회 춘계학술대회, pp. KSR2019S068[1]~[2], 2019.05.23.-24, 여수엑스포 컨벤션센터, 여수.
- [12] 김남훈, 김우현, 왕국명, 길경석, “고출력 전자기 펄스 발생기의 개념 설계”, 2019년도 한국철도학회 춘계학술대회, pp. KSR2019S069[1]~[2], 2019.05.23.-24, 여수엑스포 컨벤션센터, 여수.
- [13] 김우현, 왕국명, 김남훈, 길경석, “3상 유도전동기 보호용 전자식 계전기의 설계 및 제작”, 2019년도 한국철도학회 춘계학술대회, pp. KSR2019S074[1]~[2], 2019.05.23.-24, 여수엑스포 컨벤션센터, 여수.
- [14] 김우현, 왕국명, 김남훈, 길경석, “전력설비 절연진단을 위한 TEV 센서에 관한 연구”, 2019년도 한국철도학회 춘계학술대회, pp. KSR2019S075[1]~[2], 2019.05.23.-24, 여수엑스포 컨벤션센터, 여수.
- [15] 왕국명, 김우현, 김남훈, 길경석, “SF6 및 g3 가스 중 부분방전 특성 비교”, 2019 한국전기전자재료학회 하계학술대회, p.50, 2019.06.19.~21,

웰리힐리파크, 황성.

[16] 왕국명, 김우현, 김남훈, 길경석, “신경망 기반의 지능형 낙뢰경보 알고리즘”, 2019 한국전기전자재료학회 하계학술대회, p.50, 2019.06.19.~21, 웰리힐리파크, 황성.

[17] 김우현, 왕국명, 김남훈, 길경석, “고출력 LED를 이용한 스마트 탐조등의 개발”, 2019 한국전기전자재료학회 하계학술대회, p.63, 2019.06.19.~21, 웰리힐리파크, 황성.

◎ 국제학술회의 논문집

[1] Guoming Wang, Seong-Cheol Hwang, Woo-Hyun Kim, and Gyung-Suk Kil, “Protection Performances of Thermally Protected Metal-Oxide Varistor”, International Symposium on Marine Engineering and Technology [ISMT2017], pp.106-107, October 26-27, 2017, BEXCO, Busan, Korea.

[2] Guoming Wang, Woo-Hyun Kim, and Gyung-Suk Kil, “Design and Fabrication of an LED Searchlight for Drones”, 2018 International Conference on Engineering, Technology, and Applied Science [ICETA 2018], pp. 1-5, June 25-27, 2018, Taipei, Taiwan.

[3] Woo-Hyun Kim, Guoming Wang, and Gyung-Suk Kil, “A LED Lighting System for Biorhythm Adjustment of Marine Life”, International Conference on Engineering, Technology, and Applied Science [ICETA 2018], pp. 6-9, June 25-27, 2018, Taipei, Taiwan.

[4] Woo-Hyun Kim, Guoming Wang, and Gyung-Suk Kil, “Lifetime Predication of Metal-oxide Varistor based on Absorbed Energy”, International Conference on Engineering, Technology, and Applied

- Science [ICETA 2018], pp. 10-14, June 25-27, 2018, Taipei, Taiwan.
- [5] Guoming Wang, Woo-Hyun Kim, Gyung-Suk Kil, and Il-Kwon Kim, "Design and Fabrication of a LED Headlight System for High-speed Trains", The 2nd Asian Conference on Railway Engineering and Transportation [ART 2018], pp. 38[1]-[3], October 17-19, 2018, Jeju, Korea.
- [6] Woo-Hyun Kim, Guoming Wang, Gyung-Suk Kil, Dae-Won Park, and Tae-Seong Kim, "An Investigation on the Necessity of Introducing Lightning Warning System in Railway System", The 2nd Asian Conference on Railway Engineering and Transportation [ART 2018], pp. 38[1]-[3], October 17-19, 2018, Jeju, Korea.

감사의 글

2017년 3월 2일에 학·석사 연계과정으로 입학하여, 저의 고전압연구실 생활이 시작되었습니다. 학부생으로 있었던 기간까지, 도합 2년 6개월 동안 많은 일들이 있었습니다. 너무나 즐겁고 신났고 때로는 힘든 순간의 연속이었지만, 돌이켜보면 그 빛나는 결과들에 가슴이 벅칩니다. 제가 우리교수님 밑에서 석사를 하지 않았다면, 계속 작은 세계에서 살았을 것이라 생각합니다. 감사합니다 교수님! 아무것도 모르던 제게, 공부할 기회를 주셔서 감사합니다.

2년이 넘는 기간 동안, 많은 것을 겪고 또한 많은 것을 배웠습니다. 일일이 나열하기도 힘든 수많은 영광들과 감사함을 감히 말로 형용하기가 힘듭니다. 다시 한 번 길경석 지도교수님께 감사드립니다. 또한 바쁘신 중에도 부족한 논문을 지도해주신 이성근 교수님, 장낙원 교수님과, 석사과정 동안 가르침을 주신 김윤식 교수님, 서동환 교수님, 전태인 교수님, 주양익 교수님께 감사드립니다.

저랑 같이 졸업하는 국명이형. 연구실 방장이자, 중국 대표 왕국명 박사님! 감사합니다. 형이 도와줘서 제가 여기까지 올 수 있었습니다. 형한테 정말 많은 것을 배웠고 도움 받았습니다. 중국 놀러 갈 테니, 같이 맛있는 것 먹으러 가시죠.ㅎㅎ

연구실 생활은 같이 못했지만, 늘 감사한 기우형. 석사학위의 꿈을 심어준 형 덕분에 제가 고전압을 들어올 수 있었습니다! 그리고 랩뷰 기초를 가르쳐주셨기 때문에 정말 많은 결과물들을 만들 수 있었어요. 감사드립니다!

같이 풀타임으로 함께 생활했던, 성철이형. 석사의 꿈을 심어준 것이 기우형이라면, 시작의 발판을 마련해준 것은 형입니다! 저를 연구실 생활적으로, 일적으로 가르쳐주고, 도와주셔서 감사합니다. 그리고 저 학위논문

작성하고 발표할 때 형 자료 엄청 많이 참고했어요!! 감사합니다.

지금은 사라져버린, 정배형과 태호. 다 어디 갔어!!! 뭐야!!! 그래도 즐거운 시간들이 있습니다. 감사합니다. 얼른 졸업하세요, 두분 다!

남훈이 한신이 동현이에게. 이 바보들! 열심히 공부해. 무엇이던 최선을 다하고 노력해! 하면 되더라. 모여서 술 먹고 게임하고 어디 놀러 다니지 말고 엉덩이 항상 붙여놔. 그리구 태호 복학하면 4명이서 교수님 잘 모셔.

파트타임으로 계신, 김태수 사장님, 경렬이형. 덕분에 간접적으로 사회경험을 많이 했습니다! 그리고 참 많이 얻어 먹었습니다!! 감사합니다. 박사까지 같이 달리지죠!

졸업시즌이 다가오고 저를 물심양면으로 도와주신 송재용 박사님. 본인의 일처럼 챙겨주셔서 정말 감사드립니다! 제가 얼른 취업해서 맛있는 거 사드리겠습니다!! 조금만 기다려주세요, 얼마 안 남았습니다.

이엠아이테크의 서재석 사장님, 박대원 박사님, 정윤이형 태성이형. 거리도 가깝고 같이 과제도 많이 하고 점점이 많았습니다. 특히 광명역 갈 때마다 도와주신 서사장님께 감사드립니다! 여러 가지를 자세히 설명해주시고 가르쳐주신 박대원 박사님께도 감사합니다. 그리고 맛있는 거 많이 사주시고 과제 진행할 때도 많이 도와주신 정윤이형, 태성이형 감사드립니다!!

지금은 졸업하셨지만, 파트타임으로 주말마다 뵈던 성욱형님 홍근형님 선재형님. 정말 많이 얻어먹었고, 배그도 같이 많이 했습니다.ㅎㅎ 감사합니다! 제 일들을 본인의 일처럼 챙겨주셔서 감사드립니다 정말.. 지금은 세분 다 박사님이시네요! 저도 얼른 쫓아가겠습니다!

그리고 과 조교이자, 우리 편 회주누나. 과사무실이 행정적인 일을 하지만, 학생들의 상담소 역할도 해주셨습니다. 감사합니다 누나!

자주 뵈지 못 했지만 실험실 행사 때마다 보았던 반가운 선배님들께도 감사드립니다. 한 명, 한 명 언급 못해 죄송합니다.

우리 아버지, 어무니, 누나. 나 석사하는 거, 묵묵히 기다려주고 항상 응원해주고, 걱정해줘서 고마워. 꼭 성공할게. 그리고 아프지마, 알겠지?

누구부터 언급해야할까, 고등학교 패밀리인 규동, 상우, 은국, 재현, 지성, 진명, 진환, 효주(이름순이야 ㅋㅋ). 그리고 대학교 패밀리 경태, 상연, 성욱, 성현. 모두 고마워. 이제는 시간 맞춰서 얼굴보기도 힘드네. 그래도 가끔은 맛있는 거 먹자.

마지막으로, 내 마약 같은 여자친구님. 못난 자랑 사겨줘서 고맙고, 덕분에 항상 힘낼 수 있었어. 내가 더 잘할게. 사랑해!

2019년 6월의 마지막 날.

김 우 현 드림.