

창 립
40주년학술대회
논문 87-K-20-5

푸리에 적분 방식에 의한 광도파로의 해석

이재승*, 신상영

한국과학기술원 전기및 전자공학과

Jae-Seung Lee*, Sang-Yung Shin

Fourier integral approach to the analysis
of optical waveguides

ABSTRACT

Using the transmission line model, we have developed a formalism which is fairly accurate and convenient for analyzing the dispersion characteristics of rectangular dielectric waveguides for integrated optics. The fields in open half space regions are expressed as a Fourier integral form. Including all the TE and TM polarized discrete modes in slab waveguide region, our calculation shows that the discrepancies between the previous vectorial wave analysis using one discrete mode and the brute-force numerical analysis for the rectangular dielectric waveguides can be fully reduced with this method.

해석한 결과도 최근에 발표되었다(2). 그러나 그 방법은 core 에서의 전자장을 가장 우수한 한 도파모드(guided mode)로 근사하였으므로 영역간의 경계에서 발생하는 모드간의 결합현상을 적절하게 포함시킬 수 없다. 그 결과 core 의 굴절율이 기본 구조(substrate) 의 그것과 큰 차이를 갖는 경우 오차가 특히 커지게 된다. 본 논문에서는 core 외부영역의 각 전자계 성분을 간단한 Fourier 적분으로 나타내어 등가의 도망방식을 적용하는 방법을 제안하고 core 영역에서 존재하는 모든 도파모드를 포함한 계산을 수행하여, 구형 광도파로의 고차모드에 대해서도 정확한 분산특성을 얻었다.

등가도망방식(equivalent network approach)에 의하여 광도파로를 해석하는 방법이 최근에 발표되었다(1). 이 방법은 광도파로의 전 영역을 변수분리가 가능한 여러 영역으로 나누고 각 영역의 전자장을 해당 영역의 모드 함수로 전개한 후 각 영역간의 경계에서 경계조건을 부가하여 광도파로의 분산(dispersion) 관계를 얻는 방법이다. 구형 광도파로와 같이 core 외부영역의 고유함수가 연속 spectrum 뿐인 경우를 등가도망방식에 의해

그림 1 과 같이 영역을 구분하여 구형 광도파로를 Fourier 적분방식으로 해석한다. 각 좌표들은 자유공간 전파상수의 역수로 규격화되었다. Y 방향으로의 묵시적(implicit)인 전자계 변화를 $e^{-\gamma y}$ 로 잡은 다음, 영역간의 경계면($x = a, b$)에 수직인 전자계 성분을 Maxwell 방정식에서 소거하여 다음과 같은 관계식들을 얻는다.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \epsilon_r(x, z) \right) \begin{pmatrix} E_y(x, z) \\ H_y(x, z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -j\xi \frac{\partial}{\partial z} & jZ_0 \frac{\partial}{\partial x} \\ -jY_0 \epsilon_r(x, z) \frac{\partial}{\partial x} & -j\xi \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x(x, z) \\ H_x(x, z) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \epsilon_r(x, z) - \xi^2 \right) \begin{pmatrix} E_x(x, z) \\ H_x(x, z) \end{pmatrix} = 0 \quad (2)$$

여기서 Z_0 는 자유공간 특이 임피던스 (intrinsic impedance) 이며 $Y_0 = 1/Z_0$ 이다. ϵ_r 은 relative electric permittivity 이다. 영역 3 에서의 전자기장방정식

$$\begin{aligned} E_x(x, z) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{jkx} + j(\epsilon_r - k^2 - \xi^2)^{1/2} z \begin{pmatrix} A(k) \\ B(k) \end{pmatrix} \\ H_x(x, z) & \quad (\epsilon_r = n_0^2) \end{aligned} \quad (3)$$

와 같이 Fourier 적분형태로 나타내고 이를 식 1 에 대입하여

$$\begin{aligned} E_x(x, z) &= \frac{Z_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk \frac{e^{jkx}}{\epsilon_r (\epsilon_r - k^2 - \xi^2)^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} dz' e^{-jkz'} \\ & \quad \left[\left(\frac{\partial}{\partial z^2} + \epsilon_r \right) H_y(x, z') + j\xi \frac{\partial}{\partial z'} H_x(x, z') \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} H_x(x, z) &= -\frac{Y_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk \frac{e^{jkx}}{(\epsilon_r - k^2 - \xi^2)^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} dz' e^{-jkz'} \\ & \quad \left[\left(\frac{\partial}{\partial z^2} + \epsilon_r \right) E_y(x, z') + j\xi \frac{\partial}{\partial z'} E_x(x, z') \right] \end{aligned} \quad (5)$$

와 같은 관계식을 얻는다. 이들 전자계 접선 성분들을 경계면 $x = a$ 에서의 연속조건을 이용하여 영역 2 의 모드함수로 전개하고 각 모드 상호간의 직교성을 써서 $x = a$ 에서 발생하는 영역 2 모드들간의 정확한 결합관계식을 얻는다.

다. $x = b$ 에서의 결합관계식도 마찬가지로 방법으로 얻을 수 있다. 이제 영역 2 내에서 단면공진조건 (transverse resonance condition) 을 이용하여 ξ 에 대한 본산관계를 구한다.

Core 이외의 모든 영역이 자유공간일 경우 에 대해 영역 2 의 모든 도파모드를 고려하여 그 본산특성을 계산하고 그림 2 및 그림 3 에 수치해석결과와 함께 나타내었다(3). 우수한 도파모드 하나만을 사용하여 얻은 결과도 나타내었는데 참고문헌 2 의 결과와 완전히 일치한다. Core 의 굴절률과 주위의 굴절률과의 차이가 클수록 또한 고차모드도 갈수록, 우수한 도파모드 하나만을 사용한 경우의 오차는 심해지지만 모든 도파모드를 고려한 경우는 이러한 오차가 상당히 감소됨을 알 수 있다.

참고문헌 2 의 방식은 영역 1 과 영역 3 의 굴절률이 다를 경우 z 방향으로 등가회로망을 구성하지만 Fourier 적분방식은 x 방향으로 등가회로망을 구성하게 되는 대응관계가 있다.

결론으로, 본 논문에서는 Fourier 적분방식을 이용하여 구형 광도파로를 해석하는 방법을 제시하였고 core 영역의 모든 도파모드를 고려한 계산을 수행하여 구형광도파로의 고차모드에 대하여도 정확한 본산특성을 얻었다.

참고문헌

1. S. T. Peng and A. A. Oliner, 'Guidance and leakage properties of a class of open dielectric waveguides: Part 1- mathematical formulation', IEEE Trans., MTT-29, 843-855,

1981.

2. M. Koshiba and M. Suzuki, 'Vectorial wave analysis of dielectric waveguides for optical-integrated circuits and its applications', J. Lightwave Technol., vol. 4, 656-664, 1986.
3. J. E. Goell, 'A circular-harmonic computer analysis of rectangular dielectric waveguides', Bell Syst. Tech. J., vol. 48, 2133-2160, 1969.

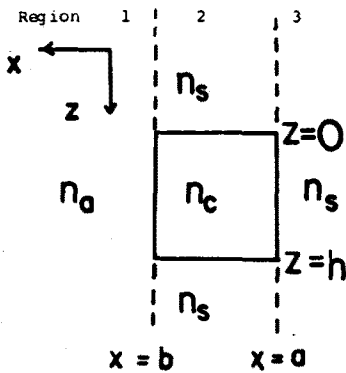


그림 1 구형 광도파로

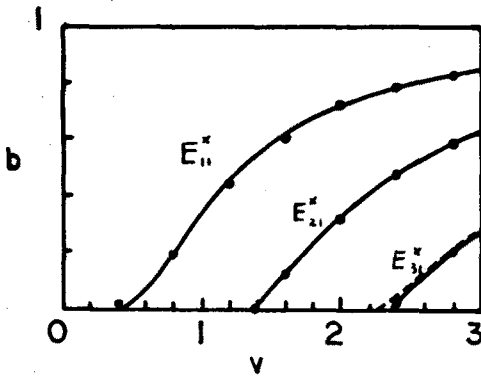


그림 2 $n_1=1, n_2-n_1=10^{-5}$ 인 경우의
본산특성 ($n_a=n_s=n_1, n_c=n_1$)
 $b=(k^2 - n_2^2)/(n_1^2 - n_2^2)$
 $v=t(n_1^2 - n_2^2)/\pi$

$$t = b - a, h = a$$

— 푸리에 적분 방법

----- 참고문헌 2

• 수치해석 방법

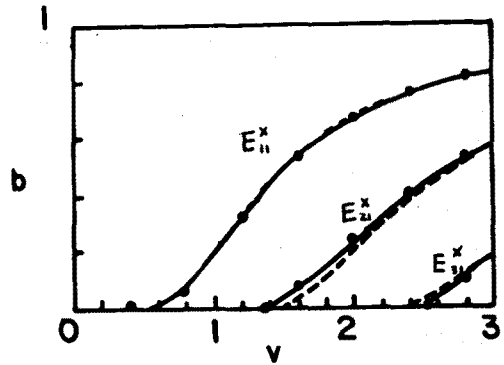


그림 3 $n_1=1, n_2-n_1=0.5$ 인 경우의
본산특성 ($n_a=n_s=n_1, n_c=n_1$)
 $b=(k^2 - n_2^2)/(n_1^2 - n_2^2)$
 $v=t(n_1^2 - n_2^2)/\pi$

$$t = b - a, h = a$$

— 푸리에 적분 방법

----- 참고문헌 2

• 수치해석 방법