

초고속 광신호전송에서 광섬유 편광모드분산의 영향

이봉영, 정 준, 서동흡

한국통신 연구개발원, 서울시 서초구 우면동 17

광전송이 초고속화되면서 광전송시스템의 성능에 영향을 미치는 여러가지 물리적 현상 중에서 광섬유의 편광모드분산에 관하여 고찰하였다. 단일모드 광섬유의 편광특성 해석은 Principal States of Polarization의 변화에 대한 확률모델로서 Maxwell분포를 갖는 확률분포함수를 적용하였다. 이 가정하에서 IM/DD 광통신시스템에서 편광모드분산으로 인한 파워페널티를 해석적으로 구하였고, Maxwell 확률모델로부터 시스템의 페이딩 특성을 예측하고 이를 기준으로 전송용량의 한계 및 미래의 대용량 광전송시스템의 전송방식에 대해서도 검토하였다.

I. 서 론

통신기술은 광섬유를 이용한 통신이 가시화되면서 전송속도의 고속화가 급격하게 진전되었다. 선진국들은 정보화사회의 건설이라는 목표하에 사회간접자본으로서 초고속정보통신망을 구축하여 우선적으로 멀티미디어서비스를 제공하려고 한다. 이는 1970년대 초반의 저손실 광섬유의 개발과 1980년대 부터 통신용반도체레이저가 개발되므로써, 통신에서 중추신경 역할을 할 광통신의 싹을 트게 하였고, 최근에는 20기가비트 광전송시스템의 상용화 직전까지의 눈부신 기술발전이 있었다. 이는 데이터당 전송비용이 기존의 구리선을 이용하는 것보다 저렴한 광통신기술이 개발되었기 때문이다.

현재 우리나라에서 사용되고 있는 광전송장비로는 155Mbps, 622Mbps 광전송시스템이 있고 2.5Gbps시스템은 상용화가 시작되고 있는 단계에 있다. 지금까지는 전광-광전 변환 과정을 거쳐야 하는 광신호재생증폭기였다. 그러나 이제부터는 광통신의 또하나의 획기적 기술 전→광변환이 필요없는 EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)라는 광증폭기가 개발되므로써, 수십기가비트 이상의 광전송시스템에 대한 연구가 활발히 진행되어서 가까운 미래에는 광전송시스템의 전송용량, 즉 전송속도×전송거리(Gbps·km)를 광파주파수영역

(테라헤르쯔= 10^{12} Hz)인 테라급으로까지 발전될 것이다.

광전송시스템에서 전송용량을 제한하는 여러가지 물리적 현상들이 광섬유안에서 일어나는데, 일반적으로 널리 알려져 있는 것이 광섬유색분산의한 광신호펄스폭 커짐이다. 색분산은 광섬유에서 일어나는 선형현상 중 대표적인 것이라 할 수 있다. 또한 비선형현상 중에서 광펄스파워페널티를 일으키는 대표적인 것은 자기위상변조라 할 수 있다. 이밖에 최근의 광증폭기를 사용한 광전송로 상에서는 높은 광파워로 인한 현상들로서 유도라만산란, 유도브릴리안산란과 같은 유도산란현상과 Induced Modulation Instability들을 주로 고려하고 있다.

그런데 최근 광통신기술이 급속히 발전하면서 CATV망의 지중선 설치 및 심기가 이상의 광전송기술이 개발되면서 광섬유의 편광모드분산(Polarization Mode Dispersion, PMD)도 광전송시스템의 전송용량에 영향을 미치는 제한적 요소가 될 수 있다는 것이다[1]-[3].

본 논문에서는 이상에서 언급한 광전송시스템의 성능에 영향을 미치는 여러가지 물리적인 현상들 중에서 편광모드분산에 대해서 고찰한 것이다. 특히, 본 논문은 우리나라의 교체 혹은 신규 광통신망 설계시 고려하여야 할 규격으로서 적절한 광섬유의 편광모드분산치는 어느정도여야 하는가에 대한 연구이다.

II. 광섬유의 편광모드분산

단일모드광섬유는 광펄스의 편광적 관점에서 보면 두 모드의 광섬유라고 할 수 있다. 이상적인 단일모드 광섬유는 매질이 등방성이므로 기하학적인 구조가 원형이기 때문에, 편광이 서로 직교하는 축퇴된 두개의 전파모드를 가질 수 있다. 이 두 모드는 편광의 고유모드(Polarization Eigenmode)로서, 전파속도, 즉 전파상수가 서로 같으며, 한 편광모드만을 갖고 전파하는 광의 이상적인 경우는 다른 편광모드를 갖는 광과 서로간에 상호작용이 일어나지 않는다.

실제적으로는 광섬유의 제조과정, 포설과정에서 생기는 물리적 비대칭성 및 포설된후에 주위의 온도변화, 압력 등 광섬유의 외부 환경변화에 따른 물리적 비대칭적 변형 등으로 인하여, 두 모드간의 전파상수차이가 유발되어 전송속도도 달라서 전파하는 광의 두 모드간에 상호작용이 빈번히 일어나게 된다. 이러한 이유로 광섬유의 편광모드분산(Polarization Mode Dispersion, PMD)이 생긴다 [4][5]. PMD로 인하여 광섬유를 전파하는 선형편광펄스의 두가지 변화는 광펄스폭 커짐(군지연속도차 $\Delta\tau$)과 Depolarization인데, 이는 수신감도를 나쁘게 한다.

광전송로는 광섬유의 길이가 수km 이상이므로 해석을 위해서 긴 거리 동안 많이 일어나는 모드 간의 상호작용(mode coupling)을 전부 고려하기가 곤란하므로, 고유편광모드법으로는 단일모드광섬유의 편광특성을 정확히 해석할 수 없다. 그러므로 광펄스의 편광주상태(principal states of polarization, PSP)의 개념을 적용하는 것이 편리하고 물리적 의미도 있다 [6]

PSP의 개념은, 손실이 편광 상태에 무관한 임의의 광학전파매질에는 다음 두 가지의 성질을 만족하는 두 개의 직교입력편광상태가 항상 존재한다는 실험적 사실에 기초를 둔다.

성질 1) 직교하는 두 개의 입력 편광상태에 해당하는 각각의 출력도 서로 직교한다.

성질 2) 이 직교하는 두개의 출력편광상태는 적어도 일차적으로는 입력파장에 무관하다.

이러한 조건을 만족시키는 두 직교선편광상태

를 PSP라 하며, 이는 임의의 길이의 광섬유에 입력되는 임의의 광신호를 해석하는 유용한 basis set으로 활용할 수 있다.

편광보존광섬유 등과 같이 두 편광모드간의 상호작용이 적은 특수한 경우는 두 편광모드의 군지연속도차 $\Delta\tau$ 가 광섬유 길이에 비례하게 된다. 그러나, 실제로 포설되어 있는 광섬유인 경우는 두 편광모드간의 상호작용이 커서 $\Delta\tau$ 가 광섬유길이(L)의 제곱근으로 나눈 값으로 PMD를 정의한다.

광섬유 PMD가 색분산과 다른 가장 중요한 점은 어떤 한 광섬유의 색분산은 시간에 따라 변하지 않는 일정한 값은 (보통의 단일모드 광섬유의 경우 파장이 1.55 μ m에서) $D=17ps/km/nm$ 정도을 가지나 편광모드분산은 주변의 온도변화 등에 따라서 시간적으로 임의로 변한다는 것이다. 측정된 전송링크의 총합분산치에 대하여 한번 보상을 하여주면 색분산에 의한 파워페널티는 계속 낮게 유지할 수 있다. 그러나, PMD의 경우는 어떤 한 시점에서 측정된 분산치를 고려하여 시스템을 설계하여도 시간에 따른 수신감도의 악화가 더 심하게 일어날 가능성이 있다는 것이다. PMD는 변수로서 취급하여야 하므로 확률적 모델링을 하여야 한다.

두 PSP 간에 PMD 때문에 생기는 전송속도차 $\Delta\tau$ 는 여러 이론적, 실험적 연구결과에 의하면 다음과 같은 Maxwell 분포를 가장 잘 따른다고 알려져 있다[7]-[10]. 즉, 충분히 긴 어떤 광섬유에서 두 PSP 간의 군지연속도차 $\Delta\tau$ 를 갖기 위한 확률밀도함수는

$$f(\Delta\tau) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\Delta\tau^2}{\tau^3} \exp\left(-\frac{\Delta\tau^2}{2\tau^2}\right) \quad (1)$$

로 표현된다.

PMD로 인한 $\Delta\tau$ 가 Maxwell분포를 따르는 가 하는 문제는 아직도 논란의 여지가 있으나, 지금까지 알려진 여러 확률밀도함수 중에서 PMD로 인한 여러 현상이 가장 잘 설명되는 것으로 알려져 있으므로, 본 논문에서도 이러한 PMD의 통계적 모델을 택하여 이용하였다.

본 논문에서 고려하는 광전송시스템구성도가 그림1이다. DFB 레이저에서 나오는 광신호의 파장은 1.55 μ m로 가정하였고, 외부 변조기를 사용하여 변조하고, 변조기에 의한 주파

수치평은 무시할 만큼 작다고 가정하였다. 여기서의 관심은 PMD에 의한 파워페널티가 얼마인가 하는 것이므로, 광섬유손실과 색분산 등에 의한 효과는 일단 무시한다.

어떤 광전송시스템에서 PMD에 의하여 유발되는 파워페널티는 시간에 따라서 임의적으로 불규칙하게 변하게 되므로, 이러한 시스템은 마치 무선전송시스템에서와 같은 신호의 페이딩현상이 일어나는데 이는 참고문헌[11]의 내용을 기본으로 인용한 것이다.

그림1에서 편광에 무관한 일정한 시간지연을 무시한다면, 어떤 입력신호 $P_{in}(t)$ 에 대하여 출력신호 $P_{out}(t)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{out}(t) = \gamma P_{in}(t + \Delta\tau/2) + (1 - \gamma) \cdot P_{in}(t - \Delta\tau/2) \quad (2)$$

여기서 γ 는 두 PSP에 입력되는 광신호 크기의 비율이며, 0 ~ 1 사이의 값을 갖는다. $\Delta\tau$ 는 PMD의 크기를 나타내는 것으로써 입력신호의 두 직교하는 PSP 편광 성분 간의 군지연속도차이다. 입력펄스의 폭 τ_{in} 을 입력신호 $P_{in}(t)$ 의 제곱근평균값으로 정의하고 위의 식을 사용하면, 출력신호 $P_{out}(t)$ 의 폭 τ_{out} 은 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_{out}^2 = \tau_{in}^2 + \Delta\tau^2 \gamma(1 - \gamma) \quad (3)$$

이와 같은 광펄스폭 커짐은 광수신기에 두가지 악영향을 미치게 된다. 하나는 인접하고 있는 두bit간의 가간섭현상 일으킴이고, 다른 하나는 광펄스폭이 증가하면서 에너지의 일부분이 다른bit펄스로 합해지면서 원래 신호펄스의 피크파워와 총에너지가 감소하여, 결과적으로 수신기 판단회로의 신호대잡음비(SNR)를 나쁘게 하는 것이다. 수신기의 수신 감도를 일정하게 유지시키려면 SNR이 같아야 하므로, 위의 경우는 수신기의 동일한 성능을 위해서는 더 많은 신호파워가 필요하다는 의미이고, 다시 말하면, PMD에 의하여 파워페널티가 유발되었다는 것이다.

펄스폭 커짐에 의한 파워페널티를 정확히 수치적으로 구하는 것은, 정확한 신호펄스의 모양, 수신기의 구조, 여러가지 필터의 정확한 모양 등을 알아야 하므로, 여러가지 어려운

점이 따른다. 그러나, 몇가지를 가정하면, 적어도 근사적으로는 PMD에 의한 파워페널티를 예측할 수 있고, 이로 인하여 많은 정보를 얻을 수 있다. 우선, τ_{out} 이 τ_{in} 에 비하여 그다지 크지 않다고 가정한다. 이러한 가정은 계산을 단순화 하기 위해서도 필요하고 PSP의 대역폭 조건을 만족시키기 위한 조건도 된다. PMD에 의한 펄스폭 커짐이 크지 않다고 하면, 식(3)로 부터 펄스폭이 벌어지는 비율 τ_{out}/τ_{in} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\tau_{out}}{\tau_{in}} \approx 1 + \frac{\Delta\tau^2 \gamma(1 - \gamma)}{2\tau_{in}^2} \quad (4)$$

IM/DD 전송시스템의 변조형태를 Non-Return-To-Zero (NRZ) 형태라고 하고, 광펄스가 이상적인 square pulse일 때를 생각하면, 데이터 스트림을 구성하는 각각의 펄스폭 T(full width)는 전송비트속도가 B일때 1/B로 나타내어 지며, 맥스웰분포를 갖는 제곱근평균펄스폭 τ_{in} 과 T의 관계는

$$\tau_{in} = \frac{T}{2\sqrt{3}} \quad (5)$$

로 된다. 이러한 시스템의 파워페널티를 펄스폭 커짐에 의한 피크파워 감소를 보상할 수 있는 크기라고 단순히 정의하면, 지금까지 얻은 식들로 부터 구할 수 있는데, 이를 dB단위로 나타내면

$$\begin{aligned} \text{penalty(dB)} &= 10 \log \left(\frac{\tau_{out}}{\tau_{in}} \right) \\ &\approx 10 \log \left(1 + \frac{\Delta\tau^2 \gamma(1 - \gamma)}{2\tau_{in}^2} \right) \\ &\approx 26 B^2 \Delta\tau^2 \gamma(1 - \gamma) \end{aligned} \quad (6)$$

와 같이 된다. 식(6)은 PMD에 의한 파워페널티를 수치적 형태로 얻으려고 단순한 몇가지를 가정하여 얻은 식이다. 그러나, 조금더 일반화시킨 수치해석 방법으로 얻은 결과와 크게 다르지 않을 뿐더러, 파워페널티, 전송속도와 PMD와의 관계를 잘 보여주고 있다.

일반적으로 PMD에 의한 평균파워페널티는

$$\langle \text{penalty(dB)} \rangle = 5.1 \cdot B^2 \cdot L \cdot (\text{PMD})^2 \quad (7)$$

로 PMD량으로 고려하고 있는데, 이식은 간단한 시험적식이므로, 실제 시스템의 설계를 위

해서 어떤 규격치로서의 PMD 값을 제시하는 데는 적절하지 않다.

어떤 데이터 전송시스템이 안정된 동작을 요구하는 조건을 정하는 것은 다분히 임의적이지만, 여기서는 다음과 같은 요구조건을 생각하였다.

PMD에 관한 데이터전송시스템 조건 :
PMD에 의한 파워페널티가 1dB 이상 되는 시간은 1년에 30분 미만

이 조건은 보통의 상용전송시스템이 큰 데이터 손실 없이 안정적으로 동작하기 위해서는 시스템 페이딩이 적어도 앞에서 제시한 정도이면 수용할 수 있다고 보는 것이다.

식(7)를 조금 형태를 바꾸어 보면

$$\langle \text{penalty}(\text{dB}) \rangle \geq 6.5 \cdot B^2 \cdot L \cdot \text{PMD}^2 \cdot 10^{-6} \quad (8)$$

이 되는데, 여기서 10^{-6} 은 B를 Gbit/sec로, L을 km로, PMD를 $\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ 등, 각 변수를 흔히 쓰는 단위로 나타내기 위한 조정상수이고 γ 는 최악의 경우를 고려해서 1/2로 하였다. 여기서 PMD는 시간에 따라 임의로 변하는 불규칙 변수이므로 파워페널티도 시간에 따라 변하게 된다.

이 파워페널티가 1이 넘는 빈도수(=30분/1년)이므로, 위의 식(8)에 파워페널티를 1로 놓았을 때 얻어지는 PMD값은 앞에서 주어진 Maxwell 분포의 $4.72 \times \tau$ 밖의 영역

$$\int_x^\infty \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{4\tau^2}{r^3} \exp\left(-\frac{4\tau^2}{2r^2}\right) d4\tau \leq 5.71 \times 10^{-5} \quad (9)$$

을 만족시키는 x 여야 한다. 여기에 평균값 $\langle \text{PMD} \rangle = 4\tau / (2\pi)^{1/2}$ 를 이용하면, 위에서 제시한 조건을 만족시키는 시스템의 조건은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$B^2 (\text{Gbit/sec}) \cdot L (\text{km}) \leq \frac{1.76 \times 10^4}{\langle \text{PMD} (\text{ps}/\sqrt{\text{km}}) \rangle^2} \quad (10)$$

식(10)이 본 논문에서 최종적으로 구하고자 하는 PMD에 의한 전송거리한계를 의미하는 식이다.

III. 초고속 광전송시스템에서 광섬유편광모드 분산의 영향

식(10)를 이용하여 그림2에 몇개의 PMD 값에 대하여 전송속도와 전송거리의 관계치 관계를 나타내었다. 그림2에서 보는 것처럼 전송속도가 2.5Gbps 이하 일 때는 전송거리의 한계가 수백km 이상이므로 시스템 성능이 PMD에 의하여 제한되는 것이 아니고, 광섬유의 색분산이나 광중폭기의 잡음, 또는 자기위상변조와 같은 비선형현상 등에 의한 파워페널티가 시스템 성능을 제한하는 요소임을 보여주고 있다. 그러나 10Gbps 이상으로 올라갈수록 PMD에 의해서 급격하게 전송거리가 짧아지므로 광섬유의 PMD가 어떤 값을 갖느냐가 중요한 문제가 된다는 것이다.

실제로, 포설된 광섬유의 PMD값이 $1 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$ 정도일 때, 2.5Gbps 전송시스템의 경우 약 2800km 정도가 한계전송거리로 되지만, 육상전송거리에서는 수백km에 한번은 소위 3R 중계기(Retiming, Reshaping, Regeneration Repeater)를 이용하여 신호를 깨끗하게 재생하기 때문에 PMD가 전혀 문제되지 않는다. 대륙간과 같은 장거리전송에서도 그 영향이 매우 적다고 할 수 있다. 10Gbps 정도라도 PMD에 의한 전송거리 한계치가 약 180km 정도이므로, 수백km의 전송시스템에서는 PMD에 의한 신호페이딩이 발생할 소지가 많기 때문에, 기존의 광섬유를 이용한 10Gbps 시스템은 적절하지 않다는 것이다.

그림3은 광섬유의 색분산에 의해 제한되는 전송속도와 전송거리와의 관계를 PMD 결과치와 비교한 것이다. 두 결과를 비교하여 보면, 우리가 $1.55\mu\text{m}$ 광신호를 분산천이 광섬유가 아닌 보통의 단일모드 광섬유($D=17\text{ps}/\text{km}/\text{nm}$)를 사용하여 전송할 때는 PMD가 약 $1.8 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$ 가 되는 경우와 거의 일치함을 볼 수 있다.

광섬유의 색분산에 의한 문제를 해결하려고 비용이 많이 드는 분산천이광섬유를 사용하는 것이 때에 따라서는 PMD에 의한 제한으로 인하여 막대한 광섬유 포설비용 등의 불필요한 경제적 손실을 초래 할 수도 있다는 사실이다. 즉 색분산치를 아무리 적게 줄여도 PMD값이 크면, 이에 의한 제한이 우선이므로 장거리전송이 어려워질 수 있다는 것이다. 이

것은 색분산의 경우는 분산보상이 가능하나, PMD의 경우는 보상이 거의 불가능 하다는 것이다. 최근 광증폭기를 여러개 사용하는 장거리 전송시스템에서 편광에 따른 이득 또는 손실의 차이로 인한 파워페널티를 보상하는 방법으로서 polarization scrambling 등의 기술이 연구되고 있으나, 이러한 방법도 PMD에 의한 파워페널티를 극복하기는 쉽지 않다. 근본적인 이유는 광섬유의 편광특성이 임의로 불규칙하게 변하기 때문에, 어느 한 시점에서 시스템을 최적화시켜도 얼마정도 시간이 지나면 최적조건이 변화하여 시스템 성능이 떨어진다. 그러므로 PMD에 의한 파워페널티는 10Gbps 이상의 광전송시스템의 성능을 제한하는 중요한 물리적 현상이라고 할 수 있다. 따라서, 기존의 광섬유를 이용한 10Gbps 시스템은 안정화된 2.5 Gbps 시스템을 기본으로 한 파장분할다중화방식(WDM)으로 전송용량을 높여가는 것이 유리할 것이다.

이미 포설되어있는 광섬유를 활용하기 위해서는 기존의 광섬유의 정확한 PMD값 측정도 중요하다. 최근 미국의 AT&T 에서는 PMD 값이 항상 $0.2 \text{ ps/km}^{1/2}$ 이하가 되도록 광섬유를 생산하는 공정을 개발하였다. 만일 PMD를 0.2 이하로 유지할 수 있다고만 하면, 그림 2 또는 그림 4 에서 보는 것 처럼 PMD는 큰 문제가 되지 않는다.

그런데, 이미 포설된 광섬유나 특히 우리나라의 경우 현재 포설 중에 있는 광섬유는 PMD값 $0.2 \text{ ps/km}^{1/2}$ 를 보장하지 못 한다는 데 문제가 있다. 우리나라에서는 아직 포설하는 광섬유의 요구규격으로 PMD를 포함하고 있지 않기 때문에, 정확한 데이터는 없으나, 외국의 경우 여러 전화회사들의 측정결과를 보면 PMD 값이 $1 \text{ ps/km}^{1/2}$ 이상인 것이 대부분이고, 경우에 따라서는 $2 \text{ ps/km}^{1/2}$ 가 넘는 경우도 많으리라는 예측이다.

시내와는 달리 국간거리가 몇십km 이상인 시외전송망의 경우에는, 이미 10Gbps 정도 부터도 PMD에 의한 시스템페이딩이 문제가 된다는 것을 그림 4가 보여주고 있다. 색분산의 관점에서만 보면, 이에 의하여 제한되는 거리가 보통의 단일모드광섬유를, 사용하면 약 60km 정도 이지만, 분산보상기술을 적용한다면, 분산천이광섬유를 사용하면 전송거리를

많이 늘릴 수 있어 몇백km도 전송이 가능한 것 처럼 보인다. 그러나, 광섬유의 PMD 때문에, 분산천이광섬유를 사용하더라도, 한계전송거리가 50-60km정도로 되어 광펄스재생증폭기를 이용해야하는 복잡한 전송망이 될 수 있다는 것이다.

그런데, 만일 우리가 2.5Gbps를 바탕으로 하여 파장분할다중화방식을 사용한 4개의 채널을 전송하는 총 전송용량 10Gbps 시스템을 채택한다면, 개개의 채널의 속도가 2.5Gbps로 낮으므로 PMD에 의한 전송거리의 한계치가 약 700km 이상으로 길어져서 한채널로 10 Gbps 전송하는 경우보다 16배 길어진다. 이로부터 알 수 있는 것은, 적어도 PMD의 관점에서 보면 파장분할다중화된 10Gbps 시스템이 단일채널 10Gbps 시스템보다 전송거리 면에서 유리하다는 것이다. 바꾸어 말하면, 광전송시스템의 고속화를 위해서 단순히 TDM 전송시스템을 고속화 시키는 것은 PMD에 의하여 곧 한계에 부딪치므로, WDM 방식으로 전송용량을 높여 가는 것이 기술적으로도 타당한 것이라는 것이다. 만일 전송망 특성상 수백km 구간에 단일채널의 10Gbps 전송시스템을 설치해야 할 경우에는 새로이 포설하는 광섬유의 PMD 조건을 광섬유의 규격에 포함시키는 것이 반드시 필요하다 하겠다.

IV. 결 론

본 논문에서는 광섬유의 편광모드분산이 초고속 광신호펄스 전송시에 시스템의 성능에 미치는 영향에 대하여 알아보기 위해서, 단일모드 광섬유의 편광특성을 Maxwell 확률분포 함수를 인용[11]하여 분석하였다. IM/DD광통신시스템에서 편광모드분산으로인한 파워페널티를 구하였고, 시스템의 페이딩현상을 예측하고 이를 기준으로 전송용량의 한계를 살펴 보았다. 이 결과로 부터 전송속도가 2.5Gbps 이하의 저속시스템에서는 편광모드분산의 영향이 색분산이나 자기위상변조 등의 효과에 비하여 무시 할 만큼 작지만, 10Gbps이상의 광전송시스템에서는 가장 중요한 제한요인이 될 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] RE. Wagner, and AE. Elrefaie, "Polarization-dispersion limitations in lightwave systems," OFC '88, Proceedings, TU16 (1988)
- [2] E. Iannone, F. Matera, A. Galtarossa, G. Gianello, and M. Schiano, "Effect of polarization dispersion on the performance of IM-DD communication systems," IEEE Photon. Technol. Lett. Vol.5 Iss.10, pp.1247-1249 (1993)
- [3] T. Ono, S. Yamazaki, H. Shimizu, and K. Emura, "Polarization control method for suppressing polarization mode dispersion influence in optical transmission systems," IEEE J. Lightwave Technol. Vol.12 Iss.5, pp.891-898 (1994)
- [4] R. Passy, A.L. Gama, N. Gisin, and J.P. von der Weid, "Pressure dependence of polarization mode dispersion in HiBi fibers," IEEE J. Lightwave Technol. Vol.10 Iss.11, pp.1527-1531 (1992)
- [5] Chen Zhihao, Qu Yan, and Yao Huihai, "Birefringence and polarization mode dispersion in graded-core stress-applied polarization-maintaining fibers," Applied Physics B [Photophysics and Laser Chemistry] Vol.B48 Iss.3, pp.225-229 (1989)
- [6] C.D. Pool, and R.E. Wagner, "Phenomenological approach to polarisation dispersion in long single-mode fibers," Electron. Lett. Vol.22, pp.1029-1030 (1986)
- [7] F. Matera, "Evolution of polarization mode dispersion in single mode fibres," Tenth Annual EFOC/LAN '92 Conference. Proceedings. pp.16-21 (1992)
- [8] T. Takahashi, T. Imai, and M. Aiki, "Time evolution of polarisation mode dispersion in 120km installed optical submarine cable," Electron. Lett. Vol.29 Iss.18, pp.1605-1606 (1993)
- [9] A.M. Vengsarkar, and L.G. Cohen, "Polarisation optical time domain reflectometry for statistical evaluation of polarisation mode dispersion," Electron. Lett. Vol.29 Iss.10, pp.848-850 (1993)
- [10] C. De Angelis, A. Galtarossa, G. Gianello, F. Matera, and M. Schiano, "Time evolution of polarization mode dispersion in long terrestrial links," IEEE J. Lightwave Technol. Vol.10 Iss.5, pp.552-555 (1992)
- [11] C.D. Poole, R.W. Tkach, A.R. Chraplyvy, and D.A. Fishman, "Fading in lightwave systems due to polarization-mode dispersion," IEEE Photon. Technol. Lett. Vol.3 Iss.1, pp.68-70 (1991)

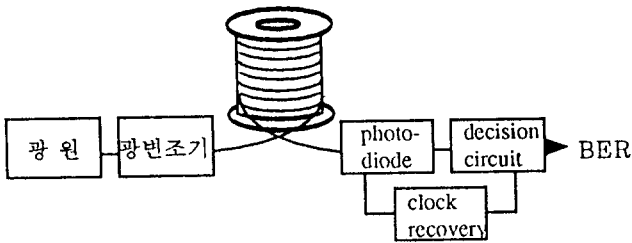


그림1 IM/DD 광전송시스템의 구성도

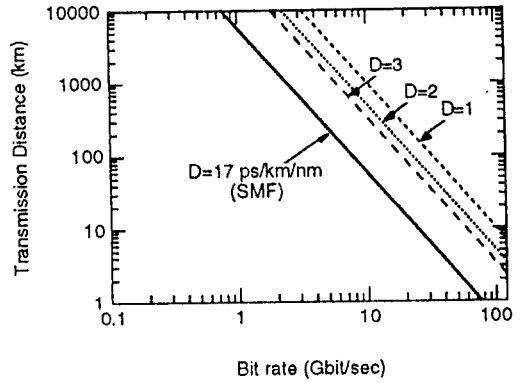


그림3 색분산에 의한 전송속도 및 전송거리의 제한

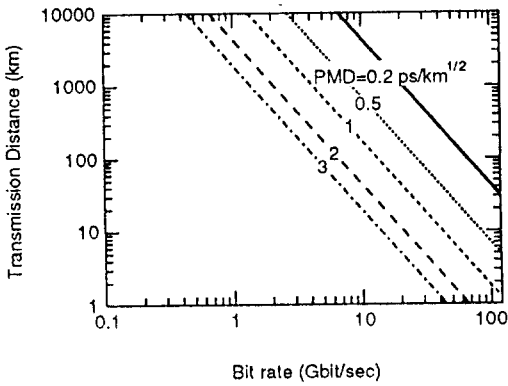


그림2 PMD에 의한 전송속도 및 전송거리의 제한

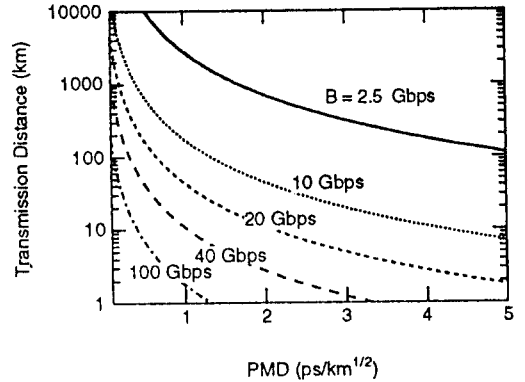


그림4 PMD값에 대한 최대전송속도 및 최대전송거리