

# TFDR 기법을 이용한 Coaxial Cable상에 존재하는 다양한 결함 감지 및 추정

## Detection and Estimation of Multiple Faults on a Coaxial Cable Based on TFDR Algorithm

송은석 · 신용준\* · 육종관 · 박진배

Eun-Seok Song · Yong-June Shin\* · Jong-Gwan Yook · Jin-Bae Park

### 요 약

본 논문에서는 도선상의 결함 감지 및 추정 방법인 고분해능 시간-주파수 반사측정기법(time-frequency domain reflectometry)을 제안한다. 이 방법은 관측된 신호를 시간과 주파수 영역에서 동시에 분석 가능한 시간-주파수 상호 상관 관계(time-frequency cross correlation) 특성을 채택하였다. 제안된 방법인 TFDR의 정확도는 고주파용 coaxial cable을 가지고 실험을 통하여 기존의 방식들과 비교 검증하였다. 제안된 알고리즘의 다양한 결함들에 대한 감지 및 추정 결과, 기존의 방법에 비해 월등하다는 것을 명백히 나타내었다.

### Abstract

In this paper, we propose a high-resolution time-frequency domain reflectometry technique as a methodology of detection and estimation of faults on a wire. This method adopts the time-frequency cross correlation characteristics of the observed signal in both time and frequency domains simultaneously. The accuracy of the proposed method is verified with experiments using a RG type coaxial cable and comparing it with traditional time domain as well as frequency domain reflectometry methods. It is clearly shown here that the proposed algorithm produces excellent results compared to the conventional methods for single as well as multiple fault cables.

Key words : Time-Frequency Domain Reflectometry, Chirp Signal, Time Frequency Cross Correlation, Fault Detection, Fault Estimation, Resolution

### I. 서 론

여러 번의 항공기 사고들은 전체 시스템의 안정성에 큰 영향을 주는 민간 항공기의 전기적 배선 시스템에 대한 관심을 불러 일으켰다<sup>[1]</sup>. 비행기들이나 전자기기의 노화된 도선들은 시스템 정확도를 악화시키고 또한 오동작과 같은 심각한 문제들을 일으킨다<sup>[2]</sup>. 항공기 엔진 또는 날개의 뚜렷한 결함과는 달리, 손상된 도선은 감지하기가 매우 어렵다. 이러한

손상된 유전체나 노출된 도체는 간섭(Interference), EM(Electromagnetic)방사, 아크 등의 현상을 일으킨다. 만약 유전체를 감싸고 있는 외부차폐가 손상되면, 결과적으로 도선에서 외부로 또는 내부 성분에 전자기적 에너지의 영향을 받거나 방사가 일어난다. 즉, 노화된 도선들은 EMI원으로 작용하게 된다. 전송선로상에서 이러한 결함을 찾기 위해, 반사측정법에 기본을 둔 여러 기법들이 사용되어져 왔다. 시간 영역에서의 Time Domain Reflectometry(TDR)<sup>[3]</sup> Opti-

「This research was funded by Ministry of Commerce, Industry and Energy, Republic of Korea, Project A1A-190.」

연세대학교 전기전자공학과(Dept. of Electrical and Electronic Eng., Yonsei University)

\*텍사스 오스틴 전기컴퓨터공학과(Dept. of Electrical and Computer Eng., The University of Texas at Austin, USA)

· 논문 번호 : 20030625-093

· 수정완료일자 : 2003년 8월 7일

cal Time Domain Reflectometry(OTDR)<sup>[4]</sup>, 주파수 영역에서, Frequency Domain Reflectometry(FDR)<sup>[5]</sup>, Optical Frequency Domain Reflectometry(OFDR)<sup>[6]</sup>, Standing Wave Reflectometry(SWR)<sup>[7]</sup>.

TDR은 케이블에서 결함위치를 감지하는데 가장 널리 사용되는 방법이다. 현재, 고성능 TDR장비는 기가비트 속도에서 사용되는 패키지 공정, 소켓, 커넥터, 회로 보드상에서의 signal integrity와 도선의 특성 임피던스 매칭 정도에 대해 분석하는데 쓰인다. TDR 임피던스 측정에 근간하여, 설계자들은 시스템의 signal integrity 분석을 수행하고, 디지털 시스템 성능은 정확히 예측된다. TDR은 장치를 측정하는데, 전송 선로상에 매우 빠른 상승시간을 갖는 펄스파를 보낸다. 측정된 반사현상은 임피던스의 불일치 정보를 제공하며, coaxial cable, PC 보드 신호선, IC 패키지상의 전송선등을 설계하는 작업을 손쉽게 해준다. PCB상의 테스트처럼 하나의 임피던스 불일치점일 경우, TDR은 정확하게 임피던스 값과 위치를 찾아낸다. 그러나 실제 환경에서의 신호선들은 보드상의 패키지와 커넥터, 비아들과 연결되어져 있고 잠재적으로 이러한 소자들간은 임피던스차를 발생한다. 이와 같이 실제환경은 좀더 복잡하고, multiple reflection으로 알려진 영향을 고려해야 한다.

TDR은 첫번째 불일치점은 정확하게 감지하지만, 다반사 현상에 의해 펄스파의 상승시간이 감소하며, 뒤에 발생하는 임피던스 불일치점의 정확도는 현저히 떨어진다. TDR의 고분해능은 입력펄스의 짧은 상승시간에 의존한다. 그러나, 상승시간이 짧아질수록, 성능 감소의 결과를 일으키는 ringing, preshoot와 같은 오차요인이 발생한다. 또한 TDR장비 자체의 샘플링 레이트의 제한은 분해능을 개선시키는데 또 하나의 어려움이다.

SWR은 측정하고자 하는 도선에 사인파를 보내고, 결함부에서 반사된 신호와 기준신호가 중첩되어 정재파를 발생시킨다. 이 정재파의 피크점과 널(null)점에서 도선의 결함위치를 임피던스값에 대한 정보를 얻는 기법이다<sup>[7]</sup>.

SWR와 마찬가지로, FDR기법은 사인파를 사용한다. FDR은 기준신호와 반사된 신호간의 위상차를 측정한다. FDR과 SWR의 경우, 이 방법의 분해능은 위상차를 이용하는 FDR은 위상이 노이즈에 민감하

기에 상대적으로 높은 오차율을 보인다. 단지 한 영역에서 신호를 분석하는 이러한 방법론들은 잠재적으로 낮은 정확도를 갖게 된다.

손상된 도선의 결함은 실제 시스템 상에서 다양한 형태로 존재하며, 결과적으로 기존의 방법들은 이러한 결함들을 특성을 감지하고 추정하는데 어려움이 존재한다. Smart wiring system상의 이러한 어려움들을 극복하기 위해 실제 환경에 적합한 고분해능 반사측정법이 필요하다.

본 논문에서 제안된 TFDR(Time-Frequency Domain Reflectometry) 알고리즘은 하나뿐만 아니라 여러 개의 결함에 대해서도 좀더 정확하게 감지할 수 있는 성능을 갖는다. 기준 신호는 측정하고자 하는 도선의 주파수 응답특성과 분해능등을 고려하여 설계하였다. 제한된 TFDR방법은 시간-주파수 상호상관 관계함수(time-frequency cross correlation function)을 이용하여 높은 정확성을 보여주었다. 제안된 TFDR 알고리즘의 이론적인 기반은 2장에서 논의하였고 반사측정법의 실험 방법에 대해 3장에서 나타내었다. 4장에서는 기존의 방법들과 TFDR의 성능을 고주파용 coaxial cable을 가지고 비교 분석하였다.

## II. 제안된 TFDR 알고리즘

본 장에서는 시간-주파수 반사측정법의 기본 개념에 대해 서술하였다. TFDR알고리즘과 기존의 반사 측정법론들을 신호체계 관점에서 비교하였다. 그

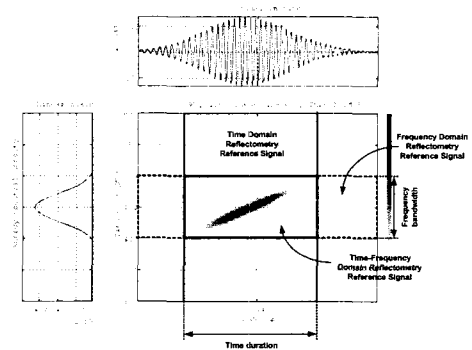


그림 1. 설계된 기준신호의 시간-주파수 분포상에서 TDR, FDR, TFDR의 비교  
Fig. 1. Comparisons of the TDR, FDR and TFDR for the designed reference signal on time-frequency distribution.

그림 1은 TDR, FDR, TFDR에 대해 기준신호체계를 묘사하였다. 그림에서 묘사한 것과 같이, 기존방법은 시간 또는 주파수 영역에서 기준신호와 반사신호의 분석이 이루어진다. 반면에, TFDR은 시간-주파수 분석기법(time-frequency analysis)을 기반으로 높은 정확도를 얻기 위해 시간과 주파수영역의 정보를 함께 고려하였다. TDR은 시간영역에서만 고정된 시간간격을 갖는 스텝펄스를 이용하고 반사된 신호와 비교 분석 한다. 결과적으로, TDR은 이상적인 스텝 펄스의 시간대역폭에 무한한 주파수 성분을 갖고 있기 때문에 주파수 영역에서 신호를 분석할 수 없다. 반면, FDR은 고정된 주파수 밴드를 갖는 사인신호를 소인하며 주파수 영역에서 신호의 변화를 분석한다. 결과적으로, 순수한 사인신호는 무한한 시간폭을 갖기 때문에 FDR기법을 가지고 시간영역 데이터를 얻어 내기가 간단하지 않다. 기존 방법론들은 단지 시간 또는 주파수 영역에서 기준신호와 반사신호 분석을 수행하였다. 그러나, TFDR 방법은 기존의 방법들의 단점을 보완하기 위해 결합된 시간-주파수 영역에서 신호의 시간-주파수 분포함수(time-frequency distribution)를 채택하였다. TFDR 알고리즘의 순서도는 그림 2에 나타내었다. 우선, 측정도선의 주파수 특성을 예측하여 얻어진 처프(chirp)신호의 적절한 시간과 주파수 대역폭을 고찰한다. TFDR에서 얻어진 시간 데이터는 위그너 분포함수(Wigner distribution)를 취한다. 신호의 위그너 분포함수는 시간-주파수 상호상관 관계함수의 평가를 위해 필요하다. 시간-주파수 상호상관 관계함수 피크치간의 차는 결합 위치로

변환되고, 시간-주파수 상호상관 관계함수피크값은 미리 결정된 경계값과의 비교를 통해 결함 상태를 추정하는데 사용된다. 기준 처프신호는 시간과 주파수영역에서 모두 측정가능한, 제한된 정보를 갖는 가우시안 포락선을 사용하였다. 처프신호 포락선은 시간영역에서 TDR과 유사한 기능을 하고, 반면에, 선형적으로 변조된 사인신호는 FDR 특성을 지닌다. 처프신호  $s(t)$ 는 본 논문에서 이용되었으며, 수식은 다음과 같다.

$$s(t) = (\alpha / \pi)^{1/4} e^{-\alpha(t-t_0)^2/2 + j\beta(t-t_0)^2/2 + j\omega_0(t-t_0)} \quad (1)$$

여기서,  $\alpha, \beta, t_0, \omega_0$ 는 각각 시간폭, 주파수 소인율, 중심 시간, 중심 각 주파수를 나타낸다. 결함을 감지하기 위해, 위그너 분포함수는 기준신호에 적용하였다. 기준신호의 위그너 분포는 다음과 같이 정의된다.

$$W_s(t, \omega) = \frac{1}{\pi} e^{-\alpha(t-t_0)^2 - (\omega - \beta(t-t_0) - \omega_0)^2 / \alpha} \quad (2)$$

$r(t)$ 는 반사된 신호, 이 신호의 위그너 분포는  $W_r(t, \omega)$ 를 나타내고 이것은 시간-주파수 상호상관 관계함수  $C_{sr}(t)$ ,

$$C_{sr}(t) = \frac{2\pi}{E_s E_r(t)} \int_{t-T_s}^{t+T_s} W_r(t', \omega) W_s(t-t', \omega) d\omega dt' \quad (3)$$

여기에서,

$$E_r(t) = \int_{t-T_s}^{t+T_s} W_r(t', \omega) d\omega dt' \quad (4)$$

$$E_s = \iint W_s(t, \omega) dt d\omega \quad (5)$$

$E_r(t)$ 와  $E_s$ 는 시간-주파수 상호상관 관계함수가 0~1에 경계되어지도록 하는 정규화 인자 역할을 한다. 기준신호와 반사신호간의 시간-주파수 정보의 유사성을 비교하는 시간-주파수 상호상관 관계함수를 가지고 배선 시스템 상에서 다수의 결함을 감지하는 것이 가능하다.

위 개념의 타당성은 다음 장에서 고주파용 coaxial cable을 가지고 실험을 통해 입증하였다. 그림 1에서, 고주파용 coaxial cable에 대한 기준신호의 설계된 시간-주파수 분포함수를 제공한다. 그림 3에서와 같이 기준신호의 시간폭은 50 ns이고, 주파수 대역은 400

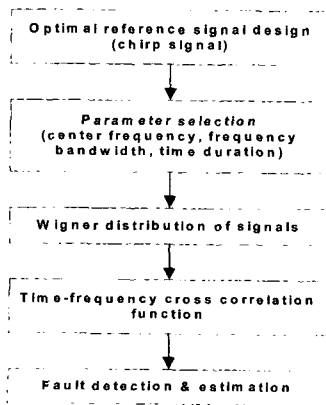


그림 2. TFDR 알고리즘  
Fig. 2. TFDR algorithm.

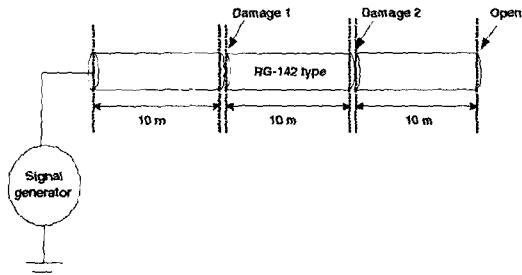


그림 3. 다수 결함을 갖는 RG 142 coaxial cable  
Fig. 3. Multiple fault on a RG 142 coaxial cable.

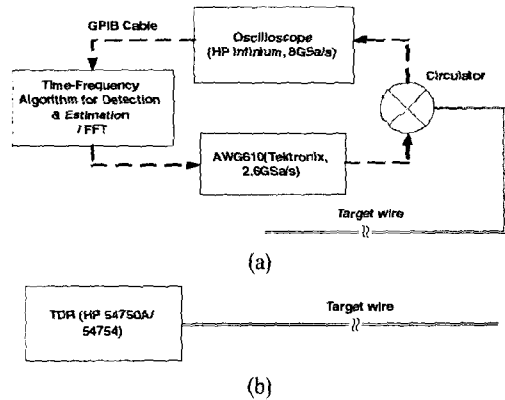


그림 4. (a) TFDR/FDR, (b) TDR의 실험 구성도  
Fig. 4. Experimental setup of the TFDR/FDR (a) and TDR (b).

MHz~500 MHz로 제한하였다. 시간영역에서의 가우시안 포락선은 또한 주파수영역에서 같은 성질을 반영한다. 즉, 시간과 주파수영역에서 동시에 적절한 지역화를 허용한다.

### III. 실험 구성

여러 경우의 결함에 대한 실험을 하기 위해 단일 결함과 복합 결함에 대한 실험을 수행하였다. 먼저, 단일 결함은 RG 400 타입에 대해, 결함의 위치(10 m, 20 m, 30 m, 40 m)를 변화시키고, 결함상태를 "open", "short", "damage"로 각각 구분하였다. Coaxial cable의 "damage"의 경우 외부차폐 손상 길이를 1 cm로 고정하였다. Coaxial cable의 "damage" 상태는 외부차폐도체와 유전체 일부를 제거하였다. 복합 결함은 RG 142 타입에 대해 2개의 "damage"(불일치점)과 마지막단에 "open"으로 실험하였다. 그림 3에서와 같이, 결함들은 소스원으로부터 10 m 간격으로

표 1. RG 타입에 대한 물리적, 전기적인 성질의 파라미터

Table 1. Physical and electrical property parameter for a RG type coaxial cables.

Coaxial cable type	Inside radius [mm]	Outside radius [mm]	Permittivity (r)	Loss tangent, [f≤3 GHz일 경우]
RG 142	0.9398	3.4544	2.1	0.0003
RG 400	1.0150	3.5900	2.1	0.0003

이루어진다. 손상된 도선은 CPU, 오실로스코프, 임의의 신호 발생기, circulator를 포함한 TFDR 시스템에 연결되어져 있다. 게다가, 실제 TDR 장비(HP사, 54750A/54754)를 가지고 전반적인 시스템 성능을 비교하였다. TFDR/FDR 측정 시스템은 임의의 신호발생기(Tektronix사, AWG610, 2.6 Gsa/s)와 오실로스코프(HP Infinium, 8 Gsa/s)로 구성되고 각각은 GPIB cable로 연결되어져 있다. GPIB cable을 사용하여, CPU에서 외부 장비들을 조정하고, 획득된 신호 데이터를 가지고 시간-주파수 상호상관 관계 알고리즘을 수행한다. 시뮬레이션은 표 1과 같은 파라미터와 같은 조건으로 수행하였다. TDR 측정에 대한 기준 입력신호는 펄스파형이고, FDR은 Giga-bit sample된 500 MHz 사인파를, TFDR의 경우 시간에 따라 주파수가 선형적으로 증가하는 가우시안 포락선 형태의 처프 신호(중심주파수: 450 MHz, 주파수밴드: 100 MHz, 시간간격: 50 ns)를 사용한다.

기준신호의 주파수 범위를 결정하기 위해, RG 타입 coaxial cable의 주파수 특성을 그림 5에 나타내었다. 위상 특성은 수백 MHz까지 상당히 잘 유지되는 것을 볼 수 있으나, 진행파의 크기는 수 GHz 영역에서 급격히 감소되는 것을 알 수 있다. 처프 신호의 변조되는 주파수 범위는 시스템의 분해능, 위상변화, 감쇄특성을 고려하여 400 MHz~500 MHz로 선택하였다. 또한, 불행히도, 처프 신호생성의 주파수 밴드가 결함부에서 반사된 신호의 진행방향을 바꾸어주는 circulator의 동작 주파수대역과 AWG610의 성능에 제한되어진다. 또한 좀더 작은 시간대역폭은 높은 시간-지역화(time-localization)와 dead-zone과 연관되어 있다. 하지만, 결정된 주파수 대역은 불확정성의 원리(uncertainty principle)에 의해 시간대역폭

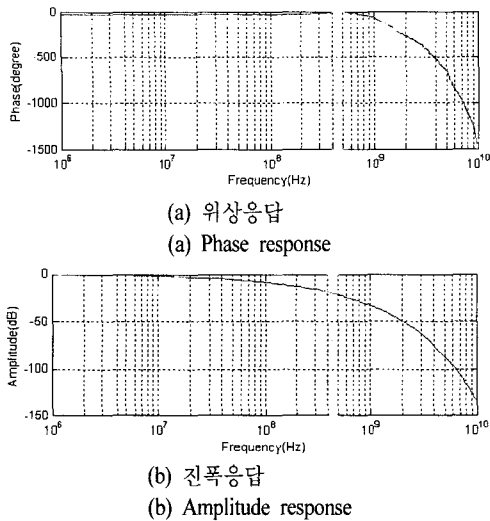


그림 5. RG 타입 coaxial cable의 주파수 특성  
Fig. 5. Frequency characteristics of RG type coaxial cable.

결정에 영향을 준다. 400 MHz~500 MHz의 주파수를 소인하기 위해, 최소 시간대역폭은 50 ns가 필요하다.

FDR과 TFDR의 공정한 비교를 위해 FDR 주파수를 TFDR 신호의 최대 소인주파수에 해당하는 500 MHz로 설계하였다. 도선의 파라미터 특성은 표 1에 나타내었다.

실제 배선시스템 상에서 여러 개의 결함이 존재할 가능성은 아주 높지만 이러한 결함들을 정확히 감지하는데 기존의 방법으로는 많은 어려움이 존재한다. 기존의 방법들과 제안된 방법들의 성능을 다양한 결함경우에 대해 측정 비교하였다. 위에서 묘사된 실험 구성 하에서 실제 측정은 다음 절에서 시뮬레이션 결과들과 비교 검증할 것이다.

#### IV. 측정결과 및 분석

##### 4.1 단일 결함이 존재할 경우

도선 중앙에 결함을 갖는 RG 142, RG 400 타입 coaxial cable를 고려하자. 그림 6과 그림 7은 ADS (Advanced Design System) 2002 시뮬레이션의 예이다. 각각은 RG 142에 대해 소스원으로부터 30 m 떨어진 위치에 결함이 존재하는 "damage" 상태에 대한 TDR과 TFDR의 결과를 보여준다. TDR측정에서 결

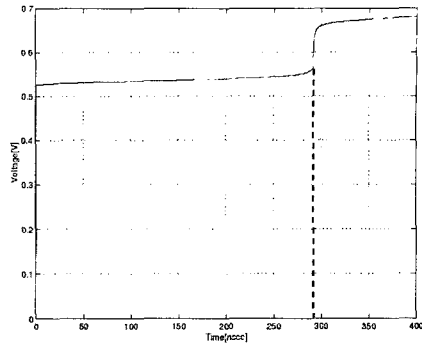


그림 6. RG 142 coaxial cable상의 30 m 지점 결함 감지 및 추정에 대한 TDR 시뮬레이션(추정된 결함 위치: 30.07 m, 오차율: 0.23 %)

Fig. 6. The TDR simulation for the detection and estimation of the fault for a fault at 30m on a RG 142 type coaxial cable(Estimation fault location: 30.07 m, Error rate: 0.23 %).

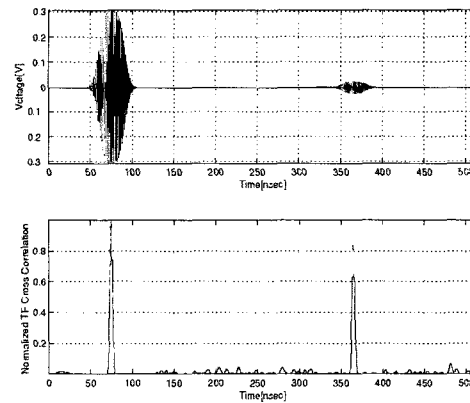


그림 7. RG 142 coaxial cable상의 30 m 지점 결함 감지 및 추정에 대한 TFDR 시뮬레이션(추정된 결함 위치: 30.04 m, 오차율: 0.11 %)

Fig. 7. The TFDR simulation of the detection and estimation of the fault for a fault at 30 m on a RG 142 type coaxial cable(Estimation fault location: 30.04 m, Error rate: 0.11 %).

함위치를 계산하기 위해, calibration과정을 수행해야 한다. TDR에서 전파속도는 공정한 비교를 위해 측정 도선을 가지고 calibration과정에서 구한다. 하지만, TFDR의 관심있는 주파수에 해당하는 도선의 전파속도(velocity of propagation)는 제작자로부터 제공받는다. 시간-주파수 상호상관 관계함수의 피크점은 TFDR시스템 상에서 기준신호와 반사신호간의 전파

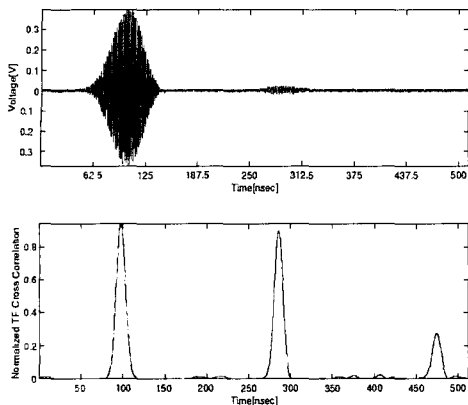


그림 8. RG 400 타입 coaxial cable의 20 m 지점의 "open" 결함에 대한 반사된 신호의 시간 파형과 결함 감지 및 추정에 대한 시간-주파수 상호상관 관계함수(추정된 결함 위치: 19.97 m, 오차율: 0.15 %)

Fig. 8. Time series of the reflected signal in (a) and corresponding time-frequency cross correlation function for detection and estimation of the fault in (b) for a open at 20 m of a RG 400 type coaxial cable(Estimation fault location: 19.97 m, Error rate: 0.15 %).

지연을 정확히 구하는데 이용된다. 이 전파 지연은 전파속도 정보를 가지고 결함 위치로 환산된다. TDR과 TFDR에서 결함위치는 다음의 수식에 의해 계산되어진다.

$$d = \frac{VOP \times t_d}{2} \tag{6}$$

여기에서,  $d$ 는 결함위치,  $VOP$ 는 도선의 전파속도를 나타낸다.  $t_d$ 는 TDR에서는 펄스파의 왕복시간을, TFDR에서는 기준신호와 반사신호에 대한 시간-주파수 상호상관 관계함수의 피크점간의 시간차를 의미한다. RG 142와 RG 400에 대한 제작자로부터 제공받은  $VOP$ 는  $2.085 \times 10^8$  [m/s]이다.

그림 8는 기준 신호 소스원으로부터 20 m 떨어진 RG 400 타입에 대한 "open" 상태의 TFDR의 측정 결과값을 보여준 것이다. 그림 8-(a)에서, 기준신호는 50 ns~150 ns간에 위치하였으며, 250 ns~350 ns의 시간간격에 위치한 신호성분은 도선의 손상된 지점으로부터 반사된 신호를 의미하지만, 시간영역에서 식별하기가 어렵다. 그림 8-(b)는 결함의 상태와 위치의 감지 및 추정에 대한 기준신호와 반사신호와의 시

간-주파수 상호상관 관계함수를 취한 결과이다. 그림에서 첫번째 피크값은 기준신호간의 상관관계값을 나타내며, 두번째 피크점은 반사신호와의 상관관계값으로써 결함이 존재함을 보여주고 있다. 결함의 감지뿐만 아니라, TFDR은 또한 왕복시간에 상응하는, 첫번째와 두번째 피크점간의 시간 지연에 근간한 결함 위치를 정확히 추정(19.97 m, 오차율: 0.15 %)이 가능하다. TDR과 TFDR의 정확한 비교를 하기 위해, 같은 조건의 coaxial cable에 대해 TDR 장비 (HP 54750A/54754)를 가지고 측정하였다. 그림 9는 그림 8에서 제공된 실험 조건하에서 TDR 장비로 측정된 결과이다. TDR은 불일치점에 프로브하여 결함위치를 추정하고 신호의 포락선 변화를 관찰하여 결함을 감지한다. 그러나, 그림 9와 같이, 기준신호의 이상적인 스텝은 반사된 신호에 의해 왜곡되어지고 결함의 위치를 정확하게 측정하기가 쉽지 않다. 결함위치의 결과는 19.60 m(오차율: 2.0 %)로 측정되어졌다. 전반적인 RG 400 타입에 대한 실험결과들은 표 2에 정리하였다. 결과를 좀더 시각적으로 보이기 위해, 각 실험의 오차율들을 제공하고 그림 10에 나타내었다.

그림 10의 TDR 결과에서 거리가 길수록 파형의 왜곡이 심해져 오차율이 커지는 경향이 있다. damage 상태 10 m에서 오차율이 높은 것은 cable의 fault 거리를 재는데 오차로 보여진다. 하지만, 전체

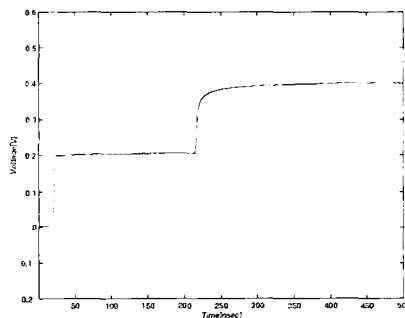


그림 9. RG 400 타입 coaxial cable 20 m 지점에 존재하는 결함 감지 및 추정에 대한 TDR 측정장비 파형(추정된 결함 위치: 19.60 m, 오차율: 2.0 %)

Fig. 9. A screen snapshot of the TDR HP54750A/54754A for the detection and estimation of the fault for a fault at 20 m on a RG 400 type coaxial cable(Estimation fault location: 19.60 m, Error rate: 2.0 %).

표 2. RG 400 타입 coaxial cable에 대한 TDR과 TFDR의 성능 비교

Table 2. Comparison of TDR and TFDR for a RG 400 type coaxial cable.

Fault location	RG 400 fault state	TFDR	Error(m)	TDR	Error(m)
40 m	damage	39.93	0.07	39.19	0.81
	open	39.83	0.17	39.09	0.91
	short	40.05	0.05	39.19	0.81
30 m	damage	29.90	0.10	29.48	0.52
	open	29.86	0.14	29.38	0.62
	short	29.93	0.07	29.45	0.55
20 m	damage	19.99	0.01	19.70	0.30
	open	19.97	0.03	19.60	0.40
	short	19.96	0.04	19.70	0.30
10 m	damage	9.96	0.04	9.79	0.21
	open	9.94	0.06	9.89	0.11
	short	9.95	0.05	9.89	0.11

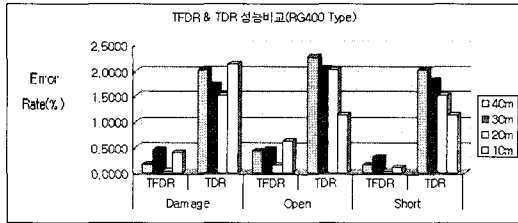


그림 10. RG-400 coaxial cable의 여러 결함 위치에 대한 TFDR과 TDR간의 오차율(error rate) 비교

Fig. 10. Comparison of the fault location error rate between the TFDR and TDR with RG 400 coaxial cable for different fault location.

적인 경향을 보면, TDR 정확성은 거리에 영향을 받으나, TFDR은 거리에는 무관함을 알 수 있다. 표 2에서 볼 수 있듯이, TFDR은 모든 결함 타입에 대해 TDR방법보다 우수한 성능을 보여주었다. TDR 측정에서 오차율은 1~2% 정도인 반면에, TFDR의 결과는 모든 경우에 대해 0.6% 이하의 오차율을 보인다. TFDR과 TDR방법에서 단일 결함에 대한 시뮬레이션 결과는 모두 1% 이하로 나타나는데 주파수 특성을 완전히 반영하지 못한 결과이다. 게다가, 그림 10에서 보여준 것과 같이, TDR에서는 거리가 멀어질수록 높은 오차율을 보이는 경향이 보이는 것을 알 수 있다. 그러나, TFDR 방법은 TDR에서 관찰되는

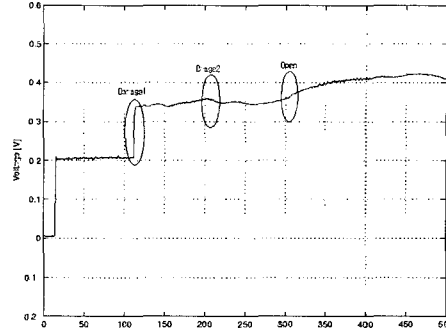


그림 11. 다수의 결함을 갖는 RG 142 타입 coaxial cable에 대한 TDR 파형

Fig. 11. A screen snapshot of the TDR HP54750A/54754A for a multiple fault of a RG 142 type coaxial cable.

유사한 경향은 보이지 않고 전반적으로 TDR보다 오차율이 반정도에 불과한 것을 알 수 있다.

#### 4.2 다수의 결함이 존재할 경우

다수의 결함이 존재할 경우의 성능을 비교하기 위해, TDR, FDR, TFDR방법들에 대한 시뮬레이션과 측정은 RG 142에 대해 수행되어졌다. 그림 11은 TDR장비를 가지고 다수의 결함에 대한 측정된 파형을 나타낸 것이다. 그림 11에서 10 m("damage 1")지점의 결함은 상대적으로 명백하게 인식할 수 있으나, 20 m("damage 2")와 30 m("open")지점의 결함들은 분명치 않은 파형때문에 명료하게 인식하기가 어렵다. 그러므로, TDR은 첫번째 결함을 제외한 여러 결함이 같이 존재할 경우 정확히 감지해 내기가 어렵다는 점이 확실하다.

그림 12는 AWG610장비에서 발생된 500 MHz 사인신호로써 설계된 기준신호와 다수의 결함을 갖는 RG 142 coaxial cable로부터 반사된 신호간의 위상차를 구한 것이다. RG 142 coaxial cable의 10 m 지점의 결함부에서 반사된 신호와 기준신호와의 구한 위상차는 174.08°이다. 그러나, 20 m와 30 m인 경우, 거리에 대한 위상 정보는 신호의 다반사의 중첩현상에 의해 얻어낼 수 없다.

이 위상정보는 두 신호에 대해 FFT를 취한 후, 결함 거리로 환산된다. 위상차  $\theta$ 로부터, 다음의 수식으로 거리로 환산된다.

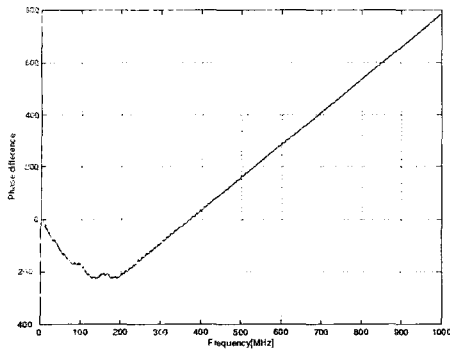


그림 12. 다수의 결함을 갖는 RG 142 타입 coaxial cable으로부터 기준 신호와 반사 신호간의 위상차

Fig. 12. Phase difference between reference and reflected signal from a multiple fault a RG 142 coaxial cable.

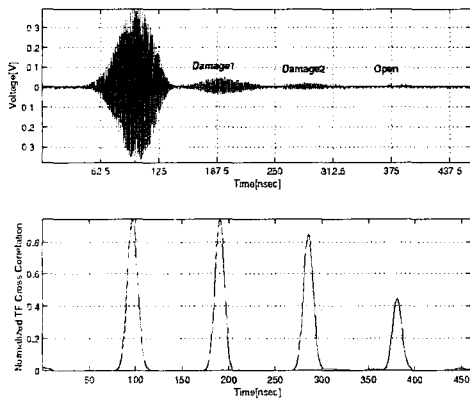


그림 13. 다수의 결함을 갖는 RG 142 타입 coaxial cable에 대한 기준신호와 반사된 신호의 시간 파형과 시간-주파수 상호상관 관계함수  
Fig. 13. Time series of the reference and reflected signal in (a) time-frequency cross correlation function in (b) for a multiple fault of a RG 142 type coaxial cable.

$$d = \frac{VOP \times \theta}{\omega} \quad (7)$$

그림 13-(a)는 TFDR측정으로부터 얻어진 시간영역에 대한 기준신호와 반사신호의 파형을, 그림 13-(b)는 시간-주파수 상호상관 관계결과값을 나타낸다. 시간영역의 신호는 감쇄와 다반사에 의해 반사된 신호의 위치를 명확히 보이기 어렵다. 그러나, 시간영역 데이터의 작은 신호임에도 불구하고

표 3. 다수의 결함이 존재하는 RG 142 coaxial cable 을 가지고 TDR, FDR, TFDR간의 결함 감지 및 추정 성능 비교

Table 3. Comparison of the multiple fault detection and estimation among the TDR, FDR and the TFDR with a RG 142 coaxial cable.

		Fault location (state)	Detection and Estimation	Error (m)	Error (%)
TDR	Measured	10 m(damage1)	9.956	0.044	0.44
		20 m(damage2)	undetected	-	-
		30 m(open)	undetected	-	-
	Simulated	10 m(damage1)	10.032	0.032	0.32
		20 m(damage2)	20.112	0.112	0.56
		30 m(open)	29.842	0.158	0.53
FDR	Measured	10 m(damage1)	11.477	1.477	14.77
		20 m(damage2)	undetected	-	-
		30 m(open)	undetected	-	-
	Simulated	10 m(damage1)	8.962	1.038	10.38
		20 m(damage2)	undetected	-	-
		30 m(open)	undetected	-	-
TFDR	Measured	10 m(damage1)	9.957	0.043	0.43
		20 m(damage2)	19.938	0.062	0.31
		30 m(open)	29.925	0.075	0.25
	Simulated	10 m(damage1)	9.983	0.017	0.17
		20 m(damage2)	19.972	0.028	0.14
		30 m(open)	29.818	0.182	0.61

시간-주파수 정보를 함께 고려할 수 있는 시간-주파수 상호 상관 관계값은 위치 (10 m, 20 m, 30 m)와 상태("damage", "open", "short")에 상관없이 도선의 여러 결함들을 정확히 잡아내었다. 표 3은 TDR, FDR 뿐만 아니라 TFDR의 실험과 시뮬레이션 결과값들을 요약하였다. TDR과 TFDR의 오차율은 거의 대부분의 결함에서 1% 정도의 신뢰도 범위에 수렴하였다. 그러나, FDR법은 오차율을 보정하지 않았으며, 노이즈에 민감하기에 오차율이 10%를 초과한다. 노이즈에 대한 취약성은 FDR방법의 가장 중요한 단점이며, 널리 실용화되지 못하는 점이다.

다수의 결함의 경우, TDR과 FDR 모두 2번째, 3번째 결함을 감지해 내지 못한다. 하지만, 제안된 TFDR 알고리즘은 매우 정확한 측정결과값을 보인다. TFDR이 다른 기존의 방법들보다 노이즈에 강하고



높은 분해능을 가지며, 신뢰할 수 있는 오차율 범위 내로 다수의 결함들을 감지 및 추정할 수 있는 성능을 가지고 있음은 분명하다.

## V. 결 론

치프 신호의 시간-주파수 상호상관 관계분석에 근거한, 매우 정확한 TFDR 방법을 제안하였고, 상당한 실험을 통해 그 정당성을 확인하였으며, 결과들을 입증하였다. TFDR 알고리즘의 시뮬레이션과 측정 결과들은 모든 경우에 대해 TDR, FDR의 결과값보다 작은 오차율인 1% 이하로 보여주었다. 더군다나, 제안된 방법은 단일 결함뿐만 아니라 기존 방법의 단점으로 밝혀진 도선에 다수 결함이 존재할 경우에 대해서도 감지 및 추정이 가능하다. 따라서, TFDR은 비교적 다양한 결함 타입에 대한 감지 및 추정 결과들에 있어 보다 높은 분해능을 갖는 우수한 반사측정법이라고 결론 내릴 수 있다. 이 새로운 반사측정법은 고주파용 cable에 국한된 것이 아니다. 동축 케이블, ADSL 라인, 네트워크 케이블, 광 케이블 등과 같은 전송선에 대해서도 적용 가능하다. 이 TFDR은 또한 신호 무결성(signal integrity)문제상의 임피던스 측정과 같은 다른 연구 분야에 유용하게 쓰여질 수 있을 것이다.

## Acknowledgement

The authors would also like to acknowledge support from The National Radio Research Laboratory, Seoul, Korea for their assistance in conducting the experiments.

## 참 고 문 헌

- [1] C. Furse, R. Haupt, "Down to the Wire: The Hidden Hazard of Aging Aircraft Wiring", *IEEE Spectrum*, pp. 35-39, Feb. 2001.
- [2] C. Teal, C. Satterlee, "Managed aircraft wiring health directly relates to improved avionics performance", *Digital Avionics Systems Conference, 2000. Proceedings*, vol. 1, pp. 3B6/1-3B6/6, 2000.
- [3] S. Navaneethen, J. J. Soraghan, W. H. Siew, F. McPherson and P. F. Gale, "Automatic fault location for underground low voltage distribution networks", *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 16, no. 2, pp. 346-351, Apr. 2001.
- [4] A. Beghi, M. Bertocco, "A robust fault detection algorithm for the improvement of OTDR sensitivity", *Instrument and Measurement Technology Conference, 1996. IMTC-96. Conference Proceedings. Quality Measurement: The Indispensable Bridge between Theory and Reality, IEEE*, vol. 2, pp. 818-821, 1996.
- [5] H. Vanhamme, "High resolution frequency-domain reflectometry", *Instrument and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 39, no. 2, pp. 365-375, Apr. 1990.
- [6] M. Wegmuller, M. Lerge, P. Oberson, O. Guinnard, L. Guinnard, C. Vinegoni and N. Gisin, "Analysis of the polarization evolution in a ribbon cable using high-resolution coherent OFDR", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, no. 2, pp. 145-147, Feb. 2001.
- [7] N. Kamdor, C. Furse, "An inexpensive distance measuring system for location of robotic vehicles", *Antennas and Propagation Society, IEEE International Symposium 1999*, vol. 3, pp. 1498-1501, 1999.
- [8] Leon Cohen, "Time-frequency distributions-a review", *Proc. IEEE*, vol. 77, pp. 941-981, Jul. 1989.
- [9] Y. J. Shin, E. S. Song, J. W. Kim, J. B. Park, J. G. Yook and E. J. Powers, "Time-frequency domain reflectometry for smart wiring systems", *The International Symposium on Optical Science and Technology. SPIEs 47<sup>th</sup>*, vol. 4791, pp. 86-95, Jul. 2002.

송 은 석



2001년: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학사)  
2001년 8월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석사과정  
[주 관심분야] power/signal integrity, EMI/EMC analysis, time-frequency analysis, microwave circuit and computational electromagnetics

육 중 관



1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
1998년 12월: University of Michigan 전기전자공학과 (공학박사)  
1997년 1월~1998년 10월: University of Michigan Research Fellow  
1998년 11월~1999년 2월: Qualcomm Inc. Senior Engineer  
1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수  
2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 조교수  
[주 관심분야] microwave circuit & antenna, RF MEMS, computational electromagnetic, power integrity, EMI/EMC analysis, SAR

신 용 준



1996년: 연세대학교 전기공학과 (공학사)  
1997년: University of Michigan, Ann Arbor 전기전자공학과 (공학석사)  
1997년~현재: University of Texas at Austin 전기컴퓨터공학과 박사과정

[주 관심분야] time-frequency analysis, wavelet, high order statistical signal analysis, power system, measurement & instrument

박 진 배



1977년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)  
1985년 5월: University of Kansas State (공학석사)  
1990년 12월: University of Kansas State (공학박사)  
1992년 3월~1993년 12월: 연세대학교 조교수

1993년 5월~현재: 교육부 (심의위원)  
1993년 5월~현재: 산업정책연구원 (전문위원)  
1993년 5월~현재: 생산기술연구원 (전문위원)  
1994년 4월~현재: 정보통신부 (심의위원)  
1994년 4월~현재: 통상자원부 (기획평가위원)  
1994년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 부교수  
1994년 10월~현재: 국방부 (심의위원)  
1997년 9월~1999년 2월: 연세대학교 전기공학과 학과장  
1998년 6월~1999년 8월: 연세대학교 연세공학원 (부원장)  
2000년 1월~현재: 대한전기학회 학술위원회 (위원)  
[주 관심분야] measurement & instrument, optics, nonlinear control, robust control, fuzzy systems, neural network, signal processing and robotics