

論文99-36D-11-3

광통신용 테이퍼 방향성 결합기의 설계 특성

(Design Characteristics of Tapered Directional Couplers in Optical Communication)

孫碩備*, 扈光春**, 金暎權*

(Seock Yong son, Kwang Chun Ho, and Yung Kwon Kim)

요 약

최근, 유사 빔 전파방법이나 비 직교성 결합모드이론과 같은 다양한 근사적 해석법들이 중첩모드에 기초한 테이퍼 방향성 결합기의 그 광학적 특성을 분석하기 위하여 제안되어 왔다. 비록, 이들 접근 방식들이 특별한 구조에서 충분히 정확한 결과들을 제공하지만 테이퍼 전송 구조와 같은 민감한 광 소자 해석에는 불충분하다. 이를 위하여, 우리는 그 방향성 결합기의 전력전송을 정확하게 해석하기 위하여 새롭게 발전된 모드 전송선로 해석법을 소개하고 이용하고자 한다. 이를 이용한 수치 해석 결과 대칭인 두 테이퍼 채널의 간격이 증가함에 따라 우/기 모드의 전파상수는 하나의 값으로 수렴하였다. 더욱이, 테이퍼 각도가 $\theta=0.1^\circ$ 일 때 하나의 전송 채널을 통하여 입사된 모드의 97%가 다른 전송 채널로 전송되었고, 그 기운 각도가 증가함에 따라 전력전송은 현저하게 감소하였다.

Abstract

Recently, various simplified simulation techniques such as finite-difference beam propagation method and non-orthogonal coupled-mode theory have proposed to analyze the optical characteristics of tapered directional couplers supported by the coupling of two propagating modes. Although these approaches are often in sufficiently accurate, they do not provide the detailed solutions encountered in the analysis of tapered guiding structures. For this purpose, we introduce and utilize a newly developed modal transmission-line theory to analyze rigorously power transfer of the directional coupler. The numerical result reveals that the propagation constants of even and odd modes converge to a single value as increasing the spacer thickness between two symmetric tapered guides. Furthermore, 97% of the power incident into a guiding channel is transmitted to the other channel at the tapered angle $\theta=0.1^\circ$, and the efficiency of power transfer decreases dramatically as increasing the angle.

I. 서 론

오늘날 테이퍼형 광 방향성 결합기는 광 통신용 소자로서 그 중요성이 날로 증가하고 있다. 하나의 단자로 입사한 광을 테이퍼 각도와 도파로의 두께를 조절하여 2개 단자로 출력하는 빔 스피리터(beam splitter)로써 뿐만 아니라 두 도파로 간의 혼신(cross talk)을 줄여 그 특성을 향상시키는 광 필터의 기본 구조로 이

* 正會員, 建國大學校 電子工學科
(Dept. of Electronics Eng., Konkuk Univ.)

** 正會員, 漢拏大學校 電子工學科
(Dept. of Electronics Eng., Halla Institute of Technology)

接受日字 : 1999年2月3日, 수정완료일 : 1999年10月20日

용되는 중요한 소자이다¹⁻³⁾.

그 광 소자의 전자기학적 그리고 광학적 특성을 해석하기 위한 지금까지 다양한 해석법들이 제안되었고 발전되어왔다. 그 접근 방법중에서 유사 빔 전파방법(finite-difference beam propagation method: FD-BPM)⁴⁾과 비 직교성 결합모드이론(non-orthogonal coupled-mode theory : NCMT)⁵⁾은 가장 널리 사용되는 해석법들이다. FD-BPM은 비교적 정확한 수치해석적 결과를 제공하지만 수치 해석상의 복잡성과 상당한 계산시간의 소요로 인하여 테이퍼 광 방향성 결합기의 설계에 쉽게 적용하기가 어렵다. 예를 들어, 테이퍼 구조를 이용하여 좋은 특성의 광 필터를 설계할 때 고려해야 하는 많은 광학 변수들을 긴 계산시간을 거쳐 분석하기란 지루한 것이다. 한편, 각각의 분리된 도파로(isolated waveguide)에서 전파하는 정상모드들(normal modes)에 기초한 국부 배열모드(local array modes)의 비 직교성을 이용하는 NCMT는 수치해석적 기법이 간단하고 다양한 임의의 구조를 갖는 광 방향성 결합기에 적용이 가능하지만 전파방향에 따라 변화하는 넓은 각도의 테이퍼 전송 채널을 해석하기에는 불충분하다. 즉, 결합모드이론은 각 독립된(isolated) 전송선로의 그 특성들을 결합하여 방향성 결합기의 전력전송을 해석하는 방법이다. 그러므로, 방향성 결합기를 구성하는 두 독립된 전송선로의 간격이 충분히 큰 경우(넓은 각도의 테이퍼 단에서) 그 결합 특성을 나타내는 결합계수(coupling coefficient)가 부정확한 값으로 결정되므로 최적 설계를 위한 정확한 전력전송 효율을 얻기가 어렵다. 이에 대한 자세한 수치해석 결과는 4장에 언급되어질 것이다.

이를 위하여, 본 논문에서는 정확한(rigorous) 접근법 이면서 수치해석 시 근사적 해석법인 NCMT보다 간결하고 쉽게 테이퍼 광 방향성 결합기의 광학적 특성 및 최적 설계조건을 얻을 수 있는 모드 전송선로 해석법(modal transmission-line theory : MTLT)을 소개하고자 한다. 지금까지, 테이퍼 방향성 결합기에 대한 정확한 해석법은 본 논문에서 제안한 MTLT가 처음이라 생각한다. 이는 최근 광 전송구조의 그 전파특성 및 설계 특성을 분석하기 위하여 Ho⁶⁾에 의하여 새롭게 발전되어 가고 있는 해석법이다.

일반적으로, 평면 도파로는 선형(parallel)구조를 가지지만, 본 논문에서 사용된 테이퍼 광 결합기는 테이퍼 각도에 의해서 비선형(non-parallel) 구조를 갖는 광 전

송소자이다. 따라서, 테이퍼 광 결합기와 같은 비선형 구조를 충분히 작은 n 개의 미소구간으로 분할하여 그 전파상수를 해석하는 분할 기법이 자주 이용된다. 이에 대한 자세한 설명이 다음 장에서 언급되었고, 3장에서는 n 개 ($n = 1, 2, \dots, m$)의 미소평형 도파관으로 대치된 테이퍼 광 결합기의 미소구간마다 존재하는 필드 분포와 결합효율을 MTLT에 기초하여 정의하고 유도하였다. 그리고, MTLT의 정확성과 효율성을 평가하기 위하여 NCMT의 수치해석적 결과들과 비교하였고 그 종합적 결론을 5장에 언급하였다.

II. 테이퍼의 모드특성

그림 1에서 보듯이 2θ 의 각도로 분리된 테이퍼 광 도파로의 광학적 특성을 분석하기 위하여 테이퍼 광 결합기를 n 개의 미소구간 Δz 로 분할하였고, 상층채널로 입사된 전력이 상층채널을 통해 출력되도록 구성하였다. 입사된 모드는 $\lambda = 1.5\mu m$ 에서 전파하는 동작 주파수를 갖으며 테이퍼 방향성 결합기를 구성하는 광 도파로와 클래딩(cladding)의 굴절률은 각각 $n_1 = 3.1$, $n_0 = 3.0$ 이다.

n 개의 미소 평형 도파관(parallel waveguide)으로 구성된 그림 1(b)의 테이퍼 광 결합기는 결국 각각의 미소구간 Δz 에서 존재하는 정상모드들을 모드 전송선로 해석법을 적용하여 정확하게 해석할 수 있다. 그리고, 이 정상모드들은 평형 도파관에서 존재하는 기(odd), 우(even) 모드인 중첩모드(supermode)와 동일한 모드적 특성을 가진다. 그때, 유효굴절률 변화에 영향을 미치는 각 미소구간에서 구성된 평형 방향성 결합기의 테이퍼 변화는 다음과 같다.

$$\Delta t = \Delta z \cdot \tan \theta \quad (1)$$

즉, 테이퍼의 기울기를 나타내는 각도 θ 와 파장에 비하여 충분히 작도록 선택한 미소구간 Δz 의 크기가 결정되면 위의 식으로부터 두 미소 평형 도파관들 사이의 분리 거리 Δt 가 결정된다. 그러므로, n 개의 미소구간 Δz 에서 n 번의 MTLT의 횡 방향 공진조건(transverse resonance condition)⁶⁾을 적용하여 얻어진 n 개의 전파상수를 결합하면 테이퍼 방향성 결합기의 중첩모드에 기인한 전력전송 및 모드간의 결합 특성을 정확하게 분석할 수 있다.

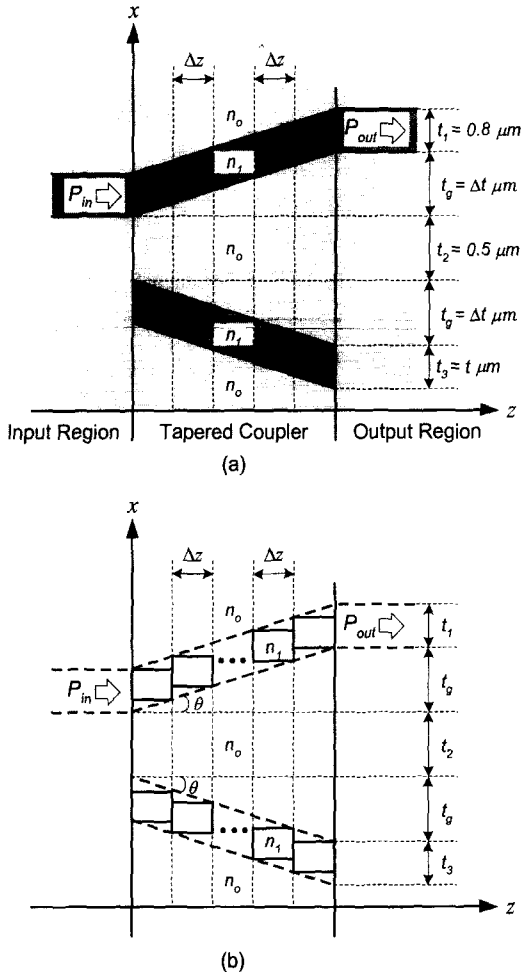


그림 1. 테이퍼 방향성 결합기의 구성도
 (a) 연속적인 테이퍼로 구성된 결합기
 (b) 미소구간으로 분할된 테이퍼 결합기
 Fig. 1. Configuration of tapered directional coupler
 (a) a continuous tapered waveguide interaction.
 (b) a stepwise discrete tapered waveguide interaction.

그림 2에 미소구간 Δz 에서 형성된 평형 방향성 결합기의 자세한 그림과 MTLT를 적용하여 그 결합기의 전파상수를 결정하는 등가 전송선로가 도시되어 있다. 참고문헌 [6]에서 언급했듯이 등가 전송선로에서 전파상수는 아래의 횡 방향 공진조건을 만족하는 하나의 고유치(eigenvalue)로 주어진다.

$$Y_{up}^{(n)}(\Delta z) + Y_{dn}^{(n)}(\Delta z) = 0 \quad (2)$$

여기서, $Y_{up}^{(n)}(\Delta z)$ 와 $Y_{dn}^{(n)}(\Delta z)$ 은 x -축상의 임의의

경계면에서 각각 위와 아래로 들여다 본 그 어드미턴스(admittance)를 나타내며, 위 첨자는 n 번째 테이퍼 방향성 결합기를 나타낸다. 결국, 고유치 문제인 식 (2)를 수치 해석하여 우리는 n 개의 미소구간으로 분할된 평형 결합기들의 전파상수들을 결정할 수 있다.

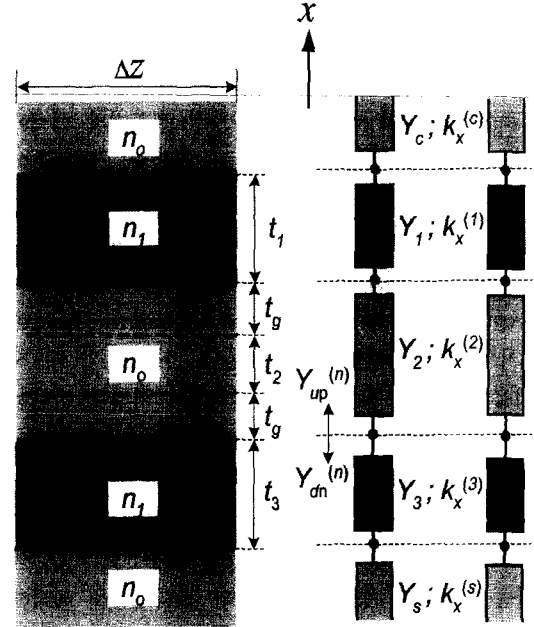
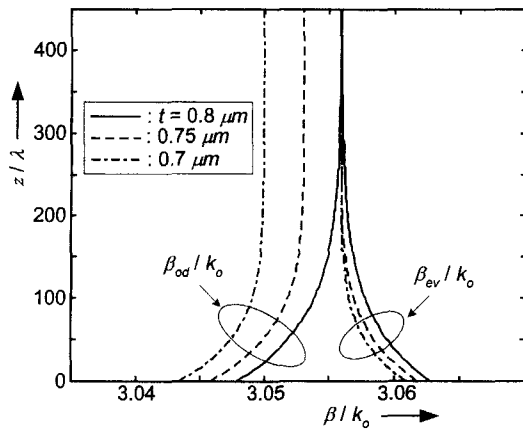
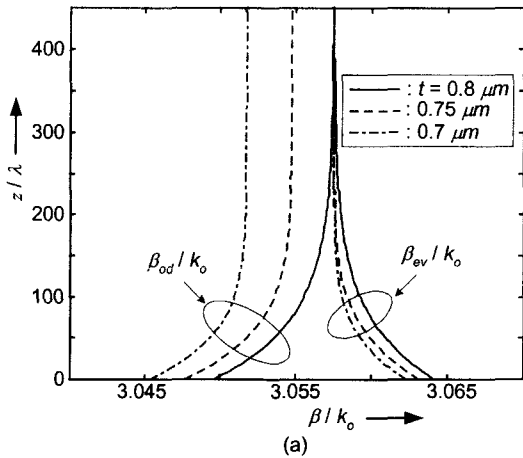


그림 2. 등가 전송선로의 구성도
 (a) 미소구간 Δz 에서의 평형 결합기
 (b) 평형 결합기 (a)의 등가 전송선로
 Fig. 2. Equivalent transmission-line network.
 (a) parallel coupler with an infinitesimal segment length Δz .
 (b) the equivalent network of (a).

테이퍼 각도가 $\theta = 0.1^\circ$ 일 때 하층채널의 두께변화에 따른 각 미소구간에서의 전파상수 $\beta_{ev}^{(n)}(\Delta z)$ 와 $\beta_{od}^{(n)}(\Delta z)$ 가 전파거리의 함수로써 그림 3에 자세하게 나타나있다. 이 분산 곡선에서 아래 첨자 ev 와 od 는 중첩모드의 우 모드와 기 모드를 각각 나타낸다. 그림에서 보듯이 TE, TM 모드는 전파거리 z 가 증가함에 따라 (즉, 두 미소 평형 도파관들 사이의 분리 거리 Δt 가 증가함에 따라) 두 채널간의 결합특성이 약해져 우/기 모드는 상호간 독립된(isolated) 모드로 동작한다. 결국, 우 모드와 기 모드의 전파상수는 일정한 값으로 수렴하며 하층채널의 두께가 상층채널의 두께와 동일한 대칭구조를 형성함에 따라 중첩모드의 전파상수 값

들은 같은 값으로 수렴한다.



(b)

그림 3. 거리에 따른 전파상수의 변화. 여기서, 테이퍼의 각도는 $\theta = 0.1^\circ$ 이다.

(a) TE 모드

(b) TM 모드

Fig. 3. Propagation constants as a function of distance for (a) TE modes, (b) TM modes. Here, the taper tilt-angle is $\theta = 0.1^\circ$.

III. 전파모드의 결합특성

1. 전력전송효율

본 논문을 통하여 고려된 필드는 y -축에 대하여 일정하며 ($\partial/\partial y \equiv 0$), 입력 모드는 그림 1에서 보듯이 상층채널을 통해 입사한다고 가정하였다. 그림 2(b)에서 언급한 각 미소구간에 대한 공진조건에 의해서 등가 전송선로의 그 전파상수와 특성 임피던스 혹은 어

드미턴스가 구해지고, 이 값들로부터 테이퍼 방향성 결합기의 n 번째 미소구간에서 z -축을 따라 진행하는 정확한 TE모드의 전개분포를 형성한다^[7].

$$E_n(x, \Delta z) \cong V_{ev}^{(n)} e^{i\beta_{ev}^{(n)} \Delta z} e_{ev}^{(n)}(x) + V_{od}^{(n)} e^{i\beta_{od}^{(n)} \Delta z} e_{od}^{(n)}(x) \quad (3)$$

여기서, $\beta_{ev,od}^{(n)}$ 은 n 번째 미소구간에서 전파하는 중첩모드의 그 전파상수를 나타낸다. n 번째 미소구간에서의 필드분포를 나타내는 위의 식은 각 미소구간의 경계면에서 모드정합조건(modal matching condition)을 만족하며, 그림 4에 도시했듯이 전력전송효율을 해석하기 위한 중 방향 등가 전송선로를 구성한다. 결국, 종축을 따라 n 개로 분할된 테이퍼 방향성 결합기는 중 방향으로 n 개의 등가 전송선로로 구성된다.

각각의 미소구간에서 존재하는 불연속 경계면을 해석하기 위해서 미소구간마다 존재하는 입출력모드의 연속 조건인 모드간 정합조건을 사용한다. 이는 테이퍼 방향성 결합기를 n 개의 미소길이를 갖는 평형 도파관으로 대체시킴으로써 발생하는 미소구간별 불연속조건을 해석하기 위한 것이다. 이들 필드분포 사이의 모드정합조건은 다음 절에서 자세하게 설명되어질 것이다.

우선, 입/출력 경계면에서의 전력반사가 매우 작다고 무시하고 경계조건(boundary condition)을 이용하면

$$V_{in} e_{in}(x) \cong V_{ev}^{(1)} e_{ev}^{(1)}(x) + V_{od}^{(1)} e_{od}^{(1)}(x)$$

$$V_{out} e_{out}(x) \cong V_{ev}^{(m)} e^{i\beta_{ev}^{(m)} \Delta z} e_{ev}^{(m)}(x) + V_{od}^{(m)} e^{i\beta_{od}^{(m)} \Delta z} e_{od}^{(m)}(x) \quad (4)$$

와 같은 등가관계식을 얻을 수 있고, 각각의 미소구간 경계면에서 발생하는 중첩모드들 사이의 연속조건은

$$V_{ev}^{(n-1)} e^{i\beta_{ev}^{(n-1)} \Delta z} e_{ev}^{(n-1)}(x) + V_{od}^{(n-1)} e^{i\beta_{od}^{(n-1)} \Delta z} e_{od}^{(n-1)}(x) \cong V_{ev}^{(n)} e_{ev}^{(n)}(x) + V_{od}^{(n)} e_{od}^{(n)}(x) \quad (5)$$

와 같이 주어진다. 그러므로, 다음 절에서 유도될 진행 모드들 사이의 중요한 전자기적 특성인 식 (10)의 필드 정규화 직교조건 (field orthonormality)과 식 (14)의 모드 정합조건을 식 (4)와 (5)에 적용하고 정리하면 아래와 같은 입력 전압에 대한 출력 전압의 비율을 얻을 수 있다.

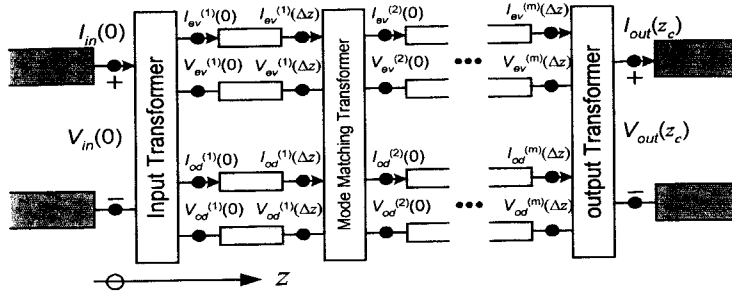


그림 4. 테이퍼 방향성 결합기의 등가전송선로 모델

Fig. 4. Equivalent transmission-line network of a typical tapered directional coupler shown in Fig.1.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = T_{in, ev} T_{ev, out} \exp \left[i \left(\sum_{n=1}^{\infty} \beta_{ev}^{(n)} \right) \Delta z \right] + T_{in, od} T_{od, out} \exp \left[i \left(\sum_{n=1}^{\infty} \beta_{od}^{(n)} \right) \Delta z \right] \quad (6)$$

위의 식에서 보듯이 입력 경계면에서 입사된 모드는 각각의 미소구간에서 발생하는 중첩모드들의 위상변화에 의하여 영향을 받으며 진행된다. 결국, 출력 경계면에서 상향 도파로를 통하여 출력되는 모드의 위상변화는 이들의 합으로 표현되는 것은 당연한 결과일 것이다. 그때, 식 (6)의 입/출력 경계면에서 발생하는 입/출력 변환상수 (input/output transformer)는 중첩모드의 직교성에 의하여 아래와 같이 정의된다.

$$T_{in, v} = \int_{cs} e_{in}(x) e_v^{(1)*}(x) dx, \quad (7)$$

$$T_{v, out} = \int_{cs} e_v^{(m)}(x) e_{out}^*(x) dx$$

여기서, v 는 우 모드인 경우에는 ev 이고 기 모드인 경우에는 od 로 나타난다. 그때, 입력전력에 대한 출력전력의 비로 표현되는 테이퍼 방향성 결합기의 TE 모드에 대한 결합효율 (coupling efficiency)은

$$\eta_{TE} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out} \Gamma_{out}^*}{V_{in} \Gamma_{in}} = \frac{Re(\beta_{out})}{Re(\beta_{in})} \left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right|^2 \quad (8)$$

으로 정의된다. 여기서, β_{in} 과 β_{out} 는 각각 입/출력 영역에서의 전파상수들을 나타낸다. 만일, 테이퍼 방향성 결합기를 통하여 TM 편향된 모드가 전파될 경우 n 번째 미소구간에서 z -축을 따라 진행되는 식 (3)의 횡방향 전계분포 (E_y)는 횡방향 자계분포 (H_y)를 나타내는 모드 전류 $I_v^{(n)}$ (modal current)와 자계성분의 모드 함수 $h_v^{(n)}(x)$ (modal function)로 대치된다^[7]. 그때,

각 영역에서 정의된 이 횡방향 자계분포들 사이에 존재하는 식 (10)와 (14)의 TM 모드 정규화 직교조건과 모드 정합조건을 이용하면, TE 모드에서와 같은 과정을 통하여 우리는 식 (8)과 유사한 TM 모드의 결합효율을 얻을 수 있다. 이 결합효율은 입/출력 영역에서의 TM 모드 전파상수들과 그 경계면에서 흐르는 전류의 비율로 표현된다.

2. 모드 정합조건

그림 1의 테이퍼 방향성 결합기는 모드 전송선로 해석법에 의해 그림 2와 같이 미소구간으로 분할된다. 서로 다른 미소구간마다 존재하는 전/자계는 비록 무시할 정도로 작지만 각 미소구간의 불연속 경계면에서 서로 결합한다. 이러한 광학적 현상은 모드간 모드정합을 사용하여 그 불연속 경계면에서 발생하는 모드의 특성을 정의할 수 있다.

이 모드 정합조건을 유도하기 위하여 먼저 서로 다른 미소구간에 존재하는 모드들의 직교성을 적용하면 아래와 같은 관계식을 얻을 수 있다^[7].

$$\beta_p^{(n)} - \beta_q^{(r)} \int_{cs} \gamma_j(x) \Psi_p^{(n)}(x) \Psi_q^{(r)}(x) dx = 0 \quad (9)$$

여기서, 위 첨자 n, r 은 서로 다른 미소구간을 나타내며 아래 첨자 p, q 는 서로 다른 모드를 나타낸다. 그리고 TE 모드인 경우 $\gamma_j(x) = 1$, $\Psi(x) = e(x)$ 를 나타내며 TM 모드인 경우 $\gamma_j(x) = 1/\epsilon_j(x)$, $\Psi(x) = h(x)$ 를 나타낸다. 만일, 모드가 서로 동일한 미소구간내에 존재한다면 즉, $n = r$ 인 경우 위의 식으로부터 아래와 같은 일반적인 모드 함수들 사이의 직교성을 정의할 수 있다.

$$\int_{cs} \gamma_j(x) \Psi_p(x) \Psi_q(x) dx = \delta_{pq} \quad (10)$$

여기서, δ_{pq} 는 Kronecker 델타 함수이다. 또한, 서로 다른 미소구간내에 모드가 존재하는 경우 ($n \neq r$ 인 경우) 만일 두 존재하는 모드가 다르면 $p \neq q$ 식 (9)의 $\beta_p^{(n)} - \beta_q^{(r)} \neq 0$ 이므로 이 식은 아래와 같이 간소화된다.

$$\int_{cs} \gamma_j(x) \Psi_p^{(n)}(x) \Psi_q^{(r)}(x) dx = 0 \quad (11)$$

즉, 서로 다른 미소구간내에 존재하는 서로 다른 모드들은 직교조건을 만족한다. 만일, 모드가 같을 경우 ($p = q$)에는 식 (9)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\beta_p^{(n)} - \beta_p^{(r)} \int_{cs} \gamma_j(x) \Psi_p^{(n)}(x) \Psi_p^{(r)}(x) dx = 0 \quad (12)$$

위의 식에서 보듯이 하나의 모드가 서로 다른 미소구간에서 전파할 때 그 불연속 경계면에서 발생하는 모드의 특성을 정의하기 위하여 우리는 앞서 합리적이고 보편 타당한 가정을 하였다. 즉, 미소구간의 길이가 파장에 비하여 충분히 작다 ($\Delta z \ll \lambda$). 이 가정하에서 서로 다른 미소구간의 광학적 특성은 근사적으로 서로 같고 ($\beta_p^{(n)} - \beta_p^{(r)} \approx 0$) 그때 식 (12)는 아래와 같이 정규화 될 수 있다.

$$\int_{cs} \gamma_j(x) \Psi_p^{(n)}(x) \Psi_p^{(r)}(x) dx = 1 \quad (13)$$

결국, 미소구간들에 존재하는 모드들의 광학적 특성인 식 (11)과 (13)을 고려하면 테이퍼 방향성 결합기의 서로 다른 미소구간들에서 발생하는 모드간의 모드 정합조건을 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\int_{cs} \gamma_j(x) \Psi_p^{(n)}(x) \Psi_q^{(r)}(x) dx = \delta_{pq} \quad (14)$$

여기서, δ_{pq} 는 Kronecker 델타 함수이다. 비록, 같은 전송 구조의 결합기에서 정의되는 식 (10)의 필드의 정규화 직교조건과 유형은 비슷하지만 그 물리적 의미에서 조건의 특성이 구별될 수 있다.

IV. 수치 해석

2, 3장에서 언급한 모드 전송선로 해석법을 이용하여

비대칭구조를 갖는 그림 1의 테이퍼 방향성 결합기의 전력전송효율을 수치 해석하였다. 본 논문에서 제안한 정확한 접근법의 타당성을 보이기 위하여 테이퍼 방향성 결합기의 광학적 특성 해석에 주로 사용되는 근사적 해석법인 비 직교성 결합모드이론 (NCMT)과 비교 검토하였다.

그림 5(a)에서 보듯이 테이퍼 각도가 0.1° 일 경우 두 해석법에 의하여 얻어진 TE모드에 대한 전력전송효율은 잘 일치하였다. 그러나, 그림에서 횡 방향 접선으로 나타냈듯이 MTLT는 임계 거리 $z_c = 700 \mu m$ 이상에서 결합효율이 존재하지 않았다. 즉, MTLT는 임계 거리

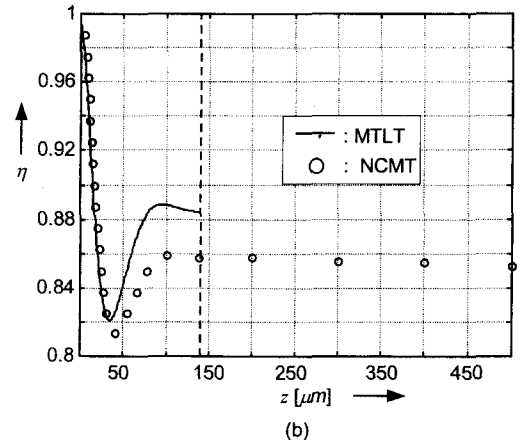
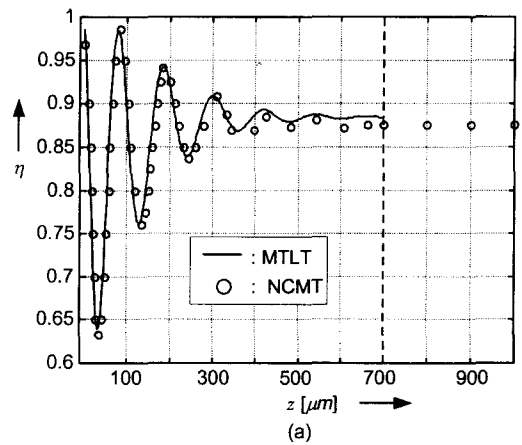
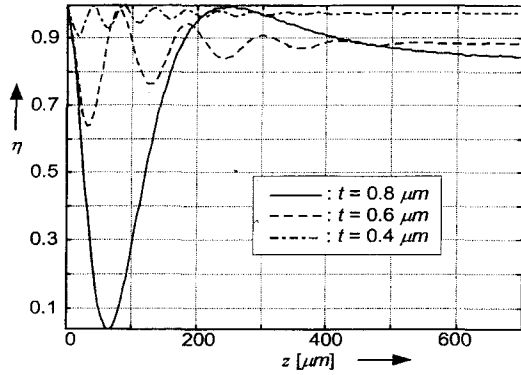


그림 5. 전파 거리에 따른 TE모드의 결합효율 변화. 여기서, 하층채널의 두께는 $t = 0.6 \mu m$ 이다
(a) $\theta = 0.1^\circ$ 일 때
(b) $\theta = 0.5^\circ$ 일 때

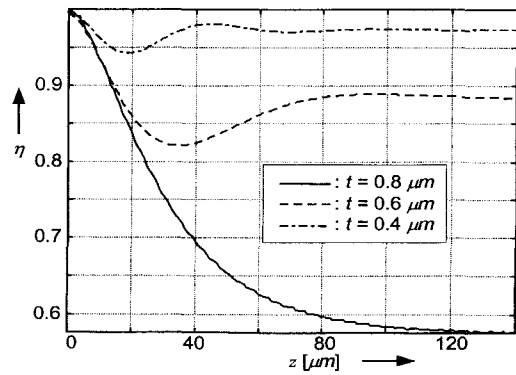
Fig. 5. Variation of coupling efficiency along with propagation distance for (a) the tilt-angle $\theta = 0.1^\circ$, (b) $\theta = 0.5^\circ$. Here the thickness of lower guide is $t = 0.6 \mu m$.

z_c 이상에서는 테이퍼의 각도에 기인하여 중첩모드가 존재하지 않는 정확한 중첩모드 해석에 기초하지만, NCMT는 독립된 도파로에서 전파하는 정상모드를 이용하여 국부 배열모드를 구하기 때문에 테이퍼의 각도에 상관 없이 그 효율 값이 존재하는 것이다.

그러므로, NCMT는 테이퍼 각도가 크지 않은 비대칭성 테이퍼 방향성 결합기의 전력전송효율을 계산하기 위하여 좋은 수치 해석적 알고리즘을 제공하지만 테이퍼 각도가 큰 결합기의 광학적 특성 해석에는 부적절하다고 할 수 있다.



(a)



(b)

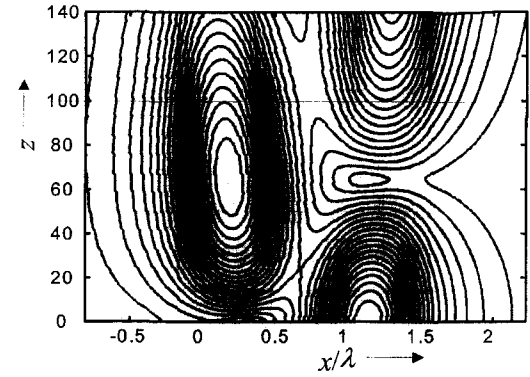
그림 6. 하층채널의 두께 변화에 따른 TM 모드의 결합효율

(a) $\theta = 0.1^\circ$ 일 때

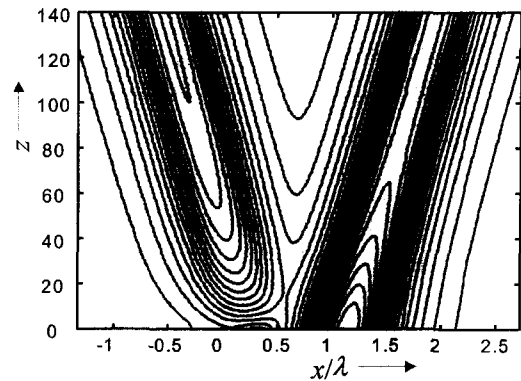
(b) $\theta = 0.5^\circ$ 일 때

Fig. 6. Coupling efficiency as a function of the thickness of lower guide for (a) the tilt-angle $\theta = 0.1^\circ$, (b) $\theta = 0.5^\circ$.

이와 같은 현상은 그림 5(b)에서 보듯이 테이퍼 각도가 0.5° 로 증가함에 따라 더욱 자세하게 나타나고 있다. 그림에서 보듯이 테이퍼 각도가 0.5° 일 경우 중첩모드는 오직 임계 거리 $z_c = 700\mu m$ 근처까지 발생하였으며, 테이퍼 각도가 증가함에 따라 MILT와 NCMT에 의하여 분석된 결합효율이 상당한 차이를 나타내었다.



(a)



(b)

그림 7. 결합기에서 전파하는 TM모드의 등고선 분포. 여기서, 하층채널의 두께는 $t = 0.8\mu m$ 이다

(a) $\theta = 0.1^\circ$ 일 때

(b) $\theta = 0.5^\circ$ 일 때

Fig. 7. Contour distribution of a field propagating along the coupler shown in Fig.1 for (a) the tilt-angle $\theta = 0.1^\circ$, (b) $\theta = 0.5^\circ$. Here the thickness of lower guide is $t = 0.8\mu m$.

다음으로, 테이퍼 각도가 0.1° , 0.5° 일 때 하층채널의 두께변화에 따른 TM 모드에 대한 전력전송효율의 변화를 분석하였다. 이에 대한 가지적 분석이 그림 6에 자세하게 나타나있다. 그림에서 보듯이 상층채널로 입사된 전력은 테이퍼 방향성 결합기의 초기영역에서 근접한 두 채널간의 결합으로 인하여 전력전송이 이루어

하지만, 전파거리가 증가함에 따라 두 채널간의 분리 간격이 증가하여 전력전송효율은 감소한다. 이러한 테이퍼 결합기의 특성에 기인하여 그 결합효율은 채널의 구조가 대칭 구조 ($t = 0.8 \mu\text{m}$)일 경우 증가하고, 비대칭 구조 ($t = 0.4, 0.6 \mu\text{m}$)일수록 감소함을 보였다. 또한, 그림 6(b)에서 보듯이 테이퍼 각도가 증가함에 따라 두 도파간의 결합특성은 급격히 감소하였고, TE 모드도 (여기서, 그림으로 도시하지 않았지만) TM모드와 유사한 결과를 나타내었다. 오직, 대칭 구조일 경우 수렴하는 전력전송효율이 TM 모드보다 조금 향상되었다.

마지막으로, 하층채널의 두께가 $0.8 \mu\text{m}$ 인 대칭구조에서 테이퍼 각도가 각각 0.1° , 0.5° 일 때 테이퍼 방향성 결합기에서 전파하는 TM 모드의 분포를 입체적으로 분석하기 위하여 그 3 차원 분포를 그림 7에 나타내었다. 그 필드분포에서 보듯이 상층 채널을 통하여 입사된 모드는 테이퍼 각도가 작을 경우(그림 7(a)) 전파방향을 따라 진행하는 필드의 변화는 크지만, 테이퍼 각도가 커질수록(그림 7(b)) 필드의 변화는 완만하다. 이는 테이퍼 각도가 증가함에 따라 테이퍼 방향성 결합기의 상/하층 채널간의 결합특성이 약해져 전송된 에너지가 빠르게 독립된 채널로 수렴함을 의미한다. 비록, 비대칭구조에 대한 등고선 분포는 도시하지 않았지만 비대칭 테이퍼 방향성 결합기는 테이퍼 각도에 상관없이 상/하층 채널로 전력이 잘 분배됨을 알 수 있었다.

이상에서 보듯이 결합기의 구조가 대칭일 경우 상층 채널과 하층채널의 출력 단을 통하여 나오는 전력은 테이퍼 각도에 의존하여 민감하게 영향을 받으므로, 광 필터(optical filter)를 제작하기 위한 구조로 자주 이용되고 있다. 그리고, 구조가 비대칭일 경우 양쪽 출력 단을 통해 나오는 전력이 테이퍼 각도에 상관없이 거의 동일하므로 광 전력 분할기(optical power divider) 혹은 파장 분할 다중화기(wavelength-division multiplexer)로 사용될 수 있다.

V. 결 론

정확한 모드 전송선로 해석법 (MTLT)을 이용하여 입력파장 $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ 일때 TE와 TM 모드에 대한 테이퍼 방향성 결합기를 해석하였다. 횡방향 공진조건에 기초한 전파상수는 테이퍼 각도 θ 와 하층채널의 두께 변

화에 따라 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서, 전파상수의 변화는 필드분포와 전력전송효율의 변화에 영향을 주며, 이로 인해 테이퍼 광 결합기는 테이퍼 각도와 하층채널의 두께 변화에 따라 각기 다른 용도의 광 소자로서 사용될 수 있다. 예를 들어, 구조가 대칭이면 서로 다른 두 모드(우/기 모드)의 전파상수는 동일한 값으로 수렴하며, 구조가 비대칭이면 이들 모드는 서로 다른 전파상수 값으로 수렴하므로 대칭구조의 테이퍼 방향성 결합기는 광 필터로서 비대칭구조는 광 신호 분배기로서 유용하게 이용될 수 있다.

결국, 기존의 근사적 해석법인 비 직교성 결합모드이론 (NCMT)의 타당성과 제한성을 검증하기 위하여 본 논문에서는 정확한 모드 전송선로이론 (MTLT)을 제안하고 그 수치 해석적 결과들을 비교하였다. 비교결과, 테이퍼 각도가 클수록 근사적 해석법인 NCMT의 수치 해석적 결과의 정확성은 현저히 줄어들었다. 특히, 수치 해석에서 중요한 고려 사항중의 하나인 시뮬레이션 시간은 수 십 초로 두 해석법이 거의 비슷하게 걸렸다. 따라서, 본 논문에 제안한 모드 전송선로 이론은 테이퍼 방향성 결합기의 광학적 특성을 분석하고 설계하기 위한 매우 정확하고 간략한 시뮬레이션 알고리즘을 제공하며, 쉽게 3 차원 구조를 해석하기 위하여 확장될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] H. A. Haus and N. A. Whitaker, "Elimination of Cross Talk in Optical Directional Couplers," *Appl. Phys.*, Vol. 44, No. 1, pp. 1~3, 1985.
- [2] A. F. Milton and W. K. Bums, "Tapered Velocity Couplers for Integrated Optics: Design," *Appl. Opt.*, Vol. 14, No. 5, pp. 1207~1212.
- [3] T. Tamir Ed., *Guided-Wave Optoelectronics*, New York: Springer-Verlag, 1988.
- [4] M. Geshiro, T. Kitamura, K. Fukumura and S. Sawa, "A Three-Waveguide Tapered-Velocity Coupler for Dividing Optical Power into Three Equal Parts," *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E80-C, No. 11, pp. 1414~1420, 1997.
- [5] S. Lessard and W. P. Huang, "Assessment

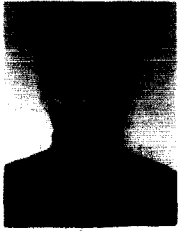
of Coupled-Mode Theory for Tapered Optical Coupler," *J. Lightwave Technol.*, vol. 11, pp. 405~407, 1993.

[6] 호광춘, 김준환, 김영권, "광통신용 광 결합기의

모드 전송선로 해석법," *대한전자공학회지*, 제 35권, D편, pp. 25~31, 1998

[7] L. B. Felsen and N. Marcuvitz, *Radiation and Scattering of Waves*, IEEE Press, 1994.

저 자 소 개



孫碩備(正會員)

1973년 4월 10일생. 1997년 2월 건국대 전자공학과 학사. 1999년 2월 건국대 전자공학과 석사. 1999년 3월~현재 건국대 전자공학과 박사과정. 주관심 분야는 광 유/무선 통신, 광소자의 설계 및 해석

扈光春(正會員) 第 35卷 D編 第 7號 參照

金映權(正會員) 第 35卷 D編 第 7號 參照