

변압기 내부 방전에 의한 초음파 감지용 광섬유 센서 특성과 측정데이터의 wavelet 분석

이상훈^{†*}, 지승욱[†], 김춘년[†], 이광식[†], 이준하[■], 김금영[◆], 도대호[◆], 김달우[†]
 영남대학교[†], 호서대학교[■], 포항 1대학[◆], 포항포항산업과학연구원[†]

Characteristics of fiber-optic sensor to detect ultrasonic by discharge in transformer and signal analysis with wavelet transform

S.H. Lee^{†*}, S.W. Ji[†], C.N. Kim[†], K.S. Lee[†], C.H. Lee[■], K.Y. Kim[◆], D.H. Do[◆], D.W. Kim[†]
 Yeungnam University[†], Hoseo University[■], Pohang College[◆], RIST[†]

Abstract - This paper introduced the characteristics of fiber-optic Mach-Zehnder interferometer to detect ultrasonic waves by discharges in oil. Noise-reduction method with wavelet and frequency-domain analysis was performed.

1. 서 론

사회발전에 따라 안정적인 전력공급에 대한 요구는 날로 증대되고 있으며, 이러한 요구에 부응하기 위한 전력기기 진단 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1,2]

광기술의 발전으로 높은 정밀도의 물리량 측정이 가능해지고 있으며, 이러한 기술을 전력용 기기 진단에 응용하고자 하는 노력이 진행 중이다.^[3]

본 논문에서는 변압기 내부 방전시 발생하는 초음파를 측정할 목적으로 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하고^[4,5], 구성된 간섭계의 초음파 측정 특성 및 측정신호의 wavelet 변환을 실시하였다. 그리고, 절연유 중에 침-평판 전극을 배치하고 전압인가에 따라 측정되어진 초음파 신호의 주파수 대역에 대한 분석을 실시하였다.

2. Mach-Zehnder 간섭계

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.^[12,13]

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

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.

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

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.

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

J_k 는 k 차 베셀 함수(Bessel function)^[6]를 나타낸다. 식 (3)을 ω 와 2ω 에 대해 풀면 다음과 같은 결과로 나타난다.

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

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

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.^[7]

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

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

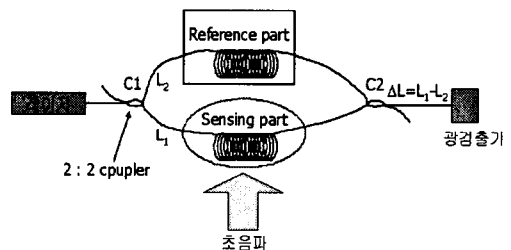


그림 1. 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계 개략도.

3. 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-Ne 레이저에서 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 편광조정기(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 지나온 광섬유와 합쳐지게 된다.

기준영역과 감지영역 광섬유 센서는 둘 다 길이 10[m]인 싱글모드 광섬유를 이용하였다. 광섬유의 직경은 125[μm]이며, 코어의 직경은 4[μm]이다. 기준 광섬유 코일에 직렬로 연결된 편광조정기(polarization controller)는 위상지연효과를 가지는 것으로 기준영역의 광섬유와 감지영역의 광섬유를 지

나는 레이저빔의 위상차가 $\pi/2$ 되게 하여 "signal fading" 현상을 줄이기 위해 이용하였다.⁽⁸⁾ 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 구조이지만, 실제 중요한 요소는 광섬유 코일의 직경을 결정하는 것이다. 감지영역의 광섬유를 알루미늄 판에 감은 이유는 초음파 음압에 영향을 받는 면적을 늘여 측정감도를 높이기 위해 이용된 방법이다.

전극계는 침-침 전극으로 갭간격 0.65(mm), 두 전극사이의 각도를 76도로 하여 배치하였다. 침전극은 침단각도 30도인 알루미늄 재질의 전극을 사용하였다. 전극계와 광섬유 센서와의 거리를 4(cm)로 일정하고 교류전압을 인가하여 방전시 발생하는 초음파를 측정하였다. 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 확인하는 물론 광검출기로 측정되어지는 초음파 신호와의 비교를 통해 초음파 시간지연을 확인할 수 있다.

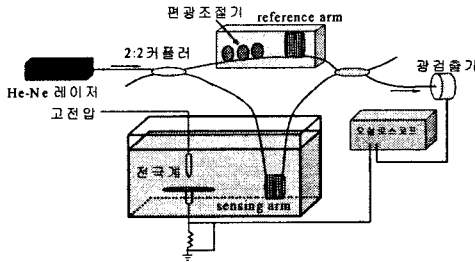


그림 2. 실험장치도.

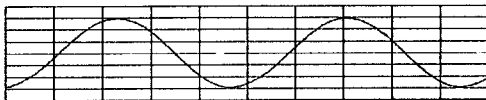
4. 실험결과 및 검토

4.1 초음파 검출특성

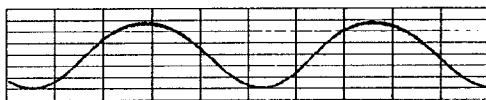
구성된 광섬유 센서의 초음파 측정 특성을 알아보기 위하여 초음파 발생기에 200(kHz)의 사인파를 인가하고 이때 측정된 초음파 신호를 그림 3에 나타냈다. 그림을 통해 보면 합수발생기에서 인가된 신호와 동일한 모양의 초음파가 측정됨을 알 수 있다.

측정된 사인파에 포함된 노이즈 성분을 제거하기 위해 wavelet 변환한 결과를 그림 4에 나타냈다. 그러므로, wavelet 변환을 이용한 신호의 처리가 신호에 포함된 노이즈 성분 제거에 유용하며, 이런 특성에 관한 연구가 앞으로 필요함을 알 수 있다.

그림 5에는 초음파 발생원에서 광섬유 센서까지의 거리를 다르게 하여 측정된 초음파 신호의 크기를 나타낸 것이다. 초음파는 절연유 내부에서 거리에 따라 지수적 감쇄 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.



(a) 합수발생기 발생신호
(5(V), 1(μ s)/div)



(b) 광섬유센서 신호
(100(mV), 1(μ s)/div)

그림 3. 광섬유 센서의 초음파 검출특성.

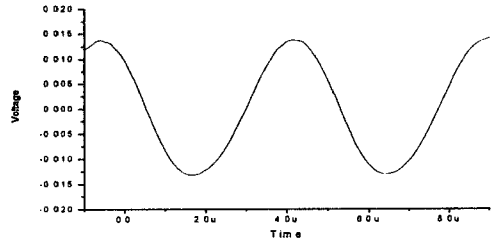


그림 4. 측정된 초음파 신호의 wavelet 분석.

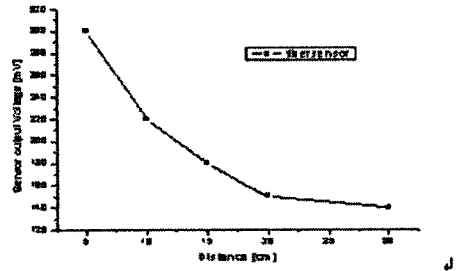


그림 5. 거리에 따른 광섬유 측정 신호의 감쇄특성.

그림 6에는 절연유 내부에 배치한 침-평판전극에 12(kV)의 전압을 인가하고 그때 측정된 초음파 신호와 방전전류 신호를 나타냈다. 방전전류는 PD detector(Plutec Electronics Co.)에 장착된 전류 측정장치를 이용하였다. 정. 부극성에서 방전전류가 보이며, 이때 측정된 초음파를 나타냈다. 측정된 초음파에 대한 정밀한 분석이 요구되어지며, 본 논문에서는 푸리에 변환을 이용하여 측정된 초음파 신호의 주파수 성분에 대한 분석을 실시하였다.

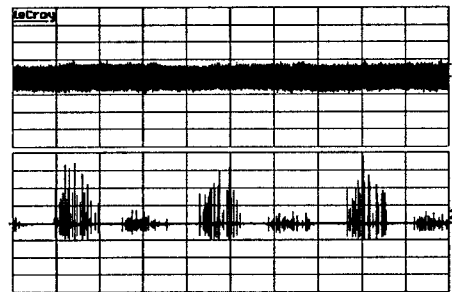
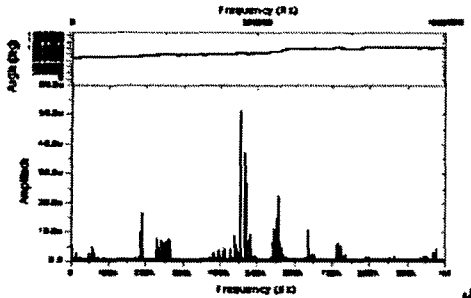


그림 6. 12(kV)전압 인가시 측정된 초음파 신호(상)와 방전전류 파형(하)(5ms/div).

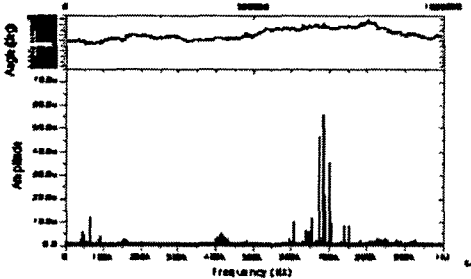
그림 7에는 침전극에 전압을 인가하고 이때 광섬유 센서로 측정된 초음파 신호의 주파수 성분을 알아보기 위해 푸리에 변환을 실시한 결과를 나타냈다. 그림 (a)에서 전원을 인가하지 않고 레이저만 켜진 상태에서 측정된 신호에서는 500(kHz)이하의 대역에서 높은 성분을 가지고 있음을 볼 수 있다. 이는 주변의 진동이나 기타 다양한 노이즈 성분에 의한 것으로 판단된다.

그림 (b)는 6(kV)의 전압을 인가한 후 측정된 신호의 푸리에 변환의 결과이다. 그림 (a)와 달리 670(kHz)정도에서 피크치를 가지고 있음을 볼 수 있다. 그러므로 전원을 인가하여 방전전류가 측정됨에 따라 측정되는 초음파 신호의 중심 주파수가 상승함을 알 수 있다. 그림 (c), (d), (e)에는 전압을 각각 8, 10, 12(kV)인가해

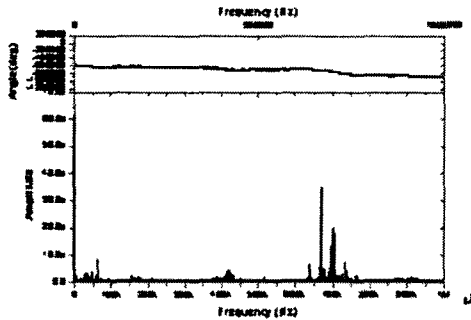
측정된 신호의 주파수 분석결과를 나타냈다. 그림을 통해 보면 그림 (b)와 마찬가지로의 대역에서 높은 값을 나타내고 있지만, 그림 (b)와 달리 높은 값을 나타내는 영역이 집단적으로 발생하고 있음을 볼 수 있다. 그러므로, 이러한 부분에 대한 좀더 깊이 있는 데이터 처리가 요구되어진다.



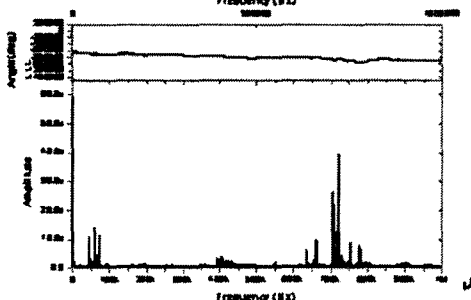
(a) 전압을 인가하지 않은 상태에서 측정되어진 초음파 신호의 푸리에 변환결과



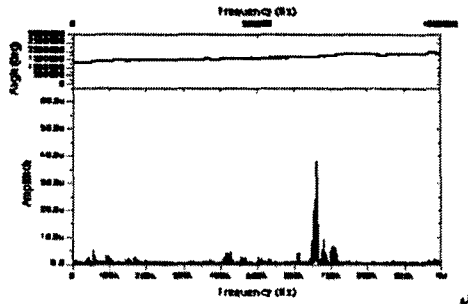
(b) 6(kHz)인가시 측정된 초음파 신호의 푸리에 변환 결과



(c) 8(kHz)인가시 측정된 초음파 신호의 푸리에 변환 결과



(d) 10(kHz)인가시 측정된 초음파 신호의 푸리에 변환 결과



(e) 12(kHz)인가시 측정된 초음파 신호의 푸리에 변환 결과
그림 7. 인가전압에 따라 측정된 초음파 신호의 푸리에 변환.

4. 결 론

본 논문은 광섬유를 이용하여 변압기 내부에서 발생하는 방전에 의해 공간으로 전파되는 초음파를 측정할 목적으로 센서를 구성하고 초음파 측정 특성 및 인가전압에 따라 측정된 초음파 신호의 주파수 대역 분석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초음파 발생기를 이용한 실험에서 광섬유 센서를 이용한 초음파 측정이 가능함을 확인했으며 wavelet 변환을 통하여 노이즈 제거가 가능하였으며, 거리에 따른 절연유 내부에서의 초음파 감쇄특성도 살펴보았다.
- 2) 전압인가에 따라 측정된 초음파의 주파수 대역을 살펴본 결과 전압을 인가하지 않은 경우에는 500 [kHz]이하의 주파수 대역에서 피크치를 보이는 것에 비하여 전압을 인가한 경우 670[kHz]정도에서 피크치를 보였다. 그리고, 전압상승에 따라 피크치가 측정되는 대역이 넓어짐을 볼 수 있었다.

[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] 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] 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.
- [6] 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.
- [7] A.M.Yurek, A.B. Tveten and A. Dandridge, "Acoustic Noise Measurements in the Arcticutilizing all-Fiber Optic Hydrophone," IEEE, pp.1677-1680, 1991
- [8] E. Carminati, and M. Lazzaroni, "Analysis of PD Signal by Wavelet Transform", IEEE, pp. 1081~1085, 2000.