



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

XLPE 지중케이블에서 부분방전의
측정과 분석

Measurement and Analysis of Partial Discharge
in XLPE Underground Cable



指導教授 吉 暻 碩

2017年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

朴 序 浚

本 論文을 朴序浚의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長：工學博士 金 潤 植 ㉠

委 員：工學博士 吉 暻 碩 ㉠

委 員：工學博士 李 成 根 ㉠



2016年 12月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

朴 序 浚

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 XLPE 케이블	3
2.2 절연열화 및 부분방전	5
2.3 절연진단 및 위치추정	10
제 3 장 실험 및 분석	18
3.1 부분방전 측정	18
3.2 부분방전 위치추정	31
제 4 장 결 론	41
참 고 문 헌	43

그림 및 표 목차

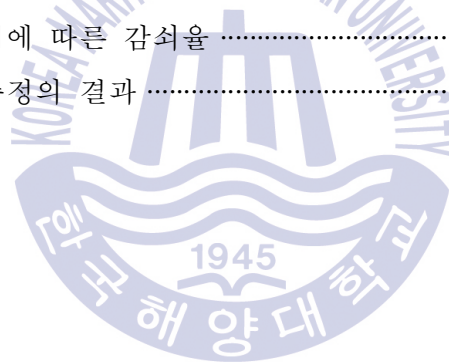
< 그림 목차 >

그림 2.1	22.9 kV-y CNCV-W 케이블의 구조	4
그림 2.2	케이블의 절연열화 요인	5
그림 2.3	케이블에서 부분방전 발생	6
그림 2.4	지중케이블의 고장사례	7
그림 2.5	내부방전의 등가회로	8
그림 2.6	교류전압에서 부분방전 패턴	9
그림 2.7	IEC 60270에 따른 부분방전 검출 회로	12
그림 2.8	지중케이블의 부분방전 검출 시스템	13
그림 2.9	고주파 센서를 이용한 부분방전 검출	14
그림 2.10	임피던스 변화에 따른 펄스의 진행	15
그림 2.11	TDR 방식의 구성	16
그림 3.1	감도산출을 위한 실험계 구성	18
그림 3.2	추정된 단일펄스	19
그림 3.3	PD 패턴의 분석을 위한 실험계 구성	20
그림 3.4	보이드 결함의 종류	22
그림 3.5	PRPD의 예	23
그림 3.6	1 mm-interfacial에서 PD 특성	25
그림 3.7	1 mm-surface에서 PD 특성	26
그림 3.8	2 mm-interfacial에서 PD 특성	27
그림 3.9	2 mm-surface에서 PD 특성	28
그림 3.10	결함별 PD 특성 비교	30
그림 3.11	결함 위치추정을 위한 실험계 구성	31
그림 3.12	결함 위치추정의 원리	32
그림 3.13	펄스의 시간차	33

그림 3.14 케이블 거리에 따른 펄스파형	35
그림 3.15 케이블 거리에 따른 감쇠율	36
그림 3.16 50 m 케이블(결함지점 2 m)에서 결함 위치추정	37
그림 3.17 70 m 케이블(결함지점 2 m)에서 결함 위치추정	38
그림 3.18 50 m 케이블(결함지점 30 m)에서 결함 위치추정	39

< 표 목차 >

표 1.1 국내 배전선로 현황	1
표 2.1 XLPE 케이블의 종류 및 특징	3
표 2.2 지중케이블에서 이용되는 부분방전 검출 센서	11
표 3.1 결함별 PD 특성 비교	29
표 3.2 케이블 거리에 따른 감쇠율	36
표 3.3 결함 위치추정의 결과	40



Measurement and Analysis of Partial Discharge in XLPE Underground Cable

by Seo-Jun Park

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

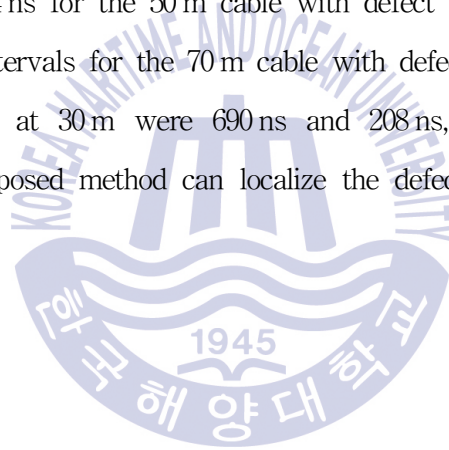
Abstract

This thesis dealt with the characteristics of partial discharge (PD) depending on defect and the defect localization in an XLPE underground cable. Four types of defects with different sizes and positions were fabricated inside a cable of 1 m long and 60 mm². A 50 kV transformer was used to apply high voltage to the cable for generating PD. The discharge pulses were detected by a high frequency current transformer (HFCT) with a frequency range of 150 kHz - 30 MHz, and acquired using an oscilloscope (5 GS/s) and a data acquisition unit. The PD characteristics were analyzed in terms of discharge inception voltage (DIV), apparent charge, and phase-resolved partial discharge (PRPD) pattern developed by a LabVIEW program.

From the results, it showed that the DIV increased with the size of defect and the apparent charge increased as the defect was adjacent to the conductor.

In four types of defects, the PRPD presented similar phase distribution. However, it was indicated that the pulse count in the negative half of the applied voltage became higher as the defect got closer to the conductor.

The defect localization experiment was conducted based on the time-domain reflectometry method using the PD pulse. The HFCT was set at 1 m from the near end of the cable, where the measurement point was selected. To verify the validity of this method, cables with different lengths and defect positions were used. The time interval between the PD pulse and the reflected pulse was measured as 474 ns for the 50 m cable with defect at 2 m from the near end. And the time intervals for the 70 m cable with defect at 2 m and the 50 m cable with defect at 30 m were 690 ns and 208 ns, respectively. It was revealed that the proposed method can localize the defect in a cable with an error less than 1 m.



제 1 장 서 론

오늘날 전력수요의 급증에 따른 전력망 확보와 무정전 고품질 전력공급의 출현으로, 전력설비에 대한 지중화사업이 점차적으로 확대되고 있다. 지중선로의 경우 인구 밀도가 높은 대도시를 중심으로 적용하고 있으며, 국외적으로 싱가포르나 유럽의 런던 및 파리에서는 대부분의 선로가 지중 방식으로 전환되었다^{[1],[2]}. 표 1.1은 최근 4년간 국내 배전선로 현황을 나타낸 것으로, 지중선로 보급이 지속적으로 확대되고 있음을 알 수 있다. 지중선로는 가공선로와 비교해 낙뢰 등의 자연재해로부터 신뢰성이 높고, 배전선로 확장에 유리하며, 도시의 미관을 확보할 수 있는 특징이 있다. 그러나 전기적 절연이 취약하고, 대도시에 주로 매설되어 있기 때문에 사고 발생에 따른 피해규모가 대형화로 확산될 수 있으며, 복구시간 또한 장시간이 소요된다^[3]. 따라서 지중선로에서 발생하는 사고를 미연에 방지할 수 있는 다각적인 연구가 필요하다.

표 1.1 국내 배전선로 현황
Table 1.1 Status of distribution line in the domestic

구 분	2011	2012	2013	2014
가공선로 공장 [C-km] (증가율)	178,882 (0.77 %)	180,017 (0.63 %)	181,135 (0.62 %)	182,608 (0.81 %)
지중선로 공장 [C-km] (증가율)	30,604 (4.08 %)	31,781 (3.85 %)	33,218 (4.52 %)	34,743 (4.59 %)
지중화율	14.6 %	15.0 %	15.5 %	16.0 %

출처 : 한국전력공사 통계연보

지중배전선로의 경우 주로 XLPE(Cross-linked polyethylene)를 절연체로 구성하는 전력케이블이 주류를 이루고 있다. 하지만 제조과정에서 생성되는 절연체 내부의 보이드(Void) 및 불순물로 인해 절연열화를 촉진시키고, 최종적으로 단락 및 지락사고에 이르게 한다. 이러한 사고를 예방하기 위해, 과거 TBM(Time based maintenance) 방식에서 온라인 상태진단이 가능한 CBM(Condition based maintenance) 방식이 적용 중에 있으며, 부분방전 진단이 주로 이용되고 있다. 열화초기에 발생하는 부분방전(Partial discharge, PD)은 빛, 소리 및 전자기파 등의 에너지를 방출하며, 다양한 센서로부터 이를 측정할 수 있어 활용도가 높다. 또한 결함별 특성을 분석할 수 있는 특징이 있다.

본 논문에서는 지중배전선로에서 이용되는 XLPE 케이블을 대상으로, 절연열화에 따른 부분방전을 측정하고 특성을 분석하기 위한 연구를 수행하였다. 현장에서 활용되는 22.9 kV-y CNCV-W 케이블에서 부분방전을 모의하고, 고주파변류기(High frequency current transformer, HFCT)로 방전펄스를 검출하였다. 연구내용으로 XLPE 절연체 내부에서 발생하는 보이드의 크기 및 위치를 통해 부분방전 특성을 분석하였다. 또한 TDR(Time domain reflectometry) 방식을 기반으로 부분방전 펄스 분석으로 결함의 위치를 추정하였다.

제 2 장 이 론

2.1 XLPE 케이블

XLPE는 고분자 화합물인 PE(Polyethylene)에 포함된 탄소들 간의 결합과정(Cross-linked, 가교)을 통해 전기적 및 열적 특성을 강화한 물성재료이다. 이러한 XLPE를 절연체로 구성하는 전력케이블을 총칭하여 XLPE케이블이라 하며, 일반적으로 PVC(Polyvinyl chloride)로 구성된 시스(Sheath)와 결합하여 CV케이블이라 한다. 중량이 가벼워 운반과정이나 포설시 용이하고, 90℃의 높은 허용온도 및 열적 변형성이 우수하기 때문에 국내 지중케이블의 주류를 이루고 있다^{[1],[4]}. 표 2.1은 XLPE 케이블의 종류와 그에 따른 특징을 나타내며, 습한 환경적인 조건에 의해 발생하는 케이블 내 수분침투를 억제하거나, 시스의 내열특성을 보완하는 등의 다양한 케이블들이 지속적으로 개발되어 왔다.

표 2.1 XLPE 케이블의 종류 및 특징
Table 2.1 Types and characteristics of XLPE Cable

종 류	특 징
CNCV	기존의 습식에서 건식가교방식으로 전환하였으며 전기적 차폐를 위해 동심중성선을 구성
CNCV-W	수분과 접촉 시 부풀어 오르는 특성을 가진 재료를 구성하여, 도체 및 절연체의 수분침투를 방지
FR-CNCO-W	기존의 PVC 시스에서 난연성 기능을 가진 폴리올레핀 시스로 교체하여, 내열특성 강화
TR-CNCV-W	수트리의 발생을 억제시키기 위해, XLPE 절연체 내 특수한 첨가제를 주입

그림 2.1은 22.9kV-y CNCV-W 케이블의 구조이다. XLPE로 구성된 절연체가 도체를 감싸고 있으며, 절연체 중심으로 내·외부의 얇은 반도체층(Semi conducting tape)은 도체표면의 평활작용 및 절연체와의 밀착효과로 계면의 국부적인 전기집중을 완화시킨다. 중성선 내·외부의 차수층(Swelling tape)은 수분을 만나면 부풀어 올라 수분침투를 방지한다. 금속 차폐층(Metallic shield)은 내부 도체에서 방사되는 전계를 차단하며, 일반적으로 금속테이프를 감는 구조이다. 하지만 국내의 경우 22.9kV-y 다중 접지방식이 적용되며, 도체 이외에 중성선이 별도로 요구됨에 따라 금속 차폐층 대신 동심중성선(Concentric neutral conductor)을 적용하고 있다 [5],[6].

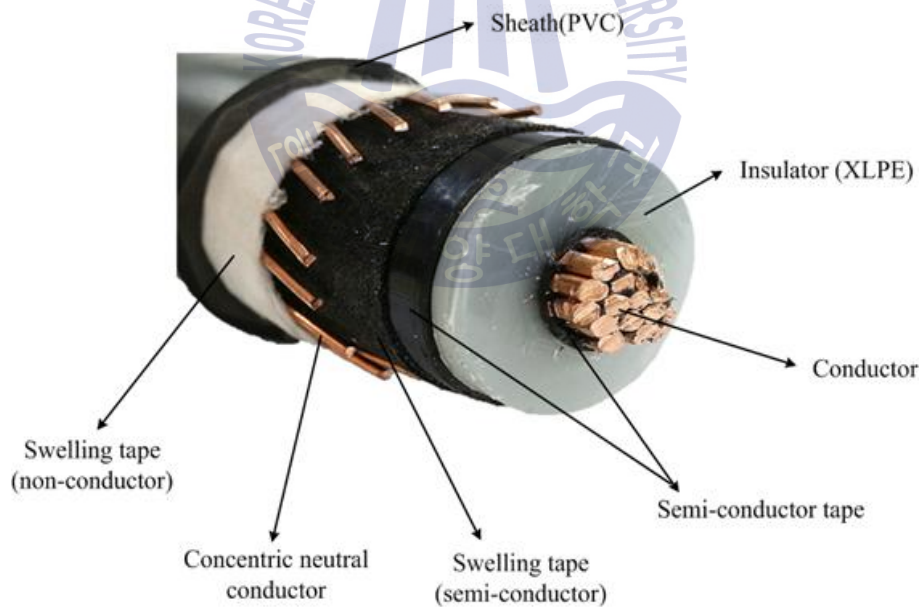


그림 2.1 22.9kV-y CNCV-W 케이블의 구조
 Fig. 2.1 Structure of a 22.9 kV-y CNCV-W cable

2.2 절연열화 및 부분방전

2.2.1 절연열화

절연체는 전기적, 열적 및 환경적인 요인들로 인하여 초기의 물성 값 이하로 성능이 저하될 수 있으며, 이를 절연열화라 한다. 그림 2.2는 XLPE 지중케이블에서 발생하는 열화요인을 나타낸다. 대표적으로, 케이블 운반 및 매설 시 물리적인 손상에 의한 절연체 내 돌기(Protrusion)나 균열(Crack)을 형성시킨다. 또한 케이블 제조과정에서 생성되는 가교부산물물은 건조과정 후에 배출되어도 그 공간은 남게 된다. 이는 불균일한 전계를 구성하여 부분방전을 유도함으로써 열화를 촉진시킨다. 지하에 매설되어 있는 케이블은 다양한 환경적인 요인들에 의해 영향을 받는다. 특히 다량의 수분이 존재하는 공간의 경우 케이블 절연층 내부로 수분이 침투하여 절연성능을 저하시킨다^[7].

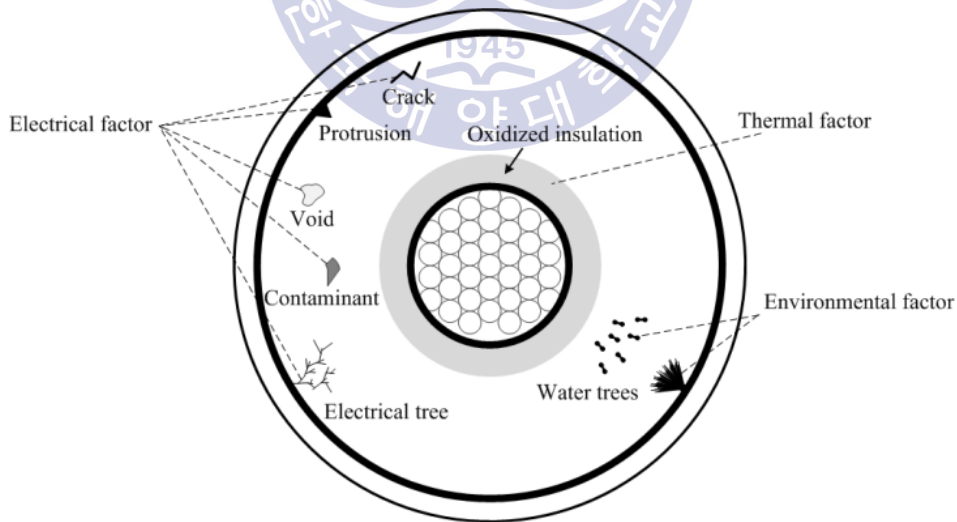


그림 2.2 케이블의 절연열화 요인
Fig. 2.2 Degradation factors of cables

2.2.2 부분방전

부분방전은 그림 2.3과 같이, 케이블 절연층 내부에서 형성된 돌기나 보이드 등으로부터 강한 전계가 집중되어, 국부적인 방전을 발생시키는 현상이다. 초기단계에서는 방전전하량 미소하기 때문에 절연체에 큰 영향을 끼치지 않는다. 하지만 장기간 지속 시, 절연체의 성능저하로 인하여 전기트리(Electrical tree)가 형성된다^[8]. 이로 인해 방전전하량이 급격하게 증가하며, 최종적으로 절연파괴(Break down)로 인한 사고를 초래한다.

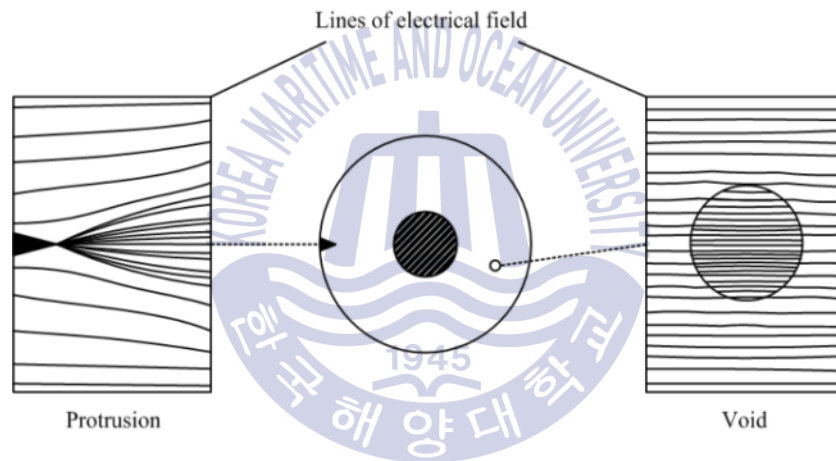


그림 2.3 케이블에서 부분방전 발생
Fig. 2.3 Occurrence of PD in cables

부분방전의 형태를 3가지로 구분할 수 있다. 코로나(Corona)방전은 고전압이 인가된 도체주변의 전계집중으로 인해 주변의 공기와 같은 기체분자의 절연파괴로 발생하며, 연면(Surface)방전은 절연물 표면의 손상으로 인해 유효 누설거리가 감소하여 표면을 따라 방전로를 형성시킨다. 내부(Internal)방전은 절연물 속에 유전율이 낮은 보이드의 존재로 인해, 전계가 집중되어 발생된다^{[9]-[11]}.

지중케이블의 경우 주로 절연체 내부의 보이드, 불순물 및 수분 등에 의한 내부방전을 통해 부분방전이 발생된다. 또한 결함의 크기, 위치 및 형상에 따라 사고로 진행하는데 수개월에서 10년 이상에 이르기까지 다양하다^{[6],[12]}.

지속적인 부분방전의 발생은 수지상의 방전흔적을 남기는 전기트리를 형성하며, 케이블의 급격한 수명저하 및 절연파괴의 요인으로 작용된다. 또한 절연체에 침투된 수분은 초기의 수 μm 의 분자수준을 가지며, 장기간 지속 시 응집력이 증가함에 따라 물방울 형태로 진행하게 되는데, 이러한 현상을 수트리(Water tree)라 한다. 수트리는 전기트리보다 성장속도가 느리지만, 낮은 전계에서 부분방전을 발생시키는 특징을 가지기 때문에 그 위험성이 높다. 그림 2.4는 부분방전으로 인한 지중케이블의 사고사례를 나타내고 있다. 2001년부터 2008년까지 원인별 사고 발생 통계에 따르면, 약 40% 정도로 절연체의 내부방전을 통한 자연적인 열화에 기인한 것으로 보고된 바 있다^{[13],[14]}.



출처 : '12 전력케이블 결함 검출 및 평가기준 선정에 관한 연구, 한국수자원공사 연구원

그림 2.4 지중케이블의 사고사례

Fig. 2.4 Failure cases of a underground cable

부분방전에 의해 나타나는 펄스를 측정하고 분석하기 위해, 발생 메커니즘을 이해하는 것은 중요하다. 그림 2.5는 내부방전에 의한 등가회로이며, C_c 는 결합부분의 정전용량으로 부분방전 발생 시 방전의 통로로 작용된다. C_b 는 결합과 직렬로 접속된 나머지 부분의 정전용량을, C_a 는 상기의 정전용량을 제외한 전체 절연체의 정전용량으로 나타낼 수 있다^{[15]-[17]}.

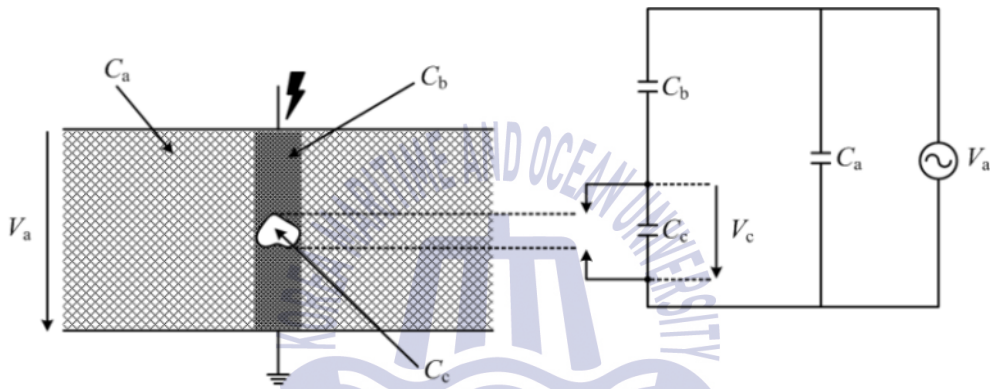


그림 2.5 내부방전의 등가회로
Fig. 2.5 Equivalent circuit of an internal discharge

V_c 는 결합지점 C_c 의 양단에서 발생하는 방전전압이며, 교류전압 V_a 를 인가하였을 때, 식 2.1과 같이 표현할 수 있다.

$$V_c = \frac{C_b}{C_b + C_c} V_a \quad (2.1)$$

그림 2.6은 V_a 의 한 주기에서 발생하는 부분방전 펄스의 패턴이다. V_c 가 증가하여 U_i 이상이 되면 결합지점에서는 방전이 발생하게 되고, U_e

이하로 감소되면 방전이 소멸하게 된다. 이와 같이 U_i 를 방전개시전압 (Discharge Inception Voltage, DIV)이라 하고, U_e 를 방전소멸전압 (Discharge Extinction Voltage, DEV)이라 한다. 방전이 소멸한 후, 약 10^{-7} s 이하의 매우 빠른 시간동안 임펄스 형태의 전류가 생성되며, 방전의 발생과 동일한 위상을 가진다. V_a 가 증가하여 방전개시전압에 도달하게 되면 상기의 과정을 반복하게 되며, 반주기의 부극성에서도 동일한 과정을 가진다^{[15][18]}.

이와 같이 부분방전의 발생 메커니즘을 통하여 방전개시전압과 임펄스 전류를 검출함으로써 도출할 수 있는 방전의 위상분포, 크기 및 발생횟수 등의 파라미터를 통해 부분방전의 특성을 분석할 수 있다.

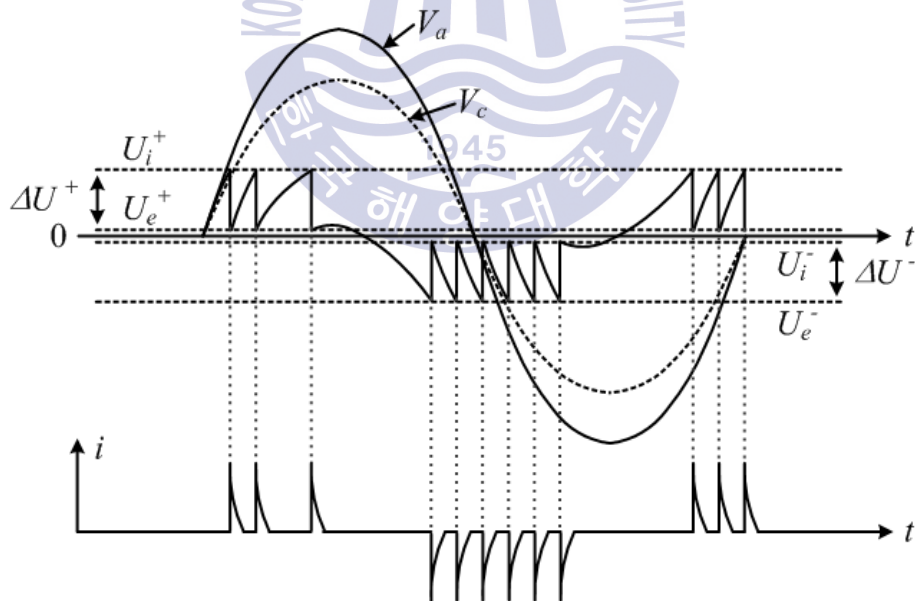


그림 2.6 교류전압에서 부분방전 패턴
Fig. 2.6 PD patterns under AC voltage

2.3 절연진단 및 위치추정

2.3.1 절연진단

지중케이블은 주로 도심지의 지하에 매설하여 전력계통을 구성하기 때문에 절연열화로 인한 사고 발생시 대규모의 피해로 확산되거나, 장시간의 복구과정이 소요된다. 따라서 열화징후를 사전에 파악하여 사고발생을 조기에 예방하기 위한 다양한 진단기술들이 개발되어 왔으며, 지속적으로 연구 중에 있다.

종래의 대표적인 진단방법으로, 케이블에 직류고전압을 인가하여 일정 시간동안 절연저항 및 누설전류를 통해 절연특성을 측정하는 절연저항법 및 직류누설전류법이 있다. 또한 절연체에 교류를 인가할 때, 발생하는 유전손실을 통하여 절연상태 및 열화정도를 추정하는 유전정접($\tan\delta$)법이 존재한다. 하지만 상기의 진단기술은 절연체 내에서 생성되는 보이드나 크랙 등의 결함에 대해서 검출이 불가능하고, 수트리가 발생된 케이블의 경우 높은 전압으로 인해 절연성능에 악영향을 미칠 수 있다. 또한 전력공급이 중단된 오프라인 상태에서 측정이 가능하기 때문에, 주로 초기에 완성된 케이블에 대한 공장시험이나 정기적인 검사과정을 통해 수행되고 있다^{[15][16]}.

XLPE 케이블의 주요 사고메커니즘은 부분방전에 의한 전기트리 형성을 통해, 최종적인 절연파괴로 이어지게 되며, 이 과정에서 부분방전은 필연적으로 발생할 수밖에 없다. 따라서 부분방전을 검출하기 위한 다각적인 연구가 관련 전문기관을 통해 지속적으로 수행되어 왔다. 부분방전 진단기술의 특징으로, 전력공급이 지속적으로 운용되는 온라인 상태에서 상시적으로 진단할 수 있기 때문에 복잡한 배전선로망에 대한 감시체계를 시스템화 할 수 있다. 또한 절연체 내 발생하는 여러 종류의 결함에 대한

특성을 판별할 수 있으므로, 다양하고 신뢰성이 높은 진단 정보를 제공할 수 있다.

부분방전이 발생되면 방전에 의한 에너지는 임펄스 전류, 전자기파, 초음파 및 빛 등으로 변환되어 나타나며, 다양한 센서를 이용해 이를 검출할 수 있다. 지중케이블은 지하에 매설되어 있기 때문에 전력구식 형태의 매설방식을 제외한 직매식이나 관로식의 경우, 지상으로 인입·인출되는 접속부에 센서를 설치하여 검출한다. 하지만 주변 전력설비에서 발생하는 외부노이즈로 인하여 부분방전 펄스의 판별이 어렵기 때문에, 상대적으로 영향이 적은 고주파 센서를 이용하여 검출하고 있다. 표 2.2는 지중케이블에서 이용되는 부분방전 검출 센서를 나타내었다^[19].

표 2.2 지중케이블에 이용되는 부분방전 검출 센서
Table 2.2 PD detection sensors for the underground cable

종 류	개 요
유도성 센서 (Inductive)	방전펄스에 의해 발생하는 자계를 통하여 검출하며, 대표적으로 고주파변류기와 로고우스키 코일(Rogowski coil)이 있다. 주로 지상 인입부에 설치하여 검출한다.
용량성 센서 (Capacitive)	정전용량을 이용하여 방전펄스를 검출하며, IEC 60270에 따른 커플링 커패시터를 통한 부분방전 검출법과 케이블 시스템에 금속포일을 부착하여 검출하는 박전극센서를 활용한다.
방향성 센서 (Directional)	주로 케이블 접속재(Cable joint)에서 이용되며, 양단에 방향성 커플러를 설치하여 접속재 내·외부의 방전펄스를 구분해 검출한다.
압전 센서 (Piezoelectric)	케이블 시스템에 부착하여 사용되며, 절연체 내 방전펄스로 인한 미세한 진동을 전기적신호로 변환하여 검출한다.

그림 2.7은 국제 규격 IEC 60270에 따른 부분방전 검출법을 나타낸다. 시료(a)의 결함에서 발생하는 부분방전 펄스를 커플링 커패시터(k) 및 검출임피던스(Z_m)를 이용하여 측정한다. 주로 차폐시설을 보유한 실험실에서 사용되며, 노이즈가 차단될 수 있는 조건에서는 검출 결과가 우수한 특징이 있다. 하지만 현장에서 적용할 경우 외부노이즈로 인해 신뢰성을 가진 데이터를 취득하기 어려워, 케이블의 품질검사 용도로 활용되고 있다^[20].

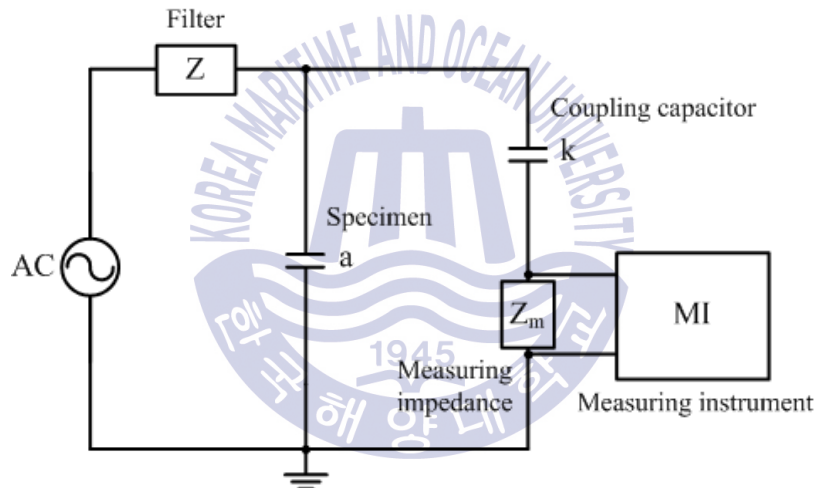


그림 2.7 IEC 60270에 따른 부분방전 검출 회로
Fig. 2.7 PD detection circuit according to IEC 60270

방전펄스의 상승시간 및 폭은 수 ns ~ 수십 ns로 매우 짧은 시간동안 발생되며, 수 MHz이상의 고주파 성분을 포함하고 있다. 이러한 고주파 영역의 경우 외부노이즈의 크기가 상대적으로 작기 때문에, 펄스검출에 용이하다. 그림 2.8는 지중케이블에서 고주파센서에 의한 부분방전 검출 시스템을 나타낸다. 대표적으로 케이블 시스와 접지사이에 설치하여 검출하

는 고주파변류기 및 시스에 직접 부착하는 박전극센서가 활용된다. 그림 2.9과 같이 지상을 통해 인입·인출되는 터미널 접속부 또는 지하의 전력구 내 케이블접속재를 통하여 수행된다^{[21]-[23]}.

박전극센서의 경우 고주파변류기와 비교하여, 감도의 성능은 우수하지만 주위환경 및 시간에 따라 검출특성이 변할 수 있다. 가스절연개폐기 (Gas insulated switchgear, GIS) 및 유입변압기의 경우 수 pC의 전하량을 통해 위험도를 판단하기 때문에 검출감도는 매우 중요하다. 반면에, 지중케이블은 수백 pC ~ 수천 pC 정도의 높은 허용기준치를 가지므로, 비교적 감도가 양호한 고주파변류기로도 충분히 활용가능하다. 따라서 본 논문에서는 고주파변류기를 통한 측정시스템을 구성하여 연구를 수행하였다.

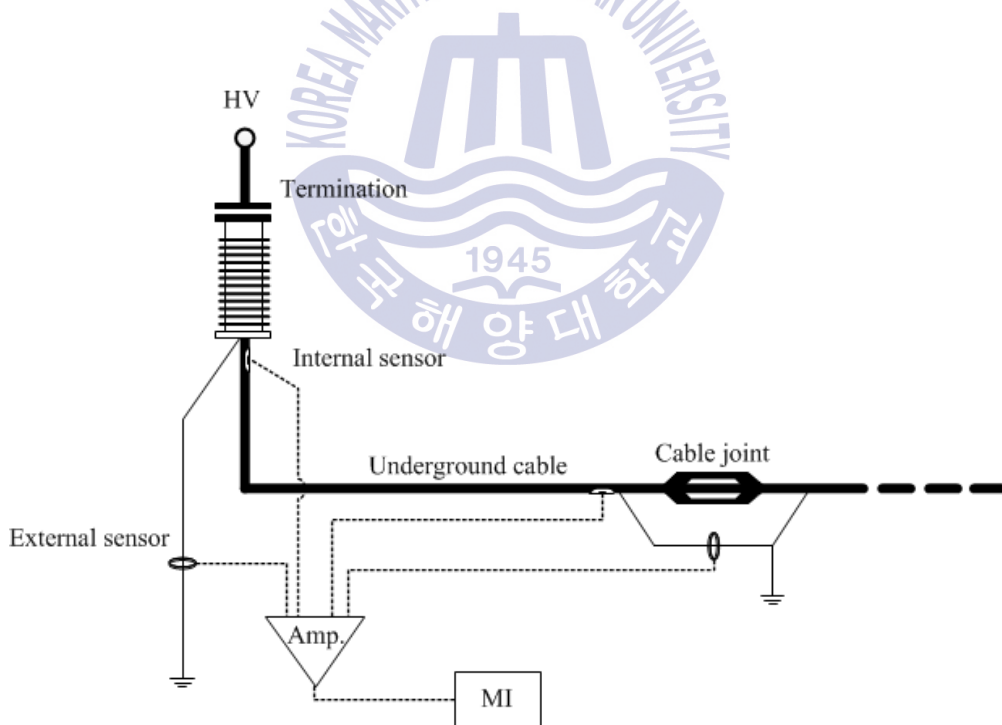
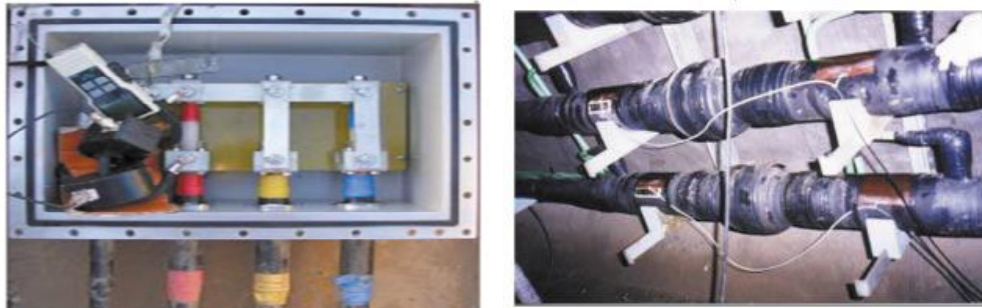


그림 2.8 지중케이블의 부분방전 검출 시스템
Fig. 2.8 PD detection system for a underground cable



출처 : '09 2월 전기의 세계, 대학전기학회

그림 2.9 고주파 센서를 이용한 부분방전 검출
 Fig. 2.9 Detection of PD using high frequency sensors

2.3.2 위치추정

케이블에서 열화로 인한 사고발생시, 신속한 복구를 위해 고장위치를 확인해야 한다. 지중케이블의 경우 육안으로 식별하기 불가능하기 때문에, 다양한 전기적인 방법을 통해 위치를 추정한다. 일반적으로 결함별 유형에 따른 적합한 기술을 선정하고, 초기의 개략적인 고장점 위치를 파악한 후, 보다 정밀한 위치를 추적한다. 과거에는 케이블의 길이 및 저항과의 관계성을 이용한 머레이 루프(Murray loop) 방식이 활용되었다. 하지만, 사고지점의 임피던스가 높을 때는 측정이 불가능하며, 건전상의 케이블이 추가로 요구되는 단점이 있다.

현재는 펄스를 케이블에 인가하여, 사고지점으로부터 반사되는 펄스를 검출하는 TDR(Time domain reflectometry) 방식을 주로 활용한다. 건전상의 케이블은 균일한 특성 임피던스로 구성되어 있다. 하지만 고장이 발생되면 케이블 도체저항에 따른 특성 임피던스가 변화한다. 이를 통해 외부에서 주입된 펄스를 통과시키면 전기적인 반사펄스가 발생되며, 펄스간의 시간차를 통해 고장위치를 추정할 수 있다^[24].

그림 2.10과 같이 입사펄스(v_i)는 서로 다른 매질을 통해, 특성 임피던스가 변화하는 지점에서 투과펄스(v_t)와 반사펄스(v_ρ)가 발생된다.

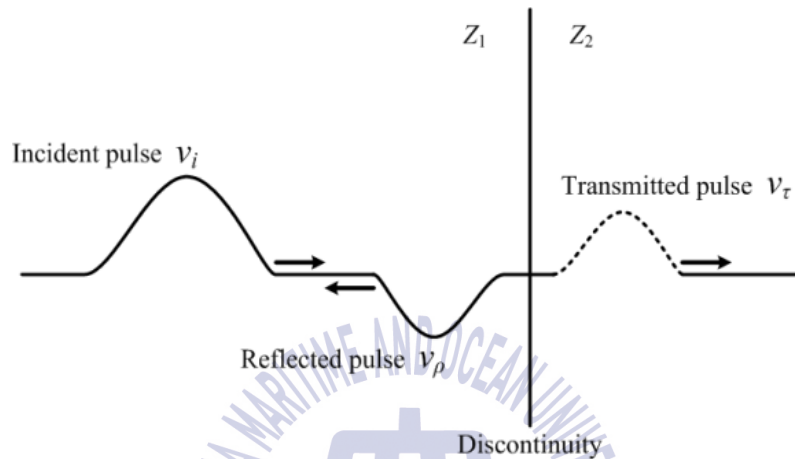


그림 2.10 임피던스 변화에 따른 펄스의 전파
Fig 2.10 Propagation of a pulse against the change of impedance

식 2.2는 입사펄스와 반사펄스의 관계를 나타내며, ρ 는 반사계수 (Reflection coefficient)로서 식 2.3과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_\rho = \rho v_i \quad (2.2)$$

$$\rho = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.3)$$

케이블의 고장점이 단선(Open)일 경우 $Z_2 \gg Z_1 (Z_2 \rightarrow \infty)$ 이므로 식 2.3에 따라 $\rho \approx 1$ 이 된다. 따라서 v_i 와 v_ρ 는 크기 및 극성이 모두 동일한 특

성을 가진다. 반면에 단락(Short)에서는 $Z_2 \ll Z_1 (Z_2 \rightarrow 0)$ 이므로 $\rho \approx -1$ 임에 따라 크기는 동일하나 극성은 다르다. 이와 같이 단선 및 단락의 경우 반사된 펄스의 극성이 서로 다르므로 개략적인 사고 유형을 판단할 수 있다.

TDR 방식을 이용한 케이블의 고장점 위치추정은 그림 2.11과 같이 구성된다. 케이블 인입부에 있는 펄스발생장치를 통해, 펄스를 주입하는 시점부터 고장점에서 반사되어 다시 인입부에 도달하는 시점까지의 시간차를 측정해 위치를 파악한다. 식 2.4는 고장점 위치를 산출하는 식을 정의한다^{[25],[26]}.

$$l = \frac{1}{2}v\Delta t [m] \quad (2.4)$$

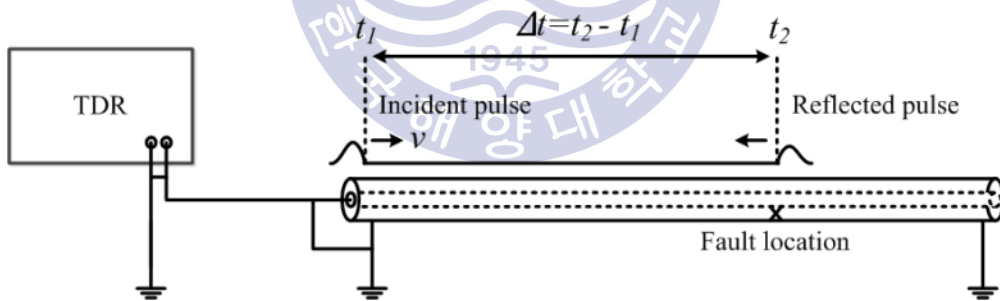


그림 2.11 TDR 방식의 구성

Fig. 2.11 Configuration of the TDR Method

펄스의 전파속도(v)는 식 2.5와 같이 빛의 속도(c), 투자율(μ) 및 유전율(ϵ)을 통해 정의된다. 케이블에서는 비 투자율(μ_r)이 1이므로 무시한다.

반면에 비 유전율(ϵ_r)은 케이블을 구성하는 절연물의 종류에 따라 다르기 때문에, 실질적인 전파속도를 결정하는 주요인으로 작용한다.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r\epsilon_0\mu_r\mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}c [m/s] \quad (2.5)$$

기존의 TDR 방식은 케이블 사고발생 이후에 오프라인 상태에서 수행되며, 절연체 내 보이드 등의 결함을 사전에 확인할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 부분방전 시 발생하는 방전펄스를 이용해 TDR 방식을 적용한 케이블 내 결함 위치추정을 수행하였다.



제 3 장 실험 및 분석

3.1 부분방전 측정

3.1.1 실험계

고주파변류기로 구성된 측정시스템의 검출 감도를 위하여 그림 3.1과 같이 실험계를 구성하였다. 케이블에 결함을 모의하여 부분방전을 발생시키고, 50Ω 무유도 저항 및 고주파변류기를 통해 방전 펄스를 검출하였다. 또한 검출된 펄스를 이용해 방전전하량을 산출한 후 이를 비교하였다. 전하량 q 는 식 3.1와 같이 정의할 수 있으며, 오실로스코프에서 측정된 펄스를 적분한 값으로 나타낼 수 있다. 고주파변류기의 감도 산출은 측정된 펄스의 peak 값에 대한 전하량의 비를 통해 나타내었다.

$$q = \int_{t_1}^{t_2} i dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{V}{R} dt \quad (3.1)$$

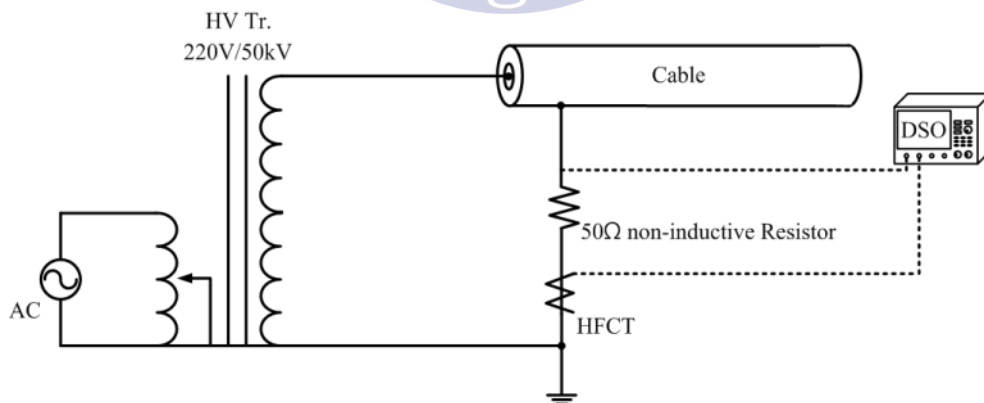
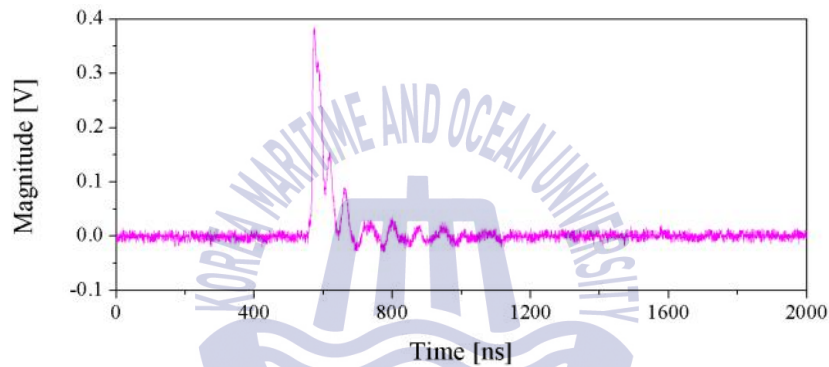


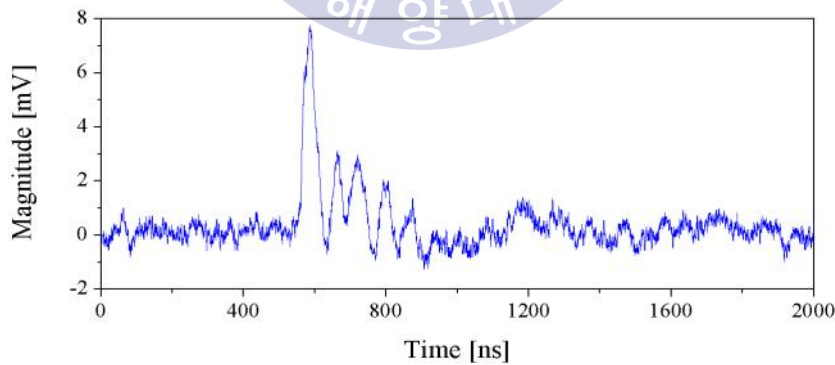
그림 3.1 감도산출을 위한 실험계 구성

Fig. 3.1 Experimental setup for the sensitivity calculation

그림 3.2는 50Ω 무유도 저항 및 고주파변류기에서 측정된 방전 펄스의 파형을 나타낸다. 총 10회를 측정 수행한 결과, 50Ω에서는 평균 305.26 pC으로, 고주파변류기의 경우 298.89 pC으로 나타났으며, 약 2%이내의 오차로 거의 일치함을 보였다. 또한 고주파변류기의 감도를 산출한 결과, 약 38.5 pC/mV로 나타났다. 따라서 상기 실험을 통해 고주파변류기의 측정시스템에 대한 적합성여부 및 감도를 확인하였다.



(a) 50Ω 무유도 저항



(b) 고주파변류기

그림 3.2 측정된 단일펄스
Fig. 3.2 Detected single pulses

그림 3.3은 XLPE 절연체 내 보이드의 크기 및 위치에 따른 부분방전 특성을 분석하기 위한 실험계를 나타낸다. 22.9 kV-y CNCV-W 케이블에서 결함을 모의하여 부분방전을 발생시켰으며, 220V/50 kV 변압기는 케이블의 도체와 시스 사이에 연결하여 고전압을 인가하고, 10,000:1 분압기를 통해 전압을 측정하였다. 또한 고압부와 케이블 도체사이에서 발생하는 코로나를 방지하기 위해 충분한 절연내력을 갖도록 설계하였다. 150 kHz ~ 30 MHz 주파수대역을 가지는 고주파변류기는 케이블 시스와 접지사이에 설치하여 발생된 방전펄스를 검출하고, 5 GS/s Sampling rate를 가지는 오실로스코프와 데이터수집 모듈장치(Data acquisition, DAQ)를 통해 수집하였다. 부분방전 특성은 LabVIEW로 설계된 PRPD를 이용하여 분석하였다.

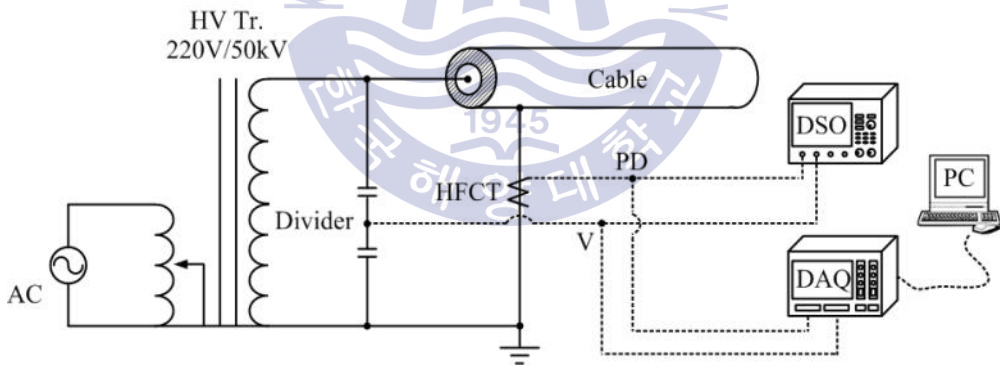


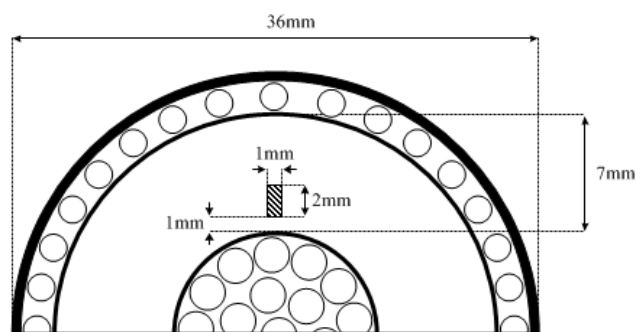
그림 3.3 PD 패턴의 분석을 위한 실험계 구성

Fig. 3.3 Experimental setup for analysis of PD patterns

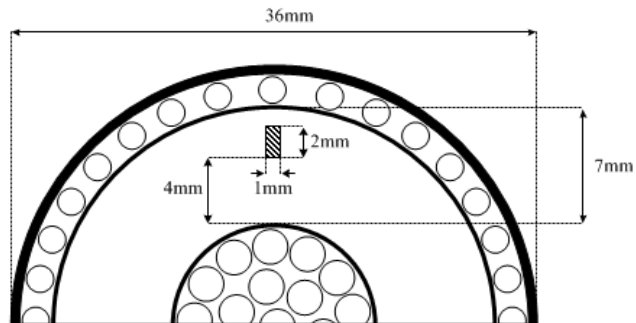
XLPE 절연층의 두께는 약 7mm이며, 1m 길이로 절단하여 각각의 보이드 크기 및 위치에 따른 결함을 모의하였다. 실제 케이블에서 발생하는 보이드는 수 μm 로 매우 작기 때문에 인위적인 제작은 어렵다. 따라서 케이블 시스로부터 구멍을 뚫어 보이드를 형성한 후 에폭시를 이용해 표면을 도포하였고, 부분방전 발생이 용이하도록 수 mm 크기로 구성하였다. 결함 모두 원통형의 구조로서, 동일하게 도체의 인입부로부터 40cm 떨어진 지점에서 결함을 모의하였다.

그림 3.4는 케이블의 단면도를 통해 본 4종의 보이드 결함이다. (a) 1 mm-interfacial은 케이블 도체로부터 인접한 직경 1mm 및 높이 2mm 크기의 보이드이다. (b) 1 mm-surface는 (a)와 동일한 결함크기로서, 절연체 외곽에 인접해 있으며, (c) 2 mm-interfacial 및 (d) 2 mm-surface는 직경 2mm 및 높이 2mm 크기의 보이드를 통해 각각 도체 및 절연체 외곽에 인접한 구조를 나타낸다.

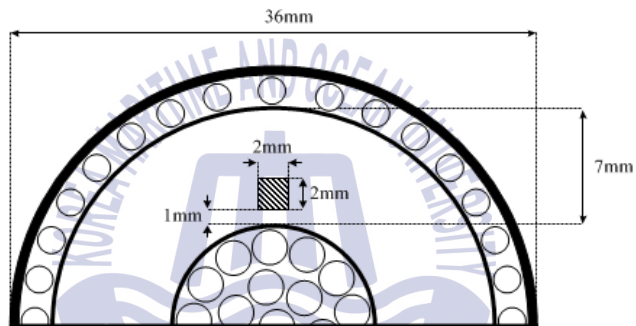
본 연구는 XLPE 전력케이블의 제조공정에서 발생하는 주요 열화요인인 보이드를 대상으로 수행하였으며, 크기 및 위치 변화에 따른 위상분포, 방전전하량 및 방전횟수(Φ -q-n)를 파라미터로 적용하여 부분방전의 특성을 분석하였다.



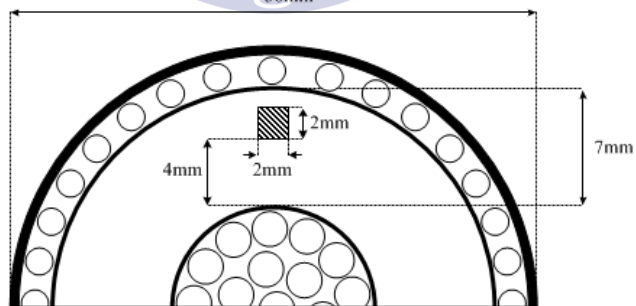
(a) 1 mm-interfacial



(b) 1 mm-surface



(c) 2 mm-interfacial



(d) 2 mm-surface

그림 3.4 보이드 결함의 종류
Fig. 3.4 Types of void defect

3.1.2 분석 시스템

결합별 부분방전 특성을 분석하기 위해 대표적인 기법인 PRPD(Phase Resolved Partial Discharge)를 통해 수행하였다. PRPD는 방전펄스로부터 발생지점의 위상(Φ)과 측정된 방전전하량(q) 및 방전의 발생횟수(n)에 대한 데이터들을 조합하여 분석하는 방식이다. 그림 3.5는 PRPD로 수행한 예를 나타내며, $0^\circ - 360^\circ$ 위상의 한주기 동안 발생한 펄스를 수집한다. LabVIEW로 설계된 PRPD는 실시간 분석과, 일률적인 처리를 위하여 Producer-consumer 및 Standard state machine 구조를 적용하였다. 수집된 신호는 Peakholder 기법을 이용해 검출부에 연산되고, 데이터는 누적하여 저장한다. 수집이 완료되면, 저장된 신호를 재 호출함으로서 방전량과 방전횟수에 따른 데이터를 배열 및 연산 처리한다. 최종적으로 상기의 알고리즘에 의한 결과를 프론트 패널(Front panel)에 표시하게 되며, 각각의 종합적인 데이터들과 그래프는 csv 및 그래픽 파일로 저장하게 된다.

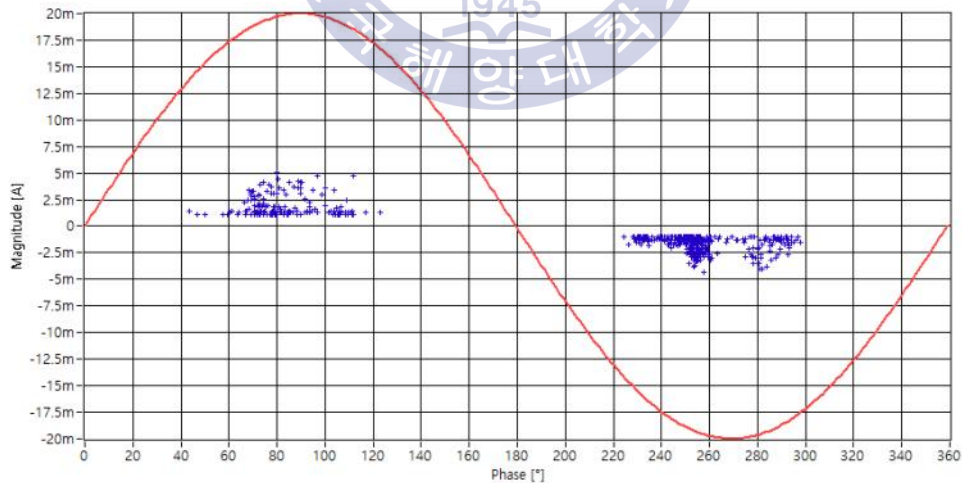


그림 3.5 PRPD의 예
Fig. 3.5 An example of PRPD

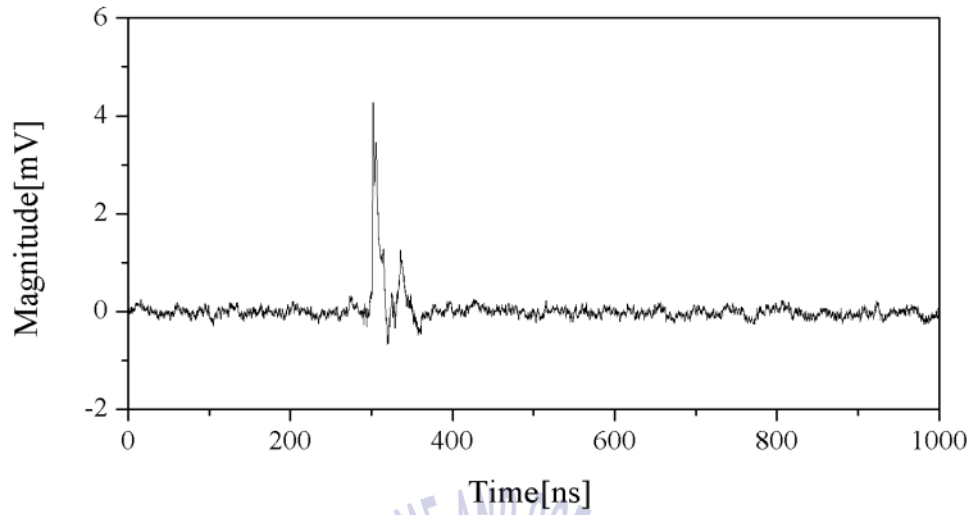
3.1.3 결과 및 분석

1 mm-interfacial의 방전개시전압은 3.4 kV로 관측되었다. 그림 3.6은 4.1 kV를 인가하였을 때, 단일펄스 및 PRPD 패턴을 나타낸다. 측정된 펄스의 크기는 2.4 mV로, 방전전하량은 92.4 pC으로 산출되었다. 방전횟수의 경우 정·부극성에서 각각 152회 및 370회로 발생하였으며, 정극성보다 부극성에서 약 3배 이상의 높은 빈도수를 보였다. 위상은 정극성의 경우 $65^{\circ} - 120^{\circ}$ 및 부극성의 경우 $225^{\circ} - 305^{\circ}$ 로 분포하였다.

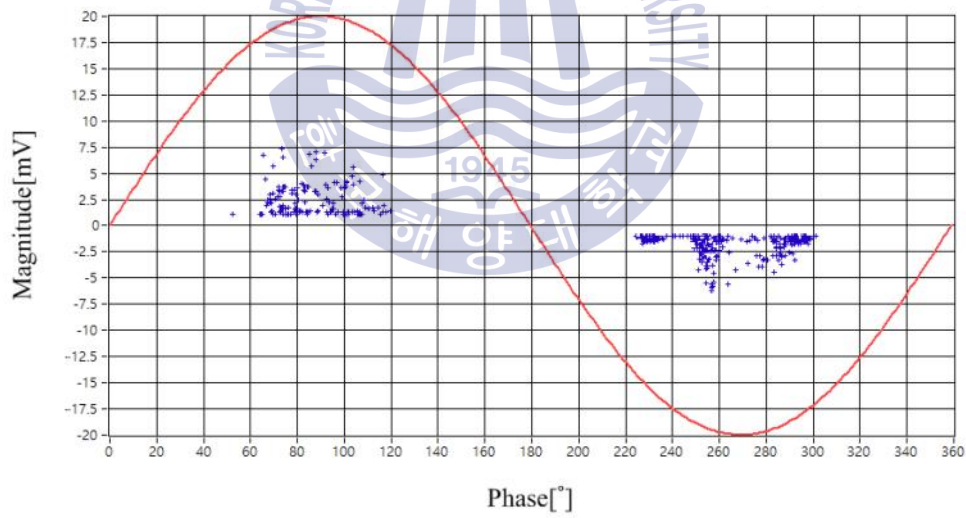
1 mm-surface의 방전개시전압은 3.5 kV로 측정되었다. 그림 3.7은 4.2 kV를 인가하였을 때, 단일펄스 및 PRPD 패턴을 나타낸다. 측정된 펄스의 크기는 1.6 mV로, 방전전하량은 61.6 pC으로 산출되었다. 방전횟수의 경우 정·부극성에서 각각 210회 및 234회로 발생하였으며, 두 극성 모두 유사하게 나타났다. 위상은 정극성의 경우 $42^{\circ} - 120^{\circ}$ 및 부극성의 경우 $230^{\circ} - 305^{\circ}$ 로 분포하였다.

2 mm-interfacial의 방전개시전압은 3.0 kV로 측정되었다. 그림 3.8은 3.6 kV를 인가하였을 때, 단일펄스 및 PRPD 패턴을 나타낸다. 측정된 펄스의 크기는 3.1 mV로, 방전전하량은 119.4 pC으로 산출되었다. 방전횟수는 정·부극성에서 각각 289회 및 669회로 발생하였으며, 정극성보다 부극성에서 약 2.5배 정도의 높은 빈도수를 보였다. 위상은 정극성의 경우 $58^{\circ} - 120^{\circ}$ 및 부극성의 경우 $225^{\circ} - 305^{\circ}$ 로 분포하였다.

2 mm-surface의 방전개시전압은 2.9 kV로 측정되었다. 그림 3.9는 3.5 kV를 인가하였을 때, 단일펄스 및 PRPD 패턴을 나타낸다. 펄스의 크기는 2.1 mV로 측정되었으며, 방전전하량의 경우 80.9 pC으로 산출되었다. 방전횟수는 정·부극성에서 각각 422회 및 485회로 발생하였으며, 부극성에서 다소 높게 나타났다. 위상은 정극성의 경우 $50^{\circ} - 120^{\circ}$ 및 부극성의 경우 $230^{\circ} - 310^{\circ}$ 로 분포하였다.

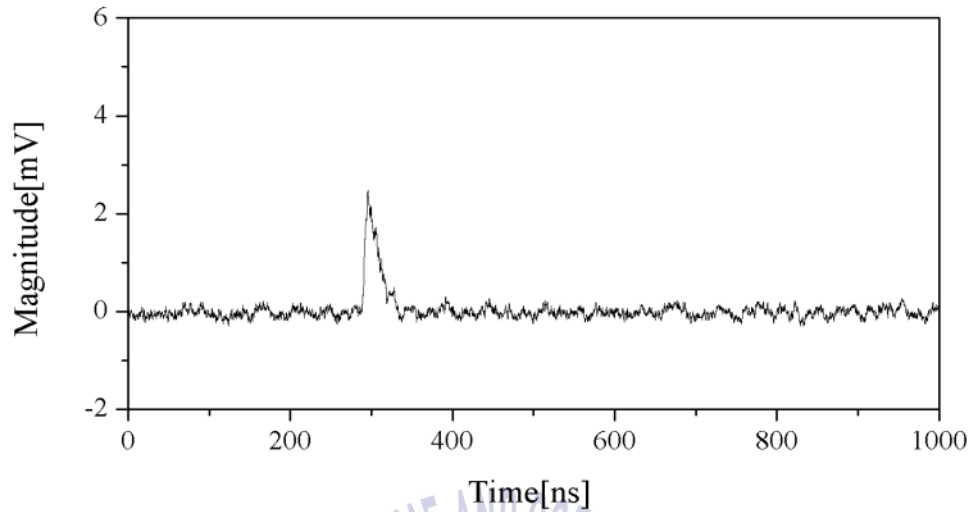


(a) 단일펄스

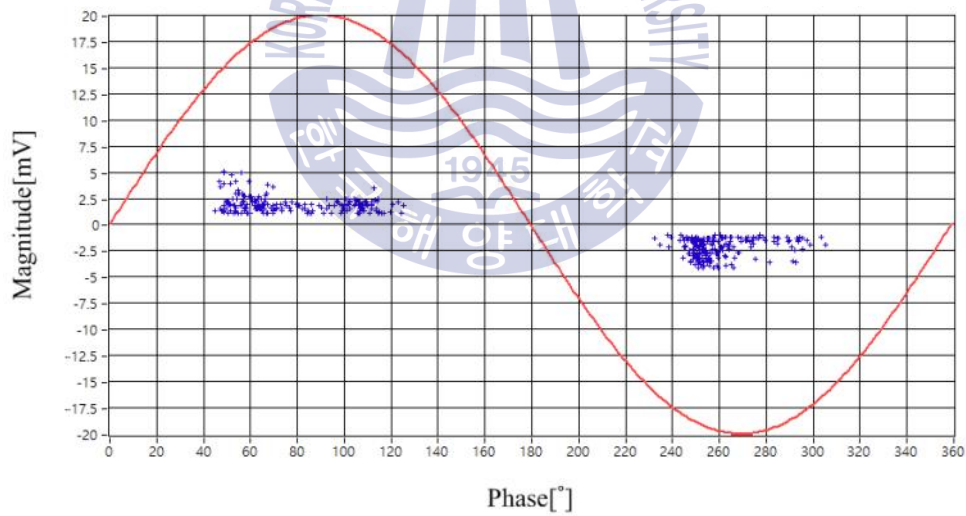


(b) PRPD

그림 3.6 1 mm-interfacial에서 PD 특성
 Fig. 3.6 PD characteristics in the 1 mm-interfacial

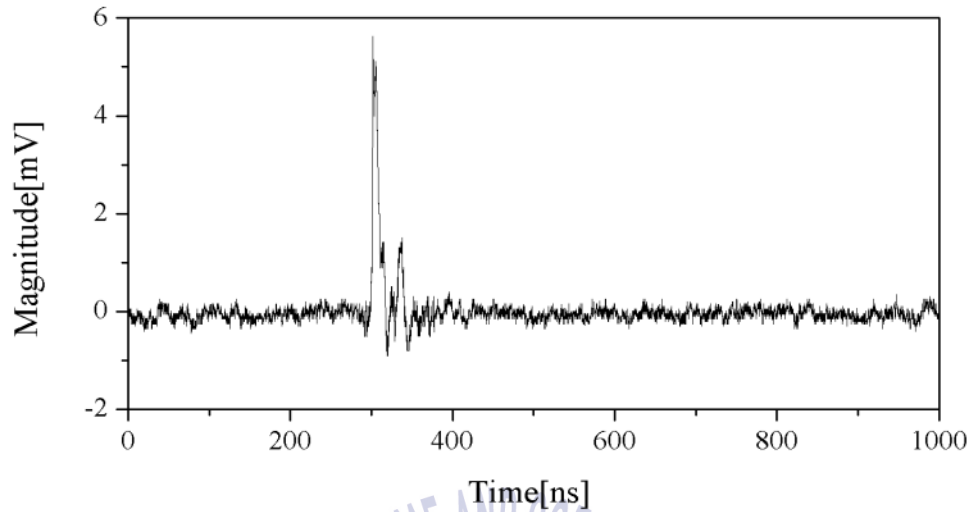


(a) 단일펄스

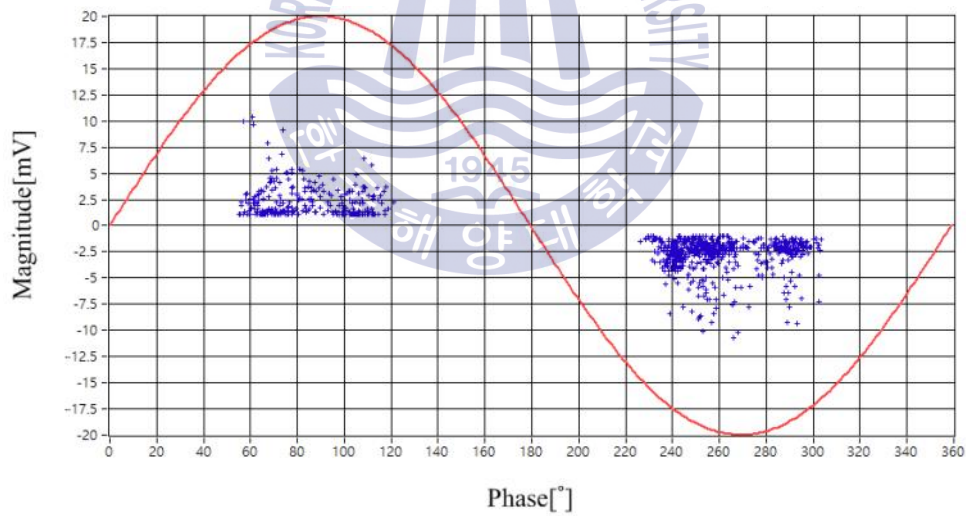


(b) PRPD

그림 3.7 1 mm-surface에서 PD 특성
 Fig. 3.7 PD characteristics in the 1 mm-surface

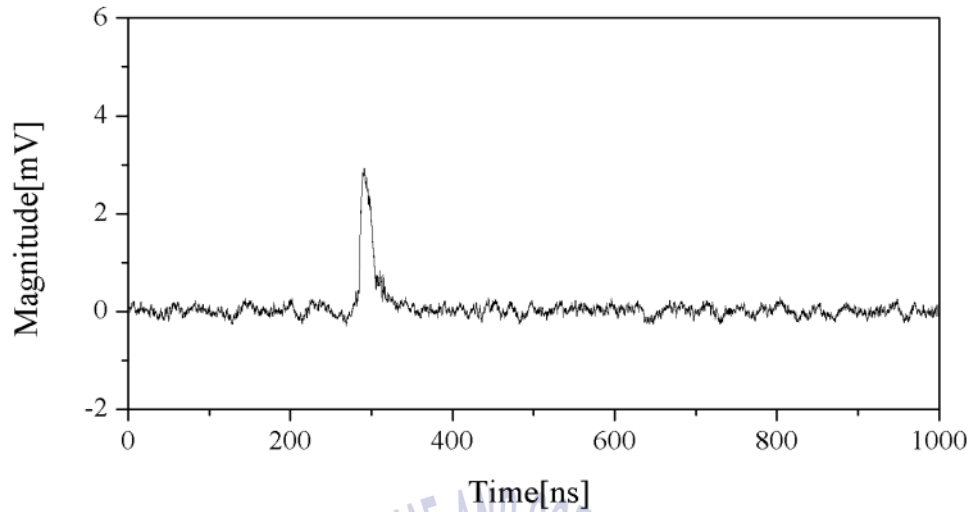


(a) 단일펄스

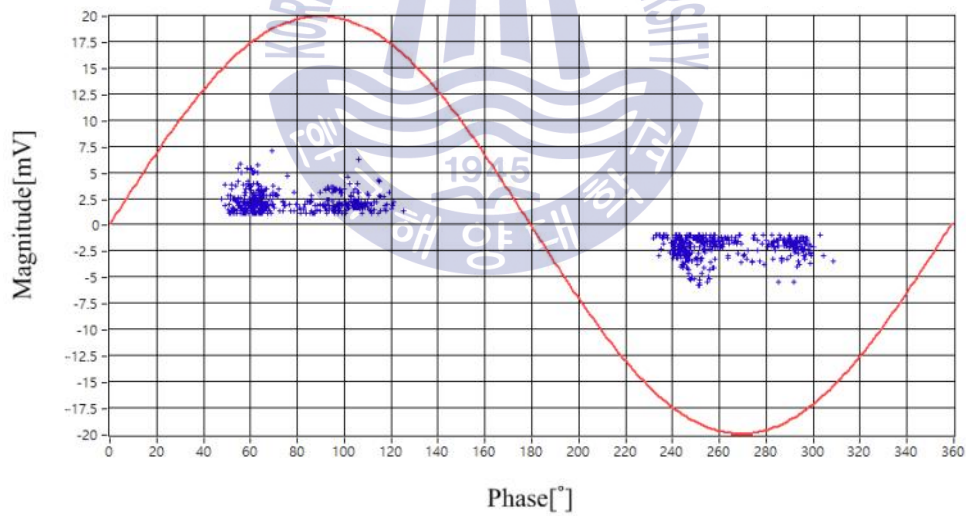


(b) PRPD

그림 3.8 2 mm-interfacial에서 PD 특성
 Fig. 3.8 PD characteristics in the 2 mm-interfacial



(a) 단일펄스



(b) PRPD

그림 3.9 2 mm-surface에서 PD 특성
 Fig. 3.9 PD characteristics in the 2 mm-surface

결함별 방전특성에 대한 종합적인 분석결과를 표 3.1 및 그림 3.10에서 나타내었다. 약 3 kV 정도에서 부분방전이 모두 발생되었으며, 방전전하량의 경우 2 mm-interfacial에서 119.4 pC으로 가장 크고, 1mm-surface에서는 61.6 pC으로 가장 작게 나타났다. 또한 보이드의 크기가 크거나 도체에 인접한 위치에 존재할수록 전하량의 크기 또한 증가하는 경향을 보였다. 방전횟수의 경우 동일한 위치를 기준으로, 직경 1 mm보다 2 mm에서 방전의 발생빈도수가 많았다. 또한 도체에 인접한 Interfacial이 Surface와 비교하여 부극성에서 발생하는 비율이 약 20 % 이상으로 높았다. 위상의 경우 정·부극성에서 평균 55° - 120° 및 225° - 307°로 유사하게 분포하였다.

표 3.1 결함별 PD 특성 비교
Table 3.1 Comparison of PD characteristics against the defect types

결함종류 구 분	1 mm interfacial	1 mm surface	2 mm interfacial	2 mm surface
방전개시전압[kV]	3.4	3.5	3.0	2.9
방전전하량[pC]	92.4	61.6	119.4	80.9
발생횟수[회] (극성비율)	N _{Pos.} : 152 (29 %)	N _{Pos.} : 210 (47 %)	N _{Pos.} : 289 (30 %)	N _{Pos.} : 422 (47 %)
	N _{Neg.} : 370 (71 %)	N _{Neg.} : 234 (52 %)	N _{Neg.} : 669 (70 %)	N _{Neg.} : 485 (53 %)
위 상[°]	65 - 120	42 - 125	58 - 120	50 - 120
	225 - 305	230 - 305	225 - 305	230 - 310

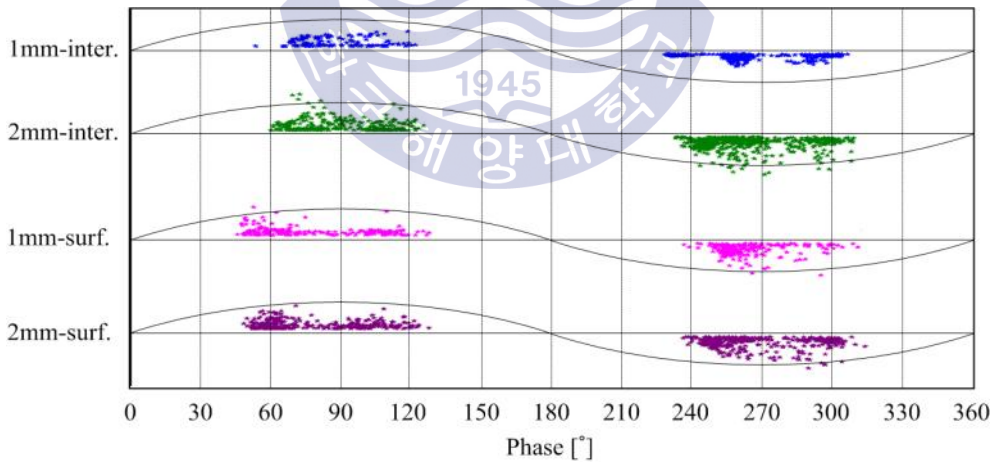
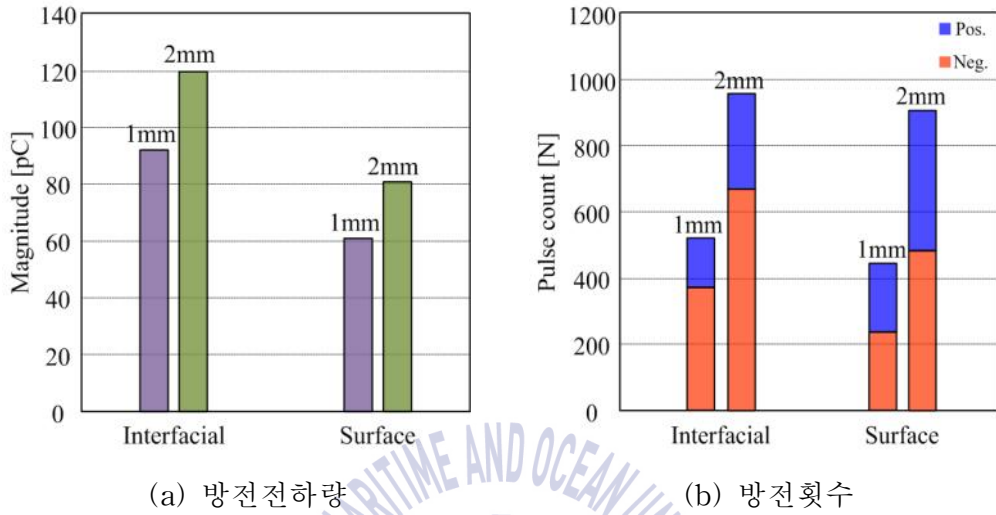


그림 3.10 결함별 PD 특성 비교

Fig. 3.10 Comparison of PD characteristics against the defect types

3.2 부분방전 위치추정

3.2.1 실험계

그림 3.11은 TDR 방식을 기반으로 부분방전 펄스를 이용한, 케이블 내 결함 위치추정의 실험계 구성도이다. 도체와 시스 사이에 연결된 변압기를 통해 고전압을 인가하였으며, 분압기를 이용하여 전압을 측정하였다. 고주파변류기는 고압 인입부로부터 1m 떨어진 위치에 설치하여 방전펄스를 검출하였으며, 이를 측정지점으로 선정하였다. 결함은 길이 50m 케이블을 통해, 측정지점으로부터 2m 떨어진 위치에 모의하였다. 또한 실험의 유효성을 입증하기 위하여, 케이블 길이 및 결함지점을 변화시켜 수행하였다. 오실로스코프에서 측정된 방전펄스 및 반사펄스를 통해 펄스 간의 시간차를 분석하였으며, 식 3.3에서 도출한 공식을 적용하여 결함 위치를 산출하였다.

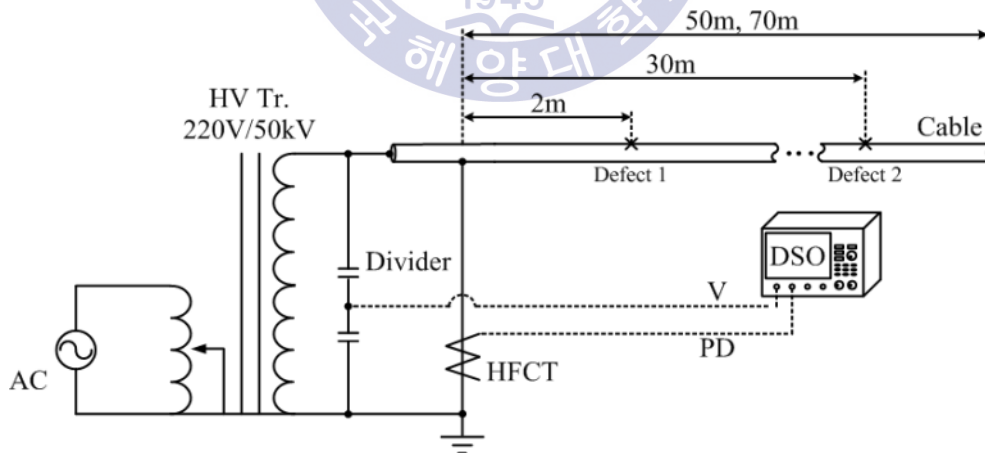


그림 3.11 결함 위치추정을 위한 실험계 구성

Fig 3.11 Experimental setup for a defect localization

그림 3.12와 같이 부분방전에 의한 펄스는 결함지점을 기준으로, 케이블 양 끝단을 향해 동시에 진행하게 된다. 식 3.2는 방전펄스 및 개방된 케이블 끝단에서 발생한 반사펄스의 시간차를 나타내며, 전파속도와 펄스간의 이동거리를 통해 도출할 수 있다. 식 3.3은 상기의 식을 이용해 측정지점으로부터 결함지점까지의 거리(x)를 표현한 것으로, 케이블의 전장(l), 펄스의 전파속도(v) 및 측정된 시간차(Δt)를 적용하여 산출할 수 있다. 하지만 케이블을 따라 진행되는 펄스의 전파속도 및 거리에 대한 감쇠특성을 사전에 고려할 필요가 있으며, 본 연구에 앞서 이를 수행하였다.

$$\Delta t = t_{Ref.} - t_{PD} = \frac{2(l-x) + x}{v} - \frac{x}{v} \text{ [s]} \quad (3.2)$$

$$x = l - \frac{1}{2} \Delta t \times v \text{ [m]} \quad (3.3)$$

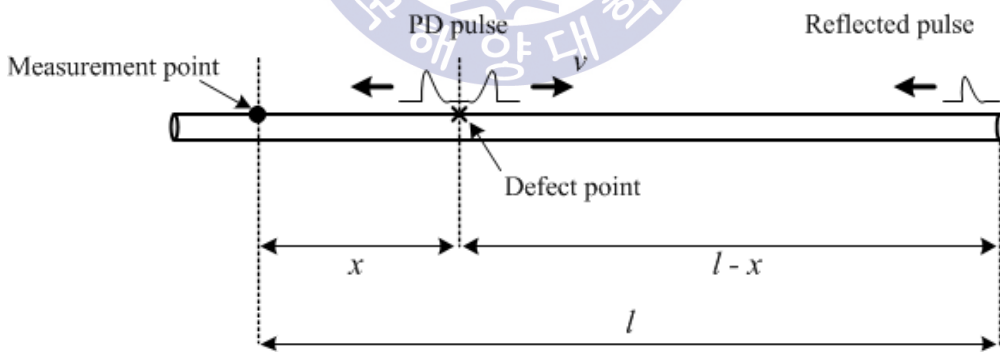


그림 3.12 결함의 위치추정 원리

Fig 3.12 Principle of defects localization

3.2.2 전파속도 산출

결함위치를 추정하기 위해서는, 케이블을 따라 진행하는 펄스의 전파속도(Velocity of propagation, v)가 요구된다. 빛의 속도(c) 및 절연체의 비유전율(Relativity permittivity, ϵ_r)을 이용하여 산출할 수 있으며, 대상 케이블의 자료를 참조하여, 식 3.4에 나타내었다.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{2.3}} = 1.98 \times 10^8 [m/s] \quad (3.4)$$

또한 10 m 이격시킨 두 고주파변류기를 통해, 펄스간의 시간차를 측정하여 전파속도를 구하였다. 그림 3.13과 같이 시간차는 50 ns로 나타났으며, 전파속도는 2×10^8 m/s로 산출되었다. 비유전율을 통한 결과와 거의 유사함을 보였고, 오실로스코프의 수평분해능(Horizontal resolution)이 충분히 높다면, 동일한 결과가 나타날 것이라 판단된다. 본 연구에서는 고주파변류기를 통해 산출된 전파속도를 적용하여 실험을 수행하였다.

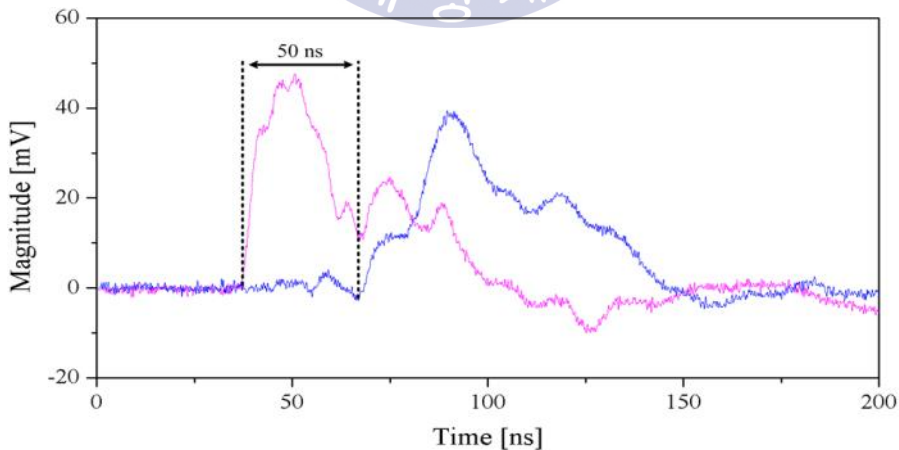


그림 3.13 펄스의 시간차

Fig. 3.13 Time interval between two pulses

3.2.3 감쇠특성 분석

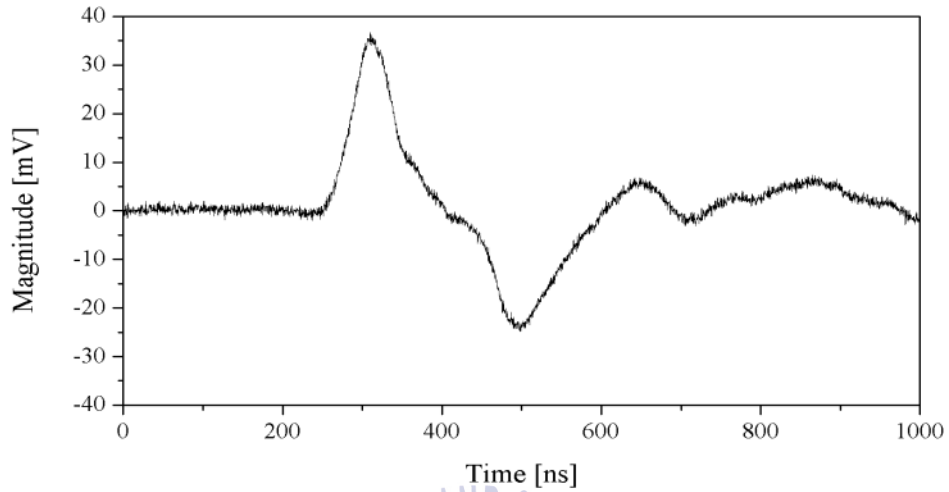
펄스가 케이블을 따라 진행하게 되면, 저항 및 리액턴스 성분에 의해 크기 및 위상이 변화하게 된다. 이를 전파정수(Constant of propagation, γ)를 통해 확인할 수 있으며, 식 3.5와 같이 케이블의 임피던스(Z) 및 어드미턴스(Y)를 이용하여, 산출할 수 있다. 식 3.6은 상기의 식을 복소수화 한 것으로 실수분(α)은 펄스크기에 대한 감쇠정도를, 허수분(β)은 위상의 변화정도를 나타낸다^[27].

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (3.5)$$

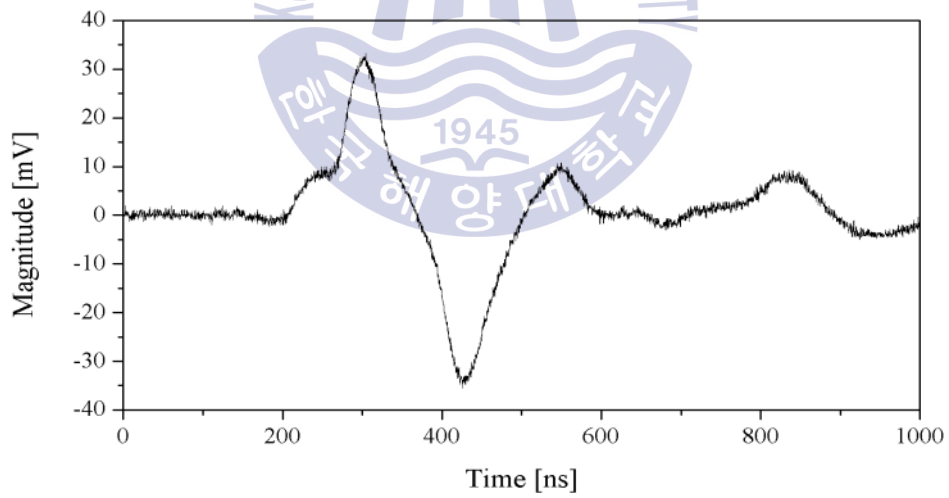
$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (3.6)$$

부분방전 펄스 및 반사펄스의 검출 용이성을 판단하기 위해 진행거리에 따른 감쇠율을 분석하였으며, 측정 가능한 최대거리를 도출하였다. 전파정수를 이용한 방식은 케이블의 임피던스 및 어드미턴스 값이 필요하며, 이를 위해 추가적인 실험절차가 요구된다. 따라서 본 논문에서는 부분방전 펄스와 유사한 임펄스를 케이블에 발생시켜, 거리에 따른 펄스의 크기를 측정하였다.

함수발생기를 통해 크기 5V, 폭 40 ns 및 상승시간 20 ns로 구성된 펄스를 케이블에 주입시켰으며, 특성임피던스(Characteristic impedance)의 변화에 따른 반사를 고려하여 실험장치 및 케이블에 동일 임피던스를 매칭시켰다. 고주파변류기를 이용하여 10 m 간격으로 최대 50 m까지 펄스를 검출하였으며, 그림 3.14는 케이블 인입부(0 m)와 50 m 지점에서 측정된 펄스의 파형을 나타낸다.



(a) 케이블 인입부(0 m)



(b) 50 m

그림 3.14 케이블 거리에 따른 펄스파형
 Fig. 3.14 Waveforms of a pulse to cable distance

케이블을 따라 진행하는 펄스의 감쇠특성을 표 3.2 및 그림 3.15에 나타내었다. 10 m 간격으로 측정된 펄스 크기를 통해 감쇠율을 분석한 결과, 2.15%로 일정한 선형성을 유지하며 감쇠됨을 확인하였다. 이는 케이블 길이 당 동일한 R, L, C 성분을 포함하고 있기 때문이라 판단된다. 측정 가능한 최대거리를 분석한 결과, 약 465 m에서 펄스의 크기가 소멸됨을 확인하였다. 70 m 케이블에서 진행하는 펄스의 최대거리는 140 m로, 상기의 과정을 통해 방전펄스의 검출의 가능성을 입증하였다.

표 3.2 케이블 거리에 따른 감쇠
Table 3.2 Attenuation to the cable distance

거리 [m]	크기 [mV]	감쇠율 [%]
0	37.2	-
10	36.4	2.15
20	35.6	4.3
30	34.8	6.45
40	34.0	8.6
50	33.2	10.75

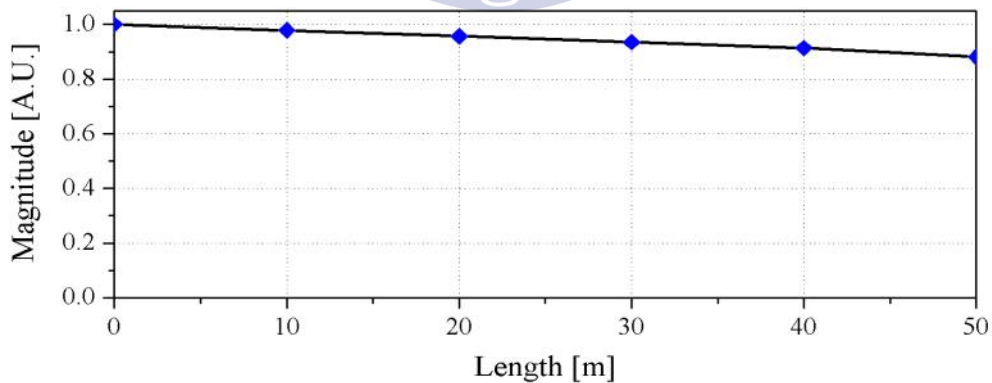


그림 3.15 케이블 거리에 따른 감쇠
Fig. 3.15 Attenuation of a pulse to cable distance

3.2.4 결과 및 분석

그림 3.16은 50 m 케이블에서 측정지점으로부터 2 m 이격시킨, 결함지점에 대한 펄스파형을 나타낸다. 방전펄스와 반사펄스의 크기는 각각 58 mV 및 17 mV로 발생하였으며, 두 펄스간의 시간차는 474 ns로 측정되었다. 결함위치를 계산한 결과 식 3.7과 같이 2.6 m로 산출되었으며, 실제 결함지점과는 0.6 m의 오차를 보였다.

$$x_1 = 50 - \left(\frac{1}{2} \times 474 \times 10^{-9} \times 2 \times 10^8 \right) \quad (3.7)$$

$$= 2.6 \text{ m}$$

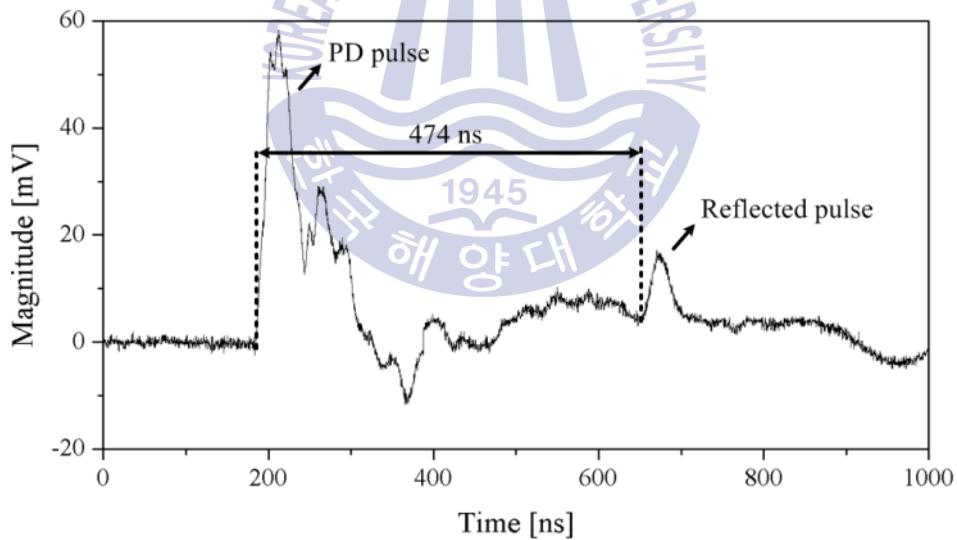


그림 3.16 50 m 케이블(결함지점 2 m)에서 결함 위치추정

Fig 3.16 Defect localization a 50 m long cable with defect at 2 m

그림 3.17은 70 m 케이블에서 측정지점으로부터 2 m 이격시킨, 결함지점에 대한 펄스파형을 나타낸다. 방전펄스와 반사펄스의 크기는 각각 56 mV 및 18 mV로 50 m 케이블에서 수행한 것과 동일하였다. 두 펄스간의 시간차는 690 ns로 측정되었으며, 결함위치를 계산한 결과 1 m로 산출되었다. 실제 결함지점과는 1 m의 오차를 보였다.

$$x_2 = 70 - \left(\frac{1}{2} \times 690 \times 10^{-9} \times 2 \times 10^8 \right) \quad (3.8)$$

$$= 1 \text{ m}$$

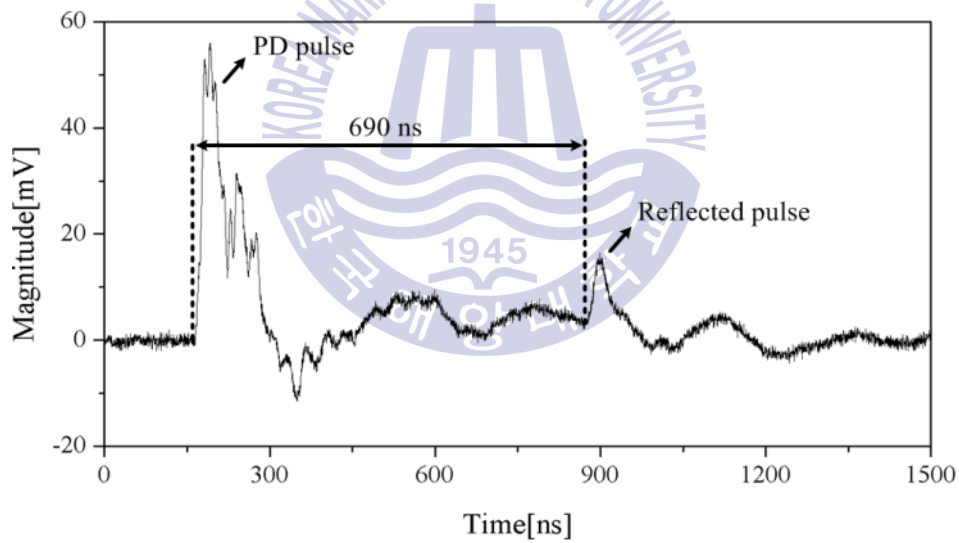


그림 3.17 70 m 케이블(결함지점 2 m)에서 결함 위치추정
 Fig 3.17 Defect localization a 70 m long cable with defect at 2 m

그림 3.18은 50 m 케이블에서 측정지점으로부터 30 m 이격시킨, 결함지점에 대한 펄스파형을 나타낸다. 방전펄스와 반사펄스의 크기는 각각 49 mV 및 14 mV로 발생하였으며, 두 펄스간의 시간차는 208 ns로 측정되었다. 식 3.9는 측정된 시간차를 통해 결함위치를 계산한 결과로서, 29.2 m로 산출되었으며 실제 결함과는 0.8 m의 오차를 보였다.

$$x_3 = 50 - \left(\frac{1}{2} \times 208 \times 10^{-9} \times 2 \times 10^8 \right) \quad (3.9)$$

$$= 29.2 \text{ m}$$

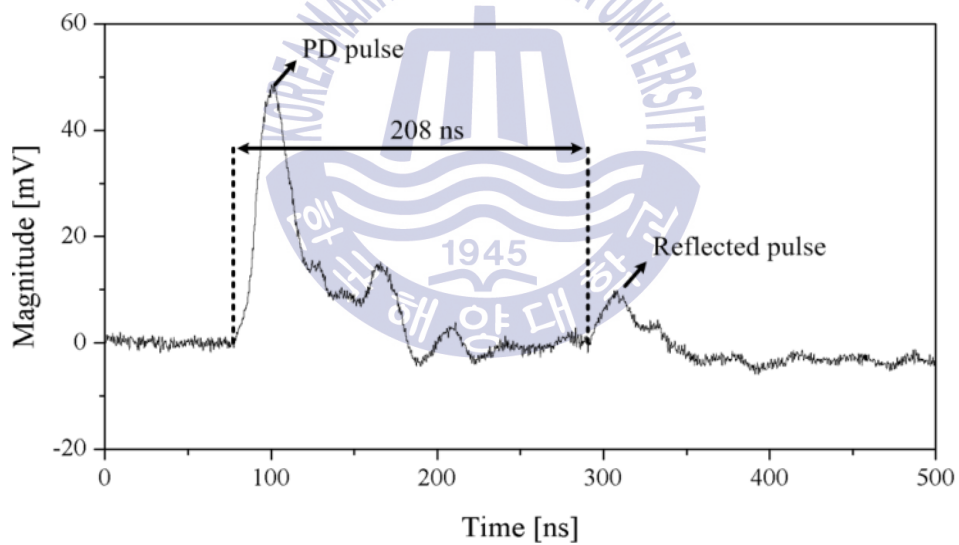


그림 3.18 50 m 케이블(결함지점 30 m)에서 결함 위치추정
 Fig 3.18 Defect localization a 50 m long cable with defect at 30 m

표 3.3은 결함 위치추정에 대한 결과를 나타낸다. 실제 결함위치와 시간차를 통해 산출된 위치를 비교한 결과, 각각 0.6 m, 1.0 m 및 0.8 m의 오차를 보였으며, 최대 1 m 이내의 오차범위에서 실제 결함지점과 일치함을 확인하였다.

표 3.3 결함 위치추정의 결과
Table 3.3 Results of defect localization

구 분	시간차 [ns]	산출거리 [m]	오차 [m]
50 m(2 m)	474	2.6	0.6
70 m(2 m)	690	1.0	1.0
50 m(30 m)	208	29.2	0.8

제 4 장 결 론

본 논문에서는 XLPE 지중케이블을 대상으로, 부분방전 측정 및 분석에 관한 연구를 수행하였다. 지중배전선로에 활용되는 22.9kV-y CNCV-W 케이블을 통해 결함을 모의하고, 고주파변류기를 이용하여 발생하는 방전 펄스를 검출하였다. XLPE 절연체의 주요결함인 보이드의 크기 및 위치에 따른 부분방전 특성을 PRPD를 이용하여 분석하였다. 또한 TDR 방식을 기반으로 방전펄스와 반사펄스간의 시간차를 측정하여, 케이블의 결함 위치를 추정하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 부분방전 특성

XLPE 절연체 내부에서 크기 및 위치에 따른 4종의 보이드 결함을 제작하였으며, 결함별 부분방전 특성을 분석하였다. 50Ω 무유도 저항 및 고주파변류기에서 측정된 펄스를 통해 각각의 방전전하량을 비교하였으며, 약 2% 이내의 오차로 거의 동일하였다. 또한 고주파변류기의 검출감도는 38.5 pC/mV 산출되었으며, 이를 통해 고주파변류기의 측정시스템에 대한 신뢰성을 입증하였다.

방전전하량 및 방전횟수의 경우 보이드가 크거나, 도체에 인접할수록 증가하는 경향을 보였다. 또한 도체와 가까운 위치에 있을수록 부극성에서 발생하는 비율이 정극성보다 약 20% 높게 확인되었다. 이는 결함의 크기가 클수록 전리(Ionization)되는 전자 수가 많고, 도체에 근접할수록 강한 전기에 의해 기인한 것으로 판단된다. 위상의 경우 평균적으로 정·부극성에서 각각 55° - 120° 및 225° - 307°로 결함 모두 유사하게 분포하였다.

2. 결함 위치추정

방전펄스 및 반사펄스의 시간차를 측정하여, 본 논문에서 기재된 공식을 적용해 결함위치를 도출하였다. 케이블을 따라 진행하는 펄스의 전파 속도는 2×10^8 m/s로 측정되었다. 또한 펄스의 진행거리에 따른 감쇠특성을 분석하였으며, 10 m당 2.15%의 선형적인 감쇠율을 보였다. 이를 통해 측정 가능한 최대거리는 약 465 m로 확인되었으며, 방전펄스를 검출하기 위한 가능성을 입증하였다. 하지만 실제 지중배전선로의 경우 최대 450 m의 케이블이 이용되고 있으며, 반사펄스는 최대 900 m까지 진행이 가능하다. 이로 인해 펄스가 소멸되어 검출이 불가능할 수 있기 때문에, 케이블의 양단에 각각의 고주파변류기를 설치하여 측정하거나, 증폭회로 설계를 통한 대안이 필요하다고 판단된다.

케이블 전장 50 m, 측정지점으로부터 2 m에 위치한 결함지점의 경우, 시간차는 474 ns로 관측되었으며 산출결과, 2.6 m로 실제 결함지점과 0.6 m의 오차를 보였다. 케이블의 길이 및 결함지점을 변화시켜 실험을 수행하였으며, 각각 1 m 및 0.8 m의 오차가 발생하였다. 종합적인 분석결과, 최대 1 m 이내의 오차범위에서 실제 결함지점과 일치함을 확인하였다.

최종적으로 절연체 내부에서 보이드의 기하학적 구조에 따른 부분방전 특성을 확인하고, 방전펄스를 이용해 케이블 결함위치를 추정하였다. 상기 연구를 통하여 부분방전 진단기술에 있어 다양한 정보를 제공할 뿐만 아니라 지중배전선로의 절연 감시 및 상태 진단을 수행하는데 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] 황광수, “KEPCO의 지중배전케이블 열화진단기술 적용방향”, Electrical world monthly magazine, pp.65-71, 2012.
- [2] 송일근, 김주용, 이재봉, “고신뢰 지중 배전케이블 개발방향”, 조명·전기설비 제17권 제2호, pp.3-10, 2003.
- [3] 송재용, 서황동, 길경석, 한문섭, 장동욱, “전력케이블 진단을 위한 부분방전 검출장치의 설계 및 제작”, 한국철도학회 학술발표대회논문집, pp.141-146, 2005.
- [4] Tetiana Salivon, Xavier Colin, Raphael Comte, “Degradation of XLPE and PVC cable insulators”, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.656-659, 2015.
- [5] KS C 3404, “22.9kV 동심중성선 전력 케이블”, 2000.
- [6] J.C. Hernandez-Mejia, J. Perkel, “Partial discharge(PD) HV and EHV power cable systems”, NEETRAC, pp.18-25, 2016.
- [7] M.U. Zuberi, A. Masood, E. Husain and A. Anwar, “Estimation of Partial Discharge Inception Voltages Due to Voids in Solid Sheet Insulation”, IEEE Conference on Electrical Insulation, pp.124-128, 2013.
- [8] Jean Carlos Hernandez Mejia, Joshua Perkel, “Partial Discharge(PD) HV and EHV Power Cable Systems”, NEETRAC, pp.16-29, 2016.
- [9] H.A. Illias, M.A. Tunio, A.H.A. Bakar, H. Mokhlis, G. Chen, “Partial Discharge Phenomena within an Artificial Void in Cable Insulation Geometry: Experimental Validation and Simulation”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.23,

pp.451-459, 2016.

- [10] E. Peschke, R. von Olshausen, "Cable systems for high and extra-high voltage", Pirelli, pp.44-54, 1999.
- [11] Paul Gill, "Electrical power equipment maintenance and testing", Second edition, CRC Press, pp.326-375, 2009.
- [12] Saravanakumar Arumugam, Marc Bogaczyk, Sergey Gorchakov, "Dielectric and Partial Discharge Investigations on Aged Medium Voltage Underground Power Cables", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.306-310, 2015.
- [13] Ruay-Nan Wu and Chien-Kuo Chang, "Deterioration Trend on Electrical Treeing of Underground Cable Insulation", IEEE Conference on International Power Modulator and High Voltage, pp.613-616, 2012.
- [14] 정종연, 선상진, "지중배전선로 고장요인에 관한 연구", 대한전기학회 학술대회 논문집, pp.302-303, 2009.
- [15] Dr F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", Butterworth, pp.23-24, 1989.
- [16] Jarot Setyawan, "Investigation of Partial Discharge Occurrence and Detectability in High Voltage Power Cable Accessories", TU Delft, pp.45-57, 2009.
- [17] Guoming Wang, "Analysis on Statistical Characteristic of Partial Discharges in SF₆ Gas under HVDC, Master thesis, The Graduate School of Korea Maritime and Ocean University, 2015.
- [18] Kai Wu, Cheng Pan, Yongpeng Meng, Yonghong Cheng, "Effect of void area on PD magnitude uniformity", IEEE Conference on

- Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.1165-1168, 2013.
- [19] 김충식, “전력케이블 시스템에서 발생하는 전자기파 부분방전의 진단 기술”, 대학전기학회 전기의 세계 제58권 제2호, pp.23-30, 2009.
- [20] KS C IEC 60270, “고전압 시험방법 - 부분 방전 측정”, 2006.
- [21] 이진선, “HFPD 부분방전 검출을 이용한 XLPE 전력 케이블 시스템 진단기술 개발 연구”, 박사학위논문, 한양대학교 대학원, 2003.
- [22] KS C 3700, “전자파 부분방전 측정장치”, 2007.
- [23] IEEE Std 400.3, “Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment”, 2006.
- [24] F. Puletti, M. Olivieri, A. Cavallini, G.C. Montanari, “Localization of partial discharge sources along HV and MV Cable Routes”, International Power Engineering Conference, pp.1-6, 2005.
- [25] Daniel Gotz, Frank Petzold, Hein Putter, Sacha Markalous, Marco Stephan, “Localized PRPD Pattern for Defect Recognition on MV and HV Cables”, Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp.1-4, 2016.
- [26] A. Rodrigo Mor, P.H.F. Morshuis, P. Llovera, V. Fuster, A. Quijano, “Localization techniques of partial discharges at cable ends in off-line single-sided partial discharge cable measurements”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.23, pp.428-434, 2016.
- [27] Y. H. Md Thayoob, A. Mohd Ariffin, S. Sulaiman, “Analysis of High Frequency Wave Propagation Characteristics in Medium Voltage XLPE Cable Model”, International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics, pp.665-670, 2010.