

회전기와 칩 광섬유 격자를 이용한 가변 분산 보상기

김준희 · 배준기 · 한영근[†] · 김상혁 · 이상배

한국과학기술연구원 광기술연구센터
Ⓣ136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1번지

정제명

한양대학교 전자통신전파공학과
Ⓣ133-791 서울시 성동구 행당동 17번지

(2003년 12월 26일 받음, 2004년 3월 18일 수정본 받음)

본 논문에서는 칩 광섬유 격자를 이용한 가변 분산 보상기를 소개한다. 개발된 가변 분산 보상기는 금속판의 벤딩에 의해 유도되는 인장력과 수축력에 대한 분석을 기반으로 칩광섬유 격자의 분산값을 제어할 수 있도록 설계되었으며, 제작된 분산 보상기는 단순히 금속 원판의 회전만으로 광섬유 격자에 선형적인 인장력과 수축력을 유도하고, 중심파장의 이동이 없이 분산값을 변화시킬 수 있었다. 분산값은 회전각의 변화에 따라 228.04 ps/nm ~ 1430.7 ps/nm의 범위에서 분산값을 제어할 수 있었다. 그리고 중심 파장의 이동은 0.03 nm미만이였다.

주제어 : Chirped fiber Bragg gratings, tunable dispersion compensation, optical fiber devices.

I. 서 론

칩 광섬유 격자는 초고속 파장 분할 다중화 방식(WDM)의 통신망에서 분산을 보상하기 위한 소자 중 하나로 많은 관심을 받고 있다. 이것은 광섬유 격자가 삽입 손실과 비선형 특성이 작고, 제어가 용이하며, 크기가 작다는 등의 다양한 이점을 가지고 있기 때문이다.^[1-3]

현재까지 분산값을 제어하기 위한 방법으로는 박막 히터^[1,2,4,5], 폴리머 패키징^[3], 압전기(piezoelectric)^[6], S형 틀^[7], 온도/인장력^[8] 등이 연구 되어왔다. 하지만, 이러한 방법들은 분산값의 변화와 함께 중심파장이 이동하거나, 선형성을 보장할 수 없다는 등의 단점을 가지고 있다. 비록 최근에 광섬유 격자가 부착된 금속판을 구부려 수축력과 인장력을 대칭적으로 유도함으로써 중심 파장을 억제하는 방법이 제시 되었으나^[9-12], 선형적인 벤딩 형태 구현이 힘들고 이론적 분석이 미약하며, 선형성에 대한 정확도 또한 떨어진다는 한계점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 새로운 광섬유 격자의 분산 제어 방법을 제시하고자 한다. 이 방법은 특별하게 제작된 회전판의 회전 각도를 제어함으로써 칩 광섬유 격자에 선형적인 인장력과 수축력을 유도할 수 있으며, 이를 통해 분산값을 효과적으로 제어할 수 있다. 또한 대칭적으로 유도된 동일한 양의 인장력과 수축력은 중심파장의 이동을 억제시킨다.

개발된 가변 분산 보상기는 칩 광섬유 격자의 분산값을

228.04 ps/nm부터 1430.7 ps/nm까지 제어할 수 있었다. 그리고 중심 파장 이동은 0.03 nm미만이였다.

II. 가변 분산 보상기의 수학적 모델링

지금까지 광섬유 칩 격자에 인장력을 유도함으로써 분산을 유도하는 연구는 다양한 방식으로 활발하게 진행되어왔다. 그러나 기존의 연구는 원하는 분산값을 얻기 위한 정확한 벤딩 형태 형성에 대한 연구가 부족하였다. 본 논문에서는 원하는 분산값을 얻기 위해 유도되어야 할 금속판의 벤딩 곡선을 해석 하였고, 이것을 기반으로 새로운 방법의 가변 분산 보상기를 제작하였다.

그림 1은 금속판을 구부렸을 때, 발생하는 인장력과 수축력에 대한 원리를 설명한 그림이다. 금속판을 구부릴 때, 금속판의 바깥 면에는 곡률 반경에 반비례하는 인장력이, 안쪽 면에는 수축력이 작용하게 되는데, 이때, 유도되는 인장력 또는 수축력 ϵ 은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.^[9]

$$\epsilon(l) = \frac{W}{2} \cdot \frac{d\phi}{dl} = \frac{W}{2} \cdot \frac{1}{R(l)} \quad (1)$$

이때, W 는 금속판의 두께, ϕ 는 곡면이 이루는 각도, l 은 금속판의 길이방향 변위, R 은 곡률 반경이다.

광섬유 격자의 선형적인 그룹 지연을 유지하면서 분산값을 변화시키기 위해서는 광섬유 격자의 길이에 대해 인장력을 선형적으로 증가 또는 감소시켜야 한다. 또한, 광섬유 칩 격자의 중심 파장의 이동을 막기 위해서는 동일한 양의 인장력과 수축력이 광섬유 격자의 중심에 대해서 대칭적으로 유도

[†]E-mail: yyghan@kist.re.kr

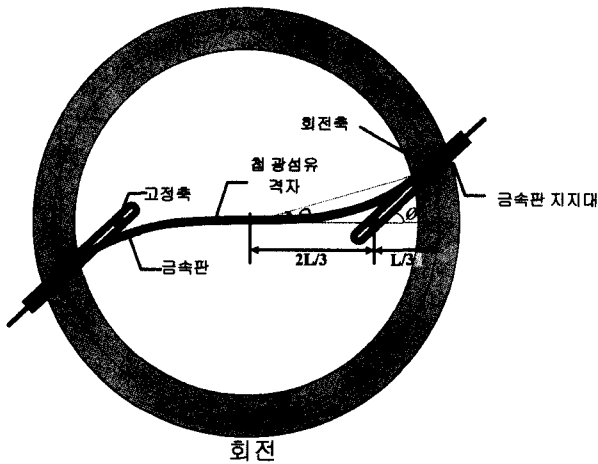


그림 2. 가변 분산 보상기 구조

되어야 한다. 이러한 길이 변위 l 에 따른 인장력의 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\varepsilon(l) = \frac{\varepsilon_M \cdot l}{L} \quad (2)$$

여기서 ε_M 은 $l=L$ 또는 $l=-L$ 에서의 최대 인장력 값을 나타낸다.

이 식 (2)를 식 (1)에 적용하면 변위 l 에서의 곡률(κ)은 다음과 같다.

$$\kappa(l) = \frac{1}{R(l)} = \frac{2\varepsilon_M \cdot l}{WL} \quad (3)$$

여기서 W 는 금속판의 넓이를 나타낸다. 임의의 길이 l 위치에서의 곡률이 식 (3)에서와 같이 정해졌으므로 이러한 곡률

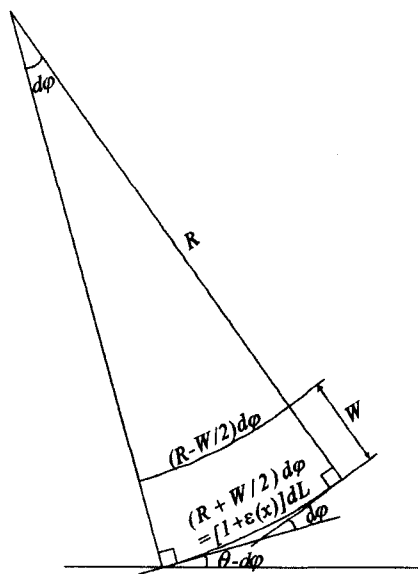


그림 1. 금속판의 벤딩 구조

을 가지는 금속판의 x, y 좌표상의 위치 함수 $x(l), y(l)$ 은 각각 다음과 같은 Fresnel Cosine Integral과 Sine Integral 형태로 구해질 수 있다.

$$x(l) = \int_0^l \cos\left(\frac{\varepsilon_M l^2}{WL}\right) dl \quad (4)$$

$$y(l) = \int_0^l \sin\left(\frac{\varepsilon_M l^2}{WL}\right) dl$$

Fresnel Integral의 특성으로, 격자의 양쪽 종단의 회전각도가 충분히 작을 경우 종단에서 그 접선이 x 축과 만나는 절편은 격자 반쪽 길이의 2/3지점으로 근사화될 수 있다. 이 2/3 지점은 본 논문에서 설계된 분산 보상기의 고정축 위치로 활용되었으며 이 지점을 고정시켰을 때 격자의 구부러진 곡선이 Fresnel Integral 형태의 곡선을 따른다고 할 수 있다.

위와 같은 가정 하에 격자 고정축 위치를 격자 반쪽 길이의 2/3 지점으로 고정시켰을 때, 광섬유 격자 양 끝에 유도되는 인장력의 크기는 회전각도 θ 에 대하여 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$$\varepsilon_M(\theta) = \frac{3W}{L} \theta \quad (5)$$

이때, 회전각도 θ 에 따른 광섬유 격자의 분산값의 변화는 다음의 식 (6)으로 표현될 수 있다.^[13]

$$\begin{aligned} D(\theta) &= \frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda(\theta)} \\ &= \frac{4L \cdot n_{eff}}{c} \cdot \frac{1}{\Delta\lambda_0 + 2\lambda_c \cdot \varepsilon_M(\theta)} \\ &= \frac{4L \cdot n_{eff}}{c} \cdot \frac{1}{\Delta\lambda_0 + 6w\lambda_c\theta/L} \end{aligned} \quad (6)$$

이를 이용하여 우리는 중심파장의 이동 없이 첩 광섬유 격자의 분산값을 제어할 수 있는 가변 분산 보상기를 제작하였다.

III. 실험 결과

그림 2는 금속판의 벤딩을 이용한 가변 분산 보상기의 구조를 나타낸 그림이다. 제안된 가변 분산 보상기는 첩 광섬유 격자가 부착된 금속판과 금속판을 구부리기 위한 금속판 지지대, 축, 회전판으로 구성되어 있다. 첩 광섬유 격자가 부착된 금속판은 복원력이 강한 스프링강 재질의 금속을 사용하였으며, 길이는 15.3 cm, 두께는 0.2 mm로 제작하였다. 실험에 사용된 첩 광섬유 격자의 길이는 11 cm, 대역폭은 1.1 nm, 중심파장은 1546.4 nm, 분산값은 1077 ps/nm, 리플은 ± 35.15 ps이다. 금속판은 두 개의 지지대로 고정되어, 각각 고정축과 이동축의 위치 변화에 따라 구부러질 수 있도록 구성되었다. 고정축은 $\pm(2/3)L$ 지점에 위치 시켰고, 두 개의 이동축은 외부 원판이 회전함에 따라 서로 원점을 중심으로 대칭적으로 회전할 수 있도록 설계되었다. 광섬유 격자는 UV

경화 에폭시를 이용하여 금속판에 고정되었으며, 두개의 이동축 사이에서 금속판이 이루는 곡면에 따라 인장력과 수축력이 유도될 수 있도록 제작되었다. 이 구조를 통해서 금속판은 식 (4), (5)에서 보여지는 바와 같은 *Fresnel Integral* 형태의 곡선에 따라 구부러져, 광섬유 격자에 선형적인 인장력을 유도할 수 있다. 또한 격자 중심을 기준으로 동일한 양의 인장력을 대칭적으로 분포 시킬 수 있다.

그림 3은 회전각에 따른 반사스펙트럼 및 시간 지연의 변화를 나타낸 그림이다. 칩 광섬유 격자의 대역폭은 칩 격자의 칩핑률에 비례한다. 칩핑률의 증가는 칩 격자의 대역폭을 증가시키며, 반대의 경우에는 감소시킨다. 외부 원판이 -0.5° 에서 4° 까지 변화함에 따라 반사 스펙트럼의 FWHM은 최초 1.1 nm에서 5 nm까지 변화하였다. 이는 칩 격자의 칩핑률이 회전각에 따라서 증가했음을 말해준다. 여기서 칩핑률이 증가함에 따라 발생된 반사율의 감소는 광섬유 격자 제작단계에서 굴절률 변화를 증가시켜 줌으로써 최소화할 수 있다. 한편, 중심파장의 이동은 0.03 nm 미만으로 중심파장의 변동이 효과적으로 억제 되고 있으며, 격자 중심을 기준으로 정확한 대칭구조의 인장력이 가해지고 있음을 알 수 있다.

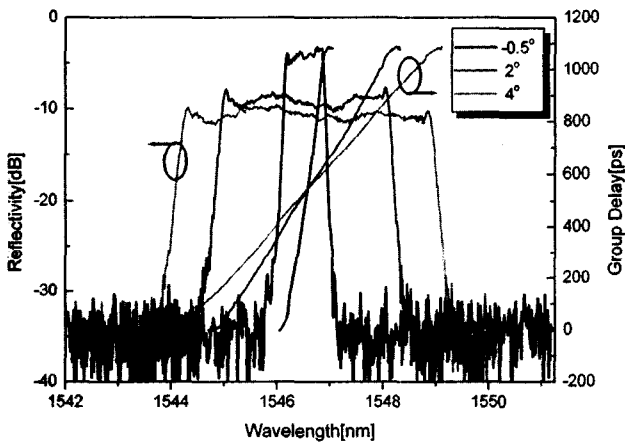


그림 3. 가변 분산 보상기의 시간 지연 및 반사 스펙트럼.

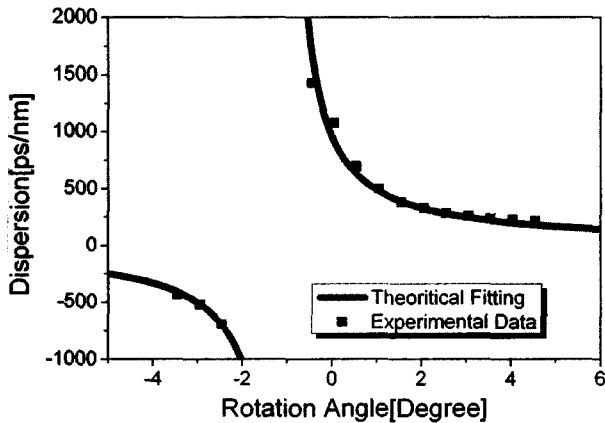


그림 4. 측정된 분산값 결과와 이론 결과 비교.

외부 원판이 시계방향으로 회전할 때, 광섬유 격자의 분산값은 식 (6)에 따라 서서히 감소하여, 0의 값으로 접근해 가게 된다. 반대로, 외부 원판이 반 시계방향으로 회전할 때, 분산값은 증가하며, θ 가 -2° 인 지점에서 분산값의 반전이 일어나게 된다. 분산값의 반전이 이루어진 이후에 분산값은 $-\infty$ 에서 점차 증가하여, 0의 값에 접근해가게 된다. 이런 원리에 의해서 외부원판이 -0.5° 에서 4° 까지 회전할 때, 분산값은 1430.7 ps/nm에서 228.04 ps/nm로 감소함을 확인할 수 있었다. 리플의 변화는 보상 범위 내에서 최대 ± 40.25 ps로써 최초 리플크기와 큰 변화가 없었다.

그림 4는 식 (6)를 통해서 계산된 분산값과 실험에 의해 측정된 분산값을 비교한 그림이다. 약간의 오차가 발생하였지만 전반적으로 두 결과가 일치함을 알 수 있다. 이 결과를 통해, 제작된 가변 분산 보상기가 정확한 벤딩 곡선을 형성시킨다는 것을 알 수 있으며, 회전각에 따른 분산값의 변화 또한 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있다. 발생한 오차는 격자 제작 과정과 UV 경화 과정에서 발생한 오차이며, 이것은 제작 장비의 성능 향상을 통해 극복할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 금속판의 벤딩 곡선에 대한 해석을 기반으로 칩 광섬유 격자의 분산값을 제어할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 가변 분산 보상기는 단순히 외부 원판의 회전만으로 칩 광섬유 격자의 분산값을 효과적으로 제어할 수 있었다. 이 방법을 통해 구현된 금속판의 벤딩 곡선은 칩 광섬유 격자에 선형적인 인장력을 유도 시켰으며, 격자 중심을 기준으로 정확한 인장력과 수축력의 대칭적 분포를 통해서 중심파장의 이동 또한 효과적으로 억제 시켰다.

분산 가변 범위로는 회전각 $-0.5^\circ \sim +4^\circ$ 영역에 대해서 1430.7 ps/nm부터 228.04 ps/nm까지 변화하였다. 반사 스펙트럼의 FWHM은 회전각 $-0.5^\circ \sim 4^\circ$ 범위에 대해서 최초 1.1 nm에서 최대 5 nm까지 변화하였고, 리플은 큰 변화가 없었다. 중심파장의 이동은 0.03 nm 이하로 억제 되었다.

제안된 가변 분산 보상기는 향후 초고속 광통신 시스템에서 실용화될 수 있을 것으로 기대되고 있다.

참고문헌

- [1] B. J. Eggleton, J. A. Rogers, P. S. Westbrook, and T. A. Strasser, "Electrically tunable power efficient dispersion compensating fiber Bragg grating," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 854-856, 1999.
- [2] S. Matsumoto, T. Ohira, M. Takabayashi, K. Yoshiara, and T. Sugihara, "Tunable dispersion equalizer with a divided thin-film heater for 40-Gb/s RZ transmissions," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, pp. 827-829, 2001.
- [3] S. T. Vohra, I. N. Duling, C. C. Chang, W. I. Kaechele, M. L. Dennis, and K. P. Koo, "Dynamic dispersion com-

- compensation using bandwidth tunables," in *ECOC 2000*, vol. 1, pp. 113-114, 2000.
- [4] N. Q. Ngo, S. Y. Li, R. T. Zheng, S. C. Tjin, and P. Shum, "Electrically tunable dispersion compensator with fixed center wavelength using fiber Bragg grating," *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, pp. 1568-575, 2003.
- [5] J. A. Rogers, B. J. Eggleton, R. J. Jackman, G. R. Kowach, and T. A. Strasser, "Dual on-fiber thin-film heaters for fiber gratings with independently adjustable chirp and wavelength," *Opt. Lett.*, vol. 24, pp. 1328-1330, 1999.
- [6] M. M. Ohn, A. T. Alavie, R. Maaskant, M. G. Xu, F. Bilodeau, and K. O. Hill, "Dispersion variable fiber Bragg grating using a piezoelectric stack," *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 2000-2001, 1996.
- [7] T. Komukai, T. Inui, and M. Nakazawa, "Very low group delay ripple characteristics of fiber Bragg gratings with chirp induced by an S-curve bending technique," *Electron. Lett.*, vol. 37, pp. 449-451, 2001.
- [8] P. C. Hill and B. J. Eggleton, "Strain gradient chirp of fiber Bragg gratings," *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 1172-1174, 1994.
- [9] T. Imai, T. Komukai, and M. Nakazawa, "Dispersion tuning of a linearly chirped fiber Bragg grating without a center wavelength shift by applying a strain gradient," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, pp. 845-847, 1998.
- [10] Y. W. Song, D. Starodubov, Z. Pan, Y. Xie, A. E. Willner, and J. Feinberg, "Tunable WDM dispersion compensation with fixed bandwidth and fixed passband center wavelength using a uniform FBG," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, pp. 1193-1195, 2002.
- [11] X. Dong, B. Guan, S. Yuan, X. Dong, and H. Tam, "Strain gradient chirp of uniform fiber Bragg grating without shift of central Bragg wavelength," *Opt. Comm.*, vol. 202, pp. 91-95, 2002.
- [12] S. Chung, J. Kwon, S. Baek, and B. Lee, "Group delay control of super-imposed fiber gratings using a two-column system mounted on a rotatable disk," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, pp. 153-155, 2004.
- [13] M. Ibsen, M. Durkin, R. Feced, M. J. Cole, M. N. Zervas, Richard I. Laming, "Dispersion compensating fiber fiber Bragg gratings," *Proc. SPIE*, vol. 4532, pp. 540-551, 2001.

Tunable dispersion compensator based on chirped fiber bragg gratings with a mechanical rotator

Junhee Kim, Junkye Bae, Young-Geun Han[†], Sang Hyuck Kim, and Sang Bae Lee

Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, 136-791, KOREA

[†] E-mail: yyghan@kist.re.kr

Je-Myung Jeong

Department of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, KOREA

(Received December 26, 2003, Revised manuscript March 18, 2004)

A systematic method for tunable dispersion compensation based on chirped fiber Bragg gratings without a center wavelength shift is proposed. The specially designed mechanical rotator can flexibly control the chirping ratio along the fiber grating and the corresponding dispersion value. The group delay can be linearly controllable since the proposed method can induce a linear strain gradient with the rotation angle change. The dispersion value could be controlled from 228.04 ps/nm to 1430.7 ps/nm with small center wavelength shift, which was less than 0.03 nm.

OCIS Codes: 050.0050, 060.0060, 230.0230.