

## 회절격자구조를 갖는 도파로 소자의 엄밀한 광선광학적 결합계수 계산

박선택 · 송석호 · 오치환 · 김필수

한양대학교 물리학과

(1999년 2월 19일 받음, 1999년 7월 20일 수정본 받음)

엄밀한 결합패를 적용하는 광선광학적 방법에 의해, 임의의 격자구조를 갖는 도파로 회절소자의 결합계수를 계산하였다. 엄밀한 광선광학적 방법으로 다양한 격자구조(사각형, 정현파, 삼각형, 사다리꼴)에 대한 결합계수를 계산하였으며, 기존의 근사적 광선광학적 방법이나 결합모드 방법들과 비교 분석하였다. 특히, 사각형 격자의 경우에는 격자의 깊이 변화뿐만 아니라 격자영역비(duty-cycle)에 따른 결합계수를 구하였다. 엄밀한 광선광학적 방법은 강한 결합조건에서도 기존의 방법들에 비하여 도파로 회절격자의 결합계수를 매우 정확하게 결정할 수 있음을 확인하였다.

### I. 서 론

회절격자(diffraction grating)는 광통신용 DFB LD, WDM 통신용 파장필터, 광신호 변조기 등 도파로 구조를 갖는 많은 광소자등에서, 보다 다양한 기능과 높은 성능을 부여하는 핵심적 요소가 되고 있다.<sup>[1]</sup> 이러한 도파로 회절격자의 특성은 도파로내에서 전파되는 광신호모드와 격자모드간의 에너지 결합 정도를 나타내는 결합계수(coupling coefficient)로 표현될 수 있다.<sup>[2]</sup> 결합계수를 계산하는 방법으로는 격자에 의한 섭동모드(perturbation mode)와 비섭동모드(unperturbation mode)가 갖는 필드분포간의 중첩적분으로 기술되는 결합모드 방법(Coupled Mode Method: CMM)이 가장 많이 사용되어왔다.<sup>[3]</sup> 이 방법은 도파모드의 관점에서 에너지 결합 정도를 해석하므로 격자의 깊이가 작은 약한 결합(weak coupling)일 경우에는 비교적 정확하나, 격자깊이가 커질수록 결합이 강해져(strong coupling) 오차가 점차 증가하게 되며, 격자구조가 없는 비섭동 도파로의 기하학적 구조를 어떻게 설정하는가에 따라 결합계수의 값이 크게 좌우된다.<sup>[4]</sup>

보다 직관적인 관점에서 결합계수를 결정할 수 있는 방법으로서, 광신호가 도파로내에서 지그재그로 전반사 되면서 전파한다는 기하광학적 접근에 따른 광선광학적 방법(Ray-Optics Method : ROM)이 제안되었다.<sup>[5,6]</sup> CMM과 달리, 결합계수의 값을 계산할 때 비섭동 도파로의 기하학적 구조를 설정하는데 임의성을 배제할 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 지금까지 발표된 ROM은 근사적 방법으로서 결합계수의 분석적 해를 얻기 위해, 격자깊이가 매우 작다는 약한 결합조건과 격자에 의한 1차 회절효과가 지배적이고 2차 이상의 회절효과는 무시할 수 있다는 가정을 하고있다. 그런데, 격자깊이가 커질수록 결합조건은 점차 강해지며 2차이상의 고차 회절항들도 무시할 수 없을 만큼 커지게 된다. 도파로의 회절격자구조가 강한 결합조건을 만족할수록, 약한 섭동모드에 근거하는 CMM이나 1차 회절항만을 고려하는 ROM에 의한 계산결과는 점차적으로 실제적인 값에서 크게 벗어나게 된다.

본 논문에서는 DFB 격자와 같은 도파로 소자의 결합계수를 결정하기 위한 회절효율을 계산할 때, 강한 결합조건을 포함하며 2차 이상의 고차 회절항들까지도 고려할 수 있는 엄밀한 광선광학적 방법(Rigorous Ray-Optics Method : RROM)을 적용하고자 한다. RROM을 이용한 예로서는 격자 외부결합기(grating output-coupler)의 결합효율(coupling efficiency)을 계산하는 방식이 제안된바 있다.<sup>[8]</sup> 그러나, WDM 파장필터와 같이 회절된 광신호가 도파로내를 다시 전파하게 되는 경우에 대해서는 아직 적용된바가 없으며, 특히, 본 저자가 아는 범위내에서 판단하기에는 RROM을 CMM이나 근사적 방식인 ROM 등과 비교 분석한 것은 본 논문에서 처음 시도된 것이라 하겠다. 본 논문에서는 엄밀한 결합파이론(rigorous coupled wave theory)<sup>[7]</sup>에 근거하여 사각형, 정현파, 삼각형, 사다리꼴 등의 다양한 격자모양을 갖는 DFB 도파로 회절격자구조들의 결합계수를 제안된 RROM에 의해 계산하였으며, 기존에 발표된 ROM과 CMM의 결과들과 비교 분석하였다. RROM과 ROM, CMM등으로 계산된 결합계수 값들은 격자 깊이가 작을수록 비교적 잘 일치되지만, 격자 깊이가 커질수록 결합계수 계산 값의 차이가 점차 심화되었다. 각 방법에 대한 결합계수의 상대적 차이를 계산하여 각각의 방법들이 적용될 수 있는 결합조건 범위를 알아보았다. 특히, 사각형 격자모양일 때 그 차이가 가장 두드러지게 나타났는데, 사각형 격자 한 주기내의 격자영역비(duty-cycle)에 따른 결합계수의 값을 RROM과 CMM으로 계산하여 봄으로써 보다 자세한 분석결과를 제시하였다.

### II. 엄밀한 광선광학적 방법 (Rigorous Ray-Optics Method)

그림 1은 덮개층(cladding layer), 도파층(guiding layer), 기판층(substrate layer)으로 구성된 3층 DFB 도파로 구조의 개략도이다.  $n_a$ ,  $n_b$ ,  $n_c$ 는 각각 덮개층, 도파층, 기판층의 굴절율이고,  $t$ 는 도파층의 두께이다. 도파층내에서 광신호의 도파과

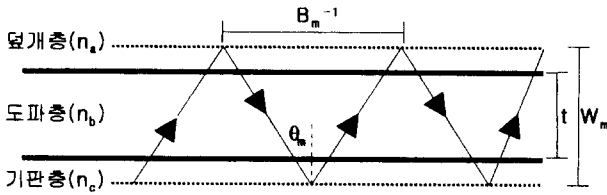


그림 1. 3층 도파로내를 전파하는 광신호의 광선광학적 해석 개념도.

정을 기하광학적 관점에서 보면, 그림 1처럼 도파로내의 광신호는 입사각  $\theta_m$  을 가지고 덮개층과 기관층에 차례로 전반사되면서 지그재그로 도파한다고 가정한다.  $\theta_m$  은  $m$ -모드의 도파면에 대한 입사각이고, 도파되는 광신호가 느끼는 도파층의 두께는 Goos-Hanchen shift 효과에 의해 유효두께(effective thickness),  $w_m$  으로 정의될 수 있다.<sup>[9]</sup>

$$w_m = t + \frac{1}{q_m} + \frac{1}{p_m} \quad (1)$$

여기서,  $q_m = k_0 \sqrt{n_m - n_a}$ ,  $p_m = R_0 \sqrt{n_m - n_c}$  이고,  $k_0$ 는 진공에서의 전파상수,  $n_m = n_b \sin \theta_m$ 은  $m$ -모드의 유효굴절율이다. 그림 1과 같은 도파로 구조에서, 덮개층과 도파층 사이, 혹은, 도파층과 기관층 사이에 회절격자구조가 있게되면, 도파로 내로 전파되는 광신호 모드에 영향을 주게된다. 한 예로, 그림 2에 그림 1의 도파층과 덮개층 사이에 임의 모양의 회절격자가 있는 경우가 자세히 도시되어 있다.  $\Lambda$ 는 격자의 주기이고  $d$ 는 격자의 최대깊이이다. 광신호 도파모드와 회절격자모드간의 결합계수  $\kappa$ 는 기하광학적 관점으로 분석하면 아래와 같이 결정될 수 있다.<sup>[15]</sup>

$$\kappa = B_m \sqrt{\eta_m} \quad (2)$$

$\eta_m$ 은  $m$ -번째 도파모드의 격자에 의한 회절효율을 나타내며,  $B_m$ 은 회절격자와 지그재그 경로를 갖는  $m$ -모드 광신호간의 단위길이당 결합률(bound rate)로서, 다음과 같이 정의된다.

$$\kappa_m = (2w_m \tan \theta_m)^{-1} = \frac{\sqrt{n_b^2 - n_m^2}}{2n_m w_m} \quad (3)$$

따라서, 식(2)의 결합계수는  $\eta_m$ 을 어떻게 계산하는가에 따라 정확도가 결정된다. 기존의 광선광학적 방법인 ROM에서는,  $\eta_m$ 의 분석적 해를 얻기 위해 약한 결합조건에 근거한 2

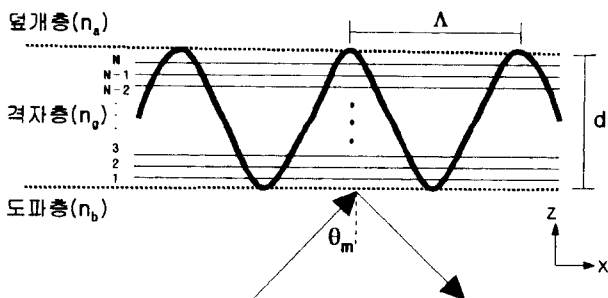


그림 2. N개의 얇은 평면격자층으로 나뉘어진 회절격자의 상세도.

차 이상의 고차회절항을 무시하는 근사식을 사용하였다. 그러나, 본 논문에서 적용하고자하는 RR0M이란 기존의 자유공간 회절광학계에서 매우 정확한 회절효율을 계산하기 위해 발전되어왔던 엄밀한 결합파 이론(RCWT: rigorous coupled wave theory)을 적용하여, 매우 정확한  $\eta_m$ 의 수치적 해를 구할 수 있는 방법이다. 그러므로, RR0M은 임의의 격자구조에 대한 정확한 회절효율 계산과 2차 이상의 고차회절항까지 고려해야 되는 강한 결합의 경우에도 결합계수를 구할 수 있는 매우 정확한 방법이라 할 수 있다.

우선, RR0M의 근간을 이루는 RCWT를 살펴보면 다음과 같다. 그림 2에 도시된 바와 같이 도파층(b)과 덮개층(a) 사이에 있는 임의모양의 회절격자층(g)은 표면에 평행하게 여러개의 얇은 층(slab)으로 나누어 총 N개의 매우 얇은 평면격자층들로 구성되어 있다고 가정하자. RCWT란 각 층마다 정확한 경계치 조건을 적용하여 총 N개의 층을 거칠 때마다 결합모드 방정식의 해를 구함으로써, 임의모양의 회절격자에 의한 모든 차수의 반사 회절효율과 투과 회절효율을 계산하는 방법이라 요약될 수 있다. RCWT를 이용하여 TE 편광을 갖는 광신호가 그림 2에 보는바와같이 회절격자층에  $\theta_m$  각을 가지고 입사할 때의 회절효율을 구하여보자. 도파층(영역b)에서의 복소전기장은, 도파층에서 격자층(영역g)으로 입사되는 입사파와 반사된 회절파들의 합으로 나타낼 수 있으며, 아래와 같이 표현된다.

$$E_b = \exp(-jk_b \cdot \vec{r}) + \sum_{i=-\infty}^{\infty} R_i \exp(-jk_{bi} \cdot \vec{r}) \quad (4)$$

$\lambda$ 는 진공중에서의 파장이다.  $\vec{k}_b$ 는 영역 b에서 격자층으로 입사되는 입사파의 파수 벡터로 크기는  $2\pi n_b / \lambda$ 이고  $R_i$ 는 영역 b로 반사된  $k_{bi}$ 의 파수를 갖는  $i$ 차 회절파의 진폭이다. 또한, 영역 a에서의 복소전기장은 투과된 회절파들만의 합으로 나타낼 수 있으므로,

$$E_b = \sum_{i=-\infty}^{\infty} T_i \exp[-jk_{bi} \cdot (\vec{r} - d\hat{z})] \quad (5)$$

$T_i$  영역 a로 투과된  $k_{ai}$ 의 파수를 갖는  $i$ 차 회절파의 진폭이다. 격자층(영역 g)을 이루는 z-축에 수직방향으로 쌓여있는 총 N개의 층들에서, 만일 각 층의 두께가 충분히 얇다면 각각을 평면격자로 취급할 수 있다. 한 예로, 영역 g의 n번째 층은 유전율  $\epsilon_b$ 과  $\epsilon_a$ 인 물질이 x-축 방향을 따라 교대로 있다고 볼 수 있다. 따라서, n번째 층의 유전율은  $\epsilon_n(x, z_n) = \epsilon_n(x + \Lambda, z_n)$ 와 같이 주기성을 가지므로, 이를 푸리에 급수로 전개하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\epsilon_n(x, z_n) = \epsilon_b + (\epsilon_a - \epsilon_b) \sum_{h=-\infty}^{\infty} \epsilon_{h,n} \exp(jhKx) \quad (6)$$

$z_n$ 은 n번째 얇은 층의 z-축 좌표이고,  $K=2\pi/\Lambda$ 는 주기가  $\Lambda$ 인 회절격자 벡터의 크기이다. 그리고,  $\epsilon_{h,n}$ 은 복소 조화 진폭 계수로 회절격자의 모양을 결정하는 함수  $f(x, z_n)$ 와는 푸리에 변환관계를 갖는다.

$$\epsilon_{n,n} = (1/\Lambda) \int_0^\Lambda f(x, z_n) \exp(-jhKx) dx \quad (7)$$

따라서, 각 층에서의 전장은 주기적인 회절격자의 구조에 따른 공간 조화함수(space harmonics)로 전개할 수 있으며, 이들은 각 층에서의 회절차수에 대응되므로, 영역 g에서의 전장은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_g = \sum_{i=-\infty}^{\infty} S_{i,n}(z) \exp(-j\vec{\sigma}_{i,n} \cdot \vec{r}) \quad (8)$$

$S_{i,n}(z)$ 는 n 번째 격자층 내에서의 i 차 회절파가 갖는 공간조화 필드의 진폭이고,  $\vec{\sigma}_{i,n}$ 는 i 차 회절파의 파수 벡터로 아래처럼 주어진다.

$$\vec{\sigma}_{i,n} = \vec{k}_{g,n} - i\vec{K}$$

여기에서,  $\vec{k}_{g,n}$ 는 0차 회절파의 파수 벡터이고  $\vec{K}$ 는 회절격자 벡터이다. 도파층인 영역 g에서는 각 격자층에 대해 다음과 같은 파동방정식이 모두 만족되어야 한다.

$$\nabla^2 E_{g,n} + k^2 \epsilon_n(x, z_n) E_{g,n} = 0 \quad (9)$$

그러므로, 식(6)과 (9)로부터, n번째 격자층에 대한 결합파 방정식은

$$\frac{d^2 S_{i,n}(z)}{dz^2} - j2(k_{g,n}^2 - k_b^2 \sin^2 \theta_m)^{1/2} \frac{dS_{i,n}(z)}{dz} + K^2 i(l-i) S_{i,n}(z) + k^2 (\epsilon_a - \epsilon_b) \sum_{h=1}^{\infty} [\epsilon_{h,n} S_{i-h,n}(z) + \epsilon_{h,n}^* S_{i+h,n}(z)] = 0 \quad (10)$$

이다.  $l = 2\Lambda(\epsilon_b)^{1/2} \sin \theta_m / \Lambda$  이고, l이 정수이면 브래그 조건을 만족함을 의미한다.

격자의 회절효율을 구하는 과정은 위에서 구한 식들을 이용하여 다음과 같은 3단계로 이루어진다. 먼저, 식(10)의 n번째 격자에 대한 결합파 방정식에서, 상태변수방법(state-variables method)<sup>[7]</sup>을 이용하여  $S_{i,n}(z)$ 에 대한 해를 구한다. 그리고, 각 격자층마다 전자기파의 경계조건을 적용하여 총 N개의 연립 방정식을 얻는다. 마지막 3단계에서는, 경계조건으로부터 얻은 방정식 배열로부터 식(4)와 (5)에 정의된 진폭  $R_i$ 와  $T_i$ 를 구함으로써, 임의의 i 차 회절광에 대한 회절효율을 구할 수 있다. 즉, 영역 b에서의 i 차 반사회절효율  $\eta_{bi}$ 과 영역 a에서의 i 차 투과회절효율  $\eta_{ai}$ 은 각각 다음과 같이 얻어진다.

$$\eta_{b,i} = \text{Re}[(\vec{k}_{bi} \cdot \hat{z}) / (\vec{k}_{b0} \cdot \hat{z})] R_i R_i^* \quad (11)$$

$$\eta_{a,i} = \text{Re}[(\vec{k}_{ai} \cdot \hat{z}) / (\vec{k}_{a0} \cdot \hat{z})] T_i T_i^* \quad (12)$$

결과적으로, 식(2)에 정의된 결합계수를 보다 정확히 구하기 위하여 RROM에서 도입한 엄밀한 결합파이론은, 2차 이상의 고차 회절항까지 고려하여 격자의 회절효율을 식(11)와 (12)에서와 같이 계산할 수 있을 뿐만 아니라, 격자층을 N개의 매우

얇은 평면격자층으로 나누어 계산하므로써, 임의의 격자모양에 대해서도 식(6)과 같이 공간조화함수의 합으로 전개하여 정확한 회절효율을 얻어낼 수 있다. 그러므로, 기하광학적 개념에 엄밀한 결합파이론을 적용하여 회절효율을 구하는 광선광학적 방법(RROM)은, 이전에 발표된 CMM이나 ROM이 취한 근사적 접근의 한계를 벗어나 보다 정확하게 결합계수를 결정할 수 있을 뿐만 아니라, 다양한 형태의 회절격자구조를 갖는 도파로 소자의 해석에도 쉽게 적용할 수 있는 유용한 결합계수 계산방법이라 하겠다. 다음절에서 RROM을 적용하는 구체적인 예를 들어 기존의 방법들과 비교 분석하고자 한다.

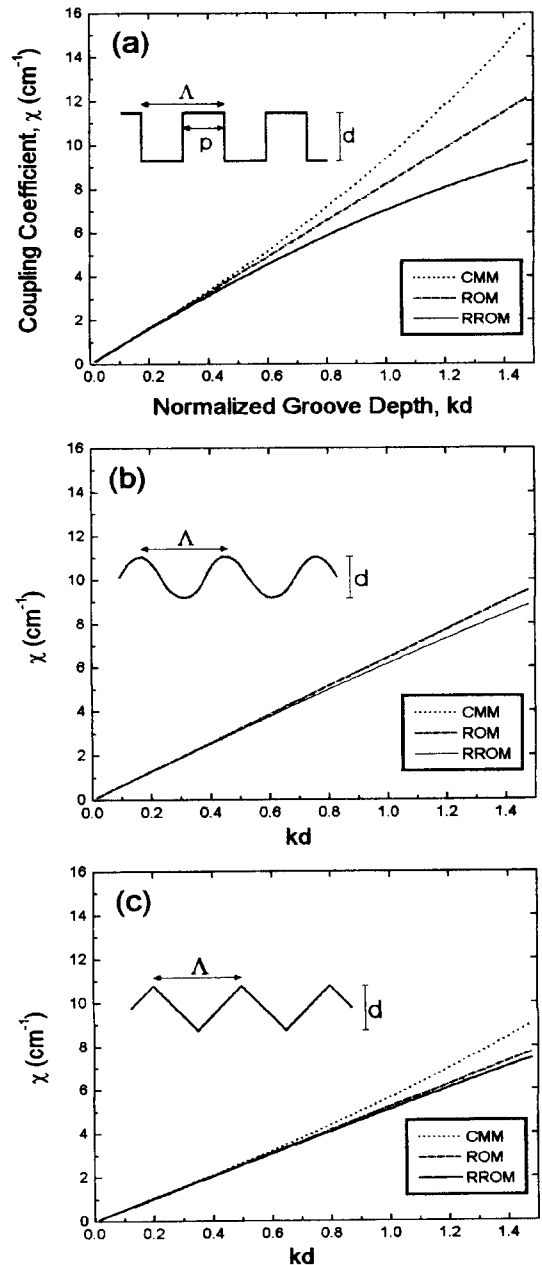


그림 3. RROM(직선), ROM(일점쇄선), CMM(점선)을 사용하여 계산한 (a) 사각형, (b) 정현파, (c) 삼각형 격자모양들에 대한 정규화된 격자깊이, kd,에 따른 결합계수.

### III. 계산결과

그림 1의 도파로 구조에 사각형, 정현파, 삼각형 모양의 격자가 있을 때의 결합계수를 계산하였고, 기존에 발표된 ROM 및 CMM에 의한 계산결과와 비교하였다. 또한, 사다리꼴 격자를 갖는 도파로 구조에 대해서는 사다리꼴의 기울기가 변할 때 격자깊이에 따른 결합계수 값을 계산하여 CMM에 의한 계산 결과와 비교하였다. 사각형 격자구조를 갖는 도파로에 대해서는 격자의 깊이가 커짐에 따라 격자영역비(duty-cycle)의 변화가 결합계수에 주는 영향을 분석하였다. 계산에 사용된 파장은  $0.85 \mu\text{m}$ , 덮개층, 도파층, 기판층의 굴절율은 각각,  $n_a = 3.4$ ,  $n_b = 3.6$ ,  $n_c = 3.59$ 이고, 도파층의 두께는  $2 \mu\text{m}$ 로 설정하였다. 그리고, 파수( $k$ )와 격자의 깊이( $d$ )을 곱한 값,  $kd$ 가 0~1.5 까지의 넓은 범위를 고려하여, 약한 결합영역에서 뿐만 아니라 강한 결합영역까지도 계산하였다.

그림 3은  $kd$  값에 따른 사각형, 정현파, 삼각형 격자구조를 갖는 도파로 소자의 결합계수의 값을 RROM, ROM, CMM 등으로 계산한 결과이다. RROM으로 계산된 결과는 직선, ROM은 일점쇄선, 그리고 CMM은 점선으로 표시하였다. 그림 3(a)는 사각형 격자구조에 대한 것으로, 격자의 깊이( $p$ )을 주기( $\Lambda$ )로 정의되는 격자 영역비(duty-cycle)는 0.5로 설정하였다.  $kd$ 가 0에서 1.5까지 증가함에 따라 3가지 방법들로부터 얻어진 계산 값들의 차이가 점차 커짐을 알 수 있다. 전반적으로 보면, CMM으로 계산한 값이 모든  $kd$  범위에서 가장 크고, RROM으로 계산한 결과가 가장 작으며, ROM으로 계산된 값은 다른 두 가지 방법으로 계산된 값들의 거의 중간값을 가지고 있다. 한 예로, 약한 결합영역이라 할 수 있는  $kd=0.1$ 인 경우, 얻어진 결합계수의 값은  $\kappa_{RROM} = 0.83 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\kappa_{ROM} = 0.85 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\kappa_{CMM} = 0.85 \text{ cm}^{-1}$ 로서, ROM과 CMM의 결과들은 거의 동일하며, RROM의 결과보다는 약간 큰 값을 가진다. 그러나, 강한 결합영역인  $kd=1.0$  경우를 보면,  $\kappa_{ROM}$ 과  $\kappa_{CMM}$ 의  $\kappa_{RROM}$ 에 대한 상대적 차이( $(\kappa_{ROM} - \kappa_{RROM}) / \kappa_{RROM}$ 과  $(\kappa_{CMM} - \kappa_{RROM}) / \kappa_{RROM}$ )로 정의할 때, 각각의 상대적 차이가 16%와 33%로서 CMM이 ROM 보다 약 2배정도 크다. 그 이유는 CMM의 경우는 모드관점에서 해석하였기 때문에 격자깊이가 커질수록 비섭동 도파로의 기하학적 구조에 더욱 민감하게 된다. 그러므로, CMM은 실제값보다 더 큰 값을 가지며,<sup>[10]</sup> 기하광학적 관점에서 해석한 ROM에 비해 실제값에 대한 오차가 더 커진다.<sup>[5]</sup> 따라서, 고차 회절항까지 고려한 RROM은 1차 항만을 고려한 ROM 보다 오차가 더욱 작은 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그림 3(b)는 정현파 격자모양일 경우로서  $kd$ 가 증가함에 따라 사각형 격자모양에서와 같이  $\kappa_{RROM}$ 이 가장 작게 나타난다. 그러나,  $\kappa_{CMM}$ 과  $\kappa_{ROM}$ 은  $kd$ 가 증가하여도 거의 일치하고 있다.  $kd=1.0$ 인 경우를 보면  $\kappa_{RROM} = 6.2 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\kappa_{CMM} = 6.5 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\kappa_{ROM} = 6.5 \text{ cm}^{-1}$ 로 CMM과 ROM의 값이 동일하였다. 이는 정현파 격자 모양이 공간조화파 형태로 표현되는 CMM의 격자모드와 매우 유사하기 때문에, 약한 섭동모드라는 동일한 근사조건을 사용한  $\kappa_{CMM}$ 과  $\kappa_{ROM}$ 의 값이 일치하게 된 것이고,  $\kappa_{RROM}$ 에 비해서는 모두 약간의 오차를 보인다. 그림 3(c)의 삼각형 격자모양일 때는 그림 3(b)와는

대조적으로  $kd$ 가 증가함에 따라,  $\kappa_{RROM}$ 과  $\kappa_{ROM}$ 이 오히려 비슷하고  $\kappa_{CMM}$ 만이 더 크게 나타난다. RROM과 ROM이 비슷한 결과를 보이는 이유는, 삼각형 격자의 경우 고차 회절효율은 거의 없고 대부분의 입사광이 1차 회절광으로 나오기 때문이다. RROM에서 고차 회절항까지 고려했던 효과가 매우 작기 때문이다.

결과적으로, 격자 깊이가 작은 약한 결합일 경우, 즉  $kd \ll 1$  범위에서는, 세 가지 방법으로 계산한 값들이 차이가 매우 작지만, 격자 깊이가 커지는 강한 결합일 경우에는 각각의 방법으로 계산된 결합계수 값의 차이가 증가함을 알 수 있다. 그 차이는 격자의 모양에 따라 다르게 나타났다. CMM으로 계산할 경우에는  $kd$ 가 증가함에 따라 격자모양이 정현파, 삼각형, 사각형의 순으로  $\kappa_{RROM}$ 에 대한  $\kappa_{CMM}$ 의 상대적 차이가 커진다. 이는 CMM이 도파모드와 격자모드라는 관점에서만 결합계수를 해석하여 격자 모양에 따른 실제 격자가 받는 필드의 분포를 충분히 고려하지 못했기 때문이다. ROM의 경우는 삼각형, 정현파, 사각형 순으로 RROM과의 상대적 차이가 커지는데, 이것은 ROM이 비록 격자의 기하학적 구조를 고려하였으나, 회절격자의 깊이가 매우 작다( $kd \ll 1$ )는 가정과 2차이상의 고차회절광을 무시해도 된다는 가정때문이다. 특히, 사각형 격자모양의 경우는 2차이상의 회절광 세기가 1차 회절광에 비해 무시할 수 없을 만큼 크기 때문에 정현파나 삼각형 격자모양일 때 보다  $\kappa_{RROM}$ 과  $\kappa_{ROM}$  간의 상대적 차이가 더욱 크게 나타났으며, 따라서, 사각형 격자구조일때가 격자 깊이에 가장 민감하다고 할 수 있다.

그림 4는 각변의 길이와 기울기가 서로 다른 3가지 사다리꼴 모양의 격자 구조에 대하여 격자깊이에 따른 결합계수값을 RROM과 CMM으로 계산한 결과이다. 사다리꼴 모양의 격자는 인식 식각에 의해 회절격자를 제작할때 생성되기 쉬운 격자구조로서,<sup>[11]</sup> 사다리꼴 각변의 길이( $L_1$ ,  $L_2$ )와 기울기에 따라 결합계수 값을 변화시킬 수 있다. ROM은 RROM의 근사적 방법이고, 또한, 모든 격자모양에 대해 그림 3에서 살펴본 바와같이 CMM과 RROM의 사이 값을 가지므로 그림 4에서는 ROM의 결과는 생략하고, RROM과 CMM으로부터 얻은 결과만을 제시하였다. 그림 4의 각 경우에 사용된 사다리꼴 격자모양은 (a)  $L_1/\Lambda=0.1$ ,  $L_2/\Lambda=0.4$ , (b)  $L_1/\Lambda=0.25$ ,  $L_2/\Lambda=0.25$ , 그리고, (c)  $L_1/\Lambda=0.4$ ,  $L_2/\Lambda=0.1$ 이다. 한 예로,  $kd=0.2$ 일때, RROM과 CMM을 이용하여 계산한 결합계수값들의 상대적 차이는 각각 (a) 2.8% (b) 2.3% (c) 1.7%로서,  $L_1$ 의 값이 증가함에 따라 작아진다. 그 이유는 동일한 격자깊이라 할지라도  $L_1$ 의 값이 커지면 사다리꼴의 기울기가 완만해져서 격자가 도파모드에 주는 영향이 작기 때문으로 풀이된다. 다시말하자면,  $L_1$ 이 작아질수록 그림 3(a)에서 계산된 사각형 격자모양의 결과와 유사하며,  $L_1$ 이 증가할수록 그림 3(b)의 삼각형 격자와 비슷한 결과를 얻게 되므로, RROM과 CMM 계산결과들 간의 차이도  $L_1$ 에 따라 변화됨을 알 수 있다.

그림 5는 그림 3(a)에서 정의된 사각형 격자모양의 격자영역비(duty-cycle:  $p/\Lambda$ )에 따른 결합계수값의 변화를 RROM과 CMM 두 경우에 대해 비교하여 나타낸 그래프이다. 격자깊이

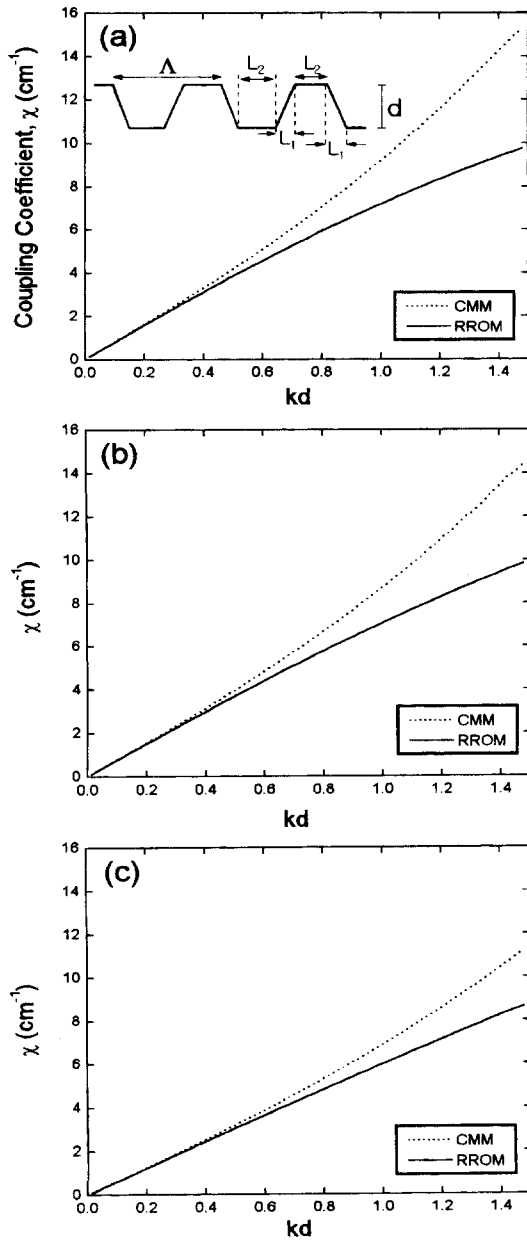


그림 4. 각변의 길이가 다른 사다리꼴 격자의 정규화된 격자깊이 ( $kd$ )에 따른 결합계수. (a)  $L_1/\Lambda=0.1, L_2/\Lambda=0.4$ , (b)  $L_1/\Lambda=0.25, L_2/\Lambda=0.25$ , (c)  $L_1/\Lambda=0.4, L_2/\Lambda=0.1$ .

는 각각 (a)  $0.04 \mu\text{m}$  (즉,  $kd=0.30$ ), (b)  $0.1 \mu\text{m}$  ( $kd=0.74$ ), (c)  $0.15 \mu\text{m}$  ( $kd=1.11$ ), (d)  $0.2 \mu\text{m}$  ( $kd=1.48$ )이다.  $kd$ 가 작은 경우에는 격자영역비에 관계없이 RROM이나 CMM으로 계산된 결과가 거의 일치하나,  $kd$ 가 점점 증가함에 따라 영역비의 영향이 점차 커지며, 결합계수의 최대치간의 차이와 그때의 영역비의 값도 변하게 된다. 즉, RROM의 경우는 최대치가 (a)  $2.42 \text{ cm}^{-1}$ , (b)  $6.17 \text{ cm}^{-1}$ , (c)  $9.45 \text{ cm}^{-1}$ , (d)  $12.86 \text{ cm}^{-1}$ 이고, 그때의 격자영역비는 각각 0.43, 0.36, 0.31, 0.27이었으나, CMM의 경우는 최대치가 (a)  $2.51 \text{ cm}^{-1}$ , (b)  $7.26 \text{ cm}^{-1}$ , (c)  $12.8 \text{ cm}^{-1}$ , (d)  $20.2 \text{ cm}^{-1}$ 이고, 각각의 격자영역비는 0.43, 0.37, 0.33, 0.30이었다. 두 방법 모두  $kd$ 가

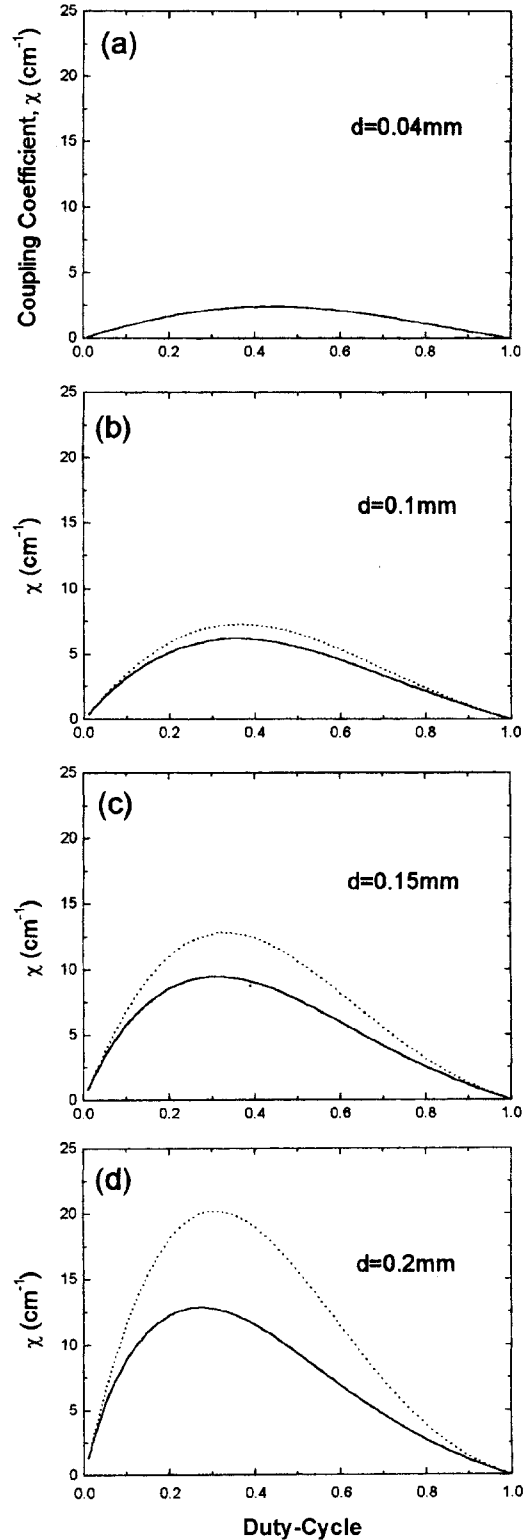


그림 5. 격자깊이가 각각 (a)  $0.04 \mu\text{m}$  ( $kd=0.30$ ), (b)  $0.1 \mu\text{m}$  ( $kd=0.74$ ), (c)  $0.15 \mu\text{m}$  ( $kd=1.11$ ), (d)  $0.2 \mu\text{m}$  ( $kd=1.48$ )인 사각형 격자들의 격자영역비(duty-cycle:  $p/L$ )에 따른 결합계수.

증가하면 최대치가 점점 커지며 영역비가 작아지는 유사한 경향을 보인다. 그러나, 최대치일 때의 영역비 값을 보면, 약한

결합조건이라 할 수 있는 (a)의 경우에는 동일하나,  $kd$  가 증가함에 따라 RROM의 경우가 CMM의 경우 보다 더 작은 쪽으로 이동하여,  $kd$  가 1.48일때는 RROM이 CMM 보다 약 0.03 정도 작아진다. CMM은 도파모드의 필드분포에 따라 결합계수의 값이 영향을 받으므로, 격자내의 평균굴절율이 증가하는 쪽으로, 즉, 격자영역비가 커지는 쪽으로 최대치 발생지점이 이동한다고 볼 수 있다.

#### IV. 결 론

임의의 격자구조를 갖는 도파로 회절소자의 결합계수 계산을 위해 엄밀한 결합파이론에 근거한 광선광학적 방법(RROM)을 제안하였으며, 이를 사용하여 다양한 형태의 격자구조를 갖는 3층 도파로 회절소자의 결합계수를 계산하였다. 기존에 발표된 근사적인 기하광학적 방법(ROM)과 결합모드 방법(CMM)에 의해 계산된 결과와 비교하였다. 격자 모양에 따라 각 방법들의 상대적 차이가 다르게 나타났는데, RROM에 비해 ROM은 삼각형, 정현파, 사각형 순으로, CMM은 정현파, 삼각형, 사각형 순으로 차이가 커졌다. 사다리꼴 격자의 경우는 격자의 기울기가 증가함에 따라 3가지 방법들간의 상대적 차이가 점점 증가하였다. 또한, 사각형 격자에서 결합계수 값의 최대치가 발생하는 격자영역비 값이 RROM에 보다 CMM이 더 크게 나타났는데, 이는 CMM은 도파모드 관점에서 해석하므로 비섭동 광도파관의 기하학적 구조나 격자 깊이에 따라 결합계수의 값이 많은 영향을 받기때문이라 판단된다. ROM은 기하광학적 관점에서 해석하므로 도파관의 기하학적 구조에 대해 CMM에 비해 민감하지 않다고 할 수 있다. 그러나, ROM은 격자의 회절효율을 계산하기 위해 회절격자의 깊이가 아주 작다고 가정하였고( $kd \ll 1$ ), 2차이상의 고차회절과를 무시하였으므로, 회절격자의 깊이가 커질수록 실제값과의 오차가 증가할 것이다. 그러나, 본 논문에서 제안한 RROM의 경우는, 격자의 회절효율을 계산하기 위해 거의 근사를 사용하지 않고, 가능한 모든 회절차수를 고려할 수 있는 RCWT를 이용하였으므로, ROM에 비해 보다 정확한 결합계수 값을 구

할 수 있을 뿐만 아니라,  $kd$  값이 큰 강한 결합의 경우일지라도 ROM이나 CMM 보다 실제값에 더욱 유사한 결합계수를 얻는것이 가능하다. 또한, RCWT에 의해 임의의 모양을 갖는 격자의 회절효율을 정확하게 계산할 수 있으므로, RCWT에 기반을 둔 RROM은 다양한 격자구조를 갖는 도파로 회절소자에 대한 보다 엄밀한 해석에 매우 유용하리라 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구비(98-0702-04-01-3) 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] T. K. Gaylord and M. G. Moharam, Proceedings of the IEEE, **73**, 894 (1985).
- [2] H. Kogelnik and C. V. Shank, J. Appl. Phys., **43**, 2327 (1972).
- [3] W. Streifer, D. R. Scifres, and R. D. Bumham, IEEE J. Quantum Electron., **QE-11**, 867 (1975).
- [4] W. Streifer, D. R. Scifres, R. D. Bumham, and R. I. MacDonald, IEEE J. Quantum Electron., **QE-13**, 67 (1977).
- [5] H. J. Luo and S. Zory, IEEE J. Quantum Electron., **QE-30**, 10 (1994).
- [6] S. Cho, B. Kim, and N. Dagli, J. Lightwave Technol., **LT-16**, 715 (1998).
- [7] M. G. Moharam and T. K. Gaylord, J. Opt. Soc. Am., **72**, 1385 (1982).
- [8] S. H. Song and E. Lee, Appl. Opt., **32**, 5913 (1995).
- [9] T. Tamir, Integrated Optics, (Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1979) pp. 25.
- [10] J. Hong, W. Huang, and T. Makino, J. Lightwave Technol., **LT-10**, 1860 (1992).
- [11] P. Correc, IEEE J. Quantum Electron., **QE-24**, 8 (1988).

#### Ray-optical determination of the coupling coefficients of waveguide gratings by use of the rigorous coupled wave theory

Suntak Park, Seok Ho Song, Cha Hwan Oh and Pill Soo Kim  
Department of Physics, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received February 19, 1999, Revised manuscript received July 20, 1999)

Ray-optics approach based on the rigorous coupled wave theory, called by the rigorous ray-optics method (RROM), is developed for the calculation of coupling coefficients of waveguide grating devices. The coupling coefficients of several grating structures, such as rectangular, sinusoidal, triangle, and trapezoidal shapes, are determined by the RROM, and they are compared with those obtained by conventional methods of the ray-optics method (ROM) and the coupled mode method (CMM). In the case of rectangular gratings, the coupling coefficients is evaluated in detail by various depths and duty-cycles of the grating. We have found that the RROM gives more exact solutions for the coupling coefficients of even arbitrary shapes of diffractive waveguide grating devices than the other conventional methods.