

## 전력 케이블의 부분방전 위치 추정용 센서 특성 연구

남석현, 신두성, 권윤혁, 이상진, 김동욱  
LG 전선(주)

### Partial Discharge Sensor Characteristics for Discriminating Location in Power Cable

S. H. Nam, D. S. Shin, Y. H. Kwon, S. J. Lee, D. W. Kim  
LG Cable, Ltd.

**Abstract** - 본 논문에서는 케이블 내전압 시험 및 부분 방전 측정 시험에 사용될 수 있는 전구 차단 장치의 차단 기준에 큰 영향을 미치는 케이블 부분방전 센서의 특성에 관한 연구를 수행하였다. 특히, 부분방전 발생 시 부분방전 발생 위치를 보다 정확하게 판별할 수 있는 센서의 종류 및 구조를 주파수 특성과 시간 특성을 함께 측정 한 결과를 보고한다.

### 1. 서 론

전력 케이블의 품질 검사 중 하나인 내전압 시험에서 절연 파괴 이전에 전압을 차단하여 결함의 원인을 판단을 용이하게 하는 전구 차단 장치의 이용이 증가하는 추세이다. 전구 차단 장치의 차단 기준을 설정하는 가장 필수적이고 기본적인 것은 방전이 발생한 위치를 손쉽게 판별할 수 있는 센서와 시스템의 구성이다. 최근에는 주변 노이즈의 영향을 피할 수 있는 고주파 부분방전 센서를 이용하여 보다 정확한 위치 판별을 위해 노력하고 있으며, 위치 판별의 오차 원인을 분석하고 이를 줄이기 위한 노력이 활발히 진행 중이다[1-4].

전력 케이블 및 접속함에 설치하는 고주파 부분방전 센서로는 크게 용량성 센서, 방향성 센서, 코일 센서, 슈스 분리 센서 등으로 나눌 수 있다. 일반적으로 변압기, GIS 혹은 GIL 및 케이블에서 발생하는 부분방전은 상승 시간(Rising time)이 nano second 단위 이하이며, 펄스 폭이 수 나노인 1GHz까지의 대역을 갖고 있으나, 케이블에서는 고주파 펄스의 감쇄와 분산으로 인하여 측정되는 부분방전 펄스의 주파수 대역은 수백 MHz 정도로 보고되고 있으며, 용량성 센서의 경우, S/N비 및 케이블의 고주파 진행의 한계로 인하여 수 MHz ~ 수십 MHz의 대역이 부분 방전의 측정에 가장 합당하다고 보고 되고 있다[4-5].

부분방전 위치 판별하는 기술은 크게 두 가지 방법이 많이 적용되고 연구되고 있다. 하나는 센서를 한 개 설치하여 원래의 진행파와 케이블 끝단에서 반사하는 반사파를 측정하여 시간차를 구하여 거리를 판별하는 반사파법과 다른 하나는 케이블 양 끝단에 센서를 각각 설치하고 두 센서에 측정된 부분방전 펄스의 시간차를 측정하는 방법이다. 반사파법을 적용할 경우, 부분방전 신호가 진행하는 경로가 증가될 수 있고, 만약 임피던스 매칭이 잘 이루어지지 않았을 경우, 신호 끝단에 발생하는 진동 파형이 반사파와 구분되기 어렵다는 단점이 있다.

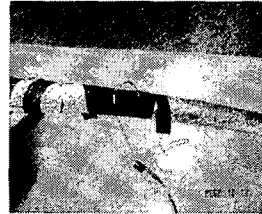
본 연구에서는 66kV XLPE 케이블에 고주파 부분방전 센서를 용량성 센서 및 방향성 센서를 설치하고 이에 대한 센서 주파수 특성 및 시간 특성을 측정하여 분석, 비교 하였고, 각 센서에 대한 센서 설치 위치 및 센서 크기의 최적 조건을 파악 하였다. 또한, 부분방전을 모의하는 펄스 신호를 케이블 도체-차폐간 주입하고, 케이블 양단에 최적 조건인 센서 2개를 설치하여 펄스를 측정하고, 펄스 발생 위치를 판별하여 펄스 신호 주입 위치를 판정하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 시험 방법

##### 2.1.1 대상 케이블 및 적용 센서

시험 대상 케이블은 66kV XLPE 630mm<sup>2</sup> 케이블 13m이며, 적용 센서는 전구 차단 장치를 이용하는 전자 차폐실의 저 노이즈 특성과 감도를 고려하여 용량성 센서 중 슈스 분리형 센서와 방향성 센서 중 유도형 센서를 선택하였다. 적용한 센서의 사진을 그림 1에 나타냈다.



(a) 슈스 분리형 센서 (b) 유도형 센서

그림 1. 시험 적용 센서

슈스 분리형 센서는 슈스를 일정 간격 제거 하고, 분리된 슈스 사이에 점퍼선을 연결하여 60Hz의 상용주파 전류를 접지로 통하게 하고, 부분방전 신호는 고주파 이므로 노출된 반도체의 저항과 공기층의 저항을 매개로 하여 동축 케이블에 입력된다. 현장에서는 슈스 분리 및 노이즈 차폐 문제로 적용이 어려운 단점이 있으나, 전자파 차폐실과 전구 차단 장치와 병행하여 사용할 경우, 외부 노이즈 문제가 크지 않고, 큰 수신 감도로 적용에 이점이 있다.

유도성 센서는 케이블 반도체층 위에 등근 금속판을 설치하고 금속판 양 끝 단자에 동축 케이블을 연결하였다. 일반적으로 측정 주파수 대역은 5 ~ 200MHz로 알려져 있으며, 노이즈 영향을 적게 받아 실선로 적용 시에 유리하다.

##### 2.1.2 시험 조건

센서의 특성을 파악하기 위하여 크게 두 가지 시험을 수행하였다. 첫 번째는 센서 종류 및 설치 형태에 따라서 주파수 특성 및 수신 감도와 S/N비를 파악하기 위한 주파수 특성 시험과 이 시험을 통해 얻은 최적 조건의 센서를 케이블에 설치하고 케이블 도체-차폐간 모의 부분방전 신호를 입력하여 입력된 위치를 판별하는 시간 특성 시험을 수행하였다.

센서 설치 조건은 슈스 분리형 센서는 반도체 노출 길이를 각각 1cm, 5cm, 20cm로 설치하였고, 유도형 센서는 센서 길이를 각각 2.5cm, 10cm, 20cm로 설치하였다.

그림 2에 센서 주파수 특성 시험을 나타냈다.

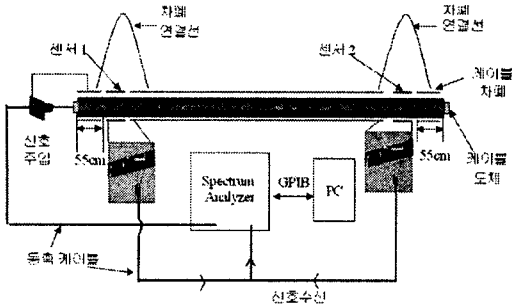


그림 2. 센서 주파수 특성 측정 시험

그림 2에서 신호 주입 부분에 설치된 센서를 센서 1로, 다른 한쪽 케이블 중단 부분에 설치된 센서를 센서 2로 설정하였다. 케이블 중단으로부터의 쉬스는 100MHz를 기준으로 1/4 파장 이상을 확보(55cm)하여 신호 전달의 반사 특성을 상쇄하고자 하였다. 측정 주파수 대역은 신호 및 노이즈 모두 0 ~ 100MHz로 한정하였다.

센서의 시간 특성 측정은 그림 2의 스펙트럼 어벌라이저 대신 신호 주입 측에 펄스 폭 16ns인 펄스를 주입하고 수신측에 오실로스코프를 이용하여 신호를 각각 센서 1과 센서 2로부터 측정된 시간차로 위치 추정을 하였다.

## 2.2 시험 결과

### 2.2.1 센서 설치에 따른 주파수 특성

쉬스 분리 센서 및 유도형 센서의 센서 설치에 따른 주파수 특성 시험 결과를 표 1과 2에 각각 나타냈다. 주파수 특성은 신호 수신에 원래 신호의 1/2이 되는 6dB cutoff frequency를 적용하여 나타냈다.

표 1. 쉬스 분리형 센서 설치에 따른 주파수 특성

센서	센서 길이	감도[dB]	6dB Cutoff Freq. [MHz]	S/N비
센서 1	1cm	-10 dB	Low:3.3Mhz High:12Mhz	35 ~ 40 dB @ 0.2~20Mhz
	5cm	-9.5 dB	Low:12Mhz High:25Mhz	40 ~ 45 dB @ 0.2~20Mhz
	20cm	-8 dB	Low:14.5Mhz High:25Mhz	35 ~ 45 dB @ 0.2~20Mhz
센서 2	1cm	-18 dB	Low:23.5Mhz High:30Mhz	20 ~ 25 dB @ 30~50Mhz
	5cm	-16dB	Low :23.8Mhz High:29.5Mhz	20 ~ 25 dB @ 30~50Mhz
	20cm	-8 dB	Low :11.2Mhz High : 35Mhz	30 ~ 40 dB @ 0~50Mhz

표 2. 유도형 센서 설치에 따른 주파수 특성

센서	센서 길이	감도[dB]	6dB Cutoff Freq. [MHz]	S/N비
센서 1	1cm	-25 dB	Low : 28Mhz High:36.2Mhz	15 ~ 20 dB @ 0.2~20Mhz
	5cm	-27 dB	Low :14Mhz High:20.2Mhz	10 ~ 20 dB @ 0.2~20Mhz
	20cm	-25 dB	Low : 55Mhz High:66.5Mhz	10 ~ 20 dB @55~66.5Mhz
센서 2	1cm	-32 dB	Low : 8Mhz High : 12Mhz	20 ~ 25 dB @ 0~10Mhz
	5cm	-32 dB	Low : 8Mhz High : 12Mhz	20 ~ 25 dB @ 0~10Mhz
	20cm	-32 dB	Low : 8Mhz High : 12Mhz	20 ~ 25 dB @ 0~10Mhz

표 1과 2의 결과로부터, 내전압 시험에 전구차단장치를 사용할 경우, 적합한 센서는 쉬스 분리형 센서임을 알 수 있었다. 또한, 쉬스 분리형 센서의 경우, 반도체 노출 길이가 길어질수록 감도는 증가하고, 측정 가능 주파수 대역은 고주파대역으로 이동함을 알 수 있었다. S/N비 특성 측면을 보면 센서 길이가 증가할수록 협대역에서 광대역으로 고른 S/N비 특성을 보이고 있음을 알 수 있었다. 이상의 결과를 종합하여 최적 센서로는 쉬스 분리형 센서 20cm를 선정하였다.

### 2.2.2 위치 추정 결과

쉬스 분리형 센서를 길이 20cm로 케이블 양단에 설치하고 케이블 도체-쉬스간 크기 5V, 펄스폭 16ns의 펄스를 입력하고 오실로스코프를 이용하여 신호를 측정하여 시간차를 구하였다. 측정된 신호를 그림 3에 나타냈다.

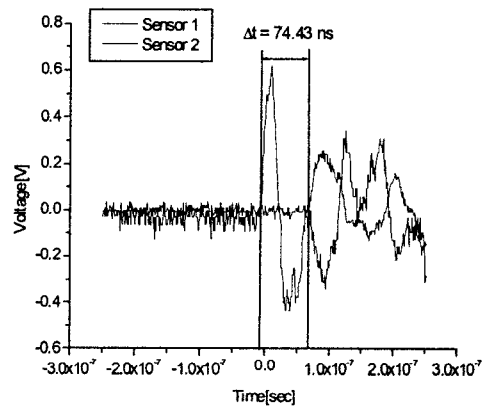


그림 3. 시간차 측정

그림 3을 보면, 측정된 시간차는 74.43 ns 이었고, 이를 케이블내의 신호 전달 속도  $v = 1.67 \times 10^8$  m/s를 곱하면 신호 주입 위치 차이는 12.4 m로 판별되었다. 이 거리는 실제 센서 두 개 사이의 거리 11.8m에 매우 근접한 값을 얻을 수 있었다.

그림 3에 측정된 신호의 주파수 특성을 살펴보기 위하여 각 신호의 FFT를 수행한 결과를 그림 4, 그림 5에 나타냈다.

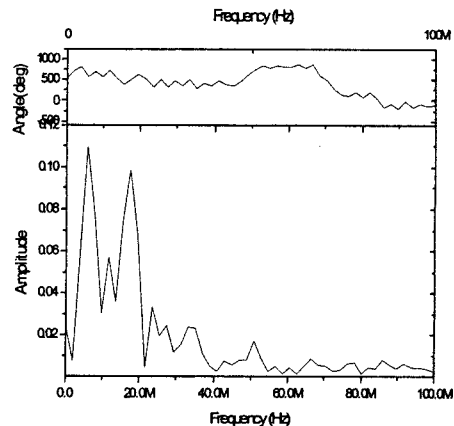


그림 4. 센서 1 신호의 FFT 결과

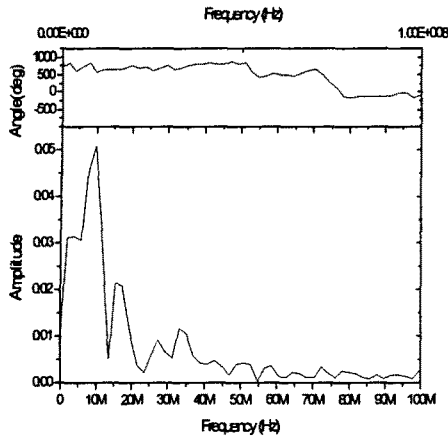


그림 5. 센서 2의 FFT 결과

그림 4와 그림 5를 보면, 비록 센서 자체의 6dB Cutoff 주파수는 증가하지만, 신호 전달의 입장에서 보면 필스의 분산으로 인하여 측정된 신호의 주파수는 저주파 쪽으로 이동함을 알 수 있다.

### 2.3 토의

일반적으로 쉬스 분리형 센서는 실선로에 적용하기에는 쉬스 분리 및 노이즈 유기 문제로 인하여 곤란하다고 알려져 있다. 또한, 실선로에 적용할 경우엔, 반도체 노출 길이를 최소화하여 반도체에서의 고주파 신호의 반사 효과를 막아야 한다는 연구 결과도 발표되고 있다.

하지만, 본 연구에서는 전자파 차폐실에 전구 차단 장치와 병행하여 사용하는 경우이므로 외부 노이즈 자체가 매우 작고, 센서를 케이블 양끝단에 설치함으로써 반사파를 측정하는 것이 아니므로 반사파에 의한 임피던스 매칭 자체가 매우 중요한 요소는 아니다. 따라서, 본 연구에서는 신호 감도의 크기와 측정 주파수 대역이 부분방전 신호를 측정하는데에 알맞은 것인가가 중요한 것이다. 만약 반사파법을 이용하여 부분방전 발생 위치를 추정한다면, 임피던스 매칭이 안되어서 발생하는 반사파에 의한 신호 뒷 부분의 진동파가 반사파와의 구분을 더욱 어렵게 하는 단점이 있다.

본 연구에서 쉬스 분리형 센서의 길이가 길어지면 반도체 표면 임피던스가 증가하여 측정 감도를 높이는 것으로 판단된다. 하지만, 일정 길이(20cm)이상인 경우는 측정감도가 증가하는 것이 포화되는 특성을 확인하였다.

센서 자체의 주파수 특성을 보면 저주파 통과 필터의 역할을 함을 알 수 있다. 이는 반도체의 전도율이 주파수가 증가함에 따라 증가하여 반도체의 자체 저항은 고주파에서 작은 값을 갖고 반도체 표면 저항과 쉬스-쉬스 간 캐피시턴스로 이루어지는 R-C 저주파 통과 필터를 생성하기 때문이다.

## 3. 결 론

케이블 내전압 시험등의 품질시험에 부분방전 신호를 기준으로 전구 차단 장치를 사용할 때 이용하기 위한 부분방전 위치 추정용 센서에 대한 주파수 특성 시험 및 모의 위치 추정 시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 내전압 시험에는 쉬스 분리형 센서가 유도형 센서에 비하여 측정 감도에 있어서 탁월한 효과를 가지고 있었다.
- (2) 쉬스 분리형 센서의 길이가 길어짐에 따라서 부분방

전 측정 감도가 상승하나, 일정 길이(20cm) 이상이 되면 포화하는 특징을 가지고 있다.

(3) 전자파 차폐실과 같이 외부 노이즈가 작은 경우, 전구 차단용 부분방전 센서로는 측정 감도가 높고 주파수 특성이 부분방전 신호 측정에 알맞은 20cm 길이의 쉬스 분리형 센서를 추천한다.

### (참 고 문 헌)

- [1] C.Y. Lee, D.W. Kim, "The Application of Pre-Breakdown Partial Discharge Detection Method for XLPE Power Cable Test", K-J Symposium, 2001
- [2] Mashikian, M.S., R. Bansal, and R.B. Northrop. "Location of Discharge Sites in Power Cables", IEEE Trans. PD-5, No.2, April 1990, p.833
- [3] Zhifang Du, P.K. Villett and M.S. Mashikian, "Performance Limits of PD Location Based on Time-domain Reflectometry", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, pp. 182 - 188, 1997
- [4] F.H. Kreuger, M.G. Wezelenburg, A.G. Wiemer, and W.A. Sonneveld, "Partial Discharge Part XVIII: Errors in the Location of Partial Discharges in High Voltage Solid Dielectric Cable", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 9, pp.15-23, 1993
- [5] Y.Tian, P.L. Lewin, and A.E. Davies, "Comparison of On-line Partial Discharge Detection Methods For HV Cable Joints", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 9, No. 4, August 2002