

대용량 DWDM 시스템을 위한 분산 분포 광케이블

정희원 박 의 돈*, 이 동 옥**, 박 혜 영***, 김 대 원****,

정 윤 철*****, 손 현*****, 조 영 기*****

Dispersion Distributed Fiber Optic Cable for Large-Capacity DWDM System

Euy-don Park*, Dong-uk Lee**, Hae-young Park***, Dae-won Kim****,

Yun-C Chung*****, Hyun Son*****, Yung-ki Cho***** *Regular Members*

요 약

DWDM 전송 시스템에서 전송 용량 증대를 위하여 bit rate를 고속화하고 채널 간격을 줄이기 위해서는 전송로로 사용되는 광케이블의 분산특성이 상반되는 값을 갖도록 요구된다. 즉, 분산으로 인한 신호 왜곡을 줄이기 위해서는 광케이블의 분산이 작아야 하고, 비선형 현상을 억제하기 위해서는 분산이 커야 한다. 이러한 두 가지 상반된 분산 penalty를 동시에 해결하기 위한 방안으로 양과 음의 분산 값이 이산적으로 분포된 광섬유 케이블을 최초로 설계 및 제작하였다. 이러한 분산 분포 케이블을 위해 일반 단일 모드 광섬유(SMF)와 대응되는 음분산 값을 갖는 새로운 광섬유(NDF)를 설계 및 제조한 후, SMF의 +17 ps/km/nm 및 NDF의 -15 ps/km/nm의 분산영역이 6 km의 케이블 내에 분포되도록 케이블을 제작하였다. 새롭게 개발된 케이블의 분산값은 국지적으로는 높은 값을 가지면서도 전체적으로는 1.0 ps/km/nm의 평균 분산값으로 NZSDF 대비 30% 이하를 가질 수 있음을 확인하였다. 또한, 제안된 케이블은 SMF 케이블과 동일한 케이블 시공 운용 환경에서도 정합함을 확인하였다.

ABSTRACT

The trend toward higher bit rate, narrower channel spacing and wider passband width in lightwave communication has increased interest in dispersion management that is to reduce dispersion penalty in high bit rate and suppress nonlinear effects simultaneously. New method of dispersion distribution during cable manufacturing process for dispersion management was exploited for the first time to suppress nonlinear effects induced signal distortion. We fabricated dispersion distributed cable which involves alternating sections of standard single mode fiber(SSMF) and newly designed negative dispersion fiber(NDF). It is shown that the fabricated cable keep the average dispersion value of an entire cable length close to zero while the local dispersion is around 17 ps/km/nm as absolute value. Moreover, the developed cable had good optical and mechanical properties and the feasibility of this cable for practical use was confirmed.

I. 서 론

파장 분할 다중화(dense wavelength division multiplexing: DWDM) 광 전송방식은 하나의 광선

유를 통해 서로 다른 파장의 신호를 동시에 전송하는 것으로서, 광증폭기(Erbium doped fiber amplifier: EDFA)의 이득 대역을 증대하기 위한 연구와 함께 이 기술을 기반으로 하여 장거리 전송

* LG전선 (edpark@cable.lg.co.kr),

** LG전선 (genfiber@cable.lg.co.kr),

*** LG전선 (young2@cable.lg.co.kr),

**** LG전선 (dwkim@cable.lg.co.kr),

***** KAIST 전자공학부 교수 (ychung@ee.kaist.ac.kr),

***** 경북대학교 전자공학과(h0son@ee.knu.ac.kr),

***** 경북대학교 전자공학과 교수 (ykcho@ee.knu.ac.kr)

논문번호 : K01167-0723, 접수일자 : 2001년 7월23일

선로에서 수 Tera bit/s 급의 전송 용량 구현에 관한 많은 연구 결과가 제시되고 있다^[1].

이러한 DWDM을 이용한 최대 용량의 광전송 기술의 구현은 한 개의 광 파장을 캐리어(carrier)로 해서 전송할 수 있는 bit rate를 가장 빠르게 하는 것과, 한 개의 광섬유를 통해서 실장할 수 있는 캐리어 파장의 수를 가장 많게 하는 것에 의해서 가능하다. 또한 최대 캐리어 파장을 처리하기 위해서는 얼마나 좁은 간격으로 인접파장을 위치 시켜서 전송할 수 있는가와, 사용할 수 있는 파장 대역을 얼마나 넓게 확보하여 전송하는가에 의해서 결정이 된다.

고속 bit rate를 전송시 광신호의 펄스 폭이 좁아짐으로 인해 신호 왜곡의 허용 수준이 감소하므로 이를 위해 광케이블의 분산(chromatic dispersion) 및 편광모드 분산(polarization mode dispersion: PMD)이 작게 유지되어야만 한다^[2]. 또한, 고속 bit rate 신호를 다채널로 다중화 하여 장거리 전송선로에 걸쳐서 신호 대 잡음비(signal to noise ratio: SNR)를 유지하기 위해서는 신호전력이 시스템의 전체길이에 따라 높은 수준으로 유지되어야 하므로 광섬유 굴절율의 광전력에의 의존성으로 인한 문제가 커진다^{[2],[3]}. 또한, 좁은 채널간격(channel spacing)으로 말미암아 선로 품질 저하를 야기할 수 있는 채널간의 상호작용이 해결되어야 한다. 이러한 사항은 모두 광케이블의 전송특성이 대용량 장거리 통신 부하에서 비선형적으로 거동하는 현상과 직접적으로 관련되어 있다^[3].

광섬유 내에 발생하는 비선형 현상은 실리카 분자의 유도산란에 의한 것으로서, 짧은 파장 신호의 광전력이 긴 파장 신호로 전달되어 광신호 대 잡음비를 감소시키는 라만 산란(stimulated Raman scattering: SRS)과 광섬유에 인가할 수 있는 최대 파워를 제한하는 브릴리언 산란(stimulated Brillouin scattering: SBS)이 있다. 또한, 비선형 굴절률에 의한 것으로 자기위상 변조(self-phase modulation: SPM), 상호 위상 변조(cross-phase modulation: XPM) 및 사광파 혼합(four wavelength mixing: FWM)이 있고^[4], DWDM과 같은 다 채널 통신방식에서 채널 간격을 감소시킬 경우 특히 문제가 되는 것은 FWM이다.

XPM은 광섬유 굴절률의 광전력에 대한 의존성으로 인해, 한 채널에서의 파워 요동(power fluctuation)이 다른 채널의 광 위상변화를 유발하는 것이다. 이러한 위상변화는 잔류 분산(residual

system dispersion)과 상호 작용해서 신호의 세기 왜곡으로 전환됨으로써, 수신단에서 잡음으로 간주되어 전송시스템의 성능을 저하시키게 된다^[5,6]. 이때 채널 간격과 분산값이 커질수록 작용하는 채널 간의 walk-off가 증가해서 국지적인 왜곡 발생을 피하는 조건이 되어 XPM 신호왜곡이 작아지게 된다^[5,6]. FWM은 광섬유 내에서 서로 다른 주파수를 갖는 두 개 이상의 광파들이 3차 전기 감수율(third-order electric susceptibility)에 의해 결합해서, 다른 파장의 새로운 광파를 만드는 현상으로, 이 새로운 광파가 다른 전파 채널과 간섭하여 누화를 야기하는 것이다. 분산 및 채널 간격이 클수록 FWM에 의해 발생하는 새로운 주파수 성분의 광전력의 세기는 위상 부정합(phase mismatching)이 용이해져서 감소되고, 전송거리가 길수록 또는 광섬유의 유효 단면적(effective area: A_{eff})이 작아질수록 커지게 된다^[3].

이와 같이 빠른 bit rate를 지원하고 분산 보상비용과 분산 보상의 복잡성을 피하기 위해서는 작은 분산값을 가지는 광섬유가 요구되는데 비해 비선형 현상에 의한 신호의 왜곡을 줄이기 위해서는 큰 분산값을 갖는 광섬유를 사용하여 채널 간 위상의 부정합을 유도해야 하므로, 이 두 가지를 동시에 만족시키기 위한 분산값의 최적화가 광케이블의 설계에서 고려되어 져야 한다. 또한 비선형 현상 억제를 위해 광섬유의 유효 단면적을 증가시켜야 한다. 이를 위한 기술적인 대안으로서 운용 중심 파장에서 종래의 약 17 ps/km/nm의 분산 값보다 작은 약 4 ps/km/nm 수준의 영이 아닌 분산값을 가지게 하여 비선형 신호 왜곡을 감소시키며 장거리 전송을 가능하게 하는 비영분산 천이 광섬유(non-zero dispersion shifted fiber: NZDSF)가 있다. 그러나 이러한 광섬유는 유효 단면적이 크지 않으면서 상대적으로 분산 값이 작아서 50 GHz 이하의 수준으로 채널 간격이 좁아지는 경우 FWM등의 비선형 현상을 충분히 억제하지 못하므로 전송거리가 매우 제한 될 수 있다는 점이 새로운 문제점으로 부각되고 있다^{[7],[8]}. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 운용 중심 파장에서 광섬유의 분산 값을 8 ps/km/nm 수준의 값을 갖게 하여 50GHz의 채널 간격에서도 비선형의 신호 왜곡을 효과적으로 억제시킬 수 있는 새로운 형태의 NZDSF가 제안되었다^[9]. 그러나 이것 또한 증가된 분산 값에 의한 추가적인 분산보상 비용이 발생하고, 분산 보상 주기가 짧아져서 시스템의 복잡성이 증가되는 한계를 여전

히 가지고 있는 것이다.

다른 방안은 케이블의 길이에 따라 분산 값이 다르게 분포되도록 하여 국지적으로는 큰 분산 값을 가지면서 케이블 전체 길이의 평균 분산은 작은 값을 갖도록 하여, 분산과 비선형 현상에 의한 신호왜곡 문제를 동시에 해결하는 것이다. 이러한 방법으로 최근 화학 증착법(modified chemical vapour deposition: MCVD)의 광섬유 모재 제조법으로 길이 방향으로 굴절률을 주기적으로 변화시켜 광섬유의 분산이 최대 +4 ps/km/nm에서 최소 -3 ps/km/nm로 약 7 km 주기로 변화하는 광섬유가 보고된바 있다^[10]. 또한, Bhgavatula 등은 외부 증착법(outside vapour deposition: OVD)을 이용하여 양 분산과 음분산이 길이 방향으로 분포되어 있는 광섬유를 제조한 바 있고^[11], Nakagima 등은 수직 증착법(vapour phase axial deposition: VAD)을 이용하여 광섬유의 클래딩(cladding) 외경을 변화시키는 방법으로 ± 1 ps/km/nm 분산값이 20 km의 주기로 변하는 광섬유를 제작하여, FWM의 비선형 억제효과가 있음을 보고한 바 있다^{[12],[13]}. 이러한 방법들은 광섬유의 모재 상태에서 외경 및 굴절률 분포형태(refractive index profile)를 조정하여 길이방향의 분산 분포를 형성시키는 것으로서, 단지 길이 방향으로 다른 분산 값을 갖는 광섬유의 제작 가능성을 보여주는 수준으로 실제로 완제품 케이블 상태로의 완성을 시도한 연구보고는 아직까지 없다.

실제로 주기적인 분산 분포를 갖는 광섬유를 케이블 완제품으로서 광선로에의 적용을 실현시키기 위해서는 케이블링(cabling)과정과 시공 및 운용 과정에서 취급이 가능한 길이를 만족해야 하며, 이러한 길이는 10 km보다 훨씬 작아야 실용성이 있다. 10 km보다 작은 케이블 길이에서 50 GHz의 채널 간격에서도 FWM을 충분히 억제하기 위해서는 절대값이 10 ps/km/nm 보다 큰 양과 음의 분산 분포가 요구된다^[13]. 그러나 위와 같은 연구는 이러한 케이블 길이의 주기 내에서 ± 10 ps/km/nm 수준의 분산 변화 분포를 얻는 것이 기존 광섬유 제조 방법으로는 곤란할 것으로 예측된다.

본 논문에서는 광케이블의 선형 평균 분산 값이 종래의 NZDSF의 수준이면서 새로운 NZDSF의 50% 이하 수준인 0~1 ps/km/nm 값을 유지하면서도 비선형 현상으로 인한 신호 왜곡을 효과적으로 억제하기 위한 방법으로 이산형 분산 분포를 갖는 광케이블을 설계했다. 즉 광섬유 모재(preform)의 분산 값을 변화시킨 분산 분포 케이블의 제작 방법

상 한계를 극복하고 실제적으로 선로에 적용 가능한 길이를 전제로 하여 새로운 분산 분포에 대한 설계개념과 제작방법을 제시하였다. 그리고 제안된 케이블을 직접 제작하여 분산 값의 분포, 기타 광학적인 특성 및 케이블의 기계 환경 적인 특성과 신뢰성을 측정하여 실제적인 적용이 가능함을 확인하였다.

II. 케이블의 분산 분포 설계

광케이블은 20년의 운용 기간 동안 외부 환경에 의한 응력하에서 광전송 특성의 열화가 허용범위 내에 유지되어야 한다. 시공 및 운용 중에 가해질 수 있는 기계 환경 적인 부하의 크기와 옥외 광케이블이 유지해야 되는 특성 값에 대한 일반 요구 사항은 산업 기준에 제시되어 있다^[14]. 본 논문에서는 분산 분포 케이블의 실제 적용에 관련된 기계 환경 적인 사항의 설계와 시험 평가는 종래의 표준 단일 모드 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, 관로 전체의 접속 수를 줄일 수 있어 광손실(optical power loss) 측면에서는 유리하지만, 케이블이 놓이게 되는 관로의 굽기, 직진성, 시공방법 및 포설 기술 등의 요인으로 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 늘어날 것으로 추측된다.

본 논문에서는 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 μm^2 로 넓어서 비선형 현상을 효과적으로 억제 할 수도 있다. 이러한 관점에서 본 논문에서는 SSMF의 사용을 전제로 하여 초고속 대용량 DWDM 전송 시스템에 적합한 분산 분포 케이블 구조를 조사했다.

광케이블을 n 부분으로 나누어 길이 방향으로 분

산 값의 변화를 갖는 예를 그림 1에 나타내었다. 여기서 i 부분 길이의 전파상수를 β_i , 분산 값을 D_i 라고 한다. β_i 와 D_i 는 각 부분 길이 내에서는 일정하다고 할 때, n 번째 부분 길이의 끝단에 나타나는 FWM에 의해 발생하는 광신호의 크기는 다음처럼 표현할 수 있다^[15].

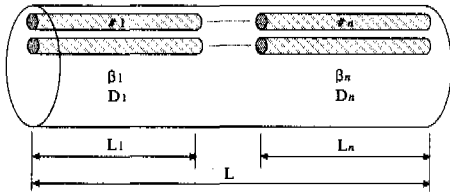


그림 1. 분산 값이 다른 n개의 부분으로 구성된 광케이블

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

여기서, n_{co} : 코어 굴절률

c : 광속

D : degeneracy factor

χ : 3차 비선형 감수율

A_{eff} : 광섬유의 유효 단면적

$P_q(0)$ ($q=i,j,k$): q 번째의 입력 파워

α : 광섬유의 손실

η 는 FWM 효율로서 아래 식으로 주어진다.

$$\eta = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\exp\{-\alpha + j\Delta\beta_i L_i\} - 1}{j\Delta\beta_i - \alpha} \prod_{j=1}^{i-1} \exp\{-\alpha + j\Delta\beta_j L_j\} \right] \quad (2)$$

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

$$\Delta\beta_n = -\frac{\lambda^4 \pi D_n}{c^2 d\lambda} \{ (f_i - f_{on}) + (f_j - f_{on}) \} (f_i - f_k) (f_j - f_k) \quad (3)$$

여기서 f_i, f_j, f_k 는 i, j 또는 k 번째의 입력파의 주파수이고, D_n 과 f_{on} 은 n 번째 부분길이의 분산 및 영분산 주파수를 나타낸다. 식 (1)에서 (3)을 통하여 케이블 전체 길이에 걸쳐 나타나는 FWM에 의한 새로운 주파수 성분의 광전력을 줄이기 위해서는 케이블 길이가 6 km이하로 주어질 경우, 케이블 길

이 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.

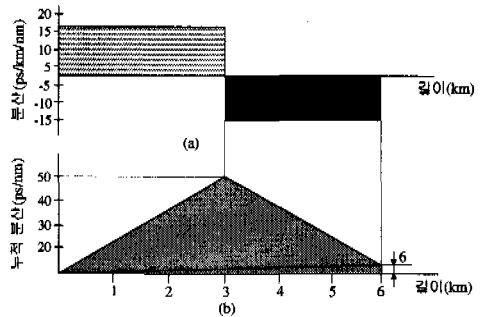


그림 2. 설계 케이블의 분산 분포
(a) 분산 분포 (b) 누적 분산 형태

주어진 케이블 길이에서 한 개의 부분 길이에 SSMF를 사용하는 것과 케이블 전체 길이의 평균 분산은 0 ps/km/nm가 되어야 한다고 가정할 경우, FWM 비선형 왜곡을 최대로 억제하기 위해서는 SSMF와 동일한 절대값의 음분산(negative dispersion)을 가져야 하고 동일한 길이 비율로 구성하여야 한다. 즉 SSMF가 약 +17 ps/km/nm의 분산 값을 가지므로 음분산 값은 -17 ps/km/nm이 되어야 하고, 3 km의 SSMF 부분 길이와 동일한 3 km의 부분 길이를 가지도록 하여 전체 케이블을 구성하는 것이 가장 효과적이다. 분산에 의한 신호왜곡을 방지하기 위해서는 케이블 전체 길이 내에서 평균 분산이 0 ps/km/nm이 되는 것이 이상적이지만, 분산보상 주기의 큰 희생이 없는 범위 내에서 어느 정도의 분산 값을 줌으로써 비선형 왜곡을 더욱 안정적으로 억제할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 케이블 전체 길이의 평균 분산 값이 1 ps/km/nm가 되도록 하여 종래의 NZDSF 대비하여 30% 수준의 분산 값을 갖도록 함으로써 3배 이상의 분산 보상 주기가 가능하도록 했다. 제안된 케이블의 분산과 누적 분산의 분포를 그림 2에 나타내었다.

III. 케이블 제작 및 설계

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 천이영역^{[10],[13]}이 길어지게 되어 이 부분에서 비선형 신호 왜곡이 발생될 수 있다.

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

1. 광섬유의 제작

양분산(positive dispersion)의 부분길이에 적용되는 SSMF는 계단형 굴절률 분포를 가지고 1550nm 파장에서 모드필드경(mode field diameter : MFD)이 10.2 μ 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 -15 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) 내에 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 (4)

에서 (11)로 표현되는 광특성 결정은 R1, R2, R3, Δ_1 , Δ_2 및 Δ_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^[16].

$$F(R) = \begin{cases} \exp\left(\frac{-\gamma R^2}{R_0^2}\right) & , R \geq R_0 \\ \sqrt{\frac{R_0}{R}} \exp(\gamma - 0.5 - (2\gamma - 0.5)R/R_0) & , R \leq R_0 \end{cases} \quad (4)$$

여기서 γ 와 R_0 는 주어진 광섬유에 대한 상수이다. 최적 γ 와 R_0 는 eigen value을 최소화함으로써 구해진다. A_{eff} 및 MFD는 F(R)로부터 아래와 같이 계산되어 질 수 있다.

$$A_{eff} = \frac{2\pi \left[\int_0^\infty F^2(R) R dR \right]^2}{\int_0^\infty F^4(R) R dR} \quad (5)$$

$$MFD = 2\sqrt{2} \left[\frac{\int_0^\infty F^2(R) R dR}{\int_0^\infty (dF/dR)^2 R dR} \right]^{1/2} \quad (6)$$

색분산 σ 은 재료분산 σ_m 과 도파로 분산 σ_w 의 합에 의해 아래 식으로 구해질 수 있다.

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_w \quad (7)$$

여기서, σ_m 과 σ_w 는 다음 식으로 표현된다.

$$\sigma_m = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad (8)$$

$$\sigma_w(\lambda, z) = \frac{\lambda}{2\pi^2 c n W(\lambda, z)^2} \left[1 - \frac{2\lambda}{W(\lambda, z)} \left(\frac{3}{2} g_1(z) \lambda^{0.5} + 6g_2(z) \lambda^5 \right) \right] \quad (9)$$

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

$$\alpha_R(\lambda) = \frac{1}{\lambda^4} \frac{\int_0^{\infty} A(r)P(r)rdr}{\int_0^{\infty} P(r)rdr} \quad (10)$$

여기서 $A(r)$ 은 레일리 산란손실 계수이고 $P(r)$ 은 광섬유의 단면에서의 파워 분포이다. 레일리 산란손실은 굴절률 분포 높이 Δ_1, Δ_2 및 Δ_3 에 의존하게 되는데 일반적으로 굴절률 분포 높이가 줄어들면 레일리 산란 손실도 감소하게 된다. 구부림 손실(bending loss)은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\alpha_b = \frac{\sqrt{\pi}K^2 \exp\left(-\frac{2R\gamma^3}{3\beta^2}\right)}{2\gamma^{3/2}V^2 \sqrt{R} [K_1(\gamma a)]^2} \quad (11)$$

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

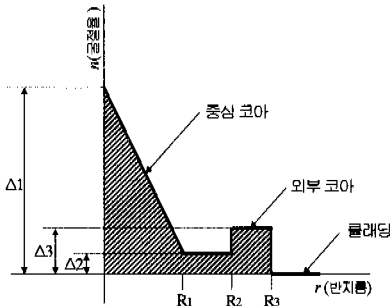


그림 3. 음분산 광섬유 케이블의 굴절률 분포 형태

표 1. 음분산 광섬유의 특성 설계치

특성 항목	단위	설계값
분산 @ 1550nm	ps/km/nm	-15
분산가속기	ps/km/nm ²	<0.15
차단파장	nm	<1450
유효 단면적	μm ²	≥65
MFD @ 1550nm	μm	9.0±0.5
손실 @ 1550nm	dB/km	<0.25

2. 분산 분포를 가지는 케이블 제작

개별 광섬유를 접속하여 SSMF와 NDF의 동일한 길이 비율이 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 적용공정은 SSMF 케이블과 동일한 조건으로 했으며, 구조는 가장 범용적인 루스튜브(loose tube)형으로 광섬유 여러 가닥이 느슨한 형태로 수용된 광유니트 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

2. 제작 결과

제작한 분산 분포케이블이 설계단계에서의 계산된 광학적인 성능과 시공 운용과정에서 요구되어지는 제반 기계/환경적인 내구성 및 신뢰성을 유지할 수 있는지를 시험했다.

1) 광학적인 특성

제작된 NDF의 광학적인 특성의 측정결과를 SSMF와 비교하여 표 2에 나타내었다. NDF는 설계단계에서 확인한 것과 근사한 분산값을 가짐을 확인했고, 파장에 따른 분산값을 그림5에 나타내었다. 분산 분포 케이블의 전체길이에 대하여 확인된 특성 결과는 손실은 0.23 dB/km이고, 분산은 1.0 ps/km/nm이다. A_{eff} 는 72 μm² 수준으로서 종래의 50 GHz 채널 간격을 지원하느는 NZDSF와 비교할 때 유효 단면적이 크다. 분산값은 국부적으로 +17 ps/km/nm 및 -15 ps/km/nm를 유지하면서도 평균 분산 값은 NZDSF 대비하여 30% 이하 수준으로 작은 값을 가짐을 확인했다. 분산 분포케이블의 유

효 단면적은 각 부분 길이의 비와 아래 식을 이용하여 계산하는 것이 가능하므로^[17] 제안된 케이블에서는 이를 적용하여 동가 유효 면적을 비교했다.

$$\Phi = \int_0^L \frac{n_2(z)}{A_{eff}(z)} \exp(-\alpha z) dz \quad (12)$$

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

표 2. 분산 분포 케이블의 광학적 특성

특성 항목	SSMF	NDF	분산분포케이블
분산(ps/km/nm) @1550nm	17.1	-15.1	1.0
분산기술기(ps/km/nm ²)	0.055	0.1	0.078
차단파장(nm)	1280	1331	-
유효 단면적(μm ²)	80	65	72
MFD(μm) @1550nm	10.2	9.0	-
손실(dB/km) @1550nm	0.20	0.26	0.25
PMD(ps/km ^{0.5})	0.06	0.22	0.16

표 3. 분산 분포 케이블과 NZDSF 케이블의 비교

	분산 분포 케이블	NZDSF		
		Truwave	LEAF	Truwave-RS
분산(ps/km/nm) @1550nm	1.0	~4	~4	~4
분산기술기 (ps/km/nm ²) @1550nm	0.078	0.07	0.11	0.04
유효 단면적(μm ²)	72	53	72	53
손실(dB/km) @1550nm	0.25	0.22	0.22	0.22
PMD(ps/km ^{0.5})	0.16	0.1	0.1	0.1

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.

3) 케이블 신뢰성 평가

시공 및 운용 과정에서 케이블에 가해질 수 있는 외부 환경에 의한 부하를 고려하여 -40°C에서 +70°C의 온도변화를 2 사이클 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/km이하이고, 300 Kg이하의 인장부하에서 측정 가능한 손실변화가 없었으며 SSMF 케이블과 동일한 수준의 신뢰성을 확인하였다.

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 4. 분산 분포 케이블의 기계적인 특성

시험 항목	시험 조건	손실변화(dB)	
		SSMF 케이블	분산분포 케이블
비틀림시험	2m X 180° X10회	0.00	0.00
구부림시험	20DX±90° X25회	0.00	0.00
압축시험	220 N/Cm X 5분	< 0.01	< 0.02
충격시험	1Kg X 1m X10회	< 0.01	0.00

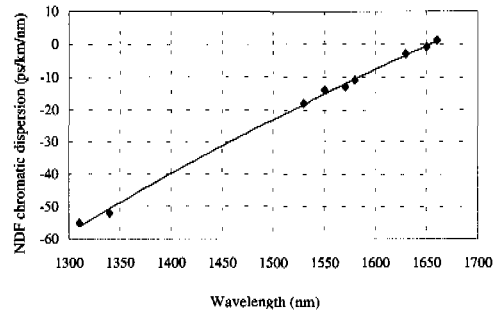


그림 5. 음분산 광섬유의 분산곡선

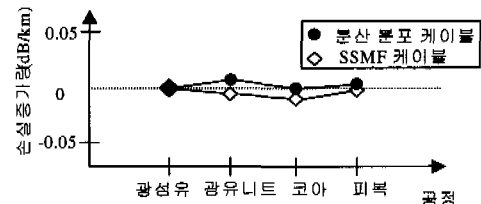


그림 6. 케이블링 공정 중의 손실변화

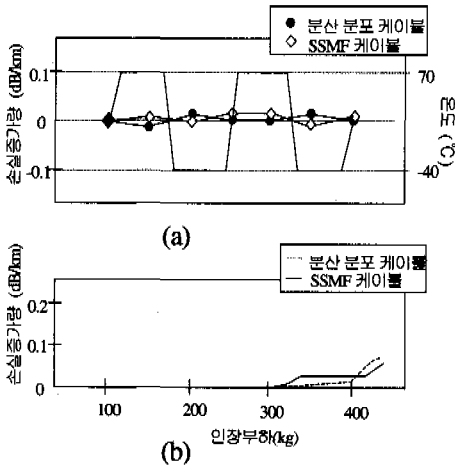


그림 7. 온도변화 특성 및 인장부하 특성

IV. 결론

DWDM 전송 시스템에서 전송 용량 증대를 위하여 bit rate를 고속화하고 채널 간격을 줄이기 위해서는 전송로로 사용되는 광케이블의 분산특성이 상반되는 값을 갖도록 요구된다. 즉, 분산으로 인한 신호 왜곡을 줄이기 위해서는 광케이블의 분산이 작아야 하고, 비선형 현상을 억제하기 위해서는 분산이 커야 한다. 이러한 두 가지 상반된 분산 penalty를 동시에 해결하기 위한 방안으로 양과 음의 분산값이 이산적으로 분포된 광섬유 케이블을 최초로 설계 및 제작하였다. 이러한 분산 분포 케이블을 위해 SSMF와 대응되는 음분산 값을 갖는 새로운 광섬유를 3-segmented core 구조를 갖도록 설계 및 제조한 후, SSMF의 +17 ps/km/nm 및 NDF의 -15 ps/km/nm의 분산영역이 6 km의 케이블 내에 분포되도록 케이블을 제작하고 특성을 확인하였다. 그 결과 케이블의 분산값은 국지적으로는 높은 값을 가지면서도 전체적으로는 1.0 ps/km/nm의 평균 분산값으로 NZSDF 대비 30% 이하를 가질 수 있음을 확인하였다. 제안된 케이블의 등가 유효 면적은 72 μm^2 로서, 기존의 NZSDF의 53~72 μm^2 와 비교할 때 큰 수준을 유지함을 확인하였고, 굴곡, 온도 변화, 인장, 비틀림 및 충격 등의 기계, 환경적인 부하 시험을 한 결과 SSMF 케이블과 동일한 케이블 시공 운용환경에서도 잘 정합함을 확인하였다.

참고 문헌

[1] K. Emura, "Multi-Terabit/s DWDM; Technolo-

gies and Perspectives", *Optical Fiber Communication Conf, Technical Digest Series, ML1-1*, Mar. 2001.

[2] F. M. Madani and K. Kikuchi, "Design Theory of Long-Distance WDM Dispersion-Managed Transmission System", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17, No. 8, pp. 1326-1335, Aug. 1999.

[3] R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy, F. Forghieri, A. H. Gnauck and R. M. Derosier, "Photon Mixing and High-Speed WDM System", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13, No. 5, pp. 841-849, May. 1995.

[4] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 2nd edition, Academic Press, New York, 1995.

[5] H. J. Thiele, R. I. Killey and P. Bayvel, "Influence of Transmission Distance on XPM-Induced Intensity Distortion in Dispersion-Managed Amplified Fiber Link", *Electronics Letters*, Vol. 35, No. 5, pp. 408-409, Mar. 1999.

[6] H. J. Thiele, R. I. Killey and P. Bayvel, "Influence of Fiber Dispersion and Bit Rate on Cross-Phase-Modulation-Induced Distortion in Amplified Optical Fiber Links", *Electronics Letters*, Vol. 34, No. 21, pp. 2050-2051, Oct. 1998.

[7] S. Bigo, et al., "1.5 Tera bit/s WDM Transmission of 150 Channel at 10 G bit/s over 4x100km of TeralightTM", *ECOC '99*, PD2-9, 1999.

[8] M. Eiselt, L. D. Garrett and R. W. Tkach, "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.

[9] 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.

[10] J. Lee, G. H. Song and U. C. Peak, "Design and Fabrication of Dispersion-Managed Fibers by Periodic Etching during the MCVF Process", *Electronics Letters*, Vol. 37, No. 1, pp.

11-12, Jan. 2001.

- [11] V. A. Bhagavatula, 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.
- [12] 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, 1996.
- [13] 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.
- [14] Bellcore GR-20-CORE, "Generic Requirements for Optical Fiber and Optical Fiber Cable," Issue 2, Jul. 1998.
- [15] 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.
- [16] 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.

박 의 돈(Euy-don Park)

정회원



1986년 2월 : 경북대학교
전자공학과 졸업
1991년 2월 : 경북대학교
전자공학과 석사
1986년 3월~현재 : LG 전선
<주관심 분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학

이 등 욱(Dong-uk Lee)

정회원

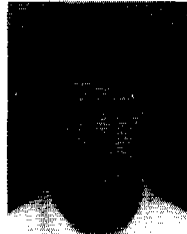


1998년 2월 : 경희대학교
물리학과 졸업
2000년 2월 : 경희대학교
물리학과 석사
2000년 3월~현재 : LG 전선

<주관심 분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학

박 해 영(Hae-young Park)

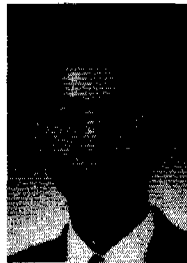
정회원



1998년 2월 : 이화여대
물리학과 졸업
1998년 3월~현재 : LG 전선
광통신 연구소
<주관심 분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학

김 대 원(Dae-won Kim)

정회원



1990년 2월 : 한양대학원 무기
재료학과 졸업
1996년~1997년 : 한국과학기술원
재료공학과 Post Doc.
1998년 1월~현재 : LG 전선
광통신연구소 전임연구원
<주관심 분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학

정 윤 철(Yun-C Chung)

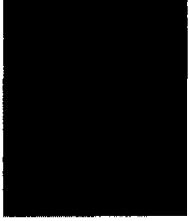
정회원



1985년~1987년 : AWU-DOE
연구소
1987년~1994년 : AT&T Bell
연구소
1994년~현재 : KAIST 교수
<주관심 분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학

조 영 기(Yung-ki Cho)

정회원



1997년~현재 : 경북대학교 전자
공학부 교수

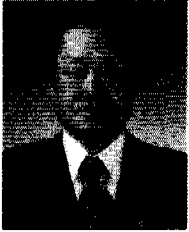
1992년~현재 : 국제전자파연합
한국대표

2000년~현재 : 한국전자파 학회
학술이사

<주관심 분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학

손 현(Hyun Son)

정회원



1966년~1977년 : 주한 미육군
정보통신단 작전과 기술
지원실 기술부장

1977년~현재 : 경북대학교 공과
대학 전자공학과 교수

1993년~현재 : 연세대학교 부설
전파 통신 연구소
연구위원

<주관심 분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학