

기계적으로 구현된 장주기 광섬유 격자 Mach-Zehnder 간섭계

장현수 · 조준용 · 이경식[†]

성균관대학교 정보통신공학부 광통신연구실

Ⓣ 440-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300

(2002년 11월 8일 받음, 2003년 6월 2일 최종수정본 받음)

본 논문에서는 장주기 광섬유격자쌍을 이용하여 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계(MZI)를 기계적인 방법으로 구현해 보았다. 제작한 간섭계의 장주기 광섬유격자쌍의 투과스펙트럼과 fringe spacing의 이론치와 실험치를 비교, 분석해 보았다. 그 결과, fringe spacing의 값은 이론치와 실험치가 비교적 잘 일치하는 것을 알았다.
주제어 : long-period grating pair, Mach-Zehnder interferometer.

I. 서 론

광통신 소자 중의 하나인 광섬유 격자는 삽입손실이 적고 파장 선택도가 높은 특성이 있어 활발한 연구와 함께 광통신 시스템에서 핵심적인 소자로 이용되고 있다. 이러한 광섬유격자는 보통 단주기 광섬유격자(short-period fiber gratings)와 장주기 광섬유격자(long-period fiber gratings)로 나뉘지는데 단주기 광섬유격자는 한주기가 수백 nm로써 코어(core)모드로 진행하는 특정파장의 빔을 반대로 진행하는 코어모드로 결합시켜 일반적으로 반사되는 빔을 사용하고, 장주기 광섬유격자는 한 주기가 수백 μm로써 진행하는 모드를 진행 방향과 같은 방향의 클래딩(cladding)모드로 결합시킴으로써 특정파장성분을 크게 감소시킬 수 있는 소자이다. 이러한 장주기 광섬유격자는 WDM(wavelength division multiplexing) 광통신 시스템에서 특정 파장성분을 투과시키는 광필터,^[1] 초고속 광전송 시스템에서 문제가 되고 있는 색분산을 보상하는 분산보상기,^[2] 모드 변환기,^[3] 광섬유센서,^[4] EDFA(erbium doped fiber amplifier)의 이득평탄 필터^[5]등으로 그 응용범위가 매우 넓다.

일반적으로 장주기 광섬유격자에 의해서 코어모드에서 결합된 클래딩 모드는 다시 같은 격자를 만나면 다시 코어모드로 들어와 간섭을 일으키게 된다. 즉, 첫 번째 격자에 의하여 각각 코어와 클래딩모드로 결합되어 도파된 두 빔이 두 번째 격자를 지나면서 만나 간섭을 일으킨다. 이 때 간섭무늬는 각 모드의 세기 비와 도파된 거리에 의하여 주어진다. 이러한 장주기 광섬유격자쌍에 의한 두 빔의 간섭은 다양한 분야에 응용이 가능하다. 우선, 간단한 Mach-Zehnder 간섭계를 구성할 수 있고,^[6] 간섭무늬는 광섬유의 외부에서 일어나는 변화에 민감하기 때문에 bending sensor, 온도센서, 광섬유 외부 코팅물질의 굴절률을 계산해 낼 수 있으며,^[7] 또한 투과스펙트럼에서 볼 수 있는 multi-peak는 WDM 시스템용 isolation filter^[8]로써도 응용이 가능하다는 것을 보여준다.

본 논문에서는 장주기 광섬유격자쌍에 대한 수학적 분석을

coupled-mode 이론을 통해 해석하고, 동작원리에 대해 분석해 보았다. 그리고 장주기 광섬유격자쌍의 투과스펙트럼을 시뮬레이션과 실험을 통해 분석해 보았다.

II. 장주기 광섬유격자쌍의 동작원리

장주기 광섬유격자쌍(LPG pair)의 구조와 동작원리에 대해서 살펴보면 다음과 같다. 그 동작 원리를 보면 코어모드로 진행하던 빔은 첫 번째 장주기 광섬유격자(LPG1)를 만나 코어모드와 클래딩모드로 나뉘어져서 도파된다. 이런 두개의 코어모드와 클래딩모드로 도파되는 길은 Mach-Zehnder 간섭계의 두 팔의 역할을 하며, 첫 번째 장주기 광섬유격자(LPG1)에 의해 커플링된 클래딩모드는 두 번째 장주기 광섬유격자(LPG2)를 만나 코어모드로 다시 커플링 되어 첫 번째 장주기 광섬유격자(LPG1)에 의해 커플링이 안 된 코어모드와 간섭을 일으킨다.^[6,9] 그림 1은 장주기 광섬유격자쌍을 이용한 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계의 개념도를 나타낸 것이다.

먼저, 광섬유격자쌍을 coupled-mode 이론에 근거하여 수식적으로 해석해보고 이의 투과스펙트럼을 제작 조건을 다르게 하여 시뮬레이션 해보았다.^[10]

빔이 d의 길이를 갖는 LPG를 지나갈 때 coupled-mode 이론에 근거해서 살펴보면, LPG를 막 지나쳤을 때의 코어 모드의 modal amplitude을 a_{co} 라 하고, 결합되는 v-th order 클래딩 모드의 modal amplitude를 a_{cl}^v 이라 하면, 이는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} a_{co}(d) \\ a_{cl}^v(d) \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} a_{co}(0) \\ a_{cl}^v(0) \end{bmatrix},$$

$$A = e^{i \frac{\beta_{co} + \beta_{cl}^v}{2} d} \begin{bmatrix} e^{i \frac{K}{2} d} & 0 \\ 0 & e^{-i \frac{K}{2} d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos sd + \frac{i \Delta \beta \sin sd}{2s} & \frac{iks \sin d}{s} \\ \frac{iks \sin d}{s} & \cos sd - \frac{i \Delta \beta \sin sd}{2s} \end{bmatrix} \quad (1)$$

[†]E-mail: kslee@skku.ac.kr

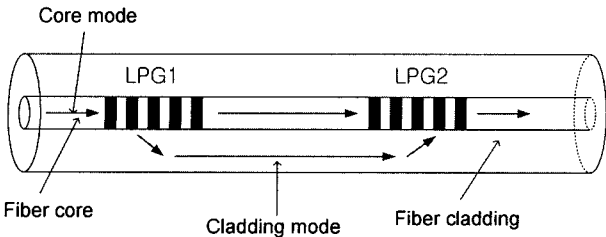


그림 1. 장주기 광섬유격자쌍이 있는 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계의 구조.

여기서, β_{co} , β_{cl}^v 는 각각 코어모드와 v -th order 클래딩 모드의 전파상수, K 는 grating vector, $K = 2\pi/\Lambda$ (Λ 는 grating 주기), $\delta\beta$ 는 phase mismatch, ($\delta\beta = d_{co} - \beta_{cl}^v - K$), κ 는 LPG 1개의 커플링 계수이며 $s^2 = \kappa\kappa^* + (\delta\beta/2)^2$ 이다.

따라서, d 의 길이를 갖는 격자구간을 지난 후에 빔이 L 의 길이를 갖는 격자가 없는 구간을 지날 때, modal amplitude는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} a_{co}(d+L) \\ a_{cl}^v(d+L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{i\beta_{co}L} & 0 \\ 0 & e^{i\beta_{cl}^v L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{co}(d) \\ a_{cl}^v(d) \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 이용하여 빔이 두 개의 격자를 지난 후의 modal amplitude는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} a_{co}(2d+L) \\ a_{cl}^v(2d+L) \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} e^{i\beta_{co}L} & 0 \\ 0 & e^{i\beta_{cl}^v L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{co}(0) \\ a_{cl}^v(0) \end{bmatrix} \quad (3)$$

또한, 코어모드와 클래딩 모드 사이의 위상차를 이용하여 간섭으로 인해 생기는 fringe spacing(S)을 구할 수 있다. 이에 대한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.¹¹⁾

$$S \approx \frac{\lambda^2}{\Delta m_{out} L} \quad (4)$$

이 때, $\Delta m = \Delta n_{eff} - \lambda \frac{d}{d\lambda} \Delta n_{eff}$ 로써, 코어와 클래딩모드의 group index의 차이이며, $\Delta n_{eff} = n_{eff}^{core} - n_{eff}^{clad}$ 이다.

III. 장주기 광섬유격자쌍의 특성실험

본 논문에서의 장주기 광섬유격자쌍(LPG pairs)은 UV빔을 주기적으로 노출시켜서 만드는 일반적인 방법과는 달리 광섬유의 광탄성효과(photoelastic effect)를 이용해서 기계적으로 광섬유에 주기적인 압력을 인가하는 방법을 이용하여 제작되었다. 이때, 광섬유에 기계적인 압력을 인가하기 위한 두 V-grooved plates의 주기는 600 μm 이었고, 길이는 2 cm이었다. 사용된 광섬유는 일반통신용 단일모드 광섬유이며, 광원은 광대역 광원을 사용하였고, 실시간 관측을 위해 광스펙트럼분석기(OSA)를 이용하여 장주기 광섬유격자쌍에 대한 투과스펙트럼을 분석하였다.

장주기 광섬유격자쌍을 제작할 때에는 입력편광상태와 두개

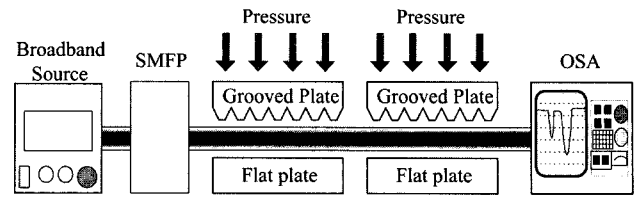


그림 2. 기계적으로 유도된 광섬유간섭계 또는 장주기 광섬유격자쌍의 실험 장치도.

의 격자의 수평상태가 매우 중요하다. 이를 위해 본 논문에서는 입력단에 single mode fiber polarizer(SMFP)를 달아 입력의 편광상태를 조절하였고, 입력편광을 광섬유를 누르는 방향과 수직인 방향으로 넣었을 때 가장 좋은 간섭의 visibility를 나타내는 것을 알 수 있었다. 또한, 두 개의 동일한 격자를 제작하기 위해서는 동일한 압력을 가해주어야 하며, 이를 위해 두 grooved plates는 수평을 유지하였다.

기계적인 압력을 가해 만드는 장주기 격자¹²⁾는 간단히 단시간에 저비용으로 장주기 광섬유격자를 제작할 수 있는 장점이 있다. 기존의 방법으로 장주기 광섬유격자를 제작할 때 중심파장을 정확하게 제어하기 어렵고 제작 후에는 중심파장이 고정된다는 점 등의 단점이 있으나, 기계적으로 유도된 장주기 광섬유격자는 파장변이가 가능하다. 그림 2는 기계적으로 유도된 장주기 격자쌍을 제작하기 위한 제작 장치도이다.

그림 3(a)는 격자 주기(Λ)가 600 μm 이고 격자사이의 간격(L)이 10 cm일 때, 장주기 광섬유격자쌍의 투과스펙트럼을 시뮬레이션한 결과이며 그림 3(b)는 측정된 투과스펙트럼이다. 투과 스펙트럼의 투과손실(transmission loss)은 LP_{01} 코어모드와 HE_{14} 클래딩모드 사이의 모드 결합을 나타낸다. 이 때, 인가된 압력은 동일하였으며 측정된 스펙트럼에서 발생된 손실은 microbending으로 인한 것으로 추정되며, 그림 3에서 측정된 투과스펙트럼의 간섭 visibility가 이론치보다 낮게 나온 것은 microbending에 의한 손실 이외에도 두 격자를 지날 때의 빔의 편광상태에 의한 선형 복굴절과 두 plates의 수평상태로 인한 손실 때문으로 예상된다. 또한, 그림 3(a)와 3(b)의 fringe spacing(S)은 각각 4.8 nm, 4.5 nm로 이론치와 실험치가 비교적 잘 일치한다는 것을 알 수 있다.

그림 4는 입력빔의 편광을 X축 편광과 Y축 편광으로 나누어 기계적으로 유도된 장주기 격자쌍을 제작하였을 때의 투과 스펙트럼이다. solid curve는 X축 편광이며, dashed curve는 Y축 편광이다. 이 때 Y축 편광은 광섬유에 압력을 가하는 방향의 축을 의미하며 X축은 압력을 가하는 방향에서 수직으로 기울어진 축을 의미한다. 투과 스펙트럼을 살펴보면 두 편광 상태에 따른 투과 peak의 위치가 다른 것을 볼 수 있는데 이는 기계적으로 유도된 장주기 광섬유격자에 의해 발생하는 복굴절로 인해 서로 다른 유효굴절률을 가지게 되어 각각의 편광에 따라 LP_{01} 코어모드와 결합되는 HE_{14} 클래딩모드의 공진파장이 서로 다르게 되기 때문이다. 또한 입력빔이 X축일 때가 Y축일 때보다 간섭이 더 잘 일어나는 원인은 X축으로 빔이 입력될 때 압력을 가하면 굴절률증가가 더 많이 일어나기 때문이다. 이는 일반적인 단일모드 광섬유의 경우($n=1.46$),

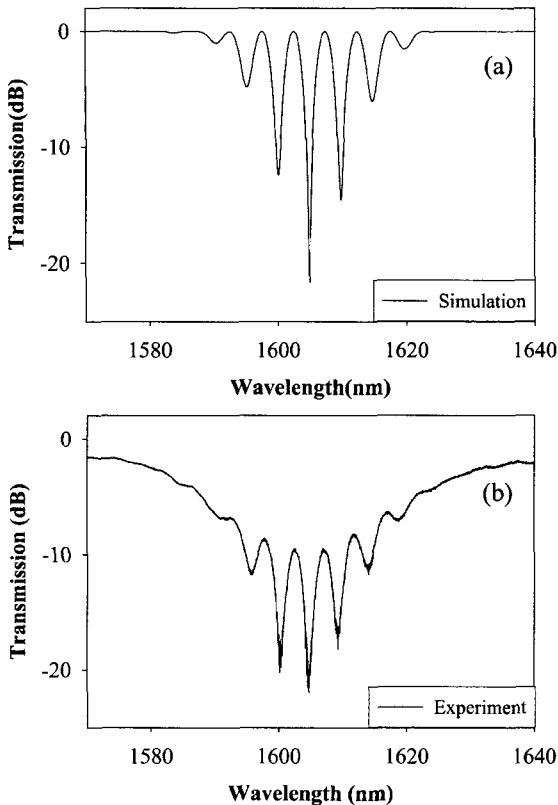


그림 3. 장주기 광섬유격자쌍의 투과스펙트럼 (a) 이론치, (b) 실험치 ($\Lambda = 600 \mu\text{m}$, $L = 10 \text{ cm}$).

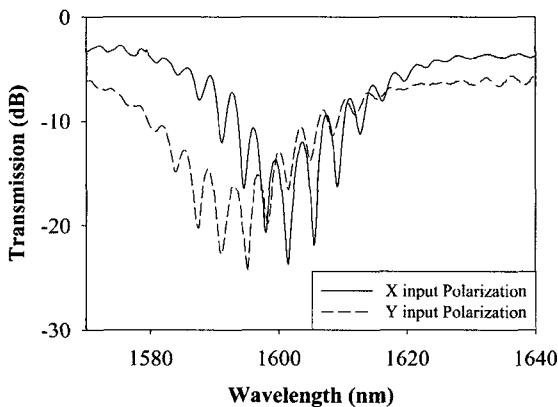


그림 4. X-입력편광빔과 Y-입력편광빔에 대한 장주기 광섬유격자쌍의 투과스펙트럼(— X-입력편광빔, --- Y-입력편광빔).

압력에 의해 발생하는 굴절률 변화량을 나타낸 식 (5), (6)로 알 수 있다.^[13,14]

$$\Delta n_x = -\frac{n_0^3}{2} [P_{11}\epsilon_x + P_{12}(\epsilon_y + \epsilon_z)] \quad (5)$$

$$\Delta n_y = -\frac{n_0^3}{2} [P_{11}\epsilon_y + P_{12}(\epsilon_x + \epsilon_z)] \quad (6)$$

여기서, n_0 는 압력이 인가되지 않은 초기 광섬유의 굴절률이고 P_{11} 과 P_{12} 는 광탄성 계수를 나타낸다.

그림 5는 격자사이의 간격(L)을 5 cm에서 20 cm까지 증가시

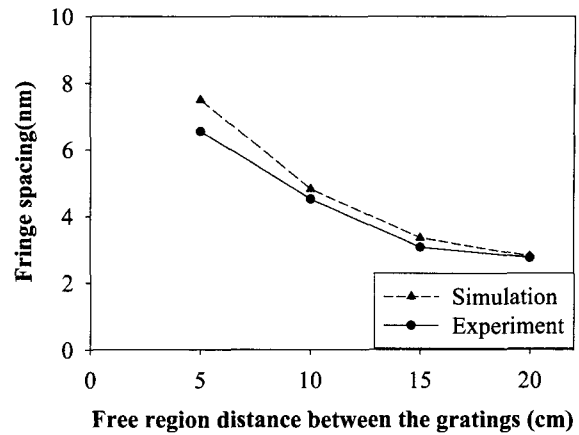


그림 5. 격자사이의 간격(L)에 따른 fringe spacing(S) (--- 이론치, — 실험치).

킴으로써 변화되는 fringe spacing(S)을 나타낸 그림이다. 그림 5를 보면 fringe spacing(S)은 식 (4)에 나타나 있는 것처럼 격자사이의 간격(L)에 반비례한다는 것을 알 수 있고, 이론치와 실험치의 결과가 비교적 잘 일치한다는 것을 볼 수 있다.

IV. 결 론

장주기 광섬유격자쌍(LPG pair)을 이용하여 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계를 기계적인 방법으로 구현해 보았다. 또한 구현된 광섬유 간섭계의 장주기 광섬유격자쌍에 대한 수식적 분석을 coupled-mode 이론을 통해서 해석하고 이의 동작원리에 대해서 분석해 보았다. 그리고 장주기 광섬유격자쌍의 제작 조건에 따른 투과스펙트럼을 시뮬레이션 해보았다. 시뮬레이션 결과, 장주기 광섬유격자쌍의 투과스펙트럼은 Mach-Zehnder 간섭계와 같이 두 빔(코어모드와 클래딩모드로 전파되는 빔)의 간섭으로 인해 간섭 fringe가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 실험을 통하여 투과스펙트럼의 visibility는 실험치가 이론치보다 낮게 나왔지만 fringe spacing(S)은 이론치와 실험치가 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan, and J. E. Sipe, "Long period fiber gratings as band rejection filters," *J. Lightwave Technol.* vol. 14, no. 1, pp. 58-65, 1996.
- [2] S. Ramachandran, B. Mikkelsen, L. C. Cowsar, M. F. Yan, G. Raybon, L. Boivin, M. Fishteyn, W. A. Reed, P. Wisk, D. Brownlow, R. G. Huff, and L. Gruner-Nielsen, "All-fiber grating-based higher order mode dispersion compensator for broad-band compensation and 1000-km transmission at 40 Gb/s," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, no. 6, pp. 632-634, 2001.
- [3] Lee, K. S., and Erdogan, T., "Fiber mode conversion with tilted gratings in an optical fiber," *J. Opt. Soc. Am. A.*, vol. 18, no. 5, pp. 1176-1185, 2001.

- [4] Y. Liu, L. Zhang and I. Bennion, "Fiber optic load sensors with high transverse strain sensitivity based on long-period gratings in B/Ge co-doped fibre" *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 8, pp. 661-663, 1999.
- [5] A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, and P. J. Lemaire, N. S. Bergand and C. R. Davidson, "Long period fiber-grating-based gain equalizers," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 5, pp. 336-338, 1996.
- [6] E. M. Dianov, S. A. Vasiliev, A. S. Kurkov, O. I. Medvedkov, and V. N. Protopopov, "In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on a pair of long-period gratings," *Proc. European Conf. Optical Communication*, pp. 65-68, 1996.
- [7] 김동희, 정재희, 김영재, 홍인기, 정영주, 한원택, 백운출, 이병하, "장주기 광섬유격자의 크래딩 모드 유효 굴절률 변화," 제7회 광전자 및 광통신학술회의 COOC2000, pp. 185-186, 2000.
- [8] X. J. Gu, "Wavelength-division multiplexing isolation fiber filter and light source using cascaded long-period fiber gratings," *Opt. Lett.*, vol. 23, no. 7, pp. 309-310, 1998.
- [9] B. H. Lee, Y.-J. Kim, Y. Chung, W.-T. Han, and U.-C. Paek, "Analytic Solution for Cascaded Long-Period Fiber Gratings," *IEEE Trans. Commun.*, vol. E84-B, no. 5, pp. 1247-1254, 2001.
- [10] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gating* (Academic Press, 1999), Chap. 4.
- [11] B. H. Lee and J. Nishii, "Dependence of fringe spacing on the grating separation in a long-period fiber grating pair," *Applied Optics.*, vol. 38, no. 16, pp. 3450-3459, 1999.
- [12] 함정우, 이종훈, 이경식, "기계적으로 유도된 장주기 광섬유격자의 제작 및 특성분석," 한국광학회지, vol. 12, no. 6, pp. 485-488, 2001.
- [13] R. Gafsi and M. A. Elsherif, "Analysis of induced birefringence effects on fiber bragg gratings," *Optical Fiber Technology.*, vol. 6, pp. 299-323, 2000.
- [14] P. D. Gianino and B. Bendow, "Calculation of stress-induced changes in the transverse refractive-index profile of optical fibers," *Appl. Opt.*, vol. 20, no. 3, pp. 430-434, 1981.

Mechanically induced Mach-Zehnder interferometers based on long-period fiber grating pair

Hyun Soo Jang, Joon Yong Cho, and Kyung Shik Lee[†]

School of Information and Communications Engineering, SungKyunKwan University, Suwon 440-746, KOREA

[†]E-mail: kslee@skku.ac.kr

(Received November 8, 2002, Revised manuscript June 2, 2003)

We have demonstrated mechanically induced Mach-Zehnder interferometers (MZI) based on a long-period fiber grating pair. The transmission spectra, the interference fringes, and the fringe spacing of the long-period fiber grating pairs have also been investigated experimentally and analytically. The fringe spacings of the fabricated LPG pairs agree well with the theoretical results.

OCIS Code : 060.2340.