

FBG를 이용한 파장가변 형 전광 필터의 고온 특성에 관한 연구

A Study on the High-Temperature Characteristics of a Tunable All-Optical Filter Using Fiber Bragg Grating

손 용 환*, 양 세 훈*, 김 현 승*, 한 상 국*★

Yong Hwan Son*, Se Hoon Yang*, Hyun Seung Kim*, Sang Kook Han*★

Abstract

In this paper, we present high temperature characteristics of a tunable all-optical filter using fiber Bragg grating(FBG) filter in Ge doped and Ge & B co-doped fiber, including peak reflectivity, bandwidth and various normalized refractive index change with temperature variation. The reflection spectrum of a FBG filter with refractive index change is affected by its thermal stability. Consequently Ge doped FBG tunable filter has a better thermal stability than Ge & B co-doped FBG tunable filter. Also, both FBG tunable filters show good thermal stability up to about 500°C.

요 약

본 논문에서는 Germanium 및 Germanium과 Boron이 도핑 된 광섬유의 FBG를 이용한 파장가변 형 전광 필터의 고온 특성을 고찰하고, 온도 변화에 대한 파장가변 형 FBG 필터의 반사도, 선폭, 정규화 굴절률 차의 특성 변화를 수치해석을 통해 비교 고찰 하였다. 굴절률 차의 변화에 따른 FBG 필터의 반사 스펙트럼은 온도 안정성에 영향을 받으며, Germanium이 도핑 된 광섬유의 FBG 필터가 Germanium과 Boron이 도핑 된 광섬유의 FBG 필터보다 온도변화에 더 안정성을 가짐을 알 수 있다. 또한 500°C 까지의 온도에 대해서는 두 가지 모두 필터로서 온도변화에 안정성을 가짐을 알 수 있다.

Key words : FBG, tunable, reflectivity, bandwidth, refractive index change

1. 서론

여러 개의 채널과 각 채널별로 여러 개의 파장을 동시에 전송하는 파장분할다중화(wavelength division multiplexing: WDM) 기술과 더욱 진보된 조밀파장분할다중화(Dense WDM) 기술 등을 적용하여 통신망의 증대 및 요구에 효과적으로 대응하여 왔다. 따라서 이러한 광통신망의 구축을 위해서는 각종 시스템

과 연동이 가능한 광통신용 소자의 연구 개발이 매우 중요한 문제이며 그 수요도 기하급수적으로 증가할 것으로 예상된다[1]. WDM과 DWDM을 위한 광통신망의 구축을 위해서는 수동형 및 능동형 광소자와 광의 경로변경 등의 제어를 할 수 있는 광 커넥터, 광 아이솔레이터, 광 써큘레이터 그리고 광 필터 등이 필수적으로 필요하다. 그러나 현재 사용되고 있는 광소자는 대체로 벌크형태의 물리적인 크기를 갖는 소자이므로 손실이 비교적 크고 시스템을 소형화, 경량화 하는데 어려움이 있을 뿐만 아니라 결합 및 분기를 위한 채널이 고정되어있어 다른 채널로 변경하기가 매우 어려운 문제가 있다. 따라서 이를 보완하기 위해 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating: FBG)를 이용하면 광섬유만으로 이러한 소자를 구성할 수

*연세대학교 전기전자공학과

★교신저자 (Corresponding author)

接受日: 2010年 12月 2日, 修正完了日: 2010年 12月 29日

있기 때문에 소형, 경량, 저손실의 소자를 구현할 수 있을 뿐만 아니라, FBG 필터에 직접 온도, 스트레인, 압력 등의 물리적 에너지를 인가하는 것만으로 FBG 필터의 주기와 유효굴절률이 변화하게 되어 송수신 채널의 변경을 위한 브래그 반사파장을 쉽게 변화시킬 수 있는 장점을 가진다[2]. 만약 송수신 채널의 변경을 위해 FBG 필터에 온도를 가하는 방법을 선택하게 된다면, 온도의 영향에 대한 FBG의 안정성이 매우 중요한 기준이 될 것이다. 이에 본 논문에서는 FBG 필터의 고정된 중심 파장을 가변하기 위해 온도를 이용하여 브래그 반사파장을 변경할 경우, Ge(Germanium) 및 Ge과 B(Boron) 도핑광섬유에서 온도변화에 따른 FBG 필터의 브래그 반사파장의 이동, FWHM(full width half maximum)대역폭, 반사도의 변화, 그리고 굴절률 차의 변화특성에 대해 해석하고, 온도안정성에 대한 그 특성을 고찰한다.

II. 파장가변 형 FBG 필터의 온도특성

FBG 필터는 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[1]. 따라서 이러한 조건을 변경시킴으로써 반사되는 특정파장을 조절할 수 있다. 격자 필터를 통과하는 두 모드가 동일하고 격자가 일반적으로 1차 회절에 의해 지배된다고 가정하면, 브래그 반사파장과 격자 주기와의 관계는 다음 식으로 된다.[3]

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

위 식에서 λ_B 는 브래그 반사파장이며, Λ 는 FBG 필터의 격자 주기, 유효굴절률 $n_{eff} = n_1 \sin\theta$ 이며, n_1 은 코어의 굴절률이다. FBG 필터에 온도, 스트레인, 압력 등의 물리적 에너지를 인가하게 되면, 인가되는 물리적 에너지로 인해 FBG 필터의 격자 주기와 유효굴절률이 변화하게 되고, 이에 따라 브래그 반사파장을 변화시킬 수 있다[2]. 따라서 식 (1)은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

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

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

여기에서 ΔT_{FBG} 는 FBG 필터에 인가되는 온도의 변화이다. 식 (3)의 첫째 항에서 $\left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial T}\frac{1}{n_{eff}}\right) = \alpha_n$ 은 FBG 필터에 인가되는 열에 의한 굴절률변화에 따른 열 광학 계수(thermo-optic coefficient)로서, 게르마늄이 도핑된 실리카 광섬유에서 보통 8.6×10^{-6} 이다. 또한 $\left(\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\frac{1}{\Lambda}\right) = \alpha_A$ 은 FBG 필터에 인가되는 열에 의한 주기변화에 따른 열 확장 계수(thermal expansion coefficient)로서, 실리카 광섬유에서 0.55×10^{-6} 값을 갖는다[3]. 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 필터의 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 필터에 온도를 인가하였을 때, 온도에 따라 변화된 브래그 반사파장 $\lambda_{B(shift)}$ 는 다음 식으로 된다.

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

FBG 필터에서 진행파와 반사파 사이의 광의 결합 관계는 결합 파동방정식의 해를 구함으로 설명된다[4]. FBG 필터의 경우, 진행방향으로 진행되는 파와 격자에서 반사되어 되돌아오는 파가 포함되므로 광 필드는 아래 식의 형태로 표현된다.

$$E(z) = A(z)\exp(iqz) + B(z)\exp(-iqz) \quad (7)$$

여기서, A 와 B 는 각각 진행되는 파와 FBG 필터에 의해 반사되는 파의 진폭을 나타내고, q 는 전파상수, z 는 진행방향을 나타낸다. 광광섬유에서 광의 전파를 설명하는 파동방정식은 다음 식과 같이 간단한 형태로 표현된다[4].

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} E + k^2 E = 0 \quad (8)$$

식 (7)을 파동방정식 (8)에 대입하면, 식 (9), (10)과 같은 결합 파동방정식을 얻을 수 있다[4].

$$\frac{dA}{dz} = i\delta A + ikB \quad (9)$$

$$\frac{dB}{dz} = -i\delta B - ik^* A \quad (10)$$

여기서, δ 는 브래그 파장에서 모드의 동조이탈계수이고, k 는 결합계수이다.

결합 파동방정식을 통해 각 진행파와 반사파가 FBG 필터를 z 방향으로 L 만큼 진행했을 때의 파와 격자의 입력 단에서의 파와의 관계를 알 수 있다. 이 결합 파동방정식을 풀고 매트릭스 해석법을 이용하여, 그 해를 매트릭스 형태로 정리하면 다음 식으로 된다 [5].

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

여기서, S 매트릭스는 FBG 필터의 특성을 나타내는 전달 매트릭스이고, 결합모드 이론을 이용하여 온도의 함수가 포함된 항으로 나타내면 각각의 S 매트릭스 각 성분은 아래 식들의 형태로 된다[4, 6].

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

(12)

여기에서 진행파와 반사파의 전파상수 q , 결합계수 κ , 동조이탈계수 δ , 유효반사계수 r 는 각각 온도 항이 포함된 다음의 식과 같다.

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

(13)

윗 식에서 $\delta\beta_{\Delta T_{FBG}} = 2\pi\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\beta(shift)}}\right)$ 는 주기 Λ 와 관련된 브래그 파장 λ_B 에서의 동조이탈계수이며, Δn 은 격자의 굴절률 차, L 은 FBG 필터의 격자길이다. 이때 온도의 변화에 따른 FBG 필터를 투과하는 스펙트럼(T_p)과 반사되어 나오는 스펙트럼(R_p)의 세기는 경계조건 $B_{out} = 0$ 에 의해 다음 식으로 주어진다[7].

$$\begin{aligned} T_p(\lambda, T) &= \left| \frac{A_{out}}{A_{in}} \right|^2 \\ &= \left| S_{11}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} - \frac{S_{12}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}} S_{21}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}}{S_{22}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}} \right|^2 \\ &= \left| \frac{1}{S_{11}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}} \right|^2 \\ R_p(\lambda, T) &= \left| \frac{B_{in}}{A_{in}} \right|^2 = \left| \frac{S_{21}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}}{S_{22}(\lambda, T)_{\Delta T_{FBG}}} \right|^2 \end{aligned} \quad (14)$$

FBG 필터에서의 브래그 중심 파장의 반사도는 격자의 굴절률 차에 의한 결합계수와 격자의 길이에 의해 결정되며, 다음 식에 의해 주어진다[3].

$$R(L, \lambda) = \tanh^2(\kappa \cdot L) \quad (15)$$

만약, FBG 필터의 굴절률차가 변화하면 결합계수가 변화하여, FBG 필터의 반사도에 영향을 미치게 된다. FBG 필터의 브래그 중심파장을 변경하기 위해 온도를 인가하게 되면 격자의 굴절률차가 변화하게 되며, 이때 온도에 의해 변화한 굴절률 차, Δn_T 는 다음 식으로 주어진다[8].

$$\Delta n_T(T) = \Delta n_0 \frac{1}{(1 + A \cdot t^\alpha)} \quad (16)$$

여기서, $\Delta n_0 (= 2 \times 10^{-4})$ 는 온도를 인가하기 전 격자의 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 $\alpha = T/5250$ 이며, 게르마늄과 보론이 도핑된 광섬유에서 $A = 0.192 \times 10^{-3} \exp(13.1 \times 10^{-3} T)$ 이고 $\alpha = T/2941$ 이다. 이는 'Erdogan power law' 파라미터이다[9]. 따라서 온도에 의한 FBG 필터의 정규화 반사도는 식(15)와 (16)에 의해 다음 식으로 된다.

$$R_{\lambda}(L, T) = \tanh^2 \left[\frac{\pi \Delta n_T(T) L}{\lambda_B} \right] \quad (17)$$

FBG 필터의 FWHM 대역폭은 온도가 변화하여 굴절률이 변화하게 되면, 그에 따라 감소하게 되며, 온도변화에 따른 FWHM 대역폭, $\Delta\lambda(T)$ 는 다음 식에 의해 주어진다[9].

$$\Delta\lambda(L, T) = \frac{\lambda_B^2 \left[\pi^2 + \left(\frac{\pi \Delta n_T(T)}{\lambda_B} L \right)^2 \right]^{1/2}}{\pi n_{eff} L} \quad (18)$$

결국, 브래그 중심파장을 변경하기 위해 FBG 필터에 온도를 가하게 되면 굴절률차가 변화하게 되어 반사 스펙트럼의 반사도와 대역폭이 감소하는 등의 영향을 미치게 되므로 온도 범위에 따른 동작안정성의 확보가 매우 중요한 기준이 된다.

III 수치해석

FBG 필터에 온도를 인가하였을 때, 그에 따른 중심 반사파장의 이동관계와 FBG 필터의 중심파장의 스펙트럼, 반사도, 대역폭, 굴절률 차의 변화에 대해 수치해석 하였다. FBG 필터의 격자 길이는 10[mm], 반사 중심 파장은 1554nm, 초기 굴절률 차의 값은 2×10^{-4} 이다. 그림 1은 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 FBG 필터의 반사파장이 이동한 것을 수치 해석하여 나타난 것이다. 30℃에서 반사중심 파장이 1554.502[nm] 일 때, FBG 필터에 인가된 온도가 100℃에서는 약 1555.497[nm]로 반사파장이 1.06[nm] 이동하였고 800℃에서는 1565.454[nm]로 이동하여 FBG 필터에 가해진 온도가 1℃ 상승할 때 열 광학 계수와 열 확장 계수에 의해 파장은 약 0.014182[nm] 이동하였다. 그림 1에 나타내어진 결과로부터, FBG에 가해지는 온도에 따라 중심

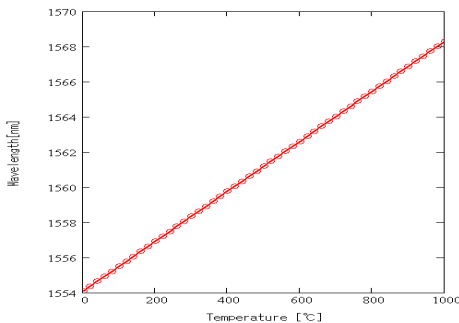


Fig. 1 Center wavelength shift of the FBG filter with temperature variation

그림 1. 온도변화에 따른 FBG 필터의 중심파장 이동

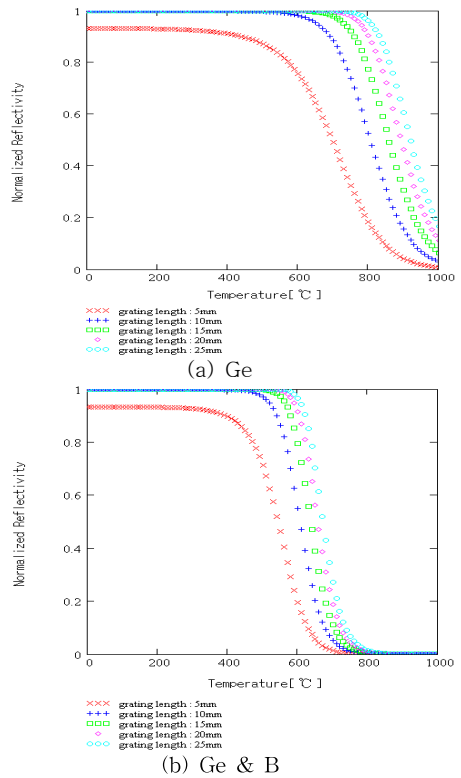


Fig. 2 Normalized reflectivity of the FBG filter with temperature variation

그림 2. 온도변화에 따른 FBG 필터의 정규화 반사도

파장이 선형적으로 이동하므로 원하는 신호의 채널을 쉽게 변경 및 선택할 수 있음을 알 수 있다.

그림 2는 격자의 굴절률 차가 2×10^{-4} 일 때 식 (17)을 이용하여 FBG 필터에 온도를 가하여 온도와 격자의 길이에 따른 반사도를 나타낸 것으로 500℃까지의 온도 상승에 대해 반사도는 감소하지 않으므로 반사중심파장의 이동에 의한 채널 변경 시 온도에 대해 안정성을 보이나, 그 이후부터 서서히 감소하여 700℃ 이후에는 반사도가 50% 이하로 떨어짐을 알 수 있으며, 800℃ 이후에는 반사도가 매우 낮아지므로 FBG가 필터로서의 동작을 하지 못함을 알 수 있다. 또한 고온영역에서 게르마늄 도핑 광섬유에 비해 게르마늄과 보론이 도핑 된 광섬유에서의 반사도가 낮음을 알 수 있으며, 격자길이가 길수록 반사도가 높은 것을 알 수 있다.

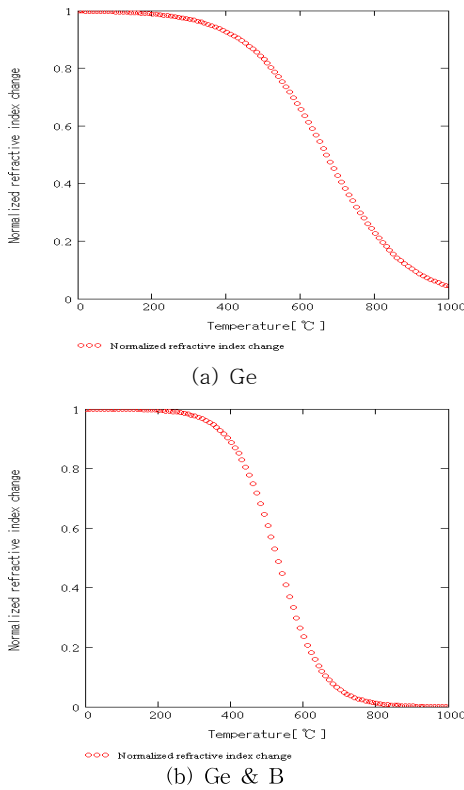


Fig. 3 Normalized refractive index change of the FBG filter with temperature variation

그림 3. 온도변화에 따른 FBG 필터의 정규화 굴절률 차의 변화

그림 3은 식 (16)을 이용하여 FBG에 가해진 온도에 따른 정규화 굴절률 차의 변화를 나타낸 것으로 FBG 필터의 초기 굴절률 차가 2×10^{-4} 일 때 가해진 온도가 500°C까지는 큰 변화를 보이지 않지만 그 이상의 온도에서는 초기 굴절률 차에 비해 현저히 굴절률차가 감소하는 것을 알 수 있으며, 게르마늄 도핑 광섬유에 비해 게르마늄과 보론 도핑 광섬유에서의 정규화 굴절률 차가 고온의 영역에서 더 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 FBG 필터의 반사도가 감소하게 되는 요인이 된다.

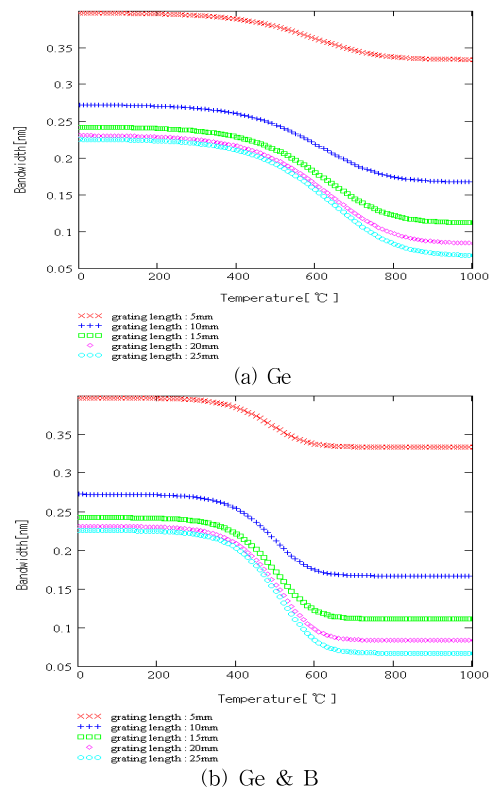
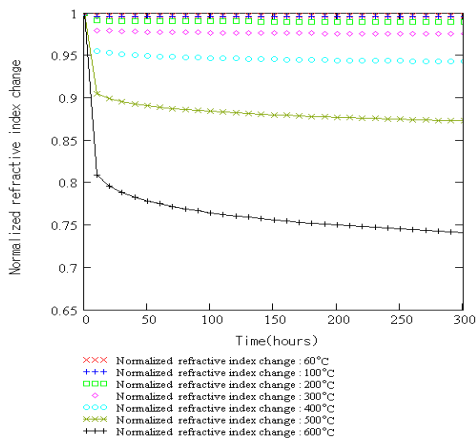


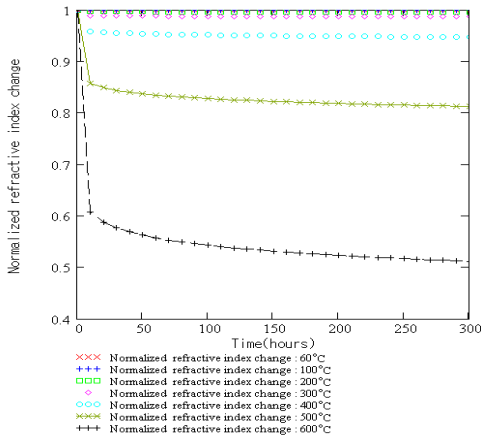
Fig. 4 Bandwidth of the FBG filter with temperature variation

그림 4. 온도변화에 따른 FBG 필터의 대역폭 변화

그림 5는 임의의 온도에 대해 가열시간에 따른 FBG 필터의 정규화 굴절률 차의 변화를 나타낸 것으로 FBG 필터의 가변을 위해 가열하는 시간이 500°C까지는 300시간 이상 가열하여도 반사도에 영향을 미치는 정규화 굴절률 차의 변화가 거의 없지만 600°C 이상에서는 짧은 시간을 가열하여도 정규화 굴절률 차의 변화가 발생하여 FBG 필터의 반사도에 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 가열시간 및 온도에서 게르마늄 도핑 광섬유에 비해 게르마늄과 보론 도핑 광섬유에서의 정규화 굴절률 차의 감소가 더 커짐을 알 수 있다.



(a) Ge

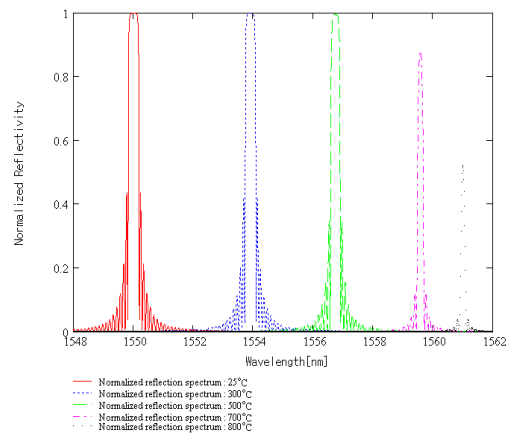


(b) Ge & B

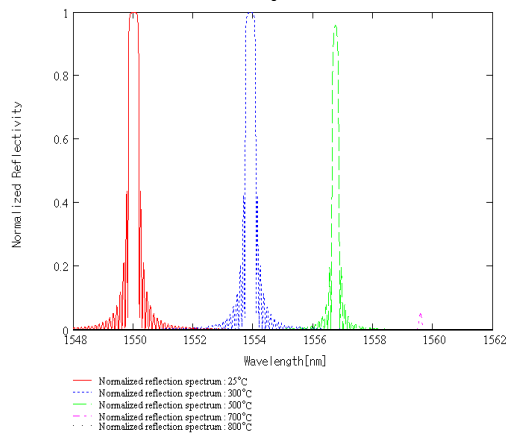
Fig. 5 Normalized refractive index change of the FBG filter with heating time

그림 5. 가열시간에 따른 FBG 필터의 정규화 굴절률 차의 변화

그림 6은 앞의 수치해석 결과와 식 (17)을 이용하여 격자의 길이를 10[mm]로 설정한 후 FBG 필터에 온도를 가하였을 때, 그 온도에 따라 중심 파장이 이동하는 스펙트럼을 나타낸 것으로, 그림의 결과에서 처럼 500°C 까지는 온도에 따라 필터의 특성 변화 없이 중심 반사파장이 장파장 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있으나, 이와 동시에 600°C 이후부터 중심파장의 반사도와 대역폭(선폭)이 감소하는 것을 알 수 있으며 게르마늄 도핑 광섬유에 비해 게르마늄과 보론 도핑 광섬유에서 그 감소의 폭이 더 큰 것을 알 수 있다.



(a) Ge doped



(b) Ge & B co-doped

Fig. 6 Reflection spectra of the FBG filter with temperature variation

그림 6. 온도변화에 따른 FBG 필터의 반사 스펙트럼

VI 결론

본 논문에서는 과장가변 형 FBG 필터의 특성과 그에 대한 온도 특성을 수치해석을 통해 고찰하였다.

과장가변 형 FBG 필터는 온도에 따라 선형적으로 반사중심파장이 이동하여 온도변화에 의해 원하는 신호의 과장을 선택할 수 있음을 알 수 있으나 온도가 상승할수록 반사중심파장의 반사도가 고온의 영역에서 감소하는 결과를 얻을 수 있다.

FBG 필터의 굴절률 차는 500°C 까지의 온도에서는 거의 변화하지 않지만, 그 이상의 온도에서는 급격히 변화하여 반사파장의 반사도에 영향을 미침을 알 수 있으며, 500°C 까지의 온도에서 FWHM 대역폭

은 일정하게 유지되나, 그 이상의 온도에서는 급격히 감소하여 600°C 이상에서는 일정한 대역폭의 확보가 어려움을 알 수 있다. FBG 필터에 가해지는 임의의 온도에 대해 가열시간에 따른 FBG 필터의 정규화 굴절률 차의 변화는 가열하는 시간이 500°C까지는 300시간 이상 가열하여도 반사도에 영향을 미치는 정규화 굴절률 차의 변화가 거의 없지만 600°C 이상에서는 짧은 시간을 가열하여도 굴절률 차의 변화가 커짐으로 FBG 필터의 반사도에 영향을 미침을 알 수 있다. 결국, 채널변경을 위한 온도를 이용하는 방법으로서의 반사증심파장의 이동은 600°C까지는 온도에 대한 안정성을 보이며, 600°C 이상의 온도에서는 필터로서의 기능을 안정적으로 할 수 없음을 알 수 있다. 또한 가열시간 및 온도에서 게르마늄 도핑 광섬유에 비해 게르마늄과 보론 도핑 광섬유에서의 굴절률 차의 감소가 더 커짐을 알 수 있으며 이는 게르마늄 도핑 된 광섬유에서의 FBG 필터가 온도의 영향에 더 안정적임을 나타낸다. 이에 본 논문에서 얻어진 결과들은 채널가변형 FBG 필터의 설계 시 유용한 설계데이터로 적용될 수 있으며, 광섬유 브래그 격자를 이용한 고온 광센서 등의 분야에도 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] 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. 1035-1039, 1993.

[2] M. Mahmoud, Z. Ghassemlooy, "Tunable Fiber Gratings Modeling and Simulation", *Proceedings of the 36th Annual Simulation Symposium (ANSS' 2003)*

[3] Andreas Othonos, Kyriacos Kalli, *Fiber Bragg Gratings Fundamentals and Application in Tel-ecommunication and Sensing*, 2001. (ISBN 0-89006-344-3)

[4] Govind P. Agrawal, and Andrew H. Bobeck, "Modeling of Distributed Feedback Semiconductor Lasers with Axially Varying Parameters", *J. of Quantum Electronics*, vol. 24, No. 12, pp. 2407-2414, 1988.

[5] 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.

[6] Govind P. Agrawal and N. K. Dutta, *Semiconductor Lasers*, New York, Van Nostrand Reinhold, chap. 7. 1993.

[7] 손용환, 정진호, "FBG와 MZI를 이용한 DWDM용 OADM의 설계와 특성에 관한 연구", *전자공학회 논문지*, 제41권, SD편, 제5호, pp.419-424, 2004.

[8] Stephen R. Baker, Howard N. Rourke, Vernon Baker and Darren 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.

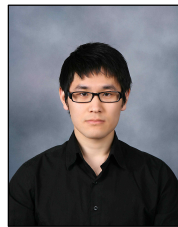
[9] M. R. Shenoy, K. Thyagarajan, Vishnu and N. S. Madhavan, "Estimation of Characteristic Parameters of Fiber Bragg Gratings from Spectral Measurements," *SPIE* vol. 3666, pp. 94-99, 1999.

저 자 소 개

손 용 환 (정회원)

한국전기전자학회 논문지 제13권 제4호 참조

양 세 훈 (비회원)



2010년 : 연세대학교 전기전자공학과 졸업 (공학사)
2010년 현재: 연세대학교 대학원 전기전자공학과 석·박사통합과정 <주관심분야> 가시광통신, 광통신, 광네트워크

김 현 승 (비회원)

한국전기전자학회 논문지 제13권 제4호 참조

한 상 국 (정회원)

한국전기전자학회 논문지 제13권 제4호 참조