

Acoustic Sensitivity Analysis of a Ring-type Probe Based on a Fiber-optic Sagnac Interferometric Sensor

Yeon-Woo Lee^{1,3}, Hyu-Sang Kwon², and Il-Bum Kwon^{3†}

¹Department of Measurement Science, University of Science and Technology, 267, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

²Center for Optical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, 267, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

³Center for Safety Measurement, Korea Research Institute of Standards and Science, 267, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

(Received November 20, 2019; Revised December 19, 2019; Accepted December 19, 2019)

To measure underwater acoustics using a fiber-optic Sagnac interferometric sensor, the sensitivities of ring-type probes are investigated by theoretical and experimental studies. A ring-type probe was fabricated by packaging a single-mode fiber wound around an acrylate cylinder of diameter 5 cm with epoxy bond. The probes were prepared as A-type, which was packaged with 46.84 m of sensing optical fiber, and B-type, which was packaged with 112.22 m of sensing fiber. The underwater acoustic test was performed at frequencies of 50, 70, and 90 kHz, and over a range of acoustic pressure of 20-100 Pa, to study the sensitivity. A commercial acoustic generator was located 1 m from the acoustic sensor, such as the ring-type probe or a commercial acoustic sensor. From the experimental test, the acoustic sensitivity of the ring-type probe had different values due to acoustic frequencies, unlike the theoretical prediction. Therefore, the experimental sensitivities were averaged for comparison to the theoretical values. These averaged sensitivities are 25.48×10^{-5} rad/Pa for the A-type probe and 60.79×10^{-5} rad/Pa for the B-type probe. The correction coefficient of Young's modulus c was determined to be 0.35.

Keywords: Sagnac interferometric sensor, Ring-type probe, Single mode optical fiber, Acoustic wave

OCIS codes: (060.5310) Fiber optics; (120.3180) Interferometry; (120.5050) Phases measurement; (120,5475) Pressure measurement; (120.5790) Sagnac effect

광섬유 사낙 간섭형 센서에 기반한 링형 탐촉자의 수중 음향 민감도 해석

이연우^{1,3} · 권휴상² · 권일범^{3†}

¹과학기술연합대학원대학교 측정과학과
☎ 34113 대전광역시 유성구 가정로 267

²한국표준과학연구원 광학표준센터
☎ 34113 대전광역시 유성구 가정로 267

³한국표준과학연구원 안전측정센터
☎ 34113 대전광역시 유성구 가정로 267

(2019년 11월 20일 받음, 2019년 12월 19일 수정본 받음, 2019년 12월 19일 게재 확정)

광섬유 사낙 간섭형 센서를 이용해 수중 음향을 측정하기 위하여 링형 탐촉자를 적용하는 경우 민감도를 이론과 실험을 통하여 조사한다. 링형 탐촉자는 단일 모드 광섬유를 지름 5 cm의 링형으로 감아서 접착제로 패키징하였다. 링형 탐촉자는 감지 광섬유의 길이를 46.84 m로 하여 제작한 A형 탐촉자와 감지 광섬유의 길이를 112.22 m로 한 B형 탐촉자를 준비하였다. 수중 음향 시험은 상용 음향 발생기와 1 m 떨어진 거리에서 링형 탐촉자를 사용하여 50, 70, 90 kHz의 주파수에 대하여 20~100 Pa의 음향 압력 범위에서 음향 민감도를 조사하는 실험을 수행하였다. 실험 결과, 링형 탐촉자는 주파수에 대하여 다른 민감도를 나타내었으며, 이론과 비교하기 위하여 평균값을 구하였다. 세 주파수에 대한 평균 민감도는 A 탐촉자와 B 탐촉자에 대하여 각각 25.48×10^{-5} , 60.79×10^{-5} rad/Pa으로 측정되었으며, 이로부터 영률 보정 계수 c 값을 0.35로 결정할 수 있었다.

Keywords: 사낙 간섭형 센서, 링형 탐촉자, 단일모드 광섬유, 음향파

OCIS codes: (060.5310) Fiber optics; (120.3180) Interferometry; (120.5050) Phases measurement; (120,5475) Pressure measurement; (120.5790) Sagnac effect

†E-mail: ibkwon@kriss.re.kr, ORCID: 0000-0002-1400-6951

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

I. 서론

광섬유는 비전도체인 유리로 제작되었기 때문에 광섬유 센서는 전자기 간섭(electromagnetic interference)이 없고, 가격이 저렴하여 다양한 분야에 사용할 수 있다^[1]. 이러한 장점을 지닌 광섬유 간섭형 센서 중에서 사냥 간섭형 센서는 자이로^[2], 온도^[3], 압력^[4], 전류 센서^[5] 등으로 사용하기 위하여 연구 개발되었다. 특히, 수중 음향을 검출하기 위한 사냥 간섭형 센서 연구는 최근까지도 계속 연구가 진행되고 있다. 미국의 Udd, E.는 사냥 간섭형 센서를 2×2 커플러와 광섬유 코일을 연결하여 제작하고 코일에 작용하는 압력이 시계 방향과 반시계 방향으로 돌아오는 빛의 위상 혹은 편광을 변화시키는 원리를 이용하는 음향 하이드로폰을 제안하였다^[6]. Krakenes, K. 외 1명은 3×3 커플러를 사용하는 사냥 간섭형 센서의 코일에 작용하는 음압을 일정한 크기의 진폭을 갖는 정현파 형태의 신호로 가정하고, 광섬유의 굴절률과 코일의 길이, 음파의 주파수에 따른 사냥 간섭형 센서의 위상 변화를 이론적으로 분석하였다^[7]. 또 Knudsen, S. 외 1명은 0.4~1.5 MHz 주파수 범위의 수중 음향 신호를 평면파로 가정하고 36~43 dB re 1 μPa/Hz¹에 해당하는 잡음 등가 압력을 이론적으로 근사하여 실험값과 비교하였다^[8]. 최근에는 이중길은 변압기 내부에서 부분 방전이 발생함에 따른 음향파를 검출하기 위해, 사냥 간섭형 코일을 중공 원통형 맨드릴의 재료 및 방향에 따라 음압을 감지하는 연구를 진행하였다^[9]. 이러한 기존 연구에서는 수중 음향파의 압력이 광섬유의 모든 부분에서 작용하는 것으로 고려하고 있다. 일반적으로 수중에서 이 탐촉부의 크기가 음향파의 파장보다 매우 작은 경우, 탐촉부에 가해지는 압력은 정수압(hydrostatic pressure)이나 방사형 압력(radial pressure)으로 가정할 수 있다^[10]. 이러한 기존 연구에서는 음향 주파수 응답 특성을 주로 고찰하였으며 음향 압력에 대한 민감도 연구는 거의 진행되지 않았다.

따라서 본 논문에서는 사냥 간섭형 센서에 의하여 수중 음향을 측정하는 탐촉자를 패키징하였을 때를 고려한 이론적인 정식화를 수행하였다. 음향 시험은 50~90 kHz의 주파수 범위와 20~100 Pa의 음향 압력 범위에서 수행하였다. 실험으로부터 구해진 민감도로부터 이론식의 영률 보정 계수 값을 구하였다.

II. 광섬유에 의한 음향 감지 이론

음향을 측정하기 위한 감지부로 광섬유를 사용하는 경우 음향 압력이 감지 광섬유에 작용하면 광학 위상이 변화될 것이다. 그래서 음향 압력과 광섬유 간섭형 센서의 출력인 광학 위상의 관계를 이론적으로 살펴본다. 또한 음향 감지를 위한 센서인 광섬유 사냥 간섭계의 원리에 대하여 정리한다.

2.1. 광학 위상과 음향 압력의 관계

단일모드 광섬유를 등방성 물체로 가정하면, 광탄성 계수는 식 (1)과 같은 대칭 행렬로 정의할 수 있다.

$$\rho_{ij} = \begin{pmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{12} \\ \rho_{12} & \rho_{11} & \rho_{12} \\ \rho_{12} & \rho_{12} & \rho_{11} \end{pmatrix} \quad (1)$$

그림 1과 같이 빛이 진행하는 광섬유의 축 방향을 1, 다른 수직인 방향을 2, 3이라고 할 때, 광섬유에 작용하는 변형률은 식 (2)와 같이 기술된다^[11].

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{E} \begin{pmatrix} \sigma_1 - \nu^f(\sigma_2 + \sigma_3) \\ \sigma_2 - \nu^f(\sigma_1 + \sigma_3) \\ \sigma_3 - \nu^f(\sigma_1 + \sigma_2) \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 은 각각 광섬유의 1, 2, 3축 방향으로 작용하는 응력, E 와 ν^f 는 각각 영률과 프와송비를 나타낸다.

센서 헤드의 크기가 음파의 파장보다 매우 작은 광섬유의 경우 정수압(hydrostatic pressure)이 광섬유에 작용한다고 가정할 수 있으므로 응력은 식 (3)과 같이 기술할 수 있다.

$$\Delta\sigma = \begin{pmatrix} -\Delta P \\ -\Delta P \\ -\Delta P \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서 Δp 는 센서에 작용하는 압력 차이이다.

식 (3)을 식 (2)에 대입하면 변형률은 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

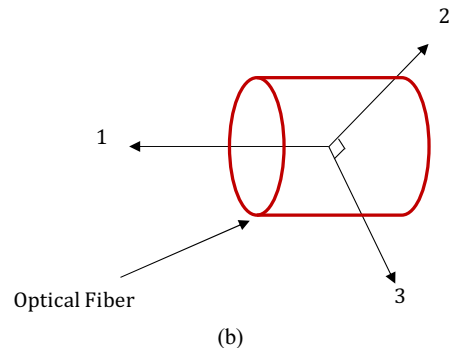
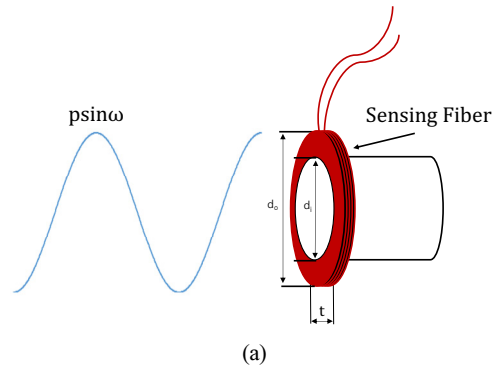


Fig. 1. Probe of a fiber-optic Sagnac interferometric sensor for acoustic sensing. (a) Acoustic probe with a sensing fiber. (b) Coordinates of optical fiber.

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{pmatrix} = -\frac{\Delta P}{E} \begin{pmatrix} 1-2\nu^f \\ 1-2\nu^f \\ 1-2\nu^f \end{pmatrix} \quad (4)$$

2.2. 광섬유 사냥 간섭계

그림 2와 같은 간섭계에서 레이저 다이오드의 빛이 1번 포트에 들어가면, 2×2 커플러로 나누어져서 시계 방향(clockwise)과 반시계 방향(counter clockwise)으로 진행하게 되고, 이 두 빛은 커플러로 돌아오면서 다시 합쳐진다. 입력 광의 전기장이 E_0 이라 할 때, 2번과 4번 포트에 돌아오는 CW와 CCW의 전기장 식은 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} E_{CW} &= \sqrt{\gamma_0} E_0 \exp(j[\omega t + \phi_{CW}]), \\ E_{CCW} &= \sqrt{\gamma_0} E_0 j \exp(j[\omega t + \phi_{CCW}]) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 γ_0 는 2×2 커플러의 감쇠비로 약 0.5에 해당하며, ϕ_{CW} 와 ϕ_{CCW} 는 CW와 CCW 방향을 지나 커플러로 돌아오는 빛의 위상이다. 광 검출기에 도달하는 빛의 전기장은 식 (6)과 같다.

$$E_D = \frac{1}{2} E_0 \exp(j[\omega t + \phi_{CW}]) - \frac{1}{2} E_0 \exp(j[\omega t + \phi_{CCW}]) \quad (6)$$

광 검출기에 도달하는 빛의 강도는 식 (6)과 그 공액 복소수 곱으로 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$I = E_D \cdot E_D^* = \frac{1}{4} |E_0|^2 [1 - \cos(\phi_{CW} - \phi_{CCW})] \quad (7)$$

사냥 간섭계는 입력 광의 편광상태에 의존하므로 가시도를 V 로 표기하면, 입력광은 I_0 로 정규화할 수 있으며, 간섭광 I' 의 강도는 식 (8)로 정리된다^[12].

$$I' = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{4} |E_0|^2 [1 - V \cos\{\phi_0 + \phi_b\}] \quad (8)$$

여기서 ϕ_0 는 CW와 CCW의 위상 차이이고, ϕ_b 는 간섭계의 위상사분점(quadrature point)에 해당한다.

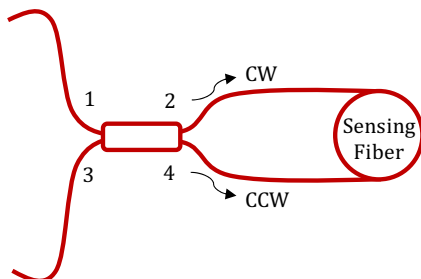


Fig. 2. Fiber-optic Sagnac interferometer.

일반적으로 광섬유 간섭형 센서는 외부에서 작용하는 압력에 의하여 광섬유의 길이 변화와 굴절을 변화에 의해서 위상 변화가 발생한다. 광섬유의 길이 변화는 식 (4)를 고려하고, 압력에 따른 굴절을 변화는 식 (1)과 압력 관계를 사용하여 정리하면 식 (9)의 위상 변화식을 얻게 된다^[13].

$$\frac{\Delta \phi_0}{\Delta P \cdot L_s} = \frac{+2\pi n}{\lambda} c \frac{(1-2\nu^f)}{E} \left[\frac{n^2}{2} (\rho_{11} + 2\rho_{12}) - 1 \right] \quad (9)$$

여기서 L_s 는 감지광섬유의 길이, λ 는 빛의 파장, ρ_{11} 과 ρ_{12} 는 식 (1)의 광탄성 계수이다. 또한 c 는 영률 보정 계수로 실험값과 이론값을 비교하여 보정하는 상수이다.

실리카(fused silica) 광섬유의 프와송비 ν^f 는 0.17, 영률 E 는 73 Gpa, 광탄성 상수 ρ_{12} 와 ρ_{11} 은 각각 0.27, 0.12, 또 굴절률 n 은 1.4682으로 알려져 있다^[11]. 단위 길이와 압력에 따른 간섭계의 위상변화를 나타내는 식 (9)에 이 값들을 대입하면 식 (10)의 음향 압력에 대한 위상 민감도 식을 얻게 된다.

$$\frac{\Delta \phi_0}{\Delta P \cdot L_s} = c \times 1.55 \times 10^{-5} \text{ rad} \quad (10)$$

III. 광섬유 사냥 간섭형 센서의 구성 및 실험

3.1. 음향 감지를 위한 광섬유 사냥 간섭형 센서의 구성

음향 감지를 위한 광섬유 사냥 간섭형 센서를 그림 3과 같이 구성하였다. 광원은 DFB 레이저 다이오드를 사용하였는데 파장은 1550 nm이고, 광 세기는 1.77 mW를 출력하도록 하였다. 이 빛은 2×2 광섬유 커플러로 입사되어 시계 방향과 반시계 방향으로 빛이 진행하도록 하였다. 광섬유 탐촉자는 커플러를 통과한 후 중간 부분에 위치하도록 설치하였다. 음향이 이 탐촉자의 굴절을 변화시키면 커플러로 되돌아오는 시계 방향 빛과 반시계 방향 빛 사이에 간섭 위상이 발생하여 광검출기에는 음향파에 비례하는 출력 신호를 얻는다. 광섬유 센서에 사용된 광원은 1550 nm 파장의 출력을 갖는 Thorlabs 사의 S3FC1550 제품을 사용하였으며, 2×2 광학

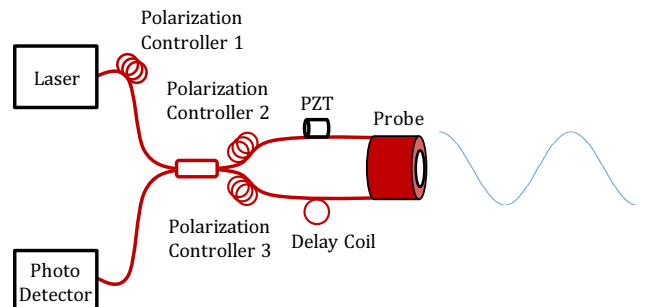


Fig. 3. Configuration of the fiber-optic Sagnac interferometric sensor with an acoustic probe.

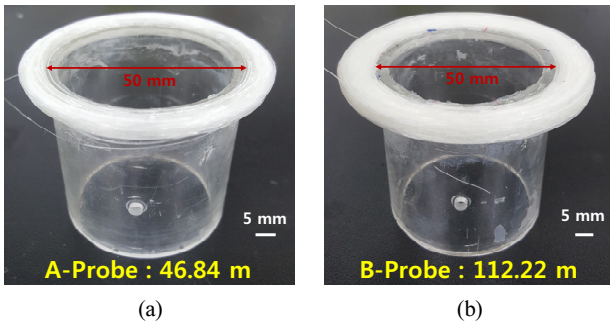


Fig. 4. Two types of probe. (a) A-probe with the fiber length of 46.84 m. (b) B-probe with the fiber length of 112.22 m.

커플러는 50:50으로 분기하는 East Photonics 사의 제품을 사용하였다. 한편 광학 검출기는 30 dB 게인을 갖는 Thorlabs 사의 PDA10CS-EC 제품을 사용하였다. 광원으로부터 나온 빛은 편광 조절기 1을 통해서 편광을 조절하였으며, 커플러를 통해 분기하는 두 빛은 각각 편광 조절기 2와 PZT 그리고 편광 조절기 3과 리드 광섬유 케이블을 진행한다.

광섬유 사냥 간섭형 센서의 초기 위상에 따라서 센서의 민감도가 달라지기 때문에 사냥 루프에 편광 조절기(East Photonics)를 추가하였다. 또한, 한 파장에 해당하는 위상을 알아내기 위해서 PZT를 사냥 루프에 설치하였는데, 이 PZT와 편광 조절기를 이용하여 음향에 가장 민감한 간섭계의 위

상 사분점(quadrature point)을 찾아서 작동시킨다. 한편, 광섬유 탐촉자가 사냥 루프의 중간 부분에 위치하도록 리드광섬유의 길이를 14.12 m로, PZT에 감긴 광섬유의 길이는 14.39 m로 구성하였다.

단일 모드 광섬유(Corning, SMF-28)를 각각 46.84 m의 길이로 지름 5 cm의 아크릴 통에 감아서 제작한 A-탐촉자와 112.22 m의 길이를 갖는 광섬유를 동일한 크기의 아크릴 통에 감아서 패키징한 B-탐촉자를 제작하였다. 이렇게 제작한 두 탐촉자의 사진을 그림 4에 보였다. 이 A-탐촉자와 B-탐촉자의 감지광섬유는 순간접착제(Kyowa, CC-33A)로 접착되었다. 고정된 원형 링 모양의 A-탐촉자와 B-탐촉자는 내경(d_i)가 5 cm로 두 개의 탐촉자 모두 같으며, 외경(d_o)이 각각 6.2, 7.1 cm로 제작되었다. 또 탐촉자의 두께 t 는 각각 4.95, 5.75 mm로 제작되었다.

3.2. 실험 셋업 및 조건

음향을 발생시키면서 제작한 탐촉자의 민감도를 확인하는 실험을 수행하기 위하여 수조에서 음향을 발생시키고 광섬유 탐촉자의 음향 감지 특성을 확인하는 실험을 셋업하였다. 이 실험을 위하여 가로 2 × 세로 1 × 높이 1.5 m의 크기를 갖는 음향 수조를 그림 5와 같이 준비하였다. 음향 발생기와 광섬유 센서 탐촉자를 수조 안에 평행하게 설치하여 음향 발생에 따른 신호를 직접 수신하도록 하였다. 수조에는 물을

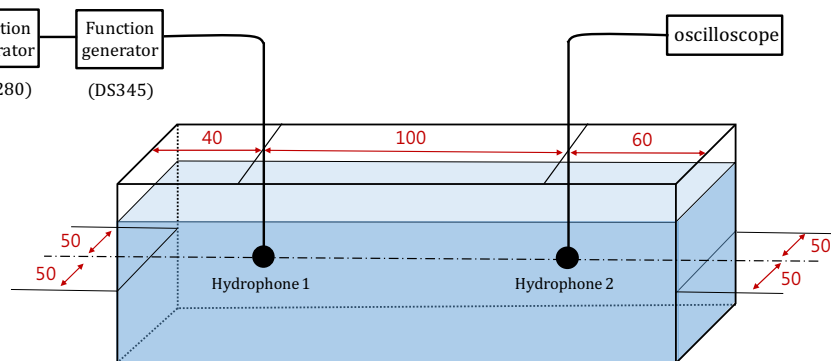


Fig. 5. Experimental setup: acoustic generation and sensing using hydrophones.

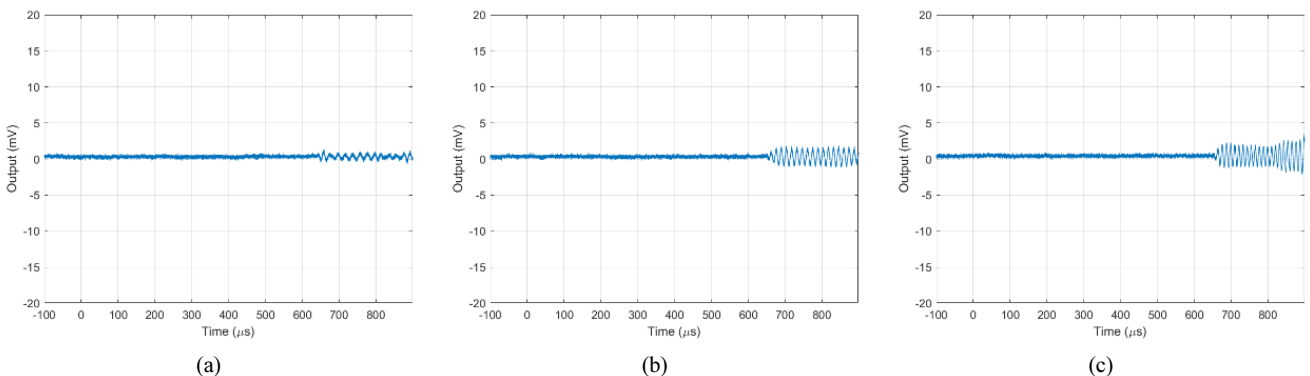


Fig. 6. Hydrophone responses to acoustic waves with (a) 50 kHz, (b) 70 kHz, (c) 90 kHz at 20 Pa.

약 83 cm 높이로 채우고 표면으로부터 약 38 cm의 깊이에 음향 발생 장치와 센서를 1 m의 거리를 두고 설치하였다. 이와 같이 음향파의 반사파를 제외하고 직접 수신되는 신호만 취득하도록 실험을 수행하기 위하여 짧은 주기로 음향을 발생시키고 음향 발생 시작 시간부터 광섬유 센서 신호를 취득하였다. 이를 위하여 함수 발생기(CFG280)에 의하여 약 30 Hz의 주기를 갖는 25개의 정현파 톤-버스트 신호가 발생하도록 하이드로폰 1을 동작시키고, 수중 음향을 발생시키거나 측정하기 위한 상용 제품으로는 하이드로폰 2를 그림 5와 같은 구성으로 사용하였다.

50, 70, 90 kHz의 주파수에 대하여 20~100 Pa의 음향 압력 범위에서 음향파를 발생시키면서 제작한 광섬유 탐촉자로 측정하는 실험을 수행하였다. 상용 하이드로폰에 의하여 음향파 발생이 정상적인지를 확인하기 위하여 그림 5와 같이 상용 하이드로폰으로 수신하는 실험을 하였다. 20 Pa의 압력으로 50, 70, 90 kHz의 조건의 음향파를 거리 1 m에서 상용 하이드로폰으로 측정한 결과를 그림 6과 같이 얻었다. 이 때 하이드로폰의 수신 특성은 이 제품의 민감도 그래프에 주어진 특성값과 일치하였고, 이로부터 실험 조건에 해당하는 음향파가 정상적으로 발생하고 있음을 알 수 있었다.

광섬유 탐촉자를 그림 5의 하이드로폰 2와 동일한 위치에 그림 7과 같이 설치하였다. 하이드로폰 1에서 톤-버스트 음향파를 발생시키면서 광섬유 탐촉자 A와 B를 번갈아 설치하고 그 특성을 확인하였다. 이 때 상용 하이드로폰에 가해지는 전압이나 주파수 같은 실험 조건은 위의 상용 하이드로폰에 대한 실험과 동일한 조건으로 실험을 수행하여 광섬유 센서에 작용하는 음압을 확인할 수 있었다.

광섬유 사냥 간섭형 센서 시스템 안에 설치한 PZT를 구동하면서 편광조절기를 조정하여 간섭계의 출력 신호가 π 위상에 해당하는 정현파 신호를 얻을 수 있게 되면 사냥 간섭계 센서의 최적 작동 조건인 위상 사분점 작동 조건이 된다. 그래서 25 kHz의 정현파 전압 신호를 PZT에 인가하면서 편광 조절기 2와 3을 조정하여 그림 8과 같이 정현파 간섭계 신호를 확인하여 사분점 작동 조건으로 설정하여 실험을 수행하였다.

50, 70, 90 kHz의 주파수로 약 20 Pa의 음압의 차이가 발생할 때 A 탐촉자로 측정한 신호는 그림 9(a)~9(c)이고, B 탐촉자로 측정한 신호는 그림 10(a)~10(c)이다. 측정된 전압의 위상을 계산한 결과, 그림 9(a)~9(c)는 각각 5.59×10^{-3} , 5.97×10^{-3} , 4.54×10^{-3} rad이며, 그림 10(a)~10(c)는 각각

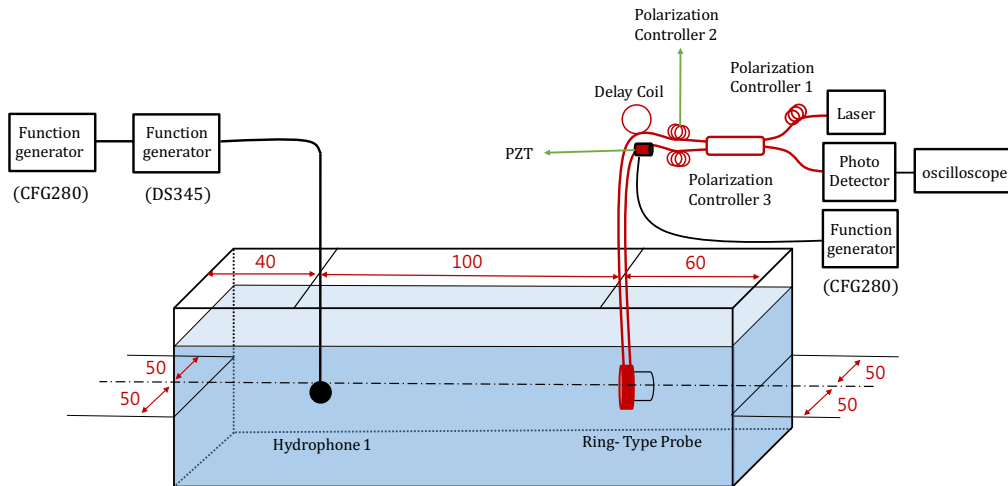


Fig. 7. Underwater acoustic test setup with the fiber-optic Sagnac interferometric sensor.

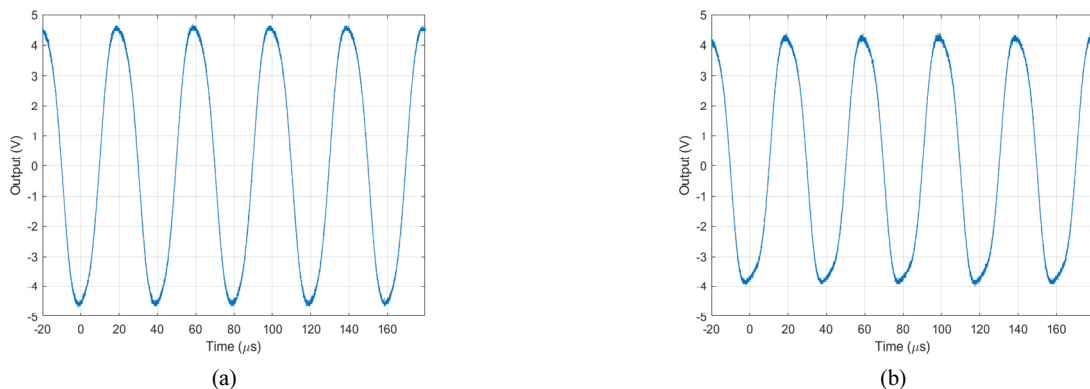


Fig. 8. Signal from the fiber-optic Sagnac interferometer with (a) A-probe, (b) B-probe as exciting the PZT cylinder.

12.97×10^{-3} , 9.60×10^{-3} , 9.67×10^{-3} rad에 해당한다. 음향 압력을 20~100 Pa 사이에서 약 10 Pa 간격으로 변화를 주면서 광섬유 센서로 음향을 측정하는 실험을 수행하였다. 이렇게 측정된 데이터를 사용하여 민감도를 계산하고 이론 값과 함께 그림 11에 나타내었다. 실험으로 측정된 50, 70, 90 kHz의 세 주파수의 평균 민감도는 A형 탐촉자와 B형 탐촉자가 각각 25.48×10^{-5} , 60.79×10^{-5} rad/Pa이다. B형 탐촉자의 경우 주파수에 따라서 민감도 차이가 크게 나타나고 있는데 그 이유는 링형 탐촉자 제작상의 편차로 사려된다. 실험으로부터 구한 평균 민감도를 각각의 탐촉자의 길이로 나누고, 식

(10)에 대입하여 영률 보정 계수 c 값을 구하면 0.35라는 계수가 구해진다. 이와 같이 패키징한 링형 탐촉자는 광섬유 자체의 영률보다 훨씬 큰 값을 갖는 효과를 가짐을 알 수 있다. 이러한 연구 결과는 수중 음향을 측정할 때 광섬유를 패키징함에 의하여 음향 민감도가 상당히 감소할 수 있음을 보이고 있다. 이제 이론식을 사용하여 A형 탐촉자와 B형 탐촉자의 민감도를 계산해 보면 25.46×10^{-5} , 61.00×10^{-5} rad/Pa이 되어 평균 민감도와 0.5% 이내의 오차만 존재한다. 이와 같이 이론값과 실험값이 거의 유사하여 두 탐촉자의 영률 보정 효과가 유효함을 알 수 있었다.

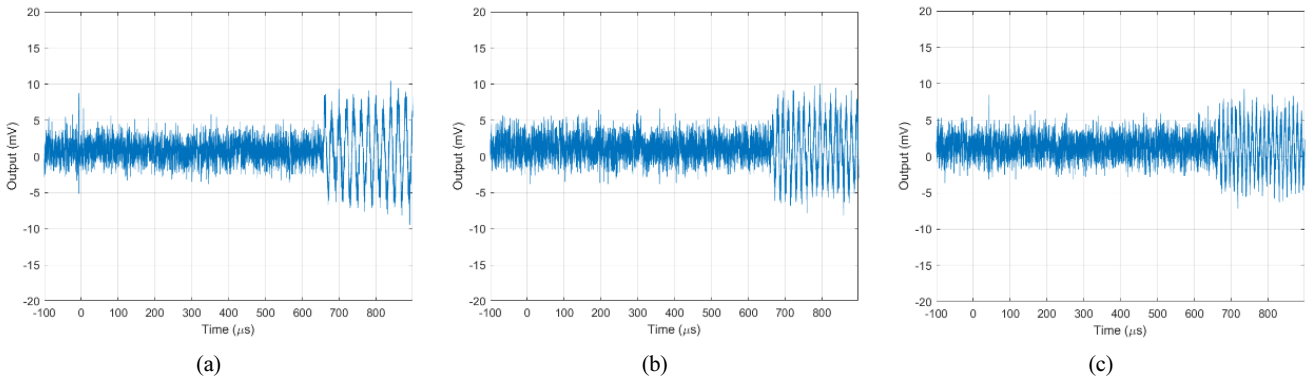


Fig. 9. A-probe sensing results of (a) 50 kHz acoustic signal, (b) 70 kHz acoustic signal, (c) 90 kHz acoustic signal at 20 Pa acoustic pressure.

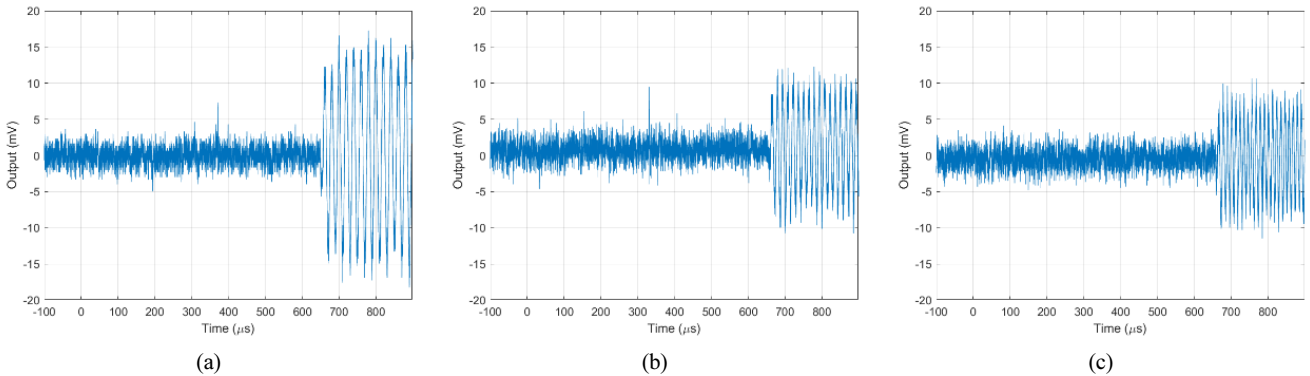


Fig. 10. B-probe sensing results of (a) 50 kHz acoustic signal, (b) 70 kHz acoustic signal, (c) 90 kHz acoustic signal at 20 Pa acoustic pressure.

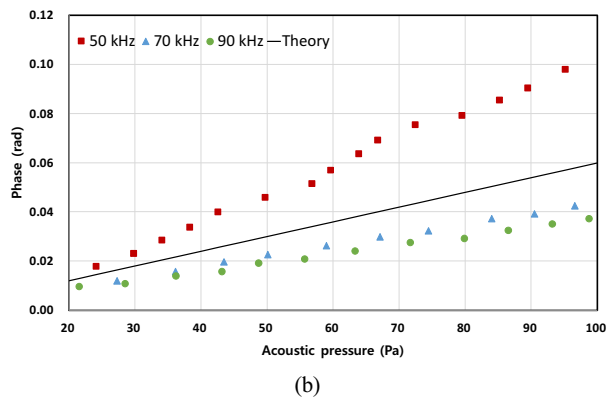
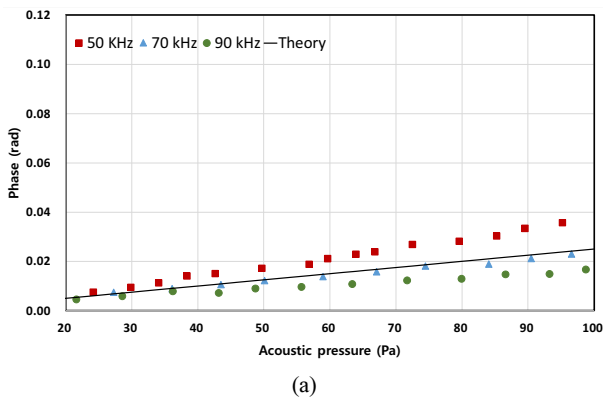


Fig. 11. Acoustic sensitivity of the Sagnac interferometric sensor with (a) A-probe, (b) B-probe.

IV. 결 론

수중에서의 음향을 감지하기 위한 광섬유 사냥 간섭형 센서에 기반한 링형 탐촉자의 민감도를 이론적으로 정식화하고 실험적으로 확인하는 연구를 수행하였다. 광섬유 탐촉자를 링 형태로 제작한 것을 고려하여 음향파의 음향 압력이 모든 방향으로 작용하는 것으로 수식화하였다. 이러한 정식화를 수행한 후 실험으로 확인하기 위하여 감지 광섬유의 길이를 각각 46.84, 112.22 m의 단일 모드 광섬유로 링 형태의 탐촉자를 제작하고 음향 수조에서 실험을 수행하였다. A형 탐촉자와 B형 탐촉자를 사용한 실험으로부터 각각의 평균 민감도는 25.48×10^{-5} , 60.79×10^{-5} rad/Pa로 결정되었다. 이 값을 사용하여 이론식으로부터 광섬유의 영률 보정 계수를 구해보면 0.35로 결정되었다. 이러한 결과로부터 링형 탐촉자는 패키징 효과에 의하여 영률이 상당히 증가하여 민감도를 감소시키는 효과가 있음을 알 수 있다. 한편, 결정된 영률 보정 계수를 사용한 이론식으로부터 구한 민감도와 실험으로부터 구한 민감도가 두 탐촉자에 대하여 0.5% 이내로 일치함을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 한국전력연구원의 ‘유입식 변압기의 광학적 부분방전 검출기술 개발’과제 지원으로 수행되었습니다. 이에 한국전력연구원 관계자 여러분에게 감사드립니다.

References

1. G. Wild and S. Hinckley, "Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: overview and state-of-the-art," *IEEE Sens. J.* **8**, 1184-1193 (2008).
2. M. Dignonnet, S. Blin, H. K. Kim, V. Dangui, and G. Kino, "Sensitivity and stability of an air-core fibre-optic gyroscope," *Meas. Sci. Technol.* **18**, 3089 (2007).
3. A. N. Starodumov, L. A. Zenteno, D. Monzon, and E. D. L. Rosa, "Fiber Sagnac interferometer temperature sensor," *Appl. Phys. Lett.* **70**, 19-21 (1997).

4. H. Y. Fu, H. Y. Tam, L.-Y. Shao, X. Dong, P. K. A. Wai, C. Lu, and S. K. Khijwania, "Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer," *Appl. Opt.* **47**, 2835-2839 (2008).
5. J. Blake, P. Tantaswadi, and R. T. D. Carvalho, "In-line Sagnac interferometer current sensor," *IEEE Trans. Power Delivery* **11**, 116-121 (1996).
6. E. Udd, "Fiber-optic acoustic sensor based on the Sagnac interferometer," *Proc. SPIE* **0425**, 90-95 (1983).
7. K. Kråkenes and K. Bløtekjaer, "Sagnac interferometer for underwater sound detection: noise properties," *Opt. Lett.* **14**, 1152-1154 (1989).
8. S. Knudsen and K. Bløtekjaer, "An ultrasonic fiber-optic hydrophone incorporating a push-pull transducer in a Sagnac interferometer," *J. Lightwave Technol.* **12**, 1696-1700 (1994).
9. J.-K. Lee, "Sound pressure sensitivity variation of the hollow cylinder type Sagnac fiber optic sensor according to the mandrel install direction and its material," *Trans. Korean Soc. Noise. Vibration Eng.* **22**, 626-633 (2012).
10. V. S. Sudarshanam and K. Srinivasan, "Static phase change in a fiber optic coil hydrophone," *Appl. Opt.* **29**, 855-863 (1990).
11. G. W. McMahon and P. G. Cielo, "Fiber optic hydrophone sensitivity for different sensor configurations," *Appl. Opt.* **18**, 3720-3722 (1979).
12. T. S. Jang, S. S. Lee, I. B. Kwon, W. J. Lee, and J. J. Lee, "Noncontact detection of ultrasonic waves using fiber optic Sagnac interferometer," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **49**, 767-775 (2002).
13. J. Posada-Roman, J. A. Garcia-Souto, and J. Rubio-Serrano, "Fiber optic sensor for acoustic detection of partial discharges in oil-paper insulated electrical systems," *Sensors* **12**, 4793-4802 (2012).
14. J. F. Nye, *Physical properties of crystals: their representation by tensors and matrices* (Clarendon Press, Oxford, UK, 1957), pp. 243-253.