

TLS와 CW 광원에 따른 트랜스포머 오일 내에서 광섬유 센서의 음압 감지 특성 연구

Investigation of Sound Pressure Detection of Fiber Optic Sensor in Transformer Oil According to TLS and CW Laser Source

이 종 길*
(Jongkil Lee*)

*안동대학교 기계교육과
(접수일자: 2010년 11월 22일; 채택일자: 2010년 12월 14일)

음압을 감지할 수 있는 Sagnac 간섭계 센서와 온도 및 스트레인을 측정할 수 있는 FBG센서를 결합한 새로운 형태의 하이브리드 광섬유 센서 시스템을 구축하기 위하여 입력 광원인 CW를 TLS로 대체할 필요가 있어 이에 따라 광원의 변화와 맨드릴 재료의 변화에 따른 광섬유 센서의 응답 특성 연구가 필요하게 되었다. 제작된 맨드릴 재료는 PTFE와 PTFE에 카본을 섞어 만든 두 종류로 선택하여 중공 원통형 맨드릴 겉면에 광섬유를 18 m 감아 광섬유 센서로 제작하였다. CW 광원에 대하여 음원의 입력 주파수를 1 kHz ~ 20 kHz까지 바꾸어 가며 트랜스포머 오일이 채워진 유조에서 실험하였다. 또한 FBG와 맨드릴형 광섬유 센서를 결합한 하이브리드형 광섬유 센서 시스템을 구성하고 TLS 광원을 입사광으로 실험하였다. 실험 결과 PTFE 센서의 탐지 크기는 카본 센서 탐지 크기보다 높게 나타났고 맨드릴 재질의 탄성계수 값이 적을수록 커진다는 이론 결과와 잘 일치함을 보였다. CW 광원과 TLS 광원에서 응답한 PTFE 센서의 특성을 주파수별로 상호 비교하여 보면 광원이 CW일 때 보다 TLS일 때 응답 특성이 우수함을 알 수 있었다. 본 연구를 통하여 TLS를 이용한 광섬유 센서는 FBG와의 하이브리드 시스템에 적용 가능하리라 사료된다.

핵심용어: 광섬유 음향센서, 사냥 간섭계, 격자 브래그 센서, 맨드릴, 가변 레이저, 음향 주파수 스펙트럼

투고분야: 물리음향 및 광음향 분야 (9.7)

To substitute TLS in the hybrid system which is combined with Sagnac interferometer and fiber bragg grating (FBG) it is necessary to investigate how the laser source (TLS and CW) and sensor material variate the response of fiber optic sensor. Two different hollow cylinder type mandrel materials are proposed which are PTFE and PTFE+carbon and 18 m optical fiber is wounded at the mandrel surface. CW laser source experiments had been done in the oil tank which is filled with transformer oil in the 1 kHz ~ 20 kHz frequency range. Also Sagnac interferometer fiber optic sensor is combined with FBG called hybrid system and TLS used as a light source. Based on the experimental results PTFE sensor showed more higher magnitude of detection signal rather than carbon sensor and this result is agreement with the McMahon's theoretical results. Phase variation is inversely proportional to the elastic modulus of the mandrel material. In PTFE fiber sensor, tunable laser source showed more higher performance rather than CW case. Therefore, TLS fiber optic sensor can be applied to the hybrid system which is combined with Sagnac and FBG.

Keywords: Fiber optic acoustic sensor, Sagnac interferometer, Fiber Bragg Grating, Mandrel, Tunable laser source, Acoustic frequency spectrum

ASK subject classification: Physical Acoustics and Photo-acoustics (9.7)

I. 서론

광섬유 센서 (optical fiber sensor)는 높은 정밀도와 분포계측 가능성, 소형 및 내구성 때문에 음향진동 분야, 토목교량 분야, 기계항공 분야 등 여러 분야에서 활발히 연구되고 있다 [1-2]. 수중 음향 분야에서도 광섬유 하이브리드 센서의 제작을 통하여 외부 음압 탐지에 많이 응용되고 있다 [3]. 특히 변압기 절연유 오일에서 발생하는 음압을 효과적으로 탐지하기 위한 방법으로 Sagnac 간섭계형 광섬유 센서가 연구 되었다 [4-6]. 이는 빛의 경로차를 이용하는 방법으로 절연유로 가득 채워진 유조에 센서를 설치하고 [4-5] 각각의 주파수에 따른 변화를 관찰함으로써, 센서의 응답 특성을 분석하는 구조이다. 주로 한 개의 단일 센서를 이용한 점 [4-6]이 본 연구와는 차별된다.

변압기 절연유 속에서 절연 파괴가 일어날 때 광섬유 센서를 이용하여 음압 [4-6], 온도, 스트레인을 동시에 측정할 수 있는 Sagnac 간섭계와 FBG (Fiber Bragg Grating)와의 결합 형태인 새로운 하이브리드 간섭계가 필요하게 되었다. 하이브리드 시스템의 입력 광원이 TLS (Tunable Laser Source)이므로 [7-8] CW (Continuous Wave)를 대체할 필요가 있고 따라서 광원에 따른 음압 탐지성능 연구가 대두되기 시작 되었다. 브래그 격자 광섬유 센서 (FBG)는 스트레인과 온도를 간단히 측정할 수 있으며 크기가 작아 다른 물체에 삽입되었을 때 그 물체의 물성값에 영향을 주지 않고 사용 온도 범위가 넓으며 전자기파의 영향을 받지 않는다는 장점이 있다 [7-8].

광섬유를 이용한 간섭계 센서는 Mach-Zehnder [3], Sagnac, Fabry-Perot, Michelson, Speckle 등이 음향 및 진동 탐지 연구들에서 많이 이용되고 있다 [1-2]. 특히 Sagnac 간섭계 [4-6]와 Fabry-Perot 간섭계가 음압 탐지에 효과적인 것으로 알려져 있다. Sagnac 간섭계의 원리는 그림 1에서와 같이 입사광이 방향성 결합기에 의해 둘로 나누어지고 각각의 빛은 광폐회로를 통하여 시계방향과 반시계 방향으로 통과하여 방향성 결합기에서 간섭되어 광 감지기 (P.D.)에서 전기신호로 검출되는 것이다 [4-6]. 이는 각각의 광경로 차이에 비례하는 위상차가 발생하여 검출광의 세기에 변화가 일어나고 이를 측정함으로써 광섬유 센서에 가해진 음향 및 진동의 크기를 검출하게 된다. 음압의 변동에 따른 위상변화는 광섬유 폐회로의 길이에 비례하므로 광섬유 센서의 감도를 증대시키기 위하여 길이를 되도록 크게 하는 것이 좋다.

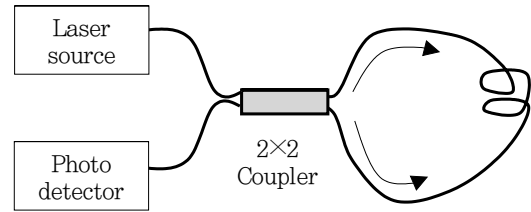


그림 1. Sagnac 간섭계를 이용한 광섬유 센서
Fig. 1. Fiber optic sensor using Sagnac interferometer.

Sagnac형 간섭계는 광섬유 폐회로 루프를 이용하므로 센서의 감도를 높이기 위하여 일반적으로 중공 원통형 맨드릴 (mandrel)에 광섬유를 촘촘히 감아 길이를 길게 한다. 따라서 광섬유 음향 센서용 맨드릴 형상은 실제 광섬유를 이용한 음압을 감지하는데 매우 중요한 요소 중 하나이다. 맨드릴의 형상은 센서의 적용 장소에 따라 달라지지만 일반적으로 중공 원통형 (hollow cylinder)을 많이 이용한다 [9-12]. 이는 외부 음압이 광섬유에 접촉하면 작은 음압을 오랫동안 유지하기 위하여 두께가 얇은 중공 원통형을 고안하게된 것이다. 또한 맨드릴형 센서는 놓이는 방향성에 따라 음원과의 상대적 위치로 인하여 응답 특성이 달라진다 [9-12].

본 연구에서는 변압기 절연유 속에서 절연 파괴가 일어날 때 광섬유 센서를 이용하여 음압을 측정하고자 Sagnac형 광섬유 배열 센서를 적용하였다. Sagnac 간섭계와 FBG와의 결합 형태인 새로운 하이브리드 간섭계를 구성하고 입력 광원을 TLS와 CW를 사용하여 응답 특성을 관찰하였다. 광섬유 센서를 구성하는 맨드릴의 재질을 두 종류로 제작하고 각각의 간섭계에 적용하였다. 이에 따라 광원의 변화와 맨드릴 센서의 변화에 따른 응답 크기를 측정하여 이를 향후 센서 설계에 활용하고자 하였다.

II. 실험 장치의 구성

2.1. 광섬유 센서 제작

단일 모드 광섬유가 끝단이 막힌 (end-capped) 중공 원통형 맨드릴에 감긴 경우 광섬유 센서에 대한 감도 (sensitivity)는 다음 식과 같이 유도된다 [13-14].

$$\left(\frac{\Delta\phi}{P}\right) = k_p n L E_m^{-1} (1 - \tilde{r}^2)^{-1} [1 + \tilde{r}^2 - \nu_m (2 - \tilde{r}^2)] (1 - n^2 p_{12} / 2) - 0.5 n^2 p_{m1} [(2 - \tilde{r}^2) [E_m E_f^{-1} (1 - \nu_f - 2\nu_f^2) + 2\nu_f \nu_m] - 2\nu_f (1 + \tilde{r}^2)] \tag{1}$$

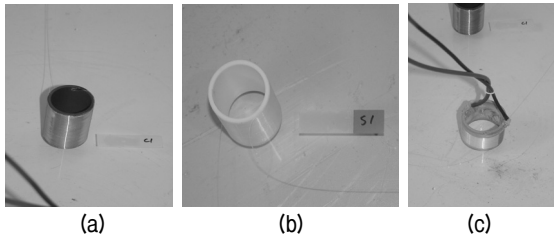


그림 2. 광섬유 센서 사진: (a) PTFE+Carbon, (b) PTFE, (c) 음원
 Fig. 2. Photograph of the fiber optic sensor: (a) PTFE+Carbon, (b) PTFE, (c) sound source.

여기서 $\Delta\phi$ 는 광 위상 변화량, P 는 음압, k_o 는 광파수, n 은 굴절률, p_{ij} 는 광탄성 스트레인 상수, L 은 광섬유의 길이, E_m 과 E_f 는 각각 맨드릴과 광섬유의 탄성계수, ν_m 과 ν_f 는 각각 맨드릴과 광섬유의 푸아송 비이며 \tilde{r} 는 맨드릴의 내외경비이다. 식 (1)에서와 같이 광 위상 변화량 $\Delta\phi$ 를 높이는 것은 광섬유 센서의 감도를 높이는 것이므로 이를 위하여 맨드릴에 감기는 광섬유의 길이를 늘이거나 탄성계수 값이 적은 맨드릴 재질로 바꾸면 된다.

광섬유 센서로 구성할 수 있는 일반적인 방법은 원통형 맨드릴 (mandrel)에 광섬유를 감아 사용하는 것이다. 제작된 맨드릴 재료는 그림 2와 같이 PTFE (Poly Tetra Fluoro Ethylene)와 PTFE+Carbon의 두 종류로 제작하였다. PTFE+Carbon 재질을 본 논문에서는 카본 센서로 명명하였다. 일반적으로 PTFE는 PVC보다 강도와 경도 면에서 낮기 때문에 카본 (carbon)을 섞어 경도를 높여서 사용한다. 맨드릴 센서 표면에 감긴 광섬유의 총 길이는 18 m이며 맨드릴의 크기는 외경 30 mm, 길이 45 mm, 두께 2 mm인 중공 원통형이다.

그림 2에는 제작된 광섬유 센서 (FOS, Fiber Optic Sensor)를 보였는데 그림 2의 (a)는 카본 (PTFE+carbon) 센서이며 (b)는 PTFE 센서, (c)는 음원 (Sound source)이다. 음원은 실제 유중에서 음을 발생시키기 위하여 원통형 세라믹에 광섬유를 감아 만든 것으로 입력 신호를 정확히 알기 위한 방법으로 채택하였다. 세라믹의 크기에 따라 음원의 공진 주파수는 달라지나 본 연구에서는 공진 주파수와 무관하게 입력 주파수를 걸어 주었다.

2.2. 트랜스포머 오일 속 실험 장치 제작

본 연구의 목적은 실제 트랜스포머 오일 속에서 광섬유 센서가 광원과 센서 재질에 따라 음원을 어떻게 감지하는지를 관찰하는데 있다. 먼저 그림 3과 같이 크기가 600 mm × 600 mm × 520 mm 인 아크릴 사각형 통속에 트랜스포머 오일 (transformer oil)을 약 70 % 정도 채우

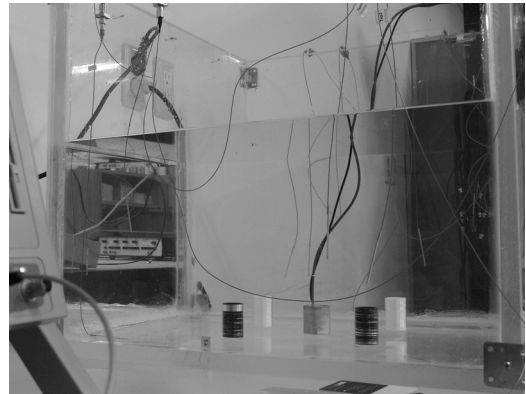


그림 3. 트랜스포머 오일내 실험 장치 사진
 Fig. 3. Photograph of the experimental set up in the transformer oil.

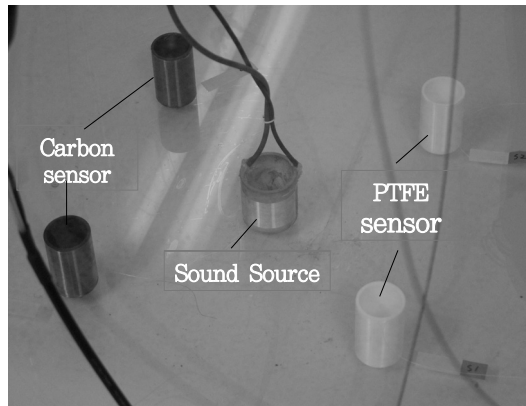


그림 4. 광섬유 센서와 음원 장치 (검정색: PTFE+카본 센서, 흰색: PTFE 센서)
 Fig. 4. Fiber optic sensor and sound source (black: PTFE+carbon sensor, white: PTFE sensor).

고 그림 4와 같이 광섬유 센서 4개 (PTFE 및 PTFE+carbon 센서 각 2개)와 세라믹 음원 발생장치를 설치하였다. 트랜스포머 오일은 맨드릴 재질인 PTFE와 화학적 반응이 없으며 독성이 없는 유체이다. 그림 4에서와 같이 음원과 센서와의 거리는 12 cm로 일정하게 유지하였으며 맨드릴의 직경이 30 mm 정도이므로 유중에서의 파장은 문제되지 않는다. 음원과 4개의 센서는 바닥면에 고정되어 있고 같은 평면상에 위치해 있다. 사각형 박스 구조인 유조는 실험 장치의 제작상 정재파의 영향은 고려하지 않았다.

Sagnac 간섭계와 4개의 센서를 배열로 구성하기 위하여 그림 5와 같이 간섭계형 배열 구조를 고안하였다. 이는 한 개의 광원으로 4개의 센서에 광을 공급할 수 있는 배열구조이다. 파장이 1500 nm인 DFB 레이저를 이용하였고 음원장치에 흡수 발생기를 이용하여 필요한 주파수를 걸어 주었다.

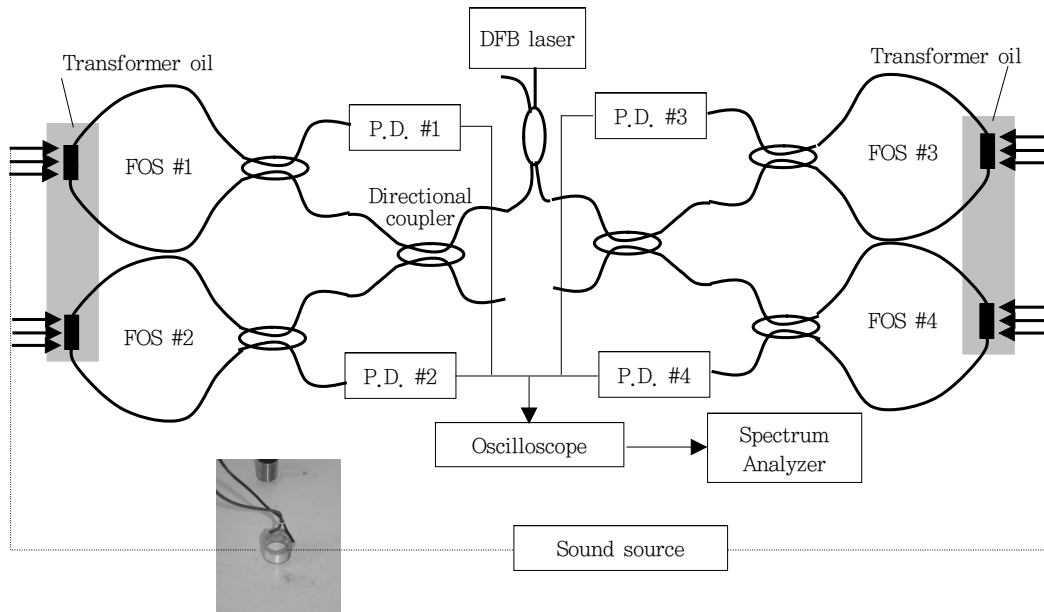


그림 5. 4개의 광섬유 배열 센서를 이용한 Sagnac 간섭계 실험 장치 구성도
 Fig. 5. Diagram of the Sagnac interferometer experimental set up with four fiber optic sensor array.

그림 5에서와 같이 입사광은 25 %씩 각 센서 (FOS #1 ~ FOS #4)로 나뉘어 통과하게 되고 서로 반대 방향으로 통과한 빛은 광 결합기에서 간섭을 일으켜 광 감지기 (P.D. #1 ~ P.D. #4)에서 전기 신호로 검출된다. 이 신호를 오실로스코프와 스펙트럼 분석기를 거쳐 감지된 음압 크기를 분석하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

3.1. CW 광원을 이용한 실험 결과

그림 3 ~ 5에 보인 것과 같이 4개의 광섬유 센서를 이용하여 Sagnac 간섭계를 구성하고 FOS를 트랜스포머 오일 속에 넣고 음원 주파수를 변경시키면서 FOS가 감지하는 유층 속에서의 특성을 실험하였다. 광원 (DFB Fiber coupled laser source, THORLAB S3FC1550)은 파장이 1550 nm이며 연속 파형 (CW, Continuous Wave)을 입사광으로 하여 실험하였다. CW 실험에서 사용한 음원의 입력 주파수는 1 kHz ~ 4 kHz의 저주파 대역과 5 kHz ~ 20 kHz의 고주파 대역으로 구분하여 사용하였다.

그림 6에는 음원 주파수가 2 kHz 및 3 kHz일 때 두 종류의 광섬유 센서가 감지한 출력 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림 6에서와 같이 2 kHz의 음원에서 PTFE 센서 #1의 탐지 크기는 -47.3 dBV, 카본 센서 #1은 -48.8 dBV로 나타났고 3 kHz의 음원에서 PTFE 센서 #2는 -39.1 dBV, 카본 센서 #2는 -46.9 dBV로 PTFE

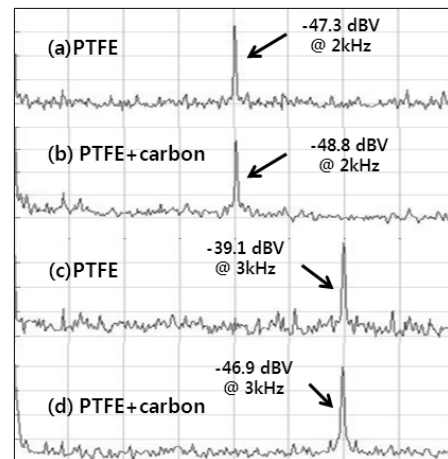


그림 6. 광섬유 센서 탐지 신호의 주파수 스펙트럼 (음원 2 kHz ~ 3 kHz, 수평축: 주파수 (500 Hz/div.), 수직축: 크기 (10 dBV/div.))
 Fig. 6. Frequency spectrum of the detected fiber optic sensor signal (sound source: 2 kHz ~ 3 kHz, horizontal axis: frequency (500 Hz/div.), vertical axis: magnitude (10 dBV/div.)).

센서의 탐지 크기가 더 높았다.

그림 7에는 음원 주파수가 1 kHz ~ 4 kHz 일 때 4개의 광섬유 센서가 감지한 신호의 크기를 비교하였다. PTFE 센서 #1은 음원이 1 kHz ~ 4 kHz로 변하는 동안 크기는 -58.1, -47.3, -41.9, -60.7 dBV로 각각 변함을 알 수 있다. 또한 카본 센서 #1은 -56.5, -48.8, -50.3, -49.2 dBV로 주파수에 따라 크기가 변하고 있음을 보여준다. PTFE 센서 #1은 두 개의 카본 센서보다 대체적으로 높은

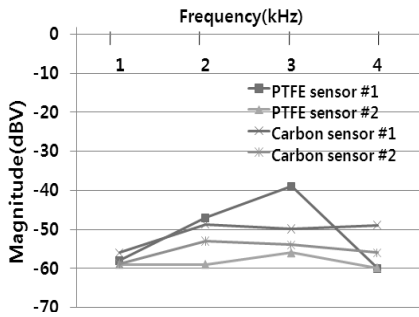


그림 7. CW 광원을 이용한 음원 주파수 1 kHz ~ 4 kHz에서의 탐지 성능 실험 결과

Fig. 7. Experimental results of detected signal in the sound frequency range of 1 kHz ~ 4 kHz using CW laser source.

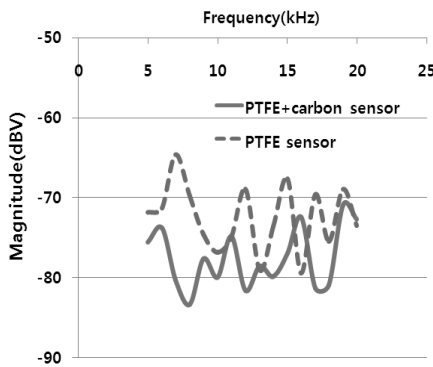


그림 8. 두 종류의 FOS 감지 성능 비교 (CW의 경우)

Fig. 8. Comparison of the detected signal magnitude between two different material sensors (case of CW).

감도를 유지하고 있었으나 PTFE 센서 #2는 4개의 센서 중 가장 낮은 크기로 특이한 현상을 나타내었다. 이는 식 (1)에서 광 위상 변화량을 높이기 위하여 맨드릴 재질의 탄성계수 값이 적을수록 커진다는 이론식과 특정 주파수 (4 kHz)를 제외한 범위에서는 대체로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 8에는 음원 주파수가 5 kHz ~ 20 kHz 일 때 두 종류의 센서가 감지한 신호의 크기를 비교하여 보였다. 센서 #1 ~ #4에서 측정된 값을 두 그룹으로 묶어 여러 회 측정된 평균한 값을 나타낸 것인데 그림 8에서와 같이 PTFE 센서는 주파수 7 kHz에서 -64.6 dBV로 최고치를 보였고 16 kHz에서 -79.4 dBV로 최저치를 나타내었다. 반면 카본 센서는 19 kHz에서 -70.9 dBV로 최고치를 보였고 17 kHz에서 -81.3 dBV로 최저치를 나타내어 대조를 보였다. 그림 8에서와 같이 PTFE 센서의 탐지 크기가 카본 센서 탐지 크기보다 높음을 알 수 있다. 이는 식 (1)에서 보인 광 위상 변화량을 높이기 위하여 맨드릴 재질의 탄성계수 값이 적을수록 커진다는 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다. 그림 7과 그림 8을 통하여 CW 광원을

표 1. 공기중과 유중에서의 응답 성능 비교

Table 1. Comparison of response performance between in air and in oil.

음원 주파수	센서 종류	증기량 (dBV)	응답 증가율 (%)
1 kHz	PTFE sensor #1	7	9.1
	PTFE sensor #2	26	30.9
	Carbon sensor #1	13	20.3
	Carbon sensor #2	7	13.5
2 kHz	PTFE sensor #1	31	39.6
	PTFE sensor #2	22	26.8
	Carbon sensor #1	19	29.7
	Carbon sensor #2	20	27.9
3 kHz	PTFE sensor #1	48	53.3
	PTFE sensor #2	33	36.3
	Carbon sensor #1	28	36.4
	Carbon sensor #2	24	28.3
4 kHz	PTFE sensor #1	30	32.4
	PTFE sensor #2	26	30.4
	Carbon sensor #1	34	41.8
	Carbon sensor #2	24	30.2

이용한 그림 5와 같은 Sagnac형 4개의 배열 센서는 음원 주파수 1 kHz ~ 20 kHz의 음원 주파수를 잘 탐지함을 확인할 수 있었으며 그림 5의 배열 형태가 음원 탐지에 매우 효과적임을 증명하였다.

표 1은 그림 3과 그림 4의 장치에서 트랜스포머 오일을 채우기 직전 공기중에서 측정된 음원 (주파수 1 kHz ~ 4 kHz)에 대한 응답 크기와 유중에서의 응답 크기를 비교하여 응답 증가율 (%)을 계산하여 정리한 것이다. 유중에서 응답 크기는 공기 중에서의 응답 [10~11]보다 최저 9.1%에서 최고 53.3%의 증가율을 보이고 있다. 또한 음원 주파수가 높아지면 감도 증가율도 높아짐을 알 수 있다. 공기중에서 실험을 한 결과를 보면 음원 주파수가 높을수록 대체로 응답 크기가 떨어지는 경향을 나타낸다. 표1과 같이 공기 중에서도 유중에서의 감지 성능이 뛰어난 것을 알 수 있다. 이는 음원이 전파되는 모형은 공기 중에서도 유중에서 음압 전달 매체의 밀도가 높으므로 음의 전파는 더 확실하게 이루어진다고 볼 수 있다. 매질에 따라 음의 전파가 달라지므로 이러한 특성을 이용하면 향후 센서 설계에 중요한 자료가 될 것으로 사료된다.

3.2. TLS 광원을 이용한 실험 결과

서론에서도 밝혔듯이 본 연구는 변압기 절연유 속에서 절연 파괴가 일어날 때 광섬유 센서를 이용하여 음압, 온도, 스트레인을 동시에 측정할 수 있는 시스템 구축이 목표이며 그 연구의 일환으로 Sagnac 간섭계와 FBG와의

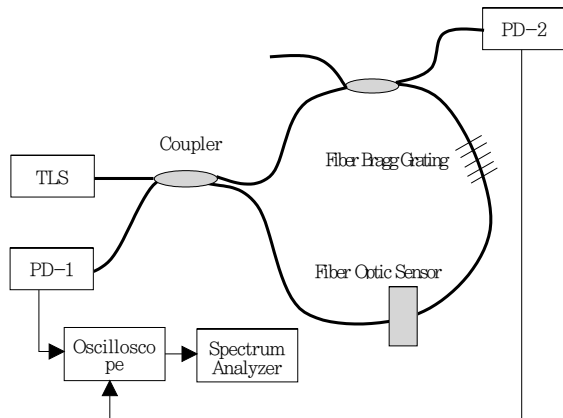


그림 9. 하이브리드 광섬유 센서 시스템의 구성도 (FBG+Sagnac FOS)

Fig. 9. Configuration of the hybrid fiber optic sensor system (FBG+Sagnac FOS).

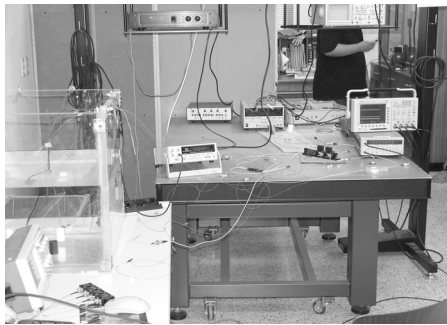


그림 10. 하이브리드 광섬유 센서 시스템 실험 장치 구성 사진
Fig. 10. Photograph of the experimental set up using hybrid fiber optic sensor system.

결합 형태인 새로운 하이브리드 간섭계를 필요하게 되고 하이브리드 시스템 (본 논문에서 FBG와 Sagnac이 결합된 형태를 하이브리드 시스템이라 명명하였다.)의 입력 광원이 TLS이므로 CW를 대체할 필요가 있어 광원에 따른 음압 탐지성능 연구가 시작 되었다. 브래그 격자 광섬유 센서 (FBG)는 스트레인과 온도를 간단히 측정할 수 있으며 크기가 작아 다른 물체에 삽입되었을 때 그 물체의 물성값에 영향을 주지 않고 사용 온도 범위가 넓으며 전자기파의 영향을 받지 않는다는 장점이 있다 [7-8].

FBG와 맨드릴형 광섬유 센서를 결합한 하이브리드형 광섬유 센서 시스템을 구축하기 위하여 Sagnac 간섭계에 FBG를 결합한 그림 9와 같은 구성도를 고안하였다. 그림 9에서와 같이 가변 파장 광원 (TLS)를 이용하여 FBG를 구성하고 FBG와 직렬로 FOS를 부착하고 이를 유중에 삽입하여 실험하였다. 그림 9에서 FBG는 실제 변압기 절연유의 온도 변화를 감지할 목적으로 설치되었으며 FOS는 음압을 감지할 목적으로 설치되었다. PD-1과 PD-2는 FBG에서 받는 신호를 분석하기 위하여 필요한 것이며 실

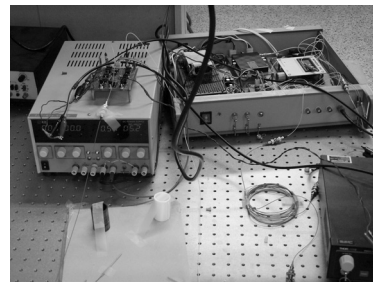


그림 11. 가변 광원 장치 사진
Fig. 11. Photograph of the tunable laser source.

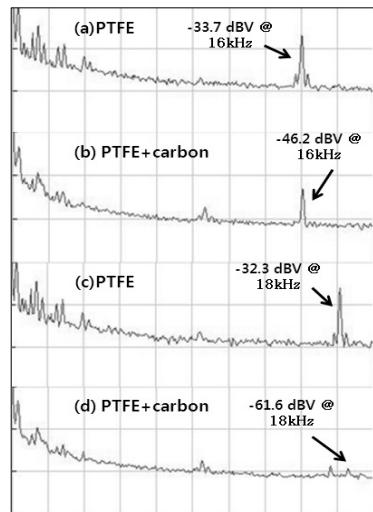


그림 12. FBG가 결합된 하이브리드 시스템에서 TLS 광원을 이용한 트랜스포머 오일에서의 광섬유 센서의 감지 주파수 스펙트럼 (음원 16 kHz, 수평축: 주파수 (2 kHz/div.), 수직축: 크기 (20 dBV/div.))

Fig. 12. Detected signal frequency spectrum of the hybrid system in transformer oil combined with FBG using TLS as a laser source (sound source: 18 kHz, horizontal axis: frequency (2 kHz/div.), vertical axis: magnitude (20 dBV/div.)).

제 FOS에서 감지한 신호는 PD-1을 이용하여 분석하였다. PD-1의 신호는 오실로스코프를 거쳐 스펙트럼 분석기를 이용하여 분석하였다.

그림 10에는 FBG와 FOS가 결합된 하이브리드 광섬유 센서 시스템의 광간섭계 실험 장치를 보였고 그림 11에는 가변 광원 발생 장치를 보였다. 그림 10에서와 같이 CW 광원 실험에서와 동일한 유조와 센서를 사용하였다.

그림 9와 같이 FBG와 Sagnac 간섭계가 결합된 하이브리드형 광섬유 센서 시스템에 광원을 파장 가변 레이저 (TLS)를 이용하여 유중에서 실험하였다. 음원 주파수는 4.5 kHz ~ 20 kHz로 가변시켜 PTFE 센서와 카본 센서가 감지한 응답 특성을 관찰하였다. 음원 주파수는 가청 영역에서 낼 수 있는 최대치까지 근접하여 발생하게 했으며 실제 변압기 내에서는 주로 초음파를 감지할 수도 있으며

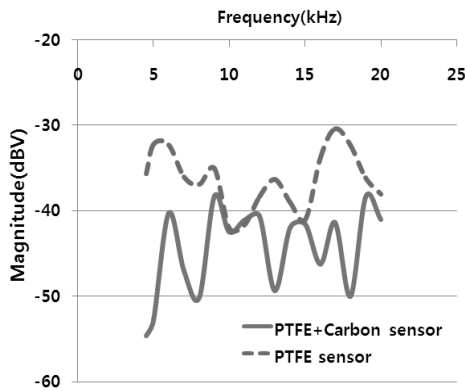


그림 13. 두 종류의 FOS 감지 성능 비교 (TLS의 경우)
 Fig. 13. Comparison of the detected signal magnitude between two different material sensors (case of TLS).

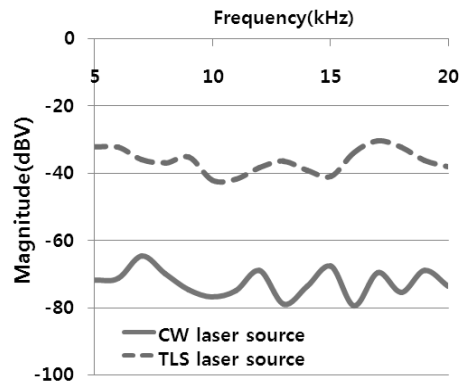


그림 14. CW와 TLS일 때 FOS의 감지 성능 비교
 Fig. 14. Comparison of the FOS detected signal magnitude between CW and TLS.

로 대역폭을 최대한 넓혀 실험하였다.

그림 12는 TLS 광원을 이용한 트랜스포머 오일에서 PTFE 센서와 카본 센서가 감지한 응답 특성을 보인다. 음원 주파수 16 kHz에서 PTFE 센서 (a)의 응답 크기는 -33.7 dBV, 카본 센서 (PTFE+carbon) (b)는 -46.2 dBV로 PTFE 센서의 응답 특성이 높게 나타났다. 음원 주파수 18 kHz에서 PTFE 센서 (c)의 응답 크기는 -32.3 dBV인 반면 카본 센서 (PTFE+carbon) (d)는 -61.6 dBV로서 16 kHz에 비교하여 15.4 dBV 낮게 나타났다. 그림 12를 CW를 이용한 실험결과인 그림 6과 비교하여 볼 때 4 kHz 이하의 주파수 영역에서 여러 피크치가 보이는 현상이 나타났다. 이는 TLS 광원의 특성 때문인 것으로 해석된다.

그림 13은 음원 주파수를 4.5 kHz ~ 20 kHz 까지 변화시켰을 때 PTFE 센서와 카본 센서가 반응한 응답 크기를 나타낸 것이다. 그림 12에서 나타난 광원의 변화에 의한 4 kHz 이하에서의 피크치 중복을 피하기 위하여 입력 음원 주파수를 4.5 kHz부터 시작하였다. 실험 결과 그림 13과 같이 음원의 전 주파수 대역에서 PTFE 센서의 응답 성능이 카본 센서보다 상대적으로 높음을 알 수 있다. 그러나 11 kHz, 12 kHz, 15 kHz 인근에서는 두 센서의 응답 크기가 비슷하게 나타났다. PTFE 센서의 경우 16 kHz ~ 19 kHz 대역에서의 응답 성능이 10 kHz ~ 15 kHz에서의 응답 성능보다 높음을 알 수 있다. 이는 맨드릴의 특성, 실험 조건 등과 관련이 있어 보인다. 그림 12 및 그림 13에서와 같이 TLS 광원을 이용한 광섬유 센서는 CW 광원의 경우와 마찬가지로 음원 주파수에 잘 응답함을 알 수 있다.

그림 14에는 그림 8과 그림 13의 결과를 이용하여 CW 광원과 TLS 광원에서 응답한 PTFE 센서의 특성을 주파수

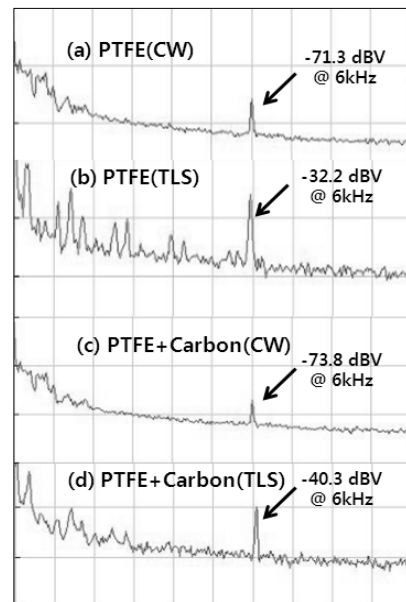


그림 15. CW와 TLS일 때 FOS의 감지 신호 주파수 스펙트럼 (음원 6 kHz, 수평축: 주파수 (1 kHz/div.), 수직축: 크기 (20 dBV/div.))
 Fig. 15. Frequency spectrum comparison of the FOS detected signal in the case of CW and TLS (sound source: 6 kHz, horizontal axis: frequency (1 kHz/div.), vertical axis: magnitude (20 dBV/div.)).

별로 상호 비교하여 본 것이다. 광원이 CW일 때 보다 TLS일 때 응답 특성이 우수함을 알 수 있다. 물론 하이브리드 시스템에서는 그림 9와 같이 단일 센서를 교체하면서 사용하였고 CW 광원인 경우 그림 5와 같이 4개의 배열 센서로 구성되어 동시에 측정하였으므로 단일 센서에 공급되는 광량은 서로 다를 것이다. 그림 5에 입사된 광량이 그림 9에서 보다 많으므로 그림 14와 같은 특성을 얻는 것은 당연한 결과이다.

그림 15에는 음원 주파수가 6 kHz 일 때 두 종류의 센서가 두 종류의 광원으로 바꾸었을 때 보인 응답 특성을

나타내었다. CW 광원의 경우 PTFE 센서 (a)의 응답 크기는 -71.3 dBV, 카본 센서 (PTFE+carbon) (c)는 -73.8 dBV로 비슷하게 나타났으나 TLS 광원의 경우 PTFE 센서 (b)의 응답 크기는 -32.2 dBV인 반면 카본 센서 (PTFE+carbon) (d)는 -40.3 dBV로 낮게 나타났다.

본 실험을 통하여 제작된 두 종류의 광섬유 센서는 FBG와의 하이브리드 시스템에 적용 가능함을 알 수 있었고 TLS 광원에서도 CW 광원의 경우와 마찬가지로 외부 음원을 잘 감지함을 확인하였다. 음원의 주파수별로 광섬유 센서의 응답 특성이 다른 것은 맨드릴의 형상에서 오는 고유진동수의 변화와 실험 조건 변화 등에 따른 것으로 사료된다. MaMahon 등 [13]과 Lee 등 [14]의 이론 결과인 식 (1)은 향후 주파수에 의존하는 위상 변화량 식으로 수정할 필요가 있다. 또한 향후 음향, 진동, 온도, 스트레인의 동시 측정을 통하여 구조물의 건강 모니터링 (structural health monitoring)을 목표로 하는 하이브리드 시스템의 배열로도 구성 가능함을 확인시켜주는 것이다.

IV. 결론

본 연구의 목적은 절연유 속에서 절연 파괴가 일어날 때 발생하는 음압을 감지할 수 있는 Sagnac 간섭계 센서와 온도 및 스트레인을 측정할 수 있는 FBG (Fiber Bragg Grating) 센서를 결합한 새로운 형태의 하이브리드 광섬유 센서 시스템을 구축하기 위한 것이다. 하이브리드 시스템의 입력 광원이 TLS (Tunable Laser Source)이므로 CW를 대체할 필요가 있어 이에 따라 광원의 변화와 맨드릴 재료의 변화에 따른 광섬유 센서의 응답 특성 연구가 필요하게 되었다.

광섬유 센서로 구성할 수 있는 일반적인 방법은 원통형 맨드릴 (mandrel)에 광섬유를 감아 사용하는 것이다. 제작된 맨드릴 재료는 PTFE와 PTFE에 카본을 섞어 만든 두 종류로 제작하였다. 외경 30 mm, 길이 45 mm, 두께 2 mm인 중공 원통형 맨드릴 겉면에 광섬유를 18 m 감아 광섬유 센서를 4개 제작하였다. 음원은 실제 유중에서 음을 발생시키기 위하여 원통형 세라믹에 광섬유를 감아 만든 것으로 사용하였다. 크기가 $600\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 520\text{ mm}$ 인 아크릴 사각형 통속에 트랜스포머 오일을 약 70% 정도 채우고 광섬유 센서 4개 (PTFE 및 PTFE+carbon 센서 각 2개)와 세라믹 음원 발생장치를 설치하였다.

먼저 CW 광원에 대한 광섬유 센서의 응답 특성으로 보기 위하여 Sagnac 간섭계형 배열 센서를 구성하고 음

원의 입력 주파수를 1 kHz ~ 20 kHz까지 바꾸어 가며 실험하였다. PTFE 센서는 주파수 7 kHz에서 -64.6 dBV로 최고치를 보였고 16 kHz에서 -79.4 dBV로 최저치를 나타내었다. 반면 카본 센서는 19 kHz에서 -70.9 dBV로 최고치를 보였고 17 kHz에서 -81.3 dBV로 최저치를 나타내어 대조를 보였다. PTFE 센서의 탐지 크기는 카본 센서 탐지 크기보다 높음을 알 수 있었으며 이는 MaMahon [13]의 이론 결과인 광 위상 변화량을 높이기 위하여 맨드릴 재료의 탄성계수 값이 적을수록 커진다는 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다 [14]. 유중에서 응답 크기는 공기 중에서의 응답 [10-11]보다 최저 9.1%에서 최고 53.3%의 증가율을 보였으며 음원 주파수가 높아지면 응답 특성도 좋아짐을 알 수 있었다.

TLS 광원에 대한 광섬유 센서의 응답 특성을 보기 위하여 FBG와 맨드릴형 광섬유 센서를 결합한 하이브리드형 광섬유 센서 시스템을 구성하고 음원의 입력 주파수를 4.5 kHz ~ 20 kHz까지 바꾸어 가며 실험하였다. 실험 결과 전 주파수 대역에서 PTFE 센서의 응답 성능이 높게 나타났다. 그러나 11 kHz, 12 kHz, 15 kHz 인근에서는 두 센서의 응답 크기가 비슷하게 측정되었고 PTFE 센서의 경우 16 kHz ~ 19 kHz 대역에서의 응답 크기가 10 kHz ~ 15 kHz에서의 응답 크기보다 높게 나타났다. TLS 광원을 이용한 광섬유 센서는 CW 광원의 경우와 마찬가지로 음원 주파수에 잘 응답함을 알 수 있었다.

CW 광원과 TLS 광원에서 응답한 PTFE 센서의 특성을 주파수별로 상호 비교하여 보면 광원이 CW일 때 보다 TLS일 때 응답 특성이 우수함을 알 수 있었다. 이는 하이브리드 시스템에서는 단일 센서를 교체하면서 사용하였고 CW 광원인 경우 4개의 배열 센서로 구성되어 동시에 측정하였으므로 단일 센서에 공급되는 광량이 서로 다르기 때문인 것으로 사료된다.

본 연구를 통하여 제작된 두 종류의 광섬유 센서는 FBG와의 하이브리드 시스템에 적용 가능함을 알 수 있었고 TLS 광원에서도 CW 광원의 경우와 마찬가지로 외부 음원을 잘 감지함을 확인하였다. MaMahon 등 [13]과 Lee 등 [14]의 이론 결과인 식 (1)은 향후 주파수에 의존하는 위상 변화량 식으로 수정할 필요가 있다. 향후 음향, 진동, 온도, 스트레인의 동시 측정을 통하여 구조물의 건강 모니터링 (structural health monitoring)을 목표로 하는 하이브리드 시스템의 구현에 본 연구 결과를 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력 연구원 (R-2008-25)주관으로 수행된 과제입니다.

참고 문헌

1. D. A. Jackson and J. Jones, "Fiber optic sensors," *OPTICA ACTA*, vol. 33, no. 12, pp. 1469-1503, 1986.
2. L. M. Lyamshev and Y. Y. Smirnov, Y. Y., "Fiber optic sensors (review)," *Sov. Phys. Acoust.*, vol. 29, no. 3, pp. 169-180, 1983.
3. 이종길, 윤희규, 설재수, 김대환, "실험을 통한 간섭계형 광섬유 청음기의 음향신호 감지성능 연구," *한국소음진동공학회지*, 7권, 6호, 901-906쪽, 1997.
4. 이종길, 이준호, 김상준, "광섬유 Sagnac 간섭계를 이용한 유증 방전 신호검출," *전기학회논문지*, 49C권, 11호, 622-626쪽, 2000.
5. 이종길, 박윤석, 이준호, "광섬유 간섭계 센서를 이용한 부분방전 음압 측정," *한국음향학회지*, 21권, 7호, 614-623쪽, 2002.
6. J. Lee, "Acoustic Signal Detection of Partial Discharge using an Interferometric Fiber Optic Sensor," *Proceedings of the ASK-ASJ Joint Conference on Acoustics*, pp. 5-8, 2003.
7. 고기한, 박영, 조용현, 정호성, 조용석, 최원석, "FBG 센서를 활용한 온도 및 스트레인 변화 모니터링," *전기전자재료학회논문지*, 22권, 3호, 218-221쪽, 2009.
8. 허진석, 김만섭, 이정주, "광섬유 브래그 격자를 이용한 촉각센서용 유연 단위 힘 센서 개발," *센서학회지*, 15권, 4호, 251-256쪽, 2006.
9. 신대용, 권기태, 이종길, 이준호, "수중에서 Sagnac 간섭계를 이용한 광섬유 센서의 지향성에 관한 연구" *2002년 대한전기학회 하계학술대회논문집 (C)*, 1714-1716쪽, 2002.
10. 이종길, "광섬유 배열 센서의 방향성에 따른 음압 탐지 실험," *한국소음진동공학회 2010년 춘계학술대회논문집*, 248-249쪽, 2010.
11. J. Lee, 2010, "Sound detection characteristics under different positions of the fiber optic sensor arrays using Sagnac interferometer," *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics*, Australia, 2010.
12. P. J. Nash and J. Keen, J., "Design and construction of practical optical fiber hydrophones," *Proceedings of the Institute of Acoustics*, vol. 12, pp. 201-212, 1990.
13. G. W. McMahon and P. G. Cielo, "Fiber optic hydrophone sensitivity for different sensor configurations," *Applied Optics*, vol. 18, no. 22, pp. 3720-3722, 1979.
14. 이종길, 윤희규, 서인창, "끝단이 막힌 중공 원통형 광섬유 하이브리드 로폰의 감도해석," *한국소음진동공학회지*, 6권, 4호, 475-479쪽, 1996.

저자 약력

•이 종 길 (Jongkil Lee)

한국음향학회지 제28권 제2E호 참조