

## 파이버 브래그 격자를 이용한 곡률 측정

정진호<sup>1\*</sup>, 이종윤<sup>1</sup>

### Curvature Measurement Using Fiber Bragg Gratings

Jin-Ho Jung<sup>1\*</sup> and Jong-Youn Lee<sup>1</sup>

**요약** 본 논문에서는 곡률을 측정하기 위해 파이버 브래그 격자를 이용한 곡률 센서에 대해 연구하고자 한다. 곡률의 변화를 측정하기 위해 브래그 공진파장의 이동 변화를 측정하였다. 실험결과로부터 곡률이  $0 \text{ m}^{-1}$ 에서  $10 \text{ m}^{-1}$ 까지 증가함에 따라 반사 스펙트럼은 감소하나, 브래그 공진 파장의 변화량은 선형적으로 증가함을 알 수 있었으며, 기울기는 대략  $8.8 \text{ pm/m}^{-1}$  이었다. 한편, 반사 스펙트럼은 곡률이 증가함에 따라 감소하였다.

**Abstract** To measure the curvature, in this paper, we investigate an optical curvature sensor based on the fiber Bragg gratings. We observed the variation of the Bragg resonant wavelength shift to measure the curvature change. From the experimental results, we knew that the Bragg resonant wavelength shift was linearly increased with the increase of the curvature from  $0 \text{ m}^{-1}$  to  $10 \text{ m}^{-1}$ . It's slope is about  $8.8 \text{ pm/m}^{-1}$ . On the other hand, the spectral reflection decreased with the increase of the curvature.

**Key Words** : Curvature, FBG

### 1. 서론

최근 파이버 브래그 격자는 통신과 센서 응용분야에서 중요한 광 수동소자로 사용되고 있다[1]. 특히, 파이버 브래그 격자(FBG) 센서를 이용하여 온도, 스트레인, 압력, 습도 등 다양한 측정분야에서 광범위하게 연구 발표되고 있다[2]. 이에 본 논문에서는 광센서 기술 개발의 일환으로 파이버 브래그 격자를 이용한 곡률 센서에 대해 연구 고찰하고자 한다. 이를 위해 곡률 변화에 따른 파이버 격자의 공진 파장 변화에 대해 이론적으로 고찰하고, 곡률 변화에 따른 파이버 브래그 격자의 공진파장의 변화를 실험적으로 측정하여 그 결과에 대해 검토하고자 한다.

### 2. FBG 곡률 센서

파이버 브래그 격자는 광파이버의 코어에 자외선 영역

의 엑시머 레이저(Kr 또는 ArF excimer Laser)를 조사하여 광파이버 코어의 굴절률을 주기적으로 변화시킴으로써 영구적으로 특정 파장만을 반사시킬 수 있는 특성을 갖는 광 수동소자이다[3]. 이때 파이버 브래그 격자의 반사 파장은 광파이버 내로 전파하는 광파의 에너지 및 모멘트 보존법칙을 만족하는 브래그(Bragg) 조건에 의해 결정된다. 그림 1로부터 진행파와 반사파에 대한 에너지 보존법칙은 다음 식으로 표현된다.

$$h\nu_i = h\nu_r \quad (1)$$

여기서,  $h$ 는 Planck 상수이고,  $\nu_i$ ,  $\nu_r$ 은 각각 진행파와 반사파의 주파수이다. 식 (1)을 만족하기 위해서는 진행파의 주파수( $\nu_i$ )와 반사파의 주파수( $\nu_r$ )가 같아야 한다. 또한, 모멘트 보존법칙을 만족하기 위해서는 그림 1로부터 다음 식이 성립되어야 한다.

이 논문은 2007년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임. (20070232)

<sup>1</sup>호서대학교 전자공학과  
접수일 08년 4월 24일

수정일 08년 7월 16일

\*교신저자: 정진호(jhjung@hoseo.edu)  
게재확정일 08년 8월 11일

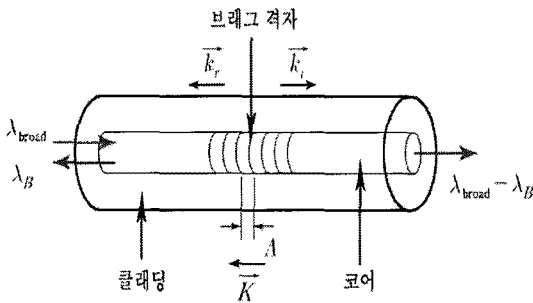
$$\vec{k}_i + \vec{K} = \vec{k}_r \quad (2)$$

여기서,  $\vec{k}_i$ 는 진행파의 파 벡터,  $\vec{K}$ 는 격자에서의 파 벡터, 그리고  $\vec{k}_r$ 는 반사파의 파 벡터이다. 그림 1로부터 진행파의 파 벡터와 반사파의 파 벡터는 크기는 같고, 방향만 반대이므로 식 (2)는 다음 식으로 된다.

$$2\left(\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B}\right) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (3)$$

여기서,  $\lambda_B$ 는 브래그 반사 파장이며,  $\Lambda$ 는 파이버 브래그 격자의 격자 주기,  $n_{eff}$ 는 광파이버 코어의 유효굴절률이다. 따라서 식 (3)으로부터 파이버 브래그 격자의 브래그 반사 파장은 다음 식으로 구해진다[4].

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



[그림 1] 파이버 브래그 격자

여러 파장의 광신호가 파이버 브래그 격자에 입사되면 파이버 브래그 격자 특성에 의해 식 (1)을 만족하는 브래그 반사 파장( $\lambda_B$ )과 일치하는 광 신호는 파이버 브래그 격자에 의해 반사되고, 다른 파장을 갖는 광 신호들은 통과된다. 이러한 원리에 의해 파이버 브래그 격자는 특정 파장( $\lambda_B$ )만을 차단 또는 통과시키는 광 파장 필터로 사용할 수 있다.

그러나 이러한 파이버 브래그 격자에 온도, 스트레인, 압력 등의 외부적 환경변화에 의한 물리적 에너지가 인가되면, 그로 인해 파이버 브래그 격자의 격자 주기와 유효굴절률이 변화하게 되어 브래그 반사 파장이 변경될 수 있다[5]. 만약 외부의 물리적인 변화로 인해 광파이버의 길이가 변한다면, 파이버 브래그 격자가 새겨진 부분의 길이가 변하게 되어 격자의 간격 및 유효 굴절률이 변

하게 되므로 식 (4)의 브래그 반사 파장이 변하게 된다. 이와 같이 길이 변화로 인한 브래그 반사 파장의 변화는 식 (4)로부터 다음 식으로 표현된다[3-4, 6].

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_B &= 2 \left( n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial L} + \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial L} \right) \Delta L \\ &= 2 n_{eff} \Lambda \left( \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial L} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial L} \right) \Delta L \\ &= \lambda_B \left( \frac{\partial \Lambda}{\Lambda} + \frac{\partial n_{eff}}{n_{eff}} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 축 방향 스트레인 변화와, 유효굴절률 변화는 각각 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{\Delta \Lambda}{\Lambda} = \frac{\Delta L}{L} \equiv S_{11} \equiv \epsilon \quad (6)$$

$$\frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} = \frac{\pm n_{eff}^2 [(p_{11} + p_{12}) S_{12} + p_{12} S_{11}]}{2} \quad (7)$$

식 (7)의 부호(±)는 스트레인에 의해 길이가 늘어나면  $n_{eff}$ 가 감소하므로 (-)이고, 길이가 감소하면  $n_{eff}$ 가 증가하므로 (+)부호를 가진다.  $p_{11}$ ,  $p_{12}$ 는 pockel 계수이다. 그리고 poisson 비는  $\mu \equiv -\frac{S_{12}}{S_{11}}$  이므로 식 (7)은 다음 식으로 된다.

$$\frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} = \frac{\pm n_{eff}^2 [(1 - \mu) p_{12} - \mu p_{11}]}{2} S_{11} \quad (8)$$

외부 에너지에 의해 길이가 늘어나면 식 (5)의 브래그 파장 변화는 식 (6)과 (8)을 식 (5)에 대입함으로써 다음 식으로 된다.

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_B &= \lambda_B \left( 1 - \frac{n_{eff}^2 [(1 - \mu) p_{12} - \mu p_{11}]}{2} \right) S_{11} \\ &= \lambda_B (1 - \rho_e) \epsilon \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,  $\rho_e = \frac{n_{eff}^2 [(1 - \mu) p_{12} - \mu p_{11}]}{2}$ 는 광

파이버의 광탄성계수이다.

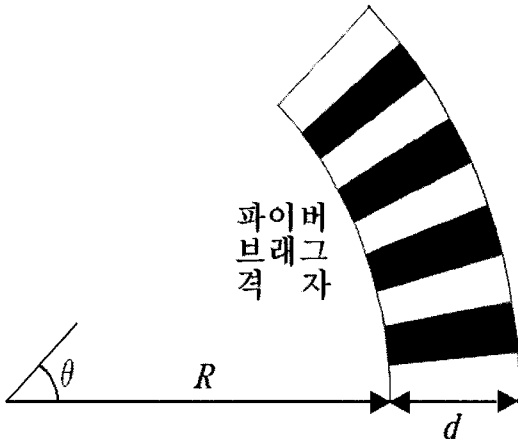
만약 파이버 브래그 격자가 외부의 영향으로 인해 그림 2와 같이 휘어지게 되면, 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\theta \approx \frac{L_1}{R+d} \quad (10)$$

$$\theta \approx \frac{L_2}{R} \quad (11)$$

여기서,  $\theta$ 는 원의 중심각,  $R$ 은 원의 반경,  $d$ 는 두 중심원의 반경 차이이고,  $L_1$ ,  $L_2$ 는 각각 외원과 내원의 원호이다. 식 (10)과 (11)로부터 다음 식이 얻어진다.

$$\frac{L_1}{R+d} = \frac{L_2}{R} \quad (12)$$



[그림 2] 구부러진 파이버 브래그 격자

이때, 파이버 브래그 격자의 내측 길이  $L_2$ 와 외측 길이  $L_1$ 은 외측이 내측보다 더 늘어나므로 다음 식과 같은 관계를 가진다.

$$L_1 = L_2 + \Delta L \quad (13)$$

식 (13)을 식 (12)에 대입하면 다음 식이 얻어진다.

$$(L_2 + \Delta L)R = L_2(R+d) \quad (14)$$

식 (14)로부터 늘어난 스트레인의 차  $\Delta\epsilon$ 은 다음 식으로 된다[7].

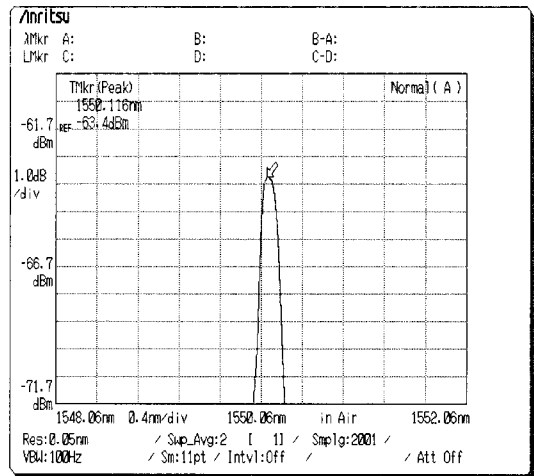
$$\Delta\epsilon \equiv \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{\Delta L}{L_2} = \frac{d}{R} \quad (15)$$

따라서 식 (9)로부터 곡률반경  $R$ 로 구부러진 파이버 브래그 격자의 이동 파장은 다음 식으로 구해진다[8].

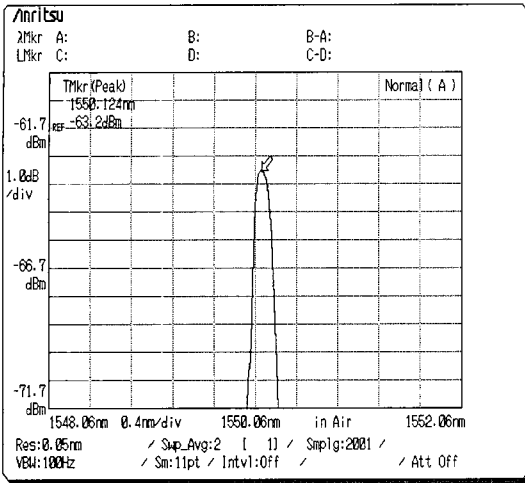
$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= \lambda_1 - \lambda_2 = \lambda_B(1 - \rho_\alpha)\Delta\epsilon \\ &\approx \lambda_B(1 - \rho_\alpha)\frac{d}{R} \end{aligned} \quad (16)$$

### 3. 곡률측정실험 및 결과

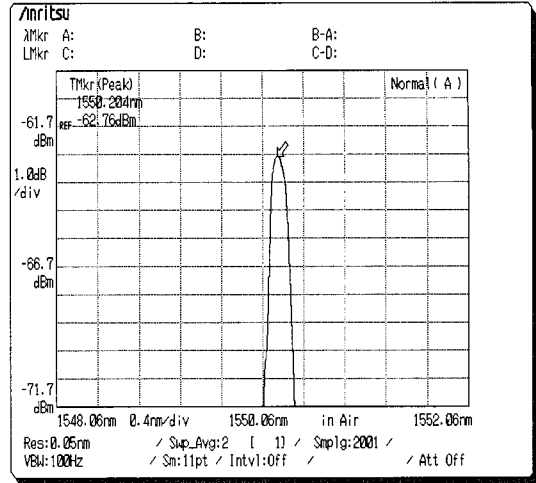
본 논문에서는 파이버 브래그 격자를 이용하여 곡률 측정을 하였으며, 실험을 위해 광원으로 BBS-1550+1EP 광대역 광원을 사용하였고, 광원으로부터 나온 광은 2 × 1 광 결합기로 분기되고 원통시료에 감겨진 파이버 브래그 격자에서 반사되어 다시 광 결합기를 통해 광 스펙트럼 분석기(Anritsu 사 MS9710C)로 반사 광 스펙트럼을 측정하였다. 이때, 사용된 원통시료의 반경은 0.1 m, 0.2 m, 0.4 m, 1 m, 그리고 ∞이며, 곡률 변화에 따라 광 스펙트럼 분석기로 여러 번 반복해서 측정하였으며, 파이버 브래그 격자의 반사 스펙트럼을 그림 3에 나타내었다.



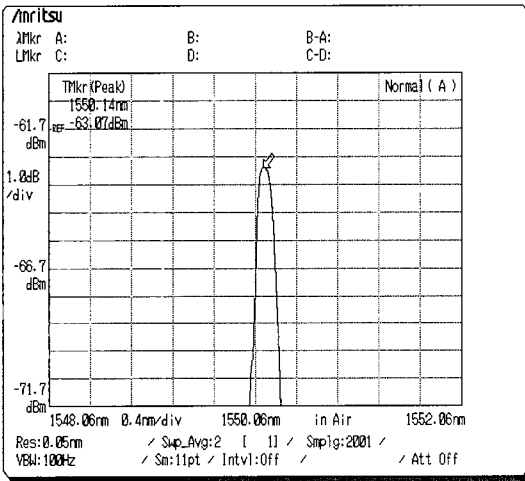
a)



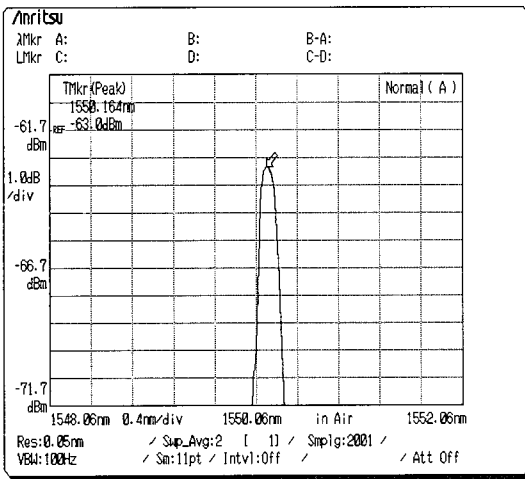
b)



c)



c)

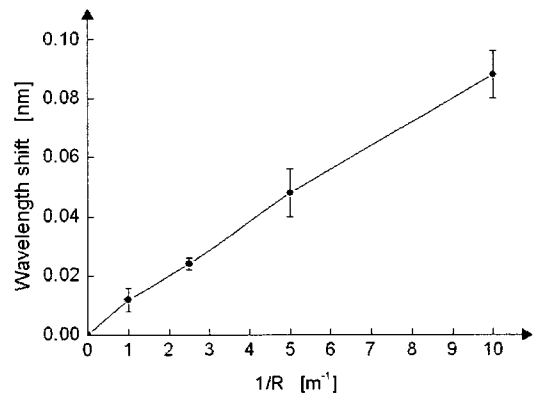


d)

[그림 3] FBG 반사 스펙트럼 :

- a)  $1/R=0 \text{ m}^{-1}$ , b)  $1/R=1 \text{ m}^{-1}$ ,
- c)  $1/R=2.5 \text{ m}^{-1}$ , d)  $1/R=5 \text{ m}^{-1}$ ,
- e)  $1/R=10 \text{ m}^{-1}$ .

또한, 그림 3의 측정 결과로부터 얻어진 곡률 변화에 따른 브래그 중심파장의 변화량을 그림 4에 나타내었다. 그림 4로부터 곡률이 증가함에 따라 브래그 중심파장은 장파장 쪽으로 선형적으로 이동하였으며, 그 기울기는 평균적으로 대략  $8.8 \text{ pm/m}^{-1}$  이었다.



[그림 4] 곡률 변화에 대한 브래그 중심 파장의 변화량

#### 4. 결론

본 논문에서는 전광 센서 개발을 위해 파이버 브래그 격자를 사용하여 곡률을 측정하였으며, 그 결과 곡률이 증가함에 따라 반사 스펙트럼은 감소하나, 브래그 중심파

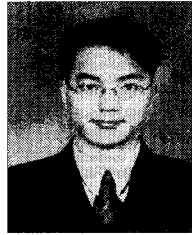
장의 변화량은 선형적으로 증가함을 알 수 있었으며, 이때 기울기는 대략  $8.8 \text{ pm/m}^{-1}$  이었다. 또한, 이러한 선형성으로 인해 곡률 측정을 위한 광센서로 사용하기에 손색이 없음을 알 수 있다. 따라서 곡률의 변화에 따라 이동된 브래그 중심 파장의 변화를 측정한 본 논문은 물체의 구부러짐이나 휘어짐을 관측하기 위한 실제 현장 응용분야에 매우 유용할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

- [1] K. O. Hill and G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1263-1276, 1997.
- [2] Y. J. Rao, "In-fiber Bragg grating sensors," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 355-375, 1997.
- [3] T. Erdogan, "Fiber Grating Spectra," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1277-1294, 1997.
- [4] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings Fundamentals and Application in Telecommunication and Sensing*, Artech House, 1999.
- [5] M. Mahmoud and Z. Ghassemlood, "Tunable fiber gratings modeling and simulation," Proceedings of the 36th Annual Simulation Symposium(ANSS) 2003.
- [6] R. W. Waynant and M. N. Ediger, *Electro-Optics Handbook*, 2nd Ed., McGraw-Hill, pp. 21.7-21.8, 2000.
- [7] M. Ibsen, S. Y. Set, G. S. Goh, and K. Kikuchi, "Broad-band continuously tunable all-fiber DFB lasers," *IEEE Photon Technol. Lett.*, vol. 14, no. 1, pp. 21-23, 2002.
- [8] M. J. Gander, W. N. MacPherson, R. McBride, J. D. C. Jones, L. Zhang, I. Bennion, P. M. Blanchard, J. G. Burnett and A. H. Greenaway, "Bend measurement using Bragg gratings in multicore fibre," *Electronics Lett.*, Vol. 36, No. 2, pp. 120-121, 2000.

### 이 종 윤(Jong-Youn Lee)

[정회원]



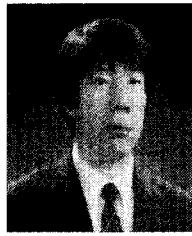
- 2001년 2월 : 호서대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 2003년 2월 : 호서대학교 전자공학과 졸업(공학석사)
- 2005년 2월 ~ 현재 : 호서대학교 전자공학과 졸업(박사수료)

<관심분야>

WDM 광통신, 광전자공학, 광센서, 집적광학소자

### 정 진 호(Jin-Ho Jung)

[정회원]



- 1980년 2월 : 건국대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1982년 2월 : 건국대학교 전자공학과(공학석사)
- 1989년 2월 : 건국대학교 전자공학과(공학박사)
- 2003년 1월 ~ 2004년 1월 : 미테네시 주립대학교 방문교수
- 1987년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

광무선통신, WDM 광통신, 광전자공학, 집적광학, 광센서공학