

편광유지 광섬유와 광섬유 격자를 기반으로 하는 편광 간섭형 광섬유 압력 센서

최성욱\*, 이용욱\*\*\*

부경대 의생명기계전기융합공학협동과정\*, 부경대 전기공학과\*\*

Polarimetric fiber pressure sensor based on polarization-maintaining fiber and fiber grating

Sungwook Choi\*, Yong Wook Lee\*\*\*

Interdisciplinary Program of Biomedical, Mechanical & Electrical Engineering, Pukyong National University\*,  
School of Electrical Engineering, Pukyong National University\*\*

**Abstract** - 본 논문에서는 PMF와 FBG로 구성된 PDL 기반 사냥 간섭계를 이용하여 편광 간섭형 광섬유 압력 센서를 구현하였다. 여러 종류의 PMF들에서 압력 민감도를 비교하기 위해, 서로 다른 세 종류의 보우-타이형 PMF를 센서부로 사용하였다. 구현된 광섬유 압력 센서를 이용하여 0~0.3 MPa의 범위에서 압력 측정을 수행하였으며, 최대 압력 민감도는 근사적으로 -15.07 nm/MPa로 측정되었고, 센서의 선형성을 나타내는 R<sup>2</sup>값은 ~0.992로 측정되었다. 제안된 센서는 FBG를 이용하여 외부 온도 변화의 보상이 가능하면서도, 이전의 편광유지 광자결정 광섬유 기반 압력 센서에 비해 압력 민감도를 4배까지 증가시킬 수 있었다.

1. 서 론

산업 현장에서 안전 사고를 미연에 예방하기 위하여 많은 종류의 센서가 연구되고 있다. 특히, 광섬유를 이용한 센서는 전자식 압력 센서에 비하여 전자기 간섭에 무관하며, 소형 및 경량이고, 부식에 강하며, 다중점에서 측정이 가능한 점 등 상용화를 위한 많은 잠재성을 지니고 있다. 이러한 센서들 중에서 압력 센서는 다양한 분야에서 안전 외에도 계측을 위한 여러 목적으로 사용될 수 있다. 대부분의 광섬유 압력 센서는 막 (Diaphragm) 을 이용한 구조로서 광 세기 (Optical Intensity) 변화를 기반으로 한다. 그러나, 광 세기 변화 기반 센서들의 경우 센서부 광섬유의 마이크로벤딩 손실 (Micro-Bending Loss) 에 의해 큰 영향을 받는다[1]. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근에는 파장 변화 기반 광섬유 압력 센서들이 제안되고 있으며, 주로 간섭계 (Interferometer) 를 기반으로 하는 파장변화 광섬유 압력 센서들이 연구되고 있다. 최근에는 사냥 (Sagnac) 간섭계를 이용한 센서들이 주로 연구되고 있으며, 현재까지 발표된 광섬유 압력 센서 중 최대 압력 민감도는 ~3.42 nm/MPa이다[2]. 이러한 간섭계를 이용한 광섬유 압력 센서들은 외부 온도 변화에 둔감한 센서를 구현하기 위해 주로 편광유지 광자결정 광섬유 (Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fiber: 이하 PM-PCF) 를 센서부 (Sensor Head) 로 사용하였다. 그러나, 편광유지 광자결정 광섬유는 일반 편광유지 광섬유 (Polarization-Maintaining Fiber: 이하 PMF) 에 비해 10배 이상 고가이며, 민감도는 절반 이하로 감소하며 또한 단일모드 광섬유 (Single-Mode Fiber: 이하 SMF) 와의 용착 접속 손실 (Fusion Splicing Loss) 이 상대적으로 크게 발생하기 때문에 센서의 정확도가 저해될 수 있는 단점을 가지고 있다.

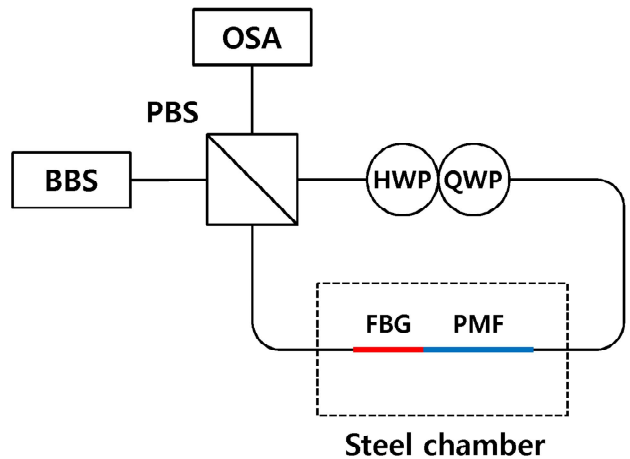
본 논문에서는 PMF를 센서부로 사용한 편광 상이 루프 (Polarization Diversity Loop: 이하 PDL) 구조 기반의 편광 간섭형 광섬유 압력 센서를 제안하였다.

2. 본 론

2.1 제안된 센서의 구성 및 원리

그림 1은 제안된 편광 간섭형 광섬유 압력 센서 시스템의 모식도를 보여주고 있다. 사냥 간섭계 역할을 하는 PDL은 편광 빔 분배기 (Polarization Beam Splitter: PBS), 1/2 파장판 (Half-Wave Plate: 이하 HWP), 1/4 파장판 (Quarter-Wave Plate: 이하 QWP), PMF, 그리고 광섬유 브래그 격자 (Fiber Bragg Grating 이하: FBG) 로 구성되었다. 센서부는 14 cm 길이의 보우-타이 형 PMF와 FBG로 구성되어 금속 챔버 (Steel Chamber) 내에 위치시켰으며, 금속 챔버 내에 질소 가스를 주입하여 압력을 인가하였다. 그리고 PMF는 압력 변화를 감지하기 위해 사용되고, FBG는 센서부인 PMF 주변 온도 변화를 보상하기 위한 목적으로 사용되었다. 광원으로는 광대역 광원 (Broadband Source: 이하 BBS) 을 사용하였고, 출력되는 스펙트럼 분석을 위해 광 스펙트럼 분석기 (Optical Spectrum Analyzer: 이하 OSA) 를 사용하였다. 그리고 모든 광학 요소들은 SMF로 연결되어 있다. 제안된 압력 센서 시스템의 동작 원리는 BBS에서 출력되는 입사광이 PBS를 통과한 뒤 수평 편광과 수

직 편광을 가진 두 선형 편광 성분으로 나뉜다. 수평 편광 성분은 시계 방향 (Clockwise: 이하 CW) 으로 순환하면서 HWP, QWP, PMF, 그리고 FBG를 거치고, 수직 편광 성분은 반시계 방향 (Count-Clockwise: 이하 CCW) 으로 순환하며 FBG, PMF, QWP, 그리고 HWP를 거친다. 이와 같이 CW와 CCW 방향으로 순환하면서 광학 요소들을 거친 후 PBS를 다시 통과하고, 통과 후 수평 편광과 수직 편광으로 서로 직교하는 편광을 가지기 때문에 간섭 없이 중첩되어 출력되어 OSA로 측정한다. PDL 구조 내의 HWP와 QWP는 통과하는 빛의 편광 상태를 바뀌주는 역할을 하며, HWP와 QWP를 함께 사용함으로써 정밀하게 편광 상태를 조절할 수 있다. HWP와 QWP의 방위각 (Azimuthal Angle) 을 조정함으로써 출력되는 간섭 스펙트럼의 소거율 (Extinction Ratio) 과 파장 위치를 조절할 수 있다. 금속 챔버 내부에 압력을 인가 시, 압력은 PMF의 복굴절을 변화시키고, 이러한 복굴절의 변화는 출력 간섭 스펙트럼의 파장을 이동시킨다. 따라서, 간섭 스펙트럼의 파장 이동을 측정함으로써 인가된 압력을 추정할 수 있다. 하지만 PMF는 주변의 온도가 변할 경우에도 출력 간섭 스펙트럼의 파장이 변하게 되므로, 온도 보상을 위해 FBG를 PMF와 용착 접속하여 센서부를 제작하였다. FBG는 온도와 압력 변화를 가했을 때, 압력 변화로 인한 파장 변화는 일어나지 않고 온도 변화에만 파장 변화가 일어난다. 출력된 스펙트럼에서 FB에 해당되는 스펙트럼의 변화를 보고 온도 변화를 파악할 수 있고, 따라서 온도 변화가 일어나도 압력 변화에 의한 출력 스펙트럼 변화를 정확히 측정할 수 있다.



<그림 1> 제안된 편광 간섭형 압력 센서의 모식도

2.2 제안된 센서의 실험 결과

제안된 압력 센서 시스템의 압력 측정 실험은 0~0.3 MPa의 압력 범위에서 0.025 MPa씩 압력을 증가 시켜 OSA를 이용하여 출력 스펙트럼을 관측하였다. 그림 2는 0~0.3 MPa의 압력 범위에서 0.025 MPa씩 압력을 증가 시켰을 때, 제안된 압력 센서 시스템의 출력 간섭 스펙트럼이다. 그림 2에서 압력 증가시 출력 스펙트럼이 단파장으로 이동 (Blue Shift) 되며, FBG 반사 스펙트럼은 변화하지 않는 것을 확인할 수 있다. PMF의 광학적 특성에 따른 압력 민감도 비교를 위해 서로 다른 세 종류의 보우-타이 (Bow-Tie) 형 PMF를 각각 센서부로 사용하여 압력 응답 실험을 수행하였다. 세 종류의 PMF로는 Fibercore사의 HB1250T, Oxford Electronics사의 HB1500-125P, 그리고 Fibercore사의 HB1500 모델이다. 세 PMF들은 모델 별로 복굴절, 스트레스 요소 (Stress

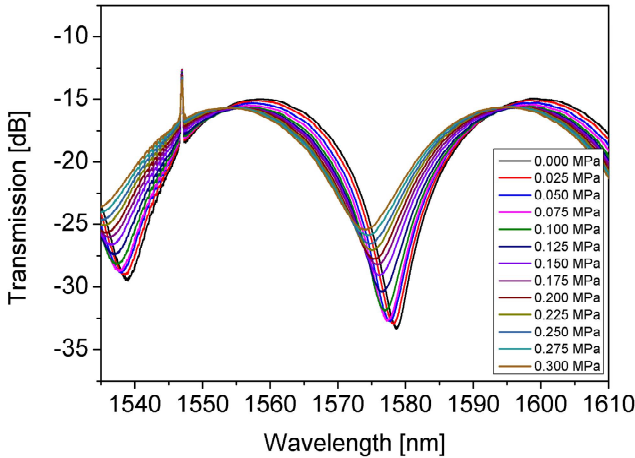
Element) 의 크기, 스트레스 요소의 기계적 특성, 모드-필드 직경 (Mode-Field Diameter), 차단 파장 (Cut-Off Wavelength) 등이 다른 특성을 가진다.

**[감사의 글]**

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20131020400830).

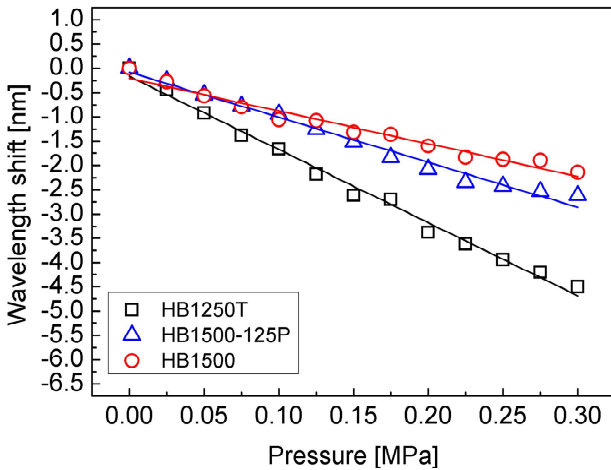
**[참고 문헌]**

[1] E. Cibula and D. Donlagic, "Miniature fiber-optic pressure sensor with a polymer diaphragm," Appl. Opt., vol. 44, pp. 2736-2744, 2005.  
 [2] 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.



**<그림 2> 0~0.3 MPa의 압력 범위에서 측정된 압력 센서 시스템의 출력 간섭 스펙트럼**

그림 3은 서로 다른 세 종류의 PMF에 대해 0~0.3 MPa의 압력 인가 범위에서 측정된 압력 센서 시스템의 출력 간섭 스펙트럼의 파장 변화를 보여주고 있다. 그림에서 사각형, 삼각형, 원형의 삼불로 표시된 HB1250T, HB1500-125P, HB1500에 대해 스펙트럼의 파장 이동량은 각각 ~4.50, ~2.62, ~2.14 nm로 측정되었으며, 압력 민감도는 각각 -15.07, -9.27, -6.75 nm/MPa로 계산되었다. 그리고 센서의 선형성을 나타내는 R<sup>2</sup>값은 ~0.992, ~0.969, ~0.983의 값을 가진다.



**<그림 3> 0~0.3 MPa 범위의 인가 압력에서 PMF 종류에 따른 스펙트럼의 파장 이동량**

**3. 결 론**

본 논문에서는 PBS, PMF, FBG, HWP, QWP로 구성된 PDL 구조 사냥 간섭계를 이용하여 편광 간섭형 광섬유 압력 센서 시스템을 제안하였다. 센서부는 14 cm 길이의 보우-타이형 PMF와 센서부 주변의 온도를 보상하기 위한 FBG로 구성되었다. 제작된 압력 센서의 압력 측정 실험에서는 PMF의 광학적 특성에 따른 압력 민감도 비교를 위해 서로 다른 세 종류의 보우-타이형 PMF로 센서부를 사용하였고, 제안된 편광 간섭형 광섬유 압력 센서의 압력 응답 실험을 각각 수행하였다. 센서부가 위치한 금속 챔버 내부의 압력을 0 MPa부터 0.3 MPa까지 0.025 MPa씩 증가시켜 출력 스펙트럼을 분석하였으며, 출력 스펙트럼의 최대 파장 이동량은 ~4.50 nm, 최대 압력 민감도는 ~-15.07 nm/MPa를 얻을 수 있었다. 이는 이전에 보고되었던 PM-PCF를 이용한 사냥 간섭계 기반 편광 간섭형 압력 센서의 최대 압력 민감도보다 약 4배 증가된 결과이다. 또한, 제안된 압력 센서 시스템의 센서부 길이도 이전의 센서에 비해 약 4배만큼 소형화된 장점을 가진다.