

## XLPE 전력케이블의 부분방전 측정을 위한 평면 루프 센서 설계에 관한 연구

임광진, 양상현, 키아우소원, 박노준, 박대희  
원광대학교

### Korean Institute of Electrical and Electronic Materials

Kwang-Jin Lim, Sang-Hyun Yang, Kyaw-Soe Lwin, Noh-Joon Park, Dae-Hee Park  
Wonkwang Univ.

**Abstract :** In this study, The new type of loop antenna which detects the partial discharge was designed based on microstrip line technology. In diagnosis of power cable, partial discharge signal generally occurred at the frequency range lower than 100MHz because high frequency PD signals could be lost along the propagation path in the cable. The new type of loop antenna sensor has been studied by using Simulation software named CST microwave studio version 5.0. In partial discharge measuring experiments, commercial HFCT sensor was used as a reference sensor. Several experiments were made over HFCT sensor and loop antenna sensor in detection partial discharge on MV XLPE cable of 22.9kV. In this study, we have shown our loop antenna sensor can apply as a commercial HFCT sensor.

**Key Words :** PD(Partial Discharge), Planar Loop Sensor, Cable Diagnosis, HFCT Sensor

### 1. 서 론

전력기기의 열화로 인해 발생하는 문제는 절연파괴사고로 이어진다[1]. 실제로 1970년에서 2006년 사이에 발생한 지중선로 고장에서 전력케이블의 고장을 살펴보면 85년 제조된 케이블의 고장빈도가 매우 높게 나타나는 것을 포함하여 80년대 후반에 제조된 케이블의 고장빈도가 높다. 이는 85년부터 국내에서 케이블 수요가 폭발적으로 증가 하면서 저 품질의 케이블이 상당수 납품되었으며, 당시 포설된 케이블의 대부분은 교체 되었으나 그 중 일부 선로에 남아있는 케이블의 고장은 지금도 계속 이어지고 있다[2].

이러한 문제점을 극복하기 위해 부분방전 측정법을 적용하고 있는데, 부분방전 측정에 있어서 노이즈는 미소한 부분방전 신호를 검출하는데 많은 어려움을 주고 있다. IEC-60270에서 제안하는 1MHz 이내의 주파수는 다양한 노이즈를 수반하는 주파수로 현장에서 적용하는데 많은 어려움을 가지고 있다. 이에 따라 수MHz~수백MHz 대역의 고주파영역에서 발생하는 부분방전을 측정하는 기술에 대한 신뢰성의 요구가 증가되고 있으며 이를 충족시키기 위한 연구가 계속 진행되고 있다[3, 4].

본 연구에서는 전력케이블의 주 발생대역을 검토한 결과, 100MHz 이하에서 가장 많은 발생 빈도를 보임에 따라 2~100MHz의 넓은 광대역 특성의 측정대역을 설정 하였으며, 노이즈에 덜 영향을 받는 안테나성 센서를 적용 검토하였다[5].

전력케이블의 부분방전 신호를 검출하는 안테나 센서는 설계 및 제작 시에 공진주파수에 따른 안테나 크기로 인하여 여러 가지 제약을 받고 있다. GIS(Gas Insulated

Switchgear: 가스절연개폐장치)에서 발생하는 부분방전 신호의 경우에는 수백MHz~수GHz의 넓은 대역에서 검출 되기 때문에 안테나의 공진 길이를 수cm~수십cm로서 센서 취부에 설치가 용이하다[6, 7]. 그러나 전력 케이블에서 발생하는 부분방전 주파수 대역은 100MHz 이하로서 안테나의 공진 길이는 수 m가 되어 센서 취부에 설치가 어려운 실정이다. 따라서 안테나를 VHF대역으로 설계 시 안테나 이론에 의해 길이 및 크기가 커지게 되며 그에 따른 제작에 많은 어려움을 주고 있다.

본 연구에서는 루프안테나의 원리를 이용한 전자파 감지 방식의 부분방전 측정 장치를 구현하고 인쇄회로기판 기술을 이용하는 마이크로스트립 안테나 구조를 적용함으로써 설계 및 제작이 용이하도록 하며, 평면루프안테나의 접지면을 이용한 외부노이즈 차단효과를 개선하여 노이즈에 대한 영향이 기존의 루프센서에 비해 우수한 루프안테나 센서를 개발함으로써 운전 중인 전력케이블에서 발생하는 부분방전을 측정하는 효과적인 방법을 제안하고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 센서 설계 및 제작

전력케이블 진단을 위한 기존의 전자파 감지센서로는 헬리컬 안테나를 들 수 있는데, 기존에 연구되었던 헬리컬 안테나는 30MHz의 특정 주파수 분포 대역만을 감지하여 케이블에서 부분방전되는 전자파의 주파수 대역 전반을 감지할 수 없다. 또한 헬리컬 안테나는 그림 1의 (a)와 같이 자체적으로 개루프(Open loop)를 구성하여 접지가 필요하고 접지조건에 따른 영향을 많이 받으며, 기본적인

로 이득이 낮아 별도의 증폭장치가 필요하여 대지와 안테나 사이의 분포용량(C) 성분에 의한 편차가 심하다. 뿐만 아니라 헬리컬 안테나로 이루어진 부분방전 감지 장치는 특정 전력케이블에만 부착이 가능하여 다른 전력케이블의 부분방전을 감지할 수 없는 문제점이 있다.

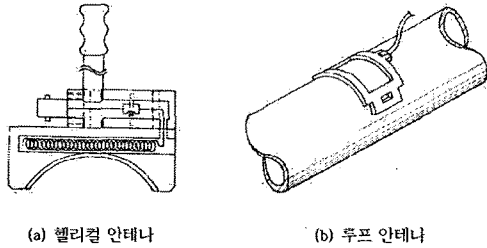


그림 1. 부분방전 측정용 안테나

이에 반하여 루프안테나는 에나멜 코일을 루프형태로 감아서 전자파를 감지하는 안테나로서 루프안테나의 길이는 식에 의해 계산될 수 있다.

$$h = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{f} \cdot \frac{1}{12} \quad (\text{식 1.1})$$

여기서 h : 루프안테나의 길이, f : 감지하고자 하는 주파수 대역

식(1.1)에서 파장은 감지하고자 하는 주파수 대역(f)에 의해 결정되고 루프안테나의 길이는 파장에 따라 결정된다. 한편 결정된 루프 안테나의 길이가 일정할 때 센서장치의 사이즈에 따른 턴수를 살펴보면, 센서장치의 사이즈가 클수록 턴수는 감소하고, 센서장치의 사이즈가 작을수록 턴수는 증가한다. 또한 루프 안테나를 생성하는 에나멜 코일의 턴 수가 일정할 때 에나멜 코일의 턴수에 따른 센서장치의 사이즈를 살펴보면, 루프 안테나의 길이가 길수록 센서장치의 사이즈는 커지고 루프안테나의 길이가 짧을수록 센서장치의 사이즈는 작아진다[8].

그러나 이러한 루프안테나 구조에 마이크로스트립 기술을 적용하면 보다 작고, 제작이 용이하며, 넓은 검출 대역을 갖는 센서의 제작이 가능하다.

그림 2는 제작된 센서의 모습이다. 안테나 센서는 인쇄회로기판(Printed Circuit Board: PCB)을 이용하여 제작하였다. PCB는 여러 종류의 많은 부품을 페놀 수지 또는 에폭시 수지로 된 평판 위에 밀집 탑재하고, 각 부품 간을 연결하는 회로를 수지 평판의 표면에 밀집 단축하여 고정시킨 회로 기판이다.

먼저 설계된 도면을 인쇄용 필름에 고해상도 프린터로 출력하여 제작하고, 인쇄된 필름을 UV노광기를 사용하여 제작하고자 하는 PCB 원판에 약 1~3분 정도 노광시킨다. 이후 노광된 부분을 현상제를 통해서 제거하게 되고 현상작업이 끝나 PCB는 에칭기를 통해 에칭되게 된다. 에칭작업이란 현상제를 통해 벗겨진 동판을 영화 제2산화철 용액을 통해 용해시키는 작업으로 남게 되는 동판부분

에 의해 센서가 형성되게 된다. 에칭작업은 에칭기에 따라 2~10분정도 소요된다. 이후 에칭된 PCB는 PCB절단기를 통해 설계된 규격에 따라 절단하게 되고 SMA 커넥터를 부착하는 것을 마지막으로 한다.

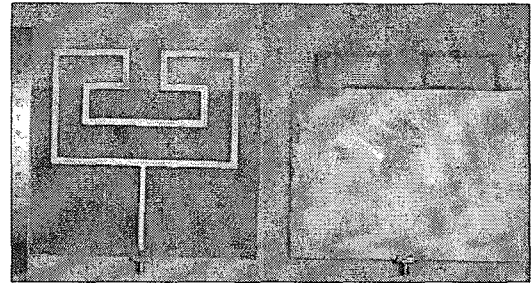


그림 73. 제작된 평면루프 센서

## 2.2 측정 시스템 및 측정방법

그림 3은 실험실에 모의로 설치된 전력케이블 부분방전 검출 시스템을 나타내고 있다. 실험에 사용된 케이블은 배전급 케이블 TR-CNCV-W 325mm<sup>2</sup> 케이블로서 배전 케이블 접속에 사용되는 중간 접속함을 사용하여 7M 케이블과 6M케이블 2개를 접속하였고 종단처리도 현장 배전선로에 사용되는 단말 처리 키트로 현장 배전선로와 동일하게 접속하였다. 케이블의 중간 접속함 내부에 모의 결함(계면방전결함)을 인위적으로 만든 상태이다.

시험과정으로는 먼저 교정펄스 발생기(Calibrator: PD, CAL1A)를 이용하여 정량적으로 교정된 인위적인 방전 신호를 전력케이블에 주입하고 본 연구에서 제안한 평면 루프 센서와 비교를 목적으로 사용된 HFCT 센서(PD사, CT-100)에서 각각 신호를 검출하여 비교하며, 두 번째로 최대 50kV까지 전압인가가 가능한 내전압기(Hipotronics, 750-2CTS)를 이용하여 XLPE 전력케이블의 사용전압인 22kV까지 인가하여 발생하는 부분방전 신호를 검출한다.

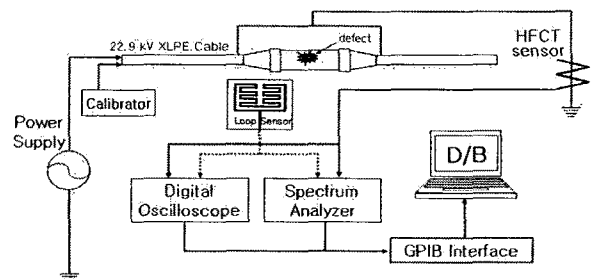
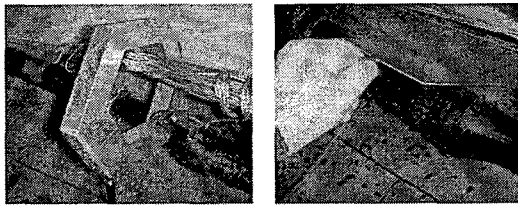


그림 3. 케이블 부분방전 측정시스템

그림 4는 부분방전 측정을 위한 각각의 센서를 나타냈다. 그림 4의 (a)는 고주파 변류기(HFCT: High-frequency Current Transformer)형 센서로서 센서의 검출 주파수 대역은 2~50MHz이며 접속한 케이블시스의 접속부에 설치하여 시스에 흐르는 순환전류의 고주파 신호 검출을 위해 적용한 상용화된 센서이다. 접속함 부근에 열화에 의한 부분방전 신호가 발생되면 시스 층으로 유입되어 검출되는 원리이다.

그러나 케이블 선로가 길어질수록 시스에 유기된 신호는 중간 접속부까지 도달하기 전에 소멸되기 때문에 중간 접속부에서 발생하는 부분방전 신호는 검출가능성이 있으나 측정위치가 멀어지는 경우 신호는 미약하게 나타나게 된다. 또한 중간 접속부에 접지가 연결되었을 경우 신호는 더욱 미약하게 검출될 수 있다. 그림 4의 (b)는 본 연구에서 제안한 평면루프 센서로 접속함 외부에 설치하여 부분방전 현상과 함께 발생하는 전자파를 수신하는 장치이다.



(a) HFCT 센서 (b) 평면루프 센서

그림 4. 22.9kV 모의 케이블선로의 센서 설치

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 평면루프센서 평가

그림 5는 시뮬레이션을 통해 설계된 안테나 센서의 측정 감도를 계산하여 얻어진 반사손실을 나타내고 있다. 설계된 센서는 IEEE Standard 400.3에서 권고하는 -6dB 대역폭을 기준으로 할때 약 50MHz의 공진 대역폭을 나타냈으며, 약 52MHz에서 측정 감도를 보였다. 여기에서 -10dB의 반사손실은 Source 신호의 90%를 센싱하는 것을 의미하며 -20dB Source 신호의 95%를, -30dB는 97.5%를 각각 센싱할 수 있음을 의미한다.

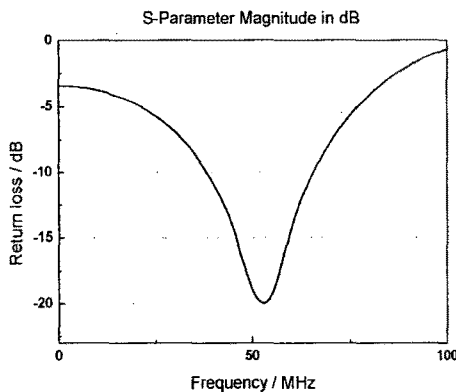


그림 5. 시뮬레이션상의 반사손실 특성

#### 3.2 부분방전 신호(PD signals) 평가

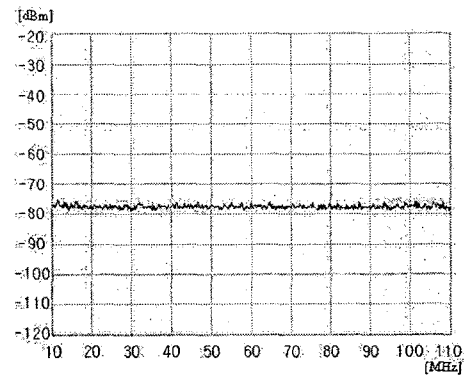
모의 결함을 가지고 있는 22.9kV XLPE 케이블에 실제 상용전압을 인가하여 실험하였다. 전력케이블에서 발생하는 부분방전은 케이블의 열화 상태 및 경화정도로 인해

발생 시간 및 회수가 제 각각이다. 본 연구에 적용된 전력케이블 역시 정해진 시간과 주기에 따라 정량적으로 부분방전이 발생하는 것이 아니라 상황에 따라 검출 신호 특성이 다르게 된다. 또한 고전압의 인가로 인해 발생하는 전원 노이즈의 영향이 실험에 지장을 줄 수 있다. 이러한 특성을 고려하여 실험을 진행하였다. 단 전압을 인가할 때 선로의 상태 관찰 및 부분방전의 개시전압 특성을 확인하기 위하여 500V에서부터 1 [kV/s]의 속도로 전압을 상승시키며 주시 하였고 본 실험에서 부분방전 현상은 20kV에서 시작 하였다.

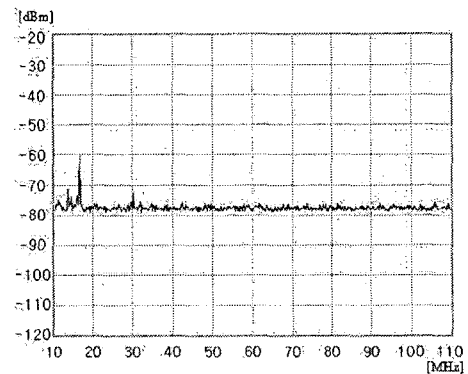
#### (1) 주파수 분석(frequency domain analysis)

그림 6의 (a), (b)는 부분방전의 발생 전과 부분방전 발생 후의 주파수 특성을 HFCT 센서를 이용하여 측정된 그래프이다. HFCT 센서의 경우 부분방전 발생 시 센서가 가지고 있는 고유 주파수 영역인 10~40MHz 범위에서만 부분방전이 검출됨을 그림 6의 (b)를 통해 알 수 있다.

그림 7의 (a), (b)는 본 연구에서 제안한 평면 루프 센서의 상용전압 인가 후 발생한 부분방전을 측정된 그래프이다. 그림 7의 (b)를 보면 안테나 센서가 가지고 있는 주파수가 10~60MHz 대역임을 확인 할 수 있었다.

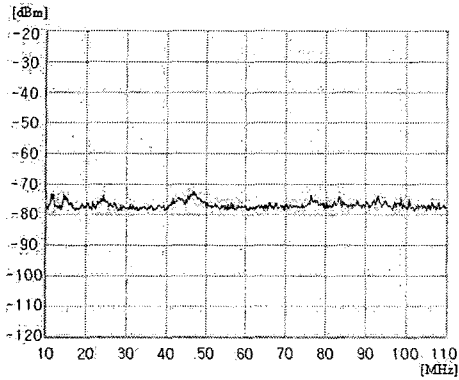


(a) 19kV

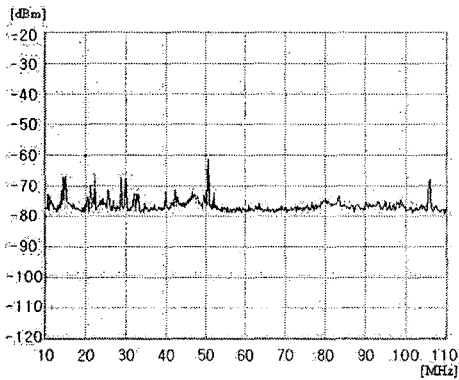


(b) 22kV

그림 6. 상용전압을 인가한 HFCT 센서의 주파수 특성



(a) 19kV



(b) 22kV

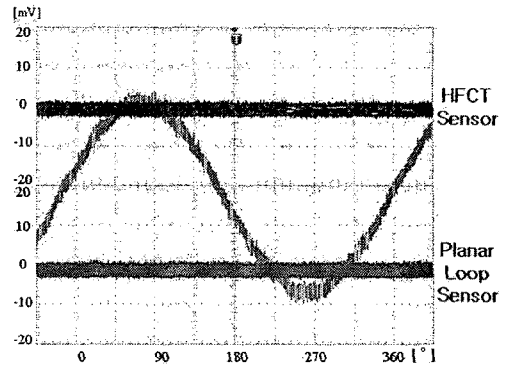
그림 7. 상용전압을 인가한 평면루프 센서의 주파수 특성

(2) 위상 분석(phase analysis)

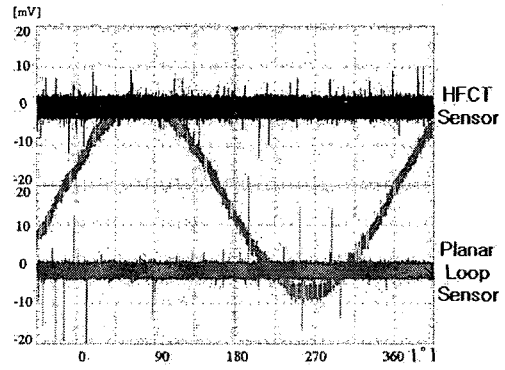
이번 실험은 오실로스코프를 통해 상용전압 인가 시 발생된 부분방전의 특성 확인 하고자 한다. 한 화면에 각각의 측정 센서를 설정하여 부분방전 발생 시 동시 관측이 가능하도록 세팅 하였으며, 인가전압의 위상을 설정하여 부분방전의 발생 위치 및 패턴을 확인 하였다. 또한 이번 실험에서는 HFCT 센서와 평면루프 센서 각각이 얼마만큼의 노이즈 영향을 받는지 확인 하였다.

그림 8은 상용전압의 인가 시 발생된 부분방전의 크기 및 형태를 그래프로 나타낸 결과이다. 19kV 전압인가 시 까지 부분방전은 발생되지 않았으며, 22kV 전압 인가 시 활발한 부분방전의 진행을 확인 할 수 있었다. 그림 8의 (b)는 전압 인가 후 1분간 부분방전을 측정할 결과이며 위상에 따라 부분방전의 패턴을 확인 할 수 있었다. 각 센서의 신호크기 검출 특성을 비교해 볼 때 평면 루프 센서가 HFCT 센서의 두 배의 전압크기를 보였으며 검출 발생 빈도수는 비슷한 양상을 보였다.

노이즈에 대한 영향을 확인 해 본 결과, HFCT 센서의 경우 노이즈 크기가 6mV의 크기를 가진 반면, 평면 루프 센서의 경우 그 크기가 4mV로 약 1/5 적은 영향력을 가지고 있음을 확인 하였다. 부분방전의 미소한 특성을 감안 할 경우 우수한 성능임을 확인 할 수 있는 결과이다.



(a) 19kV



(b) 22kV

그림 8. 상용전압을 인가한 각 센서의 전압 특성

4. 결 론

본 논문에서는 XLPE 지중 배전 케이블의 부분방전 측정 감도 향상 및 노이즈 억제에 위한 안테나성 센서를 설계 및 제작하였고 센서의 반사손실을 측정하였다. 또한, 교정 펄스신호를 주입하여 평면루프 센서의 특성을 확인하였고, 이후 결함을 가진 모의 케이블선로에서 HFCT 센서를 적용하여 센서의 검출 능력을 비교 시험하였다. 시험 결과를 요약하면 아래와 같다.

첫째, 설계 및 제작된 평면루프 센서의 IEEE 6dB 대역폭은 25MHz~ 75MHz로서 기존 루프안테나 센서보다 광대역특성을 보였으며 최대 감도는 52MHz에서 -19dB의 반사손실 특성을 보였다.

둘째, 주파수 특성 분석 결과, 평면루프 센서 검출 주파수 대역이 HFCT센서에 비해 광대역 특성을 보였으며 동일한 이득값을 얻었다.

셋째, 케이블 부분방전 발생 시 검출된 신호크기는 평면루프 센서가 HFCT 센서보다 두배의 차이로 우수한 검출능력을 보였다.

넷째, 노이즈에 대한 분석결과, 평면루프 센서가 HFCT 센서에 비해 약 20% 노이즈 영향을 최소화 하였다.

실험을 통해 평면루프 센서의 부분방전 측정 능력을 확인하고 측정주파수 대역 및 검출이득을 확인 하였다. 또한 노이즈의 영향을 기존의 센서가 가진 범위 이하로 줄일 수 있음을 확인 하였다. 고가의 전문 진단센서의 이용

이 아닌 저가의 센서를 설계함으로써 경제성 또한 확인할 수 있었다.

### 참고 문헌

본 논문은 Post BK-21 사업에 의해 지원되었습니다.

### 참고 문헌

- [1] G.C. Montanari, "Insulation Diagnosis of High Voltage Apparatus by Partial Discharge Investigation", IEEE 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Vol. 1, pp. 1-11, 2006.
- [2] 김주용, 송일근, 정익중, 한명관, 심유정, 문재덕, "지중 배전케이블의 최적 교체기준 수립을 위한 열화진단 및 특성 분석", 대한전기학회 논문지, vol. 53C, no. 5, pp. 258-263, 2004.
- [3] E. Lemke, H. Elze, W. Weissenberg, "Experience in PD diagnosis tests of HV cable terminations in service using the ultra-wide band PD probing", XIV Symposium, pp. 221-227, 2003.
- [4] Sander Meijer, Andrea Bovis, Edward Gulski, Johan J. Smit and Alain Girodet, "Analysis of the Sensitivity of the UHF PD Measuring Technique", Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, CA USA, pp. 397-399, 2000.
- [5] Wei Wang, Changyu Li, Chengrong Li, Bin Zheng, Luhua Zhang, "On Site PD Detection on XLPE Cable Accessories", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 12, no. 2, pp. 216-222, 2005.
- [6] Zhiguo Tang, Chengrong Li, Xu Cheng, Wei Wang, Jinzhong Li and Jun Li, "Partial Discharge Location in Power Transformers Using Wideband RF Detection", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 13, no. 6, pp. 1193-1199, 2006.
- [7] IEEE Std 1434-2000, "IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery", IEEE Power Engineering Society, pp. 7-8, 2000.
- [8] 박영훈, "케이블 부분방전 감시장치", 대한민국 공개특허 10-2004-0026172, pp. 1-6, 2004.