

수중에서 펄스초음파 신호에 대한 Sagnac 간섭형 광섬유센서의 특성 연구

論 文
53C-1-3

A Study on Characteristics of Sagnac Interferometric Optical Fiber Sensor to Pulsed Ultrasonic Signal in Underwater

李 峻 昊* · 申 大 湧**
(June-Ho Lee · Dae-Yong Shin)

Abstract - In this paper, we present the fabrication and characteristic analysis of Sagnac interferometric optical fiber sensor(OFS) system for detecting pulsed ultrasonic signal in underwater. The hollow cylindrical mandrel wound round by single mode optical fiber is used as sensing component. The ultrasonic signal source is simulated by the PZT actuator operated by an function generator. The distance dependency of the OFS's sensitivity was measured. The sensitivity has been shown to be inversely proportional to the square-root of distance between ultrasonic source and sensing component. It has also 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 :Sagnac interferometer, optical fiber sensor(OFS), PZT, partial discharge(PD)

1. 서 론

광섬유를 이용한 센서기술은 광대역성, 저손실성, 소형경량, 상호불간섭성, 무유도성, 방폭성, 높은 절연내력, 내부식성 등의 장점을 가지고 있기 때문에 전력 기기의 이상 유무를 측정하는 진단 분야에 적용함으로써 많은 효과를 볼 수 있으며 최근 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

누분방전(partial discharge)은 전력기기의 절연상태에 대한 정보를 외부로 전달해주는 중요한 물리량 중 하나이기 때문에 전력설비의 진단에 부분방전의 측정방법이 널리 이용되고 있다. 이중 전력용 변압기 진단의 경우 방전시 발생하는 음향을 측정하는 경우가 많으며 통상 AE(acousto-electric)센서를 이용하고 있다.

이러한 음향신호를 검출하기 위한 또 다른 방법으로 광섬유 센서 시스템을 제안할 수 있는데, 이는 부분방전에 의해 발생하는 음압이 매질(절연유나 구조물 등)을 통해 광섬유센서의 센싱부에 전달되어 물리적인 변형을 발생시키고 이러한 변형은 광섬유 내부를 통과하고 있는 광의 위상변화를 일으켜 간섭계의 원리로 음압을 측정할 수 있는 구성을 가지고 있다[1-8].

본 연구에서는 수중에서 방전신호를 모의한 음향신호를 검출하기 위해, Sagnac 간섭원리를 적용한 중공 원통형 맨드릴(hollow cylindrical mandrel) 광섬유 센서를 제안 및 구성하고 이의 실용적 적용을 위해 맨드릴과의 음원간 거리에 따른 감도와 맨드릴에 감긴 광섬유의 층수에 따른 감도이 상관성을 실험을 통하여 검토하였다. 또한 2개의 광섬유센서 시스템을 활용한

위치검출의 성능을 실험하였으며, 기존에 많이 사용되고 있는 AE센서의 신호경로 의존성 및 광섬유센서 시스템의 의존성을 시뮬레이션과 실험을 통하여 상호 비교하였다. 이러한 연구결과는, 전력용 변압기에서 Sagnac 광섬유 센서시스템을 이용한 부분방전의 올바른 신호해석 및 효과적 위치검출을 위한 기초 자료로 활용하게 될 것이다.

2. 실험

2.1 광섬유 간섭계의 구성

그림 1은 본 실험에서 사용된 Sagnac 간섭계 구성도이다. 광원으로는 최대출력 2.5mW 파장 1550nm인 레이저 다이오드를 사용하였다. 이 광원으로부터 0.4mW의 레이저광이 편광 조절기를 거쳐 2x2 광섬유 결합기(photocoupler)에 입사된 후 양방향으로 분리되어 서로 반대방향으로 진행되어 맨드릴 센싱부를 통과한 후 다시 광섬유 결합기에서 만나 간섭현상을 일으키게 된다. 이때 맨드릴 센싱부에 작용하는 음압의 세기에 비례한 변위에 의한 광로차가 간섭현상에 반영되게 된다 [4]. 실험에 사용된 수조의 크기는 길이, 폭, 높이가 각각 80, 38, 25 [cm]이고 투명 폴리 카보네이트(poly-carbonate) 수지로 제작하였으며 수돗물(tap water)로 채웠다. 수위는 20cm이며 상온에서 실험을 진행하였다.

2.2 맨드릴형 센서 제작

본 연구에서는 수중에서 발생하는 방전에 의한 음압신호를 검출하기 위하여 가운데가 빈 원통형 절연체에 광섬유를 감은 맨드릴형 센서를 제작, 이용하였다. 그림 2는 제작된 맨드릴 센서의 사진이다. 맨드릴형 센서에 사용할 광섬유의 곡률 반경에 따른 구부림 손실을 알기 위해서 광손실계(optical loss tester)를 사용하여 직경에 따른 구부림 손실을 측정하였으며 그 결과는

* 正 會 員 : 湖 西 大 電 氣 情 報 通 信 工 學 部 副 教 授 · 工 博

** 正 會 員 : 湖 西 大 電 氣 情 報 通 信 工 學 部 工 學 碩 士

接 受 日 字 : 2003 年 8 月 4 日

最 終 完 了 : 2003 年 9 月 16 日

표 1과 같다. 원통형 절연체의 지름이 3.5cm까지는 큰 손실이 없었으나 지름 2cm부터 급격한 손실이 발생함을 알 수 있다. 따라서 광섬유의 구부림 손실을 고려하여 직경이 3.5cm인 3개의 동일한 크기의 맨드릴을 사용하였다.

맨드릴의 재질은 아크릴이고 각각의 맨드릴에는 22.9m, 46.1m, 69.3m의 단일 모드 광섬유를 층상으로 감아 3개의 센서부를 구성하였다. 맨드릴에 감긴 광섬유 단층 권수는 200회이다. 본 연구에서 사용된 단일모드 광섬유는 사용파장 1550nm이고, 코아 직경 9.3 μ m, 클래드 직경 125 μ m, 아크릴 수지 보호피막을 포함한 전체 직경 220 \pm 10 μ m의 구조를 가지고 있다.

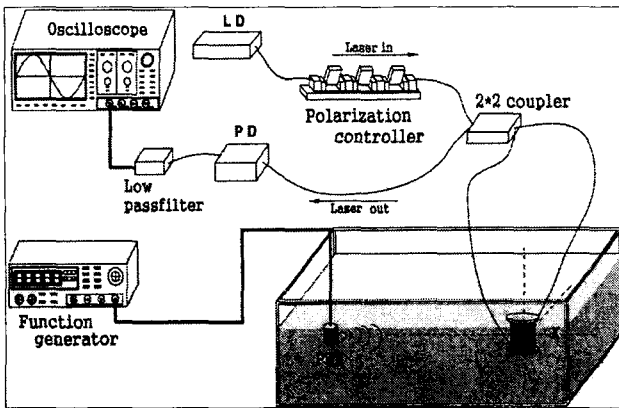


그림 1 실험 구성도 I
Fig. 1 Experimental setup I

표 1 맨드릴 직경에 따른 광섬유의 구부림 손실
Table 1 The optical fiber bending loss depending on diameter of mandrel

직경[cm]	광출력[mW]	손실[dBm]
∞	0.357	-4.47
6.5	0.354	-4.51
5.0	0.366	-4.30
3.5	0.365	-4.37
2.0	0.070	-11.55
1.5	0.011x 10 ⁻³	-49.55
0.7	0.08 x 10 ⁻⁶	-70.92

본 연구에서 제작, 구성한 광섬유 센서 시스템의 기본적인 측정성능을 확인하기 위하여 PZT에 함수 발생기에서 만들어진 172kHz의 정현파를 인가하고 이를 Sagnac 간섭계로 검출하였으며 그림 3은 그 결과이다. 그림 3의 결과로부터 검출된 신호(Ch2)의 주파수가 PZT에 인가한 신호(Ch1)와 일치하고 있음을 확인하였고 이는 본 연구를 위하여 구성된 광섬유 맨드릴 센서 시스템이 정상적으로 작동하고 있음을 보여주는 것이다.

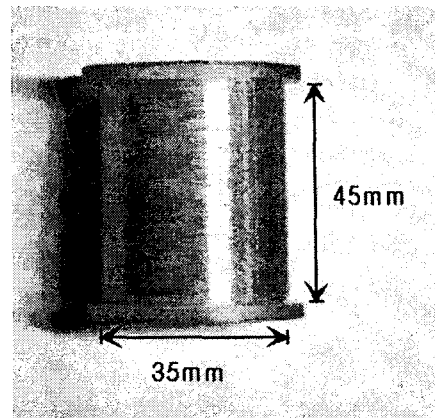


그림 2 중공 원통형 광섬유 맨드릴 센서
Fig. 2 Photograph of the hollow cylindrical optical fiber mandrel sensor

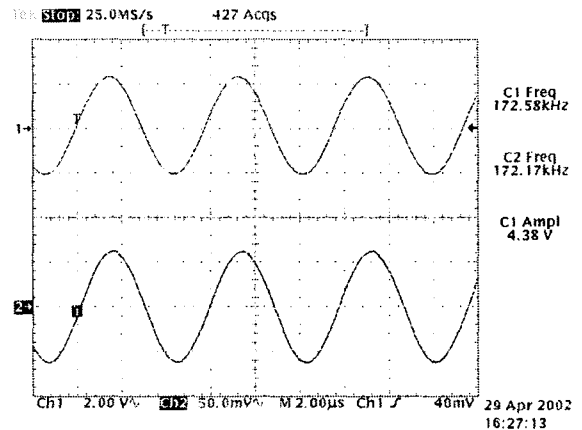


그림 3 Ch.1. PZT에 인가한 정현신호
Ch.2 Sagnac 광섬유 센서로 검출된 신호
Fig. 3. Ch.1. PZT input signal
Ch.2. Signal detected by Sagnac OFS

3. 결과 및 검토

3.1 광섬유 센서의 거리 의존 특성

수중에서 PZT와 광섬유 맨드릴 센서의 이격거리를 5-50cm로 변화시키며 층상에 따른 3개의 맨드릴 센서를 축방향인 X,Y,Z 일 때 감도 특성 실험을 하였다. 이때 PZT에는 주기500ms, 펄스 폭500 μ s, 크기5.82V인 펄스파를 인가하였다. 그리고 반사파의 영향을 배제하기 위하여 맨드릴 센서의 감도 측정 시 음파에 반응하는 처음 파장을 측정 데이터로 이용하였다. 그림 4는 PZT에 인가된 펄스파와 광섬유센서로부터 측정된 파형을 보이고 있다.

음원의 거리에 따른 광섬유 맨드릴 센서의 감도를 정량적으로 분석하기 위해 측정데이터를 비선형 함수로 근사화시켜 보았다. 이때 측정데이터의 근사화 함수로는 지수함수 $y = ax^b$ 를 이용하였다. 측정된 거리-감도 데이터는 최소제곱법(least square curve fitting)으로 분석하였으며 이를 이용하여 그림5의 실선은 각 측정값들에 대한 curve fitting 결과를

나타낸 것으로 광섬유가 감겨진 층수(number of layer)에 관계없이 지수적으로 감소하는 특징을 보이고 있다. 표 2는 각 층수별 데이터에 대한 최소제곱법 적용시 파라미터의 값들을 정량적으로 정리한 것인데 여기서 χ^2 는 오차의 제곱을 모두 더한 파라미터이다. 수치해석 결과 맨드릴 센서의 이격거리에 대한 감도를 나타내는 지수 a 가 대략 -0.5 정도의 값으로 이격거리의 제곱근에 반비례하고 있음을 알 수 있다.

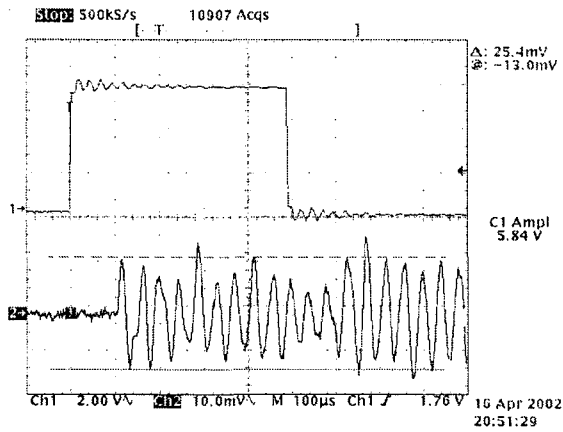


그림 4 PZT에 인가된 펄스파에 대한 광섬유 센서의 검출신호
 Fig. 4. Signal detected by OFS on pulsed signal applied to PZT

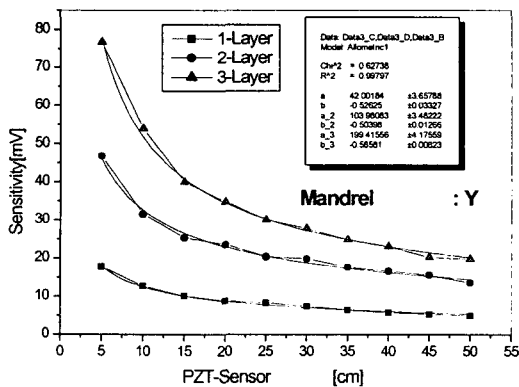


그림 5 맨드릴 센서와 초음파원의 거리에 따른 광섬유 센서의 감도
 Fig. 5 Sensitivity of OFS as a function of distances between mandrel sensor and ultrasonic source

이러한 결과는 본 연구에서 사용된 PZT가 원통형이고 이로부터 발생하는 음파는 원통형 음원(cylindrical wave)으로 모델링 가능하다. 따라서 원통형 음원의 거리에 따른 음압을 이론적으로 검토하면, 다음 식 (3)과 같이 음원으로부터 반경 거리 r의 제곱근에 반비례한다[10]. 따라서 본 실험의 결과는 이론적인 관계와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

$$p(r) \propto \frac{1}{\sqrt{r}} \quad (3)$$

표 2 그림 5의 데이터에 대한 최소제곱법으로부터 계산된 파라미터들

Table 2. Parameters calculated by least-square curve fitting on Fig. 5 data

축방향	parameter	1-layer	2-layer	3-layer	χ^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	

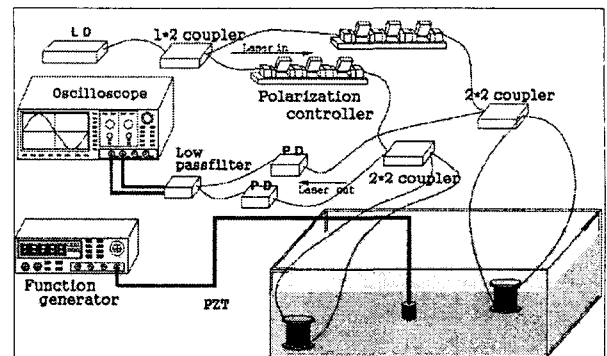


그림 6 2개의 광섬유 센서에 의한 초음파원 검출을 위한 실험 구성도
 Fig. 6. Experiment setup for locating ultrasonic sources by two OFSS

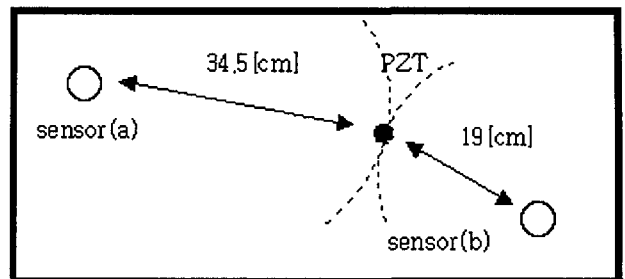


그림 7 수조에서 음원과 센서의 배치
 Fig. 7. Arrangement of the ultrasonic source and sensors

3.2 초음파 음원의 위치 검출 특성

수중에서 초음파 음원의 위치를 검출하기 위해서는 적어도 2개의 센서가 요구된다. 즉, 매질에서 음파의 진행속도를 알고 2개의 센서에서 감지한 신호의 지연시간을 측정하면 삼각 측정법에 의해서 위치를 추정할 수 있다. 이를 위해 본 실험에서는 그림 6과 같이 1*2 coupler를 사용하여 레이저광을 1:1로 분할하여 2개의 동일한 Sagnac 간섭형 광섬유 맨드릴 센서부를 구성하였고 이때 맨드릴 센서로는 2-layer 광섬유 맨드릴 센서를 선택하여 수중에 배치하였다. PZT에는 주기

500ms, 펄스 폭 500 μ s, 크기 7.5V인 펄스 신호를 인가하였고 각각의 맨드릴 센서에서 초음파 음원의 위치에 따른 지연시간을 측정하였다. 그림 7은 실제 수조속에 배치된 센서들과 PZT이 위치 및 이들간의 실측치를 표시하였다.

그림 8는 PZT에 인가된 펄스신호와 센서(a) 및 (b)에 검출된 신호의 오실로스코프 파형을 보이고 있다. 실험 결과 펄스의 발생시간으로부터 센서(a)와 (b)에 신호가 검출될 때까지의 지연시간은 각각 236 μ s, 132 μ s이고 수중에서의 음파의 진행속도가 1470m/s이므로 PZT로부터 센서 (a), (b)까지의 거리는 각각 34.69cm와 19.40cm이라는 계산이 가능하다. 따라서 맨드릴 센서의 위치에서 거리에 따른 궤적을 그리면 초음파 음원의 위치를 알 수 있다. 따라서 본 실험에서 수조에서 PZT와 맨드릴 센서(a),(b)의 실측거리는 각각 34.5cm, 19cm이므로 실측거리와의 실험에 의한 계산거리의 오차가 2% 내외이고 이는 Sagnac 광섬유 맨드릴 센서가 초음파 음원의 위치를 용이하게 검출 할 수 있음을 보여주는 결과이다.

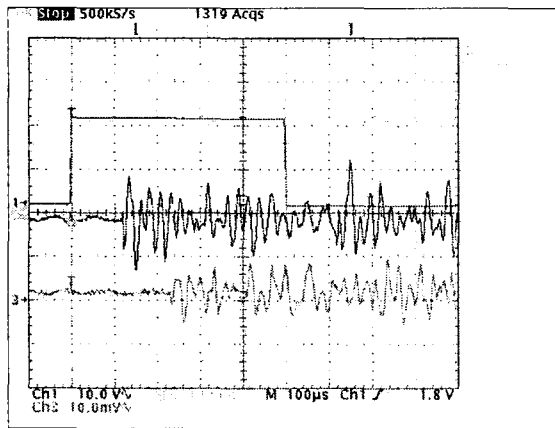


그림 8 PZT에 인가된 펄스신호와 센서 (a)와 (b)에 의해 검출된 신호

Fig. 8. Pulsed signal applied to PZT and detected signals by sensor (a) and (b)

3.3 초음파 신호 전달경로의 영향

통상 전력용 변압기의 부분방전 위치추정을 위해 사용되는 초음파센서의 경우 자석식 고정장치를 이용하여 원하는 부위의 변압기 외벽에 부착하기가 용이하다는 장점이 있으나, 음향신호가 전달되는 과정에서 방전발생원으로부터 직접 전달되는 신호와 금속벽과 같은 음속이 다른 매질을 통하여 간접적으로 전달되는 신호가 중첩되는 경우 방전크기나 위치검출이 어려운 것으로 알려져 있다[4]. 본 연구에서는 기존의 AE(acousto-electric)센서와 광섬유센서의 초음파신호 전달경로의 영향을 살펴보았다. 이를 위하여 그림 9과 같이 AE센서를 수조의 외벽에 부착하고 바로 안쪽에 광섬유센서를 배치한 후, PZT 음원의 위치를 수직방향으로 위치한 #1 과 사선방향으로 위치한 #2에 각각 놓고 펄스파를 인가하여 각 센서에 검출되는 시간을 측정, 비교하였다.

또한 수중에서의 초음파의 속도는 1470m/s 이고 수조의 재질인 폴리카보네이트 매질에서의 초음파의 속도는 2270m/s 이므로 약 1.5배정도의 차이가 난다. 그로 인해 초음파 신호가

직접경로로 AE 센서에 도달하는 시간보다 간접경로로 해서 AE 센서에 도달하는 시간이 짧을 경우가 발생한다. 이것을 MATLAB 프로그램으로 시뮬레이션하였으며 그 결과를 측정 데이터와 비교하였다.

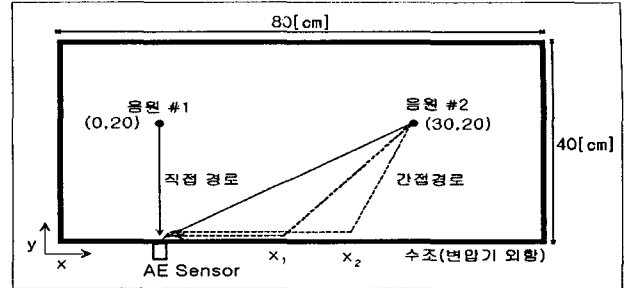


그림 9 경로의존시험을 위한 수조내의 AE 센서와 광섬유센서의 배열

Fig. 9. Layout for path dependence experiment of AE sensor and OFS in water-tank.

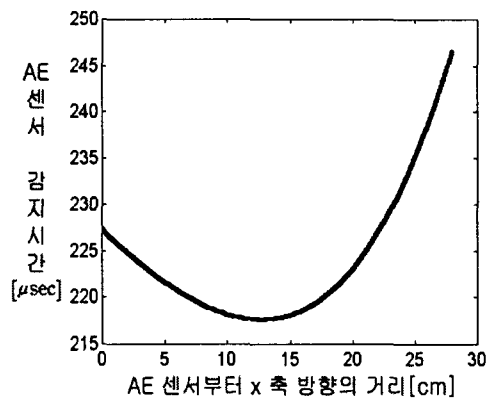


그림 10 직·간접경로를 통한 초음파 신호의 AE 센서까지 도달시간에 대한 시뮬레이션 결과

Fig. 10 Simulated elapsed time of ultrasonic signal through direct and indirect paths at AE sensor

그림 10에서의 위치 좌표는 AE 센서가 부착된 위치를 원점(0, 0)으로 설정하였을 때, 좌표 (30, 20)에 초음파 음원이 있는 경우를 시뮬레이션 한 결과이다. 그 결과 음원 #2로부터 발생한 초음파 신호가 직접경로로 도달할 경우 227 μ sec의 시간이 소요되지만 간접경로 중 AE센서로부터 x-방향으로 12cm 정도 떨어진 지점에 도달한 후 외벽을 타고 전달된 경우 217.6 μ sec 로 더 빠르게 전달됨을 보이고 있다.

표 3 은 실험으로 측정된 시간으로 AE 센서의 경우 간접 경로에 의해 AE 센서에 도달한 시간은 218.47 μ s로 직접경로에 의한 시간 224.9 μ s 보다 6.43 μ s 앞서서 신호가 도달하였다. 측정됐다. 이러한 신호의 전달경로 의존성은 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.

표 3 AE센서와 광섬유 센서의 측정된 소요시간
Table 3. Measured elapsed time from AE sensor and OFS.

위치 (cm)	AE 센서		광섬유 센서	
	적용거리 (cm)	소요시간 (ms)	적용거리 (cm)	소요시간 (ms)
점선 #1 (10, 20)	127.6	*	124.4	*
점선 #2 (30, 20)	224.9	218.4	225.8	*

4. 결 론

본 연구에서는 Sagnac 간섭형 광섬유 맨드릴 센서 시스템을 제안하고 이를 구성하였으며, 작동특성을 검증하기 위하여 PZT의 발생음원과 광섬유 맨드릴 센서에서 측정된 신호를 비교하였다. 그 결과 두 신호가 위상 및 주파수가 잘 일치하고 있음을 확인 할 수 있었다.

방전신호를 모의한 펄스음원과 Sagnac 간섭형 광섬유 맨드릴 센서 간의 거리에 따른 감도를 측정하고, 그 결과를 수치해석하여 센서의 감도가 이격거리의 제곱근에 반비례함을 알 수 있었다. 이는 본 연구에 사용된 음원을 원통형음파로 모델링하였을 경우 이론적 상관식과 잘 일치하였다. 또한 2개의 광섬유 맨드릴 센서를 이용한 위치 검출은 초음파 신호의 지연시간과 매질의 전파속도에 의해 수조 내의 임의의 위치에서 발생하는 초음파 음원까지의 거리를 계산할 수 있으며, 그 결과 초음파 음원과 실제위치와의 오차의 범위가 2% 내외로 매우 우수한 신뢰성을 검증하였다.

기존에 사용되고 있는 AE 센서가 가지는 직·간접경로에 영향을 분석하고 이를 광섬유 센서로 대체하였을 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 기초 자료로 활용될 것이며, 변압기 외함에 의해 발생하는 반사파 영향을 최소화하고 이를 개선한 신호 검출 기법을 개발한다면 보다 향상된 광섬유 센서 시스템을 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소(R-2003-B-104) 주관으로 수행된 과제임

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 ISEL, 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 Appliations".
[4] 이종길, 이준호, 김상준, "광섬유 Sagnac 간섭계를 이용한 유중방전 신호검출", Trans. KIEE, Vol.49C, No.11. 2000, pp.622-626.
[5] Mark MacAlpine, ZhaoZhiqiang, M.Suleyman Demokan, "Development of a fibre-optic sensor for partial discharges in oil-filled power transformers", Electric Power System Research 63, pp.27-36, 2002.Hee-ro Kwak, Jae-Chul Kim, Sun-Ju Hwang, "Detection and Location of Partial Discharge in Transfermers." Journal of KIEE, pp. 295-301, 1992.
[6] 신대용, 권기태, 이종길, 이준호, "수중에서 Sagnac 간섭계를 이용한 광섬유 센서의 지향성에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집(C), p. 1714, 2002.
[7] 김상준, "광섬유 Sagnac 간섭계를 이용한 방전현상 검출", 고려대학교 박사 논문, 2000.
[8] 이종길, 박윤석, 이준호, "광섬유 간섭계 센서를 이용한 부분방전 음압 측정", 한국음향학회지, 21권, 7호, p. 614, 2002.
[9] 이종길, 윤형규, 서인창, "끝단이 막힌 중공 원통형 광섬유 하이드로폰의 감도 해석" 한국소음진동학회지, 6권, 4호, p. 475, 1996.
[10] Donald E. Hall, "Basic Acoustics", John Wiley & Sons, Inc., p. 10, 1987.

저 자 소 개



이 준 호 (李 峻 昊)

1962년 3월 14일생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사), 1887년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 1993년~1994년 일본 전력중앙연구소 연구원, 2001년~2002년 미국 MIT High Voltage

Research Laboratory 파견연구원(학술진흥재단 지원), 1994년~현재 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수
Tel : 041-540-5656, Fax : 041-548-6685
E-mail : leejh@office.hoseo.ac.kr



신 대 용 (申 大 湧)

1975년 8월 20일생. 2001년 호서대 공과대 학 전기공학과 졸업. 2003년 호서대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주) 세원 ECS 기술연구소 연구원

Tel : 011-347-0393, Fax : 031-358-6159
E-mail : jeongky75@hanmail.net