

$\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 에서 포물선분포 - 이중클래드, 분산보상 단일모드 광섬유의 설계*

김동각 · 김창민 · 이상배* · 강희전**

서울시립대학교 전자공학과

*한국과학기술연구원 정보전자부

**대한전선 주식회사 광통신 기술부

(1996년 10월 29일 받음)

기존의 $\lambda=1.31 \mu\text{m}$ 에서 분산 최적화된 광통신시스템을 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 광전송시스템으로 향상시키는데 필요한 분산보상 단일모드 광섬유(DCF)를 설계하였다. 총분산이 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 에서 큰 마이너스 분산치를 갖는 굴절률 분포를 얻기 위해 포물선 분포-이중클래드 광섬유의 분산특성을 해석하였다. 광섬유 스칼라 파동방정식으로부터 분산특성을 얻기 위해 1차원 유한요소법을 적용하였다. Reel에 감긴 DCF의 macro-bending에 의한 손실을 적절히 제한하기 위해, LP_{01} 모드의 차단 파장이 $\lambda=1.80 \mu\text{m}$ 이상이 되도록 설계하였다. 이 조건에 맞는 굴절률분포의 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 에서 분산의 하한치는 약 $-120 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ 정도로 제한됨을 볼 수 있었다.

I. 서 론

단일모드 광섬유는 장거리 광통신 시스템에서 광 전송매체로서 널리 사용되어지고 있다. 광섬유 전송시스템에서 무중계거리 및 정보 전송 용량은 시스템의 성능 및 가격을 결정짓는 요인들이다. 특히 무중계거리는 광섬유의 손실과 분산특성에 의하여 결정되어지며,^[1] 무중계거리를 극대화하기 위하여 저손실, 저분산 특성을 갖는 광섬유가 계속해서 요구되고 있다. 최근에는 희토류 첨가 광섬유 증폭기의 출현으로 인하여 광섬유의 손실 보상이 가능해지고 있다. 특히 희토류중 하나인 erbium이 도핑된 광섬유 증폭기(erbium-doped fiber amplifiers, EDFA)는 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 에서 동작하여, 광섬유의 저손실 대역인 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 대역과 함께 사용할 경우 손실에 의한 무중계 거리의 제한 요소를 극소화할 수 있다.

EDFA를 사용해 무중계거리를 장거리화하기 위해, $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 대역에서 저분산을 갖는 광섬유가 요구된다. 최근에 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 대역에서 저분산을 갖는 분산천이 광섬유(dispersion-shifted fiber, DSF)나 평탄분산 광섬유(dispersion-flattened fiber, DFF) 등이 설계되고 있다. 새로이 포설하고자 하는 전송구간은 DSF나 DFF로 포설하여 무중계 거리를 장거리화하는 것이 가능하다. 그러나 기존에 설치되어 있는 $\lambda=1.31 \mu\text{m}$ 대역에서 저분산을 갖는 광섬유를 DSF나 DFF로써 대체한다는 것은 시간과 경비적인 측면으로 볼 때 불가능하다. 따라서 기존에 설치되어있는 광섬유를 그대로 이용하면서 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 에서의 분산을 보상할 수 있는 방안이 대두되어왔다.

광섬유를 이용한 분산보상 방법에 주목해 보면, 두 개의 모드를 갖는 광섬유를 이용한 보상방법과 단일모드 광섬유를 이용한 보상방법으로 나눌 수 있다.

1) 두 개의 모드를 갖는 광섬유를 이용한 분산보상방법은 Poole^[2] 등에 의해 제안되었다. 이 방법은 광전송용 단일모드 광섬유를 통해 전달된 LP_{01} 모드를 LP_{11} 모드로 전환하고 LP_{11} 모드가 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 에서 큰 마이너스 분산치를 갖는 두모드 광섬유를 이용하여 분산을 보상한다. 두모드 광섬유를 이용한 분산보상방법에는 모드 전환기, 편극 회전기등과 같은 소자가 추가적으로 필요하여 시스템의 가격과 복잡성이 증대된다.

2) 단일모드 광섬유를 이용한 분산보상방법은 추가적인 소자없이 광전송용 광섬유와 분산보상 광섬유를 직접연결함으로써 분산보상을 할 수 있는 간단한 방법이다. Lin^[4]나 Lamer^[3] 등은 서로 다른 분산치를 갖는 두 광섬유의 직접연결에 의하여 총 분산을 변화시킬 수 있고, 이를 이용해 광 펄스를 등화할 수 있음을 제시하였다. Izadpanah^[5] 등은 분산보상 단일모드 광섬유와 EDFA를 기존의 $\lambda=1.31 \mu\text{m}$ 에 최적화된 광전송 시스템에 도입해, $1.31/1.55 \mu\text{m}$ 파장 분할 다중화(WDM)를 시도해 보았다. 또한 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 에서 큰 마이너스 분산치 갖는 분산보상 단일모드 광섬유의 최적화를 위한 연구가 최근에 진행되어왔다.^[6,7]

분산보상 단일모드 광섬유는 일반적인 광전송용 광섬유와 달리 reel에 감아서 송·수신단에 설치되므로, macro-bending에 의한 손실이 크게 증가되지 않도록 고려되어야 한다. 실험적으로 LP_{01} 모드의 차단 파장이 $1.80 \mu\text{m}$ 이하가 되면, $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 의 광신호는 macro-bending시에 큰 영향을 받아 손실이 커지는 것으로 알려져있다.^[7]

본 논문에서는 이중클래드형 구조를 이용하여 분산보상 단일모드 광섬유를 설계하였다. 광섬유의 스칼라 파동방정식을 토대로하여, 임의의 굴절률 분포를 갖는 광섬유의 분산특성을 해석하였다. 광섬유 스칼라 파동방정식은 유한요소법(Finite Element Method, FEM)을 적용하여 해석하였다. 먼저 α 승 분포-단일클래드 광섬유에 의한 분산특성을 해석하였다. $\alpha=2$ 즉, 코어부가 포물선분포를 갖는 경우에 대한 결과를 중

*본 연구는 1996년도 KIST-2000 연구프로그램 위탁연구비(과제번호 H040)로 수행되었습니다.

심으로 해석하였다. 다음, 포물선분포 광섬유의 결과를 연장하여, 이중클래드 구조의 경우 분산치가 $-300 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ 이 하까지도 내려감을 확인하였다. 또한 macro-bending에 의한 손실을 적당히 제한하기 위해, LP₀₁ 모드의 차단 파장이 $1.80 \mu\text{m}$ 이상이 되는 범위에서 포물선분포-이중클래드 구조를 갖는 광섬유의 분산치를 계산하였다. 그 결과 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 에서 약 $-120 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ 정도의 분산치를 갖는 광섬유의 파라미터를 추출하였다.

II. 기본 원리

임의의 굴절을 분포를 갖는 광섬유의 분산특성을 해석하기 위하여, 광섬유의 스칼라 파동방정식을 토대로 하였다. 광섬유 스칼라 파동방정식을 2차 보간함수를 사용한 1차원 유한차분법(FEM)을 적용하여 해석하였다.^[8]

2.1. 스칼라 파동 방정식

광섬유에서 전자계의 시간 과 z방향 의존성을 다음과 같은 형태로 가정한다.

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

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

여기서 β 는 전파상수이다. 식 (1)과 (2)를 Maxwell 방정식에 대입하여 정리하면 전계 및 자계의 횡방향 성분을 축방향 성분의 함수로 나타낼 수 있다. 따라서 전자계의 축방향 성분을 구하면, 횡방향 성분까지 구할 수 있다. 또한 식 (1)과 (2)를 Maxwell 방정식에 대입하고, 전자계의 ϕ 방향 의존성을 $e^{j\phi}$ 로 가정하고 정리하면, 전자계의 축방향 성분 E_z, H_z 에 대한 미분방정식을 얻을 수 있다. 이 미분방정식을 원주 좌표계로 풀어서 전개하면 다음과 같다.^[8]

$$\frac{d^2 E_z}{dr^2} + \left[\frac{1}{r} + \frac{v^2 f'}{(u^2 - v^2 f)} \left(\frac{\beta}{kn(r)} \right)^2 \right] \frac{dE_z}{dr} + \left[\frac{(u^2 - v^2 f)}{a^2} - \frac{v^2}{r^2} \right] E_z = -j \frac{v^2 \beta f'}{r \omega \epsilon_0 (u^2 - v^2 f)} H_z \quad (3)$$

$$\frac{d^2 H_z}{dr^2} + \left[\frac{1}{r} + \frac{v^2 f'}{(u^2 - v^2 f)} \right] \frac{dH_z}{dr} + \left[\frac{(u^2 - v^2 f)}{a^2} - \frac{v^2}{r^2} \right] H_z = j \frac{v^2 \beta f'}{r \omega \mu_0 (u^2 - v^2 f)} E_z \quad (4)$$

여기서

$$\epsilon(r) = \epsilon_0 n^2(r) = \epsilon_0 n^2 [1 - 2\Delta f(r)], \quad 0 \leq f(r) \leq 1 \quad (5)$$

$$u^2 = (k_0^2 n^2 - \beta^2) a^2 = a^2 k_0^2 (n^2 - N^2) \quad (6)$$

$$w^2 = (\beta^2 - k_0^2 n^2) a^2 = a^2 k_0^2 (N^2 - n^2) \quad (7)$$

$$v^2 = u^2 + w^2 = a^2 k_0^2 (n^2 - n^2) \quad (8)$$

ϵ, E_z, H_z 는 r 만의 함수이고, $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, $\beta = k_0 N$, a 는 코어 반경이다. 그리고 N 은 mode index라 하며, v 는 정규화 주파수(normalized frequency)라 한다. Δ 는 비굴절율차이며 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (9)$$

식 (3)과 (4)에 약도조건, 즉 $\Delta \ll 1$ 인 경우를 고려하면, 연립 미분방정식을 얻을 수 있다. 이 연립 미분방정식의 해는 다음의 지배방정식을 풀어 얻을 수 있다.^[8]

$$G'' + \left[\frac{1}{r} + \frac{f'}{(1-b-f)} \right] G' + \left[\frac{v^2}{a^2} (1-b-f) - \frac{v^2}{r^2} \pm \frac{v f'}{r(1-b-f)} \right] G = 0 \quad (10)$$

여기서

$$b = 1 - u^2/v^2 \quad (11)$$

이며 b 는 정규화 전파상수(normalized propagation constant)라 부른다. 전자계의 횡방향 성분들을 약도조건으로 조건하에 G 로 표현하면 다음의 성분을 공통적으로 포함하고 있다.^[8]

$$R(r) = \frac{1}{(1-b-f)} \left[\frac{dG}{dr} \pm \frac{vG}{r} \right] \quad (12)$$

$R(r)$ 을 횡방향 함수(transverse field function)라 하고, 이 함수를 한번 미분하여 식 (10)에 대입하면 다음과 같은 G 즉, 축방향 함수(axial field function)와의 관계를 이끌어 낼 수 있다.

$$G = -\frac{a^2}{v^2} \left[\frac{dR}{dr} \mp \frac{(v \mp 1)R}{r} \right] \quad (13)$$

식 (13)을 식 (12)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 최종적인 광섬유 스칼라 파동방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \left[\frac{v^2}{a^2} (1-b-f) - \frac{(v \mp 1)^2}{r^2} \right] R = 0 \quad (14)$$

위 식에서 위부호는 $\text{HE}_{v\mu}$ 모드에, 아래부호는 $\text{EH}_{v\mu}$ 모드에 해당한다. v 는 전자계의 ϕ 방향 양자수이고, μ 는 고유방정식의 μ 번째 해임을 의미한다.

2.2. 유한요소법(FEM)의 적용

식 (14)의 스칼라 파동방정식에 FEM을 적용하기 위해서는 경계조건을 정의해 주어야 한다. 일반적으로 even 모드에 대해서는 $r=0$ 에서 전계함수의 1차 도함수는 0이 되고, odd 모드에 대해서는 $r=0$ 에서 전계함수는 0이며, $r=\infty$ 에서 일반적으로 전계함수의 크기는 무시할 수 있다. 이상을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} \frac{dR(r)}{dr} \Big|_{r=0} = 0, & \text{even 모드} \\ R(0) = 0, & \text{odd 모드} \end{cases} \quad (15)$$

$$R(r) \Big|_{r=\infty} = 0 \quad (16)$$

해석될 전영역을 2차 선 요소로 분할하였다. 미분가능한 시험함수 ξ 를 식 (14)에 곱하고 분할된 한 요소영역에 대해서 적분하여 변분공식을 이끌어 내면 다음과 같다.^[9]

$$0 = \int_{\Omega^e} \xi \left\{ \frac{d}{dr} \left(\frac{dR}{dr} \right) + r \left[\frac{v^2}{a^2} (1-b-f) - \frac{(v \mp 1)^2}{r^2} \right] R \right\} dr$$

$$= \int_{\Omega^e} \left\{ -r \frac{d\xi}{dr} \frac{dR}{dr} + r \left[\frac{v^2}{a^2} (1-b-f) - \frac{(v \mp 1)^2}{r^2} \right] \xi R \right\} dr$$

$$+ r \xi \frac{dR}{dr} \Big|_{r_3^{(e)}} - r \xi \frac{dR}{dr} \Big|_{r_1^{(e)}} \quad (17)$$

분할된 한 요소중 e번째 요소내에서 횡방향 함수 R과 시험 함수 ξ는 다음과 같다.

$$R = \sum_{j=1}^3 R_j^{(e)} \Psi_j^{(e)} \quad (18)$$

$$\xi = \Psi_j^{(e)}(r), \quad (i=1,2,3) \quad (19)$$

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

$$\Psi_1^{(e)}(r) = \frac{(r-r_3^{(e)})(2r-r_1^{(e)}-r_3^{(e)})}{(r_3^{(e)}-r_1^{(e)})^2} \quad (20a)$$

$$\Psi_2^{(e)}(r) = \frac{4(r-r_1^{(e)})(r_3^{(e)}-r)}{(r_3^{(e)}-r_1^{(e)})^2} \quad (20b)$$

$$\Psi_3^{(e)}(r) = \frac{(r-r_1^{(e)})(2r-r_1^{(e)}-r_3^{(e)})}{(r_3^{(e)}-r_1^{(e)})^2} \quad (20c)$$

여기서 $r_j^{(e)}$ 는 선요소의 양끝, 즉 $j(j=1, 3)$ 에서의 좌표이다. 식 (20)으로 부터 각 보간함수는 자신의 절점에서는 1이고, 자신 이외의 절점에서는 0인 2차 함수가 된다는 것을 알 수 있다. 식 (18)과 (19)를 식 (17)에 대입하고 정리하여 행렬로 표현하면 다음과 같은 요소행렬식을 얻는다.

$$[K_{ij}^{(e)}] \{R_j^{(e)}\} - b [S_{ij}^{(e)}] \{R_j^{(e)}\} = F_i^{(e)} \quad (21)$$

여기서

$$K_{ij}^{(e)} = \int_{\Omega^e} \left\{ -r \frac{d\Psi_i^{(e)}}{dr} \frac{d\Psi_j^{(e)}}{dr} + r \left[\frac{v^2}{a^2} (1-f) - \frac{(v \mp 1)^2}{r^2} \right] \Psi_i^{(e)} \Psi_j^{(e)} \right\} dr \quad (22a)$$

$$S_{ij}^{(e)} = \int_{\Omega^e} r \left[\frac{v^2}{a^2} \Psi_i^{(e)} \Psi_j^{(e)} \right] dr \quad (22b)$$

$$F_i^{(e)} = c f^{(e)} \Psi_i^{(e)}(r_1) - c g^{(e)} \Psi_i^{(e)}(r_3) \quad (22c)$$

식 (21)에 식 (15)와 (16)의 경계조건을 적용하고 요소행렬식을 모든 요소에 걸쳐 합하면 다음과 같은 고유치문제 형태의 행렬식을 얻을 수 있다.

$$[K] \{R\} - b [S] \{R\} = \{0\}$$

여기서

$$[K] = \sum_{e=1}^N \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 K_{ij}^{(e)} \right] \quad (24a)$$

$$[S] = \sum_{e=1}^N \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 S_{ij}^{(e)} \right] \quad (24b)$$

식 (23)의 고유치문제에서 고유치는 b 에, 고유함수는 R 에 해당한다.

III. 분산특성 및 보상

3.1. 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.^[10,11]

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

여기서 c 는 광속이며 n 은 파장 λ 에서의 굴절율이다. 재료분산은 광섬유를 구성하는 재료에 의존한다. 전형적인 재료분산 곡선을 그림 1에 그려 놓았다.

도파로분산은 전파모드의 군속도가 빛의 주파수 또는 파장에 대하여 일정하지 않기 때문에 일어난다. 도파로분산은 다음 식으로 기술할 수 있다.^[10]

$$D_{wg} = -\frac{n_2 \Delta}{c \lambda} v \frac{d^2(ub)}{du^2} \quad (26)$$

총분산은 다음식과 같이 재료분산과 도파로분산의 합으로 나타낼 수 있다.

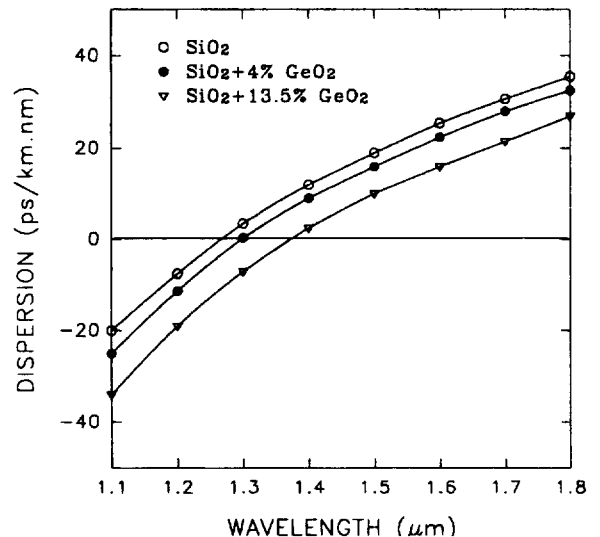


그림 1. 재료분산 곡선

$$D_{tot} = D_{mar} + D_{wg} \quad (27)$$

D_{mar} 는 그림 1으로부터 얻을 수 있고, 본 논문에서는 pure SiO_2 재질을 대상으로 하여 분산특성을 살펴보기로 한다. D_{wg} 는 식 (26)의 2차 미분형태를 유한차분형태(Finite Difference)로 바꾸고, b-v곡선 데이터로부터 구할 수 있다.

3.2. 분산보상

현재 포설되어있는 단일모드 광섬유와 분산보상 광섬유를 직접연결시키면, 직접연결에 의한 분산은 다음과 같이 선형적인 합으로 나타낼 수 있다.^[5-7]

$$D_{tot} = (D_{SMF} L_{SMF} + D_{DCF} L_{DCF} + D'_{SMF} L_{SMF}(\lambda - \lambda_1) + D'_{DCF} L_{DCF}(\lambda - \lambda_1)) / L_{SMF} \quad (28)$$

여기서 D 는 $\lambda_1(=1.55 \mu\text{m})$ 에 대한 분산치를 나타내고, D' 은 λ_1 에 대한 분산의 기울기를 나타낸다. L 은 광섬유의 길이를 나타내고있다. 아래첨자인 tot은 총 연결을 SMF와 DCF는 각각 광전송용 단일모드 광섬유와 분산보상 단일모드 광섬유를 나타낸다. $\lambda_1=1.55 \mu\text{m}$ 에서 전형적인 SMF의 분산치 D_{SMF} 와 분산 기울기 D'_{SMF} 는 각각 $17 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ 와 $0.07 \text{ ps/nm}^2 \cdot \text{km}$ 이다,^[6,7] 식 (28)로 부터 λ_1 에서 총분산 D_{tot} 가 영이 되기위한 분산보상 단일모드 광섬유의 길이는 다음과 같다.

$$L_{DCF} = \frac{|D_{DCF}|}{D_{SMF}} L_{SMF} \quad (29)$$

여기서 $|D_{DCF}|/D_{SMF}$ 는 광전송용 광섬유의 길이와 분산보상 광섬유의 길이 비, 즉 보상비율($L_{SMF}:L_{DCF}$)을 결정짓는다. D_{tot} 이 영이 되는 광섬유 길이에 대한 광섬유의 손실은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Loss &= \alpha_{SMF} L_{SMF} + \alpha_{DCF} L_{DCF} \\ &= \left(\alpha_{SMF} + \alpha_{DCF} \frac{D_{SMF}}{|D_{DCF}|} \right) L_{SMF} \end{aligned} \quad (30)$$

여기서 α 는 λ_1 에 대한 단위길이당 광섬유 손실을 나타낸다. 위 식의 두 번째 줄을 참조하여, 분산보상 광섬유에 대한 figure of merit, M 을 정의하면 다음과 같다.^[7]

$$M = \frac{|D_{DCF}|}{\alpha_{DCF}} \quad (31)$$

식 (31)로 부터 분산보상 단일모드 광섬유의 설계시 고려해야 할 사항을 살펴보면 다음과 같다. 우선 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 에서 큰 마이너스 D_{DCF} 를 갖도록 설계되어야한다. 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.

분산보상 광섬유를 협대역 파장 분할 다중화 시스템에 적

용할 경우에는 $\lambda_1=1.55 \mu\text{m}$ 대역에서 총 분산치 D_{tot} 가 작고 평탄한 분산치를 갖아야 한다. 이를 만족하기 위해서는 D'_{SMF} 가 양의 값을 가지므로 식 (28)의 D'_{DCF} 가 음의 값을 갖도록 설계되어야 한다.

IV. 모의전산

모의전산에 사용된 굴절을 분포는 일반적인 분산치인 광섬유의 설계에 사용된 굴절을 분포와 유사한 포물선분포-이중클래드(double clad)형을 사용하였다. 비굴절율차는 1.25%~2.5% 사이에서 해석하였고, 도핑에 의한 손실을 고려하여 주로 비굴절율차를 2%를 넘지 않는 굴절율분포를 선택하였다. 분산특성은 광섬유의 분산을 재료분산 D_{mar} 과 도파로분산 D_{wg} 으로 나누어 해석하였으며, 분산치는 D_{mar} 과 D_{wg} 의 합으로 구하였다.^[8] 각 굴절율분포에 대하여 스칼라 파동방정식을 풀어 LP_{01} 모드에 대한 b-v 데이터를 구한다. b-v 데이터는 $\lambda=1.475 \mu\text{m}$ ~ $1.625 \mu\text{m}$ 사이의 7개 파장에 대해 구하고, 이로부터 분산특성을 얻었다. $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 에 대한 분산치를 굴절율분포를 변화시키면서 구하였다.

분산보상 단일모드 광섬유의 설계시 LP_{02} 모드와 LP_{11} 모드, 즉 1차 모드의 차단 파장(cutoff wavelength)을 구하여 분산보상 광섬유가 단일모드만을 허용하도록 설계하였다. 또한 실험적으로 LP_{01} 모드의 차단 파장이 1.80 μm 이하가 되면, $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 의 광신호는 macro-bending시에 큰 영향을 받아 손실이 커

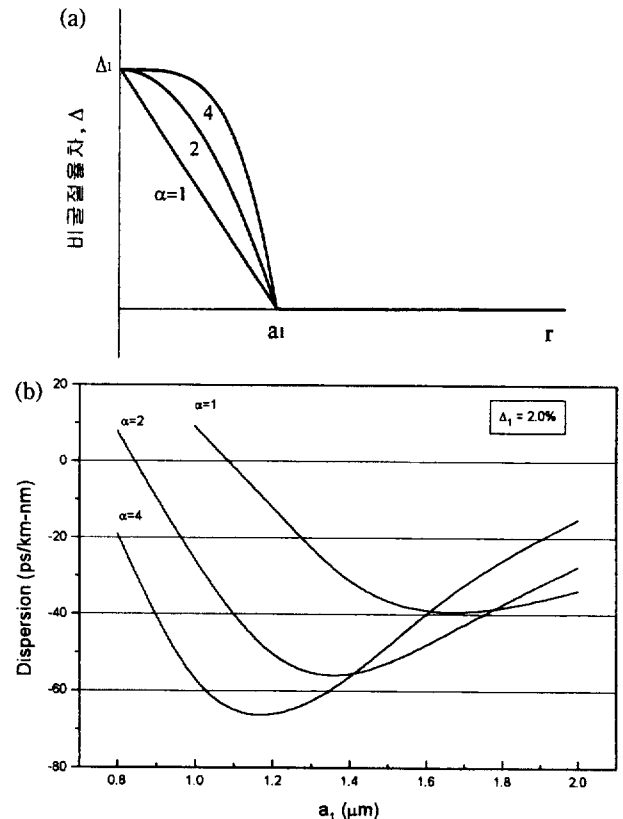


그림 2. α 승 분포 광섬유의 굴절율분포 및 분산특성 (a) 굴절율분포, (b) α 에 따른 분산특성

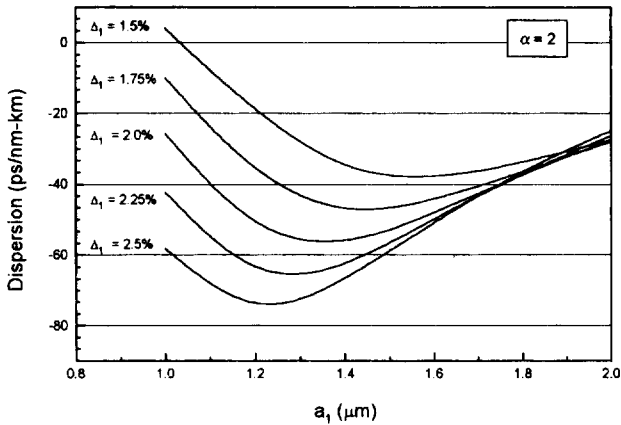


그림 3. $\alpha=2$ 일 때 Δ_1 에 따른 분산특성

지는 것으로 알려져있다.^[7] 따라서 설계된 굴절률 분포에 대한 LP₀₁모드의 차단 파장을 구하여 차단 파장이 1.80 μm이하가 되지않는 파라미터를 선택하였다.

4.1. α승 분포-단일클래드 광섬유

α승 분포 광섬유는 코어부의 굴절률분포가 α에 따라서 그림 2(a)와 같이 변화된다. 그림 2(b)에서는 각 α에 대한 λ=1.55 μm에서의 분산치를 보이고 있으며, 비굴절율차 Δ₁=2.0%에 대하여 코어반경 a₁의 함수로 나타내었다.

그림 2(b)를 보면, 각 α에 대하여 최대의 마이너스 분산치를 갖는 코어반경 a₁이 존재함을 볼 수있다. α가 증가함에 따라, 최대 마이너스 분산치는 증가하였고, 최대 마이너스 분산치를 갖는 코어반경 a₁은 감소하였다. 본 논문에서는 α=2(포물선분포)에 대한 결과를 중심으로 분산보상 광섬유를 설계하였다.

그림 3은 코어의 굴절률분포를 α=2로 고정시키고, 여러가지 비굴절율차 Δ₁에 따른 분산특성을 코어반경 a₁의 함수로 나타낸 것이다. 비굴절율차 Δ₁은 1.25%~2.5%사이의 다섯 경우에 대해 해석하였다.

그림 3을 보면, 각 Δ₁의 값에 대하여 코어반경 a₁이 1~2 μm사이에서 최대의 마이너스 분산을 나타내는 a₁이 존재함을 볼 수 있다. 또한 그 최대 마이너스 분산치는 Δ₁이 증가함에 따라 함께 증가함을 알 수 있다. 그러나 실제 제작시 도핑에 의한 손실을 고려하면 Δ₁의 값이 2%를 넘지 않는 것이 바람직하며, 이 경우 분산치가 -60 ps/nm·km이하로 보상비율 (L_{SMF}:L_{DCF})이 3:1 정도로 제한된다. 이를 극복하기위해 이중클래드형 광섬유를 해석해 보기로 한다.

4.2. 포물선분포-이중클래드형 광섬유

포물선분포-이중클래드형 광섬유는 코어의 굴절률이 포물선분포이며 클래드는 2중구조인 형태로, 그림 4에 나타내었다. 코어쪽 클래드를 1차 클래드, 바깥쪽 클래드는 2차 클래드로 부르기로 한다. 그림 4의 Δ₁, Δ₂는 최외각 클래드의 굴절율을 기준으로한 비굴절율차이다. 그림에서 Δ₂의 앞에 "-" 부호가 있음을 유의한다.

이중클래드형 광섬유의 분산특성은 네 개의 설계 파라미터

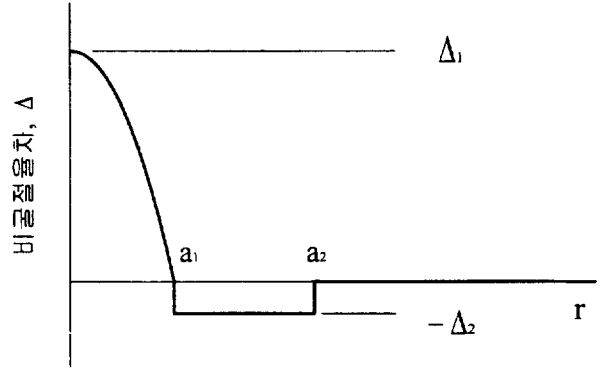


그림 4. 포물선분포-이중클래드형 광섬유의 굴절률분포

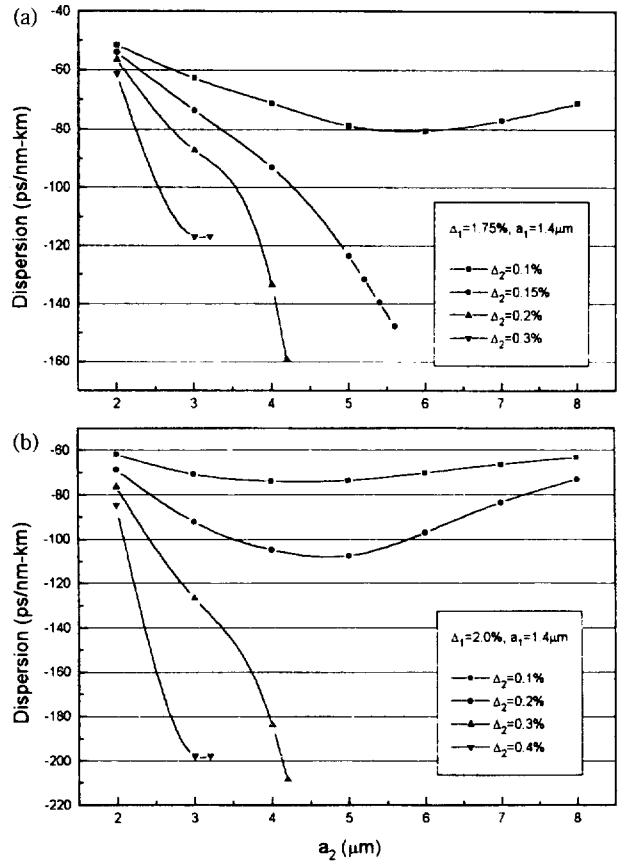


그림 5. a₂와 Δ₂에 따른 분산특성. (a) Δ₁=1.75%, a₁=1.4 μm일 때 분산특성, (b) Δ₁=2.0%, a₁=1.4 μm일 때 분산특성

(a₁, Δ₁, a₂, Δ₂)에 의존한다. 분산특성의 해석과정은 앞에서 구해진 포물선분포 해석결과에 근거해, a₁과 Δ₁을 고정하고 a₂와 Δ₂를 변화시켜가며 분산특성을 구하였다. 다음에 a₂와 Δ₂를 고정하고, 다시 a₁과 Δ₁을 미세하게 변화시켜가며 더욱 바람직한 분산특성을 추적하였다. 도핑에 의한 손실을 고려하여 Δ₁이 2%를 넘지 않는 굴절률분포를 선택하였다. 분산보상 광섬유의 1차 모드의 차단 파장을 구하여 단일모드만을 허용하도록 설계하였다. 또한 macro-bending에 의한 손실을 고려하기 위해 분산보상 광섬유의 LP₀₁모드의 차단 파장이 λ=1.80 μm이상인 되는 굴절률분포를 추출하였다.

4.2.1. 1차 클래드의 파라미터 a_2 및 Δ_2 가 변화하는 경우
 그림 3에서 $\Delta_1=1.75\%$ 와 2.0% 에 대해 $a_1=1.4 \mu\text{m}$ 일 때 최대

마이너스 분산치를 얻었다. 그림 5는 $a_1=1.4 \mu\text{m}$ 으로 고정하고, 비굴절율차 Δ_2 에 따른 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 에서의 분산치를 1차 클래드의 반경 a_2 의 함수로 나타낸 것이다. 그림 5(a), (b)는 각각 $\Delta_1=1.75\%$, $\Delta_2=2.0\%$ 에 대한 결과들이다.

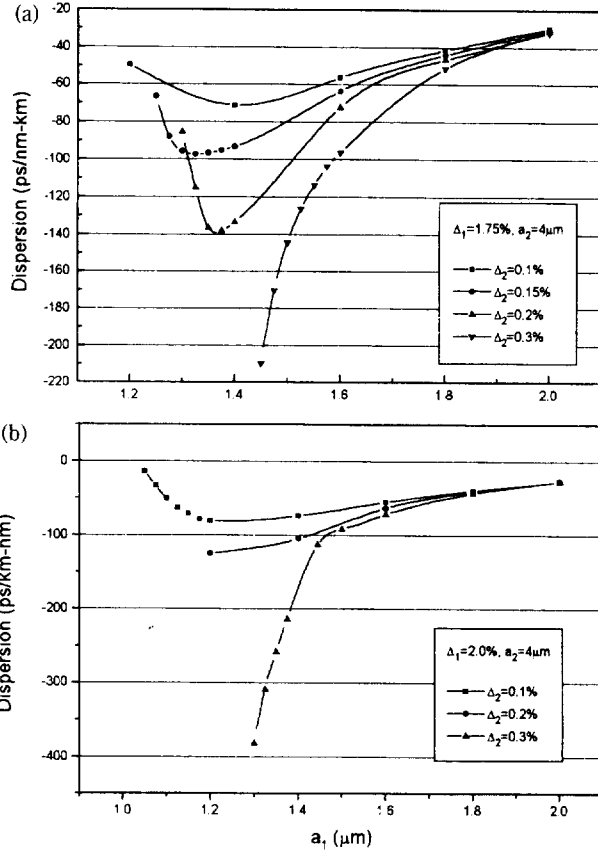


그림 6. a_1 과 Δ_2 에 따른 분산특성. (a) $\Delta_1=1.75\%$, $a_2=4 \mu\text{m}$ 일 때 분산특성, (b) $\Delta_1=2.0\%$, $a_2=4 \mu\text{m}$ 일 때 분산특성

그림 5(a), (b)를 보면, 1차 클래드 반경 a_2 는 $3\sim 6 \mu\text{m}$ 사이일 때 최대 마이너스 분산치가 얻어지고 있다. Δ_2 가 $0.2\sim 0.3\%$ 사이일 때 최대 마이너스 분산치는 그림 5(a)에서는 약 $-150 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ 이하로 까지, 그림 5(b)에서는 약 $-200 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ 이하로 까지 내려가고 있다. 그러나 Δ_2 가 이 이상 크게되면, 더 이상 분산치가 내려가지 않는 것을 볼 수 있다. 그림 5(a), (b)의 굴절율분포에 대한 1차 모드의 차단 파장은 약 $0.6 \mu\text{m}$ 근처로 단일모드만을 허용하고 있다.

4.2.2. 최적의 1차 클래드 파라미터에 대하여 코어 파라미터를 미세변화시키는 경우

그림 5의 결과를 연장하여, 그림 6은 $a_2=4 \mu\text{m}$ 로 고정하고 여러가지 Δ_2 에 따른 분산치를 a_1 의 함수로 표현하였다. 그림 6(a)는 $\Delta_1=1.75\%$ 에 대한 것이고, 그림 6(b)는 $\Delta_1=2.0\%$ 에 대한 결과들이다. Δ_2 는 $0.1\sim 0.3\%$ 까지로 제한하였다.

그림 6(a), (b)를 보면, a_1 이 $1.4 \mu\text{m}$ 부근에서 최대 마이너스 분산치를 갖는 것을 볼 수 있다. Δ_2 이 0.2% 이하인 경우에는 최대 마이너스 분산치가 약 $-150 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ 정도 이하로 떨어지지 않고 있으며, $\Delta_2=0.3\%$ 에서 최대 마이너스 분산치를 얻어지고 있다. 최대 마이너스 분산치는 그림 6(a)의 경우는 약 $-200 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ 이하이고, 그림 6(b)인 경우 약 $-300 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ 이었다. 그림 6에 나타난 모든 경우는 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 에서 단일모드만을 허용하고 있음을 확인하였다.

4.2.3. Macro-bending 손실을 고려한 최적 파라미터 추출

본 절에서는 a_1 의 변화에 따른 LP_{01} , LP_{11} 모드의 차단 파장을 검토함으로써, 1) 단일모드전송을 보장하며 2) LP_{01} 모드

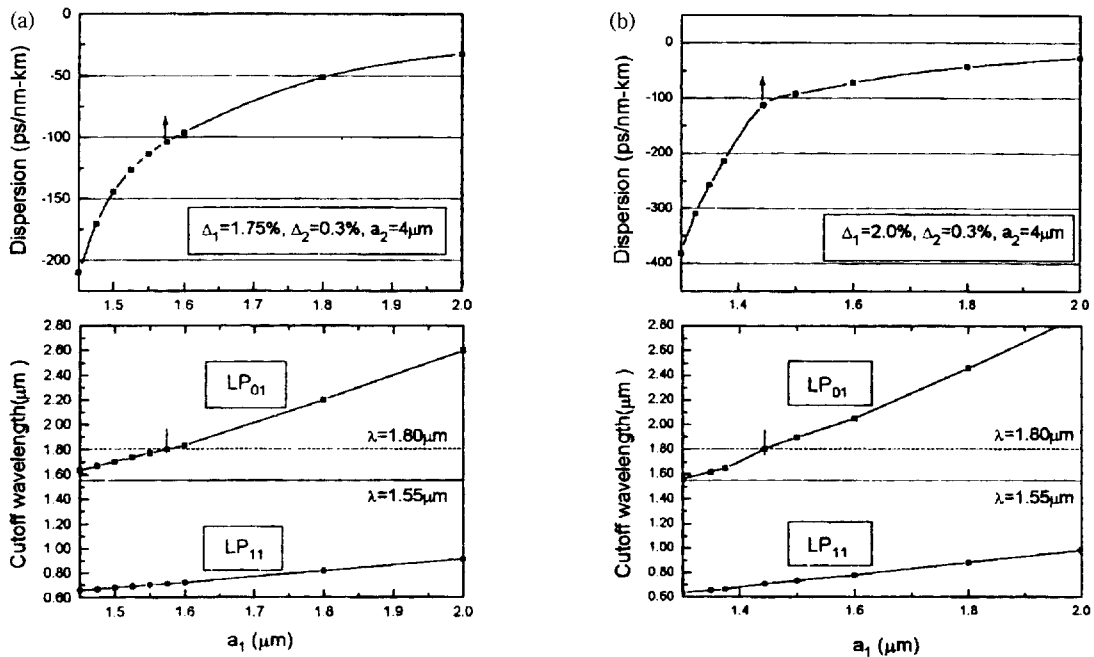


그림 7. a_1 에 따른 분산치와 LP_{01} , LP_{11} 모드의 차단 파장. (a) $\Delta_1=1.75\%$, $\Delta_2=0.3\%$, $a_2=4 \mu\text{m}$, (b) $\Delta_1=2.0\%$, $\Delta_2=0.3\%$, $a_2=4 \mu\text{m}$

표 1. 포물선분포 분산보상 단일모드 광섬유의 파라미터

	굴절율분포	Δ_1	a_1	Δ_2	a_2	D_{DCF}	D'_{DCF}
Type 1	단일클래드	1.75%	1.4 μm	.	.	-46.8	0.11
Type 2	단일클래드	2.0%	1.4 μm	.	.	-55.8	0.09
Type 3	이중클래드	1.75%	1.575 μm	0.3%	4 μm	-113.8	-0.35
Type 4	이중클래드	2.0%	1.48 μm	0.4%	4 μm	-115.1	-0.32

단, D_{DCF} 의 단위는 $\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$ 이고, D'_{DCF} 의 단위는 $\text{ps}/\text{nm}^2 \cdot \text{km}$ 이다.

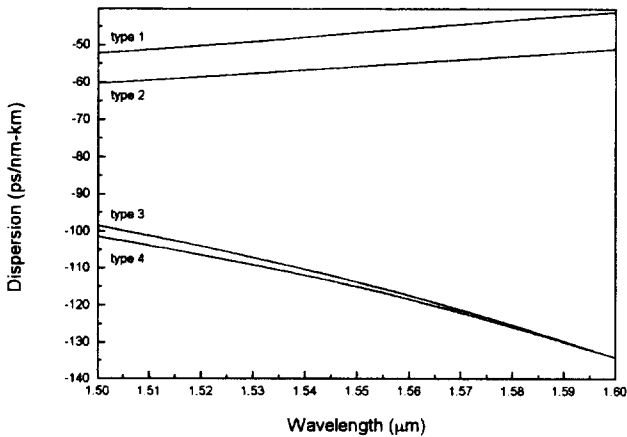


그림 8. 표1의 파라미터에 대한 분산곡선

의 차단 파장이 1.80 μm 이상이 되도록 설계 파라미터를 제한하고, 이에 따른 분산의 하한치를 검토하고자 한다. 그림 7의 상단 그림들은 그림 6의 $\Delta_2=0.3\%$, $a_2=4 \mu\text{m}$ 일 때의 a_1 에 따른 분산치를 그대로 옮긴 것이다. 그림 7의 하단 그림들은 LP₀₁, LP₁₁모드의 차단 파장을 나타낸 것이다.

그림 7의 하단 그림에서 LP₁₁모드의 차단 파장이 동작 파장 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 보다 작으므로, 그림 7의 파라미터를 갖는 광섬유는 모두 단일모드만을 허용하고 있다. 그림 7(a), (b)를 살펴보면, 분산치가 점점 큰 마이너스 값을 갖을수록 LP₀₁모드의 차단 파장이 동작 주파수인 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 에 근접하고 있음을 알 수 있다. 그림 7에서 macro-bending 손실을 적절히 제한하기 위해 LP₀₁ 모드의 차단 파장이 1.80 μm 이상이고, 최대 마이너스 분산치를 갖는 광섬유 파라미터를 추출해 보았다. $\Delta_1=1.75\%$ 인 그림 7(a)에서는 최대 마이너스 분산치는 -113.8 $\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$ 이고, 이 때의 코어반경 $a_1=1.575 \mu\text{m}$ 이었다. $\Delta_1=2.0\%$ 인 그림 7(b)에서는 최대 마이너스 분산치는 -115.8 $\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$ 이고, 이 때의 코어반경 $a_1=1.48 \mu\text{m}$ 이었다.

단일클래드 광섬유와 이중클래드형 포물선분포 광섬유에서 각각 2개씩 분산보상 광섬유의 파라미터를 추출하여 표 1에 정리하였으며, 각 파라미터 set에 따른 분산곡선은 그림 8과 같다.

표 1의 type 1과 2는 단일클래드 광섬유이고, type 3과 4는 이중클래드형 광섬유이다. 표 1과 그림 8을 보면 이중클래드 광섬유가 단일클래드 광섬유보다 훨씬 더 큰 마이너스 분산치를 갖는 것을 볼 수 있다. 또한 분산기울기 D'_{DCF} 가 단일클래드 광섬유보다 이중클래드 광섬유에서 더 큰 마이너스 값

을 나타내고 있다. Type 1과 2는 D'_{DCF} 가 광전송용 단일모드 광섬유의 D'_{SMF} 와 유사한 값을 나타내고 있다. 따라서 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 이외의 주변 파장 신호의 분산보상에 전혀 적합치 않다. Type 3과 4는 D'_{DCF} 가 약 -30 $\text{ps}/\text{nm}^2 \cdot \text{km}$ 로 분산보상 대역폭이 상당히 개선될 것을 예상할 수 있다.

V. 결 론

기존의 $\lambda=1.31 \mu\text{m}$ 장거리 광통신시스템을 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 광전송시스템으로 향상시키는데 필요한 분산보상 단일모드 광섬유를 설계하였다. 총분산이 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 에서 큰 마이너스 분산치를 갖는 굴절율분포를 얻기위해, α 승 분포-단일클래드 광섬유와 포물선분포-이중클래드 광섬유의 분산특성을 해석하였다. 광섬유의 분산특성을 얻기위해, 광섬유 스칼라 파동방정식을 1차원 유한요소법으로 해석하였다. α 승 분포-단일클래드 광섬유는 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 에서 분산치가 약 -60 $\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$ 정도로 제한되는 분산보상 단일모드 광섬유를 설계할 수 있었다. α 승 분포-단일클래드 광섬유의 분산치 제한을 극복하기위해 포물선분포-이중클래드 광섬유를 해석하였다.

포물선분포-이중클래드 광섬유는 해석상으로는 약 -300 $\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$ 이하의 큰 마이너스 분산치를 얻을 수 있었다. 그러나, macro-bending에 의한 손실을 고려하여 LP₀₁모드의 차단 파장이 $\lambda=1.80 \mu\text{m}$ 이상이 되도록 설계한 광섬유는, $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 에서의 분산치가 약 -120 $\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$ 정도로 제한됨을 볼 수 있었다.

분산기울기는 α 승 분포-단일클래드 광섬유의 경우 광전송용 단일모드 광섬유의 분산기울기와 유사한 값을 나타내어, 협대역 WDM에 적합치 않은 구조임을 알 수 있었다. 이중클래드 광섬유의 경우 이론적으로 약 -30 $\text{ps}/\text{nm}^2 \cdot \text{km}$ 로 분산보상 대역폭이 상당히 개선될 것을 예상할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] R. L. Lachance and P.-A. Belanger, "Modes in Divergent Parabolic Graded-Index Optical Fibers," J. Lightwave Technology, Vol. 9, No. 11, pp.1425-1430 (1991).
- [2] C. D. Poole, J. M. Wiesenfeld, and D. J. DiGiovanni, "Elliptical-Core Dual Mode Fiber Dispersion Compensator," IEEE Photon. Tech. Lett., Vol. 5, No. 2, pp. 194-197 (1993).
- [3] C. Lin, H. Kogelink, and L. G. Cohen, "Optical-pulse

- equalization of low-dispersion transmission in single-mode fibers in the 1.3-1.7 μm spectral region," *Opt. Lett.*, Vol. 5, No. 11, pp. 476-478 (1980).
- [4] D. S. Lamer, and V. A. Bhagavatula, "Dispersion Reduction in Single-Mode-Fiber Links," *Electron. Lett.*, Vol. 21, No. 24, pp. 1171-1172 (1985).
- [5] H. Izadpanah et al., "Dispersion compensation in 1310nm-optimised SMFs using optical equaliser fiber, EDFAs and 1310/1550 nm WDM," *Electron. Lett.*, Vol. 28, No. 15, pp. 1469 -1471 (1992).
- [6] A. M. Vengsarkar and W. A. Reed, "Dispersion-compensating single-mode fibers: efficient designs for first- and second-order compensation," *Opt. Lett.*, Vol. 18, No. 11, pp. 924-926 (1993).
- [7] A. J. Antos, and D. K. Smith, "Design and Characterization of Dispersion Compensating Fiber Based on the LP_{01} Mode," *J. Lightwave Technology*, Vol. 12, No. 10, pp. 1739-1745 (1994).
- [8] 정석원, 김창민, " $\lambda=1.3, 1.55 \mu\text{m}$ 에서 저분산을 갖는 이중-클래드 광섬유의 설계," *한국광학회*, Vol. 6, No. 2, pp. 156-164 (1995).
- [9] J. N. Reddy, *An Introduction to the Finite Element Method* (McGRAW-HILL, 1985).
- [10] G. Keiser, *Optical Fiber Communications* (McGRAW-HILL, 1991), pp. 97-107.
- [11] B. J. Ainslie and C. R. Day, "A Review of Single-Mode Fibers with Modified Dispersion Characteristics," *J. Lightwave Technol.* Vol. LT-4, No. 8, pp. 967-979 (1986).
- [7] A. J. Antos, and D. K. Smith, "Design and Character-

Design of double-clad, dispersion-compensating single-mode fiber with parabolic-index profile for $\lambda=1.55 \mu\text{m}$

Dong-Gak Kim, Chang-Min Kim

Department of Electronics Eng., Seoul City Univ., Seoul 130-743, Korea

Sang Bae Lee

Division of Information and Electronics, Korea Institute of Science and Technology

Hee Jeon Kang

Fiber Optics Engineering Department, Anyang Plant, Tai-Han Electric Wire and Cable

(Received : October 29, 1996)

We design the single mode dispersion-compensating fibers (DCF) which may be necessary for upgrading the previously installed 1.31 μm optical communication system to the 1.55 μm system. To obtain the optimum index profile that allows large negative dispersion at 1.55 μm , parabolic-index, double-clad fibers are analyzed by applying the 1-D FEM to the scalar wave equation of optical fibers. In consideration of macro-bending loss, the fibers are designed so that the cutoff wavelength of the LP_{01} mode is greater than 1.80 μm . The computer simulations show that the lower bound of the dispersion at 1.55 μm is limited to about -120 ps/nm · km for the fiber index profiles satisfying the LP_{01} 's cutoff condition.