

論文97-34D-11-8

$\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 에서 계단형, 삼각형 분포 - 이중클래드 분산보상 광섬유의 설계

(Design of Double-clad, Dispersion-Compensated Fiber at $\lambda = 1.55\mu\text{m}$: Step & Triangular Index Profile)

金秀娥*, 金昌敏*

(Sua Kim and Chang-Min Kim)

요 약

분산보상기능을 갖는 이중클래드 광섬유를 설계하기 위하여 1차원 유한 요소법을 적용하였다. LP₀₁ 단일 모드만을 허용하는 구조를 취급하였고, macro-bending 손실을 고려하였다. 코어굴절율이 계단형 분포의 경우 L_{SMF}/L_{DCF} = 6.2의 보상비, 삼각형 분포의 경우 L_{SMF}/L_{DCF} = 5.2의 보상비를 갖는 설계파라미터를 추출하였다.

Abstract

The 1-D finite-element method is applied for designing double-clad optical fibers with dispersion-compensation capability. Design parameters allowing only a LP₀₁ single mode are treated and macro-bending loss are taken into consideration. Design parameters are extracted to have the compensation ratio (L_{SMF}/L_{DCF}) of 6.2 for core structure with step-index profile, and of 5.2 for core with triangular-index profile.

1. 서 론

최근 1.55 μm 대역에서 이득을 갖는 희토류 첨가 광섬유 증폭기(EDFA : Erbium-doped fiber amplifier)의 급속한 발전으로 광섬유의 손실을 보상하고 무중계거리를 증대시킬 수 있는 여건이 마련되고 있으며, 따라서 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 에서 동작하는 전송 시스템에 관한 관심이 점차 높아지고 있다. 현재 포설되어 있는 광전송 선로의 95% 이상이 1.31 μm DSF(Dispersion shifted fiber : 분산천이 광섬유)임을 고려할 때 이를 1.55 μm DSF로 대체하는 방안은 비경제적이며, 따라서 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 의 광원을 사용하되 선로 끝단에서 분산을

보상하는 방안 등이 전반적인 추세이다. 1.31 μm 에서 영분산을 갖도록 최적화 되어있는 광섬유는 1.55 μm 에서 약 17ps/nm · km의 분산치를 갖고 있다^[1]. 1.31 μm 전송시스템을 이용하여 1.55 μm 에서 10G bps이상으로 전송이 가능하려면 분산보상이 필연적으로 요구된다.

분산보상을 하는 방법으로 여러 가지 방안이 제안되었으며, 그 중에서는 prechirp 방법^[2], 분산 자체를 FM to AM 변환에 사용하는 방법^[3], 광섬유 간섭 필터를 사용하는 방법^[4], 두 모드 광섬유 LP₁₁모드의 큰 음 분산을 이용하는 방법^[5] 등과 같이 능동소자를 사용하는 방법들이 있다. 한편 수동소자를 사용하는 방법으로는 광섬유 격자^[6] 등을 사용하거나, 다중 방향성 결합기의 파장의존 결합성질^[7]을 이용하는 방법 등이 있다.

본고에서는 분산보상을 위해 대단히 큰 음 분산을

* 正會員, 서울시立大學校 電子工學科
(Dep. of EE, The University of Seoul)

接受日字:1997年6月12日, 수정완료일:1997年9月19日

갖는 LP₀₁모드를 갖는 광섬유를 이용하는 수동적인 기법^[11]을 사용하고자 한다. DCF(Dispersion compensation fiber : 분산보상 광섬유)의 길이는 장거리 전송선로를 따라 누적된 양 분산을 상쇄시킬 수 있도록 정해질 것이다^[8].

분산보상 기능을 갖는 광섬유를 설계하기 위하여, 코어의 굴절율이 계단형과 삼각형인 이중클래드 구조를 해석하였다. 코어 및 클래드의 비굴절율차, 반경을 각각 변화시켜 낮은 분산값을 가지는 파라미터를 추적하였다. 광섬유의 고유방정식을 해석하기 위해서 1차원 유한요소법(FEM:Finite Element Method)을 적용하였다. LP₀₁ 단일모드만을 허용하는 설계파라미터를 취급하였으며, Macro-bending 손실을 고려하여 LP₀₁ 단일모드의 차단파장이 1.80μm 이상이 되도록 설계하였다^[8].

II. 약도파 광섬유 해석의 기본 원리

1. 스칼라 파동 방정식

광섬유에서 일반 전자계의 시간과 z방향 의존성은 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$\hat{E} = [\overline{E}_t(r, \phi) + \hat{z}E_z(r, \phi)] e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (1)$$

$$\hat{H} = [\overline{H}_t(r, \phi) + \hat{z}H_z(r, \phi)] e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2)$$

전계, 자계의 횡방향 성분은 축방향 성분의 함수로 다음 식과 같은 관계로 도출된다.

$$\overline{E}_t = -j \frac{\beta}{\omega^2 \mu_0 \epsilon - \beta^2} \left[\nabla_t E_z - \frac{\omega \mu_0}{\beta} \hat{z} \times (\nabla_t H_z) \right] \quad (3)$$

$$\overline{H}_t = -j \frac{\beta}{\omega^2 \mu_0 \epsilon - \beta^2} \left[\nabla_t H_z - \frac{\omega \epsilon}{\beta} \hat{z} \times (\nabla_t E_z) \right] \quad (4)$$

전계, 자계의 φ 방향 의존성을 e^{jφ}로 가정한다. 함수 e^{jφ}는 2π를 주기로 하는 단가 함수이어야 하므로 ν는 정수인 양자수이다.

한편, 대부분의 유전체 광도파로의 경우 도파영역의 굴절률 분포가 완만하게 변화하므로 ∇ε = 0을 놓을 수 있다. 이러한 가정 하에 식 (1),(2)를 Maxwell 방정식에 대입하여 정리하면, E_z, H_z에 관한 미분 방정식을 축방향 전계함수 A_ν(r)로 다음과 같이 표기할 수 있다^[9].

$$\frac{d^2 A}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dA}{dr} + \left(\omega^2 \mu \epsilon - \beta^2 - \frac{\nu^2}{r^2} \right) A = 0 \quad (5)$$

식 (5)의 A, ε은 r만의 함수이다. 식들의 정규화를 위하여 다음의 파라미터들을 도입한다.

$$\epsilon(r) = \epsilon_0 n^2(r) = \epsilon_0 n_2^2 [1 + 2\Delta f(r)], \quad 0 \leq f(r) \leq 1 \quad (6)$$

$$u^2 = (k_0^2 n_1^2 - \beta^2) a^2 = a^2 k_0^2 (n_1^2 - N^2) \quad (7)$$

$$w^2 = (\beta^2 - k_0^2 n_2^2) a^2 = a^2 k_0^2 (N^2 - n_2^2) \quad (8)$$

$$v^2 = u^2 + w^2 = a^2 k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) \quad (9)$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_2^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_2} \quad (10)$$

$$b = \frac{N^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} = \frac{\omega^2}{v^2} = 1 - \frac{u^2}{v^2} \quad (11)$$

여기서 n₁, n₂는 각각 코어, 클래드의 굴절율이다. f(r)은 굴절율 분포함수이며, a는 코어의 반경이다. N은 mode index이고, v, b는 각각 정규화 주파수, 정규화 전파상수를 의미한다.

고유방정식의 도출과정이 다소 다르기는 하지만, 횡방향 전자계 함수 R_{ν,μ}는 다음의 미방으로 유도된다^[10].

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \left[\frac{\nu^2}{a^2} (1 - b - f) - \frac{(\nu \mp 1)^2}{r^2} \right] R = 0 \quad (12)$$

위 부호, 아랫부호는 각각 HE_{ν,μ}, EH_{ν,μ} 모드에 해당된다. μ는 고유방정식의 μ 번째 해를 의미한다. HE_{l+1,μ}와 EH_{l-1,μ}은 동일한 분포를 보이며 축퇴현상을 보이게 되므로, 이를 이용하여 HE_{l+1,μ}, EH_{l-1,μ}의 분류를 다음과 같이 LP_{l,μ}로 재분류하는 것이 편리하다.

$$LP_{l,\mu} = \begin{cases} HE_{l+1,\mu} \\ EH_{l-1,\mu} \end{cases} \quad (13)$$

2. 유한 요소법(FEM)의 적용

식 (12)의 스칼라 파동방정식에 FEM을 적용하기 위해서는 경계조건을 정의해 주어야 한다. 일반적으로 even 모드에 대해서는 r=0에서 전계함수의 1차 도함수는 0이 되고, odd 모드에 대해서는 r=0에서 전계함수는 0이며, r=∞에서 일반적으로 전계함수의 크기는 무시할 수 있다. 이상을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} \left. \frac{dR(r)}{dr} \right|_{r=0} = 0, & \text{even 모드} \\ R(0) = 0, & \text{odd 모드} \end{cases} \quad (14)$$

$$R(r) \Big|_{r=\infty} = 0 \quad (15)$$

해석될 전영역을 2차 선 요소로 분할하였다. 미분가능한 시험함수 ξ 를 식 (12)에 곱하고 분할된 한 요소영역에 대해서 적분하여 변분공식을 이끌어 내면 다음과 같다^[14].

$$\begin{aligned} 0 &= \int_{a'} \xi \left\{ \frac{d}{dr} \left(r \frac{dR}{dr} \right) + r \left[\frac{v^2}{a^2} (1-b-f) - \frac{(v \mp 1)^2}{r^2} \right] R \right\} dr \\ &= \int_{a'} \left\{ -r \frac{d\xi}{dr} \frac{dR}{dr} + r \left[\frac{v^2}{a^2} (1-b-f) - \frac{(v \mp 1)^2}{r^2} \right] \xi R \right\} dr \\ &\quad + r \xi \left. \frac{dR}{dr} \right|_{r_1^{(e)}} - r \xi \left. \frac{dR}{dr} \right|_{r_2^{(e)}} \end{aligned} \quad (16)$$

분할된 한 요소중 e번째 요소내에서 횡방향 함수 R과 시험함수 ξ 는 다음과 같다.

$$R = \sum_{j=1}^3 R_j^{(e)} \varphi_j^{(e)}, \quad (17)$$

$$\xi = \varphi_j^{(e)}(r), \quad (i=1, 2, 3) \quad (18)$$

여기서 $R_j^{(e)}(j=1, 2, 3)$ 은 요소내의 절점치이고 $\varphi_j^{(e)}(r)$ 는 보간함수이다. $\varphi_j^{(e)}(r)$ 은 다음과 같이 표현한다.

$$\varphi_1^{(e)}(r) = \frac{(r-r_3^{(e)})(2r-r_1^{(e)}-r_3^{(e)})}{(r_3^{(e)}-r_1^{(e)})^2} \quad (19a)$$

$$\varphi_2^{(e)}(r) = \frac{4(r-r_1^{(e)})(r_3^{(e)}-r)}{(r_3^{(e)}-r_1^{(e)})^2} \quad (19b)$$

$$\varphi_3^{(e)}(r) = \frac{(r-r_1^{(e)})(2r-r_1^{(e)}-r_3^{(e)})}{(r_3^{(e)}-r_1^{(e)})^2} \quad (19c)$$

여기서 $r_j^{(e)}$ 는 선요소의 양끝, 즉 $j(j=1, 3)$ 에서의 좌표이다. 식 (19)로 부터 각 보간함수는 자신의 절점에서는 1이고 자신 이외의 절점에서는 0인 2차 함수가 된다는 것을 알 수 있다. 식 (17)과 (18)을 식 (16)에 대입하고 정리하여 행렬로 표현하면 다음과 같은 요소행렬식을 얻는다.

$$[K_{ij}^{(e)}] \{R_j^{(e)}\} - b [S_{ij}^{(e)}] \{R_j^{(e)}\} = \{F_i^{(e)}\} \quad (20)$$

여기서

$$K_{ij}^{(e)} = \int_{a'} \left\{ -r \frac{d\varphi_i^{(e)}}{dr} \frac{d\varphi_j^{(e)}}{dr} + r \left[\frac{v^2}{a^2} (1-f) - \frac{(v \mp 1)^2}{r^2} \right] \varphi_i^{(e)} \varphi_j^{(e)} \right\} dr \quad (21a)$$

$$S_{ij}^{(e)} = \int_{a'} r \left[\frac{v^2}{a^2} \varphi_i^{(e)} \varphi_j^{(e)} \right] dr \quad (21b)$$

$$F_i^{(e)} = c_1^{(e)} \varphi_i^{(e)}(r_1) - c_3^{(e)} \varphi_i^{(e)}(r_3) \quad (21c)$$

식 (20)에 식 (14)와 (15)의 경계조건을 적용하고 요소행렬식을 모든 요소에 걸쳐 합하면 다음과 같은 고유치문제 형태의 행렬식을 얻을 수 있다.

$$[K] \{R\} - b [S] \{R\} = \{0\} \quad (22)$$

여기서

$$[K] = \sum_{e=1}^N \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 K_{ij}^{(e)} \right] \quad (23a)$$

$$[S] = \sum_{e=1}^N \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 S_{ij}^{(e)} \right] \quad (23b)$$

식 (22)의 고유치문제에서 고유치는 b 에, 고유함수는 R 에 해당한다.

III. 분산특성 및 보상

1. 분산특성

광신호는 광섬유를 따라 진행할수록 광섬유에서의 분산의 결과로 왜곡된다. 단일모드 광섬유에서 총분산은 주로 두 요소로 구성되는데 재료분산 D_{mat} 과 도파로분산 D_{wg} 이다. 재료분산은 굴절율이 파장장의 함수로 변하기 때문에 발생하며, 다음 식으로 기술할 수 있다.^[11,13]

$$D_{mat}(\lambda) = \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad (24)$$

여기서 c 는 자유공간에서의 광속이며 n 은 파장 λ 에서의 굴절율이다. 재료분산은 광섬유를 구성하는 재료에 의존한다. 전형적인 재료분산 곡선^[13]을 그림 1에 그려 놓았다.

현재 가장 많이 사용되고 있는 광섬유 재질은 주로 silica(SiO_2)이다. 광섬유 제작시 코어와 클래드의 굴절율을 다르게 하기 위하여 GeO_2 , P_2O_5 , F, B_2O_3 등의 산화물을 도핑한다. GeO_2 나 P_2O_5 를 도핑하면 굴절율이 증가하고, F나 B_2O_3 를 도핑하면 굴절율이 감소한다.

도파로분산은 전파모드의 군속도가 빛의 주파수 또는 파장에 대하여 일정하지 않기 때문에 일어난다. 도파로분산은 다음식으로 기술할 수 있다^[11].

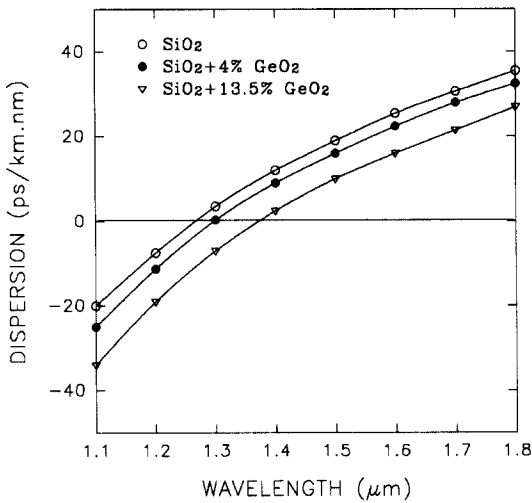


그림 1. 재료분산 곡선
Fig. 1. Material dispersion curves.

$$D_{wg} = -\frac{n_2 \Delta}{c\lambda} v \frac{d^2(vb)}{dv^2} \quad (25)$$

총분산은 다음 식과 같이 재료분산과 도파로분산의 합으로 나타낼 수 있다.

$$D_{tot} = D_{mat} + D_{wg} \quad (26)$$

D_{mat} 는 그림 1으로부터 얻을 수 있고, 본 연구에서는 SiO₂ 재질을 대상으로 하여 분산특성을 살펴보기로 한다. D_{wg} 는 식 (25)의 2차 미분형태를 유한차분 형태(Finite Difference)로 바꾸고, b-v곡선 데이터로부터 구할 수 있다.

2. 분산보상

현재 포설되어있는 단일모드 광섬유와 분산보상 광섬유를 직접 연결시키면, 직접연결에 의한 분산은 다음과 같이 선형적인 합으로 나타낼 수 있다.

$$D_{tot} = (D_{SMF}L_{SMF} + D_{DCF}L_{DCF})/L_{SMF} \quad (27)$$

여기서 D는 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 에 대한 분산치를 나타내고, L은 광섬유의 길이를 나타내고있다. 아래첨자인 tot은 총 연결을 SMF와 DCF는 각각 광전송용 단일모드 광섬유와 분산보상 단일모드 광섬유를 나타낸다. $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 에서 전형적인 SMF의 분산치 D_{SMF} 는 약 17ps/nm·km이다^{[11],[8]}. 식 (27)로부터 총분산 D_{tot} 가 영이 되기 위한 분산보상 단일모드 광섬유의 길이는 다음과 같다.

$$L_{DCF} = \frac{|D_{DCF}|}{D_{SMF}} L_{SMF} \quad (28)$$

여기서 $|D_{DCF}|/D_{SMF}$ 는 광전송용 광섬유의 길이와 분산보상 광섬유의 길이 비, 즉 보상비율($L_{SMF} : L_{DCF}$)을 결정짓는다. 식 (28)로부터 분산보상 단일모드 광섬유의 설계시 고려해야 할 사항을 살펴보면 다음과 같다. i) $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 에서 큰 마이너스 D_{DCF} 를 갖도록 설계되어야한다. ii) DCF의 구조는 일반 단일모드 광섬유와는 달리 비굴절율차 Δ 가 2.0% 근처에 이르고, 코어의 직경이 2~3 μm 정도로 작다. 따라서 이러한 구조상의 특징으로 인한 absorption, scattering, micro-bending 이나 macro-bending 등에 의한 손실이 크게 증가되지 않도록 고려하여야한다. iii) 분산보상 광섬유를 협대역 파장 분할 다중화 시스템에 적용할 경우에는 $\lambda_1=1.55\mu\text{m}$ 대역에서 총 분산치 D_{tot} 가 작고 평탄한 분산치를 가져야 한다.

IV. 모의전산

코어의 굴절율 분포는 계단형 분포와 삼각형 분포형을 대상으로 하였다. 이중 클래드 굴절율 분포를 갖는 광섬유에 대한 스칼라 파동방정식을 1차 유한요소법(FEM)을 이용하여 해석하였다. 선택된 각각의 굴절율 분포에 대하여 스칼라 파동방정식을 풀어 LP₀₁모드에 대한 정규화 전파상수 b와 정규화 주파수 v의 b-v곡선을 구한다. 구해진 b-v 데이터로부터 도파로 분산을 구한다. 본 논문에서는 기준 클래드의 재질로 pure SiO₂의 경우를 가정하였다.

실제 코어와 클래드의 재질은 성분 구성비가 다르므로 영역에 따라 재료 분산이 다르다. 그러나 실제 재료분산 관계식 (24)에 의하면 D_{mat} 을 결정짓는 변수는 오직 λ 뿐이다. 두 재질의 상이성을 고려하는 방안으로 광에너지 분포에 비례하여 weighting factor를 주는 경우^[12]가 있으나, 코어와 클래드의 두 재질을 동일하다고 보고 해석을 수행하기도 한다^[13]. 본고에서는 후자의 방법을 따르기로 한다.

구하여진 도파로 분산 D_{mat} 과 재료분산 D_{wg} 을 더하여 총분산 D_{tot} 을 얻는다. 파장 1.55 μm 에 대한 분산치를 굴절율 분포를 변화시키면서 구하였다. $\Delta_1, a_1, \Delta_2, a_2$ 등 파라미터의 변화에 따른 분산치를 제시하기에 앞서, 각 파라미터들이 단일모드만을 허용하는 범위내에 있는가를 확인하였다. 이후 제시되는 데이터들은

모두 단일모드임을 유의한다.

실험적으로 LP₀₁모드의 차단 파장이 1.80 μm 이하가 되면 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 의 광신호는 macro-bending시에 큰 영향을 받아 손실이 커지는 것으로 알려져 있다^[11]. 따라서 주어진 파라미터에 대한 LP₀₁모드차단 파장 λ_{c1} 을 구하여 λ_{c1} 이 1.80 μm 이하가 되지않는 파라미터를 구분하였다.

1. 계단형 굴절률 분포

코어의 굴절률 분포가 계단형 분포이고 1차 클래드와 기준클래드의 이중 클래드로 구성된 굴절률 분포를 그림 2에 나타내었다. 여기서 Δ_1 과 Δ_2 는 각각 코어와 기준 클래드간의 비굴절율차와 1차 클래드와 기준 클래드와의 비굴절율차를 나타내고, a_1 과 a_2 는 각각 코어의 반경과 1차 클래드의 반경을 나타낸다.

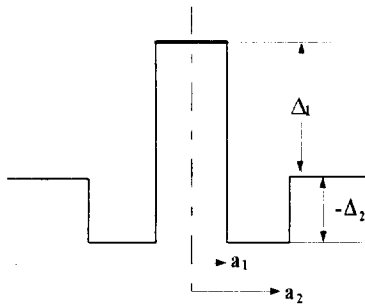


그림 2. 계단형 - 이중클래드 굴절률 분포
Fig. 2. Index profile of a step, double-clad fiber.

1) 단일 클래드의 경우

우선 $\Delta_2=0.0\%$ 일 때 마이너스 분산값을 증가시키기 위해 Δ_1 이 1.5 ~ 2.5%사이의 5개 각 경우에 대하여 코어 반경 a_1 을 변화시키면서 분산을 해석하였다. 해석결과를 그림 3에 그려져 있다.

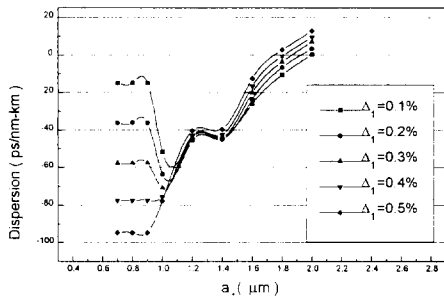


그림 3. 계단형 - 단일클래드 구조의 분산특성
Fig. 3. Dispersion characteristic of step, single-clad fibers.

Δ_1 이나 a_1 의 변화에 따른 뚜렷한 분산치 변화의 경

향은 나타나지 않고 있다. 그러나 Δ_1 이 커질수록, 그리고 a_1 이 줄어들수록 분산치가 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 큰 열팽창 계수의 차이로 말미암아 cracking의 위험성이 커지고, 또한 scattering 손실이 증가하게 되므로 Δ_1 을 2.0%로 제한하는 것이 바람직하다. $\Delta_1=2.0\%$ 일 때 최대 마이너스 분산치는 약 -70ps/nm.km 정도로 분산 보상효율이 과히 높지 않다.

따라서 코어의 굴절률을 상대적으로 높이는 효과를 주기 위해 그림 2와 같이 depressed 클래드 층을 도입하는 것은 의미있는 시도일 것이다. 이러한 의미에서 이중 클래드 구조를 해석해 보고자 한다.

2) 이중 클래드의 경우

(1) Δ_2 를 파라미터로 하여 1차 클래드반경 a_2 를 변화시키는 경우

1차 클래드의 비굴절율차 Δ_2 를 파라미터로 하여, 반경 a_2 에 따라 변화시키면서 분산특성을 살펴보았다. 그림 4에는 단일 클래드구조에서 얻어진 최적의 코어 반경 1.0 μm 일 때의 분산특성을, 그림 5에는 실제 제작 조건을 고려한 코어 반경 1.4 μm 일 때의 분산특성을 나타내었다.

i) 코어반경 $a_1=1.0\mu\text{m}$ 인 경우

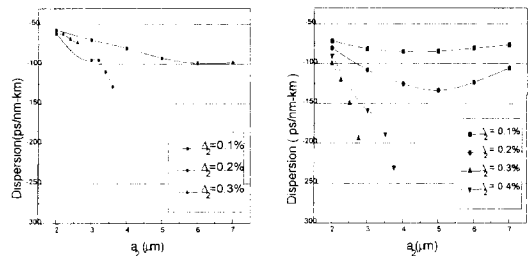


그림 4. 계단형 - 이중클래드 구조의 분산특성
(a) $\Delta_1=1.5\%$ (b) $\Delta_1=1.75\%$ (c) $\Delta_1=2.0\%$

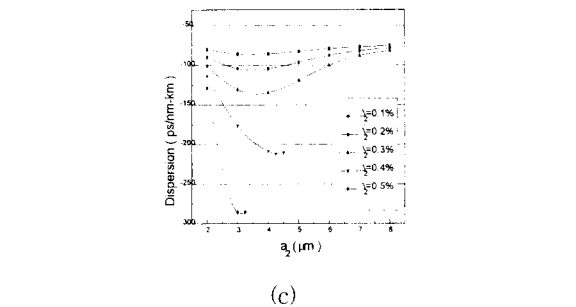


그림 4. 계단형 - 이중클래드 구조의 분산특성
(a) $\Delta_1=1.5\%$ (b) $\Delta_1=1.75\%$ (c) $\Delta_1=2.0\%$
Fig. 4. Dispersion Characteristics of step, double-clad fibers.
(a) $\Delta_1=1.5\%$ (b) $\Delta_1=1.75\%$ (c) $\Delta_1=2.0\%$

그림 4의 결과에 의하면 주어진 Δ_1 에 대하여는 Δ_2 가 크게 파일수록 분산치가 떨어지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 Δ_1 이 증가할수록 두드러지며, 특히 a_2 가 적정치로 다가갈수록 분산치는 크게 떨어지고 있다. (c)의 $\Delta_1=2.0\%$, $\Delta_2=0.5\%$ 인 경우는 $a_2=3\mu\text{m}$ 에서 분산치가 $-285\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$ 에 이르고 있다.

특히 (a)의 경우 데이터가 몇 개 나타나지 않는다. 그 이유는 데이터가 얻어진 이외의 파라미터에 대해서는 단일모드가 얻어지지 않기 때문이다.

ii) 코어반경 $a_1=1.4\mu\text{m}$ 인 경우

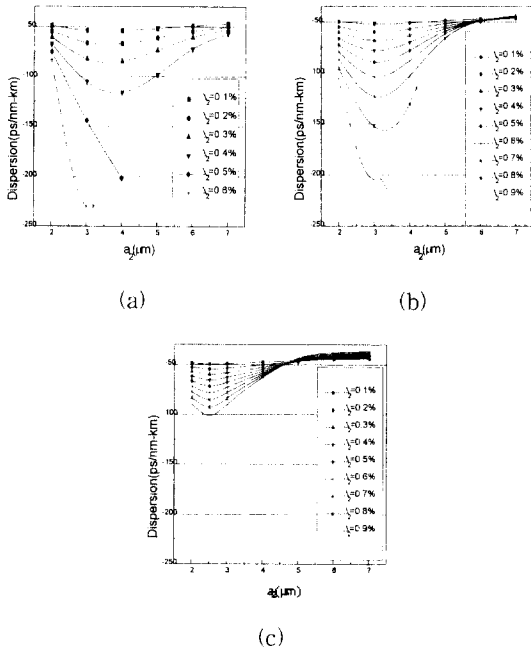


그림 5. 계단형 - 이중클래드 구조의 분산특성
(a) $\Delta_1=1.5\%$ (b) $\Delta_1=1.75\%$ (c) $\Delta_1=2.0\%$
Fig. 5. Dispersion Characteristics of step, double-clad fibers.

(a) $\Delta_1=1.5\%$ (b) $\Delta_1=1.75\%$ (c) $\Delta_1=2.0\%$

실제 제작시 코어반경 a_1 이 적어도 $1.4\mu\text{m}$ 이상은 되어야 하는 점을 고려하여, $a_1=1.4\mu\text{m}$ 에 대하여 분산특성을 구해보았다.

그림 5에 의하면 일반적으로 주어진 Δ_1 에 대하여 Δ_2 가 깊이 파일수록 분산치가 내려가는 것을 알 수 있으며, 이러한 경향은 Δ_1 이 작을수록 두드러지고 있다. $\Delta_1=1.5\%$, 1.75% 에 대해서는 a_2 의 변화에 따라 저분산의 극소치가 존재하며, $\Delta_1=2.0\%$ 에 대해서는 Δ_2 , a_2 에 따른 별다른 변화가 나타나지 않는다. 대체

로 클래드 반경 a_2 가 $2\sim 4\mu\text{m}$ 에서 각각 저분산 극소치를 보이며, (a) $\Delta_1=1.5\%$ 일 때 $\Delta_2=0.6\%$, $a_2=3.0\mu\text{m}$ 에서 가장 낮은 분산치 $-230\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$ 을 보인다.

(2) Δ_2 를 파라미터로 하여 코어 반경 a_1 을 변화시키는 경우

그림 5의 결과에 근거하여 1차 클래드의 반경 a_2 가 최적으로 정해진 상태에서, 코어의 반경을 다시 변화시키면서 최적의 구조를 추적하였다.

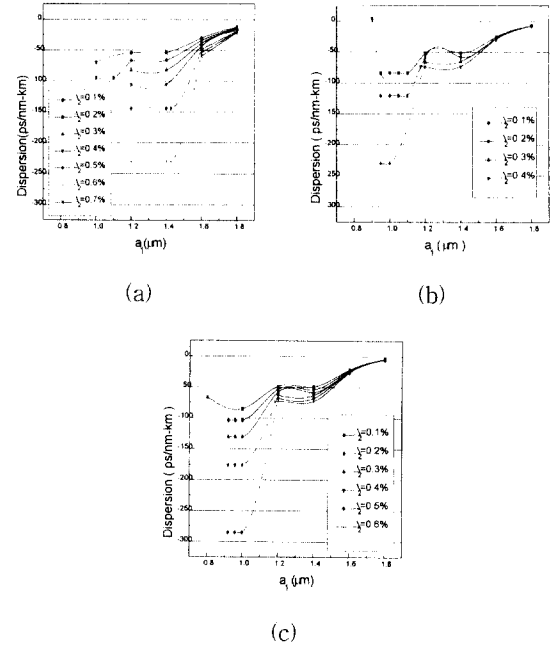


그림 6. 코어반경 a_1 의 변화에 따른 계단형 - 이중클래드 구조의 분산특성

실선영역 : 차단파장 $\lambda_c \geq 1.80\mu\text{m}$, 점선영역 : $\lambda_c < 1.80\mu\text{m}$

(a) $\Delta_1=1.5\%$, $a_2=3.0\mu\text{m}$ (b) $\Delta_1=1.75\%$, $a_2=3.75\mu\text{m}$ (c) $\Delta_1=2.0\%$, $a_2=3.0\mu\text{m}$

Fig. 6. Dispersion Characteristics of step, double-clad fibers.

Solid line : cut-off $\lambda_c \geq 1.80\mu\text{m}$, Dotted line : cut-off $\lambda_c < 1.80\mu\text{m}$

(a) $\Delta_1=1.5\%$, $a_2=3.0\mu\text{m}$ (b) $\Delta_1=1.75\%$, $a_2=3.75\mu\text{m}$ (c) $\Delta_1=2.0\%$, $a_2=3.0\mu\text{m}$

그림 6에서 macro-bending 손실을 고려하여 단일모드 차단파장 $\lambda_c=1.80\mu\text{m}$ 를 경계로 하여 실선영역과 점선 영역으로 분류하였다. 대부분의 경우 Δ_2 가 파일수록, 그리고 a_1 이 줄어들수록 분산치가 크게 떨어지고 있다. 그러나 macro-bending 손실을 고려해야 하므로 실선만을 취할 필요가 있다. 이 경우 취할수 있

는 데이터의 범위는 무척 제한적이며, 크게 떨어지는 분산치를 기대하기 힘들다.

(a)의 경우 실선의 범위내에서 $\Delta_2=0.4\%$, $a_1=1.4\mu\text{m}$ 일 때 최저 분산치 $-105\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ 를 얻을 수 있었고, (b)의 경우 $\Delta_2=0.2\%$, $a_1=1.0\mu\text{m}$ 에서 최저 분산치를 $-120\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ 정도 얻었지만, 실제 제작 가능한 반경 $1.4\mu\text{m}$ 에서는 $\Delta_2=0.4\%$ 일 때 약 $-73\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ 를 얻었다. (c)의 경우는 실선의 범위 내에서 $\Delta_2=0.3\%$, $a_1=1.0\mu\text{m}$ 일 때 최저 분산치를 $-130\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ 정도 얻었지만, 실제 제작가능한 반경 $1.4\mu\text{m}$ 에서는 $\Delta_2=0.6\%$ 일 때 약 $-72\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ 를 얻을 수 있었다.

실제 제작 가능 조건과 macro-bending 손실을 고려할 때 분산최적치는 $a_1=1.4\mu\text{m}$, $a_2=3.0\mu\text{m}$, $\Delta_1=1.5\%$, $\Delta_2=0.4\%$ 일 때 $-105\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ 이다. 이 때 $L_{DCF} : L_{SMF}$ 의 보상 비율은 1 : 6.2로서 DCF에 의한 보상이 가능하다.

2. 삼각형 굴절율 분포

코어의 굴절율 분포가 삼각형 분포이고 1차 클래드와 기준클래드의 이중 클래드로 구성된 굴절율 분포를 그림 7에 나타내었다. 여기서 Δ_1 과 Δ_2 는 각각 코어와 1차클래드의 기준 클래드에 대한 비굴절율차를 나타내고, a_1 과 a_2 는 각각 코어의 반경, 1차 클래드의 반경을 나타낸다.

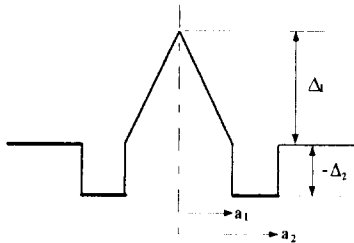


그림 7. 삼각형 - 이중클래드 굴절율 분포
Fig. 7. Index profile of a triangular, double-clad fiber.

1) 단일 클래드의 경우

Δ_2 가 0으로 단일 클래드만이 존재하는 경우와 굴절율 분포가 동일한 경우의 분산을 그림 8에 나타내었다. Δ_1 이 1.5 ~ 2.5%사이의 5개 경우에 대하여, 4코어 반경 a_1 을 변화시키면서 분산을 해석하였다.

Δ_1 이 증가할수록 코어반경 $1.6\mu\text{m}$ 근처에서 마이너스 분산값이 계속 떨어지는 것을 볼 수 있으나 코어의 굴절율을 계속 증가시킬 경우 scattering 손실 등이 증

가하게 되므로 Δ_1 을 2.0% 이내로 제한하는 것이 바람직하다. 그러나 Δ_1 을 2.0%까지 증가시켰을 때에도 약 $-40\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ 정도로 분산치가 별로 떨어지지 않고 있다. 그러므로 코어의 굴절율을 상대적으로 높이는 효과를 주기 위해, depressed된 클래드층을 갖는 이중 클래드구조를 해석하기로 한다.

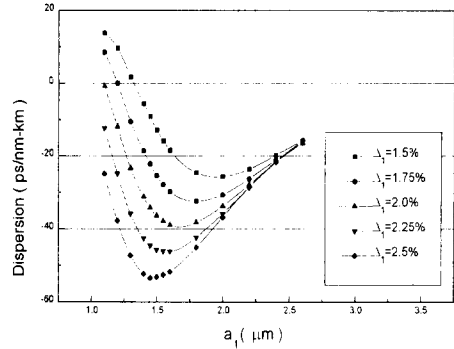


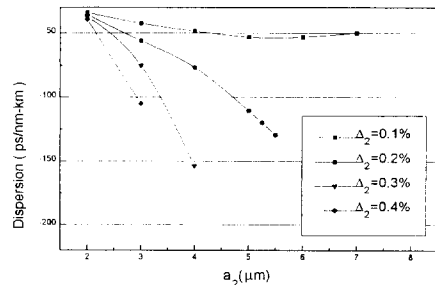
그림 8. 삼각형 - 단일클래드 구조의 분산특성
Fig. 8. Dispersion Characteristics of triangular, single-clad fibers.

2) 이중 클래드의 경우

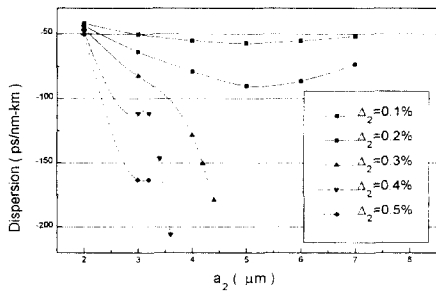
(1) Δ_2 를 파라미터로 하여 1차 클래드 반경 a_2 를 변화시키는 경우

단일 클래드 구조에서 Δ_1 이 1.75%, 2.0%일 때 각각에 대하여 최저 분산을 나타내는 코어의 반경을 선택하여, 1차 클래드의 비굴절율차 Δ_2 와 반경 a_2 를 변화시키면서 분산치의 변화를 살펴보았다.

그림 9의 결과를 보면, (a), (b) 두 경우 공히 Δ_2 가 증가할수록, 그리고 a_2 가 작은 값을 가질수록 분산치가 떨어지고 있다. 특히 (a)의 Δ_2 가 클수록 데이터가 몇 개 안되는 이유는 이 영역 파라미터에서는 단일 모드가 얻어지지 않기 때문이다.



(a)



(b)

그림 9. 삼각형 - 이중클래드 구조의 분산특성
(a) $\Delta_1=1.75\%$, $a_1=1.8\mu\text{m}$ (b) $\Delta_1=2.0\%$, $a_1=1.7\mu\text{m}$

Fig. 9. Dispersion Characteristics of triangular, double-clad fibers.

(a) $\Delta_1=1.75\%$, $a_1=1.8\mu\text{m}$ (b) $\Delta_1=2.0\%$, $a_1=1.7\mu\text{m}$

(a)에서는 $\Delta_2=0.3\%$, $a_2=4\mu\text{m}$ 에서 최저 분산치 $-153\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ 가 얻어지고 있으며, (b)에서는 $\Delta_2=0.4\%$, $a_2=3.6\mu\text{m}$ 에서 최저 분산치 $-205\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ 가 얻어지고 있다.

(2) Δ_2 를 파라미터로 하여 코어 반경 a_1 을 변화시키는 경우

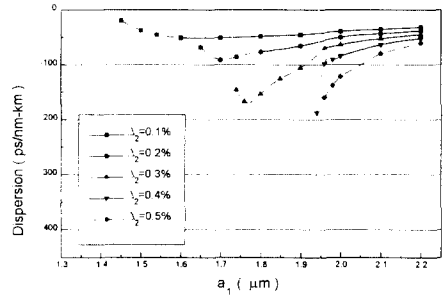
그림 9의 결과중 가장 바람직한 두 경우를 골라서, 다시 코어반경 a_1 을 변화시키면 좀더 바람직한 결과를 기대할 수 있을 것이다. $\Delta_1=1.75\%$ 에 대해서는 $a_2=4.0\mu\text{m}$ 일 때 a_1 을 $1.8\mu\text{m}$ 를 중심으로 하여 변화시켰다. $\Delta_1=2.0\%$ 에 대해서는 $a_2=3.6\mu\text{m}$ 일 때 최적이었다. 계속 진행된 모의전산결과 a_2 를 $4\mu\text{m}$ 로 하는 것이 더 바람직한 것을 확인함에 따라 $a_2=4\mu\text{m}$ 로 하였다.

그림 10에서는 단일모드 차단파장 $\lambda_c=1.80\mu\text{m}$ 를 경계로 하여 실선영역과 점선영역으로 분류하였다. 차단파장 이상이 되는 분산치는 실선으로, 그렇지 않은 분산치는 점선으로 표현하였다. macro-bending 손실을 고려하여 실선부분만을 수용하기로 한다. 대부분의 경우 Δ_2 가 깊이 파일수록, 그리고 a_1 이 줄어들수록 분산치가 떨어지고 있으며 이러한 경향은 Δ_1 일 때 두드러진다. 그림 10에서 보듯이 대부분의 데이터가 점선영역에 있어서 낙차가 큰 저 분산치를 갖는 파라미터를 얻는데 제한이 따름을 알 수 있다.

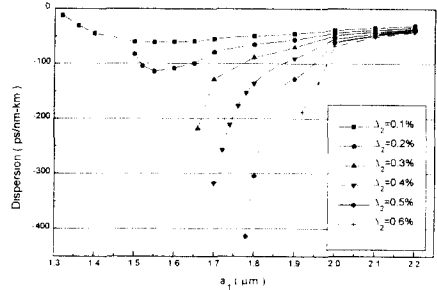
(a)의 경우 $\Delta_2=0.4\%$, $a_1=2.0\mu\text{m}$ 에서 최저 분산치 $-84\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ 를 얻을 수 있었고, (b)의 경우 $\Delta_2=0.3\%$, $a_1=1.8\mu\text{m}$ 에서 최저 분산치를 $-88\text{ps/nm}\cdot\text{km}$

정도 얻을 수 있었다.

Macro-bending 손실을 고려할 때 분산 최적치는 $a_1=1.8\mu\text{m}$, $a_2=4.0\mu\text{m}$, $\Delta_1=2.0\%$, $\Delta_2=0.4\%$ 일 때 $-88\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ 이다. 이 때 $L_{DCF} : L_{SMF}$ 의 보상 비율은 1 : 5.2로서 DCF에 의한 보상이 가능하다.



(a)



(b)

그림 10. 삼각형 - 이중클래드 구조의 분산특성
실선영역 : 차단파장 $\lambda_c \geq 1.80\mu\text{m}$, 점선영역 : $\lambda_c < 1.80\mu\text{m}$

(a) $\Delta_1=1.75\%$, $a_2=4.0\mu\text{m}$ (b) $\Delta_1=2.0\%$, $a_2=4.0\mu\text{m}$

Fig. 10. Dispersion Characteristics of triangular, double-clad fibers.

Solid line : cut-off $\lambda_c \geq 1.80\mu\text{m}$, Dotted line : cut-off $\lambda_c < 1.80\mu\text{m}$

(a) $\Delta_1=1.75\%$, $a_2=4.0\mu\text{m}$ (b) $\Delta_1=2.0\%$, $a_2=4.0\mu\text{m}$

V. 결론

분산보상 기능을 갖는 이중 클래드 광섬유의 고유방정식을 해석하기 위해서 1차원 유한요소법을 적용하였다. 코어의 굴절율이 계단형과 삼각형 두 경우에 대하여, 코어의 굴절율, 반경, 1차 클래드의 굴절율, 반경을 변화시켜 가며 낮은 분산값을 가지는 구조를 추적하였다.

대부분의 계산결과 Δ_2 가 깊이 파일수록, 그리고 Δ_1 이 커질수록 낙차가 큰 분산치를 얻을 수 있었다. $\Delta_1 + (-\Delta_2)$ 의 크기는 곧 코어굴절율에서 1차 클래드 기저 부분까지의 굴절율 차이를 의미하며, 이 차이가 클수록 낮은 분산치를 얻을 수 있다. 그러나 이러한 굴절율차는 cracking 위험과 scattering 손실을 고려할 때 2.0%를 넘기지 않는 것이 바람직하다. 가급적 큰 값의 Δ 를 유지한다는 가정아래, a_1 은 작을수록 더욱 낮은 분산치를 보이고 있다. 그러나 제작상 한계로 a_1 이 적어도 $1.4\mu\text{m}$ 이상은 유지될 필요가 있다. 한편 a_1 이 작을수록 cut-off에 가까워져 bending 손실이 커짐을 고려할 필요가 있다. 대체로 주어진 a_1 에 대하여 최저 분산치를 갖는 a_2 는 $3\sim 4\mu\text{m}$ 근처 범위에서 결정되고 있거나, 또는 그 역이 성립되고 있음을 알 수 있었다.

계단형 분포의 경우 $-105\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$ 의 최저 분산치를 얻었으며 $L_{\text{SMF}}/L_{\text{DCF}}=6.2$ 정도의 보상비를 얻을 수 있었다. 삼각형 분포의 경우 $-88\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$ 의 최저 분산치를 얻었으며 이 때 $L_{\text{SMF}}/L_{\text{DCF}}=5.2$ 정도의 보상비를 얻었다.

참 고 문 헌

[1] A.M. Vengsarker and W.A. Reed, "Dispersion-compensating single-mode fibers : Efficient designs for first- and second-order compensation," *Opt. Lett.*, vol. 18, pp. 924-926, 1993.

[2] A.H. Gnauck, L.J. Cimini, J. Stone, and L.W. Schultz, "Optical equalization of fiber chromatic dispersion in a 5 Gbps transmission system," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, pp. 585-587, 1990.

[3] B. Wedding, "New method for optical transmission beyond the dispersion limit," *Electron. Lett.*, vol. 28, pp. 1298-1300, 1992.

[4] A.H. Gnauck, C.R. Giles, L.J. Cimini, Jr., J. Stone, L.W. Stulz, S.K. Korotky, and J.J. Veselka, "8-Gbps-130km transmission experiment using Er-doped fiber pre-

amplifier and optical dispersion equalization," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, pp. 1147-1149, 1991.

[5] C.D. Poole, J.M. Wiesenfeld, A.R. McCormick, and K.T. Nelson, "Broadband dispersion compensation by using the higher-order spatial mode in a two-mode fiber," *Opt. Lett.*, vol. 17, pp. 985-987, 1992.

[6] F. Ouellette, "All-fiber filter for efficient dispersion compensation," *Opt. Lett.*, vol. 16, pp. 303-305, 1991.

[7] F. Ouellette and Y. Duval, "Optical equalization with linearly tapered tow-dissimilar-core fiber," *Electron. Lett.*, vol. 5, pp. 476-478, 1991.

[8] A. J. Antos and D.K. Smith, "Desing and characterization of dispersion compensating fiber based on the LP_{01} mode," *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, pp. 1739-1745, 1994.

[9] M.J. Adams, *An Introduction to Optical Waveguides*, John Wiley & Sons, Ch.7, 1981.

[10] 김동각, 김창민, 이상배, 강희전, " $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 에서 포물선분포-이중클래드, 분산보상 단일모드 광섬유의 설계," 한국광학회지, 제8권, 제2호, pp. 134-141, 1997

[11] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, McGRAW-HILL, pp. 97-107. 1991.

[12] A.S. Jazi, L.J. Lu, "Accuracy of approximate methods for the evaluation of chromatic dispersion in dispersion-flattened," *J. Lightwave Technol.*, vol. 8, pp. 1145-1150, 1990.

[13] B.J. Ainslie, C.R. Day, "A review single-mode fibers with modified dispersion characteristics," *J. Lightwave Technol.*, vol. 8, pp. 967-979, 1986.

[14] J. N. Reddy, *An Introduction to the Finite Element Method*, McGRAW-HILL, ch 7. 1985.

저 자 소 개



金 秀 娥(正會員)

1973년 6월 4일생. 1996년 2월 서울
시립대학교 전자공학과 졸업. 1996년
3월 ~ 현재 동 대학원 석사과정. 주
관심분야는 도파/집적광학, 광섬유
설계, 광소자 설계, FEM, FEM,
BPM, SOR등의 수치해석임

金 昌 敏(正會員) 第 34卷 D編 第 1號 參照

현재 서울시립대학교 전자전기공학부
교수