

## 편광상이 고리 기반 사낙 간섭계를 이용한 광섬유 진동 센서

정준혁\*, 이용욱\*\*\*

부경대 전기공학과\*, 부경대 의생명기계전기융합공학협동과정\*\*

### Fiber vibration sensor using Sagnac interferometer based on polarization-diversity loop

Jun Hyeog Jeong\*, Yong Wook Lee\*\*\*

School of Electrical Engineering, Pukyong National University\*,

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

**Abstract** - 본 논문에서는 PDLs 기반 사낙 간섭계를 사용하여 편광 간섭형 광섬유 진동 센서를 제안하였다. LD와 PD는 빠른 속도로 변하는 세기를 측정하기 위해 사용하였다. PZT를 사용하여 1~3000 Hz까지의 주파수 진동측정이 이루어졌으며 차단 주파수는 ~2100 Hz 였다. 그리고 단위 길이와 단위 스트레인 당 위상 이동은 ~3.48 mrad/( $\mu\text{e}\cdot\text{m}$ )였으며, 최소 검출 가능한 스트레인 섭동은 2000 Hz에서 ~460  $\text{pe}/\text{Hz}^{1/2}$ 이였다.

PM-PCF를 원통형의 압전 변환기 (Piezoelectric Transducer: 이하 PZT) 에 감아서 사용하였으며, PZT 제어기와 함수 발생기 (Function Generator) 를 이용하여 PZT의 부피 변화를 고속으로 유도하였다.

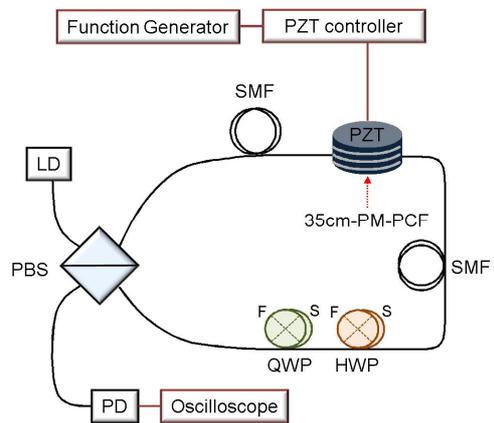
### 1. 서 론

온도, 스트레인 (Strain), 압력, 자기장 등과 같은 여러 가지 물리량을 측정할 수 있는 광섬유 센서는 소형, 경량, 방수성, 전자기 간섭 (Electromagnetic Interference) 강인성, 원거리 측정 가능성 등 많은 이점들을 가지고 있기 때문에 산업 현장 적용을 위해 계속해서 연구가 이루어지고 있다. 특히, 광섬유 진동 센서는 수송 기기에서 토목 및 건축물에 이르기까지 그 적용 범위가 매우 넓으며, 기존의 전자기 센서가 적용되기 어려운 전자기 간섭이 심하거나 극저온 및 극고온의 열악한 환경에서도 사용이 가능하다. 또한, 제한된 장소에서 사용되기에 충분히 작은 크기이며 긴 수명을 가지고 있다. 이러한 광섬유 진동 센서의 최근 이슈는 진동 민감도, 측정 가능 주파수 범위, 온도 무관성에 대한 것이며, 이러한 특성들을 향상시키기 위하여 광자 결정 광섬유 (Photonic Crystal Fiber) 나 광섬유 격자 (Fiber Grating) 등을 이용한 다양한 광섬유 진동 센서들이 연구되고 있다. 2012년에는 편광유지 광자결정 광섬유 (Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fiber: 이하 PM-PCF) 와 두 개의 편광기 (Polarizer) 를 사용한 편광 간섭형 (Polarimetric) 진동 센서가 제안되었고, ~0.253 dB/mm의 진동 민감도로 2-25 Hz 대역에서 측정이 가능하였다[1]. 같은 해에 두 개의 광섬유 브래그 격자 (Fiber Bragg Grating: 이하 FBG) 로 구성된 Fabry-perot 간섭계를 사용한 진동센서는 측정 주파수를 1 kHz까지 향상 시켰지만 온도 보상이 이루어지지 않았다[2]. 2013년에는 서로 다른 공진 파장을 갖는 FBG 2개를 사용하여 진동과 온도를 둘 다 측정하는 센서가 제안되었고 주파수 측정범위와 온도 측정범위는 각각 0.5~100 Hz 그리고 20~180 °C 였다[3]. 그리고 단일 모드 광섬유 (Single Mode Fiber: 이하 SMF) 의 구조적인 변형과 편광 유지 광섬유 (Polarization-Maintaining Fiber) 의 복굴절 변화는 1000 Hz 보다 빠른 속도를 측정할 수 있었다. 이외에도 여러 가지 광섬유 격자를 이용하여 많은 광섬유 진동 센서들이 제안되었으나, 2000 Hz 이상의 측정 주파수 범위를 갖는 광섬유 진동 센서는 보고되지 않았다. 본 논문에서는 PM-PCF로 구성된 편광 상이 루프 구조 (Polarization-Diversity Loop Structure: 이하 PDLs), 레이저 다이오드 (Laser Diode: 이하 LD), 그리고 광 검출기 (Photo Detector: 이하 PD) 를 사용하여 진동 주파수 측정 범위가 넓고 검출 가능한 진동이 가장 최소화 된 편광 간섭형 광섬유 진동 센서를 구현하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 제안된 센서의 구성

그림 1은 제안된 광섬유 진동 센서의 모식도를 보여주고 있으며, 편광 빔 분배기 (Polarization Beam Splitter: 이하 PBS), 센서부 (Sensor head) 인 PM-PCF, 1/4 파장판 (Quarter-Wave Plate: 이하 QWP), 1/2 파장판 (Half-Wave Plate: 이하 HWP) 으로 구성된 PDLs는 사낙 복굴절 간섭계 (Sagnac Birefringence Interferometer: 이하 SBI) 를 구현하여 센서의 출력으로 간섭 스펙트럼을 생성한다. PDLs 내의 각 광학 요소들 (PBS, PM-PCF, QWP, HWP) 은 SMF로 연결되었고, PDLs 내의 HWP와 QWP의 방위각을 조절하여 출력 간섭 스펙트럼을 정밀하게 이동시킴으로써 진동 민감도를 최대화할 수 있는 최적의 센서 동작점 (Operating Point) 을 찾을 수 있었다. 센서부로는 35 cm 길이의



〈그림 1〉 진동 주파수 측정을 위한 제안된 센서의 모식도

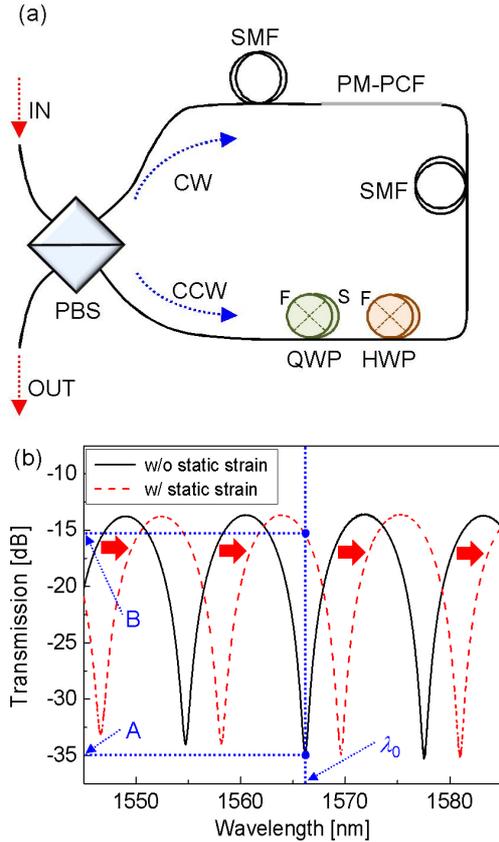
#### 2.2 제안된 센서의 동작 원리

센서는 기본적으로 SBI를 사용한다. 그림 2(a)는 PBS, PM-PCF, HWP, 그리고 QWP로 구성된 PDLs를 기반으로 하는 SBI의 모식도이다. HWP와 QWP는 SBI의 출력 간섭 스펙트럼의 소거율을 조절하는데 사용하였다. PBS, PM-PCF, 그리고 파장판들은 SMF로 연결되어 있다. 광대역 광원 (Broad Band Source) 의 빛이 PBS로 들어가면 선형 수평 편광과 선형 수직 편광인 두 개의 직교하는 편광 성분들로 나뉜다. 선형 수직 편광 성분은 PDLs를 따라 시계방향으로 회전하여 그림 1에서 보이는 대로 PM-PCF, HWP, 그리고 QWP를 차례로 거치게 된다. 반대로, 선형 수평 편광 성분은 시계 반대 방향으로 회전하여 QWP, HWP, 그리고 PM-PCF를 차례로 거치게 된다. 빛의 진행 방향과 무관하게 빛이 PM-PCF를 지나게 되면 PM-PCF의 fast 축과 slow 축 사이의 복굴절에 의해 위상차가 발생하여 간섭 스펙트럼을 만든다. 그림 2(b)는 SBI 기반으로 하는 센서의 투과 스펙트럼이다. 그림 2(b)에서 보듯이 정적인 스트레인이 가해졌을 경우, 투과 스펙트럼은 검은색 실선에서 빨간색 점선으로 적색이동을 한다. 횡적인 스트레인이 가해진 PM-PCF는 복굴절과 길이를 변화시켜 투과 스펙트럼의 이동을 일으킨다. 만약  $\lambda_0 \approx 1567 \text{ nm}$ 인 LD와 같은 단색광 광원이 사용된 경우 스트레인이 가해지지 않았다면 광 출력은 그림 2(b)의 A점이며, 스트레인이 가해져서 스펙트럼이 이동한다면 광 출력은 B점으로 증가하게 된다. 그러므로 LD를 입력 광원으로 하고 PD로 출력 전압의 변화를 측정하여 인가된 스트레인의 크기를 얻을 수 있다.

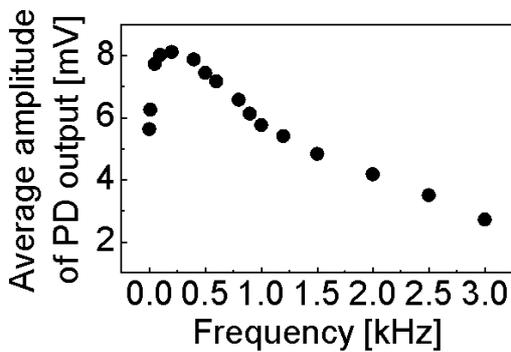
#### 2.3 제안된 센서의 실험 결과

그림 3은 제안된 센서의 1~3000 Hz 범위의 진동 주파수에서 측정된 PD 출력 신호를 측정된 것이다. 그림 3에서 200 Hz의 진동 주파수에서 PD 출력 전압이 최고치를 보이며 주파수가 증가할수록 출력 전압이 줄어드는 것을 관찰할 수 있다. 차단 주파수는 PD 출력 전압이 최고치의 절반일 때 주파수를 말하며, 실험 결과에서는 2100 Hz로 나타났다. 이 실험 결과를 통하여 PM-PCF의 복굴절이 높은 주파수 진동에 충분히 반응하는 것을 확인할 수 있다. 제안된 센서의 민감도는 단위 길이 당, 그리고 단위 스트레인당 위상 이동으로 표현할 수 있다. 이것은 단위 스

트레인 당 파장 이동과 파장-위상 변환 인자를 사용하여 얻어 낼 수 있다. 파장-위상 변환 인자는 위상 지연  $\Gamma (=2\pi BL/\lambda)$  를 이용하여 유도할 수 있다[4]. 이에 따라 계산한 민감도는  $\sim 3.48 \text{ mrad}/(\mu\text{e}\cdot\text{m})$ 였다. 2000 Hz에서 측정 가능한 최소 스트레인 섭동은  $\sim 460 \text{ pe}/\text{Hz}^{1/2}$ 였으며, 신호 대 잡음비는  $\sim 35.2 \text{ dB}$  였으며 주파수 분해능은 20 Hz 였다. 제안된 센서에서 측정된 주파수보다 더 높은 주파수에서 측정이 어려운 것은 PM-PCF의 복굴절 변화가 줄어들기 때문이다. 이러한 이유는 PZT 물질과 PM-PCF를 구성하는 실리카 물질 사이의 Young's modulus에서의 차이에 의한 것으로 생각된다.



<그림 2> PDLS 기반 사각 복굴절 간섭계의 (a) 모식도와 (b) 투과 스펙트럼



<그림 3> 제안된 센서의 주파수 응답 특성

### 3. 결 론

본 논문은 넓은 주파수 측정범위와 측정가능한 진동을 최소화한 편광 간섭형 광섬유 진동센서를 SBI를 기반으로한 PDLS를 사용하여 제안하였다. 넓은 주파수 측정 범위는 원통형 PZT에 넓은 밴드 폭과 빠른 복굴절 변화를 가지는 PM-PCF를 감아서 센서부로 사용해 얻을 수 있었다. PZT의 고속 부피 변화를 통해 1~3000 Hz 범위의 단일 주파수 진동 센서부에 인가하였다. 입력 광원은 중심 파장이  $\sim 1567 \text{ nm}$ 인 레이저 다이오드를 사용하였고, 센서의 출력 신호는 광 검출기를 통해 측정

되었으며, HWP와 QWP를 사용하여 최적화된 동작점에 의해 센서부에 인가되는 스트레인이 증가할수록 광 검출기의 전압은 선형적으로 증가되었다. 그림 3는 그림 1과 같은 실험 셋업에서 PZT를 1~3000 Hz의 범위에서 구동시키면서 광 검출기 출력 전압의 평균 진폭을 PZT 구동 주파수 즉, 진동 주파수에 따라 관찰한 것으로, 제안된 진동 센서의 주파수 응답 특성을 보여주고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 제안된 진동 센서의 주파수 응답은 200 Hz 부근에서 최대 진폭이 되고, 진동 주파수가 증가할수록 이 진폭은 점점 감소하여 차단 주파수는 2100 Hz로 측정되었다. 또한, 제안된 센서의 검출 가능한 최소 스트레인의 변화 (Minimum Detectable Strain Perturbation) 는 2000 Hz에서  $\sim 460 \text{ pe}/\text{Hz}^{1/2}$ 로 측정되었다.

### [감사의 글]

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

### [참고 문헌]

- [1] G. Rajan, M. Ramakrishnan, Y. Semenova, A. Domanski, A. Boczkowska, T. Wolinski, and G. Farrell, "Analysis of vibration measurements in a composite material using an embedded PM-PCF polarimetric sensor and an FBG sensor," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, pp. 1365-1371, 2012
- [2] Wada, A.; Tanaka, S.; Takahashi, N. Optical fiber vibration sensor using FBG Fabry - Perot interferometer with wavelength scanning and Fourier analysis. *IEEE Sens. J.* 2012, 12, 225 - 229.
- [3] Zhang, Q.; Zhu, T.; Zhang, J.; Chiang, K.S. Micro-fiber-based FBG sensor for simultaneous measurement of vibration and temperature. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2013, 25, 1751 - 1753.
- [4] Dong, X.; Tam, H.Y. Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer. *Appl. Phys. Lett.* 2007, 90, 151113(1 - 3).