수중에서 2개의 광섬유센서를 이용한 초음파 음원의 위치 검출에 관한 연구

권태호, 신대용, 이준호. 이종길*
호서대학교 전기공학과, 안동대학교 기계교육과*

A Study on Ultrasonic Location in Underwater Using the Two Optical Fiber Sensors

Tae-Ho Kwon, Dae-Yong Shin, June-Ho Lee, Jongkil Lee*
Hoseo Univ., Andong National Univ.*

Abstract

The preliminary results on the application of optical fiber sensor(OFS) for locations of ultrasonic signals in underwater are presented and analyzed . The OFS utilizing the principle of Sagnac interferometry was designed and the hollowed cylindrical mandrel wound by single mode optical fiber was used as sensing component. The ultrasonic signal source was simulated by the PZT actuator operated with function generator. It has been shown that the OFS could detect the signals less affected by ultrasonic path comparing to conventional acousto-electric sensor and accurate location of ultrasonic signal could be carried out using two OFSs.

Key Words : optical fiber sensor, sagnac interferometry, partial discharge

1. 서 론

광섬유 센서는, 광역성, 저손실성, 소형경량, 상호불간섭성, 무유도성, 방폭성, 높은 절연내력, 내부식성, EMI 영향 배제 등의 장점을 가지고 있기 때문에 전력기기 내부의 전계 왜곡없이 설치가 가능하다. 최근 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 검증한 연구가 발표된 바 있다.[1]-[5]

광섬유 센서 시스템을 보다 실용화하기 위해서는 광섬유센서의 거리에 따른 감도(directional sensitivity) 및 초음파 음원의 위치 검출에 대한 연구의 필요성이 제기되고 있다. 본 논문에서는 음압 반응에 따른 중공 원통형 맨드릴(hollow cylindrical mandrel) 광섬유 센서와 초음파 음원과의 거리에 따른 감도에 대한 연구를 하였다. 변압기 외함에 기존에 많이 사용되고 있는 AE(acousto-electric)센서를 부착하였을 때 음파 신호의 직접경로와 간접경로에 의한 간섭의 영향을 광섬유센서와 비교 분석하였다. 맨드릴 광섬유 센서를 이용해 초음파 음원의 위치 검출에 대한 연구결과를 실험을 통하여 제시하였으며 본 논문에서의 결과는 전력용 변압기에서 광섬유 센서를 이용한 부분방전의 효과적인 위치 검출을 위한 기초자료로 활용할 것이다.

2. 이 론

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.

$$\Delta\Phi = knL\varepsilon_1 - \frac{1}{2}n^3kL\times(\varepsilon_1 p_{11}+\varepsilon_2 p_{12}+\varepsilon_3 p_{21}) \quad (1)$$

여기서 k 는 광파수(optical wave number), n 은 굴절률(refractive index), ε_x 는 광섬유의 변형률(st-rain), p_{xy}는 Pockel 상수이다. 식(1)과 같이 광섬유의 위상 변화량 즉, 감도는 광섬유의 길이 및 변형률에 비례하여 증가하게 된다.[6]

초음파 음원의 위치 검출은 맨드릴 광섬유 센서에 음파가 도달한 시간을 측정하고, 그 시간에 따른 거리를 각각 계산하여 측정할 수 있다. 상온 20℃ 각 매질내의 음속은 표 1과 같다.

표 1. 매질에 따른 음파속도[7]

매질	속도 [m/s]
수돗물	1480
폴리카보네이트	2270
절연유(Oil)	1400

3. 실 험

3.1 맨드릴 광섬유 센서의 제작과 실험 구성

맨드릴 광섬유 센싱부는 동일한 크기의 중공 원통형 아크릴 맨드릴을 설계 제작하였다.[3] 맨드릴에는 동작파장이 1550[nm]의 단일 모드 광섬유를 2층으로 감아 사용을 하였고 맨드릴에 감긴 단층 권수는 200회이며 맨드릴에 감긴 광섬유의 길이는 46.1[m]이다. 그림 1는 본 실험에서 사용된 Sagnac 간섭계 구성도이다. 광원으로는 최대 출력 2.5[㎽] 파장 1550[㎚]인 레이저 다이오드(Thorlabs社 model S3FC1550)를 사용하였다. 이 광원으로부터 1[㎽] 의 레이저광이 1×2광섬유 결합기(photo coupler)에 입사된 후 양방향으로 분리되어 편광조절기(polarization controller)를 거쳐 2×2 광섬유 결합기에 입사된 후 양방향으로 분리되어 맨드릴 광섬유 센싱부를 통과하고 다시 광섬유 결합기에서 간섭을 일으킨 후 광 검출기(photo detector)를 거쳐 오실로스코프로 측정하였다. 초음파 신호 검출을 위한 AE 센서(DUCI社 model SE1000-H)는 수조의 외벽에 부착하였다. 이 AE 센서의 주파수 대역는 약 8[kHz] ~ 400[kHz]이다. 수조의 크기는 길이, 폭, 높이가 각각 80, 38, 25[㎝]이고 투명 폴리카보네이트(polycarbonate) 수지로 제작하였으며 실험의 편의상 절연유 대신 수돗물로 채웠다. 수위는 20[㎝]이며 상온에서 실험을 진행하였다

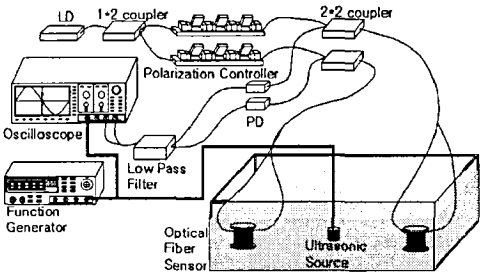


그림 1. 실험 구성도

3.2 맨드릴형 광섬유 센서와 AE 센서의 성능 비교

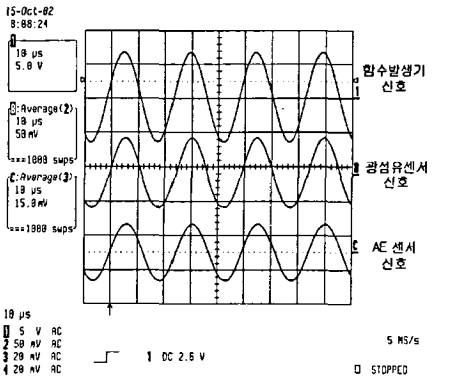


그림 2. PZT에 인가한 정현신호와 맨드릴 광섬유 센서 & AE 센서 검출파형

본 연구에서 제작, 구성한 맨드릴 광섬유 센서 시스템의 기본적인 측정성능을 확인하기 위하여 PZT 액츄에이터에 함수 발생기에서 만들어진 40 [㎑]의 정현파를 인가하고 이를 맨드릴형 광섬유 센서로 검출한 신호파형이 그림 2이다. 검출된 신

호(B, C)의 주파수가 PZT에 인가한 신호(Ch1)와 일치하고 있다. 따라서 구성된 맨드릴 광섬유 센서(B)와 AE 센서(C)가 모두 정현파 음원에 대해 적절히 반응하고 있음을 확인할 수 있다.

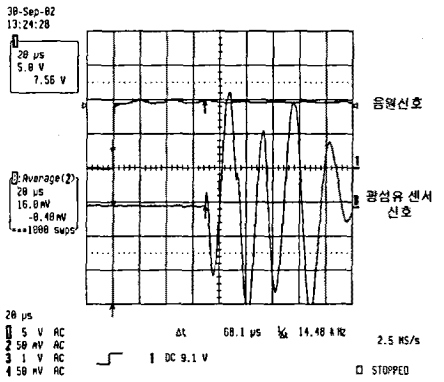


그림 3. 음원으로부터 발생한 펄스파가 광섬유 센서에 도달하는 시간

초음파 음원인 PZT에는 주기 100[ms], 펄스 폭 5[ms], 크기 10[V]인 펄스파를 인가하였다. 실험시 음원과 맨드릴 광섬유 센서의 이격거리는 10[cm]와 60[cm] 두 가지로 수중의 초음파 속도를 측정해 보았다. 초음파 음원과 광섬유 센서의 이격 거리가 60[cm] 일 때 초음파가 맨드릴 광섬유 센서에 도착하는 시간이 약 408.25[μs]이다. 이것을 속도 공식으로 계산하면 실험수조의 수중에서의 초음파의 속도는 약 1470[m/s]인 것을 알 수 있다. 이로부터 수중 초음파 전달속도의 실험치가 1470[m/s]로 계산되며 이는 이론치 1480[m/s]와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

표 2. 맨드릴 광섬유 센서에 의한 수중의 초음파 속도 측정

분류 / 거리	측정값[μs]	속도[m/s]
10[cm]	68.1	1468.43
60[cm]	408.25	1469.68

3.3 수중에서 맨드릴 광섬유 센서의 거리에 따른 감도

수중에서 PZT와 맨드릴형 광섬유 센서의 이격거리에 따른 감도 측정을 하였다. 맨드릴 광섬유 센서의 거리에 따른 감도 실험에서는 PZT와 맨드릴 센서와의 이격거리를 10[cm]씩 증가 시켜며 실험을 진행하였다. 거리에 따른 맨드릴형 광섬유센서의 감도은 그림 4과 같다. 음원의 거리에 따른 맨드릴형 센서의 감도를 정량적 분석을 위해 그림 4의 데이터를 지수함수 $y=ax^b$ 로 근사화시켜 보았다. 이때 수치해석은 최소제곱법(least square curve fitting)을 이용하여 30회 반복(literation)된 결과값을 취하였으며 오차의 정도는 χ^2로 나타내었다. 표 3은 근사화의 결과로 센서의 감도가 이격거리의 0.76승에 반비례하고 있음을 알 수 있다.

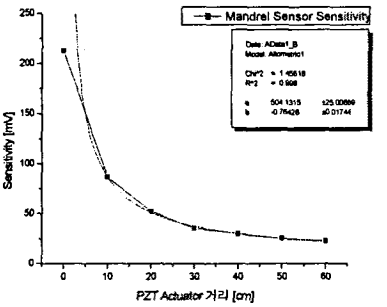


그림 4. 거리에 따른 맨드릴 센서 감도

표 3. 그림 4에 나타난 측정data의 커브 피팅 결과

a	b	χ^2
504.1315	-0.76428	1.45618

3.4 초음파 신호의 전달경로와 센서신호의 관계

수조의 수중에서의 초음파의 속도는 1470 [m/s]이고 수조의 재질인 폴리카보네이트 매질에서의 초음파의 속도는 2270[m/s]이다. 수조의 물보다 폴리카보네이트 매질의 초음파 속도가 약 1.5배정도의 차이가 난다. 그로 인해 초음파 신호가 직접경로로 AE 센서에 도달하는 시간보다 간접경로로 해서 AE 센서에 도달하는 시간이 짧을 경우가 발생한다. 이것를 MATLAB으로 프로그램하여 시뮬레이션을 한 값과 실제 측정한 값을 비교 분석하였다.

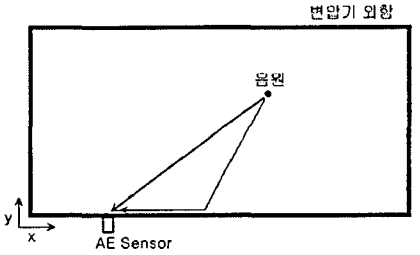


그림 5. 초음파 신호가 AE 센서에 전달되는 직·간접경로의 예

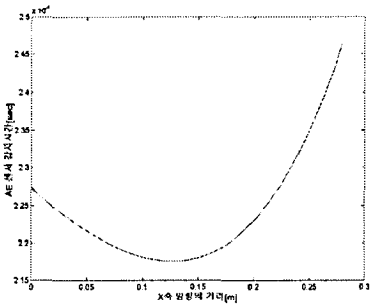


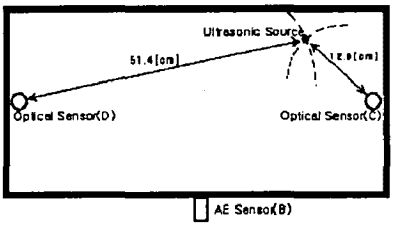
그림 6. 초음파 신호가 직·간접경로로 센서까지 도달시간을 MATLAB 시뮬레이션한 결과

표 4. MATLAB 시뮬레이션과 측정값의 비교

분류 / 위치	직접경로[μs] (계산값)	측정값	
		직접경로[μs]	간접경로[μs]
(0, 20)	123.129	127.62	·
(30, 20)	227.379	224.98	218.47

위치의 좌표는 AE 센서가 부착된 위치를 원점 (0, 0)으로 설정하였다. 그림 6은 좌표 (30, 20)에 초음파 음원이 있는 경우를 MATLAB으로 시뮬레이션 한 결과이다. 그림 6에서 최단시간에 AE 센서로 초음파가 도달한 시간은 간접경로를 통한 217.613[μs]이다. 실험에서 간접경로에 의해 AE 센서에 도달한 시간은 218.47[μs]로 측정됐다. 이 실험에서 직·간접경로로 AE 센서에 초음파가 도달시간 시간차는 약 6.5[μs]이다. 대용량 변압기의 경우, 직·간접경로에 의한 도달시간차는 더욱 커질 것으로 예상된다. 따라서 초음파 음원의 위치검출에 대한 오차도 커질 것으로 예상된다. 이에 비해 광섬유 센서를 사용할 경우는 간접경로에 대한 영향을 배제할 수 있으므로 기존의 AE 센서에 의한 초음파 음원의 위치검출보다 정확한 결과를 도출할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

3.5 광섬유 센서를 이용한 초음파 음원의 위치검출



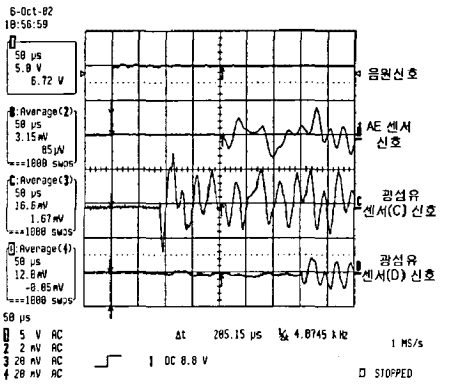


그림 7. 초음파 음원의 위치 검출

수중에서 초음파 음원의 위치를 검출하기 위하여 2개의 맨드릴 센서를 그림 7과 같이 배치한 후 각각 초음파의 지연시간을 오실로스코프에 의해 측정한 것이다. 그림 7와 같이 맨드릴 센서 (C) 및 (D)는 초음파 음원의 펄스보다 지연시간 Δt에 의해 초음파 신호가 측정되고 있다. 지연시간 Δt에 의한 맨드릴 광섬유 센서 각각 음원으로부터의 거리를 계산할 수 있다. 삼각측량법으로 두 맨드릴 광섬유 센서의 위치에서 거리에 따른 궤적을 그리면 초음파 음원의 위치를 알 수 있다. 표 5를 보면 각 센서에 대한 지연시간 Δt에 대한 계산거리, 실측거

리 그리고 오차를 나타내었다. 따라서 매질의 음파 전파 속도를 알고, 초음파 신호의 지연시간을 정확하게 측정함으로써 초음파 음원의 위치를 용이하게 검출할 수 있다.

표 5. 맨드릴 센서의 음파 음원의 위치 검출

분류 / 센서	지연시간 [μs]	계산거리 [cm]	실측거리 [cm]	오차 [%]
맨드릴센서 (C)	88.75	13.046	12.9	1.13
맨드릴센서 (D)	352.45	51.810	51.4	0.79

4. 결 론

본 논문에서는 수중에서 발생하는 초음파 음원의 위치를 검출하기 위하여 두 개의 광섬유 센서를 이용한 측정 시스템을 개발하였으며, 이를 통한 실험적 결과를 고찰하였다. 그 결과 초음파 음원의 실제위치와 오차의 범위가 1[%] 내외로 우수한 신뢰성을 검증하였다. 기존에 사용되고 있는 AE 센서에 대한 직·간접경로에 영향을 분석하고 이를 광섬유 센서로 대치하였을 경우, 경로상의 오차 발생은 크게 감소시킬 수 있음을 보였다. 상기에서 제시된 광섬유 센서를 이용한 수중에서의 측정 결과들은 실제 전력용 변압기의 부분 방전 위치 추정연구에 있어 중요한 기초자료로 활용될 수 있다. 더불어 외함에 의해 발생하는 반사파 영향을 최소화하고 이를 개선한 신호 검출기법을 개발한다면 보다 개선된 광섬유 센서 시스템을 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

[1] 이종길, 이준호, 김상준, "광섬유 Sagnac 간섭계를 이용한 유중방전 신호검출", Trans. KIEE, Vol.49C, No.11, pp.622-626. 2000.

[2] 박윤석, "간섭계형 Optical Fiber Sensor를 이용한 부분방전현상에 관한 연구" 대한 전기학회 전기물성·응용부문회 추계학술대회 논문집, pp.201-204, 2001.

[3] 신대용, 권기태, 이종길. 이준호 "수중에서 Sagnac 간섭계를 이용한 광섬유 센서의 지향성에 관한 연구" 대한전기학회 하계학술대회 논문집(C), pp.1714-1716, 2002.

[4] 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. 1996.

[5] Hee-ro Kwak, Jae-Chul Kim, Sun-Ju Hwang, "Detection and Location of Partial Discharge in Transfermers." J. 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] Dale Ensminger, *Ultrasonics* (Second Edition) Marcel Dekker, Inc., pp. 206-229, 1988.