

케이블 내 근접 결함 추정을 위한 영상 처리 기반의 시간 주파수 영역 반사파 계측법

Image Processing Based Time-Frequency Domain Reflectometry for Estimating the Fault Location Close to the Applied Signal Point

정 종 민* · 이 춘 구* · 윤 태 성** · 박 진 배†
(Jong Min Jeong · Chun Ku Lee · Tae Sung Yoon · Jin Bae Park)

Abstract - In this paper, we propose an image processing based time-frequency domain reflectometry(TFDR) in order to estimate the fault location of a cable. The Wigner-Ville distribution is used for analysis in both the time domain and the frequency domain when the conventional TFDR estimates the fault location in a cable. However, the Wigner-Ville distribution is a bi-linear function, and hence the cross-term is occurred. The conventional TFDR cannot estimate the accurate fault location due to the cross-term in case the fault location is close to the position where the reference signal is applied to the cable. The proposed method can reduce the cross-term effectively using binarization and morphological image processing, and can estimate the fault location more accurately using the template matching based cross correlation compared to the conventional TFDR. To prove the performance of the proposed method, the actual experiments are carried out in some cases.

Key Words : Fault localization, Time-frequency domain reflectometry, Image processing, Wigner-Ville distribution, Cross-term

1. 서 론

최근 들어 국내에서 많은 전력 사고들이 발생하고 있다. 전력 사고는 막대한 경제적 손실을 발생시킬 뿐만 아니라 인명 사고를 일으킬 수도 있는 심각한 문제이다. 다양한 전력 사고 중에서도 특히, 케이블의 고장으로 인한 사고가 자주 발생하고 있으며, 케이블의 사용이 증가함에 따라 더욱 큰 문제로 대두되고 있는 상황이다. 따라서 케이블의 사고 예방을 위해서는 진단 기법의 연구가 필수적이며, 현재 케이블의 고장 검출 및 추정을 위한 다양한 연구들이 진행되어 오고 있다[1,5]. 케이블의 고장 진단을 위한 대표적인 방법으로는 $\tan\delta$ 기법, 부분 방전(partial discharge) 기법, 그리고 반사파 계측법(reflectometry) 등이 있다. $\tan\delta$ 기법은 절연층의 열화를 검출하기 위한 기법으로, 케이블 전체의 절연층 상태만을 진단할 수 있다는 한계점을 가지고 있으며, 부분 방전 기법은 절연층 내 공극에 의한 부분 방전 신호를 측정함에 따라 결함 지점을 추정할 수 있으나, 케이블 전체에 대한 부분 방전 신호를 취득해야 한다는 단점을 가지고

있다. 그에 비해서 반사파 계측법은 케이블 내의 임피던스 불일치 지점을 검출하고 케이블의 전파 속도를 이용하여 결함의 위치를 추정하는 기법으로, 다른 기법들과 비교하였을 때 정확하고 실험 환경이 간단하다는 장점을 가지고 있다. 반사파 계측법은 시간 영역 반사파 계측법(Time Domain Reflectometry : TDR), 주파수 영역 반사파 계측법(Frequency Domain Reflectometry : FDR), 시간 주파수 영역 반사파 계측법(Time Frequency Domain Reflectometry : TFDR)의 세 가지 방법으로 분류할 수 있다. 시간 영역 반사파 계측법은 기준 신호와 반사된 신호의 크기 변화를 이용하여 케이블의 결함 지점을 추정하는 방법으로 시간 영역에서만 분석이 이루어지며[6], 주파수 영역 반사파 계측법은 기준 신호와 반사된 신호를 주파수 영역에서 분석함으로써 고장점의 위치를 추정하는 방법이다[7]. 그러나 시간 주파수 영역 반사파 계측법은 기준 신호와 반사된 신호를 시간 영역 뿐 아니라 주파수 영역에서도 동시에 분석함으로써, 다른 반사파 계측법들에 비해 잡음에 강인하고 정확도가 높다는 장점을 가진다[8,10].

그에 따라 시간 주파수 영역 반사파 계측법을 이용한 케이블 결함 위치 추정 연구가 다양하게 진행되고 있으며, 성공적인 연구 성과를 보이고 있다. 하지만 시간 주파수 영역 반사파 계측법은 시간과 주파수 영역에서 동시에 분석하기 위해서 위그너-빌 분포(Wigner-Ville distribution)를 이용하고 있는데, 위그너-빌 분포는 이중 선형 함수(bi-linear function)라는 특성으로 인해 혼신 성분(cross-term)을 발생시킨다. 이러한 혼신 성분들은 기존의 시간 주파수 영역 반사파 계측법이 기준 신호 인가 지점으로부터 근접한 케이블

† Corresponding Author : Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea
E-mail: jbpark@yonsei.ac.kr

* Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

**Department of Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon, Korea

Received : August 27, 2014; Accepted : November 11, 2014

의 결합 위치를 추정하는데 어려움을 야기한다. 한편, 위그너-빌 분포의 혼신 성분을 제거하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다[11,12]. [11]에서는 푸리에-베셀(Fourier-Bessel) 확장 기법을 이용하여 신호를 분리함으로써 위그너-빌 분포의 혼신 성분은 줄이는 방법을 제안하였으며, [12]에서는 모호성 함수(ambiguity function)와 회전 창 함수(rotating window function)을 결합시켜 위그너-빌 분포의 혼신 성분을 줄이는 방법을 제안하였다. 하지만 제시된 방법들은 시간 주파수 영역 반사파 계측법에서 적용하기에는 몇 가지 선행 조건이 만족되어야 할 뿐 아니라, 계산이 복잡하다는 한계점을 가지고 있다.

본 논문에서는 기존의 시간 주파수 영역 반사파 계측법에서 기준 신호 인가 지점으로부터 근접한 결합 위치를 추정할 때 발생할 수 있는 위그너-빌 분포의 혼신 성분 문제를 해결하고, 정확한 결합 위치를 추정하기 위해 영상 처리 기반의 시간 주파수 영역 반사파 계측법을 새로이 제안하기로 한다. 제안하는 방법에서는 측정 신호에 대한 위그너-빌 분포에서 기준 신호 및 반사된 신호의 위그너-빌 분포 성분들과 혼신 성분 간의 영상 특징을 이용하여 혼신 성분을 제거한다. 혼신 성분을 제거하기 위해 형태학적(morphology) 영상 처리, 에지 검출(edge detection) 등 다양한 영상 처리 기법을 이용한다. 그리고 제안한 기법을 실제 케이블에 적용하여 실험을 하고 결과를 분석해 봄으로써 그 효율성과 우수성을 증명하기로 한다.

2. 본 론

2.1 시간 주파수 영역 반사파 계측법

시간 주파수 영역 반사파 계측법은 기준 신호와 반사된 신호를 시간 주파수 영역에서 동시에 분석하는 방법으로, 시간에 따라 주파수가 선형적으로 증가하는 가우시안 포락선 선형 첩 신호를 기준 신호로 사용하는 반사파 계측법이다. 기준 신호로 사용하는 가우시안 포락선 선형 첩 신호는 다음과 같다.

$$s(t) = Ae^{-((t-m)^2/2\sigma^2 + j(\beta t^2/2 + \omega_0 t + \phi))} \quad (1)$$

기서 A 는 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 크기, m 은 신호의 중심 시간, σ 는 시간의 폭, ω_0 는 시작 각주파수 그리고 ϕ 는 위상을 나타낸다. 기준 신호로 사용하는 가우시안 포락선 선형 첩 신호는 시간 폭, 주파수 증가 비율 등과 같은 변수들을 조절함으로써 케이블마다의 최적 신호를 설계할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 시간 주파수 영역 반사파 계측법은 케이블의 결합이 있는 곳에서 임피던스 불일치로 인하여 반사파가 발생하는 원리를 이용한다. 영상 처리 기반의 시간 주파수 영역 반사파 계측 시스템은 기준 신호를 발생시켜주는 임의 파형 발생기(Arbitrary Waveform Generator : AWG)와 반사파를 취득하는 디지털 오실로스코프(Digital Storage Oscilloscope : DSO)로 구성되어 있다. 디지털 오실로스코프를 이용하여 취득한 반사파는 기준 신호가 감쇠되고, 시간이 지연되었으며 잡음이 추가된 형태이며, 이는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$r(t) = \sum_{i=1}^{N_r} \alpha_i A e^{-((t-m-d_i)^2/2\sigma^2 + j(\beta(t-d_i)^2/2 + \omega_0(t-d_i) + \phi))} + v_i \quad (2)$$

여기서 N_r 은 반사파의 개수, α_i 는 i 번 째 반사파의 감쇠 상수, d_i 는 i 번 째 반사파의 시간 지연, v_i 는 잡음을 의미한다. 시간 주파수 영역 반사파 계측 시스템에 의해 측정된 신호 $c(t)$ 는 식 (3)과 같다.

$$c(t) = s(t) + r(t) \quad (3)$$

시간 주파수 영역 반사파 계측법은 반사된 신호를 시간 영역과 주파수 영역에서 분석하고, 결합 지점의 거리를 추정하기 위해서 다양한 시간 주파수 영역 분석법 중 위그너-빌 분포(Wigner-Ville Distribution : WVD)를 이용한다. 측정 신호 (3)을 시간 영역과 주파수 영역에서 동시에 분석하기 위해서 위그너-빌 분포로 변환하면 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} W_c(t, \omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} c(t+\tau/2)c^*(t-\tau/2)e^{-j\omega\tau}d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} (s(t+\frac{\tau}{2})+r(t+\frac{\tau}{2}))(s(t-\frac{\tau}{2})+r(t-\frac{\tau}{2}))^*e^{-j\omega\tau}d\tau \\ &= W_s(t, \omega) + W_r(t, \omega) + \Xi(t, \omega) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $W_c(t, \omega)$, $W_s(t, \omega)$, $W_r(t, \omega)$ 는 각각 측정 신호, 기준 신호, 반사 신호의 위그너-빌 분포 함수이며, $\Xi(t, \omega)$ 는 혼신 성분(cross-term)을 나타낸다. 그림 1은 기준 신호와 반사 신호의 위그너-빌 분포와 혼신 성분을 보여준다.

결합의 위치를 추정하기 위해서 기준 신호와 신호의 위그너-빌 분포 함수에 대한 정규화 된 시간 주파수 영역 상호 상관 함수(Normalized Time Frequency Cross Correlation : NTFCC)를 계산한다. 위그너-빌 분포 기반의 정규화 된 시간 주파수 영역 상호 상관 함수는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{sc}(t) = \frac{1}{E_s E_c} \iint W_s(t'-t, \omega) W_c(t', \omega) d\omega dt' \quad (5)$$

여기서 $E_s = \iint W_s(t, \omega) d\omega dt$, $E_c = \iint W_c(t, \omega) d\omega dt$ 이며, E_s 와 E_c 는 각각 시간 주파수 영역에서의 기준 신호 에너지, 측정 신호 에너지를 나타낸다. 정규화 된 상호 상관 함수는 0과 1사이의 값을 가지며, 값이 클수록 기준 신호와 비슷한 신호임을 의미한다. 시간 주파수 영역 반사파 계측법은 정규화 된 상호 상관 함수의 극대값을 이용하여 시간 지연을 계산함으로써 고장점의 위치를 추정한다. 시간 지연을 이용한 고장점의 위치는 다음과 같은 식을 이용하여 추정된다.

$$D_F = \frac{vop \times t_d}{2} \quad (6)$$

여기서 vop 는 velocity of propagation에 줄임말로써, 케이블 내 전자기 신호의 전파 속도를 의미하고 t_d 는 시간 지연을 나타낸다. 그리고 D_F 는 계측 지점으로부터 고장점까지의 거리를 나타낸다.

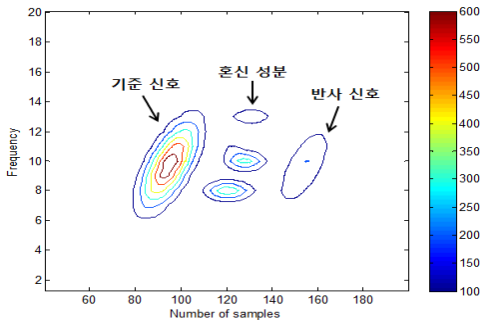


그림 1 측정 신호의 위그너-빌 분포
Fig. 1 WVD of the measured signal

2.2 근접 결함 시 위그너-빌 분포의 문제점

시간 주파수 영역 반사파 계측법에서 시간과 주파수 영역에서의 분석을 위해 사용하는 위그너-빌 분포는 시간과 주파수에 대한 높은 분해능(resolution)을 가지고 있고, 시간-주파수 정보의 보존 능력을 가지고 있기 때문에 순시 주파수(instantaneous frequency), 군 지연(group delay) 등과 같은 신호 분석에 용이하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 위그너-빌 분포는 이중 선형 함수이기 때문에 해석하기 어려운 혼신 성분들이 발생한다는 단점을 가지고 있다. 수식 (4)와 그림 1을 통해 측정 신호를 위그너-빌 분포로 변환할 때 혼신 성분이 발생함을 확인할 수 있다. 시간 주파수 영역 반사파 계측법을 이용하여 결함 지점의 위치를 추정할 때에도 위그너-빌 분포를 사용함에 따라 혼신 성분이 발생한다. 케이블의 결함 위치가 기준 신호를 인가하는 지점으로부터 멀리 떨어져 있을 경우에는 혼신 성분의 영향이 적어 정확하게 결함의 위치를 찾아낼 수 있지만, 결함의 위치가 기준 신호의 인가 지점으로부터 가까이 놓인 경우에는 혼신 성분이 기준 신호 및 반사파의 위그너-빌 분포 함수와 겹쳐짐에 따라 케이블 내의 결함 위치를 정확하게 추정하기가 어려워진다는 문제점이 존재한다.

2.3 영상 처리 기반의 시간 주파수 영역 반사파 계측법

본 논문에서는 기준 신호의 인가 지점으로부터 근접한 결함의 위치를 정확하게 추정하기 위해서 영상 처리 기반의 시간 주파수 영역 반사파 계측법을 새롭게 제안한다. 제안하는 알고리즘은 기존의 시간 주파수 영역 반사파 계측법을 이용하여 근접 결함의 위치를 추정하는데 있어 문제점이었던 위그너-빌 분포 내의 혼신 성분을 효과적으로 제거해줌으로써 기존의 기법보다 정확하게 결함 위치를 추정할 수 있다. 위그너-빌 분포 내의 혼신 성분을 효과적으로 제거하여 정확한 결함 위치를 추정할 수 있는 영상 처리 기반의 시간 주파수 영역 반사파 계측법은 다음과 같은 단계로 이루어진다.

1) 기준 신호와 측정 신호의 위그너-빌 분포 변환

기존의 시간 주파수 영역 반사파 계측법과 동일하게 기준 신호와 측정 신호를 시간, 주파수 영역 모두에서 분석하기 위해 위그너-빌 분포로 변환한다. 측정 신호의 위그너-빌

분포는 그림 2의 (a)와 같이 기준 신호의 위그너-빌 분포 함수 성분, 반사된 신호의 위그너-빌 분포 함수 성분, 혼신 성분, 그리고 잡음 성분으로 구성되어 있다. 여기서, 정확한 결함 위치를 추정하기 위해 필요한 성분은 기준 신호와 반사 신호의 위그너-빌 분포 함수 성분이며, 혼신 성분과 잡음 성분은 결함 위치 추정을 방해하는 요소이다.

2) 위그너-빌 분포에서의 잡음 성분 제거

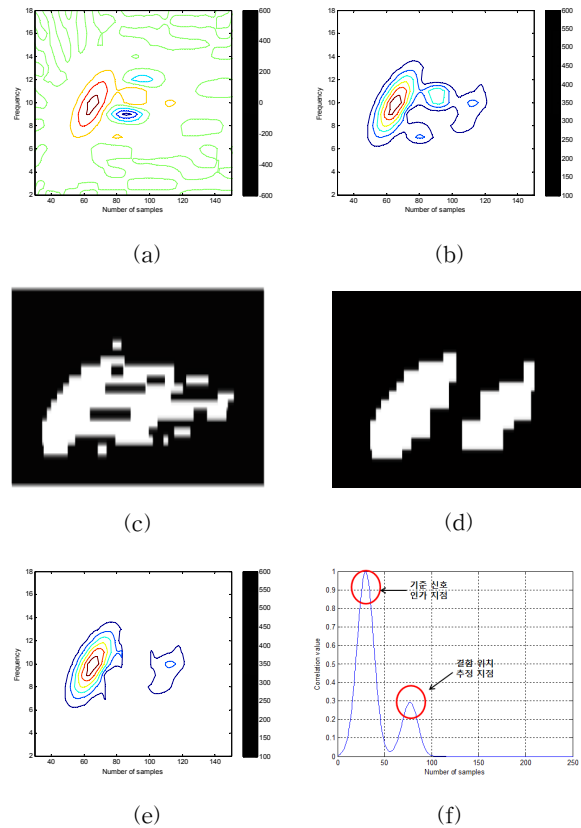


그림 2 영상 처리 기반의 시간 주파수 영역 반사파 계측법:
(a) 측정 신호의 위그너-빌 분포, (b) 잡음 성분 제거, (c) 위그너-빌 분포의 이진 영상, (d) 이진 마스크, (e) 이진 마스크 기반의 위그너-빌 분포 (f) 템플릿 매칭 기반의 상호 상관 함수

Fig. 2 The image processing based TFDR: (a) WVD of the measured signal, (b) reduction of the noise, (c) the binary image of the WVD, (d) the binary mask, (e) The binary mask based WVD, (f) the template matching based cross correlation function

위그너-빌 분포에서 잡음 성분은 다른 성분들과 비교하여 작은 값을 가진다는 특징이 있다. 따라서 임계값(threshold) 기법을 이용해 잡음 성분을 효과적으로 제거할 수 있다. 식 (7)을 통해 기준 신호의 위그너-빌 분포와 측정 신호의 위그너-빌 분포 내에서 잡음 성분을 제거한다.

$$W_s^{th}(t, \omega) = \begin{cases} W_s(t, \omega) & \text{if } W_s(t, \omega) \geq \gamma_s^{th} \\ 0 & \text{if } W_s(t, \omega) < \gamma_s^{th} \end{cases}$$

$$W_c^{th}(t, \omega) = \begin{cases} W_c(t, \omega) & \text{if } W_c(t, \omega) \geq \gamma_c^{th} \\ 0 & \text{if } W_c(t, \omega) < \gamma_c^{th} \end{cases} \quad (7)$$

여기서 γ_s^{th} 와 γ_c^{th} 는 각각 기준 신호의 위그너-빌 분포와 측정 신호의 위그너-빌 분포에서의 잡음 성분 제거를 위한 임계값을 의미한다. 일반적으로 잡음 성분은 -20~10 사이의 값을 가지는 반면, 다른 성분들은 잡음 성분보다 상대적으로 큰 50~700 사이의 값을 가진다. 따라서 임계값을 10~50 사이의 값으로 설정하면 효과적으로 잡음 성분을 제거할 수 있다. 그림 2의 (b)는 잡음 성분을 제거한 위그너-빌 분포를 보여준다.

3) 위그너-빌 분포 영상의 이진(binary)화

단계 2)를 통해 잡음을 제거한 기준 신호의 위그너-빌 분포와 측정 신호의 위그너-빌 분포를 이차원 흑백 영상으로 간주하여 이진화를 수행한다. 위그너-빌 분포를 이진 영상으로 변환한 후, 다양한 형태학적 영상 처리를 통해서 혼신 성분을 제거하는 영상 마스크(mask)를 생성한다. 이진화 기법은 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} W_s^b(t, \omega) &= \begin{cases} 1 & \text{if } W_s^{th}(t, \omega) \geq \gamma_s^b \\ 0 & \text{if } W_s^{th}(t, \omega) < \gamma_s^b \end{cases} \\ W_c^b(t, \omega) &= \begin{cases} 1 & \text{if } W_c^{th}(t, \omega) \geq \gamma_c^b \\ 0 & \text{if } W_c^{th}(t, \omega) < \gamma_c^b \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 γ_s^b 와 γ_c^b 는 각각 기준 신호의 위그너-빌 분포와 측정 신호의 위그너-빌 분포의 이진화를 위한 임계값이며, 검출하고자 하는 성분인 기준 신호와 반사 신호의 위그너-빌 분포 함수 성분과 혼신 성분에 해당하는 픽셀이 1의 값을 가지도록 설정해야 한다. 식 (7)을 통해 잡음 성분이 제거되었고, 다른 성분들의 값은 흑백 영상 내에서 일반적으로 20~255 사이의 값을 가지기 때문에 20 이하의 값을 임계값으로 설정한다. 그림 2의 (c)는 이진화 기법 후의 위그너-빌 분포 영상이며, 기준 신호와 반사 신호의 위그너-빌 분포 함수 성분과 혼신 성분에 해당하는 픽셀들이 1의 값을 가짐을 확인할 수 있다.

4) 형태학적 영상 처리 기반의 혼신 성분 제거를 위한 영상 마스크 생성

혼신 성분 제거를 위한 영상 마스크를 생성하기 위해 측정 신호의 위그너-빌 분포의 이진 영상에 다양한 형태학적 영상 처리를 수행한다. 측정 신호의 위그너-빌 분포를 보면, 기준 신호의 위그너-빌 분포 부분과 취득 신호의 위그너-빌 분포 부분은 큰 면적이 1의 값으로 이루어져 있는 반면 혼신 성분은 상대적으로 작은 면적이 1의 값으로 이루어져 있다. 이러한 특징을 이용하여 면적이 작은 성분들을 제거하는 영상 처리를 수행한다. 다양한 실험을 통해서 30개의 픽셀 이하로 이루어진 성분을 제거하는 형태학적 열림(morphological open) 연산을 수행하면 다수의 혼신 성분들을 제거할 수 있음을 확인하였다. 형태학적 열림 연산을 수행한 후에도 기준 신호의 위그너-빌 분포 성분과 반사된 신호의 위그너-빌 분포 성분 그리고 혼신 성분들이 여전히 겹쳐 있는 상황이 발생한다. 겹쳐진 혼신 성

분들을 제거하기 위해 침식(erosion) 연산과 팽창(dilation) 연산을 수행한다. 영상 처리에서 침식 연산은 이진 영상 내에서 픽셀의 값이 1로 이루어진 물체의 크기는 줄이고, 픽셀의 값이 0으로 이루어진 배경(background)을 확장시키는 기능을 가진다. 이와 반대로 팽창 연산은 이진 영상 내에서 픽셀의 값이 1로 이루어진 물체의 크기는 팽창시키고, 배경의 크기는 줄여준다. 침식 연산을 한 후에 팽창 연산을 수행하면, 상대적으로 면적이 큰 기준 신호와 반사된 신호의 위그너-빌 분포 성분은 변화가 없고, 상대적으로 면적이 작고 얇은 특징을 가지는 혼신 성분들은 제거되는 효과를 얻을 수 있다. 하지만 케이블 내 결합 위치가 기준 신호를 인가한 지점으로부터 매우 근접한 경우에는 혼신 성분의 면적이 상대적으로 커지기 때문에 위의 방법들로 혼신 성분을 모두 제거하기가 어렵다. 이러한 경우를 대비하기 위하여 형태학적 영상 처리를 수행한 이진 영상에 대해 각 주파수마다의 픽셀 값의 변화를 검사한다. 이진 영상 내에서 혼신 성분이 포함된 주파수는 픽셀의 값이 일반적으로 0에서 1, 1에서 0, 그리고 1에서 0으로 총 두 번의 값 변화가 발생하며, 혼신 성분이 포함되지 않은 주파수에서는 일반적으로 픽셀의 값이 0에서 1, 1에서 0, 0에서 1, 그리고 1에서 0으로 네 번 정도 값의 변화가 일어난다. 이를 수식으로 표현하면 식 (9)와 같다.

$$W_c^n(t, \omega) = \begin{cases} W_c^{mn}(t, \omega) & \text{if } C(\omega) = 4 \\ 0 & \text{if } C(\omega) \neq 4 \end{cases} \quad (9)$$

여기서 $W_c^{mn}(t, \omega)$ 는 형태학적 영상 처리를 한 측정 신호의 위그너-빌 분포의 이진 영상이다. $C(\omega)$ 는 주파수 ω 에서 값이 바뀐 횟수를 의미한다. 하지만 식 (9)를 통해 얻은 위그너-빌 분포 이진 영상은 혼신 성분들을 효과적으로 제거하지만 기준 신호와 반사 신호의 위그너-빌 분포 성분이 존재하는 주파수 대역의 정보 손실도 발생하게 된다. 식 (10)은 정보 손실이 발생한 주파수 대역에 대해서 주변 주파수들의 정보들을 융합하여 손실된 정보를 추정하여 복구해준다.

$$W_c^{re}(t, \omega) = \begin{cases} 1 & \text{if } C(\omega) = 4, C(\omega+1) = 0 \\ W_c^n(t, \omega) & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

그림 2의 (d)는 그림 2의 (c)에 나타난 이진 영상에 대하여 앞서 설명한 다양한 형태학적 영상처리 및 식 (9)와 식 (10)을 수행함으로써 혼신 성분을 제거하여 생성된 이진 영상 마스크이다.

5) 이진 영상 마스크 기반의 혼신 성분 제거

식 (10)을 통해 얻은 이진 영상 마스크와 식 (4)를 통해 구한 측정 신호의 위그너-빌 분포를 곱함으로써 혼신 성분이 제거된 측정 신호의 위그너-빌 분포를 취득할 수 있다. 이를 수식적으로 표현하면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있으며, 그림 2의 (e)와 같이 나타난다.

$$W_c^{new}(t, \omega) = W_c(t, \omega) \times W_c^{re}(t, \omega) \quad (11)$$

6) 템플릿 매칭(template matching) 기반의 정규화 된 상호 상관 함수

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 기존의 시간 주파수 영역 반사파 계측법에서 사용하는 정규화 된 시간 주파수 영역 상호 상관 함수를 이용하지 않고 템플릿 매칭 기반의 정규화 된 상호 상관 함수를 이용한다. 템플릿 매칭이란, 영상 처리·컴퓨터 비전(computer vision) 분야에서 많이 쓰이는 방법으로써 각 픽셀마다의 값을 비교하여 유사도를 판별하는 알고리즘이다. 템플릿 매칭 기반의 정규화 된 상호 상관 함수는 기준 신호의 위그너 빌 분포를 템플릿으로 설정하여, 혼신 성분이 제거된 측정 신호의 위그너-빌 분포와의 템플릿 매칭을 수행하여 유사도를 판별하고 결함 지점을 추정한다. 이를 수식적으로 표현하면 식 (12)와 같다.

$$TC(t) = \frac{1}{TC_{max}} \iint W_r(t'-t, \omega) W_c^{new}(t', \omega) d\omega dt' \quad (12)$$

여기서 TC_{max} 는 $TC(t)$ 값 중에서 가장 큰 값을 의미하며, 0에서 1 사이의 값을 가지도록 정규화를 시켜주는 역할을 한다. 기존의 정규화 된 시간 주파수 영역 상호 상관 함수와 비슷하게 템플릿 매칭 기반의 정규화 된 상호 상관 함수도 극대값을 이용하여 케이블 내에 결함 위치를 정확하게 추정할 수 있으며, 그림 2의 (f)와 같은 값이 나타난다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 실험 환경 및 구성

제안하는 영상 기반의 시간 주파수 영역 반사파 계측법의 정확도를 증명하기 위해, 제안하는 방법을 실제 제어 계측 케이블에 적용하였다. 이 때 실험 시료로 사용한 케이블은 600V EPR/CSP 케이블이며, 실험 구성은 NI(National Instruments) 사의 PXI(PCI extensions for instrumentation) 타입을 이용하였다. 또한 기준 신호인 가우시안 포락선 선형 칩 신호를 만들어주는 임의파형 발생기와 반사된 신호를 취득해주는 디지털 오실로스코프를 이용하여 실험 환경을 구축하였다. 실험에 사용된 장비명은 각각 Tektronix 사의 AWG5002C와 Tektronix 사의 DPO7104이다. 그림 3은 실증 실험을 위한 시스템 구성도이며, 그림4는 실제 실험 환경을

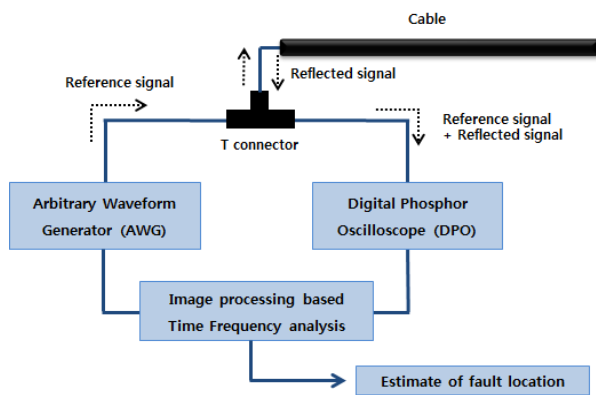


그림 3 실증 실험을 위한 영상 처리 기반의 TFDR 시스템 구성도

Fig. 3 Image processing based TFDR system configuration for experiment

보여주고 있다. 케이블의 결함은 단선 고장으로 하였으며, 케이블의 결함은 30m에서 10m까지 5m의 간격으로 5가지의 결함(30m, 25m, 20m, 15m, 10m) 위치에 대해 실험을 진행하였다. 각 실험은 10번씩 수행하였으며, 이들을 평균하여 결과를 도출해냈다.



그림 4 실험 환경

Fig. 4 Experimental setup

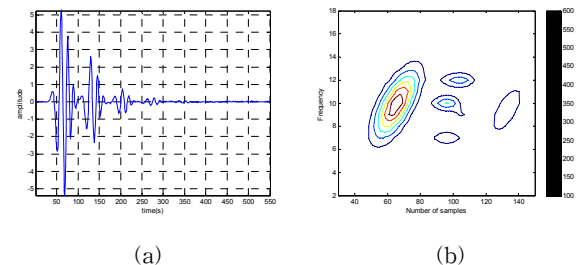


그림 5 결함 위치가 30m인 경우: (a) 측정 신호, (b) 위그너-빌 분포

Fig. 5 In case fault location is 30m: (a) measured signal, (b) WVD

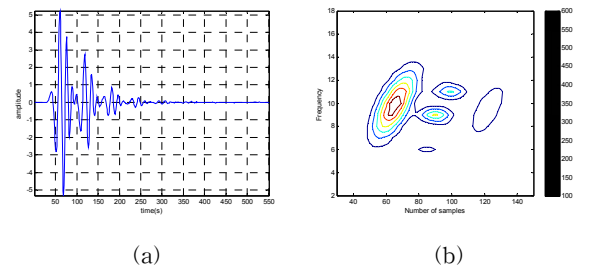


그림 6 결함 위치가 25m인 경우: (a) 측정 신호, (b) 위그너-빌 분포

Fig. 6 In case fault location is 25m: (a) measured signal, (b) WVD

3.2 실험 결과 및 분석

실증 실험에서 케이블의 고장점 위치 추정을 위해 사용한 기준 신호는 주파수 대역폭이 5MHz ~ 20MHz 이고, 시간폭은 350ns인 가우시안 포락선 선형 칩 신호이다. 그림 5와 그림 6은 각각 결함 위치가 30m일 때와 25m일 때의 측정 신호와 위그너-빌 분포를 보여준다. 결함 위치가 30m일 때에는 기준 신호와 반사된 신호가 겹치지 않고, 이에 따라 위그너-빌 분포에서도 기준 신호, 혼신 성분 그리고 반사된 신호가 정확히 구별이 가능하다. 하지만 결함 위치가 25m로 근접해

표 1 기존의 TFDR과 제안한 영상 처리 기반의 TFDR의 결함 위치 추정 결과 비교

Table 1 Comparison of the experimental results by the conventional TFDR with the proposed TFDR

결함 지점 [m]	TFDR		영상처리 기반의 TFDR	
	결함 지점 추정 [m]	오차율 [%]	결함 지점 추정 [m]	오차율 [%]
30	29.7442	0.8527	29.7442	0.8527
25	25.4334	1.7336	25.0024	0.0096
20	21.5537	7.7685	21.1227	5.6135
15	17.2430	14.9533	14.6566	2.2893
10	15.5187	55.1870	13.3633	33.6330

진 경우에는 기준 신호와 반사된 신호가 겹쳐지고, 위그너-빌 분포에서도 혼신 성분과 겹치게 되어 정확한 구분이 불가능해진다. 이러한 경우, 기존의 시간 주파수 영역 반사파 계측법은 정확한 결함 위치를 추정하지 못한다.

그림 5 (a)와 그림 6 (a)를 보면 여러 개의 신호를 확인 할 수 있는데, 첫 번째 신호는 케이블에 인가하는 기준 신호이며, 두 번째 신호는 케이블 중단에서 반사되어 돌아오는 신호이다. 그리고 나머지 신호들은 케이블 내에서 여러 번의 반사로 인해 발생한 신호들이다. 본 논문에서 제안한 알고리즘 중 식 (7)에 나타난 잡음 성분 제거 단계에서 임계값에 따라 알고리즘의 성능 차이가 나타난다. 임계값을 10 이하의 값으로 설정하면 잡음 성분이 사라지지 않아서 케이블의 결함 위치 추정을 할 수 없었으며, 임계값을 50 이상의 값으로 설정하면 기준 신호 및 반사 신호의 위그너-빌 분포 함수 성분 부분도 같이 제거됨에 따라 성능 저하가 발생함을 확인할 수 있었다. 임계값을 10 ~ 50 사이의 값으로 하였을 때에는 잡음 성분만 제거됨에 따라 우수한 성능을 보였다. 그림 7을 결함 위치에 따른 기존의 시간 주파수 영역 반사파 계측법의 실험 결과들과 본 논문에서 제안한 영상 처리 기반의 시간 주파수 영역 반사파 계측법의 실험 결과들을 보여준다. 그림 7을 보면, 기존의 시간 주파수 영역 반사파 계측법은 다수의 극대값을 가지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 케이블 내에서 신호가 여러 번 반사되어 돌아오기 때문에 취득 신호가 기준 신호와 다수의 반사 신호들을 포함하고 있기 때문이다. 여기서, 결함 위치를 확인하기 위해서는 첫 번째 극대값과 두 번째 극대값의 시간차이를 확인해야 한다. 제안한 방법으로 케이블의 결함 위치를 추정했을 때에는 두 개의 극대값이 나타남을 확인할 수 있었으며, 기존의 시간 주파수 영역 반사파 계측법에 비해 분석이 쉽다는 장점을 가진다. 모든 실험 결과에서 새롭게 제안한 영상 처리 기반의 시간 주파수 영역 반사파 계측법이 기존의 시간 주파수 영역 반사파 계측법보다 더 정확한 결과를 보여주었다. 각 실험에서 추정된 결함 위치 및 오차율을 표 1에 비교해 놓았다. 결함 위치는 식 (6)을 통해 추정할 수 있으며, 이 때 이용한 케이블 내 신호의 전파 속도는 $1.7243 \times 10^8 m/s$ 이다. 위와 같은 실증 실험 결과를 통하여 새롭게 제안한 영상 처리 기반의 시간 주파수 영역 반사파 계측법의 정확성과 효율성을 증명하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 케이블의 결함 지점을 추정하기 위한 영상 처리 기반의 시간 주파수 영역 반사파 계측법을 제안하였

다. 기존의 시간 주파수 영역 반사파 계측법은 시간 영역과 주파수 영역 모두에서 신호를 분석하기 위해 위그너-빌 분포를 사용한다. 하지만 위그너-빌 분포는 이중 선형 함수라는 특징을 가지기 때문에 혼신 성분이 발생하게 된다는 단점을 가지고 있다. 이러한 혼신 성분은 케이블의 고장점을 추정하는데 있어서 방해가 되는 요소이다. 케이블의 고장점이 기준 신호를 인가하는 지점으로부터 멀리 떨어져 있을

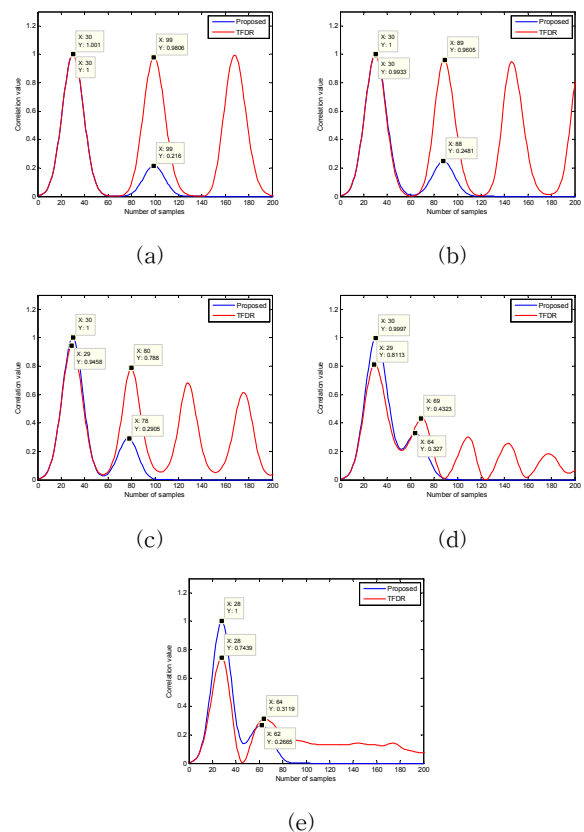


그림 7 결함 위치 추정 실험 결과: (a) 30m, (b) 25m, (c) 20m, (d) 15m, (e) 10m

Fig. 7 Experiment Results: (a) 30m, (b) 25m, (c) 20m, (d) 15m, (e) 10m

경우에는 혼신 성분의 영향이 적지만, 이와 반대로 기준 신호를 인가하는 지점으로부터 가까운 경우에는 혼신 성분이 기준 신호 및 반사된 신호의 위그너-빌 분포와 겹쳐짐에 따

라 정확한 고장점을 추정하기가 어려워진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 디지털 오실로스코프에 의해 취득된 신호의 위그너-빌 분포를 이차원 영상으로 간주하고, 이진화 기법과 침식·팽창 등과 같은 형태학적 영상 처리를 적용하였다. 그 결과, 대부분의 혼신 성분을 효과적으로 제거할 수 있었으며, 실증 실험을 통해 각 실험에 대한 오차율을 구해 비교함으로써 기존의 시간 주파수 영역 반사파 계측법에 비해 더 정확한 결함 위치를 추정할 수 있음을 확인하였다. 하지만 결함 지점이 10m 이내인 경우에는 기존 방법보다 오차율은 적지만, 약 33%의 큰 오차율을 확인할 수 있었으며, 향후에는 더욱 근접한 결함에 있어서도 정확하게 추정할 수 있고, 단일 결함이 아닌 케이블 내 다중 결함을 검출할 수 있는 기법에 대해 연구를 진행할 계획이다.

References

[1] C. K. Lee, J. B. Park, Y. J. Shin, and T. S. Yoon, "High resolution LFM CW radar system using model-based frequency estimation in cable fault localization", The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers Electronics Express, vol. 11, no. 1, pp. 1-6, 2013.

[2] Y. Ohki, T. Yamada, and N. Hirai, "Diagnosis of Cable Aging by Broadband Impedance Spectroscopy", Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 24-27, 2011.

[3] Kang Ming-Cai, Wei Yang, Zhang Jun-Fangm, Hu Guang, and Yingning Qiu, "Power cable fault location based on mathematical morphology and wavelet theory", International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, pp. 157-162, 2012.

[4] Kang Ming-Cai, Wei Yang, Zhang Jun-Fangm, Hu Guang, and Yingning Qiu, "Power cable fault location based on mathematical morphology and wavelet theory", International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, pp. 157-162, 2012.

[5] Q. Shi, and O. Kanoun, "Detection and location of single cable fault by impedance spectroscopy", Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, pp. 595-599, 2014.

[6] Jianhui Song, Yang Yu, and Hongwei Gao, "Cable Length Measurement Systems Based on Time Domain Reflectometry", Advanced in Computer Science, Environment, Ecoinformatics, and Education Communications in Computer and Information Science, vol. 214, pp. 396-401, 2011.

[7] C. Furse, Y. C. Chung, R. Dangol, M. Nielsen, G. Mabey, and R. Woodward, "Frequency-Domain Reflectometry for on-Board Testing of Aging Aircraft Wiring", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 45, no. 2, pp. 306-315, 2003.

[8] Y. J. Shin, E.J. Powers, T. S. Choe, C. Y. Hong, E. S. Song, J. G. Yook, and J. B. Park, "Application of Time-Frequency Domain Reflectometry for Detection and Localization of a Fault on a Coaxial Cable", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.

54, no. 6, pp. 2493-2500, 2005.

[9] J. Wang, P.E.C. Stone, D. Coats, Y. J. Shin, "Health Monitoring of Power Cable via Joint Time-Frequency Domain Reflectometry", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 60, no. 3, pp. 1047-1053, 2011.

[10] S. H. Lee, J. B. Park, and Y. H. Choi, "Measurement of load impedance in power cables using wavelet transform-based time-frequency domain reflectometry", Measurement Science and Technology, vol. 24, no. 9, pp. 1-9, 2013.

[11] R. B. Pachori, and S. Paradip, "A new technique to reduce cross terms in the Wigner distribution", Digital Signal Processing, vol. 17, no. 2, pp. 466-474, 2007.

[12] Y. K. Park, and Y. H. Kim, "A method to minimise the cross-talk of the Wigner-Ville distribution", Mechanical systems and signal processing, vol. 11, no. 4, pp. 547-559, 1997.

저 자 소 개



정 종 민(Jong Min Jeong)

1991년 2월 25일생. 2012년 연세대학교 공과대학 전기전자공학과 (공학사). 2012년~현재 동 대학원 전기전자공학과 통합 과정
Tel : +82-2-2123-2773
E-mail : jeong6560@yonsei.ac.kr



이 춘 구(Chun Ku Lee)

전기학회 논문지 제 62권 제 2호 참고



윤 태 성(Tae Sung Yoon)

전기학회 논문지 제 62권 제 2호 참고



박 진 배(Jin Bae Park)

전기학회 논문지 제 62권 제 2호 참고