

論文2000-37SD-8-8

광섬유 커플러 Add/Drop 필터의 연산자 분리 시영역 해석 및 설계

(Split-Step Time-Domain Analysis and Design of an Fiber-Optic Coupler Add/Drop Filter)

姜俊煥*, 金炳星*, 鄭榮哲*

(Joon Hwan Kang, Byoung Sung Kim, and Young Chul Chung)

요 약

비대칭 광섬유 커플러 ADF(add/drop filter)의 필터링 특성을 새로운 연산자 분리 시영역 모델을 이용하여 해석하였다. 연산자 분리 시영역 모델은 방향성 결합기와 브래그 격자를 포함하는 구조의 소자를 전산모사할 때 매우 유용하다. 먼저 이 모델을 이용하여 대칭구조의 광섬유 커플러 ADF의 특성을 해석하여 연산자 분리 알고리즘의 정확도를 확인한 후에, 비대칭 구조 ADF의 특성을 해석하여 필터링 성능의 최적화에 필요한 파라미터 값들을 도출하였다.

Abstract

Add-drop filtering effect of a asymmetric fiber-optic coupler ADF(add/drop filter) is analyzed using a new split-step time-domain model. This model is very useful in simulating the devices containing a directional coupler and Bragg gratings. First, a symmetric fiber-optic coupler ADM is analyzed using this model to confirm the accuracy of the new method. Then, an asymmetric fiber-optic coupler ADF is analyzed, and some design parameters for optimal filtering effect is derived.

1. 서 론

WDM(wavelength-division multiplexing) 광통신 시스템을 이루는 핵심기술 중의 하나로 ADF를 들 수 있다. 이중 가장 간단한 형태의 소자는, 4개의 단자(input port, output port, add port, drop port)를 가지고 있는 필터이며, 광섬유 결합기, 마하젠더 간섭기 및 격자구조

를 이용하여 ADF를 구현하고자하는 연구가 다양하게 진행되고 있다. 그 중에서도 비대칭 커플러와 광섬유 격자를 이용한 구조는, 간섭계 구조가 아니기 때문에 제작이 용이하고 보다 안정된 특성을 보일 것으로 기대되어 많은 관심을 갖게 하고 있다^{[1][2]}.

비대칭구조 ADF는 두 광도파로의 코어반경이나 굴절률 분포가 비대칭이기 때문에 일반적으로 광파의 전이가 일어나지 않는다. 그러나 브래그 격자에 의한 위상정합조건을 만족하는 파장성분의 경우 입력단(input port)에서 드롭단(drop port)으로 반사되어 나오고, 그 외의 파장성분은 출력단(output port)으로 나오게 되어 드롭 기능을 수행하게 된다. 비슷한 원리로 추가단(add port)에서 출력단으로의 추가기능도 수행된다.

이와 같은 비대칭구조 ADF를 해석하고 설계하기 위해서는 정상상태(steady state)에서의 결합모드방정식의

* 正會員, 光云大學校 電子工學部/電子通信工學科

(Center for Electronic Materials and Components, Department of Electronic Engineering, Hanyang University)

※ 본 연구는 1998~1999년도 한국통신 정보통신 기초연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

接受日字:2000年2月25日, 수정완료일:2000年7月3日

해를 구하는 것이 일반적인 해법이지만 본 논문에서는 시변결합 파동 방정식에 연산자 분리 시영역 모델을 적용하여 각 출력단에서의 파장특성을 구하여 설계하는 방법을 제시한다. 이 방법은 고유해를 구하지 않고도 다양한 결합구조(대칭 또는 비대칭) 및 Bragg 격자를 포함하는 ADF의 특성을 해석할 수 있는 방법으로 많은 경우에 응용이 가능하다^{[3][4]}.

제 2 장에서는 설계에 사용한 연산자 분리 시영역 모델을 설명하고, 대칭구조 ADF를 이용하여 연산자 분리 알고리즘의 정확성을 확인한다. 그리고 제 3 장에서는 비대칭구조 ADF에 연산자 분리 알고리즘을 적용하고 유효 굴절율, 결합계수등의 파라미터를 도입하여 최적설계를 하는 과정을 기술한다. 마지막으로 제 4 장에서 결론을 맺는다.

II. 연산자 분리 시영역 모델

연산자 분리 시영역 모델(split-step time-domain model)은 격자구조와 방향성결합기 도파로로 이루어진 광집적소자의 해석과 설계의 기본적인 시간의존형 결합 파동 방정식(time-dependent coupled wave equations)을 연산자 분리기법(split-step method)을 이용하여 해석하는 알고리즘이다. 이 알고리즘은 시간의존형 파동결합방정식에서 벗어남 인자(detuning factor)와 시간관련 편미분항이 포함된 항의 연산자 분리단계, 이동된 전계의 복원단계, 각각의 광도파로 내에서 역방향 전계간의 결합 연산자 분리단계, 동방향 전계간의 결합 연산자 분리단계, 한 도파로의 순방향 전계와 인접도파로의 역방향 전계간의 결합 연산자 분리단계, 경계조건 만족단계와 같은 6개의 단계로 이루어 진다. 연산자 분리 알고리즘은 기존의 유한차분법(finite-difference method)을 이용한 알고리즘에서 보여지는 섹션수에 따른 오차를 크게 개선하고 있으며 설계를 위한 시간을 단축시키고, 정확성을 높이고 있다^[4]. 본 장에서는 인접한 두 개의 격자구조의 도파로에서의 시간의존형 파동결합 방정식에 연산자 분리기법을 적용하는 과정을 기술한다.

1. 시간의존형 결합 파동 방정식

인접한 두 개의 광도파로 내에서 전파하는 빛은 식 (1)과 같이, 순방향전파와 역방향전파의 합으로 이루어진 전계(electric field)로 표현되어질 수 있다. 여기서

ω_0 는 시간축에 대응하는 중심주파수이고, β_0 는 브래그(Bragg) 주파수에서의 전파상수이다.

$$E(z, t) = [F_a(z, t)e^{-i\beta_0 z} + F_b(z, t)e^{-i\beta_0 z} + R_a(z, t)e^{+i\beta_0 z} + R_b(z, t)e^{+i\beta_0 z}]e^{i\omega_0 t} \quad (1)$$

$F_{a,b}(z, t)$ 와 $R_{a,b}(z, t)$ 는 도파로 A, B의 임의의 진행축 z 를 따라 순방향으로 전파하는 전계와 역방향으로 전파하는 전계를 나타낸다. 이러한 진행파는 격자가 새겨진 도파로 내에서의 전계의 변화를 나타내고 있는 시간의존형 결합 파동 방정식 (2)를 만족하게 된다.

$$\frac{1}{c_g} \frac{\partial F_a}{\partial z} + \frac{\partial F_a}{\partial t} = -i\Delta\beta_a F_a - ix_a R_a - ix_f^{ab} F_b - ix_f R_b \quad (2-1)$$

$$\frac{1}{c_g} \frac{\partial F_b}{\partial z} + \frac{\partial F_b}{\partial t} = -ix_f^{ba} F_a - ix_f R_a - i\Delta\beta_b F_b - ix_f R_b \quad (2-2)$$

$$\frac{1}{c_g} \frac{\partial R_a}{\partial z} - \frac{\partial R_a}{\partial t} = -ix_a^* F_a - i\Delta\beta_a R_a - ix_f^* F_b - ix_f^{ab} R_b \quad (2-3)$$

$$\frac{1}{c_g} \frac{\partial R_b}{\partial z} - \frac{\partial R_b}{\partial t} = -ix_f^* F_a - ix_f^{ba} R_a - ix_f^* F_b - i\Delta\beta_b R_b \quad (2-4)$$

여기서 $F_{a,b}(z, t)$ 와 $R_{a,b}(z, t)$ 는 크기와 위상을 함께 포함하고 있는 복소수이다. c_g 는 군속도(group velocity)를 나타내며, 임의의 주파수에서 일정하다고 가정한다. $x_{a,b}$ 는 광도파로 A, B내에서 진행되는 역방향 파동사이의 결합계수, x_f 은 두 도파로를 진행하는 역방향 파동사이의 결합계수, x_f^{ab} 와 x_f^{ba} 는 두 도파로 A와 B 내에서 같은 방향으로 진행하는 두 파동들 사이의 결합계수를 나타낸다. 또한 $\Delta\beta_a$ 와 $\Delta\beta_b$ 는 두 광도파로를 진행하는 모드의 전파상수와 격자주기 사이의 부정합을 나타내는 벗어남인자(detuning factor)이며 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta\beta_a = \beta_a - K_g = \beta_a - \pi/\Lambda_g \quad (3-1)$$

$$\Delta\beta_b = \beta_b - K_g = \beta_b - \pi/\Lambda_g \quad (3-2)$$

2. 연산자의 분리

시간의존형 결합 파동 방정식은 광도파로를 일정한 길이 $\Delta z = (c_g \Delta t)$ 를 갖는 섹션들로 나누어, 각각의 영역에 대하여 결합 파동 방정식의 해를 구함으로써, 시

단계 알고리즘으로 변환되어질 수 있다. 또 알고리즘의 구현에서, 시간의존형 결합 파동 방정식은 연산자 분리 개념을 사용하여 전산화되어진다.

시간의존형 결합 파동 방정식은 시간 미분항을 우측으로 이항한 후 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial z} \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ R_a \\ R_b \end{bmatrix} = [M_\delta + M_{g1} + M_{g2} + M_{g3}] \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ R_a \\ R_b \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 행렬 $M_\delta, M_{g1}, M_{g2}, M_{g3}$ 은 각각 다음과 같다.

$$M_\delta = \begin{bmatrix} -\frac{1}{c_g} \frac{\partial}{\partial t} - i\Delta\beta_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{c_g} \frac{\partial}{\partial t} - i\Delta\beta_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c_g} \frac{\partial}{\partial t} + i\Delta\beta_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{c_g} \frac{\partial}{\partial t} + i\Delta\beta_b \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

$$M_{g1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -ix_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -ix_b \\ ix_a^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_b^* & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

$$M_{g2} = \begin{bmatrix} 0 & -ix_f^{ab} & 0 & 0 \\ -ix_f^{ba} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & ix_f^{ab} \\ 0 & 0 & ix_f^{ba} & 0 \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

$$M_{g3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -ix_r \\ 0 & 0 & -ix_r & 0 \\ 0 & ix_r^* & 0 & 0 \\ ix_r^* & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5-4)$$

식 (4)에서 시간의존형 결합 파동 방정식의 연산자 행렬이 4개의 행렬로 분리되어 있는 것을 볼 수 있다. M_δ 는 벗어남 인자에 관한 것이고 M_{g1}, M_{g2}, M_{g3} 은 결합계수의 종류와 관련된 행렬이다. 식 (4)의 수치해 (numerical solution)는 한 섹션의 길이가 충분히 작다는 가정하에 식 (6)과 같이 쓸 수 있다. 이는 분리된

행렬식을 연속적으로 풀수 있다는 것을 나타낸다. 최종 식은 식 (6)의 우측항들을 단계적으로 계산함으로써 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_a(z + \Delta z, t) \\ F_b(z + \Delta z, t) \\ R_a(z, t) \\ R_b(z, t) \end{bmatrix} = \exp[M_{g3}\Delta z + M_{g2}\Delta z + M_{g1}\Delta z + M_\delta\Delta z] \begin{bmatrix} F_a(z, t) \\ F_b(z, t) \\ R_a(z + \Delta z, t) \\ R_b(z + \Delta z, t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

3. 벗어남인자와 시간관련 편미분항이 포함된 항의 연산 분리단계(분리단계 1)

시간의존형 결합 파동 방정식에서 벗어남인자와 시간관련 편미분항이 포함된 항만을 뽑아내면 아래와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial z} \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ R_a \\ R_b \end{bmatrix} = M_\delta \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ R_a \\ R_b \end{bmatrix} \quad (7)$$

광도파로 A에서 순방향 전계의 경우를 예를 들어 설명하면, 식 (7)을 식 아래와 같이 변형시킨 후,

$$\frac{dF_a}{F_a} = \left(-i\Delta\beta_a - \frac{1}{c_g} \frac{\partial}{\partial t} \right) dz \quad (8)$$

양변을 $z \sim z + \Delta z$ 영역에서 적분하면 식 (9)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$F_a(z + \Delta z, t) = \exp(-i\beta_a\Delta z) \exp\left[-\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)\Delta t\right] F_a(z, t) \quad (9)$$

또한 식 (9)에 테일러 정리

$$\begin{aligned} & \exp\left[-\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)\Delta t\right] F_a(z, t) \\ &= \left[1 + \frac{\partial}{\partial t}(-\Delta t) + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2}{\partial t^2}(-\Delta t)^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3}{\partial t^3}(-\Delta t)^3 \right. \\ & \quad \left. + \dots \right] F_a(z, t) = F_a(z, t - \Delta t) \end{aligned} \quad (10)$$

를 적용하면 광도파로 A에서 위치 z 와 시간 $t-\Delta t$ 에 대한 순방향 전계값과, 위치 $z+\Delta z$, 시간 t 에서의 순방향 전계값의 관계를 알 수 있다. 마찬가지로 방법을 적용하여 식 (7)의 수치해를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_a(z+\Delta z, t) \\ F_b(z+\Delta z, t) \\ R_a(z, t) \\ R_b(z, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-i\Delta\beta_a\Delta z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-i\Delta\beta_b\Delta z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-i\Delta\beta_a\Delta z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-i\Delta\beta_b\Delta z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_a(z, t-\Delta t) \\ F_b(z, t-\Delta t) \\ R_a(z+\Delta z, t-\Delta t) \\ R_b(z+\Delta z, t-\Delta z) \end{bmatrix} \quad (11)$$

이때 식 (11)의 행렬식의 값(determinant)은 1이 되어 파워 보존을 하고 있음을 나타낸다.

4. 이동된 전계의 복원단계(분리단계 2)

분리단계 1을 거친 순방향 전계와 역방향 전계를 각각 $-\Delta z$ 와 $+\Delta z$ 만큼 이동시킨다.

$$F_{a,b}(z, t) \leftarrow F_{a,b}(z+\Delta z, t) \quad (12-1)$$

$$R_{a,b}(z+\Delta z, t) \leftarrow R_{a,b}(z, t) \quad (12-2)$$

이는 분리단계 1에 의해 이동된 전계를 원위치로 환원하는 역할을 하며, 분리단계 3 ~ 분리단계 5를 실행하기에 앞서 각각 수행된다.

5. 기타 연산의 분리단계(분리단계 3 ~ 5)

시간의존형 파동결합 방정식에서 광도파로 A, B에서의 역방향 결합계수 x_a 와 x_b 만이 포함된 항을 정리하면 식 (13)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial z} \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ R_a \\ R_b \end{bmatrix} = M_{gt} \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ R_a \\ R_b \end{bmatrix} \quad (13)$$

이 관계식에 식 (14)로 표현되는 크랭크-니콜슨 기법(Crank-Nicholson Model)을 적용하여 수치해인 식

(15)를 구하게 된다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta z} [F_a(z+\Delta z, t) - F_a(z, t)] \\ &= -ix_a \frac{1}{2} [R_a(z, t) + R_a(z+\Delta z, t)] \end{aligned} \quad (14-1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta z} [R_a(z, t) - R_a(z+\Delta z, t)] \\ &= -ix_a^* \frac{1}{2} [F_a(z+\Delta z, t) + F_a(z, t)] \end{aligned} \quad (14-2)$$

$$\begin{bmatrix} F_a(z+\Delta z, t) \\ F_b(z+\Delta z, t) \\ R_a(z, t) \\ R_b(z, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-A_a}{1+A_a} & 0 & \frac{-iB_a}{1+A_a} & 0 \\ 0 & \frac{1-A_b}{1+A_b} & 0 & \frac{-iB_b}{1+A_b} \\ \frac{-iB_a^*}{1+A_a} & 0 & \frac{1-A_a}{1+A_a} & 0 \\ 0 & \frac{-iB_b^*}{1+A_b} & 0 & \frac{1-A_b}{1+A_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_a(z, t) \\ F_b(z, t) \\ R_a(z+\Delta z, t) \\ R_b(z+\Delta z, t) \end{bmatrix}$$

$$\text{Where, } A_{a,b} = \frac{x_{a,b}^2 \Delta z^2}{4}, \quad B_{a,b} = x_{a,b} \Delta z \quad (15)$$

위 수치해의 행렬식의 값(determinant)도 1이 되어 파워 보존을 하고 있음을 알 수 있다. 또한 방향성 결합 연산자 분리단계(분리단계 4)와, 한도파로의 순방향(역방향) 전계와 인접한 도파로의 역방향(순방향) 전계 간의 광결합 연산자 분리단계(분리단계 5)에도 크랭크-니콜슨 기법을 이용하여 수치해를 구할 수 있으며, 파워보존이 됨을 알 수 있다.

6. 경계조건 만족단계(분리단계 6)

분리단계 1 ~ 5를 거친 전계는 최종적으로 경계조건(boundary condition)

$$F_{a,b}(0, t) = r_1 R_{a,b}(0, t) \quad (16-1)$$

$$R_{a,b}(L, t) = r_2 F_{a,b}(L, t) \quad (16-2)$$

을 만족하는 단계를 거치고, 시간을 Δt 만큼 증가시킨 후 다시 분리단계 1~6을 반복하게 된다. 식 (16)에서 $r_{1,2}$ 는 양 단면에서의 전계 반사율이며 본 연구에서는 전계 반사율이 0일때를 고려하였다.

7. 연산자 분리기법을 이용한 대칭구조 ADF의 해석

그림 1과 같은 대칭구조의 ADF를 이용하여 연산자 분리 알고리즘의 정확성을 확인하였다.

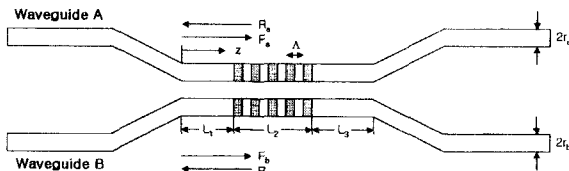


그림 1. 대칭구조의 ADF의 개략도
Fig. 1. Schematic drawing of a symmetric fiber-optic ADF.

대칭구조의 ADF에서의 결합 파동 방정식을 이용하여, 두 광도파로 A, B의 입력단에서의 반사율 공식을 구할 수 있다^[3]. 결합계수 $x_a = x_b = 5\text{cm}^{-1}$, $x_f^{ab} = x_f^{ba} = 1\text{cm}^{-1}$, $x_r = 0\text{cm}^{-1}$ 이고, 필터의 각 영역의 길이는 $L_1 = 0.685\text{cm}^{-1}$, $L_2 = 1.175\text{cm}^{-1}$, $L_3 = 1.282\text{cm}^{-1}$ 이며, 두 광도파로의 유효굴절률 $n_{\text{eff}A} = n_{\text{eff}B} = 1.503746$ 인 경우, 참고문헌 [3]의 공식을 이용하여 드롭단으로의 반사율 및 입력단으로의 되돌림 손실(return loss)을 계산한 결과를 그림 2에 검은 정사각형으로 나타내었다. 또한 본 논문에서 제안한 연산자 분리기법으로 해석한 결과를 그림 2에 실선으로 나타내었다. 연산자 분리기법의 적용시 섹션의 길이는 $\Delta z \approx 10\mu\text{m}$ 로 하였다.

두 반사특성 스펙트럼이 서로 일치하고 있음을 확인하였으며, 이를 통하여 제안한 연산자 분리 기법이 매우 정확함을 알 수 있다^[5].

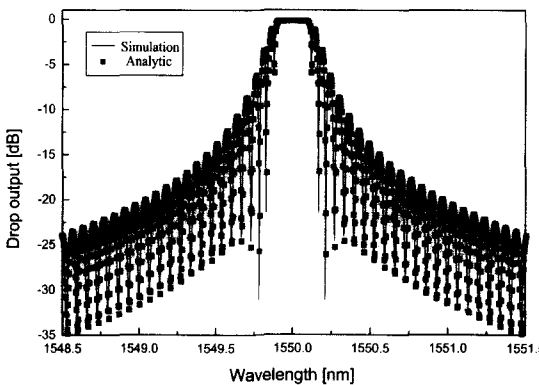


그림 2(a). 수치해와 연산자 분리 시영역 모델을 이용한 드롭단 출력특성의 비교
Fig. 2(a). Comparison of drop output powers calculated using the analytic approach and the split-step time-domain model.

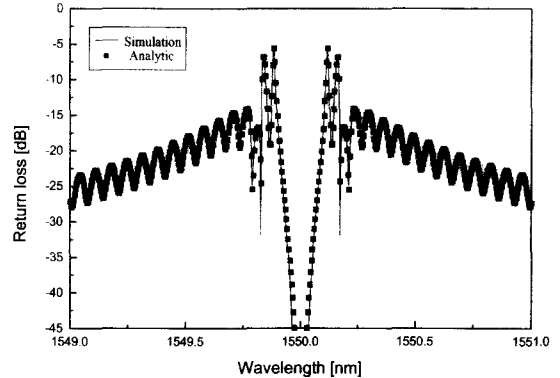


그림 2(b). 수치해와 연산자 분리 시영역 모델을 이용한 입력단 되돌림 손실특성의 비교
Fig. 2(b). Comparison of return-loss powers calculated using the analytic approach and the split-step time-domain model.

III. 비대칭구조 ADF의 해석과 설계

1. 작동원리

비대칭구조 ADF는 그림 3과 같이 비대칭의 방향성 결합기와 한쪽 영역에만 새겨진 브래그 격자로 이루어진다. 두 광도파로의 구조가 비대칭일 경우, 즉 두 광도파로의 유효 굴절률의 상대차가 서로 틀릴 경우에는 동일한 전파상수를 갖는 파장에 대해서만 광에너지의 완전이행이 일어나게 된다.

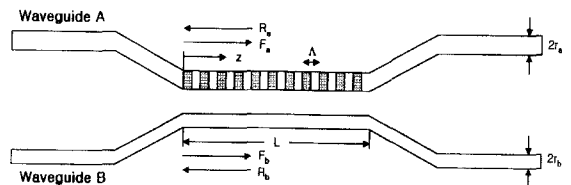


그림 3. 비대칭구조 ADF의 개략도
Fig. 3. Schematic drawing of an asymmetric fiber-optic coupler ADF.

그러므로 입사된 광파에서 동일한 전파상수를 갖는 파장성분(λ_0)을 제외한 나머지 파장 성분은 대부분 출력단으로 빠져 나가게 되고 중심 파장 성분은 도파로 A로 전이 된 후, 브래그 격자에 의해 반사되어 드롭단으로 출력된다. 이때 브래그 격자의 주기(Λ)는 식 (17)로 주어지는 위상정합조건을 이용하여 구할 수 있다. $\beta_{01}^{a,b}$ 는 각각 광도파로 A, B에서의 LP_{01} 모드의 전파상수이다^[1].

$$\beta_{01}^a(\lambda_0) + \beta_{01}^b(\lambda_0) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (17)$$

2. 유효 굴절율의 상대차에 따른 필터특성의 변화
두 광도파로의 유효 굴절율의 상대차를 변화시켜 가면서 각 port에서의 출력특성을 조사해 보았다. 결합계수 $x_a = 20 \text{ cm}^{-1}$, $x_b = 0 \text{ cm}^{-1}$, $x_r = 7 \text{ cm}^{-1}$, $x_f^{ab} = x_f^{ba} = 5.236 \text{ cm}^{-1}$ 이고 필터의 길이가 5mm일 때 유효 굴절율의 상대차이를 각각 0.12%, 0.25%로 변화시켜 가면서 각 port에서의 출력특성을 조사하였다. 이때 그림 4에 보이듯이 유효 굴절율의 상대차가 클수록 출력단으로의 되돌림 손실이 줄어드는 것을 알 수 있다. 그림 5는 중심파장에서 유효 굴절율의 상대차에 따른 각 port에서의 반사, 투과특성이다^[5].

3. 설계 파라미터의 정의

일반적으로 광전송로, 혹은 광소자 설계시 단일모드로 설계를 많이 한다. 다중모드로 설계를 할 경우

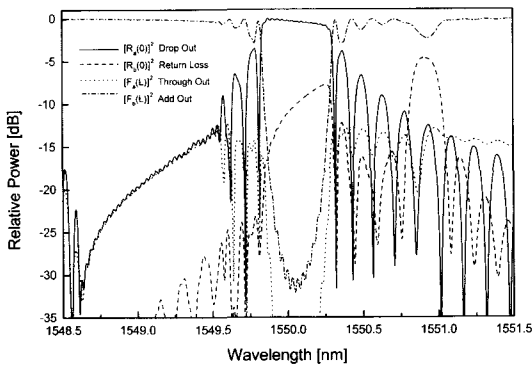


그림 4(a). 유효굴절율의 상대차가 0.12%일 때의 필터 특성

Fig. 4(a). Filter characteristics for 0.12% relative effective index difference.

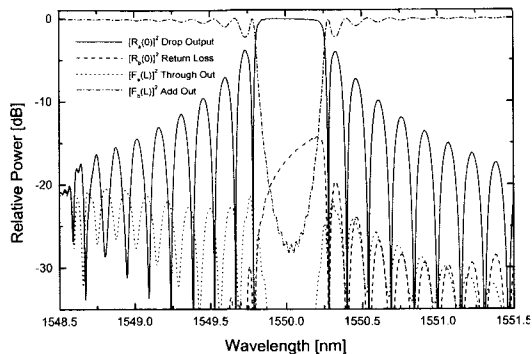


그림 4(b). 유효굴절율의 상대차가 0.25%일 때의 필터 특성

Fig. 4(b). Filter characteristics for 0.25% relative effective index difference.

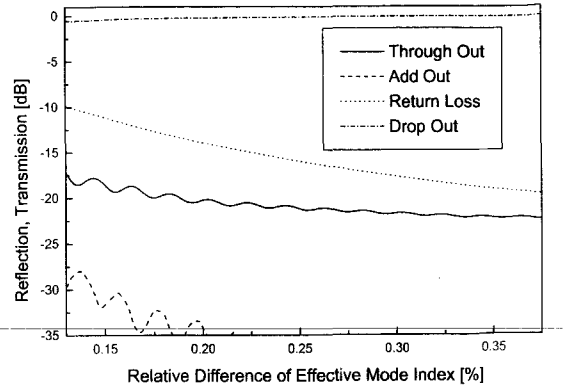


그림 5. 유효 굴절율 상대차이에 따른 필터특성.

Fig. 5. Filter characteristics as a function of the relative effective index difference.

한점의 광원으로부터 출발한 광펄스가 각각의 모드별로 서로 다른 경로를 가지고 도파하므로 충분히 먼 수신단에서는 시간차이를 가지고 도착할뿐더러, 경우에 따라서는 두 번째 펄스의 빠른 광이 첫 번째 펄스의 느린 광을 앞지르는 경우도 생겨서 고속의 장거리용에 적합하지 않다. 본 절에서는 단일모드 설계를 위한 조건과 핵심적인 파라미터인 유효 굴절율과 결합계수를 구하는 방법을 기술하였다.

(1) 유효 굴절율

비대칭구조의 ADF를 이루는 두 광도파로의 유효 굴절율은 정규화 전파상수(normalized propagation constant) b 의 정의를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다^[6].

$$n_{eff} \cong n_{clad} + b(n_{core} - n_{clad}) \quad (18)$$

정규화 전파상수 b 는 정규화 주파수(normalized frequency constant) V 와의 관계인 b - V 곡선을 이용하여 구할 수 있다. b - V 곡선에서 단일모드 차단주파수 $V_c = 2.405$ 이고 기본모드는 LP_{01} 모드이며, 단일모드를 얻기 위한 조건은 $V \leq 2.405$ 이다. 이때 식 (18)의 b 를 구하기 위해서 식 (19) ~ 식 (21)을 이용하였다^[6].

$$b \cong (1.1428 - 0.9960/V)^2 \quad (19)$$

(Accurate to within 0.2% for $1.2 < V < 2.4$)

$$V = \frac{2\pi}{\lambda_0} rNA \quad (20)$$

$$NA = (n_{core}^2 - n_{clad}^2)^{1/2} \cong n_{core} \sqrt{2\Delta}$$

$$\text{where, } \Delta = (n_{core} - n_{clad})/n_{core}. \quad (21)$$

식 (20)의 r 은 광도파로의 코어의 반경이며 NA는 광섬유의 코어가 받아들일 수 있는 최대 수광각과 관련된 파라미터인 개구수(numerical aperture)이다. 이때 V 가 2.405를 넘어가면 다중모드가 되므로 V 가 2.405보다 조금 못 미치는 곳에 오도록 코어의 반경과 코어와 클래드 각각의 굴절율을 조정하여 두 광도파로의 유효 굴절율과, 유효 굴절율의 상대차를 각각 구하게 된다.

(2) 결합계수

2절에서는 결합계수가 일정하게 고정되어 있을 경우를 고려하였으나 본 절에서는 모드의 전계분포와 도파로의 간격, 굴절율의 변조정도에 따른 결합계수의 크기를 산출하였다. 식 (22)의 결합계수 x 표현식을 보면 광도파로의 전계와, 섭동으로 인한 굴절율분포의 중첩도가 결합계수에 관여하는 것을 알 수 있다^[7]. 그림 6은 결합계수를 구하기 위해서 사용한 원통형 광도파로의 좌표계이다.

$$x_a = \frac{\omega \epsilon_0}{4\pi} \int_{S_a} (n_m^2 - n_{coreA}^2) \psi_a^2 ds \quad (22-1)$$

$$x_b = \frac{\omega \epsilon_0}{4\pi} \int_{S_b} (n_m^2 - n_{coreA}^2) \psi_b^2 ds \quad (22-2)$$

$$x_f^{ba} \cong x_f^{ab} = \frac{\omega \epsilon_0}{4} \int_{S_a} (n_{avg}^2 - n_{clad}^2) \psi_a \psi_b ds \quad (22-3)$$

$$x_r^{ab} = x_r^{ba} = \frac{\omega \epsilon_0}{4\pi} \int_{S_a} (n_m^2 - n_{coreA}^2) \psi_a \psi_b ds \quad (22-4)$$

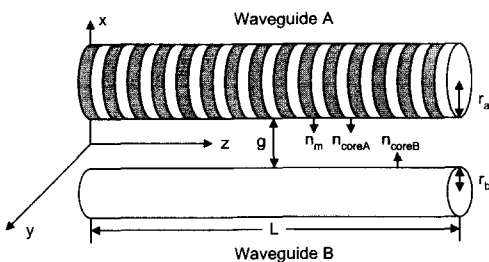


그림 6. 광섬유 커플러 ADF의 좌표계와 굴절율 분포
Fig. 6. Coordinate system and index distribution of optical fiber coupler ADF.

이때 n_m 은 광도파로 A에 UV-빔을 조사해서 격자를 형성시킬 때 생기는 굴절율의 변조를 의미하며 n_{avg} 와 $\psi_{a,b}$ 는 다음과 같다.

$$n_{avg} = \frac{n_m + n_{coreA}}{2} \quad (23-1)$$

$$\psi_{a,b} = \sqrt{\frac{2\omega L}{\beta_0^2}} \Psi_{a,b} \quad (23-2)$$

n_{avg} 는 코어 A의 굴절율 n_{coreA} 와, 변조된 굴절율 $n_m (= \delta n + n_{coreA})$ 의 평균값을 의미하며, δn 은 광도파로 A에 격자를 형성시키기 위해서 UV-빔을 조사하여 생긴 변조량이고 $\psi_{a,b}$ 은 전계분포와 관련되어지며 LP_{01} 모드의 전계분포는 식 (24)와 같다^[6].

$$E_x^a = \Psi_a \exp(-i\beta_{01}^a z) \\ = A_a \exp\left[-\frac{(x - r_a - \frac{g}{2})^2 + y^2}{w_a^2}\right] \exp(-i\beta_{01}^a z) \quad (24-1)$$

$$E_x^b = \Psi_b \exp(-i\beta_{01}^b z) \\ = A_b \exp\left[-\frac{(x + r_b + \frac{g}{2})^2 + y^2}{w_b^2}\right] \exp(-i\beta_{01}^b z) \quad (24-2)$$

식(24)에서 $w_{a,b}$ 는 전계의 반경으로서 spot size에 해당하며 식 (25)를 이용해서 구할 수 있다^[6].

$$\frac{w}{r} \cong 0.65 + 1.619 V^{-3/2} + 2.879 V^{-6} \\ (\text{Accurate to within 1\% for } 1.2 < V < 2.4) \quad (25)$$

V 는 정규화 주파수이고 정규화상수 $A_{a,b}$ 는 정규화 조건인 식 (26)을 이용하여 구할 수 있다^[7].

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{a,b}^2 ds = 1 \quad (26)$$

4. 설계 및 시뮬레이션 결과의 고찰

설계의 첫 번째 단계로 유효굴절율과 관련된 파라미터들을 선택한다. 2절에서 보였듯이 유효굴절율의 상대차가 클수록 되돌림 손실이 줄어들기 때문에 최대의 유효굴절율의 상대차를 보이는 파라미터를 선택하였다^[8]. 이때 일반적으로 사용되고 있는 단일모드 광섬유의 특성($NA < 0.2$, $r < 10 \mu m$, $0.2 < \Delta < 1\%$)을 만족하는 값을 취하였다. 클래드의 굴절율이 1.445, 광섬유 A의 굴절율이 1.4547, 코어반경이 $3.28 \mu m$ 이고 광섬유 B의 굴절율이 1.4538, 코어반경이 $2.11 \mu m$ 일 때 유효 굴절율의 상대차는 0.3%가 되며 그림 7에 의하면 약 15dB의 되돌림 손실이 있음을 알 수 있다. 이때 유효 굴절율의 상대차가 0.3%보다 크게 될 경우에는 단일모드 도파조건의 범위를 벗어나거나 광도파로의 반경이 제작이 불가능할 정도로 작아진다.

두 번째 단계로는 결합계수와 관련된 파라미터를 선택한다. 광도파로 A에 격자를 새기기 위해서 UV-빔을 조사하여 굴절율 변조를 하게 되는데, 이 과정에서 굴

절을 변조 파라미터 δn 을 증가시키는 데에는 한계가 있기 때문에 적절한 값의 선택이 중요하다^[8]. 그림 7에서는 굴절을 변조 파라미터가 0.003일 때 광도파로의 간격 g 에 따른 결합계수의 변화를 살펴보았다. 이때 x_a 는 굴절변조의 크기에 의존하므로 g 값의 변화에는 무관하며 나머지 결합계수들은 광도파로의 간격이 증가함에 따라 결합계수가 작아지고 있다. 즉 두 광도파로 사이의 간격이 멀어질수록 광결합 현상이 감소함을 알 수 있다.

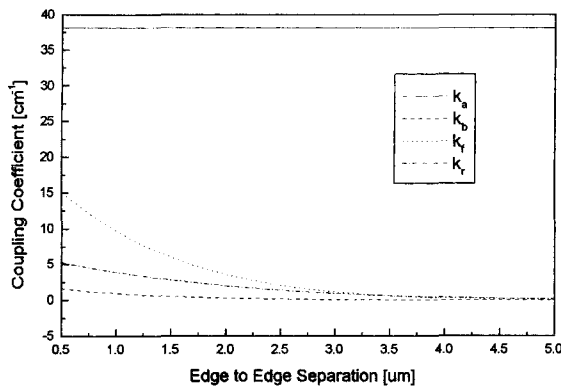


그림 7. 코어 간격에 따른 결합계수의 변화
Fig. 7. Coupling coefficient as a function of core separation.

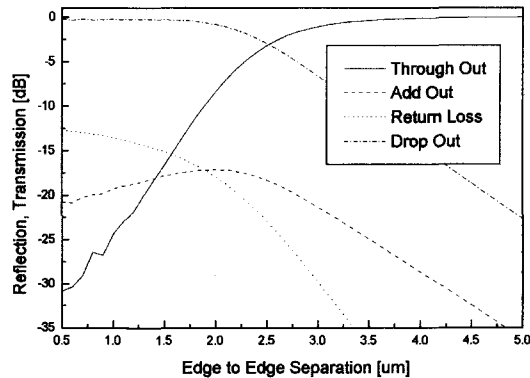


그림 8. 중심파장에서 코어 간격에 따른 필터특성
Fig. 8. Filter characteristics as a function of core separation at the center wavelength.

세번째 단계로 필터의 길이와 코어 간격 g 를 선택한다. 그림 8은 필터의 길이가 5 mm일 때, 중심파장에서 g 의 변화에 따른 각 출력 단자에서의 반사, 투과 특성을 나타내고 있다. 코어간격이 0.5~1.75 μm 일 때 입사

광의 대부분이 드롭단으로 반사되며, 3 μm 이상이 되면 광결합 현상이 감소하여 대부분의 파워가 output port로 빠져나가고 있음을 알 수 있다. 그리고 코어간격이 증가함에 따라 되돌림 손실이 감소하고 있음을 알 수 있다.

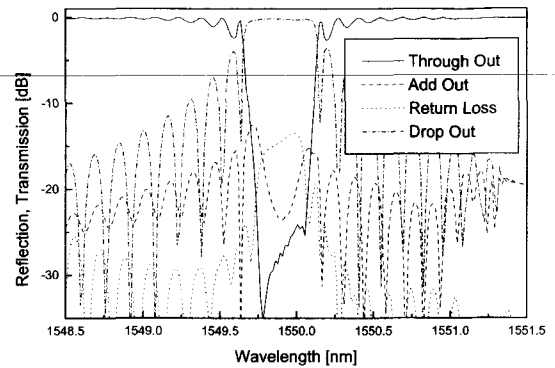


그림 9. 코어 간격이 1 μm 인 경우 파장에 따른 필터특성
Fig. 9. Filter characteristics for the core separation of 1 μm .

표 1. 설계에 사용한 광섬유 파라미터

Table 1. Optical fiber parameter values used in the design.

	Optical Fiber A	Optical Fiber B
Radius [μm]	3.28	2.11
NA	0.18	0.16
Spot size [μm]	3.36	4.43
V - parameter	2.39	1.37
Refractive index	1.4547	1.4538
Effective index	1.4509	1.4465
Refractive index of clad	1.445	
Edge to edge separation [μm]	1	
Relative difference of effective index [%]	0.3	
UV - induced index modulation, [δn]	0.003	

그림 8의 결과를 이용하여 적절한 두 광도파로의 간격을 정할 수 있다. 본 논문에서는 간격을 1 μm 로 정했다. g 값을 선택하게 되면, 그림 7을 이용하여 결합계수

를 구할 수 있으며 이 결과를 이용하여 최종적인 필터 특성을 알 수 있다. 그림 9에는 표 1의 파라미터를 이용한 비대칭구조 ADF의 각 출력 단에서의 필터 특성을 보이고 있다.

IV. 결 론

광섬유 커플러 ADF의 필터링 특성을 연산자 분리 시영역 모델을 이용하여 조사하였다. 이 모델은 기존의 유한차분법을 이용한 알고리즘에서 보여지는 섹션수에 따른 오차를 크게 개선하고 있으며 설계를 위한 시간을 단축시키고, 정확성을 높이고 있다. 우선 연산자 분리 시영역 모델을 이용하여 대칭구조 ADF의 파장응답 특성을 조사하여 연산자 분리 시영역 모델의 정확성을 확인한 후 비대칭구조 ADF에 적용하였다.

비대칭구조 ADF가 가지는 비대칭의 다양한 조건을 고려하기 위하여 위해서 유효 굴절율, 결합계수, 굴절율 변조등의 파라미터를 도입하였으며 단일모드 도파조건 하에서 설계하였다. 시뮬레이션 결과, 비대칭구조 ADF는 유효 굴절율의 상대차가 클수록 중심파장에서 되돌림 손실이 줄어들어서 우수한 필터특성을 보이고 있음을 확인하였으며 유효굴절율의 상대차를 증가시키는 데에는 한계가 있기 때문에 유효굴절율의 상대차를 0.3%로 고려하여 설계하였다. 이 경우 15dB의 되돌림 손실이 있으며 이를 만족하는 광도파로의 굴절율분포, 반지름, 개구수 등을 선택하여 광도파로의 간격에 따른 결합계수와 각 출력단에서의 반사, 투과특성을 구하여 최적의 필터링 특성을 보이는 광도파로의 간격을 구하였다.

본 연구에서는 비대칭구조의 ADF의 최적화 설계를 위한 도구를 개발하였으며 제시된 해석, 및 설계방법은 수동형 광섬유 커플러 ADF뿐만 아니라, 능동특성을 가지는 커플러와 브래그 격자가 포함된 파장가변레이저 등의 해석과 설계에도 광범위하게 적용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] L. Dong, P. Hua, T. A. Birks, L. Reekie, and P. St. J. Russel, "Novel Add/Drop Filters for Wavelength-Division-Multiplexing Optical Fiber Systems Using a Bragg Grating Assisted Mismatched Coupler," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 8, No. 12, pp. 1656-1657, 1996.
- [2] T. Erdogan, "Optical Add-Drop Multiplexer Based on an Asymmetric Bragg Coupler," *Optics Communications*, 157, pp. 249-264, 1998.
- [3] S. S. Orlov, A. Yariv and S. V. Essen, "Coupled-Mode Analysis of Fiber-Optic Filters for Dense Wavelength-Division Multiplexing," *Optic Lett.*, Vol. 22, No. 10, pp. 688-690, 1997.
- [4] B. S. Kim, Y. Chung, and S. H. Kim, "Split-Step Time-Domain Analysis of Optical Waveguide Devices Composed of a Directional Coupler and Gratings," *Optics Lett.* Vol. 25, No. 8, pp. 530-532, 2000.
- [5] 강준환, 김병성, 정영철 "광섬유 커플러 ADM의 연산자 분리 시영역 해석 및 설계" 대한전기학회 추계학술대회 논문집 C편, 1126-1127쪽, 1999년 11월
- [6] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, Wiley-Interscience, 1992.
- [7] Amnon Yariv, *Optical Electronics*, Sauer College Publishing, p. 520, 1991.
- [8] P. J. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi and W. A. Reed, "High Pressure for Achieving Ultrahigh UV Photosensitivity and Thermal Sensitivity in GeO₂ Doped Optical Fibers," *Electronics Lett.*, Vol. 29, No.13, pp. 1191-1192, 1993.

저 자 소 개



姜俊煥(正會員)

1998년 2월 광운대학교 물리학과 (학사), 1998년 3월~현재 광운대학교 전자통신공학과 석사과정 재학중
<주관심분야 : WDM 광소자/네트워크, 광통신공학>



鄭榮哲(正會員)

1981년 2월 서울대학교 전자공학과 (학사), 1983년 2월 한국과학기술원 전기/전자 (석사), 1992년 7월 Univ. of Calif. Santa Barbara, 전기 및 컴퓨터공학과 (박사), 1981년 3월~1986년 8월 금성전선기술연구소 연구원, 1987년 1월~1988년 8월 한국과학기술원(KIST) 연구원, 1993년 9월~현재 광운대학교 전자 공학부/전자통신공학과 부교수, <주관심 분야 : 광통신용 소자, 광통신 시스템/네트워크>



金炳星(正會員)

1994년 2월 광운대학교 전자통신공학과 (학사), 1996년 2월 광운대학교 전자통신공학과 (석사), 2000년 2월 광운대학교 전자통신공학과 (박사), 2000년 3월~현재 한국 전자통신 연구소(ETRI) 선임 연구원, <주관심 분야 : 반도체 광집적 소자, 광통신 시스템>