

## VLF를 활용한 전력케이블 진단 시뮬레이터 구현

김국<sup>1</sup>, 어익수<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국전기안전공사, <sup>2</sup>호남대학교 전기공학과

### Implementation of Power Cable Diagnostic Simulator using VLF

Kuk Kim<sup>1</sup>, Ik-soo Eo<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Electrical Safety Corporation

<sup>2</sup>Dept. of Electrical Engineering, Honam University

**요 약** 국내 공장이나 지중에 설치되어 있는 전력 케이블은 제조과정, 설치, 사용 중의 환경여건에 따라 사고가 발생할 수 있는 필연성을 갖고 있다. 전력 케이블에서 사고가 일어났을 때 막대한 경제적 손실과 사회적 혼란을 야기할 수 있어 이를 미연에 방지하고자 진단을 통한 케이블의 예방관리의 중요성이 증대되고 있다. 이에 본 논문에서는 현장에서 발생 될 수 있는 케이블의 설치나 제조결함, 경년열화로 문제가 될 수 있는 부분을 모의하여 진단시료 케이블을 제작하였고, 최근 도입되어 적용되고 있는 VLF(Very Low Frequency)장비를 사용하여 유전정접( $\tan \delta$ ; TD), 부분방전(Partial Discharge; PD)시험을 실시하였고, 0.1Hz 주파수를 갖는 VLF전원을 가압한 후 HFCT(High Frequency Current Transformer)를 이용한 부분방전과 AC(상용주파)내압 장비를 이용하여 가압한 후 PD측정을 수행하였다. 그 결과, VLF를 통한  $2.0U_0$  전압에서 B, C상 결함시료에서는 내부 부분방전을 측정할 수 있었으며 A상 정상시료에서는  $0.5 \sim 2.0U_0$  전압에서 모두 노이즈로 측정되었다. 또한, 상용주파수의 AC(60Hz) 내압장비를 통한  $1.5U_0$ 전압에서 측정하여 그 실효성을 검증하였다. 활성상태에서의 부분방전은  $1.0U_0$ 의 사용전압에서 측정 되며, 장비를 설치할 때 위험성이 있고, AC내압장비는 부피나 무게 등에 의해 이동의 어려움이 있어 사선상태의 VLF를 통한 진단방법이 안전과 실효성이 있음을 알 수 있었다.

**Abstract** Power cables installed in domestic factories or underground can cause accidents depending on the manufacturing process, installation, and environmental conditions during use. When an accident occurs in a power cable, it can cause enormous economic loss and social confusion. Hence, the importance of preventive management of the cable through diagnosis is increasing to prevent it. Therefore, in this paper, a diagnostic sample cable was produced by simulating a part that could be a problem due to the installation, manufacturing defects, or deterioration of cables that can occur in the field. Dielectric loss Tangent ( $\tan \delta$ ; TD), and Partial Discharge(PD) tests were performed. Partial discharge and AC (60Hz) withstand voltage equipment using High-Frequency Current Transformer (HFCT) were applied After applying a VLF (Very Low Frequency) power supply with a frequency of 0.1Hz was applied. As a result, B and C phase defect samples at a  $2.0U_0$  voltage through the VLF could measure the internal partial discharge in the A-phase normal sample cable from the noise at a  $0.5U_0$  to  $2.0U_0$  voltage. In addition, the  $1.5U_0$  voltage was measured through the AC (60Hz) withstand voltage equipment of the commercial frequency to verify its effectiveness. Partial discharge in the run-off state was measured at a voltage of  $1.0U_0$ , and there was a risk when installing the equipment. AC power equipment showed a difficulty of movement by volume or weight. The diagnostic method, through the VLF of the quadrant state, revealed its safety and effectiveness.

**Keywords** : Power Cable, VLF, TD,  $\tan \delta$ , PD

\*Corresponding Author : Ik-soo Eo(Honam University)

email: iseo@honam.ac.kr

Received June 29, 2020

Accepted August 7, 2020

Revised July 22, 2020

Published August 31, 2020

## 1. 서론

현대사회는 산업의 고도화, 도시화와 국민들의 생활수준 또한 급격하게 향상되어 전력수요가 급증하고 있으며, 이러한 수요를 감당할 수 있는 각종 대전력설비도 늘어나고 있다. 그런데 이러한 대전력 설비들은 사고가 일어났을 때 큰 사회적 혼란과 막대한 경제적 손실을 초래할 수 있다. 그중에서도 전력의 전송을 담당하는 전력 케이블은 주로 공장이나 대도시의 지중전선으로 시설되고 있어 사고가 발생하면 복구시간이 장기화 되고 산업 활동과 국민생활에 막대한 피해를 입힌다. 이에 따라 전력을 안정적으로 공급할 수 있도록 전력 케이블에 대한 예방점검·진단은 필수적인 부분이 되었다. 이에 본 논문에서는 전력 케이블에서 예상되는 사고의 종류와 원리를 알아보고, 점검할 수 있는 각종 진단방법을 소개하였으며 그 중에서도 최근 도입되어 사용되고 있는 VLF 및 HFCT-PD를 통한 진단방법에 대해서 케이블 진단시료를 통한 시뮬레이터를 구현, 측정하여 DATA를 분석하여 비교해 보고 이를 통해 전력 케이블의 예방점검 방법, 진단방법을 검토하였다.

## 2. 전력 케이블의 열화 메커니즘

Fig. 1.은 케이블의 사용기간과 이에 따른 고장현황을 보여주고 있다. 첫 번째, DFR(Decreasing Failure Rate)은 초기고장으로 케이블의 제작결함이나 시공불량이 주요한 원인이다. 절연체의 내부에 보이드가 형성되거나 불순물의 유입되면, 유전율이 낮은 보이드에 유전체 분극현상이 용이하게 발생하여 전계집중이 일어나고, 이에 따른 국부적인 절연파괴는 절연체에 부분방전을 일으키고, 국부적인 발열과 전기적인 탄화채널의 형성을 유발하여 결국에는 절연파괴가 발생한다. 참고로 XLPE 절연재료의 비유전율은 2.4 정도이며 공기의 유전율은 1이다. 두 번째, CFR(Constant Failure Rate)은 과부하나 자연재해 등 우발적으로 발생하는 결함으로 볼 수 있다. 대부분 케이블이 포설된 곳에서 지하의 상하수도 등의 공사가 이루어지는 경우, 부주의로 인하여 전력케이블에 물리적으로 손상을 발생시킨 경우가 전체 전력케이블 고장의 60% 정도를 차지하고 있다[1]. 세 번째, IFR(Increasing Failure Rate)은 열화고장으로 판단할 수 있다. 열화고장은 케이블이 포설된 주변의 환경 및 운전조건에 관한 영향을 받는다. 즉, 주된 절연재료인 XLPE 케이블은 설

계수명이 약 40년 정도로 설계되지만, 인위적인 문제점과 제조상의 결함이 없는 경우에도 시공 후 15년 정도부터 고장이 발생한다. 전력케이블의 열화고장은 수트리에 열화에 의한 고장이 가장 많이 보고되고 있으며, 특히 전력케이블의 운전상태 및 운용조건이 큰 비중을 차지하고 있는 것으로 알려져 있다. 즉, 침수상태 또는 케이블 내부로 수분이 유입될 수 있는 환경에서 운용되는 케이블은 진행이 더욱 빠르다. 이에 따라 전력케이블의 운용에 있어서 초기고장과 열화고장을 전력케이블 진단에 의한 사고의 예방을 주된 목적으로 하고 있다[2].

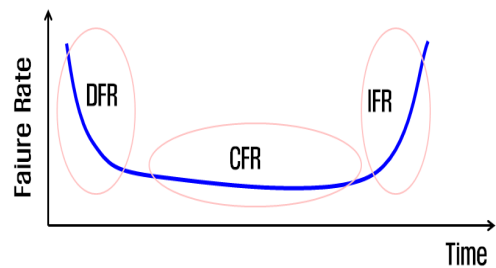


Fig. 1. Classification of cable life and failure

Table 1. Causes of underground power cable failure

Breakdown	DFR	CFR	IFR
Cause	Manufacturing defects, Construction faults	Sheath damage	Insulation deterioration
Case	Void, Scratch, Construction faults	Excavation work	Water tree, Electric tree
Management method	Commissioning test (Withstand voltage, PD)	Management supervision	Diagnosis (PD, TD)

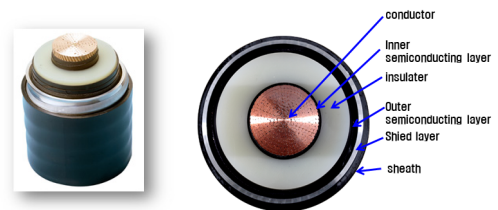


Fig. 2. Structure of XLPE cable

Fig. 2.는 XLPE 케이블의 구조 Fig. 3.은 절연파괴의 과정을 보여주고 있다. 절연체에 발생하는 수트리에(Water tree)는 가교폴리에틸렌(XLPE : Cross-Linked Poly Ethylene)의 내부에 불순물 또는 표면 손상부위에서 물

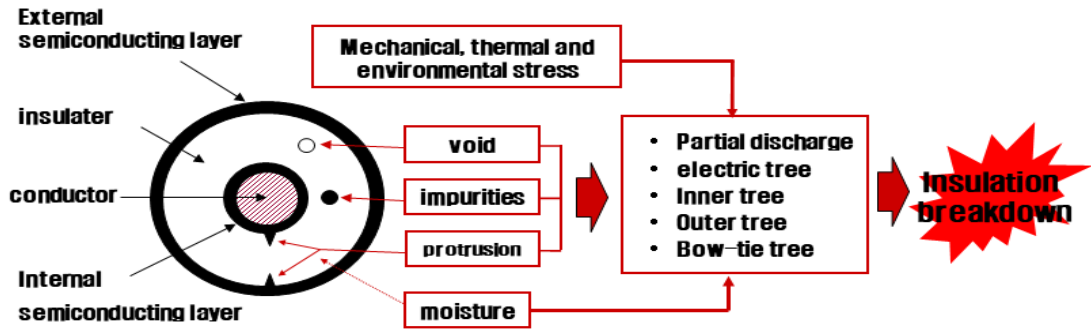


Fig. 3. Process of insulation destruction

과 전기의 복합작용에 의해 트리 형상으로 크랙이 진행되는 현상이다. 수트리의 원인은 절연체 내에 열 열화(Amber)나 금속류의 이물질(Black metal)이 존재할 때, 절연체 내에 미세한 기포(Void, Fig. 4)가 존재하거나, 도체 및 Sheath 표면에 요철에 의한 반도전층에 돌기(Protrusion)가 형성되었을 때, 절연체 내에 수분이 존재하면 전계차에 의해 수트리 현상이 발생된다.

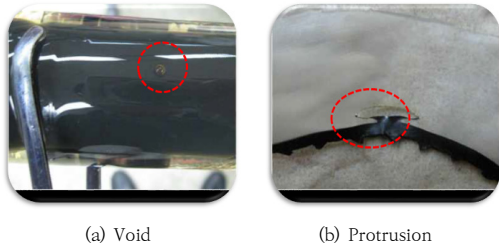


Fig. 4. Voids and Protrusion in the semiconducting layer

Fig. 5는 수트리의 종류를 보여주고 있고, 반도전층의 돌기가 기점이 되어 한쪽 끝이 전극에 닿아 있고 절연체 중심으로 성장하는 내·외도 수트리인 벤티드 트리(Vented tree)와 절연체 중의 이물질 또는 보이드를 기점으로 절연체의 가운데에 생성되는 보우타이 트리(Bow-tie tree)가 있다. 벤티드 트리는 절연체의 경계면에서 발생하여 절연체의 중심부로 1년에 10~1000 $\mu$ m 정도로 느리게 성장하지만 보우타이 트리보다 더 크게 성장하여 절연체를 관통하여 대표적인 절연파괴 원인이 된다[3-4]. 보우타이 트리는 일명 나비넥타이 트리라고 하며, 절연체의 내부에 포함된 화학적 이물질 등에 의하여 생성된 트리로서 서로 반대의 방향으로 성장하는 트리를 보우타이 트리라고 하며, 전형적으로 0.5mm까지 성장하는 특성을 가진 것으로 알려져 있다.

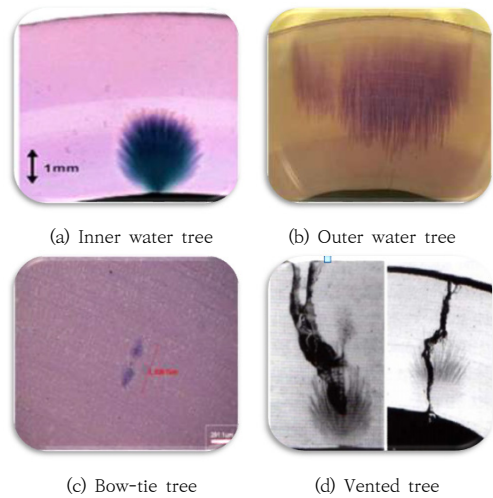


Fig. 5. Type of water tree

수트리는 케이블 내부로 침투해 있던 수분이 전기의 영향으로 XLPE 절연체 내부로 침투하면서 절연체에 미세한 공극의 경로를 만들고 그 내부를 수분으로 채우는 것이다. 수트리가 절연체를 관통하면 시간 경과에 따라 전도성 경로가 형성되고 마침내 전도성 전류가 이 경로를 통하여 흐르게 되면 발열과 함께 절연파괴에 이르게 된다. 절연체의 부분방전에 의해 탄화점이 발생하고 이 탄화점에서의 지속적인 부분방전은 절연재질의 부식을 촉진하여 전기트리로 성장한다. Fig. 6의 전기트리는 절연파괴의 마지막 단계이며, 벤티드 트리나 보우타이 트리의 침점에서 부분방전이 발생, 탄화 채널생성과 함께 전기트리로 전이되어 성장하는 특징을 가진다. 탄화채널이 생성되면 전기트리 발생 후 절연파괴의 진전은 급속도로 진행된다[5-6].

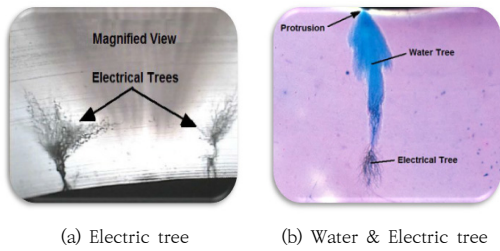
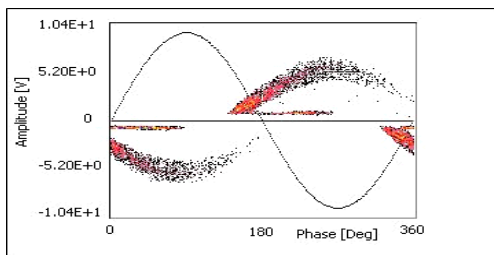


Fig. 6. Progress of Electric tree

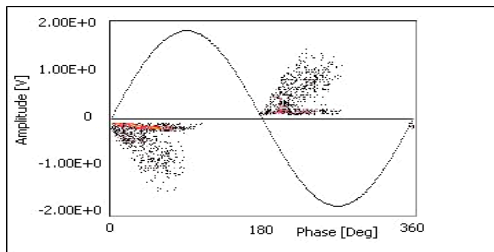
### 3. 절연열화 진단방법

#### 3.1 HFCT-PD(부분방전) 진단

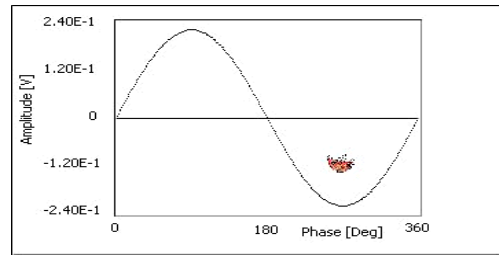
부분방전은 고압 설비에서 발생하는 국부적인 전기 방전 현상으로, 절연물 내부에 위치한 전극이나 도체의 돌출 부분에 극히 불평등한 전계가 집중된 부분에서 방전과 노출된 도체부의 표면이 공기 중에서 발생하는 코로나 방전으로 분류할 수 있다. 부분방전의 종류로는 절연체 내부의 보이드나 불순물에서 발생하는 내부 방전, 기체 절연체에 의한 전계 집중으로 발생하는 코로나 방전, 절연체 표면의 연면 방전, 절연체 내부 크랙이나 전기트리 진전으로 인한 전기트리 방전 등으로 볼 수 있다[7]. Fig. 7은 전형적인 부분방전 패턴의 종류를 보여준다.



(a) Internal PD(Void Discharge)



(b) Surface Discharge



(c) Corona Discharge

Fig. 7. Example of partial discharge pattern

HFCT-PD는 HFCT를 이용하여 부분방전량을 측정하는 것으로 Fig. 8은 결선방법과 설치 사진이다.

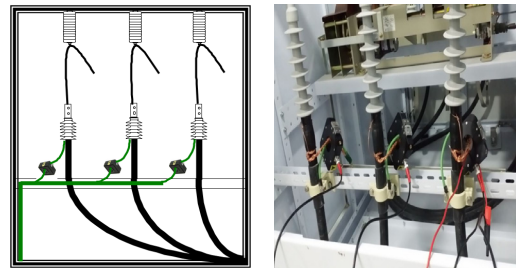


Fig. 8. Diagnosis of HFCT Partial Discharge

#### 3.2 VLF(Very Low Frequency) 진단

VLF 진단은 0.1Hz 극 저주파 특성을 갖는 AC 전원을 이용한 것으로 내전압(High Voltage Test), 유전정접(TD), 부분방전(PD) 시험을 할 수 있다. 첫 번째, 내전압 시험은 전력 케이블을 시공 후 운전전압보다 높은 VLF 전압을 가하여 시험하는 것으로 판정기준은 0.1Hz, AC 39.6kV(3U<sub>0</sub>)을 인가하여 60분 이내 절연이 파괴되면 불량으로 판정한다. 두 번째, VLF TD는 0.1Hz 교류 전원을 이용하여 절연체 내부의 이상 징후를 진단하는 방법이다. 절연체의 내부에 슈트리가 발생하면 절연저항이 감소되어 손실전류가 증가하게 되고, 이것은 tanδ의 증가로 나타나며, 이 변화의 측정을 통하여 절연체의 이상 징후를 진단한다. tanδ는 저항의 손실 전류와 커패시터 전류의 비 또는 유효전력과 무효전력의 비로 정의되며 식(1)과 같이 정의될 수 있다[8-9].

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\text{true power}}{\text{reactive power}} = \frac{V^2/R}{V^2_w C} = \frac{1}{w CR} \quad (1)$$

고전압 절연체는 절연저항이 매우 높고 커패시터를 가지기 때문에 누설 전류와 전압은 거의 90° 위상 차이가 발생한다. 그러나 이것은 이상적인 상태의 회로이며, 절연체 내부의 저항성분에 의하여 약간의 편차가 발생한다. 이러한 편차를  $\tan\delta$ 로 표현하는데  $\tan\delta$ 가 클수록 절연체의 내부에 누설전류의 저항성분에 의한 영향이 증가함을 나타내며, 이것은 절연체에 이상이 발생하고 있음을 나타낸다.  $\tan\delta$ 의 측정법은 주변의 노이즈에 거의 영향을 받지 않는 진단법으로 정밀한 위상차의 측정이 가능하다[10-11].

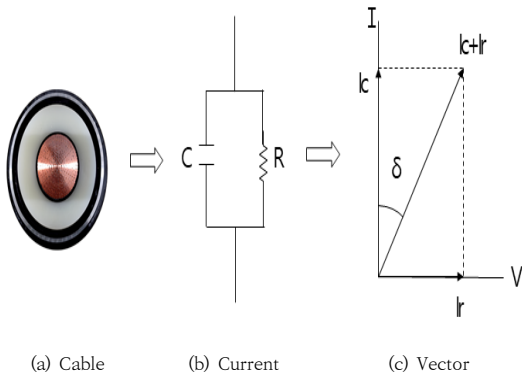


Fig. 9. Definition of  $\tan\delta$

세 번째, VLF PD는 케이블의 절연체 내부에 발생하는 국부적 결함(절연체 내부 및 계면의 공극, 절연체 내부의 이물질, 절연체 표면 상처)에서 발생하는 부분 방전량을 측정하여 결함 정도를 판단하는 것을 말하며, 0.1Hz, AC 23.1kV(1.75U<sub>0</sub>)에서 PD 측정결과, 케이블은 5pC 초과, 접속재는 300pC 초과되면 불량으로 판정한다.

#### 4. 시뮬레이터 구현 및 실험방법

##### 4.1 시뮬레이터 구현

TEST용 시뮬레이터는 가로, 세로(10x15m)인 실험실에 케이블 시료를 A, B, C상 3가닥으로 XLPE 절연체를 갖는 FR CN/CO-W 60mm를 90m 이상으로 제작하였고, Fig. 10.과 같이 바닥 및 벽면 Tray를 이용한 공사방법으로 시공하였다. A상 케이블 정상시료이고, B상 시료는 케이블 헤드(CH ; Cable Head) 끝점에 외부 반도체층을 균일하지 않게 절개하여 자기용착 테이프 미처리하고 절연테이프로 처리하여 물에 침수시켜 놓고 접착력 떨어트려서 비정상적으로 구현하였다. C상 시료는 중간접

속재를 이용하여 Fig. 11.과 같이 제조결함을 모의 구현하였다. 25m지점은 중간접속재 접속 시, XLPE 절연체 6.6mm 중 2.2mm 남기고 칼로 손상시켜 자기용착테이프를 사용하지 않았으며, 구리침(Metal Needle)을 절연물에 삽입하고 약간 풀어내어 공극(Void)을 구현하였다. 50, 77m지점은 중간접속재 접속 시, XLPE 절연체를 칼로 손상시키고, 구리침(Metal Needle), 철가루를 절연물에 삽입하고 자기용착테이프를 사용하여 접속하였다.

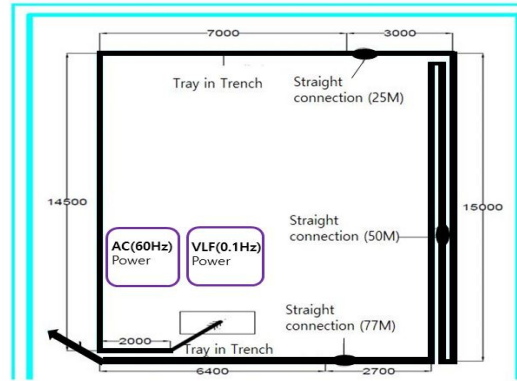


Fig. 10. Test Cable Simulator installation drawing

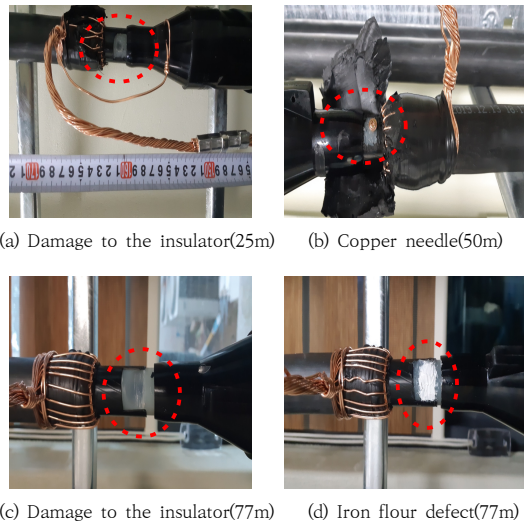


Fig. 11. Cable Insulator Defects

##### 4.2 실험방법

###### 4.2.1 VLF TD, PD 측정

Fig. 12.는 케이블의 VLF 측정방법이다. VLF 내전압 장비에 HV Filter를 연결하고, PDTD 커플링 커패시터를 연결하고 측정하고자 하는 케이블에 진단케이블을 연

결하여 전원을 인가한다.

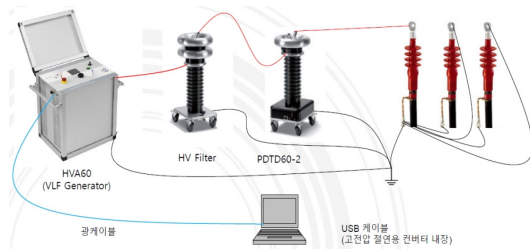


Fig. 12. Diagnosis of VLF (b2 electronic GmbH)

#### 4.2.2 VLF를 통한 HFCT-PD 측정

케이블 시료에 대해서 VLF(0.1Hz)를 사용하여  $1.0U_0$ ,  $1.5U_0$ ,  $2U_0$ 까지 각각 가압을 하고 HFCT를 통하여 신호를 검출한 후 PD장비를 사용하여 부분방전 여부를 판단하는 방법으로 Fig. 13.은 측정방법을 나타내며 케이블의 양 단말에 도체를 노출 시킨 후 한쪽 끝의 도체에 VLF 내압기를 연결한다. 그리고 케이블 쉴드가 접지에 연결된 지점에 HFCT를 체결한다. HFCT 케이블은 부분방전 측정 장비에 연결하여 측정 준비를 마친다. 그리고 VLF 내압기의 주파수 대역을 0.1Hz로 설정한 후 전압을  $1.0U_0$ ,  $1.5U_0$ ,  $2U_0$ 인가하면서 부분방전 측정 시스템에 부분방전이 검출되는지 분석한다.

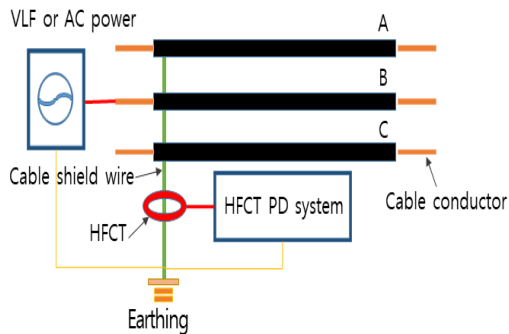


Fig. 13. Connection diagram for PD re-measurement using VLF or AC Power and HFCT-PD Equipment

#### 4.2.3 AC내압장비를 통한 HFCT-PD 측정

케이블에 VLF(0.1Hz)에서 Fig. 14.의 AC(60Hz) 내압 장비로 변경하여 전압을  $0.5U_0$ 부터 서서히 인가하여 HFCT로 부분방전 측정하여  $2U_0$ 까지 실시한다.



Fig. 14. AC Breakdown Voltage Equipment

## 5. 실험결과

### 5.1 VLF TD, PD 실험결과

#### 5.1.1 VLF TD

Table 3.는 VLF TD 측정 Data, Table 4.는 판정한 내용이다. Table 2.의 한전기준으로 검토하였으며 결함이 있는 B, C상 케이블은 DTD( $1.5U_0-0.5U_0$ )값이 1.10, 0.81로 분석되어 관심단계인 B로 최종 판정하였다.

Table 2. Cable  $\tan\delta$  Judging criteria

Ass. Level	TD [1.0U <sub>0</sub> ]	DTD [1.5U <sub>0</sub> -0.5U <sub>0</sub> ]	STDEV [1.0U <sub>0</sub> ]	Skirt [1.0U <sub>0</sub> ]	Final Decision
A	≤1.0	≤0.5			
B	≤2.0	≤1.2			
C	≤6.0	≤6.0	≥0.10	≥0.30	D
D	≤10.0	≤12.0	≥0.20	≥0.60	E
E	≤27.0	≤60.0	≥0.70	≥2.20	F
F	>1.0	>60.0			
1 <sup>st</sup> Jud.	OR		OR		
	AND				2 <sup>nd</sup> Jud.

Table 3. Cable A, B, C  $\tan\delta$  Data

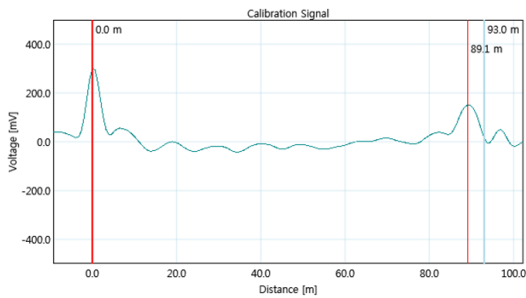
Phase	TD[E-3]	V[kV]	I[μA]	C[nF]
A	0.05	6.60	58.0	14.15
	0.15	13.19	117.0	14.15
	0.52	19.79	175.0	14.15
B	0.09	6.60	58.0	14.14
	0.22	13.19	117.0	14.14
	1.19	19.79	175.0	14.13
C	0.24	6.60	59.0	14.25
	0.29	13.19	118.0	14.25
	1.05	19.79	177.0	14.25

Table 4. Cable A, B, C tanδ Data Analysis

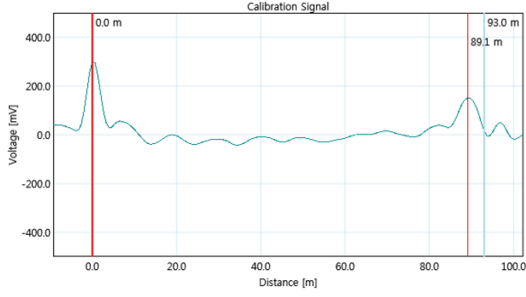
Phase	TD [1.0U <sub>0</sub> ]	DTD [1.5U <sub>0</sub> -0.5U <sub>0</sub> ]	STDEV [1.0U <sub>0</sub> ]	Skirt [1.0U <sub>0</sub> ]	Final Decision
A	0.15	0.47	0.005	0.001	A
	A	A	-	-	
B	0.22	1.10	0.005	0.001	B
	A	B	-	-	
C	0.29	0.81	0.016	0.007	B
	A	B	-	-	

5.1.2 VLF PD

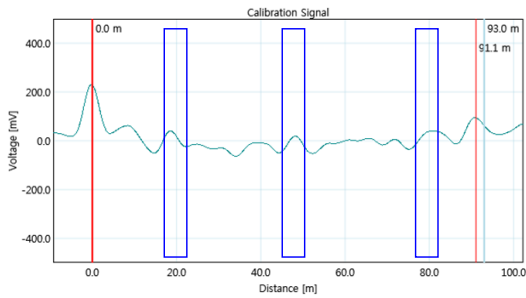
Fig. 15.는 시뮬레이터 케이블의 VLF calibration 내 용이다. 500pC를 인가하여 조정하였고, A상과 B상은 89.1m, C상은 91.1m로 제작시료와 거의 오차가 없었으며 중간접속된 부분은 각각 20m, 45m, 80m로 실제 중간접속재의 위치와는 3~5m 정도의 오차를 보였다.



(a) Cable A calibration(89.1m)



(b) Cable B calibration(89.1m)



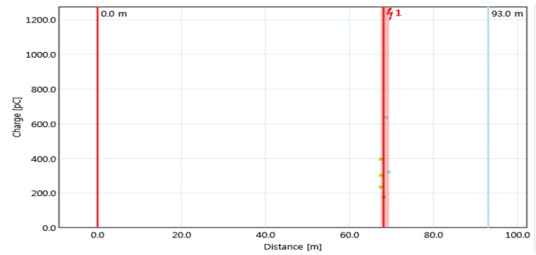
(c) Cable C calibration(91.1m)

Fig. 15. Cable A, B, C Calibration

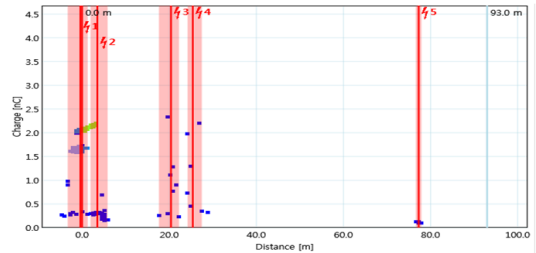
Table 5.와 Fig. 16.은 시뮬레이터용 케이블 시료의 VLF PD 측정결과로 결함이 3군데 존재하는 C상 케이블은 접속재 부근(4,5,6)에서 B상 케이블은 케이블 헤드 부분(1)에서 내부 부분방전의 신호가 검출되었고, 결함이 존재하지 않는 A상 케이블은 분석결과 Noise로 확인되었다.

Table 5. Cable PD defect data

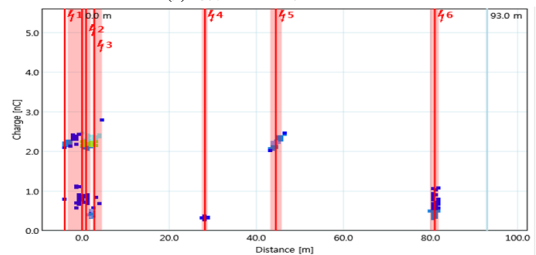
Num.	Dis. [m]	Tol. [m]	Charge	V [kV]	Defect	
A	1	68.1	1.97	344 pC	13.2	Noise
	1	4.0	4.59	1.87 nC	26.4	Internal
	2	3.5	3.93	1.02 nC	26.4	Corona
B	3	20.4	4.59	900 pC	26.4	Noise
	4	25.4	3.28	1.17 nC	26.4	Noise
	5	77.3	1.31	112 pC	26.4	Noise
C	1	4.0	1.42	1.99 nC	19.8	Corona
	2	9.0	5.24	1.69 nC	19.8	Corona
	3	2.8	1.97	1.80 nC	19.8	Corona
	4	28.2	1.31	324 pC	19.8	Internal
	5	44.5	2.62	2.2 nC	26.4	Internal
	6	81.0	1.97	579 pC	13.2	Internal



(a) Cable A Measurement



(b) Cable B Measurement



(c) Cable C Measurement

Fig. 16. Cable A, B, C Measurement

### 5.2 VLF를 통한 HFCT-PD 실험결과

VLF 내압장비를 연결한 상태에서 2.0U<sub>0</sub> 인가하여 C 상의 부분방전을 측정할 결과는 Fig. 17.과 같다.

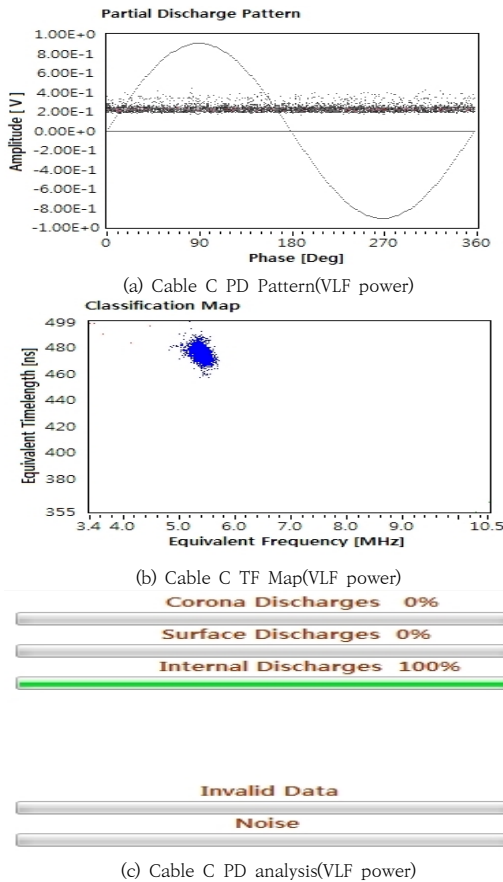


Fig. 17. PD generation screen at 0.1Hz, 2.0U<sub>0</sub>

위 Fig. 17. (b) TF map의 5~6MHz 대역에서 내부 부분방전(Internal Discharge)으로 확인하였고, VLF 내압장비를 통해 HFCT 부분방전을 측정하는 방안의 실효성을 검증하였다. B상 케이블(케이블헤드 부분 결함)은 C상과 비슷한 결과를 얻었으나 A상 케이블(정상시료)는 1.0U<sub>0</sub>, 1.5U<sub>0</sub>, 2.0U<sub>0</sub> 전압을 인가한 측정 결과는 모두 Noise로 분석되었다. 활선상태에서 상용주파수 부분방전은 HFCT, 로고스키코일 등의 장비연결 시에 감전, 정전의 위험성과 전압을 사용전압1.0U<sub>0</sub>로 측정하여야 하는 부분이 있다. 이와 같은 이유로, 사선상태에서 외부전원을 인가하여 부분방전을 측정하여야 하는데 이때, 60Hz 상용주파 AC 내압 장비 대신 VLF 내압장비를 이용하여 0.1Hz 교류 전압을 사용하면 시험장치의 무게와

크기를 크게 줄일 수 있다. 또한, 장비연결 시의 감전위험의 부담을 줄이고, 1.0U<sub>0</sub> 이상에서도 시험이 가능하여 현장 적용에는 효과적이라 볼 수 있다.

### 5.3 AC내압을 통한 HFCT-PD 실험결과

VLF 내압장비와 HFCT-PD 측정장비를 통한 부분방전의 정확성 여부를 확인하기 위해 상용주파수인 60Hz 1.0U<sub>0</sub>, 1.5U<sub>0</sub>의 전압을 인가하고, 부분방전을 측정할 결과 Fig. 18.과 같이 1.5U<sub>0</sub>의 전압에서 부분방전이 발생하고 있음을 확인하였다. 이를 통해 전원을 AC 내압장비가 아닌 VLF 내압장비로 인가하여도 사선상태에서 부분방전을 측정 할 수 있음을 알 수 있었다.

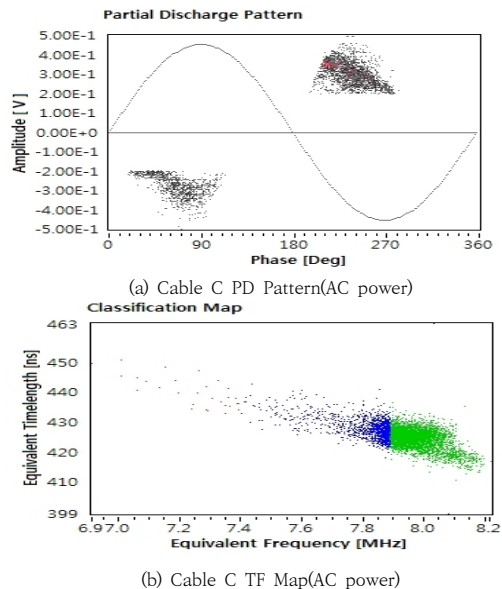


Fig. 18. PD generation screen at 60Hz, 1.5U<sub>0</sub>

## 3. 결론

본 논문은 현장모사형 케이블 진단시료를 통한 시뮬레



이터를 제작하여 전력 케이블에서 발생할 수 있는 사고를 구현하여 VLF TD·PD와 VLF와 HFCT-PD 장비, AC 내압과 HFCT-PD 장비를 통하여 부분방전도 측정 하였다. 그 측정결과로는 다음과 같다.

- 1) VLF TD는 A, B, C상 케이블 모두 TD( $1.0U_0$ )는 기준( $\leq 1.0$ ) 이내로 정상, DTD( $1.5U_0$ - $0.5U_0$ )값이 B상 1.10, C상 0.81로 분석되어 관심단계인 B(DTD 기준 $\leq 1.2$ )로 최종 판정하였다. 이는 TD( $1.0U_0$ )값 만으로 판정해서는 안되며, DTD 등의 기준을 종합 분석하여 판정하는 것이 필요함을 알 수 있었다.
- 2) VLF PD는 먼저 500pC 칼리브레이션을 통해 시료의 길이는 A상 89.1m, B상 89.1m, C상 91.1m로 측정되어 제작된 시료에 오차가 거의 없었으나, 중간접속재의 위치와는 3~5m의 오차가 발생하는 것을 알 수 있었다. 그리고,  $0.5U_0$ ~ $2.0U_0$ 까지 단계적으로 전원을 인가하여 A상 케이블은 1개의 결합 Cluster가 측정되었으나 분석결과 Noise, B상 케이블은 5개의 결합 중 1번 Cluster가 내부 부분방전, C상 케이블은 6개의 결합 중 4,5,6번 Cluster가 내부 부분방전으로 각각 판정하였다. 이 결과는 시료 결합에 약 5m 이내로 VLF PD를 통한 케이블의 결합 위치를 찾는 데 실효성이 있음을 알 수 있었다.
- 3) 그리고, 각 케이블에  $1.0$ ,  $1.5$ ,  $2.0U_0$ 를 VLF를 통하여 인가하고 HFCT를 사용 부분방전 측정을 한 결과, B, C상 케이블은  $2.0U_0$ 에서 내부 부분방전의 측정치를 얻을 수 있었고, AC 상용주파 내전압 전원으로  $1.5U_0$ 를 인가하여 내부 부분방전의 결과를 얻어 VLF전원을 이용하는 것에 대한 실효성을 검증하였다. 활선상태에서는  $1.0U_0$  고정전원에 의해서만 부분방전을 측정하는 점(내부 결합에 대한 부분방전이 발생되지 않을 수 있음)과 장비 연결 시의 감전, 정전 등의 위험성 등이 존재한다. 이 때문에 사선상태에서 부분방전을 실시하고자 할 때 AC 상용주파(60Hz) 내전압이 가지고 있는 전원용량, 장비 무게 등의 제약성을 VLF(0.1Hz)를 전원으로 사용하여 효과적으로 극복할 수 있음을 알 수 있었다.

## References

- [1] Introduction to underground cable deterioration and diagnosis, Korea Electric Power Corporation distribution center, Oct. 2010.
- [2] Carlos Ferrer, Joseba Koldo Gamez, Antoni Villalonga, "Improving Cable System Reliability with Monitored Withstand Diagnostics - Featuring High Efficiency at Reduced Test Time", *9th International Conference on Insulated Power Cables*, Jicable, 2015. [https://www.jicable.org/TOUT\\_JICABLE/2015/2015-C-2-3](https://www.jicable.org/TOUT_JICABLE/2015/2015-C-2-3)
- [3] Minghui Bao, Shiyang Tang, JunjiaHe, Xiaogen Yin, Qian Wang, GaolinWu, YanYang, "The Initiation Phenomena of Electrical Treeing in XLPE Cable Insulation", *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, pp.431-434, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2012.6357142>
- [4] G.Toman, *Medium Voltage Cable Aging Management Guide*, EPRI Report 1016689, Appendix C-2, 2008.
- [5] Jae-Bong Lee, Jong-Man Jeong, Chul-Bae Park, Jae-Wook Lee, Young-Soo Mok, "Results of Field Tree Deterioration Diagnosis Technology Field Test Results for Domestic Underground Distribution Cables," *Proceedings of the 37th Summer Conference of the Korean Institute of Electrical Engineers A*, pp. 506-507, July 2006.
- [6] Hernandez-Mejia, J. Perkel, J. Harley, R. Hampton, "Correlation between  $\tan\delta$  Diagnostic Measurements and Breakdown performance at VLF for MV XLPE Cables", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.16, pp.162-170, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2009.4784564>
- [7] Weiwei Li, Jianying Li, Guilai Yin, Shengtao Li, Jiankang Zhao, Benhong Ouyang, Yoshimichi Ohki, "Frequency dependence of breakdown performance of XLPE with different artificial defects", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.19, No.4, pp.1351-1359, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2012.6260011>
- [8] S. M. Kim, "The Influence Estimation of Aging Factor in MV Cable Using Weibull Distribution and Neural Networks", *IEEE Condition Monitoring and Diagnosis*, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/CMD.2012.6416382>
- [9] Jung Woo-Sung, *A Study on VLF  $\tan\delta$  Status Criteria for Power Cables*, Ph.D dissertation, Mokpo National University Graduate School, pp.32-33, 2020.
- [10] "IEEE Draft Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (less than 1 Hz)," in *IEEE P400.2/D13* August 2012, pp.1-56, 7 Oct. 2012.
- [11] "IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above," in *IEEE Std 400-2012* (Revision of IEEE Std 400-2001), pp.1-54, 5 June 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6213052>

김 국(Kuk Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 전남대학교 전기공학과 졸업
- 2019년 3월 ~ 현재 : 호남대학교 대학원 재학 중
- 2013년 3월 ~ 2018년 2월 : 한국전기안전공사 광주전남사무소 소장
- 2018년 3월 ~ 현재 : 한국전기안전공사 전기안전교육원 교수

<관심분야>

전기설비, 신재생에너지, 전기설계 및 진단

---

어 익 수(Ik-soo Eo)

[종신회원]



- 1996년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (석사)
- 2008년 2월 : 서울벤처대학원 컴퓨터응용학과 (박사)
- 1998년 2월 ~ 현재 : 호남대학교 전기공학과 교수

<관심분야>

전기설비 및 조명분야