

Verification of a Computer Simulation based on the Pulse Propagation Characteristics for Detection of Water Trees in Power Cables

Jongsu Lim, Jaegyong Mun, Byungsu Kang, and Dong-Hun Kim*

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

Jin-Kyu Byun

Department of Electrical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, 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 25 May 2019, Revised in final form 19 June 2019, Accepted 19 June 2019)

In this paper, a finite element simulation using time domain reflectometry for detection of water trees in power cables is verified through an experimental test. For the purpose of doing this, a diagnostic pulse generator which can be internally charged up to a maximum voltage of 5 kV is first produced, and then the experimental setup equivalent to simulation conditions is realized. In order to examine simulation results, two-type artificial defects are created for a 6.6 kV distribution power cable, and reflected pulse signals are measured on each individual case. Finally, the validity of computer simulation for detection of water trees in power cables based on the pulse propagation characteristics is proved through a comparative analysis between simulated and experimental data of the concerned cable with and without the defect.

Keywords : finite element analysis, power cable diagnosis, pulse propagation, time domain reflectometry, water tree

전력 케이블의 수트리 탐지를 위한 펄스 전파 특성법 기반 모의실험의 타당성 검증

임종수 · 문재경 · 강병수 · 김동훈*

경북대학교 전기공학과, 대구시 북구 대학로 80, 41566

변진규

승실대학교 전기공학과, 서울시 동작구 상도로 369, 06978

황보승

호남대학교 미래자동차공학부, 광주시 광산구 어등대로 417, 62399

이동영

위덕대학교 에너지전기공학부, 경주시 강동면 동해대로 261, 38004

(2019년 5월 25일 받음, 2019년 6월 19일 최종수정본 받음, 2019년 6월 19일 게재확정)

본 논문에서는 전력 케이블의 수트리 탐지를 위한 시간 영역 반사법을 이용한 유한요소 모의실험의 타당성을 케이블 실험을 통해 검증하였다. 이를 위하여 내부 충전방식을 이용한 최대 5 kV의 펄스전압 크기를 발생시킬 수 있는 진단펄스 발생기를 제작하고 모의실험과 가급적 동등한 실험환경을 구축하였다. 수트리 탐지를 위한 모의실험 결과를 검증하기 위하여 6.6 kV 배전용 전력 케이블을 대상으로 두 가지 형태의 모의결합을 인위적으로 생성시켜 진단펄스의 반사파를 측정하였다. 대상 케이블의 모의결합 유무에 따른 모의실험과 실험 데이터의 비교분석을 통해 전력 케이블의 수트리 탐지를 위한 펄스 전파 특성법을 이용한 유한요소 모의실험의 타당성을 확인하였다.

주제어 : 유한요소법, 전력 케이블 진단, 펄스 전파, 시간 영역 반사법, 수트리

I. 서 론

대부분의 케이블 결함은 전기적, 기계적, 열적, 그리고 화학적 스트레스로 인해 발생하며, 배전용 케이블의 경우 설치 10년 후부터 절연체의 열화가 시작된다. 케이블 결함 중 수트리(water tree)는 케이블 절연체 내에 수분이 포함된 결함이나 불순물이 있는 곳에서 천천히 진행되는 대표적인 열화 현상 중 하나이다. 케이블에서 발생하는 열에 의해 절연체의 화학적 성분과 물리적 형태가 변하여 절연체 내 수트리의 형성과 성장이 촉진된다. 수트리의 발생으로 인한 전력 케이블의 고장은 정전을 야기하며, 이는 수리 및 복구에 큰 경제적 비용을 초래한다. 따라서 전력 케이블의 절연체 내에 형성되어 진행되는 수트리와 같은 케이블 결함을 검출할 수 있는 효율적이고 정확한 케이블 진단기술의 개발이 요구된다[1].

현재 상용화되어 있거나 개발 중인 전력 케이블 활선 진단 장치는 대부분 부분방전(partial discharge; 이하 PD) 측정법을 이용하고 있다. 그러나 PD 측정법은 케이블의 주 절연층에 대해서는 높은 신뢰도를 제공하기 어려운 단점이 있다[2]. 반면, 케이블 내 펄스 전파특성을 분석하는 시간 영역반사(time domain reflectometry; 이하 TDR) 기법은 케이블에 진단펄스를 인가하고, 케이블 내에 수트리 등의 결함에 의해 발생하는 임피던스의 불연속인 지점에서 발생하는 반사파를 시간 영역에서 분석하는 기법이다. 이러한 TDR 기법을 이용하여 전력 케이블의 주 절연층에서 형성되고 성장하는 수트리 결함을 진단하는 기술이 국외에서 시도되고 있다[3].

한편, 국내에서도 펄스전파 특성법을 이용한 전력케이블 진단 기술의 가능성을 검토를 위해 수치해석을 기반으로 한 TDR 기법을 적용한 연구가 진행되었다[4]. 기존 연구에서는 전력 케이블과 수트리의 유한요소 모델링을 이용하여 시간영역에서 과도상태 해석을 수행하여 펄스파의 전파 특성을 분석하는 모의실험을 수행하였다. 또한, 모의실험 결과로부터 진단 펄스의 반사파로부터 케이블 내에 형성된 수트리 위치를 검출하고, 수트리의 진행도에 따라 반사파의 크기가 영향을 받는다는 사실을 확인하였다. 그러나 이러한 모의실험에 적용한 기법의 실제 전력 케이블 내에 형성된 수트리 결함 탐지 가능성을 확인하기 위해서는 실험 데이터를 통한 검증 연구

가 요구된다.

따라서, 본 논문에서는 전력 케이블 내 수트리 탐지를 위해 수행된 TDR 기법을 적용한 수치해석 기반의 모의실험 결과의 타당성을 검증하기 위하여 가능한 모의실험과 동일한 실험조건을 구축하였다. 우선 내부 충전방식을 이용한 최대 5 kV의 펄스전압 크기와 수십 ns의 펄스폭을 발생할 수 있는 진단펄스 발생기를 제작하였다. 실제 케이블 내 형성된 수트리 형상을 수리적으로 모델링하는 것은 불가능하므로 모의실험에 적용한 TDR 기법의 정확도를 검증하기 위해서 배전용 6.6 kV 전력 케이블을 대상으로 두 가지 형태의 모의결합을 인위적으로 생성시켜 진단펄스 반사파를 측정하였다. 대상 전력 케이블의 모의결합 유무에 따른 모의실험과 실험 데이터의 비교분석을 통해 전력 케이블의 수트리 탐지를 위한 TDR 기법의 유효성을 확인하였다.

II. 전력 케이블 모의실험

1. 수치해석 기법

전력 케이블의 열화 특성 분석을 위해 기본적인 형태의 수트리를 모델링하고 인가된 진단 펄스의 반사 파형을 전자기(electromagnetic) 수치해석을 통해 분석하였다. 진단 펄스파의 전파를 시간 영역에서 모의실험을 수행하기 위하여 COMSOL Multiphysics Ver 5.3a 소프트웨어의 RF 모듈을 사용하였다[5,6]. 자기 벡터 포텐셜을 상태변수로 사용하는 전자기 시스템의 지배 방정식은 맥스웰(Maxwell) 방정식으로부터 식(1)과 같이 유도할 수 있다.

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} (\nabla \times \vec{A})) + \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}) = 0 \quad (1)$$

여기서 \vec{A} 는 자기 벡터 포텐셜이며, σ 는 도전율, μ_r 과 μ_0 는 각각 비투자율과 공기 중 투자율, ϵ_r 과 ϵ_0 은 비유전율과 공기 중 유전율이다.

TDR 기법은 케이블에 펄스파를 인가하고 진행파와 반사파의 측정, 분석을 통해 케이블의 열화특성을 진단하는 방법이다[7,8]. 진행파가 케이블에 인가되면 케이블의 종단이나 임피던스가 다른 부분 즉 매질의 물질특성이 다른 부분에서 반

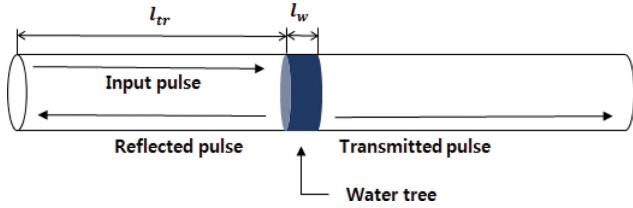


Fig. 1. (Color online) Propagation path of input and reflected pulse.

사가 일어나게 된다. 진단 펄스파의 진행속도를 기반으로 인가 시간과 반사파가 돌아온 시간을 측정하게 되면 케이블 내의 매질이 불연속적인 부분을 유추할 수 있다[3]. 절연체와 절연체 내에 형성된 수트리 영역은 매질 특성의 불연속이 발생함으로 이를 이용하면 케이블 내에 발생한 수트리의 위치를 파악할 수 있다. Fig. 1에서 인가된 진단 펄스파가 수트리 부분에서 투과되는 파와 반사되어 돌아오는 파의 경로를 도식적으로 표현하고 있다.

2. 유한요소 모델링

유한요소 모델링에 사용된 케이블의 규격은 도체 외경 14.4 mm, 절연체 외경 24.8 mm이고 축 방향 길이는 10 m로 설정하였다. 절연체의 외부와 내부 경계에는 도체가 존재하는 것을 가정하여 식(2)와 같은 완전 전기 도체(perfect electric conductor; 이하 PEC) 경계조건을 설정하였다.

$$\hat{n} \times \vec{E} = 0 \tag{2}$$

여기서 \hat{n} 은 경계면의 단위법선벡터, \vec{E} 는 전기장 벡터이다. 식(2)는 경계면에서 전기장의 접선성분이 0임을 의미한다. PEC 경계조건은 손실이 없는 도체면 경계에서 사용된다.

한편, 케이블의 종단과 모의결함에 의해 케이블 일부만이 제

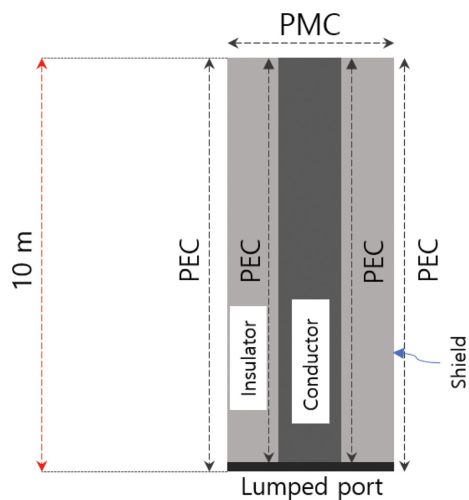


Fig. 2. (Color online) Finite element modeling of a power cable.

Table I. Cable specification for the simulation and measurement.

Parameter	
Capacity	6.6 kV 1C
Conductor cross-sectional area (mm ²)	150
Insulation material outer diameter (mm)	24.8
Conductor outer diameter (mm)	14.4
Cable length (m)	10
Insulation material (XLPE) relative permittivity (ϵ_r)	2.3
Insulation material (XLPE) conductivity (σ) (S/m)	1×10^{-15}

거된 절연체의 외부 경계조건은 개방 조건을 고려하여 완전 자기 도체(perfect magnetic conductor; 이하 PMC) 경계조건으로 부여하였다. PMC 경계조건은 식(3)과 같이 표현된다.

$$\hat{n} \times \vec{H} = 0 \tag{3}$$

여기서 \vec{H} 는 자기장 벡터이다. PMC 경계조건에서는 자기장의 접선 성분과 표면전류밀도가 0이다. 이는 높은 임피던스를 가지는 경계면으로 사용될 수 있으며, 개방된 상태를 나타내는 조건이라고 볼 수 있다.

Fig. 2에는 내부 도체, 절연체, 외부 차폐층으로 구성된 모의 결함에 없는 기본 케이블의 축 방향 모델링의 단면형상과 이때 전자장 수치해석을 위해 부여된 경계조건을 나타낸다. Table I에서 모의실험과 실제 케이블 실험에 쓰인 6.6 kV 배전용 전력 케이블 규격을 제시하였다[9].

III. 진단펄스 발생기와 실험장치 구성

1. 진단 펄스 발생기

진단 펄스 발생기는 Fig. 3과 같이 케이블 형태의 내부 도체를 충방전하는 방식으로 설계되었다. 진단 펄스 발생기의 특성 임피던스는 50 Ω이며 수은 스위치 단락 시 내부 도체에 충전된 전하가 빠져나가는 현상을 이용하였다. Fig. 3에서 출력 펄스의 크기는 내부 도체의 충전 전압 V의 절반이고 펄스폭은 케이블 길이 l 과 펄스전파 속도 v 에 의해 결정된다.

Fig. 4에서는 리드릴레이 스위치, 스위칭 회로, 전원 공급

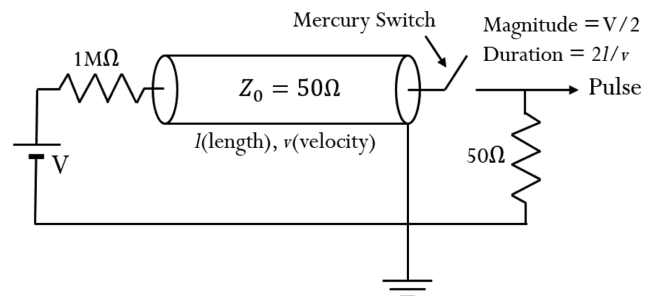


Fig. 3. Schematic diagram of a diagnostic pulse generator.

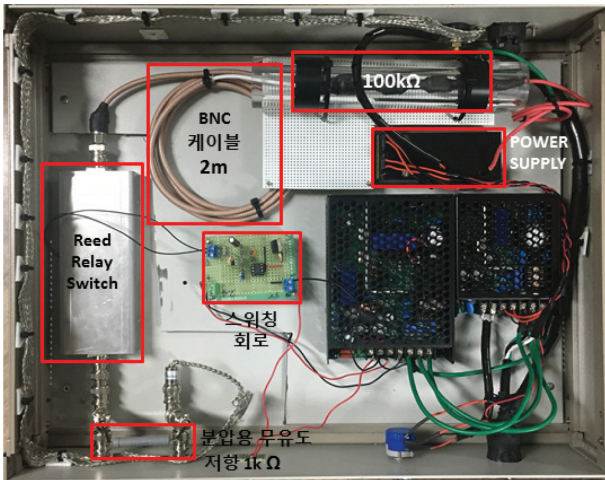


Fig. 4. (Color online) A diagnostic pulse generator and its components.

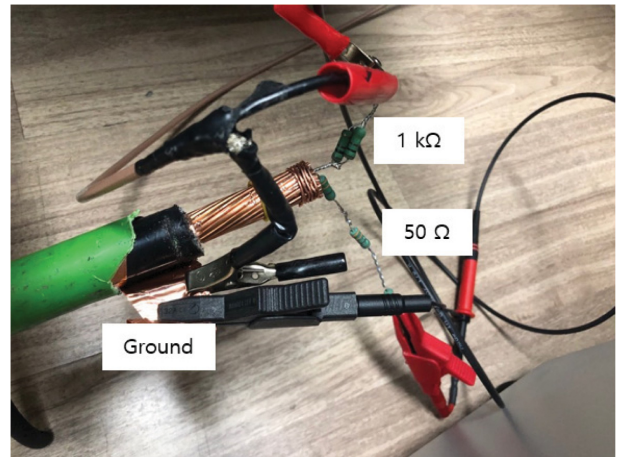


Fig. 7. (Color online) A photograph of electrical connections at the input terminal of a cable.



Fig. 5. (Color online) Output pulse waveform produced by a pulse generator.

장치, BNC케이블 등으로 구성된 제작된 내부 충전방식의 진단 펄스 발생기 내부이다. 리드릴레이 스위치를 동작하는 스위칭 회로는 226 Hz의 주파수, 2.4:7.6의 듀티(duty) 값, 9 ms의 온 시간(on-time)을 갖도록 설계되었으며 스위치 회로 동작을 위해 전원공급기의 5 V를 이용하여 24 V의 신호가 출력 되도록 제작하였다. Fig. 4의 진단펄스 발생기는 0~5 kV의 전압 크기를 갖는 단 펄스의 출력이 가능하고 내부에 설치된 BNC 케이블의 교체를 통해 진단 펄스의 폭 조절이 가능하다.

Fig. 5는 제작한 진단펄스 발생기의 출력을 분압하여 출력시킨 8.8 ns의 펄스폭을 갖는 트리거 신호이다. 1 kΩ의 무유도 저항과 감쇠기를 사용하여 40:1로 분압하여 오실로스코프에서는 25.5 V가 측정되었다. 이는 실제 펄스 발생기의 내부 도체에 충전된 전압은 2 kV이며 출력된 단 펄스의 크기는 절반인 1 kV임을 의미한다.

2. 실험장치

케이블 모의결함 실험을 위한 실험장치 구성은 Fig. 6에서와 같이 펄스 발생기, 오실로스코프로, 함수 발생기 및 케이블로 구성되었다. 함수 발생기에서 리드릴레이 스위치 동작에 필요한 신호가 인가되면 펄스 발생기에서 단 펄스가 출력되고 케이블에 진단 펄스 신호가 전송되는 구조이다. 함수 발생기는 에질런트(Agilent)사의 33210A 제품으로 기본 주파수는 20 Hz로 설정하였다. 오실로스코프는 50 ns의 시간대역과 1:400의 전압배율을 설정하여 실험을 진행하였다. 케이블과 오실로스코프 사이는 전압강화를 위해 1 kΩ의 저항과 케이블과 펄스 발생기 사이에는 50 Ω의 임피던스 매칭을 위한 저항을 삽입하였다. 케이블의 차폐층 도체, 오실로스코프 및 펄스 발생기는 공통으로 접지를 시켰으며 케이블의 종단은 개

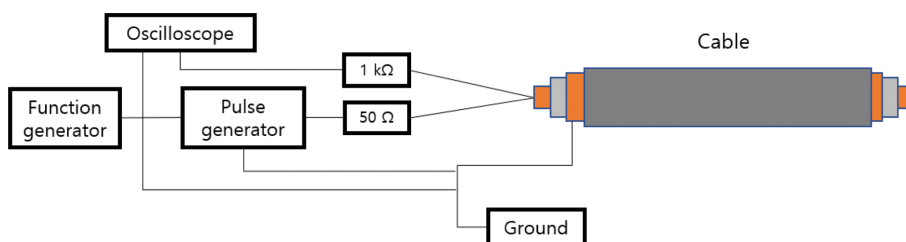


Fig. 6. (Color online) Schematic diagram of the experimental setup for a power cable test.

방회로로 구성하였다.

Fig. 7에서는 실제 실험을 위해 구현된 케이블과 펄스 발생기, 오실로스코프 사이의 저항을 연결한 사진이다. 케이블 내부 도체와 50 Ω, 1 kΩ의 저항을 납땜으로 연결하여 측정 시 발생하는 접촉저항에 의한 노이즈를 방지하였다. 또한, Fig. 7의 사진은 케이블 외부 차폐층 도체가 펄스 발생기와 오실로스코프의 접지단자와 연결된 모습이다.

IV. 케이블 펄스 특성 실험

본 장에서는 Table I에 제시한 6.6 kV 배전용 전력 케이블에 대해 3차원 수치해석을 이용한 모의실험과 이와 동등한 조건을 구현한 실제 케이블 실험을 수행하였다. 두 가지 실험에서 사용한 진단 펄스는 단 펄스 형태로 케이블에 인가되며 전압은 1 kV이고 펄스폭은 10.5 ns이다. 모의결합이 없는 대상 케이블과 180° 모의결합과 360° 모의결합을 각각 포함한 동일 케이블에 대해 세 가지 비교실험을 시행하였다.

1. 대상 케이블

실험에 사용된 케이블은 모의결합을 발생시키지 않은 10 m 길이의 전력 케이블이다. 다년간 배전선로에 설치되어 사용하다 노후화로 교체를 위해 수거된 케이블의 일부 구간에 해당한다. 따라서 케이블의 일부 구간에는 부분열화 현상이

진행되었을 것으로 판단되지만 이러한 열화 부분에 대한 정확한 형상을 모의실험에 반영하기는 현실적으로 불가능하다. 따라서 모의실험에서는 해당 케이블을 정상적인 케이블로 간주하여 수치해석을 수행하였다.

Fig. 8은 진단 펄스를 입력하여 케이블 종단에서 반사되는 반사파를 측정된 결과이다. Fig. 8(a)의 모의실험에 의한 결과는 예상한 바와 같이 입사파와 종단 반사파 사이에 열화에 의해 나타나는 추가적인 반사파가 없음을 보여준다. 또한 케이블 종단에서 발생한 반사파가 입력 단까지 다시 되돌아오는데 걸린 시간이 100 ns이고 케이블 내 펄스파의 진행 속도는 2×10^8 m/s이므로 측정된 케이블 길이가 10 m임을 알 수 있다. 이러한 현상은 실제 오실로스코프로 측정된 펄스 진행 파형인 Fig. 8(b)를 통해서도 확인할 수 있다. Fig. 8(b)에서는 케이블 종단에서 발생한 반사파가 케이블 입력단과 종단 사이를 반복하면서 서서히 전압의 크기가 줄어드는 추가적인 반사파도 측정되었다. 또한, Fig. 8(b)의 빨강 점선 원으로 표기된 작은 반사파는 진단 펄스가 입력된 후 바로 나타나며, 이는 Fig. 7의 케이블 입력단에서 절연체와 외부 차폐 도체가 제거된 내부 도체만 있는 부분에서 생성되는 것으로 판단된다. 한편 Fig. 8(b)에서는 입사파와 반사파 사이에 추가적인 미세한 반사파들이 생성되는 것이 관측되며 이는 모의 실험에서는 고려하지 못한 실제 케이블의 노후화에 따라 생성된 열화에 의해 기인된 것으로 사료된다.

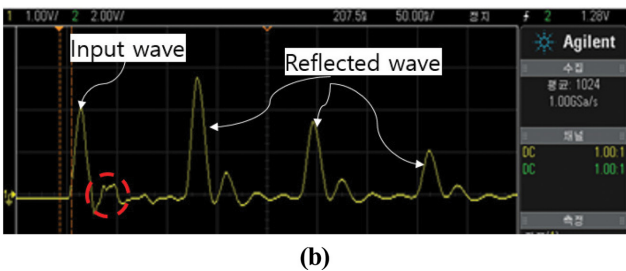
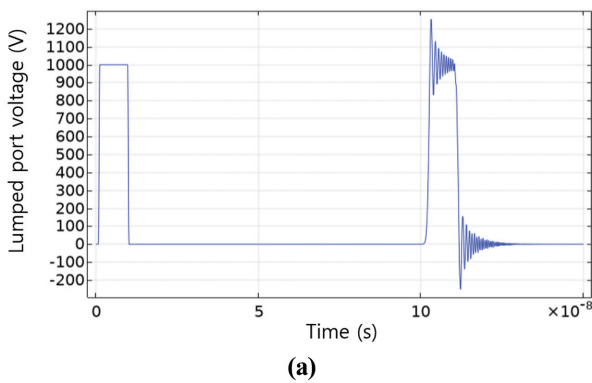


Fig. 8. (Color online) Reflected pulse waveforms for an original cable; (a) Simulation, (b) Measurement.

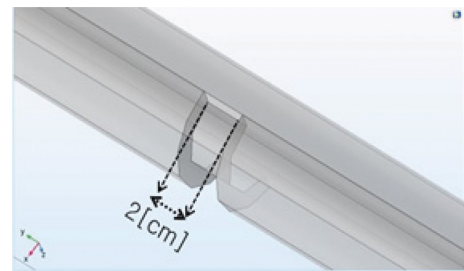


Fig. 9. (Color online) A cable defect with a central angle of 180°, penetration depth of 50% and length of 2 cm; (a) Defect modeling, (b) Photograph.

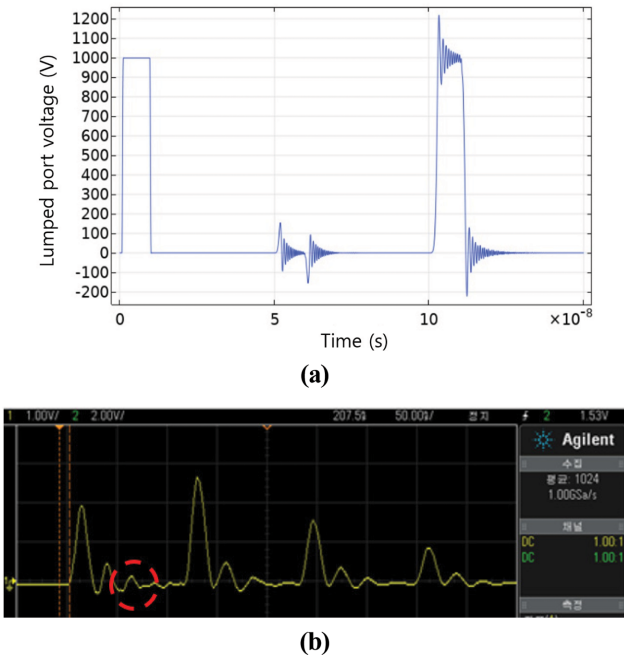


Fig. 10. (Color online) Reflected pulse waveforms for a 180° defect cable; (a) Simulation, (b) Measurement.

2. 180° 모의결합

대상 케이블의 중간인 5 m 지점에 길이 2 cm, 중심각 180°, 50%의 절연체 두께를 인위적으로 제거한 180° 모의결합을 생성하였다. Fig. 9는 180° 모의결합에 대한 수치해석 모델과 실제 생성된 모의결합 사진이다.

Fig. 10은 180° 모의결합을 갖는 케이블에 진단 펄스를 입력하여 케이블 중단에서 반사되는 반사파를 측정된 결과이다. Fig. 10(a)의 모의실험 결과는 입사파와 중단 반사파 사이인 케이블의 중간지점에서 모의결합에 의한 추가적인 반사파가 발생하고 있는 것을 보여준다. Fig. 10(b)를 모의결합이 없는 케이블에 대한 실제 측정결과인 Fig. 8(b)와 비교하면 빨강 점선 원으로 표기된 추가적인 반사파가 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 모의결합에 의해 발생하는 추가적인 반사파의 위치는 케이블 중심인 5 m 지점이고 그 전압의 크기는 입력 펄스 신호 대비 15.1%로 분석되었다. 따라서 180° 모의결합에 의해 관측되는 반사파 신호의 크기는 모의실험과 실제 실험 사이에 2% 내외의 차이를 갖는 것으로 확인되었다.

3. 360° 모의결합

180° 모의결합을 갖는 케이블의 동일 지점에 길이 2 cm, 50%의 절연체 두께를 추가적으로 제거한 360° 모의결합을 생성하였다. Fig. 11은 360° 모의결합에 대한 수치해석 모델과 실제 생성된 모의결합 사진이다.

Fig. 12는 360° 모의결합을 갖는 케이블에 진단 펄스를 입

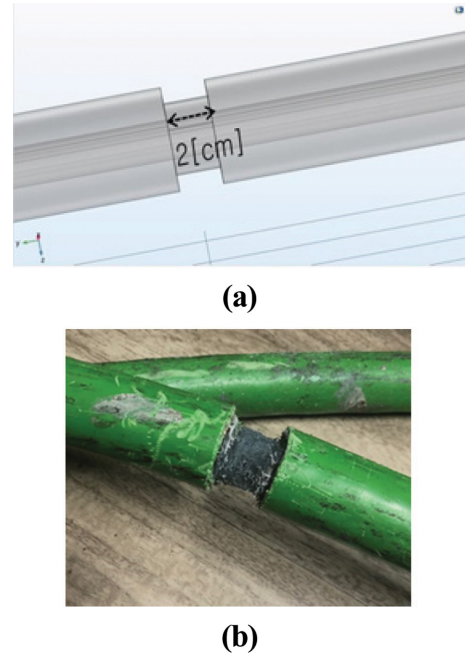


Fig. 11. (Color online) A cable defect with a central angle of 360°, penetration depth of 100% and length of 2 cm; (a) Defect modeling, (b) Photograph.

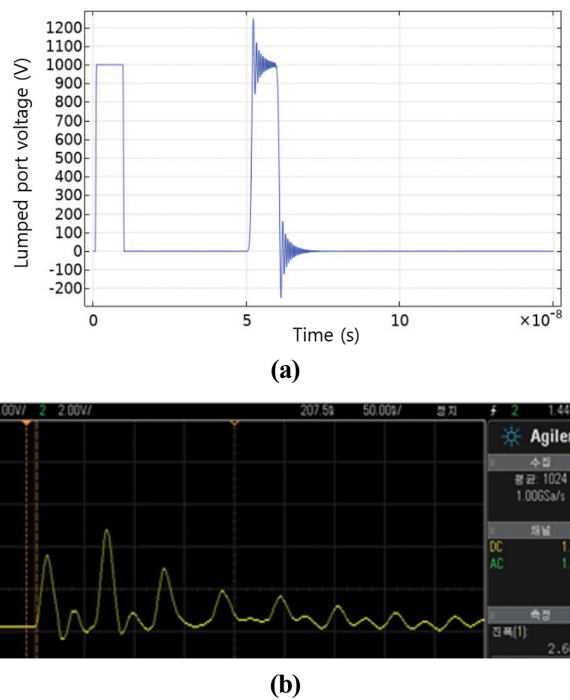


Fig. 12. (Color online) Reflected pulse waveforms for a 360° defect cable; (a) Simulation, (b) Measurement.

력하여 케이블 에서 반사되는 반사파를 측정된 결과이다. Fig. 12(a)의 모의실험 결과에서 반사파의 위치는 펄스 신호가 입력 단까지 다시 되돌아오는데 걸린 시간이 50 ns로 케이블의

중간 지점인 5 m에서 생성되는 것으로 예측되었다. 이는 Fig. 11(b)의 사진에서와 같이 360° 모의결합으로 인해 케이블 중간지점에서 외부 차폐 도체 층이 2 cm 길이로 제거되어 입력 펄스신호가 케이블 종단까지 전파되지 못하고 모의결합 위치에서 바로 반사되어 오는 것으로 분석된다. 이러한 현상은 실제 오실로스코프로 측정된 펄스 진행 파형인 Fig. 12(b)를 통해서도 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 전력 케이블의 수트리 탐지를 위해 TDR기법을 적용한 유한요소 모의실험의 타당성을 검증하기 위하여 인위적으로 생성한 모의결합을 갖는 케이블 실험을 수행하였다. 각 케이블 조건에 따른 모의실험 결과가 실제 측정된 케이블 반사파 결과와 매우 유사함이 확인되었다. 따라서 수치 해석을 활용한 TDR 기법이 전력 케이블 수트리 진단 분야에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 케이블 내 실제 수트리의 형상을 수리적으로 모델링하는 기법과 어느 정도까지 정밀하게 수트리 탐지가 가능한지에 대한 추가 연구가 요구된다.

감사의 글

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 전력연구원의 전력산업 기초연구과제 지원을 받아 수행된 연구(No. 2017-0023)의 결과이다.

References

- [1] J. Wang, P. E. C. Stone, Y.-J. Shin, and 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] M. Choi, J. Park, J. Byun, D. Kim, S. Hwangho, and D. Yi, J. Korean Magn. **28**, 66 (2018).
- [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).