음파에 의한 광섬유 브래그 격자 변조를 이용한 좁은 선폭의 파장가변 광학필터

Tunable Narrow-Bandwidth Optical Filter Based on Acoustically Modulated Fiber Bragg Grating

염동일, 박희수, 김병윤
한국과학기술원 물리학과
yuha@kaist.ac.kr

광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating, FBG)는 좁은 선폭과 적은 삽입손실 등의 뛰어난 스펙트럼 특성을 가지고 있어, 고밀도 파장분할 다중화 방식을 이용한 광통신 시스템과 여러 종류의 광섬유 센서에 응용되고 있다. 브래그 격자의 광학적 스펙트럼을 능동적으로 조절하기 위하여, 광섬유에 열이나 스트레인을 인가하거나[1,2], 음파와 빛의 결합을 이용한[3] 방법이 제안되었으며, 특히 음향 광학 브래그 격자 변조기(Acousto-Optic Superlattice Modulator)[3]는 종 방향 음파(Longitudinal Acoustic Wave)를 이용하여 파장과 크기의 조절이 가능한 사이드 밴드(Side Band)를 생성해 내었다.

본 연구에서 우리는 횡 방향 음파(Flexural Acoustic Wave)를 이용하여 광섬유 브래그 격자를 변조시킴으로써, 파장과 크기 조절이 가능한 좁은 선폭의 사이드 밴드를 생성하는 광학필터를 제안하였다. 이전에 제안된 소자와 비교하여[4], 본 연구에서 제안된 소자는 작은 파워의 소모로 동작 하며, 반사되는 빛뿐만 아니라, 투과되는 빛을 이용할 수 있다는 장점을 가진다.

그림. 1은 횡 방향 음파를 이용한 광섬유 브래그 격자의 변조를 보여준다. 광섬유를 진행하는 음파는 광섬유 축을 따라 주기적인 구부림을 인가하며, 그림. 1과 같이 브래그 격자가 새겨진 코어가 광섬유의 중심축에서 벗어나 있다면, 브래그 격자는 음파에 의하여 횡방향의 스트레인 변조를 겪게 된다. 이에 따른 브래그 격자의 굴절률 분포는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$n(z) = \Delta n_B \cos[\int \frac{2\pi}{\Lambda(z)} dz] \cong \Delta n_B \cos[k_B z - \alpha \cdot \cos(k_s z + \Omega t)]$$

$$= \Delta n_B J_0(\alpha) \cdot \cos(k_B z) + \Delta n_B \sum_{n=1} (-1)^n J_n(\alpha)[\cos(k_B z + nk_s z + \frac{n}{2}\pi) + \cos(k_B z - nk_s z + \frac{n}{2}\pi)] \quad (1)$$

여기서 Δn_B, k_B는 본래 브래그 격자의 변조세기와 파동벡터의 크기를 나타내며,Δ 는 종 방향의 음파진폭, $\alpha = k_B \cdot \Delta$ 이고, Ω는 음파의 주파수이며, J_n은 n번째 베셀함수(Bessel function)를 나타낸다. 식(1)에서 첫 번째 성분은 중심파장 $\lambda_0 = 2\Lambda_B n_{eff}$ 에 위치한, 본래 브래그 격자의 주기와 관계있는 성분이며, 나머지 항들은 중심파장 $\lambda_n = 2\Lambda_B(1 \pm n\frac{\Lambda_B}{\Lambda_S}) n_{eff}$ (n=1,2,3...)에 위치한 사이드 밴드와 관계있는 성분이다. 여기서, Λ_B, Λ_s는 본래 브래그 격자와 음파의 주기이며, n_{eff}는 진행하는 빛 모드의 유효굴절률이다. 위 식에서 각 사이드 밴드의 크기는 α와 Δn_B에 비례하므로, 주어진 브래그 격자에서 사이드 밴드의 크기는 오직 음파의 종 방향 진폭에 비례하게 된다.

그림. 1에서 보듯이, 횡 방향 음파로 브래그 격자를 변조하기 위하여, 코어가 중심축에서 벗어나 있는 광섬유를 제작하여야 한다. 이를 위해 우리는 단일모드 광섬유의 측면을 연마한 이후, 불산 용액을 이용하여 식각하였다. 위와 같은 제작 과정을 거쳐서 그림. 2에서 보는 바와 같이 D 모양의 단면을 갖는 광섬유를 제작하였으며, 이 광섬유의 단면적은 이론적으로 계산한, 코어에서의 음파 진폭이 최대값을 갖는 광섬유의 단면적과 같게 설계되었다.

이와 같이 코어가 중심축에서 벗어나 있는 광섬유에 길이 20 mm, 중심파장에서 -74 dB의 투과세기를 갖는 브래그 격자 새긴 후, 횡 방향 음파를 인가하였다. 그림. 3은 걸어준 음파의 주파수에 따른 빛의 투과, 반사 스펙트럼을 보여주고 있다. 0.13 MHz, 0.50 MHz, 0.73 MHz의 주파수를 인가하였을 때, 본래 브래그 격자의 중심파장으로부터 0.60 nm, 1.08 nm, 1.30 nm 떨어져 있는 곳에 사이드 밴드가 발생함을 관찰 할 수 있었고, 이는 이론적으로 계산한 값과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 한편, 이러한 사이드 밴드의 크기는 음파의 주파수가 증가함에 따라 감소하는 것을 관찰 하였는데, 이는 광섬유에 음파를 걸어준 음향 트랜스듀서(Acoustic Transducer)의 대역폭 한계에 기인한 것이다.

참고문헌

1. G. A. Ball and W. W. Morey, "Tunable Bragg grating fiber filters and their applications," in *Proc. CLEO'97,* Baltimore, MD (1997), pp. 108-109.
2. G. A. Ball and W. W. Morey, "Compression-tuned single-frequency Bragg grating fiber laser," *Opt. Lett.*, vol. 19, pp. 1979-1981 (1994).
3. W. F. Liu, P. St. J. Russell, and L. Dong, "Acousto-optic superlattice modulator using a fiber Bragg grating," *Opt. Lett.*, vol. 22, pp. 1515-1517 (1997).
4. W. F. Liu, P St. J. Russell, and L. Dong, "100% efficient narrow-band acoustooptic tunable reflector using fiber Bragg grating," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 16, pp. 2006-2009 (1998).

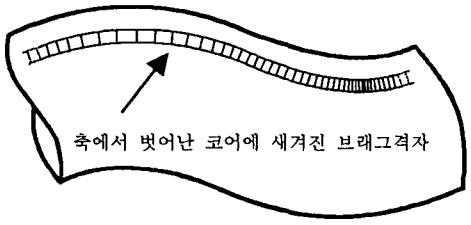

그림 1. 횡 방향 음파에 의한 브래그 격자의 변조

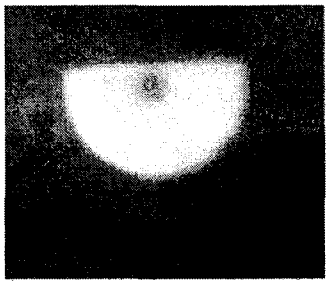

그림 2. 중심 축에서 벗어난 코어를 갖는 D 모양 단면의 광섬유

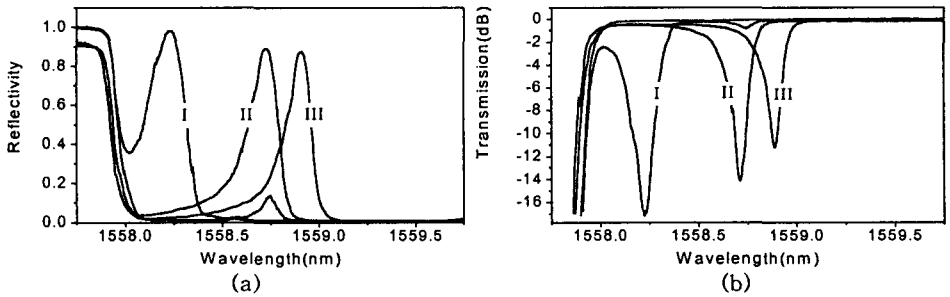

그림 3. 다양한 음파 주파수 I:0.13 MHz, II: 0.5 MHz, III: 0.73 MHz 에 따른 (a) 반사 (b) 투과 스펙트럼