

광섬유 Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 부분방전 초음파 검출특성

(Ultrasonic-detecting Characteristics by Partial Discharge
using the Fiber Mach-Zehnder Interferometer in Insulating Oil)

심승환*[†] · 이광식* · 이상훈[○] · 김달우[○]

(Seung-Hwan Sim · Kwang-Sik Lee · Sang-Hun Lee · Dal-Woo Kim)

*영남대학교 전자정보공학부 [○]포항산업과학연구원

Abstract

The partial-discharge(PD) is accompanied by physical and chemical phenomena, such as heat, light, noise, gas, chemical transformation, electric current, and electromagnetic radiation. The PD can be detected by measuring one of these changes. Although some techniques are employed in this purpose, several obstacles interfere with an on-line measurement. Now, a fiber-optic sensor for detecting ultrasonics is suggested for the on line measurement system with high accuracy.

In this paper, an optical fiber sensor utilizing the principal of Mach-Zehnder interferometer was proposed to detect the discharge signal.

1. 서론

전력시스템의 고전압화, 대용량화에 따라 전력기기의 고신뢰도 동작을 확보하기 위한 예방진단의 필요성이 증대되고 있다. 전력기에서 절연과피가 되기 전의 전구현상으로 대부분의 경우 부분방전을 수반하므로 부분방전현상의 측정을 통하여 전력기기의 이상 및 열화를 판정하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근 부분방전 검출을 위해 안테나 혹은 초음파 센서를 이용하는 방안이 연구되고 있다.^[1-2] 이러한 방법은 비접촉식 on-line 구현이 가능하지만 주변 노이즈(noise)나 전자기적 결합에 의해 신호가 왜곡되는 문제점이 있다.

최근, 광섬유를 이용한 센서의 응용은 여러 분야에서 이용되고 있다. 센서로서의 광섬유 특징으로는 저손실성, 소형, 경량, 넓은 대역폭, 무유도성, 강한 내부식성, 특히 높은 감도(sensitivity)등의 장점을 가지고 있기 때문에 센서로서의 무한한 가능성을 가지고 있다.

본 논문에서는 유입변압기 절연진단을 목적으로 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하여 함수발생기를 이용한 초음파 검출특성과 절연유 내에서 발생하는 방전신호에 대한 음향신호 검출특성을 살펴보았다.

2. 본론

2.1 광섬유를 이용한 Mach-Zehnder 간섭계 구성도

본 연구에서는 절연유 내의 부분방전에 의해 발생하는 초음파 신호 검출을 위하여 광섬유를 이용함으로써 외부노이즈로부터 영향을 대폭 줄일 수 있으며 맨드렐(mandrel)을 사용하여 광섬유를 수회 감아 좋은 감도를 얻을 수 있는 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하였다. 그림 1은 광섬유를 이용한 Mach-Zehnder 간섭계를 나타낸 것이다.^[3-4]

일반적으로 두 개의 다른 경로를 통과함으로써 발생하는 위상차 Φ 에 의하여 발생하는 출력빛의 세기 I 는 다음과 같다.

$$I = A + B \cos \Phi \quad (1)$$

여기서, A 는 빛의 평균 세기에 비례하는 상수이고 B 는 두 개의 경로를 통하여 재결합된 빛의 편광상태와 세기를 나타내는 상수이다. 총 위상변위 Φ 는 일반적으로 많은 주파수 성분의 합으로서 다음과 같이 나타낸다.

$$\Phi = \Phi(t) + \Phi_{\omega} \cos \Phi \quad (2)$$

Φ_{ω} 는 레이저의 주파수 변조에 의해 나타나는 위상신호를 의미하며, $\Phi(t)$ 는 초음파 음압에 선형적으로 관계하는 함수를 나타낸다. 센서에서 되돌아

오는 신호로부터 $\Phi(t)$ 를 찾아 신호검출에 이용한다. 식 (1)을 식 (2)에 대입하면 다음과 같이 표현된다.

$$I = A + B \cos(\Phi(t)) J_0(\Phi_\omega) + 2B \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(\Phi_\omega) \cos 2k\omega t - B \sin(\Phi(t)) [2 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(\Phi_\omega) \cos(2k+1)\omega t] \quad (3)$$

J_k 는 차수 k 의 베셀 함수(Bessel function)이다. ω 와 2ω 항을 보면 다음과 같은 결과식이 나온다.

$$I_\omega = BG J_1(\Phi_\omega) \sin \Phi(t) \quad (4)$$

$$I_{2\omega} = -BH J_2(\Phi_\omega) \cos \Phi(t) \quad (5)$$

G 와 H 는 ω 와 2ω 에 대한 손실신호의 진폭을 의미한다. 신호검출을 하기 위한 sine과 cosine항의 시간 도함수는 각각의 sine항과 cosine항을 교차해서 곱하여 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$B^2 GH J_1(\Phi_\omega) d\Phi(t) / dt \quad (6)$$

여기서, 출력은 신호 $\Phi(t)$ 의 적분을 통해 얻어진다.^[5]

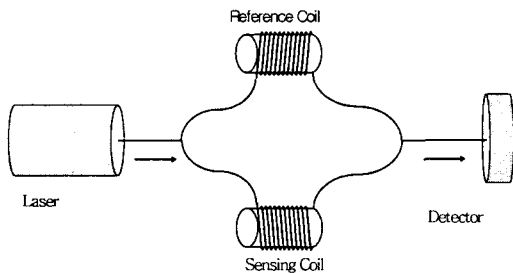


그림 1. 광섬유를 이용한 Mach-Zehnder 간섭계

2.2 실험방법

그림 2에서와 같이 광원(He-Ne laser)에서 출발한 광은 2×2 coupler를 통하여 동일한 크기의 두 개의 광으로 분할된다. coupler를 지난 하나의 광(sensing part)은 유중을 지나 맨드렐(mandrel)에 감긴 광섬유를 통과하고, 다른 하나의 광은 유조박을 경유하게 된다. 이 때 서로 다른 두 개의 광경로는 같은 재질의 광섬유로 동일한 길이를 가지며 맨드렐을 통과한 광은 방전시 발생하는 초음파 신호 음압의 세기 변화에 의해 변위를 일으켜 광경로차가 발생하여 위상차가 발생한다. 위상차로

인한 검출광의 세기에 변화가 일어나 검출광의 세기를 측정함으로써 광섬유 센서에 가해진 방전시 발생 신호의 크기를 검출하게 된다.

광원으로는 연속출력(CW)형 He-Ne 레이저를 사용하였으며 레이저와 광섬유 각각의 연결부분은 FC connector를 사용하여 접합손실을 최소화하였다. Sensing coil과 Reference coil은 둘 다 single mode 광섬유로 길이 10[m]인 bare type을 사용하였으며 직경 10[cm]인 스테인리스 봉에 30회를 감았다. 방전시키지 않는 초기상태에서 광 경로차에 의한 신호 손실(signal fading)을 방지하기 위해 polarization controller를 사용하였다. Reference coil은 외부자극의 영향을 최소화하기 위해 밀폐된 차단 상자 속에 위치시켰다. 전극으로는 침대 평판 전극을 사용하였으며 1[mm] 간격으로 하고 10[kV]를 인가하여 전극과 광섬유 센서의 거리를 14[cm]로 두고 측정하였다.

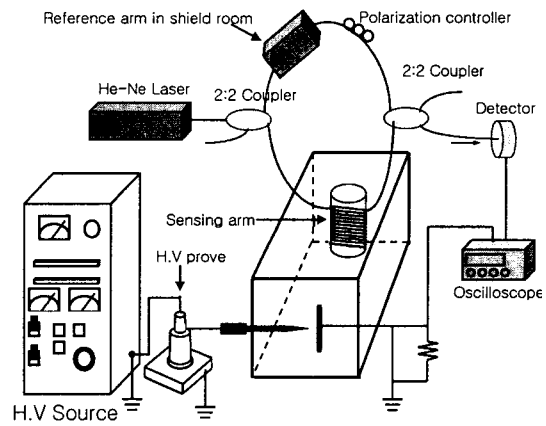


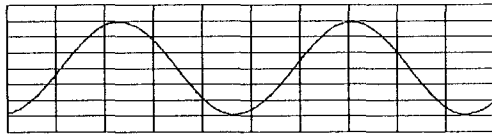
그림 2. 실험 장치

2.3 실험결과 및 검토

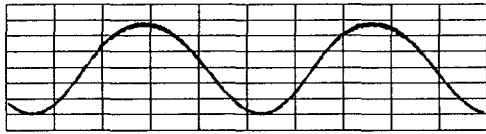
2.3.1 PZT를 이용한 광섬유 센서의 초음파 검출 특성

먼저 본 연구에서 사용하는 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계의 초음파 검출 능력을 확인하기 위해 함수발생기 신호를 PZT(piezoelectric transducer)에 인가하여 초음파를 발생시키고 광섬유 센서로 측정하였다. 광섬유 센서와 PZT의 거리를 5 [cm]로 두었다. 그림 3은 PZT에 인가된 신호와 광섬유 센서로 검출된 신호를 동시에 보여주는 결과를 나타낸 것으로 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계로 측정된 신호가 함수발생기로부터 발생된 초음파 신호와 동일하게 검출할 수 있음을 알 수 있다. 그림 4는 광섬유 센서로 검출한 신호의 주파수 분석 결과로

나타낸 것으로서 함수발생기를 통해 인가된 신호의 주파수와 광섬유 센서를 통해 검출한 신호의 주파수가 일치함을 보여준다.



(a) 함수발생기 발생 신호
(5[V], 1[μ s]/div)



(b) 광섬유 센서 신호
(100[mV], 1[μ s]/div)

그림 3. 광섬유 센서의 초음파 검출 특성

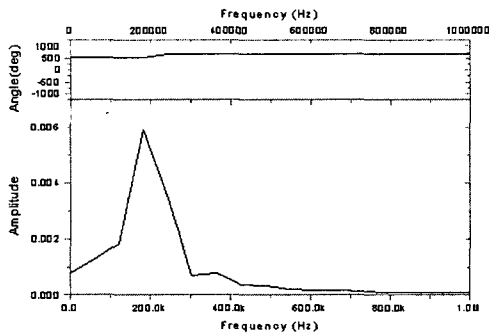


그림 4. 광섬유 센서 검출 신호의 FFT

2.3.2 유중 방전시 광섬유 센서의 초음파 신호 검출 특성

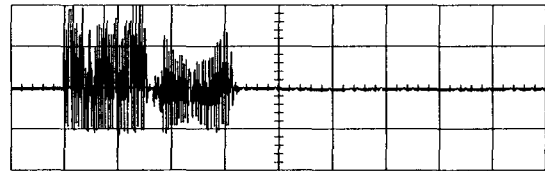
그림 5는 유중에서 방전시 초음파 신호를 검출한 것이다. 그림 (a)는 갭간격 1[mm]에서 10[kV]를 인가하여 측정된 전류 신호를 나타내고 그림(b)는 그 때 측정된 초음파 신호이다.

그림 (c)는 오실로스코프 타임 디비전(time division)을 50[μ s]로 설정하여 방전시 측정된 초음파 신호를 나타낸 것이다. 그림 (c)에서 보는 바와 같이 방전과 동시에 펄스 신호를 먼저 수반한 다음 일정 시간을 두고 초음파 신호가 측정됨을 알 수 있다. 그림 (d)는 광섬유 센서의 레이저 전원을 끈 상태에서 측정된 신호이다. 즉, 방전과 동시에 발생하는 전기적 노이즈 신호를 나타낸 것이다. 그림 (c)와 (d)는 동일한 펄스 신호를 가지고 있음을 볼 수 있는데 이를 통해 그림 (c)의 펄스 신호가 노이즈임을 알 수 있다. 그림 5(c)에서 펄스 신호와 일정

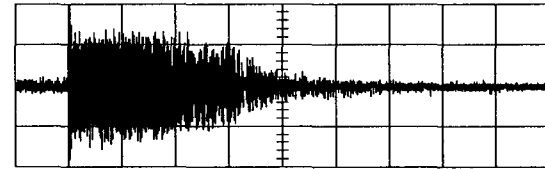
시간 뒤에 나타나는 초음파 신호와의 지연시간을 측정했을 때 약 101 [μ s] 정도의 차이가 나타난다.

일반적으로 상온 상기압 유중에서의 초음파 진행속도는 1420 [m/s] 정도이므로 본 실험에서 측정된 지연시간을 통해 방전점과의 거리를 계산해보면 14.34 [cm]의 계산값이 나온다.^{[6][7]}

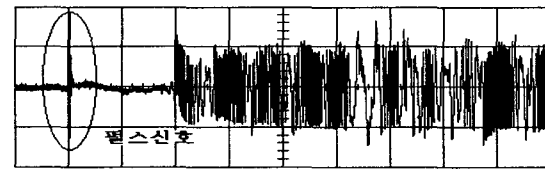
본 실험에서 실제거리가 14 [cm]이므로 측정 오차가 매우 작음을 알 수 있다. 그러므로 펄스 신호와 음향 신호와의 지연 시간을 측정하여 위치검출이 가능함을 알 수 있다.



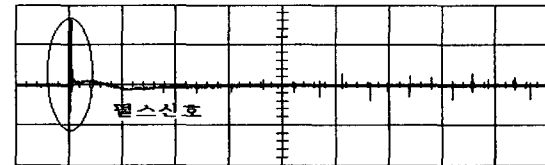
(a) 방전 전류 신호 (5[V], 5[ms]/div)



(b) 광섬유 센서로 검출한 초음파 신호
(50[mV], 5[ms]/div)



(c) 광섬유 센서로 검출한 초음파 신호
(50[mV], 50[μ s]/div)

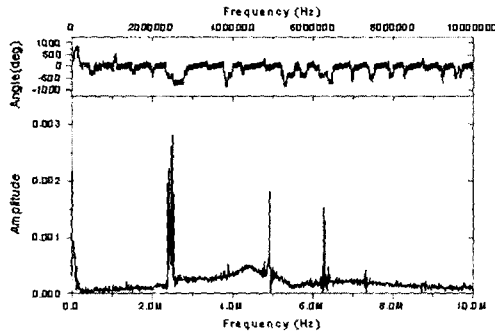


(d) 레이저 전원 off시 검출 신호
(50[mV], 50[μ s]/div)

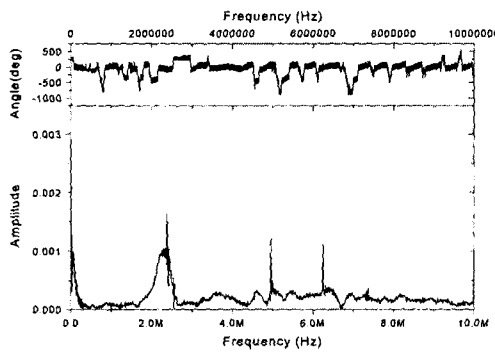
그림 5. 유중 방전시 전류 신호와 광섬유 센서로 검출한 초음파 신호

그림 6(a)는 그림 5(b)의 펄스 신호만 선택하여 주파수 분석한 결과를 나타내었다. 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 약 2, 5, 6[MHz] 부근에서 피크값을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 그림 6(b)는 그림 5(d)의 펄스 신호만 선택하여 주파수 분석을 나타낸 것으로서 그림 5(c)

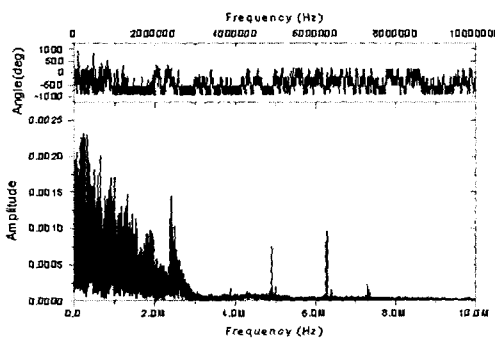
의 펄스 신호와 거의 동일한 주파수 대역에서 피크값을 보였다. 주파수 분석을 통해 보면 그림 5(c)의 펄스 신호는 고주파 성분을 많이 포함하는 전기적 노이즈 신호라 판단된다. 그림 6(c)는 그림 5(b)의 주파수 분석 결과를 나타낸 것으로서 그림(a)와 (b)에서 보여진 펄스 신호의 주파수를 포함하여 방전에 의한 초음파 신호의 주파수를 나타내고 있다. 본 실험을 통해 나타낸 주파수를 분석해보면 방전에 의한 초음파 성분이 500[kHz] 내에서 최대치를 나타내고 있으며 수 [MHz]이상의 신호는 노이즈로 판단된다.



(a) 그림 5(c)의 펄스 신호의 FFT



(b) 그림 5(d)의 펄스 신호의 FFT



(c) 그림 5(b)의 FFT

그림 6 광섬유 센서 검출신호의 주파수 스펙트럼

3. 결론

본 논문에서는 유입변압기 절연진단을 위해 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하였다. 구성된 광섬유 센서를 이용해 합수발생기를 통한 초음파 검출 실험과 실제 방전시 발생하는 초음파 검출 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계가 초음파 신호를 검출할 수 있는지 PZT를 사용하여 실험한 결과 초음파 신호를 검출할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 실제 방전시 검출된 초음파 신호에 펄스 신호가 섞이게 되는데 주파수 분석을 통하여 방전시 동시에 발생하는 노이즈 신호임을 알았다.
- 3) 방전 신호와 동시에 발생하는 펄스 신호와 일정 시간이 지나서 수반하는 초음파 신호와의 지연 시간을 측정하여 방전 위치 예측이 가능했다.

방전시 발생하는 전기적 노이즈 신호에 대해서는 앞으로 완벽한 차폐와 함께 노이즈 신호의 주파수 대역을 분석하여 그에 맞는 필터회로를 적용하면 더 좋은 결과가 나오리라 판단된다.

참고 문헌

- [1] Bengtsson, C., "Status and Trends in Transformer Monitoring", J.EEIS., Vol. 3, No.2, pp.170-173, 1998
- [2] Konig, D., Narayana Rao, Y., "Partial discharge in Electrical Power Apparatus", VDE-Verlag, 1993
- [3] Alan D. Kersey and Anthony Dandridge, "Application of Fiber-Optic Sensors," IEEE, pp.472-478.
- [4] A. B. Tveten, A. M. Yurek and A. Dandridge, "High Performance Fiber Optic Hydrophone," J. Underwater Acoustics 40, 295, 1990
- [5] A.M.Yurek, A.B. Tveten and A. Dandridge, "Acoustic Noise Measurements in the Arctic utilizing all-Fiber Optic Hydrophone," IEEE, pp.1677-1680, 1991
- [6] 김호철 외 4인, "물리 음향학 I", (주)민음사, pp.200-210, 1994
- [7] L. E. Lundgaard, "Acoustic Partial Discharge Detection Fundamental Considerations", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.8, No.4, pp. 25-31, 1992