

PMFBG 센서를 이용한 횡방향 변형률 측정

윤혁진* · 김대현* · 홍창선** · 김천곤**

Measurement of Transverse Strain Using PMBG Sensor

Hyuk-Jin Yoon, Dae-Hyun Kim, Chang-Sun Hong and Chun-Gon Kim

Key Words : Transverse strain, Fiber optic sensor, Fiber Bragg grating, Polarization maintaining fiber

ABSTRACT

PMFBG sensor was fabricated using phase mask and Excimer laser. The reflected wavelength of PMFBG sensor had dual peaks due to intrinsic birefringence. To discover the polarization axes, peak sensitivity was measured under compression test. The signal characteristics of PMFBG sensor were also examined in embedding condition. The embedded PMFBG sensor in epoxy block was loaded for the transverse strain measurements. Experiments showed that the PMFBG sensor could successfully measure the transverse strain. This PMFBG sensor is useful for the structures that require measuring transverse strain.

1. 서론

광섬유 센서를 이용해서 변형률을 측정하는 연구는 지금까지는 주로 페브리 패로 센서(Fabry-Perot sensor), 브래그 격자 센서(Bragg grating sensor)를 이용한 일방향 변형률 측정이 주를 이루었다. 특히 광섬유 브래그 격자 센서(fiber Bragg grating sensor, FBG sensor)를 이용하여 반사파장의 변위를 측정함으로써 일방향 변형률을 측정하고, 파장 분할 다중화(wavelength division multiplexing, WDM) 기법을 사용함으로써 동시에 다점의 변형률을 측정하는 연구가 활발히 수행되었다[1].

그러나 기존의 FBG 센서는 일방향의 변형률을 측정하는 데는 효과적이지만, 광섬유에 횡방향으로 변형률이 가해지는 경우 FBG 센서 신호의 형상이 유지되지 않으므로 광섬유의 축방향 변형률을 제대로 측정할 수가 없다[2]. 대부분의 광섬유 변형률 센서는 광섬유에 횡방향 변형률이 작용하

지 않는 경우에 축방향 변형률만을 측정할 수 있다. 그러나 구조물에 센서가 삽입되어 변형률을 측정할 경우 광섬유의 횡방향 변형률을 측정할 필요가 있으며, 특히 응력 측정에서 구조물에 작용하는 응력은 전체 변형률의 함수이므로 축방향 변형률 만으로는 계산될 수 없다. 따라서 본 연구에서는 편광 유지 광섬유에 브래그 격자를 새겨 편광 유지 광섬유 브래그 격자 센서(polarization maintaining fiber Bragg grating sensor : PMFBG 센서)를 제작하였고, PMFBG 센서의 편광축을 찾기 위하여 센서를 회전시켜 가면서 횡방향으로 하중을 가하여 센서의 민감도를 측정하였다. 편광축이 결정된 PMFBG 센서를 에폭시 시편에 삽입하여 횡방향 변형률을 측정하였다.

2. PMFBG 센서의 제작과 편광축 결정

2.1 PMFBG 센서 제작

편광 유지 광섬유의 광민감성을 증가시키기 위하여 수소처리 장치에서 100°C, 120 기압 하에서 48 시간 동안 편광 유지 광섬유를 수소처리 하였

* KAIST 기계공학과 항공우주공학전공 박사과정

** KAIST 기계공학과 항공우주공학전공 교수

다. 이 실험에서 사용된 편광 유지 광섬유는 FIBERCORE 사의 HB1250 이며 세부적인 사양은 표 1 과 같다.

| Specification | Value |
|---------------------|----------------------------|
| Fiber Diameter | 125 μm |
| Numerical Aperture | 0.16 |
| Cut-off Wavelength | 1095 nm |
| Mode Field Diameter | 6.7 μm @1300 nm |
| Birefringence | 4.869×10^{-4} |

표 1. 편광 유지 광섬유의 특성

수소처리장치에서 수소처리된 편광 유지 광섬유에 위상 마스크(phase mask)와 엑시머 레이저를 사용하여 편광 유지 광섬유 브래그 격자를 제작하였다. 브래그 격자가 새겨진 부분을 PMFBG 센서로 사용하기 위해서는 브래그 격자에서 반사되어 돌아오는 빛의 반사파장이 안정화 되어야 하므로, 오븐에서 48 시간 동안 120°C 로 가열하여 수소제거 작업을 하였다. 제작된 PMFBG 센서에 ASE(amplified spontaneous emission) 소스를 입사시킨후 반사되어 돌아온 편광 유지 광섬유 브래그 격자 센서의 반사 신호는 그림 1 과 같다.

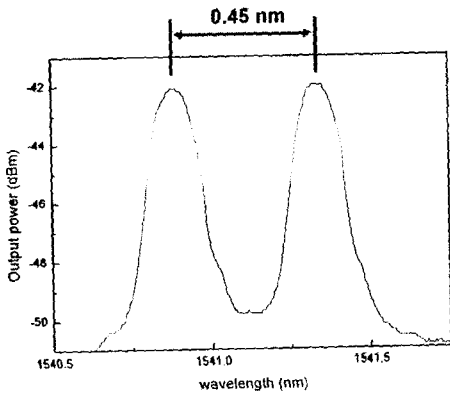


그림 1. PMFBG 센서의 반사 스펙트럼

이 신호로부터 두 편광축으로부터 각각 반사되어 돌아오는 두 개의 피크(dual-peak)를 확인할 수 있으며 피크와 피크 사이의 파장 간격은 0.45 nm 이다.

2.2 PMFBG 센서의 편광축 결정

편광 유지 광섬유에 입사된 빛은 그림 2 에서

나타나 있는 두 광축인 x_2 축과 x_3 축을 따라서 진행한다.

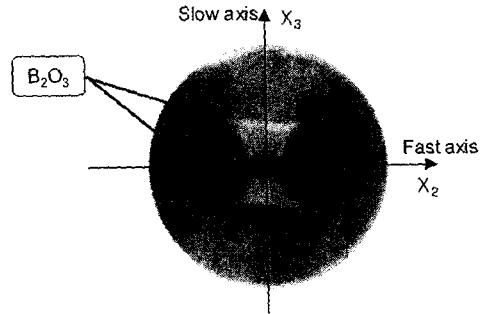


그림 2. 편광 유지 광섬유의 단면

PMFBG 센서의 응답신호는 이 두 광축에서 반사되는 빛의 파장 신호이므로, 측정되는 응답신호로부터 물리량이 작용하는 방향을 결정하기 위해서는 센서의 두 광축이 현재 어떻게 놓여져 있는지를 알아야만 한다.

편광축을 결정하기 위한 방법으로 PMFBG 센서를 회전시켜 가면서 횡방향으로 가해지는 하중에 대한 피크 반사 파장의 민감도를 측정하기 위하여 그림 3 과 같이 유리판(glass plate) 위에 PMFBG 센서와 보조(support) 광섬유를 놓고 그 위에 유리판을 올려놓은 후 두 광섬유 가운데에 지름 1mm 의 강철 핀(steel pin)을 올려 놓았다. 만능 시험기로 강철 핀에 압축하중을 가하여 광섬유 센서에 균일하게 하중이 가해지도록 하였다[3].

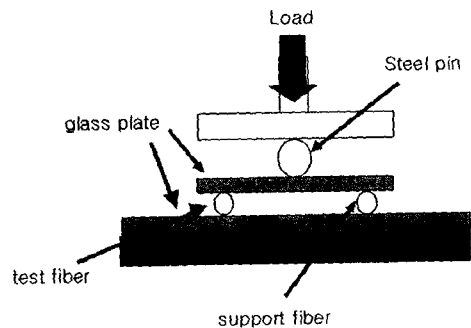


그림 3. PMFBG 센서에 균일한 횡방향 하중을 가하기 위한 지그

PMFBG 센서를 임의의 방향으로 고정시킨 후, 회전시킨 각도에 대한 PMFBG 센서의 x_3 축 반사 파장 민감도(peak sensitivity)를 표시하면 그림 4 와 같다. x_3 축 반사 파장 민감도는 $\Delta\lambda_3 / \Delta P$ 로 정의 하였다.

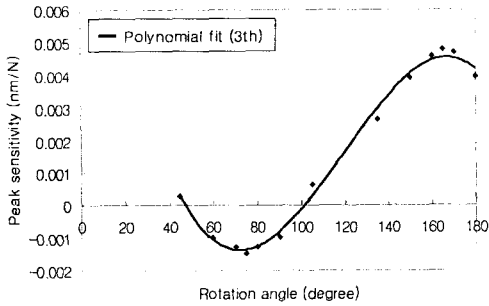


그림 4. 회전 각도에 대한 반사 파장 민감도

이 그림으로부터 PMFBG 센서의 반사 파장의 민감도는 PMFBG 센서의 회전각도에 따라 크게 다르며 일정한 주기를 갖는다는 것을 알 수 있다. 이는 하중이 가해지는 방향과 평행하게 놓인 축은 압축이 일어나고 수직인 축은 인장이 일어나므로 광축이 회전되면서 새로운 복굴절이 일어나는 축이 달라지기 때문이다. PMFBG 센서의 반사 파장의 민감도가 가장 클 때의 각도가 x_3 축이 하중이 가해지는 방향과 수직하게 놓인 경우이고, 가장 작을 때의 각도가 x_3 축이 하중이 가해지는 방향과 평행하게 놓인 경우이다. 이 두 각도는 165도와 75도로 정확히 90도 차이를 보이므로 이 실험으로 정확히 광축을 찾을 수 있었다.

3. PMFBG 센서를 이용한 횡방향 변형률 측정

3.1 PMFBG 센서의 변형률 측정 원리

빛이 진행하는 광섬유의 코어 내에 주기적인 굴절률의 변화가 새겨진 것은 브래그 격자의 역할을 하게 되며 광폭 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우 굴절률이 변하는 경계면에서 빛이 반사하는데 이들 중 다음의 식 (1)과 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 의해서 결정된 파장 성분은 보강 간섭을 일으켜 광섬유 격자 부위에서 반사되며 나머지 파장 성분은 통과하게 된다.

$$\lambda_B = 2n_c \Lambda \quad (1)$$

위 식에서 n_c 는 광섬유 격자의 유효 굴절률이고, Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격(grating period)이다. 만약 변형률이 광섬유에 가해지면 이

는 광섬유의 유효 굴절률을 변화시키며, 브래그 파장 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\Delta \lambda_{B,2}}{\lambda_{B,2,0}} = \varepsilon_1 - \frac{n_e^2}{2} [p_{11}\varepsilon_2 + p_{12}(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)] \quad (2)$$

$$\frac{\Delta \lambda_{B,3}}{\lambda_{B,3,0}} = \varepsilon_1 - \frac{n_e^2}{2} [p_{11}\varepsilon_3 + p_{12}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)]$$

여기에서 p_{11} , p_{12} 는 스트레인 광학 상수이고 n_0 는 유효 굴절률이다.

변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 변형률을 식 (2)를 통하여 계산해 낼 수 있다.

3.2 시편 제작 및 실험

PMFBG 센서의 편광축을 결정하기 위한 실험으로부터 x_3 축이 가해지는 하중 방향과 수직이 되도록 조정하였다. 광축을 찾은 후 광섬유 칩으로부터 분리할 경우 찾은 광축이 틀어지게 되므로, 그대로 PMFBG 센서를 고정시킨 상태에서 몰드를 센서 부분에 사각형으로 씌우고 클램프를 이용하여 틀을 고정시켰다. 몰드를 이용해 사각형으로 만들어진 틀 안에 국도화학의 수지(YDF-170)와 경화제(H4198)를 질량비 100:50으로 섞은 에폭시를 부었고, 상온에서 24시간동안 경화시킨 후 몰드를 분리하였다. 그림 5는 PMFBG 센서가 삽입된 에폭시 시편의 형상이다.

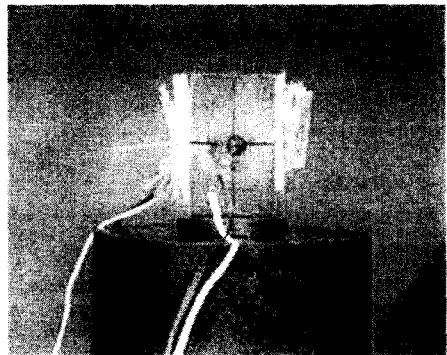


그림 5. PMFBG 센서가 삽입된 에폭시 시편

PMFBG 센서가 삽입된 그림 5의 시편 표면에 2축 ESG를 부착하여 측정된 값을 비교할 수 있도록 하였다. 제작된 시편을 압축하중 시험을 위해 10ton 용량의 INSTRON(Model No. 4482)사의 만

능 시험기에 설치하였다. WSFL 을 광원으로 사용하였으며 파장 좌표계의 설정을 위해 피크간 간격이 0.8nm 인 E-Tek 사의 페브리-페로 파장 고정기 (FPWL)를 사용하였다. 광검출기로 감지된 PMFBG 센서의 신호는 National Instruments 사의 A/D 변환보드(PCI6110E)를 통하여 컴퓨터로 취득하였다. 취득된 PMFBG 센서의 시간 영역에서의 데이터와 FPWL 의 피크점들에서의 데이터를 통해 반사 파장을 측정할 수 있도록 신호처리 프로그램을 구성하였고, 이를 통해 PMFBG 센서의 반사 파장을 검출하였다.

3.3 결과

신호처리 프로그램을 통해 저장된 반사 파장과 스트레인 광학 상수를 식 (2)에 대입하여 2 축과 3 축 방향의 변형률을 계산하였다. 그림 6 은 PMFBG 센서의 2 축과 3 축 방향 변형률(ϵ_2, ϵ_3)과 스트레인 게이지로 측정된 변형률을 보여준다.

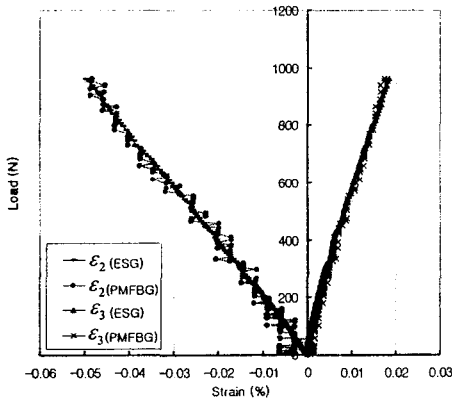


그림 6. PMFBG 센서와 ESG 로 측정된 변형률(ϵ_2, ϵ_3).

그림 6 에서 볼 수 있는 바와 같이 PMFBG 센서의 ϵ_2 와 ϵ_3 가 스트레인 게이지의 값을 잘 따라가고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

위상 마스크와 엑시머 레이저를 사용하여 PMFBG 센서를 제작하였다. 제작된 PMFBG 센서의 반사 신호는 편광 유지 광섬유의 높은 복굴절율의 영향으로 두개의 피크를 가짐을 알 수 있었고, 0.45 nm 의 차이를 갖는 두 반사 파장의 변화

량을 측정하면 횡방향 변형률을 측정할 수 있음을 확인하였다.

PMFBG 센서가 나타내는 횡방향 변형률은 각각의 광축이 나타내는 변형률 이므로 광축을 찾아야 한다. 따라서 광축을 결정하기 위해서 PMFBG 센서를 임의의 방향으로 고정시키고 회전시켜 가면서 압축하중을 가하여 브래그 반사 파장의 민감도를 측정하여 PMFBG 센서의 광축을 결정하였다. 또한 PMFBG 센서에 횡방향으로 압축하중을 가하였을 때, 브래그 반사 파장은 회전각도에 크게 민감함을 알 수 있었다.

PMFBG 센서를 에폭시 시편에 삽입하고 시편에 가해지는 하중에 대해 PMFBG 센서의 반사파장을 측정하였다. 브래그 반사 파장은 하중에 선형적으로 변화하였으므로 구조물에 가해진 하중을 측정하는데 적합함을 확인할 수 있었다.

PMFBG 센서에 가해지는 횡방향 변형률을 측정하기 위해서 스트레인 광학 상수의 값을 결정하였으며, 에폭시에 함침하여 시편을 제작하였다. 제작된 시편에 가해지는 변형률을 PMFBG 센서로 모니터링 하였고 스트레인 게이지와 비교하여 횡방향 변형률을 측정할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업중 중점국가연구개발사업(기계설비소기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

참고문헌

- (1) C. S. Hong, C. Y. Ryu and C. G. Kim, "Multiplexed Strain Monitoring of Composite Structures Using Fiber Bragg Grating Sensors," Proc. of 6th Japan Int. SAMPE Conference, pp.951-954, Tokyo, Japan, October 26-29, 1999.
- (2) 이정률, 류치영, 강현규, 김대현, 구본용, 강동훈, 병프환, 평판 내부에 삽입된 광섬유 브래그 격자 센서의 삽입안정성과 신호 특성에 관한 연구, 한국복합재료학회 추계학술발표회 논문집, pp.238-244, 서울대학교, 2000.11.17
- (3) C. M. Lawrence, D.V. Nelson, E. Udd and T. Bennett. (1999), A Fiber Optic Sensor for Transverse Strain Measurement, *SPIE*, Vol. 39, No. 3, 202-209.