

광섬유 센서를 이용한 부분방전 측정연구

이준호, 이철규
호서대학교 공과대학 전기공학과

A Study on Partial Discharge Measurement using Optical Fiber Sensors

June-Ho Lee and Cheol-Kyou Lee
Dept. of Electrical Eng., Hoseo University

Abstract - In this paper, an optical fiber sensor(OF sensor) utilizing the principal of Mach-Zehnder interferometer were proposed to detect the partial discharge signals in insulating oil. At first the AC breakdown signals were detected to check the response of the OF sensor. The detected signals from OF sensor was consistent with that from current probe. After the response checking, simultaneous measurements and continuous recording were made of electrical and the OF sensor signals from partial discharge(PD) produced by IEC(b) electrode system immersed in insulating oil. The continuous recording made it possible to extract basic quantities of PD from the OF sensor signals, such as pulse phase and pulse amplitude distribution. Through the signal analysis, the absolute peaks of the OF sensor PD signal was found to be increased with the amplitude of electrical signals, and these results mean that there is a strong correlation between OF sensor and electrical PD signals. It was demonstrated that the OF sensor in this research had a possibility to detect the PD signals in power apparatus.

1. 서 론

부분방전은 전력기기의 절연상태에 대한 정보를 외부로 전달해주는 중요한 물리량 중 하나이기 때문에 전력설비의 진단에 부분방전의 측정기법이 널리 이용되고 있다 [1]. 이러한 부분방전의 측정방법은 크게 전기적인 방법과 비전기적인 방법으로 나눌 수 있는데, 전기적인 방법은 부분방전이 발생하면서 나타나는 전류펄스를 측정임 피던스나 CT(current transformer)와 같은 전기적 측정장치를 사용하여 검출하는 방법으로 대부분의 전력기기에서 가장 널리 사용되고 있다 [2, 3]. 비전기적인 방법은 부분방전이 일어나면서 에너지의 소모에 의해 발생하는 빛, 음향, 열, 가스 등을 측정하여 부분방전을 검출하는 방법으로 이중 부분방전에 수반되는 음향신호 측정방법은 전력용 변압기나 GIS 등에 응용하기 위해 많은 연구가 이루어지고 있다 [4, 5]. 음향신호 측정방법에는 통상 압전재료로 만들어진 초음파센서를 이용하는데 이 방법은 EMI나 전기적 잡음의 영향을 받지않고 자석식 고정장치를 이용하여 원하는 부위에 설치가 용이하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 부분방전에 의해 발생한 음향신호는 초음파센서에 까지 전달되는 과정에서 매질이나 절연구조물 등에 의해 감쇠되기 때문에 센서로부터 먼 거리의 부분방전신호를 검출하기 어렵다. 또한 음향신호가 전달되는 과정에서 방전 발생원으로부터 직접 전달되는 신호와 금속벽과 같은 다

른 매질을 통하여 간접적으로 전달되는 신호가 중첩되는 경우 방전크기나 위치검출이 어려워질 수 있다. 최근 들어 광섬유를 이용한 센서의 응용이 여러분야에서 활발히 이루어지고 있다. 센서로서의 광섬유는 광대역성, 저손실성, 소형경량, 상호불간섭성, 무유도성, 방폭성, 높은 절연내력, 높은 내부식성 등의 장점을 가지고 있기 때문에 전력기기와 관련된 물리량의 측정에도 우수한 가능성을 가진 센서이다 [6]. 본 연구에서는 절연유 내에서 발생하는 부분방전신호를 자체 제작한 광섬유센서를 이용하여 연속적으로 측정하고 동시에 기존의 전기적 측정방법으로도 신호를 측정하여, 위상각에 따른 두 신호의 일치성, 신호의 크기, 형태 등의 상관관계를 살펴봄으로써 광섬유센서를 이용한 전력기기의 부분방전검출의 응용가능성과 앞으로의 개선점에 대해 고찰하였다.

2. 측정원리

본 연구에서는 절연유 내의 부분방전에 의해 발생하여 전달되는 음향신호검출을 위하여 높은 측정감도를 특징으로 하는 단일모드 광섬유를 이용한 간섭계(interferometer)를 이용하였다. 광섬유내를 통과하는 빛은 음향의 압력에 의해 위상이 변조되게 된다 [7]. 간섭계로는 Michelson, Mach-Zehnder, Sagnac, Fabry-Perot 간섭계 등이 널리 사용되는데 본 연구에서는 호모다인(homodyne)방식의 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하였다. 그림 1은 광섬유를 이용한 Mach-Zehnder 간섭계의 간단한 구성도이다.

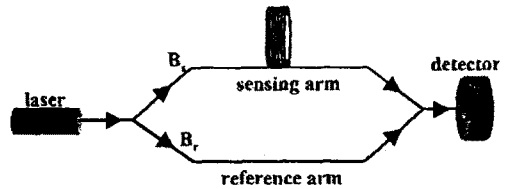


그림 1. 광섬유를 이용한 Mach-Zehnder 간섭계의 구성도

그림에서와 같이 레이저에서 나온 빛은 둘로 갈라져서 아무런 물리적 변화를 겪지 않는 reference arm과 측정하고자 하는 물리량에 의해 광섬유에 변화가 가해지는 sensing arm을 각각 통과한 후 다시 합쳐져서 광검출기에 검출된다. 이때 각각의 광경로차이에 비례하는 위상차가 발생하여 검출광의 세기에 변화가 일어나고 이를 측정함으로써 sensing arm에 가해진 피측정량의 크기를 측정하게 된다.

우선 sensing arm과 reference arm을 통과하는 빛을 각각 B_s , B_r 라 하고 이를 복소수로 표시하면 다음과 같다

$$B_s = A_s \exp[j \omega_L t + 2\beta x_s] \quad (1-1)$$

$$B_r = A_r \exp[j \omega_L t + 2\beta x_r] \quad (1-2)$$

여기서 A_s , A_r 은 각각 sensing arm 과 referenece arm의 빛의 크기, ω_L 은 레이저광의 각주파수, x_s 와 x_r 은 각 arm의 빛의 경로길이이며, β 는 위상전달상수 (phaes propagation constant)로 다음 식(2)와 같이 정의된다.

$$\beta = \frac{2\pi n}{\lambda_0} \quad (2)$$

여기서 n 은 광섬유 코어의 굴절율이고 λ_0 는 진공에서 레이저광의 파장이다. 두 빛은 다시 합쳐져 광검출기로 들어가는데 이 때 빛의 세기 $I_d(t)$ 는 다음 식(3)으로 표현된다[8].

$$I_d = A_s^2 + A_r^2 + 2 A_s A_r \cos \phi(t) \quad (3)$$

여기서 $\phi(t)$ 는 간섭계의 arm 사이의 위상차이며 시변 함수로 다음과 같이 주어진다.

$$\phi(t) = 2\beta [x_s(t) - x_r] \quad (4)$$

위 식(4)에서 주어진 바와 같이 reference arm의 길이가 일정하다고 가정하면 피측정량, 본 연구의 경우 부분방전에 의해 발생한 음향신호의 압력의 영향을 받은 sensing arm의 길이 $x_s(t)$ 가 변화하고 이는 위상차 $\phi(t)$ 의 변화로 반영되어 최종적으로 빛의 세기 $I_d(t)$ 가 변화하게 된다. 따라서 이 빛의 세기의 시간적 변화를 측정함으로써 피측정량의 변화를 알 수 있게된다.

3. 실험 및 결과

그림 2는 본 연구를 위해 구성된 Mach-Zehnder 간섭계의 구성도이다.

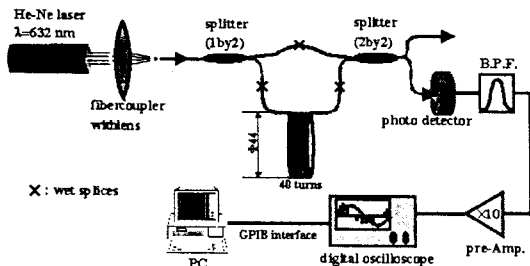


그림 2. 본 연구에 사용한 Mach-Zehnder 간섭계의 구성도

3.1 교류절연 파괴실험

본 연구에서는 광섬유센서를 이용한 부분방전 신호검출에 앞서 구성된 간섭계의 성능과 부분방전신호의 검출가능성을 확인하고 기존의 발표된 결과들과 비교하기 위하여 절연유 내에서 절연파괴시 발생하는 신호를 측정하는 실험을 수행하였다. 그림 3은 절연유 내의 구대구 전극의 파괴실험을 위한 장치이다.

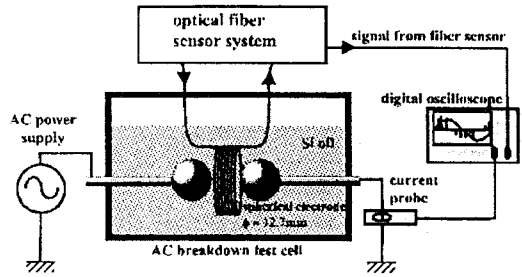


그림 3. 절연유 내의 구대구 전극 절연파괴실험장치

구전극의 직경은 12.7 mm 이고 절연유 속에서 교류전압을 인가하여 파괴실험을 행하였다. 절연파괴시 전기적 신호는 전류프루브(Tektronix사 모델 A6303)을 사용하여 접지측으로 흐르는 전류를 측정하였으며 전류프루브의 검출신호는 디지털오실로스코프로 들어가 광섬유 간섭계의 신호와 동시에 측정, 비교하였다.

그림 4는 절연유가 교류전압에 의해 파괴될 때 광섬유센서와 전류프루브에 검출된 신호로써 구전극의 간격은 각각 1.5 mm와 2.0 mm이다. 본 교류파괴실험의 목적은 전술한 바와 같이 이번 연구를 위해 구성된 광섬유센서가 전기적 파괴신호를 제대로 검출할 수 있는지를 살펴보기 위한 것이다. 우선 이 실험을 통하여 전류프루브에서 펄스가 측정된 시간과 광섬유 센서 신호의 펄스 측정시간이 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었으며 이는 본 연구에서 구성된 광섬유센서가 제대로 작동하고 있음을 알려주는 결과이다. 그리고 광섬유센서의 신호에서는 펄스발생 후 작은 크기의 진동신호가 관찰되는데 이는 기존의 음향센서를 이용한 방전신호 측정시에 공통적으로 나타나는 현상인 것으로 방전에 의한 음향파가 매질을 진행하면서 진동하거나 혹은 측정셀의 벽면에 음향파가 반사되면서 전달된 신호의 영향이라고 볼 수 있다[9].

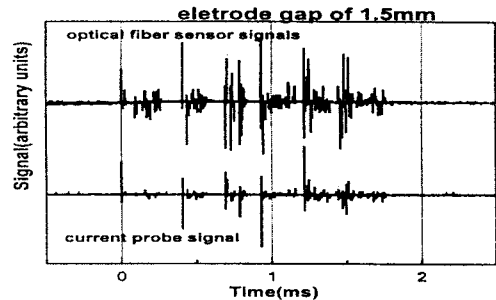


그림 4. 광섬유센서와 전류프루브에 검출된 절연유 내 구대구 전극에서의 교류절연 파괴신호

3.2 부분방전 신호검출

그림 5는 본 연구에서 사용한 부분방전 측정장치이다. 부분방전의 발생부분은 IEC(b) 전극계를 이용하였다. IEC(b) 전극계는 일반적으로 전력기에서 발생하는 연면방전을 모으는 전극이다. 부분방전의 전기적 신호는 결합 캐패시턴스 C_k 아래의 측정임피던스에 의해 검출되어 1/5 감쇠기를 통과한 후 디지털오실로스코프로 관찰되며 CRT 화면에는 전기적 방법에 의한 부분방전신호와 광섬유센서에 의한 신호, 그리고 시료에 인가되는 전압신호가 1000:1 고압프루브(HP사 모델 34300A)를 통하여 동시에 관찰, 저장된다. 기존의 광섬유센서를 이용한 방전측정에 관한 연구를 살펴보면 대부분 음향센서와 광섬유센서와의 측정신호를 비교하였으며, 방전신호도 부분방전신호가 아닌 아크신

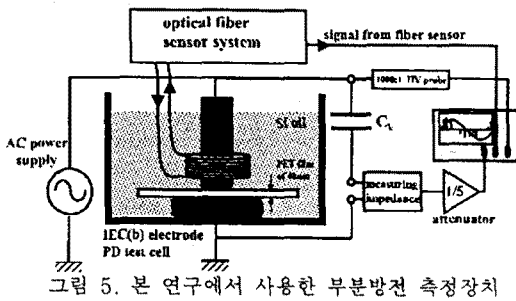


그림 5. 본 연구에서 사용한 부분방전 측정장치

호 또는 절연과피 신호이거나 연속적인 방전신호의 측정이 아닌 단일방전신호에 관한 측정과 분석에 대한 내용을 담고있다. 그러나 용량센서에 의한 방전신호의 측정에서 신호가 매질을 통하여 전달되는 과정에서 감쇠와 분산현상의 영향을 받으면서 센서의 위치에 따라 원래의 신호가 왜곡되는 경향이 있다. 특히 고주파 성분은 신호전달거리가 증가함에 따라 급속히 감쇠하여 S/N 비가 저하되는 원인이 된다[10]. 따라서 부분방전에 함유된 통계적 정보의 분석이나 방전크기의 관련성, 위상 분포 등을 검토하기 위해서는 부분방전으로부터 전기적 신호와 광섬유센서의 신호를 동시에 측정하여야 한다.

그림 6 은 교류 12kV 인가시 발생하는 부분방전의 전기적 신호와 광섬유신호, 그리고 인가전압의 파형을 측정 한 결과이다. 전기적 신호와 광섬유센서 신호의 펄스 발생 위상이 매우 잘 일치하고 있음을 관찰할 수 있다. 광섬유신호의 경우 노이즈성분의 펄스는 프리앰프 자체의 노이즈와 함께 간섭계의 원리상 기준광과 측정광의 광로차에 매우 민감하므로 본 실험에서도 reference arm에 가해질 수 있는 매우 미약한 진동이나 온도변화 등의 영향에 의한 노이즈가 복합적으로 작용한 것으로 사료되며 S/N 비의 향상을 위한 방법이 보다 더 연구되어야 할 것이다.

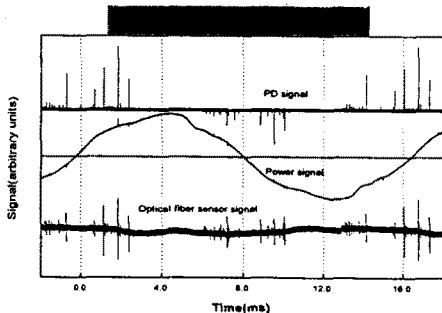


그림 6. 연속적인 부분방전의 전기적 신호, 광섬유센서 신호 및 인가전압파형

본 연구에서 제시한 광섬유센서의 신호측정성능을 평가함에 있어 검출된 방전신호의 크기의 관계가 기존의 전기적인 방법에 의해 측정된 신호와 어느 정도의 관련성이 있는지를 검증하여야 한다. 이는 전기적 측정법과는 달리 음향파에 의한 방전신호의 측정에 있어서는 아직 신호의 교정(calibration)법이 정립되지 않았기 때문에 부득불 광섬유센서의 신호는 방전의 크기를 알고있는 전기적 신호와의 상대비교에 의해 교정이 가능하기 때문이다. 본 연구에서는 광섬유에 의한 부분방전신호와 같은 위상에서 측정된 전기적 신호의 크기를 비교하였고 그 결과 광섬유센서의 신호와 전기적 신호간에는 매우 양호한 선형성을 가지고 있음을 확인하였다. 이러한 선형성의 정보를 이용하여 광섬유센서에 의해 측정된 신호로부터

터 방전크기를 확률적으로 보정해 낼 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 광섬유를 이용하여 부분방전신호를 측정하기 위하여 Mach-Zehnder 간섭계의 원리를 이용한 광섬유센서를 개발하였고 기존의 전기적 측정방법으로 측정 한 방전신호와의 비교를 통하여 광섬유센서의 특성을 살펴보았다.

부분방전 신호발생을 위한 전극제로 IEC(b) 전극계를 사용하였으며 이를 절연유 내에 담근 상태에서 전압을 인가하여 부분방전을 유지시켰다. 부분방전신호는 두가지 방법으로 측정하였다. 우선 기존의 전기적인 신호측정을 통하여 위상에 따른 부분방전신호를 측정하였고, 동시에 본 연구에서 개발한 광섬유센서를 이용하여 절연유를 통하여 전달되는 부분방전신호를 검출하여 비교하였다. 그 결과 전기적 신호와 광섬유센서 신호의 위상각이 일치된 펄스형태를 확인하였다.

광섬유신호와 전기적 신호의 상관관계를 분석한 결과 매우 양호한 선형성을 나타내었으며 이러한 두 신호간의 양호한 선형성은 광섬유센서로부터 검출된 부분방전 신호를 방전량으로 보정하는 것을 가능하게 한다.

본 연구에서는 광섬유센서를 이용한 절연유 내에서의 부분방전신호를 연속적으로 검출하는 데 성공하였다. 더불어 기존의 전기적 측정방법을 이용한 부분방전 신호검출을 병행하여 두 신호간의 위상각에 따른 방전신호의 일치성, 방전신호의 크기, 형태 등의 상관관계를 살펴보고 양호한 선형성을 확인함으로써 광섬유센서를 이용한 전력기기 부분방전검출의 응용가능성을 제시하였다.

(참 고 문 헌)

- (1) June-Ho Lee and Tatsuki Okamoto, "A Study on the Partial Discharge Patterns in Multi-Defect Insulating Systems", J. EEIS., Vol. 3, No. 2, pp. 170-173, 1998.
- (2) S. A. Boggs, "Partial Discharge Part I: Overview and Signal Generation", IEEE Elec. Insul. Mag., Vol. 6, No. 4, pp. 33-39, 1990.
- (3) G. C. Stone, "The Use of Partial Discharge Measurements to Assess the Condition of Rotating Machine Insulation", IEEE Elec. Insul. Mag., Vol. 12, No. 4, pp. 23-27, 1996.
- (4) P. von Glahn, K. L. Stricklette, R. J. Van Brunt and Cheim, "Correlations Between Electrical and Acoustic Detection of Partial Discharge in Liquids and Implications for Continuous Data Recording", Conf. Record of 1996 IEEE ISEI, Vol. 1, pp. 69-74, 1996.
- (5) R. T. Harrold, "Acoustic Technology Applications in Electrical Insulation and Dielectrics", IEEE Trans. Elec. Insul., Vol. 20, No. 1, pp. 3-19, 1985.
- (6) 大越孝敬, 光ファイバセンサ, オーム社, 1986, pp. 5-8.
- (7) Peter Hauptmann, *Sensors principles and applications*, Prentice Hall, 1991, pp. 75-114.
- (8) B. E. A Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley & Sons, 1991, pp. 63-64.
- (9) P. von Glahn, K. L. Stricklett, R. J. Van Brunt and L. A. V. Cheim, "Correlation between Electrical and Acoustic Detection of Partial Discharge in Liquids and Implications for Continuous Data Recording", Conf. Record of the 1996 IEEE ISEI, Vol. 1, pp. 69-74, 1996.
- (10) L. E. Lundgaard, "Partial Discharge-Part XIV: Acoustic Partial Discharge Detection-Practical Application", IEEE Elec. Insul. Mag., Vol. 8, No. 5, pp. 34-43, 1996.