

해석적인 기법을 통한 FBG 센서의 스펙트럼 분석 및 수소고압용기의 센서 삽입위치 결정

박상오*·김철웅**·박지상***·김천곤*

Spectrum analysis of the FBG sensor signal and location determination of FBG sensor into the H₂ pressure vessel

S. O. Park*, C. U. Kim**, J. S. Park*** and C. G. Kim*

Abstract

The optical fiber is known for the proper sensor which can accomplish the structural health monitoring. Fiber Bragg Grating sensors are being studied more than any other fiber optic sensors due to good multiplexing capabilities. But because the signal stability of FBG sensors can be influenced by the strain gradient, it needs to analyze signal of FBG sensors. Particularly according to strain gradient induced by structural geometry or cracks, the spectrum peak of the FBG sensor signal can be split easily. In this paper, the spectrum analysis of the FBG sensor signal was performed and the region of embedment of FBG sensors was determined in H₂ pressure vessel by numerical method.

Key Words: Fiber Bragg Grating, Grating Length, Strain Gradient

1. 서 론

현재 광섬유는 센서로써 산업분야에 적용하기 위한 구조건강성 모니터링(structural health monitoring)등의 역할을 수행하기 위하여 많은 연구가 진행되어지고 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.[1,2]

일반적으로 반사파장에 의한 FBG 센서 신호는 단일 피크 형상을 가진다. 하지만, FBG 센서

신호는 센서에 횡방향응력(transverse stress)이나 광섬유의 미소굽힘(micro-bending) 등에 의해 복굴절(birefringence) 현상이 발생하거나 격자 부분에 내부 변형률 구배(internal strain gradient)가 생길 경우 FBG 센서의 피크가 갈라지는 현상이 발생하여 센서적용에 한계가 발생한다.[3] 본 연구에서는 FBG 생존성 향상 및 안정된 신호처리를 위해 변형률 구배에 따라 발생할 수 있는 FBG 센서의 피크 갈라짐 현상을 해석적으로 규명하였으며, 향후 FBG 센서 장착 시 장착위치의 올바른 선정을 위해 변형률 분포에 따라 변하는 FBG의 스펙트럼을 시뮬레이션하여 변형률 분포 정도에 따른 게이지 길이의 가이드 라인을 제시하여 수소 고압 용기의 FBG 센서 삽입 위치를 결정하였다.

2. 변형률 구배에 따른 FBG 센서의 스펙트럼 분석

* 한국과학기술원 항공우주공학전공
** 현대·기아 연구개발본부 선행해석팀
*** 한국기계연구원 복합재료그룹

2.1 FBG 센서의 변형을 측정 원리

광섬유에서 브래그 격자는 광폭 스펙트럼 (broadband spectrum)을 광섬유에 입사시킬 경우 (1)식과 같이 브래그 조건(Bragg condition)에 의해 결정된 파장 성분, λ_B 만이 보강 간섭을 일으켜 브래그 격자 부위에서 반사되며 나머지 파장 부분은 통과하게 된다.

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

여기서, n_e 는 광섬유 격자의 유효 굴절률 (effective refractive index)이고 Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격(grating period)이다. 격자에서 반사되는 브래그 파장(Bragg wavelength)은 식 (2)를 통하여 계산해 낼 수 있으며, 이것이 바로 광섬유 브래그 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - \nu_e)\epsilon] \quad (2)$$

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

여기서 ΔT 는 센서에 작용된 온도 변화이며 ϵ 는 센서에 가해진 기계적 변형률을 나타낸다. 또한 α 는 광섬유의 열팽창 계수(thermal expansion coefficient)이고 ξ 는 온도 변화에 따른 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)이다. ν_e 는 광탄성 상수(photoelastic constant)이고 ν_{11} 과 ν_{12} 는 스트레인 광학 텐서의 성분이며 n 은 코어의 굴절률, ν 는 프와송 비이다.

2.2 변형을 구배 모델링

본 연구에서 일정한 변형률이 작용하는 것 아니라 변형률 구배를 갖는다고 가정한다면 다음과 같이 변형률($\epsilon(z)$)과 변형률-게이지 계수($G_\epsilon(z)$)로 브래그 파장($\lambda(z)$)을 나타낼 수 있다.

$$\lambda(z) = 2n(z)\Lambda(z) = 2[n_0 \Lambda_0 + \Delta\{n\Lambda\}]$$

$$= 2 n_0 \Lambda_0 \{1 + G_\epsilon(z)\epsilon(z)\} \quad (4)$$

그리고 이러한 브래그 격자는 T-matrix에 의해서 해석 되어질 수 있다. Fig. 1 (a)과 같이 일정한 단위격자(Uniform Short Fiber Bragg Grating)에 들어가고 나오는 광 파동의 경계조건을 $a_f(0)$, $a_b(0)$, $a_f(\Delta L)$, $a_b(\Delta L)$ 나타내고 다음과 같이 광 파동을 T-matrix에 의해서 관계지을 수 있다.[3]

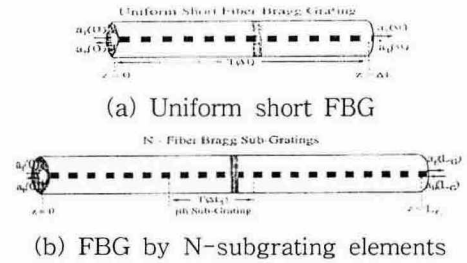


Fig. 1 Boundary conditions.

$$\begin{bmatrix} a_f(0) \\ a_b(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_f(\Delta L) \\ a_b(\Delta L) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T_{11} = T_{22}^* = \frac{\Delta\beta \sinh(s\Delta L) + i \cosh(s\Delta L)}{is} \exp(-i\beta_0 \Delta L)$$

$$T_{12} = T_{21}^* = \frac{\kappa \sinh(s\Delta L)}{is} \exp(i\beta_0 \Delta L)$$

전체의 광센서(L_G)에서 변형률 구배가 있는 경우 이것을 Fig.1 (b)처럼 N개의 단위격자들이 연결된 것으로 가정한다면 전체의 광센서에 대한 T-matrix에 대한 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a_f(0) \\ a_b(0) \end{bmatrix} = [T(\Delta L_1)] [T(\Delta L_2)] \dots [T(\Delta L_N)] \begin{bmatrix} a_f(L_G) \\ a_b(L_G) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$L_G = \Delta L_1 + \Delta L_2 + \dots + \Delta L_N$$

이러한 T-matrix를 사용하여 Fig. 2와 같은 알고리즘에 따라서 스펙트럼 해석 프로그램을 구현하였다. 여기에서 초기값 $a_f(0)$, $a_b(0)$ 를 각각 1, 0이라 가정하였다.

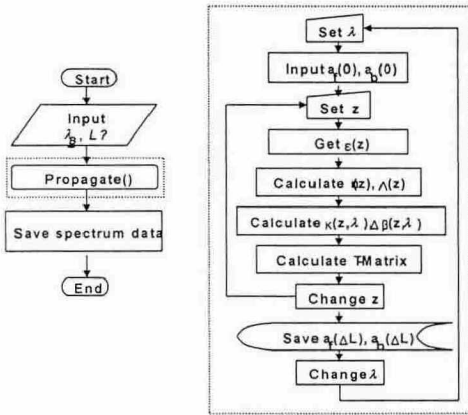
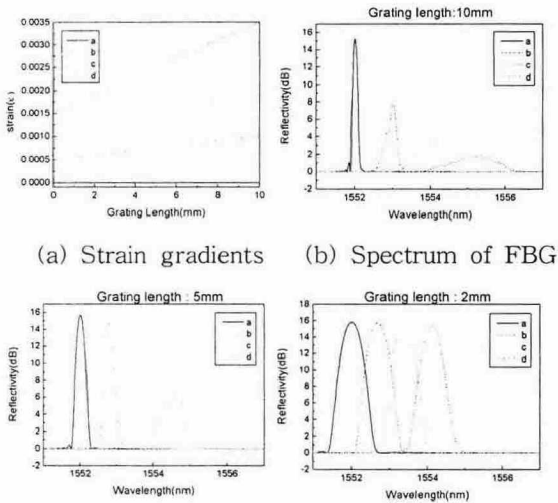


Fig. 2 Algorithm of spectrum program.

2.3 FBG 센서의 스펙트럼 분석

우선 변형률 구배의 크기에 따른 FBG 센서의 스펙트럼 해석을 수행하였다. 게이지의 길이는 10 mm, 5 mm, 2 mm으로 하였고, 각각의 비교 해석을 위해서 스펙트럼 반사율은 같게 조정하였다.



(a) Strain gradients (b) Spectrum of FBG

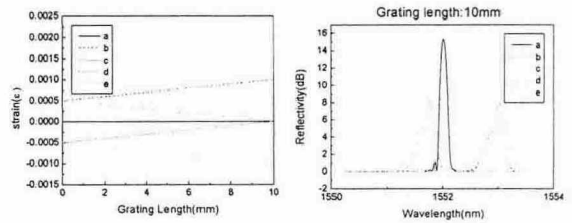
(c) Spectrum of FBG (d) Spectrum of FBG

Fig. 3 Spectrum of FBG sensors of different gage length under the stain gradients.

Fig. 3는 변형률의 구배(a)에 따른 각각의 게이지 길이에서의 스펙트럼 분포를 보여주고 있다. 반사 스펙트럼 중간값 사이의 파장 대역폭 FWHM은 변형률구배가 있는 경우 초기의 값에

비해서 100%이상 변하게 되면 스펙트럼이 일그러져서 파장의 이동을 정확히 측정 할 수 없게 되어진다.

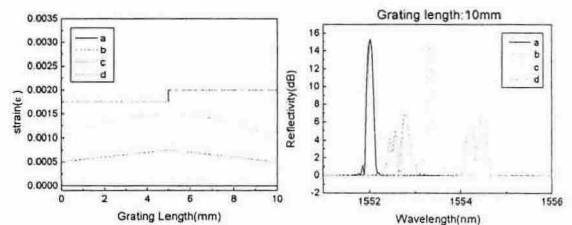
구조물은 단순히 한 가지 하중만을 받는 것이 아니므로 압축력과 인장력에 따르는 스펙트럼의 분포를 해석할 필요가 있다. 따라서 Fig. 4 (a)와 같이 절대값이 일정한 변형률 구배에서 스펙트럼을 분석하여 보았다. Fig. 4 (b)에서 보여지는 것처럼 반사 스펙트럼에 영향을 미치는 인자는 압축 또는 인장 하중과 같은 하중의 종류가 아니라 변형률 구배의 크기에 따르고 있음을 알 수 있다.



(a) Strain gradients (b) Spectrum of FBG

Fig. 4 Spectrum of FBG under the strain gradients of tension and compressing load.

구조물에 하중이 가해질 경우 변형률과 변형률의 구배가 항상 일정하게 유지 되지는 않는다. 변형률이 급격하게 변하거나 변형률의 구배가 달라지기도 한다. 따라서 변형률의 형태에 따른 반사 스펙트럼에 대한 해석이 필요하다.



(a) Strain gradients (b) Spectrum of FBG

Fig. 5 spectrum of FBG under the strain gradients of different shapes.

Fig. 5 (a)는 다양한 변형률의 형태를 보여주고 있다. Fig. 5(b)에서 보여주고 있는 것처럼 반사 스펙트럼의 일그러짐은 게이지 길이 내에서 작용되어지는 변형률이 급격하게 변하는 구간이

있을 경우 발생하게 되어진다. 따라서 이러한 구간에 가급적이면 FBG 센서를 삽입하지 않는 것이 좋다.

3. 수소고압용기에 FBG 센서의 삽입위치 결정

수소 탱크의 앞돔과 뒷돔은 대칭으로 되어 있다. 따라서 한쪽 부분만 해석해 보면 전체의 수소 탱크에 대해서 알아볼 수 있다.

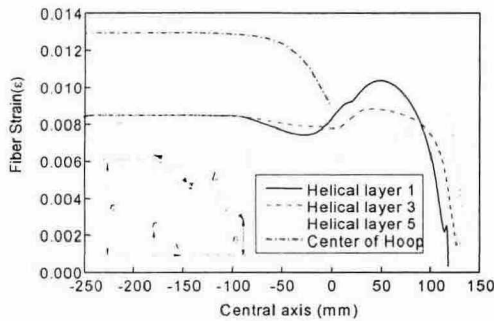


Fig. 6 Strain distribution of H₂ pressure vessel under residual strain, inner temp.: 85°C, outer temp.: room temp., inner pressure: 82.25 MPa.

Table. 1 Possible location of FBG sensor in the H₂ pressure vessel

Grating length	Possible location			
	Hel. layer 1	Hel. layer 3	Hel. layer 5	Cen. Hoop
10	~ -5 -10 ~ -20 40 ~ 60	~ 15 25 ~ 95	~ -10 25 ~ 105	~ -30
5	~ 90	~ 105	~ 110	all region
2	all region	all region	all region	all region

Unit : mm

Fig. 6은 한쪽 부분에서 잔류변형을 고려하고, 내부온도 85C, 외부온도 상온, 압력 82.25 MPa일때 수소 탱크의 각 섬유방향 변형을 분포를 보여 주고 있다. 여기에서 중심축은 Fig. 6과 같이 돔이 시작 되어지는 지점으로 잡았다. FBG 센서는 각 위치별 섬유방향으로 삽입될 것이다. 따라서 각 위치에서 변형률이 분포 되어질때 FGB 센서의 스펙트럼에 대한 평가가 미리 이루어져야 한다. 이러한 각각의 게이지 길이에 대한 스펙트럼 분석을 통하여 Table. 1

과 같이 게이지 길이에 따른 삽입위치를 결정하였다.

4. 결론

본 연구에서는 FBG 센서에 변형률 구배가 작용할 경우 센서가 나타내는 신호 특성을 분석하기 위해서 해석 프로그램을 제작하였다. 제작된 프로그램을 사용하여 FBG센서에 변형률 구배가 작용할 경우 변형률 구배의 크기, 하중의 종류, 하중의 형태에 따른 센서의 신호 특성을 분석하였으며, 수소 저장 용기의 열·운용하중하에서 변형률 분포를 고려하여 FBG센서의 길이에 따른 센서 삽입위치를 결정하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 지원으로 수행하는 21C 프런티어 연구개발사업(수소에너지사업단)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) 류치영, 박중원, 강현규, 김대현, 구본용, 홍창선, 김천곤, "광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 복합재 구조물의 변형률 측정에 관한 연구," 한국항공우주학회지, 제28권, 제5호, pp.44-52, 2000.
- (2) 강동훈, 강현규, 류치영, 홍창선, 김천곤, "광섬유 센서를 이용한 구조물의 열변형 및 온도 측정," 한국항공우주학회지, 제28권, 제8호, pp.61-68, 2000.
- (3) 강동훈, 박상오, 김천곤, "변형률 구배와 격자 길이에 따른 광섬유 브래그 격자 센서의 신호특성 연구," 한국항공우주학회지, 제33권, 3호, pp. 32-38, 2005.
- (4) Huang, S., Ohm, M. M., Le Blanc, M., Lee, R., and Measures, R. M., "Fiber Optic Intra-Grating Distributed Strain Sensing," *SPEI* 2294, pp. 81-92, 1994.