

Analysis of Pulse Propagation Characteristics for Detection of Water Trees in Power Cables

Min-Soo Choi, Ji-san Park, and Jin-Kyu Byun*

Department of Electrical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

Dong-Hun Kim

Department of Electrical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

Seung Hwangbo

Department of Automotive Engineering, Honam University, Gwangju 62399, Korea

Dong-Young Yi

Division of Energy and Electrical Engineering, Uiduk University, Kyungju 38004, Korea

(Received 26 March 2018, Received in final form 17 April 2018, Accepted 18 April 2018)

In this paper, characteristics of propagated pulse signals are analyzed for detection of water trees in power cables using simulation-based TDR (Time Domain Reflectometry). COMSOL Multiphysics software is used for time-domain simulations of propagated pulse signals with high frequency components. The water trees with various penetration depths and lengths are modeled by axis-symmetry or 3D geometry, depending on the shapes of the water trees considered. The reflected waveforms and RMS values of the applied diagnostic pulse signals are analyzed according to the shapes and lengths of the water tree models and outer conductor conditions. Also, the propagation velocity of the pulse signal is calculated considering the material property of XLPE insulator in the cable, and the location of the water tree is obtained by checking the starting point of the reflected pulse. Furthermore, positional errors with respect to the actual positions of the water trees are calculated.

Keywords : TDR (Time Domain Reflectometry), pulse propagation, water tree, power cable diagnosis

전력 케이블의 수트리(Water Tree) 탐지를 위한 펄스 전파특성 분석

최민수 · 박지산 · 변진규*

송실대학교 전기공학과, 서울시 동작구 상도로 369, 06978

김동훈

경북대학교 전기공학과, 대구시 북구 대학로 80, 41566

황보승

호남대학교 미래자동차공학부, 광주시 광산구 어등대로 417, 62399

이동영

위덕대학교 에너지전기공학부, 경주시 강동면 동해대로 261, 38004

(2018년 3월 26일 받음, 2018년 4월 17일 최종수정본 받음, 2018년 4월 18일 게재확정)

본 논문에서는 전력 케이블의 수트리(water tree) 탐지를 위하여 시뮬레이션 기반의 TDR(Time Domain Reflectometry) 기법을 이용해 펄스파의 전파 특성을 분석하였다. 높은 주파수 성분을 갖는 펄스파의 전파를 시간 영역에서 시뮬레이션하기 위해 COMSOL Multiphysics 소프트웨어를 이용하였다. 다양한 침투 깊이와 길이를 갖는 수트리에 대해 그 형상에 따라 축대칭, 또는 3D로 모델링하였으며, 수트리의 형상과 길이, 외부 도체의 상태 조건에 따라 반사된 진단 펄스파의 파형과 RMS 값을 분석하였다. 또한 전력 케이블 내 XLPE 절연체의 물질 상수를 고려하여 펄스파의 전파 속도를 계산하고 반사파의 시작점을 확인하여 수트리의 위치를 얻은 후 실제 수트리 위치에 대한 오차를 분석하였다.

주제어 : TDR(Time Domain Reflectometry), 펄스 전파, 수트리(water tree), 전력 케이블 진단

I. 서 론

대부분의 케이블 결함은 전기적, 기계적, 열적, 그리고 화학적 스트레스로 인해 발생하며, 배전용 케이블의 경우 설치 10년 후부터 절연체의 열화가 시작되는 것으로 알려져 있다. 수트리(water tree)는 수분이 포함된 결함이나 불순물이 있는 곳에서 천천히 진행되는 열화 현상이며, 케이블에서 발생하는 열에 의해 절연체의 화학적 성분과 물리적 형태가 변하여 수트리의 형성이 촉진될 수 있다. 수트리의 발생으로 인한 전력 케이블의 고장은 정전으로 이어져 높은 수리비용 등 큰 경제적 손실을 초래할 수 있다. 따라서 개방이나 단락 사고 뿐만 아니라 현재 형성되고 있는 수트리와 같은 작은 케이블 결함까지 검출할 수 있는 예방적 진단 기법의 필요성이 높아지고 있다[1].

현재 상용화되어 있거나 개발 중인 전력 케이블 활선진단 장치는 대부분 PD(Partial Discharge) 측정법을 이용하고 있으나 PD 측정법은 케이블 주 절연층의 경우 신뢰도 확보가 어려운 단점이 있다[2]. TDR(Time Domain Reflectometry) 기법은 레이더의 원리와 같이 케이블에 펄스를 전송하고 케이블 내의 임피던스가 불연속인 지점(수트리)에서 발생하는 반사파를 시간 영역에서 분석하여 진단을 수행하는 기법이며 활선에 대해 비파괴 검사를 진행할 수 있다는 장점이 있다[3].

본 논문에서는 펄스전파 특성법을 이용한 전력케이블 진단 기술의 타당성 검토를 위해 수치해석을 기반으로 한 TDR 기법을 활용하여 전력 케이블과 수트리를 모델링하고 시간영역에서 과도상태 해석을 수행하여 펄스파의 전파 특성을 분석하였다. 다양한 침투 깊이와 길이를 갖는 수트리를 모델링하고 수트리의 형상, 길이, 외부 도체의 상태 조건 등에 따라 반사된 진단 펄스파의 파형을 얻고 그 RMS 값을 계산하였다. 또한 펄스파의 전파 속도와 반사파의 시작점을 이용해 수트리의 위치를 결정한 후 실제 수트리 위치에 대한 오차를 계산하고 분석하였다.

II. 수치해석 기반의 TDR 기법과 케이블 모델링

1. TDR 기법과 진단용 펄스파

본 논문에서는 수치해석 기반의 TDR 기법을 적용해 수트

리의 위치를 구하기 위해 COMSOL Multiphysics 소프트웨어를 이용하여 케이블과 수트리를 모델링하고 시간영역에서 펄스파 전파 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에서 진단용으로 사용된 펄스파의 크기는 4 kV이고 지속시간은 10 ns 이다. 진단용 펄스의 파형이 Fig. 1에 나와 있다.

TDR 기법을 적용한 케이블 진단에서는 펄스파의 전파속도와 진단용 펄스가 반사되어 돌아오는 시간을 확인하여 수트리의 위치를 파악한다. 전력 케이블 내에서 펄스파의 전파속도 v 는 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \tag{1}$$

여기서 ϵ 와 μ 는 각각 전파 매질의 유전율과 투자율이다. 전력 케이블에 사용되는 유전체로는 XLPE를 적용하였으며 그 비유전율과 비투자율은 각각 $\epsilon_r = 2.3$, $\mu_r = 1$ 이다[4]. 수트리의 비유전율은 Burkes의 논문을 참고하여 $\epsilon_r = 4$ 로 설정하였다[5, 6]. 이를 식(1)에 대입하면 XLPE 절연체 내에서 펄스파의 속도는 $v_{xp} = 1.98 \times 10^8$ m/s, 수트리 내에서는 $v_r = 1.5 \times 10^8$ m/s로 계산된다.

입력단에서 관측되는 반사파의 총 이동 거리는 펄스파가 입력단으로부터 시작해 XLPE 절연체를 통해 전파된 후 절연체와 수트리 경계면에서 반사되어 다시 입력단까지 돌아오는 거리이다(Fig. 2). 따라서 입력단으로부터 수트리 경계면까지의 거리 l_r 를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$l_r = \frac{v_{xp} t_r}{2} \tag{2}$$

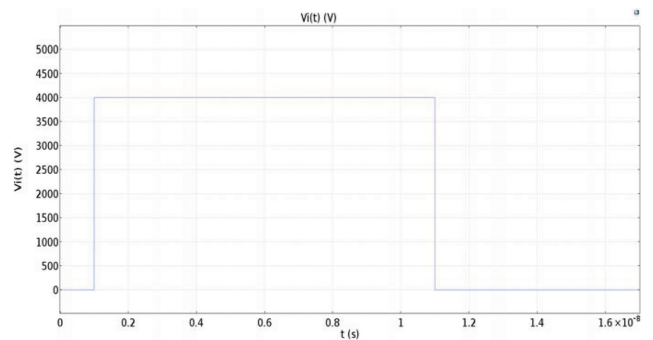


Fig. 1. (Color online) Waveform of the input diagnostic pulse.

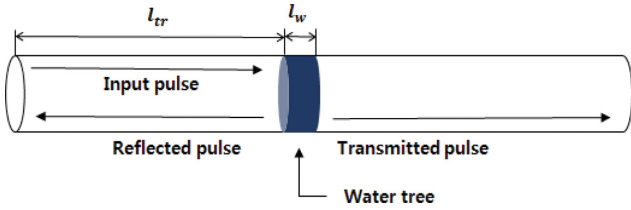


Fig. 2. (Color online) Route of reflected pulse wave in the cable.

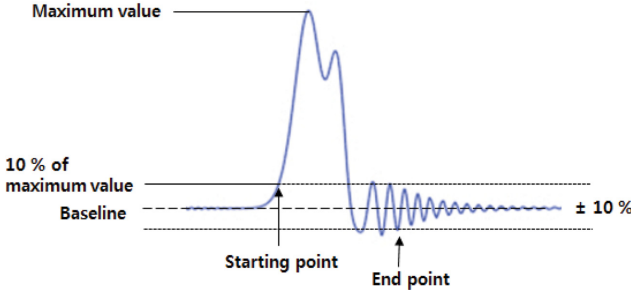


Fig. 3. (Color online) Starting point and end point of reflected pulse for RMS value calculation.

여기서 t_r 은 입력단에서 관측되는 펄스와 시작 시점과 반사파 시작 시점의 시간 차를 의미하며 $v_{xp}t_r$ 은 반사파의 총 이동거리가 된다. 식(2)를 이용해 수트리의 위치를 계산하고 실제 모델링한 수트리의 위치와 비교하면 TDR 기법으로 구한 수트리 위치의 오차를 분석할 수 있다.

2. 반사파의 RMS 값 계산

수트리의 반사파를 측정할 때 노이즈가 섞이거나 매칭이 잘 되지 않았을 때 파형의 왜곡이 발생한다. 이러한 경우에 반사파의 크기를 정량적으로 나타내기 위해 다음과 같이 반사파의 RMS 값 V_{rms} 를 계산하여 이용하였다.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [f(t)]^2 dt} \tag{3}$$

여기서 T 는 반사파 펄스의 지속시간(주기), $f(t)$ 는 시간에 따른 반사파의 파형을 나타내는 함수이다. 식(3)을 이용하여 RMS 값을 계산할 경우 반사파의 지속시간 T 를 결정하기 위한 기준이 필요하다. 반사파의 파형이 왜곡된 경우 그 시작 시점과 종료 시점이 명확하지 않기 때문에 Fig. 3과 같이 반사파 구간에서 최대값의 10%를 기준으로 시작 시점과 종료 시점을 정하고 지속시간 T 를 계산하였다.

3. 케이블 모델링

본 논문에서는 우리나라에서 쓰이고 있는 22.9 kV 직경 35 mm 전력케이블의 한전표준규격을 참고하여 케이블을 모델링하였다[7]. XLPE 절연층은 외경 24.63 mm, 내경 9.3 mm의

Table I. Dimensions and material properties of power cable model.

Parameters	
XLPE outer diameter	24.63 mm
XLPE inner diameter	9.3 mm
Cable axial length	10 m
XLPE relative permittivity	2.3
XLPE conductivity	1×10^{-15} S/m
XLPE relative permeability	1

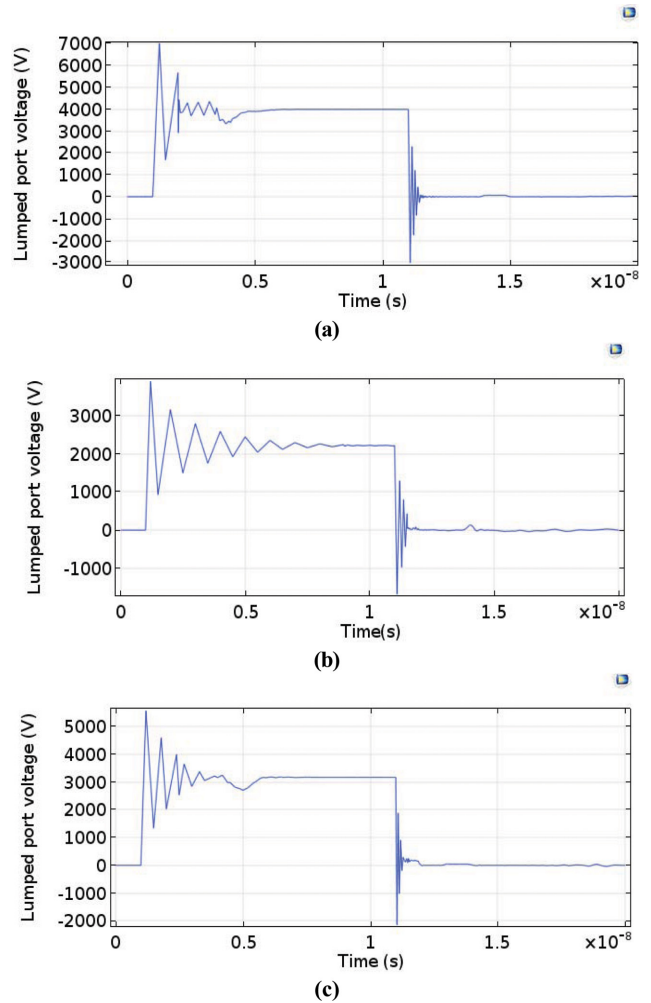


Fig. 4. (Color online) Observed input pulse waveform according to the port characteristic impedance setting. (a) $Z_0 = 38.49 \Omega$ (b) $Z_0 = 100 \Omega$ (c) $Z_0 = 58.71 \Omega$

원기둥 형상으로 모델링하였으며 그 물질상수는 비유전율 $\epsilon_r = 2.3$, 도전율 $\sigma = 1 \times 10^{-15}$ S/m으로 설정하였다[4]. 케이블 내부와 외부 도체는 XLPE 절연층 안쪽 면과 바깥쪽 면에 PEC(Perfect Electric Conductor) 경계조건을 적용하여 모델링하였다. 또한 케이블의 전체 길이는 10m로 하고 수트리가 케이블 중앙에 위치한다고 가정하였으며 수트리의 비유전율은 $\epsilon_r = 4$, 도전율은 XLPE 보다 10^{10} 배 큰 1×10^{-5} S/m로

설정하였다[5, 6]. 케이블 모델링에 쓰인 각 제원들을 정리하면 Table I과 같다.

펄스와 입력 포트는 특성 임피던스를 갖는 전압원 포트 로 설정하였다. 특성 임피던스 Z_o 는 입력단의 전압과 전류의 비에 의해 결정되며 동축 케이블의 경우 식(4)로 표현된다[8].

$$Z_o = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \quad (4)$$

여기서 ϵ_r 은 케이블 유전체의 비유전율, r_o , r_i 는 각각 유전체의 외경과 내경을 나타낸다. 특성 임피던스 값을 적절하게 설정하지 않으면 입력 펄스와 반사파의 크기가 부정확하게 계산된다. Fig. 4는 입력 펄스의 크기를 4 kV로 설정한 경우 다양한 특성 임피던스의 크기에 대해 실제로 입력단에서 관찰되는 펄스파의 크기를 보여준다. Fig. 4(a)와 같이 XLPE의 비유전율과 외경 및 내경을 고려하여 특성 임피던스를 $Z_o = 38.49 \Omega$ 로 정확하게 설정할 경우 입력 펄스의 크기는 설정값 4 kV와 거의 일치한다. 그러나 Fig. 4(b), 4(c)와 같이 $Z_o = 100 \Omega$, $Z_o = 58.71 \Omega$ 등 임의의 부정확한 값으로 특성 임피던스를 설정하면 입력 펄스파의 크기가 각각 약 2 kV, 3.1 kV로 관찰되며 입력 펄스가 완전하게 전달되지 못하는 것을 확인할 수 있다.

마지막으로 케이블 종단은 개방 조건을 나타내는 PMC (Perfect Magnetic Conductor) 경계조건으로 설정하였다.

4. 수트리 모델링

수트리는 케이블 유전체 내부의 불순물이 존재하는 위치나 표면의 손상부에서 물과 전계의 복합적인 작용으로 인하여 나뭇가지 형상으로 결함이 진행되는 현상을 말한다. 수분에 의해 수트리가 절연체의 미소공간을 따라 진행되면 케이블 내부와 외부 도체 사이에 통전채널이 형성되고 부분방전으로 전이되어 최종적으로 케이블 절연과피의 원인이 될 수 있다[9].

본 논문에서는 수트리가 케이블 바깥쪽에서 안쪽 방향으로 형성되어있고 하나의 수트리가 유전체 영역에서 일정한 중심각과 침투 깊이 및 축방향 길이를 갖는 것으로 가정하고 모델링하였다. 또한 케이블에서 수트리의 위치는 길이 10 m의 케이블에서 축방향으로 중심에 위치하고 있는 것으로 가정하였다. 수트리의 모델링 파라미터는 중심각, 침투 깊이, 축방향 길이, 수트리와 접촉하고 있는 내부/외부 도체의 상태(도체유지 또는 개방조건) 등이며 다양한 파라미터에 대해 수트리를 모델링하고 반사되는 펄스파의 특성을 분석하였다. Table II에 본 논문에서 고려한 수트리의 모델링 파라미터를 정리하였다. Table II에서 중심각이 90°, 180°인 경우는 3D로 모델

Table II. Various parameters for modeling of water tree.

Water tree parameter	values
Central angle (°)	90, 180, 360
Penetration depth (% of XLPE thickness)	30 %, 50 %, 70 %, 100 %
Water tree axial length (mm)	7, 70, 150, 300, 500, 1000
Boundary condition of inner/outer conductor touching water tree	PEC (conductor intact), PMC (conductor removed)

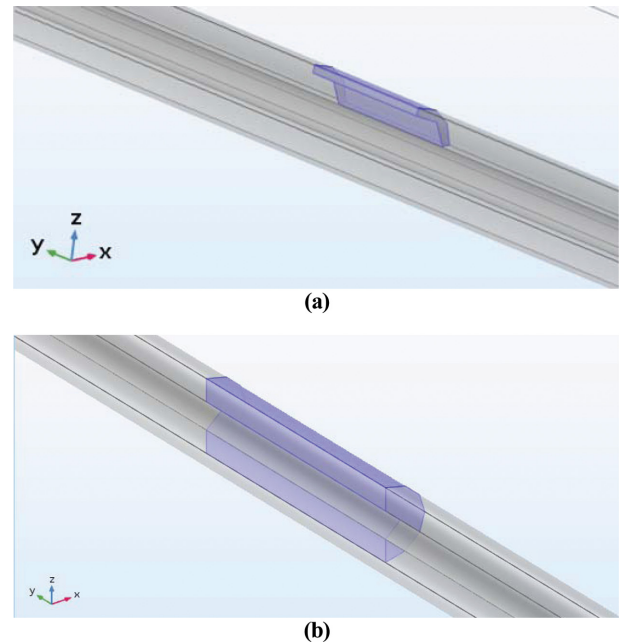


Fig. 5. (Color online) 3D modeling of water trees. (a) Central angle: 90°, penetration depth: 70 %, length: 70 mm. (b) Central angle: 180°, penetration depth: 100 %, length: 150 mm.

링하였으며 중심각이 360°인 경우는 모델 전체가 축대칭이므로 축대칭 모델을 이용해 해석 시간을 단축하였다. 또한 Table II에서 침투 깊이는 XLPE 유전체의 두께 대비 %로 표시하였으며 100 %인 경우는 내부 도체와 외부 도체가 수트리로 연결된 상태이다. 수트리와 접촉하고 있는 내부 또는 외부 도체의 상태는 PEC(Perfect Electric Conductor) 또는 PMC(Perfect Magnetic Conductor) 경계조건을 이용하여 설정하였다. PEC 조건을 설정한 경우 도체는 결함 없이 온전히 유지되고 있는 상태이며 PMC 조건을 설정한 경우는 수트리와 접촉하고 있는 도체가 손상되거나 벗겨져 해당 부분은 전기적으로 개방된 상태를 의미한다.

Fig. 5에 일부 파라미터에 대해 모델링한 수트리의 형상을 나타내었다. Fig. 5(a)는 중심각 90°, 침투깊이 70 %, 길이 70 mm, Fig. 5(b)는 중심각 180°, 침투깊이 100 %, 길이 150 mm일 때 모델링한 수트리의 형상이다.

III. 수트리에 의한 펄스 반사파 특성 분석

1. 축대칭 케이블 모델 TDR 분석

케이블의 절연체 XLPE가 중심각 360°의 수트리에 의해 열화된 경우를 가정한 경우 케이블 모델링에 축대칭을 적용하여 해석시간을 단축할 수 있다. 축대칭 모델의 경우 수트리와 접촉하고 있는 내부 또는 외부 도체의 경계조건을 PMC로 설정할 경우 도체가 완전히 제거되어 단절된 상태를

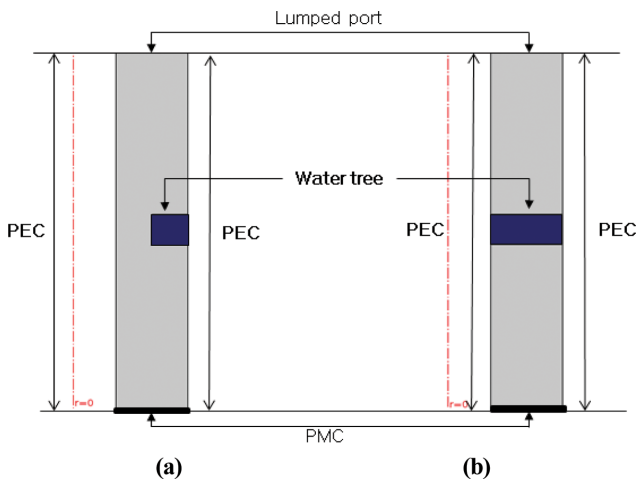


Fig. 6. (Color online) Axisymmetric modeling of water trees. (a) Penetration depth: 50 %. (b) Penetration depth: 100 %.

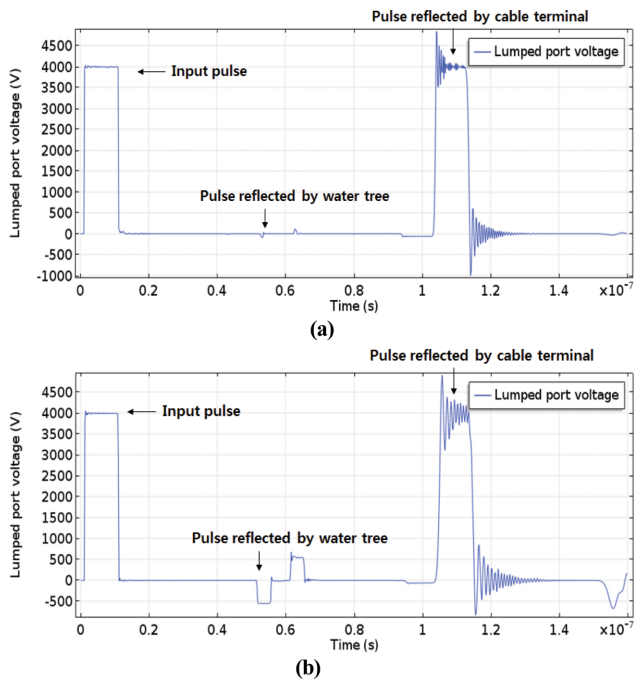


Fig. 7. (Color online) Reflected pulse waveform for various water tree parameters (axisymmetric model). (a) Penetration depth: 30 %, length: 70 mm. (b) Penetration depth: 100 %, length: 300 mm.

의미하므로 PEC 경계조건만 고려하였다. Fig. 6에 수트리의 중심각 360°, 침투깊이가 50 %인 모델과 100 %인 모델을 비교하여 나타내었다.

Fig. 7에 수트리의 침투깊이와 길이가 각각 30 %, 70 mm인 경우와 100 %, 300 mm인 경우에 입력단에서 관측되는 펄스 파형을 비교하여 나타내었다. 두 경우 모두 50 ns 부근에서 반사파가 관측되며 수트리의 침투깊이가 깊어지고 길이가 길어지는 경우 반사파의 크기가 더 커지는 것을 확인할 수 있다.

다양한 침투깊이와 축방향 길이를 갖는 수트리에 대해 반사된 펄스의 RMS 값을 식(3)을 이용해 계산하면 Fig. 8의 그래프로 나타낼 수 있다. 수트리의 침투깊이가 깊어지고, 길이가 길어질수록 반사파의 RMS 값이 커지는 것을 확인할 수 있으며 수트리의 길이가 500 mm를 넘어가는 경우 RMS 값의 증가폭은 감소한다.

축대칭 모델의 경우 회전축을 중심으로 360°에 걸쳐 수트리가 있기 때문에 3D 모델에 비해 반사파의 시작 시점을 명확하게 관측할 수 있다. 2장에서 설명한 TDR 기법과 식(2)를 적용하여 수트리 경계면의 위치를 계산하고 실제 모델링한 수트리의 위치와 비교하여 절대 위치와 상대 오차를 분석하면 Table III과 같다. 대부분의 경우 TDR 기법으로 계산한 수트리 위치의 오차는 3 % 내외인 것으로 나타났다.

2. 3D 케이블 모델 TDR 분석

수트리의 중심각이 90°, 또는 180° 일 때는 축대칭 모델링을 쓸 수 없으며 이 경우 수트리를 포함한 전체 케이블을 3D로 모델링하였다. 3D 모델의 경우 수트리의 침투 깊이는 30 %, 50 %, 70 %, 100 %, 축방향 길이는 7 mm, 70 mm, 150 mm인 경우에 대해 고려하였다. 또한 수트리와 접촉하고

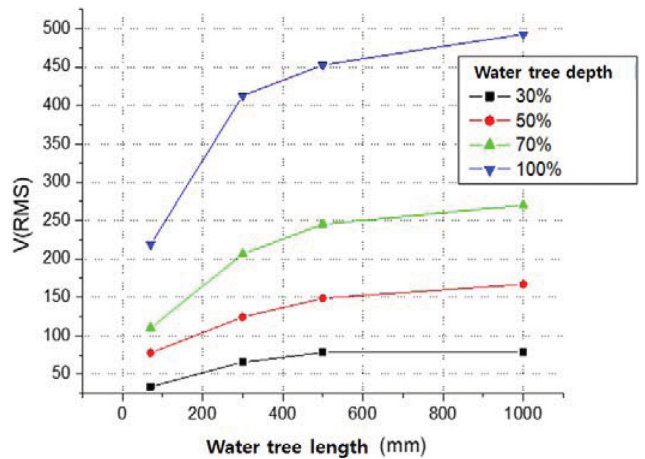


Fig. 8. (Color online) Plot of RMS values of reflected pulse waveforms (axisymmetric model).

Table III. Water tree location and relative error for axisymmetric cable model.

Water tree parameters	Water tree location (TDR)	Water tree location (actual model)	Relative error
Depth: 30% Length: 70 mm	5.1193 m	4.965 m	3.1 %
Depth: 30 % Length: 300 mm	5.0092 m	4.85 m	3.3 %
Depth: 30 % Length: 500 mm	4.8913 m	4.75 m	3 %
Depth: 30 % Length: 1000 mm	4.6513 m	4.5 m	3.4 %
Depth: 50 % Length: 70 mm	5.0486 m	4.965 m	1.7 %
Depth: 50 % Length: 300 mm	4.998 m	4.85 m	3.1 %
Depth: 50 % Length: 500 mm	4.894 m	4.75 m	3 %
Depth: 50 % Length: 1000 mm	4.6332 m	4.5 m	3 %
Depth: 70 % Length: 70 mm	5.1144 m	4.965 m	3 %
Depth: 70 % Length: 300 mm	5.0079 m	4.85 m	3.3 %
Depth: 70 % Length: 500 mm	4.9 m	4.75 m	3.2 %
Depth: 70 % Length: 1000 mm	4.6389 m	4.5 m	3.1 %
Depth: 100 % Length: 70 mm	5.1058 m	4.965 m	2.8 %
Depth: 100 % Length: 300 mm	5.0029 m	4.85 m	3.2 %
Depth: 100 % Length: 500 mm	4.8912 m	4.75 m	3 %
Depth: 100 % Length: 1000 mm	4.6391 m	4.5 m	3.1 %

있는 내부 또는 외부 도체의 경계조건은 해당 위치의 도체가 제거된 PMC 경계조건, 또는 도체가 손상되지 않은 PEC 경계조건으로 각각 설정하고 시뮬레이션을 진행하였다.

PEC 경계조건에 대해 다양한 중심각과 침투깊이를 갖는 수트리에 의해 반사된 펄스 파형이 Fig. 9에 나와있다. 수트리의 축방향 길이가 7 mm인 경우는 반사파의 크기가 너무 작아 식별이 어려웠으며 길이가 150 mm인 경우만 그림에 나타내었다. 3D 모델의 경우 펄스 파형에 수치적 노이즈가 발생하여 반사파의 시작 시점을 명확하게 구별하기 어려운 것을 확인할 수 있다.

PEC 경계조건을 이용한 3D 케이블 모델에서 다양한 침투

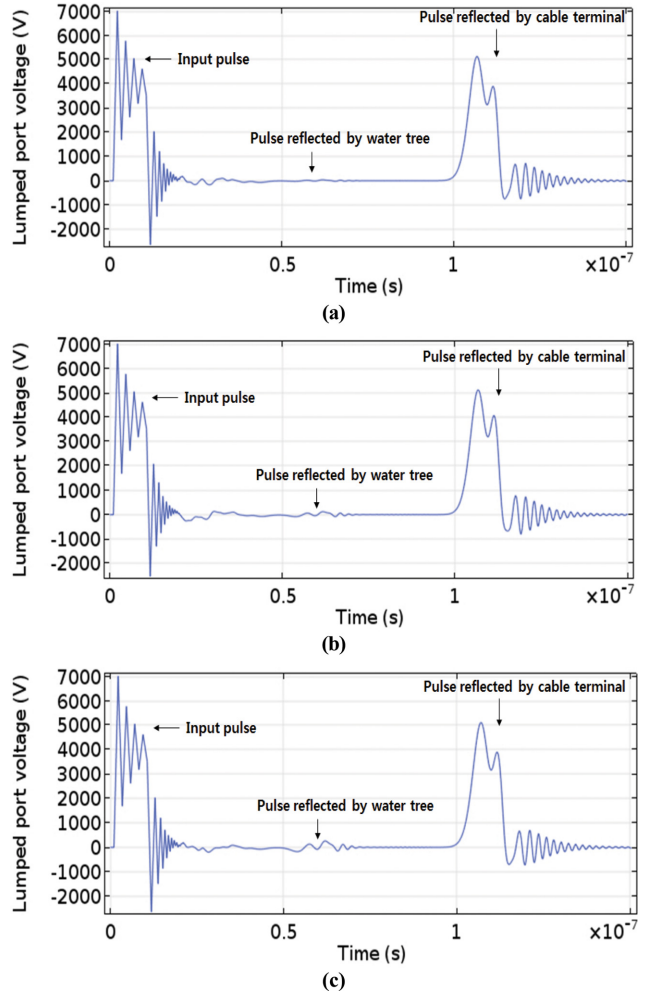


Fig. 9. (Color online) Reflected pulse waveform for various water tree parameters (3D model, PEC boundary condition). (a) Central angle: 90°, penetration depth: 50 %, length: 150 mm. (b) Central angle: 180°, penetration depth: 70 %, length: 150 mm. (c) Central angle: 180°, penetration depth: 100 %, length: 150 mm.

깊이와 축방향 길이를 갖는 수트리에 의해 반사된 펄스의 시작 시점을 Fig. 3과 같이 확인하고 그 RMS 값을 식(3)을 이용해 계산하면 Fig. 10의 그래프로 나타낼 수 있다. 축대칭 모델과 마찬가지로 수트리의 침투깊이가 깊어지고, 길이가 길어질수록 반사파의 RMS 값이 커지는 것을 확인할 수 있으며 수트리의 침투 깊이가 얇은 경우 축방향 길이가 긴 경우에도 반사파의 RMS 값은 크게 증가하지 않았다. PEC 경계조건에서 수트리의 중심각 90°, 침투깊이가 30 %인 경우는 수트리의 축방향 길이가 긴 경우에도 반사파 확인이 불가능했다.

수트리와 접촉하는 일부 도체가 제거된 상태를 나타내는 PMC 경계조건을 이용한 경우 다양한 침투깊이와 축방향 길이를 갖는 수트리에 의해 반사된 펄스 파형이 Fig. 11에 나와있다. 그리고 PMC 경계조건 모델에서 식(3)을 이용해 계

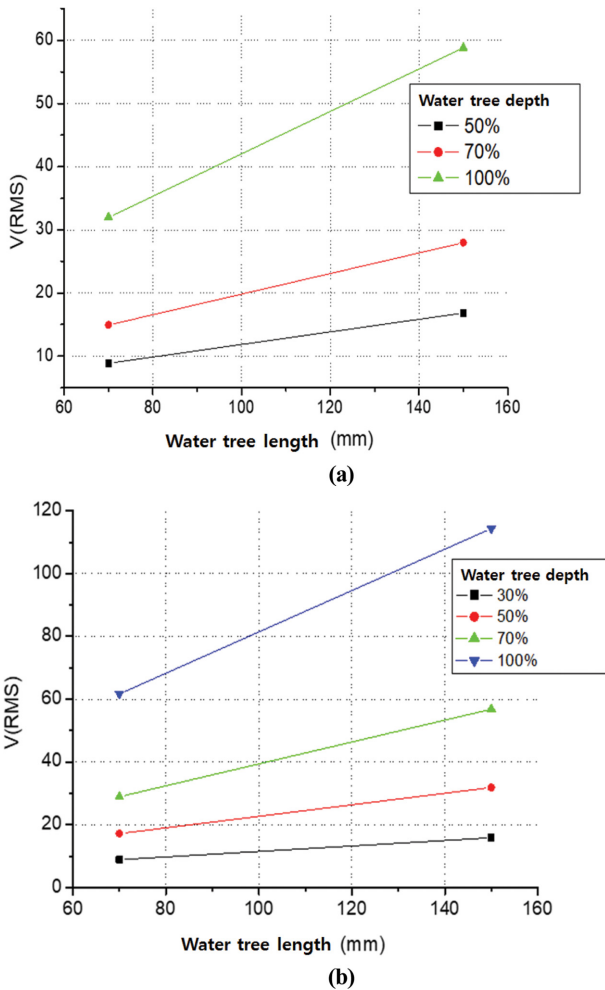


Fig. 10. (Color online) Plot of RMS values of reflected pulse waveforms (3D model, PEC boundary condition). (a) Central angle: 90°. (b) Central angle: 180°.

산한 펄스 반사파의 RMS 값을 Fig. 12에 나타내었다.

Fig. 11과 Fig. 12에서 수트리와 접촉하고 있는 도체가 손상되거나 제거된 PMC 경계조건을 사용했을 때 동일한 수트리의 형상을 갖는 PEC 경계조건보다 반사파의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 PMC 경계조건인 경우에도 수트리의 축방향 길이가 7 mm인 경우는 반사파의 식별이 어려웠다. 한 가지 특이한 사항은 Fig. 12를 보면 PMC 경계조건인 경우 수트리의 침투 깊이가 30%에서 70%까지 증가하면 반사파의 RMS 값이 조금씩 감소하다가 침투 깊이가 100%까지 증가하면 다시 반사파의 RMS 값도 크게 증가하는 것으로 관찰되었다. 이는 수트리의 중심각이 90°, 180°인 경우 모두 발생하며 도체가 제거된 PMC 경계조건이 수트리와 접촉하는 일부 중심각의 경계에만 적용되어 반사파가 불규칙적으로 발생하며 일어나는 현상으로 추측된다.

3D 모델의 경우 불규칙한 반사파와 수치적 노이즈 발생으

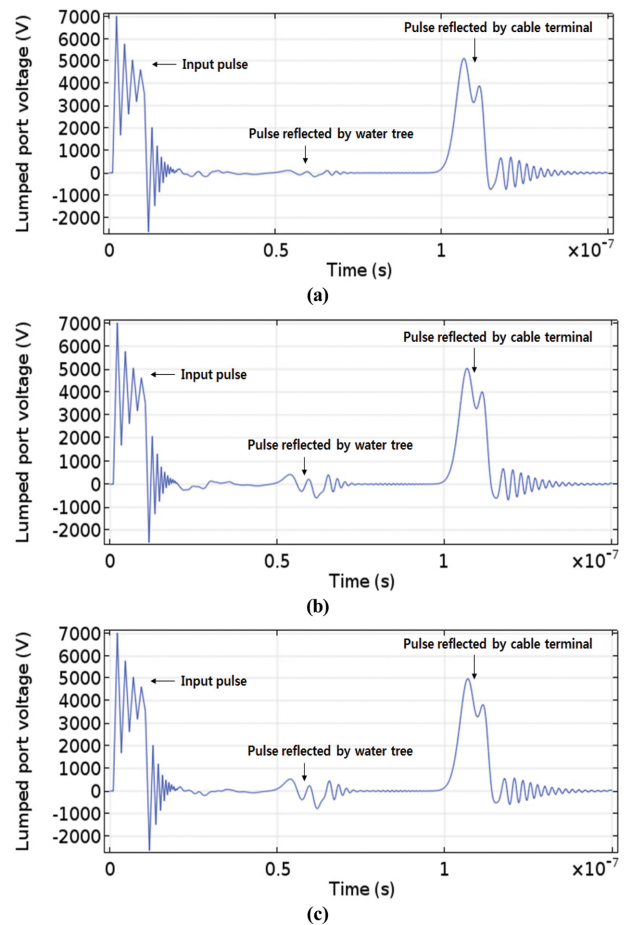


Fig. 11. (Color online) Reflected pulse waveform for various water tree parameters (3D model, PMC boundary condition). (a) Central angle: 90°, penetration depth: 50%, length: 150 mm. (b) Central angle: 180°, penetration depth: 70%, length: 150 mm. (c) Central angle: 180°, penetration depth: 100%, length: 150 mm.

로 펄스 반사파의 시작 시점을 명확히 관측하는 것이 어렵다. 수트리의 중심각이 각각 90°, 180°인 PEC 경계조건 적용 모델에 대해 Fig. 3과 식(2)를 적용하여 수트리 경계면의 위치 l_w 를 계산하고 실제 위치와 비교하여 TDR 기법의 상대 오차를 분석하면 각각 Table IV, V과 같다. 중심각이 90°, 180°인 경우 모두 3D 모델에서 계산한 수트리 위치의 오차는 축대칭 모델보다 큰 10% 내외인 것으로 나타났으며 그 이유는 Fig. 3을 이용하여 결정한 반사파의 시작시점이 실제보다 지연되기 때문인 것으로 추측된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 전력 케이블에서 발생하는 수트리의 탐지를 위해 수치해석 기반의 TDR 기법을 적용하여 다양한 형태의 수트리를 모델링하고 그에 따른 펄스 반사파의 특성을 분석

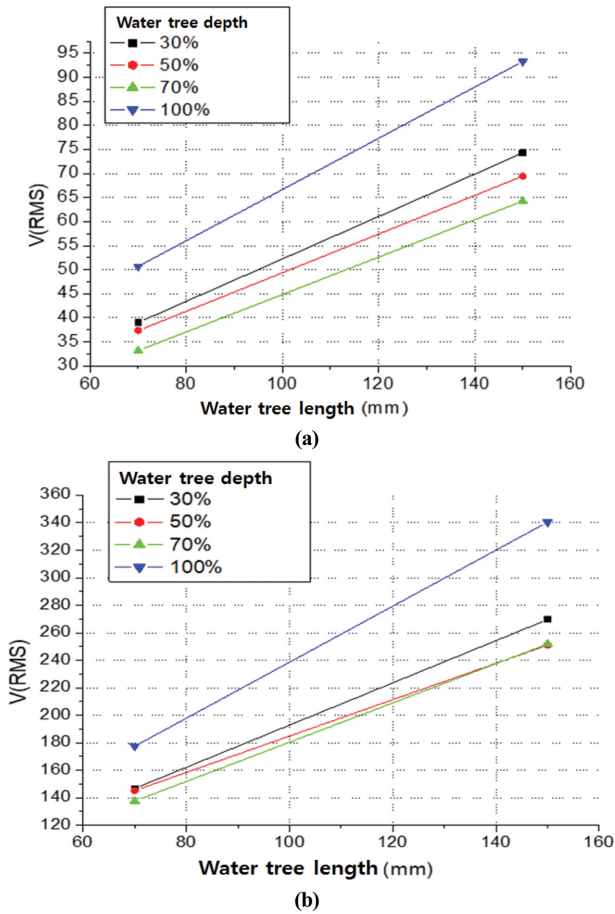


Fig. 12. (Color online) Plot of RMS values of reflected pulse waveforms (3D model, PMC boundary condition). (a) Central angle: 90°. (b) Central angle: 180°.

Table IV. Water tree location and relative error for 3D cable model with water tree central angle of 90°.

Water tree parameters	Water tree location (TDR)	Water tree location (Actual model)	Relative error
Depth: 50 % Length: 70 mm	5.4615 m	4.965 m	10 %
Depth: 50 % Length: 150 mm	5.4535 m	4.925 m	10.7 %
Depth: 70 % Length: 70 mm	5.4544 m	4.965 m	9.9 %
Depth: 70 % Length: 150 mm	5.4497 m	4.925 m	10.7 %
Depth: 100 % Length: 70 mm	5.4587 m	4.965 m	9.9 %
Depth: 100 % Length: 150 mm	5.4581 m	4.925 m	10.8 %

하였다. 전반적으로 수트리의 회전각과 침투깊이, 길이가 커짐에 따라 반사파의 RMS 값이 증가하였다. 또한 수트리와

Table V. Water tree location and relative error for 3D cable model with water tree central angle of 180°.

Water tree parameters	Water tree location (TDR)	Water tree location (Actual model)	Relative error
Depth: 50 % Length: 70 mm	5.4611 m	4.965 m	10 %
Depth: 50 % Length: 150 mm	5.4625 m	4.925 m	10.9 %
Depth: 70 % Length: 70 mm	5.4558 m	4.965 m	9.9 %
Depth: 70 % Length: 150 mm	5.4546 m	4.925 m	10.8 %
Depth: 100 % Length: 70 mm	5.4783 m	4.965 m	10.3 %
Depth: 100 % Length: 150 mm	5.4605 m	4.925 m	10.9 %

접촉하고 있는 도체가 제거되거나 손상된 경우를 나타내는 PMC 경계조건의 경우 도체가 그대로 유지되고 있는 PEC 경계조건에 비해 반사파의 크기가 증가하였으며, PMC 경계조건을 적용한 일부 구간에서는 수트리의 침투 깊이가 증가할수록 반사파의 RMS 값이 감소하는 경향을 볼 수 있었다. 시뮬레이션 결과에서 관측되는 반사파의 시작 시점을 이용하여 수트리의 위치를 계산한 결과 축대칭 모델에서는 3 % 내외, 3D 모델에서는 10 % 내외의 오차가 발생하였다. 이는 반사파의 시작 시점 기준을 최대값의 10 % 지점으로 지정했기 때문에 발생하는 오차로 추정되며 관측되는 반사파의 시작 시점 기준을 변경하여 오차를 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 중심각, 침투깊이, 축방향 길이가 매우 작은 일부 수트리에 대해서는 반사파를 확인할 수 없었으며 이는 TDR 기법의 한계로 볼 수 있다. 본 논문에서는 수치해석을 활용하여 TDR 기법을 이용한 전력 케이블 수트리 진단 기술의 타당성을 검토하였으며 향후 펄스파 발생장치와 연결한 케이블의 실측 데이터를 이용한 TDR 기법의 검증 및 아주 작은 수트리까지 정밀하게 탐지할 수 있는 FDR(Frequency Domain Reflectometry), JTFDR(Joint Time-Frequency Domain Reflectometry) 등의 진단기법에 대한 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 2017년 착수 사외공모 기초연구(개별)에 의해 지원되었음(과제번호: R17XA05-39).

References

[1] J. Wang, P. E. C. Stone, Y.-J. Shin, R. A. Dougal, IET Signal

- Processing **4**, 395 (2010).
- [2] J.-H. Choi, J. KSME **53**, 24 (2013).
- [3] K. W. Burkes, E. B. Makram, and R. Hadidi, IEEE Power Energy Technol. Syst. J. **2**, 53 (2015).
- [4] K. W. Burkes, Proceedings of the 2016 COMSOL Conference in Boston (2016).
- [5] K. W. Burkes, E. Makram, and R. Hadidi, Proceedings of the 2016 COMSOL Conference in Boston (2016).
- [6] M. Alsharif, P. A. Wallace, D. M. Hepburn, and C. Zhou, Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Milan (2012).
- [7] Technical Standards of KEPCO, ES-6145-0025 (2017).
- [8] D. M. Pozar, Microwave Engineering, 2nd Edition, Wiley, New York (1998).
- [9] K.-S. Hwang, J. Electrical World Monthly Magazine **427**, 65 (2012).