

## FBG를 이용한 고온 측정 센서의 온도특성

손용환 · 한상국<sup>†</sup>

### Thermal characteristics of high-temperature measurement sensor using fiber Bragg grating

Yong-Hwan Son and Sang-Kook Han<sup>†</sup>

#### Abstract

In this paper, we present thermal characteristics of high-temperature measurement sensor using fiber Bragg grating(FBG), including peak reflectivity, FWHM bandwidth and various normalized refractive index change along temperature variation. The temperature stability of FBG temperature sensor can be changed by varying the refractive index change and grating length. The proposed FBG temperature sensor can measure up to about 600°C and 1000 hours of heating time.

**Key Words :** FBG, temperature sensor, reflectivity, bandwidth, refractive index change

## 1. 서 론

FBG (fiber Bragg grating)는 광대역 광 신호 중 조건에 따라 특정 파장의 신호만을 반사시키는 특성을 갖는 소자이다<sup>[1]</sup>. 따라서 이를 센서 등으로 이용하면 광섬유만으로 구성할 수 있기 때문에 소형, 경량, 저손실의 센서를 구현할 수 있다. 또한 FBG에 직접 온도, 스트레인, 압력 등의 물리적 에너지를 인가하는 것만으로 FBG의 주기와 유효굴절률이 변화하게 되어 물리량에 따라 선형적으로 브래그 반사파장이 이동하기 때문에 센서로서 정밀한 측정이 가능한 장점을 가진다<sup>[2]</sup>. 즉, 브래그 격자의 변형률과 온도 함수인 반사파장의 변이를 측정함으로써 변형률과 온도를 측정할 수 있으며 사용온도의 범위가 넓고 전자기파의 영향을 받지 않는 장점이 있다<sup>[3]</sup>. 만약 FBG를 온도측정을 위한 센서로 사용하게 된다면, 온도의 영향에 대한 FBG의 특성변화와 안정성이 매우 중요한 기준이 될 것이다. 이에 본 논문에서는 게르마늄이 도핑 된 실리카 광섬유에서 온도변화에 따른 FBG 온도센서의 브래그 반사파

장의 이동, FWHM (full width half maximum)선폭, 반사도의 변화, 그리고 굴절률 차의 변화특성에 대해 해석하고, 온도안정성에 대한 그 특성을 고찰한다.

## 2. FBG 센서의 온도특성

FBG는 광섬유의 코어에 자외선 영역의 엑시머 레이저(Kr 또는 ArF Excimer Laser)를 이용하여 주기적인 굴절률 변화를 영구적으로 새김으로써 조건에 따라 특정 파장을 반사시키는 특성을 갖는 소자이다<sup>[1]</sup>. 따라서 이러한 조건을 변경시킴으로써 반사되는 특정파장을 조절할 수 있다.

FBG를 투과하는 두 모드가 동일하고 격자가 일반적으로 1차 회절에 의해 지배된다고 가정하면, Bragg 반사파장과 격자 주기와와의 관계는 다음 식으로 된다<sup>[4,5]</sup>.

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{eff} A \quad (1)$$

위 식에서  $\lambda_B$ 는 브래그 반사파장이며,  $A$ 는 FBG의 격자 주기, 유효굴절률  $n_{eff} = n_1 \sin \theta$ 이며,  $n_1$ 은 코어의 굴절률이다.

FBG에 온도, 스트레인, 압력 등의 물리적 에너지를 인가하게 되면, 인가되는 물리적 에너지로 인해 FBG 센서의 격자 주기와 유효굴절률이 변화하게 되고, 이에

연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

<sup>†</sup>Corresponding author: skhan@yonsei.ac.kr

(Received : April 21, 2008, Accepted : May 22, 2008)

따라 브래그 반사파장을 변화시킬 수 있다<sup>[2]</sup>. 따라서 식 (1)은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\lambda_B = 2(\Delta A)n_{eff} + 2A(\Delta n_{eff}) \quad (2)$$

온도측정 센서를 위한 브래그 반사조건을 변화시키기 위해 FBG에 인가하는 에너지가 온도라면, 식 (2)는 온도에 관계된 항을 갖는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_B &= 2\left(\frac{\partial A}{\partial T}n_{eff} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}\right)\Delta T_{FBG} \\ &= \lambda_B\left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial T}\frac{1}{n_{eff}} + \frac{\partial A}{\partial T}\frac{1}{A}\right)\Delta T_{FBG} \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서  $\Delta T_{FBG}$ 는 FBG에 인가되는 온도의 변화이다. 식 (3)의 마지막 항에서  $\left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial T}\frac{1}{n_{eff}}\right) = \alpha_n$  은 FBG에 인가되는 열에 의한 굴절률변화에 따른 열 광학 계수 (thermo-optic coefficient)로서, 게르마늄이 도핑 된 실리콘 파이버에서 보통  $8.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 이다. 또한  $\left(\frac{\partial A}{\partial T}\frac{1}{A}\right) = \alpha_A$  은 FBG에 인가되는 열에 의한 주기변화에 따른 열 팽창 계수(thermo-expansion coefficient)로서, 실리콘 파이버에서  $0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 값을 갖는다<sup>[5]</sup>. 따라서 식 (3)은 다음 식으로 간략하게 다시 쓸 수 있다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha_n + \alpha_A)\Delta T_{FBG} \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 FBG 센서의 온도 민감도(temperature sensitivity)  $ST_{FBG}$ 는 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$ST_{FBG} \equiv \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T_{FBG}} = \lambda_B(\alpha_n + \alpha_A) \quad (5)$$

결국 FBG 센서에 온도를 인가하였을 때, 온도에 따라 변화된 브래그 반사파장  $\lambda_{B(shift)}$ 는 다음 식으로 된다.

$$\lambda_{B(shift)} = \lambda_B + ST_{FBG}\Delta T_{FBG} \quad (6)$$

결합 파동방정식을 통해 각 진행파와 반사파가 FBG를 z방향으로 L만큼 진행했을 때의 파와 격자의 입력단에서의 파와의 관계를 알 수 있다. 이 결합 파동방정식을 풀고 매트릭스 해석법을 이용하여, 그 해를 매트릭스 형태로 정리하면 다음 식으로 된다<sup>[6]</sup>.

$$\begin{bmatrix} A_{out} \\ B_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{in} \\ B_{in} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, S 매트릭스는 FBG의 특성을 나타내는 전달 매트릭스이고, 결합모드 이론을 이용하여 온도의 함수가 포함된 항으로 나타내면 각각의 S 매트릭스 각

성분은 아래 식들의 형태로 된다<sup>[7,8]</sup>.

$$\begin{aligned} S_{11}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} &= (1 - r(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}^2)^{-1} [\exp(jq(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}L) \\ &\quad - r(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}^2 \exp(-jq(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}L)] \\ S_{22}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} &= (1 - r(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}^2)^{-1} [\exp(jq(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}L) \\ &\quad - r(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}^2 \exp(-jq(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}L)] \\ S_{21}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} &= -S_{12}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} \\ &= (1 - r(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}^2)^{-1} \gamma(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} \\ &\quad [\exp(jq(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}L) - \exp(-jq(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}L)] \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서, L은 FBG의 격자길이이며 진행파와 반사파의 전파상수 q, 결합계수 κ, 동조이탈계수 δ, 유효반사계수 r는 각각 온도 항이 포함된 다음의 식과 같다.

$$\begin{aligned} \kappa(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} &= \pi \Delta n / \lambda_{B(shift)} \\ \delta(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} &= 2\pi(1/\lambda - 1/\lambda_{B(shift)}) \\ q(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} &= \pm[\delta(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} - \kappa(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}^2]^{1/2} \\ r(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} &= [q(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} - \delta(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}] / \kappa(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} \end{aligned} \quad (9)$$

위 식에서 Δn은 격자의 초기 굴절률 차이이다. 이때 온도의 변화에 따른 FBG 센서를 투과하는 스펙트럼( $T_p$ )과 반사되어 나오는 스펙트럼( $R_p$ )의 세기는 경계조건  $B_{out} = 0$ 에 의해 다음 식으로 주어진다<sup>[9]</sup>.

$$\begin{aligned} T_p(\lambda, T) &= \left| \frac{A_{out}}{A_{in}} \right|^2 \\ &= \left| S_{11}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} - \frac{S_{12}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} S_{21}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}}{S_{22}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}} \right|^2 \\ &= \left| \frac{1}{S_{11}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}} \right|^2 \\ R_p(\lambda, T) &= \left| \frac{B_{out}}{A_{in}} \right|^2 = \left| \frac{S_{21}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}}{S_{22}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}} \right|^2 \end{aligned} \quad (10)$$

FBG 센서에서 브래그 중심 파장의 반사도는 격자의 굴절률 차에 의한 결합계수와 격자의 길이에 의해 결정되며, 다음 식에 의해 주어진다<sup>[5]</sup>.

$$R(L, \lambda) = \tanh^2(\kappa \cdot L) \quad (11)$$

만약, 온도에 의해 FBG의 굴절률차가 변화하면 결합계수가 변화하여, FBG 센서의 반사도에 영향을 미치게 된다. 이때 온도에 의해 변화한 굴절률 차, Δn<sub>7</sub>는 다음 식으로 주어진다<sup>[10]</sup>.

$$\Delta n_T(T) = \Delta n_0 \frac{1}{(1 + A \cdot t^\alpha)} \quad (12)$$

여기서,  $\Delta n_0 (= 2 \times 10^{-4})$ 는 온도를 인가하기 전 FBG의 초기 굴절률 차이이고,  $t$ 는 온도가 가해지는 시간이다. 또한 게르마늄이 도핑된 실리카 광섬유에서  $A = 1.86 \times 10^{-3} \exp(7.64 \times 10^{-3} T)$ 이고  $\alpha = 7/5250$ 이며 이는 'Erdogan power law' 파라미터이다<sup>[11]</sup>. 따라서 온도에 의한 FBG 센서의 정규화 반사도는 식 (11)과 (12)에 의해 다음 식으로 된다.

$$R_N(L, T) = \tanh^2 \left[ \frac{\pi \Delta n_T(T) L}{\lambda_B} \right] \quad (13)$$

FBG 센서의 FWHM 선폭은 온도가 변화하여 굴절률이 변화하게 되면, 그에 따라 감소하게 되며, 온도변화에 따른 FWHM 선폭,  $\Delta \lambda(T)$ 는 다음 식에 의해 주어진다<sup>[11]</sup>.

$$\Delta \lambda(L, T) = \frac{\lambda_B^2 \left[ \pi^2 + \left( \frac{\pi \Delta n_T(T) L}{\lambda_B} \right)^2 \right]^{1/2}}{\pi n_{eff} L} \quad (14)$$

결국, FBG 센서에 온도를 가하게 되면 격자의 주기와 굴절률 차가 변화하게 되어 온도측정을 위한 스펙트럼의 반사도와 선폭이 감소하는 등의 영향을 미치게 되므로 온도 범위에 따른 센서의 동작안정성 확보가 매우 중요한 기준이 된다.

### 3. 수치해석

FBG 센서에 온도를 인가하였을 때, 그에 따른 중심 반사파장의 이동관계와 FBG 센서의 중심파장의 스펙트럼, 반사도, 선폭, 굴절률 차의 변화에 대해 수치해석하였다. FBG 센서의 격자 길이는 10 mm이고, 초기 굴절률 차의 값은  $2 \times 10^{-4}$ 이다. 그림 1은 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 FBG 센서의 반사파장이 이동한 것을 수치 해석하여 나타낸 것이다. 30 °C에서 반사중심 파장이 1554.502 [nm] 일 때, FBG 센서에 인가된 온도가 100 °C에서는 약 1555.497 nm로 반사파장이 1.06 nm 이동하였고, 200 °C에서는 약 1556.920 nm로 이동하였으며, 300 °C에서는 1558.342 nm, 400 °C에서는 1559.764 nm, 500 °C에서는 1561.187 nm, 600 °C에서는 1562.609 nm, 700 °C에서는 1564.031 nm, 800 °C에서는 1565.454 nm로 이동하여 FBG 센서에 가해진 온도가 1 °C 상승할 때 열 광학 계수와 열 확장 계수에 의해 파장은 약 0.014182 nm 이동하였다. 그림 1에 나타내어진 결과로

부터, FBG 센서에 가해지는 온도에 따라 중심파장이 선형적으로 이동하므로 중심파장의 이동에 따라 변화

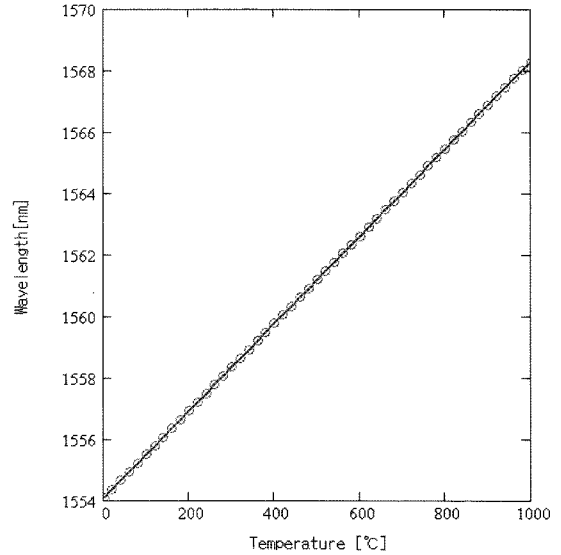


그림 1. 온도변화에 따른 FBG 센서의 중심파장 이동  
Fig. 1. Center wavelength shift of the FBG sensor along temperature variation.

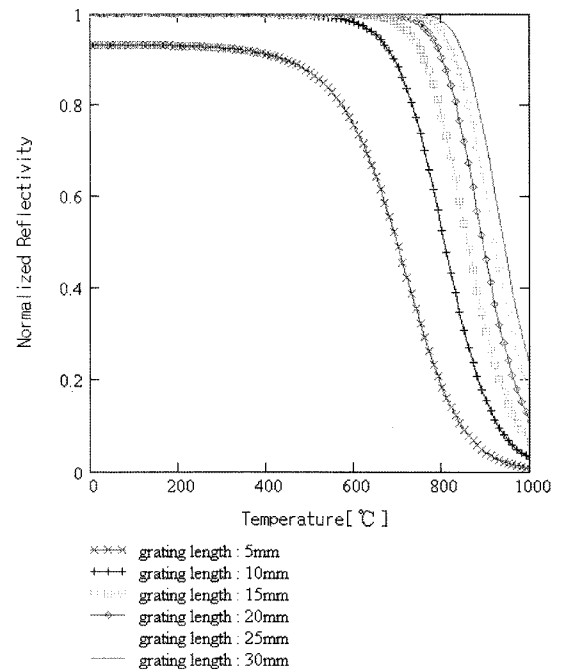


그림 2. 온도변화에 따른 FBG 센서의 정규화 반사도  
Fig. 2. Normalized reflectivity of the FBG sensor along temperature variation.

하는 온도를 측정할 수 있음을 알 수 있다. 그림 2는 FBG 센서의 격자 굴절률 차가 일 때 식 (13)을 이용하여 FBG 센서에 온도를 가하여 온도와 격자의 길이에 따른 반사도를 나타낸 것으로 600 °C까지의 온도 상승에 대해 반사도는 감소하지 않으므로 반사중심파장의 이동에 의한 온도측정 시 온도에 대해 안정성을 보이나, 그 이후부터 서서히 감소하여 700 °C 이후에는 반사도가 감소함을 알 수 있으며, 800 °C 이후에는 온도 측정을 위한 중심파장의 반사도가 매우 낮아지므로 FBG 센서가 동작을 하지 못함을 알 수 있다. 또한 FBG 센서의 격자길이가 길수록 반사도가 커지므로 더 넓은 범위에서 온도측정이 가능함을 알 수 있다.

그림 3은 식 (12)를 이용하여 FBG 센서에 가해진 온도에 따른 정규화 굴절률 차의 변화를 나타낸 것으로 FBG의 격자길이는 10 mm, 초기 굴절률 차가  $2 \times 10^{-4}$ 일 때 가해진 온도가 600 °C까지는 큰 변화를 보이지 않지만 그 이상의 온도에서는 초기 굴절률 차에 비해 현저히 굴절률차가 감소하는 것을 알 수 있으며, 이것은 온도측정을 위한 FBG 센서의 반사도가 감소하게 되는 요인이 된다.

식 (14)를 이용하여 FBG 센서에 가해진 온도에 따른 반사스펙트럼의 선폭에 대한 변화를 그림 4에 나타내었다. FBG 센서에 가해진 온도가 약 600 °C 부근까지는 반사스펙트럼의 선폭이 크게 감소하지 않으나, 그 이상의 온도영역에서는 선폭이 급격히 감소함을 알 수

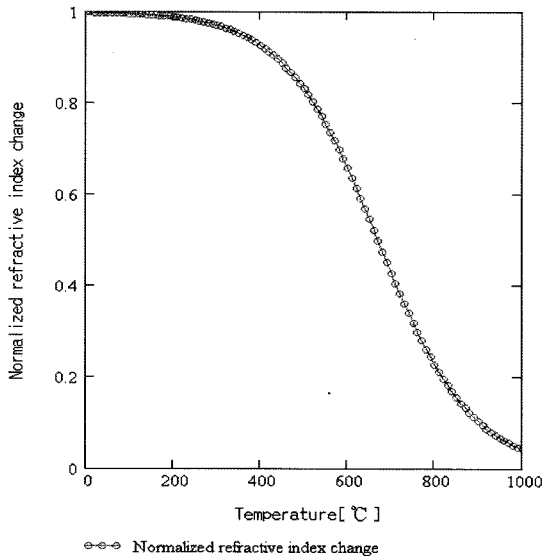


그림 3. 온도변화에 따른 FBG 센서의 정규화 굴절률 차의 변화  
Fig. 3. Normalized refractive index change of the FBG sensor along temperature variation.

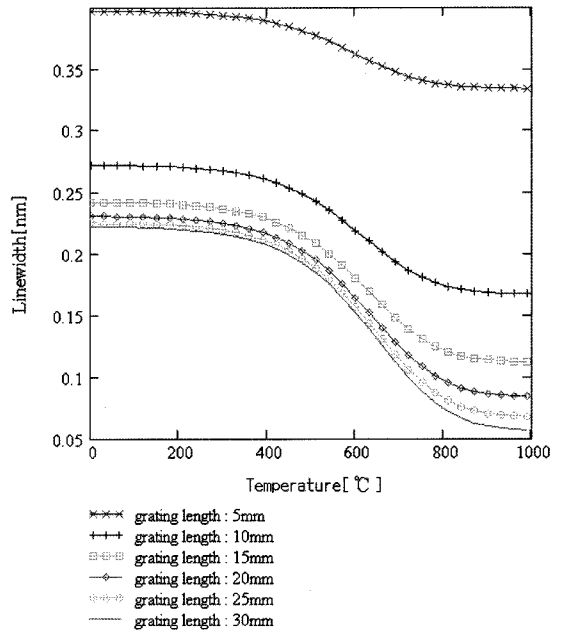


그림 4. 온도변화에 따른 FBG 센서의 선폭 변화  
Fig. 4. Linewidth of the FBG sensor along temperature variation.

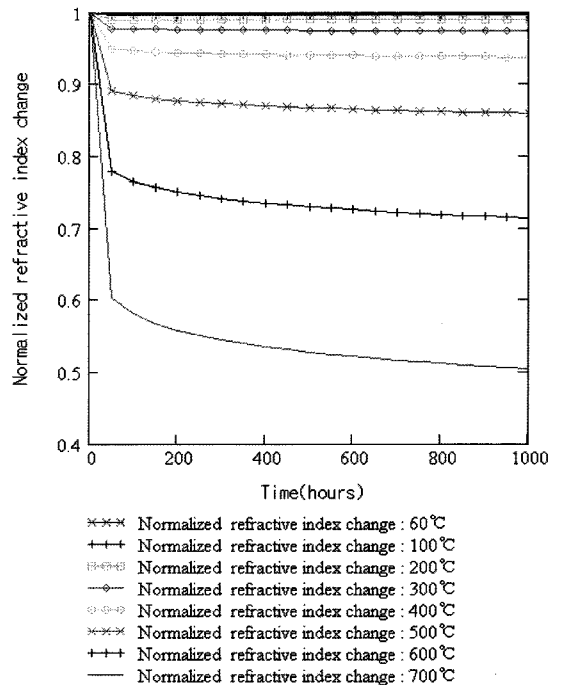


그림 5. 가열시간에 따른 FBG 센서의 정규화 굴절률 차의 변화  
Fig. 5. Normalized refractive index change of the FBG sensor along heating time.

있으며, 이는 온도측정을 위한 센서로써 동작 시 오류가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 그림 2와 그림 4의 결과로부터 격자길이가 길수록 고온영역에서 반사도의 감소폭이 작지만 선폭이 매우 좁아지므로 30 mm 이하의 격자길이를 센서를 설계해야 함을 알 수 있다.

그림 5는 임의의 온도에서, 온도변화를 측정하기 위한 FBG 센서의 노출시간에 따른 정규화 굴절률 차의 변화를 나타낸 것으로 600 °C까지는 1000시간 이상 노출하여도 반사도에 영향을 미치는 정규화 굴절률 차의 변화가 거의 없지만 700 °C 이상에서는 짧은 시간 노출에도 굴절률 차의 변화가 급격하여 FBG 반사파장의 반사도에 영향을 미침으로 온도측정 시 오류를 발생시킬 수 있음을 알 수 있다.

그림 6은 앞의 수치해석 결과와 식 (10)을 이용하여 FBG의 격자길이를 10 mm로 설정한 후 FBG 센서에 온도를 가하였을 때, 그 온도에 따라 중심 파장이 이동하는 스펙트럼을 나타낸 것으로, 그림의 결과에서처럼 600 °C까지는 온도에 따라 FBG 센서의 중심 반사파장이 선형적으로 이동하므로 온도 변화 범위에 따른 온도를 측정할 수 있음을 알 수 있으나, 이와 동시에 600 °C 이후부터 중심파장의 반사도와 선폭이 감소하여 700 °C 이후에서는 온도 측정 시 오류가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 FBG를 이용한 온도 측정 센서의 특성을 수치해석을 통해 고찰하였다. 저온에서 고온영역의 온도를 측정하기 위한 FBG 센서는 온도에 따라 선형적으로 반사중심파장이 이동하여 온도변화의 범위에 따른 온도를 측정할 수 있음을 알 수 있으나 온도가 상승할수록 반사중심파장의 반사도가 고온의 영역에서 감소하는 결과를 얻음을 알 수 있다.

FBG 센서의 굴절률 차는 600 °C까지의 온도에서는 거의 변화하지 않지만, 그 이상의 온도에서는 급격히 변화하여 반사파장의 반사도에 영향을 미침을 알 수 있으며, 600 °C까지의 온도에서 FWHM 선폭은 일정하게 유지되나, 그 이상의 온도에서는 급격히 감소하여 600 °C 이상에서는 일정한 선폭의 확보가 어려움을 알 수 있다. 또한 FBG 센서에 가해지는 임의의 온도에 대한 노출시간에 따른 FBG의 정규화 굴절률 차의 변화는 600 °C까지는 1000시간 이상 노출하여도 반사도에 영향을 미치는 정규화 굴절률 차의 변화가 거의 없지만 노출온도가 600 °C 이상에서는 짧은 시간을 노출하여도 굴절률 차의 변화가 커짐으로 FBG 센서의 반사

도에 영향을 미침을 알 수 있으며 격자길이가 길수록 고온영역에서 반사도의 감소폭이 작지만 선폭이 매우 좁아지므로 30 mm 이하의 격자길이를 센서를 설계해야 함을 알 수 있다. 결국, 온도측정을 위한 FBG 센서의 반사중심파장의 이동은 600 °C 까지는 온도에 대해 안정성을 보이며, 600 °C 이상의 온도에서는 정확한 온도측정을 안정적으로 할 수 없음을 알 수 있다. 이에 본 논문에서 얻어진 결과들은 온도측정을 위한 FBG 온도센서의 설계 시 유용한 설계데이터로 적용될 수 있을 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] M. Mahmoud and Z. Ghassemlooy, "Tunable fiber gratings modeling and simulation", *Proc. of the 36th Annual Simulation Symposium*, pp. 305-308, 2003.
- [2] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, no. 10, pp. 1035-1037, 1993.
- [3] 허진석, 김만섭, 이정주, "광섬유 브래그 격자를 이용한 측각센서용 유연 단위 힘 센서 개발", *센서학회지*, 제15권, 제4호, pp. 251-256, 2006.
- [4] 김경복, 광계달, "단일모두 광섬유 브래그 격자를 이용한 저주파수 대역의 음향 센서에 관한 연구", *센서학회지*, 제9권, 제6호, pp. 396-403, 2000.
- [5] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings Fundamentals and Application in Tel- ecommunication and Sensing*, ISBN 0-89006-344-3, 2001.
- [6] M. Yamada and K. Sakuda, "Analysis of almost periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach", *Appl. Opt.*, vol. 26, pp. 3474-3478, 1978.
- [7] G. P. Agrawal and A. H. Bobeck, "Modeling of distributed feedback semiconductor lasers with axially varying parameters", *J. Quantum Electronics*, vol. 24, no. 12, pp. 2407-2414, 1988.
- [8] G. P. Agrawal and N. K. Dutta, *Semiconductor Lasers*, Van Nostrand Reinhold, New York, chap. 7, 1993.
- [9] 손용환, 정진호, "FBG와 MZI를 이용한 DWDM용 OADM의 설계와 특성에 관한 연구", *전자공학회 논문지*, 제41권, SD편, 제5호, pp.419-424, 2004.
- [10] S. R. Baker, H. N. Rourke, V. Baker, and D. Goodchild, "Thermal decay of fiber bragg gratings written in boron and germanium codoped silica fiber", *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1470-

1477, 1997.

- [11] M. R. Shenoy, K. Thyagarajan, Vishnu, and N. S. Madhavan, "Estimation of characteristic parameters

of fiber bragg gratings from spectral measurements", *SPIE* vol. 3666, pp. 94-99, 1999.



### 손용환

- 1999년 호서대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 2001년 호서대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 2008년 호서대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
- 2008년~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사 후 연구원
- 주관심분야 : 광센서, 집적광학 소자, 광통신시스템



### 한상국

- 1986년 연세대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1988년 Electronic Engineering, University of Florida(공학석사)
- 1994년 Electronic Engineering, University of Florida(공학박사)
- 2008년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수
- 주관심분야 : 광통신 소자 및 광통신 네트워크 시스템, 광 스위칭