

편광상이 고리 구조 기반 사낙 간섭계를 이용한 편광 간섭형 광섬유 압력 센서

(Polarimetric Fiber Pressure Sensor Incorporating Polarization-Diversity-Loop-Based Sagnac Interferometer)

류우찬* · 최성욱 · 이용욱**

(Uh-Chan Ryu · Sung Wook Choi · Yong Wook Lee)

Abstract

In this paper, we demonstrated a polarimetric fiber pressure sensor using a polarization-diversity-loop-based Sagnac interferometer(PDLSI) composed of polarization-maintaining fiber(PMF) and a fiber Bragg grating(FBG). In order to compare the pressure sensitivity for various kinds of PMF, three kinds of bow-tie PMF were employed as sensor heads. The maximum pressure sensitivity was measured as approximately -15.07nm/MPa , and an R2 value to represent sensor linearity was measured as ~ 0.992 at the sensor system using corresponding PMF over a pressure range of 0-0.3MPa. An FBG was utilized and located adjacent to the PMF segment for compensating temperature-induced errors in the measurement of pressure. The pressure sensitivity of the proposed sensor was improved by approximately four times compared with the previously reported pressure sensor based on polarization-maintaining photonic crystal fiber.

Key Words : Polarization-Maintaining Fiber, Pressure Sensor, Sagnac Interferometer, Birefringence

1. 서 론

* Main author : Pukyong National University, Specialized Graduate School Science & Technology Convergence LED Convergence Engineering, Assistant Professor

** Corresponding author : Pukyong National University, School of Electrical Engineering, Associate Professor; Pukyong National University, Interdisciplinary Program of Biomedical Mechanical & Electrical Engineering, Associate Professor

Tel : 051-629-6323, Fax : 051-629-6305

E-mail : yongwook@pknu.ac.kr

Received : 2015. 3. 9

Accepted : 2015. 6. 19

최근 산업 현장에서의 안전사고를 방지하기 위해 다수의 센서들이 사용되고 있는 추세이며, 새로운 센서들을 개발하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다. 수많은 센서들 중 특히 압력 센서는 다양한 산업분야에서 여러 가지 목적으로 사용될 수 있다. 주로 광통신선로로 사용되는 광섬유는 센서에도 응용이 가능한데, 이러한 광섬유를 이용한 압력 센서는 전자식 압력 센서에 비하여 소형 및 경량으로 제작 가능한 장점을 가지며, 전자기 간섭(electromagnetic interference)에 무

관한 특징을 갖는다. 또한 광섬유 압력 센서는 다중접에서 압력을 측정할 수 있는 잠재성을 지니고, 부식이나 습도에 강하여 일반 전선보다 수명이 길다는 장점이 있다. 대부분의 광섬유 압력 센서는 막(diaphragm)을 센서의 전환자(transducer)로 이용한 구조이다[1-2]. 그러나 이러한 세기(intensity) 기반 광섬유 센서의 정확도는 막의 표면으로부터 발생하는 광 세기의 변화, 광원의 출력 세기 변화, 센서부(sensor head)의 미세굴곡 손실(microbending loss) 등에 의해 큰 영향을 받는다. 따라서 최근에는 광 세기 기반의 압력 센서 대신 파장 변화를 측정하는 방식의 파장 암호화된 광섬유 압력 센서가 활발하게 연구되고 있다[3-7]. 이러한 파장 암호화된 광섬유 압력 센서들 중 간섭계(interferometer)를 이용한 광섬유 센서들이 주를 이루고 있으며, 최근에는 사냥(Sagnac) 간섭계 기반 센서가 활발히 연구되고 있다. 2008년 H. Y. Fu 연구진에서 발표한 길이 58.4cm의 편광유지 광자결정 광섬유(polarization-maintaining photonic crystal fiber : 이하 PM-PCF)를 이용한 사냥 간섭계 기반 편광 간섭형 압력 센서는 0-0.3MPa의 압력 측정 범위에서 ~3.42nm/MPa의 압력 민감도를 달성하였다[4]. 2년 후 동 연구진에서 60cm 길이의 PM-PCF와 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating 이하: FBG)를 결합한 형태의 센서부 구조를 제시하였고, 0-20MPa의 압력 측정 범위에서 ~3.24nm/MPa의 압력 민감도를 보고하였다[5]. 2013년에 보고된 FBG 기반의 광섬유 압력 센서는 0-1MPa의 압력 측정 범위에서 ~1.41nm/MPa의 압력 민감도를 얻을 수 있었다[7]. 현재까지 발표된 광섬유 압력 센서에서 최대 압력 민감도는 ~3.42nm/MPa이고, 최대 압력 측정 범위는 0-20MPa이었다. 그러나 PM-PCF로 구성된 광섬유 압력 센서의 경우 외부 온도 변화에 둔감하기는 하나 편광유지 광섬유(polarization-maintaining fiber: 이하 PMF)로 구성된 광섬유 압력 센서에 비해서 10배 이상 고가이고, 민감도는 절반 이하로 감소한다. 또한 광섬유의 구조가 주기적인 공기 구멍의 배열로 이루어져 있어 일반 광섬유와의 용착 접속(fusion splicing)이 어려워 용착 접속 손실이 커지게 되고, 증가된 접속 손실은 센서의 정확도를 저해할 수 있다.

본 논문에서는 편광 빔 분배기(polarization beam splitter: 이하 PBS), 1/2 파장판(half-wave plate: 이하 HWP), 1/4 파장판(quarter-wave plate: 이하 QWP), PMF, FBG로 구성된 편광상이 고리 기반 사냥 간섭계(polarization-diversity-loop-based Sagnac interferometer: 이하 PDLSI)를 이용하여, 센서부인 PMF에 압력 인가 시 출력 간섭 스펙트럼 파장 변화를 측정하여 인가 압력을 구할 수 있는 편광 간섭형 광섬유 압력 센서를 제안한다[8-9]. 제안된 센서의 센서부는 14cm 길이의 보우-타이(bow-tie) 형 PMF와 FBG로 구성하였다. 여기서 PMF는 편광 간섭(polarization interference)을 구현하여 간섭 스펙트럼을 생성시키기 위한 복굴절(birefringence) 요소로 사용되었다. 센서부에 압력 인가 시 PMF의 복굴절이 변화되고, 이러한 복굴절의 변화는 센서에서 출력되는 간섭 스펙트럼의 파장을 이동시키므로 파장 변위를 측정하면 센서부에 인가된 압력을 측정할 수 있다. 그리고 FBG는 압력 인가 시에도 그 반사 스펙트럼이 영향을 받지 않기 때문에, 센서부 주변 온도 변화를 보상하기 위한 목적으로 사용되었다. 제안된 센서를 이용하여 외부 인가 압력에 의한 간섭 스펙트럼의 변화를 세 가지 종류의 PMF에 대해서 실험하였으며, 0-0.3MPa의 압력 측정 범위에서 약 -15.07nm/MPa의 최대 압력 민감도를 얻을 수 있었다. 제안된 센서는 이전의 PM-PCF기반 압력 센서에 비해 압력 민감도를 약 4배정도 증가시켰으며, 센서부 광섬유의 길이는 약 4배정도 감소시켜 센서부의 구조를 더 간단히 구현할 수 있었다.

2. 실험 과정 및 결과

2.1 PDLSI를 이용한 압력 센서의 동작원리

그림 1은 제안된 광섬유 압력 센서 시스템의 모식도를 보여주고 있다. 제안된 광섬유 압력 센서 시스템은 광대역 광원(broadband light source: 이하 BBS), 광 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer: 이하 OSA) 그리고 PDLSI로 구성되어 있으며, PDLSI는 PBS, HWP, QWP, PMF, FBG로 이루어져 있다. PDLSI 내부에 위치하는 센서부는 길이 14cm의 보우-

타이형 PMF와 FBG로 구성되어 있다. 센서부와 PDLSI를 구성하는 다른 광학 요소들은 단일-모드 광섬유(single-mode fiber)로 연결된다. 제안된 압력 센서 시스템의 BBS에서 출력되는 입사광은 PBS를 통과한 뒤 수평과 수직의 서로 직교하는 편광(orthogonal polarization)을 가진 두 선형 편광 성분(linear polarization component)으로 나누어지는데, 두 편광 성분들 중 수평 편광 성분은 시계 방향으로 순환하고, 수직 편광 성분은 반시계 방향으로 순환한다. 나누어진 두 편광 성분이 PMF를 통과할 때, 각각의 편광 성분은 PMF 코어의 굴절률이 작은 고속축(fast axis)과 굴절률이 큰 저속축(slow axis)에 대응되는 두 편광 요소로 분해된다. 나누어진 두 편광 성분이 광섬유를 순환한 뒤 PBS에 다시 돌아올 때, PBS의 출력 단자에서 각각의 편광 성분(시계 방향 및 반시계 방향 순환 성분)에 의해서 두 개의 간섭 스펙트럼들이 생성된다. 이 때 생성된 두 간섭 스펙트럼들은 서로 직교하는 편광이므로 PBS의 출력 광 세기는 각 간섭 스펙트럼들의 광 세기의 산술 합이 된다. 따라서 임의의 편광을 가진 빛이 PBS에 입력되어 시계 및 반시계 방향으로 순환하는 광 세기 간의 비가 달라지더라도 PBS의 출력 광 세기 즉, PDLSI 출력 광 세기는 변화되지 않는다. 다시 말해 PDLSI는 입력 편광에 무관한 특성을 갖는다. PDLSI 내의 HWP와 QWP는 파장편을 통과하는 빛의 편광 상태를 바꿔주는 역할을 하며, HWP와 QWP의 방위각(azimuthal angle)을 조정함으로써 PDLSI에서 출력되는 간섭 스펙트럼의 소거율(extinction ratio)과 파장 위치를 조절할 수 있다.

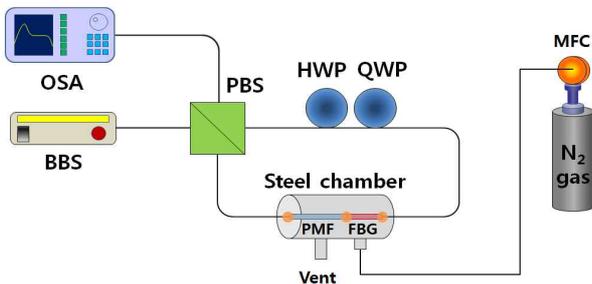


그림 1. 제안된 광섬유 압력 센서 시스템의 모식도
 Fig. 1. Schematic diagram of proposed fiber pressure sensor system

PMF와 FBG로 구성된 센서부는 금속 챔버(steel chamber) 내부에 위치하고, 질소(N₂) 가스를 금속 챔버 내부에 주입하여 금속 챔버 내부의 압력을 조절 가능하며, 부가적으로 금속 챔버 내부에 시험대를 설치하여 센서부를 고정시켰다. 그리고 질소 가스의 유량은 가스 흐름 조절기(mass flow controller: 이하 MFC)를 사용하여 조절하였다. 챔버 내부의 인가 압력 변화는 PMF의 복굴절을 변화시키고, 이러한 복굴절의 변화는 결과적으로 PDLSI 출력 간섭 스펙트럼의 파장을 이동시킨다. 따라서 간섭 스펙트럼의 파장 변위를 측정함으로써 인가된 압력을 추정할 수 있다. 하지만, PMF 주변의 온도가 변할 경우에도 PDLSI 출력 간섭 스펙트럼의 파장이 변하게 되므로 센서부 주변의 온도가 변하게 되면 센서 시스템의 압력 측정 정확도가 감소하게 된다. 제안된 압력 센서 시스템에서는 FBG를 PMF와 함께 사용하여 센서부 온도 변화를 보상할 수 있는데, FBG는 그 반사 스펙트럼의 파장이 외부 압력에는 영향을 받지 않고, 주변 온도 변화에 의해서 이동되기 때문이다. 예를 들어 센서부 주변의 온도가 변할 경우 FBG 반사 스펙트럼의 파장 변위를 측정하여 온도 변화를 추정하고, 이를 통해 온도 변화에 의한 PDLSI 출력 간섭 스펙트럼의 파장 변위를 보상하면 압력에 의한 간섭 스펙트럼의 파장 변위만을 알아낼 수 있다. 이와 같은 방식으로 PDLSI 출력 간섭 스펙트럼의 파장 변위와 FBG 반사 스펙트럼의 파장 변위를 함께 측정하면, 외부 온도 변화를 보상하며 센서부에 인가된 압력을 구할 수 있다.

상기 언급된 온도 보상 과정을 수식적으로 살펴보면 다음과 같다. PMF와 FBG로 구성된 센서부는 센서부 주변의 압력 변화(ΔP)와 온도 변화(ΔT)로 인해 각각 PMF의 복굴절로 결정되는 간섭 스펙트럼의 파장과 FBG 반사 스펙트럼의 파장이 변하게 되며, 각각의 파장 변위 $\Delta\lambda_{PMF}$ 와 $\Delta\lambda_{FBG}$ 는 식 (1) 및 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\lambda_{PMF} = K_1\Delta T + K_2\Delta P \quad (1)$$

$$\Delta\lambda_{FBG} = K_3\Delta T + K_4\Delta P \quad (2)$$

여기서 K_1 과 K_3 는 각각 간섭 스펙트럼의 파장 변위와 FBG 반사 스펙트럼의 파장 변위에 대한 온도 계수를 나타내고, K_2 와 K_4 는 각각 해당 스펙트럼의 파장 변위에 대한 압력 계수를 나타낸다. 여기서 FBG의 반사 스펙트럼은 외부 압력의 변화에도 파장 변화가 일어나지 않으므로 $K_4 = 0$ 로 생각할 수 있다. 식 (1)과 식 (2)는 행렬을 이용하여 식 (3)과 같이 하나의 식으로 표현할 수 있으며, 식 (4)와 같이 온도 및 압력 계수 K 에 대한 행렬의 역행렬을 이용하면 센서부 주변의 압력 및 온도 변화량(ΔP 및 ΔT)을 알아낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_{PMF} \\ \Delta\lambda_{FBG} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 & K_2 \\ K_3 & K_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta P \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 & K_2 \\ K_3 & K_4 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta\lambda_{PMF} \\ \Delta\lambda_{FBG} \end{pmatrix} \quad (4)$$

일반적으로 PMF의 복굴절로 발생하는 간섭 스펙트럼은 압력 및 온도 변화 시 모두 단파장으로 이동하는 청색 천이(blue shift)를 나타내므로 K_1 과 K_2 는 모두 음수가 되고, FBG의 반사 스펙트럼은 온도 변화 시 장파장으로 이동하는 적색 천이(red shift)를 나타내므로 K_3 는 양수가 된다. 따라서 계수의 차이가 명확하기 때문에 식 (4)에서 좀 더 정확하게 온도 및 압력 변화량을 구할 수 있고, 이를 통해 압력 측정 시 외부 온도가 변화되더라도 그로 인한 오차를 정확하게 보상하는 것이 가능하다[10].

2.2 실험결과 및 논의

제안된 압력 센서 시스템을 이용한 압력 측정 실험은 금속 챔버 내부의 압력이 0MPa에서 0.025MPa씩 0.3MPa까지 증가할 때, BBS(Fiberlabs FL7004)와 OSA(Yokogawa AQ6370C)를 이용하여 스펙트럼을 분석함으로써 수행되었다. 그림 2는 금속 챔버에 질소가스를 주입시키지 않았을 때(0MPa), 제안된 압력 센서 시스템의 PDL SI에서 측정된 간섭 스펙트럼을 보여주고 있다. 측정된 간섭 스펙트럼의 파장 간격

(fringe spacing)은 $\sim 39.66\text{nm}$ 이었고, 이러한 파장 간격은 PMF의 길이와 복굴절에 의해 결정되므로 파장 간격과의 관계식을 이용하여 추정된 PMF의 복굴절은 $\sim 4.41 \times 10^{-4}$ 이었다. 이러한 간섭 스펙트럼에서 QWP와 HWP의 방위각을 조정할 경우 간섭 스펙트럼의 소거율(extinction ratio)과 골(dip)의 파장 위치를 바꿀 수 있으며, 소거율이 최대($\sim 18.35\text{dB}$)인 골을 센서 표지자(sensor indicator)로 사용하였다. 선정된 센서 표지자의 파장은 $\sim 1578.66\text{nm}$ 이었고, FBG 반사 스펙트럼 첨두(peak)의 파장 위치는 $\sim 1546.78\text{nm}$ 이었다.

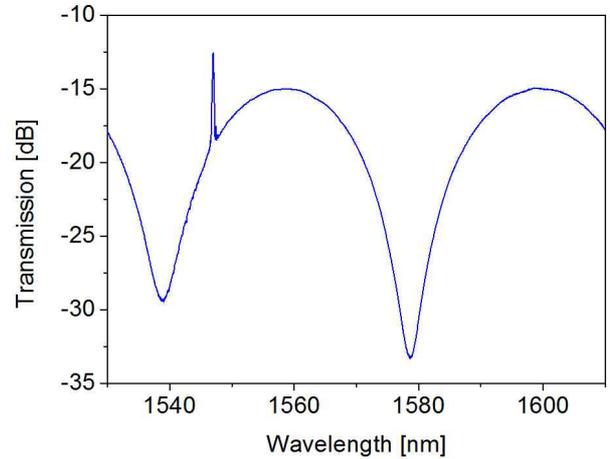


그림 2. 제안된 광섬유 압력 센서의 PDL SI에서 측정된 간섭 스펙트럼

Fig. 2. Interference spectrum measured in PDL SI of proposed fiber pressure sensor

그림 3은 0-0.3MPa의 압력 범위에서 0.025MPa씩 금속 챔버 내의 압력을 증가시켰을 때, 제안된 압력 센서 시스템에서 측정된 출력 간섭 스펙트럼의 변화를 보여주고 있다. 센서부에 인가되는 압력이 서서히 증가함에 따라 PMF의 복굴절이 변화되어 센서 표지자로 선택된 스펙트럼 골이 단파장으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 압력 인가에 따른 센서 표지자 이동에 대한 실험 결과를 수식적으로 논의해보면 다음과 같다. 제안된 압력 센서 시스템의 PDL SI에서 길이가 L 이고 복굴절이 B 인 PMF에 압력이 인가될 경우, 압력 인가로 인한 위상차(phase difference)의 변화($\Delta\delta$)에 따른 간섭 스펙트럼 골의 파장 변위($\Delta\lambda$)는 식 (5)

와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{BL} \frac{\Delta\delta}{2\pi} \quad (5)$$

여기서 λ 는 외란이 없는 경우 출력 간섭 스펙트럼에서 센서 표지자로 사용된 골의 파장이고, $\Delta\delta$ 는 식 (6)으로 표현된다.

$$\Delta\delta = \frac{2\pi L \Delta B}{\lambda} \quad (6)$$

ΔB 는 광탄성 효과(photoelastic effect)에 따른 PMF의 복굴절 변화량이며, 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\Delta B = \Delta n_s - \Delta n_f \quad (7)$$

PMF 코어의 유효 굴절률(effective refractive index) 변화는 압력 변화(ΔP)에 따른 광탄성 계수와 관련이 있고, 저속축 굴절률 변화량 Δn_s 와 고속축 굴절률 변화량 Δn_f 는 식 (8a) 및 식 (8b)와 같이 서로 다른 광탄성 계수를 갖는다. 그리고 p_s 와 p_f 는 각각 저속축과 고속축의 광탄성 계수를 나타낸다.

$$\Delta n_s = p_s n_s \Delta P \quad (8a)$$

$$\Delta n_f = p_f n_f \Delta P \quad (8b)$$

식 (6), 식 (7), 식 (8)을 식 (5)에 대입하여 정리하면 인가 압력 변화로 인한 $\Delta\lambda$ 는 식 (9)와 같이 기술된다.

$$\Delta\lambda = \lambda \left(\frac{p_s n_s - p_f n_f}{n_s - n_f} \right) \Delta P \quad (9)$$

따라서 식 (9)에서 확인할 수 있듯이 제안된 압력 센서 시스템에서 출력 간섭 스펙트럼의 센서 표지자 파장 변위는 센서부에 인가되는 압력에 비례하는 것을 알 수 있다.

특히 PMF의 광학적 특성에 따른 압력 민감도 비교를 위해 서로 다른 세 종류의 보우-타이형 PMF를 각각 센서부로 사용하여 압력 응답 실험을 수행하였다.

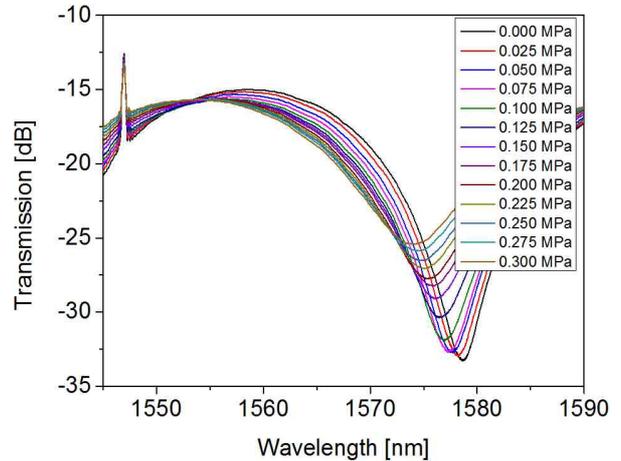


그림 3. 0에서 0.3MPa의 압력 인가 범위에서 측정된 제안된 센서의 압력 응답
Fig. 3. Pressure response of proposed sensor measured for applied pressure ranging from 0 to 0.3MPa

세 종류의 PMF로는 Fibercore사의 HB1250T, Oxford Electronics사의 HB1500-125P, Fibercore사의 HB1500 모델이 각각 14cm씩 사용되었으며, 실험에서는 각각 PMF 1, PMF 2, PMF 3로 지정하였다. 세 PMF들은 모델 별로 복굴절, 스트레스 요소(stress element)의 크기, 스트레스 요소의 기계적 특성, 모드-필드 직경(mode-field diameter), 차단 파장(cut-off wavelength) 등이 다른 특성을 가진다. 그림 4는 서로 다른 세 종류의 PMF에 대해 0-0.3MPa의 압력 인가 범위에서 측정된 압력 센서 시스템의 출력 간섭 스펙트럼 표지자의 파장 변화를 보여주고 있다. 그림에서 원형, 마름모형, 삼각형의 기호로 표시된 PMF 1(HB1250T), PMF 2(HB1500-125P), PMF 3(HB1500)에 대해 센서 표지자가 이동한 총 변위는 각각 ~ 4.50 , ~ 2.62 , ~ 2.14 nm로 측정되었으며, 압력 민감도는 각각 -15.07 , -9.27 , -6.75 nm/MPa로 계산되었다. 또한 그림 2에서 언급되었던 바와 같이 간섭 스펙트럼에서 파장 간격을 측정함으로써 각 PMF의 복굴절을 추정할 수 있으며, PMF 1, PMF 2, PMF 3의 복굴절은 각각 $\sim 4.41 \times 10^{-4}$, $\sim 2.20 \times 10^{-4}$, $\sim 5.35 \times 10^{-4}$ 로 계산되었다. 상기 측정 결과를 이용하면 PMF의 복

굴절에 대한 광탄성 효과에 의한 복굴절 변화량($\Delta B/B$)은 PMF 1, PMF 2, PMF 3의 순으로 각각 ~0.285%, ~0.165%, ~0.135%로 얻어지며, 이러한 복굴절의 변화량이 센서의 압력 민감도를 결정하기 때문에 서로의 변화 추세가 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 추가적으로 센서의 선형성을 나타내는 R^2 값은 ~0.992, ~0.969, ~0.983로 평가되었다.

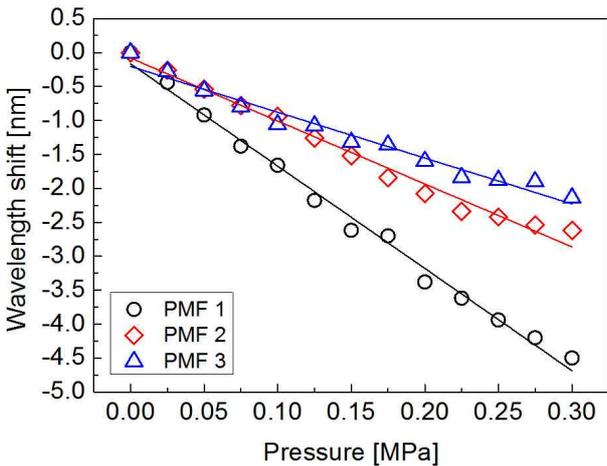


그림 4. 세 종류의 PMF(HB1250T, HB1500-125P, HB1500)에 대해 0-0.3MPa 범위의 인가 압력에서 측정된 센서 표지자의 파장 변화
 Fig. 4. Wavelength shift of sensor indicator measured at applied pressure ranging from 0 to 0.3MPa with respect to three PMF models(HB1250T, HB1500-125P, HB1500)

실험에서 관측되는 PMF 별 압력 민감도의 차이는 광섬유 코어의 직경과 스트레스 요소 크기와 같은 광섬유의 구조적인 특성이 다르기 때문에 발생하는 것으로 사료되며, 스트레스 요소의 기계적 특성 또한 압력 민감도에 영향을 미칠 수 있을 것으로 보인다. 스트레스 요소의 물질 특성과 구조적인 사양에 대한 정보는 일반적으로 공개되고 있지 않으나, PMF의 코어 지름은 제조사에서 제공되는 차단 파장과 개구수 (numerical aperture)를 이용하여 모델 별(HB1250T, HB1500-125P, HB1500)로 각각 ~8.00, ~7.66, ~6.62 μm 의 수치를 얻을 수 있었다. 추정된 코어 지름을 고려해볼 때, 압력에 의한 복굴절 변화량의 PMF 별 차이는 PMF 별 코어 지름의 변화 경향과 유사하며, 이

는 PMF의 코어 지름이 압력 민감도에 영향을 미치는 요소 중 하나임을 분명히 보여준다.

3. 결 론

본 논문에서는 PBS, PMF, FBG, HWP, QWP로 구성된 PDLSI를 이용하여 편광 간섭형 광섬유 압력 센서 시스템을 제안하였다. 압력 측정을 위한 센서부는 14cm 길이의 보우-타이형 PMF와 센서부 주변의 온도를 보상하기 위한 FBG로 구성되었다. 제작된 압력 센서를 이용한 압력 측정 실험에서는 PMF의 광학적 특성에 따른 압력 민감도 비교를 위해 서로 다른 세 종류의 보우-타이형 PMF로 센서부를 구성하여 압력 응답 실험을 수행하였다. 센서부 주변 압력을 0MPa부터 0.025MPa씩 0.3MPa까지 증가시켜 출력 스펙트럼을 분석하였으며, 출력 스펙트럼의 최대 파장 이동량은 ~4.50nm, 최대 압력 민감도는 근사적으로 -15.07nm/MPa를 달성할 수 있었다. 이는 이전에 보고되었던 PM-PCF를 이용한 사냥 간섭계 기반 편광 간섭형 압력 센서의 최대 압력 민감도보다 약 4배 증가된 수치이다. 또한 제안된 압력 센서 시스템은 센서부의 길이도 기존의 센서에 비해 약 4배 감소시켰으며, 센서부 길이의 감소에 따라 센서의 구조가 단순화됨으로써 기존 센서에 비해 센서 시스템의 제작이 용이하다는 장점을 가진다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] E. Cibula and D. Donagic, "Miniature fiber-optic pressure sensor with a polymer diaphragm," *Appl. Opt.*, vol. 44, pp. 2736-2744, 2005.
- [2] K. Totsu, Y. Haga, and M. Esashi, "Ultra-miniature fiber-optic pressure sensor using white light interferometry," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 15, pp. 71-75, 2005.
- [3] Q. Zhang, N. Liu, T. Fink, H. Li, W. Peng, and M. Han, "Fiber-optic pressure sensor based on π -phase-shifted

fiber Bragg grating on side-hole fiber,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 24, pp. 1519-1522, 2012.

[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., vol. 47, pp. 2835-2839, 2008.

[5] H. Y. Fu, C. Wu, M. L. V. Tse, L. Zhang, K.-C. D. Cheng, H. Y. Tam, B.-O. Guan, and C. Lu, “High pressure sensor based on photonic crystal fiber for downhole application,” Appl. Opt., vol. 49, pp. 2639-2643, 2010.

[6] F. Urban, J. Kadlec, R. Vlach, and R. Kuchta, “Design of a pressure sensor based on optical fiber Bragg grating lateral deformation,” Sensors, vol. 10, pp. 11212-11225, 2010.

[7] J. Huang, Z. Zhou, D. Zhang, and Q. Wei, “A fiber Bragg grating pressure sensor and its application to pipeline leakage detection,” Adv. Mech. Eng., vol. 2013, pp. 590451(1-6), 2013.

[8] Y. W. Lee, K. J. Han, B. Lee, and J. Jung, “Polarization-independent all-fiber multiwavelength-switchable filter based on a polarization-diversity loop configuration,” Opt. Express, vol. 11, pp. 3359-3364, 2003.

[9] Y. W. Lee, “Polarization-independent multiwavelength-switchable filter based on polarization beam splitter and fiber coupler,” J. Electr. Eng. Technol., vol. 4, pp. 405-409, 2009.

[10] L. Liu, H. Zhang, Q. Zhao, Y. Liu, and F. Li, “Temperature-independent FBG pressure sensor with high sensitivity,” Opt. Fiber Technol., vol. 13, pp. 78-80, 2007.

◆ 저자소개 ◆



류우찬(柳祐潑)

1971년 10월 6일생. 1997년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업. 1999년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 2003년 광주과학기술원 정보통신공학과 졸업(박사). 현재 부경대학교 과학기술융합전문대학원 LED융합공학전공 조교수.



최성욱(崔聖旭)

1989년 3월 14일생. 2015년 2월 부경대학교 전기공학과 졸업. 2015년 3월 부경대학교 대학원 의생명기계전기융합공학협동과정 입학. 현재 부경대학교 의생명기계전기융합공학협동과정 대학원 재학(석사과정).



이용욱(李鎔旭)

1975년 4월 25일생. 1998년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업. 2000년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 2004년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(박사). 현재 부경대학교 전기공학과 부교수.