

유중 방전에 의한 초음파 측정용 광섬유 센서 특성 및 측정 데이터 분석

論文

52C-10-11

Characteristics and Signal Analysis of Fiber-optic Sensor for Detecting Ultrasonic Waves Generated by Discharge in Insulation Oil

李相勳* · 宋炫直** · 李廣植*** · 金達羽§
(Sanghun Lee · Kwangsik Lee · Dalwoo Kim)

Abstract - It is well known that a discharge in oil is the source of various physical phenomena. Ultrasonic-wave detection is a useful method to the diagnosis of the transformer-insulation condition. Conventionally, ultrasonic waves are detected by Piezo-electric transducer, and we use optical method that has many advantages. In this paper, we constructed a Mach-Zehnder interferometer with optical fiber and investigated the principle of operation. Test arrangement is based on the needle-plane electrode system in oil and applied AC high voltage. Ultrasonic waves were detected and analyzed with wavelet transform.

Key Words : Fiber-optic sensor, Ultrasonic, Wavelet transform, Oil-insulated transformer, Discharge

1. 서 론

사회의 정보화 및 산업구조의 변화는 고품질 전력의 안정적인 공급을 요구하게 되었다. 그러므로, 전력 설비의 장시간에 걸친 원활한 운용과 신뢰성 확보가 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 이에 따라 주기적인 유지보수와 더불어 사고를 미연에 감지할 수 있는 기술의 확보가 절실히 요구되고 있다.[1-2]

일반적으로 방전은 열, 빛, 전자계 방출, 초음파, 진동, 필스 전류 등 여러 가지 물리적인 현상과 가스발생, 절연유 변질과 같은 화학적 변화를 일으킨다. 이러한 변화를 감지하여 전력기기의 상태를 파악하기 위한 노력이 계속되고 있으며, 상시 감시 체제를 갖추기 위하여 방전시 주변으로 전파되어지는 전자파나 초음파 측정에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. 그중 방전에 의한 초음파의 측정은 압전소자식 초음파 센서를 많이 이용하고 있다. 최근, 광기술 및 광소자기술의 발달로 레이저 및 광섬유를 이용한 측정이 활발히 전개되고 있다. 광섬유 센서를 이용한 초음파의 측정은 구조물, 의료용 등에 이용되어 높은 활용가치를 인정받고 있으며,[3-4] 센서 구성을 위한 이론적 배경은 이미 오래 전부터 연구되어져 왔다.[5-6] 근래에는 초음파 측정용 광섬유 센서를 전력 설비의 진단에 응용하고자하는 연구가 활발히 진행되고 있다.[7-8]

본 연구에서는 절연유 내부의 방전에 의한 초음파를 측정

할 목적으로 광섬유를 이용해 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하였다. 먼저, 초음파 측정능력을 확인하기 위해 일정 주파수의 초음파를 발생시켜 광섬유 센서로 측정하였다. 절연유 내부에 침-평판 전극을 배치하고 교류전압을 인가해 이때 발생한 초음파를 광섬유 센서로 측정하고 측정된 데이터를 wavelet 분석한 연구이다.[9~12]

2. 본 론

2.1 Mach-Zehnder 간섭계

Mach-Zehnder 간섭계는 Michelson 간섭계와 더불어 두 빔 간섭계 중 대표적인 것으로 광섬유 내부를 지나는 빔을 간섭시켜 만든 장치로서 감도가 아주 뛰어난 것으로 알려져 있으며, 전기적으로 안전하며, 경량이고, 전자기적 영향이 적으며, 병렬배치(multiplexing)도 가능하다. 또한, 센서 구성에 있어 기하학적으로 용이하며, 측정범위가 넓고, 감도가 뛰어나다. 길이 30 m의 초음파 측정용 센서를 예로 들면, 직경 6[cm] 크기의 무지향성 hydrophone 구성이 가능하며, 간섭형 센서를 구성할 경우, 10-13~10-15정도의 strain에도 높은 감도를 가진 센서 구성이 가능하다. 그림 1에 광섬유를 이용해 구성한 Mach-Zehnder 간섭계의 개념도를 나타낸다.[6,13]

광섬유 Mach-Zehnder 간섭계의 기본 동작원리를 보면 다음과 같다. 광섬유 센서를 구성하기 위해 제일 중요한 소자는 coupler인데, 광섬유 코어의 측면을 폴리싱(polishing) 해서 두 개를 충분히 가까이 하면 빔이 한쪽 광섬유에서 다른 쪽 광섬유로 전달이 된다.[14] Mach-Zehnder 간섭계에는 두 개의 coupler가 사용되는데, 레이저 빔이 들어오는 부분부터 C₁, C₂라 하자. 만약, C₁ 과 C₂에서의 power coupling coefficient를 k_1 , k_2 라하고, sensing arm과 reference arm

* 正會員 : 嶺南大 工大 전자정보공학부 博士課程
** 正會員 : 구미1대학 컴퓨터응용전기전공 전임강사
*** 正會員 : 嶺南大 工大 전자정보공학부 教授
§ 正會員 : 포항산업과학연구원(RIST) 수석연구원
接受日字 : 2002年 12月 11日
最終完了 : 2003年 8月 24日

에서의 손실을 각각 α_s, α_r 이라고 하면, reference arm과 sensing arm을 거쳐 나온 optical field는

$$\begin{aligned} E_r &= E_0 \sqrt{\alpha_r k_1 k_2} \cos(\omega_0 t + \phi_r), \\ E_s &= E_0 \sqrt{\alpha_s (1-k_1)(1-k_2)} \cos(\omega_0 t + \phi_s). \end{aligned} \quad (1)$$

간섭계를 통한 출력의 크기는 다음 I 와 같다.

$$I = \langle E_r^2 \rangle + \langle E_s^2 \rangle + 2\langle E_r E_s \rangle. \quad (2)$$

여기서, $\langle \rangle$ 표시는 $2\pi/\omega_0$ 보다 긴 주기 동안의 시간평균을 의미한다. 식 (1)을 식 (2)에 대입하면,

$$I = I_0 \left[\alpha_r k_1 k_2 + \alpha_s (1-k_1)(1-k_2) + 2\sqrt{\alpha_s \alpha_r k_1 k_2 (1-k_1)(1-k_2)} \cos(\phi_r - \phi_s) \right]. \quad (3)$$

여기서, I_0 는 식 (1)과 (2)를 통한 것으로 초기 전류치를 나타낸다. 만약, 간섭계의 complementary 출력을 고려하면,

$$I' = I_0 \left[\alpha_r k_1 (1-k_2) + \alpha_s (1-k_1) k_2 + 2\sqrt{\alpha_s \alpha_r k_1 k_2 (1-k_1)(1-k_2)} \cos(\phi_s - \phi_r) \right]. \quad (4)$$

여기서, $\alpha_s = \alpha_r = \alpha, k_1 = k_2 = 0.5$ 라고 가정하고, $\Delta\phi = (\phi_r - \phi_s)$ 로 두면,

$$I = \frac{I_0 \alpha}{2} (1 + \cos \Delta\phi), \quad (5)$$

$$I' = \frac{I_0 \alpha}{2} (1 - \cos \Delta\phi).$$

간섭계의 미분 위상변화가 크기 ϕ_s 인 시그널 항 $d\phi$, 주파수 ω , 느리게 변화하는 위상변화 ϕ_d 로 구성되어 있다고 가정하자. 간단화 하기 위해 식 (5)와 등가인 간섭계 출력을 이용하면,

$$I = \frac{I_0 \alpha}{2} [1 + \cos(\phi_d + \phi_s \sin \omega t)], \quad (6)$$

$$I' = \frac{I_0 \alpha}{2} [1 - \cos(\phi_d + \phi_s \sin \omega t)].$$

이러한 출력은 광검출기에 의해 전류로 변환된다. 광전류를 이산조합(differential combination)한 출력 i 는

$$i = \epsilon I_0 \alpha \cos(\phi_d + \phi_s \sin \omega t). \quad (7)$$

여기서, ϵ 은 광검출기의 응답도이다. 식 (7)을 Bessel 함수[15]를 이용해 전개하면,

$$\begin{aligned} i &= \epsilon I_0 \alpha \left[\cos \phi_d \left\{ J_0(\phi_s) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\phi_s) \cos 2n\omega t \right\} \right. \\ &\quad \left. + \sin \phi_d \left\{ 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\phi_s) \sin((2n+1)\omega t) \right\} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $J_n(\phi_s)$ 는 변수 ϕ_s 의 n 차 Bessel 함수이다. 이 단계에서 ϕ_s 에 따른 낮은 차수의 Bessel함수의 변화에 대해서 살펴보면 그림 2와 같다. 그림에서 알 수 있듯이, Bessel함수는 ϕ_s 에서 주기적이며, ϕ_s 가 증가함에 따라 전체적인 Bessel함수의 크기는 감소한다. 식 (8)에서 작은 변수(예를 들어, $\phi_s \ll 1$)에 대해보면, $J_0=1, J_1(\phi_s)=\phi_s/2$ 이고, 식 (8)의 시간에 따른 변화량에 대해서만 고려하면, 다음 식 (9)와 같다.

$$di \approx \epsilon I_0 \alpha \sin \phi_d \phi_s \sin \omega t. \quad (9)$$

식에서 보면, 서로 다른 두 경로를 지나는 레이저 빔의 위상차 $d\phi$ 의 크기는 $\sin \phi_d$ 의 값에 의존적임을 알 수 있다. 그러므로, 열적운동(thermal drift)에 의해 ϕ_d 가 변화함에 따라 다음과 같은 변화가 일어난다.

- 1) $\phi_d = n\pi$ (예를들어, $\sin \phi_d = 0$)일 때, 신호는 소멸된다.
- 2) 반면, $\phi_d = (2n+1)\pi/2$ (예를들어, $\sin \phi_d = \pm 1$)일 때, 신호는 최대화된다. (여기서, $n=0,1,2, \dots$)

이것이 일반적으로 말하는 간섭계형 센서에서의 "fading problem"이다.

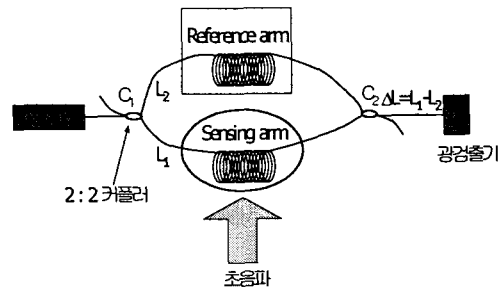


그림 1 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계.
Fig. 1 Mach-Zehnder interferometer with fiber.

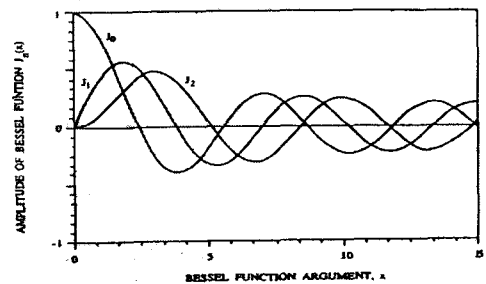


Figure 10.2. Amplitude of Bessel function $J_n(x)$, orders 0, 1, and 2.

그림 2 0, 1, 2차 Bessel 함수의 크기.
Fig. 2 Dimensions of 0, 1, 2 order Bessel function.

2.2 실험장치 및 방법

그림 3에 본 실험에서 구성한 장치들의 배치를 나타냈다. 광원은 파장이 632.8[nm]인 He-Ne 레이저를 이용하였다. 레이저에서 나온 빔을 싱글모드 광섬유로 커플링(coupling)하

기 위하여 커플러를 이용하였다. 커플러는 레이저빔을 집광시키는 렌즈 부분과 싱글모드 광섬유 그리고, 빔의 입사각을 조정할 수 있는 구조를 하고 있다. 이렇게 싱글모드 광섬유로 커플링 된 빔은 2:2 커플러(C₁)에서 두 개의 빔으로 분할된다. 여기서 2:2 커플러는 광분할기(beam splitter)와 동일한 역할을 한다. 분할된 두 빔중 하나는 절연유속에 위치한 감지영역(sensing arm)을 지나게 되고, 다른 한 빔은 편광조절기(polarization controller)를 거쳐 기준영역(reference arm)을 지난다. 감지영역을 지나서 광섬유를 절연유 내부에 그냥 두어도 센서로서의 동작이 가능하지만, 감도가 상당히 낮아지고, 구조적으로도 많은 문제점을 가지게 된다. 본 실험에서는 초음파에 의한 광섬유의 변화를 최대화하기 위하여 직경 10[cm]인 알루미늄 관에 감은 굴대(mandrel)형태로 구성하였다. 기준영역의 광섬유는 외부 영향을 최소화하기 위하여 전자기 차폐를 위해 알루미늄 호일로 싸고 접지한 통속에 배치하였다. 편광조절기는 앞에서 이야기한 "signal fading" 현상을 줄이기 위해 사용하였다.[16] 편광조절기는 위상지연효과를 가지고 있으며, 이러한 위상지연효과를 통해 감지영역을 지나서 빔과의 위상차가 $\pi/2$ 가 되도록 한다. 편광조절기에서 광섬유 코일의 직경은 1.06 인치 정도이며, 구조상으로는 앞뒤로 광섬유를 조정할 수 있는 구조이지만, 실제 중요한 요소는 광섬유 코일의 직경을 결정하는 것이다. 레이저 파장에 따른 위상 지연 특성을 그림 4에 나타냈다. 이렇게 서로 다른 경로를 지나온 빔은 다시 두 번째 2:2 커플러(C₂)에서 합쳐지게 된다. C₂에서 합쳐진 빔은 서로 간섭하며, 감지영역에서의 위상 변화가 간섭 정도를 변화시키고, 이를 광검출기를 통하여 측정하게 되는 것이다. 이는 앞에서 설명한 Mach-Zehnder 간섭계의 원리를 실제 구현한 것으로 감지영역 광섬유에 방전에 의해 발생한 초음파가 압력을 가하게 되어 미세한 길이 변화를 일으키게 되어 두 경로를 지나온 빔 사이에 위상차가 발생하게 되는 것이다. 광섬유는 코어 직경 4[μ m], 전체 직경 125[μ m], 길이 10[m]인 싱글모드 광섬유를 이용하였다.

먼저, 광섬유 센서의 동작 특성을 알아보기 위한 실험을 위해 감지영역의 광섬유와 5[cm]떨어진 곳에 초음파 발생장치를 위치시켰다. 초음파 발생장치에는 함수발생기를 통해 200[kHz]의 정현파를 PZT에 인가하여 초음파를 발생시켰다.

다음으로, 절연유 내에서의 방전을 모의하기 위해 침-평판 전극을 이용하였다. 침과 평판 전극은 모두 스테인리스 재질로 갭 간격은 1[mm]로 하였다. 절연유중에서 방전이 원활히 일어나도록 침단각이 작은 45°침전극이 이용되었다. 침 전극에는 상용주파수의 교류전압을 인가하였는데, 초당 1[kV]씩 전압을 증가하였으며, 일정전압이후 방전이 발생할 때 까지 전압을 유지하였다. 본 실험은 광섬유를 이용한 Mach-Zehnder 간섭계의 절연유 내에서 방전에 의해 발생하는 초음파의 측정을 위한 것으로 전극계와 감지영역과의 거리를 각각 7[cm]로 하여 실험을 실시하였다. 감지영역의 광섬유를 제외한 대부분의 광학기구는 실딩한 상자에 넣어서 전기적 노이즈 및 방전시 주변으로 방사되어지는 전자파의 영향을 최대한 적게 받도록 하였다. 방전전류를 측정하기 위해서 평판전극에 접속된 접지선에 직렬로 50[Ω]의 무유도 저항을 삽입하여 양단의 전압변화를 오실로스코프(LeCroy, 1GHz)로 측정하였다. 이를 통하여 방전이 시작되는 시점을 알

수 있으며, 광섬유 센서로 측정된 초음파 신호와 비교함으로써 시간지연특성을 연구하였다. 또한, 측정된 데이터를 wavelet 분석 및 FFT(Fast-Fourier Transform)한 결과를 검토하였다.

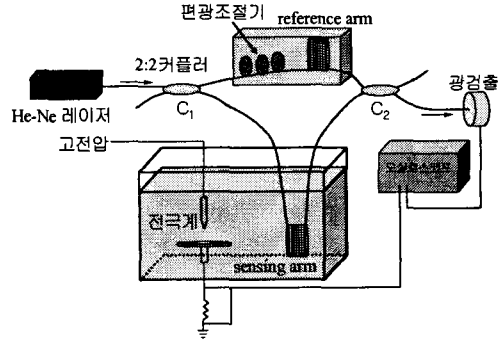


그림 3 실험장치도.
Fig. 3 Experimental setup.

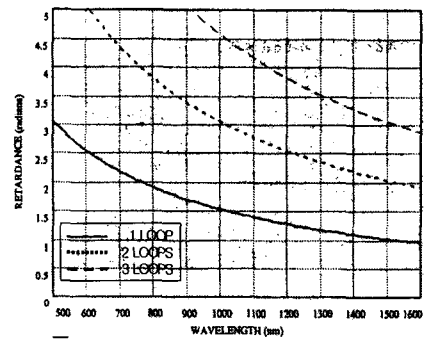


그림 4 파장에 따른 편광조절기에서의 위상지연특성.
Fig. 4 Phase-delay characteristics with wavelength in polarization controller.

2.3 실험결과 및 검토

그림 5에는 광섬유 센서의 초음파 측정 능력을 평가하기 위해 초음파 발생부와 감지 광섬유와의 거리를 5[cm]로 두고 실험한 결과를 나타냈다. 그림 5(a)에는 초음파 발생을 위해 PZT에 인가한 함수발생기의 신호(200[kHz] 사인파)를 보여준다. 그림 (b)는 광섬유 센서로 측정된 초음파의 파형이다. 광섬유 센서로 측정된 초음파의 경우 잡음을 포함하고 있지만, 그림 (a)와 동일한 형태의 주파수 파형을 나타내고 있다.

광섬유 센서로 측정된 데이터(그림 5(b))에 포함된 잡음 신호를 제거하기 위해 실시한 wavelet 변환의 결과를 그림 6에 나타냈다. 방전에 관계된 신호처리를 위해서 다양한 모함수(mother wavelet function)를 사용하고 있지만,^[10,11] 본 실험에서는 daubechies 3(db3)을 모함수로 하여 6단계에 걸쳐 실시하였다. 그림의 제일 상단에는 광섬유 센서에 의해 측정된 신호를 나타내고 있으며, 그 아래로 $d_1 \sim d_6, a_6$ 의 변환결과를 나타내고 있다. Wavelet 변환은 일종의 소프트웨어적인 필터라고 할 수 있는데, $d_1 \sim d_6$ 는 그 대역에서의 고

주파 잡음신호이며, a_6 는 고주파 잡음이 걸러진 신호성분이다. 광섬유 센서로 측정된 초음파 신호에 포함된 고주파 잡음 성분을 제거하면 a_6 에서 보는 바와 같이 깨끗한 사인파를 얻을 수 있다. 이상의 wavelet 변환과정을 통해, 잡음이 포함된 신호로부터 순수한 신호의 추출이 가능하며, 이러한 기법의 이용은 방전에 의한 신호분석에도 유용하다고 판단된다.

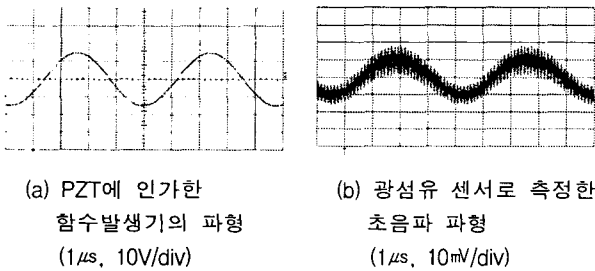


그림 5 초음파 발생기를 이용한 실험 결과.
Fig. 5 Results by ultrasonic-generator.

스로 보여진다. 또한, 펄스의 모양이 피크치 이후에 지수적으로 감소하는 모습을 보여주고 있어, 일반적인 방전에 의한 초음파와 다른 형태를 하고 있으며,^[17] 주파수 성분도 수 [MHz] 이상의 고주파 성분으로 구성되어 있음을 확인하였다. 이러한 결과를 통해 방전 개시와 동시에 그림 (b)에서 측정되어진 펄스는 잡음으로 판단된다. 그림 (b)를 보면 방전후 약 40[μ s]의 시간 지연을 보이고 있다. 이 결과는 일반적인 절연유 내에서의 초음파 속도와 거의 일치하는 결과이다.[18] 이러한 결과를 이용한다면, 2개 이상의 광섬유 센서를 이용하면 방전 위치 추정에 응용이 가능할 것이다.

그림 8은 광섬유 센서로 측정된 방전시 초음파 신호(그림 7(b))에 대한 FFT결과이다. 상당히 높은 주파수대역에 걸쳐 신호가 발생됨을 알 수 있으며, 그중 가장 데이터의 크기가 큰 ~3[MHz]대역 부분을 나타냈다. FFT의 결과를 보면 수십 [MHz]까지의 높은 주파수의 신호를 포함하고 있는데, 잡음의 영향이 상당히 큰 것으로 보여진다. 그림에서 가장 큰 변화를 보여주고 있는 수백 [kHz]대역 신호의 분석을 위하여 db10 모함수를 이용한 wavelet 변환을 실시하였다. 신호에 포함된 잡음이 높은 대역의 주파수 대역을 포함하고 있어서 13단계에 걸쳐 변환을 실시하였다. 고주파 잡음 성분을 포함하고 있는 d.의 결과는 제거하고 저주파 신호성분을 나타내는 a_{13} 의 결과에 대해서 나타냈다. 결과를 살펴보면, 고주파 잡음이 제거되고 크게 두 개의 펄스를 보여주고 있다. 첫 번째 펄스는 그림 7(a)에서 보는 바와 같이 방전에 의해 일정한 시간지연 후 발생한 초음파를 나타내는 것이고, 두 번째 펄스의 경우, 본 실험에서 사용한 절연유 유조가 협소하여 광섬유 센서의 주위 벽에서 반사된 초음파 신호로 판단된다. 그 이유는 앞의 결과에서 방전전류가 두 개의 펄스를 나타내고 있지만, 절연유 중에서의 초음파 시간지연 특성을 고려해 보면 방전전류 측정시의 두 번째 펄스는 그림 9에서 표시되어질 수 없기 때문이다.

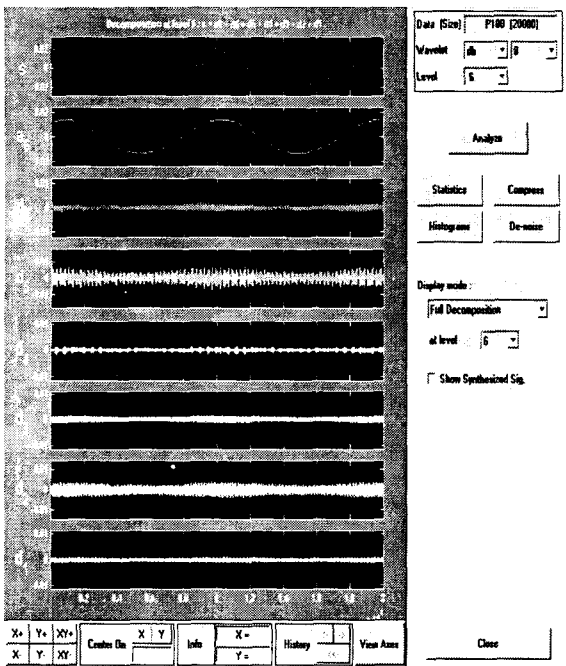
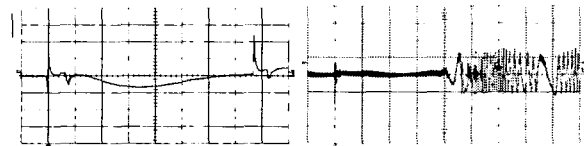


그림 6 웨이브렛 변환 결과.
Fig. 6 Wavelet transformed data.

그림 7은 인가전압을 8[kV]로 하여 이때 발생된 방전전류의 파형과 광섬유 센서로 측정된 초음파의 파형이다. 그림 7(a)는 방전시 평판전극에 접속된 접지선에 직렬로 연결한 50[Ω]의 무유도 저항 양단에서의 전압을 측정된 것으로 두 개의 방전펄스가 측정되었다. 그림 (b)를 살펴보면, 그림 (a)에서 방전이 개시된 시간에 발생된 펄스성 신호와 초음파 신호가 보여진다. 방전개시와 동시에 발생된 펄스는 레이저 출력을 제거한 상태로 방전을 일으켜도 동일한 결과를 보여주고 있는데, 이는 방전시 주변으로 방사되어지는 전자파 잡음에 의해 광검출기와 같은 전기/전자기에 유도된 잡음펄



(a) 8[kV]인가시의 방전전류 파형 (10 μ s, 5V/div)
(b) 광섬유 센서로 측정된 방전시 초음파 파형 (10 μ s, 50mV/div)

그림 7 방전전류 및 광섬유 센서로 측정된 초음파 파형.
Fig. 7 Discharge current & ultrasonic waveform.

그림 10에는 a_{13} 에서 얻어진 신호에 대해 FFT한 파형이다. 그림 8과 비교하여 보면, 그림 8의 경우는 방전시 주위로 전파되는 전자파에 의한 잡음을 많이 포함하고 있어 수 [MHz]에 걸쳐 높은 주파수 성분들을 많이 포함하고 있으며, 이로 인해 초음파 신호를 구분하기 어려운 것에 반해, 그림 10의 결과는 고주파 잡음이 제거된 깨끗한 파형을 보여주고 있다. 광섬유 센서로 측정된 절연유 내부에서 방전에 의한 초음파 신호는 350[kHz]대 까지 측정되어지고, 200[kHz] 부근에서 피크치를 나타냈다. Wavelet 변환과 FFT 결과 등의 연

구를 통해 광섬유 센서로 측정된 초음파 신호의 잡음제거는 물론 주파수 성분 파악이 가능함을 볼 수 있다. 이러한 결과는 차후 광섬유 센서를 이용한 변압기 진단에 좋은 자료가 될 것이다.

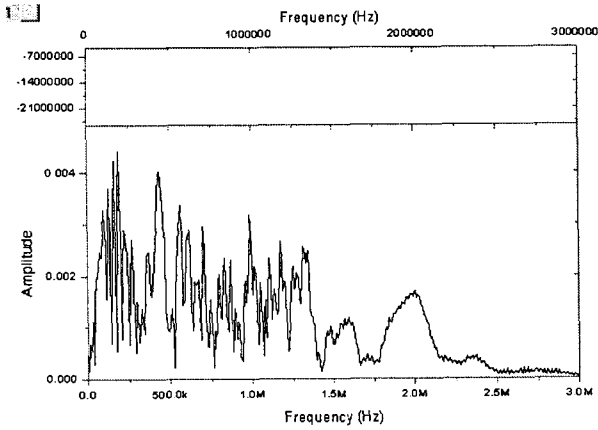


그림 8 광섬유 센서로 측정된 신호의 주파수 분석.
Fig. 8 Frequency-domain analysis detected by fiber-optic sensor.

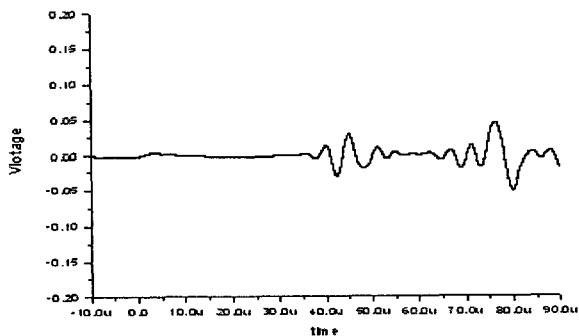


그림 9 초음파 신호의 웨이브렛 분석(db10, a₁₃)
Fig. 9 Wavelet transform of ultrasonic signal.

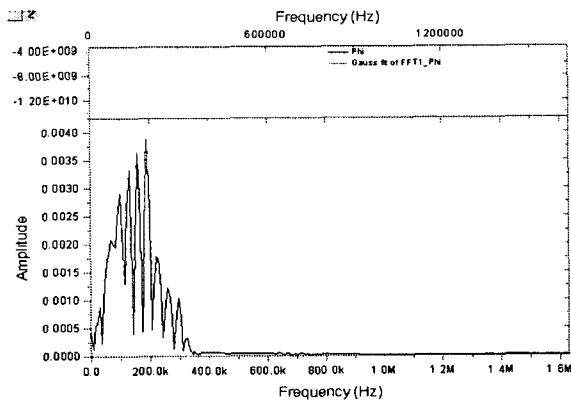


그림 10 a₁₃의 푸리에 변화 결과.
Fig. 10 Fourier-transform result to a₁₃.

3. 결 론

본 논문은 절연유 내부에서 발생하는 방전에 의해 절연유 내부로 전파되는 초음파를 측정 및 측정된 데이터를 분석할 목적으로 광섬유를 이용한 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하고, 동작원리 및 초음파 발생기를 이용한 초음파 검출 특성, 방전시의 초음파 검출 결과를 나타냈다. 측정된 데이터는 잡음제거를 위해 wavelet 변환을 실시하였으며, 주파수 특성을 확인하기 위하여 FFT 분석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- 1) 초음파 발생기에서 발생된 초음파를 광섬유 센서를 이용해 측정하였으며, wavelet 변환을 통해 측정된 신호에 포함된 잡음신호의 제거가 가능하다.
- 2) 방전에 의한 초음파 측정 실험에서 초음파 전파 속도와 일치하는 시간지연이 측정되었으며, 이러한 결과는 2개 이상의 광섬유 센서를 이용한 방전 위치 검출에 이용 가능하다.
- 3) 광섬유 센서로 측정된 초음파 신호는 수 십 [MHz]에 걸쳐 검출되었으며, 이는 방전시 주위로 전파되는 전자파에 의해 측정에 이용된 전자기기들이 영향을 받아서 발생한 잡음의 영향으로 판단된다.
- 4) 방전시 측정된 초음파 신호의 wavelet 분석결과 잡음이 제거된 신호 파형을 얻을 수 있었으며, 이를 통해 정확한 시간 지연 특성을 파악 할 수 있으므로 정밀한 방전 위치 추정이 가능할 것으로 판단된다.
- 5) Wavelet 변환에 의해 얻어진 데이터의 FFT 분석결과 350[kHz] 이내의 주파수 성분을 나타냈다. 그리고, 200[kHz] 부근 대역에서 피크치를 나타냈다. 그러므로, 200[kHz] 대역에 대한 분석을 실시하면 절연유 내부에서 발생하는 방전에 대한 분석이 가능할 것으로 판단된다.

향후, 지속적인 데이터 축적 및 광섬유 센서의 감도를 높이기 위한 연구 및 절연유 내의 다양한 방전조건을 고려한 실험을 실시하면 절연유 내부에서 발생하는 방전에 대한 정밀 분석이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] A. Zargari, T.R. Blackburn, "Acoustic Detection of Partial Discharge using Non-intrusive Optical Fibre Sensor", '98. Proceeding of the 1988 IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, pp. 573~576, 1998.
- [2] S.H. Lee, S.H. Sim, K.S. Lee, and D.I. Kim, "Fiber-Optic Sensor for Ultrasonic Measurement in Partial Discharge", Proceedings of ICEE 2001, pp.1460-1462, 2001.
- [3] A.M. Yurek, A.B. Tveten, and A. Dandridge, "High Performance Hydrophones in the Arctic Environment", OFS '90, Sydney Aust., Dec 1990.
- [4] Daniel Cortazar, Hilda A. Larrondo, Patricio, A.A. Laura, and Daniel R. Avalos, "A low-cost fiber-

optic system for monitoring the state of structural health of a mechanical cable”, Ocean Engng, Vol. 23, No. 2, pp. 193-199, 1996.

[5] A.D. Kersey, F. Bucholtz, and A. Dandridge, “SENSOR TECHNOLOGY:FIBER-OPTICS”, AIChE symposium series, Vol. 83, No. 258, pp. 58-67.

[6] D. A. Jackson, A. Dandridge, and S.K.Sheem “Measurements of Small Phase Shifts Using a Single Mode Optical Fiber Interferometer”, Opt. Lett. 5, 139, 1980.

[7] Christian Helming, Ralf Merte, and Katrin Temmen, “Optical Partial Discharge Sensor for On-Line-Monitoring of Oil Insulated Transformer”, OFS 2000, P-109, pp. 70-73, 2000.

[8] A. Zargari, and T.R. Blackburn, “Modified Optical Fibre Sensor for PD Detection in High-Voltage Power Equipment”, Conf. Record of 1996 IEEE ISEI, Vol. 1, pp. 424-427, 1996.

[9] I. Shim, J.J. Soraghan, and W.H. Siew, “Detection of PD Utilizing Digital Signal Processing Methods”, IEEE Electrical Insulation Magazine, pp. 6~13, 2001.

[10] X. Ma, C. Zhou, and I.J. Kemp, “Automated Wavelet Selection and Thresholding for PD Detection”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 18, No. 2, March/April 2002.

[11] E. Carminati, and M. Lazzaroni, “Analysis of PD Signal by Wavelet Transform”, IEEE, pp. 1081~1085, 2000.

[12] Yusheng Quan, Ning Gao, Guanjun Zhang, and Zhang Yan, “Wavelet transform applying in partial discharge measurement”, Conference record of the 1998 IEEE Interantional Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA, June 7-10, 1998.

[13] ERIC UDD, “Fiber Optic Sensors-An Introduction for Engineers and Scientists”, John Wiley & Sons, Inc. pp. 271-323, 1991.

[14] S. K. Sheem, and T. G. Giallorenzi, “Single Mode Optical Fiber Power Divider : Encapsulated Etching Technique”, Opt. Lett. 4, 29, 1979.

[15] M. Abramowitz, and I.A. Stegun, “Handbook of Mathematical Function”, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 1972.

[16] Christian Hentschel, “Fiber Optics Handbook”, HEWLETT PACKARD, pp. 163-166, March, 1989.

[17] J. Akbari, Y. Satio, T. Hanaoka, S. Higuchi, and S. Enomoto, “Effect of grinding parameters on acoustic emission signals while grinding ceramics”, Journal of Materials Processing Technology pp.403~407, 1996.

[18] Stefan Kocis and Zdenko Figura, “Ultrasonic Measurements and Technologies”, CHAMPMAN & HALL 1996.

저 자 소 개



이 상 훈 (李相勳)

1973년 1월 16일생. 1998년 영남대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2003년 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 053-815-7291, Fax : 053-813-8230
E-mail : miraecraft@yahoo.com



이 광 식 (李廣植)

1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(박사). 1998~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수, 현 한국 조명·전기설비학회 부회장. 영남대 공대 전자정보공학부 교수. 산업대학원 원장.

Tel : 053-810-2486, Fax : 053-813-8230
E-mail : kslee@yu.ac.kr



김 달 우 (金達羽)

1949년 9월 16일생. 1973년 서울대 물리학과 졸업. 1977년 동 대학원 졸업(석사). 1989년 Louisiana State University 졸업(박사). 현 포항산업과학연구원 센서계측연구팀 수석연구원. 포항공대 물리학과 겸직교수. 장춘이공대학 객좌교수.

Tel : 054-279-6707, Fax : 054-279-6988
E-mail : dalwoo@rist.re.kr



송 현 직 (宋炫直)

1968년 7월 30일생. 1991년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 구미1대학 컴퓨터응용전기전공 전임강사

Tel : 054) 440-1206,
Fax : 054) 440-1209

E-mail : hjsong@kumi.ac.kr