

광섬유 Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 부분방전 초음파 검출특성

(Detecting Characteristics of Ultrasonics Generated by Partial Discharge in Insulating Oil Using the Optical Fiber Mach-Zehnder Interferometer)

이상훈* · 심승환 · 이광식 · 김달우

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

요 약

본 논문에서는 유압변압기 진단을 목적으로 부분방전시 발생하는 여러 가지 물리적 화학적 현상중 초음파를 검출하기 위하여 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하였다. 구성된 광섬유 센서의 초음파 검출 평가 실험을 실시하고, 절연유 중에 배치한 침-평판전극에 교류 고전압을 인가하여 방전시 발생하는 초음파를 측정하고 푸리에 변환 및 wavelet 변환을 이용한 데이터 분석 결과를 나타냈다.

Abstract

It is well known that a partial-discharge(PD) in insulation oil is the source of various physical and chemical phenomena, such as heat, light, gas, chemical transformation, electric current, electromagnetic radiation and ultrasonics. 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. Ultrasonic-wave detection is a useful method for the diagnosis of the transformer-insulation condition. Conventionally, ultrasonic waves are detected by Piezo-electric transducer, but 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 : Mach-Zehnder interferometer, optical fiber, ultrasonics, wavelet, FFT, insulation oil

1. 서 론

전력시스템의 고전압화, 대용량화에 따라 전력기

기의 고 신뢰도 동작을 확보하기 위한 예방진단의 필요성이 증대되고 있다[1,2]. 전력기기는 대부분 부분방전을 경유하여 절연파괴 되므로 부분방전의 정밀한 측정을 통해 전력기기의 이상 및 절연열화 정도를 판단하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

전력용 변압기의 경우 절연유 내부에서 발생하는 부분방전에 의해 생성되는 가스나 화학적으로 변화

* 주저자 : 영남대학교 박사과정
Tel : 053-815-7291 Fax : 053-813-8230
E-mail : h2mlove@orgio.net
접수일자 : 2003년 2월 13일
1차심사 : 2003년 2월 19일
심사완료 : 2003년 3월 25일

된 물질 검출 등을 통해 변압기 상태를 파악하는 방법을 많이 이용하고 있다. 최근에는 온라인 진단을 위해 전자파나 초음파를 측정하는 방법이 많이 논의되고 있으며,[3-7] 그중 초음파의 측정은 여러 가지 장점으로 인해 많은 성과를 거두고 있다. 기존의 초음파 측정법은 주로 압전소자식 센서를 이용하는 것으로 신호가 미약하고 외부 잡음에 노출되어 있다는 단점을 가지고 있다.

근래 산업 전반에 걸쳐 고정밀도 측정을 위해 레이저 및 광섬유를 이용한 측정기법이 많이 이용되고 있다[8,9]. 광섬유를 이용한 센서는 저손실성, 소형, 경량, 넓은 대역폭, 무유도성, 강한 내부식성, 특히 높은 감도(sensitivity)등의 장점을 가지고 있기 때문에 센서로서 무한한 가능성을 가지고 있다. 그중 광섬유를 이용한 초음파의 측정은 군사적 목적으로 많이 이용되어왔으며, 점차 그 이용범위가 확대되고 있다[10].

본 논문에서는 유입변압기 절연진단을 목적으로 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하였다[11,12]. 초음파 측정 능력을 알아보기 위하여 초음파 발생장치로 발생시킨 초음파 신호를 광섬유 센서로 측정하였다. 절연유 중에 침-평판 전극을 배치하고 상용주파수 교류전압을 인가하여 방전을 모의하고 이때 절연유 내부로 전파되는 초음파를 측정하였다. 그리고, 푸리에 변환 및 wavelet 변환을 통해 측정된 데이터의 분석을 실시하였다[13-15].

2. 본 문

2.1 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계

Mach-Zehnder 간섭계는 Michelson 간섭계와 더불어 두 빔 간섭계의 대표적인 형태로 높은 감도를 가지는 센서 구성이 가능한 것으로 알려져 있다 [11,16]. 그림 1에는 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계의 개략도를 나타냈다. 일반적으로 두 개의 다른 경로를 통과함으로써 발생하는 위상차 Φ 에 의하여 발생하는 출력빔의 세기 I 는 다음과 같다[17,18].

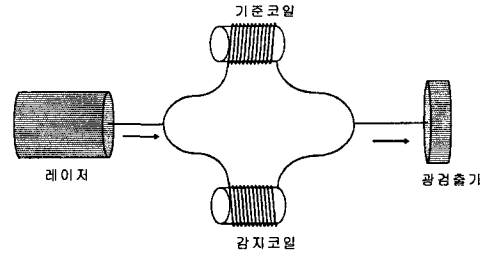


그림 1. 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계 개념도.
Fig. 1. Schematic diagram of fiber Mach-Zehnder interferometer.

$$I = A + B \cos \Phi. \tag{1}$$

여기서, A 는 빔의 평균 세기에 비례하고 B 는 두 개의 경로를 통하여 재결합된 빔의 세기, 편광상태 및 간섭정도에 의존한다. 총 위상변위 Φ 는 일반적으로 주파수 성분의 조합으로 식 (2)와 같다.

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

여기서, Φ_{ω} 는 레이저의 주파수 변조에 의해 나타나는 위상신호를 의미하며, $\Phi(t)$ 는 초음파 음압과 선형적인 관계를 가진다. 그러므로, 센서로 들어오는 신호로부터 $\Phi(t)$ 를 구별해 내면 초음파 신호의 검출이 가능하다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 전개하면 식 (3)과 같다.

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

J_k 는 k 차 베셀 함수(Bessel function)[19]를 나타낸다. 식 (3)을 ω 와 2ω 에 대해 풀면 다음과 같은 결과로 나타난다.

$$I_{\omega} = BG J_1(\Phi_{\omega}) \sin \Phi(t). \tag{4}$$

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

여기서, G 와 H 는 각각 ω 와 2ω 에 대한 혼합신호의 크기다. 신호검출을 위한 sine과 cosine항의 시간 도함수는 sine과 cosine항의 제곱항을 이용하기 위하여 각각 sine항과 cosine항을 교차해서 곱하여 정리하면 식 (6)과 같다[20].

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

그러므로, 식 (6)을 적분하면 초음파와 선형적 관계인 $\Phi(t)$ 를 얻을 수 있다.

2.2 실험장치 및 방법

절연유 내부에서 발생하는 부분방전에 의한 초음파를 측정하기 위한 실험 장치 구성을 그림 2에 나타냈다. 파장 632.8[nm]인 He-Ne 레이저를 광원으로 사용하였다. 각 광섬유간의 연결은 FC커넥터(FC connector)를 이용하여 커플링 손실이 최소화 되도록 하였다. He-Ne레이저에서 출발한 빔은 2:2 커플러(2:2 coupler)에서 크기가 같은 두 개의 빔으로 갈라지게 된다. 먼저, 그림 2에서 위쪽을 지나는 빔은 외부영향을 받지 않기 위해 차폐한 상자 속에 배치한 광섬유 코일을 지나 편광조절기(polarization controller)를 거쳐 두 번째 2:2 커플러에 도달한다. 다음으로 아래쪽을 지나는 광섬유는 절연유 내부에 배치한 직경 10[cm]의 알루미늄 관에 감았다. 절연유 부를 지나는 광섬유는 두 번째 2:2 커플러에서 기준 영역을 지나는 광섬유와 합쳐지게 된다.

기준영역과 감지영역 광섬유 센서는 둘 다 길이 10[m]인 싱글모드 광섬유를 이용하였다. 광섬유의 직경은 125[μ m]이며, 코어의 직경은 4[μ m]이다. 기준 광섬유 코일에 직렬로 연결된 편광조절기(polarization controller)는 위상지연효과를 가지는 것으로 기준영역의 광섬유와 감지영역의 광섬유를 지나는 레이저빔의 위상차가 $\pi/2$ 되게 하여 "signal fading" 현상을 줄이기 위해 이용하였다[16]. Signal fading 현상은 두 빔의 경로차가 $\pi/2$ 이외의 다른 값으로 되어 신호가 제대로 나오지 않는 현상이다. 편광조절기에서 광섬유 코일의 직경은 1.06 인치 정도이며, 구조상으로는 앞뒤로 광섬유를 조정할 수 있는 구조

이지만, 실제 중요한 요소는 광섬유 코일의 직경을 결정하는 것이다. 감지영역의 광섬유를 알루미늄 관에 감은 이유는 초음파 음압에 영향을 받는 면적을 늘여 측정감도를 높이기 위해 이용된 방법이다.

먼저 구성된 광섬유 센서의 초음파 측정 능력을 확인하는 실험을 실시하였다. 초음파를 발생시키기 위한 소스(source)로 함수발생기를 이용하고 함수발생기에서 나온 신호를 압전소자형 초음파 발생장치(정격 주파수: 200[kHz])에 인가하여 초음파를 발생시켰다. 초음파 발생장치와 광섬유 센서와의 거리는 5[cm]로 하였다.

다음으로 절연유 중에서 부분방전을 모의하기 위하여 갭간격 1[mm]인 침-평판 전극을 배치하였다. 침 단각도 45°인 알루미늄 재질의 침전극에 상용주파수 교류전압을 인가하였다. 전원장치는 최고 30[kV]까지 인가할 수 있으며, 초당 1[kV]씩 전압을 상승시켜 일정전압을 유지한 상태에서 실험을 실시하였다. 본 실험에서는 초음파 측정뿐만 아니라 절연유 내부에서의 초음파 전파 지연을 확인하기 위하여 전극계와 감지영역 광섬유 코일과의 거리를 14[cm]로 일정하게 유지하였다. 그리고, 방전전류 측정을 위하여 평판전극에 직렬로 50[Ω]의 무유도 저항을 접속하고 그 양단의 전압을 오실로스코프로(LeCroy사 LT372, 500[MHz], 4[Gs/s]) 측정하였다. 이를 통해 방전의 시작을 확인함은 물론 광검출기로 측정되어지는 초음파 신호와의 비교를 통해 초음파 시간지연을 확인할 수 있다.

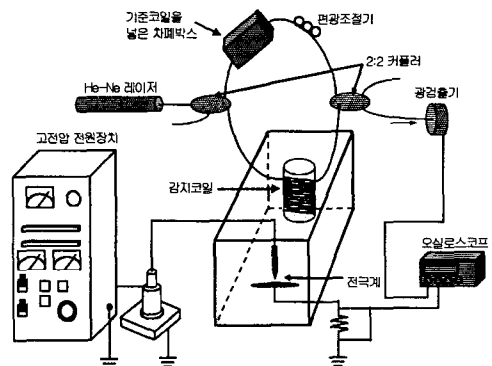
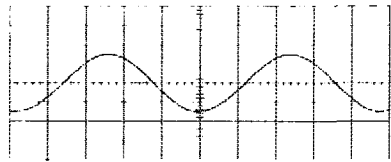


그림 2. 실험장치도.
Fig. 2. Experimental setup.

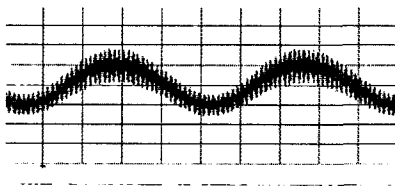
2.3 실험결과 및 검토

2.3.1 광섬유 센서의 초음파 검출 특성

그림 3에는 초음파 발생장치에 인가한 함수발생기의 신호와 광섬유 센서로 측정된 초음파 신호를 나타냈다. 그림 3의 (a)를 보면 200[kHz]의 정현파가 함수발생기에서 초음파 발생기로 인가되고 있음을 볼 수 있다. 그림 (b)는 초음파 발생기에서 5[cm] 떨어진 곳에 배치한 광섬유 센서로 측정한 초음파 신호를 나타냈다. 그림 (a)와 비교해 보면 많은 잡음을 포함하고 있는 것으로 보이지만, 전체적인 신호의 모양이 인가 신호와 동일한 양상을 보인다.



(a) 초음파 발생기 인가 신호
(1[μs], 10[V/div])



(b) 광섬유 센서로 측정된 초음파 신호(1[μs], 10[mV/div])

그림 3. 광섬유 센서의 초음파 검출 특성.
Fig. 3. Characteristics of a fiber-optic sensor in detecting ultrasonics.

측정된 신호에 대한 분석을 위해 그림 4에는 그림 3의 (b)신호를 푸리에 변환한 결과를 나타냈다. 그림 4는 푸리에 변환 결과 가장 큰 피크치를 나타낸 주파수 영역을 나타냈으며, 약 200[kHz]대역에서 피크치를 보여주고 있어 초음파를 발생시키기 위해 인가한 신호와 동일한 주파수를 나타내고 있다.

광섬유 센서로 측정된 데이터(그림 3(b))에 포함된 잡음신호를 제거하기 위해 실시한 wavelet 변환의 결과를 그림 5에 나타냈다. Wavelet 변환은 일종의 소프트웨어적인 필터로 기존의 푸리에 변환이 사

인함수를 기저함수로 하는 것에 반해 wavelet(잔물결)을 기저함수로 하여 측정 중 잃어버리는 신호의 분석에 많이 이용되고 있는 분석법이다. Wavelet 분석의 결과는 detail과 approximation으로 구성된다. detail은 고주파 성분의 잡음을 의미하며, approximation은 필터링된 신호이다. 방전에 관계된 신호 처리를 위해서 다양한 모함수(mother wavelet function)를 사용하고 있지만, 본 실험에서는 daubechies 3(db3)을 모함수로 하여 8단계에 걸쳐 실시하였다. 그림 5에는 approximation 8 (a_8)을 나타냈다. 측정된 초음파 신호에 포함된 고주파 잡음 성분을 제거하면 a_8 에서 보는 바와 같이 깨끗한 정현파를 얻을 수 있다. 이상의 wavelet 변환과정을 통해, 잡음이 포함된 신호로부터 순수한 신호의 추출이 가능하며, 이러한 기법의 이용은 부분방전에 의한 측정 신호분석에 유용하다고 판단된다.

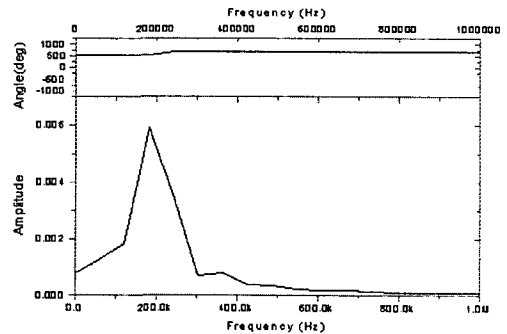


그림 4. 광섬유 센서 검출신호의 FFT.
Fig. 4. FFT of detected signal.

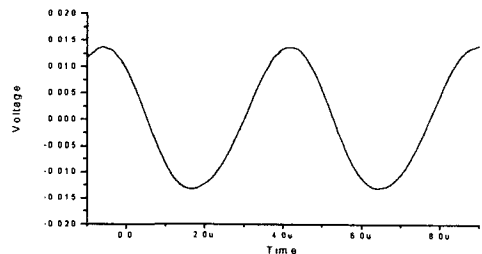
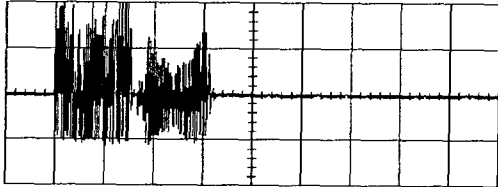


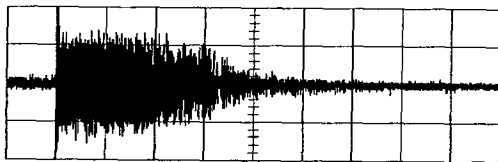
그림 5. 측정된 초음파신호의 wavelet 변환 (a_8) 결과.
Fig. 5. Wavelet transform of ultrasonic waves.

2.3.2 유종 방전시 광섬유 센서의 조음파 검출 특성

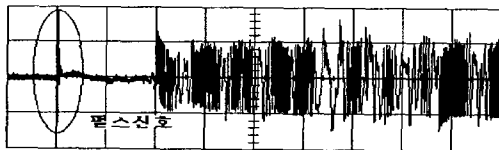
그림 6에는 절연유 중에 배치한 침-평판 전극에 10[kV]의 전압을 인가하고 방전시 측정되어진 방전 전류 (그림 6(a))와 초음파 신호 (그림 6(b))를 나타냈다. 다수의 방전전류 펄스가 보여지며, 초음파 신호가 측정되고 있음을 볼 수 있다.



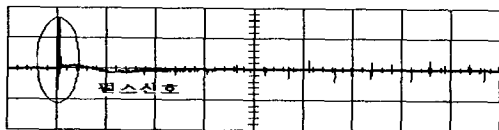
(a) 방전 전류 신호(5[V], 5[ms]/div)



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



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



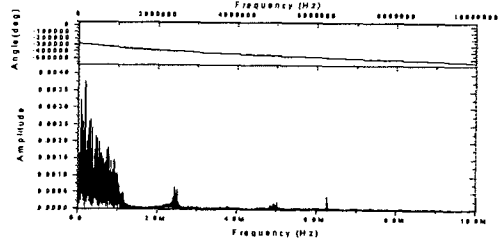
(d) 레이저 전원 off시 검출 신호 (50[mV], 50[μs]/div)

그림 6. 유종 방전시 전류 신호와 광섬유 센서로 검출한 초음파 신호
Fig. 6. Discharge current signal and its ultrasonic signals.

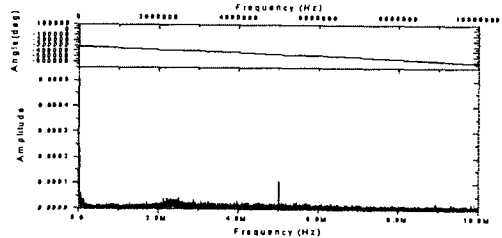
그림 6(c)는 절연유 내부에서 발생한 초음파의 시간지연 특성을 확인하기 위해 좀더 짧은 시간영역에서 측정된 초음파 신호를 나타냈다. 그림에서 타원으로 표시한 펄스 다음 약 100[μs]이후부터 초음파가 측정되어짐을 볼 수 있다. 타원으로 표시한 펄스의 원인을 알아보기 위해 레이저 전원을 끈 상태로

방전을 시켜 광검출기로 측정되어지는 신호를 그림 6(d)에 나타냈다. 그림 6의 (c)와 (d)를 동시에 살펴 보면 원으로 표시한 부분의 펄스신호가 방전에 의한 잡음이라는 것을 확인할 수 있다. 그리고, 방전에 의한 잡음 펄스와 약 100[μs] 시간지연 후 초음파가 측정되어지는데 실험조건에서 전극계와 센서와의 거리를 14[cm]로 하였으므로 일반적인 초음파의 속도와 잘 일치함을 볼 수 있다. 이러한 시간지연의 측정 은 두개 이상의 광섬유 센서 이용하여 방전이 발생하는 위치추정에 이용 가능함을 보여준다.

그림 7에 그림 6의 (c)와 (d)신호에 대한 푸리에 변환결과를 나타냈다. 그림 7(a)는 그림 6(c)신호의 푸리에 변환결과로 주파수 성분이 1[MHz]이하가 대부분이며, 2.3, 4.9, 6.2[MHz]부근에서 피크치를 가지고 있지만, 아주 작은 값이다. 그림 7(b)는 그림 6(d)신호의 푸리에 변환결과로 그림 7(a)와 동일하게 10[MHz]까지의 주파수 성분을 보이고 있지만, 전체적으로 작은 값들을 보이고 있다. 그림 7의 (a)와 (b)를 동시에 살펴보면, 2.3, 4.9[MHz]에서 동일한 피크치를 보이고 있다. 그러므로 이 주파수대역의 신호는 잡음으로 판명이 되며 절연유 중에서 발생한 부분방전에 의한 초음파 신호는 1[MHz]이하의 주파수 대역의 신호라는 것을 알 수 있다.



(a) 그림 6의 (c)신호에 대한 푸리에 변환 결과



(b) 그림 6의 (d)신호에 대한 푸리에 변환 결과

그림 7. 측정신호에 대한 푸리에 변환 분석.
Fig. 7. Fourier transform analysis of detected signal.

그림 8에 그림 6(c)신호에 대한 wavelet 변환 결과를 나타냈다. 모함수로 daubechies 3(db3)를 이용하여 5단계로 변환을 실시하였다.

그림에서 detail 1~detail 5 ($d_1 \sim d_5$)는 고주파 잡음 성분을 보여주는 것이며, a_5 는 원형신호에서 고주파 잡음 성분을 제거한 결과를 보여준다. 그리고, S 는 그림 6의 (c)신호 즉, 원형신호를 나타내는 것이다. Wavelet 변환은 원형신호에 포함된 각 주파수 성분을 고주파에서 저주파 순으로 갈라내는 역할을 할 수 있으며, d_1 은 신호가 가지고 있는 가장 높은 주파수 성분을 표시하며 $d_2 \sim d_5$ 는 앞에서 제거한 고주파 성분 외의 신호 중 높은 주파수 성분을 나타낸다. 그림을 살펴보면 의 경우 앞에서 이야기한 방전시작점에서 발생한 펄스신호만을 가지는데 이는 그림 6에서 설명한 바와 같이 방전시 주변으로 전파되는 잡음 신호라는 것을 보여주며, 아주 높은 주파수 성분이 포함되어 있음을 보여준다. 신호에 포함된 고주파 잡음 성분을 점차 제거하면 a_5 의 결과가 나오는데, 이 신호에 대한 푸리에 변환 결과를 그림 9에 나타냈다.

그림 9로부터, 광섬유 센서로 측정된 초음파 신호의 주파수 성분이 500[kHz]이내의 대역에 있음을 알 수 있으며, 100~200[kHz] 대역에서 높은 값을 가지고 있으며, 이 주파수 대역에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 그림 7의 (a)와 비교하면 1[MHz] 이내의 신호 중에도 상당히 많은 잡음 성분을 포함하고 있으며, wavelet 변환을 이용해 이러한 잡음 성분을 제거할 수 있다.

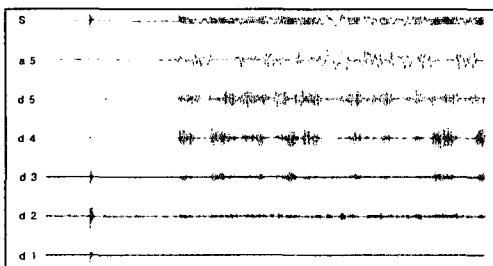


그림 8. 광섬유 센서로 측정된 초음파 신호의 wavelet 변환.
Fig. 8. Wavelet transform of ultrasonic signals detected by the fiber-optic sensor.

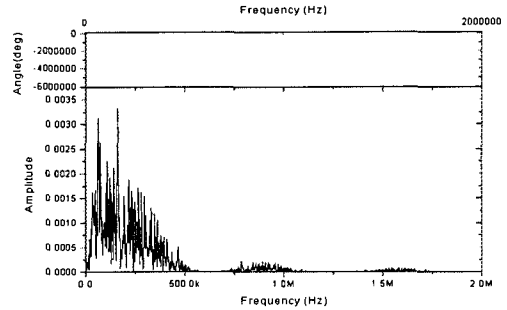


그림 9. Wavelet 변환 결과에 대한 푸리에 변환 결과.
Fig. 9. Fourier transform for the wavelet transformed signal.

3. 결 론

본 논문에서는 유입변압기 내부 방전시 발생하는 초음파를 측정할 목적으로 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하였다. 구성된 광섬유 센서의 초음파 측정능력 평가 및 절연유 중에 침-평판 전극에 고전압을 인가하여 방전시 발생한 초음파를 측정하였다. 그리고, 측정된 신호에 대한 푸리에 변환 및 wavelet 변환 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초음파 발생 장치로 발생시킨 초음파를 광섬유 센서로 측정이 가능하며, wavelet 변환에 의해 잡음이 제거된 신호 획득이 가능하다.
- 2) 절연유 내부에서 발생한 방전에 의한 초음파를 광섬유 센서로 측정하고, 시간지연특성을 확인했다. 이러한 특성을 이용하면 방전이 발생하는 위치 검출이 가능하다.
- 3) 고주파 잡음 성분이 포함된 초음파 신호에 대하여 푸리에 변환을 실시한 결과 1[MHz] 이내의 주파수 대역에서 초음파가 측정됨을 확인하였다.
- 4) 고주파 잡음 성분을 제거하기 위하여 측정된 초음파 신호를 wavelet 변환을 이용하여 분석한 결과 신호 중에 포함된 고주파 잡음 성분의 제거가 가능했으며, 500[kHz] 이내의 주파수 성분을 가지고 있음을 확인하였다. 이 대역에 대한 분석을 통해 절연유 내부 방전에 의한 초음파 분석이 가능하리라 판단된다.
- 5) 실제 변압기 내부에 위치시키기 위하여 맨드릴을 유전체 재질로 하여 센서를 구성하는 방법이 필요하며, 해저 탐사용 광섬유 초음파 센서

를 위한 유전체 재질의 맨드릴에 관한 여러 선
행연구가 이뤄지고 있다.

초음파를 이용하여 전력용 변압기를 진단하기 위
한 노력이 국내외적으로 이루어지고 있으며, 본 논
문의 결과를 변압기 조립단계에 적용한다면 좋은 결
과가 있을 것으로 생각되며, 광섬유 센서를 이용한
초음파 신호의 측정은 다른 센서에 비해 외부 잡음
영향이 적지만, 광검출기나 기타 전자장비의 잡음
영향을 줄이는 작업을 실시하면 깨끗한 초음파 신호
의 획득이 가능할 것으로 판단되며, 지속적인 데이
터 축적 및 퓨리에 변환, wavelet 변환을 이용한 데
이터 처리를 통해 유입변압기 절연진단에 유용하게
이용 가능할 것이라 판단된다.

References

[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] 이상우, 김인식, 이동인, 이광식, 이동희, "초음파를 이용한 에폭시 울드변압기의 열화진단", 한국조명·전기설비학회 논문지, 제 13권, 제 3호, pp. 73-81, 1999.

[4] 김충년, 지승욱, 이상훈, 이광식, "안테나를 이용한 VHF 대역에서 전기형태에 따른 방사전자파의 전파특성", 한국조명·전기설비학회 논문지, 제 16권, 제 4호, pp. 73-79, 2002.

[5] 김인식, 이상우, 이동인, 이광식, 김이국, "광대역 AE 센서에 의한 유중코로나의 초음파 특성", Trans, KIEE, Vol. 49C, No. 1, JAN, 2000.

[6] Bengtsson, C., "Status and Trends in Transformer Monitoring", JIEES, Vol. 3, No.2, pp.170-173, 1998.

[7] Konig, D., Narayana Rao, Y., "Partial discharge in Electrical Power Apparatus", VDE-Verlag, 1993.

[8] A.M. Yurek, A.B. Tveten, and A. Dandridge, "High Performance Hydrophones in the Arctic Environment", OFS '90, Sydney Aust., Dec 1990.

[9] 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.

[10] A.D. Kersey, F. Bucholtz, and A. Dandridge, "SENSOR TECHNOLOGY : FIBER-OPTICS", AICHE symposium series, Vol. 83, No. 258, pp. 58-67.1990.

[11] D.A. Jackson, A. Dandridge, and S.K.Sheem, "Measure

ments of Small Phase Shifts Using a Single Mode Optical Fiber Interferometer", Opt. Lett. 5, 139, 1980.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

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

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

[17] Alan D. Kersey and Anthony Dandridge, "Application of Fiber-Optic Sensors", IEEE, pp.472-478, 1990.

[18] A. B. Tveten, A. M. Yurek and A. Dandridge, "High Performance Fiber Optic Hydrophone," J. Underwater Acoustics 40, 295 , 1990.

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

[20] A.M.Yurek, A.B. Tveten and A. Dandridge, "Acoustic Noise Measurements in the Arcticutilizing all-Fiber Optic Hydrophone," IEEE, pp.1677-1680, 1991.

◇ 저자소개 ◇

이상훈 (李相勳)

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

심승환 (沈承煥)

1974년 8월 9일 생. 2001년 영남대 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 졸업(석사).

이광식 (李廣植)

1948년 10월 20일 생. 1971년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(박사), 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수, 현재 한국조명·전기설비학회 부회장. 영남대 공대 전자정보공학부 교수, 산업대학원 원장.

김달우 (金達羽)

1949년 9월 16일 생. 1973년 서울대 물리학과 졸업. 1977년 동 대학원 졸업(석사), 1989년 Louisiana State University 졸업(박사), 현재 RIST 센서계측연구팀 수석연구원, 포항공대 물리학과 겸직 교수, 장준이공대학 객좌교수.