

# 이산형 분산 분포를 갖는 DWDM 시스템용 광섬유 케이블

論 文

50C-10-8

## Discrete Dispersion Distributed Fiber Optical Cable for DWDM System

朴義敦\* · 李東旭\*\* · 朴惠英\*\*\* · 金大原§ · 鄭允喆<sup>§§</sup> · 孫 鉉<sup>§§§</sup> · 趙榮基<sup>§</sup>  
( Euy-Don Park · Dong-Uk Lee · Hae-Young Park · Dae-Won Kim · Yun-C Jung · Hyun Son · Yung-Ki Cho )

**Abstract** - A large dispersion value in optical fiber cable should be maintained to suppress the nonlinear effect induced distortion for the narrow channel spaced DWDM system while small value of dispersion is needed for high bit rate transmission. To meet these two requirements simultaneously, dispersion distribution control method during the cabling process was exploited. And dispersion distributed cable was fabricated by the way of designing alternation sections in single cable piece with standard single mode fiber(SSMF) and newly developed negative dispersion fiber(NDF). It is shown that the discretely dispersion varying cable along the axis keep the same average dispersion value of an entire cable length as that of nonzero dispersion shifted fiber(NZDSF) with 3.6 ps/km/nm while the local dispersion is around 17 ps/km/nm of absolute value. Moreover, the developed cable had good optical and mechanical properties and the feasibility of this cable for practical use was confirmed.

**Key Words** : Chromatic dispersion, Dispersion management, Nonlinear effect, Negative dispersion, Dispersion compensation

### 1. 서 론

파장 분할 다중화(dense wavelength division multiplexing: DWDM) 광전송 시스템의 전송용량을 최대화하기 위해서 광전송 대역폭을 증가시키는 방안과 채널간 전송 bit rate를 증가시키고 채널 간격을 조밀화하여 spectral efficiency를 높여려는 방안 등이 집중적으로 조사되고 있다. 광전송 대역폭은 기존의 어븀 광증폭기(Erbium doped fiber amplifier: EDFA)가 이득을 가지는 대역인 C-band에서, 라만 증폭기(Raman amplifier) 및 툴리움 광증폭기(Thulium doped fiber amplifier: TDFA) 등의 연구를 통해서 가능할 것으로 보이는 장파장대의 L-band 및 단파장대인 S-band 까지로의 확장이 제안되고 있다[1],[2]. 또한, 채널당 전송 속도 측면에서는 10 Gbit/s급에서 40 Gbit/s의 경제성있는 상용 적용이 지속적으로 탐색되고 있고, 반송 파장(carrier wavelength)의 실장 밀도는 200 GHz 및 100 GHz에서 50 GHz 및 25 GHz의 채널 간격을 이용한 연구 결과가 제시되고 있다[3]. 이러한 최대

전송 용량을 구현하기 위한 여러 가지의 광전송 부하를 잘 수용하기 위해서는 서로 상반되는 광학적인 특성을 가지는 광케이블이 요구된다. 즉, 전송 bit rate를 증대시키기 위해서는 작은 분산값을 갖는 광섬유 케이블이 유리하지만, 채널 간격의 조밀도를 높이기 위해서는 오히려 큰 분산값이 광섬유의 비선형 현상을 억제하기 때문에 유리하게 작용한다. 또한 3-band의 넓은 전송 대역을 효율적으로 지원하기 위해서는 분산기울기가 작은 것이 유리한데, 이 경우 분산 기울기와 trade-off 관계인 광섬유의 유효 단면적이 작아지게 되어 비선형 왜곡이 더 심하게 된다.

이러한 문제를 동시에 해결하기 위하여 광섬유의 분산 특성과 유효 단면적의 최적화를 시도한 연구 결과가 많이 발표되었다[4]-[6]. 그러나 이러한 방법은 케이블의 전 길이에 걸쳐서 한 개의 고정된 분산계수를 최적값으로 선정하기 위한 시도로서, 고분산값에 의한 penalty와 저분산값에 의한 penalty를 동시에 완벽하게 해결하기는 어렵다. 본 연구에서는 광섬유 케이블내에 부호가 양인 분산값과 음인 분산값이 이산적으로 분포되게 하여 케이블 길이 전체의 평균 분산값을 낮게 유지시킴으로서 고분산 penalty를 작게 하면서도 국지적으로 큰 절대 분산값을 갖게 하여 저분산 penalty를 동시에 해결하기 위한 방안을 조사하고 실제로 광섬유 케이블을 제작하여 특성을 확인했다.

### 2. 광섬유 케이블의 전송 제한 요인

#### 2.1 광섬유 케이블의 분산(dispersion)

분산이란 광섬유를 통해서 진행하는 신호가 퍼지게 되는 현

\* 正 會 員 : LG 전선(주) 광기술개발팀장

\*\* 準 會 員 : LG 전선(주) 광통신연구소

\*\*\* 準 會 員 : LG 전선(주) 광통신연구소

§ 準 會 員 : LG 전선(주) 광통신연구소 전임연구원

§§ 準 會 員 : KAIST 전자공학교 교수

§§§ 正 會 員 : 경북대 전자공학교 교수

§ 正 會 員 : 경북대 전자공학교 교수

接受日字 : 2001年 7月 27日

最終完了 : 2001年 9月 10日

상으로 모드분산, 편광모드분산(polarization mode dispersion: PMD)과 색분산이 있다. 단일 모드 광섬유에서는 하나의 모드만 존재하므로 모드분산이 존재하지 않고, 광섬유의 주편광 모드(principle polarization mode)의 fast axis와 slow axis 간의 군속도 차이에 의해 발생하는 PMD는 광섬유 내에 oscillatory spin을 부여하여 경로차를 발생시켜 상당히 줄일 수 있으므로 색분산만을 본 논문의 고려 대상으로 한다.

표준 단일 모드 광섬유(standard single mode fiber: SSMF)에서 색분산은 재료분산과 구조분산의 합이며, 분산 계수(D)로 표현된다.

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \approx \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad (1)$$

고속으로 변조된 신호가 광섬유를 통과하게 되면 신호 파장 성분의 군속도 차이로 인한 퍼짐 현상인 색분산(chromatic dispersion)을 갖게 되는데, 이러한 색분산으로 인하여 수신단에서는 신호가 중첩되어 복조가 불가능하게 되는 치명적인 결과가 유발된다. 일반적으로 분산에 의한 영향만을 고려할 경우 광섬유를 통하여 전송할 수 있는 최대 전송거리는 다음과 같은 식으로 주어진다[7].

$$B^2 L = 7.9 \times 10^5 \frac{c}{\lambda^2 D} \quad (Gb/s)^2 km \quad (2)$$

위 식에서 B는 한 채널의 전송속도이며, D는 광섬유의 분산값, 그리고 L은 최대 전송거리를 나타낸다. 만약 동일한 전송거리라고 가정하면, 전송속도가 4배로 증가하는 경우 분산값은 제곱에 반비례하여 1/16의 작은 값이 요구되는 것을 나타내므로 고속 시스템일수록 분산값은 급격히 작아져야 한다.

## 2.2 광섬유 케이블의 비선형성

고밀도 파장 분할 다중 방식 시스템에서는 여러 개의 신호들이 동일한 광섬유를 통해 장거리로 전송되기 때문에 빛이 광섬유에 입사 되었을 때 광자(photon)와 원자(atom)가 서로 상호작용을 일으켜 발생하는 비선형적인 현상이 발생한다.

이러한 비선형 현상은 발생 원인에 따라서 크게 2가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 실리카 분자의 유도 산란에 의한 유도 라만 산란(stimulated Raman scattering: SRS)과 유도 Brillouin 산란(stimulated Brillouin scattering: SBS)이다. 두 번째로, 비선형 굴절률로부터 발생하는 자기위상변조(self-phase modulation: SPM), 상호 위상 변조(cross phase modulation: XPM)와 사광파 혼합(four wave mixing: FWM)이다. SRS는 짧은 파장의 신호 전력이 파장이 긴 신호로 전달되어 광신호대 잡음비를 감소시키며, SBS는 광섬유의 인가할 수 있는 최대 파워를 제한한다. SPM과 XPM은 광신호의 위상변조를 유발하며, FWM은 신호간의 간섭으로 인하여 새로운 주파수 성분을 발생시킨다. 전송 용량 증대를 위한 다 채널 전송 시스템에서 채널 간격을 감소시킬 경우 특히 XPM과 FWM이 문제가 된다.

XPM은 실리카 광섬유 내에 세 굴절률이 광신호 전력의 변화에 따라 변하는 현상인 Kerr effect 때문에 발생한다.

WDM 시스템에서 다중화 된 채널이 광섬유를 따라 진행할 때 신호의 파장이  $\lambda_k$ 인 신호의 위상은 다른 채널의 파위에 의해서 변화하게 된다. 채널 수가 M이라고 할 때 채널 k에 나타나는 전체 위상 변화( $\Delta\Phi_k^{NL}$ )는 식 (3)의 결합 방정식(coupled equations)으로부터 구할 수 있다[8].

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{1}{v_{g1}} \frac{\partial A_1}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{21} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} + \frac{\alpha_1}{2} A_1 = i\gamma_1 [ |A_1|^2 + 2|A_2|^2 ] A_1 \quad (3-a)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{1}{v_{g2}} \frac{\partial A_2}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{22} \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} + \frac{\alpha_2}{2} A_2 = i\gamma_2 [ |A_2|^2 + 2|A_1|^2 ] A_2 \quad (3-b)$$

여기서,

$A_j$ : slowly varying amplitude, (j=1,2)

$\gamma_j = \frac{n_2 \omega_j}{c A_{eff}}$ , (j=1,2) 비선형 계수

$\alpha$ : 전송 손실

$$\Delta\Phi_k^{NL} = \gamma L_{eff} \left( P_k + 2 \sum_{i=k}^M P_i \right) \quad (4)$$

식 (4)에서  $L_{eff}$ 는 유효 거리(effective length)이며, 괄호안의 첫 번째 항은 SPM에 의한 영향을 표시하며, 두 번째 항은 XPM에 의한 영향을 나타낸다. 파장이  $\lambda_1$ (채널 1)과  $\lambda_2$ (채널 2)인 두 개의 신호가 인가 될 때 분산에 의하여 두 신호는 서로 다른 속도로 진행한다. 이 때, 채널 1이 채널 2에 XPM에 의하여 위상 변화를 초래하며, 결과적으로 채널 2에서 신호의 rising edge에는 저주파 성분이 생기고 falling edge에는 고주파 성분이 새롭게 생긴다. 1550nm 대역에서는 고주파 성분이 저주파 성분보다 빠르게 진행하고 신호의 위상 변화는 세기 변화로 전환되며, 이러한 신호의 왜곡은 강도 변조 직접 검파(intensity modulation-direct detection: IM-DD) 방식의 시스템에서 잡음으로 간주되어 시스템의 성능을 저하시킨다.

FWM이란 서로 다른 주파수의 2개 이상의 광파들이 3차 전기 감수율(third-order electric susceptibility)에 의해 결합해서, 다른 파장의 새로운 광파들을 만드는 현상이다.  $f_i, f_j, f_k$ 의 주파수를 가지는 광파들이 매질에 입사되면 FWM에 의해 새로운 주파수 성분이 발생한다.

$$f_{FWM} = f_i + f_j + f_k \quad (i, j \neq k) \quad (5)$$

FWM 성분의 세기는 혼합효율(mixing efficiency)과 전파 상수차( $\Delta\beta$ )로 나타낼 수 있다.

$$P_{ijk}(L) = \eta_{ijk} \frac{1024\pi^6}{n^4 \lambda^2 c^2} (D\chi_{1111})^2 \left( \frac{L_{eff}}{A_{eff}} \right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \quad (6)$$

여기서,  $P_i, P_j, P_k$ : 신호 성분  $i, j, k$ 에 대한 입사 전력  
 $L$ : 광섬유의 길이  
 $n$ : 코어의 굴절률  
 $\lambda$ : 전송장의 파장대역  
 $\chi_{III}$ : 3차 비선형 자화율,  
 $A_{eff}$ : 유효면적

$$\eta_{ijk} = \left( \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \right) \left\{ 1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta L / 2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right\} \quad (7)$$

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda^2}{c} (\Delta f)^2 \left( D_c \Delta f \frac{\lambda^2}{c} \frac{dD_c}{dD} \right) \quad (8)$$

위의 식 (6)부터 식 (8)에 나타나 듯이 FWM에 의해 발생하는 전력을 감소시키기 위해서는 분산( $D_c$ )이 커서 위상 정합(phase matching)을 피할 수 있어야 한다. 이와 같이 FWM과 같은 비선형 신호 왜곡을 억제하는 것과 전송 속도 증가로 전송 용량을 확대하는 것은 서로 상반되는 관계에 있으므로, 두 가지 조건을 동시에 충족시키기 위하여 분산 특성의 특별한 설계가 필요하다.

### 3. 케이블 설계

분산에 의한 신호 왜곡량을 줄이면서도 비선형 현상도 피하기 위한 방안으로 종래의 약 17 ps/km/nm의 분산 값을 가지는 SSMF 대신 약 4 ps/km/nm 수준의 (non-zero dispersion shifted fiber: NZDSF)를 적용하는 것이 제안되었다. 그러나 이러한 광케이블은 광섬유의 유효단면적이 크지 않으면서 상대적으로 분산 값이 작아서 50 GHz 이하의 수준으로 채널 간격이 좁아지는 경우 FWM등의 비선형 현상을 충분히 억제 하지 못하여 전송거리가 매우 제한 될 수 있다는 점이 새로운 문제점으로 부각되고 있다[9,10]. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 운용 중심 파장에서 광케이블의 분산 값을 8 ps/km/nm 수준의 값을 갖게 하여 50GHz의 채널 간격에서도 비선형의 신호 왜곡을 효과적으로 억제 시킬 수 있는 새로운 형태의 NZDSF가 제안되었다[6],[9]. 그러나 이것 또한 증가된 분산 값에 의한 추가적인 분산보상 비용이 발생하고, 분산 보상 주기가 짧아지고 시스템의 복잡성이 증가되는 것 등과 같이 분산과 비선형 현상 문제를 동시에 해결하지 못하는 한계를 여전히 가지고 있는 것이다. 일반적으로 분산 보상을 위해 분산보상 광섬유(dispersion compensating fiber: DCF)가 사용되는데 이 광섬유는 절대값이 크고 부호가 음인 분산을 가지며 비교적 큰 광섬유 손실을 가진다. 또한 유효 단면적이 작아 비선형 현상이 발생하므로 DWDM 시스템에서는 2단 증폭기를 구성하고 증폭기 사이에 분산보상 광섬유를 위치시키게 되어 광신호 대 잡음비가 열화될 수도 있다. 분산보상 광섬유는 단위 길이 당 단가가 일반 광섬유보다 훨씬 높기 때문에 시스템 비용 측면에서도 누적되는 분산량을 줄여 분산보상 광섬유의 사용을 최소화하는 것이 좋다.

다른 방안은 케이블의 길이에 따라 분산 값이 다르게 분포되도록 하여 국지적으로는 큰 분산 값을 가지면서 케이블 전체 길이의 평균 분산은 작은 값을 갖도록 하여, 비선형 신호왜곡과 분산

에 의한 신호왜곡의 문제를 동시에 해결하는 것이다. 이러한 방법으로 최근 화학 증착법(modified chemical vapour deposition: MCVD)의 광섬유 코재 제조법으로 길이 방향의 주기적인 굴절률 변화 구조를 갖는 광섬유를 이용하여 최대 +4 ps/km/nm에서 최소 -3 ps/km/nm의 분산 값이 약 7 km 주기로 분포되도록 하는 것이 보고된바 있다[11]. 또한, Bhagavatula 등은 외부 증착법(outside vapour deposition: OVD)을 이용하여 양분산과 음분산이 길이 방향으로 분포되어 있는 광섬유를 제조한바 있고[12], Nakagima 등은 수직 증착법(vapour phase axial deposition: VAD)을 이용하여 광섬유의 클래딩(cladding) 외경을 변화시키는 방법으로  $\pm 1$  ps/km/nm 분산값이 20 km의 주기로 변하는 광섬유를 제작하여, FWM의 비선형 억제효과가 있음을 보고한 바 있다[13],[14]. 이러한 방법들은 광섬유의 모재 상태에서 분산값을 결정하는 외경 및 굴절률 분포형태(refractive index profile)를 조정하여 길이방향의 분산 분포를 형성시키는 것으로서, 단지 다른 분산 값을 갖는 연속적인 광섬유의 제작 가능성을 보여주는 수준으로 실제로 완제품 케이블 상태로의 완성을 시도한 연구 보고는 아직까지 없다.

본 연구에서는 광케이블의 평균 분산 값을 종래의 NZDSF 수준인 약 3 ps/km/nm 값을 유지하면서도 비선형 왜곡 현상의 억제 효과가 더 크게 될 수 있도록 하기 위한 방법으로 길이 방향으로 분포된 분산 값을 갖는 광케이블을 설계했다. 그것은 광섬유 모재(preform)에서의 분산 값을 변화시키는 분산 분포 케이블의 제작 방법상 한계를 극복하고 실제적으로 선로에 적용이 가능한 길이를 전제로 하여 새로운 분산 분포에 대한 설계개념과 제작방법을 제시한 것이다.

광케이블은 20년의 운용 기간 동안 외부 환경에 의한 응력에 있어서 광전송 특성의 열화가 허용범위 내에 유지되어야 한다. 시공 및 운용 중에 가해질 수 있는 기계 환경적인 부하의 크기와 옥외 광케이블이 유지해야 되는 특성 값에 대한 일반 요구 사항은 산업기준에 제시되어 있다[16]. 본 연구에서는 분산 분포 케이블의 실제 적용에 관련된 기계 환경적인 사항의 설계와 시험 평가는 종래의 표준 단일모드 광섬유 옥외용 광케이블과 동일한 기준인 Telcordia GR-20 CORE를 적용했다. 광케이블의 사용 가능한 최대 길이는 일반적으로 적용되는 기준은 없으며, 선로의 시공 운용조건에 따라 결정된다. 단위 케이블의 길이가 긴 경우, 선로 전체의 접속 수를 줄일 수 있어 광손실(optical power loss) 측면에서는 유리하지만, 케이블이 높게 되는 관로의 굵기, 적진성, 시공방법 및 포설 기술 등의 요인 등으로 사용 가능한 최대 케이블 길이의 제한이 따르게 된다. 최근 공기압력 등으로 케이블에 가해지는 응력을 최소화한 상태로 포설하는 기술개발이 확대되고 있어, 사용 가능한 최대 케이블 길이는 향후 길어질 것으로 추측된다.

본 연구에서는 현재 유럽 등에서 장거리 통신망용으로 실제 적용하고 있는 6 km 길이를 분산 분포 케이블의 기준 길이로 선정했다. 또한 가장 많이 사용되고 있는 SSMF는 그 제조공정이 안정되어 있고, 가장 경제성이 있으며 기존 통신망에 포설되어 있는 양이 많아서 새롭게 설계되는 분산 분포 케이블은 SSMF와 정합성(compatibility)을 크게 할 필요가 있다. 또한 SSMF는 분산이 17 ps/km/nm로 비교적 크고, 유효 단면적도 80  $\mu m^2$ 로 넓어서 비선형 현상을 효과적으로 억제 할 수도 있다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 SSMF의 사용을 전제로 하여 초고속 대용량 DWDM 통신에 적합한 분산 분포 케이블 구조를 조사했다. 그리고 제안된 케이블

을 제작하여 분산 값의 분포, 기타 광학적인 특성 및 케이블의 기계 환경적인 특성과 신뢰성을 측정하여 실제적인 적용이 가능함을 확인하였다.

### 3.1 광섬유 케이블의 비선형성

광케이블을  $n$ 부분으로 나누어 길이 방향으로 분산 값의 변화를 갖는 예를 그림 1에 나타내었다. 여기서  $i$ 부분 길이의 전파상수를  $\beta_i$ , 분산 값을  $D_i$ 라고 한다.  $\beta_i$ 와  $D_i$ 는 각 부분 길이 내에서는 일정하다고 할 때,  $n$  번째 부분 길이의 끝단에 나타나는 FWM에 의해 발생하는 광신호의 크기는 식 (6)을 변형하여 다음처럼 표현할 수 있다[16].

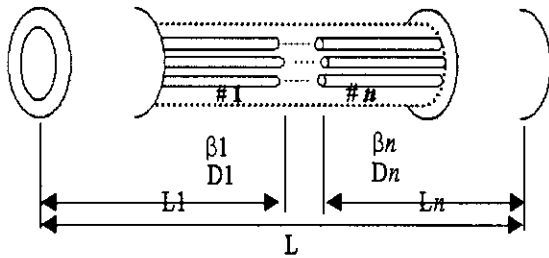


그림 1 분산 값이 다른  $n$ 개의 부분으로 구성된 광케이블  
Fig. 1 Optical cable divided into  $n$  part which has different dispersion

$$P_F^{(n)}\left(\sum_{i=1}^n L_i\right) = \frac{1024\pi^6 (D_X)^2 P_i(0)P_j(0)P_k(0)}{n_{co}^4 \lambda^2 c^2 A_{eff}^2} \exp\left[-\alpha\left(\sum_{i=1}^n L_i\right)\right] \eta \quad (9)$$

- 여기서,  $n_{co}$  : 코어 굴절율
- $c$  : 광속
- $D$  : degeneracy factor
- $x$  : 3차 비선형 감수율
- $A_{eff}$  : 광섬유의 유효 단면적
- $P_q(0)(q=i,j,k)$  :  $q$ 번째의 입력 파워
- $\alpha$  : 광섬유의 손실

$\eta$ 는 FWM 효율로서 아래 식으로 주어진다.

$$\eta = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\exp\{(-\alpha + j\Delta\beta_i)L_i\} - 1}{j\Delta\beta_i - \alpha} \prod_{j=1}^{i-1} \exp\{(-\alpha + j\Delta\beta_j)L_j\} \right] \quad (10)$$

여기서  $\Delta\beta_n$ 은  $n$ 번째 부분길이의 위상 부정합을 나타내며 아래식으로 표현 가능하다.

$$\Delta\beta_n = -\frac{\lambda^4 \pi D_n}{c^2 d\lambda} \left\{ (f_i - f_{on}) + (f_j - f_{on}) \right\} (f_i - f_k)(f_j - f_k) \quad (11)$$

여기서  $f_i, f_j, f_k$ 는  $i, j$  또는  $k$  번째의 입력광의 주파수이고,

$D_n$ 과  $f_{on}$ 은  $n$ 번째 부분길이의 분산 및 영분산 주파수를 나타낸다. 식 (9)에서 (11)을 통하여 케이블 전체 길이에 걸쳐 나타나는 FWM에 의한 새로운 주파수 성분의 광전력을 줄이기 위해서는 케이블 길이가 6 km이하로 주어진 경우, 케이블 길이 내의 부분 길이의 수  $n$ 을 작게 하는 것이 효과적임을 보여준다. 또한 각 부분길이에서 분산 값을 높게 유지하여 서로 다른 파장 성분에 대한 전파상수의 차  $\Delta\beta$ 를 키우는 것을 고려해야 한다. 뿐만 아니라, 광섬유의 유효 단면적  $A_{eff}$ 를 크게 하여 단위 유효 단면적 당 입력 광 파워의 밀도를 줄이는 것도 필요함을 보여준다.

부분 길이의 수  $n$ 가 최소가 되는 2로 하고 주어진 케이블 길이에서 한 개의 부분 길이에 SSMF를 사용하면서 평균 분산 값을 종래의 NZDSF와 동일한 3ps/km/nm 수준으로 유지 시키기 위한 다른 한 개의 부분 길이의 음분산 광섬유(negative dispersion fiber: NDF)의 분산 값의 크기와 두 개의 부분 길이의 비율을 최적화 하는 것이 중요하다. 또한 FWM의 비선형 신호 왜곡의 억제 효과를 크게 하기 위해서는 FOM(figure of merit)이 커야 한다. FOM은 작은 평균 분산 값을 가지면서 FWM의 비선형 현상 억제를 할 수 있는 국지적 분산 값을 얼마나 크게 가지는가를 나타내는 지수로서 분산 분포 케이블이 갖게 되는 누적 분산의 총합과 그 분산 분포 케이블의 평균 분산값과 동일한 단일 고정 분산 값을 갖는 케이블의 누적 분산의 총합과의 비로 아래 식과 같이 정의하는 것이 가능하다.

$$FOM = \frac{\sum_{i=1}^n |D_i| \cdot l_i}{D_{avg} \cdot L} \quad (12)$$

여기서  $D_{avg}$ 는 평균분산,  $D$ 는 분산,  $l$ 은 거리 및  $L$ 은 케이블 길이이다. 케이블 내의 두 개의 부분 길이의 비가 1이 되는 경우 케이블의 시공, 운용 및 접속과정에서 발생할 수 있는 케이블 끝 부분 절단 등의 다소간의 케이블 길이 비율 변경 가능성을 고려할 때, 설계된 평균 분산 값을 가장 안정적으로 유지하는 조건이 된다. 케이블 내의 여러 가지 분산 분포 형태를 그림 2에 나타내었다. NDF의 분산 값이 너무 작은 경우 그림 2(c)와 같은 분산 분포를 가지게 되고 그림 2(a)의 ABEF가 이루는 면적 크기의 누적 분산의 총합을 갖게 된다. 이것은 두 개의 부분 길이의 비율이 1에서 멀어지게 되고 FOM이 작아지게 된다. 종래의 NZDSF 케이블의 경우, 분산 값에 의한 누적 분산의 총합은 그림 2(a)의 AEF가 이루는 면적이고 국지적 분산의 추가 효과가 전혀 없는 조건으로서 FOM은 1이다.

NDF의 분산 값을 너무 크게하는 경우, 그림 2(e)와 같은 분산 분포를 가지게 되어 큰 FOM이 되기는 하나, 작은 NDF의 경우와 마찬가지로 두 개의 부분 길이의 비율이 1에서 멀어지게 된다. 또한 이 경우, NDF의 큰 음의 분산 값을 갖기 위해서는 재료 분산을 억제하고 도파로 분산을 키워야 하기 때문에 도파로의 구조가 복잡하게 되어 유효 단면적이 작아지게 되는 것[17] 등의 불리한 점이 있다. 본 연구에서는 -14ps/km/nm의 값을 NDF의 분산 값 영역으로 설계하여 종래의 NZDSF와 동일한 수준의 유효 단면적을 가질 수 있으면서도 FOM이 비교적 큰 2.9의 값을 확보 할 수 있도록 함과 동시에 케이블 내의 두 개의 부분 길이의 비가 1에 가깝게 유지되도록 했다.

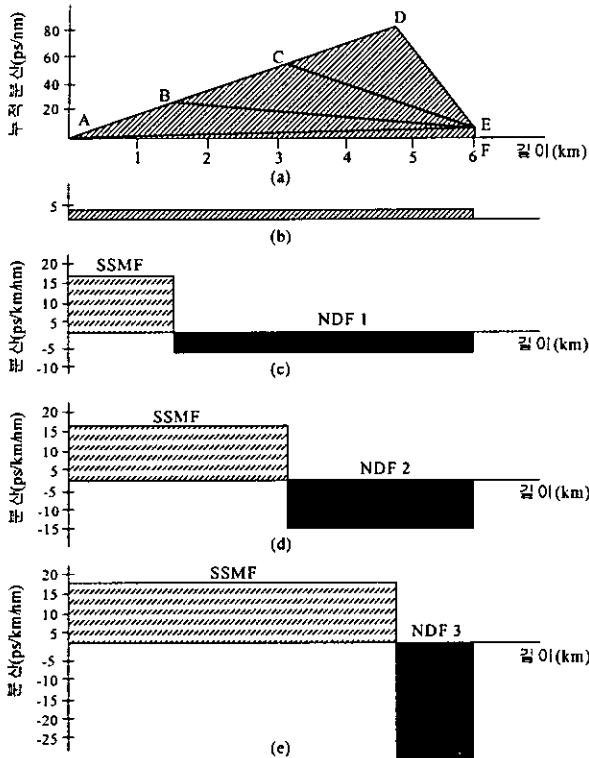


그림2 분산 분포 및 누적 분산 형태  
 (a) 누적 분산 형태  
 (b) 종래의 NZDSF 케이블의 분산 분포  
 (c) ABEF의 누적 분산 형태를 갖는 케이블의 분산 분포  
 (d) ACEF의 누적 분산 형태를 갖는 케이블의 분산 분포  
 (e) ADEF의 누적 분산 형태를 갖는 케이블의 분산 분포

Fig.2 Dispersion distribution and the types of accumulated dispersion

- (a) Accumulated dispersion
- (b) Dispersion distribution of existing NZDSF cable
- (c) Dispersion distribution of cable which has the type of ABEF
- (d) Dispersion distribution of cable which has the type of ACEF
- (e) Dispersion distribution of cable which has the type of ADEF

4. 케이블 제작 및 결과

종래의 분산 분포케이블 제작을 위하여 사용된 방법인 광섬유의 코어 외경, 클래딩 외경 및 도우핑 농도를 연속적으로 다르게 하는 방법은 분산 값을 크게 변화시키는데 한계가 있고, 변화주기를 짧게 하는 것이 곤란할 뿐만 아니라, 분산 값의 부호가 바뀌는 친이영역[11,14]이 길어지게 되어 이 부분이 나선형 신호 왜곡을 일으키는 문제를 가지고 있다.

본 연구에서는 광섬유 제작공정에서의 분산 분포 형성하는 방법에서의 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 두 가지 종류의 분산 분포 케이블용 광섬유를 미리 제작한 다음 케이블링 공정(cabling process)에서 계산된 분산분포가 길이 방향으로 형성되도록 하는 방법을 선택했다.

4.1 광섬유의 제작

양분산(positive dispersion)의 부분길이에 적용되는 SSMF는 계단형 굴절률 분포를 가지고 1550nm 파장에서 모드필드경(mode field diameter : MFD)이 10.2 $\mu$ m, 손실 0.20 dB/km 및 분산 17 ps/km/nm의 값을 갖도록 설계했다. 이것과 연결되어 분산분포를 이루어야 하는 음분산(negative dispersion)의 적용되는 광섬유는 분산값이 -14 ps/km/nm의 값을 유지하면서 큰  $A_{eff}$ 를 가져야 한다. 또한, 접속특성 등 SSMF와의 양립성이 좋아야 하며, SSMF와 동일한 케이블링 조건 및 시공 운용환경 부하에서 비슷한 특성 거동을 보여야 한다. 이러한 광섬유는 사용 파장대에서 분산값의 부호가 음이므로 영분산 파장이 1550nm 이상으로 이동해야 한다. 음분산 광섬유는 분산값의 부호가 음이면서 동시에  $A_{eff}$ 를 최대로 하기 위해 SSMF의 계단형 굴절률 분포와 달리 광섬유 코어(core) 내 서로 다른 굴절률 분포를 갖는 다수의 영역을 갖게 하는 것이 필요하다. 일반적으로 광특성 간에는 trade off 관계가 성립하므로 여러 특성을 동시에 목표값에 맞추기가 어렵다. 광섬유 코어를 여러 영역으로 구성할 경우 굴절률 분포 변수가 증가하므로 단일 영역으로 구성한 경우보다 자유도가 증가하여 trade off 관계가 있는 여러 광특성을 동시에 목표값에 근사시키는 것이 가능하다. 반면 여러 영역의 굴절률 분포를 제어해야 하므로 제조 시 어려움이 있으므로 영역의 수를 적절히 결정하는 것이 중요하다. 음분산 광섬유는 분산과  $A_{eff}$ 를 조정하기 위하여 코어를 세 영역으로 나누었으며, 특히 유효 단면적을 증가시키기 위하여 두 번째 영역의 굴절률보다 세 번째 영역의 굴절률을 높게 하여 그림 3과 같은 구조를 도입하였다. 그림 3의 굴절률 분포를 갖는 광섬유의 아래 식 (5)에서 (12)로 표현되는 광특성 결정은  $R_1, R_2, R_3, \Delta_1, \Delta_2$  및  $\Delta_3$  등의 광섬유 구조 변수를 바꾸어 가면서 광특성 목표값과 각 목표값의 가중치(Weighting factor)로부터 도출한 에러를 최소화 할 수 있는 구조 변수값을 찾는 최적화 방법을 사용하였다. 표1과 같은 특성치를 갖는 설계된 광섬유는 MCVD방법을 이용하여 제작했다. 광섬유의 굴절률 분포(refractive index profile)로부터 광특성을 계산하는 방법을 아래에 나타내었다. 아래 방법에서는 기본모드의 전기장 분포(fundamental mode electric field distribution)  $F(R)$ 을 가우시안 근사법(Gaussian approximation method)을 사용하여 다음 식으로 표현한다[18].

$$F(R) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{\gamma R^2}{R_0^2}\right) & , R \leq R_0 \\ \sqrt{\frac{R_0}{R}} \exp(\gamma - 0.5 - (2\gamma - 0.5)R/R_0) & , R \geq R_0 \end{cases} \quad (13)$$

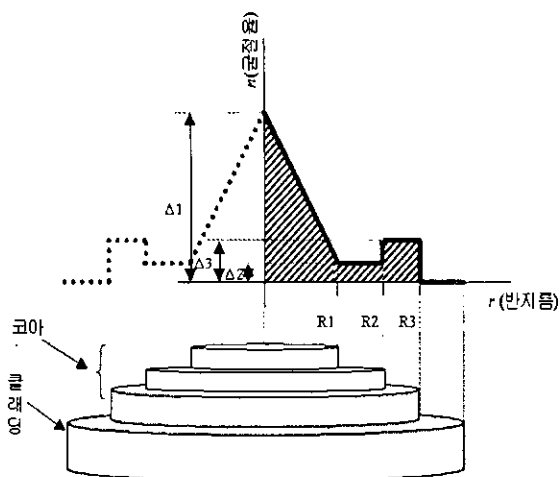


그림 3 음분산 광섬유의 굴절률 분포 형태  
Fig.3 Refractive index profile for negative dispersion fiber

여기서  $\gamma$ 와  $R_0$ 는 주어진 광섬유에 대한 상수이다. 최적  $\gamma$ 와  $R_0$ 는 eigen value를 최소화함으로써 찾아진다.  $A_{eff}$  및 MFD는  $F(R)$ 로부터 아래와 같이 계산되어 질 수 있다.

$$A_{eff} = \frac{2\pi \left[ \int_0^\infty F^2(R)RdR \right]^2}{\int_0^\infty F^4(R)RdR} \quad (14)$$

$$MFD = 2\sqrt{2} \left[ \frac{\int_0^\infty F^2(R)RdR}{\int_0^\infty (dF/dR)^2 RdR} \right]^{1/2} \quad (15)$$

색분산  $\sigma$ 은 재료분산  $\sigma_m$ 과 도파로 분산  $\sigma_w$ 의 합에 의해 아래 식으로 구해질 수 있다.

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_w \quad (16)$$

여기서,  $\sigma_m$ 과  $\sigma_w$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$\sigma_m = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2} \quad (17)$$

$$\sigma_w(\lambda, z) = \frac{\lambda}{2\pi^2 cnW(\lambda, z)^2} \left[ 1 - \frac{2\lambda}{W(\lambda, z)} \left( \frac{3}{2}g_1(z)\lambda^{0.5} + 6g_2(z)\lambda^5 \right) \right] \quad (18)$$

여기서  $\lambda$ 는 광파장,  $c$ 는 광속,  $n$ 은 굴절률,  $2W(\lambda, z)$ 는 MFD 그리고  $g_1(z)$ 와  $g_2(z)$ 는 상수이다. 레일리 산란손실(Rayleigh scattering loss)은 다음 식에 의해 구해질 수 있다.

$$\alpha_R(\lambda) = \frac{1}{\lambda^4} \frac{\int_0^\infty A(r)P(r)rdr}{\int_0^\infty P(r)rdr} \quad (19)$$

여기서  $A(r)$ 은 레일리 산란손실 계수이고  $P(r)$ 은 광섬유의

단면에서의 파워 분포이다. 레일리 산란손실은 굴절을 분포 높이  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  및  $\Delta_3$ 에 의존하게 되는데 일반적으로 굴절을 분포 높이가 줄어들면 레일리 산란 손실도 감소하게 된다. 구부림 손실(bending loss)은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\alpha_b = \frac{\sqrt{\pi}K^2 \exp\left(-\frac{2R\gamma^3}{3\beta^2}\right)}{2\gamma^{3/2}V^2\sqrt{R}[K_1(\gamma a)]^2} \quad (20)$$

여기서  $R$ 은 굴곡반경이고,  $a$ 는 광섬유 반경,  $V$ 는 정규 주파수,  $\beta$ 는 전파상수,  $K$ 와  $\gamma$ 는  $\beta$ 에 관련되는 상수 그리고  $K_1(\gamma a)$ 는 벡셀(Bessel) 함수를 나타낸다.

표 1 음분산 광섬유의 특성 설계값

Table 1 Characteristic design values for negative dispersion fiber

특성 항목	단위	설계값
분산, @1550nm	ps/km/nm	-14
분산기울기	ps/km/nm <sup>2</sup>	<0.13
차단파장	nm	<1400
유효 단면적	μm <sup>2</sup>	≥60
MFD, @1550nm	μm	9.0±0.5
손실, @1550nm	dB/km	<0.28

#### 4.2 분산 분포를 가지는 케이블 제작

개별 광섬유를 접속하여 SSMF와 NDF의 길이 비율이 3.4 대 2.6으로 유지되게 한 다음 케이블링을 하는 방식으로 케이블을 제작했다. 광섬유 접속부분에서의 기계적인 강도의 열화로 인한 케이블링 공정 중에서의 파단 및 신뢰성 감소의 문제를 해결하기 위하여 광섬유의 유리부분을 용착 접속한 후, 접속 부분에 자외선 경화 레진을 주입하고 자외선을 조사하여 접속점을 보강하는 방법을 적용했다. 케이블링의 적용 공정은 SSMF 케이블과 동일한 조건으로 했으며, 구조는 가장 범용적인 루스튜브(loose tube)형으로 광섬유 여러 가닥이 느슨한 형태로 수용된 광유닛 튜브를 중심 인장선 위에서 스트랜딩(stranding)되게 하여 케이블 코어를 성형한 후 외부 피복을 적용했다. 실제 제작된 케이블은 그림 4와 같은 구조를 갖는다.

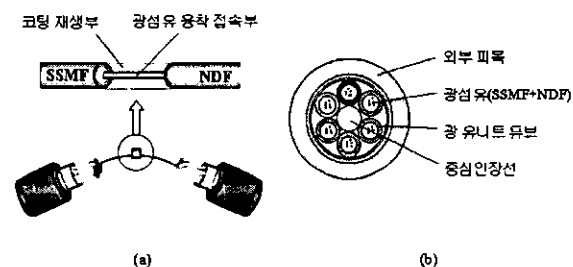


그림 4 분산 분포 케이블 구조

(a) 접속부 (b) 케이블 구조

Fig. 4 Cable structure for dispersion distribution

(a) Connection part (b) Cable structure

4.3 제작 결과

제작한 분산 분포케이블이 설계단계에서의 계산된 광학적인 성능과 시공 운용과정에서 요구되어지는 제반 기계환경적인 내구성 및 신뢰성을 유지할 수 있는지 시험했다.

4.3.1 광학적인 특성

제작된 NDF의 광학적인 특성의 측정결과를 SSMF와 비교하여 표 2에 나타내었다. NDF는 설계단계에서 확인한 것과 근사한 분산 특성값을 가짐을 확인했고, 파장에 따른 분산값을 그림 5에 나타내었다. 분산 분포 케이블의 전체길이에 대하여 확인된 특성 결과는 손실은 0.23 dB/km이고, 분산은 3.6 ps/km/nm이다. 유효 단면적은 72  $\mu\text{m}^2$  수준으로서 표 3에 나타낸 것과 같이 50GHz 채널 간격을 지원하는 새로운 NZDSF의 유효 단면적 65  $\mu\text{m}^2$ 와 비교할 때 10% 이상 큰 값을 가진다. 분산값은 극부적으로 +17 ps/km/nm 및 -14 ps/km/nm를 유지하면서도 평균 분산값은 새로운 NZDSF의 8 ps/km/nm와 대비하여 50% 이하 수준으로 작은 값을 가짐을 확인했다. 분산 분포케이블의 유효 단면적은 각 부분 길이의 비와 아래 식을 이용하여 계산하는 것이 가능하므로[17] 제안된 케이블에서는 이를 적용하여 등가 유효 단면적을 비교했다.

$$\Phi = \int_0^L \frac{n_2(z)}{A_{eff}(z)} \exp(-\alpha z) dz \quad (21)$$

음분산 광섬유의 손실과 PMD는 제조 공정의 추가적인 안정화를 통하여 개선할 수 있는 것으로 판단된다.

4.3.2 케이블링 특성 평가

SSMF와 NDF의 두 가지 종류의 광섬유를 사용하여 케이블 내에서 계산된 분산 분포가 유지되도록 하는 케이블링 작업이 가능함을 확인했고, 그림 6에서 보이는 것과 같이 케이블링 중에 손실증가량을 측정하여 비교한 결과 분산 분포 케이블은 SSMF와 동일한 수준의 케이블링 정합성이 있는 것으로 확인되었다.

4.3.3 케이블 신뢰성 평가

시공 및 운용 과정에서 케이블에 가해질 수 있는 외부 환경에 의한 부하를 고려하여 -40℃에서 +70℃의 온도변화를 2 사이클 동안 가하는 조건 및 최대 300 Kg의 인장부하를 가하는 조건하에서 광특성이 안정적으로 유지되는지를 측정하였다. 그림 7에서 알 수 있듯이 온도변화에 따른 손실 변화량이 0.03 dB/km 이하이고, 300 Kg이하의 인장부하에서 측정 가능한 손실변화가 없었으며 SSMF 케이블과 동일한 수준의 신뢰성을 확인하였다.

4.3.4 기계적인 특성

분산분포 케이블의 비틀림, 구부림, 압축 및 충격 등의 기계적인 외부 부하에 의한 특성의 변화 가능성은 Telcordia GR-20 CORE에 따라서 시험하고 SSMF 케이블과 비교한 결과는 표 4에서 보이는 것과 같이 동일한 수준의 특성값으로 확인되었다.

표 2 분산 분포 케이블의 광학적 특성

Table 2 Fiber characteristics of dispersion distribution cable

특성 항목	SSMF	NDF	분산분포케이블
분산(ps/km/nm), @1550nm	17	-14	3.6
분산기울기(ps/km/nm <sup>2</sup> )	0.055	0.1	0.078
차단파장(nm)	1280	1331	-
유효 단면적( $\mu\text{m}^2$ )	80	65	72
MFD( $\mu\text{m}$ ), @1550nm	10.2	9.0	-
손실(dB/km), @1550nm	0.20	0.26	0.25
PMD(ps/km <sup>0.5</sup> )	0.06	0.22	0.16

표 3 분산 분포 케이블과 NZDSF 케이블의 비교

Table 3 Comparison dispersion distribution cable with NZDSF

	분산 분포 케이블	종래의 NZDSF			새로운 NZDSF
		Truwave	LEAF	Truwave-RS	Teralight
분산 (ps/km/nm) @1550nm	3.6	~4	~4	~4	~8
분산기울기 (ps/km/nm <sup>2</sup> ) @1550nm	0.078	0.07	0.11	0.04	0.058
유효 단면적 ( $\mu\text{m}^2$ )	72	53	72	53	65
손실(dB/km) @1550nm	0.25	<0.22	<0.22	<0.22	0.21
PMD (ps/km <sup>0.5</sup> )	0.16	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1

표 4 분산 분포 케이블의 기계적인 특성

Table 4 Mechanical characteristics of dispersion distribution cable

시험 항목	시험 조건	시험 결과 손실변화(dB)	
		SSMF 케이블	분산분포 케이블
비틀림시험	2m X 180° X10회	0.00	0.00
구부림시험	20D X±90° X 25회	< 0.01	0.00
압축시험	220 N/cm X 5분	0.00	< 0.01
충격시험	1kg X 1m X10회	< 0.02	< 0.01

5. 결론

DWDM 방식의 광전송 시스템에서 초대용량의 전송을 위하여 전송 속도를 증가시키기 위해서는 작은 분산 값을 갖는 케이블이 유리하다. 그러나, 파장 간격을 좁게 하여 한정된 대역폭 내에서 많은 채널을 전송하려고 하는 경우 큰 분산 값을 갖는 케이블이 FWM의 비선형 현상을 억제하는 효과의 측면에서는 유리하다. 이처럼 두 개의 상반된 요구 사항을 동시에 만족시키는 정도를 평가하기 위해 FOM(Figure of Merit)의 지수를 새롭게 제시하고, 이것을 적용하여 케이블 전체 길이에서의 평균 분산 값을 낮게 유지시키면서도 국지적으로는 큰 분산 값을 가지게 함으로써, 이중적인 분산 특성을 나타내는 케이블을 설계하였다. 이를 위해 음분산 값을 갖는 새로운 NDF를 설계 및 제작한 후 SSMF와 거의 동일한 길이 비율로 케이블 내에 구성시키는 방법으로 설계된 케이블을 제작하였다. 제작된 케이블은 종래의 NZDSF보다 비선형 현상에 의한 신호왜곡을 억제하는데 유리한 높은 국지적 분산 절대값 14~17 ps/km/nm을 가진다. 또한, 상대적으로 큰  $72\mu\text{m}^2$ 의 유효 단면적을 가지면서도 3.6 ps/km/nm의 기존 NZDSF와 동일한 수준의 평균 분산 값을 가짐을 확인하였다. 이것은 50 GHz의 채널 간격을 수용하는 새로운 NZDSF 케이블의 분산 값 8 ps/km/nm과 비교할 때 50% 이하의 값을 나타내는 것이다. 또한, 제안된 케이블은 SSMF 케이블과 동일한 케이블 시공 운용 환경에서도 잘 정합함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] S. Shen, M. Naftaly, A. Jha and S. J. Wilson, "Thulium-doped Tellurite Glass for S-band Amplification", Optical Fiber Communication Conference, Technical Digest Series, TuQ1-2, Mar. 2001.
- [2] T. Tsuzaki, M. Kakui, M. Hirano, M. Onishi, Y. Nakai and M. Nishimura, "Broadband Discrete Fiber Raman Amplifier with High Differential Gain Operating over 1.65 $\mu\text{m}$ -band", Optical fiber Communication Conference, Technical Digest Series, Ma3-1, Mar. 2001.
- [3] K. Emura, "Multi-Terabit/s DWDM: Technologies and Perspectives", Optical Fiber Communication Conf., Technical Digest Series, ML1-1, Mar. 2001.
- [4] Z. Gills and A. Judy, "New Requirements for Long Haul Optical Transmission", National fiber Optic Engineers Conference, Technical Proceedings, PP.20-26, Aug. 2000.
- [5] A. J. Lucero, S. Tsusa, and V. L. da Silva, "320 Gbit/s WDM transmission over 450km of LEAF Optical Fiber", Annual Multiplexed Telephony Conference, 2000.
- [6] L. de Monotmoriilon, A. Bertaina, P. Sillard, L. Fleury, P. Nouchi, J. Chariot, S. Bigo, J. Hamaide "Optimized Fiber Terabit Transmission", International Wire and Cable Symposium, PP.38-44, Nov. 2000.
- [7] F. Elrefaie, R. E. Wanger, D. A. Atlas, and D. G. Daut, "Chromatic Dispersion Limitations in Coherent Lightwave Transmission Systems", IEEE J. Lightwave Technol., Vol.

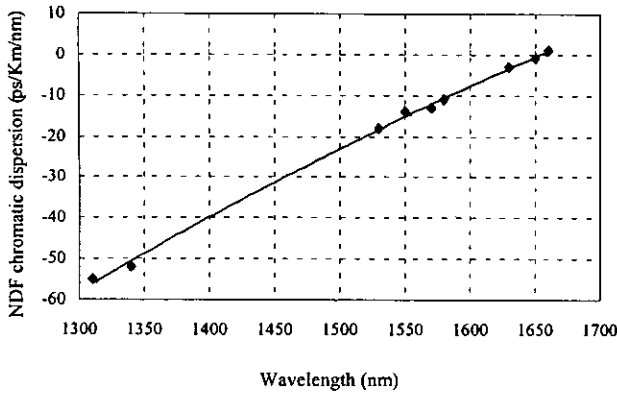


그림 5 음분산 광섬유의 분산곡선

Fig.5 NDF chromatic dispersion

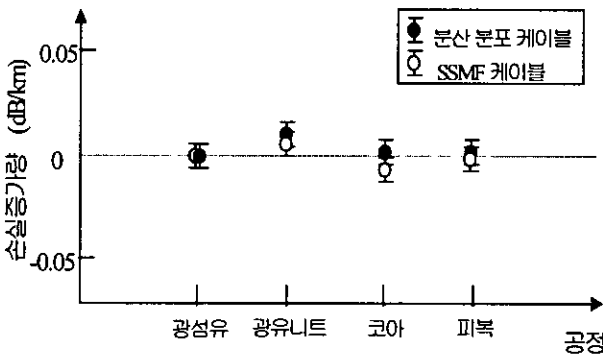


그림 6 케이블링 공정 중의 손실변화

Fig.6 Attenuation change during cabling process

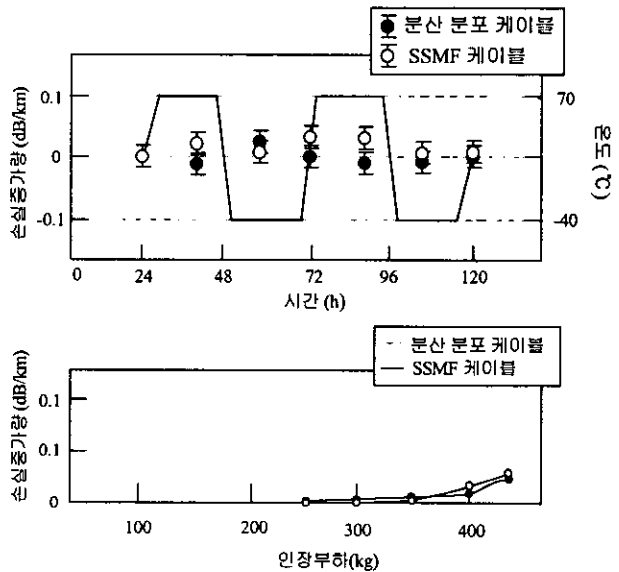


그림 7 온도변화 특성 및 인장부하 특성

Fig.7 Characteristic of cable under the temperature cycle and tensile load



- 6, No. 5, pp. 704-709, May, 1988.
- [8] G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", 2<sup>nd</sup> edition, Academic Press, New York, 1995.
- [9] S. Bigo, et al., "1.5 Tera bit/s WDM Transmission of 150 Channel at 10 G bit/s over 4×100km of Teralight™", ECOC '99, PD2-9, 1999.
- [10] M. Eiselt, L. D. Garrett and R. W. Tkack, "Experimental Comparison of WDM Systems Capacity in Conventional and Nonzero Dispersion Shifted Fiber", IEEE Photon, Technologies Letters, Vol. 11, No. 2, pp. 281-283, 1999.
- [11] J. Lee, G. H. Song and U. C. Peak, "Design and Fabrication of Dispersion-Managed Fibers by Periodic Etching during the MCVD Process", Electronics Letters, Vol. 37, No. 1, pp. 11-12, Jan. 2001.
- [12] V. A. Bhagauatula, G. Berkey, D. Chowdhury, A. Evans and M. J. Li", Novel Fibers for Dispersion-Managed High-Bit-Rate Systems," Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest Series, pp. 21-22, 1998.
- [13] Y. Miyajima, M. Ohashi and K. Nakajima, "Novel Dispersion-Managed Fiber for Suppressing FWM and an Evaluation of Its Dispersion Distribution", In Proc. OFC '96, Vol. PD7.
- [14] K. Nakajima, M. Ohashi, T. Horiguchi, K. Kurokawa and Y. Miyajima, "Design of Dispersion Managed Fiber and Its FWM Suppression Performance", In Proc. OFC, Vol. Th G3, pp. 87-89, 1999.
- [15] Bellcore GR-20-CORE, "Generic Requirements for Optical Fiber and Optical Fiber Cable", Issue 2, Jul. 1998
- [16] K. Nakajima, M. Ohasui, K. Shiraki, T. Horiguchi, K. Kurokawa and Y. Miyajima, "Four-Wave Mixing Suppression Effect of Dispersion Distributed Fibers", Journal of Lightwave Technology, Vol. 17, No. 10, pp. 1814-1821, Oct. 1999.
- [18] S. Yin, K. W. Chung, H. Liu, P. Kurtz and K. Reichard, "A New Design of Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber (NZ-DSF) with a Large Effective area over 100 $\mu\text{m}^2$  and Low Bending and Splice Loss", Optics Communications, 177(2000), pp. 225-232, 2000.
- [17] K. Mukasa and T. Yagi, "Dispersion Flat and Low Non-linear Optical Link with New Type of Reverse Dispersion Fiber(RDF-60)", Optical Fiber Communication Conference, Technical Digest Series, TuH7-1, Mar. 2001.

지 자 소개



박 의 돈 (朴 義 敦)  
1961년 1월 9일 생. 1986년 경북대 전자공학과 졸업 1991년 경북대 전자공학과 석사 졸업. 1986년~현재 LG 전선  
Tel : 054-469 7020, Fax : 054-469 7703  
E-mail : edpark@cable.lg.co.kr



정 윤 철 (鄭 允 喆)  
1956년 4월 30일 생. 1985년~1987년 AWU-DOE 연구소 1987년~1994년 AT&T Bell 연구소 1994년~현재 KAIST 교수  
Tel : 054-469 7020, Fax : 054-469 7703  
E-mail : ychung@ee.kaist.ac.kr



이 등 욱 (李 東 旭)  
1972년 9월 30일 생. 2000년 경북대 물리학과 석사 졸업. 2000년~현재 LG 전선  
Tel : 031-450 8017, Fax : 031-456 1041  
E-mail : genfiber@cable.lg.co.kr



조 영 기 (趙 榮 基)  
1954년 9월 12일 생. 1997년~현재 경북대 전자공학부 교수. 1992년~현재 국제전자파연합 한국대표 2000년~현재 한국전자파 학회 학술이사.  
Tel : 054-469 7020, Fax : 054-469 7703  
E-mail : ykcho@ee.knu.ac.kr



박 혜 영 (朴 惠 英)  
1976년 1월 27일 생. 1998년 이화여대 물리학과 졸업. 1998년~현재 LG 전선  
Tel : 031-450 8018, Fax : 031-456 1041  
E-mail : young2@cable.lg.co.kr



손 현 (孫 鉉)  
1935년 5월 27일 생. 1966년~1977년 주한 미육군 정보통신단 작전과 기술 지원실 기술부장. 1977년~현재 경북대 공과대학 전자공학과 교수.  
Tel : 054-469 7020, Fax : 054-469 7703  
E-mail : h0son@ee.knu.ac.kr



김 대 원 (金 大 原)  
1965년 10월 4일 생. 1990년 한양대학원 무기재료학과 졸업. 1996년~1997년 한국과학기술원 재료공학과 Post Doc. 1998년~현재 LG 전선 광통신연구소 전임연구원  
Fax : 031-456 1041  
E-mail : dwkim@cable.lg.co.kr