

## 반사와 계측법 기반의 활선 케이블 고장 검출을 위한 커플러의 개발

전정채<sup>1</sup>, 오훈<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국전기안전공사 전기안전연구원, <sup>2</sup>원광대학교 전기공학과

## Development of Coupler for Live Cable Fault Detection Based on Reflectometry

Jeong-Chay Jeon<sup>1</sup>, Hun Oh<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Electrical Safety Research Institute, KESCO

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Wonkwang University

**요약** 반사와 계측법을 기반으로 활선 상태의 케이블 고장과 위치를 검출할 때, 케이블과 계측 장치사이에 커플러가 사용된다. 이러한 커플러는 케이블에 공급되는 전압으로부터 반사와 계측 기반의 시험 회로의 손상을 예방하게 된다. 또한 케이블에 인가되고 반사되는 송수신 신호의 커플링 통로를 제공한다. 본 논문에는 반사와 계측법을 이용하여 사선과 활선 상태에서 케이블 고장 위치를 검출하는데 사용하기 위한 접촉식 커플러를 설계 및 제작하였다. 제안된 커플러는 유도성 결합 형태로 설계되었고 시뮬레이션을 통해 손실을 계산한 후 제작하였다. 제작한 커플러는 신호 입력에 따른 출력을 측정하여 손실과 주파수 평탄도 실험을 실시하였다. 그 결과 1MHz 이상의 주파수 대역에서는 신호의 전송 손실이 1.75dB 이하로 측정되었다. 활선 상태에서 케이블 고장과 위치 검출에 적용하기 위해 sequence time domain reflectometry (STDR)과 spread spectrum time domain reflectometry (SSTDR)에 기반한 반사와 계측법 시스템을 구축하여 케이블 고장과 위치 검출 실험을 실시하였다. 그 결과 본 연구에서 제안한 커플러가 활선 케이블 고장 검출을 위한 반사와 계측 장치에 사용될 수 있음을 확인하였다.

**Abstract** When measuring live cable faults and their location based on reflectometry, a coupler is placed between the cable and the test system. This coupler prevents damage to the test circuits by indirectly measuring the live voltage of the cable using reflectometry. It also provides a coupling path that allows the transmission and receive signal to pass into the cable. In this study, we design and construct a contact coupler to locate faults in both dead and live cables using reflectometry. The proposed coupler is of the inductive coupling type and is constructed after the calculation of the signal transmission loss by simulation. The performance of the developed coupler is tested by measuring the transmission loss and frequency flatness. The results showed that the transmission signal loss is less than -1.98dB in the frequency bandwidth above 1 Mhz. The reflectometry system was designed based on sequence time domain reflectometry (STDR) and spread spectrum time domain reflectometry (SSTDR) in order to apply it to the detection of faults and their location in live cables and tests on live cables were performed. The test results showed that the proposed coupler can be used in a reflectometry system for live cable fault detection.

**Keywords** : Coupler, Fault location, Frequency flatness, Live cable, Loss, Reflectometry

본 논문은 원광대학교 2016년도 교내 연구비 지원에 의해 수행되었음.

\*Corresponding Author : Hun Oh(Wonkwang Univ.)

Tel: +82-63-850-6732 email: ohhun@wonkwang.ac.kr

Received August 26, 2016

Revised September 8, 2016

Accepted September 9, 2016

Published September 30, 2016

## 1. 서론

케이블의 단선, 합선 등의 고장 위치를 검출하기 위한 방법으로 반사파 계측법(reflectometry)이 자주 사용된다. 반사파 계측법은 전송선로를 따라 진행하는 전자파는 특성 임피던스가 변화할 때 반사가 발생하게 되고, 전송선로의 특성 임피던스보다 큰 임피던스 지점에서는 동위상(단선), 작은 임피던스 지점에서는 역위상(합선)의 반사가 발생하는 것을 기본으로 고장 유형을 판별한다. 또한 반사파를 검출하는 데 걸리는 시간을 측정하여 케이블 고장 위치까지의 거리  $D$ 를 식 (1)을 이용하여 계산한다[1-2].

$$D = \frac{v_p \times \tau_D}{2} \quad (1)$$

여기서,  $v_p$ 는 케이블에 인가되는 신호의 VOP (velocity of propagation)를 의미하고  $\tau_D$ 는 케이블에 신호가 인가된 시점에서부터 고장 지점에서 반사되어 되돌아오기까지 걸린 시간이다.

반사파 계측법 기반의 케이블 고장 검출 장치를 현장에서 사용하는 데 케이블을 전원으로 분리해야 되므로 사용을 꺼리게 되고, 활선(또는 무정전) 상태에서 측정하기를 전기설비 관리자는 요구하게 된다. 이는 현장에서 사용자가 사선(또는 정전) 상태로 측정할 경우 작업 손실로 인한 경제적 피해가 발생하기 때문이다. 이에 따라 활선 상태 케이블의 고장 위치를 찾아내기 위한 연구가 진행되었다[3-4].

활선 상태에서 케이블 고장 검출을 위해서는 장치를 보호하면서 신호를 송·수신하고 케이블에 인가된 신호와 고장 위치에서 반사되는 신호를 분리하기 위한 커플러가 필요하다[5]. 또한 활선 상태에서 접촉 불량과 같이 간헐적 고장을 검출하기 위해서는 상시 감시 형태의 장치가 필요하고, 이를 위해서는 더욱 커플러가 필요하다[4-5]. 이러한 커플러는 송·수신 신호의 손실을 최소화하면서 케이블과 반사파 계측 장치 사이를 연결해야 한다.

본 논문에서는 활선 상태에서 케이블 고장 검출이 가능하도록 유도성 결합 방식을 이용한 접촉식 커플러를 설계 및 제작하였으며, 입·출력 손실과 케이블 인가신호의 주파수에 대한 평탄도 검증을 실시하였다. 또한 개발된 커플러를 STDR 및 SSTDR 기반의 실험 시스템을 구축하고, 활선 케이블 고장 검출 실험에 적용하였다.

## 2 커플러의 설계 및 제작

### 2.1 반사파 계측법에서 커플러의 역할

케이블 고장 위치를 검출하기 위한 반사파 계측 장치에서는 장치와 고장 검출 대상 케이블을 연결하여 특정 신호를 송·수신 받기 위한 접속이 필요하고, 전원이 공급되고 있는 활선 상태에서는 Fig. 1에서와 같이 커플러를 사용하게 된다.

활선 상태에서 커플러는 전기신호와 케이블에 인가되고 고장 위치에서 반사되는 신호를 물리적으로 분리하는 역할을 수행하게 된다. 이러한 커플러는 케이블과 장치와의 절연을 확보하면서 넓은 주파수 대역에서 신호의 손실(감쇠)을 최소화 할 수 있어야 한다.

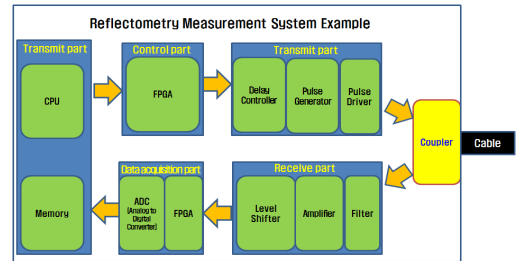


Fig. 1. Coupler in reflectometry measurement system

### 2.2 커플러의 설계 및 제작

본 논문에서는 유도성 결합(inductive coupling)을 이용한 접촉식 커플러를 Fig. 2와 같이 설계하였다. 설계된 커플러는 1MHz 이상의 대역에서 사용이 가능하도록 입·출력 인덕턴스가  $40\mu H$ 가 되도록 우선 설계하여 신호 손실을 시뮬레이션 하였다. Fig. 2의 회로의 전원부에 주파수 대역별 신호를 인가하고, 수신부에서 신호 감쇠량을 계산한 결과 Fig. 3에서와 같이 1MHz 대역 이상부터 손실은 1.2dB정도로 일정하게 나타났다.

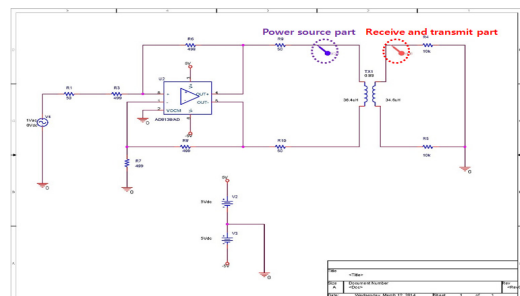


Fig. 2. Circuit of the proposed coupler

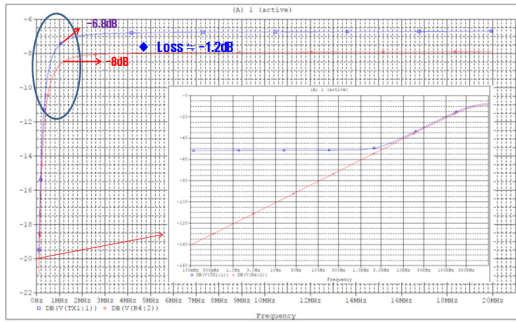


Fig. 3. Simulation result of the designed coupler

시뮬레이션 후 Fig. 4와 같이 코일 턴 수를 조절하여 인덕턴스가  $40\mu H$ ,  $225\mu H$ ,  $444\mu H$ 가 되도록 커플러를 3가지 형태로 제작하고, 신호의 주파수에 따른 전송 실험을 실시하였다. 그 결과 Fig. 5와 같이 인덕턴스 값이  $40\mu H$ 일때는 주파수가 1MHz 이상부터 입력에 따른 출력이 거의 일정해졌지만, 그 이하의 주파수 대역에서는 인덕턴스 값이  $225\mu H$ 와  $444\mu H$  일 때 손실이 더 작아짐을 알 수 있다. 더 낮은 주파수 대역에서 신호 손실이 작다는 것은 반사파 계측법의 적용에 있어 케이블에 인가되는 신호의 주파수 선택을 자유롭게 할 수 있다는 것을 의미한다.

따라서 인덕턴스가  $225\mu H$ 인 커플러를 최종적으로 제작 및 사용하였고, 실제 케이블 고장 검출 실험에 사용하기 위해 커플러 이외에 신호 입출력을 위한 RS 58 케이블과, T-connector 등을 이용하여 Fig. 6과 같이 PCB 보드들 제작하였다.

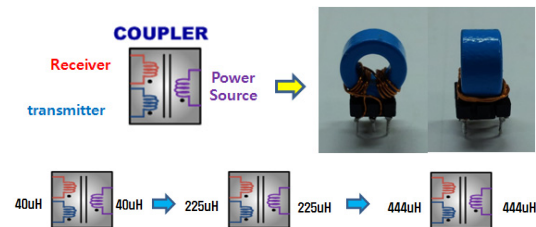


Fig. 4. The developed coupler

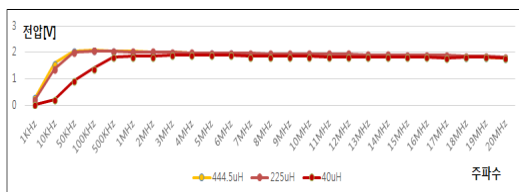


Fig. 5. Frequency flatness of the coupler

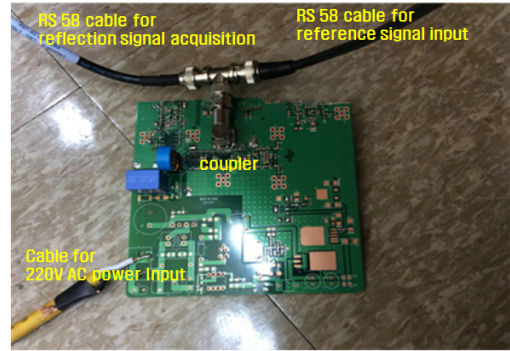


Fig. 6. The coupler board for the real test

## 2.3 커플러의 입출력 손실

제작된 커플러는 대부분 반사파 계측법의 신호로서 1MHz 이상의 대역을 사용하므로 입·출력 손실을 1MHz 대역에서 측정하였다.

Fig. 7은 활성 실험을 위해 제작한 접촉식 커플러로 입력 파형과 크기 값 그리고 Fig. 8은 출력 측의 파형과 크기 값을 나타내고 있으며, 손실은  $1.98\text{dB}$  ( $Loss = 10\log\frac{\text{입력}}{\text{출력}} = 10\log\frac{1.55}{1.89} = -1.98$ ) 정도로 설계 값과 유사하게 측정되었다.

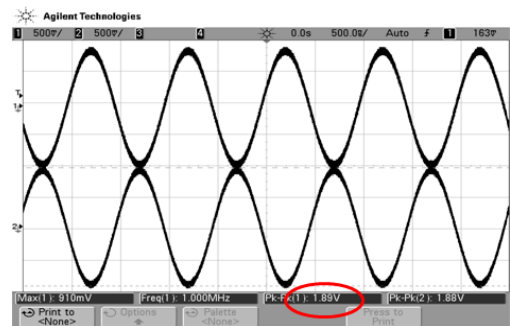


Fig. 7. Input of the coupler

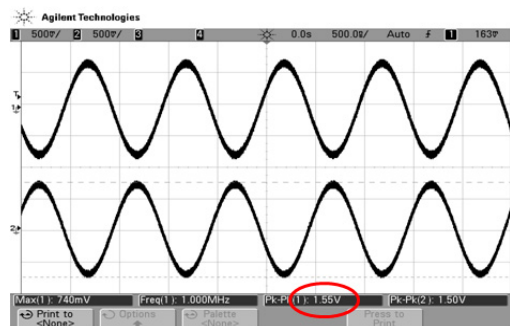


Fig. 8. Out of the coupler

### 3. 반사파 계측법 적용 실험 및 결과

#### 3.1 실험 방법

##### 3.1.1 실험 시스템의 구성

개발된 커플러를 반사파 계측법에 적용하여 케이블 고장 검출 실험을 실시하기 위하여 Fig. 9와 같이 NI사의 임의파형 발생장치 모듈, 디지털 오실로스코프 모듈 그리고 제어용 PC로 구성된 실험 시스템을 구축하였다. Fig. 9의 실험시스템에서 개발된 커플러는 시스템과 케이블 사이에 연결되며, 임의파형 발생장치 모듈과 디지털 오실로스코프 모듈을 제어하여 신호를 인가하고 반사 신호를 측정 및 분석하기 위한 프로그램은 LabView를 이용하여 개발하였다.

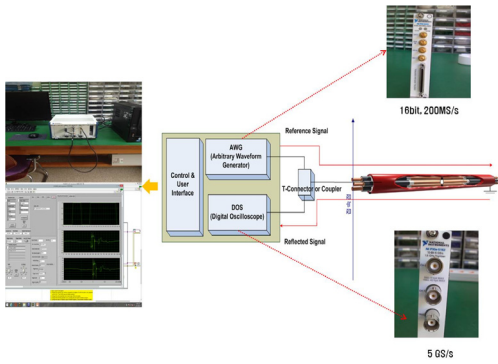


Fig. 9. Experimental setup for the coupler

케이블 고장 검출을 위해 사용된 반사파 계측법은 STDR 및 SSTDR 기법이고, 케이블에 인가되는 신호의 주파수는 STDR에서는 2.5MHz 그리고 SSTDR에서는 5MHz 이며, 표본화율(Sampling rate)은 STDR의 경우는 25MS/s를 SSTDR의 경우는 50MS/s를 사용하였다.

대부분의 반사파 기반 케이블 고장 검출 장비는 케이블에 인가되는 신호로써 펄스를 사용하고, 고장 위치에 반사되는 파형을 사용자가 분석하여 고장 유형과 위치를 계산하는 TDR(time domain reflectometry) 방식이다. TDR은 사용자가 반사신호의 파형을 보고 고장 유형과 거리를 분석하기 때문에 거리가 멀거나 노이즈 환경에서 반사파형이 변형될 경우, 사용자의 숙련도에 따라 고장을 잘 못 판단하거나 오차가 커질 우려가 있다[6].

이러한 문제를 해결하기 위해, 케이블에 인가되는 신호로 의사 잡음 수열(pseudo noise sequence : PN sequence)을 사용하여 인가신호와 반사신호의 시간 상관 분석(time correlation analysis)을 실시함으로써 케이블 고장

을 검출하는 STDR과 SSTDR이 개발 되었다[6-8].

##### 3.1.2 STDR 및 SSTDR

STDR 및 SSTDR은 Fig. 10과 같이 자기상관(auto-correlation) 성질이 좋은 PN 수열(STDR 인 경우) 또는 PN수열에 정현파 신호를 사용하여 변조(modulation)한 신호(SSTDR인 경우)를 케이블에 인가한 뒤 고장 지점에서 반사되는 신호의 도착 시간과 위상을 관측하여 고장 위치와 고장 종류(유형)를 탐지하는 기법이다[7-8].

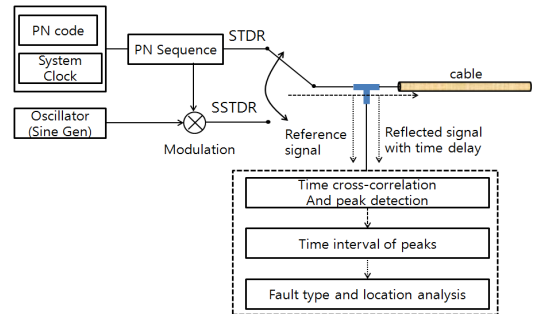


Fig. 10. The principle of STDR and SSTDR

Fig. 10에서 보는 바와 같이 STDR 및 SSTDR에서 길이가  $N$ 인 수열  $\mathbf{c} = [c_0, c_1, \dots, c_{N-1}]$  을 사용한 인가신호  $s(t)$ 는 식 (2)과 같이 표현된다[7-8].

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n p_{t_c}(t - nt_c), \quad (2)$$

STDR에서는 수열에 곱해지는 신호가 식 (3)와 같이 1과 0으로 구분되며 SSTDR에서는 식 (4)와 같이 정현파 신호이다.

$$p_{T_c}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < t_c \\ 0, & \text{그 밖} \end{cases} \quad (3)$$

$$p_{T_c}(t) = \begin{cases} \cos(2\pi f_c t), & 0 \leq t < t_c, \quad f_c = \frac{1}{t_c} \\ 0, & \text{그 밖} \end{cases} \quad (4)$$

여기서,  $t_c$ 는 1 또는 -1 값을 갖는 PN 수열의 칩 구간(chip duration)으로 불리며  $f_c$ 는 반송파의 주파수이다.

식 (3) 및 (4)의 신호를 케이블에 인가하게 되면 케이블의 고장 위치(특성 임피던스 변화지점)에서 일정한 시간 지연 후에 반사가 발생하게 된다. 반사된 신호  $r(t)$ 는 케이블 시험 환경에 따라 보통 노이즈 신호  $g(t)$ 를 포함하게 되며 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$r(t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_k s(t - \tau_k) + g(t) \quad (5)$$

여기서,  $a_k$ 는 인가된 신호와 관련하여 반사된 신호  $a_k s(t - \tau_k)$ 의 크기이며,  $\tau_k$ 는 인가된 신호가 케이블 고장 위치에서 반사되기까지의 지연 시간이며,  $g(t)$ 는 노이즈 신호이다.

다음으로 식 (6)과 같이 인가신호  $s(t)$ 을 시간  $\tau$ 만큼 이동하여 반사신호  $r(t)$ 와의 시간 상호 상관 분석을 실시하고, 상관계수의 최댓값을 구하게 된다. 그리고 인가신호와 반사신호의 상관계수의 최댓값들의 차이에 의해 신호가 인가되어 고장 지점에서 반사되어 되돌아오는 데 걸리는 시간을 구하고 식 (1)을 이용하여 케이블의 고장 위치를 계산하게 된다.

$$\begin{aligned} C_{time, sr}(\tau) &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s(t) r^*(t - \tau) dt \\ &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s(t) \sum_{n=0}^{N-1} a_k s(t - \tau_k - \tau) dt \\ &\quad + \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s(t) g(t - \tau) dt \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $T_s$ 는 기준신호  $s(t)$ 의 시간 폭, 즉 주기를 의미한다.

### 3.1.3 실험결과

개발된 커플러를 이용하여 활성 상태에서 케이블 고장 검출 실험한 결과를 그림 11부터 14까지 나타내었다. 각각의 그래프에서 맨 처음 파형은 인가신호 파형이고, 다음은 반사파를 취득한 파형이며, 마지막 파형은 인가신호와 반사신호 파형에 대해 상관분석을 실시한 결과이다. 상관 분석 결과에서 고장 위치까지의 거리는 인가신호를 의미하는 첫 번째 피크 샘플에서 다음 피크 샘플까지의 샘플차를 이용하여 계산하게 되며, 본 논문에서는 자동으로 계산되도록 프로그램화하여 그래프 맨 하단에 노란색으로 거리를 표시하도록 하였다.

Fig. 11은 CV2C6SQ 케이블의 120m 위치 단선 고장 그리고 Fig. 12는 CV3C10SQ 케이블의 200m 위치에 있는 단선 고장을 STDR을 적용하여 검출 실험한 결과이다. 120m의 경우는 측정 거리가 123.73m로 오차율이 3.11% 정도이고, 200m의 경우에는 측정 거리가 198.924m로 오차율이 0.5% 정도였다.

Fig. 13은 SSTDR를 적용하여 CV2C6SQ 케이블의

120m 위치에 있는 단선 고장 그리고 Fig. 14는 CV3C10SQ 케이블의 200m 위치에 있는 단선 고장을 검출한 결과이다. 120m의 경우는 측정 거리가 120.02m로 오차율이 0.017% 였고, 200m의 경우에는 측정 거리가 200.855m로 오차율이 약 0.43%였다.

이상의 실험결과는 제안된 커플러가 수 MHz 이상의 주파수 대역을 사용하는 STDR 및 SSTDR 기반의 반사파 계측법에 적용할 수 있다는 것을 의미한다.

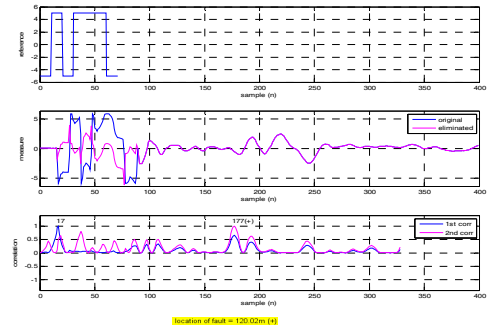


Fig. 11. Experimental results for CV2C6SQ cable open fault at 120m using STDR

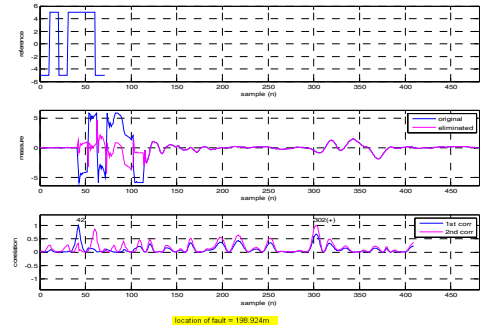


Fig. 12. Experimental result for CV3C10SQ cable open fault at 200m using STDR

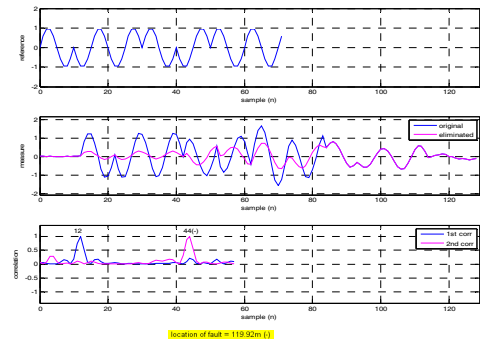


Fig. 13. Experimental results for CV2C6SQ cable open fault at 120m using SSTDR



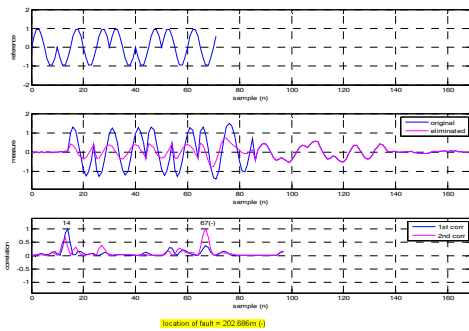


Fig. 14. Experimental result for CV3C10SQ cable open fault at 200m using SSTDR

## 5. 결론

본 논문에서는 제작한 접촉식 커플러는 신호의 전송 손실이  $-1.98\text{dB}$  이하로  $1\text{MHz}$  대역 이상부터는 일정하게 나타나 반사와 계측장치에서 케이블 인가되는 신호를  $1\text{MHz}$  이상의 주파수 대역에서 다양하게 선택할 수 있다는 장점이 있는 것으로 나타났다. 개발된 커플러는 반사와 계측법 중 STDR 및 SSTDR 기법을 적용하여 실증하여 적용 가능성을 검증하였다. 향후에는  $1\text{MHz}$  이하의 저주파 대역까지 신호 손실을 억제할 수 있도록 커플러를 보완하고, 실제 반사와 계측장비의 개발에 적용할 예정이다.

## References

- [1] LeCroy, "Time Domain Reflectometry(TDR) and S-parameters," July 2009.
- [2] Agilent, "Time Domain Reflectometry Theory Application Note 1304-2," May 10, 2006.
- [3] You Chung Chung, Nirmal N. Amarnath, Cynthia M. Furse, "Capacitance and Inductance Sensor Circuits for Detecting the Lengths of Open-and Short-Circuited Wires," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 58, no. 8, pp. 2495-2902, Aug. 2009.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2009.2014617>
- [4] Wakil Ahmad Syed, Samir Khan, Paul Philips and Sureh Perinpanayagam, "Intermittent fault finding strategies," 2nd International Through-life Engineering Services Conference, pp. 74-79, 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.07.062>
- [5] Shang Wum, Cynthia Furse and Chet Lo, "Noncontact Probes for Wire Fault Location With Reflectometry,"

IEEE Sensors Journal, vol. 6, no. 6, pp. 1716-1721, December 2006.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2006.884560>

- [6] Cynthia Furse, "A Critical comparison of reflectometry methods for location of wiring faults," Smart Structure and Systems, vol. 2, no. 1, pp. 25-46, 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/ss.2006.2.1.025>
- [7] Chirag R. Sharma, Cynthia Furse and Reid R. Harrison, "Low-Power STDR CMOS Sensor for Location Faults in Aging Aircraft Wiring," IEEE Sensors Journal, vol. 7, no. 1, pp. 43-50, Jan. 2007.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2006.886866>
- [8] Paul Smith, Cynthia Furse and Jacob Gunther, "Analysis of Spread Spectrum Time Domain Reflectometry for Wire Fault Location," IEEE Sensors Journal, vol. 5, no. 6, pp. 1469-1478, Dec. 2005.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2005.858964>

## 전 정 채(Jeong-Chay Jeon)

[정회원]



- 1999년 2월 : 원광대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2015년 8월 : 원광대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 한국전기안전공사 전기안전연구원 책임연구원

<관심분야>

전력설비 진단 및 검사, 전기안전, 전기 계측 및 제어,

## 오 훈(Hun Oh)

[정회원]



- 1993년 8월 : 원광대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 8월 : 원광대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 2011년 10월 ~ 현재 : 원광대학교 전기공학과 조교수

<관심분야>

재생에너지, 전기안전 진단, 계측기 개발