



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

편광유지 광자결정 광섬유를  
이용한 편광 간섭형  
진동 센서에 관한 연구



2015년 2월

부경대학교 대학원

의생명융합공학협동과정

김영석

공 학 석 사 학 위 논 문

편광유지 광자결정 광섬유를  
이용한 편광 간섭형  
진동 센서에 관한 연구

지도교수 이 용 욱

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2015년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

전 기 공 학 과

의 생 명 융 합 공 학 협 동 과 정

김 영 석

김영석의 공학석사 학위논문을 인준함.

2015년 2월 27일



위 원 장	공학박사	장 윤 석 (인)
위 원	공학박사	이 용 욱 (인)
위 원	공학박사	박 창 현 (인)

# 목 차

목차 .....	i
그림 목차 .....	ii
Abstract .....	iv
1. 서론 .....	1
2. 광섬유 진동 센서 구성 요소 관련 이론	
가. 편광유지 광자결정 광섬유 .....	3
나. 사략 복굴절 간섭계 .....	5
다. 센서 구성요소에 의한 위상 지연 .....	8
3. 기존 광섬유 진동 센서 연구 .....	12
4. 제안된 광섬유 진동 센서를 이용한 다양한 진동 측정	
가. 압전 소자를 이용한 단일 주파수 진동 측정 .....	18
나. 철제 외팔보를 이용한 자연 감쇠 진동 측정 .....	21
다. 제안된 진동 센서 시스템의 온도에 대한 반응 측정 .....	24
5. 결론 .....	26
참고문헌 .....	28

## 그림 목 차

그림 2.1. PCF와 PM-PCF의 단면도 .....	4
그림 2.2. (a) 사냥 간섭계의 기본 원리를 나타낸 그림과 (b) 복굴절 요소가 추가된 그림 .....	6
그림 2.3. 스트레인 인가에 따른 간섭계의 스펙트럼 변화 (해상도 높일 것) ..	7
그림 2.4. 복굴절 요소에 입력되는 빛이 겪는 위상 지연 효과 .....	9
그림 2.5. 1/4 파장판에 입력되는 (a) $-45^\circ$ 선형편광 및 (b) $+45^\circ$ 선형편광에 따른 출력 편광 .....	10
그림 2.6. 1/2 파장판에 입력되는 (a) $-45^\circ$ 선형편광 및 (b) 좌원편광에 따른 출력 편광 .....	11
그림 3.1. 기존에 제안된 FBG의 반사 대역폭 변화를 이용한 (a) 광섬유 진동 센서의 모식도 및 (b) 외팔보의 변위에 따른 FBG 반사 대역폭의 변화 .....	12
그림 3.2. 기존에 제안된 (a) 폴리에스터 수지에 PM-PCF를 내장시킨 합성 시료와 (b) 합성 시료를 센서부로 이용한 기존의 광섬유 진동 센서의 구조 .....	13
그림 3.3. 기존에 연구된 공진파장이 (a) 동일하거나 (b) 다른 두 개의 FBG 및 (c) 여러 개의 FBG를 사용한 기존의 광섬유 진동 센서 시스템들의 모식도 .....	15
그림 3.4. SMF-MMF-SMF (SMS) 구조를 센서부로 이용한 기존의 광섬유 진동 센서의 모식도 .....	17
그림 4.1. 단일 주파수 진동 측정을 위한 제안된 진동 센서 시스템의 개략도 .....	19
그림 4.2. 제안된 진동 센서의 주파수별 출력 신호 .....	20
그림 4.3. 철제 외팔보에 인가되는 진동을 측정하기 위한 센서 시스템의	

개략도 .....	22
그림 4.4. 각 조건별 진동에 따른 센서의 반응 .....	23
그림 4.5. 외팔보에 인가되는 충격량에 따라 변화되는 (a) 센서의 침투치 와 (b) 기본 주파수 .....	24
그림 4.6. 제안된 진동 센서 시스템의 온도에 대한 (a) 광대역 및 (b) 협 대역 투과 스펙트럼 변화 .....	26



Study on Polarimetric Optical Fiber Vibration Sensor Composed of  
Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fiber

Young Suk Kim

Department of Electrical Engineering,  
Interdisciplinary Program of Marine-Bio, Electrical & Mechanical Engineering,  
The Graduate School, Pukyong National University

**Abstract**

In this thesis, a polarimetric optical fiber vibration sensor was implemented by incorporating a Sagnac birefringence interferometer composed of polarization-maintaining photonic crystal fiber (PM-PCF). A 8-cm-long thread of PM-PCF was used as the sensor head of the proposed sensor, and the sensor response to various types of vibration was investigated. In order to investigate the vibration response of the proposed sensor for single-frequency vibration, a vibration with a fixed frequency was applied to the sensor head by using a cylindrical piezoelectric transducer. In the case of the single-frequency vibration measurement, the sensor response was investigated for a frequency range of 1-8000 Hz. The proposed sensor allowed the detection of vibration, of which amplitude corresponded to an effective static strain of  $\sim 6.75 \mu\epsilon(\text{rms})$  over a single-frequency vibration range of 1-5000 Hz. It was observed that the sensor response started to deteriorate from 5000 Hz in the single-frequency vibration measurement, and then the sensor response to naturally damped vibration was also examined by utilizing a metal cantilever beam and a few weights. It is found from the examination that the sensor response is related with initially applied stress in the naturally damped vibration measurement.

## 1. 서론

광섬유 센서 (optical fiber sensor) 는 부식이나 폭발에 강하고, 습하거나 전자기 간섭 (electromagnetic interference) 이 많은 환경에 사용하기 적합하며, 한정된 공간에서 사용할 수 있을 정도로 크기가 작고 유연한 장점을 가진다. 이러한 장점들을 이용하여, 온도, 스트레인, 가스, 염분 등과 같은 물리량 또는 화학량을 측정할 수 있는 다양한 광섬유 센서가 연구되었다 [1-5]. 특히, 상기 장점들을 이용하여 많은 광섬유 진동 센서들이 제안되었으며, 최근의 광섬유 진동 센서 연구에서는 진동 민감도, 측정 가능한 진동 주파수 대역폭 및 주변 온도 변화에 대한 안정성과 같은 부분이 주요한 쟁점이 되고 있다. 이러한 쟁점들을 해결하기 위해 광자결정 광섬유 (photonic crystal fiber: 이하 PCF) 나 특별한 광섬유 격자 (optical fiber grating) 를 센서부 (sensor head) 로 사용하는 다양한 연구들이 시도되고 있다 [6, 7].

본 논문에서는 편광유지 광자결정 광섬유 (polarization-maintaining photonic crystal fiber: 이하 PM-PCF) 를 이용한 사냥 간섭계 (Sagnac interferometer) 를 기반으로 외부 온도 변화에 둔감하고, 측정 가능한 주파수 대역

폭을 1~5000 Hz까지 확장시킨 광섬유 진동 센서를 제안한다. 구현된 센서는 광섬유 브래그 격자 (fiber Bragg grating: 이하 FBG) 제작에 사용되는 UV 노출공정을 거치지 않기 때문에 센서부 제작이 용이하고, 광섬유 격자를 이용한 센서보다 횡방향 스트레스 (longitudinal stress) 에 더 강인하다. 단일 주파수 진동 (single-frequency vibration) 에 대한 센서의 반응을 확인하기 위해 원통형 압전소자 (piezoelectric transducer: 이하 PZT) 를 이용하였다. 5000 Hz 이상의 단일 주파수에서 센서의 반응이 줄어들기 시작하는 것을 관측하였으며, 5000 Hz에서 관측 가능한 최소 검출 가능 스트레인 섭동 (minimum detectable strain perturbation) 은  $\sim 2.013 \text{ n}\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$ 이었다. 또한, 금속 외팔보 (metal cantilever) 를 이용하여 자연 감쇠 진동 (naturally damped vibration) 에 대한 센서의 반응을 조사하였고, 충격량의 크기가 증가함에 따라 센서 출력 신호의 침투치는 증가하며 기본 주파수는 감소하는 것을 확인하였다. 제안된 센서의 온도 민감도는 일반적인 편광유지 광섬유 (polarization-maintaining fiber) 에 비해 약 15배 낮은  $\sim 64.86 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 로 측정되었고, 온도에 의한 부정확성은  $\sim 0.003 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ 로 계산되었다.

## 2. 광섬유 진동 센서 구성 요소 관련 이론

### 가. 편광유지 광자결정 광섬유 (PM-PCF)

PCF와 PM-PCF는 새로운 광 도파로 (optical waveguide) 개념을 제공하여 광섬유 연구에 많은 변화를 가져왔으며, PCF의 고유한 도파 특성을 이용하여 새로운 방식의 광섬유 센서들이 제안되고 있다. PCF 내부의 공기구멍 (air hole) 이 입력 광원의 파장과 비슷한 크기를 갖게 되면 광 밴드갭 (photonic bandgap) 효과가 생기며, 이 효과에 의해 빛을 도파시킬 수 있다. 또한, PCF는 코어 (core) 와 클래딩 (cladding) 이 단일 물질인 실리카 ( $\text{SiO}_2$ ) 로 구성되어 기존의 광섬유에서 사용된 굴절률 유도 (index guiding) 방식에 비해 현저히 낮은 온도 민감도를 갖는다. 따라서, PCF 기반 광섬유 센서들은 기존의 여러 간섭계를 이용한 광섬유 센서들과 비교하여 상대적으로 온도 변화에 둔감하다. 특히, PM-PCF 기반의 사략 간섭계는 구조가 간단하여 구성하기 쉽고, PM-PCF의 복굴절 변화가 주변 물리량 변화에 대해 민감하며, 입력 편광에 의존하지 않는 특성을 지니기 때문에 센서부나 센서 복조용 필터 (demodulation

filter) 로 널리 사용되고 있다. 그림 2.1은 PCF와 PM-PCF의 단면도를 보여주고 있다.

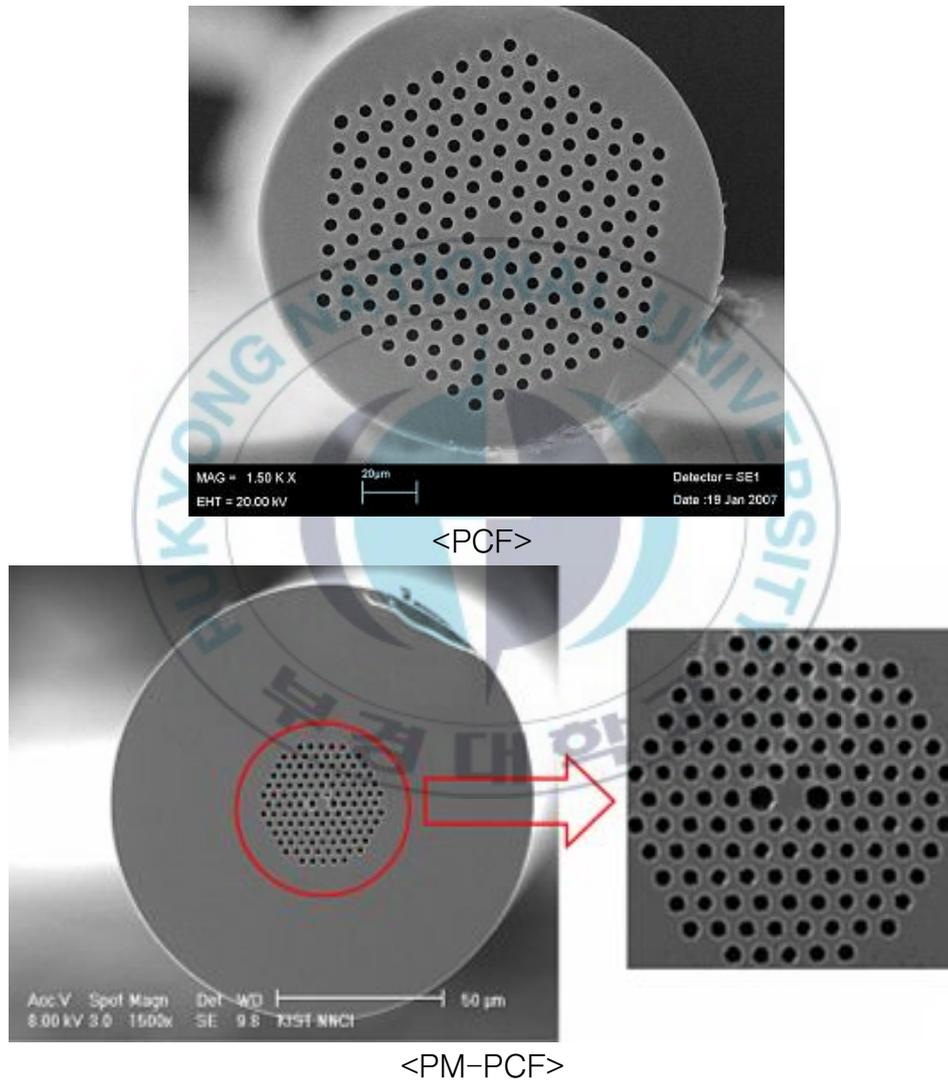


그림 2.1. PCF와 PM-PCF의 단면도

## 나. 사냐 복굴절 간섭계

여러 가지 광섬유의 고유한 특성을 이용해 다양한 간섭계 구조를 구성한 광섬유 센서들이 제안되고 있다. 이러한 간섭계의 종류에는 마이클슨 (Michelson), 페브리-페로 (Fabry-Perot), 마하-젠더 (Mach-Zehnder), 사냐 간섭계 등이 있으며, 이 중에서 광섬유의 복굴절 변화를 이용한 물리량 측정에는 사냐 간섭계가 많이 사용되고 있다. 그림 2.2(a)는 사냐 간섭계의 기본 원리를 나타낸 그림으로, 빔 분배기 (beam splitter) 의 입력단자에  $u_0$ 의 빛이 입사하게 되면 시계 방향의 경로 1 (path 1) 과 반시계 방향의 경로 2 (path 2) 로 빛이 분배되고, 분배된 빛은 각각 같은 경로를 순환하여 다시 빔 분배기에서 결합되어 출력단자로 나오게 된다. 사냐 간섭계에서는 각 방향으로 진행하는 빛이 느끼는 굴절률이 다른 경우나 진행 경로의 길이가 다른 경우, 출력단자에서 간섭이 일어나게 된다.

본 논문에서는 빛이 진행하는 경로에 복굴절 요소 (birefringence component) 를 삽입하여 빛이 느끼는 굴절률을 편광에 따라 다르게 만드는 사냐 복굴절 간섭계 (Sagnac birefringence interferometer: 이하 SBI) 구조를 사용하였다. 그림 2.2(b)와 같이 사냐 간섭계 구조에 복굴절 요소와 편광 조절

기 (polarization controller) 를 추가 구성할 경우, 빔 분배기에 의해 갈라진 두 빛은 서로 반대 방향의 경로를 진행하고, 복굴절 요소에 의해 반대 방향으로 회전하는 두 빛 사이에 위상차가 생기게 되며, 위상차의 정도에 따라 보강 간섭이나 상쇄 간섭과 같은 간섭 특성이 나타나게 된다. 광대역 광원 (broadband light source) 과 광 스펙트럼 분석기 (optical spectrum analyzer) 를 통해 그림 2.3의 점선과 같은 SBI의 출력 간섭 스펙트럼을 관측하였다.  $\lambda_A$ 와  $\lambda_B$ 를 출력 간섭 스펙트럼에서 이웃

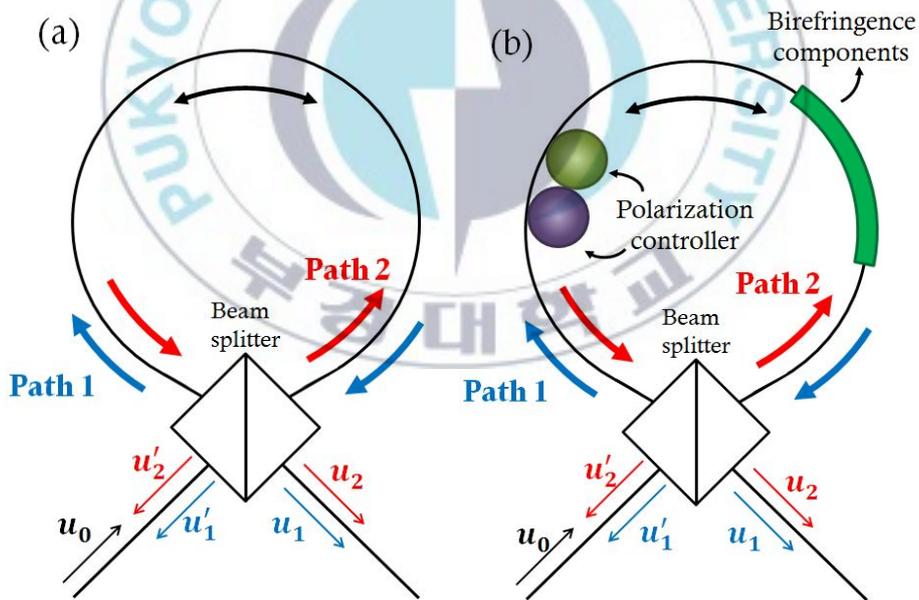


그림 2.2. (a) 사냥 간섭계의 기본 원리를 나타낸 그림과 (b) 복굴절 요소가 추가된 그림

한 두 개의 투과 골 (transmission dip) 의 파장이라고 할 때, 간섭 패턴의 간격 (fringe spacing)  $\Delta\lambda$ 는 식 (1)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\lambda = |\lambda_B - \lambda_A| = \frac{\lambda_B \lambda_A}{BL} = \frac{\lambda_B^2}{BL + \lambda_B} \approx \frac{\lambda_B^2}{BL} \quad (1)$$

여기서  $B$ 와  $L$ 은 각각 PM-PCF의 복굴절과 길이이며, 간섭 패턴의 간격은 PM-PCF의 복굴절과 길이에 반비례하는 것을

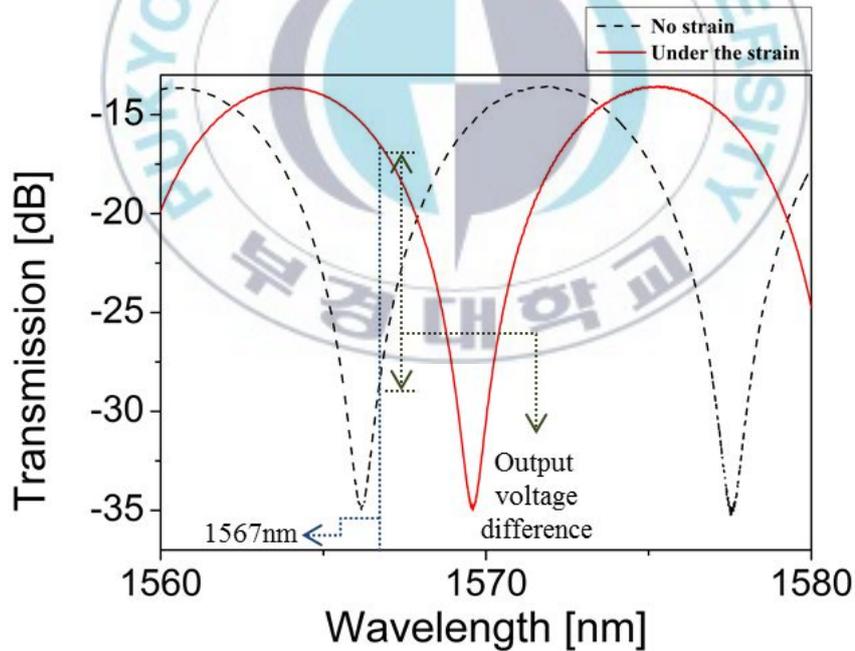


그림 2.3. 스트레인 인가에 따른 간섭계의 스펙트럼 변화

식 (1)에서 확인할 수 있다. 본 실험에서는 복굴절 요소가 센서부로 사용되었으며, 센서부에 스트레인이 인가되면 복굴절이 변하게 되어 간섭계의 출력 스펙트럼이 장파장 방향으로 이동하는 것을 그림 2.3의 실선을 통해 확인할 수 있다. 이때, 간섭계의 입력으로 단파장 광원 (monochromatic light source) 을 사용하면, 투과율에 따라 출력되는 신호의 세기가 다르게 나타난다. 따라서 출력되는 빛의 세기 변화량을 통해 센서부 주변에 가해진 진동의 종류와 크기를 측정할 수 있다.

#### 다. 센서 구성요소에 의한 위상 지연

복굴절 요소를 진행하는 빛은 복굴절에 의해 위상 지연이 발생하여 직교 편광 (orthogonal polarization) 을 갖는 두 입력 빛은 출력된 후 두 직교 편광 간에 위상 차이가 나타나는 것을 그림 2.4에서 확인할 수 있다. 실험에서 복굴절 요소로 사용된 PM-PCF는 내부 공기구멍의 크기 차이에 의해 굴절률이 크고 작은 부분이 형성되어 있다. 즉, 고속 축 (fast-axis) 과 저속 축 (slow-axis) 으로 구분되고, 빛의 편광성분이 PM-PCF의 두 축에 배열되어 진행하는 동안 직교하는 편광을 갖는 두 빛 사이에 위상 지연이 발생하게 된다. 간섭계에 입력된 빛은 편광 빔

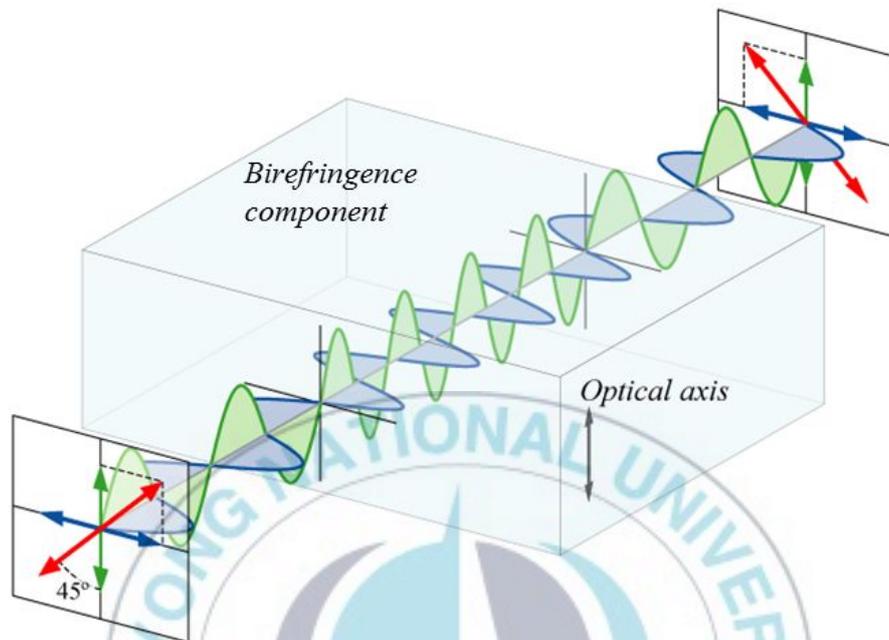


그림 2.4. 복굴절 요소에 입력되는 빛이 겪는 위상 지연 효과

분배기 (polarization beam splitter: 이하 PBS) 에 의해 서로 직교하는 수평 및 수직 편광 성분으로 나뉘지고, 서로 다른 편광을 가진 두 빛은 각각 시계 방향과 반시계 방향으로 진행한다. 각 방향으로 회전하는 빛은 간섭계 내부에서 PM-PCF, 1/2 파장판 (half-wave plate: 이하 HWP), 1/4 파장판 (quarter-wave plate: 이하 QWP) 을 만나게 되고, 각 구성 성분들의 성질에 의해 서로 다른 위상 지연을 겪게 된다. 그림 2.5와 그림 2.6은 HWP와 QWP의 위상 지연 효과를 보여준다. HWP와 QWP에

입력되는 빛의 편광 상태와 HWP와 QWP의 방위각 (azimuthal angle) 에 따라 직교하는 두 편광 성분의 위상차가 정해지며, 방위각을 조절함으로써 간섭계에서 출력되는 간섭 스펙트럼의 소거율 (extinction ratio) 과 파장 위치가 결정된다.

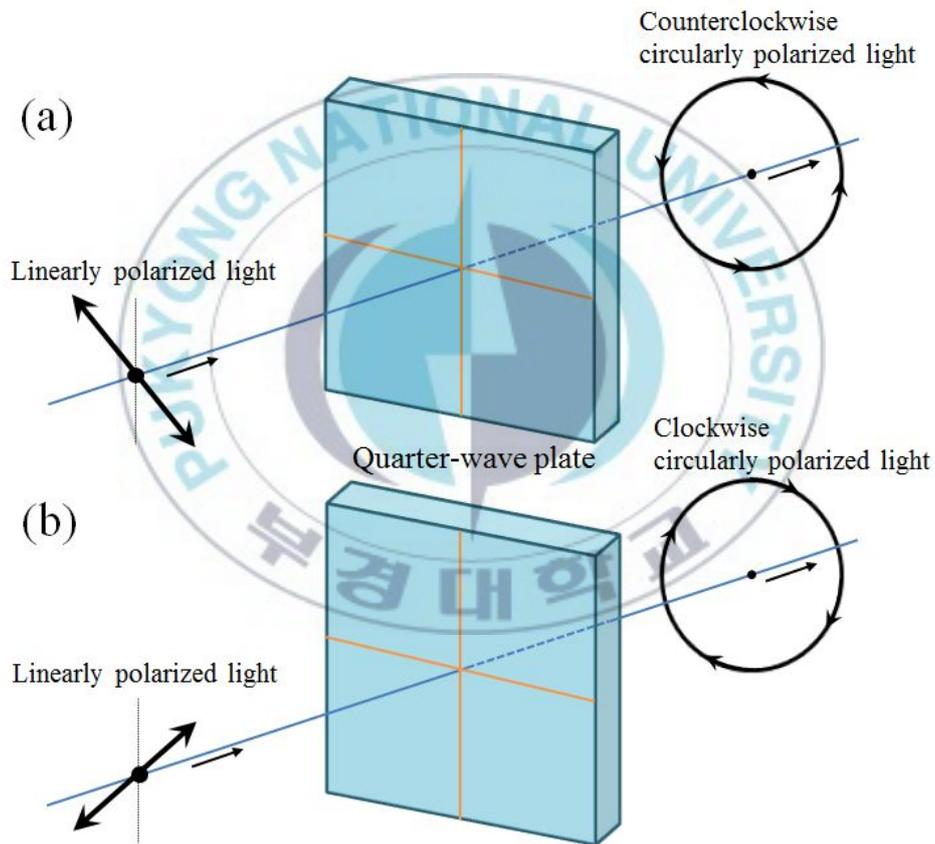


그림 2.5. 1/4 파장판에 입력되는 (a)  $-45^\circ$  선형편광 및 (b)  $+45^\circ$  선형편광에 따른 출력 편광

그림 2.5(a)와 2.5(b)에서 QWP에 입력되는 빛의 편광이  $\pm 45^\circ$  선형 편광이면, 출력되는 빛의 편광은 각각 우원 편광 또는 좌원 편광인 빛이 출력되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 2.6에서 HWP에  $-45^\circ$  선형 편광이 입력되면  $+45^\circ$  선형 편광이, 좌원 편광이 입력되면 우원 편광이 출력되는 것을 알 수 있다.

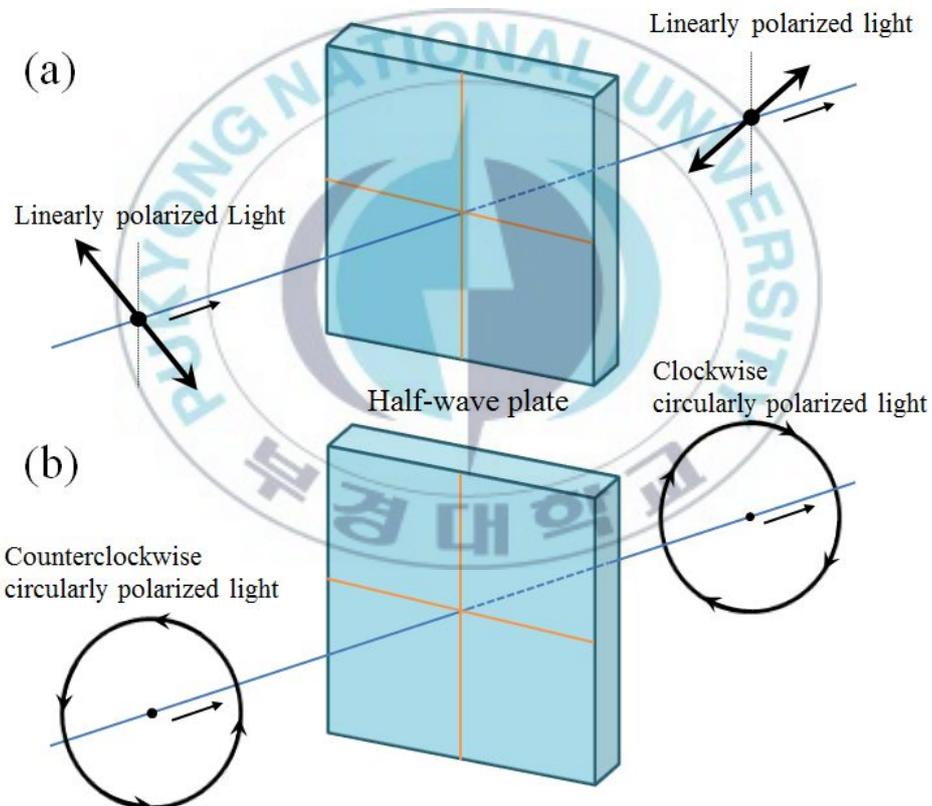


그림 2.6. 1/2 파장판에 입력되는 (a)  $-45^\circ$  선형편광 및 (b) 좌원편광에 따른 출력 편광

### 3. 기존에 연구된 광섬유 진동 센서

2010년에 FBG를 센서부로 사용하여 온도에 무관한 진동센서가 제안되었고, FBG의 반사 대역폭 (reflection bandwidth) 이 온도에 의해 변하지 않는 특징을 이용하였다. 제안된 센서는 그림 3.1(a)와 같이 센서 시스템을 구성하여, 편심타원기어를 주기적으로 회전시켜 외팔보에 진동을 주는 방식으로 진동 특성을 조사하였다. 측정 가능한 주파수 대역폭은 0~25 Hz이었고, 출력 파워 민감도는  $\sim 0.264$  mV/mm로 측정되었다. 하지만, UV 노출공정을 통해 제작된 광섬유 격자를 센서부로 사용하여 제작이 까다롭고, 센서부가 횡방향 스트레스에 약하다 [8].

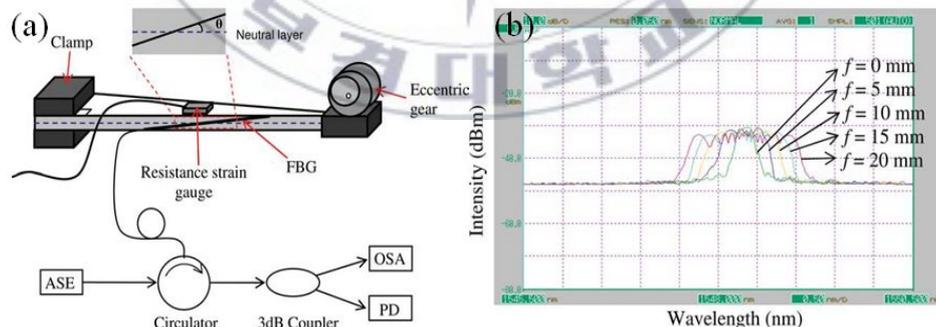


그림 3.1 기존에 제안된 FBG의 반사 대역폭 변화를 이용한 (a) 광섬유 진동 센서의 모식도 및 (b) 외팔보의 변위에 따른 FBG 반사 대역폭의 변화

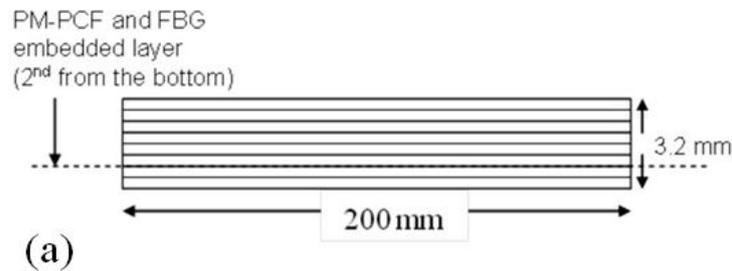


그림 3.2 기존에 제안된 (a) 폴리에스터 수지에 PM-PCF를  
함침시킨 합성 시료와 (b) 합성 시료를 센서부로 이용한  
광섬유 진동 센서의 구조

2012년에는 PM-PCF를 센서부로 사용하고, 센서부 양쪽에 두 개의 선형 편광판을 연결하여 온도에 둔감한 편광 간섭형 진동 센서가 제안되었다. 제안된 센서에서는 그림 3.2(a)와 같이 PM-PCF를 일반적인 폴리에스터 수지 (polyester resin) 를 쌓

아울린 합성 시료 내부에 내장시켜 센서부가 외부 스트레스에 강인하도록 설계하였다. 제안된 센서 시스템은 그림 3.2(b)와 같이 진동 센서 시스템을 구성하여 소형 진동기를 이용해 센서부에 진동을 인가하였으며,  $\sim 0.253$  dB/mm의 민감도로 2~25 Hz의 주파수 대역폭을 측정할 수 있었다 [9]. 동일 년도에 공진 파장이 같은 두 개의 FBG를 센서부로 포함하는 페브리-페로 간섭계를 기반으로 진동 센서 시스템이 제안되었다. 실험에 사용된 FBG의 길이는 8 mm, 두 FBG 사이의 간격은 4 mm이었다. 크로스 롤러 가이드 (cross roller guide) 와 직사각형 압전 소자를 이용하여, 스트레인과 진동에 대한 센서의 반응을 조사하였으며, 제안된 센서는 측정 가능한 주파수 대역폭을 1 kHz 까지 확장시켰지만, 주변 온도에 대한 보상 방법을 제시하지 못했다 [10]. 2013년에는 공진 파장이 다른 두 개의 FBG를 이용하여 진동과 온도를 동시에 측정할 수 있는 센서가 제안되었다. 제안된 센서 시스템에서는 두 개의 FBG를 일반적인 단일모드 광섬유 (single-mode fiber: 이하 SMF) 에 새긴 후, 불화수소 (HF) 를 이용한 화학적 식각 과정을 거쳐 그림 3.3(b)와 같은 센서부를 제작하였다. 제안된 센서를 오븐에 넣고, 내부 온도를 20~180 °C의 범위에서 10분 간격으로 변화시키며 센서의 반응을 측정하였다. 또한, 진동대를 이용하여 제안된 센서의 진동에

대한 반응을 조사하였다. 제안된 센서로 측정 가능한 진동과 온

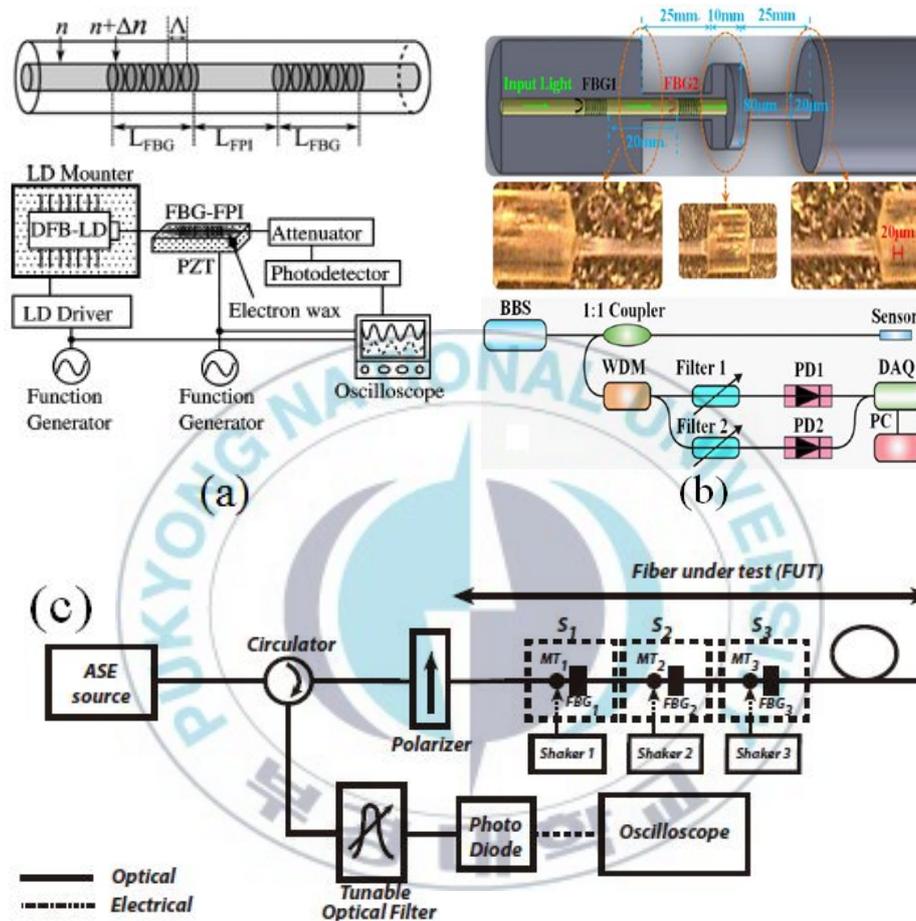


그림 3.3 기존에 연구된 공진파장이 (a) 동일하거나 (b) 다른 두 개의 FBG 및 (c) 여러 개의 FBG 를 사용한 기존의 광섬유 진동 센서 시스템들의 모식도

도 범위는 각각 0.5~100 Hz, 20~180 °C 이었다. 제안된 센서

는 온도에 대한 보상이 가능했지만, 측정 가능한 주파수 대역폭이 100 Hz로 제한되었다 [11]. 동일한 해에 그림 3.3(c)와 같이 서로 다른 공진 파장을 가진 여러 개의 FBG를 직렬 연결하여 여러 지점에서 진동을 측정할 수 있는 다중점 (multi-point) 진동 센서가 제안되었다. 광대역 광원에서 출력된 빛은 광 순환기 (optical circulator) 를 통해 한 개의 편광기와 FBG들이 있는 단자로 나오게 되고, FBG들에서 반사된 빛은 다시 편광기와 광 순환기를 거쳐 광 검출기 (photodetector) 를 통해 검출된다. 제안된 센서는 여러 지점에서 800 Hz까지의 진동을 측정할 수 있었지만, 온도 보상 기법은 제시되지 못하였다 [12]. 2014년에는 그림 3.4(a)와 같은 구조로 코어의 지름이 62  $\mu\text{m}$ 인 다중모드 광섬유 (multi-mode fiber: 이하 MMF) 를 이용하여 센서부를 제작한 진동 센서가 제안되었다. 제안된 센서는 MMF 양단을 SMF와 용착 접속하여 다중모드에 의한 간섭 현상을 이용한 센서로, 센서부에 인가되는 진동은 자석과 코일에 의한 전자기 유도 방식을 이용하였다. 제안된 센서는  $\sim 4.741$  mV/Hz의 민감도로 2~80 Hz의 주파수 대역폭을 측정할 수 있었다 [13]. 동일 년도에 그림 3.4(b)와 같이 센서부로 코어의 지름이 105  $\mu\text{m}$ 인 MMF를 사용하고, MMF의 양단 역시 SMF와 용착 접속시켜 센서부를 제작한 진동 센서 시스템이 제안되었다. 제안된 센서

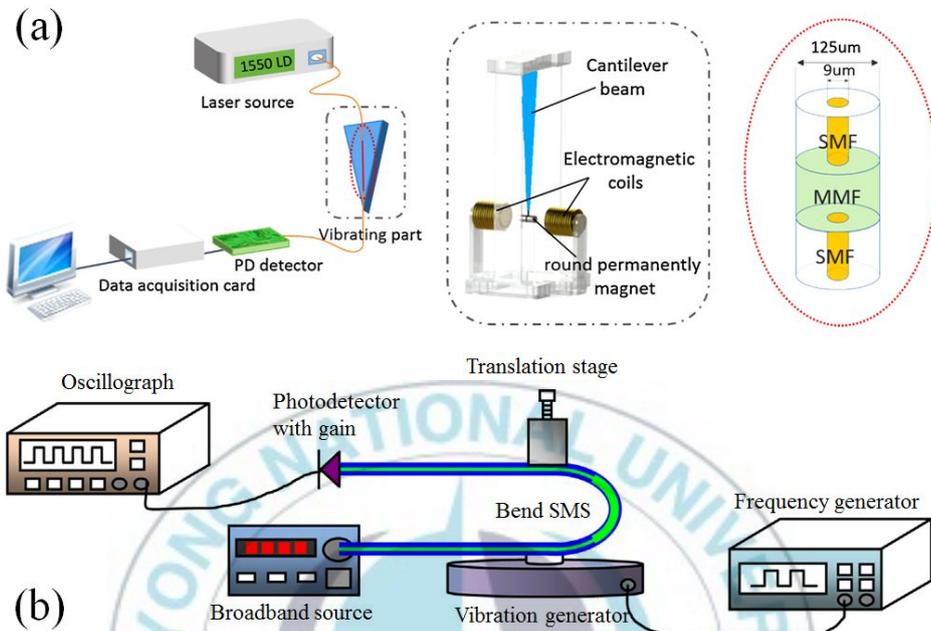


그림 3.4 SMF-MMF-SMF (SMS) 구조를 센서부로 이용한 기존의 광섬유 진동 센서의 모식도

의 진동에 대한 반응을 조사하기 위해 진동 발생기와 이동 스테이지 (translation stage) 를 이용하여 센서부에 구부림의 정도를 시간에 따라 변화시키면서 나타나는 센서 투과율의 변화를 광 검출기를 통해 출력 파워 변화로 변환시켜 진동을 측정하였다. 제안된 센서는 측정 가능한 주파수 대역폭을 11.5 kHz 까지 확장시켰지만, 주변 온도 변화에 대한 보상 기법은 제시되지 않았다 [14].

## 4. 제안된 편광 간섭형 광섬유 센서를 이용한 다양한 진동 측정

### 가. 압전 소자를 이용한 단일 주파수 진동 측정

그림 4.1은 단일 주파수 진동을 측정하기 위해 구성된 편광상이 배치 구조 (polarization-diversity loop constructure: 이하 PDLC) 기반 SBI를 이용한 편광 간섭형 진동 센서 시스템의 모식도를 보여준다. SBI는 편광 빔 분배기 (polarization beam splitter), 센서부로 사용된 PM-PCF와 HWP, QWP를 연결한 PDLC로 구성되며, 이러한 PDLC는 주기적인 간섭 스펙트럼의 투과 특성을 가진다. PDLC에 포함된 HWP와 QWP는 출력 간섭 스펙트럼의 소거율과 절대 파장 위치를 조절하기 위해 사용된다. 실험에 사용된 PM-PCF의 코어와 클래딩은 실리카로 이루어져 있으며, 코어 주변의 큰 공기구멍과 작은 공기구멍의 지름은 각 4.5, 2.2  $\mu\text{m}$ 이다. PM-PCF의 양끝은 광섬유 용착 접속기 (fiber fusion splicer) 를 이용하여 SMF 와 접속시켰고, 두 접속지점 (splicing point) 에서의 손실을 포함한 접속 손실 (splicing loss) 은 총  $\sim 7$  dB로 측정되었다. 접속 손실이 일반적인 광섬유보다 상대적으로 크게 측정되었는데, PM-PCF와

SMF 사이의 모드 필드 직경 (mode field diameter) 의 부정합과 개구율 (numerical aperture) 의 차이, 그리고 접속 과정에서 발생한 PM-PCF의 공기구멍 붕괴에 의한 손실 때문으로 사료된다. 발생한 접속 손실은 SBI의 최대 투과도를 감소시키지만, 제안된 센서는 진동에 의해 발생하는 출력 신호의 변화를 측정하므로 투과도의 변화는 진동 측정의 정확도에는 영향을 미치지 않는다. SBI의 입력 광원으로 1567 nm의 단파장 레이저 다이오드 (monochromatic laser diode) 를 사용하였고, 광 검출기를 이용해 간섭계에서 출력되는 빛의 세기를 전압 신호로 변환시켰다. 또한, 센서부로 사용된 8 cm 길이의 PM-PCF를 외경

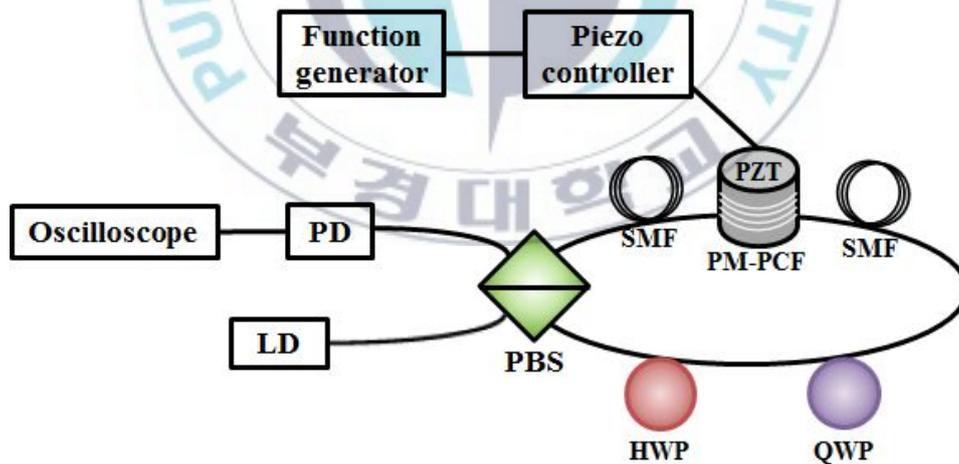


그림 4.1. 단일 주파수 진동 측정을 위한 제안된 진동 센서 시스템의 개략도

2 cm의 원통형 PZT에 에폭시 수지 (epoxy resin) 를 이용하여 감아 부착하여 PZT에서 발생된 진동이 PM-PCF에 온전히 전달되게 하였다. PZT 제어기 (PZT controller) 와 함수 발생기 (function generator) 를 이용하여 단일 주파수 정현파 (single-frequency sinusoidal wave) 가 발생되도록 PZT를 제어하였다. 이때, 인가되는 단일 주파수 진동의 실효치 (effective value) 는  $\sim 6.75 \mu\epsilon$  (rms) 로 측정되었다. 그림 4.2는 단일 주파수 진동에 대한 센서의 다양한 출력 신호 변화와 주파수 응답을 보여준다. 1~8000 Hz 범위의 단일 주파수 진동에 대한

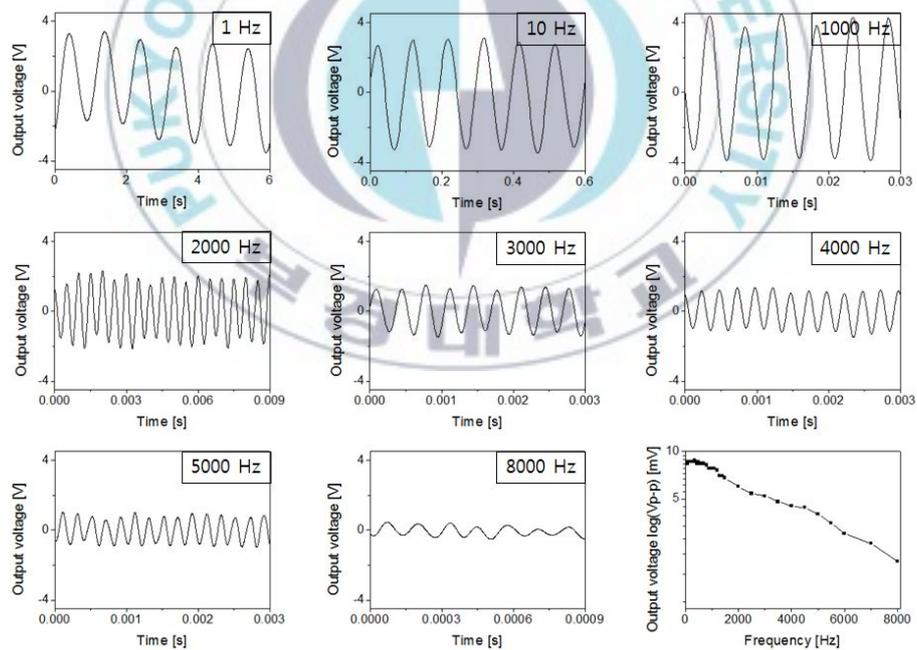


그림 4.2. 제안된 진동 센서의 주파수별 출력 신호

센서의 반응을 확인하였으며, 한계 주파수 (cutoff frequency)가 5000 Hz로 측정되었다. 5000 Hz 이상 주파수에서는 복굴절 변화 속도가 PM-PCF의 주 재료인 실리카 (SiO<sub>2</sub>)의 변형속도에 즉각적으로 부응하지 못하는 것으로 사료된다. 5000 Hz에서 측정 가능한 최소 검출 가능 스트레인 섭동은  $\sim 2.013 \text{ ne/Hz}^{1/2}$ 로 측정되었다.

#### 나. 철제 외팔보를 이용한 자연 감쇠 진동 측정

철제 외팔보와 추를 이용해 발생시킨 자연 감쇠 진동에 대한 센서의 응답을 확인하기 위해 그림 4.3과 같이 센서 시스템을 구성하였다. 실험에 사용된 철제 외팔보의 한 쪽 끝은 고정시켜 놓고 다른 한 쪽 끝에 다양한 무게의 추를 떨어뜨려 자연 감쇠 진동을 발생시켰다. 철제 외팔보에 의해 생성된 자연 감쇠 진동은 에폭시 수지를 이용하여 철제 외팔보에 부착된 PM-PCF에 인가되도록 하였다. 각 27.8, 55.6, 83.4 g의 추를 6, 10, 14 cm의 높이에서 외팔보의 고정하지 않은 한 쪽 끝에 수직으로 낙하시켰을 때, 낙하높이와 추의 무게에 상응하는 자유 감쇠 진동이 발생되었다. 그림 4.4는 다양한 진동 조건에 따라 측정한 센서의 반응을 보여주고 있다. 센서 출력 신호의 침두치는 센서부에

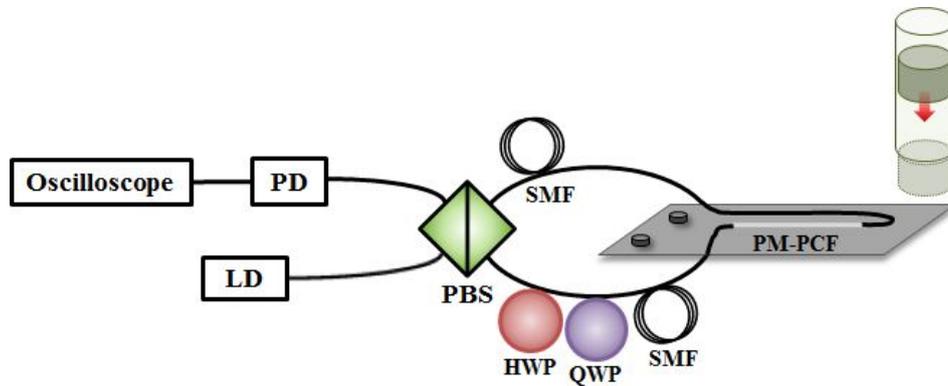


그림 4.3. 철제 외팔보에 인가되는 진동을 측정하기 위한  
진동 센서 시스템의 개략도

가해지는 외부 스트레스 (external stress) 크기에 비례하며, 외팔보에 추가로 인가되는 외부 스트레스가 없을 경우, 시간의 흐름에 따라 출력 신호가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 센서의 출력 신호가 초기 침투치의 20%가 되는데 걸리는 회복 시간 (recovery time) 은 ~3 s로 측정되었다. 회복 시간은 외팔보를 구성하는 물질의 종류나 외팔보의 형태에 많은 영향을 받을 것으로 사료된다. 충격량-운동량 정리 (impulse-momentum theorem) 를 통해 낙하하는 추에 의해 외팔보에 인가되는 외부 스트레스는 다음 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$I = mg\Delta h \quad (2)$$

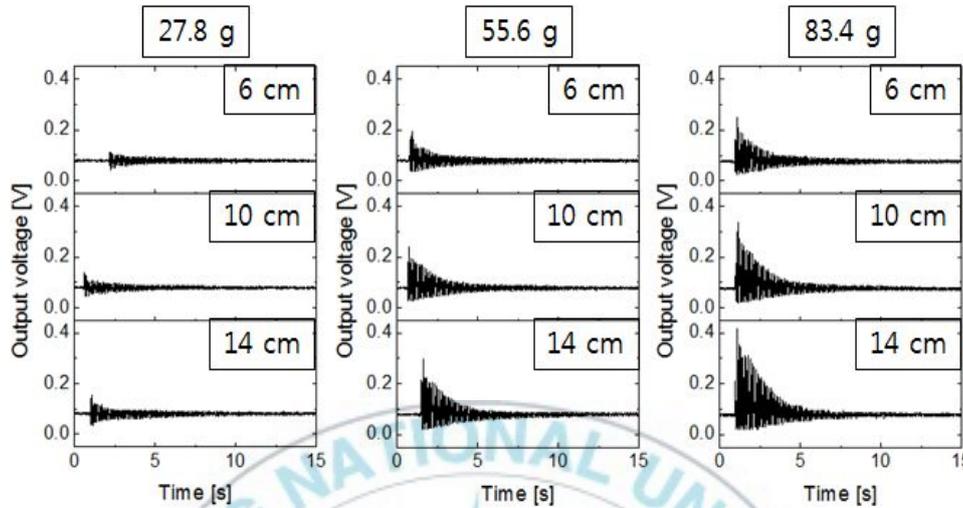


그림 4.4. 각 조건별 진동에 따른 센서의 반응

여기서  $I$ 와  $g$ 는 각각 외팔보에 인가되는 외부 스트레스의 충격량과 중력가속도이다. 식 (2)에서부터 충격량  $I$ 는 추의 질량  $m$ 과 낙하 높이  $h$ 에 비례하는 것을 확인할 수 있다. 그림 4.5(a)와 4.5(b)는 외팔보에 인가되는 충격량에 따른 출력 신호의 첨두치 변화와 기본 주파수를 보여준다. 외부에서 인가되는 충격량의 크기가 증가하면, 출력 첨두치는 증가하지만 기본 주파수는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 각 추의 질량 (27.8, 55.6, 83.4 g)에 대해 충격량 민감도와 기본 주파수는 각각 1.62, 2.40, 2.67 V/(kg·m/s)와 8.84, 8.79, 8.68 Hz로 측정되었다.

## 다. 제안된 진동 센서 시스템의 온도에 대한 반응 측정

항온항습기를 이용해 온도에 대한 제안된 센서 시스템의 반응을 확인하였다. 제안된 진동 센서의 센서부로 사용된 PM-PCF를 항온항습기에 넣어 20~90 °C의 온도 범위에서 온도 변화에 대한 센서의 반응을 확인하였다. 센서부 주변의 온도가 증가함에 따라 투과 스펙트럼은 적색 천이 (red shift) 하는 것을 확인할 수 있었다. 그림 4.6(a)은 센서 시스템의 주변 온도를 증가시켰을 때, 스펙트럼의 파장 천이를 보여준다. 간섭 패턴의 간격은 PM-PCF의 길이와 복굴절에 의해 결정되는 것을 식 (1)에서 확인할 수 있고, 측정된 간섭 패턴의 간격은 18.92 nm로 측정되었다. 온도가 20에서 90 °C로 증가했을 때, 투과 골이 장파장 방향으로 4.54 nm 천이한 것을 그림 4.6(b)에서 확인할 수 있으며, 제안된 센서의 온도에 대한 민감도는 일반적인 편광유지 광섬유에 비해 약 15배 둔감한  $\sim 64.86 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 로 측정되었다. 제안된 센서 시스템의 온도에 따른 평균변화율과 출력 신호의 변동은 각각  $\sim 0.052 \text{ V}/^\circ\text{C}$ 와 0.002 V로 측정되었으며, 온도에 의해 발생된 오차는 5000 Hz에서  $\sim 2.815\%$ 로 계산되었다.

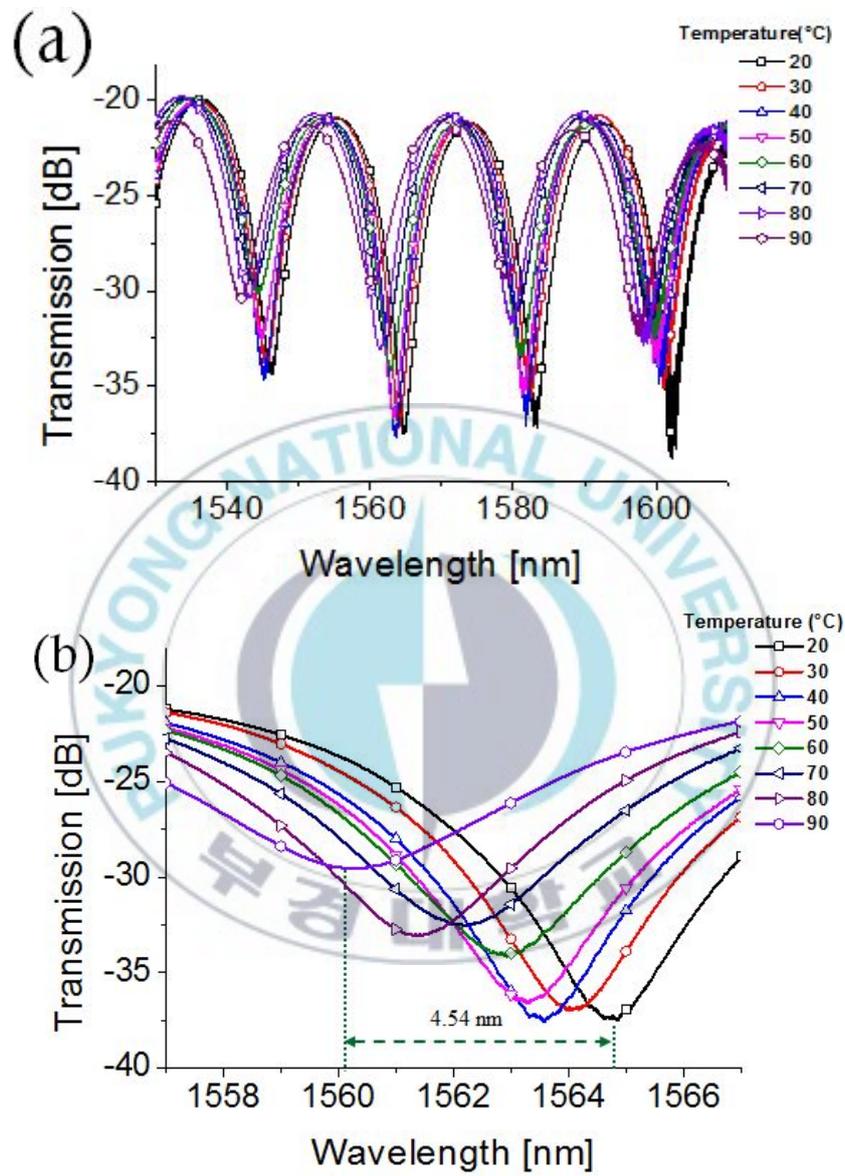


그림 4.6. 제안된 진동 센서 시스템의 온도에 대한 (a) 광대역 및 (b) 협대역 투과 스펙트럼 변화

## 5. 결론

본 논문에서는 PBS, PM-PCF, HWP, QWP를 이용하여 구성된 SBI를 기반으로 편광 간섭형 진동센서를 제안하였고, 다양한 진동과 온도에 대해 제안된 센서의 반응을 확인하였다. 제안된 센서는 기존에 연구된 광섬유 진동 센서에 비해 넓은 측정 가능 주파수 대역폭을 제공하고, 비교적 주변 온도에 둔감한 특성을 가지는 것을 확인하였다. 제안된 센서를 이용하여 1~5000 Hz 범위의 단일 주파수 진동을 측정할 수 있었고, 5000 Hz 이상의 단일 주파수 진동에서 센서의 출력 신호가 저하되기 시작하는 것을 확인할 수 있었다. 이 때, 정적 스트레인 실효치는  $\sim 6.75 \mu\epsilon$  (rms) 로 측정되었다. 또한, 5000 Hz의 단일 주파수 진동에서 센서의 측정 가능한 최소 검출 가능 스트레인 섭동은  $\sim 2.013 \text{ n}\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$ 로 측정되었다. 자연 감쇠 진동에 대한 센서의 특성을 확인하기 위해 금속 외팔보와 다양한 무게의 추를 이용하여 측정을 수행하였다. 외부에서 센서부로 사용된 PM-PCF에 인가되는 충격량이 증가할수록 센서의 출력 신호의 침투치와 센서 민감도가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 반면에 기본 주파수는 감소하는 것을 확인하였다. 추가적으로, 항온항습기 이용하여 센서부 주변 온도를 20~90 °C의 범위에서 조절하여

제안된 센서 시스템의 온도에 대한 반응을 조사하였다. 제안된 센서 시스템의 온도 민감도는  $\sim 64.86 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 로 확인되었고, 온도에 의한 평균변화율과 출력 신호의 변동은 각각  $\sim 0.052 \text{ V}/^\circ\text{C}$ 와  $\sim 0.002 \text{ V}$ 로 측정되었다. 또한, 5000 Hz의 단일 주파수 진동에서 온도에 의해 발생된 오차는  $\sim 2.815\%$ 로 계산되었다.



## 참 고 문 헌

- [1] Hao Sun, Manli Hu, Qiangzhou Rong, Yanying Du, Hangzhou Yang, Xueguang Qiao, “High sensitivity optical fiber temperature sensor based on the temperature cross-sensitivity feature of RI-sensitive device,” *Opt. Communications*, vol. 323, pp. 28-31, 2014.
- [2] B. Dong, J. Hao, C. Liaw, B. Lin, S. C. Tjin, “Simultaneous strain and temperature measurement using a compact photonic crystal fiber inter-modal interferometer and a fiber Bragg grating,” *Appl. Opt.*, vol. 49, pp. 6232-6235, 2010.
- [3] F. Xu, D. Ren, X. Shi, C. Li, W. Lu, L. Lu, L. Lu, B. Yu, “High-sensitivity Fabry-Perot interferometric pressure sensor based on a nanothick silver diaphragm,” *Opt. Lett.*, vol. 37, pp. 133-135, 2012.
- [4] B. Renganathan, D. Sastikumar, S. Gokul Raj, A. R. Ganesan, “Fiber optic gas sensors with vanadium oxide and tungsten oxide nanoparticle coated claddings,” *Opt. Communications*, vol. 315, pp. 74-78, 2014.
- [5] J. R. Guzman-Sepulveda, V. I. Ruiz-Perez, M. Torres-Cisneros,

- J. J. Sanchez-Mondragon, D. A. May-Arrioja, "Fiber optic sensor for high-sensitivity salinity measurement," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 25, pp. 2323-2326, 2013.
- [6] A. Gonzalez-Segura, J. L. Cruz, M. V. Andres, P. Barrios, A. Rodriguez, "Fast response vibration sensor based on Bragg gratings written in tapered core fibers," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, pp. 3139-3143, 2007.
- [7] H. V. Thakur, S. M. Nalawade, Y. Saxena, K.T.V. Grattan, "All-fiber embedded PM-PCF vibration sensor for Structural Health Monitoring of composite," *Sens. Actuators A : Phys.*, vol. 167, pp. 204-212, 2011.
- [8] W. Zhou, X. Dong, C. Shen, C. L. Zhao, C. C. Chan, P. Shum, "Temperature-independent vibration sensor with a fiber Bragg grating," *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, vol. 52, pp. 2282-2285, 2010.
- [9] G. Rajan, M. Ramakrishnan, Y. Semenova, A. Domanski, A. Boczkowska, T. Wolinski, G. Farrell, "Analysis of vibration measurements in a composite material using an embedded PM-PCF polarimetric sensor and an FBG Sensor," *IEEE Sens. J.*, vol. 12, pp. 1365-1371, 2012.

- [10] A. Wade, S. Tanaka, N. Takahashi, "Optical fiber vibration sensor using FBG fabry-perot interferometer with wavelength scanning and fourier analysis," *IEEE Sens. J.*, vol. 12, pp. 225-229, 2012.
- [11] Q. Zhang, T. Zhu, J. Zhang, K. S. Chiang, "Micro-fiber-based FBG sensor for simultaneous measurement of vibration and temperature," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 25, pp. 1751-1753, 2013.
- [12] N. Linze, P. Tihon, O. Verlinden, P. Megret, M. Wuilpart, "Development of a multi-point polarization-based vibration sensor," *Opt. Express*, vol. 21, pp. 5606-5624, 2013.
- [13] Y. Zhao, X. Li, F. Meng, Z. Zhao, "A vibration-sensing system based on SMS fiber structure," *Sens. Actuators A : Phys.*, vol. 214, pp. 163-167, 2014.
- [14] Q. Wu, M. Yang, J. Yuan, H. P. Chan, Y. Ma, Y. Semenova, P. Wang, C. Yu, G. Farrell, "The use of a bend singlemode-multimode-singlemode (SMS) fibre structure for vibration sensing," *Opt. Technol.*, vol. 63, pp.29-33, 2014.