

論文

변형률 구배와 격자 길이에 따른 광섬유 브래그 격자 센서의 신호 특성 연구

강동훈*, 박상오**, 김천곤**

The Signal Characteristics of Reflected Spectra of Fiber Bragg Grating Sensors with Strain Gradient and Grating Lengths

Dong-Hoon Kang*, Sang-Oh Park** and Chun-Gon Kim**

ABSTRACT

FBG sensors have been studied more actively than any other fiber optic sensor because of good multiplexing capabilities among many fiber optic sensors. The demodulation method of FBG sensors is based on the detection of wavelength shift of their sensor peaks and properties such as strain and temperature can be measured by detecting them. However, the signal stability of FBG sensors can be influenced by the strain gradient induced by structural geometry or cracks on the surface when FBG sensors are embedded into or attached on the structure. In this study, the signal characteristics of reflected spectra of FBG sensors under strain gradient were verified and the relations between the grating length of FBG sensors and the amount of strain gradient were investigated. From the experimental results, the recommended working range of FBG sensors under strain gradients was shown quantitatively with respect to grating lengths of them.

초 록

FBG 센서는 다중화의 큰 장점으로 인해 다른 여러 광섬유 센서에 비해 더욱 활발한 연구가 진행 되어오고 있다. FBG 센서는 센서 피크 신호의 파장 이동량을 감지함으로써 변형률, 온도 등의 물리량을 측정하는 복조기법을 가지고 있다. 하지만, 센서를 구조물에 부착 혹은 삽입 적용하는 과정에서 구조물의 기하학적인 특성이나 결함 등에 의해 구조물에 변형률 구배가 발생할 수 있으며 이는 센서의 격자 부분에 작용할 경우 센서 피크 신호의 안정성에 영향을 미쳐 측정 오차로 작용하게 된다. 본 연구에서는 FBG 센서의 격자 부분에 변형률 구배가 작용할 경우 변형률 구배에 따른 FBG 센서의 신호 특성을 고찰하였고 또한 격자의 길이와 변형률 구배의 상관관계에 대해 알아보았다. 이를 통해, 변형률 구배가 작용할 경우 FBG 센서의 적절한 사용 영역을 FBG 센서의 격자 길이에 따라 정량적으로 제시하였다.

Key Words : Fiber Bragg Grating(광섬유 브래그 격자), Grating Length(격자 길이), Strain Gradient(변형률 구배), Signal Characteristics(신호 특성)

† 2004년 9월 6일 접수 ~ 2005년 1월 10일 심사완료

* 정회원, 한국철도기술연구원 남북철도기술개발사업단
연락처, E-mail : dhkang@krii.re.kr

경기도 의왕시 월암동 360-1

** 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공

1. 서 론

최근 스마트 구조물에 대한 관심이 높아지면

서 그 감지계로서 광섬유 센서에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 다른 여러 광섬유 센서에 비해 다중화가 용이하다는 큰 장점을 가지고 있는 광섬유 브래그 격자 센서(Fiber Bragg grating sensor, FBG sensor)는 변형률과 온도의 함수인 반사파장의 변이를 측정함으로써 변형률과 온도 등을 간단히 측정할 수 있다. 뿐만 아니라, FBG 센서는 크기가 작아 구조물의 물성에 영향을 주지 않고 구조물에 삽입이 가능하며 사용온도 범위가 넓고 전자파의 영향을 받지 않는 등의 장점으로 인해 구조물의 파손 신호를 포함한 센서의 신호 특성에 대한 연구뿐만 아니라 변형률과 온도 측정을 위한 센서로도 많은 적용 연구가 이루어지고 있다[1-3].

FBG 센서는 구조물의 제작이 완료된 이후 표면에 부착되거나 구조물의 제작 시부터 삽입되어 적용되며 적용 영역 또한 기계, 항공 구조물뿐만 아니라 건축, 토목 분야로 점차 확대되고 있는 추세이다. 하지만, FBG 센서를 복합재료의 내부에 삽입 적용할 경우 성형으로 인한 잔류 열응력(thermal residual stress)에 의해 FBG 센서에 복굴절(birefringence)이 발생할 수 있고 이는 센서 피크 신호의 갈라짐을 유발한다[4]. 뿐만 아니라, 구조물들은 구조물의 기하학적인 형태(geometry)나 구조물의 결함(cracks) 등에 의해 하중을 받을 경우 구조물에 변형률 구배가 생길 수 있다. 이렇듯, 구조물에 변형률 구배가 발생할 경우 구조물에 적용된 FBG 센서의 격자 부분에도 변형률 구배가 발생하게 되어 센서 피크 신호의 안정성에 영향을 주게 된다. FBG 센서는 피크 신호의 이동량을 감지함으로써 변형률과 온도 등의 물리량을 측정하는 복조기법을 가지고 있으므로 FBG 센서의 피크 신호를 안정적으로 유지하는 것은 매우 중요하다.

Huang 등은 I-Matrix를 이용해 연계모드(coupled-mode) 방정식을 풀었으며 이를 통해 격자 부분에서 반사되어 돌아오는 신호 형상을 형상화하였다. 또한, 보(beam)의 굽힘 시험을 수행함으로써 FBG 센서에 변형률 구배가 작용할 경우 센서의 계산된 신호 형상과 굽힘 시험을 통해 측정된 신호 형상이 잘 일치하며 변형률 구배의 종류(인장, 압축)와 관계가 없음을 확인하였다[5]. 뿐만 아니라, 임의의 변형률 형태(strain profile)가 존재할 경우 센서 구간 내에서 1 mm의 위치 해상도로 변형률 값을 측정할 수 있는 FBG 센서의 복조기법을 소개하였고 실험을 통해 결과 값을 비교하였다[6]. Dong 등은 균일한 격자 간격을 갖는 FBG 센서의 중심 파장 이동이 없으면

서 격자 부분에 변형률 구배를 발생시키는 장치를 고안하였고 실험을 통해 신호를 확인함으로써 광통신에 사용되는 비선형 전송 시스템(non-linear transmission systems)에서 동적인 분산 효과(dynamic dispersion)를 보상할 수 있음을 보였다[7].

이상의 연구들은 변형률 구배가 작용할 경우 FBG 센서의 신호 특성에 대한 정성적인 고찰과 센서의 격자 구간 내에서의 변형률 취득을 위한 기법개발에만 초점이 맞추어져 있었다. 또한, FBG 센서의 격자 구간 내에 변형률 구배가 작용할 경우 센서의 스펙트럼이 넓어지고 반사율(reflectivity)이 낮아지며 피크 갈라짐이 발생해 측정오차로 작용할 수 있음을 확인하는 정도에 그쳤다. 그러므로, 보다 효율적인 FBG 센서의 적용을 위해서는 변형률 구배가 작용할 때 센서의 신호 특성에 대한 정량적인 연구가 선행되어야 하며 이를 바탕으로 변형률 구배에 보다 안정적인 센서의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 보의 굽힘 시험을 통해 변형률 구배량에 따른 FBG 센서의 신호 특성을 정량적으로 알아보고, FBG 센서의 격자 길이를 조절함으로써 변형률 구배에 보다 안정적인 신호 특성을 갖는 센서의 개발에 대한 연구를 수행하였다.

II. FBG 센서의 복조기법

광섬유 브래그 격자는 광대역 스펙트럼을 갖는 광원을 광섬유에 입사시킬 경우 식 (1)과 같이 브래그 조건(Bragg condition)에 의해 결정된 파장 성분만이 브래그 격자 부분에서 반사되며 나머지 파장 부분은 그냥 통과하게 된다.

$$\lambda_B = 2 n_e \Lambda \tag{1}$$

Fig. 1은 이 과정을 나타내고 있다. 식 (1)에서 n_e 는 광섬유 격자의 유효 굴절률이고 Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격이다. 그러므로, 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며 광섬유 격자에 온도나 변형률 등의 외란이 가해지면 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다. 변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형률 등의 물리량을 식 (2)를 통하여 계산해 낼 수 있으며, 이것이 바로 광섬유 브래그 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

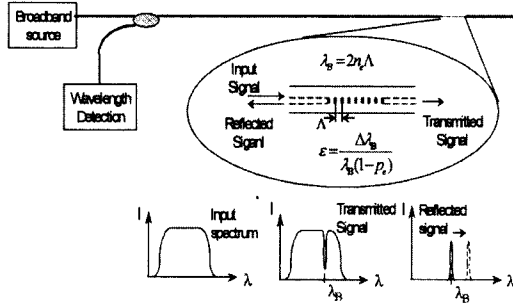


Fig. 1. FBG sensor encoding operation

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(a + \xi)\Delta T + (1 - p_e)\Delta\varepsilon] \quad (2)$$

$$p_e = \left(\frac{n^2}{2}\right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (3)$$

여기서, p_e 는 광탄성 상수이고 p_{11} 과 p_{12} 는 변형을 광학 텐서(strain-optic tensor)의 성분이며 n 은 코어의 굴절률(refractive index of the fiber core), ν 는 광섬유의 프와송 비(Poisson's ratio)이다. 본 연구에서와 같이 주위 온도의 급격한 변화가 없고 센서들 간의 온도차가 없는 상태에서 구조물의 변형을 측정하면 식 (2)에서 $\Delta T=0$ 으로 가정할 수 있으므로 식 (2)는 식 (4)와 같이 되어,

$$\varepsilon = \frac{1}{(1 - p_e)} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (4)$$

구조물의 변형률은 브래그 반사 파장의 변화량만 측정하면 쉽게 구해진다. 또한 브래그 반사 파장이 서로 다른 광섬유 격자들은 서로 영향을 받지 않는 파장 분할 다중화의 특성으로 인해 하나의 광섬유 선에 여러 개의 브래그 격자 센서를 배열할 수 있으므로 동시에 여러 지점의 변형을 측정이 가능하다.

본 연구에서와 같이, 식 (4)에서 구조물에 변형을 구배가 발생할 경우 측정되는 브래그 파장이 구배를 갖게 되어 센서의 선평(bandwidth)이 넓어지는 결과로 나타난다. 뿐만 아니라, 센서의 반사율은 감소되어 센서로서의 성능이 저하되며 센서의 피크도 다중 피크가 감지되게 되므로 측정 오차로 작용하게 되는 문제점이 있다[8].

III. FBG 센서의 제작

FBG 센서의 제작 방법은 Meltz에 의해 개발된 홀로 그래픽 방법[9] 등 여러 가지가 있지만 현재 Hill이 고안한 위상 마스크에 의한 제작 방법[10]이 대량 생산에 적합하고 제작 방법이 간

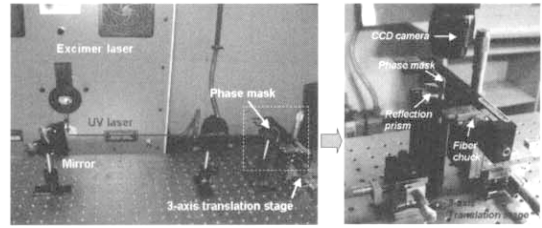


Fig. 2. Experimental setup for the fabrication of FBG sensors with various grating lengths

단해 가장 널리 사용되고 있다. 하지만, 상용 위상 마스크의 경우 격자의 길이가 고정되어 있으며 일반적으로 10 mm를 가진다. 본 연구에서는 센서 제작 시 레이저가 통과하는 위상 마스크의 격자 부분을 조절함으로써 다양한 격자 길이를 갖는 FBG 센서를 제작하였다. 이를 위해 엑시머 레이저의 파장 대역과 같은 248 nm의 빛을 99% 이상 반사하는 특수 코팅으로 표면 처리된 반사 프리즘을 이용하여 위상 마스크를 통과하는 빛의 양을 조절함으로써 격자 길이를 조절하였다. 센서 제작을 위한 장치의 모습은 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서와 같이 3축 이송장치와 CCD 카메라를 이용해 위상 마스크와 반사 프리즘과의 간격을 조절함으로써 제작된 FBG 센서의 격자 길이를 임의로 조절할 수 있다.

센서 제작에 사용된 반사 프리즘의 사양은 Table 1과 같다. Table 1에서 알 수 있듯이 프리즘의 경사면에는 248 nm의 파장에 대해 99% 이상의 반사율을 가지는 특수 코팅이 되어 있다. 그러므로, 입사된 레이저 중에서 프리즘이 반사하지 않는 부분에 대해서만 레이저가 위상 마스크에 도달하게 되고 결과적으로 FBG 센서의 격자 길이를 조절할 수 있다.

Table 1. Specifications of a reflection prism

	Specifications
Material	Fused Silica
Size	0.5"×0.5"×0.5"
Coating	R>99.0%, At λ=248nm
Model	KRF-RAP-050-UV
Producer	Korea Electro-Optics Co., LTD.

본 연구에서는 격자 길이가 각각 10 mm, 5 mm, 2 mm인 세 가지 FBG 센서를 제작하였다. 센서는 IBSN의 위상 마스크와 MPB 사의 ASX-750 엑시머 레이저를 이용하여 10 dB(90%)의 반사율을 가지도록 제작되었다.

IV. 시편형상 및 실험장치

변형률 구배와 FBG 센서의 신호 특성 상이의 정량적인 해석을 위해 외팔보(cantilever beam)의 굽힘 시험을 수행하였다. 시험에는 3장의 방법으로 제작된 10 mm, 5 mm, 2 mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서를 사용하였다.

시험에는 큰 변형률 구배를 발생시키기 위해 큰 처짐(deflection)이 가능한 연성 재료(ductile material)인 아크릴(acrylic)을 이용하여 시편을 제작하였으며 같은 처짐에 대해 더 큰 변형률 구배가 발생하도록 하기위해 시편의 두께를 두껍게 하고 시편의 길이를 짧게 하였다. 시편의 형상과 센서의 부착 위치 등은 Fig. 3과 같다. FBG 센서는 시편 윗면의 가운데 부분에 상온 경화 에폭시를 이용하여 부착하여 시편에 처짐이 발생할 경우 인장 변형률 구배가 발생하도록 하였다. FBG 센서의 변형률 구배로 인한 신호 특성은 변형률 구배의 종류(인장, 압축)에는 관계가 없으므로[4] 본 연구에서는 인장 변형률 구배에 대해서만 시험을 수행하였다.

굽힘 시험을 위한 실험 장치는 Fig. 4와 같다. 한쪽 면 고정지지(clamped)의 경계 조건(boundary condition)으로 굽힘 하중을 가할 수 있도록 구성하였으며 광분배기(coupler), 광대역 광원(83437A, Agilent), 그리고 분광 분석기(MS9710B, Anritsu)를 이용하여 반사된 FBG 센서 신호를 취득하였다. 광섬유 센서 신호는 2 mm의 처짐, 즉 7.8 $\mu\epsilon/mm$ 의 변형률 구배 간격으로 26 mm(101.4 $\mu\epsilon/mm$)의 처짐까지 측

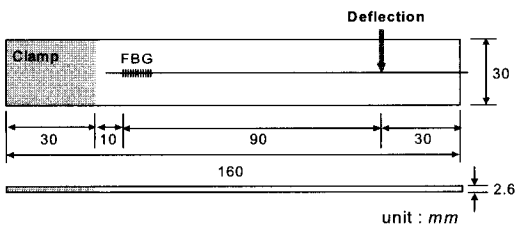


Fig. 3. Dimensions of a test specimen

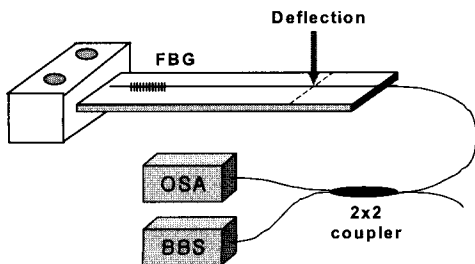


Fig. 4. Experimental setup for bending test

정하였다. 보의 처짐으로 인해 보에 발생하는 변형률 구배는 단순보 이론(simple beam theory)에 의해 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{d\epsilon(x)}{dx} = 1.5 \times 10^3 \frac{y t}{L^3} \quad (\epsilon/mm) \quad (5)$$

식 (5)에서 보의 변형률 구배는 보의 형상과 처짐에만 관계가 있음을 알 수 있다. 여기서, y 는 처짐을 t 는 보의 두께, L 은 고정지지점에서 하중 작용점까지의 길이를 나타낸다.

V. 실험 결과

FBG 센서는 센서의 피크 신호를 감지해 물리량을 계산하는 복조기법을 가지고 있어 변형률 구배로 인해 발생한 FBG 센서 신호의 특성 변화에 대한 연구는 매우 중요하다. FBG 센서의 여러 신호 특성 중에서, FBG 센서 신호의 선폭 증가는 과장 분할 다중화(wavelength division multiplexing, WDM) 성능을 저하시키고 반사율의 저하는 신호 대 잡음비(signal to noise ratio, SNR)를 감소시키며 피크 신호의 다중화는 FBG 센서의 측정 오차에 영향을 주기 때문에 매우 중요한 의미를 갖는다.

5.1 3-dB 선폭의 변화

10 mm, 5 mm, 2 mm의 세 가지 격자 길이를 갖는 FBG 센서들에 대해 변형률 구배에 따른 FBG 센서 신호의 선폭 변화를 정량적으로 측정하기 위해 굽힘 시험 동안 각 처짐에서의 FWHM(full width half maximum)을 조사하였다. 센서 신호에 대한 FWHM 값은 선폭의 변화를 알아보기 위해 가장 보편적으로 사용되는 값이며 피크 반사율의 50% (3-dB)되는 지점의 선폭을 의미한다.

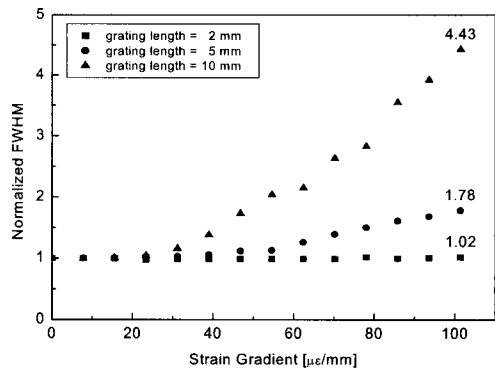


Fig. 5. 3-dB bandwidth change of FBG sensors with strain gradient

Fig. 5는 변형을 구배가 증가함에 따라 각 격자 길이에 따른 FBG 센서 신호의 3-dB 선폭 변화를 보여주고 있다. 10 mm FBG 센서의 경우 약 25 $\mu\text{E}/\text{mm}$ 까지는 선폭이 거의 일정하였다. 하지만, 이후 변형을 구배가 더 증가할수록 지수 함수적으로 선폭이 증가하여 26 mm의 처짐, 즉 101.4 $\mu\text{E}/\text{mm}$ 의 변형을 구배에서는 변형을 구배가 없을 때의 선폭에 비해 4.43 배로 증가하였다.

한편, 5 mm FBG 센서의 경우 약 50 $\mu\text{E}/\text{mm}$ 의 변형을 구배까지는 선폭이 일정하였으며 더 큰 변형률에 대해서도 10 mm FBG 센서에 비해 증가폭이 적어 101.4 $\mu\text{E}/\text{mm}$ 의 변형을 구배에 대해 초기 선폭의 1.78 배의 증가에 그쳤다. 반면, 10 mm FBG 센서와 5 mm FBG 센서와 달리 2 mm FBG 센서는 변형을 구배가 증가하더라도 실험 범위 내에서 선폭의 변화가 거의 발생하지 않았다.

위의 결과로부터 변형을 구배의 영향에 대해 FBG 센서의 격자 길이가 짧을수록 FBG 센서 신호의 선폭 변화가 적어 더욱 안정된 신호 특성을 가짐을 확인하였다.

5.2 반사율의 변화

FBG 센서는 변형을 구배의 영향을 받을 경우 선폭의 변화와 함께 센서의 반사율이 감소하게 된다. Fig. 6은 변형을 구배에 대해 각 격자 길이에 따른 FBG 센서의 반사율 변화를 보여주고 있다. 3-dB 선폭 변화에 대한 결과에서와 마찬가지로, 10 mm FBG 센서의 경우 약 25 $\mu\text{E}/\text{mm}$, 5 mm FBG 센서의 경우 약 50 $\mu\text{E}/\text{mm}$ 의 변형을 구배까지는 반사율의 변화가 거의 없었으며 이후 변형을 구배가 증가함에 따라 선형에 가까운 감소경향을 나타냈다. 최종 101.4 $\mu\text{E}/\text{mm}$ 의 변형을 구배에 대해서는 각각 초기 반사율의 57%, 81%의 값으로 반사율이 감소하였다. 반면, 2 mm FBG 센서의 경우 전 구간에

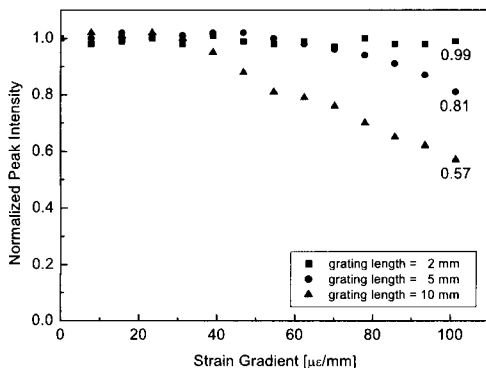


Fig. 6. Reflectivity change of FBG sensors with strain gradient

대해 반사율의 변화 없이 초기값을 유지하였다.

위의 결과로부터 반사율의 관점에서도 FBG 센서의 격자 길이가 짧을수록 변형을 구배의 영향으로부터 더욱 안정된 신호특성을 가짐을 확인하였다.

5.3 피크 신호의 다중화

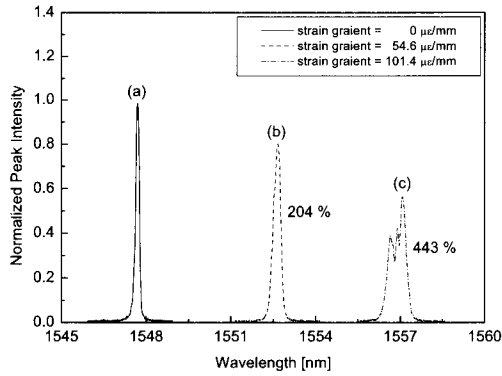
변형을 구배가 증가함에 따라 FBG 센서의 격자 길이에 대한 신호 특성을 통해 피크 신호의 다중화 시점을 알아보았다. Fig. 7은 10 mm, 5 mm, 2 mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서에 대해 (a) 변형을 구배가 없는 경우, (b) 54.6 $\mu\text{E}/\text{mm}$ 의 변형을 구배가 작용할 경우, (c) 101.4 $\mu\text{E}/\text{mm}$ 의 변형을 구배가 작용할 경우의 세 가지 경우에 대해 시험을 통해 분광 분석기로 취득된 반사 스펙트럼을 보여주고 있다. A, B, C 각각의 (a)부분을 통해 FBG 센서는 격자 길이가 짧아질수록 넓은 선폭을 가짐을 Fig. 7을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 7(A), 즉 10 mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서의 경우 신호의 선폭과 반사율이 변형을 구배가 증가할수록 큰 폭으로 변화하는 것을 확인할 수 있다. (b)의 경우부터 피크가 다중화되어 두 개로 감지되기 시작하며 (c)의 경우에는 피크 값이 여러 개로 감지되었다.

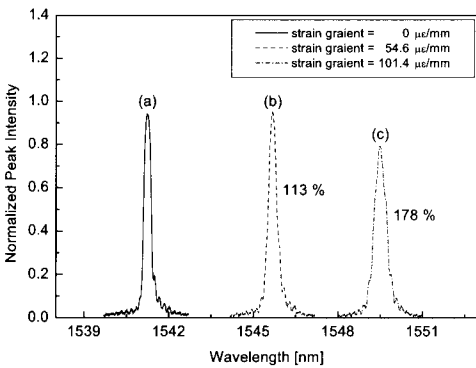
FBG 센서의 스펙트럼은 변형을 구배가 증가할수록 초기에는 선폭의 증가와 반사율의 감소가 동시에 진행되며 변형을 구배가 더욱 커지게 되면 단일 피크에서 여러 개의 피크로 피크 다중화의 과정을 거친다. FBG 센서의 복조기법으로 인해 피크가 다중화 되는 시점이 매우 중요하며 10 mm FBG 센서의 경우 3-dB 선폭이 2 배 이상이 되면 피크가 다중화 됨을 확인하였다.

Fig. 7(B), 즉 5 mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서의 경우 Fig. 7(A)와 마찬가지로 변형을 구배가 커질수록 선폭이 넓어짐을 확인할 수 있다. 하지만, 10 mm FBG 센서에 비해 상대적으로 선폭의 증가량이 적어 (c)의 경우 센서 신호의 대칭성이 왜곡되었지만 아직 피크가 다중화 하지는 않았다. Fig. 5의 결과로부터 피크가 다중화 되는 시점은 변형을 구배에서 선폭이 2 배가 되는 지점, 즉 약 120 $\mu\text{E}/\text{mm}$ 의 변형을 구배가 발생하는 지점으로 예상된다.

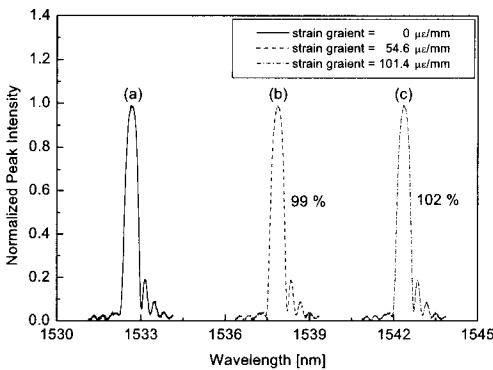
Fig. 7(C), 즉 2 mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서의 경우 10 mm, 5 mm의 FBG 센서와 달리 변형을 구배가 증가하더라도 센서 신호의 선폭이나 반사율의 변화 없이 중심 파장의 이동만이 발생하여 전 시험 구간을 통해 안정적인 센서 신호 형상을 나타내었다.



(A) Grating Length = 10 mm



(B) Grating Length = 5 mm



(C) Grating Length = 2 mm

Fig. 7. Reflected spectra of FBG sensors with strain gradient

이상의 결과로부터 변형률 구배에 대한 FBG 센서의 적정 사용 구간을 센서 신호의 선폭 증가와 반사율 감소, 그리고 피크 신호의 다중화 지점을 고려하여 Table 2와 같이 정리하였다. Table 2에서 'Good'구간은 센서 신호의 선폭과 반사율의 변화가 모두 없는 영역으로 FBG 센서의 신호가 가장 안정적인 구간을 의미한다. 'Fair'구간은 센

서 신호의 반사율의 저하가 있으며 선폭이 초기 선폭의 2 배, 즉 피크의 다중화가 시작되기 이전까지의 구간을 의미한다. 이 구간에서는 센서 신호의 반사율이 저하되고 신호의 선폭 증가는 있지만 FBG 센서의 피크값에 대한 측정에는 어려움이 없는 구간이다. 마지막으로, 'Poor'구간은 FBG 센서의 피크가 다중화 되어 측정오차가 발생하는 구간으로 정확한 측정이 어려운 구간으로 FBG 센서의 사용 시 배제되어야 할 구간을 의미한다. Table 2에서 2 mm의 FBG 센서의 경우에는 본 연구에서 수행한 시험 전 구간을 통해 신호의 이상유무가 발생하지 않았기 때문에 굽힘 시험의 마지막 측정값을 기준으로 하고 다른 격자 길이의 센서가 나타내는 경향을 바탕으로 하여 선형적으로 유추하여 제시하였다.

Table 2. The guideline for a recommendable working range of FBG sensors

Grating length	Performance		
	Good	Fair	Poor
10 mm	- 25	25 - 50	> 50
5 mm	- 50	50 - 120	> 120
2 mm	- 125	125 - 300	> 300

단위 : [με/mm]

실제 구조물에는 하중 상태에 따라 다양한 정도의 변형률 구배가 작용할 수 있고 변형률 구배의 정도에 따라 가장 적합한 격자 길이는 달라지므로 변형률 구배의 양과 격자 길이와의 관계를 규명하는 것은 FBG 센서의 실제 적용을 위해 매우 중요하다. 본 연구의 결과를 바탕으로 임의의 격자 길이를 갖는 FBG 센서와 변형률 구배와의 상관관계를 도식화 하면 Fig. 8과 같은 그래프를 얻을 수 있다.

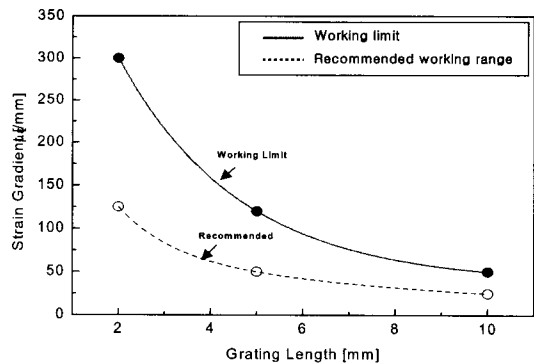


Fig. 8. The working range of FBG sensors with various grating length under strain gradient

Fig. 8을 통해 FBG 센서를 적용하고자 하는 대상 구조물의 변형률 구배를 알 경우 가장 좋은 성능(안정적인 신호특성과 낮은 측정오차)을 갖는 FBG 센서의 격자 길이에 대한 결정이 가능하게 된다.

VI. 결 론

본 연구에서는 FBG 센서에 변형률 구배가 작용할 경우 센서가 나타내는 신호 특성을 신호 선폭의 변화, 반사율의 변화, 피크의 다중화 시점 등을 기준으로 정량적인 분석을 수행하였다. 세 가지 격자 길이를 갖는 FBG 센서를 제작하여 외팔보를 이용한 굽힘 시험을 수행하였으며 시험을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. FBG 센서의 제작 시 특정한 파장영역만을 반사시키는 특수 코팅된 반사 프리즘을 이용할 경우 다양한 격자 길이를 갖는 FBG 센서의 제작이 가능하다.

2. FBG 센서에 변형률 구배가 작용할 경우 FBG 센서의 신호 특성은 신호 선폭이 증가하고 반사율은 감소하며 센서 신호의 피크가 다중화되는 경향으로 진행된다. 이러한 효과의 정도는 FBG 센서의 격자 길이가 짧아질수록 감소한다.

3. 변형률 구배가 작용할 경우 FBG 센서의 피크 다중화가 발생하지 않는 구간, 즉 사용 가능 영역은 10 mm FBG 센서의 경우 $\sim 50 \mu\epsilon/\text{mm}$, 5 mm FBG 센서의 경우 $\sim 120 \mu\epsilon/\text{mm}$, 2 mm FBG 센서의 경우 $\sim 300 \mu\epsilon/\text{mm}$ 이다.

이를 통해, 변형률 구배가 작용할 경우 FBG 센서의 적절한 사용 영역을 FBG 센서의 격자 길이에 따라 정량적으로 제시하였다.

후 기

본 연구는 21C 프런티어 연구개발 사업에서 지원받는 위탁연구과제로 수행한 것이며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1) 방형준, 김대현, 홍창선, 김천곤, "스마트 구조물의 동시다점 진동 취득용 안정화된 광섬유

브래그 격자 센서 시스템의 개발", 한국항공우주학회지, 제 32권, 제 5호, 2004, pp. 50-57.

2) 강동훈, 강현규, 류치영, 홍창선, 김천곤, "광섬유 센서를 이용한 구조물의 열변형 및 온도 측정", 한국항공우주학회지, 제 28권, 제 8호, 2000, pp. 61-68.

3) 강현규, 강동훈, 홍창선, 김천곤, "비대칭 직교적층 복합재료 적층판의 성형시 및 성형후 광섬유 센서를 이용한 변형률 및 온도의 동시 모니터링", 한국항공우주학회지, 제 30권, 제 1호, 2002, pp. 49-55.

4) Okabe, Y., Yashiro, S., Tsuji, R., Mizutani, T. and Takeda, N., "Effect of thermal residual stress on the reflection spectrum from fiber Bragg grating sensors embedded in CFRP laminates", *Composites - Part A*, Vol. 33, 2002, pp. 991-999.

5) Huang, S., LeBlanc, M., Ohn, M. M. and Measures, R. M., "Bragg intragrating structural sensing", *Applied Optics*, Vol. 34, No. 22, 1995, pp. 5003-5009.

6) Huang, S., Ohn, M. M., LeBlanc, M. and Measures, R. M., "Continuous arbitrary strain profile measurements with fiber Bragg gratings", *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, 1998, pp. 248-256.

7) Dong, X., Guan, B. O., Yuan, S., Dong, X. and Tam, H. Y., "Strain gradient chirp of uniform fiber Bragg grating without shift of central Bragg wavelength", *Optics Communications*, Vol. 202, 2002, pp. 91-95.

8) Kang, H. K., Park, J. S., Kang, D. H., Kim, C. U., Hong, C. S. and Kim, C. G., "Strain of filament wound composite tank using fiber optic Sensors", *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, No. 6, 2002, pp. 848-853.

9) Meltz, G., Morey, W. W. and Glenn, W. H., "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method", *Optics Letters*, Vol. 14, No. 15, 1989, pp. 823-825.

10) Hill, K. O., Malo, B., Bilodeau, F., et al., "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask", *Applied Physics Letters*, Vol. 62, No. 10, 1993, pp. 1035-1037.