

## XLPE 케이블에서 보이드 결함의 부분방전 특성과 위치추정

### Partial Discharge Characteristics and Localization of Void Defects in XLPE Cable

박서준 · 황성철 · 왕국명 · 길경석\*

Seo-Jun Park · Seong-Cheol Hwang · Guoming Wang · Gyung-Suk Kil

**Abstract** Research on condition monitoring and diagnosis of power facilities has been conducted to improve the safety and reliability of electric power supply. Although insulation diagnostic techniques for unit equipment such as gas-insulated switchgears and transformers have been developed rapidly, studies on monitoring of cables have only included aspects such as whether defects exist and partial discharge (PD) detection; other characteristics and features have not been discussed. Therefore, this paper dealt with PD characteristics against void sizes and positions, and with defect localization in XLPE cable. Four types of defects with different sizes and positions were simulated and PD pulses were detected using a high frequency current transformer (HFCT) with a frequency range of 150kHz~30MHz. The results showed that the apparent charge increased when the defect was adjacent to the conductor; the pulse count in the negative half of the applied voltage was about 20% higher than that in the positive half. In addition, the defect location was calculated by time-domain reflectometry (TDR) method, it was revealed that the defect could be localized with an error of less than 1m in a 50m cable.

**Keywords** : PD, Void defect, Localization, XLPE cable, TDR

**초 록** 전력공급의 안정성 및 신뢰도 향상을 위해 각종 전력설비의 예방진단에 관한 연구개발이 활발하다. 가스절연개폐장치와 변압기와 같은 단위 기기의 절연진단기술은 빠르게 발전하고 있으나, 전력케이블에 있어서는 단순히 결함의 유무와 부분방전을 측정할 뿐, 세부적 특성에 대해서는 거의 연구되고 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 XLPE 케이블에서 보이드의 크기와 위치에 따른 부분방전 특성과 결함의 위치추정에 관한 연구를 수행하였다. 보이드의 크기 및 위치에 따른 4종의 결함계를 모의하였으며, 부분방전펄스는 주파수 대역 150kHz~30MHz의 고주파변류기로 검출하였다. 실험결과, 도체에 인접한 결함일수록 방전전하량이 크고, 정극성에 비해 부극성의 방전펄스 수가 약 20% 많게 나타났다. 또한 TDR 방법으로 결함위치를 산출하였으며, 50m 케이블에서 1m 이내로 결함의 위치를 추정할 수 있었다.

**주요어** : 부분방전, 보이드 결함, 위치추정, XLPE 케이블, TDR

## 1. 서 론

오늘날 전력수요의 증가와 고품질 전력공급을 목표로, 전력망의 지중화가 확대되고 있다. 지중선로 방식은 가공선로에 비해 자연재해로부터 신뢰성이 높고, 배전선로 확장이 유리하다. 하지만 전기적 절연의 취약성과 사고 발생에 따른 파급효과가 크기 때문에, 전력설비에 대한 원활한 전력공급과 사고를 미연에 방지할 수 있는 다각적인 연구가 필요하다[1,2]. 지중배전선로용 케이블은 전기적·열적 특성이 우수한 XLPE(Cross-linked polyethylene) 절연체를 사용하며, 제조공정에서 생성되는 절연체 내부의 보이드(Void) 및 불순물이나 운전중 진동 및 충격에 의한 결함발생으로 단락 및 지락사고에 이르게 된다. 이를 예방하기 위하여, 상태기반진단(Condition based maintenance, CBM)기술이 활발히 적용되고 있으며, 대표적 방법이 부분방전(Partial discharge, PD) 검출이다[3].

열화초기에 발생하는 PD는 초음파나 전자기파 등의 에너지를 방출하며, 다양한 센서로 부터 검출할 수 있다. 또한 결함별 특성을 분석할 수 있으므로, 전력설비에서 주로 활용되고 있다. 그러나 기존의 연구는 결함 유무에 따른 PD 검출이 대부분이며, 위치 표정은 주로 외부 펄스를 주입하여 TDR(Time domain reflectometry)방식으로 수행하고 있다.

\*Corresponding author. E-mail: kilgs@kmou.ac.kr.

© 2017 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<https://doi.org/10.7782/JKSR.2017.20.2.203>

본 논문에서는 지중배전선로에서 주로 이용되는 22.9kV-y CNCV-W 케이블로 결함을 모의하였고, 고주파변류기(High frequency current transformer, HFCT)로 방전펄스를 검출하였다. 절연 진단의 위험도를 판단하는 기초자료로 활용하기 위해, XLPE 케이블에서 대표적으로 발생하는 보이드의 크기 및 위치에 따른 PD 특성을 분석하였다. 또한 PD 펄스를 이용하여 운전 중 결함위치를 추정하였으며, 이는 예방진단 시 결함의 크기 변화와 생성, 고장 시 절연파괴 위치를 파악할 수 있어 신속한 복구에 활용될 수 있다.

## 2. 부분방전의 측정과 분석

### 2.1 부분방전의 측정

#### 2.1.1 실험계 및 결함모의

XLPE 절연체 내부에서 발생된 결함의 크기와 위치에 따른 PD 특성을 분석하기 위해, Fig. 1과 같이 실험계를 구성하였다. PD 펄스는 수십 kHz ~ 수 십 MHz의 고주파 성분을 포함하고 있으며[4], 비접촉식으로 펄스를 검출하기 위해 HFCT(URD, 150kHz~30MHz, 1V/A)를 고압 인입부로부터 0.5m 이격된 시스에 설치하였다. 오실로스코프(1GHz, 5GS/s, DL 9140) 및 DAQ(125MHz, 250MS/s NI 5114)를 이용하여 펄스를 수집하였으며, 결함별 PD 특성은 LabVIEW로 설계한 PRPD(Phase resolved partial discharge) 프로그램을 활용하였다.

22.9kV-y CNCV-W 케이블의 절연층 두께는 약 7mm이며, 1m 길이로 절단하여 결함을 모의하였다. 실제 케이블에서 발생되는 보이드는 직경 수  $\mu\text{m}$ 로 매우 작기 때문에 인위적인 제작은 어렵다[5]. 따라서 케이블 시스로부터 천공(穿孔)하여 보이드를 형성시킨 후 에폭시를 이용해 표면을 도포하였고, PD의 발생이 용이하도록 수mm 크기로 구성하였다. Fig. 2는 단면도를 통해 본 4종의 결함계를 나타낸다. (a) 1mm-interfacial은 케이블의 도체로부터 인접한 직경 1mm 크기의 보이드이다. (b) 1mm-

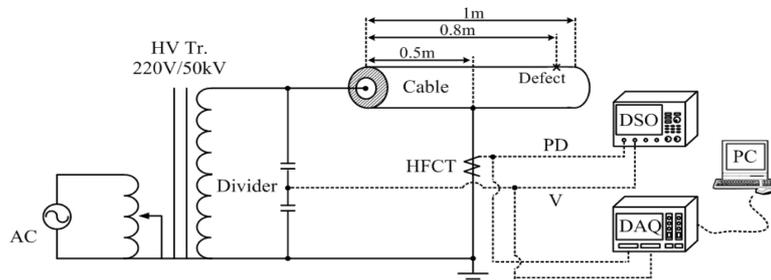


Fig. 1. Experimental setup for analysis of PD patterns.

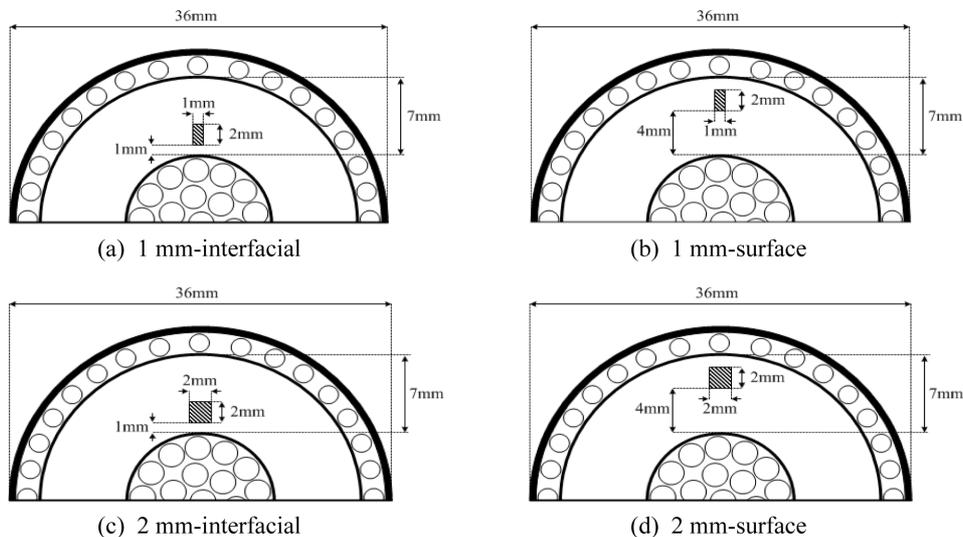


Fig. 2. Types of void defects.

surface는 (a)와 동일한 크기로서, 절연체의 외곽에 인접해 있다. (c) 2mm-interfacial 및 (d) 2mm-surface는 직경 2mm 크기의 보이드를 통해 각각 도체 및 절연체의 외곽에 인접한 구조를 나타낸다.

### 2.1.2 검출감도 산출

실험을 수행하기에 앞서, HFCT로 구성된 측정시스템의 유효성과 검출감도를 확인하였다. 케이블에 결함을 모의하여 PD를 발생시키고, 50Ω 무유도 저항 및 HFCT를 통해 PD 펄스를 검출하였다. 방전전하량은 식(1)과 같이 정의할 수 있으며, 오실로스코프에서 측정된 전압펄스  $V(t)$ 를 적분한 값으로 도출할 수 있다. 따라서 50Ω과 HFCT에서 검출된 펄스를 통해 방전전하량을 산출하고 이를 비교하였으며, 측정된 펄스의 Peak 값에 대한 전하량의 비로서 HFCT의 검출감도를 확인하였다. Fig. 3은 2mm-interfacial에서 3.6kV를 인가하였을 때 50Ω과 HFCT로 측정된 펄스 파형의 예이다. 총 10회를 수행한 결과, 평균전하량은 각각 305.26pC 및 298.89pC으로 거의 일치함을 보였고, HFCT의 감도는 약 38.5pC/mV로 산출되었다.

$$q = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{V(t)}{R} dt \quad (1)$$

## 2.2 부분방전의 특성 분석

방전개시전압(Discharge inception voltage, DIV)은 측정된 펄스 크기가 2mV 이상일 때, 인가된 전압으로 하였다[6]. PRPD 특성을 확인하기 위한 측정전압은 DIV를 기준으로 1.2배하여 수행하였고, 2초(120cycle)동안 수집된 데이터를 측정 1주기로 하여 단속적으로 총 10회를 측정하였다.

Fig. 4는 1mm-interfacial에서 발생한 PD 파형 및 PRPD 결과를 나타낸다. 1mm-interfacial의 DIV는 3.4kV로 측정되었으며, 평균 방전전하량은 92.4pC으로 산출되었다. 방전횟수의 경우 정·부극성에 각각 152회 및 370회로 부극성에서 발생된 비율이 정극성에 비해 3배 이상 높았다. 위상은 정극성의 경우 65°~120° 및 부극성은 225°~305°로 분포되었다. 1mm-surface의 DIV는 3.5kV이며, 전하량은 61.6pC으로 나타났다. 방전횟수의 경우 정·부극성에서 각각 210회 및 234회로, 두 극성 모두 유사하게 발생되었다. 위상은 정극성의 경우 42°~130° 및 부극성은 235°~310°로, 1mm-interfacial에 비해 정극성에서 다소 넓게 분포하였

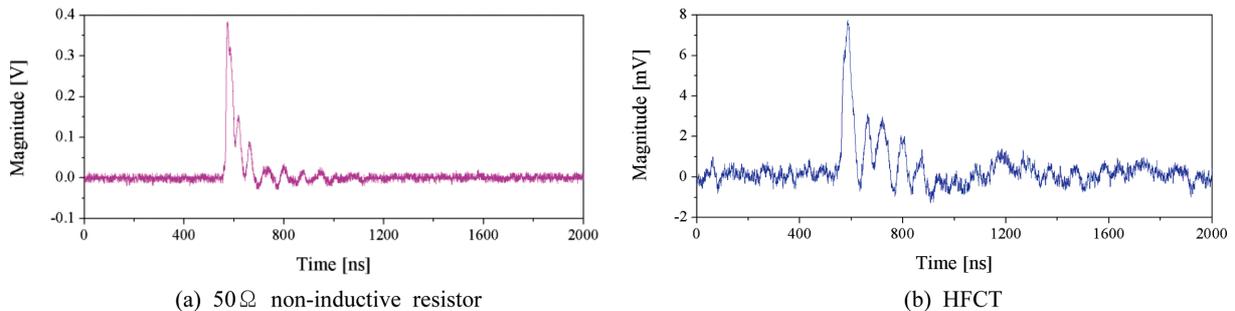


Fig. 3. Detected single pulses.

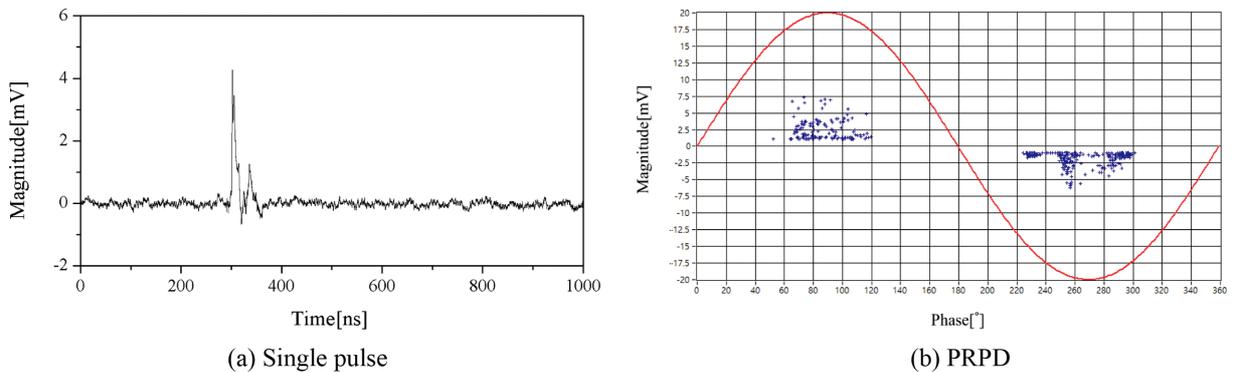


Fig. 4. PD characteristics in 1mm-interfacial.

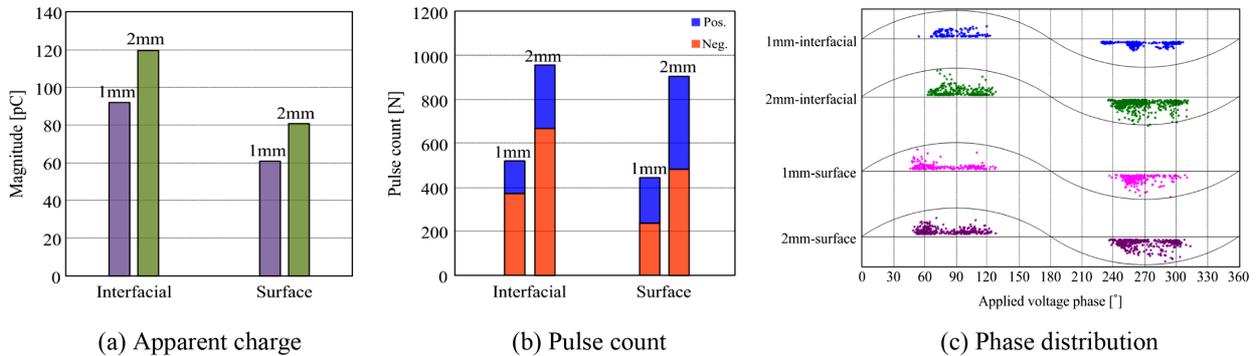


Fig. 5. Comparison of PD characteristics against different defect types.

다. 2mm-interfacial의 DIV는 3.0kV이며, 방전전하량은 119.4pC으로 결함 중에서 가장 높은 크기를 보였다. 방전횟수는 정·부극성에서 각각 289회 및 669회로, 1mm-interfacial와 동일하게 부극성에서 발생빈도가 높았다. 위상은 정극성의 경우 60°~125° 및 부극성은 230°~310°로 분포하였다. 2mm-surface의 DIV는 2.9kV이며, 방전전하량은 80.9pC으로 산출되었다. 방전횟수는 정·부극성에서 각각 422회 및 485회로 나타났으며, 위상은 정극성의 경우 50°~125° 및 부극성은 235°~310°로 분포하였다.

결함별 PD 특성에 관한 분석결과를 Fig. 5에 나타내었다. 방전전하량은 2mm-interfacial에서 가장 크게 발생되었으며, 결함이 크거나 도체에 인접한 위치에 존재할수록 증가하는 경향을 보였다. 방전횟수의 경우 동일한 위치에서 결함이 클수록 방전펄스 수가 증가하며, 이는 결함이 클수록 단면적이 증가하여 전자의 발생 확률이 높아지기 때문이다. 결함의 위치에 따라서는 Interfacial이 Surface에 비해 부극성에서의 방전펄스 수가 약 20% 이상으로 많게 나타나는데, 이는 부극성에서 발생하는 전자의 이동속도가 양전하에 비해 빠르기 때문이다. 또한 결함이 도체에 인접할수록 전계의 세기가 증가하므로 Interfacial 결함에서 방전 전하량이 크고, 펄스 수도 많아지게 된다[7,8]. 위상의 경우 정·부극성에서 평균 54°~120° 및 228°~308°로 유사하게 분포하였다.

### 2.3 결함의 위치추정

#### 2.3.1 실험계

TDR 방법을 기반으로 PD 펄스를 이용하여, 케이블 내 결함위치를 추정하기 위한 실험계를 Fig. 6에 나타내었다. 50m 케이블 전장에서 고압 인입부로부터 1m 이격된 지점에 HFCT를 설치하였고, 이를 측정지점으로 선정하였다. 결함은 절연체에 직경 1mm의 보이드를 구성하였으며, 측정지점으로부터 각각 2m 및 30m 떨어진 위치에서 모의하였다. 측정전압은 5kV에서 10회 반복하여 수행하였으며, 발생된 PD 펄스와 반사펄스 간의 시간차를 분석하여 결함 위치를 추정하였다.

TDR 방법은 케이블내 결함위치에서 특성임피던스의 변화로 생기는 반사펄스 사이의 도달시간차를 이용하여 위치를 추정한다. Fig. 7과 같이 PD에 의한 펄스는 결함지점을 기점으로, 케이블 양 끝단을 향해 동시에 진행한다. 식(2)는 PD 펄스( $t_{PD}$ )와 개방된 케이블 끝단의 임피던스 변화에 따른 반사펄스( $t_{Ref}$ )의 시간차( $\Delta t$ )를 나타내며, 전파속도( $v$ )와 각 펄스들의 진행거리를 통해 도출할 수 있다. 식(3)은 상기의 식을 이용해, 측정지점으로부터 결함위치까지의 거리( $x$ )를 나타낸 것으로, 케이블의 길이( $l$ ), 전파속도 및 시간차를 적용하여 산출할 수 있다[9].

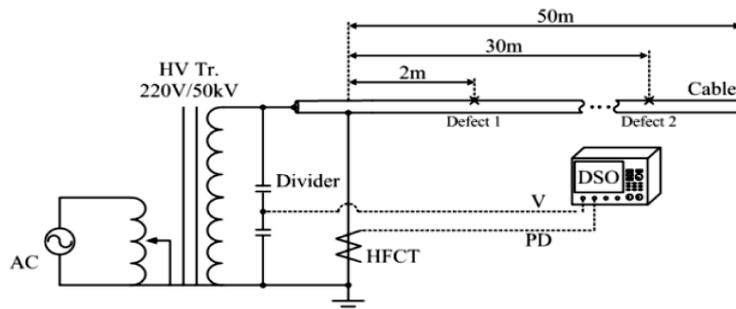


Fig. 6. Experimental setup for defect localization.

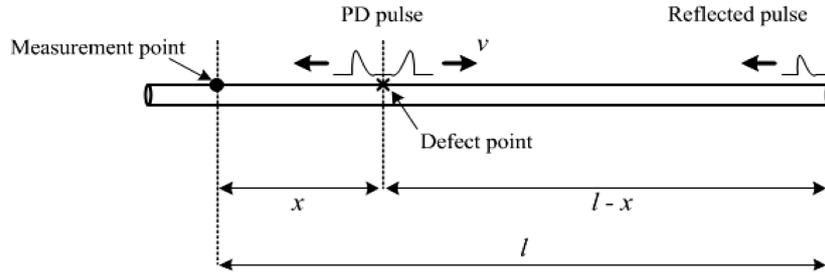


Fig. 7. Principle of defect localization.

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

$$x = l - \frac{1}{2} \Delta t \times v [m] \quad (3)$$

### 2.3.2 전파특성 분석

결함 위치추정은 케이블을 따라 진행되는 펄스의 전파속도가 요구되며, 식(4)과 같이 빛의 속도( $c$ )와 절연체의 비 유전율 (Relativity permittivity,  $\epsilon_r$ )로 도출할 수 있다. 대상 케이블의 자료( $\epsilon_r=2.3$ )를 참조하여, 전파속도를 산정한 결과  $1.98 \times 10^8$  m/s로 나타났다[10]. 또한 10m 이격시킨 두 HFCT에서 측정된 펄스시간차로 전파속도를 도출하였으며, Fig. 8과 같이 50ns의 시간차에 의하여  $2 \times 10^8$  m/s로 산출되었다. 따라서 비 유전율을 통한 결과와 거의 유사함을 확인하였으며, 본 연구에서는 HFCT에서 산출된 전파속도를 적용하였다.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{2.3}} = 1.98 \times 10^8 [m/s] \quad (4)$$

PD 펄스와 이로 인해 발생하는 반사펄스의 검출 용이성을 판단하기 위해 펄스의 전파거리에 따른 감쇠특성을 분석하였고, 측정 가능한 최대거리를 도출하였다. PD 펄스와 유사한 임펄스를 케이블에 주입시켜, 10m 간격으로 HFCT를 설치하여 최대 50m 까지 측정하였다. Table 1과 Fig. 9는 펄스의 이동거리에 따른 감쇠정도를 나타내며, 10m 당 약 2.15%로 일정한 감쇠율을 보였다. 또한 상기의 과정을 통해 측정 가능한 최대거리를 분석한 결과, 약 465m에서 펄스가 소멸될 것으로 예상되며, 50m 케이블에서 진행되는 펄스의 최대거리의 100m이므로 충분히 펄스 검출이 가능함을 확인하였다.

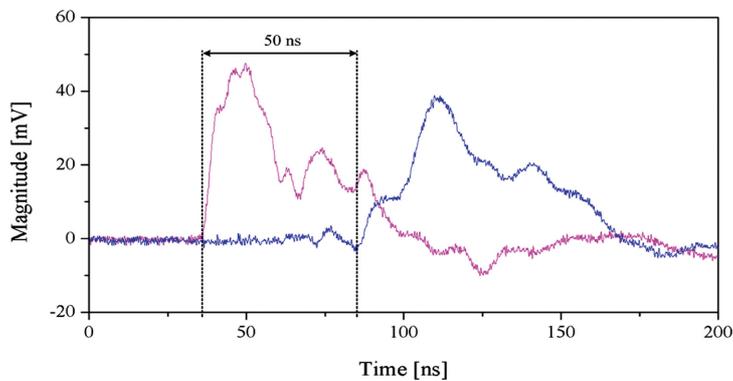
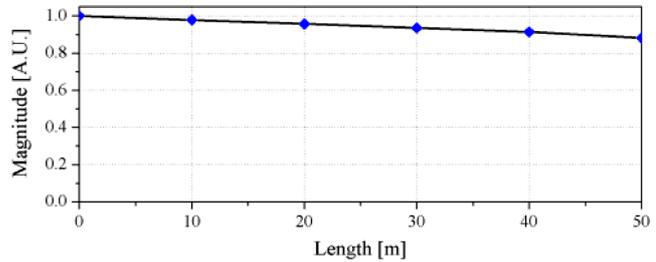


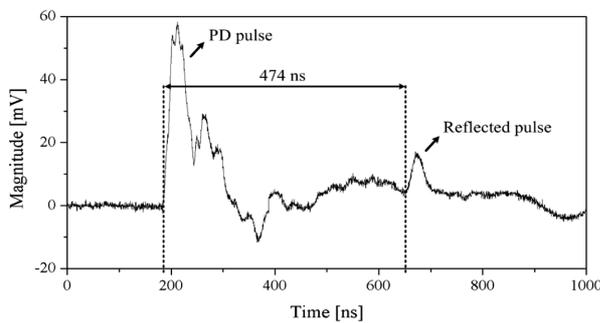
Fig. 8. Time interval between two pulses.

**Table 1.** Attenuation to cable length.

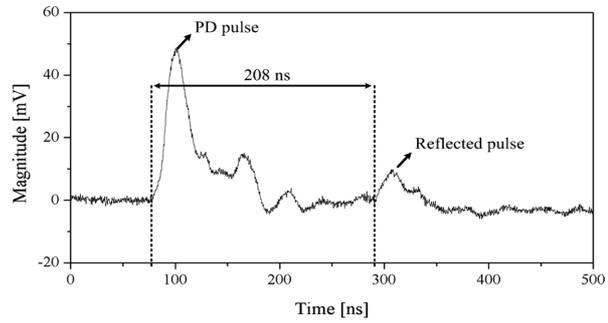
Distance(m)	Magnitude(mV)	Attenuation ratio(%)
0	37.2	-
10	36.4	2.15
20	35.6	4.3
30	34.8	6.45
40	34.0	8.6
50	33.2	10.75



**Fig. 9.** Attenuation of a PD pulse along cable length.



(a) In case of defect at 2m



(b) In case of defect at 30m

**Fig. 10.** Defect localization in a 50m long cable.

**2.3.3 결과 및 분석**

Fig. 10의 (a)는 측정지점으로부터 2m 이격된 결함지점의 펄스파형이며, 펄스간의 시간차는 474ns로 측정되었다. 상기의 식 (3)를 적용하여 결함위치를 산출한 결과, 2.6m로 나타났으며 실제 결함지점과는 0.6m의 오차를 보였다. (b)는 30m 이격된 결함 지점에 대한 펄스파형을 나타내며, 시간차는 208ns로 측정되었다. 산출 결과 29.2m로, 실제 결함지점과는 0.8m의 오차를 보였다. 따라서 최대 1m 이내의 오차범위에서 실제 결함지점과 일치함을 확인하였다.

**3. 결 론**

본 논문은 XLPE 지중케이블을 대상으로, 절연체 내부의 기하학적 구조에 따른 결함의 PD 특성과 TDR 방법을 기반으로 PD 펄스를 이용한 결함 위치추정에 관하여 연구를 수행하였다. 보이드의 크기 및 위치에 따른 PD 특성의 경우, 방전전하량 및 방전 횟수는 결함이 클수록 증가하는 경향을 보였으며, 펄스 수는 도체에 인접할수록 부극성이 정극성보다 약 20% 많게 발생하였다. 케이블 내 PD 펄스의 전파속도는  $2 \times 10^8$  m/s이었으며, 결함에서 발생하는 PD펄스 및 반사 펄스의 시간차로부터 결함의 위치를 추정할 수 있었다. 본 실험에서 위치표정 오차는 1m이내 이었으며, 진행 펄스의 감쇄량으로부터 측정 가능한 최대 길이는 약 465m로 산출되었다. 위치표정의 정확도는 측정장치의 시간분해능(Sampling rate)이 높을수록 향상된다. 본 연구 결과는 지중배 전선로의 절연감시, 상태진단 및 결함 위치추정에 활용도가 높을 것으로 기대한다.

**References**

[1] E. Peschke, R. von Olshausen (1999) *Cable Systems for High and Extra-High Voltage*, Pirelli, Berlin, pp. 24-26.  
 [2] M.S. Naidu, V. Kamaraju (1995) *HighVoltage Engineering*, McGraw-Hill, USA, pp. 333-337.  
 [3] D.W. Park, C.Y. Park, J.S. Choi, G.S. Kil, et al. (2009) Evaluation on insulation performance of traction motors for a hybrid vehicle by partial discharge measurement, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(2), pp. 249-253.  
 [4] C.F.F.C. Cunha, A.T. Carvalho, M.R. Petraglia, A.C.S. Lima (2015) A new wavelet selection method for partial discharge denoising, *Electric Power Systems Research*, 125, pp.184-195.

- [5] H.A. Illias, M.A. Tunio, A.H. A. Bakar, H. Mokhlis, *et al.* (2016) Partial discharge phenomena within an artificial void in cable insulation geometry: experimental validation and simulation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(1), pp.451-459.
- [6] International Electrotechnical Commission (2006) High-Voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements, IEC 60270.
- [7] N.H. Malik, A.A. Al-Arainy, M.I. Qureshi (1998) *Electrical Insulation in Power System*, Marcel Dekker, New York, pp. 21-186.
- [8] G.M. Wang, H.E. Jo, S.J. Kim, S.W. Kim, G.S. Kil (2016) Measurement and analysis of partial discharges in SF<sub>6</sub> gas under HVDC, *Measurement*, 91, pp.351-359.
- [9] A. Rodrigo Mor, P.H.F. Morshuis, P. Llovera, V. Fuster, *et al.* (2016) Localization techniques of partial discharges at cable ends in off-line single-sided partial discharge cable measurements, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(1), pp. 428-434.
- [10] F. Puletti, M. Olivieri, A. Cavallini, G. C. Montanari (2005) Localization of partial discharge sources along HV and MV cable routes, *International Power Engineering Conference*, Singapore, pp.1-6.

(Received 18 January 2017; Revised 20 March 2017; Accepted 29 March 2017)

---

**Seo-Jun Park:** hvpsj0318@kmou.ac.kr

Department of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Yeongdo-Gu, Busan 49112, Korea

**Seong-Cheol Hwang:** hschungul@kmou.ac.kr

Department of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Yeongdo-Gu, Busan 49112, Korea

**Guoming Wang:** journey@kmou.ac.kr

Department of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Yeongdo-Gu, Busan 49112, Korea

**Gyung-Suk Kil:** kilgs@kmou.ac.kr

Department of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Yeongdo-Gu, Busan 49112, Korea