

## 중간 결합층이 적층된 측면연마 광섬유 결합기의 해석 및 결합효율 개선

손경락<sup>†</sup>

한국해양대학교 전파정보통신공학부  
Ⓣ 606-791 부산광역시 영도구 동삼동 1번지

김광택

호남대학교 광전자공학과  
Ⓣ 506-714 광주광역시 광산구 서봉동 59-1

(2003년 10월 9일 받음, 2003년 12월 18일 수정본 받음)

상부 도파로와 중간 결합층이 적층된 단일모드 광섬유를 기본구조로 하는 측면 연마 광섬유 결합기를 상호 광 결합이 일어나는 영역을 다층막 도파로로 등가화하여 결합 효율을 해석하였다. 다층막 구조에서 중간 결합층의 유무에 따른 반사도를 계산하여 상부 도파로의 굴절률의 함수로 도시하였고, 상부 도파로의 굴절률이 광섬유 코어의 굴절률보다 클 경우 중간 결합층의 조건에 의해서 광 결합이 증가되어짐을 보였다. 리튬나오베이트를 상부 도파로로 가지는 결합기의 실험결과를 통해 이론적 해석의 타당함을 보였고 계산 결과와 일치함을 보였다.

주제어 : side-polished fiber coupler, planar waveguide, comb filter, multi-layered media.

### I. 서 론

단일모드 광섬유의 측면을 일부분 연마하고 그 상부에 평면 도파로를 구현하여 소산장 결합을 유도함으로써 다양한 광학적 기능을 얻고자 하는 많은 연구가 진행되고 있다. 주로 상부 도파로의 굴절률과 두께, 클래딩의 조건에 따라서 광통신용 소자로서의 기능이 결정되며, 최근까지 광섬유형 필터,<sup>[1,2]</sup> 스위치,<sup>[3]</sup> 편광기,<sup>[4]</sup> 증폭기,<sup>[5]</sup> 센서<sup>[6,7]</sup> 등으로의 응용을 위한 연구결과가 발표되고 있다. 상부 도파로의 경우 광섬유 코어보다 굴절률이 높은 폴리머 계열의 물질을 연마된 광섬유의 클래딩층 위에 직접 도포하여 제작하거나, 별도로 제작한 평면 도파로를 붙이게 된다. 지금까지 연구된 대부분의 소자 구조에서는 두 도파로 사이에 공기층을 없애기 위해서 광섬유의 클래딩 층과 동일한 굴절률을 가지는 정합액을 이용하고 있다. 능동소자로 활용하기 위해서는 상부 도파로 또는 상부 도파로의 클래딩 층에 열광학이나 전기광학 효과를 가지는 물질을 이용하게 된다. 이때 두 도파로 사이에 높은 광 결합이 일어날 수 있는 물질의 선택은 매우 중요하다. 상부 도파로의 구조와 조건에 따라서 두 도파로 사이에 적절한 중간 결합층을 설계하여 광섬유 모드와 평면 도파로 모드 사이의 위상정합 조건을 맞추어 준다면 강한 광 결합을 유도하여 높은 소멸비를 얻을 수 있다.<sup>[8]</sup> 특히 상부 도파로의 굴절률이 광섬유 코어의 굴절률보다 매우 큰 경우 중간 결합층의 역할은 매우 중요하며 최적화 조건이 제시되어야 한다.

본 논문에서는 다층박막에 대한 광선 해석법<sup>[9]</sup>을 측면연마 광섬유 결합기 구조에 적용하여 입사광선에 대한 반사도와 투

과도를 계산함으로써 두 도파로 사이의 광 결합 정도를 예측할 수 있음을 보고한다. 이 방법은 복잡한 결합모드이론을 적용하지 않고도 간단히 소자의 광 결합력을 해석할 수 있어서 급속층 클래딩을 가지는 광섬유형 편광기 해석에 도입되었다.<sup>[10]</sup> 본 연구에서는 측면연마 광섬유 구조에서 두 도파로 사이의 광 결합력을 극대화하기 위한 중간 결합층 해석 및 설계에 처음으로 적용하였으며, 상부 도파로 조건에 따라 설계되어야 하는 중간 결합층의 조건을 제시할 수 있음을 보이고자 한다. 이론적인 해석 결과를 근거로 200 μm 두께의 리튬나오베이트를 평면 도파로로 가지는 결합기를 제작하여 실험결과를 제시함으로써 해석의 타당함을 보였다. 리튬나오베이트를 상부 도파로로 가지는 경우에 있어서 중간 결합층의 유무에 따라 광 전력 전달 특성이 다르게 나타났으며, 중간 결합층을 삽입함으로써 20 dB 이상의 광 결합력을 얻을 수 있었다.

### II. 다층막 모델링에 의한 광 결합력 해석이론

그림 1(a)는 중간 결합층을 가지는 측면연마 광섬유 결합기 구조를 보여주고 있으며, 그림 1(b)는 단면 구조이다. 광섬유의 소산장과 충분한 광결합이 일어날 수 있도록 평면 도파로를 코어 가까이 근접시켰다. 손실을 고려하지 않는다면 원통형 광섬유 도파로는 빔이 진행하면서 상부 도파로와 결합하는 방향으로의 모드장과 광섬유의 전파 상수가 일치하는 평면 도파로로 등가화할 수 있다.<sup>[11]</sup> 그림 1(c)는 단일모드 광섬유를 유효 굴절률이 일치하는 평면 도파로로 등가화하여 나타난 구조이고 굴절률 분포는 그림 1(d)에 나타내었다. 여기서,  $n_{e1}$ ,  $n_{e2}$ 는 등가화된 광섬유 코어와 클래딩의 유효 굴절률,  $t_b$ 는 중간 결합층의 두께,  $s'$ 은 상부 도파로와 결합하는 광섬유 클래

<sup>†</sup>E-mail: krsohn@bada.hhu.ac.kr

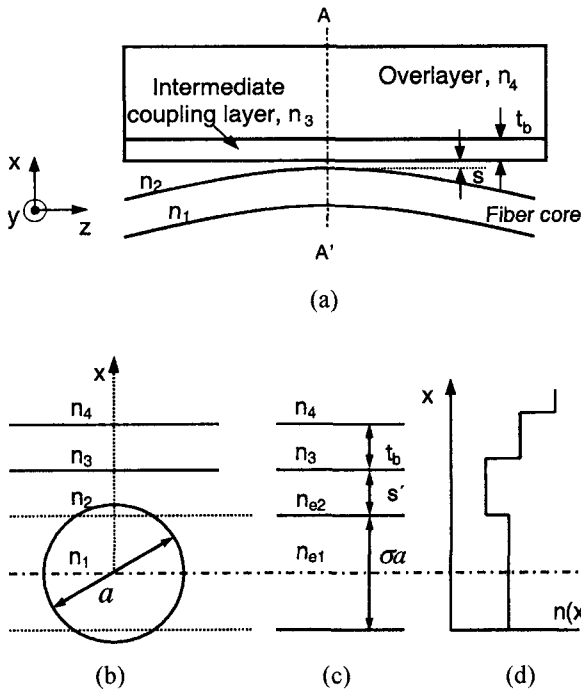


그림 1. (a) 중간 결합층을 가진 측면면파 광섬유 결합기, (b) 결합기의 단면도 (A-A'), (c) 등가화된 1차원 결합기 구조, (d) 등가화된 결합기의 굴절률 분포.

당의 유효 두께이다. 광섬유 코어 직경이  $a$ 일 때 등가화된 코어의 유효 두께를 구하기 위한  $\sigma$ 의 값은 다음과 같다.

$$\sigma = 0.8404 + 0.0251V - 0.0046V^2 \quad (1)$$

여기서  $V = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ 이다. 일반적으로 단일모드 광섬유의 경우  $V = 2.1 \sim 2.2$  범위의 값을 가진다. 이때 광섬유 코어 내부에 걸쳐 진행하는  $LP_{01}$  모드는  $\beta_0$ 의 전파상수를 가지며, 코어와 클래딩의 경계에서  $\theta_0$ 의 각도로 궤적을 그리면서 진행한다고 가정할 수 있다. 그러므로, 그림 1은 그림 2와 같이 박막 형태의 도파로가 다수 개 적층된 구조로 둘 수 있다. 즉, 광섬유와 평면 도파로 사이에 중간 결합층이 적층된 4층의 평면 도파로 구조로 등가화시킬 수 있으며, 광섬유의 코어층에 해당하는 영역 0에서 광선이  $\theta_0$ 의 각도로 진행한다고 도식화할 수 있다. 이때  $\theta_0$ 는  $\beta_z = n_{e1} k_0 \sin \theta_0$ 로부터 계산되어진다. 영역 0에서  $\theta_0$ 의 각도로 진행되는 광선이 각각의 경계면에서 반사하여 영역 0로 되돌아오게 되는 반사파의 전기장의 크기를 계산하여 두 도파로 사이의 광 결합 정도를 예측하고자 한다. 광섬유의 광 전력이 최상부 도파로( $A_N$ )로 많이 빠져나가서 되돌아오는 반사광이 적다면 광 결합 효율은 높은 것이다.

그림 2는 등가화된 모델에 대하여 다층 박막해석법을 적용하여 해석하기 위한 파라미터들을 정의하고 있으며, 다층 구조의 도파로는 다음과 같은 굴절률 분포로 나타낼 수 있다.

$$\phi(x) = \begin{cases} n_{e1}, & x < x_0 \\ n_{e2}, & x \leq x \leq x_1 \\ n_3, & x \leq x \leq x_2 \\ n_4, & x_2 < x \end{cases} \quad (2)$$

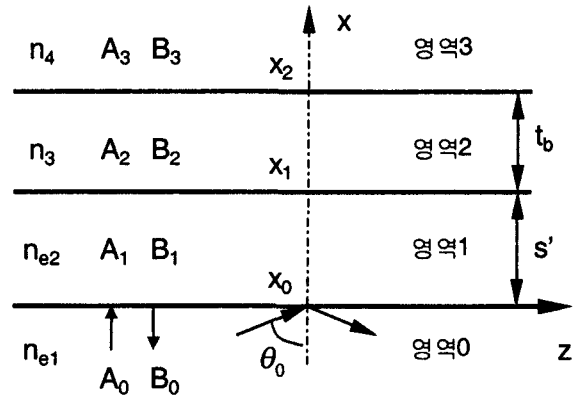


그림 2. 4층 평면 도파로로 등가화된 결합기의 구조도.

각 영역의 두께는

$$\begin{aligned} s' &= x_1 - x_0 \\ t_b &= x_2 - x_1 \end{aligned} \quad (3)$$

로 주어진다.

입사광선을 평면파라고 한다면 전기장  $E(x)$ 는 다음층으로 진행되는 진행파와 경계면에서의 반사에 의한 반사파의 합으로 표현된다.

$$E(x) = \begin{cases} A_0 e^{-jk_{0x}(x-x_0)} + B_0 e^{jk_{0x}(x-x_0)}, & x < x_0 \\ A_1 e^{-jk_{1x}(x-x_1)} + B_1 e^{jk_{1x}(x-x_1)}, & x_0 \leq x \leq x_1 \\ A_2 e^{-jk_{2x}(x-x_2)} + B_2 e^{jk_{2x}(x-x_2)}, & x_1 \leq x \leq x_2 \\ A_3 e^{-jk_{3x}(x-x_3)} + B_3 e^{jk_{3x}(x-x_3)}, & x_2 < x \end{cases} \quad (4)$$

여기서,  $k_{lx}$ 는 각 영역( $l$ )에서의 파 벡터의  $x$  성분을 의미하며, 동일 영역에서의 광선각  $\theta_l$ 과 다음의 식으로 관계되어진다.

$$k_{lx} = n_l \frac{\omega}{c} \cos \theta_l, \quad l = 1, 2, 3, \dots, N-1 \quad (5)$$

각 영역에서의 진행파의 전기장 크기를  $A_l$ , 반사파의 전기장의 크기를  $B_l$ 로 나타내면 처음 빛이 입사하는 영역인 최하위 영역  $A_0$ 와 투과된 빛이 빠져나가는 최상위 영역  $A_N$ 는 다음과 같은  $2 \times 2$  행렬식의 관계로 표현되어진다.

$$\begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_N \\ B_N \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서,

$$\begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} = D_0^{-1} \left[ \prod_{l=1}^{N-1} D_l P_l D_l^{-1} \right] D_N \quad (7)$$

$D_l$ 은 영역  $l$ 에서의 광선의 동적인 성질, 즉 입사파와 반사파의 세기, 위상천이, 편광의 영향을 나타내는 동적 행렬이고,  $P_l$ 은 벌크층을 통한 파동의 전파를 나타내는 전파 행렬이다.<sup>1)</sup> 식 (6)의 행렬식으로부터 다층 매질에 대한 반사계수와 투과 계수를 구할 수 있다. 그림 2의 영역 0으로 입사된 광선에 대

한 반사계수를 구한다면 상부 도파로와의 광 결합 정도를 예측할 수 있다. 영역 0으로 입사된 입사광에 대하여 상부 영역으로 진행한 후 동일 영역으로 되돌아오는 반사광의 비는 반사계수  $r=(B_0/A_0)_{B_N=0}$ 로부터 계산되어지고, 최상위 영역으로 빠져나가는 투과광과의 비는 투과계수  $t=(A_N/A_0)_{B_N=0}$ 로부터 계산되어진다. 반사도(R)와 투과도(T)는 다음의 식으로 표현된다.

$$R=|r|^2 = \left| \frac{M_{21}}{M_{11}} \right|^2 \tag{8a}$$

$$T = \frac{n_N \cos \theta_N}{n_0 \cos \theta_0} |t|^2 \tag{8b}$$

여기서,  $n_N$ 은 최상위 영역의 굴절률이며,  $\theta_N$ 은 최상위 영역으로 투과되는 광선각이다. 측면연마 광섬유 결합기에서 광섬유로 진행되는 광선이 소산장 결합을 통해 상부 도파로로 완전한 광 결합이 일어나기 위해서는 두 도파로의 유효 굴절률이 일치해야 하므로 단면 공동 공진 조건을 만족해야한다. 즉, 다층 매질의 경계면에서의 반사파는 거의 없는 상태이므로 광섬유 내부에 진행되는 에너지의 대부분은 상부 도파로로 투과됨을 의미한다. 그러므로, 광섬유에 입사된 빛이 결합영역에서 상부 도파로로 광 결합을 할 때 두 도파로 사이에 존재하는 클래딩층 또는 중간 결합층의 조건에 따라 광 투과도를 제어할 수 있는 것이다.

### III. 측면연마 광섬유 결합기에 대한 해석 및 실험결과

측면연마 광섬유 결합기 제작시 평면 도파로는 광섬유 클래딩의 일부가 제거된 상부에 접착된다. 따라서, 두 도파로 사이에는 광섬유의 클래딩이 존재하게 되지만 굴절률 조절이 어렵기 때문에 위상정합 조건을 만족하는 상부 도파로의 특정한 굴절률에서만 강한 광 결합이 일어나게 된다. 그림 3은 그림 2의 구조에서 중간 결합층(영역 2)이 존재하지 않고 광섬유의 코어층, 광섬유 클래딩층, 그리고 상부 평면도파로로만 이루어진 3층 구조에 대한 반사량을 계산한 결과이다. 입사광은 광섬유의 코어로만 입사되었다고 가정하였다( $B_N=0$ ). 계산에 사용된 단일모드 광섬유는 코어직경  $a=9\mu\text{m}$ , 코어 굴절률  $n_1=1.458$ , 클래딩 굴절률  $n_2=1.453$ 이다. 상부 도파로와 접촉한 광섬유 클래딩의 유효 두께  $s'$ 에 관계없이 상부 도파로의 굴절률이 광섬유 코어의 굴절률과 비슷한 영역에서 반사량이 최저가 됨을 알 수 있다. 이것은 광섬유의 광전력 대부분이 상부 도파로로 빠져나갔음을 의미하므로 두 도파로 사이에 강한 광전력 전달이 일어났음을 보여준다. 방향성 결합기 구조에서 두 도파로의 유효 굴절률이 같아지는 조건(동일한  $\beta$ 값)에서 최적의 광결합이 일어나는 것과 일치하고 있다. 그러나 상부 도파로의 굴절률과 광섬유 클래딩의 두께가 증가함에 따라 반사량이 증가하여 광 결합이 약해진다. 만약, 굴절률이 큰 리튬나오베이트( $n_{eo}=2.13$ ,  $n_o=2.21@1550\text{nm}$ )의 전기 광학계수를 이용하기 위하여 이를 상부 도파로로 적용할 경우 광섬

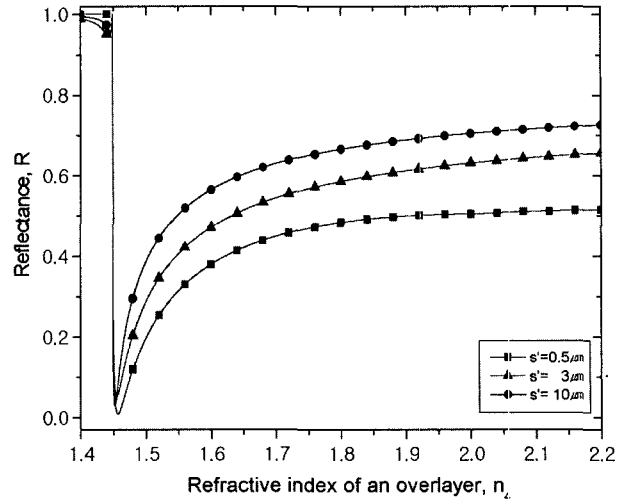
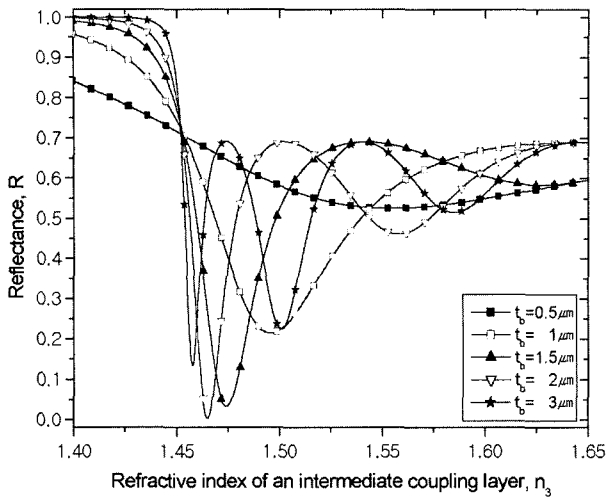


그림 3. 중간 결합층(영역 2)이 없는 경우 상부 도파로의 굴절률( $n_o$ )과 광섬유 클래딩의 두께( $s$ )에 따른 계산된 반사도( $\theta = 86.5^\circ$ ).

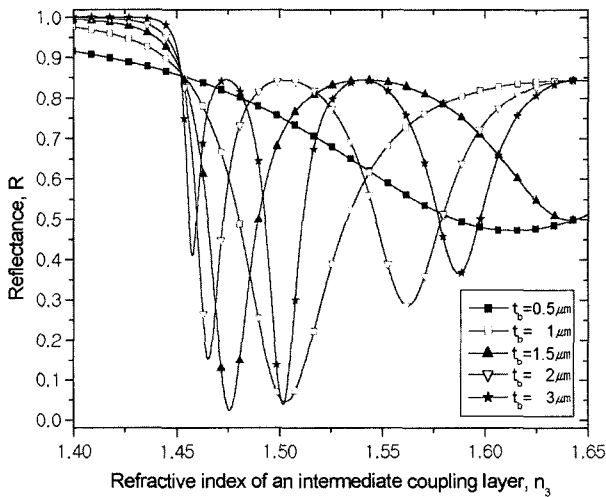
유 모드와의 광 결합력이 약해 큰 소멸비를 얻기 어렵다. 그러므로, 두 도파로 사이의 위상 정합 조건을 맞추어 주기 위한 굴절률 제어가 가능한 중간 결합층이 필요하다. 중간 결합층을 포함하는 그림 2의 4층 구조에 대한 반사도를 중간 결합층의 두께와 굴절률에 대한 함수로 계산하여 그림 4에 보여주고 있다. 식 (7)에서 행렬  $D_1$ 은 편광에 의존하므로 복굴절을 가지는 평면 도파로인 경우 TE와 TM에 대한 응답특성은 달라진다. 그러나, 두 직교 편광에 대하여 중간 결합층에 의한 반사량이 급격히 줄어드는 조건이 있음을 보여주고 있으며, 이것은 상부 도파로로 투과되는 광선이 급격히 증가함을 의미한다. 중간 결합층의 조건이 굴절률  $n_3=1.47-1.5$ , 두께  $t_b=1.5-2\mu\text{m}$  부근에서 편광에 무관하게 효과적인 광 결합이 일어남을 예측할 수 있다.

그림 4의 결과로부터 중간 결합층의 두께를  $2\mu\text{m}$ 로 고정된 조건에서 두고 중간 결합층의 굴절률  $n_3$ 를 변화시키면서 투과도를 계산하였고 그림 5에 나타내었다. 중간 결합층의 굴절률이 광섬유 코어의 굴절률보다 높은 1.475 부근에서 상부 도파로의 높은 굴절률에 대하여 높은 광 투과도를 보이고 있으며, 상부 도파로의 굴절률이 증가해도 일정한 투과도를 유지하고 있다. 따라서 굴절률이 높은 물질을 상부 도파로로 이용하는 경우 중간 결합층에 의해서 광 결합 특성을 개선시킬 수 있으며, 최적 조건에 의한 소자 설계가 가능하여 상부 도파로 물질의 선택범위를 한층 높일 수 있다. 리튬나오베이트를 상부 도파로로 사용할 경우 광섬유 코어와의 굴절률 차가 큼에도 불구하고 높은 광 결합 특성을 얻을 수 있을 것이다.

본 연구에서는 단일모드 광섬유의 소산장을 효과적으로 유도하고 이를 상부 평면 도파로와 강한 광 결합작용이 일어나도록 하기 위하여, 광섬유를 적당한 반경으로 휘 후 이를 블록에 고정하고 클래딩의 일부분을 연마하는 방법인 측면연마 광섬유 결합기 제작 기법을 이용하였다. 이 구조는 광섬유의 소산장에 의한 평면 도파로로의 광 전력 전달이 매우 좁은 영역에서 일어나며 평면 도파로로 한번 결합된 광 전력은 광섬



(a)



(b)

그림 4. 리튬나오베이트를 상부 도파로(영역 3)로 가지는 경우 중간 결합층의 굴절률과 두께에 따른 반사도( $s=3 \mu\text{m}$ ,  $\theta_0=86.5^\circ$ ). (a) TM, (b) TE.

유로 재결합하지 않으므로 이론적 해석의 적용에 대한 타당성을 보장한다. 사용된 광섬유는 코어 직경이  $9.1 \mu\text{m}$ 이고 차단 주파수가  $1260 \text{ nm}$ 인 단일모드 광섬유를 사용하였다. 이 광섬유는  $25 \text{ cm}$  정도의 반경으로 흠이 파진 유리블록에 고정된 후 자외선 경화제에 의해 집착되어진다. 이 블록을 연마패드와 분말을 이용하여 적당한 두께까지 연마한다. 광섬유가 블록상에서 휘어져 있기 때문에 연마시에는 중간 부분에서 먼저 클래딩이 노출되어진다. 광섬유의 코어에서 클래딩까지 가장 가까운 거리  $s=3 \mu\text{m}$  정도가 될 때까지 연마하게 되는데 클래딩의 두께는 정합액의 굴절률 변화에 대한 광 손실 측정법<sup>[12]</sup>으로 계산해낼 수 있다. 즉, 노출된 클래딩 부위에 굴절률이 다른 정합액을 도포하고 광 손실을 측정하여 최대 손실이 발생하는 굴절률을 알게 되면 연마 후 남은 클래딩의 두께를 유추할 수 있는 것이다. 연마된 광섬유의 상부에  $200 \mu\text{m}$  두께의 리튬나오베이트를 부착하여 광 결합을 유도하였다. 두 블록 사이에 존재하는 공기층을 광섬유 클래딩의 굴절률과 동일

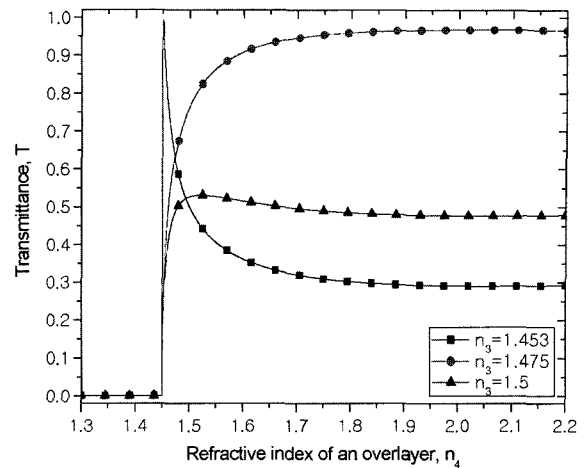


그림 5. 중간 결합층의 두께  $t_b=2 \mu\text{m}$ 일 때 중간 결합층과 상부 도파로의 굴절률에 따른 투과도(TM,  $s=3 \mu\text{m}$ ,  $\theta_0=86.5^\circ$ ).

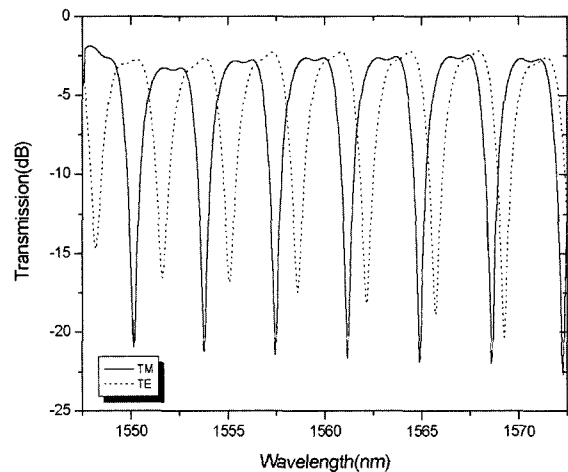
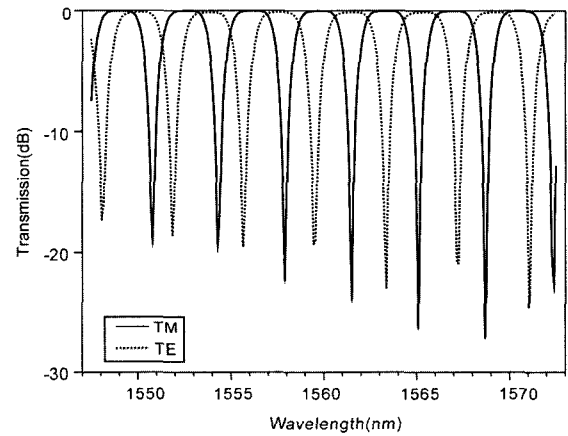


그림 6.  $200 \mu\text{m}$  두께의 리튬나오베이트 평면 도파로에 대한 측면연마 광섬유 결합기의 투과 스펙트럼(중간 결합층의 조건:  $n_b=1.487$ ,  $t_b=2 \mu\text{m}$ ). (a) BPM으로 전산 모의한 결과, (b) 측정 결과.

한 Cargille oil을 정합액으로 사용하여 실험한 결과 모드 결합 현상을 관측할 수 없었다. 두 도파로의 경계에서의 반사파로 인하여 대부분의 광선이 광섬유 내부로만 진행되어짐을 의미한다. 그러나, 이론적인 해석을 바탕으로 최적 광 결합이 일

어는 조건의 중간 결합층을 삽입한 경우에는 채널간 소멸비가 큰 필터 특성을 얻을 수 있었다. UV15(masterbond,  $n=1.487 @633 \text{ nm}$ )를 측면 연마된 광섬유 블록에 스피너 코팅하여 2  $\mu\text{m}$  두께의 박막을 형성하고, 상부에 200  $\mu\text{m}$  두께의 리튬나오베이트를 접착하여 경화시키면 경화된 UV15층이 중간 결합층의 역할을 한다. 그림 6(a)는 다층 평면 도파로로 동기화된 구조를 빔 전파 방법(Beam Propagation Method: BPM)으로 해석하였을 때의 투과 스펙트럼이다. 상부 도파로로 사용한 리튬나오베이트는 굴절률이 높고 두께가 두꺼워 분산 특성이 크게 나타나므로 다중모드를 지원한다. 측정 파장 영역에서 각각의 모드에 대한 유효 굴절률이 광섬유 코어의 유효 굴절률과 일치하는 파장에서 강한 광결합이 일어나므로 필터 특성이 주기적으로 반복되는 빗살필터의 스펙트럼을 보인다. 채널간의 간격은 3.8 nm, 채널간 소멸비는 20 dB 이상으로 나타났다. 리튬나오베이트의 복굴절 때문에 두 직교 편광에 대한 투과 스펙트럼은 다르게 나타남을 알 수 있다.

그림 6(b)는 중간 결합층을 가진 제작된 결합기의 측정결과를 보여 주고 있으며 계산 결과 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 장파장으로 갈수록 결합파장이 약간씩 달라지고 있으며 2 dB 정도의 삽입손실을 보이고 있다. 이것은 제작된 평면 도파로의 두께가 균일하지 못하고 측정 오차를 고려하지 않았으므로 발생하는 것으로 판단되며, 2 dB 정도의 삽입손실은 광섬유와 평면 도파로 제작시 연마공정에서 발생하는 표면의 결합 때문이다. 두 도파로의 표면이 깨끗하고 두께가 일정하게 제어된다면 개선될 수 있다.

#### IV. 결 론

측면연마 광섬유 결합기 구조에서 두께가 두껍고 굴절률이 높은 물질을 상부 도파로로 적용하였을 때의 광 결합력을 동기화된 다층막 도파로에 대한 광선 해석법을 적용하여 해석하였다. 두 도파로 사이에 중간 결합층을 두어 굴절률과 두께를 조절하게 되면 상부 도파로 조건에 따른 최적의 광 전력 전달 특성을 얻을 수 있음을 보였다. 리튬나오베이트의 경우 중간 결합층 없이 두 도파로 사이의 공기층을 광섬유의 클래딩과 굴절률이 동일한 매질을 정합액으로 사용하게 되면 강한 광결합을 얻기 어려워 소멸비가 큰 소자제작이 어렵지만, 광섬유의 코어보다 높은 굴절률을 가진 유전체로 중간 결합층을 형성하게 되면 최적의 광 결합 조건을 유도할 수 있었다. 200  $\mu\text{m}$  두께의 리튬나오베이트를 이용하여 광섬유형 결합기를 제작하였을 때 20 dB 이상의 채널간 소멸비를 얻음으로서 이론적 해석이 타당함을 규명하였다. 본 논문의 결과를 바탕으로

리튬나오베이트의 전기광학계수를 이용한 광섬유형 변조기 제작이 가능할 것으로 기대한다.

#### 참고문헌

- [1] C. Miller, M. Brierey, and S. Mallinsion, "Exposed-core single-mode fiber channel-dropping filter using a high-index overlay waveguide," *Opt. Lett.*, 12, no. 4, pp. 284-286, 1987.
- [2] 김광택, 이소영, 손경락, 이종훈, 송재원, 이상재, 김시홍, 강신원, "광섬유 평면도 파로 광 결합기를 이용한 광필터 제작과 특성 측정," *한국광학회지*, 10권, 5호, pp. 419-423, 1999.
- [3] S. M. Tseng and C. L. Chen, "Low-voltage optical fiber switch," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, pp. L42-L45, 1998.
- [4] K. T. Kim, H. W. Kwon, J. W. Song, S. Lee, W.G. Jung, and S.W. Kang, Polarizing properties of optical coupler composed of single mode side-polished fiber and multi-mode metal-clad planar waveguide, *Opt. Commun.*, vol. 180, pp. 37-42, 2000.
- [5] W. Y. Liu and O. M. Stafsudd, "Optical Amplification of a multimode evanescently active planar optical waveguide," *Appl. Opt.*, vol. 29, no. 21, pp. 3114-3117, 1990.
- [6] K. R. Sohn, K. T. Kim, and J. W. Song, "Optical fiber sensor for water detection using a side-polished fiber coupler with a planar glass-overlay-waveguide," *Sensors and Actuators A*, vol. 101, pp. 137-142, 2002.
- [7] K. R. Sohn, J. W. Sohn, and H. P. Kim, "Polarization insensitive fiber-optic refractometer based on a side-polished fiber coupler with a thick glass waveguide," *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 6, no. 3, pp. 117-122, 2002.
- [8] K. R. Sohn and J. W. Song, "Tunable fiber optic comb filter using a side-polished single mode fiber coupler with  $\text{LiNbO}_3$  overlay and intermediate coupling layer, *Opt. Commun.*, vol. 203, pp. 271-276, 2002.
- [9] P. Yeh, *Optical waves in layered media*, John Wiley & Sons, 1988, chap. 5.
- [10] S. Tseng, K. Hsu, H. Wei, and K. Chen, "Analysis and experiment of thin metal-clad fiber polarizer with index overlay," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 5, pp. 628-630, 1997.
- [11] A. Sharma, J. Kompella, and P. K. Mishra, "Analysis of fiber directional coupler and coupler half-blocks using a new simple model for single-mode fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 143-151, 1990.
- [12] S. M. Tseng and C. H. Chen, "Side-polished fibers," *Appl. Opt.*, vol. 31, no. 18, pp. 3438-3447, 1992.

## **Analysis of side-polished fiber couplers with an intermediate-coupling layer and improvement of their coupling efficiency**

Kyung Rak Sohn<sup>†</sup>

*Department of Radio and Information Communication Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: krsohn@bada.hhu.ac.kr*

Kwang Taek Kim

*Department of Optoelectronics, Honam University, Gwangju, 506-714, KOREA*

(Received October 9, 2003, Revised manuscript December 18, 2003)

An in-line fiber coupler, based on side-polished single-mode fibers covered with an intermediate coupling layer and a planar waveguide, is analyzed by modeling the interaction region as an equivalent multi-layered planar waveguide. The reflectance for the multi-layered structure with and without buffer layer is illustrated as a function of the refractive index and thickness of the overlay waveguides. When the refractive index of the overlay waveguides is greater than that of the fiber core, the conditions for the intermediate coupling layer to increase the power coupling from the fiber to the overlays is also explained. Through the experimental results using a LiNbO<sub>3</sub> planar waveguide, we show that the theoretical analysis is reasonable and in good agreement with the measured values.

OCIS Codes : 060.2340, 120.2440, 130.3730, 230.7390.