

## 전자파와 음향신호측정에 의한 지중 케이블의 고장점 검출기법에 관한 연구

°민경래\*, 김훈\*, 윤용한\*, 김재철\*, 송호엽\*\*

\*숭실대학교 전기공학과 \*\*한우테크㈜

### A Study on Fault Detection Method in Underground Cables using the Detecting ElectroMagnetic Wave and Acoustic Signal

° Kyoung-Rae Min\*, Hun Kim\*, Yong-Han Yoon\*, Jae-Chul Kim\*, Ho-Yub Song.\*\*

\*Dept. of Electrical Eng. Soongsil Univ.

\*\*HanWoo Tech. Co.

**Abstract** - This paper presents fault detection in cables. We developed the device for detecting pinpoint location of faults in power cables using acoustic method. The proposed device consists of hardware and software for the fault detection. Using the device, we explain how to detect the pinpoint of faults and introduce that the other method use the time delay between electro-magnetic and acoustic signals for the pinpoint of the faults.

#### 1. 서 론

지중 배전선로의 케이블에서는 시공 시 발생할 수 있는 경미한 결함과 절연체 열화 진행 등의 원인에 의한 절연 파괴로 사고가 발생한다. 케이블은 대부분의 경우 인구 밀집된 도심 지역이나 산업 공단 등에 포설되어 있어 사고 발생 시 도심 주택 지역의 정전 사고 및 공단 지역의 값비싼 설비 등에 많은 영향을 주어 경제적 손실이 매우 크다고 하겠다. 따라서 사고가 발생된 후에는 원활한 전력 공급을 위하여 빠른 복구 시간이 필요하며, 고장점의 정확한 위치를 검출하여야 한다.

현재 케이블의 고장을 측정하거나 위치를 추정하는 방법으로는 머레이 루프 테스터(murray loop tester), 케이블 고장 탐지기(capacitor discharge fault locator), 펄스 레이더(pulse radar), 매설물 탐지기(cable and sheath fault locator)등을 이용하여 지락 고장점의 거리를 측정하는 방법이나 단선 고장점의 위치를 추정하는 방법 등이 있다[1,2]. 고장 현장에서는 사고 발생 후 사고 복구를 위해서 고장 거리 및 위치 측정을 하기 위한 장비의 투입 및 이용에 있어서 많은 어려움이 있다. 대부분의 경우에는 절연 저항계만을 이용하여 절연 저항 값만으로 고장 위치를 찾는 방법을 사용하기도 한다. 그러나 절연 저항 측정 방법으로는 케이블의 전 포설 구간을 대상으로 고장 검출에 시간이 많이 걸린다는 단점이 있고, 머레이 루프 테스터나 펄스 레이더 등의 거리 측정기에 의한 고장 거리를 가지고서는 고장점의 정확한 위치를 추정하는 데 많은 어려움이 있다. 본 논문에서는 케이블 사고 시 현장에서 사고 복구를 위하여 개발된 전력케이블 고장점 검출 기기를 가지고 고장점의 정확한 위치를 찾는 고장점 검출을 설명하고, 전자파와 음향신호의 이용으로 고장점 검출 방법을 기술하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 케이블의 고장점 측정 기법

케이블 고장 발생 시 고장점 검출을 위한 일반적인 흐름도는 그림 1과 같다[1]. 케이블의 고장이 발생하게 되면 관리자는 고장 선로와 고장 구간을 확인한 후 고장점 검출 처리 과정을 결정하게 된다. 현장에서 목적될

수 있는 케이블 외상 사고의 경우, 즉시 고장 구간을 확인할 수 있어 바로 복구 작업을 시행한다 그리고 신뢰성을 위하여 절연 저항계 등을 이용한 절연 저항 측정과 절연 내력 시험법에 의한 절연 내력 시험으로 케이블의 절연 정도를 파악한 후 전력을 공급한다. 그러나 케이블 사고가 지락 사고나 단선 사고인 경우에는 고장 거리 측정 기기나 고장점 위치 추정 장비를 사용한다. 케이블 선로의 1선 지락 고장이 발생할 경우 완전 접지가 이루어진 곳에서 머레이 루프 테스터로 고장점까지의 거리를 측정한다. 지락 사고인 경우에는 지락 사고의 80[%]정도를 차지하는 고저항 지락 사고가 대부분이므로 케이블을 burning 기술로 고저항 지락을 저저항 지락으로 변환시킨다. 측정된 고장점까지의 거리는 실측 거리와 다르므로 고장점의 위치는 케이블의 고장 탐지기를 이용하여 정전 방전(임펄스 방출)시 발생하는 음의 크기로서 선로를 따라 고장점의 위치를 추정한다[3]. 단선 고장인 경우에는 케이블에 펄스를 발생시켜 펄스가 고장점의 위치에서 반사되어 되돌아오는 시간을 이용하여 고장점까지의 거리를 측정한다[4]. 위치가 파악된 고장점에 대해서는 복구 작업을 시행한 후 절연 저항 측정 및 내전압 시험 등으로 테스트하여 전력을 공급해 준다. 본 논문에서는 열거한 고장점 검출 기법들 중 음향법에 의한 고장점 검출 장비의 개발과 그 장비를 이용하여 케이블 고장점의 정확한 위치를 파악하는 방법에 관하여 연구하였다.

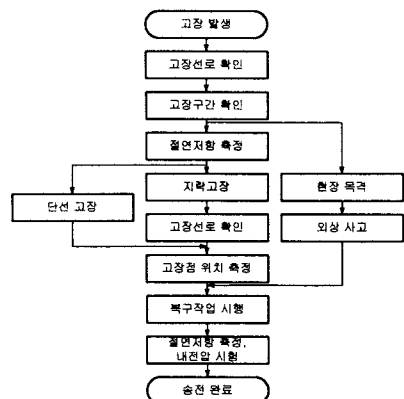


그림 1. 케이블의 고장 처리 순서도

##### 2.2 음향법에 의한 고장점 검출

현 전력 케이블의 사고 형태는 지락 사고, 단선 사고 및 케이블 외상 손실에 의한 사고로 분류된다. 지락 사고는 고저항 지락 사고와 저저항 지락 사고로 나눌 수 있는데 고저항 지락인 경우에는 저저항으로 변환 후 충격 전압을 인가하여 고장점에서 섬락(flash over)을 발생시킨다. 그림 2는 충격 전압 발생기의 내부 구조와 이를 고장난 케이블에 연결하는 회로도이다. 고장난 케이블

블에 충격 전압인가 시 발생하는 음향신호를 이용하여 고장점을 검출하는 방식이 음향법이다. 발생하는 음향신호는 그림 3과 같이 위치 추정 시는 음속의 매질에 따른 전달 특성과 감쇄 성분을 이용하여 음향신호 발생 시 지상에서는 케이블 매설 경로를 따라 가청기 등을 이용하여 귀로 음향을 들으면서 소리의 크기로서 고장 위치를 검출한다[3,5]. 그러나 사고 발생 지점이 원거리인 경우에는 신호의 감쇄와 노이즈의 영향이 심해 고장점 검출에 많은 시간이 소요되며, 케이블의 매설 위치를 따라 가는데 장애물 등 케이블 매설 현장의 환경상 검출이 곤란한 경우가 발생한다. 특히 주위의 소음 등에 의해 가청기의 음향 판별이 어려워 전문가만이 판별할 수 있는 등 고장점 검출에 어려움을 겪고 있다. 따라서 그 소리를 들어 전문가만이 판별할 수 있는 아날로그형 장비보다는 음향신호를 디지털 처리 하여 가시적으로 고장점을 검출할 수 있는 장비가 필요하다.

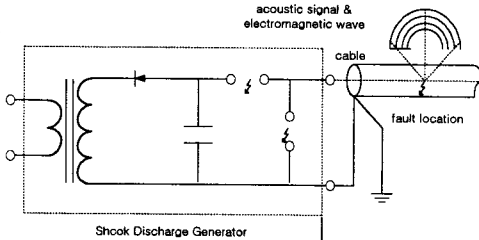


그림 2. 충격전압 발생기의 회로도

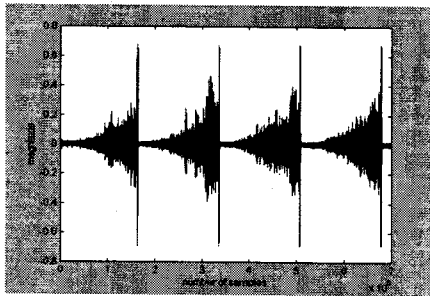


그림 3. 음향신호

### 2.3 음향신호 처리 기기

그림 4는 SWE-90을 이용하여 음향신호의 크기를 디지털 처리할 수 있도록 개발된 전력케이블 고장점 검출 기기이다 음향신호의 디지털 처리 장비를 개발하기 위하여 독일의 Seba Dynatronic사의 SWE-90 장비를 이용하였다. 일종의 서지 파형 리시버인 SWE-90은 충격 전압 발생기에 생긴 섬락 현상 때문에 발생하는 음향을 검출하는 장비로 헤드폰을 이용하여 그 소리를 사용자에게 전달하여 준다.

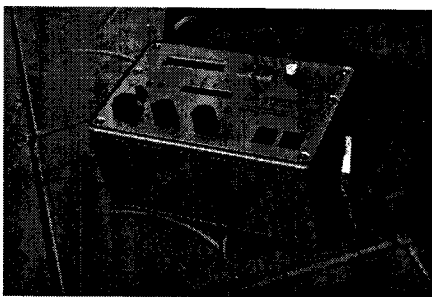
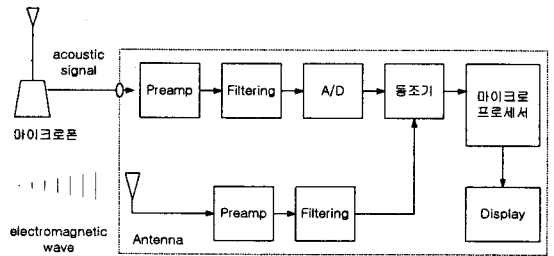


그림 4. 전력케이블 고장점 검출 기기  
특히 섬락 현상 발생 시 음향신호와 함께 생성되는 전자장을 전자파 안테나를 이용해 검출할 수 있는 기능을 가지고 있다. 이것은 전자파와 음향파의 전달 시간차를 이용하여 고장점을 검출할 수 있는 방식을 제공해 준다[5].

### 2.3.1 하드웨어 구성

그림 5는 개발된 전력케이블 고장 검출 기기의 내부 블록도 이다. 마이크로폰을 통하여 들어오는 음향신호는 미소 신호의 증폭과 필터링 과정을 통과하여 헤드폰으로 음향 출력된다. 이 출력 신호를 다시 마이크로프로세서로 가져와 프로세서 내부에서 A/D변환한다. 변환된 신호는 소프트웨어 처리 과정을 통하여 외부 출력 기기로 출력되고, 사용자는 외부 출력기기에 표시된 음향신호의 크기로서 고장점의 위치를 판별할 수 있게 된다. 외부 출력 기기의 출력 값은 A/D변환 값과 측정 장소의 최고치를 기억하도록 하였다. 이 최고치는 A/D변환 값과 계속 비교 작업을 수행한다. 이는 사용자가 케이블 매설 지역을 따라가며 고장점을 찾아갈 수가 있다.



전력케이블 고장점 검출기기

그림 5. 고장점 검출기기의 하드웨어 구성

### 2.3.2 소프트웨어 구성

마이크로프로세서의 소프트웨어 처리는 그림 6과 같다. 구동 프로그램을 시작하면 외부 기기 초기화와 A/D 변환 초기화를 수행한다. A/D변환 후 그 변환 값은 메모리에 입력되고 다음의 변환 값과 비교되어 더 큰 값이 나오면 최대 값으로 저장된다. 이런 반복 처리 후에 최대 값과 변환 값을 외부 출력기기에 출력하여 사용자로 하여금 인식하게 하였다. 따라서 사용자는 출력된 현재 값을 최대 값과 비교하는 과정을 통해 현재 위치가 고장점에서 떨어진 정도나 고장점에 접근해 가는 과정임을 알게 된다.

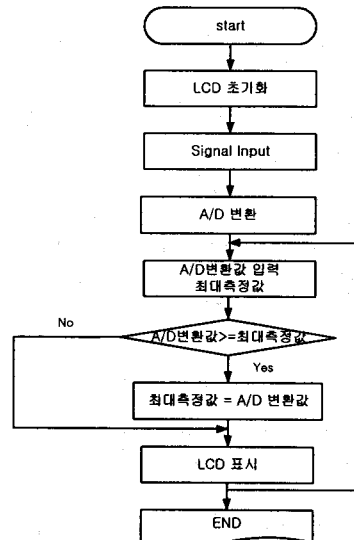


그림 6. 고장점 검출 기기의 소프트웨어 흐름도

## 2.4 개발된 고장 검출기기에 의한 고장점 검출

개발된 전력케이블 고장 검출 기기는 전문가만이 음향 신호를 가청 하여 고장점을 찾는 방식에서 음향파의 크기를 디지털화 하여 비전문가도 음향신호의 수치 비교만으로 고장점을 쉽게 판단할 수 있다.

### 2.4.1 하나의 센서로 고장점 검출

그림 7은 케이블의 매설 경로를 따라가며 고장점을 검출하는 모습으로 고장 검출기기에 의한 일반적인 고장점 검출 방식이다. 케이블에 연결된 충격 전압 발생기를 주기적으로 발생시키면 사용자는 케이블의 매설 경로를 따라 마이크로폰을 임의 추정 지역  $L_1$ 에서 시작하여 이동시킨다. 이때 외부 표시 장치에 표시되는 측정치를 비교해 가며 고장점의 위치를 검출한다. 임의 추정 지역  $L_1$ 이 고장점  $L_2$ 에서 많이 떨어져 있으면 검출 시간이 장시간 소요된다.

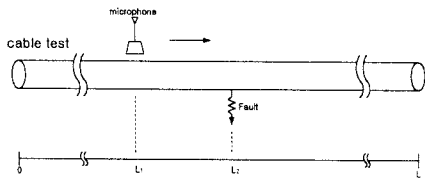


그림 7. 하나의 센서로 고장점 검출 방법 1

그림 8은 케이블의 고장점 추정 구간이  $L_1$ 과  $L_3$  사이라는 것을 알았을 때 고장점을 알아내는 방법이다. 머레이 루프 테스트나 케이블 고장 탐지기 등을 이용하여 케이블 고장점까지의 거리를 계산하더라도 실제 고장점 위치와는 차이가 있다. 다만 어느 영역 안에 있을 거라는 가정을 하고 고장점 탐색에 들어갈 수 있다. 케이블의 매설이 직선 경로로 가정하고 고장 추정 구간이  $L_1$ 과  $L_3$ 이라고 할 때  $L_1$ 에서의 음향신호 측정값을  $M_1$ 이라 하고  $L_3$ 에서의 음향신호 측정값을  $M_3$ 라 한다면 고장점  $L_2$ 는 거리에 대한 크기의 비례식에 의해 식(1)과 같이 결정된다[5].

$$L_2 - L_1 = \frac{1}{M_1 + M_3} (L_3 M_1 - L_1 M_3) \quad (1)$$

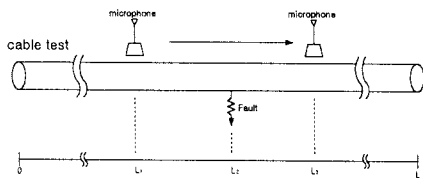


그림 8. 하나의 센서로 고장점 검출 방법 2

### 2.4.2 두 개의 센서로 고장점 검출

두 개의 마이크로폰을 이용하는 방법은 그림 9과 같다. 케이블의 매설이 직선 경로라고 가정하고 고장 추정 구간이  $L_1$ 에서  $L_3$ 으로 설정한다. 고장 추정 구간 사이에 고장점  $L_2$ 가 존재한다면 충격 전압 발생기기에 의해 음향신호가 발생 시 두 개의 마이크로폰을 사용하여 음향신호를 동시에 측정하여 시간 차이를 계산한다면 고장점의 위치를 추정할 수 있다. 측정된 시간 차이를  $\Delta \tau$ 라 하고 음향파의 전달 속도를  $v$ 라 하다면 식 (2)과 같이 고장점  $L_2$ 를 계산할 수가 있다[6,7].

$$L_2 - L_1 = \frac{1}{2} [(L_3 - L_1) - \Delta \tau \times v] \quad (2)$$

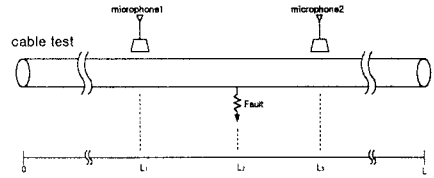


그림 9. 두 개의 센서로 고장점 검출

## 2.5 전자파와 음향파를 이용하여 검출하는 기법

케이블에 충격 전압인가 시 발생되는 섬락 현상 때문에 음향신호 외에 고주파 신호도 생성된다. 고주파는 나선형 소선 케이블의 경우 선로를 따라 전송되어지고 케이블의 바깥 층에서 자장(magnetic field)이 형성되어 외부로 전자파가 전달된다[8]. 자장 형성에 의해 전달되는 전자파와 음향파의 측정에 의해 전자적인 시간 지연 계산으로 고장점을 검출할 수가 있다[5]. 즉, 전자파는 일반적으로 음향파 보다 전달 속도가 더 빠르므로 전자파 안테나 시스템에 전자파가 감지된 후에 음향파가 마이크로폰에 의해 감지되어 이 두 신호 사이의 시간 지연이 생긴다. 이 시간 지연을 이용하여 고장점의 위치를 추정할 수 있다[5].

## 3. 결 론

본 논문에서는 지중 배전선로의 케이블에서 고장이 발생할 경우 고장점의 위치를 추정하는 방법 중 음향법을 이용하여 고장점을 디지털화 하여 사용자가 손쉽게 고장점을 검출할 수 있는 고장점 검출 기기를 개발하였고 그 장비 이용 방안으로 음향신호를 이용하여 고장점을 검출하는 방법과 전자파와 음향파를 이용하여 고장점의 위치를 추정하는 방법을 소개하였다.

추후로 제안한 장비의 신뢰도를 증명하기 위해서는 현장에서의 실증 및 검증이 필요하겠고, 두 개의 마이크로폰을 이용하는 방법과 전자파와 음향파를 이용하여 고장점의 위치를 추정하는 방법의 실용화 연구가 필요하겠다.

본 연구는 경기지방중소기업청 지원으로 한우테크㈜와 공동으로 이루어진 연구입니다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 한국전력공사 서울연수원 배전교수실, 신입배전기초, pp.279-283, 1997.
- [2] W.L. Weeks, J.P. Steiner, "Instrument for the detection and location of incipient faults in power cables," IEEE Trans. PAS Vol. PAS-101, No. 7, pp.2328-2335, 1982.
- [3] R.T. Harrold, "Acoustic Technology Applications in Electrical Insulation and Dielectrics," IEEE Trans. EI, Vol. 20, No. 1, pp.3-19, 1985.
- [4] W.E. Anderson, J. D. Ramboz, A.R. Ondrejka, "The detection of incipient faults in transmission cables using time domain reflectometry techniques : Technical challenges," IEEE Trans. PAS Vol. PAS-101, No. 7, pp.1928-1934, 1982.
- [5] SWE-90 operating manuals, Seba dynatronic co., 1995.
- [6] 김재철의, "초음파 센서를 이용한 변압기 예방진단 기술연구," 한국조명·설비 학회지, Vol. 8, No. 2, pp.46-53, April 1994.
- [7] 윤용한 외, "유입변압기내 부분 방전 위치 측정," 대한 전기학회 논문지, Vol. 41, No.11, pp.1316-1323, Nov. 1992.
- [8] Y. Nakanish et. al., "Development of A Line Partial-Discharge Detection Method for XLPE-insulated Copper Wire-Shielded Cable Using A Yoke coil," IEE Japan, Vol. 112-B, No. 10, 1992.