

## 광섬유 센서 구성을 위한 보론 첨가에 따른 장주기 광섬유 격자의 구부림 특성 변화

### Bending Characteristics Change of Long-Period Fiber Grating due to Co-doping of Boron for Optical Fiber Sensors

문대승\*, 정영주\*<sup>†</sup>

Dae Seung Moon\* and Youngjoo Chung\*<sup>†</sup>

**초 록** 광섬유 센서 구성을 위한 장주기 광섬유 격자(Long-Period Fiber Grating, LPFG)는 코어 모드로 진행하는 빛이 위상 정합 조건(Phase Matching Condition)에 의해 특정 파장에서 클래딩 모드와 커플링이 일어나는 광소자이다. 공진 파장과 커플링의 세기는 온도, 스트레인, 주변 굴절 지수 등에 의해 민감하게 변화하는 특성을 이용하여 광섬유 센서에 넓게 응용될 수 있다. 일반적으로 광섬유 격자는 광섬유 코어를 자외선에 노출시킴으로써 굴절률의 주기적인 변화가 유도되는 원리, 즉 광민감성(Photosensitivity)에 기초를 두고 있으며 광민감성을 가진 격자 제조용 광섬유 제작은 광섬유 격자 연구에 대단히 중요한 부분이다. 이 논문에서는 보론 첨가의 양에 의한 코어와 클래딩의 굴절률 차 변화와 그것에 따른 장주기 광섬유 격자의 온도 및 구부림 특성 변화를 분석하였다. 보론의 양이 증가할수록 코어와 클래딩의 굴절률 차가 줄어드는 것( $1.69 \times 10^{-4}/\text{SCCM}$ )을 실험을 통해 알 수 있었고, 그로 인해 보론의 음의 온도 의존성으로 인해 장주기 광섬유 격자의 온도 의존성이 억제됨( $0.01145 \text{ nm}/^\circ\text{C}/\text{SCCM}$ )을 확인할 수 있었다. 또한, 보론의 증가로 인해 코어와 클래딩의 굴절률차가 줄어들수록 장주기 광섬유 격자는 구부림에 더 민감함을 알 수 있었다.

**주요용어:** 광섬유 센서, 장주기 광섬유 격자, 온도, 구부림, 광민감성

**Abstract** In long-period fiber grating (LPFG) to be made up optical fiber sensors, resonance coupling occurs between the forward-propagating core mode and cladding modes at the wavelengths that satisfy the phase matching condition. The resonance wavelength and the coupling strength depends strongly on the external environment like temperature, strain, and ambient index. These characteristics can be utilized for various applications as optical fiber sensors. Fabrication of optical fiber gratings is typically based on the photosensitivity effect, i.e. the permanent change of the refractive index upon irradiation of the UV beam, and therefore, fabrication of the optical fiber with high photosensitivity is an important part of the research on optical fiber gratings. In this work, we measured the effect of co-doping of boron on the index difference between the core and cladding of the optical fiber and the sensitivity of the LPFG to the temperature and bending changes. We observed that the index difference between the core and the cladding decreased by  $1.69 \times 10^{-4}/\text{SCCM}$  and the temperature sensitivity of the resonance wavelength shift decreased by  $0.01145 \text{ nm}/^\circ\text{C}/\text{SCCM}$ . The dependence of the bending-induced changes of the transmission characteristics of LPFG on the core-cladding index difference was investigated experimentally. The measurement results indicate that the bending sensitivity increases as the index difference decreases.

**Keywords:** optical fiber sensor, long-period fiber grating, temperature, bending, photosensitivity

## 1. 서 론

힐(Hill)이 단주기 광섬유 격자 (fiber Bragg grating)를 발명한 이래로[1], 광섬유 격자는 광필터, 광섬유 레이저, 광섬유 센서 등과 같은 다양한 분야에 많은 관심을 불러 일으켜 왔다. 광섬유 격자는 굴절률 변화의 주기의 크기에 따라 단주기 격자와 장주기 격자의 두 가지 종류로 나누어진다. 단주기 격자는 수백 nm의 짧은 격자 주기로 인하여 코어 모드를 반대로 진행하는 코어 모드로 결합시키는 격자를 말한다. 단주기 격자에 비하여 장주기 격자는 그 주기가 수백  $\mu\text{m}$ 로 크며, 단주기 격자가 코어 모드간의 커플링인 반면, 장주기 격자는 코어 모드와 클래딩 모드간의 커플링으로 단주기 격자와는 달리 반사 스펙트럼에는 아무런 빛이 나오지 않는 특성을 가지고 있다. 단주기 격자가 위상 마스크 (phase mask)를 사용하여 제작하는 것과는 달리, 장주기 격자는 그 격자 간격이 넓어 주로 진폭 마스크 (amplitude mask)를 이용하여 제작한다. 또한, 같은 길이의 격자를 비교해 볼 때 장주기 격자를 구성하는 각각의 격자의 수가 단주기 격자에 비하여 현저히 작기 때문에 손실 밴드의 폭이 수십 nm 정도로 커지게 된다. 장주기 격자의 경우 중요한 응용 분야는 어븀 첨가 광섬유 증폭기와 같은 광증폭기의 이득 평탄화를 들 수 있는데 이는 WDM 전송에 있어서 필수 불가결한 소자로 인식되고 있다. 두개 이상의 장주기 격자를 일렬로 연결한 장주기 격자쌍, 직렬 장주기 격자 등은 높은 해상도를 가지며 다채널 필터로서 다파장 광섬유 레이저, 광센서 등에 응용 되고 있다. 광센서에의 응용으로는 온도/스트레인 센서, 구조물 변형 센서 등을 들 수 있다[2].

광섬유 격자는 일반적으로 광섬유 코어를 자외선에 노출시킴으로써 굴절률의 주기적인 변화가 유도되는 원리, 즉 광민감성 (photosensitivity)에 기초를 두고 있으며 이는 도핑된 Ge.으로부터 야기된 defect의 영향으로 주로 해석되어지며, 광민감성을 가진 격자 제조용 광섬유 제작은 광섬유 격자연구에 대단히 중요한 부분이다. 광민감성에 영향을 주는 재료로는 germanium 이외에도 boron, nitrogen, tin 등이 있다. 특히, 보론은 온도가 증가함에 따라서 물질의 온도 의존성을 감소시키는 역할을 하는 특성을 갖고 있기 때문에 광민감성 뿐만 아니라 장주기 격자의 온도 민감성 억제에 관한 연구에 많이

이용되어져 왔다[3,4]. 일반적으로 광섬유의 광민감성을 증가시키기 위해 MCVD (modified chemical vapor deposition) 공정에서 코어 부분에 Ge-B을 함께 도핑시키는 방법이 많이 사용된다[5]. 본 논문에서는 광섬유 센서 구성을 위한 보론 첨가의 양에 의한 코어와 클래딩의 굴절률 차 변화와 그것에 따른 광섬유 격자 (long-period fiber grating)의 온도 및 구부림 특성 변화에 대해 연구하였다.

## 2. 실험 및 결과

보론의 영향을 분석하기 위해 동일한 MCVD (Ge 양, 보론 가열 온도 등) 공정 및 광섬유 인출 조건에서 보론의 양만 다른 광섬유가 제작되었다. Fig. 1은 보론 양에 의한 코어와 클래딩의 굴절률 차를 나타내는 그래프이다. 실험을 위해 보론의 양이 30, 35, 40, 65 SCCM 으로 각기 다른 네 종류의 광섬유 모재를 제작하였다[6,7]. Fig. 1에서 보듯이 보론은 광섬유 코어의 굴절률을 감소시키는 역할을 한다는 것을 확인하였고, Fig. 1의 fitting된 값으로부터  $\Delta n = 0.01593 - 1.68966 \times 10^{-4}x$  ( $x$ : 보론의 양)의 관계를 얻을 수 있었으며 보론 1 SCCM당 코어와 클래딩의 굴절률의 차가  $1.69 \times 10^{-4} (\pm 6 \times 10^{-6})$  감소하는 것을 알 수 있다.

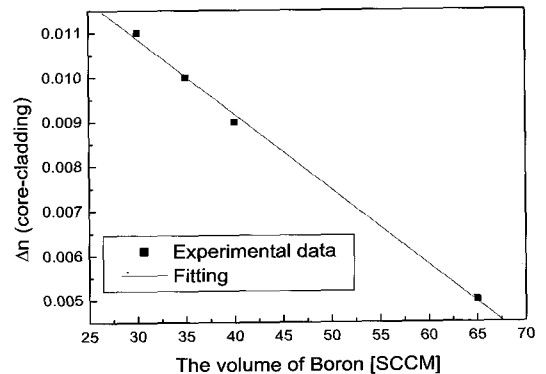


Fig. 1 The refractive index variation between core and cladding versus the volume of Boron

게르마늄 (germanium)은 양의 온도 의존성 ( $dn/dT > 0$ )을 갖는 반면, 보론은 음의 온도 의존성 ( $dn/dT < 0$ )을 갖는 특성을 가지고 있다[8,9]. 그러므로 MCVD 과정에서 코어 부분에 보론을 도핑시킴으로써 LPFG의 온도 의존성을 억제할 수 있다.

LPFG는 KrF 엑시머 레이저와 진폭 마스크 (amplitude mask)를 사용하여 수소 처리 없이 제작하였고, 0 °C에서 190 °C 까지 온도를 변화하며 측정하였다. KrF 엑시머 레이저의 펄스당 에너지는 140 mJ이었고, 펄스 반복률은 10 Hz, LPFG의 주기와 길이는 각각 500  $\mu\text{m}$ , 2 cm 였다. Fig. 2는 보론의 양에 의한 LPFG의 공진파장의 변화율을 나타낸 그래프인데, 보론에 의해 공진파장의 변화가 음인 것을 알 수 있으며, LPFG 공진파장 변화율과 보론의 양의 관계  $d\lambda_{res}/dT = 0.23155 - 0.01145x$ 를 얻었다. 이 관계식으로부터 보론 1 SCCM당 LPFG의 공진파장 변화율이 0.01145 ( $\pm 0.00146$ ) nm/°C 감소하는 것을 알 수 있다.

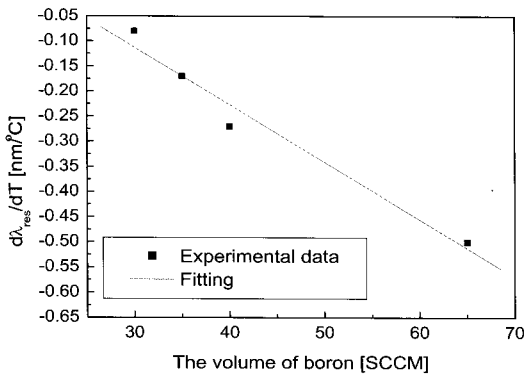


Fig. 2 The temperature variation rate of resonance wavelength of LPFG versus the volume of boron

Fig. 3은 LPFG의 구부림 특성을 측정하기 위한 실험도이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이, 두개의 스테이지 중앙에 2 cm의 LPFG가 새겨진 30 cm 길이의

광섬유를 양쪽에 고정시켜 놓고, 축 방향의 스트레인이 인가되지 않도록 주의하여 스테이지 중의 하나를 이동시키면서 LPFG의 구부림 특성을 측정하였다. 스테이지 이동 거리에 의한 곡률 반경은 4포인트 벤딩 시스템을 적용하였는데[10], 2 mm와 4 mm 이동했을 경우 곡률은 각각 4.21  $\text{m}^{-1}$ , 5.96  $\text{m}^{-1}$ 였다.

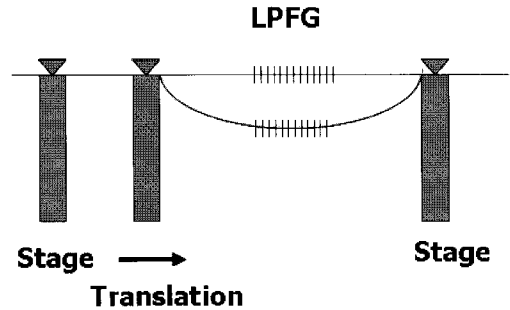


Fig. 3 The schematic of bending measurement of LPFG

Fig. 4는 코어와 클래딩의 굴절률 차가 다른 광섬유들의 곡률에 의한 LPFG의 투과 스펙트럼의 변화를 나타낸 그림이다. 일반적으로, LPFG는 코어 모드로 진행하는 빛이 위상 정합 조건(Phase Matching Condition)에 의해 특정 파장들에서 여러 클래딩 모드와 커플링이 일어나는데, 커플링된 각기 다른 클래딩 모드들은 온도, 스트레인 등 주변 환경에 각각 다른 민감성을 보인다. 따라서 코어와 클래딩의 굴절률차가 각기 다른 광섬유들의 곡률에 의한 공진 파장의 변화를 비교하기 위해, 각 LPFG의 LP<sub>04</sub> 모드 (코어 모드와 커플링 하는 네 번째 클래딩 모드)의 공진 파장 변화를 측정하였다. Fig. 4로부터 굴절률차가 0.011인 경우, 곡률이 4.21  $\text{m}^{-1}$ ,

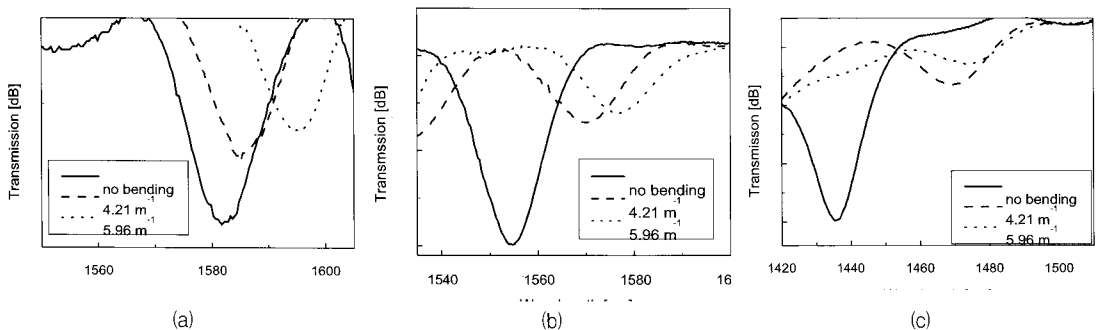


Fig. 4 The resonance wavelength variation of LPFG versus the bending. The core-cladding index difference was (a) 0.011, (b) 0.009, (c) 0.007

5.96  $\mu\text{m}^3$ 일때, LPFG의 공진 파장의 변화는 각각 3.4 nm, 12.8 nm 였으며, 굴절률차가 0.009일 경우의 공진파장 변화는 각각 16.4 nm, 23.2 nm 였다. 또한, 굴절률차가 0.007일 경우에 각각 34.8 nm, 42 nm로 구부림에 의한 공진 파장의 변화가 가장 컸다.

위의 결과로부터, 굴절률차가 작은 LPFG의 경우 구부림에 더 민감하며 이는 보론이 굴절률을 낮춰 준다는 사실을 이용하여 [11], MCVD 코어 증착 과정에서 보론의 양을 더 많이 도핑하여, 코어와 클래딩 사이의 굴절률 차를 줄여 줌으로써 구부림에 더욱 민감한 LPFG를 제작할 수 있다는 것을 확인하였다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 광섬유 센서에 사용하기 위한 Ge-B이 도핑된 광섬유 내에서 장주기 광섬유 격자를 이용하여 보론의 영향을 알아보았다. 보론이 코어와 클래딩의 굴절률 차를 줄여 주는 역할을 한다는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었고, LPFG의 온도 특성을 억제하는 것을 알 수 있었다. 또한, 코어와 클래딩의 굴절률차가 다른 LPFG의 구부림 특성에 대한 연구를 통해, 굴절률차가 작은 LPFG의 경우가 구부림에 더 민감하다는 것을 알 수 있었다. 위의 결과들을 이용한다면, LPFG를 기반으로 하는 온도나 구부림 센서 등 여러 분야의 응용에 많은 도움이 될 것이다.

### 후 기

위 연구는 BK-21 사업의 일부 지원에 의하여 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] K. O. Hill, et al., "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 32, No. 10, pp. 647-649, (1978)
- [2] 정영주, 박현수, 오승태, 송종섭, "광섬유 격자 기술 동향," *광기술동향 통권1호*, pp. 10-20, (2003)
- [3] K. Shima, et al., "A novel temperature-insensitive long period fiber grating using a boron-codoped germanosilicate core fiber," *OFC97, Paper FBs*, pp. 347-348, (1997)
- [4] Y. G. Han et al., "Temperature sensitivity control and mechanical stress effect of boron-doped long-period fiber gratings," *Fiber & Int. Opt.*, Vol. 20, No. 6, pp. 591-600, (2001)
- [5] D. L. Williams, et al., "Enhanced UV photosensitivity in boron codoped germanosilicate fibres," *Electron. Lett.*, Vol. 29, No. 1, pp. 45-47, (1993)
- [6] 문대승, 황성인, 한영근, 김복현, 한원택, 백운출, 정영주, "게르마늄과 보론이 첨가된 광섬유에서의 보론 도핑 조건의 영향", *광전자학술대회*, paper FB3-3, pp. 707-708, (2003)
- [7] D. S. Moon, et al., "Experimental Analysis of Boron Co-doping Effect on Transmission Characteristics of Fiber Gratings," *OECC 2004*, paper 13P-90, pp. 290-291, (2004)
- [8] K. Shima, et al., "A novel temperature-insensitive long period fiber grating using a boron-codoped germanosilicate core fiber," *OFC 97*, paper FB2, pp. 347-348, (1997)
- [9] G. Yandong, et al., "Novel B/Ge codoped photosensitive fiber and dispersion compensation in an 8×10 Gbit/s DWDM system," *Opt. & Laser Technol.*, Vol. 32, No. 1, pp. 23-31, (2000)
- [10] Y. Liu, et al., "Optical Bend Sensor Based on Measurement of Resonance Mode Splitting of Long-Period Fiber Grating," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 12, No. 5, pp. 531-533, (2000)
- [11] 문대승, 황성인, 한영근, 한원택, 백운출, 정영주, "보론 첨가에 의한 광민감성 및 장주기 광섬유 격자 특성 변화의 실험적 분석", *Photonics Conference*, paper FP15, pp. 533-534, (2003)