

## 격자구조형 광섬유 결합기에서 최적 전력결합을 결정하기 위한 새로운 조건

호광춘<sup>†</sup>

한성대학교 정보통신공학과

Ⓣ 136-792 서울시 성북구 삼선동 2가 389번지

호광수

계명대학교 기계공학과

Ⓣ 704-701 대구광역시 달서구 신당동 1000번지

(2005년 9월 21일 받음, 2006년 2월 21일 수정본 받음)

격자 구조형 평면도파로와 원통형 광섬유로 구성된 격자구조형 광섬유 결합기(GAFC)를 제안하였고, 그 최적 전력결합 특성을 중 방향 모드 전송선로이론(L-MTL)에 기초하여 분석하였다. 또한, 격자 구조형 평면도파로에서 입사된 광신호가 단일 모드 광섬유로 결합되기 위한 새로운 최적 조건들을 제시하였다. 수치해석 결과 GAFCs에서 최적 전력결합 특성은 기존에 널리 사용하는 위상정합 조건이 아닌 새로운 조건(즉, 정확한 모드의 최소간격 조건)에서 나타났다.

주제어 : Grating-Assisted Fiber Couplers, Longitudinal Modal Transmission-Line Theory, Optical Power Coupling.

### I 서 론

최근 광통신 시스템에서 원통형 광섬유와 평면 구조형 도파로 사이의 결합효율을 최적화하는 작업이 광통신용 소자 설계에 중요한 사항으로 대두되고 있다. 즉, 평면 구조형 도파로로부터 입사된 광신호가 단일모드 광섬유로 전송되는 과정에서 발생하는 문제점, 예를 들어, 불연속 구조의 결합으로 인한 결합손실, 소자들의 다단계적 패키징으로 인한 소자들 사이의 어긋남 등, 을 해결하기 위한 다양한 방법들이 연구되고 제시되고 있다.

그 방법들 중에서 두 가지 기법이 도파로/광섬유 결합을 위하여 가장 널리 사용되고 있다. 첫 번째 방법은 광섬유의 끝을 평면 도파로의 가상자리에 위치시키는 Butting 결합이고,<sup>[1,2]</sup> 두 번째 방법은 채널 도파로로부터 입사된 광신호가 일정길이의 상호결합영역에서 도파로의 누설특성을 이용하여 전력을 전송하는 누설파(Evanescent wave) 결합이다.<sup>[3]</sup> Butting결합은 에칭된 렌즈를 사용하여 상대적으로 쉽게 도파로/광섬유 결합을 구현할 수 있으나, 전송되는 모드들의 정합을 위하여 연결되는 직각 면들 사이에 정확한 정렬이 요구된다. 이에 반하여, 누설파결합은 그림 1에서 보듯이 다층형태로 소자가 설계되므로 Butting결합에서 발생하는 어려움들을 극복할 수 있다.

이를 위하여 본 논문에서는 격자구조형 평면 도파로와 연마된 클래딩 영역을 갖는 광섬유를 다층으로 결합한 형태의 격자구조형 광섬유 결합기(Grating-Assisted Fiber Coupler: GAFC)를 그림 1에 보듯이 구성하였으며, 이 전송구조의 광학적 특성을 이론적으로 분석하였다.

결국, 본 논문에서 제안한 누설파결합 특성을 갖는 GAFC의 최적 결합특성을 분석하기 위하여 최근 소형화되고, 복잡해지는 광 소자 설계에 정확한 수치해석적 기법을 제공하는 종방향 모드 전송선로 이론(Longitudinal Modal Transmission-Line Theory: L-MTL)<sup>[4]</sup>을 이용하였다. 이 해석법은 마이크로파 공학에서 RF소자 제작을 위하여 널리 사용하고 있는 전송선로의 원리에 기초한 개념으로 서로 다른 단단, 다층구조(평면형/원통형 등)로 설계된 광 소자들의 특성해석에 쉽게 적용할 수 있으며, 매우 유용한 프로그래밍 기법을 제공한다. 이에 대한 이론적 배경과 광 소자 설계 시 사용되는 다른 이론들과의 비교가 참고문헌<sup>[5]</sup>에 자세하게 기술되어 있다.

### II. GAFC의 분산특성

그림 1에 제안한 GAFC의 최적 결합조건을 분석하기 위하여 우선적으로 고려해야 할 전송특성은 설계된 소자에서 전파하는 모드들의 분산특성(Dispersion Curves)이다. 그 분산특성을 분석하기 위하여 제안한 GAFC는 동작주파수  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 격자두께  $t_g$ , 필름두께  $t_f = 1.0 \mu\text{m}$ 를 갖는 굴절률  $N_f = 1.6$ 의  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 와 결합영역에서 두께  $t_{cu}$ 의 연마된(Polished) 클래딩 영역을 갖는 광섬유, 그리고 굴절률  $N_{su} = 1.447$ 의  $\text{SiO}_2$  기판으로 구성하였다. 또한, 광섬유는 단일모드 전송을 위하여  $t_{co} = 4 \mu\text{m}$  두께의 굴절률 1.48인 코어와  $t_{cb} = 18 \mu\text{m}$  두께의 굴절률 1.46인 클래딩으로 구성된 광섬유를 사용하였다.

이와 같이 주기적인 격자를 포함하고 있는 GAFC에서 분산특성을 나타내는 전파상수  $k_{zn}$ 는 주기적인 격자로 인하여 발생하는 공간 고조파(Space Harmonics)들로 구성되며, 다음과 같은 복소수 형태로 표현된다.

<sup>†</sup> E-mail: kwangho@hansung.ac.kr

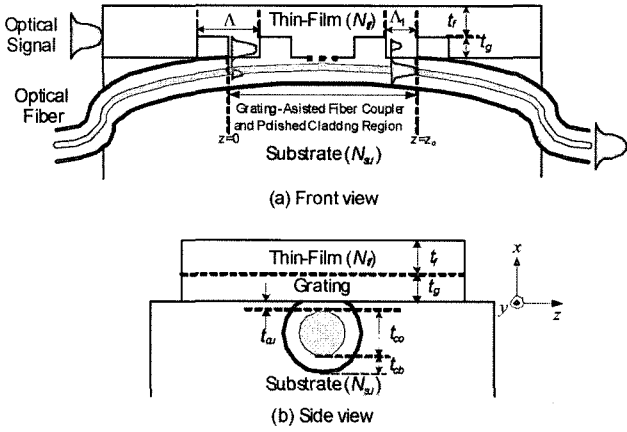


그림 1. 격자 구조형 광섬유 결합기의 구성도 (a)전면도, (b)측면도.

$$k_{zn} = k_{z0} + \frac{2n\pi}{\Lambda} = (\beta + i\alpha) + \frac{2n\pi}{\Lambda} = \sqrt{(k_o N_j)^2 - k_{zn,j}^2}, \quad (1)$$

여기서,  $n$ 은  $n$ 번째 공간 고조파를 나타내며,  $\Lambda$ 는 격자주기,  $N_j$ 는  $j$ 번째 층의 굴절률을 나타낸다. 그때, 이 식을 구성하는 0번째 공간 고조파의 전파상수  $k_{z0}$ 를 결정하기 위하여 MTLT에서는 그림 2에서 보듯이 그림 1의 GAFC에 대응하는 등가 전송선로를 구성하여야 한다. 결국, 구성된 등가전송선로에 아래와 같은 MTLT의 횡방향 공진조건(Transverse Resonance Condition)<sup>[6]</sup>을 적용하여 GAFC에서 전파하는 정확한 모드들의 전파상수와 그 감쇄상수를 결정할 수 있다.

$$|Y_{up}(k_{zn}) + Y_{dn}(k_{zn})| = 0, \quad (2)$$

여기서,  $Y_{up}(k_{zn})$ 과  $Y_{dn}(k_{zn})$ 은 횡방향의 임의 위치에서 위와 아래로 들여다본 입력 어드미턴스(Admittance) 행렬을 의미한다. 예를 들어, 기판과 두께  $t_{cb}$ 의 클래딩 사이의 경계면에서 아래로 들여다본  $n$ 번째 공간 고조파의 반사계수는

$$\Gamma_n = \frac{Y_{cd}^{(n)}(r) - Y_{cs}^{(n)}}{Y_{cd}^{(n)}(r) + Y_{cs}^{(n)}}, \quad (3)$$

와 같고, 정의된  $\Gamma_n$ 을 이용하여 두께  $t_{cb}$ 의 클래딩과 두께  $t_{co}$ 의 코어 사이의 경계면에서 아래로 들여다본  $n$ 번째 공간 고조파의 입력 어드미턴스를 표현하면 다음과 같다.

$$Y_{in}^{(n)} = \frac{1 - \Gamma_n \exp(2ik_{zn,d}t_{cb})}{1 + \Gamma_n \exp(2ik_{zn,d}t_{cb})} Y_{cd}^{(n)}(r). \quad (4)$$

그때, 격자구조에 기인하여 GAFC 내에서 발생한 모든 공간 고조파 성분들을 고려하여 식 (4)를 다시 표현하면 다음과 같은 행렬식으로 정의할 수 있다.

$$Y_{dn}(k_{zn}) = Y_{in} = (1 + R \exp(2iK_o t_{co}))^{-1} (1 - R \exp(2iK_o t_{co})) Y_{cd}(r) \quad (5)$$

여기서,  $R$ 은 반사계수  $\Gamma_n$ 의 열행렬이고,  $\exp(2iK_o t_{co})$ ,  $Y_{cd}(r)$ ,

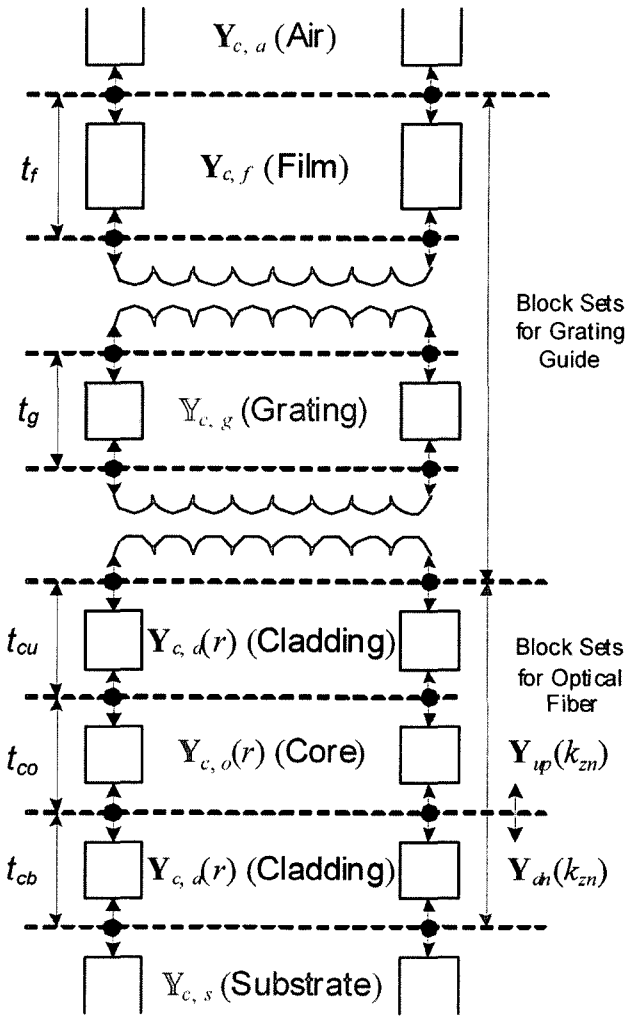


그림 2. 횡방향에서 구성된 그림 1의 GAFC에 대한 등가 전송선로.

$Y_{in}$ 은 각각 요소  $\delta_{mn} \exp(2iK_o t_{co})$ ,  $\delta_{mn} Y_{cd}^{(n)}(r)$ ,  $\delta_{mn} Y_{in}^{(n)}$ 로 구성된 대각선 행렬이다. 그리고, 등가전송선로의  $j$ 번째 블록을 구성하는 공간 고조파의 특성 어드미턴스  $Y_{c,j}^{(n)}$ 는 평면격자 전송선로 영역인 경우

$$Y_{c,j}^{(n)} = \begin{cases} k_{zn,j}/(\omega\mu_0) & \text{for TEModes} \\ (\omega\epsilon_0 N_j^2)/k_{zn,j} & \text{for TMmodes} \end{cases}$$

와 같이 광섬유 전송선로 영역인 경우

$$Y_{c,j}^{(n)}(r) = \begin{cases} k_{zn,j}/(r\omega\mu_0) & \text{for TEModes} \\ (r\omega\epsilon_0 N_j^2)/k_{zn,j} & \text{for TMmodes} \end{cases}$$

와 같이 각 층의 굴절률과 관계된다. 이와 같은 방법으로 등가전송선로의 임의의 경계면에서 위로 들여다본 입력 어드미턴스  $Y_{up}(k_{zn})$ 에 대한 행렬식도 결정할 수 있다.

결국, 식 (2)의 횡방향 공진조건으로부터 미지수 고유치  $k_{zn}$ 이 결정되면, GAFC 내에서 전파하는 정확한 모드들의 그 분산특성뿐만 아니라 임의의 공간( $x, z$ )에서 진행되는 전계  $E(x, z)$ 와

자계  $H(x, z)$  성분들을 평가할 수 있다.

결정된 고유치인  $k_{zn}$ 을 구성하는 전파상수  $\beta$ 와 감쇄상수  $\alpha$ 를 사용하여 GAFC에서 상호 결합하는 누설파(Leaky Waves)들의 전파특성을 그림 3과 4에 분석하였다. 여기서, 격자비율(Aspect Ratio)은 균일비율인  $\Lambda_1/\Lambda = 0.5$ 로, 연마된 클래딩 두께는  $t_{cu} = 1.0 \mu\text{m}$ 로 선택하였다. 그림 3(a)와 4(a)의 실선에서 보듯이, 격자 층이 평균 굴절률을 갖는 균일 층으로 대체된 경우<sup>[6]</sup> GAFC의 결합영역에서는 두 개의 표면파(Surface Waves) 모드가 발생하며, 이 중첩모드들은 위상정합 조건(Phase-Matching Condition)을 나타내는 임의의 한 점에서 서로 일치하는 특성을 나타낸다. 본 논문에서 제안한 구조에서 격자 층의 두께가 각각  $t_g = 0.1 \mu\text{m}$ ,  $0.2 \mu\text{m}$ 인 경우 그 위상정합 조건은 그 조건의 격자주기를 나타내는  $\Lambda_{ph} = 17.69 \mu\text{m}$ ,  $17.3 \mu\text{m}$ 에서 발생하였다. 이 조건은 광소자 특성해석

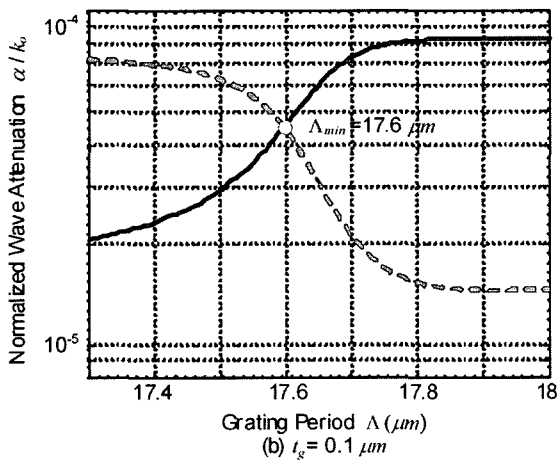
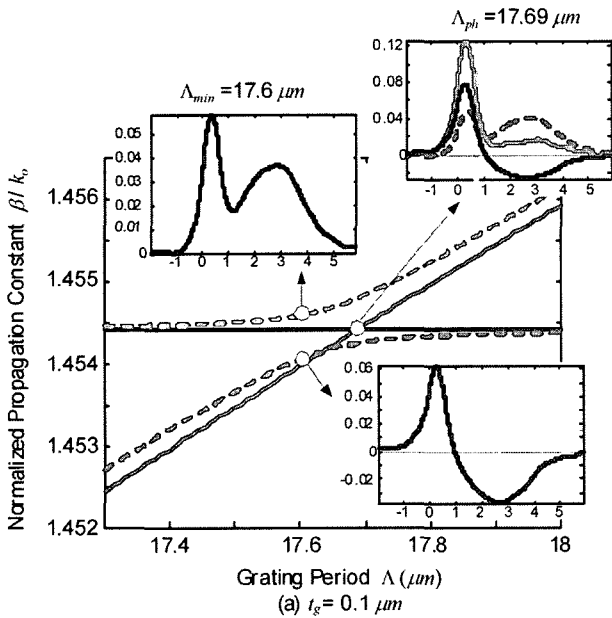


그림 3. GAFC내에서 전파하는 기/우 모드들의 분산곡선. (a) 표면파와 누설파 모드들의 전파상수, (b) 누설파 모드들의 감쇄상수.

에서 널리 사용되고 있는 결합모드 이론(Coupled-Mode Theory)이나 빔 전파 방법(Beam-Propagation Method)에서 광 방향성 결합기의 최적 전력전송을 위한 조건<sup>[7]</sup>으로 지금까지 널리 사용되어 왔다.

그러나, 주기적인 격자 층이 균일 층으로 근사화되지 않은 GAFC의 경우, 근사적인 두 개의 표면파(Surface Waves) 모드들은 전파방향을 따라 누설 특성을 나타내는 전파상수  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ 의 정확한 누설파 모드들로 변환된다. 이 모드들이 그림 3(a)와 4(a)에 점선으로 도시되어 있다. 그림에서 보듯이, 이 모드들이 서로 가장 유사한 전파특성을 갖는, 즉 두 모드들 사이의 간격  $|(\beta_1 - \beta_2)/k_0 + \lambda/\Lambda|$ 이 최소가 되는 격자주기인 최소간격 조건(Minimum-Gap Condition)에서 지금까지 최적 전력전송을 위한 조건으로 알려져 왔던 위상정합 조건에서의 격자주기와 서로 상이하게 나타남을 보였다. 그러므로, GAFC

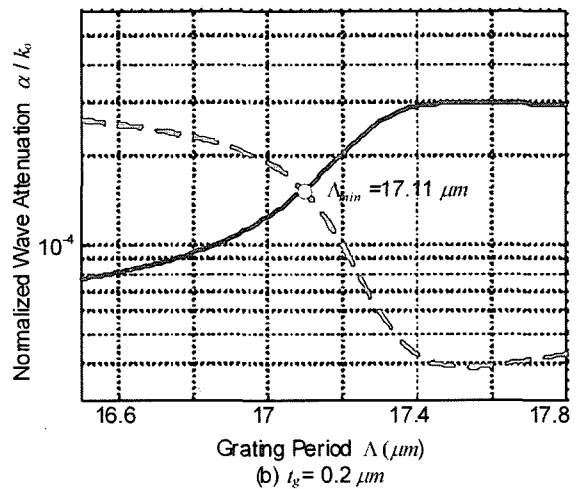
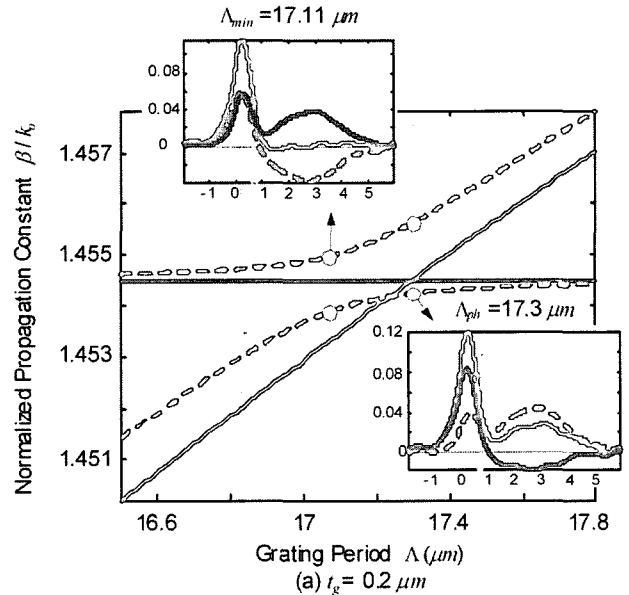


그림 4. GAFC내에서 전파하는 기/우 모드들의 분산곡선. (a) 표면파와 누설파 모드들의 전파상수, (b) 누설파 모드들의 감쇄상수.

에서 최적 전력전송은 근사적인 위상정합 조건에서가 아닌  $t_g = 0.1 \mu\text{m}, 0.2 \mu\text{m}$ 인 경우 그 최소간격 조건의 격자주기를 나타내는  $\Lambda_{min} = 17.6 \mu\text{m}, 17.11 \mu\text{m}$ 에서 발생함을 알 수 있다.

이를 좀더 구체적으로 분석하기 위하여, 두 조건에서 전파하는 모드들의 전계 분포를 고려하였다. 그림 3(a)와 4(a)의 삽입도에서 보듯이, 최소간격 조건에서 기/우 모드들은 서로 정합되어 모든 전계성분이 입력 채널인 평면 도파로에 분포하였다. 이에 반하여, 위상정합 조건에서 기/우 모드들은 서로 비 정합되어 일부 전계성분이 광섬유에 잔류함을 나타내었다. 이는 평면 도파로를 통하여 입사된 광신호가 GAFC의 결합영역에서 완전하게 단일 모드 광섬유로 전송되지 못하고 일부 신호가 평면 도파로에 잔류하는 원인을 제공한다. 이에 대한 내용은 본 논문의 3장에서 자세하게 언급하기로 하겠다.

또한, GAFC의 전파특성을 결정하는 또 다른 성분인 모드들의 감쇄상수를 분석하였다. 그림 3(b)와 4(b)에서 보듯이,  $t_g = 0.1 \mu\text{m}, 0.2 \mu\text{m}$ 에서 기/우 모드들의 감쇄상수들은 최소간격 조건에서 서로 일치함을 보였다. 결국, 최소간격 조건에서 모드들은 주어진 동작 주파수에서 서로 전파특성이 가장 유사한 결과를 나타내며, 이 유사성에 기인하여 도파로/광섬유 사이에 최적 전력전송이 발생할 수 있다.

다음으로, 격자의 요철 사이의 비율을 나타내는 격자비율  $\Lambda_1/\Lambda$ 와 서로 다른 평면/원통형 구조를 결합하는 연마된 클래딩의 두께  $t_{cu}$ 가 GAFC의 전파특성에 미치는 영향을 고려하였다. 그림 5(a)에서 보듯이, 격자비율이 균일비율  $\Lambda_1/\Lambda = 0.5$ 보다 작아짐에 따라 최소간격 조건을 만족하는 격자주기는  $\Lambda_{min} = 16.73 \mu\text{m}$ 로 줄어들었고, 커짐에 따라 그 조건을 만족하는 격자주기는  $\Lambda_{min} = 17.35 \mu\text{m}$ 로 늘어남을 보였다. 이 결과는 GAFC 설계 시에 격자비율은 제작에 용이한 임의의 형태로 선택할 수 있으며, 단지 그 격자비율을 만족하는 최소간격 조건의 격자주기를 이용하면 최적 전력전송 특성을 얻을 수 있음을 보여 주는 것이다.

이와 유사하게, 연마된 클래딩 두께  $t_{cu}$ 의 변화에 따른 전파특성의 변화를 그림 5(b)에 도시하였다. 여기서, 격자비율은 균일비율인  $\Lambda_1/\Lambda = 0.5$ 로 선택하였다. 그림에서 보듯이, 클래딩이 많이 연마됨에 따라, 즉 클래딩의 두께가 작아짐에 따라, 격자주기는  $t_{cu} = 1.0 \mu\text{m}, 0.3 \mu\text{m}, 0.1 \mu\text{m}$ 에서 각각  $\Lambda_{min} = 17.11 \mu\text{m}, 17.05 \mu\text{m}, 16.95 \mu\text{m}$ 로 미세하게 줄어들었다. 그러나, 정확한 누설파 모드들의 최소간격 값을 나타내는  $\Delta n$ 은 점진적으로  $\Delta n_1 = 1.07 \times 10^{-3}, \Delta n_{03} = 2.03 \times 10^{-3}, \Delta n_{01} = 2.43 \times 10^{-3}$ 와 같이 늘어남을 보였다. 결국, GAFC의 설계 시에 평면 도파로와 결합되는 광섬유의 클래딩 부분이 너무 많이 연마된 경우, GAFC의 내에서 발생하는 기/우 모드들의 전계분포가 기형적으로 변형되어 좋은 정합특성을 나타내지 않으며, 최적 전력전송 특성을 얻을 수 없음을 보여 주는 것이다.

### III. GAFC의 전력전송 특성

앞 장에서 고려된 전파특성들에 대한 결과의 구체적인 타당성을 보여 주기 위하여, 이 장에서는 두 개의 서로 다른 전송구조로 구성된 GAFC의 전력전송 특성을 분석하였다.

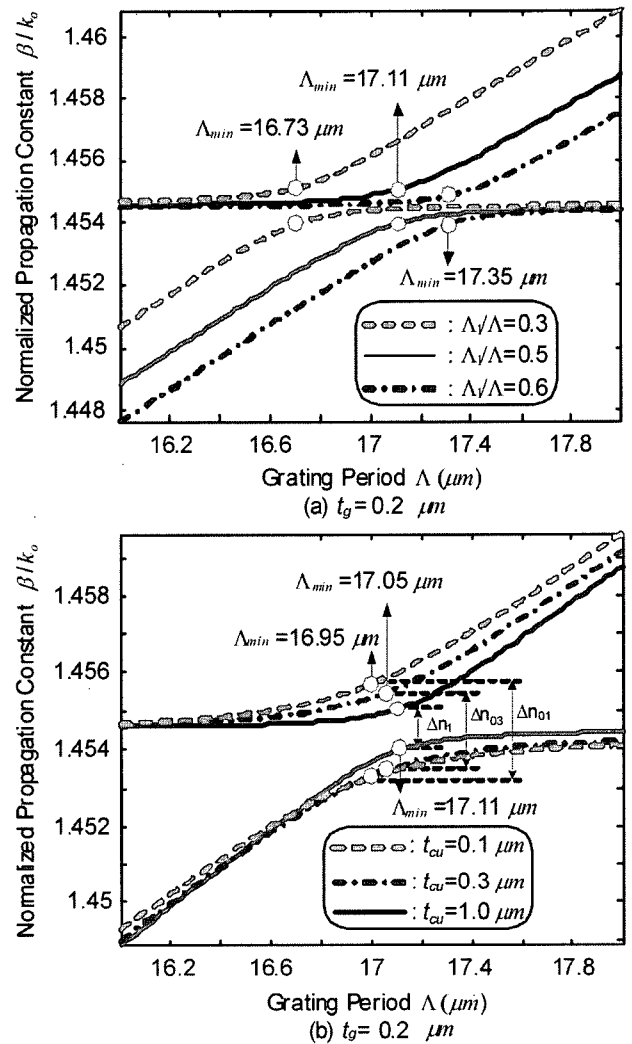


그림 5. GAFC내에서 전파하는 기/우 모드들의 분산곡선. (a) 격자 비율에 따른 누설파의 전파상수, (b) 연마된 클래딩 두께에 따른 누설파의 전파상수.

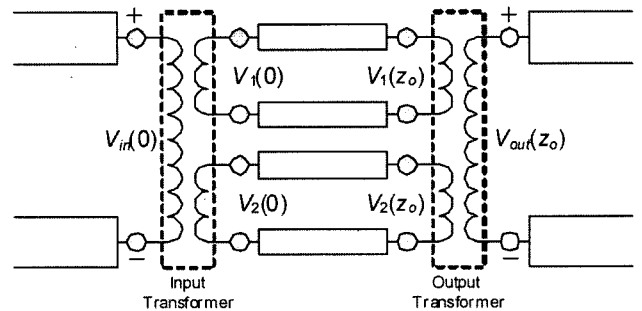


그림 6. 종방향으로 구성된 GAFC의 등가 전송선로

그림 1(a)에서 보듯이, 평면 도파로를 통하여 입사된 광 신호는 도파로/광섬유 결합영역에서 서로 직교특성을 갖는 두 개의 기/우 모드를 여기 시키고, 이 두 직교모드들은 전파방향을 따라 상호 결합하여 평면 도파로부터 원통형 광섬유로 단일 모드를 전송한다. 이 전력전송 메커니즘은 그림 6에

도시한 종방향으로 구성된 L-MTLT의 등가전송선로를 이용하여 정확하게 분석할 수 있다.

먼저, TE 모드가 평면 도파로를 통하여  $z < 0$  영역에서 입사되었다고 가정하자. 그때, 입사된 횡방향 전계와 자계는 아래와 같은 모드 함수들로 표현할 수 있다.<sup>[8]</sup>

$$E_y(x, z) = V_{in}(z)e_{in}(x), H_x(x, z) = I_{in}(z)h_{in}(x). \quad (6)$$

여기서, 모드 전압과 전류는  $V/I = (\omega\mu)/k_z$ 와 같은 임피던스 관계를 만족하며,  $k_z$ 는 평면도파로의 전파상수를 나타낸다. 이 표면파 형태의 모드들이 GAFC 영역 ( $0 \leq z \leq z_0$ )에 입사된 경우, 격자구조에 기인한 무한한 수의 누설파 모드들이 GAFC내에 여기되고, 그 전계성분들은 다음과 같은 L-MTLT 식으로 표현할 수 있다.<sup>[4]</sup>

$$E_c(x, r, z) = \sum_p V_p(z)e_p(x; r). \quad (7)$$

그러나, 두 개의 전송 채널(도파로와 광섬유)로 구성된 방향성 결합기에서 전력전송에 주된 영향을 주는, 즉 99% 이상의 평균 Poynting 벡터 전력을 포함하고 있는, 모드들은 기본모드(Fundamental Mode)와 1차 모드(1st-order Mode)이다. 그러므로, GAFC 내에서의 전계성분은 다음과 같이 두 모드들의 선형적 결합으로 나타낼 수 있다.

$$E_c(x, r, z) \cong V_1 e^{ik_{1,2}z} \sum_n e_{jn}^{(1)}(x; r) e^{i\Lambda_n z} + V_2 e^{ik_{2,2}z} \sum_n e_{jn}^{(2)}(x; r) e^{i\Lambda_n z}. \quad (8)$$

여기서,  $k_{1,2} = k_{z0,(1,2)} = \beta_{(1,2)} + i\alpha_{(1,2)}$ 는 두 최저차 모드들의 전파상수를 나타내며,  $\Lambda_n = (2n\pi)/\Lambda$ , 그리고  $e_{jm}^{(1,2)}(x; r)$ 는  $x$  방향에서 전계의 공간분포를 나타낸다.

이때,  $z = 0$ 의 경계면에 입사된 표면파 모드와 여기된 누설파 모드들 사이에 경계조건(모드들의 연속조건)을 적용하면

$$V_{in}(0) \cong V_1(0) \sum_n e_{jm}^{(1)}(x; r) + V_2(0) \sum_n e_{jm}^{(2)}(x; r) \quad (9)$$

와 같고, 양변에  $\sum_m k_{zm,(1,2)} e_{jm}^{(1,2)}(x; r)$ 을 곱하고 전송구조의 단면적  $dS$ 에 대하여 적분하면 누설파 모드들의 직교조건<sup>[9]</sup>으로부터

$$V_1(0) = A_1 V_{in}(0), V_2(0) = A_2 V_{in}(0) \quad (10)$$

을 얻을 수 있다. 여기서, 입력 변압계수(Transformer Coefficient)  $A_{(1,2)}$ 는

$$A_{(1,2)} = \frac{1}{C_{(1,2)}} \int_{cs} \left\{ e_{in}(x) \sum_m k_{zm,(1,2)} e_{jm}^{(1,2)}(x; r) \right\} dS,$$

와 같고, 다층 주기적인 전송구조에서 정규화 상수  $C_{(1,2)}$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\int_{cs} \left\{ \sum_m k_{zm,\delta} e_{jm}^{(\delta)}(x; r) \sum_m e_{jm}^{(\nu)}(x; r) \right\} dS = C_\nu \delta_{\delta\nu}$$

결국, 입력 단에서 결정된 식 (10)을 만족하는 모드들은 서로 결합하여 임의의 거리를 진행한 후에 출력 채널인 광섬유를 통하여 전송된다. 그때, 출력 채널 광섬유에서 전파하는 TE 모드의 횡방향 전계와 자계는 아래와 같은 모드 함수들로 표현할 수 있다.<sup>[10]</sup>

$$rE_\phi(r, z) = V_{out}(z)e_{out}(r), H_z(r, z) = I_{out}(z)h_{out}(r) \quad (11)$$

여기서, 모드 전압과 전류는  $V/I = (\omega\mu r)/k_z$ 와 같은 임피던스 관계를 만족한다. 입력 단에서의 경우와 같이 이 원통형 모드 함수들은 GAFC 내에서  $z = z_0$ 까지 전파한 누설파 모드들과 출력 경계면에서 연속조건을 만족하며

$$V_{out}(z_0)e_{out}(r) \cong V_1 e^{ik_{1,z_0}} \sum_n e_{jm}^{(1)}(x; r) e^{i(2n\pi/\Lambda)z_0} + V_2 e^{ik_{2,z_0}} \sum_n e_{jm}^{(2)}(x; r) e^{i(2n\pi/\Lambda)z_0}, \quad (12)$$

와 같이 정의할 수 있고, 이 식에 원통형 광섬유에서 전파하는 모드들의 전력 정규화 조건

$$\int_{cs} e_{out}(r) e_{out}^*(r) dS = 1$$

과 식 (10)을 적용하면 아래와 같은 출력 모드 전압을 얻을 수 있다.

$$V_{out}(z_0) = (A_1 B_1 e^{ik_{1,z_0}} + A_2 B_2 e^{ik_{2,z_0}}) \equiv T_f V_{in}(0) \quad (13)$$

여기서, 출력 변압계수  $B_{(1,2)}$ 는

$$B_{(1,2)} = \int_{cs} \left\{ e_{out}^*(r) \sum_n e_{jm}^{(1,2)}(x; r) e^{i(2n\pi/\Lambda)z_0} \right\} dS$$

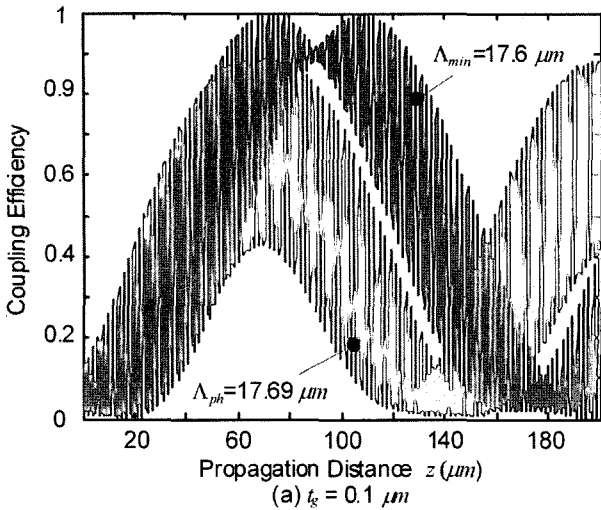
와 같다.

결국, GAFC을 포함한 입/출력 단에서 고려된 L-MTLT에 의존하는 식 (6)-(13)에 대한 그 종방향 등가전송선로를 그림 5와 같이 도시할 수 있다. 이 등가 망으로부터 식 (13)을 만족하는 TE 모드에 대한 결합효율(Coupling Efficiency)  $\eta_{TE}$ 을 정의하면 다음과 같다.

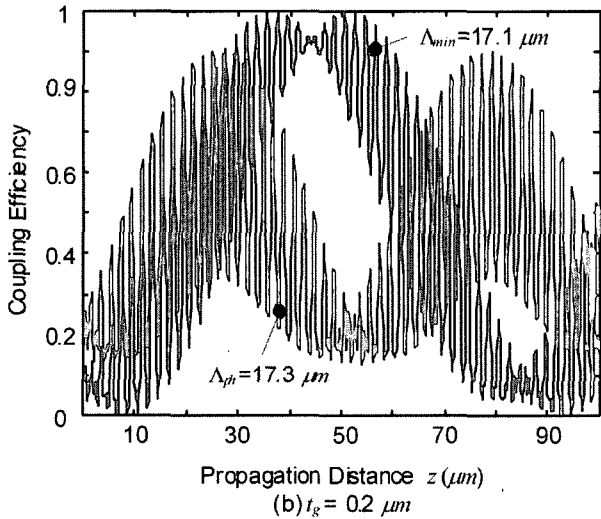
$$\eta_{TE} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\text{Re}(k_{z,out})}{\text{Re}(k_{z,in})} |T_f|^2 \quad (14)$$

이 결합효율은 입력 전력 ( $V_{in}(0)I_{in}^*(0)$ )에 대한 출력 전력 ( $V_{out}(z_0)I_{out}^*(z_0)$ )의 그 비율을 나타내며, 1 Watt로 정규화된 입력 전력 중의 몇 Watt가 출력전력으로 전송되었는지를 분석할 수 있는 중요한 요소다.

먼저, GAFC의 서로 다른 두 전송구조 사이의 최적 전력전송 조건을 분석하기 위하여 제 2장의 그림 3에서 고려한 위상정합 조건  $\Lambda_{ph}$ 와 최소간격 조건  $\Lambda_{min}$ 에서 발생하는 결합효율을 평가하였다. 그림 7에서 보듯이, 격자구조의 두께가  $t_g = 0.1 \mu\text{m}$ 인 경우 위상정합 조건에서 평면 도파로에서 입사된 광 신호는 결합길이(Coupling Length)  $z_0 = 68 \mu\text{m}$ 에서 평균



(a)  $t_g = 0.1 \mu\text{m}$

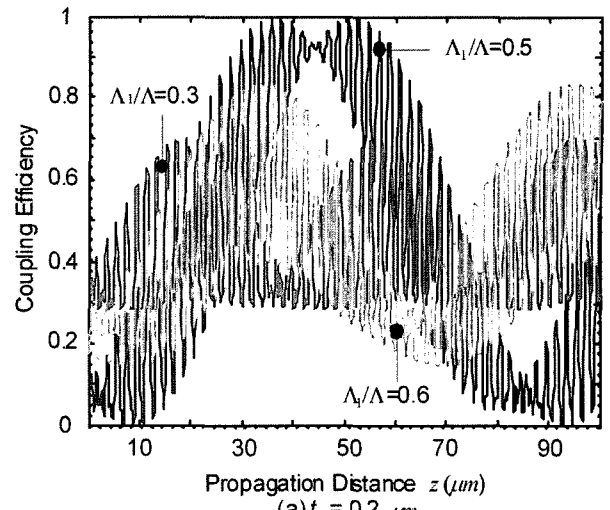


(b)  $t_g = 0.2 \mu\text{m}$

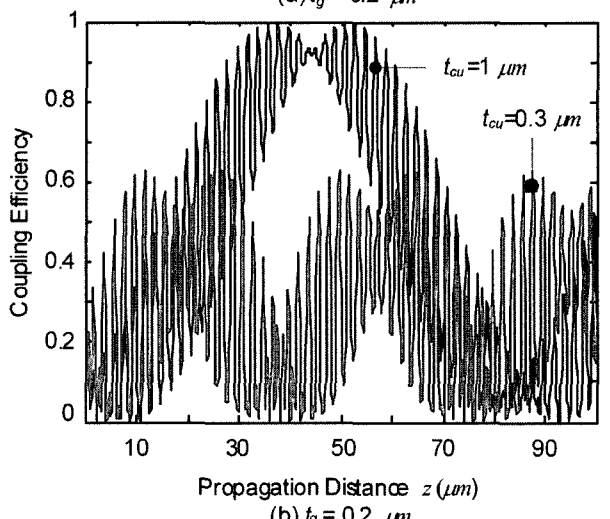
그림 7. 전파거리  $z$ 에 따른 결합효율(전력전송), 격자두께가 (a)  $t_g = 0.1 \mu\text{m}$  (b)  $t_g = 0.2 \mu\text{m}$  인 경우.

70%의 신호가 광섬유로 전송되었다. 이에 반하여, 최소간격 조건에서 광 신호는 결합길이  $z_0 = 88 \mu\text{m}$ 에서 평균 95%의 신호가 광섬유로 전송되었다. 또한, 격자구조의 두께가  $t_g = 0.2 \mu\text{m}$ 인 경우 위상정합 조건에서 평균 70%의 신호가 결합길이  $z_0 = 25 \mu\text{m}$ 에서 전송되었고, 최소간격 조건에서는 결합길이  $z_0 = 43 \mu\text{m}$ 에서 평균 95%의 신호가 광섬유로 전송되었다. 이 결과는 제 2장에서 언급했듯이, GAFC에서 최적 전력전송은 위상정합 조건이 아닌 정확한 누설파 모드들 사이의 최소간격 조건에서 발생함을 입증하는 것이다. 더욱이, 최소간격 조건에서 보다 위상정합 조건에서 결합효율의 리플 비트 패턴(Ripple-Beat Pattern) 현상이 현저하게 증가하였다. 이 특성은 최소간격 조건에서 결합효율은 주기적인 장방형 격자(Rectangular Grating) 면들의 불연속성에 기인한 리플 영향을 적게 받는다는 것을 의미한다.

다음으로, 제 2장의 그림 5에서 고려한 격자비율의 변화와 연마된 클래딩의 두께 변화에 의존하는 전파특성에 대한 결합효율을 분석하였다. 그림 8(a)에서 보듯이, 격자주기는  $\Lambda$



(a)  $t_g = 0.2 \mu\text{m}$



(b)  $t_g = 0.2 \mu\text{m}$

그림 8. 전파거리  $z$ 에 따른 결합효율(전력전송), 격자두께가 인 경우 (a) 격자비율의 변화에 대한 결합효율, (b) 연마된 클래딩의 두께 변화에 대한 결합효율.

$\Lambda_{min} = 17.11 \mu\text{m}$ 와 같이, 격자비율은 균일비율  $\Lambda_1/\Lambda = 0.5$ 와 같이 선택하였을 경우, 격자비율이 균일비율로부터  $\Lambda_1/\Lambda = 0.3, 0.6$ 으로 변함에 따라 결합길이는  $z_0 = 35 \mu\text{m}, 20 \mu\text{m}$ 로 변하였고, 그 결합효율은 각각 평균 50%와 60%로 나타났다. 본 논문에서는 도시하지 않았지만, 만일 격자주기를 비 균일비율의 최소간격 조건인  $\Lambda_{min} = 16.73 \mu\text{m}, 17.35 \mu\text{m}$ 을 선택하였을 경우 그 결합효율은 균일비율을 선택하였을 때와 같이 평균 95%로 나타났다. 그러나, 각 격자 면들의 불연속성에 기인한 리플 영향은 균일비율의 경우에 비하여 다소 증가함을 보였다. 이와 같은 리플 현상은 격자두께  $t_g$ 를 줄이거나, 사인파(sinusoidal) 형태의 격자를 이용하면 현저하게 줄일 수 있다.

유사하게,  $\Lambda_{min} = 17.11 \mu\text{m}$ 의 격자주기와  $\Lambda_1/\Lambda = 0.5$ 의 격자비율에서 연마된 클래딩의 두께 변화에 따른 결합효율의 변화를 고려하였다. 그림 8(b)에서 보듯이, 연마된 클래딩의 두께가  $t_{cu} = 0.3 \mu\text{m}$ 인 경우, 결합길이  $z_0 = 19 \mu\text{m}$ 에서 결합효율은 평균 40%를 나타내었다. 결국, 이 사실은 앞 장의 그림

5(b)에서 언급하였듯이 연마된 클래딩의 두께가 줄어들어 따라 정확한 누설파 모드들의 최소간격은 점진적으로 늘어나므로 결합효율은 현저하게 떨어질 수 있다는 것을 예측할 수 있게 하여 주는 것이다.

#### IV. 결 론

평면 구조형 도파로에서 입사된 광 신호를 단일모드 광섬유로 전송하는 소자인 형태의 격자 구조형 광섬유 결합기(GAFC)를 제안하였다. 제안한 GAFC의 전파특성과 최대 결합효율을 갖는 최적 전력전송 특성을 정확하게 분석하기 위하여 모드 전송선로 이론(MTLT)을 이용하였다. 분석결과, GAFC에서 최적 전력전송은 표면파 모드들의 위상정합 조건이 아닌 정확한 누설파 모드들의 최소간격 조건에 발생함을 보였다. 더욱이, 격자비율의 변화에 따른 최적 전력전송은 격자비율의 변화에 의존하는 최소간격 조건을 선택함으로써 얻을 수 있었다. 그러나, 연마된 클래딩의 두께 변화에 따른 최적 전력전송은 연마된 클래딩의 두께가 줄어들어 따라 정확한 누설파 모드들의 최소간격이 점진적으로 늘어나므로, 기/우 모드들의 전계분포가 기형적으로 변형되지 않는 범위 내에서 연마된 클래딩의 두께를 유지해야 함을 보였다.

#### 감사의 글

본 연구는 2006년도 한성대학교 교내연구비 지원과제입니다.

#### 참고문헌

[1] L. P. Boivin, "Thin-Film Laser-to-Fiber Coupler," Appl. Opt. vol. 13, pp. 391-395, 1974.

[2] H. P. Hsu and A. F. Milton, "Single- Mode Coupling between Fibers and Indiffused Waveguides," IEEE J. Quantum Electron., vol. 13, pp. 224-233, 1977.

[3] J. M. Hammer, R. A. Bartolini, A. Miller, and C. C. Neil, "Optical Grating Coupling between Low-Index Fibers and High-Index Film Waveguides," Appl. Phys. Lett., vol. 28, pp. 192-194, 1976.

[4] K. C. Ho, "Longitudinal Modal Transmission-Line Theory (L-MTLT) of Multilayered Periodic Waveguides," IEICE Trans. Electron., vol. E88-C, no. 2, pp. 1-5, 2005.

[5] K. C. Ho, and Y. K. Kim, "Dispersion Characteristics of Optical Planar DFB Guiding Structures for Optical Communication," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E83-A, no. 6, pp. 1151-1160, June 2000.

[6] T. Tamir and S. Zhang, "Modal Transmission-Line Theory of Multilayered Grating Structures," J. Lightwave Technol., vol. 14, pp. 914-927, 1996.

[7] W. P. Huang, B. E. Little, and C. L. Xu, "On Phase Matching and Power Coupling in Grating-Assisted Couplers," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 4, pp. 151-153, 1992.

[8] K. C. Ho, G. Griffel, and T. Tamir, "Polarization Splitting in Lossy/Gainy MQW Directional Couplers," J. Lightwave Technol. vol. LT-15, pp. 1233-1240, 1997.

[9] K. C. Ho and Y. K. Kim, "On Leaky-Wave Approach of Rigorous Modes Coupled in Multi-layered Periodic Waveguides," IEICE Trans. Electron., vol. E84-C, pp. 84-95, 2001.

[10] 호광춘, 박천관, "광통신용 원통형 격자필터 설계를 위한 모드 전송선로이론," 대한전자공학회논문집, SD-vol. 40, no. 4, pp. 217-223, 2003.

### Novel Criteria to determine Optimized Power coupling in Grating-Assisted Fiber Couplers (GAFCs)

Kwang-Chun Ho<sup>†</sup>

Dept. of IC Eng., Hansung University, Seoul 136-792, KOREA

<sup>†</sup>E-mail: kwangho@hansung.ac.kr

Kwangsoo Ho

Dept. of Mechanical Engineering, Keimyung University, Daegu 1000, KOREA

(Received September 21, 2005, Revised manuscript February 21, 2006)

A grating-assisted fiber coupler(GAFC), which consists of a thin-film waveguide with grating and circular optical fiber, is proposed and the optimized power coupling is evaluated by using a technique amenable to rigorous longitudinal modal transmission-line theory(L-MTLT). In addition, novel criteria to couple an optical signal incident through the grating waveguide to a single-mode optical fiber are proposed. The numerical result reveals that the optimized power coupling occurs at minimum-gap condition between rigorous modes rather than for the conventional phase-matching condition.

OCIS Codes : 060.1810, 130.2790, 230.7370.