

論文 2002-39SD-2-6

Wide Angle BPM을 이용한 광도파로열 격자 파장 필터의 해석

(Analysis of Arrayed Waveguide Grating Wavelength Filter using Wide Angle Beam Propagation Method)

朴 垞 吾 *, 鄭 榮 哲 *

(Joonoh Park and Youngchul Chung)

요 약

광도파로열 격자(AWG : Arrayed Waveguide Grating) 파장 필터는 전광 네트워크(All Optical Network)를 실현하는 매우 중요한 핵심 소자 중에 하나이다. 광도파로열 격자 파장 필터와 같은 광도파 소자를 해석 및 설계시 수학적 해석이 필요하며, 가장 대표적인 방법은 BPM(Beam Propagation Method)이다. 본 논문에서는 Paraxial BPM과 Wide Angle BPM을 InP/InGaAsP/InP 광도파로열 격자 파장 필터 해석에 적용시켜 정확도의 차이를 고찰해 보았다. WA-BPM을 구현하기 위하여 저차의 Pade Approximant를 적용하였다. 광도파로열 격자 파장 필터의 SLL(Side Lobe Level)과 삽입손실(Insertion Loss)을 비교하여 분석하였다. 광도파로열 격자 파장 필터를 정확하게 해석 및 설계하기 위해서는 고차의 WA-BPM을 사용해야 함을 확인하였다.

Abstract

The key component to accomplish the WDM all optical network is an Arrayed Waveguide Grating(AWG) wavelength filter. Numerical analysis is necessary for design and analysis of optical components like AWG wavelength filter. Beam Propagation Method(BPM) is the most widely-used method. In this paper, we analyze the difference between the paraxial BPM and the WA-BPM when they are applied to the analysis of InP/InGaAsP/InP AWG wavelength filter. The paraxial BPM is based on paraxial approximation, and the WA-BPM is based on the low order Pade approximant. The side lobe level(SLL) and insertion loss calculated from both methods are compared. The high order Pade approximant will be used to more accurate design and analysis of AWG.

I. 서 론

최근 음성, 영상, 데이터, 인터넷등 멀티미디어 서비

* 正會員, 光云大學校 電子工學部 電子通信工學科
(School of Electronics Engineering, Kwangwoon University)

※ 이 논문은 산업자원부 중기거점 과제(PPI 위탁연구) 사업비에 의하여 연구되었음.

接受日字:2001年9月12日, 수정완료일:2001年12月5日

스에 대한 수요가 폭발적으로 급증함에 따라 현재의 통신기반 수용능력은 점차 한계에 다다르고 있다. 대용량의 멀티미디어 서비스를 안정적이며, 고품질의 통신 서비스로 전달하기 위한 유력한 방안으로 초고속·대용량 정보를 전송할 수 있는 파장분할 다중화 방식(WDM : Wavelength Division Multiplexing)을 이용한 전광 네트워크(All Optical Network)의 구현이 전세계적으로 확산되고 있다.

WDM기술을 이용한 전광네트워크를 실현하기 위해서는 광도파로열 격자 (AWG:Arrayed Waveguide Grating)파장 필터, 동조 가능한 DBR 반도체 레이저, 수신

기, 파장 변환기 등의 부품들이 필요하다. 특히, 핵심소자인 광도파로열 격자 파장 필터는 다중화 기능, 역 다중화 기능, 라우팅 기능 등 여러 가지 역할을 할 수 있다^{[1][2]}. 이러한 광도파 소자들을 해석 및 설계하기 위해서는 수학적 해석을 통하여 가능하며, 이러한 방법으로는 여러 가지 방법이 있다. FDM(Finite Difference Method), FEM(Finite Element Method), FDTD(Finite Difference Time Domain), BPM(Beam Propagation Method) 등이 있다. 특히 BPM은 광파가 진행하는 방향에 대하여 균일한 도파 구조를 갖는 결합기는 물론이고, 교차형 결합기나 가변폭 방향성 결합기 등에 유용한 도파 해석 방법이다.

BPM은 FFT(Fast Fourier Transform) BPM의 형태로 처음 알고리즘이 발표되었다. 1990년대에 이르러 FD(Finite Difference)BPM으로 개선되었으며, 지금은 가장 보편적으로 쓰이고 있다^[3]. 일반적인 BPM은 광파가 진행하는 방향에 대해서 종축근사(Paraxial Approximation)를 한다. 이 방법은 대부분의 광도파 해석을 하는데 유용하지만, 종축근사를 함에 따라 비교적 큰 각도로 휘어진 도파로 등을 해석할 때에는 오차가 커지는 경향을 나타낸다. 따라서 각도가 큰 도파로를 해석할 경우에는 Helmholtz 방정식을 종축근사 하지 않고 계산해야 한다. 이러한 방법을 WABPM(Wide Angle Beam Propagation Method)라 하며, WABPM은 각도가 큰 도파로 해석에 오차가 작아지는 경향이 있다. 광도파로열 격자 파장 필터를 설계 및 해석함에 있어서, 진행각도가 큰 도파로가 삽입되어야 하는 경우가 있는데, 이 경우에는 WABPM을 사용하여야 한다^[4-5].

본 논문에서는 광도파로열 격자 파장 필터를 Paraxial BPM과 Wide Angle BPM을 이용하여 해석하였고, 광도파로열 격자 파장 필터를 통하여 두 개의 BPM의 특성을 비교 분석하였다^[6]. 또한 Wide Angle BPM을 통한 광도파로열 격자 파장 필터의 해석은 이 소자를 직접 제작할 경우에 근사한 특성을 갖는 것을 확인하였다.

II. 광도파로열 격자 파장 필터의 특성

1. 광도파로열 격자 파장 필터의 구성요소 및 기능
 광도파로열 격자 파장 필터(Arrayed Waveguide Grating Wavelength Filter)는 그림 1에 나타난 바와 같이 입력도파로, 자유 전파 영역인 두 개의 성형결합기

기, 두 개의 성형결합기를 연결하는 광도파로열, 출력도파로로 구성되어 있다^{[1][2]}.

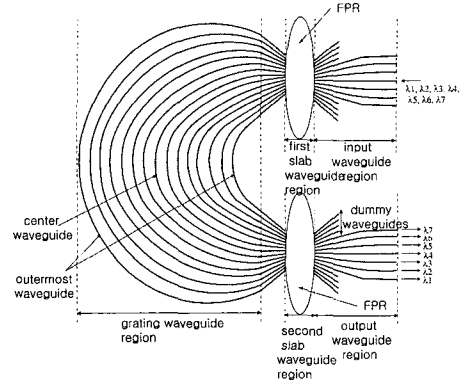


그림 1. 광도파로열 격자 파장 필터의 개략도
 Fig. 1. Layout of the AWG demultiplexer.

광도파로열 격자 파장 필터의 동작 상태를 살펴보면, 임의의 한 입력도파로로 입사된 광파는 입력도파로를 지나 첫 번째 성형결합기에 입력된다. 자유전파 영역인 첫 번째 성형결합기로 인해 입력된 광파가 회절(Diffraction)에 의해 분기된다. 분기된 광파는 광도파로열을 통과하여 두 번째 성형결합기에 여기된다. 광도파로열의 이웃한 도파로들 사이에는 ΔL 의 길이차이로 위상 변위차($2\pi n \Delta L / \lambda$)를 일으키게 되므로, 두 번째 성형결합기에서 집중되는 광파에 영향을 주어 파장이 따라 초점의 위치가 변하여 출력 도파로를 통해 전달된다. 이러한 작용을 하는 광도파로열 격자 파장 필터를 해석

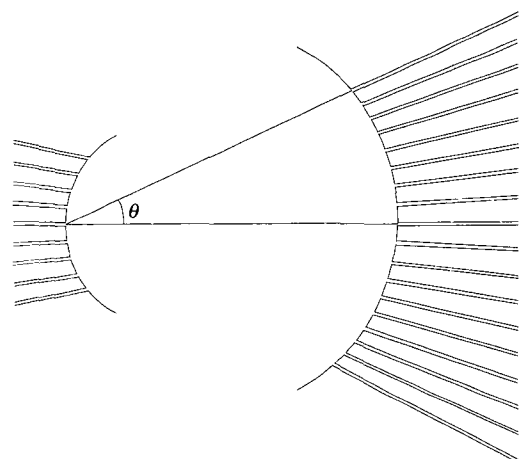


그림 2. 첫 번째 성형결합기의 개략도
 Fig. 2. Schematic figure of first star coupler.

및 설계하기 위해서는 BPM을 이용한다. 이때, 설계 및 해석시 오차를 최소화 하기 위해서는, 첫 번째 성형결합기에서의 중심도파로와 최외각 도파로 사이에 각도가 중요하다. 그림 2은 첫 번째 성형결합기를 확대한 그림이다. 입력도파로에서 입사한 광파는 회절에 의해 광파는 분기되면서 전파한다. 이 때에 입력 도파로와 광도파로열의 최외각 도파로 사이에 각도가 커질수록 Paraxial BPM에 의한 시뮬레이션 결과의 오차가 커진다. 따라서 각도가 커질수록 Wide Angle BPM을 사용해야 한다.

III. Paraxial FDBPM과 Wide Angle BPM

1. Paraxial Finite Difference Beam Propagation Method

도파로에서의 파동은 Helmholtz 방정식에 의하여 식 (3.1)과 같이 표현될 수 있다.

$$\nabla^2 \vec{E} + k_0^2 n^2(x, y, z) \vec{E} = -\nabla(\nabla \cdot \vec{E}) \quad (3.1)$$

여기서 $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ 는 공기중에서의 전파상수(propagation constant), $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$ 이다. 식 (3.1)의 우측 항을 통하여 각 편광 성분이 결합되게 되며, 일반적인 벡터(vector)파의 전파를 설명할 수 있다. 벡터파의 전파를 시뮬레이션 하는데에는 많은 계산량이 소요되기 때문에 대부분의 경우에는 도파로 내에서 스칼라 파의 전파만을 고려한다. 스칼라 파는 식 (3.1)의 우측항을 무시한 것이며, 이 경우 각 편광 성분 사이의 결합은 무시되며, 어느 한 편광성분에 대하여 식 (3.1)은 식 (3.2)와 같이 된다.

$$\nabla^2 E + k_0^2 n^2(x, y, z) E = 0 \quad (3.2)$$

여기에서 천천히 변하는 전계를 도입하면 전계는 식 (3.3)과 같다.

$$E = E e^{-jk_0 n z} \quad (3.3)$$

여기서 n_r 은 기준(reference) 굴절율이다. 식 (3.3)을 식 (3.2)에 대입하면 식(3.4)와 같은 형태로 나타난다.

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - j 2k_0 n_r \frac{\partial E}{\partial z} + \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right.$$

$$\left. + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_0^2 (n^2 - n_r^2) \right\} E = 0 \quad (3.4)$$

대부분 광도파로의 경우 z축에 대한 E의 변화는 매우 느리므로 식 (3.5)와 같은 부등호가 적용된다.

$$2k_0 n_r \left| \frac{\partial E}{\partial z} \right| \gg \left| \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} \right| \quad (3.5)$$

따라서 식 (3.4)에서 z에 대한 이차 미분항을 무시하면(중축 근사: paraxial approximation) 식 (3.4)는 식 (3.6)과 같이 된다.

$$j 2k_0 n_r \frac{\partial E}{\partial z} = \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_0^2 (n^2 - n_r^2) \right\} E \quad (3.6)$$

위의 식 (3.6)을 종종 Paraxial 파동 방정식이라 불려진다. 대부분의 BPM들은 식(3.6)의 해를 어떻게 수치적으로 구현하는가에 의존한다. 식 (3.6)의 formal operator solution은 식 (3.7)과 같이 나타난다.

$$E(z + \Delta z) = \exp \left[\frac{\Delta z}{2jk_0 n_r} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_0^2 (n^2 - n_r^2) \right\} \right] E \quad (3.7)$$

여기에서 y축 방향으로 굴절율이 변화하지 않는다고 가정하면 $\frac{\partial}{\partial y} = 0$ 라 할수 있고 식 (3.7)은 아래와 같이 나타난다.

$$E(z + \Delta z) = \exp \left[\frac{\Delta z}{2jk_0 n_r} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_0^2 (n^2 - n_r^2) \right\} \right] E \quad (3.8)$$

식 (3.8)을 Pade Approximation을 적용시키면 식 (3.9)와 같이 근사시킨다.

$$E(z + \Delta z) = \frac{1 + \frac{\Delta z}{4jk_0 n_r} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_0^2 (n^2 - n_r^2) \right\}}{1 - \frac{\Delta z}{4jk_0 n_r} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_0^2 (n^2 - n_r^2) \right\}} E(z) \quad (3.9)$$

식 (3.9)를 식 (3.10)과 같은 형태로 변형한다.

$$(1 - L)E(z + \Delta z) = (1 + L)E(z) \quad (3.10)$$

여기서 $L = \frac{\Delta z}{4jk_0 n_r} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_0^2 (n^2 - n_r^2) \right\}$ 이다.

여기에서 식 (3.11)과 같은 유한 차분 근사(Finite Difference Approximation)을 이용하여 정리한다.

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{E(x - \Delta x) - 2E(x) + E(x + \Delta x)}{\Delta x^2} \quad (3.11)$$

따라서 식 (3.11)을 이용하여 식 (3.10)의 좌변 식은 식 (3.12)와 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 & \left[1 - \frac{\Delta z}{4jk_0 n_r} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_0^2(n^2 - n_r^2) \right\} \right] E(x, z + \Delta z) \\
 &= E(x, z + \Delta z) - \frac{\Delta z}{4jk_0 n_r} \frac{E(x - \Delta x) - 2E(x) + E(x + \Delta x)}{\Delta x^2} \\
 &\quad - \frac{\Delta z}{4jk_0 n_r} k_0^2(n^2 - n_r^2)E(x, z + \Delta z) \\
 &= -\frac{\Delta z}{4jk_0 n_r} \frac{E(x - \Delta x, z + \Delta z)}{\Delta x^2} \\
 &\quad + \left\{ 1 - \frac{\Delta z}{4jk_0 n_r} \left[k_0^2 \{ n^2(x, z) - n_r^2 \} - \frac{2}{\Delta x^2} \right] \right\} E(x, z + \Delta z) \\
 &\quad - \frac{\Delta z}{4jk_0 n_r} \frac{E(x + \Delta x, z + \Delta z)}{\Delta x^2} \quad (3.12)
 \end{aligned}$$

또한 식 (3.11)을 이용하여 식 (3.10)의 우변 식은 식 (3.13)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \left[1 + \frac{\Delta z}{4jk_0 n_r} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_0^2(n^2 - n_r^2) \right\} \right] E(x, z) \\
 &= E(x, z) + \frac{\Delta z}{4jk_0 n_r} \frac{E(x - \Delta x) - 2E(x) + E(x + \Delta x)}{\Delta x^2} \\
 &\quad + \frac{\Delta z}{4jk_0 n_r} k_0^2(n^2 - n_r^2)E(x, z) \\
 &= \frac{\Delta z}{4jk_0 n_r} \frac{E(x - \Delta x, z)}{\Delta x^2} + \left\{ 1 + \frac{\Delta z}{4jk_0 n_r} \left[k_0^2 \{ n^2(x, z) - n_r^2 \} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{2}{\Delta x^2} \right] \right\} E(x, z) + \frac{\Delta z}{4jk_0 n_r} \frac{E(x + \Delta x, z)}{\Delta x^2} \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

식 (3.12)와 식 (3.13)을 이용하여 삼대각 행렬(Tridiagonal Matrix)방정식의 해를 계산할 수 있다. 그러므로 위의 해를 이용하여 Paraxial FD-BPM(Finite Difference Beam Propagation Method)를 실행할 수 있다.

2. Wide Angle Finite Difference Beam Propagation Method

식 (3.4)을 다시 적어보면 식 (3.14)와 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - j2k_0 n_r \frac{\partial E}{\partial z} + \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_0^2(n^2 - n_r^2) \right\} E = 0 \quad (3.14)$$

Paraxial FD-BPM은 식 (3.14)에서 천천히 변하는 전계(Slowly Varying Electric Field)를 도입하여 이차 미분항을 무시하였지만, Wide Angle FD-BPM은 이차 미분항까지 고려한다^[4, 5, 6, 9]. 식 (3.14)을 식 (3.15)의 형태로 변형시킨다.

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - j2k_0 n_r \frac{\partial E}{\partial z} + k_r^2 P E = 0 \quad (3.15)$$

여기서 $P = \frac{1}{k_r^2} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_0^2(n^2 - n_r^2) \right]$ 이다. 식 (3.15)를 인수분해하면 식 (3.16)과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{\partial}{\partial z} + jk_r(\sqrt{1+P}-1) \right] \\
 & \left[\frac{\partial}{\partial z} - jk_r(\sqrt{1+P}+1) \right] = 0 \quad (3.16)
 \end{aligned}$$

식 (3.16)의 해는 Forward Wave와 Backward Wave를 나타낸다.

$$\frac{\partial E}{\partial z} = -jk_r(\sqrt{1+P}-1)E \quad \text{Forward Wave} \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = +jk_r(\sqrt{1+P}+1)E \quad \text{Backward Wave}$$

식 (3.17)에서 광파가 진행되는 방향인 Forward Wave만을 고려한다.

$$\frac{\partial E}{\partial z} = -jk_r(\sqrt{1+P}-1)E \quad (3.18)$$

여기에서 $(\sqrt{1+P}-1)$ 의 항은 직접 계산이 복잡하기 때문에 유리함수로 근사 시킨다.

$$\frac{\partial E}{\partial z} = -jk_r \frac{N}{D} E \quad (3.19)$$

Wide Angle FD-BPM은 식 (3.19)을 얼마나 정확하게 근사 시키는가에 따라 광파가 급격하게 휘어진 도파로를 진행할 때 오차가 작아지게 된다. 식 (3.19)을 Paraxial FD-BPM과 같이 formal operator solution을 구하여 정리하면 식 (3.20)과 같이 나타내어 진다.

표 1. 낮은 차수의 Pade 근사
Table 1. Low-Order Pade Approximants.

차 수	표 현 식
Pade(1,0)	$\frac{N_1(P)}{D_0(P)} = \frac{P}{2}$
Pade(1,1)	$\frac{N_1(P)}{D_1(P)} = \frac{\frac{P}{2}}{1 + \frac{P}{4}}$
Pade(2,2)	$\frac{N_2(P)}{D_2(P)} = \frac{\frac{P}{2} + \frac{P^2}{4}}{1 + \frac{3P}{4} + \frac{P^2}{16}}$
Pade(3,3)	$\frac{N_3(P)}{D_3(P)} = \frac{\frac{P}{2} + \frac{4P^2}{3} + \frac{5P^3}{16} + \frac{P^4}{32}}{1 + \frac{11P}{64} + \frac{15P^2}{16} + \frac{5P^3}{32} + \frac{P^4}{256}}$

$$E(z + \Delta z) = \frac{1 - j\frac{1}{2}k_0 n_r \Delta z \frac{N}{D}}{1 + j\frac{1}{2}k_0 n_r \Delta z \frac{N}{D}} E(z) \quad (3.20)$$

여기에서 식 (3.20)을 근사화 하기 위하여 Pade Approximation을 표 1과 같이 도입하였다^[9].

식 (3.20)에 Pade(1,0) operator $\frac{N_1(P)}{D_0(P)} = \frac{P}{2}$ 를 유리함수 부분에 대입하면

$$E(z + \Delta z) = \frac{1 - j\frac{1}{4}k_0 n_r \Delta z P}{1 + j\frac{1}{4}k_0 n_r \Delta z P} E(z) \quad (3.21)$$

식 (3.21)과 같이 나타나는데, 식 (3.21)은 식 (3.9)와 동일한 식이다. 따라서 Pade(1,0)을 이용한 Wide Angle BPM은 천천히 변하는 전계를 도입하여 전개한 Paraxial BPM의 결과와 같이 나타난다. Pade(1,1)을 사용하여 식

(3.20)에 Pade(1,1) operator $\frac{N_1(P)}{D_1(P)} = \frac{P}{1 + \frac{P}{4}}$ 를 유리함수 부분에 대입하면 식 (3.22)와 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} E(z + \Delta z) &= \frac{1 - j\frac{1}{2}k_0 n_r \Delta z \frac{2P}{4+P}}{1 + j\frac{1}{2}k_0 n_r \Delta z \frac{2P}{4+P}} E(z) \\ &= \frac{P + \frac{4}{1 - jk_0 n_r \Delta z}}{P + \frac{4}{1 + jk_0 n_r \Delta z}} E(z) \end{aligned} \quad (3.22)$$

식 (3.22)를 Paraxial FD-BPM과 같은 형태로 전개하면 식 (3.23)과 같다.

$$\begin{aligned} &\frac{1}{(k_0 n_r \Delta x)^2} E(x - \Delta x, z + \Delta z) \\ &+ \left[\frac{n^2 - n_r^2}{n_r^2} + \frac{4}{1 + jk_0 n_r \Delta z} - \frac{2}{(k_0 n_r \Delta x)^2} \right] \\ &E(x, z + \Delta z) + \frac{1}{(k_0 n_r \Delta x)^2} E(x + \Delta x, z + \Delta z) \\ &= \frac{1}{(k_0 n_r \Delta x)^2} E(x - \Delta x, z + \Delta z) \\ &+ \left[\frac{n^2 - n_r^2}{n_r^2} + \frac{4}{1 - jk_0 n_r \Delta z} - \frac{2}{(k_0 n_r \Delta x)^2} \right] \\ &E(x, z + \Delta z) + \frac{1}{(k_0 n_r \Delta x)^2} E(x + \Delta x, z + \Delta z) \end{aligned} \quad (3.23)$$

식 (3.23)을 이용하여 삼대각 행렬(Tridiagonal Matrix) 방정식의 해를 계산할 수 있다. Pade(1,1)을 이용한

Wide Angle FD-BPM은 삼대각행렬을 한 번만 계산하면 된다. 따라서 Paraxial BPM과 Pade(1,1)을 이용한 WA-BPM은 계산시간이 같으며, 오차는 WA-BPM이 작아지는 것을 알 수가 있다. Paraxial BPM보다는 Pade(1,1)을 이용한 WA-BPM이 보다 효율적이다. 또한 Pade(2,2)를 이용하여 WA-BPM을 적용할 경우에도 식 (3.24)와 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} E(z + \Delta z) &= \frac{(1 - jk_0 n_r \Delta z)P^2 + (12 - jk_0 n_r \Delta z)P + 16}{(1 + jk_0 n_r \Delta z)P^2 + (12 + jk_0 n_r \Delta z)P + 16} E(z) \\ &= A \frac{(P+a^*)(P+b^*)}{(P+a)(P+b)} E(z) \end{aligned} \quad (3.24)$$

여기서 각 파라미터의 값은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} A &= \frac{1 - 4k_0^2 n_r^2 \Delta z^2 - jk_0 n_r \Delta z}{1 + 4k_0^2 n_r^2 \Delta z^2} \\ a &= \frac{1}{1 + 4k_0^2 n_r^2 \Delta z^2} \left[\sqrt{L^2 + M^2} \exp\left\{-j \tan^{-1} \frac{M}{L}\right\} \right. \\ &\quad \left. + \left[\sqrt{N^2 + Q^2} \exp\left\{j \tan^{-1} \frac{Q}{N}\right\} \right]^{1/2} \right] \\ b &= \frac{1}{1 + 4k_0^2 n_r^2 \Delta z^2} \left[\sqrt{L^2 + M^2} \exp\left\{-j \tan^{-1} \frac{M}{L}\right\} \right. \\ &\quad \left. - \left[\sqrt{N^2 + Q^2} \exp\left\{j \tan^{-1} \frac{Q}{N}\right\} \right]^{1/2} \right] \\ L &= 6 + 4k_0^2 n_r^2 \Delta z^2 \\ M &= 10k_0 n_r \Delta z, \\ N &= 16k_0^4 n_r^4 \Delta z^4 - 116k_0^2 n_r^2 \Delta z^2 + 20, \\ Q &= 48k_0^3 n_r^3 \Delta z^3 - 88k_0 n_r \Delta z \end{aligned}$$

식 (3.24)은 Multi-Step방법을 사용하여 Pade(1,1)을 이용한 WA-BPM과 같은 형태로 전개시켜 삼대각행렬 방정식의 해를 계산할 수 있다^[10]. Pade(2,2)을 이용한 Wide Angle FD-BPM은 삼대각행렬을 두 번 계산해야 하기 때문에 Paraxial BPM과 Pade(1,1)을 이용한 WA-BPM보다 Pade(2,2)을 이용한 WA-BPM의 계산 시간은 2배가 되며, 오차는 더욱 더 작아지는 것을 알 수 있다. 만약 Pade(3,3) 또는 Pade(4,4)를 이용할 경우에는 계산시간이 3배, 4배 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 또한 오차는 더욱 더 작아지는 경향이 있다.

IV. 광도파로열 격자 파장 필터의 특성 해석

1. 시뮬레이션에 고려된 도파구조

그림 3와 같은 도파 구조는 단위 도파로의 횡단면 굴절률 분포를 나타낸 것이다^[11]. 이 구조를 고려해서

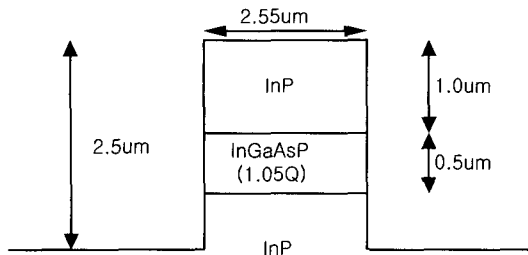


그림 3. 광도파로 격자파장 필터에 고려된 단위도파로의 횡단면 굴절율 분포

Fig. 3. Refractive index profile of cross section in the AWG wavelength filter.

해석 및 시뮬레이션을 수행함으로써 Paraxial BPM과 Wide Angle BPM의 차이를 알 수 있다.

InP기판에 0.5 μm-InGaAsP(1.05Q)의 코어층을 형성하고 다시 InP를 재성장시켜 슬랩도파로를 형성하였다. 그리고 축 방향 구속력을 강하게 주기 위하여 InP-InGaAsP-InP를 2.5 μm까지 식각을 시켜서 깊게 식각한 ridge (Deeply-etched Ridge)형 도파로를 형성하도록 설계하였다. 이 도파구조는 깊게 식각을 하였기 때문에 곡률손실이 거의 없고, 코어와 클래딩의 굴절율 차이도 상당히 크다. TE mode인 경우에 코어의 굴절율은 3.1939이고, 클래딩의 굴절율은 깊게 식각을 했기 때문에 1로 가정할 수 있다^[11]. 코어의 굴절율은 유효 굴절율법(EIM: Effective Index Method)을 이용하여 계산하였다^[11].

2. 광도파로 격자파장 필터의 해석 사양

Paraxial FDBPM과 Wide Angle FDBPM의 특성을 비교하기 위한 광도파로 격자 파장 필터에 사용되어진 설계 변수들은 표 2와 같다. 광파가 여기 되는 입력 도파로들간의 간격은 125 μm이고, 성형 결합기와 광도파로 열 경계면에서 도파로간의 간격이 넓으면 성형 결합기에서 광도파로 열로 전달되는 파워의 양이 적게 되므로, 첫 번째 성형결합기 출력 부분, 두 번째 성형결합기 입력 부분에 각각 Taper를 두어 파워 전달이 최대가 되도록 하였다. 이 때 Taper를 둔 구간의 길이는 100 μm이다. 곡률반경은 반경이 500 μm이상인 경우 손실이 0.18dB/cm이하이므로 곡률반경을 500 μm이상으로 하였다. 또한 광도파로 열에서 도파로와 인접한 도파로 사이에 각도가 0.87°이고, 도파로의 개수는 49개이다. 따라서 광도파로 열에서 중심도파로와 최외곽 도파로 사이의 각도는 20°이다.

표 2. AWG 설계 변수와 BPM 변수
Table 2. Parameters of AWG wavelength filter and BPM.

Number of Input and Output Waveguide	7
Focal Length	300 μm
Length Difference	67.2 μm
Diffraction Order	138
Channel Spacing	1.6nm(200GHz)
Free Spectral Range	11.2nm(1.4THz)
Core Refractive Index	3.195692
Cladding Refractive Index	1
Effective Index	3.182897
Taper Length	100 μm
Dispersion Angle	0.87°
Reference Refractive Index	3.18
Tilt Angle Range	20°

3. 횡축 메쉬 변화크기에 따른 비교

광도파로 열 격자 파장 필터의 해석 시 사용되는 BPM은 횡축, 종축 크기에 따라 광도파로 열 격자 파장 필터의 성능이 크게 좌우된다. 그러므로 횡축, 종축 크기를 적절하게 선택해야만 한다. 그러나 횡축, 종축의 크기를 작게 선택할수록 계산 시간은 늘어나므로 시간을 효율적으로 사용하면서도 광도파로 열 격자 파장 필터의 성능은 실제 제작할 경우에 근접해야 한다. 따라서 횡축, 종축의 크기를 변화해 가면서 중요한 성능 비교 분석이 가능한 SLL과 삽입손실(Insertion Loss)을 시뮬레이션 하였다.

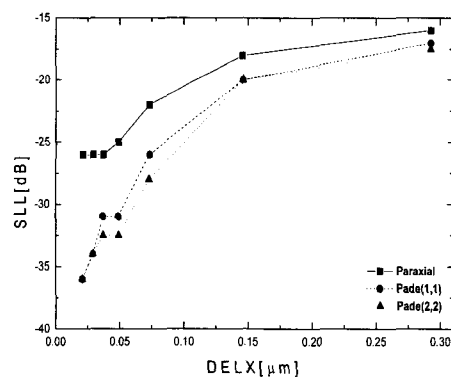


그림 4. 종축 메쉬 크기가 1 μm일 때, 횡축 메쉬 크기 변화에 따른 SLL(Side Lobe Level)

Fig. 4. Side Lobe Level versus lateral mesh size between Paraxial BPM and WA-BPM when the longitudinal mesh size is 1 μm.

그림 4는 종축 메쉬 크기를 $1\mu\text{m}$ 로 고정시킨후 Paraxial BPM과 Pade(1,1)을 이용한 WA-BPM, Pade(2,2)를 이용한 WA-BPM의 SLL을 비교한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 SLL은 Paraxial BPM보다 WA-BPM이 1-10dB 낮다. 그림 5는 종축 메쉬 크기를 $1\mu\text{m}$ 로 고정시킨후 Paraxial BPM과 Pade(1,1)을 이용한 WA-BPM, Pade(2,2)를 이용한 WA-BPM의 삽입 손실을 비교한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 삽입 손실은 Paraxial BPM보다 WA-BPM이 0.05-0.55dB 작은 것을 알 수 있다.

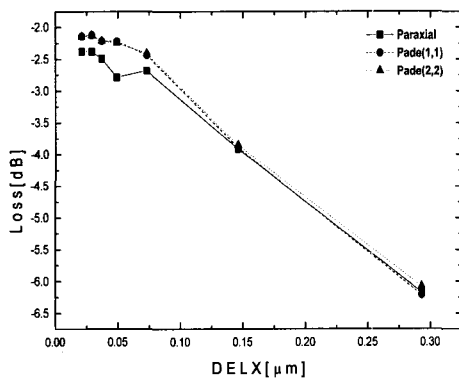


그림 5. 종축 메쉬 크기가 $1\mu\text{m}$ 일 때, 횡축 메쉬 크기 변화에 따른 Insertion Loss
Fig. 5. Insertion Loss versus lateral mesh size between Paraxial BPM and WA-BPM when the longitudinal mesh size is $1\mu\text{m}$.

4. 종축 메쉬 변화크기에 따른 비교

4.3절에서는 횡축 메쉬 크기 변화에 따른 SLL과 Insertion Loss에 관해서 다루었다. 본 절에서는 횡축 메쉬 크기를 $0.02\mu\text{m}$ 로 고정시킨후 종축 메쉬 크기 변화에 따른 SLL과 Insertion Loss에 관해서 시뮬레이션 하였다. 사용되어진 모든 파라미터는 표 2와 같다.

그림 6은 횡축 메쉬 크기를 $0.02\mu\text{m}$ 로 고정시킨후 Paraxial BPM과 Pade(1,1)을 이용한 WA-BPM, Pade(2,2)를 이용한 WA-BPM의 SLL을 비교한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 SLL은 Paraxial BPM보다 WA-BPM이 2-11dB 낮다. 그림 7은 횡축 메쉬 크기를 $0.02\mu\text{m}$ 로 고정시킨후 Paraxial BPM과 Pade(1,1)을 이용한 WA-BPM, Pade(2,2)를 이용한 WA-BPM의 삽입 손실을 비교한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 삽입 손실은 Paraxial BPM보다 WA-BPM이 0.11-0.23dB 작은 것을 알 수 있다.

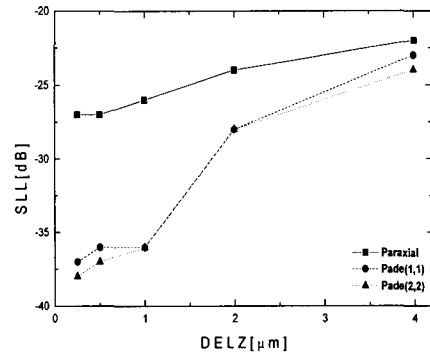


그림 6. 횡축 메쉬 크기가 $0.02\mu\text{m}$ 일 때, 종축 메쉬 크기 변화에 따른 SLL(Side Lobe Level)
Fig. 6. Side Lobe Level versus longitudinal mesh size between Paraxial BPM and WA-BPM when the lateral mesh size is $0.02\mu\text{m}$.

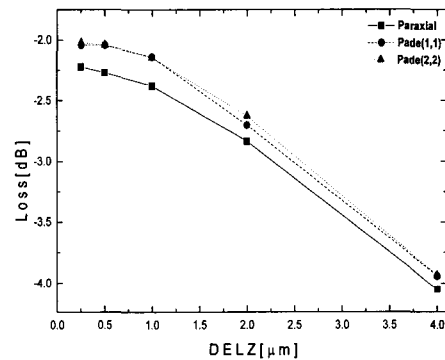


그림 7. 횡축 메쉬 크기가 $0.02\mu\text{m}$ 일 때, 종축 메쉬 크기 변화에 따른 Insertion Loss
Fig. 7. Insertion Loss versus longitudinal mesh size between Paraxial BPM and WA-BPM when the lateral mesh size is $0.02\mu\text{m}$.

5. 횡축, 종축 메쉬 변화에 따른 비교

이상 4.3절과 4.4절에서 살펴본 바와 같이 횡축, 종축의 메쉬 크기의 변화에 따른 SLL과 Insertion Loss에 대해서 살펴 보았다. 횡축 메쉬 크기를 $0.02\mu\text{m}$, 종축 메쉬 크기를 $0.25\mu\text{m}$ 로 할 경우, 광도파로열 격자 파장 필터의 파장에 대한 투과 특성 곡선은 그림 8에서 그림 10까지 나타났다. 그림 8은 Paraxial FDBPM으로 표 2에 나타난 데이터로 시뮬레이션한 그림이다. SLL은 -27dB 이며, Insertion Loss는 -2.22dB 이다. 그림 9는 Pade(1,1)을 이용한 Wide Angle FDBPM으로 표 2에 나타난 데이터로 시뮬레이션한 그림이다. SLL은 -37dB 이며, Insertion Loss는 -2.04dB 이다. 그림 10은 Pade(2,2)를 이용한 Wide Angle FDBPM으로 표 2에 나타

난 데이터로 시뮬레이션한 그림이다. SLL은 -38dB이며, Insertion Loss는 -2.02dB이다. 그림 8 - 그림10은 같은 조건을 가지고 같은 광도파로열 격자 파장 필터에 대해서 시뮬레이션을 하여 Paraxial BPM과 Pade(1,1), Pade(2,2)를 이용한 Wide Angle BPM의 차이를 보여준 그림이다.

횡축, 종축 메쉬 크기를 변화해 가면서 광도파로열 격자 파장 필터를 해석해 본 결과, WA-BPM이 Paraxial BPM보다 SLL에서는 1 - 11dB 낮게 나타나며, Insertion Loss에서는 0.05 - 0.55 dB 작게 나타났다. 또한 상대적으로 종축 메쉬 크기 변화보다는 횡축 메쉬 크기에 따라 SLL과 Insertion Loss가 작게 나타나는 것을 보았다. Paraxial BPM과 WA-BPM사이에서는 SLL과 Insertion Loss가 크게 차이가 나지만, WA-BPM에서의 Pade(1,1)과 Pade(2,2) 근사에서는 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 왜냐하면 광파가 진행하는 방향의 각도가 20° 밖에 되지 않기에 Pade(1,1)과 Pade(2,2)를 이용한 WA-BPM의 결과가 차이 없음을 알 수 있다. 급격하게 굽어진 도파로를 시뮬레이션할 경우에는 Pade(1,1)과 Pade(2,2)를 이용한 WA-BPM의 결과 차이가 크게 날 것이다. Wide Angle BPM도 경사가 커질 경우 고차의 Pade Approximant를 사용해야 한다. 또한 계산 시간에서는 Paraxial BPM과 Pade(1,1)을 이용한 Wide Angle BPM은 삼대각 행렬(Tridiagonal Matrix)를 한번만 계산해도 되지만, Pade(2,2)를 이용한 Wide Angle BPM에서는 삼대각

행렬을 두 번 계산해야 하기 때문에 계산 시간이 두배 소요된다. 물론 Pade(3,3), Pade(4,4)를 이용한 Wide Angle BPM일 경우에는 계산시간이 Paraxial BPM보다 3배, 4배 더 소요된다. 계산시간을 효율적으로 하기 위해서는 광도파로 구조에 적당한 횡축, 종축의 메쉬 크기를 선택하여야 한다. 그림 4 - 5를 비교해보면 횡축 메쉬 크기는 0.037 μm , 그림 6 - 7을 비교해보면 종축 메쉬 크기는 1 μm 의 이하의 값에서는 거의 변하지 않는 것을 볼 수 있다.

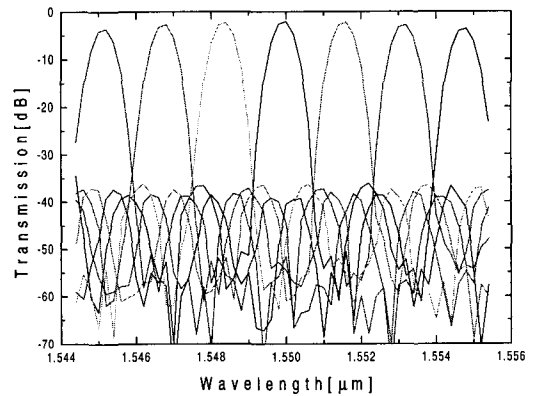


그림 9. 횡축 메쉬 크기가 0.02 μm , 종축 메쉬 크기가 0.25 μm 일 때, Pade(1,1) WA-BPM을 이용한 광도파로열 격자파장필터의 응답곡선

Fig. 9. AWG Characteristics based on Wide Angle BPM with Pade(1,1) when the lateral mesh size is 0.02 μm , the longitudinal mesh size is 0.25 μm .

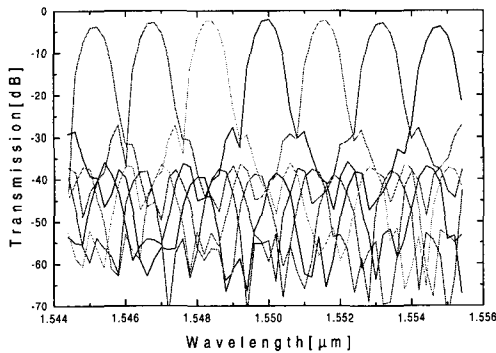


그림 8. 횡축 메쉬 크기가 0.02 μm , 종축 메쉬 크기가 0.25 μm 일 때, Paraxial BPM을 이용한 광도파로열 격자 파장필터의 응답곡선

Fig. 8. AWG wavelength filter characteristics based on Paraxial BPM when the lateral mesh size is 0.02 μm , the longitudinal mesh size is 0.25 μm .

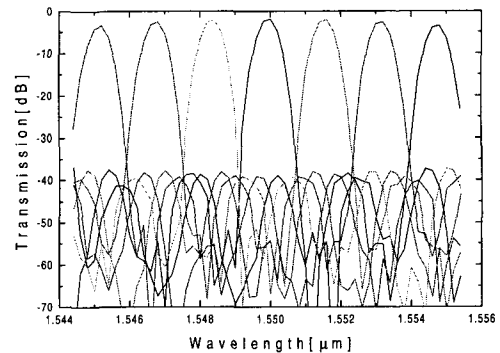


그림 10. 횡축 메쉬 크기가 0.02 μm , 종축 메쉬 크기가 0.25 μm 일 때, Pade(2,2) WA-BPM을 이용한 광도파로열 격자파장필터의 응답곡선

Fig. 10. AWG Characteristics based on Wide Angle BPM with Pade(2,2) when the lateral mesh size is 0.02 μm , the longitudinal mesh size is 0.25 μm .

따라서 InP/InGaAsP(1.05Q)/InP 인 광도파로열 격자 파장 필터의 경우에는 횡축, 종축의 메쉬 크기가 $0.037\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}$ 가 적정하다고 할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 전광 네트워크(All Optical Network)의 핵심소자인 광도파로열 격자 파장 필터를 Paraxial BPM과 Pade Approximant를 이용한 Wide Angle BPM을 이용하여 해석하여, 두 개의 BPM의 성능을 비교 분석하였다.

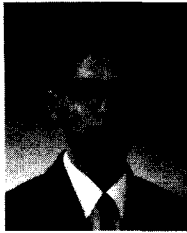
약 20° 정도 경사진 도파로가 포함된 광도파로열 격자 파장 필터를 설계 및 해석함에 있어서, Paraxial BPM과 Wide Angle BPM 사이에서는 SLL에서는 1 - 11dB 낮게 나타나며, Insertion Loss에서는 0.05 - 0.55 dB 작게 나타났다. 또한 상대적으로 종축 메쉬 크기 변화보다는 횡축 메쉬 크기에 따라 SLL과 Insertion Loss가 작게 나타나는 것을 보였다. 계산시간을 효율적으로 하기 위해서는 InP/InGaAsP(1.05Q)/InP인 광도파로열 격자 파장 필터의 경우에는 횡축 메쉬 크기는 $0.037\mu\text{m}$, 종축 메쉬 크기는 $1\mu\text{m}$ 가 적정하다고 볼 수 있다.

본 논문에서는 약 20° 정도 경사진 도파로가 포함된 광도파로열 격자 파장 필터를 시뮬레이션 하는데 있어서 Pade(1,1)과 Pade(2,2)를 이용한 Wide Angle BPM이 차이가 거의 없지만, 급격하게 경사진 도파로를 시뮬레이션을 할 경우에는 차이가 커질 것으로 사료되며, 이때에는 고차의 Pade Approximant를 사용해야 할 것으로 사료된다. 또한 일반적인 광도파로 소자를 설계 및 해석함에 있어서 고차의 Pade Approximant를 사용하는 것이 시뮬레이션 오차를 줄이는데 도움이 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Meint K. Smit, Cor Van Dam, "PHASAR-Based WDM-Devices: Principles, Design and Applications" *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, Vol. 2, No. 2, pp. 236-250, 1996.
- [2] Hiroshi Takahashi, Kazuhiro Oda, Hiroma Toba, Yasuyuki Inoue "Transmission Characteristics of Arrayed Waveguide $N \times N$ Wavelength Multiplexer" *IEEE Journal of Lightwave Technology.*, Vol. 13, No 3, pp. 447-455, 1995.
- [3] Youngchul Chung, Nadir Dagli, "An Assessment of Finite Difference Beam Propagation Method" *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 26, No. 8, pp. 1335-1339, 1990.
- [4] David Yevick, Moses Glasnet, "Forward Wide Angle Light Propagation in Semiconductor Rib Waveguides", *Optics Letters*, Vol. 15, No. 3, pp 174-176, 1990.
- [5] Y. Chung, "Factored Wide Angle Propagation Technique applied to Turning Mirror Simulation", *Electronics Letters* Vol. 32, No. 6, pp 545-547, 1996.
- [6] 박준오, 정영철 "Wide Angle BPM을 이용한 AWG 시뮬레이션", COOC 2000, pp 29-30, 2000
- [7] Pao-Lo Liu, Qida Zhao, Fow-Sen Choa, "Slow-Wave Finite-Difference Beam Propagation Method", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 7, No. 8, 1995.
- [8] Fred Ma, "Slowly Varying Envelope Simulation of Optical Waves in Time Domain with Transparent and Absorbing Boundary Conditions" *IEEE Journal of Lightwave Technology* Vol. 15, No 10, pp. 1974-1985, 1997.
- [9] Igor Ilic, Robert Scarmozzino, Richard M. Osgood, "Investigation of the Pade Approximant-Based Wide-Angle Beam Propagation Method for Accurate Modeling of Waveguiding Circuits", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 14, No 12, pp. 2813-2822, 1996.
- [10] G. Ronald Hadley "Multistep method for wide-angle beam propagation" *Optics Letters*. Vol 17, No 24, 1743-1745, 1992.
- [11] Joonoh Park, Youngchul Chung, "Flat Passband Design of Phased Array Wavelength Router using Misaligned Array Waveguides", *Journal of Electrical Engineering and Information Science.*, Vol. 5, No. 3, pp 235-240, 2000.

저 자 소 개



朴 垞 棼(正會員)

1999년 2월 : 광운대학교 전자통신
공학과 학사. 2001년 : 2월 광운대
학교 전자통신공학과 석사. 현재 :
광운대학교 전자통신공학과 박사
과정. <주관심분야> 광통신용 소
자 및 광통신시스템

鄭 榮 哲(正會員) 第38卷 SD編 第8號 參照