

광섬유 브래그 격자 센서의 변형률 감지도

Strain Sensitivity of Fiber Optic Bragg Grating Sensor

권일범*

최만용**

김민수***

Kwon, Il-Bum

Choi, Man-Yong

Kim, Min-Soo

Abstract

Recently, there has been considerable interest in the development of fiber-optic sensors based on fiber Bragg gratings (FBGs), which can be made into Ge-doped fiber's core by UV phase mask or holographic methods. A good sensitivity and small size of this sensor make it an ideal candidate for distributed sensing in smart structures or other structural monitoring applications. In this study, fiber optic Bragg grating sensor, which could be applied to measure the absolute strains, was constructed and the strain sensitivity of this sensor was investigated in order to apply to the structural health monitoring. Fiber Fabry-Perot (FFP) filter has been used to detect the optical signals instead of optical spectrum analyzer. It has been convenient to determine the structural strains from the output signal of FBGs. The fiber optic Bragg grating sensor was attached on the aluminum beam near the electrical strain gage to measure the same strain. The relationship between strain and fiber signal was linearly fitted. The strain sensitivity of the fiber optic Bragg grating sensor was determined as $1.57 \mu\epsilon/\mu\text{sec}$ from the aluminum beam test.

Key words : fiber optic Bragg grating sensor, absolute strain, structural health monitoring, strain sensitivity

* 정회원, 한국표준과학연구원 산업측정표준부 책임연구원, 공박

** 정회원, 한국표준과학연구원 산업측정표준부 책임연구원, 공박

*** 한국표준과학연구원 산업측정표준부 인턴연구원

● 본 논문에 대한 토의를 1999년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2000년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

온도, 압력, 변형률, 전류 등과 같은 물리량의 변화를 측정하기 위한 방법은 다양하다. 이 중 변형률을 측정하는 대표적인 센서로써 변형률을 계이지를 들 수 있다. 기존의 변형률 계이지는 기본 설계 및 구조가 전기적이기 때문에 전선의 자기 열효과(self-heating effect) 등으로 센서의 수명을 스스로 약화시키며 부식 등에 의해서도 내구성이 감소되는 단점이 있다. 이에 반해 광섬유 센서는 감지도가 뛰어나고 광섬유가 유전체로 구성되어 있기 때문에 전자기간섭(EMI)에 대한 영향을 고려하지 않아도 되며 화학적으로도 안정하다. 또한 광섬유의 굽힘특성이 양호하여 피측정물의 표면에 부착하거나 삽입하여 사용할 수도 있다⁽¹⁾.

광섬유 센서를 이용하여 물리양의 변화를 검출하는 방법에는 광의 세기를 이용하는 방법과 광섬유를 전파하는 광의 위상을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 전자의 경우 광섬유에 외부 물리양이 인가되면 광섬유를 진행하는 빛에 손실을 가하게 된다. 검출부에서는 손실된 광량을 직접 검출하기 때문에 신호처리가 단순하며 구조도 간단하다는 장점이 있다. 그러나 측정감도가 낮은 단점을 가지고 있다. 광의 위상을 이용하는 경우 단일 광원에서 입사된 레이저 광은 광결합기를 통해 서로 다른 광섬유를 전파하게 된다. 외부 물리량의 변화를 겪은 광과 그렇지 않은 광이 광결합기를 통해 다시 하나의 광섬유에서 만날 때 서로 다른 위상차로 인하여 보강간섭과 상쇄간섭을 통하여 간섭파를 만들게 된다. 위상차에 의한 센서이기 때문에 감도가 뛰어나지만 신호처리가 광세기변조형에 비하여 복잡하며 또한 편광을 고려해야 하는 어려움이 있다⁽²⁾.

초기의 광섬유 센서는 광원 및 광섬유 자체의 성능이 열악하여 신호 대 잡음비가 낮았으며, 신호를 검출하고자 하는 위치에서 광섬유를 절단하여 단면을 코팅하거나 특수 처리된 광섬유를 사용하여야 하는 등 복잡한 공정을 거쳐야만 했다.

그러나 1984년 희토류 금속을 광섬유에 첨가하여 제작하는 기술이 선보이면서 특정 파장대역에서 광증폭을 자유롭게 할 수 있어 신호 대 잡음비의 향상은 물론 광섬유 레이저 등과 같은 부가적인 응용 연구의 발전을 도모했다⁽³⁾.

G. Meltz 등⁽⁴⁾에 의해 광섬유에 주기적인 굴절률 변화를 갖는 격자를 형성하면 특정 파장을 광이 진행하는 반대 방향으로 반사한다는 사실을 발견하였다. 이러한 특성을 이용하는 센서를 광섬유 브래그 격자 센서라고 한다. 광섬유 브래그 격자 센서는 광의 세기를 이용하는 센서이지만 기존의 광 세기변조형 센서에 비해 신호처리가 복잡하나 감지도는 뛰어난 특성이 있다. 또한 단일 광섬유에 서로 다른 특성을 갖는 브래그 격자를 연결함으로써 서로 다른 위치에서 발생하는 연속적 혹은 불연속적인 다수의 물리량을 관측할 수 있는 분포계측센서를 구성할 수도 있다.

본 연구에서는 광섬유 브래그 격자센서에 의하여 구조물의 안전성을 감시하기 위하여 광섬유 브래그 격자 센서를 구성하고 변형률 감지도를 조사하였다. 동일한 변형률을 받는 위치에 광섬유 브래그 격자 센서와 변형률 계이지를 나란히 위치하여 변형률 검출 시스템을 구성하여 두 변형률 값을 비교·분석하였다. 특히 반사 광파장 변화를 검출하는데 고가의 광스펙트럼분석기(optical spectrum analyzer) 대신 FFP(Fiber Fabry-Perot) 필터를 사용하였다. 이렇게 검출된 광파장 변화로부터 변형률을 구하기 위한 변형률 감지도를 1차 함수로 근사하여 결정하였다.

2. 작동 원리

홀로그램이나 위상 마스크를 이용하여 게르마늄이 첨가된 광섬유의 코어에 자외선을 주사하면 주기적인 굴절률 변화를 갖는 브래그 격자를 형성할 수 있다. 브래그 격자의 구조 및 동작 형태는 Fig. 1과 같다. 넓은 대역폭을 갖는 광원을 브래그 격자가 있는 광섬유에 입사시킨다. 이러한 브래그 격자는 협대역 파장 반사 필터로서 동작

하게 된다. 브래그 격자에 광대역의 광파장을 입사하였을 경우 아래 수식과 같은 파장이 입사방향으로 반사된다.

$$\lambda_B = 2n_e A \quad (1)$$

여기에서 λ_B 는 반사되는 파장이고 n_e 는 브래그 격자의 유효굴절률이며, A 는 격자의 주기이다. 위와 같은 브래그 조건에 의해 결정된 파장을 제외한 나머지 파장은 광섬유를 통해 계속해서 진행하게 되므로 출력단에서는 반사파장이 제거된 스펙트럼을 얻게된다. 위 수식에서 알 수 있듯이 반사파장은 광섬유 코어의 브래그 격자 유효굴절률과 브래그 격자 주기 만의 함수이기 때문에 광섬유 격자에 온도나 변형률 등이 가해지면 이를 값이 변하고 이에 따라 반사 파장도 달라진다. 이렇게 반사된 파장을 브래그 파장(Bragg wavelength)이라고 한다. OSA를 이용하여 파장의 변화를 검출함으로써 외부에서 가해진 변형률을 구할 수 있는 방법과 광섬유 Fabry-Perot 필터를 이용하여 반사광을 스캐닝함으로써 기준 파장과 검출파장 간의 시간축상의 거리로써 변형률을 구하는 방법이 있다.

OSA를 이용하여 브래그 파장의 변화를 정밀하게 측정할 수 있는 경우에는 광섬유 격자에 가해진 미지의 물리량의 변화를 수식을 이용하여 역으로 계산해 낼 수 있다. 이 경우에는 광섬유의 광탄성 상수(photo-elastic constant), 변형률 광학 텐서(strain-optic tensor) 등을 알아야 하며 계산이 복잡해진다. 그러나 구조물의 변형률 측정을 위하여 광섬유 브래그 격자 센서로부터 출력되는 광파장 변화를 광섬유 Fabry-Perot(FFP) 필터를 이용하여 검출하면 반사 파장을 시간축 상의 이동 거리와 변형률과의 관계로 간단하게 산출해 낼 수 있으며 전자에 비해 경제성이 뛰어나다는 장점을 가지고 있다.

즉 광스펙트럼 분석기의 경우 기준 브래그 파장에 대하여 브래그 파장의 변화는 변형률의 변화로 분석된다. 이와 유사하게 FFP 필터에 대해서는 변형률의 값이 반사광 세기의 시간축 상의 이동으로 나타난다. 따라서 브래그 파장의 이동된 거리와 변형률 및 FFP 필터의 시간차는 다음과 같이 비례 관계를 갖는다.

$$\Delta\lambda \propto \epsilon \propto \Delta t \quad (2)$$

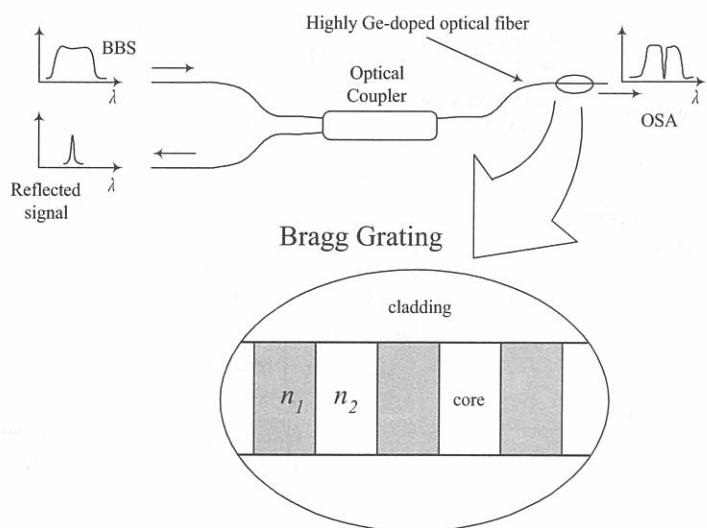


Fig. 1 브래그 격자의 동작 원리

여기에서 $\Delta\lambda$, Δt 는 각각 변형률에 의한 광신호축 상에서의 파장 이동과 시간축 상에서의 신호의 이동량을 시간으로 환산한 것이며, ϵ 은 이 때의 변형률이다.

변형률 값은 기준신호와 검출신호의 시간차 Δt 의 함수가 될 것이며 여기에 비례상수를 추가 함으로써 다음 수식의 형태로 정리할 수 있게 된다.

$$\epsilon = G \cdot f(\Delta t) \quad (3)$$

3. 실험 및 분석

본 연구에서 실험을 위하여 설치한 시스템은 Fig. 2와 같다. Fig. 3에는 실제 시스템을 나타내었다. Fig. 3의 좌측 하단에 보이는 그림은 알루미늄 외팔보 표면에 브래그 격자 센서와 변형률 게이지를 부착한 모습이다. 먼저 광대역 파장의 광을 얻기 위하여 Er 첨가 광섬유에 의한 광증폭기를 이용하여 Fig. 4와 같이 중심파장 1550nm 대역에서 넓은 대역의 빛을 방출하는 광원 본체를 제작하였다. 기준 브래그 격자와 변형률 검출용 브래그 격자는 반사 파장이 1545nm에 대하여 약 95%를 반사하는 것으로 설치하였다.

기준 브래그 격자는 광대역 광원 본체에 설치하였으며 변형률을 검출하는 브래그 격자는 알루미늄 외팔보의 표면에 부착하였다. 또한, 변형률 측정용 브래그 격자의 바로 옆에 평행하게 부착하여 브래그 격자와 동일한 변형률을 측정할 수 있도록 하였다.

Fig. 3과 같은 시스템에서 알루미늄 외팔보에 변형률을 인가하면 검출용 브래그 격자의 격자 주기가 변하게 되고 반사 브래그 파장이 바뀌게 된다. 기준 반사광 및 검출 반사광은 광결합기에



Fig. 3 실험 시스템

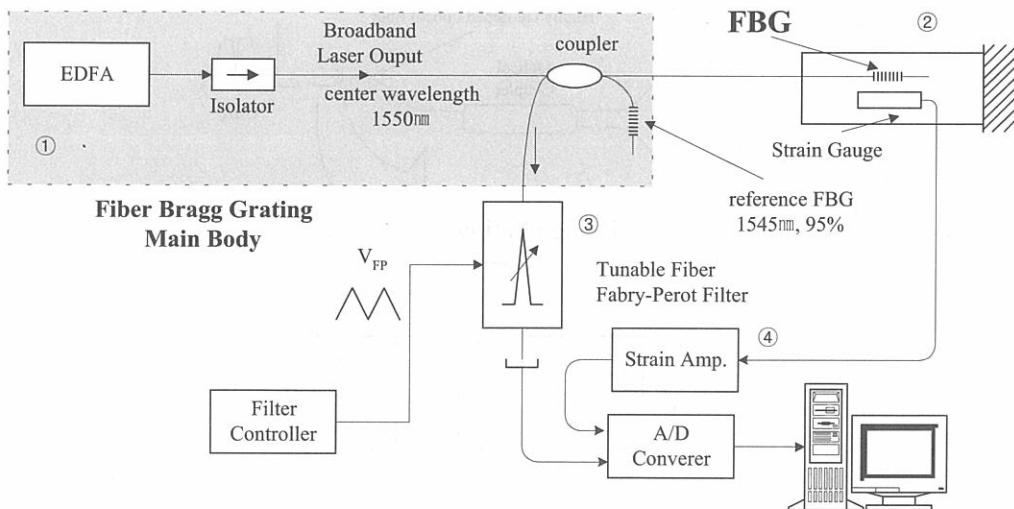


Fig. 2 광섬유 브래그 격자 센서 시스템 구성도

의해 하나의 광섬유로 합쳐지고 Fabry-Perot 필터에 의해 반사광의 형태를 시간축상에 나타낼 수 있는 형태의 신호로 만든다. 이 신호는 A/D 변환기를 통과한 후 컴퓨터에서 Fig. 4와 유사한 광스펙트럼으로 취득된다.

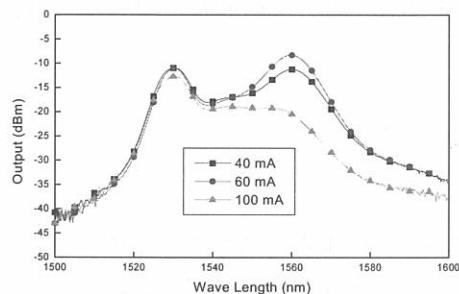


Fig. 4 광대역 광원의 스펙트럼

이러한 두 신호는 디지털 오실로스코프(TDS3034)로 취득하고 GPIB를 통해 PC에 데이터를 저장하였다. Fig. 5는 FFP 필터의 구동 전압을 나타낸 것이다. 구동전압에 비례하여 Fabry-Perot 간섭계의 간섭거리가 변하게 된다. 이러한 동작은 반사광을 파장에 따라 스캐닝하는 작용을 한다. 따라서 FFP필터는 반사광의 스펙트럼을 시간축상으로 볼 수 있게 해준다. FFP 필터를 통하여 얻어진 반사광 스펙트럼을 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 기준 브래그 격자에서 나온 신호는 피크값이 작은 부분이며 왼쪽 피크 부분이 검출

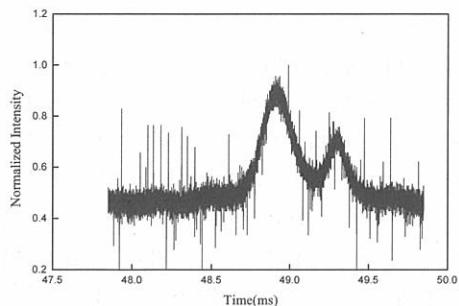


Fig. 6 광섬유 격자로부터 반사되는 광신호

브래그 격자에 의해서 나온 신호이다. 두 브래그 격자를 거의 동일한 특성으로 제작하였음에도 불구하고 초기에 두 신호에 약간의 간격이 발생한 이유는 검출 브래그 격자를 알루미늄 외팔보에 부착시 접착제로 사용한 에폭시가 경화되면서 격자에 인장력을 가해졌거나 알루미늄 외팔보가 자체 무게로 처짐이 발생하였기 때문으로 사료된다.

Fig. 6과 같은 신호에 저역 통과 필터(Low Pass Filter)를 적용하면 Fig. 7과 같은 신호를 얻게 된다. Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 실선은 변형률이 가해지지 않았을 때의 신호이며 점선은 인장 변형률을 가했을 때의 출력 신호이다. 외팔보에 인장 변형을 가하게 되면 검출 신호는 기준 피크에서 멀어지게 되고 압축 변형을 발생시키면 반대현상이 발생하게 된다. 만일 동일한 브래그 격자 혹은 서로 다른 브래그 격자의 경우

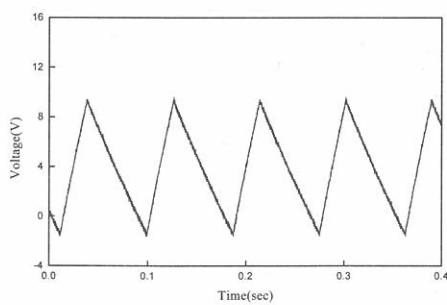


Fig. 5 FFP 구동전압

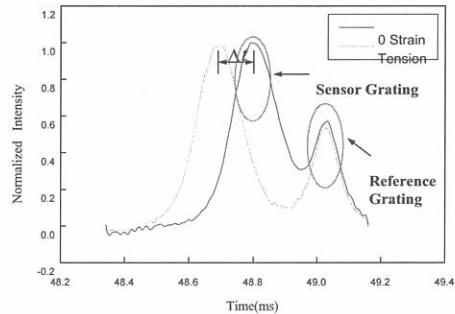


Fig. 7 FBG 센서 출력의 여과후 신호

라도 기준 피크가 오른쪽에 있는 경우는 인장 변형의 경우에 멀어지는 방향으로 검출 피크가 이동하게 된다. 또한 Fig. 5와 같은 구동 전압의 상승상태와 하강상태 중 어느 쪽을 오실로스코프로 관측하느냐에 따라 기준 피크가 왼쪽에 위치할 수도 있고 그 반대일 수도 있다. 이와 같이 외팔보에 변형이 가해지면 Fig. 7과 같이 기준 브래그 격자로부터 센서 브래그 격자의 정점이 이동함을 알 수 있다. 식 (1)에서부터 (3)에 보인 바와 같이 변형률 ε 는 이동 시간 Δt 를 측정하여 구할 수 있게 된다.

변형률 계이지로부터 얻어진 변형률 값과 광섬유 브래그 격자 센서로부터 얻어진 시간축 상의 이동거리 Δt 를 비교하여 Fig. 8을 얻었다. $-400 \sim 400 \mu\text{e}$ 에 대하여 16단계로 측정하였다. 측정 값을 선형 곡선근사(curve-fitting)를 하여 식 (4)를 얻었다.

$$\varepsilon = a \cdot \Delta t + b \quad (4)$$

단, $a = 1.88 \times 10^6$
 $b = -408.536$

동일한 변형률을 10번씩 가할 때 브래그 격자 센서의 신호 반복특성을 조사하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 $-200 \mu\text{e}$ 근처에서는 브래그 격자 센서의 신호 반복 특성이 좋지 않아서 Δt 의

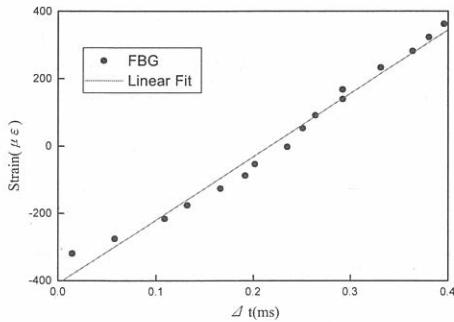


Fig. 8 인장 및 압축 변형률에 대한 곡선근사

분산 정도가 큼을 알 수 있다. 이것은 광섬유의 굽힘 특성이 이러한 변형에 대하여 비선형성을 갖는 것으로 사료되며 계속적인 실험을 통하여 면밀히 관찰해야 할 부분으로 인지하고 있다. 전체적으로 Δt 의 분산 정도가 상당히 커서 변형률을 측정 신뢰도가 낮음을 알 수 있다. 반복 측정에 의한 실험결과를 선형곡선근사한 결과는 다음과 같다.

$$a = 1.570 \times 10^6$$

$$b = -469.531$$

브래그 격자 센서의 감지도를 Δt 로 환산하기 위하여 위 상수 값을 근사식에 대입하면 다음과 같다.

$$\varepsilon = 1.570 \times 10^6 \cdot \Delta t - 469.531$$

위 식의 기울기는 곧 브래그 격자 센서의 감지 도라 할 수 있으므로 시간차 발생에 따른 변형률 감지도는 간단히 다음과으로 나타낼 수 있다.

$$\text{변형률 감지도} : 1.57 \mu\text{e}/\mu\text{sec}$$

즉 Δt 가 $1 \mu\text{sec}$ 넓어지거나 좁아짐에 따라 변형률 변화량은 $1.57 \mu\text{e}$ 변하게 되는 것이다.

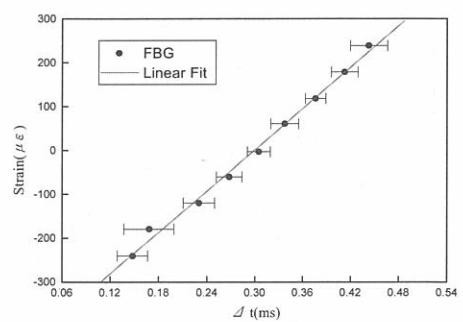


Fig. 9 변형률측정 반복특성

4. 결 론

광섬유 브래그 격자 센서의 인장 및 압축 변형 상태에서의 변형률을 감지 특성을 고찰하였다. 변형률을 시간 간격 Δt 로 환산하기 위하여 OSA 대신 FFP 필터를 이용하였으며 알루미늄 외팔보 표면에 변형률을 케이지와 브래그 격자 센서를 동일한 변형률이 발생하는 위치에 부착하였다. 동일한 변형량에 대하여 10회 반복 측정한 결과 광섬유 브래그 격자 센서는 인장 변형률에 대해서는 선형에 가까운 특성을 보였으며 압축 변형률에 대하여는 약간의 비선형 특성이 있음을 확인하였다. 실험 결과를 변형률에 대한 식으로 나타내어 시간 간격 Δt 의 1차 계수와 상수값은 각각 1.570×10^6 , -469.531 으로 결정되었다.

참 고 문 헌

1. R. O. Claus, J. C. McKeeman, R. G. May and K. D. Bennet, "Optical Fiber Sensors and Signal Processing for Smart Materials and Structures Applications," Proc. of ARO Smart Materials, Structures and Mathematical Issues Workshop, 1988, pp. 29-38.
2. 권일범, 강현규, 김천곤, 홍창선, "3×3 수동변조되풀이 광섬유 마이크로 간섭센서에 의한 구조물의 변형률 측정," 대한기계학회논문집 A권, 제 22 권, 제 1 호, 1998, pp. 80-89.
3. S. B. Poole, D. N. Payne, and M. E. Fermann, Electron. Lett., 21, 1985, pp. 737.
4. G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratins in optical fibers by a transverse holographic method," Opt. Lett., 14, 1989, pp. 823-825.

(접수일자 : 1999. 8. 19)