

### 3- 도파로 방향성 결합기의 전송선로 해석법

호광춘\*, 이리홍\*\*, 김영관\*

\*: 한라공과대학교 전자공학과 \*\*: 건국대학교 전자공학과

강원도 원주시 흥업면 흥업리 산 66 번지

[kwangho@hit.halla.ac.kr](mailto:kwangho@hit.halla.ac.kr)

### Modal Transmission-Line Theory of Three-Waveguide Couplers

Kwang Chun Ho\*, Ri Hong Lee\*\*, Yung Kwon Kim\*\*

\*: Halla Institute of Technology, \*\*: Kon-Kuk University

San 66, Heungup, Wonju, KangwonDo

[kwangho@hit.halla.ac.kr](mailto:kwangho@hit.halla.ac.kr)

#### Abstract

A three-waveguide coupler consisted of a central guide and two side guides is theoretically explored by using modal transmission-line theory. The numerical results reveal that the coupling length  $L_c$  is different from that calculated by coupled-mode theory and the difference increases gradually as the guiding modes increase.

#### 1. 서론

3 개의 도파관으로 구성된 방향성 결합기는 광통신용 소자로서 많은 관심을 끌어왔다 실제로 제작이 용이하고 결합 분배에 대한 해석이 간편하여 WDM 용 소자로 널리 이용되었다 3 개의 도파관을 이용한 결합기의 설계는 두개의 도파관을 이용한 것보다 결합 길이가 짧고 소자의 소형화가 가능하므로 다양한 해석법에 의하여 그 특성이 해석되고 연구되어 왔다

결합 모드법(Coupled Mode Theory; CMT)<sup>[2]</sup> 이나 빔 전파방법(Beam Propagation Method; BPM)<sup>[3]</sup> 과 같은 근사적 해석법들이 주로 그 전력전송 특성을 해석하기 위하여 사용되었다 이 해석법들은 3-도파로 방향성 결합기와 같은 강한 결합력을 나타내는 구조의 모드 특성들을 충분하고

정확하게 고려할 수 없다는 단점이 있다 그래서 Ho<sup>[4]</sup>에 의해 제안된 새로운 방법인 모드 전송선로 해석법(modal transmission-line theory; MILT)을 이용하여 그림1-1 과 같은 3-도파관을 정확하게(rigorous) 분석하였다

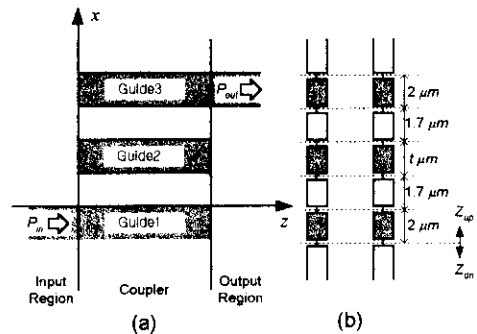


그림1-1. (a) 3-도파관으로 구성된 광 결합기 (b) 방향성 결합기의 x 축 등가 전송선로 모델

#### 2. 모드의 전송 특성

굴절률 1.55 의 cladding 으로 구성된 굴절률 1.57 의 3-도파로 전력전송 특성을 정확하게 해석하기 위하여 먼저 그림1-1 에 주어진 방향성 결합기에서 3 개의 모드만이 존재하도록 도파관 2 의 두께  $t$  를 결정해야 한다 이를 위하여 입력단 ( $z=0$ )

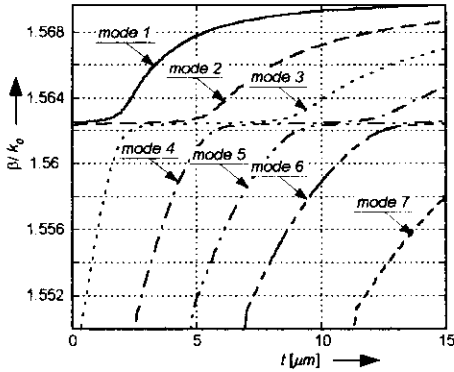


그림2-2. 도파관 2 의 두께  $t$  에 대한 모드 수의 변화

에서 그림1-1(b)와 같은  $x$  축 방향의 등가 전송선로 모델을 구성한다 구성된 모델의 임의  $x$  축선 상에서 전송선로 해석법의 공진조건  $Z_{up} + Z_{dn} = 0$  을 적용하여 전송 모드들의 유효굴절률을 계산하면 도파관2 의 두께 변화에 따른 방향성 결합기에 존재하는 전체 모드 수가 결정된다 동작 주파수  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$  에서 TE 모드에 대한 그산란도 (dispersion curve)가 그림 2-1 에 주어졌다 그림2-1 에서 보듯이 3- 모드가 존재하는 도파관 2 의 두께  $t$  는  $0.3 \sim 2.7 [\mu\text{m}]$  이다 이 중에서도 입력 모드의 분포가 가장 좋은 (전력전송이 최대가 되는) 두께  $2.1 [\mu\text{m}]$  에 대하여 그 결합효율을 해석하였다 그때 입 출력 단에서의 전계는

$$E_r(x, z) = V_r(z)e_r(x) \quad (2-1)$$

이고 3- 도파관으로 구성된 결합기에 존재하는 전계는 진행하는 3 모드의 선형적 결합으로 표현된다

$$E(x, z) = V_1(z)e_1(z) + V_2(z)e_2(z) + V_3(z)e_3(z) \quad (2-2)$$

여기서  $r$  은 입 출력 영역에서 각각  $in$  또는  $out$  을 나타낸다 결국 입력 경계면 ( $z=0$ )에서 식 (2-1)과(2-2)의 전계분포에 대하여 경계조건을 적용하면 다음과 같다

$$V_n(0)e_n(x) \cong V_1(0)e_1(x) + V_2(0)e_2(x) + V_3(0)e_3(x)$$

$$(2-3)$$

그리고 길이  $z_0$  만큼 진행한 후 출력단에서의 경계조건은

$$V_{out}(z_0)e_{out}(x) \cong V_1(z_0)e_1(x) + V_2(z_0)e_2(x) + V_3(z_0)e_3(x) \quad (2-4)$$

을 만족한다 위의 식(2-3)에 전장의 직교조건 (orthogonality condition)<sup>[4]</sup>을 적용하여 풀면

$$V_n(0) = T_{n,m} V_m(0) \quad (2-5)$$

이 된다 여기서 아래 첨자  $m=1, 2, 3$  을 나타내며 입력 변환상수 (transformation constant)  $T_{n,m}$  은 아래와 같이 주어진다

$$T_{n,m} = \int e_n(x)e_m^*(x) dS \quad (2-6)$$

같은 방법으로 출력 정규화 조건 (normalization constant)을 적용하여 식 (2-4)를 출력 전압에 대하여 풀면

$$V_{out}(z_0) = V_1(z_0)T_{1,out} + V_2(z_0)T_{2,out} + V_3(z_0)T_{3,out} \quad (2-7)$$

이고 그 출력 변환상수  $T_{m,out}$  은

$$T_{m,out} = \int e_m(x)e_{out}^*(x) dS \quad (2-8)$$

과 같이 정의된다 결국 식(2-5)를 식(2-7)에 대

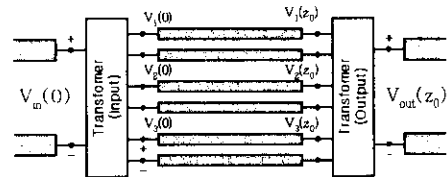


그림2-3. z 축의 등가전송선로

입하고 정리하면 입력전력에 대한 출력전력의 비율을 나타내는 그 결합효율을 정의할 수 있다

$$\eta = \frac{\text{Re}\{k_z^{(out)}\} |V_{out}(z_0)|^2}{\text{Re}\{k_z^{(in)}\} |V_n(0)|^2} \quad (2-9)$$

식 (2-9)를 나타내는 진행방향 ( $z$  축)의 그 등가 전송선로가 그림 2-3 에 자세하게 묘사되어 있다

3. 수치 해석

2 절에서 언급한 모드 전송선로 해석법의 공진조건을 적용하여 입력 경계면에서의 전계를 구하면 그림3-1 과 같다 그림에서 보듯이 설계된 그림 1-1 의 3-도파로 결합기는 오직 3-모드의 중첩 모드 (supermodes)가 존재하며 이 3-중첩모드의 선형적 결합으로 구성되는 전송모드 (guiding mode)는 대부분 도파관 1 을 통하여 입력됨을 알 수 있다 그때 식 (2-9)에서 정의된 결합효율을 이용하여 도파로 1 을 통하여 입사된 전력의 출력특성을 구하면 그림 3-2 와 같다 즉 그림 3-2

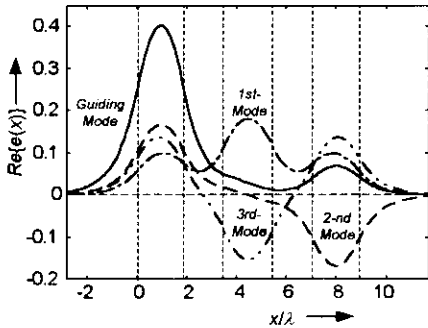


그림3-1. 입력 경계면에서의 전계분포

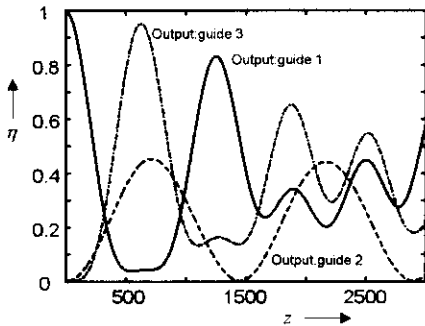


그림3-2. 도파관 1 에서 입사된 전계에 대한 결합 효율의 변화

는 도파관 각각에서 출력되는 전력의 입력 대 출력비를 그림으로 그린 것이다

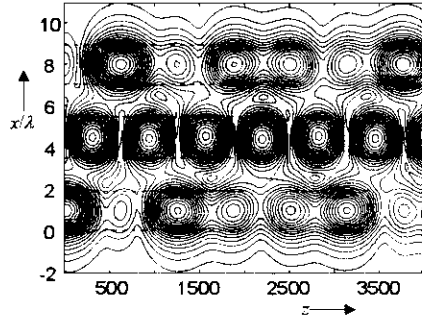


그림3-3. 전력전송 특성을 묘사하는 등고선

결합모드 해석법은 그 최대 전력전송 거리를 나타내는 결합길이 (coupling length)를 계산하기 위하여 방향성 결합기에서 생성되는 3-중첩모드를 이용하는 것이 아니라 결합에 관여하는 대칭 (symmetric) 성분과 비대칭 (antisymmetric) 성분만의 모드만으로 그 결과를 산출했다 그러나 전

표3-1. 결합 모드 방법과 전송선로 해석법의 비교 (단위 μm)

두께	존재하는 모드 수	CMT 의 결합길이	TLM 의 결합길이
1.5	3	1500	1621
2.0	3	660	620
2.1	3	655	626
2.5	3	1300	1441
3	4	2500	2708
5	5	2000	1793

송선로 해석법에서는 작은 영향이지만 결합에 관여하는 모든 중첩모드를 이용하여 그 결합길이를 결정하므로 정확한 최대 전력전송 길이를 계산할 수 있다 그림 3-3 의 전송전력 등고선에서 볼 수 있듯이 도파관 2 를 제외한 도파관 1, 3 에서의 전력전송은 주기성이 없으므로 그 결합길이를 단지 대칭 성분과 비대칭 성분으로 계산하는 것은 부정확함을 직관적으로 알 수 있다

표 3-1 에 도파관 1 을 통하여 입사된 모드가 도파관 3 으로 출력되었을 경우 결합 모드 방법과 모드 전송선로 해석법을 사용하여 계산된

결합길이를 나타내었다 표에서 보듯이 전송 가능한 모드가 증가함에 따라 계산된 결합길이가 현저하게 다름을 알 수 있다

#### 4. 결론

모드 전송선로 해석법을 이용하여 3-도파로 방향성 결합기의 전력전송 특성을 수치 해석하였다 해석결과 결합기의 결합길이  $L_c$  는 근사적 해석법인 결합 모드 방법에 의하여 계산된 결과가 정확하지 않음을 보였으며 전송 가능한 모드의 수가 증가함에 따라 그 차이가 더욱 커짐을 발견하였다 결국 모드 전송선로 해석법은 3-도파로 방향성 결합기의 광학적 특성을 분석하는데 있어 정확하고 쉬운 해석법으로 사용될 수 있다

#### 참고 문헌

- [1] J. P. Donnelly, H. A. Haus, and N. Whitaker, "Symmetric three-guide optical coupler with nonidentical center and outside guides," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 23, pp. 401-406, 1987.
- [2] K. L. Chen and S. Wang, "The crosstalk in three-waveguide optical directional couplers," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 22, pp. 1039-1041, 1986.
- [3] W. P. Yuen, "On the different formulations of the coupled-mode theory for parallel dielectric waveguides," *J. Lightwave Technology*, Vol. 12, pp. 82-85, 1994.
- [4] 호광춘, 김준환, 김영권 "광통신용 광 결합기의 모드 전송선로 해석법" 전자공학 회지에 제출중, 1998.