

수중에서 Sagnac 간섭계를 이용한 광섬유 센서의 지향성에 관한 연구

신대용, 권기태, 이종길*, 이준호
 호서대학교 전기공학과, 안동대학교 기계교육과*

A Study on Directivity of Optical Fiber Sensor Using the Sagnac Interferometer in Underwater

Dae-Yong Shin, Ki-Tae Kwon, Jongkil Lee*, June-Ho Lee
 Dept. of E.E., Hoseo Univ., Dept. of M.E., Andong National Univ.*

Abstract - Optical fiber sensor is a subject which has been attracted considerable attention in recent year. Especially, it is being developed for the detection and location of partial discharge in oil-filled transformers. In this paper, we propose and experimentally demonstrate directivity and sensitivity of a hollow cylindrical mandrel sensor. The sound source is a PZT actuator of hollow cylinder type. Several layers of the fiber laminated around the mandrel surface and experiments were performed on three axis modes. The experimental results can be applied to analyze e detected signals optimally.

1. 서 론

광섬유(fiber optic)를 이용한 센서기술은, 광대역성, 저손실성, 소형경량, 상호불감성, 무유도성, 방폭성, 높은 절연내력, 내부식성 등의 장점을 가지고 있기 때문에 전력 기기에서 열화로 인한 이상유무를 측정하는 진단기술의 한 분야로 광섬유 센서를 이용한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 특히 전력용 변압기의 열화 진단의 경우 변압기 내부의 부분방전(partial discharge) 신호를 간섭계형 광섬유 센서를 이용하여 검출할 수 있음을 실험적으로 검증된 연구가 발표된 바 있으며 그 결과 기존의 AE(acoustoelectric)센서와 비교 가능할 정도의 우수한 감지가능성을 보여주고 있다. 이러한 광섬유 센서시스템은, 부분방전시 발생하는 음압이 매질(절연유나 구조물 등)을 통해 광섬유센서의 광섬유부분에 전달되어 물리적인 변형을 발생시키고 이러한 변형은 광섬유 내부를 통과하고 있는 광의 위상변화를 일으켜 간섭계의 원리로 음압을 측정할 수 있는 구성을 가지고 있다.[1]-[5]

이러한 광섬유센서 시스템을 보다 실용화하기 위한 과제 하나로 광섬유센서의 지향성(directivity) 및 거리에 따른 감도(directional sensitivity)에 대한 연구의 필요성이 제기되고 있다. 본 논문에서는 음압 반응에 따른 중공 원통형 맨드릴(hollow cylindrical mandrel) 광섬유 센서에서 지향성에 관한 특성과 음원과 거리의 따른 감도에 대한 연구결과를 실험을 통하여 제시하였으며 이러한 결과는 전력용 변압기에서 광섬유 센서를 이용한 부분방전의 정확한 신호해석 및 위치의 효과적인 검출을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 이 론

광섬유가 어떤 음장(sound field) 내에서 음압(acoustic pressure)을 받을 때 광섬유는 세 방향으로 변형을 보이고 이에 따라 광 경로차가 발생한다. 광섬유를 등방성(isotropic) 탄성체라고 가정하면 음압에 의한 광섬유 자체의 변형은 후크의 법칙(Hooke's law)을 이용하여 구할 수 있다.

즉, 직교 세 방향 변형률 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E_f} \sigma_1 - \nu_f(\sigma_2 + \sigma_3) \tag{1}$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E_f} \sigma_2 - \nu_f(\sigma_1 + \sigma_3) \tag{2}$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E_f} \sigma_3 - \nu_f(\sigma_1 + \sigma_2) \tag{3}$$

여기서 E_f 는 광섬유의 영률(Young's modulus), ν_f 는 광섬유 포아손비(Poisson's ratio), σ_x 는 광섬유 응력이다. 또한 광섬유에 음파가 작용하면 광섬유에 변형이 생기고 이로 인해 광섬유 내를 전파하는 광은 위상 변형을 겪게 되는데, 광섬유길이 L에 따른 총 위상 변화량(total phase change) $\Delta\phi$ 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\Delta\phi = knL\epsilon_1 - \frac{1}{2} n^3 kL \times (\epsilon_1 p_{11} + \epsilon_2 p_{12} + \epsilon_3 p_{21}) \tag{4}$$

여기서 k 는 광파수(optical wave number), n 은 굴절률(refractive index), ϵ_x 는 광섬유의 변형률(strain), p_{xy} 는 Pockel 상수이다. 식(4)과 같이 광섬유의 위상 변화량 즉, 감도는 광섬유의 길이 및 변형률에 비례하여 증가하게 된다.[6]-[7]

3. 실험

3.1 맨드릴 제작 및 간섭계 구성

맨드릴 센서부는 그림 1과 같이 동일한 크기의 중공 원통형 아크릴 맨드릴을 설계 제작하였다.



그림 1 맨드릴 구조

아크릴 맨드릴의 동적 특성을 확인하기 위해서 고유 진동수를 해석한 결과는 표 1과 같다. 3개의 맨드릴에는 동작파장이 1550(nm)인 단일 모드 광섬유를 각각 22.9 46.1, 69.3(m) 층상으로 감아 3개의 센서부를 구성하였다. 맨드릴에 감긴 광섬유 단층 권수는 200회이다. 본 연구에서 사용된 단일모드 광섬유는 코어 직경 9.3(μm), 클래딩 직경 125(μm), 아크릴 수지 보호피막을 포함한 전체 직경 220(μm) ± 10의 구조를 가지고 있다.

표1 맨드릴의 고유 진동수

모드	고유 진동수
비틀림 모드	3.050 kHz
축 방향 모드	15.078 kHz
반경 모드	3.039 kHz

그림2는 본 실험에서 사용된 Sagnac 간섭계 구성도 이다. 광원으로는 최대 출력 2.5[mW] 파장 1550[nm]인 레이저 다이오드(Thorlabs-S3FC1550)를 사용하였다. 이 광원으로부터 0.4[mW]의 레이저광이 편광 조절기(polarization controller)를 거쳐 2×2 광섬유 결합기(photocoupler)에 입사된 후 양방향으로 분리되어 맨드릴 센싱부를 통과한 후 다시 광섬유 결합기에서 간섭을 일으키게 된다.

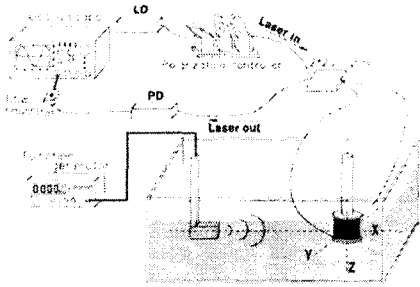


그림2 Sagnac 간섭계 구성도

광 위상변화에 의한 간섭현상은 포토 다이오드를 이용하여 정량적인 전기적 신호로 변환되는데 이때 검출된 신호에 포함된 잡음(noise)을 제거하기 위해서 차단주파수 50[kHz]인 저역통과필터(lowpass filter)를 이용하였으며 최종적으로 디지털 오실로스코프로 관측하였다. 수조의 크기는 길이, 폭, 높이가 각각 80, 38, 25 [cm]이고 투명 아크릴 수지로 제작하였으며 수돗물(tap water)로 채웠다. 수위는 20[cm]이며 상온에서 실험을 진행하였다.

3.2 간섭계 성능 실험

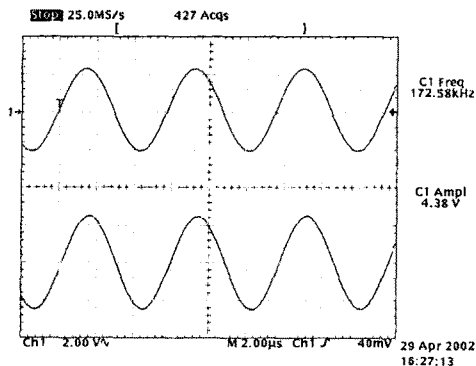


그림3 PZT에 인가한 정현신호와 Sagnac 광섬유 간섭계로 검출된 신호

그림 3은 본 연구에서 제작, 구성한 광섬유 센서 시스템

의 기본적인 측정성능을 확인하기 위하여 PZT 액츄에이터에 함수 발생기에서 만들어진 172[kHz]의 정현파를 인가하고 이를 Sagnac 간섭계의 광섬유 맨드릴 센서로 검출한 신호이다. 검출된 신호(Ch2)의 주파수가 PZT에 인가한 신호(Ch1)와 일치하고 있으므로 구성된 광섬유 맨드릴 센서가 정상적으로 작동하는 것을 확인할 수 있다.

3.3 맨드릴형 광섬유센서의 거리에 따른 감도 및 지향성실험

수중에서 PZT와 맨드릴형 광섬유 센서의 이격거리를 5-50[cm]로 변화시키며 층상에 따른 3개의 맨드릴 센서를 축방향인 X, Y, Z 일 때 감도 특성 실험을 하였다. 이때 PZT에는 주기500[ms], 펄스 폭500[μs], 크기5.82 [V]인 펄스파를 인가하였다. 그리고 반사파의 영향을 배제하기 위하여 맨드릴 센서의 감도 측정시 음파에 반하는 처음 파장을 측정 데이터로 이용하였다.

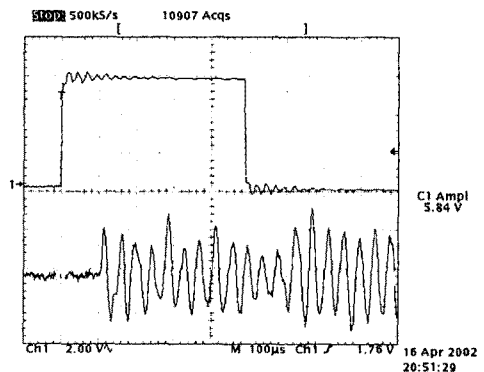


그림4 펄스파에 의한 맨드릴 센서의 응답신호

그림 4는 PZT음원과 3층으로 감긴 Z축 방향 맨드릴 센서사이의 이격거리를 15[cm]로 하였을 때, PZT에 인가된 펄스파(Ch1)와 맨드릴형 광섬유센서로 검출된 신호(Ch2)를 보여주고 있다. 이격거리 15[cm]일 때 펄스 신호로부터 맨드릴 센서가 반응하는 시간은 Y와Z축 방향에서는 평균 102[μs]의 시간 지연을 보였으며 X축 방향에서는 평균 120[μs]의 시간 지연을 나타내었다.

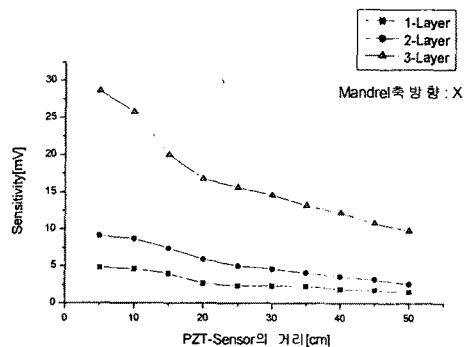


그림5 X축 방향의 맨드릴 센서 감도 특성

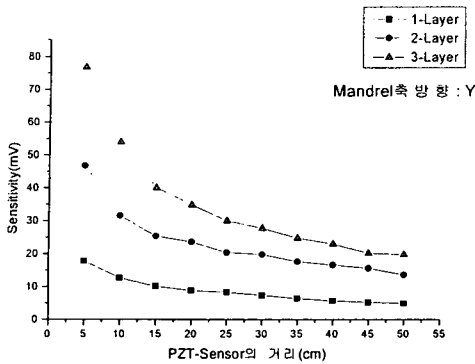


그림6 Y축 방향의 맨드릴 센서 감도 특성

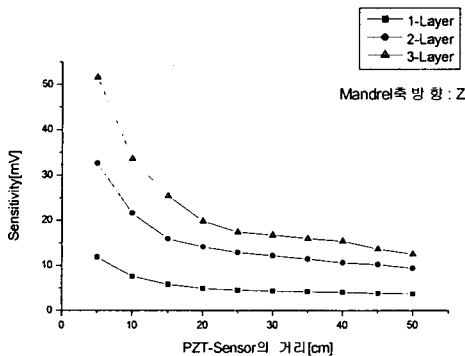


그림7 Z축 방향의 맨드릴 센서 감도 특성

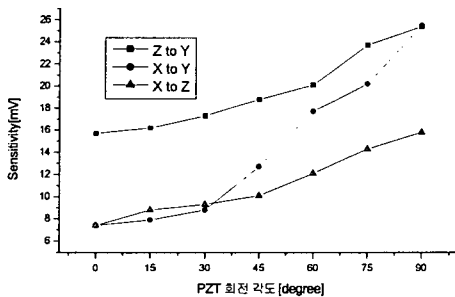


그림8 맨드릴 광섬유 센서의 지향성

그림5,6,7은 각각 거리와 X, Y, Z축 방향에 따른 맨드릴 센서의 감도 특성 곡선을 나타낸다.

한편 맨드릴 광섬유 센서의 지향성(directivity) 실험은 PZT와 맨드릴 센서와의 이격거리를 15(cm)로 일정하게 하고 PZT를 15° 간격으로 X-Y, X-Z, Z-Y 축 방향으로 회전시키며 실험을 진행하였다. Z-Y 축과 X-Z축 방향의 지향성 측정에는 PZT를 고정하고 센서를 회전시키며 실험하였다. 지향성 실험에서는 광섬유가 2층으로 감긴 맨드릴을 사용하였다. 그림 8은 맨드릴 광섬유 센서의 지향성 측정 결과를 나타낸다. 그림 5, 6, 7과 같이 X, Y, Z축 방향에 따른 맨드릴 센서의 감도 특성은 Y와Z축 방향일 때 우수하며 X축 방향에서 전체적인 감도가 낮은 것을 알 수 있다. 또한 광섬유가 단층으로 감긴 맨드릴 센서 보다 2층 3층으로 감긴 맨드릴

센서의 감도가 우수함을 확인할 수 있다. 회전각도에 따른 맨드릴 광섬유센서의 반응감도를 나타내는 지향성은 그림 8과 같다. 음원의 거리에 따른 맨드릴형 센서의 감도를 정량적으로 분석하기 위해 그림 5,6,7 결과데이터를 비선형 함수로 근사화시켜 보았다. 이때 측정데이터의 근사화 함수로는 지수함수 $y = ax^b$ 를 이용하였다. 또한 수치해석은 최소제곱법(least square curve fitting)을 이용하여 30회 반복(iteration)된 결과값을 취하였으며 오차의 정도는 χ^2 로 나타내었다. 표 2는 근사화의 결과로써 센서의 감도가 이격거리의 제곱근에 반비례하고 있음을 알 수 있다.

표2 커브 피팅 결과

축방향	Parameter	1 layer	2layer	3layer	chi ²
X	a	10.93	20.92	60.77	1.07
	b	-0.44	-0.44	-0.42	
Y	a	42.00	103.98	199.4	0.62
	b	-0.52	-0.50	-0.58	
Z	a	27.55	78.13	140.58	0.59
	b	-0.54	-0.55	-0.62	

4.결 론

본 논문에서는 맨드릴 광섬유 센서의 지향성 및 음원과 거리의 거리에 따른 감도의 관계를 실험을 통하여 측정하였다. 그 결과 음원과 거리의 거리에 따라서는 광섬유센서의 감도가 이격거리의 제곱근에 반비례함을 알 수 있었다. 그러나 또한 지향성에 관한 실험 결과를 분석하면 이러한 관계는 음원과 맨드릴의 축과의 각도에 따라 큰 변화가 발생할 수 있음을 발견하였다. 특히 음원의 방향이 맨드릴의 축과 일치할 경우는 거리에 따른 감도의 변화가 예측하기 어려운 비선형적인 특성을 나타내었다. 이러한 결과들은 추후 광섬유센서를 이용한 부분방전 위치 추정 연구를 수행하기 위한 기초적인 자료로 매우 유용하게 사용될 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1]Abbas Zsrgari, Trevor R.Blackburn, "Modified Optical Fiber Sensor for PD Detection in High Voltage Power Equipment", Conf. Record of the 1996 IEEE ISEI, pp.424-427.
- [2]ZhaoZhiqiang, Mark MacAlpine, M.Suleyman Demokan, "The Directionality of an Optical Fiber High-Frequency Acoustic Sensor for Partial Discharge Detection and Location", Journal of Lightwave Technology, Vol.18, No.6,2000, pp.795-806.
- [3]Peter Hauptmann, "Sensors Principles and Applications".
- [4]이종길, 이준호, 김상준, "광섬유 Sagnac 간섭계를 이용한 유증방전 신호검출", Trans. KIEE, Vol.49C, No.11, 2000, pp.622-626.
- [5]Hee-ro Kwak, Jae-Chul Kim, Sun-Ju Hwang, "Detection and Location of Partial Discharge in Transformers," Journal of KIEE, pp. 295-301, 1992.
- [6]이종길, 윤형규, 서인창, "끝단이 막힌 중공 원통형 광섬유 하이드로폰의 감도 해석" 한국소음진동학회지 제6권 제4호, pp.475-479, 1996.
- [7]이종길, 윤형규, 설재수, 남성현, "실험을 통한 간섭계형 광섬유 청음기의 음향신호 감지성능 연구", 한국소음진동학회지 제7권 제6호 pp.931-936,1997