

## 전자파해석기법을 이용한 전기트리 펄스전파특성 분석

이 동 영\*

### An Analysis on the Pulse Propagation Characteristics of Electrical Trees using EM Simulation

Dong-Young Yi\*

#### 요 약

본 연구에서는 전력케이블의 대표적인 열화요인 중 하나인 전기트리 열화의 진단 가능성을 전자파해석 기법해석을 통해 살펴보았다. 펄스전파특성법은 진단펄스를 동축케이블에 인가하고 열화에 의한 반사파나 투과파의 특성분석을 통해 열화를 진단하는 방법이다. 전기 트리의 침투깊이( $\delta_e$ )는 90%와 50%로 설정하였다. 침투깊이( $\delta_e$ )가 90%인 경우 반사파는 최댓값이 입사파 대비 2.76%로 계산되었으며, 침투깊이( $\delta_e$ )가 50%인 경우에는 반사파의 최댓값이 입사파 대비 0.31%로 계산되었다. 따라서 펄스전파특성법을 이용한 전기트리 측정은 수트리에 비해 민감도가 상당히 떨어지며 진단에 한계가 있을 것으로 예상된다.

#### Abstract

In this study, The detection possibility of electrical trees in the power cables was investigated using EM simulation method. The pulse propagation characteristic method is the diagnostic method of power cable aging by the analysis of reflection or transmission wave after application of diagnostic pulse. The penetration depth( $\delta_e$ ) of electrical tree was set 90% and 50%. The maximum value of ratio of the reflection wave to incidence wave was 2.76% and 0.31% in case of 90% and 50% penetration depth, respectively. Therefore, the diagnose of electrical trees using pulse propagation characteristic method may be very difficult because of very low sensitivity in comparison with water trees.

---

\* 위덕대학교 에너지전기공학부 (Division of Energy & Electrical Engineering, Uiduk University)

## I. 서론

전력케이블이 전기적, 기계적, 열적 요인 등 다양한 환경요인에 의해 열화가 진행된다면 주절연층, 반도체층의 저항을 및 유전율이 변화하고 주절연층과 차폐층 계면 및 접속부 계면의 저항이 변화하여 동축케이블의 특성임피던스가 변하게 된다. 본 연구에서는 동축전송선로 이론을 토대로 전력케이블 내에서 전기트리 열화에 대한 전자파해석을 수행하였다. 케이블 열화 특성 진단에 대한 연구를 위해 기본적인 형태의 전기트리를 모델링하였고, 전기트리의 침투깊이, 축방향 길이를 변수로 설정하여 다양한 형태의 전기트리에서 EM 시뮬레이션을 통해 진단 펄스의 반사 파형을 계산하고 분석하였다.

## II. 이론적 배경 및 해석법

### 1. 유한요소법을 이용한 모델링 기법

반사파 계측법은 케이블의 임피던스 불일치 지점에서 기준신호의 반사파가 발생한다는 현상에 착안하여, 기준신호와 그 반사파의 시간지연 차이를 분석해 케이블의 결함 위치를 추정하는 기법이며, 분석 영역에 따라 크게 시간영역 반사파 계측법(TDR, Time Domain Reflectometry), 주파수 영역 반사파 계측법(FDR, Frequency Domain Reflectometry), 시간-주파수영역 반사파 계측법(TFDR, Time-Frequency Domain Reflectometry) 으로 구분되며[1], 케이블의 열화 및 결함을 찾기 위해 TDR기법을 기반으로 동축 케이블 모델링 기법에 관한 연구를 진행하였다.

#### 1) 특성 임피던스( $Z_0$ )와 반사계수( $\Gamma$ )

무한정 선로의 전압, 전류는 송전단에서 멀어질수록 그 진폭은 점차 감소하고 그 진폭비는 선상 어디서나 일정한데 그 비를 특성 임피던스( $Z_0$ )라 한다. 특성 임피던스( $Z_0$ )의 일반적으로 식 1과 같이 쓸 수 있으며, 특성 임피던스( $Z_0$ )와 케이블의 비율전율과의 관계는 식 2와 같이 표현된다.

$$Z_0 = \frac{\sqrt{R + j\omega L}}{\sqrt{G + j\omega C}} \quad (1)$$

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \quad (2)$$

식 1-2에서  $\epsilon_r$ 은 케이블 유전체의 비유전율,  $r_o$ 는 유전체의 외경,  $r_i$ 는 유전체의 내경을 의미한다.

선로에서 전원의 내부 임피던스( $Z_i$ ), 선로의 특성 임피던스( $Z_0$ ), 부하의 임피던스( $Z_L$ )를

식 3과 같이

$$Z_i = Z_0 = Z_L \quad (3)$$

만들어주는 것을 임피던스 정합(impedance matching)이라 하며, 임피던스 정합을 통해 최대 전력 전달 조건이 충족되어 부하에 최대 전력이 공급될 뿐만 아니라 선로와 부하 사이에 발생하는 다중 반사가 선로 상에서 상쇄되는 효과를 이용할 수 있다. 이는 입사파( $V_0^+$ )와 반사파( $V_0^-$ )의 비율을 나타내는 반사 계수( $\Gamma$ )를 나타내는 식 4를 통해서도 확인할 수 있다. ( $Z_{term}$ 은 종단 임피던스를 의미한다.)

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_{term} - Z_0}{Z_{term} + Z_0} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (4)$$

그러나 케이블에 열화가 발생되면 열화 발생 지점의 임피던스와 선로의 특성 임피던스가 달라지고 열화 발생 지점의 임피던스를 종단 임피던스( $Z_{term}$ )로 생각 할 수 있다. 즉, 케이블과 열화 지점의 경계에서 반사파가 발생하게 된다[2].

일반적으로 열화 지점의 임피던스는 특성 임피던스보다 작은 값을 갖게 되므로 반사계수( $\Gamma$ )는 음의 값을 갖게 되어 반사파의 위상은 반전된다. 만약 열화 지점의 절연체가 모의결합되는 등의 손상으로 열화 지점의 임피던스가 특성 임피던스보다 큰 값을 갖게 되는 경우에는 반사 계수( $\Gamma$ )가 양의 값을 갖게 되므로 반사파의 위상은 반전되지 않게 된다.

## 2. 케이블 열화 유형별 모델링 정수 산출

케이블의 열화 유형은 크게 수 트리와 전기 트리로 구분이 가능하며, 트리의 물질상수는 열화의 유형, 열화 진행 정도, 온도 등 주변 환경에 따라 그 값이 변화하는 특징을 가진다. 따라서 본 절에서는 전기트리의 물질 상수를 산출하는 방법에 대하여 기술하였다[3].

### 1) 전기 트리 모델링

Scanning Electron Microscopy(SEM), Transmission Electron Microscopy(TEM)등의 측정법은 시각적으로 전기 트리의 물리적 구조를 파악하기 위해 좋은 방법들이다. 하지만 전기 트리의 3차원 구조를 이해하고 모델링을 위해서는 한계가 존재하기 때문에 최근 연구의 동향은 전기 트리의 물리적 구조를 3차원 영역에서 이해하기 위해 X-ray Computed Tomography(XCT)와 Serial Block-Face Scanning Electron Microscopy(SBSEM)의 측정법 사용하고 있다. 이러한 방법들은 전기 트리 채널들의 직경, 면적, 체적 등을 측정할 수 있기 때문에 전기 트리의 3차원 구조를 파악할 수 있게 하며 이를 이용하여 전기 트리의 전기적 특성을 유한요소해석으로 계산할 수 있다.

## 전자파해석기법을 이용한 전기트리 펄스전파특성 분석

### 2) Conductive tree

전기 트리 모델이 적용되기 전, 전기 트리는 먼저 conductive tree로 가정되어야 하고 이 모델은 정전방전식이 적용된다. 트리의 채널 포텐셜은 침상 전극의 전압과 같다.

작은 곡률을 가지는 보이드 끝에 생성되는 발산계의 영향으로 지역적 최대값들은 트리의 가지 끝에 위치하고 이러한 현상을 고려하여 트리의 끝 부분은 구 형태로 분할되어 적용되어야 한다.

위의 모든 상황을 고려하여 트리의 메시는 최종적으로 트리의 채널 부분보다 트리의 끝 부분에 보다 높은 밀도로 적용되어야 한다.

### 3) Charge Simulation Method

그림 2.처럼 구 형태로 분할된 메시는 Matlab의 CSM(Charge Simulation Method)을 이용하여 적절한 값으로 계산이 가능하다. 예를 들어, 그림 1.에 나타내었듯이, 절연체로 둘러싸인 반지름이 1[μm]인 완벽한 전도체 구가 무한 평면(ground)을 기준으로 2[mm]위에 위치하고 18[kV]의 전위가 적용되는 모델은 전기 트리 구조 내부의 끝부분을 계산하기 위한 것이며 전도체 구와 평면(ground) 사이의 거리는 트리의 끝 부분과 ground사이의 거리를 반영한 것이다.

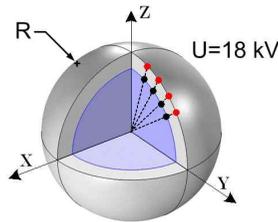


그림1. CSM 계산을 위한 전도체 구의 도식

위의 모델은 CSM의 지배방정식인 식 5와 식 6에 의해 그 값이 계산된다[3].

$$V_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} Q_j \quad (5)$$

$$E_i = \left[ \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_{ij}}{\partial x} Q_j \right] a_x + \left[ \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_{ij}}{\partial y} Q_j \right] a_y + \left[ \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_{ij}}{\partial z} Q_j \right] a_z \quad \text{or} \quad (6)$$

$$E_i = \left[ \sum_{j=1}^n (f_{ij})_x Q_j \right] a_x + \left[ \sum_{j=1}^n (f_{ij})_y Q_j \right] a_y + \left[ \sum_{j=1}^n (f_{ij})_z Q_j \right] a_z.$$

그림 2.는 지역적인 최대 전계와 최소 전계를 나타 내었고, 그림 3.은 그림 2.의 각 트리

끝 부분(T1~T56)의 평균 전기 강도와 최대 전기강도를 나타내었다.

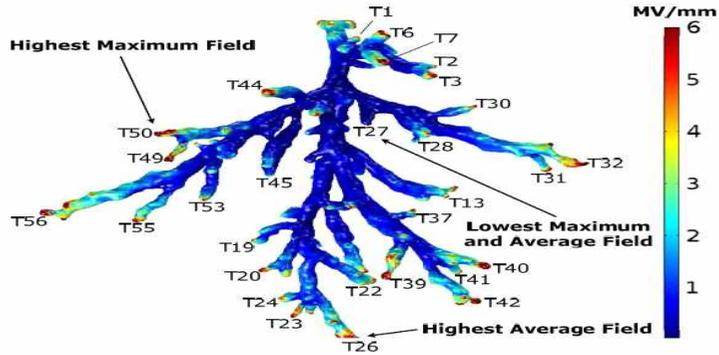


그림 2. 지역적 최대 전기 및 최소 전기

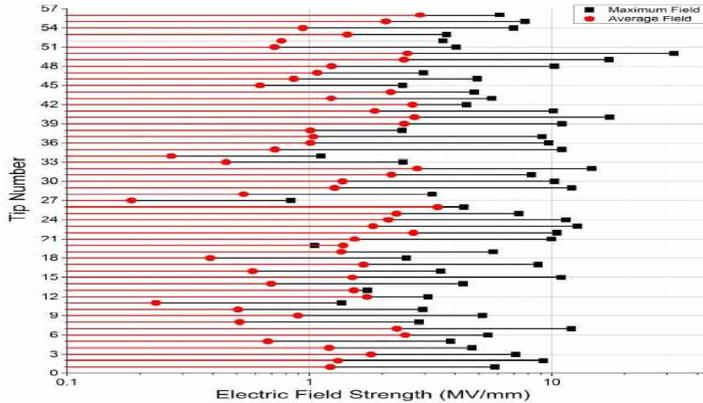


그림 3. 각 전도체 가지 끝 부분의 평균 전기 강도 및 최대 전기 강도

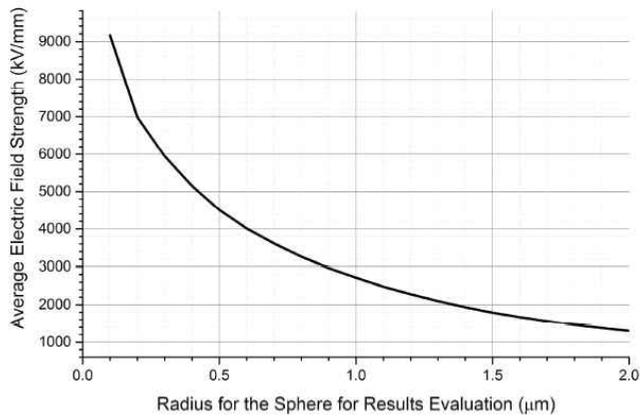


그림 4. 전도체 구의 반지름 크기에 따른 평균 전기 강도

## 전자파해석기법을 이용한 전기트리 펄스전파특성 분석

그림 4는 전도체 구의 반지름 크기에 따른 평균 전계 강도를 나타낸 것이다[4]. 따라서 계산된 값들을 이용하면 복잡한 기하학적 구조를 갖는 트리라도 단일화된 전도성을 갖는 값으로 계산하는 것이 가능하다.

### Ⅲ. 전자파해석 및 시험결과

#### 1. 열화 유형별 유한요소 모델링

케이블 열화 특성 진단에 대한 연구를 위해 기본적인 형태의 전기트리를 모델링하였고, 전기트리의 침투깊이, 축방향 길이를 변수로 설정하여 다양한 형태의 전기트리에서 EM 시뮬레이션을 통해 진단 펄스의 반사 파형을 계산하고 분석하였다.

입력 진단 펄스는 펄스 크기를 3[kV], 펄스 폭을 10[ns]로 설정하였고 케이블의 크기는 절연체의 직경을 49.26[mm], 도체의 직경을 18.6[mm], 케이블의 길이를 10[m]로 설정하였다(표 1). 전기트리의 위치는 케이블의 정 가운데에 위치하도록 설정하였으며, 절연체의 내부에 존재하는 도체와 외부에 존재하는 시스를 고려하여 절연체의 내부 경계면과 외부 경계면에는 각각 PEC(Perfect Electric Conductor) 경계조건으로 동일하게 설정하였다. 케이블의 중단부에는 개방된 상태로 가정하여 PMC(Perfect Magnetic Conductor) 경계조건을 설정해 주었다. 절연체의 물질상수 값은 [5]에 적용된 값을 참고하여 절연체의 비유전율( $\epsilon_r$ )을 2.3으로, 절연체의 도전율( $\sigma$ )을  $1 \times 10^{-15}$  [S/m]로 설정하였다.

표 1 시뮬레이션 케이블 규격

	Parameter
전압	22.9kV
공칭단면적 [ $mm^2$ ]	60
절연체 직경 [mm]	24.63
도체 직경[mm]	9.3
축 방향 길이 [m]	10
절연층 XLPE 비유전율 ( $\epsilon_r$ )	2.3
절연층 XLPE 도전율 ( $\sigma$ ) [S/m]	$1 \times 10^{-15}$

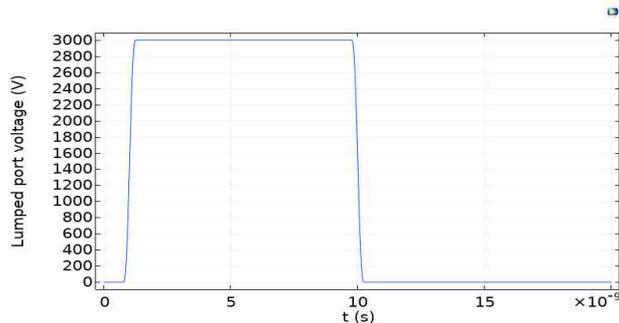
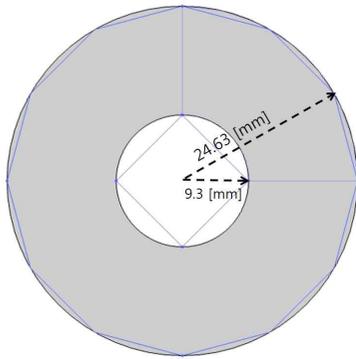
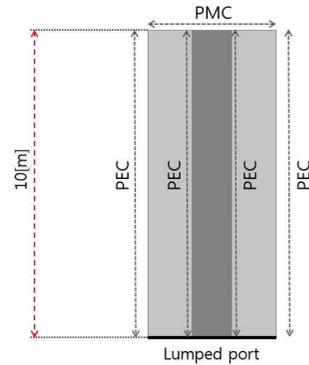


그림 5-1. 입력 진단 펄스



(a) 케이블의 단면적



(b) 케이블의 길이 및 경계 조건

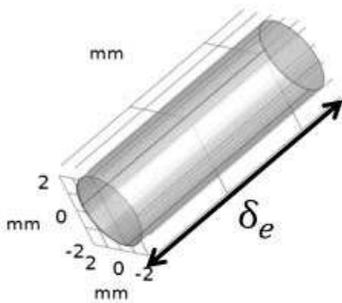
그림 5-2. 케이블 모델링

## 2. 전기 트리 시뮬레이션

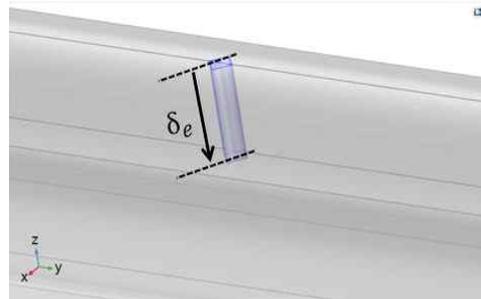
케이블에 케이블 열화 유형 중 하나인 전기 트리가 발생하였을 경우를 가정하여 EM시뮬레이션을 진행하였고 계산된 진단 펄스의 반사파를 분석하였다.

### 1) 전기 트리 모델링

전기 트리의 물질 상수 값으로 전기전도도가 가장 큰 표면 부분과 전기 트리의 채널을 포함한 단일화된 전기전도도를 고려하여([3],[5]), 비유전율( $\epsilon_{r,e}$ )은 1 그리고 도전율( $\sigma_e$ )은  $1 \times 10^5$  [S/m]로 설정하였고 직경이 4[mm]인 원통형 구조를 가지도록 모델링하였다. 전기 트리의 기하학적 구조는 그림 6.에 나타내었다. 전기 트리의 침투 방향은 절연체 외부 표면을 기준으로 절연체 내부의 도체 방향을 향해 움직이도록 설정하였으며, 전기 트리의 침투깊이( $\delta_e$ )는 90[%]와 50[%]로 설정하였다. 전기 트리 표면의 경계조건은 PEC 경계조건으로 설정하였고 케이블의 중간 지점에 위치하도록 설정하여 EM 시뮬레이션을 진행하였다.



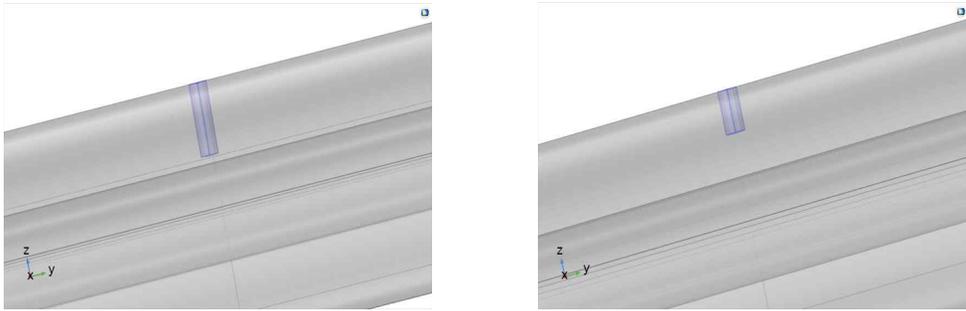
(a) 전기 트리의 기하학적 구조



(b) 전기 트리의 침투 방향

그림 6. 전기트리의 기하학적 구조 및 침투 방향

## 전자파해석기법을 이용한 전기트리 펄스전파특성 분석



(a)  $\delta_e = 90[\%]$ 인 전기 트리

(b)  $\delta_e = 50[\%]$ 인 전기 트리

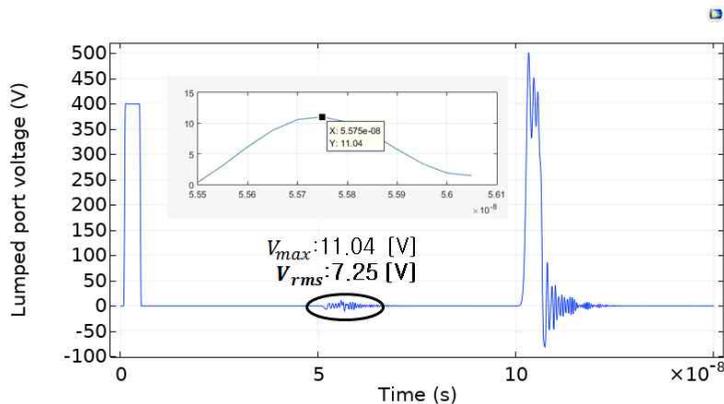
그림 7. 전기 트리가 포함된 케이블 모델링

### 2) 시뮬레이션 결과

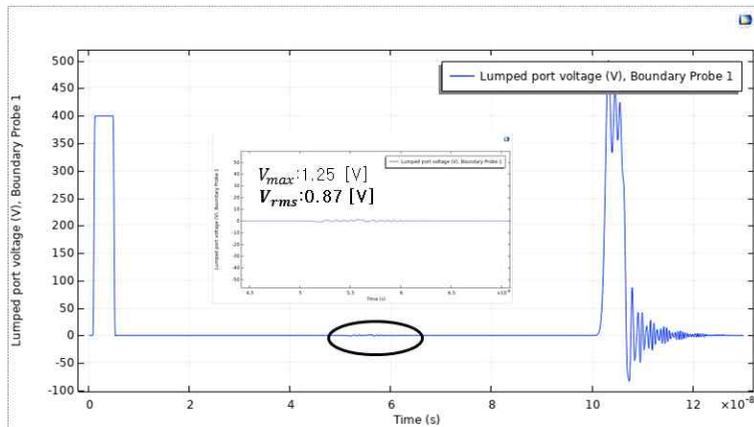
케이블 내의 진단 펄스의 전파 속도는  $1.98 \times 10^8$  [m/s]이므로 전기 트리로 인한 진단 펄스의 반사파가 관측되는 시간은 식 7에 의해  $5.048 \times 10^{-8}$  [s]임을 알 수 있다. EM시뮬레이션으로 계산된 진단 펄스의 크기는 그림 8.에 나타내었다.

$$v = \frac{2 \times l}{t} \quad (7)$$

침투 깊이( $\delta_e$ )가 90[%]인 경우 반사파는 최대값이 입사파 대비 2.76[%]로 계산되었으며, 침투 깊이( $\delta_e$ )가 50[%]인 경우에는 반사파의 최대값이 입사파 대비 0.31[%]로 계산되었다. 두 경우 모두 전기트리 반사파의 파형은 수트리 반사파와 비교해 명확하지 않았으며 특히 침투 깊이 50[%]인 경우는 실제 관측에 한계가 있을 것으로 예상된다.



(a)  $\delta_e = 90[\%]$ 인 전기 트리



(b)  $\delta_e = 50[\%]$ 인 전기 트리

그림 8. 전기 트리로 열화된 케이블의 진단 펄스 그래프

#### IV. 결론

본 연구에서는 케이블 열화 특성 진단에 대한 연구를 위해 기본적인 형태의 전기트리를 모델링하였고, EM 시뮬레이션을 통해 진단 펄스의 반사 파형을 계산하고 분석하였다.

입력 진단 펄스는 펄스 크기를 3[kV], 펄스 폭을 10[ns]로 설정하였고 케이블의 크기는 절연체의 직경을 49.26[mm], 도체의 직경을 18.6[mm], 케이블의 길이를 10[m]로 설정하였다. 전기트리의 위치는 케이블의 정 가운데에 위치하도록 설정하였으며, 전기 트리의 침투깊이( $\delta_e$ )는 90[%]와 50[%]로 설정하였다. 전기 트리 표면의 경계조건은 PEC 경계조건으로 설정하였고 케이블의 중간 지점에 위치하도록 설정하여 EM 시뮬레이션을 진행하였다.

입사파 대비 반사파의 최대치는 침투 깊이( $\delta_e$ )가 90[%]인 경우와 50[%]인 경우에 대해 각각 2.76[%]와 0.31[%]로 계산되었으며, 두 경우 모두 수트리와 비교하여 민감도가 현저히 떨어지는 결과가 나왔다. 따라서 펄스전파특성법을 이용한 전기트리열화의 진단에는 한계가 있을 것으로 예상된다.

#### 참고 문헌

- [1] Ho Jun Kim, Yong-June Shin, Jin Bae Park, "Development of linear observer for cable fault detection based on Reflectometry," 대한전기학회 창립 70주년 기념 하계 학술대회 논문집, PP.1363-1364, 2017.
- [2] V. Dubickas, "On-Line time domain reflectometry diagnostic of medium voltage XPE power cables," Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, PP.11,

2006.

- [3] Simon M. Rowland, Roger Schurch, Michalis Pattouras, Qi Li, "Application of FEA to Image-based Models of Electrical Trees with Uniform Conductivity," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 22, No. 3, PP. 1537-1546, June 2015.
- [4] Simon M. Rowland, Roger Schurch, Michalis Pattouras, Qi Li, "Application of FEA to Image-based Models of Electrical Trees with Uniform Conductivity," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 22, No. 3, PP. 1537-1546, June 2015.
- [5] A S Vaughan, I L Hosier, S J Dodd and S J Sutton, "On the structure and chemistry of electrical trees in polyethylene," Journal of Physics D: Applied Physics, PP. 962-978, 2006.