

# 장주기 격자를 위한 local-normal mode transfer matrix method

## Experimental investigation of local-normal mode transfer matrix method for long-period fiber gratings

김진채\*, 엄태중#, 김명진, 백운출, 이병하  
 광주과학기술원 정보통신공학과  
 #광주과학기술원 고등광기술연구소

Tel: 062-970-2288, Fax: 062-970-2204, E-mail: jeicy@gist.ac.kr

장주기 광섬유격자는 넓은 밴드 폭과 여러 개의 공진과장을 가지고 있어서 광통신, 센서 시스템, 광측정 시스템 등에 널리 이용되고 있다. 광통신에서 사용되는 광증폭기의 이득 평탄화 필터를 시작으로 생체의료진단기에 필요한 Gaussian 형태의 스펙트럼 차단 필터까지 그 이용범위를 넓혀가고 있다. 장주기 광섬유격자의 필터 특성을 구현하기 위해서는 효율적이고 정확한 계산 방법이 필요하다. 이를 위하여 전통적인 Coupled Mode Theory (CMT)가 널리 사용되고 있지만 제한점들이 있어 [1] 이의 보완을 위한 방법이 보고 되고 되었다 [2]. 다른 효율적 방법 중 하나로 Transfer Matrix Method(TMM)이 있는데 이는 여러 층으로 이루어져 있는 광학소자의 투과 및 반사특성을 해석하는데 유용한 방법이다. 따라서 여러 층의 박막 즉, 거울이나 렌즈에 전반사 코팅 혹은 무반사 코팅 등의 설계에 많이 사용되어 왔다 [3]. TMM에서는 두 박막 사이의 투과 또는 반사 특성을 각 박막의 경계 특성과 박막 간을 형성하는 물질의 굴절률 및 두께로 이루어진 전달 행렬 형태로 표현하고, 이들 전달행렬들의 곱의 형태로 전체 박막의 특성을 표현해 주는 방법을 사용한다. 그러나 단일 모드를 갖는 평판 도파로에서의 Distributed-Feedback (DFB) 또는 Distributed-Bragg Reflector (DBR) 구조를 해석함에 있어서는 local-normal mode TMM이 주로 사용되어 왔다 [4]. Local-normal mode TMM은 TMM에서는 물질의 굴절률 대신에 도파로의 유효굴절률을 사용하고 각 층의 경계면에서 전달되는 모드의 전달계수를 유효굴절률과 모드분포 간의 곱을 적분하여 얻은 전달행렬로 표현해준다. 전체 전달행렬은 TMM에서와 같이 각 전달행렬의 곱으로 표현하여 코어 모드의 투과 및 반사스펙트럼을 얻는다[4]. 지금까지는 하나의 코어모드가 투과 및 반사하는 경우에 한해서 연구가 진행되어 왔으나 본 연구에서는 다중 밴드를 갖는 장주기 광섬유격자의 해석에 쓰일 수 있는 local-normal mode TMM을 분석하였고 실험을 통해서 그 유효성을 알아보았다.

광섬유와 같이 도파손실이 적은 유전체에 선형 편광된 빛이 입사될 때 도파 모드는 아래의 파동방정식으로 표현된다.

$$\nabla^2 E(\vec{r}, z) + k_0^2 n^2(\vec{r}, z) E(\vec{r}, z) = 0 \tag{1}$$

여기서,  $n(r,z)$ 과  $k_0$ 는 도파로의 굴절률 분포와 자유공간에서의 파수를 나타낸다. 식(1)의 일반해에 장주기 광섬유격자에서와 같이 작은 섭동이( $Dn \sim 10^{-4}$ ), 주로 UV 범에 의한, 인가되었을 경우 섭동이 있는 도파로의 일반해는 다음과 같이 표현할 수 있다 [5].

$$E_p \equiv \sum_m C_{p,m}^+(z) u_{p,m}(\vec{r}) \exp(i\beta_{p,m} z) + \sum_m C_{p,m}^-(z) u_{p,m}(\vec{r}) \exp(-i\beta_{p,m} z) + E_{p,r} \tag{2}$$

여기서  $C_{p,m}^\pm$ 은 그림 1에 표현한  $p$ 번째 부분의 앞/뒤로 진행하는  $m$ 번째 모드의 격자 부분별 진폭을 나타내며  $\beta_{p,m}$ 와  $u_{p,m}$ 는 각각  $m$  번째 모드의 전파상수와 모드분포를 나타낸다. 그림 1과 같이 섭동이 생겼을 때 그 경계에서 각 모드로 여기 되는 비율은 경계 조건에 의해서 주어진다. 광섬유 축 방향으로 전기장 및 일계 미분이 연속이라는 경계조건과  $(p+1)$ 번째 부분의 모드분포로 식(2)의 양변에 적분을 해주고  $(p+1)$  번째 앞/뒤로 진행하는 진폭으로 정리하면 다음과 같은 식(3)을 얻는다.

$$C_{p+1,n}^\pm = \sum_m \left\{ \chi_{nm}^\pm C_{p,m}^+ + \chi_{nm}^\mp C_{p,m}^- \right\} \tag{3}$$

$$\chi_{nm}^\pm \equiv \frac{(\beta_{p+1,n} \pm \beta_{p,m})}{2\beta_{p+1,n}} \int u_{p+1,n} u_{p,m} da \tag{4}$$

경계에서 각 모드 별로 진폭의 계수가 변화하는 것을 행렬로 표현하고, 그림 1에서 길이  $d_1$ 과  $d_2$ 가 일정한 부분을

대각화된  $[\exp(\pm i\beta_m d_1)]$  행렬로 표현할 수 있다. 각각의 경계와 일정한 부분에 대해 행렬로 표현하면 길이  $L$ 인 격자는 다음과 같은 행렬의 곱으로 복잡한 구조의 격자구조를 간단한 행렬식으로 표현해 줄 수 있다.

$$[C(L)] = \left\{ \prod_{i=1}^N [S(\Lambda_i)] \right\} [C(0)] \tag{5}$$

여기서  $C(0)$ 은 그림 1에서 빛의 입사와 반사를 나타내며,  $C(L)$ 은 투과를 나타낸다. 광섬유 장주기 격자의 경계조건은 반대방향으로 입사하는 코어 모드와 클래딩 모드로 입사하는 것이 없는 경우이다.

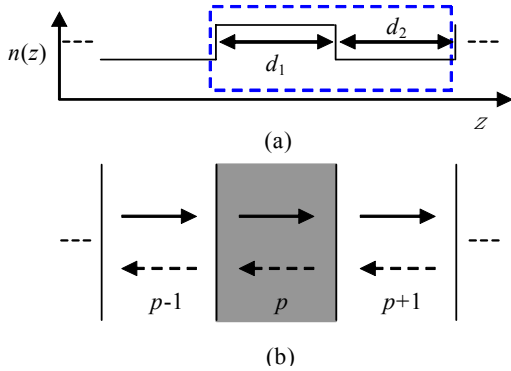


Fig. 1. (a) Schematic of the refractive index variation of the fiber's core along the fiber axis around  $p$ -th section, where the low and high in the vertical axis denote normal and UV induced core of a grating, respectively. (b) Schematic view of the forward/backward propagation modes within the piecewise uniform sections, where the vertical lines indicate the interface perpendicular to the fiber axis, and solid and dashed arrows are indicated to the forward and backward propagation modes, respectively. The shaded region corresponds to UV induced region in Fig. 1(a).

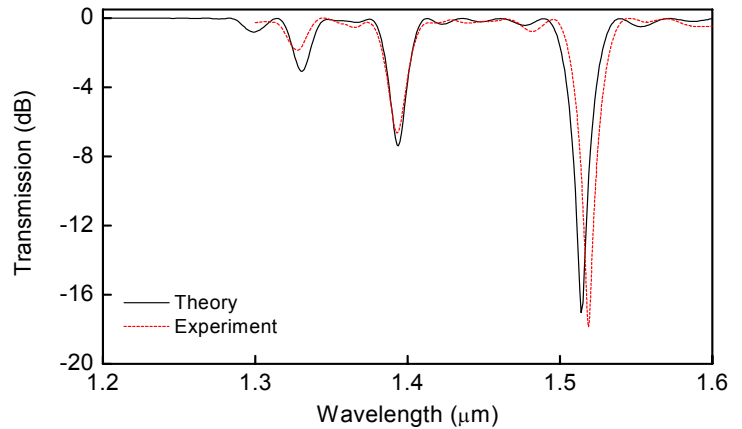


Fig. 2. Transmission spectra of the core mode in order to compare between the theory and the experiment of a long-period fiber grating having the grating period of 500 nm and the grating length of 20 mm.

그림 2는 일반 단일모드 광섬유 ( $D_n=0.448\%$ , 코어/클래딩 반경=4.27 mm/62.5 mm)에 주기 약 500 nm인 광섬유 격자를 20 mm KrF eximer 레이저로 조사했을 때의 투과 스펙트럼이다. 그림 2에서 점선은 실험을 통해서 얻은 결과이며 실선은 이 논문에서 언급한 방법으로 얻은 이론결과이다. 표 1에서는 실험과 이론으로부터 얻은 장주기 광섬유 격자의 공진파장들과 그 차를 나타내었다. 공진파장은 최대 4 nm 정도 이내에서 일치하였는데 이는 실험 조건 및 계산상의 가정 등에 약간의 오차가 있었던 것으로 추측된다.

Table 1. Resonant wavelengths of the local-normal mode TMM and the experiment, and their differences.

| Cladding mode order | Resonant wavelengths |                     |                   |
|---------------------|----------------------|---------------------|-------------------|
|                     | Theory               | Experiment          | $ \delta\lambda $ |
| $LP_{02}$           | 1.298 $\mu\text{m}$  | —                   | —                 |
| $LP_{03}$           | 1.330 $\mu\text{m}$  | 1.327 $\mu\text{m}$ | 3 nm              |
| $LP_{04}$           | 1.394 $\mu\text{m}$  | 1.393 $\mu\text{m}$ | 1 nm              |
| $LP_{05}$           | 1.514 $\mu\text{m}$  | 1.519 $\mu\text{m}$ | 4 nm              |

본 연구는 광주과학기술원의 ERC, BK-21, 한이태리 사업의 일부 지원금에 의한 것입니다.

1. B. H. Lee, *et al*, IEICE Trans. Commun. **E84-B**, 1247-1254 (2001).
2. H. Ke, *et al*, IEEE Photon. Technol. Lett. **13**, 1194-1196 (2001).
3. H. A. Macleod, *Thin-film optical filters 3rd/ed*, Ch. 2, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia (2001).
4. T. Makino, J. Lightwave Technol. **12**, 2092-2099 (1994).
5. D. Marcuse, *Theory of dielectric optical waveguides 2nd/ed*, Ch. 3, Academic Press, Inc., San Diego (1991).