

## 방향성 결합기의 응용 구조 및 특성 연구

### Special Structural Dependence Of Directional Coupler Characteristics

최철현\*, 홍정무\*, 오범환\*  
(Chul Hyun Choi, Jung Moo Hong, Beom-hoan O)

#### Abstract

We analyze the variation of coupling length as a function of the waveguide width for a directional coupler. It is interesting that the coupling length is not monotonic function of waveguide width for a given distance between the centers. The waveguide width for a maximum coupling length can be utilized for the optimum design of a directional coupler.

**Key Words(중요용어) :** 방향성 결합기, 결합길이, 소멸비

#### 1. 서론

여러 광소자를 집적화시키는 연구에 있어 광소자의 소형화는 필수이다. 특히 소형화를 위한 도파로 폭 설계는 수  $\mu\text{m}$ 에서 sub- $\mu\text{m}$ 까지 감소되고 있는 추세이다.[1] 실제 소자를 제작하는 공정상에서 도파로 폭의 조절은 0.1 $\mu\text{m}$  정도에 지나지 않으므로 이로 인한 도파로의 특성 변화와 그로 인한 설계 변수의 유효공차는 크지 않으며, 따라서 실제 소자의 구현이 쉽지 않다.[2] 이와 같은 공정상의 도파로 폭 변화를 간접적으로 보정하기 위해 방향성 결합기의 결합길이 특성을 이용하고자 한다. 방향성 결합기(Directional Coupler)는 두 도파로를 나란히 배열하여 약한 광결합을 형성함으로써 입력 도파로에 입사된 광에너지가 결합길이만큼 진행한 후 다른 쪽

도파로로 광에너지를 전이시키는 소자이며, 광통신 시스템의 집적광학회로를 구성하는데 있어서 중요한 역할을 한다. 특히, 광에너지의 전이 및 결합 특성은 광스위치, 파워 분배기, 필터, 변조기 등에 널리 이용되고 있다.[3-4]

여기서는 실리카 계열의 도파로 구조를 예로 결합기의 도파로 폭 변화에 대한 결합길이 특성을 분석하였다. 그림 1과 같은 3차원 구조에 대하여 유효굴절률법(Effective Index Method)을 적용하여 2차원 구조로 대치한 후 MPA(Modal Propagation Analysis)를 사용하였다.[5] 또한, 도파로 폭을 증가시켜 다중모드에서도 결합길이 특성을 알아보았다.

#### 2. 방향성 결합기의 기본 도파 이론과 특성 분석

방향성 결합기에서 결합길이는 광에너지의 완전한 스위칭 위치를 나타내는 중요한 변수로써, 두 기본 모드 실효 굴절률의 차이로 아래의 식과 같이 표현된다.

\* 인하대학교 전자재료공학과  
(인천시 남구 용현동 인하대학교,  
Fax: 032-875-5882  
E-mail:obh@inha.ac.kr)

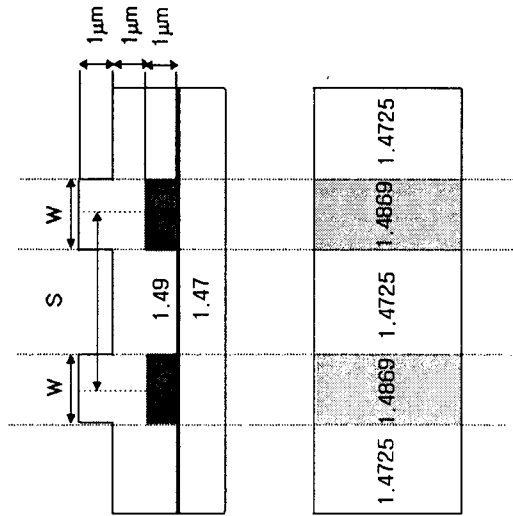


그림 1. Sol-Gel의 3차원 및 2 차원 구조도

$$L_c = \frac{\lambda}{2(N_e - N_o)} \quad (1)$$

여기서  $N_e$ ,  $N_o$ 는 방향성 결합기내의 even, odd 모드 굴절률이며,  $\lambda$ 는 진공중에서 빛의 파장이다. 해석적으로  $N_e$ ,  $N_o$ 를 얻기 위해서 다층구조이론 (Multilayer Stack Theory)을 방향성 결합기에 적용하여 근사시킨다.[5]

입력 도파로로 입사된 광에너지는 결합기내를 진행하는데, 3dB 결합길이와 완전 결합길이에서 모드 분포는 그림 2와 같다. 특히, 3dB 결합길이에서 모드 분포는 좌우대칭이어서, 두 도파로로 균등한 광 에너지 분배가 이루어진다.

식 (1)을 이용하여 두 도파로의 중심간격을 고정시키고 결합기의 도파폭에 따른 결합길이 특성을 그림 3에 나타내었다. 이때 중심간격은  $5\mu\text{m}$ 에서부터  $1\mu\text{m}$  간격으로  $15\mu\text{m}$ 까지 증가시켰다. 그림 3에서 우측 그림은 중심간격이 6, 7,  $8\mu\text{m}$ 일 때를 확대하여 나타낸 것으로, 중심간격과 무관하게 비슷한 결합길

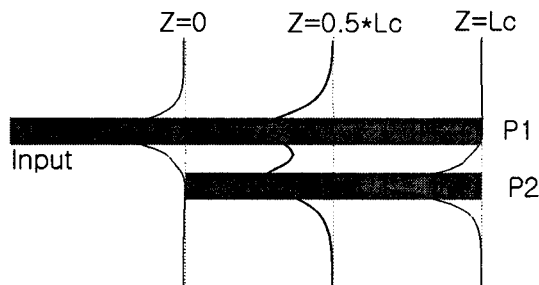


그림 2 방향성 결합기에서 도파모드 분포

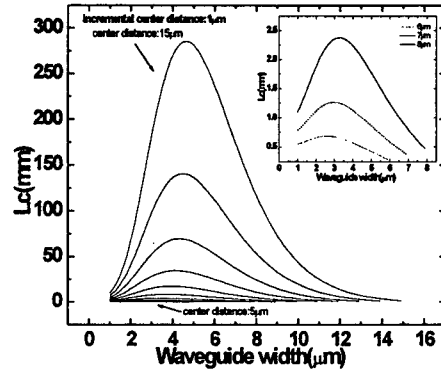


그림 3 도파폭과 중심간격 변화에 따른 결합길이 변화

이 분포를 갖는다. 즉, 특정 도파폭까지 결합길이는 증가하며 그 이후에서는 감소하는 분포로, 최대 결합길이를 갖는다. 또한, 중심간격이 증가함에 따라 최대 결합길이를 갖는 도파폭도 증가하고 있다. 최대 결합길이를 갖는 도파폭에서 최소의 결합상수를 가지는 것이므로 주어진 중심간격 조건하에서는 이때의 도파모드가 가장 광가둠효과가 크다고 할 수 있다. 이러한 중심간격과 최대 결합길이 도파폭과의 관계를 그림 4에 정리하였다. 또한 본 구조에서 단일모드 유지 도파폭은  $3.75\mu\text{m}$ 로, 그 이상으로 도파폭이 증가하면 다중모드로 전환된다. 그림 4에서 도파모드가 다중모드로 전환되면, 중심간격에 따른 도파폭 변화는 단일모드에 비해 적어진다. 이러한 이

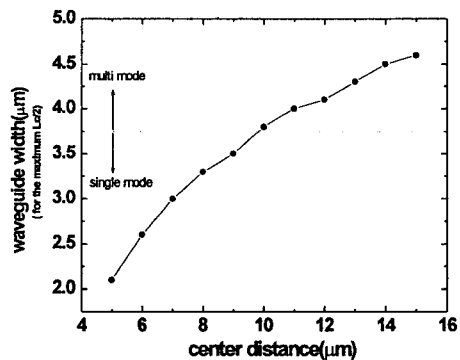


그림 4 최대 결합길이에서의 중심간격과 도파폭의 변화

유로는 기본모드 변화에만 의존하던 결합기가 다중모드가 되어 기본모드뿐만 아니라 다른 모드에도 영향을 받아 중심간격이 증가하여도 최대 결합길이를 갖는 도파폭의 변화는 크지 않게 된다. 그림 5는 최대 결합길이를 갖는 조건에서 기본 모드의 전기장 분포로써, (a)는 even 모드이고 (b)는 odd 모드이다. 이때 중심간격은 6, 8, 10 $\mu\text{m}$ 이며, 각기 다른 분포를 보인다. 중심간격이 증가하면 두 기본 모드의 최고 진폭은 모두 감소하며, even 모드의 중심( $x=0\mu\text{m}$ )에서 진폭은 최대 진폭보다 더 많이 감소한다. 이와 같은 이유는 중심간격의 증가로 두 도파로 사이의 간격이 멀어져 각 도파로간의 간섭이 감소하기 때문이다. 그림 3에서 도파폭에 따른 결합길이는 최대 결합길이 근처보다 그 밖의 도파폭에서 변화가 크기 때문에, 이에 대한 소멸비 변화도 커진다. 같은 이유로 도파폭이 변하게 되면, 3dB 결합길이에서도 소멸비 차이가 발생하며 이는 최대 결합

길이 도파폭보다는 그 밖의 도파폭에서 더 커진다. 이에 대하여 중심간격이 8 $\mu\text{m}$ 이고 도파폭이 2 $\mu\text{m}$ 인 구조에서, 0.1 $\mu\text{m}$ 의 도파폭 변화에 대하여 진행거리에 따른 소멸비 변화를 그림 6(a)에 나타내었다. 특히, 0.1 $\mu\text{m}$ 의 도파폭 변화를 갖는 구조에서 최대 소멸비(결합길이에 있어서의 소멸비)는 설계된 구조( $w=2\mu\text{m}$ )에 비해 감소되어, 도파폭 변화는 제작된 소자의 성능을 저하시킨다. 이와 같은 차이는 3dB 결합길이에서도 발생하며, 이를 그림 6(b)에 나타내었다. 3dB 결합길이(0.939mm)에서 도파폭이 2 $\mu\text{m}$ 인 구조는 균등한 광에너지 분배가 이루어지지만, 0.1 $\mu\text{m}$ 의 도파폭 변화를 갖는 구조에서는 분배비가 서로 다르며 0.6dB의 차이를 보인다. 중심간격이 8 $\mu\text{m}$ 인 구조에서 최대 결합길이 도파폭은 3.3 $\mu\text{m}$ 이며, 이때 0.1 $\mu\text{m}$ 의 도파폭 변화에 대하여 진행거리에 따른 소멸비 변화를 그림 7(a)에 나타내었다. 그림 6(a)에서 0.1 $\mu\text{m}$ 의 도파폭 변화에 대한 소멸비 변화는 크지만,

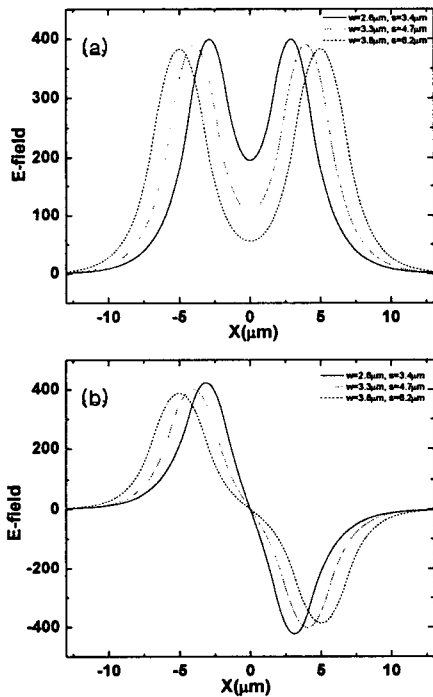


그림 5 최대 결합길이에 있어서의 전기장 분포도(중심간격:6, 8, 10  $\mu\text{m}$ )  
(a) Even mode  
(b) Odd mode

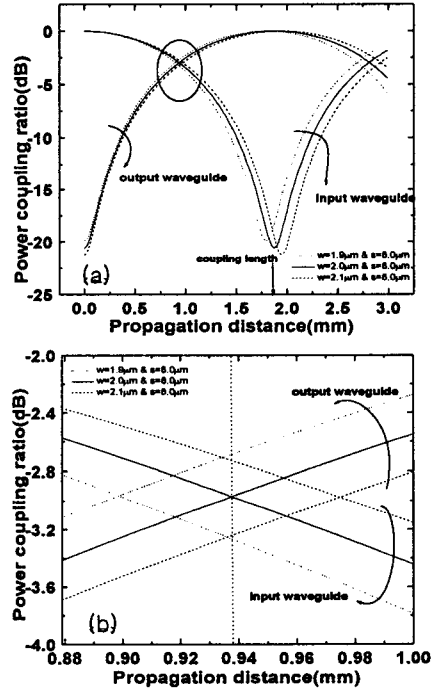


그림 6 중심 간격이 8 $\mu\text{m}$ 일 때  $W=2\mu\text{m}$ 에서  
(a) 도파로 변화에 따른 소멸비 변화  
(b) 3dB 결합길이 근처에서 소멸비 변화 (그림 6(a)에서 등근 원 영역을 확대)

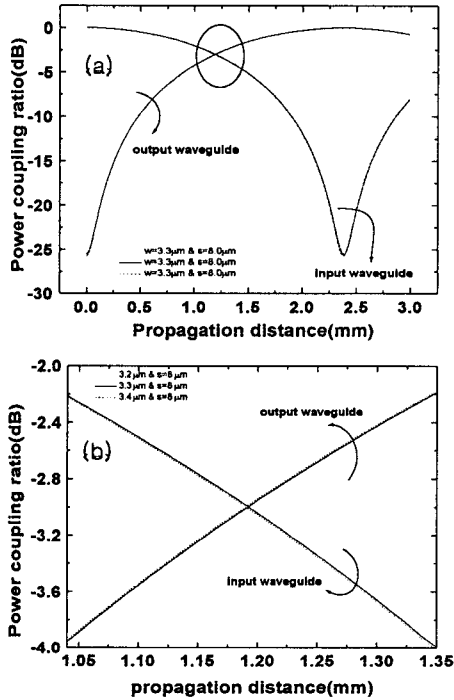


그림 7 중심 간격이  $8\mu\text{m}$ 일 때 최대 결합길에서  
 (a) 도파로 변화에 따른 소멸비 변화  
 (b) 3dB 결합길이 근처에서 소멸비 변화(그림 7(a)에서 등근 원 영역을 확대)  
 그림 7(a)에서  $0.1\mu\text{m}$  도파폭 변화에 대한 소멸비 변화는 크지 않다. 또한, 3dB 결합길에서 소멸비를 그림 7(b)에 나타내었으며 이때에도  $0.1\mu\text{m}$  도파폭 변화에 대한 소멸비 변화는 크지 않다. 이로써 최대 결합길이 근처에서는 도파폭 변화에 따른 결합길이와 소멸비 변화가 적음을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 방향성 결합기의 두 도파로 중심 간격을 고정시키고 결합기의 도파폭에 따른 결합길이의 변화특성에 대하여 알아보았으며, 도파폭을 증가시켜 이를 다중모드까지 확장하였다. 그 결과 도파폭에 따라 최대 결합길이가 형성되었으며, 이는 중심간격 변화에 대해서도 규칙적으로 형성되었다. 또한, 중심간격이 증가할수록 도파폭에 따른 결합길이 변화도 증가하였다. 이러한 특성은 소멸비 변화

에도 영향을 주어서, 최대 결합길이 도파폭 근처에서 소멸비는 크게 변하지 않았다. 이와 같은 특성은 도파폭 공정오차의 영향을 극소화하는 최적화 설계에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 정보통신부의 우수 대학원 지원 사업에 연계된 인하대학교 교내 연구비의 지원과 과학 기술처의 중점국가 연구개발 사업의 차세대 포토닉스 연구지원 그리고, 교육부의 두뇌 한국 21 지원과 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-302-012-5) 사업의 연구 지원으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- [1]. B. E. Little et al, "Ultra-Compact Si-SiO<sub>2</sub> Microring Resonator Optical Channel Dropping Filters", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 10, No. 4, pp549-551, April 1998
- [2]. 박순룡, 오범환, "도파폭 공정오차에 따른 광도파 특성변화와 소자성능 저하", 한국광학회지, 10(4), pp342-347, 1999. 8
- [3]. H. S. Hinton, "Optical switching and modulation in parallel dielectric waveguides", J. Appl. phys., 44, pp3257-3262, 1974
- [4]. R. C. Alferness and R. V. Schmidt, "Tunable optical waveguide directional coupler filter", Appl. phys. Lett. 33, 161-163, 1978
- [5]. T. Tamir, "Guided-wave optoelectronics 2nd edition", Berlin: Springer-Verlag, Chapter 3, 1990