

광 파이버 브래그 격자를 이용한 파장가변형 필터의 온도 특성에 관한 연구

손 용 환, 이 중 윤, 허 주 옥, 정 진 호
호서대학교 전기정보통신공학부 전자정보기술 전공
e-mail : sonyh38@nate.com

A Study on the Thermal Characteristics of Tunable Filter Using Fiber Bragg Grating

Yong Hwan Son, Jong Youn Lee, Ju Ok Heo, Jin Ho Jung
Dept. of Electronics, Hoseo University

Abstract

In this paper, we present thermal characteristics of a fiber Bragg grating(FBG) filter, including peak reflectivity, FWHM bandwidth, and wavelength shift by various refractive index change. The reflection spectrum of a FBG filter with refractive index change is affected by its thermal stability.

I. 서론

20세기 후반부터 계속되어진 인터넷과 이동통신, 그리고 다양한 멀티미디어 서비스 등을 제공하는 정보통신기술의 급속한 발전으로 인해 유무선 통신망의 데이터요구량 및 트래픽이 급격히 증가해 왔으며, 디지털 방송서비스 등 차세대 정보통신기술에 대한 연구와 보급으로 인해 정보의 요구량은 폭발적으로 증대될 것이 확실하다[1]. 따라서 이와 같은 요구를 충족시키기 위한 통신망의 전송용량 증대와 그것의 지속적인 확대가 필요함에 따라, 이를 배경으로 기존의 전기통신을 이용한 유무선망과 더불어 초고속, 대용량통신이 가능하도록 광을 매개로 한 광대역 초고속 광통신망이 등장하여 이러한 요구를 충족시켜 왔고, 여러 개의 채널과 각 채널별로 여러 개의 파장을 동시에 전송하는 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 기술과 더

욱 진보된 DWDM(Dense WDM) 기술 등을 적용하여 이러한 요구에 효과적으로 대응하여 왔다. 이를 위한 광통신망의 구축을 위해서는 광 파이버, 능동형 광소자와 광 케넥터, 광 아이솔레이터, 광 셔큘레이터 그리고 광의 결합, 분기를 광 다중화기 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 파이버 브래그 격자(Fiber Bragg Grating: FBG) 필터를 이용하면 광 파이버 만으로 이러한 소자를 구성할 수 있기 때문에 소형, 경량, 저손실의 소자를 구현할 수 있을 뿐만 아니라, FBG 필터에 직접 온도, 스트레인, 압력 등의 물리적 에너지를 인가하는 것만으로 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 필터에 온도를 이용하여 브래그 반사파장을 변경할 경우, 온도 변화에 따른 FBG 필터의 브래그 반사파장의 이동, FWHM 대역폭, 반사도의 변화, 그리고 굴절률 차의 변화특성에 대해 해석하고, 온도안정성에 대한 그 특성을 고찰한다.

II. FBG 필터의 특성

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[3]. 따라서 이러한 조건을 변경시킴으로써 반사되는 특정 파장을 조절할 수 있다.

FBG 필터는 간단히 광학 회절 격자로 볼 수 있으며, 격자가 일반적으로 회절에 의해 지배된다고 가정하면, Bragg 반사파장과 격자 주기와의 관계는 다음 식으로 된다[5].

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{eff} \Lambda. \quad (4)$$

위 식에서 λ_B 는 브래그 반사파장이며, Λ 는 FBG 필터의 주기, 유효굴절률 $n_{eff} = n_1 \sin \theta$ 이다.

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 (4)는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta \lambda_B = 2(\Delta \Lambda) n_{eff} + 2\Lambda (\Delta n_{eff}). \quad (5)$$

파장가변을 위한 브래그 반사조건을 변화시키기 위해 FBG 필터에 인가하는 에너지가 온도라면, 식 (5)는 온도에 관계된 항을 갖는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B \left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \frac{1}{n_{eff}} + \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \frac{1}{\Lambda} \right) \Delta T_{FBG} \quad (6)$$

여기에서 ΔT_{FBG} 는 FBG 필터에 인가되는 온도의 변화이다. 식 (6)의 마지막 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 파이버에서 보통 8.6×10^{-6} 이다. 또한 $\left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T} \frac{1}{\Lambda} \right) = \alpha_\Lambda$ 은 FBG 필터에 인가되는 열에 의한 주기변화에 따른 열 확장 계수(thermo expansion coefficient)로서, 실리카 파이버에서 0.55×10^{-6} 값을 갖는다[5]. 따라서 FBG 필터의 온도 민감도(Temperature sensitivity) ST_{FBG} 는 식 (6)을 이용하여 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$ST_{FBG} = \frac{\Delta \lambda_B}{\Delta T_{FBG}} = \lambda_B (\alpha_n + \alpha_\Lambda). \quad (8)$$

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

$$\lambda_{B(shift)} = \lambda_B + ST_{FBG} \Delta T_{FBG} \quad (9)$$

FBG 필터에서 특정 파장의 빛이 반사되는 것을 수식적으로 고려하면 광섬유 내의 진행파와 반사파 사이에서 광의 결합이 일어남으로 인해 발생하는 현상으로 볼 수 있다. 이 진행파와 반사파 사이의 광의 결합 관계는 결합 파동방정식의 해를 구함으로 설명된다[6].

결합 파동방정식을 풀고 매트릭스 해석법을 이용하면, 온도영향에 따른 FBG 필터의 투과 스펙트럼(T_p)과 반사되어 나오는 스펙트럼(R_p)의 세기는 다음 식으로 주어진다[9].

$$T_p = \left| \frac{A_{out}}{A_{in}} \right|^2 = \left| S_{11\Delta T_{FBG}} - \frac{S_{12\Delta T_{FBG}} S_{21\Delta T_{FBG}}}{S_{22\Delta T_{FBG}}} \right|^2, \\ R = \left| \frac{B_{in}}{A_{in}} \right|^2 = \left| \frac{S_{21\Delta T_{FBG}}}{S_{22\Delta T_{FBG}}} \right|^2. \quad (20)$$

여기에서 s_{mm} 은 FBG 필터의 특성을 나타내는 전달 매트릭스이다. FBG 필터에서의 브래그 중심 파장의 반사도는 격자의 굴절률 차에 의한 결합계수와 격자의 길이에 의해 결정되며, 다음 식에 의해 주어진다[5].

$$R_{FBG} = \tanh^2(\chi \cdot L). \quad (21)$$

만약 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[10].

$$\Delta n_T = \Delta n_0 \frac{1}{(1 + A \cdot t^\alpha)}. \quad (22)$$

여기에서 Δn_0 ($= 2 \times 10^{-4}$)는 온도를 인가하기 전의 굴절률 차이이고, A ($= 1.86 \times 10^{-3} \exp(13.1 \times 10^{-3} T)$) 와 α ($= T/5250$) 는 Erdogan 모델의 power law 파라미터 이다. 따라서 온도에 의한 FBG 필터의 반사도는 식(21) 과 식(22)에 의해 다음 식으로 된다.

$$R(T) = \tanh^2 \left(\frac{\pi \Delta n_T L}{\lambda_B} \right). \quad (23)$$

FBG 필터의 FWHM 대역폭은 온도가 변화하여 굴

절률이 변화하게 되면, 그에 따라 감소하게 되며, 온도 변화에 따른 FWHM 대역폭, $\Delta\lambda(T)$ 는 다음 식에 의해 주어진다[11].

$$\Delta\lambda(T) = \frac{\lambda_B^2 [\pi^2 + (\frac{\pi \Delta n_T}{\lambda_B} L)^2]^{1/2}}{\pi n_{eff} L} \quad (24)$$

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 고찰하였다. 그림 1은 FBG 필터의 반사파장이 이동한 것을 수치 해석하여 나타낸 것이다. 상온이 25°C라고 가정할 때, 가열된 온도가 100°C에서는 약 1551.06nm로 반사파장이 1.06nm 이동하였고, 200°C에서는 약 1552.48nm, 300°C에서는 1553.90nm로 이동하여 FBG 필터에 가해진 온도가 1°C 상승할 때 파장은 약 0.014182nm 이동하였다. 따라서, FBG에 가해지는 온도에 따라 선형적으로 이동하므로 원하는 신호의 채널을 쉽게 변경 및 선택할 수 있음을 알 수 있다.

그림 2는 FBG 필터에 온도를 가하였을 때, 그에 따라 중심 파장이 이동하는 스펙트럼을 나타낸 것으로, 온도에 따라 선형적으로 중심파장이 장파장 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있으나, 이와 동시에 300°C 이후부터 중심파장의 반사도와 대역폭(선폭)이 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 3은 온도를 가하였을 때, FBG의 반사도를 나타낸 것으로, 300°C까지의 온도 상승에 대해 반사도는 감소하지 않으므로 반사중심파장의 이동에 의한 채널 변경 시 온도에 대해 안정성을 보이나, 그 이후부터 서서히 감소하여 509°C 부근에서는 반사도가 50%로 떨어짐을 알 수 있다. 또한 700°C 부근에서는 반사도가 0으로 FBG가 필터로서의 동작을 하지 못함을 알 수 있다. 그림 4는 FBG에 가해진 온도에 따른 굴절률 차의 변화를 나타낸 것으로 가해진 온도가 300°C까지는 큰 변화를 보이지 않지만 그 이상의 온도에서는 초기 굴절률 차에 비해 현저히 굴절률차가 감소하는 것을 알 수 있으며, 이것은 반사도가 감소하게 되는 요인이 된다.

FBG 필터에 가해진 온도에 따른 반사스펙트럼의

대역폭(선폭)에 대한 변화를 그림 5에 나타내었다. FBG 필터에 가해진 온도가 약 300°C 부근까지는 반사 스펙트럼의 대역폭 변화는 크지 않으나, 그 이상의 온도에서는 대역폭이 급격히 감소함을 알 수 있다.

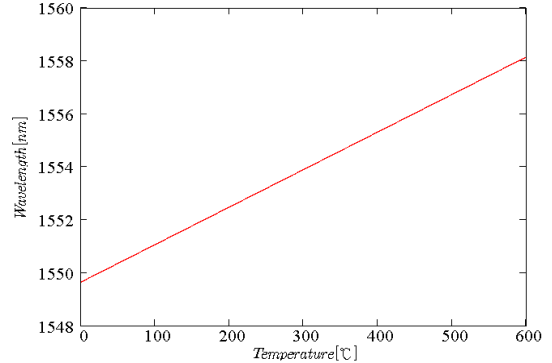


그림 1. 온도변화에 따른 FBG 필터의 반사파장의 이동

Fig. 2 Bragg Wavelength shift versus temperature

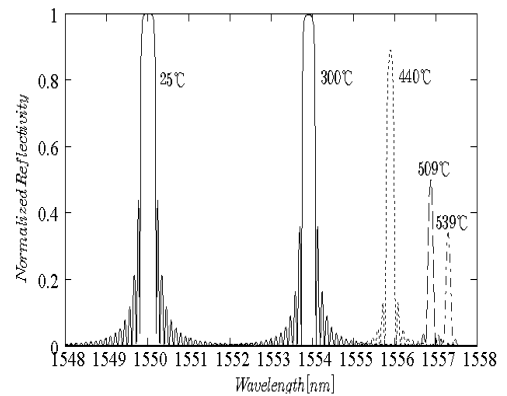


그림 2. 온도에 따른 FBG필터의 반사스펙트럼

Fig. 2 Reflection spectra of the fiber Bragg filter as a function of wavelength

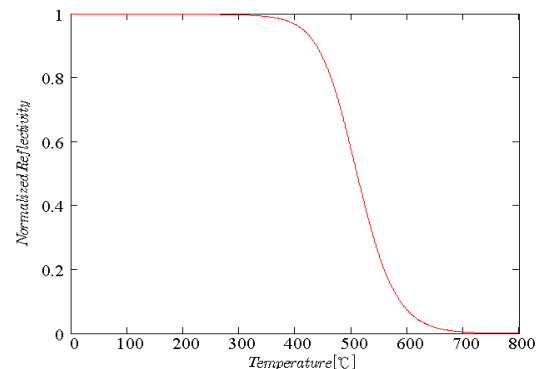


그림 3. 온도변화에 따른 FBG 필터의 반사도의 변화

Fig. 3 Reflectivity of FBG filter versus temperature

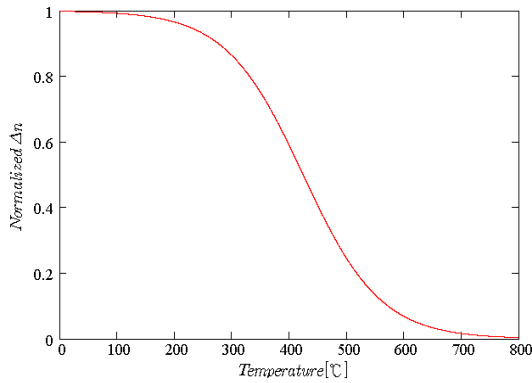


그림 4. 온도변화에 따른 FBG 필터의 굴절률차 변화
Fig. 4 Refractive index change of FBG filter versus temperature

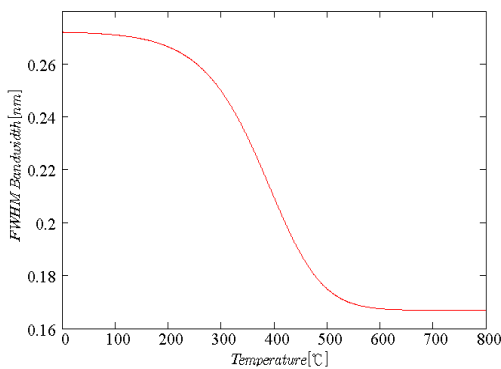


그림 5. 온도변화에 따른 FBG 필터의 반사스펙트럼 대역폭의 변화
Fig. 5 Bandwidth of FWHM reflection spectrum versus temperature

V. 결론

본 논문에서는 WDM 전광 광통신 시스템에서 필수적인 소자인 FBG 필터의 특성과 송수신 신호채널의 변경을 위한 반사중심파장을 이동시키기 위해 온도를 직접 인가하는 방법을 이용하였을 때, 그에 대한 온도 특성을 수치해석을 통해 고찰하였다. 수치해석에 의한 결과로서, 온도에 따라 선형적으로 반사중심파장이 이동하여 온도변화에 의해 원하는 신호의 파장을 선택적으로 결합 및 분기할 수 있음을 알 수 있으나, 또한 온도가 상승할수록 반사중심파장의 반사도, 굴절률차 그리고 대역폭(선폭)이 감소하는 결과를 얻을 수 있다. 따라서 온도에 따른 영향을 고려해야 함을 알 수 있다. 결국, 채널변경을 위한 온도를 이용하는 방법으로서의 반사중심파장의 이동은 300°C 까지는 온도에 대한 안정성을 보이며, 만약 광 전력의 제한이 3dB 라고 가정하면 509°C 부근 까지 비교적 안정적으로 반사

중심파장을 이동시킬 수 있을 것으로 사료되며, 600°C 이상의 온도에서는 필터로서의 기능을 안정적으로 할 수 없음을 알 수 있다. 이에 본 논문에서 얻어진 결과들은 채널가변 형 FBG 필터의 설계 시 유용한 설계데이터로 적용될 수 있으며, 광파이버를 이용한 광센서 등의 분야에도 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 조성선, 광통신부품 기술 및 시장동향, 주간기술동향통권 1093호, 한국전자통신연구원, 2003.
- [2] M. Mahmoud, Z. Ghassemlooy, "Tunable Fiber Gratings Modeling and Simulation", Proceedings of the 36th Annual Simulation Symposium(ANSS' 2003)
- [3] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson and B. S. Kawasaki, Appl. Phys. Lett., 62, 1035, 1993.
- [4] M. Born and E. Wolf, *Principle of Optics*, New York, Pergamon, sec. 8. 6. 1, 1987.
- [5] Andreas Othonos, Kyriacos Kalli, "Fiber Bragg Gratings Fundamentals and Application in Telecommunication and Sensing", 2001-ISBN 0-89006-344-3.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Govind P. Agrawal and N. K. Dutta, *Semiconductor Lasers*, New York, Van Nostrand Reinhold, 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] 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, 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.