

기계적으로 유도된 장주기 광섬유격자의 제작 및 특성분석

함정우 · 이종훈 · 이경식[†]

성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 광통신연구실

⑨ 440-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300

(2001년 8월 2일 받음, 2001년 11월 9일 수정본 받음)

본 논문에서는 광섬유에 주기적인 압력을 인가함으로써 유도되는 굴절률 변화를 통해 장주기 광섬유격자를 설계하여 제작해 보았으며, 제작된 장주기 광섬유격자의 압력에 따른 투과특성과 과장가변 특성 및 편광의존성에 대해서 이론적 고찰 및 실험적 분석을 하였다. 제작된 장주기 광섬유격자의 투과량은 압력에 따라 주기적으로 변하며, 결합되는 모드의 중심파장을 180 nm 이상 가변할 수 있었다. 또한 모드결합의 중심파장이 9 nm 정도의 편광의존성을 갖는 것을 확인하였다.

분류코드 : FO.010.

I. 서 론

최근 수년간 급격한 통신량의 증가와 초고속 정보사회의 구현에 대한 범 세계적인 요구는 기간망의 중심축인 광통신 관련 연구개발에 대규모 투자를 불러 일으켰다. 이러한 시대적 요구 및 투자에 편승하여 기존의 데이터 전송용량 확장 및 장거리 전송을 위한 초고속 전송시스템의 시도는 수많은 분야에서 연구되고 있으며, 그중 광통신 망에 쓰이는 여러 소자들 또한 많은 발전과 개발이 이루어졌다. 특히, 지난 10여년 동안 활발히 연구가 진행되어온 광섬유격자는 삽입손실이 작고 파장 선택도가 높은 특성이 있어 광통신 시스템에서 핵심소자로 이용되고 있다. 이러한 광섬유격자는 크게 단주기 광섬유격자(Short-period gratings)와 장주기 광섬유격자(Long-period fiber gratings)로 구분할 수 있는데, 그 중 장주기 광섬유격자(Long-period fiber gratings)는 한 주기가 수백 μm 로써 진행하는 모드의 특정파장 빛을 진행 방향과 같은 방향의 고차(클래딩) 모드와 커플링 시켜 감쇄시키는 원리를 이용한 것으로 투과선폭은 수십 nm에 이르는 광섬유 격자를 말한다. 이러한 장주기 광섬유격자는 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 광통신 시스템에서 특정 파장성분을 투과시켜줄 수 있는 광필터, 초고속 광전송 시스템에서 문제가 되고 있는 색분산에 의한 펄스파장을 보상해 줄 수 있는 분산보상기, 광섬유격자 센서, EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)의 이득평탄 필터 및 ASE(Amplified Spontaneous Emission)필터 등 그 응용범위가 매우 다양하다.^[1-3] 현재 장주기 광섬유격자의 제작은 광섬유에 레이저빔을 노출시켜 굴절률 변화를 유도하는 방법^[4]과 전극상을 이용하여 광섬유에 미세구부림(microbending)을 주어 광섬유격자를 형성시키는 방법^[5,6,10]이 제시되고 있다. 그러나 이러한 제작방식으로 제작된 장주기 광섬유격자는 격자 제작시 결합되는 모드의 중심파장을 제어하기 어렵고, 격자 제

작후에는 중심파장이 고정인 단점이 있다. 또한 광섬유격자 제작시 장시간이 소요되며 고비용인 단점이 있는데, 최근 이러한 단점을 극복하기 위해 광섬유에 주기적인 압력을 가하여 장주기 광섬유격자를 제작하는 방식이 제시되었다.^[7] 제시된 방식은 광섬유에 주기적인 압박을 가하여 간단히 장주기 광섬유격자를 제작할 수 있는 특징이 있었다.^[8,9]

본 논문에서는 이러한 제작방식을 한차원 더 발전시켜, 일체화된 장주기 광섬유격자 제작장치를 설계 및 제작하고, 제작된 장주기 광섬유격자에 대한 실험특성에 대한 이론적 검증을 통해 과장가변 가능한 장주기 광섬유격자를 제안하고자 한다. II장에서는 장주기 광섬유격자의 이론에 대해 살펴 보았으며, III장에서는 장주기 광섬유격자를 제작하고, 제작된 장주기 광섬유격자에 대한 실험특성 분석 및 이론적 검증을 하였다.

II. 장주기 광섬유격자의 이론

장주기 광섬유격자(Long-period fiber gratings)는 일반 광섬유격자의 확장된 개념으로, 격자 주기가 수백 μm 에 이르는 광섬유격자를 말한다. 일반 광섬유격자는 코어로 입사된 LP_{01} 모드가 격자에 의해 브래그 조건에 해당하는 파장만을 반대방향의 코어 모드로 결합시키는 반면, 장주기 광섬유격자를 이용하면 진행하는 LP_{01} 코어모드의 빛을 특정 파장에서 진행 방향의 고차 코어모드 및 클래딩 모드와 결합시킬 수 있다.^[10,11] 그러므로 광섬유격자의 주기를 적절히 설계하면 원하는 파장에서 모드결합을 일어나게 할 수 있다. 이러한 모드결합이 일어나는 파장은 식 (1)의 위상정합조건(Phase matching condition)에 의해서 결정된다.

$$\lambda_{lm} = (n_{co}^{01} - n_{cl}^{lm}) \Lambda \quad (1)$$

여기서, n_{co}^{01} 과 n_{cl}^{lm} 은 각각 LP_{01} 코어모드와 hybrid lm 클래딩 모드의 유효 굴절률(effective index)을 나타낸다.

LP_{01} 코어모드에서 hybrid lm 클래딩모드로의 모드결합이 일

[†]E-mail: kslee@yurim.skku.ac.kr

어나는 중심파장에서의 빔의 투과량은 식 (2)에 의해서 결정된다.^[12]

$$T = \cos^2(\kappa L/2) \quad (2)$$

여기서, L 은 광섬유격자의 길이이며, κ 는 결합상수(coupling constant)이다. 일반적으로 압력을 증가 시킴에 따라서 모드결합이 강하게 일어나게 되며, 그에 따라 모드결합이 일어나는 중심파장에서의 투과손실은 점점 증가하게 된다. 하지만 어떤 값 이상에서는 점점 감소하는 경향을 보이게 되는데, 이는 광탄성효과(Photo-elastic effect)에 의해 유도되는 굴절률 변화량에 비례하는 결합상수 κ 에 대해 투과량이 \cos^2 함수형태로 주기적으로 변하기 때문이다. 중심파장에서의 모드결합비는 결합모드 방정식에 의해 유도되는데, 입사된 LP_{01} 코어모드와 결합되는 m 차 클래딩 모드와의 결합비는 식 (3)과 같다.

$$\frac{P_{cl}^m(L)}{P_{01}(0)} = \frac{\sin^2\left[\kappa L \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\kappa}\right)}\right]}{1 + \left(\frac{\delta}{\kappa}\right)} \quad (3)$$

여기서, $\delta = \frac{1}{2} \left\{ \beta_{01} - \beta_{cl}^m - \frac{2\pi}{\Lambda} \right\}$ 로 detuning parameter이고 κ 는 결합상수(coupling constant)이며, L 은 격자의 길이이다. 결합상수 κ 는 압력에 의해 유도되는 굴절률 변화에 비례하며, 클래딩 모드로의 모드결합 강도를 최대로 만족시킬 때까지 증가한다. 결국, 굴절률 변화는 \sin^2 함수형이 최대가 될 때까지 증가하게 된다. 만약, 완전한 결합이 일어났다고 가정한다면 FWHM(Full Width at Half Maximum)에서 결합되는 파워비는 0.5이며, $\kappa L = \pi/2$ 이므로 이러한 값을 식 (3)에 대입하여 detuning parameter δ 를 구한 후, 그 값을 식 (4)에 대입하면, FWHM($\Delta\lambda$)은 식 (5)와 같다.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{2\lambda_0}{\pi \Delta n_{eff}} \times \delta \quad (4)$$

$$\Delta\lambda = \frac{0.8\lambda_0^2}{L(n_{co}^{01} - n_{cl}^{lm})} \quad (5)$$

여기서, λ_0 는 LP_{01} 코어모드와 결합되는 hybrid lm 클래딩모드들의 중심파장이고, L 은 격자의 길이이며, 유효굴절률차 $D_{eff} = (n_{co}^{01} - n_{cl}^{lm})$ 이다. 즉, 일정한 파장에서 FWHM($\Delta\lambda$)은 격자의 길이(L)에 반비례 하며, 격자의 길이를 증가시킴에 따라 협대역 투과필터의 설계가 가능함을 알 수 있다.

일반적인 광섬유는 대칭(symmetric)구조로 인해서 복굴절이 거의 일어나지 않지만 광섬유를 압박하여 격자를 형성시키는 경우에는 광섬유가 비대칭(asymmetric)구조로 되어 압박을 가하는 방향과 그 방향에 수직인 방향에 서로 다른 굴절률차가 발생하게 된다. 결국, 일반 광섬유에 비해 복굴절(Birefringence)이 비교적 크게 발생하며, 식 (6)에 의해서 구할 수 있다.^[13]

$$B = \frac{2n^3}{\pi E} (1 + v) (p_{12} - p_{11}) \frac{f}{r} \quad (6)$$

여기서, n 은 코어의 굴절률(refractive index)이며, E 는 Young's

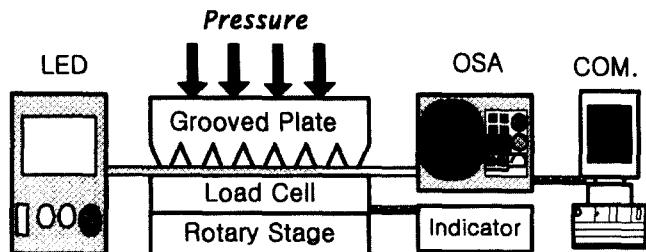


그림 1. 장주기 광섬유격자 제작을 위한 실험장치도.

modulus(7.6×10^{10} N/m²), v 는 Poisson ratio(0.17), p_{11} , p_{12} 는 실리카 광섬유에서의 Strain-optical tensor 성분이며, f 는 line force, r 은 광섬유의 외부반경(62.5 μm)이다.

III. 장주기 광섬유격자의 제작 및 특성분석

장주기 광섬유격자는 격자주기가 수백 μm이기 때문에, V형을 새긴 요철판과 평평한 판사이에 광섬유를 놓고 압력을 가하는 방식으로 제작이 가능하다. 그림 1은 이러한 제작 방식에 따른 실험장치도를 나타내고 있다.

그림 1에서 장주기 광섬유격자를 제작하기 위한 제작장치는 크게 압력을 인가하는 부분과 미세한 압력을 감지하기 위한 평평한 Load cell과 Indicator, 격자주기를 변환시키기 위한 Rotary stage로 구성되어 있으며, 광섬유에 전체적으로 균일한 압력을 가하기 위해서 일체형으로 제작하였다. 격자주기는 580 μm이며, 격자의 길이는 20 mm였다. 측정 광원은 광대역 광원인 LED를 사용하였으며, ANDO사의 AQ-6310 스펙트럼 분석기(OSA)를 사용하여 특성을 분석하였다. 사용된 광섬유는 일반 광통신용 단일모드 광섬유를 사용하였으며, 장주기 광섬유격자 제작시 보호층(Jacket)을 제거 시킨 후 격자를 형성하는 기존방식과는 달리 보호층을 그대로 유지시킨 상태에서 제작이 가능하며, 이러한 보호층은 압력에 의한 광섬유의 외부적 변형(deformation, microbending, elongation)의 영향을 줄여준다.

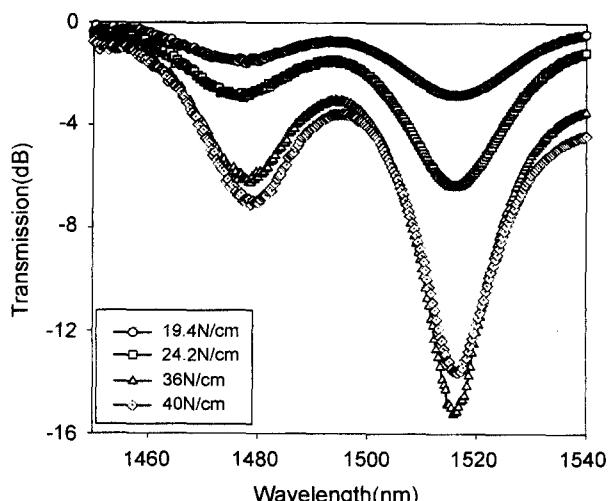


그림 2. Line force에 따른 장주기 광섬유격자의 투과 스펙트럼 ($\Lambda = 600$ μm).

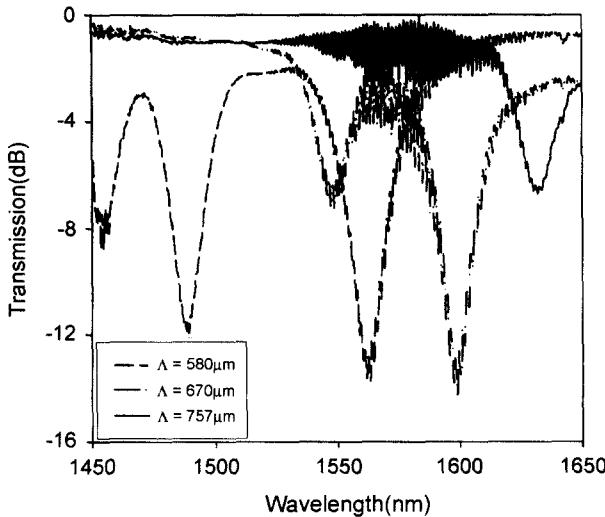


그림 3. 격자간격 변화에 따른 투과 스펙트럼 변화.

그림 2는 격자주기가 600 μm일 때, 광섬유에 압력을 가하는 Line force에 따른 투과 스펙트럼을 나타내고 있다.

그림 2에서 볼 수 있듯이, 첫 번째 모드결합이 일어나는 파장인 1,478 nm에서의 투과손실은 Line force가 증가함에 따라 점점 증가하는 형태를 나타내고 있으나, 두 번째 모드결합이 일어나는 파장인 1,513 nm에서의 투과손실은 Line force가 36 N/cm일 때 까지는 증가하다가 점점 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 식 (2)에 의해서, 투과손실이 κ 에 따라 \cos^2 함수형태를 취하기 때문이다. 또한, 격자주기가 600 μm일 때 모드결합이 일어나는 각 파장에서의 FWHM($\Delta\lambda$)은 25~30 nm로 식 (5)에 의한 이론치 26 nm, 29 nm와 거의 일치함을 확인할 수 있다.

그림 3은 격자주기를 580 μm에서 757 μm까지 증가 시켰을 때의 투과 스펙트럼 변화를 나타낸다.

Rotary stage를 회전시켜 격자주기를 증가시킴에 따라 투과 손실파장이 식 (1)의 위상정합조건에 의해 장파장쪽으로 이동되는 것을 볼 수 있다. 그림 3에서 볼 수 있듯이, 격자 주기를 변화시킴에 따라 결합되는 각 모드들의 중심파장을 적어도 180 nm 이상 가변할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

그림 4는 격자주기 변화에 따른 투과 스펙트럼상에서의 중심파장의 실험치 값들과 식 (1)에 의한 위상정합조건(Phase matching condition)의 이론치를 비교한 그림이다. 여기서, 사용된 광섬유의 클래딩 굴절률(n_2)은 1.444이며, 비굴절률차(Δ)는 3×10^{-3} 인 일반 광통신용 단일모드 광섬유이다.

표시된 여러 선들은 위에서 부터 LP_{01} 코어모드와 결합되는 각각의 hybrid 1m 클래딩모드($m = 2, 3, \dots, 8$)를 나타낸다. 또한, 실험치의 각 값들은 위에서 부터 격자주기가 757, 670, 600, 580 μm일 때의 각각의 중심파장 값을 나타낸 것이다. 그림 4에서 보는 바와 같이 이론치와 실험치가 거의 정확히 일치됨을 확인할 수 있다.

그림 5는 제작된 장주기 광섬유격자의 편광 의존성을 측정하기 위해, LP_{01} 코어모드에서 HE_{14} 클래딩모드로 모드결합이 일어나는 중심파장에서, 두 개의 수직 선형편광된 빔에 따른

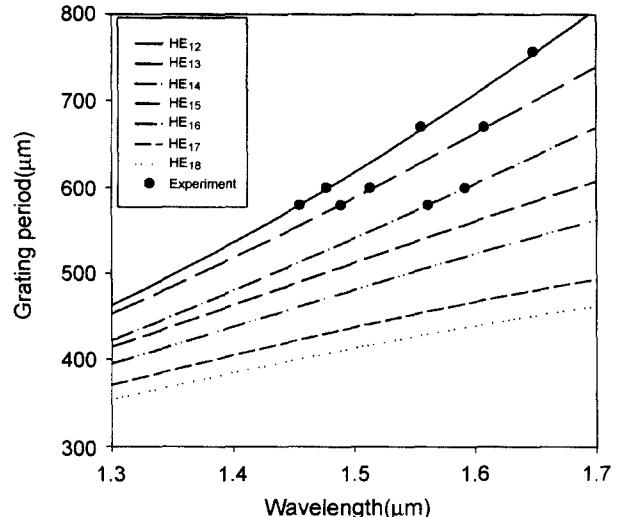
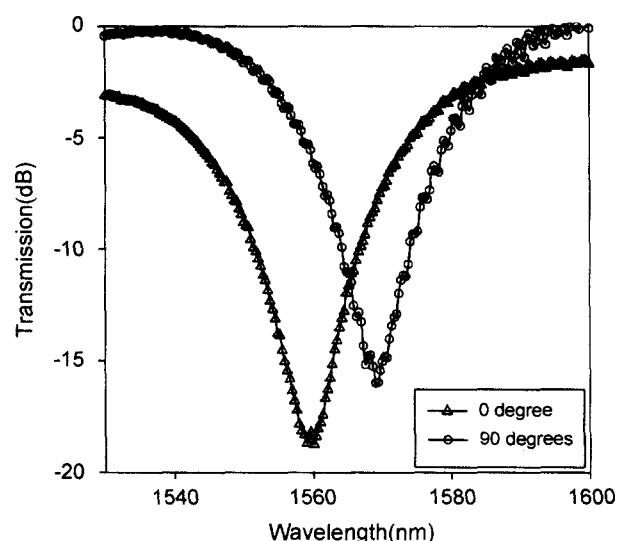


그림 4. 격자간격 변화에 따른 중심파장의 실험치와 이론치 비교.

그림 5. LP_{01} 코어모드와 HE_{14} 클래딩모드의 모드결합이 일어나는 중심파장에서 두개의 선형 편광된 모드들의 투과스펙트럼.

투과스펙트럼을 나타낸다.

최대 모드결합이 일어나는 line force(36N/cm)에서의 복굴절량은 식 (6)에 의해서 $B \approx 2.4 \times 10^{-4}$ 이었으며, 이러한 복굴절로 인해 결합되는 모드의 중심파장이 입사된 빔의 편광에 따라 9 nm까지 차이가 나며, 투과량은 2.4 dB 차이가 남을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 광섬유에 주기적으로 압력을 가하는 방식을 이용하여 장주기 광섬유격자를 제작하였고, 제작된 광섬유격자의 실험특성 분석을 하였다. 광섬유격자 제작장치는 소형이며, LP_{01} 코어모드와 결합되는 각 클래딩 모드의 중심파장을 180 nm 이상 가변할 수 있어, 원하는 파장에서 정확한 투과율

터의 설계가 가능함을 실험 및 이론적 검증을 통해 확인할 수 있었다. 또한, 편광에 따라 결합되는 모드의 중심파장이 9 nm 까지 차이가 남을 확인하였다. 제작된 광섬유격자 내에서의 모드결합에 대한 실험결과는 모드결합 이론에 의해서 예상되는 파장에서 정확하게 일어나는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

“이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음”(KRF-2000-041-E00225).

참고문헌

- [1] A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, P. J. Lemaire, N. S. Bergano, and C. R. Davidson, “Long period fiber-grating-based gain equalizers,” *Opt. Lett.*, vol. 21, pp. 336-338, 1996.
- [2] Y. Liu, L. Zhang, and I. Bennion, “Fibre optic load sensors with high transverse strain sensitivity based on long-period gratings in B/Ge co-doped fibre,” *Electro. Lett.*, vol. 35, no. 8, pp. 661-663, 1999.
- [3] X. Zenghua, C. Genxiang, L. Tangjun, J. Shuisheng, “EDFA gain spectrum flattening based on long period fiber grating,” *APCC/OECC'99*, vol. 2, pp. 1358-1361, 1999.
- [4] J. Martin and F. Ouellette, “Novel written technique of long and highly reflection in-fiber gratings,” *Electronics Letters*, vol. 30, no. 10, pp. 811-812, 1994.
- [5] T. Enomoto, M. Shigehara, S. Ishikawa, T. Danzuka, and H. Kanamori, “Long-period grating in a pure-silica-core fiber written by residual stress relaxation,” *OFC'98*, pp. 277-278.
- [6] S. G. Kosinski and A. M. Vengsarkar, “Splicer-based long-period fiber gratings,” *OFC'98*, pp. 278-279.
- [7] S. Savin, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino, and H. J. Shaw, *Opt. Lett.*, 25, 710-712, 2000.
- [8] J. W. Ham, J. H. Lee, and K. S. Lee, *Conference on Optoelectronics and Optical Communications*, pp. 191-192, 2001.
- [9] J. W. Ham, J. H. Lee, and K. S. Lee, “Wavelength selective long-period fiber gratings,” *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 1826-1828, 2001.
- [10] K. S. Lee and T. Erdogan, “Fiber mode coupling in transmissive and reflective tilted gratings,” *Appl. Opt.*, vol. 39, pp. 1394-1404, 2000.
- [11] T. Erdogan, “Cladding mode resonance in short-and long-period fiber grating filters,” *J. Opt. Soc. Am. A.*, vol. 14, no. 14, pp. 1760-1773, 1997.
- [12] D. S. Starodubov, V. Grubsky, and J. Feinberg, “All-fiber bandpass filter using cladding-mode coupling,” *LEOS'98, IEEE*, Vol.1, pp. 261-262, 1998.
- [13] A. M. Smith, “Single-mode fibre pressure sensitivity,” *Electronics Letters*, vol. 16, pp. 773-774, 1980.

Fabrication and characteristics of mechanically induced long-period fiber gratings

Joung Woo Ham, Jong Hun Lee, and Kyung Shik Lee[†]

The School of Electrical and Computer Engineering, SungKyunkwan University, Kyungki-Do 440-746, KOREA

[†]E-mail: kslee@yurim.skku.ac.kr

(Received August 2, 2001 ; revised manuscript received November 9, 2001)

The transmission spectra, the wavelength tunability, and the polarization characteristics of mechanically induced long-period fiber gratings (LPFG's) are investigated experimentally and analyzed theoretically. The transmission and mode coupling characteristics of the fabricated LPFG's agree well with the theoretical results. The resonant wavelengths at which the mode coupling occurs can be tuned over 180 nm and the peak wavelengths for orthogonally polarized lights are split by ~9 nm.

Classification code : FO.010.