

절연진단용 광섬유 센서의 초음파 검출특성

이상훈\*\*, 심승환\*\*, 이광식\*\*, 김달우\*  
\*포항산업과학연구원, \*\*영남대학교

Ultrasonic-detection characteristics of optical-fiber sensor for insulation diagnosis

S.H. Lee\*\*, S.H. Sim\*\*, K.S. Lee\*\*, D.W. Kim\*  
Research Institute of Industrial Science & Technology(RIST)\*, Yeungnam University\*\*

**Abstract** - It is well known that a discharge in oil is the source of various physical and chemical phenomena. One of them is ultra-sonic wave, and its detection is a useful method to the diagnosis of the transformer insulation condition. Conventionally, ultra-sonic waves are detected by Piezo-electric trans-ducer(PZT), 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 of the ultrasonic-detecting ability was performed for both of PZT and fiber-optic sensor. Discharge test arrangement is based on the needle-plane electrode system in oil and applied AC high voltage. Ultrasonic waves were detected and showed time-delay characteristics. We analyzed the data with frequency domain and wavelet transform.

1. 서 론

산업의 발전과 더불어 사회의 정보화가 가속됨에 따라 안정적이고, 신뢰성 높은 전력공급에 대한 수요가 급속히 증대되고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위한 각종의 기술이 개발되고 있으며, 특히 전력기기의 사고예방을 위한 각종 진단기술이 연구되고 있다.<sup>(1-2)</sup>

전력용 변압기의 대부분이 절연유 변압기로서 변압기 제작시의 손상, 경년열화 등에 의해 변압기 내부에서 부분방전이 발생하고, 최종적으로는 변압기 사고의 원인이 된다. 변압기 내부에서 발생하는 부분방전의 측정은 변압기의 수명 예측은 물론 사고 예방에 이용될 수 있다. 부분방전은 다양한 물리적, 화학적 현상을 수반하며, 이러한 변화량 측정을 통하여 부분방전발생 유무 및 진전에 대한 평가가 가능하다. 현재 절연유의 화학적 분석, 가스 분석과 같은 off-line 방법이 많이 이용되고 있으며, 최근에는 부분방전시 발생하는 초음파를 압전소자형 센서로 측정하고 있다. 이러한 방법은 on-line 측정이 매우 용이하지만 매질변화에 따른 초음파 신호의 왜곡이나 전자계적 교란에 의한 영향을 많이 받는 단점을 가지고 있다.<sup>(3)</sup>

광기술의 발전과 더불어 고정밀도 측정을 위한 레이저나 광섬유의 이용이 활발히 전개되고 있다. 광섬유를 이용한 센서의 구성은 높은 정밀도, 센서구성용 용이성, 소형, 경량 등과 같은 이점으로 인해 많은 분야에서 연구가 진행중이다. 광섬유를 이용한 초음파 측정의 경우 의료용, 군사용 등으로 1980년대 이후로 많이 진행되고 있지만, 전기분야에의 응용은 최근에 이르러서 관심이 집중되고 있다.<sup>(4-5)</sup>

본 논문에서는 광섬유를 이용해 절연유 내에서 발생하는 부분방전에 의한 초음파를 측정할 목적으로 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하였다. 센서의 동작 특성에 대해서 설명하고, 초음파 측정 능력을 평가하기 위해 PZT를 이용한 실험 결과를 보여주고, 절연유 내부에

위치시킨 침-평판 전극에 교류 전원을 인가하여 발생시킨 방전에 의해 절연유 내부로 전파되는 초음파를 측정 한 결과를 보여주고자 한다. 그리고, 측정된 데이터의 주파수 대역 분석 및 wavelet 변환 결과를 나타냈다.

2. 본 론

2.1 Mach-Zehnder 간섭계

Mach-Zehnder 간섭계는 Michelson 간섭계와 더불어 서로 다른 경로를 거쳐온 두 빔의 간섭현상을 이용하는 대표적인 간섭계로 그림 1에 개념도를 나타냈다. 레이저에서 발진된 빔은 커플러에서 크기가 동일한 두개의 빔으로 나뉘어지고, 하나의 빔은 측정하고자 하는 물리량이 있는 검출영역(sensing part)을 지나고 다른 한 빔은 레이저 위상의 기준이 되는 빔으로 참조영역(reference part)을 지나게 된다. 검출영역에서는 방전에 의해 발생한 초음파의 영향으로 미소 길이 변화를 일으킨 광섬유에 의해 참조영역을 지나는 빔과의 위상변화가 발생하게 되며, 이러한 두빔이 다시 커플러에서 합쳐지면서 간섭현상을 발생시킨다. 일반적인 간섭형 센서의 경우 10<sup>-13</sup>~10<sup>-15</sup>정도의 스트레인(strain)에 높은 감도를 가지는 센서로 구성이 가능하다고 알려져 있다.<sup>(6-7)</sup>

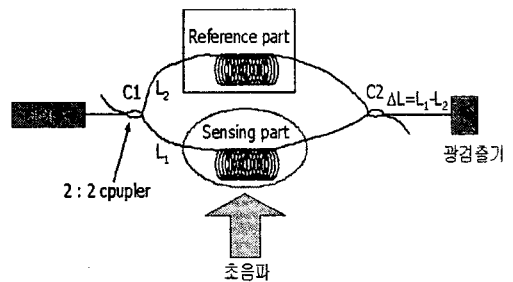


그림 1. Mach-Zehnder 간섭계 개념도.

이제 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계의 동작원리를 알아보자. Mach-Zehnder 간섭계에는 두 개의 커플러가 사용되는데, 레이저 빔이 들어오는 부분부터 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>라 하자. 만약, C<sub>1</sub>과 C<sub>2</sub>에서의 출력 커플링 계수(power coupling coefficient)를 k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>라 하고, 검출부와 참조부 광섬유에서의 손실을 각각 α<sub>s</sub>, α<sub>r</sub>이라고 하면, 검출부와 참조부를 거쳐 나온 optical field는

$$E_r = E_0 \sqrt{\alpha_r k_1 k_2} \cos(\omega_0 t + \phi_r),$$

$$E_s = E_0 \sqrt{\alpha_s (1 - k_1)(1 - k_2)} \cos(\omega_0 t + \phi_s). \tag{1}$$

간섭계를 통한 출력의 크기는 다음과 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 충분히 긴 주기동안의 시간평균을 의미한다.

여기서,  $\alpha_s = \alpha_r = \alpha$ 라고 가정하고, 식을 좀더 간단히 하기 위해  $k_1 = k_2 = 0.5$ . 간섭계의 위상지연이 크기  $\phi_s$ 인 시그널 항  $d\phi$ , 주파수  $\omega$ , 느리게 변화하는 위상 변화(phase shift)  $\phi_d$ 로 구성되어 있다고 가정하면,

$$I = \frac{I_0 \alpha}{2} [1 + \cos(\phi_d + \phi_s \sin \omega t)]. \quad (3)$$

이러한 빛의 출력은 광검출기에 의해 전류로 변환된다. 광전류를 이산조합(differential combination)한 출력은

$$i = \epsilon I_0 \alpha \cos(\phi_d + \phi_s \sin \omega t). \quad (4)$$

여기서,  $\epsilon$ 는 광검출기의 응답도이다. 식 (4)을 Bessel 함수<sup>[8]</sup>를 이용해 전개하면,

$$i = \epsilon I_0 \alpha \left[ \cos \phi_d \left\{ J_0(\phi_s) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\phi_s) \cos 2n\omega t \right\} + \sin \phi_d \left\{ 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\phi_s) \sin((2n+1)\omega t) \right\} \right]. \quad (5)$$

여기서,  $J_n(\phi_s)$ 는 변수  $\phi_s$ 의  $n$ 차 Bessel 함수이다.

식 (5)에서 작은 변수(예를 들어,  $\phi_s \ll 1$ )에 대해 생각해보면,  $J_0 = 1$ ,  $J_1(\phi_s) = \phi_s/2$ 이고, 식 (5)의 시간 변화량 부분에 대해서만 고려하면,

$$di \sim \epsilon I_0 \alpha \sin \phi_d \phi_s \sin \omega t. \quad (6)$$

식 (6)으로부터, 신호  $d\phi$ 의 크기는  $\sin \phi_d$ 의 값에 의존적임을 알 수 있다. 따라서, 열적유동(thermal drift)이 존재하는 하에서  $\phi_d$ 의 변화는 다음과 같은 결과를 일으킨다.

- 1)  $\phi_d = m\pi$  일 때, 신호는 사라진다.
- 2) 반면,  $\phi_d = (2m+1)\pi/2$  일 때, 신호는 최대화된다.

## 2.2 실험방법

그림 2에 본 실험의 장치도를 나타냈다. 광원으로는 파장이 632.8(nm)인 He-Ne 레이저를 이용하였다. 레이저에서 나온 빛을 싱글모드 광섬유로 커플링하였으며, 2:2 커플러를 이용하여 크기가 같은 두개의 빔으로 분리하였다. 여기서 2:2 coupler는 광분할기(beam splitter)와 같은 역할을 하는 것이다. 분리된 두 빔중 하나는 절연유속에 위치한 검출영역(sensing arm)을 지나게 되고, 다른 한 빔은 편광조절기(polarization controller)를 거쳐 참조영역을 지난다. 이렇게 서로 다른 경로를 지나온 빔은 다시 두 번째 2:2 coupler에서 합쳐지게 된다. 이는 앞에서 설명한 Mach-Zehnder 간섭계의 원리를 실험상에서 구현한 것으로 검지영역 광섬유에 방전에 의해 발생한 초음파가 압력을 가하게 되어 미세한 길이 변화가 발생하면 두 경로를 지나온 빔 사이에 위상차가 발생하게 되는 것이다. 광섬유는 코어 직경 4( $\mu$ m), 전체 직경 125( $\mu$ m), 길이 10(m)인 싱글모드 광섬유를 이용하였다. 광섬유 센서의 감도를 높이기 위해 광섬유를 맨드렐(mandrel)에 감는 방법을 이용하였다. 본 실험에서는 검지 영역의 광섬유를 직경 10

(cm)인 알루미늄 판에 감아놓은 형태로, 광섬유를 감을 때 적당한 인장력(tension)을 주어서 감는다. 참조영역을 지나온 빔의 경우, 먼저 편광조절기를 지나게 되는데, 이는 신호손실(signal fading) 문제를 해결하기 위해 사용하였다. 편광조절기는 세 개의 광섬유 코일을 만들게 되는데 각 광섬유 코일의 직경은 1.06(inch) 정도이다.

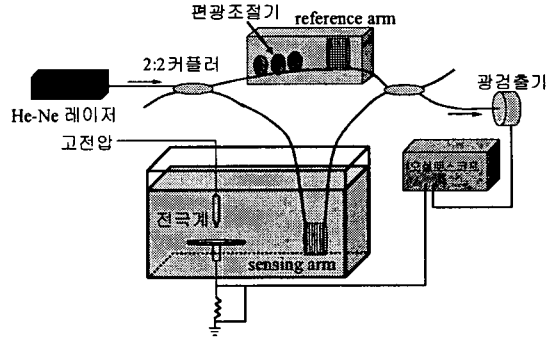


그림 2. 실험장치도.

먼저, 광섬유 센서의 초음파 측정 능력을 알아보기 위하여 PZT와 광섬유 센서를 절연유 내부에 위치시키고, 함수발생기에서 200(kHz)의 사인파를 발생시켜 이를 PZT에 인가하여 초음파를 발생시켰다. 그리고, PZT에서 발생한 초음파 신호를 광섬유 센서로 측정하였다.

다음으로 절연유 내에서 발생한 방전에 의한 초음파를 측정하기 위한 실험을 위해 침-평판 전극을 이용하였다. 침과 평판 전극은 모두 스테인레스 재질로 갭간격은 1 (mm)로 하였으며, 침단각도 45° 인 침전극을 이용하였다. 침전극에는 상용주파수 교류전압을 인가했다. 본 실험은 광섬유를 이용한 Mach-Zehnder 간섭계의 절연유 내에서 방전에 의해 발생하는 초음파의 측정 및 시간 지연특성을 알아보기 위한 것으로 전극계와 검출 광섬유와의 거리를 7(cm)로 일정하게 하여 실험을 실시하였다. 방전전류를 측정하기 위해서 평판전극에 접속된 접지선에 직렬로 50 ( $\Omega$ )의 위상도 저항을 삽입하여 오실로스코프로 측정하였다. 이를 통하여 방전이 시작되는 시점을 알 수 있으며, 광섬유 센서로 측정된 초음파 신호와 비교를 통해 시간지연특성을 알 수 있으며, 측정되어진 신호는 주파수대역 분석 및 wavelet 변환을 실시하였다.<sup>[9-10]</sup>

## 2.3 실험결과 및 고찰

광섬유 센서의 초음파 측정 능력을 확인하기 위해서 함수발생기에서 PZT에 인가한 200(kHz)의 정현파 신호에 의한 초음파 신호를 광섬유 센서를 이용해 측정된 결과를 그림 3에 나타냈다.

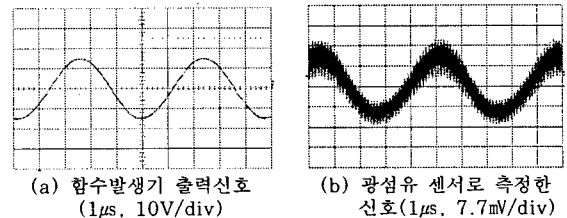


그림 3. PZT출력에 대한 광섬유 센서의 측정결과.

PZT와 광섬유 센서와의 거리를 5(cm)로 하였다. 그림 (a)에는 함수발생기에서 발생시킨 신호를 나타냈으며, 그림 (b)에는 광섬유 센서를 이용해 측정된 신호를 나타냈다. 그림 (a)와 비교하면 동일한 시간대역의 신호

를 검출하고 있음이 보여지며, 인가신호와 달리 잡음 성분을 많이 포함하고 있음을 보여준다. 이는 합수 발생기의 신호가 PZT에서 초음파로 변환될 때 포함한 잡음 및 주변 잡음의 영향으로 보여진다.

그림 4에는 그림 3의 (b)에 대하여 wavelet 변환을 실시한 결과를 나타냈다. 고주파 성분의 잡음을 제거한 결과 approximation 6에서 깨끗한 정현파 성분을 보여주고 있다.

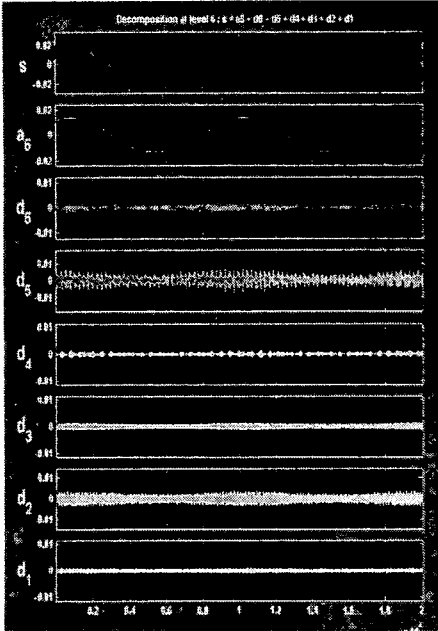


그림 4. 광섬유 센서 신호의 wavelet 변환.

절연유 중에서의 방전에 의한 초음파 측정을 위하여 칩-평판전극을 배치하고 교류전압(8[kV])을 인가하였다. 전극의 갭 간격을 1[mm]로 하고, 전극계와 광섬유 센서와의 거리를 7[cm]로 하였다.

먼저, 그림 5에는 실험장치 세팅후 레이저를 끈 상태에서 방전을 일으켜 오실로스코프로 측정된 잡음을 측정 한 결과를 나타냈다. 그림 5의 (a)는 평판전극과 접지 축 사이에 50[Ω]의 저항을 직렬로 연결하고 그 양단의 전압을 측정하는 방식으로 측정된 방전전류파형을 나타냈다. (b)에는 절연유중 방전시 광검출기를 통해 측정되어지는 잡음 신호를 나타냈다. 그림을 살펴보면 피크치 값을 나타낸후 지수적 감소를 하는 파형을 보여주고 있다.

그림 6에는 측정된 잡음 신호(그림 5의 (b))에 대한 주파수 분석결과를 나타냈다. 상당히 높은 주파수 대역에 걸쳐 신호가 발생되고 있음을 확인하였으며, 그중 특히 높은 값을 나타내는 대역에 대해서 표시하였다. 주파수 2.5, 9.7[MHz] 부근에서 피크치를 나타내고 있으며, 잡음 성분이 수~수십[MHz]오다 정도의 높은 주파수 성분을 가지고 있음을 잘 보여주고 있다.

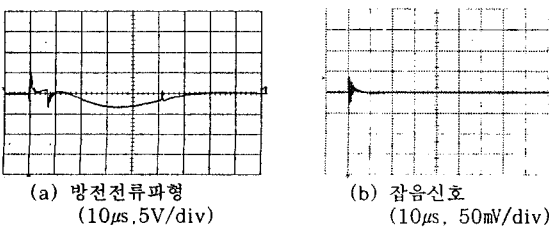


그림 5. 잡음 측정 결과.

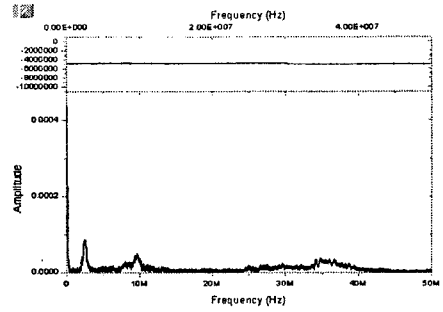


그림 6. 잡음 신호의 주파수 분석.

그림 7에는 그림 5와 동일한 조건에서 측정된 방전전류 파형과(a) 그때 광섬유 센서로 측정되어진 초음파 신호를(b) 나타냈다. 그림 (b)를 살펴보면 앞에서 기술한 잡음 성분 즉 방전시작과 동시에 발생하는 펄스가 검출되면 이어서 측정되어지는 초음파와의 시간차는 약 46[μs]정도 발생하는 것으로 나타났다. 본 실험에서는 전극계와 광섬유 센서와의 거리가 약 7[cm]정도이므로 측정되어진 초음파 신호의 속도는 약 1520(m/s)정도인데, 이는 일반적인 절연유 내부에서의 초음파 속도가 1400 [m/s]인것과<sup>(11)</sup> 비교하면 약간의 차이를 보이는 데, 이는 온도의 영향, 절연유의 오염으로 인한 불순물의 영향 등이 그 원인으로 보인다. 그러나 대략의 속도는 잘 맞는 것으로 보인다.

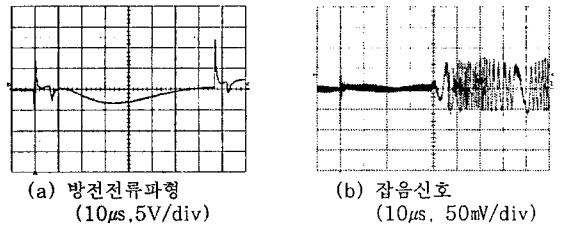


그림 7. 잡음 측정 결과.

그림 8에는 측정되어진 초음파 신호의 주파수 분석결과를 나타냈다. 그림 6에서와 마찬가지로 고주파 성분을 포함하고 있는데, 이는 앞에서 이야기한 잡음 성분이 같이 포함되어 있기 때문이라 판단되며, 주파수 분석결과 많은 변화를 보인 3[MHz]까지의 대역에 대해서 나타냈다. 그림을 보면 1.4[MHz]를 기준으로 앞과 뒷부분의 주파수 분석 결과 그래프가 서로 다른 형태를 보임을 알 수 있는데, 그림 6의 동일 주파수 대역(1.4~3.0[MHz])을 살펴보면 동일한 형태를 나타낸다. 즉 1.4[MHz]이후의 부분은 잡음으로 판단된다. 측정되어진 초음파의 주파수는 190, 430, 560, 620, 700, 980[MHz]대역에서 피크치를 나타내고 있음을 보였다. 본 결과를 통해보면 1.4 [MHz]이하의 주파수 대역에서 방전에 의한 초음파가 많이 발생하고 있으며, 피크치를 보인 주파수 대역에 대한 정밀한 분석이 이루어 진다면 절연유 내부에서의 초음파 측정에 대한 좋은 결과를 얻을수 있을 것이다.

그림 9에는 그림 7에 나타냈던 초음파 신호의 wavelet 변환한 결과를 나타냈다. 분석은 daubechies 8을 이용하여 10단계에 걸쳐 이뤄졌다. 신호중 고주파의 잡음이 단계별로 제거되어지고, detail level 10 (d10)과 approximation level 10(a10)은 그림 8에서 나타낸 주파수 성분과 동일한 대역에서의 신호의 파형을 보여주는 것이다. 그리고, level 10 단계의 그림을 살펴보면 d10의 경우 그림 7에서 나타냈던 초음파의 시간지연은 정확히 보여주고 있다. a10은 저주파 성분을 표현하는 것으로 그림 8의 초음파 주파수성분 분석중 1.4[MHz]이전의 부분을 나타내는 초음파 신호를 나타내

주고 있다. 이상의 결과를 보면 level 10의 고주파성분 (d10)과 저주파 성분(a10)을 통해서 방전에 의해 측정 되어진 초음파 신호의 분석이 가능하다고 판단된다.

### 3. 결 론

절연유 중에서 발생하는 방전에 의한 초음파를 측정할 목적으로 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하였다. PZT를 이용한 실험을 실시하고, 실제 절연유 내부에 위치시킨 침-평판 전극에 의한 방전시 초음파를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

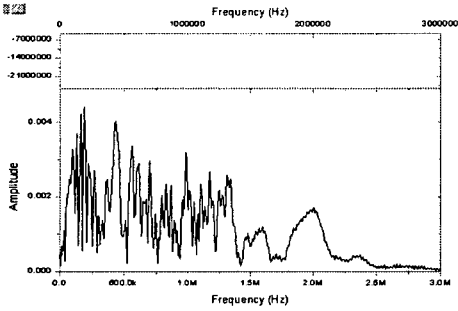


그림 8. 광섬유 센서로 측정된 초음파 신호의 주파수 분석결과.

- 1) PZT에 200[kHz]의 사인파를 인가해 초음파를 발생시키고, 광섬유 센서를 이용해 측정된 결과 광섬유 센서로 초음파 측정이 가능함을 확인했다.
- 2) 방전 환경 속에서 광섬유를 제외한 다른 일렉트로닉스는 전자계의 영향을 받으며, 그 주파수 대역은 상당히 넓은 범위에 걸쳐 영향을 주며, 특히 수~수십 [MHz]대역에서 큰 값을 가짐을 보았다.
- 3) 침-평판 전극에서 발생한 방전에 의한 초음파를 광섬유 센서를 이용해 측정된 결과, 약 1.4[MHz]대역까지 초음파가 발생함을 확인했으며, 측정된 초음파의 시간지연이 일반적인 초음파 속도와 일치함을 보였다.
- 4) Wavelet 분석을 통해 고주파 성분을 제거한 신호의 경우 방전에 의한 초음파의 파형을 잘 나타냈다.

광섬유를 이용한 초음파 측정은 측정 대역이 넓어 방전에 의한 초음파 측정에 좋은 결과를 가져 올수 있으며, 앞으로 잡음 문제에 대한 해결책 보강과 분석 그리고, 지속적인 데이터 축적을 실시한다면 절연유 변압기의 절연진단에 큰 도움이 될것으로 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 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.W. Kim, "Fiber-Optic Sensor for Ultrasonic Measurement in Partial Discharge", Proceedings of ICEE 2001, pp.1460-1462, 2001.
- [3] Bengtsson.C., "Status and Trends in Transformer", J.EEIS, Vol.3, No.2, pp170-173, 1992.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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] ERIC UDD, "Fiber Optic Sensors-An Introduction for Engineers and Scientists", John Wiley & Sons, Inc. pp. 271-323, 1991.
- [8] M.Abramowitz, "Handbook of Mathematical Function", National Bureau of Standards, Washington, D.C., 1972.
- [9] Michel Misiti, Georges Oppenheim, Jean-Michel Poggi and Yves Misiti, "Wavelet Toolbox", the Math Work. Inc. March, 1996.
- [10] Jaideva C. Goswami, Andrew K.Chan, Fundamentals of wavelets, JOHN WILEY & SONS, INC. 1999.
- [11] Zlenko Figure, "Ultrasonic Measurements and Technologies", Chapman &Hall, 1996.

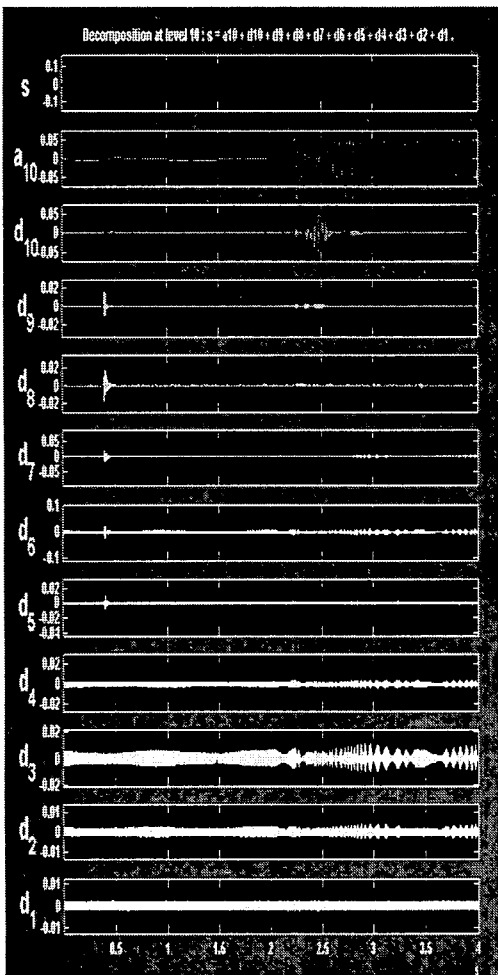


그림 9. 측정된 초음파 신호의 wavelet 변환.