

가우시안 입력신호와 상호상관관계 함수를 이용한 TDR 성능향상에 관한 연구

최덕선\*, 윤태성\*\*, 박진배\*

\*연세대학교 전기전자공학과, \*\*창원대학교 전기공학과

A Study on Improving TDR Performance Using Gaussian Envelope Input Signal and Cross Correlation Function

Tok Son Choe\*, Tae Sung Yoon\*\*, Jin Bae Park\*

\*Dept. of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei Univ. \*\*Dept. of Electrical Engineering, Changwon National Univ

**Abstract** - 본 논문에서는 도선의 결함 유무와 결함 위치를 측정하는 방법으로 널리 사용되고 있는 시간 영역 반사파 처리 기법(Time Domain Reflectometry : TDR)의 성능 향상을 위하여 가우시안 형태를 가지는 입력 신호와 상호 상관 관계 함수를 이용한 신호 처리 방법을 제안한다. 일반적으로 TDR은 입력 신호와 반사 신호의 시간 지연을 측정해서 결함 위치를 측정하게 되므로, TDR 방법으로 결함 위치를 측정하는데 있어 시간축 분해능의 정도에 따라 측정 방법의 성능이 크게 좌우된다. 따라서, 본 논문에서는 제한된 시간축 분해능에서 결함 위치 측정의 정확도를 향상시키기 위해 가우시안 형태를 갖는 입력 신호 및 반사 신호와의 상호 상관 관계 함수를 사용한다. 한편, 실제 도선에 적용하여 기존의 TDR 방법과 측정 성능을 비교 분석함으로써 본 논문에서 제안하는 방법의 우수성을 검증한다.

도선에 결함이 없다면 반사가 일어나지 않는다. 따라서, 파형 측정부에서 측정된 파형은 반사파가 없고 인가된 신호만 나타나게 된다. 만약 대상 도선에서 어떤 지점에 결함이 존재하면 그 지점에서 반사파가 나타나게 되고 이 반사파는 인가된 신호와 합성되어 파형 측정부에 디스플레이되게 된다. 이 때 파형 측정부에서 인가한 신호와 반사된 신호 사이의 시간을 정확히 측정할 수 있다면 신호를 인가한 부분에서 결함 위치까지의 거리를 계산할 수 있다. 이는 대상 도선에서 신호의 전달 속도가 일정하다는 것을 이용한 것이다. 또한 파형 측정부에서 파형의 모양을 보고 결함의 종류 및 상태에 대한 정보를 얻을 수 있다[5].

결함의 위치를 측정하는데 있어서 중요한 요소는 인가된 신호와 반사된 신호 사이의 정확한 시간 측정이다 [6]. 정확한 시간 측정은 파형 측정부의 시간축 분해능에 크게 영향을 받는다. 파형 측정부의 시간축 분해능이 더 정밀하면 정밀할수록 정확한 시간 측정이 가능해진다. 본 논문에서는 제한된 시간축 분해능으로 결함 위치에 대한 보다 정밀한 측정을 위해서 가우시안 형태의 입력신호와 상호상관관계 함수를 이용한 신호 처리 방법을 제안한다. 이를 실제 도선에 적용하여 기존의 측정 방법과 성능을 비교 분석함으로써 제안된 방법의 우수성을 검증한다.

1. 서 론

시간 영역 반사파 처리 기법(Time Domain Reflectometry : TDR)이란 측정 대상에 스텝(step) 신호 또는 펄스(pulse) 신호를 인가하여 반사되는 신호를 분석함으로써 측정 대상의 상태와 결함 위치의 거리를 알아내는 측정 방법이다. TDR의 원리는 1930년대부터 레이더(radar)에 사용되었는데, 이 때 레이더는 짧은 펄스의 마이크로웨이브(microwave) 에너지를 전송하는 송신기와 방향성 안테나 및 수신기로 구성된다. 송신기가 마이크로웨이브 펄스를 방출한 후, 이 펄스가 비행기나 배와 같이 멀리 위치해 있는 물체에 의해 반사되어 돌아오는 신호를 수신기로 수신한다. 이 때 펄스를 방출한 시점과 수신기가 반사되어 오는 신호를 수신한 시점 사이의 시간차를 측정하고 또한, 공기중에서 신호가 진행하는 속도를 알면 반사가 일어난 물체까지의 거리를 알 수 있다. 그리고 방출한 신호와 수신된 신호의 파형을 분석하면 반사가 일어난 물체에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이와 같이 레이더에 사용된 TDR은 초기 응용분야이다. 이외 응용분야로 라이더(ridar), 케이블 TDR[1], 광(Optical) TDR[2], 토양 측정 TDR[3] 등이 있다. 라이더는 레이저 등 광을 이용한 레이더로서 기상측정에 많이 사용되며, 케이블 TDR이나 광 TDR은 동축(Coaxial) 케이블, 꼬임선(Twisted Pair) 케이블, 광 케이블의 상태와 결함 위치의 거리를 측정하는데 사용된다. 토양 측정 TDR은 토양의 습도, 토양의 수분함량 등을 TDR 방법을 통해 측정한다. 본 논문에서는 TDR의 여러 응용분야 중 케이블, 특히 동축 케이블의 결함의 상태 및 결함 위치 측정에 사용되는 TDR의 성능향상 방법에 대해 다루고자 한다.

일반적인 TDR 측정 시스템[4]은 펄스나 스텝 신호 등의 신호를 발생하는 신호 발생부와 신호 발생부에서 인가한 신호와 결함 지점에서 반사되어 오는 신호를 측정하여 디스플레이하는 파형 측정부로 구성된다. 신호 발생부는 스텝 또는 펄스 신호를 측정 대상 도선에 인가한다. 인가된 신호는 대상 도선에 진행하게 된다. 만약

2. 결함 위치 측정 방법

2.1 기존 결함 위치 측정 방법

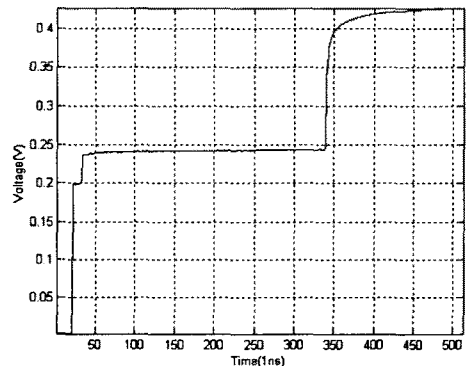


그림 1. 5C-2V 도선의 30[m] 부분이 "open" 상태일 때 기존의 방법에 의해 얻어진 신호

그림 1은 케이블 TV용 도선(5C-2V)의 30[m] 부분을 "open" 상태로 하고 HP 54754 모듈로 스텝 신호를 인가해서 반사되어 오는 신호를 HP 54750 오실로스코프로 디스플레이한 데이터이다. 약 30[ns] 부근에서의 위상 변화는 도선 앞 부분에서 스텝 신호 인가로 인해

나타나는 부분이다. 그림 1에서 약 340[ns] 부분에서의 위상 변화는 30[m]에서 도선이 "open" 상태이기 때문에 스텝 신호가 그 부분에서 반사되어서 발생한 것이다. 일반적인 TDR 방식을 사용하는 장비들은 그림 1과 같이 도선에 결함이 존재할 경우 그 부분에서 위상이 변화한다는 것을 이용해서 결함 위치를 계산한다. 앞 부분의 위상의 변화가 나타나는 부분은 정확히 33[ns]이며, 뒷 부분의 반사로 인해 위상이 변화한 부분은 정확히 338[ns]이다. 이로부터 입력 신호와 반사 신호의 시간 지연  $t_d$ 를 계산하면 305[ns]이다.

도선 제조 회사의 도선 사양으로부터 케이블 TV용 도선(5C-2V)의 상대 유전율은 2.2에서 2.5사이의 값을 알 수 있다. 기존 측정 방법을 이용한 실험에서는 상대 유전율을 2.2와 2.5의 중간값인 2.35로 놓고 계산을 한다.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

또한, 식 (1)로부터 매질에서 파의 진행 속도가 빛의 속도를 상대 유전율의 제곱근으로 나눈 것과 같다는 관계를 알 수 있다. 이 관계로부터 매질에서 파의 진행 속도가  $1.9570e+8$ [m/sec]임을 알 수 있다.

$$\text{파가 진행한 거리} = t_d \cdot v \quad (2)$$

따라서, 식 (2)와 같이 시간 지연  $t_d$ 와 파의 매질에서 진행 속도  $v$ 를 곱하면 파가 진행한 거리를 측정할 수 있다. 시간 지연  $t_d$ 와 파의 매질에서의 진행 속도  $v$ 를 곱한 값은 59.6885[m]로 계산된다.

시간 지연  $t_d$ 는 인가된 신호가 결함 위치에서 반사되어 다시 인가된 위치까지 되돌아 오는데 걸린 전체 시간 이므로 실제 결함의 위치는 식 (2)의 값을 2로 나눈 값이 된다. 그러므로, 측정된 결함의 위치는 29.8442[m]이다. 실제 결함의 위치 30[m]와는 0.1558[m]가 차이가 난다. 이 오차를 퍼센트로 나타내면 0.5192%이다. 이 때 이용된 시간축 분해능은 1/1GHz이다.

## 2.2 제안된 결함 위치 측정 방법

본 논문에서 제안한 결함 위치 측정 방법은 파형 측정은 기존의 방식과 같다. 기존의 측정 방법은 파형을 측정 후 반사파의 위상 변화를 이용해서 결함 위치를 측정하기 때문에 장비의 시간축 분해능의 영향을 많이 받는다. 본 논문에서 제안한 방법은 측정된 신호를 그대로 사용하지 않고 신호 발생기로부터 바로 들어온 입력 신호와 결함 위치에서 반사된 신호 사이의 상호 상관 관계를 이용한다. 상호 상관 관계의 정확도를 향상시키기 위해 두 개의 채널을 사용한다. 하나의 채널은 신호 발생부에서 직접 파형 측정부로 입력되도록 하여 기존 입력 신호를 얻으며, 다른 한 채널은 신호 발생부에서 순환기(circulator)를 통과해 도선을 통과하도록 연결하여 파형 측정부에서는 순환기를 직접 통해 입력되는 신호와 만약 결함이 존재한다면 결함 위치에서 반사된 신호를 얻을 수 있도록 구성한다. 상호 상관 관계를 구할 때는 바로 들어온 신호와 도선을 통과해서 반사되어 입력된 신호 사이의 상호 상관 함수를 계산한다. 상호 상관 관계 함수를 사용할 때 사용된 계산식은 식 (3)과 같다.

$$R_{xy}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) y^*(n-k) \quad (3)$$

이렇게 얻어진 상호 상관 관계로부터 바로 입력된 입력 신호를 지역화(localization)한 후 모멘트를 구해 그 시

간 위치를 측정하고, 또한 상호 상관 관계로부터 반사되어 입력된 신호도 지역화한 후 모멘트를 구해 시간 위치를 측정한다. 시간 위치 구하는 방법은 다음 식 (5)와 같다.

$$m = \frac{1}{E} \sum_{k=0}^{N-1} k x^2(k) \quad (4)$$

$$E = \sum_{k=0}^{N-1} x^2(k)$$

따라서, 시간 지연은 상호 상관 관계 상에서 측정된다. 본 논문에서 제안하는 방법은 시간 영역의 신호를 바로 해석하지 않고, 입력 신호와 반사된 신호의 상호 상관 관계 상에서 그 신호들의 모멘트를 계산하여 측정하기 때문에 시간 영역에서 바로 시간 지연을 측정하는 것에 비교해서 낮은 시간축 분해능에서도 높은 정확도를 보인다.

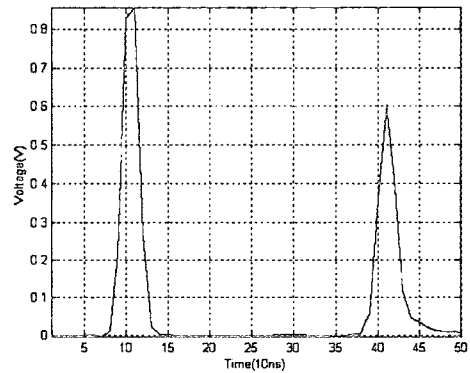


그림 2. 5C-2V의 30m 부분이 "open" 상태일 때 제안된 방법에 의해 얻어진 신호

그림 2는 본 논문에서 제안한 가우시안 모양의 입력 신호가 인가된 후 신호 발생부로부터 직접 입력된 신호와 결함의 위치에서 반사되어 다시 되돌아온 신호들이 오실로스코프에 디스플레이된 신호이다. 앞 부분의 50[ns]와 150[ns] 사이에 있는 신호가 파형 발생기로부터 직접 입력된 신호이며, 350[ns]와 450[ns] 사이에 있는 신호는 30[m] 지점에서 입력 신호가 반사되어 되돌아온 신호이다.

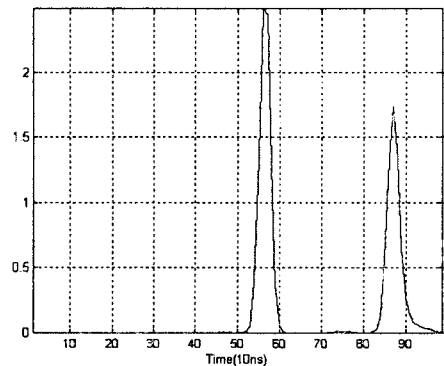


그림 3. 직접 들어온 입력신호와 반사된 신호 사이의 상호 상관 관계 그래프

그림 3은 직접 입력된 입력 신호와 반사된 신호 사이의 상호 상관 관계 그래프이다. 이 상호 상관 관계 그래프로부터 500[ns]와 600[ns] 사이에 있는 신호의 가장 큰 값을 기준으로 약 앞 뒤 10[ns]만큼 신호를 지역화하고 그 지역화한 신호의 모멘트를 구하여 바로 들어온 입력신호의 시간적 위치를 측정한다. 800[ns]와 900[ns]에 있는 반사파도 마찬가지로 방법으로 앞 뒤 약 10[ns]만큼 지역화하고 그 지역화한 신호의 모멘트를 구하여 반사된 신호의 시간적 위치를 측정한다. 그림 3의 경우는 위의 방법으로 구한 입력신호의 시간적 위치는  $5.74915e-7$ [sec]이며, 반사된 신호의 시간적 위치는  $8.83701e-7$ [sec]이다. 이것으로부터 구해진 입력신호와 반사파의 시간지연은  $3.0879e-7$ [sec]로 측정된다. 2.1절의 기존의 방법에 의한 결함 위치 측정에서와 같이 도선의 사양으로부터 얻어진 파의 진행 속도가  $1.9570e+8$ [m/sec]를 사용하면, 파가 총 진행한 거리는 60.4288[m]이다. 입력 신호가 결함 위치에서 다시 반사되어 되돌아 왔으므로 실제 거리는 파가 총 진행한 거리를 2로 나눈 값과 같다. 따라서 실제 결함의 위치는 30.2144[m]가 된다. 이 때의 오차를 퍼센트로 나타내면 0.7147%이다. 이때 이용된 시간축 분해능은 1/100MHz 이다.

### 3. 실험 조건 및 결과

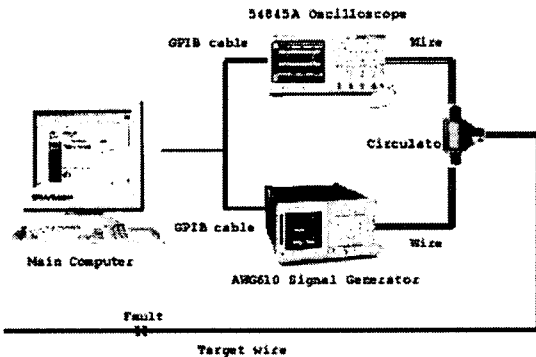


그림 4. 실험 장치의 구성도

본 논문에서 제안된 방법을 실험하기 위해서 그림 4와 같이 실험 조건을 구성하였다. 신호 발생부는 Tektronix의 AWG(임의 신호 발생기 : Arbitrary Waveform Generator) 610을 사용하였고, 이 신호 발생기를 이용해서 가우시안 형태의 입력 신호를 도선에 인가하였다. 인가된 신호는 Peak-to-Peak 전압이 2[V]이다. 인가된 신호는 도선을 따라 순환기를 통과하게 된다. 순환기의 역할은 인가된 입력 신호와 반사된 신호를 분기시켜 주는 역할을 한다. 순환기를 통과한 신호는 도선을 따라 진행하게 되고, 도선에 결함이 있다면 결함 위치에서 반사가 발생하게 된다. 반사된 신호는 다시 도선을 따라 돌아오게 되고, 순환기를 통과해서 오실로스코프(54845A)로 들어가게 된다. 하지만, 순환기가 완벽하게 입력 신호와 반사 신호를 분기시켜 주지 못하기 때문에 입력 신호가 오실로스코프에 먼저 디스플레이 되게 되고 시간 지연을 가지고 반사 신호가 중첩되게 디스플레이 된다. 신호 발생부에서 발생하는 신호를 정확히 확인하기 위해 한 채널에서는 신호 발생부에서 바로 파형 측정부로 신호를 전달할 수 있게 하였으며, 다른 채널은 앞서 서술한 바와 같이 파가 진행하도록 연결하였다. 파형 측정과 계측기 제어를 위해 각 계측기는 컴퓨터와 GPIB 케이블로 연결하였다. 컴퓨터를 통해 신호 발생기의 구동 및 파형 측정부에서 나온 신호를 바

로 컴퓨터로 이동할 수 있도록 환경을 구성하였다.

30m 지점에서 "open" 상태인 케이블 TV용 도선(5C-2V)에 대해 각 시간축 분해능에 따른 결함 위치를 측정된 결과는 표 1과 같다.

표 1. 5C-2V의 30m 부분이 "open" 상태일 때 각 시간축 분해능별 측정 결과

측정된 거리	오차	시간축 분해능
29.9330m	0.2233%	1/1GHz
29.9360m	0.2133%	1/500MHz
30.2144m	0.7147%	1/100MHz

표 1로부터 본 논문에서 제안된 방법을 사용했을 경우 낮은 시간축 분해능에서도 높은 정확도를 보임을 알 수 있었다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 도선의 결함 위치 측정을 위해서 널리 사용되는 TDR 성능향상 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 입력 신호와 반사 신호의 시간 지연을 정확히 측정하기 위해 입력 신호와 반사 신호의 상호 상관 관계 함수를 이용하였으며, 상호 상관 관계 함수에서 각 신호를 지역화하여 그 모멘트를 사용하였다. 본 방법은 시간 영역에서 바로 신호의 값을 읽는 것이 아니라 지역화된 신호의 모멘트를 이용하기 때문에 낮은 시간축 분해능에서도 비교적 높은 정확도를 나타냄을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Hayden, L.A., Marks, R.B., "Accuracy in time domain transmission line measurements", Electrical Performance of Electronic packaging, IEEE 3rd Topical Meeting, 176-178, 1994
- [2] Sumida, M., Imai, T., Furukawa, S., "Fault location on optical amplifier submarine systems", Instrumentation and Measurement Technology Conference, vol.1, 110-113, 1994
- [3] Nemanich, C.P., "Time domain reflectometry liquid level sensors", IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, Volume: 4 Issue: 4, 40-44, 2001
- [4] Hewlett Packard, "Time Domain Reflectometry Theory", Hewlett Packard, 1988
- [5] 이해철, "Time-to-Digital Converter를 이용한 저전력 Coax Time Domain Reflectometry 장치 구현에 관한 연구", 서울대학교 석사학위 논문, 2000
- [6] Van Biesen, L.P., Renneboog, J., Barel, A.R.F., "High accuracy location of faults on electrical lines using digital signal processing", Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions, Volume: 39 Issue: 1, 25-27, 1989