

광 펄스 주파수 칩과 Kerr 효과의 상호 관계가 장거리 광 전송을 위한 MSSI 보상 기법에 미치는 영향 분석

Analysis of the Influence of Mutual Relation of Optical Pulse Frequency Chirp and Kerr Effect on the Mid-Span Spectral Inversion Methods for the Long-Haul Optical Transmission

이 성 렬 · 이 윤 현*

Seong-Real Lee · Yun-Hyun Lee*

요 약

송신 전력이 비교적 높은 5 dBm인 광 펄스를 최적 펌프 전력 조건 하에서의 MSSI(Mid-Span Spectral Inversion) 보상 기법을 통해 전송할 때 다양한 주파수 칩(chirp)을 갖는 광 펄스의 전송 거리가 어느 정도 개선되는지를 다양한 전송 속도와 분산 계수에 따라 살펴보았고, 광 펄스의 주파수 칩과 Kerr 효과에 의한 위상 변화의 상호 관계가 다양한 비트율에서의 광섬유 분산 계수 변화에 따라 MSSI 보상에 어떠한 영향을 주는지를 시뮬레이션을 통해 분석해 보았다. 우선 광 펄스가 광섬유를 전파하면서 겪게 되는 자기 위상 변조에 의한 위상 변화가 광 변조 과정에서 인가된 광 펄스의 초기 칩에 의한 위상 변화와 어우러져 상쇄되는 정도가 광섬유의 분산 계수 값에 따라 달라지게 되어 MSSI 기법을 통해 광 펄스가 보상되는 정도에도 변화가 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 동일한 보상 특성을 얻을 수 있는 비트율에 따른 분산 천이 광섬유의 분산 계수 값은 전송 비트율 증가 비율을 k 라고 하면 2^k 의 관계로 줄어들어야 하는 것을 알 수 있었다.

Key words : MSSI(Mid-Span Spectral Inversion), 주파수 칩, 색 분산, 자기 위상 변조, 광 펄스 왜곡 및 보상

Abstract

In this paper, we investigated the improvement degree of transmission distance of the various initial frequency chirped optical pulse with 5 dBm initial power dependence on the various bit rate and fiber dispersion coefficient, when MSSI(Mid-Span Spectral Inversion) with the optimal pump power condition is adopted for the compensation method for optical pulse distortion. And we analyzed the influence of mutual relation of optical pulse frequency chirp and Kerr effect on the MSSI methods for the long-haul optical transmission through the computer simulation. We found that the compensation degree of distorted optical pulse varies as a consequence of the variation of combined phase modulation of self phase modulation(Kerr effect) and initial frequency chirp parameter dependence on the fiber dispersion coefficient. And we found that, if the transmission bit rate is increased k times, the dispersion coefficient value of dispersion shift fiber is decreased 2^k times so as to be almost the same performance of the transmission system with k times lower bit rate.

Key words : MSSI(Mid-Span Spectral Inversion), Frequency Chirp, Chromatic Dispersion, SPM(Self Phase Modulation), Optical Pulse Distortion and Its Compensation

(주)ATN 부설연구소(Advanced Traffic Network Co., Ltd)

*한국항공대학교 전자정보통신컴퓨터공학부(School of Electro., Telecomm. and Computer Eng., Hankuk Aviation Univ.)

· 논문 번호 : 20020529-064

· 수정완료일자 : 2002년 9월 2일

I. 서 론

EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)의 광 전송 링크에의 적용으로 광 펄스의 전기적 재생 증폭 없이 장거리 통신이 가능해졌다^[1]. 하지만 이러한 선로 증폭기를 갖는 장거리 전송 시스템의 구현을 위해서는 비교적 큰 전력의 광 신호가 전체 광 전송 링크에 걸쳐 나타나기 때문에 광섬유의 굴절 계수 변화에 대한 광 전력의 영향(Kerr 효과)을 고려하여야 한다. 즉 전체 광 전송 링크에서의 Kerr 효과와 색 분산의 상호 작용에 의한 파형의 왜곡이 비트율과 전송 거리의 적(bit-rate distance product) 등의 시스템 전송 능력을 어느 정도 제한하는 지를 분석하고, 비선형적인 광 펄스의 왜곡을 보상할 수 있는 기법이 광 전송 시스템에 적용되어야 한다.

과거 수년 동안 진행된 Kerr 효과와 색 분산에 의한 광 펄스 왜곡을 보상할 수 있는 여러 방법 중^{[2]-[4]}에서도 광 솔리톤 전송에 필적할만한 방법으로 전송 링크 중간에 광 위상 공액기(OPC ; Optical Phase Conjugator)를 사용하여 신호 왜곡을 보상하는 MSSI(Mid-Span Spectral Inversion)^{[5],[6]}가 있다.

NRZ 형식의 광 펄스 전송에 가장 많은 영향을 끼치는 Kerr 효과는 자기 위상 변조(SPM ; Self Phase Modulation)이다^[7]. 이러한 NRZ 형식의 광 펄스를 장거리 전송하는 경우 광섬유의 손실과 증폭기의 증폭 이득의 주기적 변동에 기인하는 광섬유 전 링크에서의 일정하지 않은 광 신호의 강도 분포 때문에 SPM에 의한 왜곡의 보상에 한계가 있는데^[8] 이러한 강도 변화의 영향에 의한 보상 효율 저하를 줄여주기 위한 대표적인 방법으로, 전 링크에 걸쳐 광 신호 강도의 크기가 일정하지 않아도 OPC 앞단의 첫 번째 광섬유에서 겪게 되는 광 신호의 평균 강도가 OPC로부터 수신단까지의 두 번째 광섬유에서 겪게 되는 광 신호의 평균 강도와 같게 하여 효율 좋은 보상을 얻을 수 있는 PAIA(Path-Averaged Intensity Approximation) 기법을 적용한 MSSI가 제안되었다^[9].

그러나 PAIA를 이용한 MSSI 보상에 있어 전송 링크 중간에 위치한 OPC에서 공액파(conjugate wave)를 얻기 위한 펌프(pump) 신호의 전력에 따라 OPC 다음의 두 번째 광섬유로 입력되는 공액파의

전력이 변하기 때문에 SPM에 의한 광 펄스 왜곡의 보상 정도가 달라지게 됨을 예상할 수 있는데, 색 분산과 SPM에 의한 왜곡에 대한 최상의 보상이 얻어지는 OPC 펌프 신호의 최적 전력의 크기를 선로 증폭기 간격에 따라 선행한 연구를 통해 확인하였다^[10].

또한 강도 변조 직접 검파(IM/DD ; Intensity Modulation / Direct Detection) 시스템에서 신호에 의해 직접 변조되는 반도체 레이저는 주파수 칩(chirp)을 갖는 광 펄스를 만든다. 이러한 광 펄스의 주파수 칩 현상은 광통신에서의 전송 비트율에 영향을 주기 때문에^[11] MSSI를 보상 기법으로 채택한 광 전송 시스템의 성능을 광 펄스의 주파수 칩과 관련하여 분석할 필요가 있다. 우리는 또 다른 연구를 통해 광 변조 과정에서 광 펄스에 인가되는 칩의 영향을 고려하여 MSSI 보상을 통해 안정된 수신 성능을 유지할 수 있는 광 펄스의 최대 입력 전력 범위를 비트율별로 도출해 보았다^[12].

앞선 연구를 통해 얻은 결과를 정리하면, 우선 MSSI 기법을 통해 최상의 보상이 얻어지는 OPC에서의 펌프 신호의 최적 전력이 증폭기 간격이 40 km인 경우에는 19 dBm, 증폭기 간격이 50 km인 경우에는 20 dBm이어야 하고^[10], 이러한 최적 펌프 전력을 유지하는 장거리 전송 시스템에서 광섬유를 전송하는 광 펄스의 파장이 이상 분산 파장(anomalous dispersion wavelength)인 경우 광 펄스가 down-chirp될수록 MSSI를 통해 더욱 양호하게 보상된다는 사실을 알 수 있었다^[12]. 아울러 광 송신단에서 변조된 광 펄스가 정도의 차이 없이 down-chirp되어 있다면 10 Gbps 전송의 경우 분산 계수 $D = 0.4$ ps/nm/km의 2,000 km 광 전송로를 통해 최대 5.3 dBm까지의 송신 전력을 갖는 광 펄스를 1 dB EOP(Eye Opening Penalty) 수신 성능을 유지시키면서 전송할 수 있고, 20 Gbps($D = 0.2$ ps/nm/km)에서는 약 4.8 dBm, 그리고 40 Gbps($D = 0.1$ ps/nm/km)에서는 약 3.7 dBm 정도로 매우 높은 전력의 전송이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다^[12].

이러한 결과는 최적 펌프 전력을 유지하는 MSSI 보상 기법이 색 분산 보상뿐만 아니라 SPM 보상에 매우 효율적임을 의미하고, 그 결과로써 대용량 WDM 시스템 구현에 필요한 채널당 전송 속도를

높여주기 위해서 높은 비트율과 함께 요구되는 높은 OSNR(Optical Signal to Noise Power Ratio)의 유지가 최적 펌프 전력 하에서의 MSSI 보상 기법의 적용으로 가능하다는 것을 의미한다.

대용량 WDM 시스템의 실제적 구현을 위한 높은 OSNR은 단순히 높은 광 신호를 송신하는 것으로는 얻을 수 없다. 세기가 큰 광 신호를 송출하는 것은 광섬유의 Kerr 효과에 의한 비선형적 왜곡을 가져오며, 결국 또 다른 수신 성능의 감소를 결과할 수 있기 때문이다. 하지만 MSSI 기법을 이용해 비트율에 따른 광섬유의 적당한 분산 계수 값에 의해 결정되는 색 분산에 의한 광 펄스의 폭 변화를 Kerr 효과에 의한 광 펄스의 위상 변화를 통해 상쇄시키면 높은 OSNR을 유지시킬 수 있다는 가능성을 확인하였다.

그러나 좀 더 정확한 분석을 위해서는 광 펄스의 주파수 첩을 고려하여야 한다. 즉 광 변조 과정에서 발생된 주파수 첩에 의해 광 펄스는 본질적으로 위상 변화를 가지고 전송되기 때문에 주파수 첩에 의한 위상 변화와 Kerr 효과에 의한 위상 변화의 상호 관계를 비트율과 광섬유의 분산 계수에 따라 분석하여야 한다.

최적 펌프 전력 조건 하에서의 MSSI 보상 기법이 높은 OSNR을 유지시킬 수 있다는 것을 앞선 연구를 통해 확인하였기 때문에 본 연구에서는 송신 전력이 비교적 높은 5 dBm인 광 펄스를 MSSI 보상을 통해 전송할 때 다양한 주파수 첩(chirp)을 갖는 광 펄스의 전송 거리가 어느 정도 개선되는 지를 10 Gbps, 20 Gbps, 40 Gbps의 다양한 전송 속도에서의 분산 계수 변화에 따라 살펴보고, 다양한 광섬유의 분산 계수 변화에 따라 광 펄스의 주파수 첩과 Kerr 효과에 의한 위상 변화의 상호 관계가 MSSI 보상에 어떠한 영향을 주는 지를 분석해 보도록 하겠다.

우선 2장에서는 OPC를 이용한 MSSI의 보상 원리를 간단하게 살펴보고, 3장에서는 컴퓨터 시뮬레이션에 대하여 살펴보도록 한다. 4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 이의 분석을 하고, 5장에서는 본 연구의 결론을 맺도록 한다.

시뮬레이션을 통한 수치 해석의 기본 방법은 다양한 비트율, 광섬유의 분산 계수, 그리고 광 펄스의 주파수 첩에 대해 전송 거리 변화에 따른 보상 정도

를 EOP를 통해 살펴보고, 성능의 평가는 1 dB EOP를 기준으로 하였다.

II. MSSI를 통한 광 펄스 왜곡의 보상 원리

색 분산과 SPM 효과의 보상은 그림 1에서와 같이 길이 L_1 의 첫 번째 광섬유(SMF1)와 길이 L_2 의 광섬유(SMF2) 사이에 OPC(길이 z_0)를 삽입하여 광 링크를 구성하면 이루어질 수 있다. 우선 신호와 A_s 는 길이 L_1 의 SMF1을 통해 $+z$ 방향으로 전파해 간다. 그런 후 OPC는 A_s 를 OPC 내의 펌프 신호 A_p 의 펌프 주파수에 대한 스펙트럼 반전을 통해 위상 공역과 A_c 로 변환시킨다. OPC를 빠져 나온 A_c 는 길이 L_2 의 SMF2를 통해 수신단에 도착하게 된다. 수신단에서 검출된 광 신호의 출력은

$$A_c(L_1+L_2, t) = \exp[i(\omega_c t + \beta_{11}L_1 - \beta_{12}L_2)] \times \int_{-\infty}^{\infty} d\Omega F^*(\Omega) \exp(-\Omega t) \times \exp\left\{-\frac{i}{2}\Omega^2(-\beta_{21}L_1 + \beta_{22}L_2)\right\} \times \exp\{i(\Delta\Phi_1(\Omega, t) - \Delta\Phi_2(\Omega, t))\} \quad (1)$$

으로 표현된다. 여기서 β_{2j} 는 j 번째 광섬유에서의 그룹 속도 분산(GVD ; Group Velocity Dispersion) 파라미터, Ω 는 푸리에 차원에서의 주파수, $F(\Omega)$ 는 푸리에 차원에서의 펄스 진폭이다. 그리고 $\Delta\Phi_j(\Omega, t)$ 는 j 번째 광섬유에서 SPM에 의해 겪게 되는 위상 천이이다.

식 (1)을 통해 알 수 있듯이 수신단에서 왜곡 없

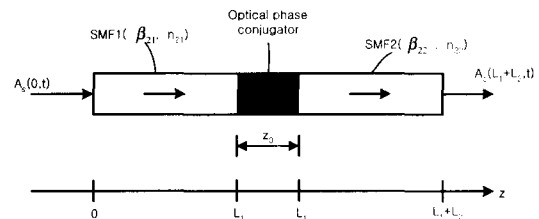


그림 1. OPC를 이용한 색 분산 및 SPM 보상의 개념도

Fig. 1. Schematic configuration of chromatic dispersion and SPM compensation by OPC.

광 펄스 주파수 첩과 Kerr 효과의 상호 관계가 장거리 광 전송을 위한 MSSI 보상 기법에 미치는 영향 분석

이 광 신호가 검출되려면, 우선

$$\beta_{21}L_1 = \beta_{22}L_2 \quad (2)$$

의 조건을 만족하여야 한다.

또한 식 (1) 우변의 마지막 항은 두 광섬유에서 SPM에 의해 겪게 되는 위상 천이의 크기가 같아지면 SPM에 의한 신호 왜곡을 보상할 수 있다는 것을 의미한다. 광섬유에서의 Kerr 효과에 의한 위상 천이는 $(\omega n_2/cA_{eff})P$ 에 비례하기 때문에 SPM에 의한 신호 왜곡의 보상 조건을 식으로 표현하면

$$\gamma_1 \overline{P_s} L_1 = \gamma_2 \overline{P_c} L_2 \quad (3)$$

이다. 여기서 $\overline{P_s}$ 와 $\overline{P_c}$ 는 각각 아래의 식들로 표현되는 SMF1에서의 신호파의 경로 평균 전력과 SMF2에서의 공액파의 경로 평균 전력이다.

$$\overline{P_s} = P_s(0, t) \frac{[1 - \exp(-\alpha L_1)]}{\alpha L_1} \quad (4)$$

$$\overline{P_c} = P_c(L_1, t) \frac{[1 - \exp(-\alpha_2 L_2)]}{\alpha_2 L_2} \quad (5)$$

III. 광 전송 시스템 모델링과 시뮬레이션

그림 2는 본 논문에서 시뮬레이션을 수행할 MSSI를 채택한 광 전송 시스템의 모델을 나타낸 것이다. 시스템은 크게 송신부, 전송 링크, 수신부로 구성된다.

전송 거리 변화에 따른 EOP를 단계 분할 푸리에 변환(SSF ; Split-Step Fourier) 방법^[13]을 이용한 시뮬레이션을 통해 수행하였고, 시스템 모델의 시뮬레이션에 필요한 파라미터들은 표 1과 같이 참고 문헌 [10],[12]와 동일하게 하였다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 3은 10 Gbps에서의 전송 거리에 대한 EOP 변화를 다양한 첩 파라미터와 광섬유 분산 계수에

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Table 1. Simulation parameters.

시스템 구성		파라미터 값
송신부	전송 속도	10 Gbps, 20 Gbps, 40 Gbps
	초기 첩 파라미터(C_0)	-1.0, -0.5, 0, +0.5
	송신 광 펄스	2차 수퍼 가우시안 펄스
	PRBS의 수	2^7
수신부	EDFA의 이득(G)	$\exp(\alpha l)$
	광 필터의 종류	로렌치안 필터
	3-dB 광 대역폭(B_0)	1nm (=124 GHz)
전송 링크부	광섬유의 종류	분산 천이 광섬유(DSF)
	SMF1와 SMF2의 손실 계수(α_i)	0.2 dB/km
	SMF1와 SMF2의 분산 파라미터	10 Gbps : 0.4, 0.8, 1.6 ps/nm/km 20 Gbps : 0.1, 0.2, 0.4 ps/nm/km 40 Gbps : 0.1, 0.2, 0.4 ps/nm/km
	SMF1와 SMF2의 비선형 굴절 계수(n_2)	$2.36 \times 10^{-26} \text{ km}^2/\text{W}$
	유효 코어 직경(A_{eff})	$60 \mu\text{m}^2$
	선로 증폭기 간격(l)	50 km
광 위상 공액기	펌프 파장(λ_p)	1,547 nm
	펌프 전력(P_p)	20 dBm
	비선형 매체의 종류	분산 천이 광섬유(DSF)
	DSF의 길이(z_0)	20 km
	DSF의 손실 계수(α)	0.23 dB/km
	DSF의 비선형 계수(γ)	$2.6 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$

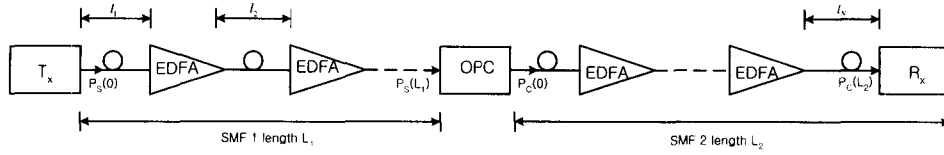


그림 2. MSSI를 채택한 광 전송 시스템의 모델
Fig. 2. Simulation model of optical transmission system using optical phase conjugator.

따라 나타낸 것이다. 각 경우에 있어 송신 전력은 비교적 큰 값인 5 dBm으로 하였다.

그림 3을 통해 우선 광섬유의 분산 계수 값에 관계없이 광 펄스가 down chirp될수록 MSSI에 의한 광 펄스의 보상을 통해 전송 거리가 더욱 신장되는 것을 알 수 있다. 이 결과는 앞선 연구에서 확인한 것과 일치하는 것이다^[12]. 또한 그림 3의 (a)를 통해 1 dB EOP를 기준으로 MSSI를 적용하지 않은 경우

의 전송 거리인 750 km보다 MSSI에 의한 광 펄스의 보상을 통해 초기 칩 파라미터 값에 따라 전송 거리가 2.4~3배 정도 신장되는 것도 알 수 있다.

광섬유의 분산 계수 값이 $D = 0.4$ ps/nm/km인 경우의 보상에서는 1,200 km까지, $D = 0.8$ ps/nm/km인 경우에는 900 km까지, 그리고 $D = 1.6$ ps/nm/km인 경우에는 600 km까지 초기 칩의 크기에 관계없이 전송 거리에 따라 거의 비슷한 보상이 얻어지

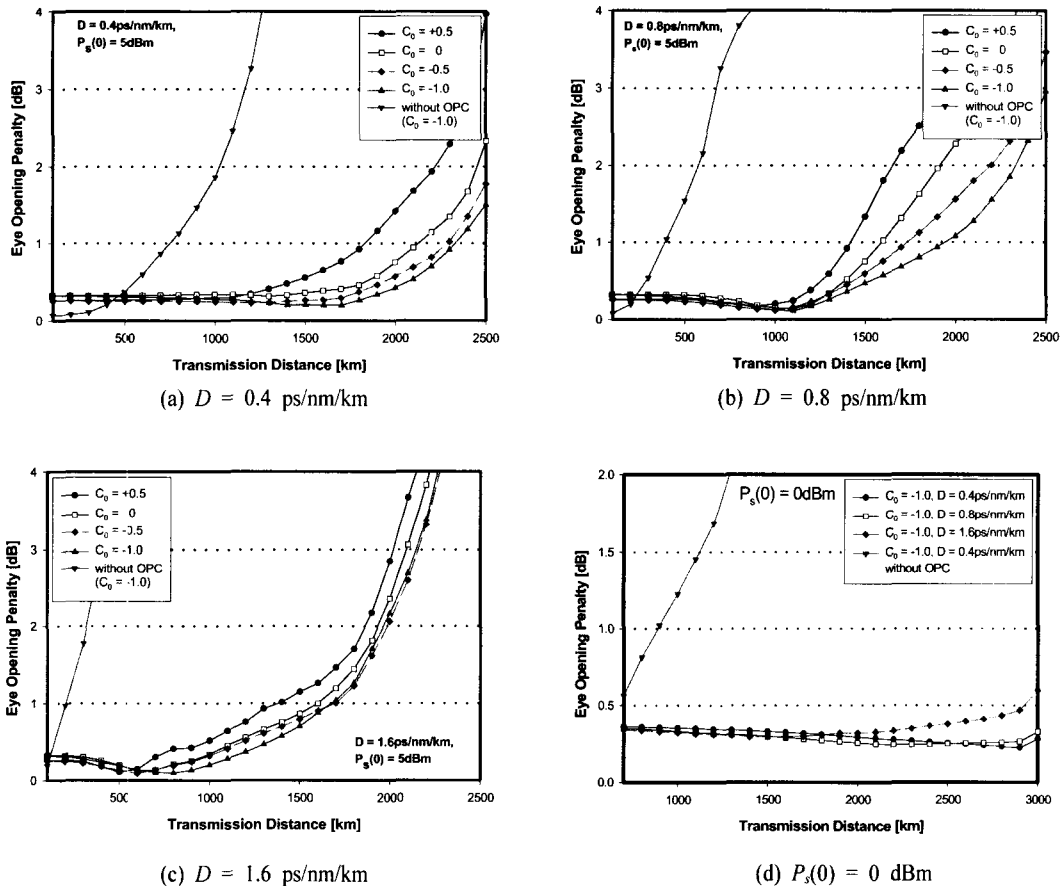


그림 3. 10 Gbps 전송 시스템에서 전송 거리에 따른 EOP 변화
Fig. 3. Variation of eye opening penalty dependence on the transmission distance(10 Gbps).

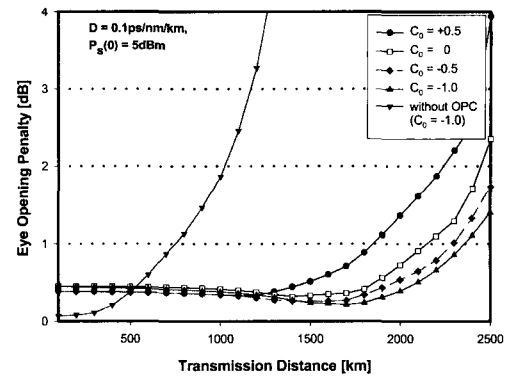
고, 그 이상으로 전송 거리가 증가하면 광 펄스의 초기 첩 파라미터 값이 커질수록 전송 거리에 따라 보상 정도가 줄어드는 것을 알 수 있다.

아울러 그림 3(d)에서 확인할 수 있듯이 광섬유에 입사되는 광 신호의 전력을 0 dBm 정도로 낮추면 MSSI를 적용하지 않은 경우에 있어 전송 거리에 따른 EOP가 선형적인 특성을 갖게 되고, 1 dB EOP 기준으로 전송 거리도 900 km로 다소 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 이 경우 MSSI 기법이 전송 링크에 적용되면 더욱 양호한 보상이 얻어져 광 펄스 초기 첩에 크게 상관없이 3,000 km 이상의 전송이 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

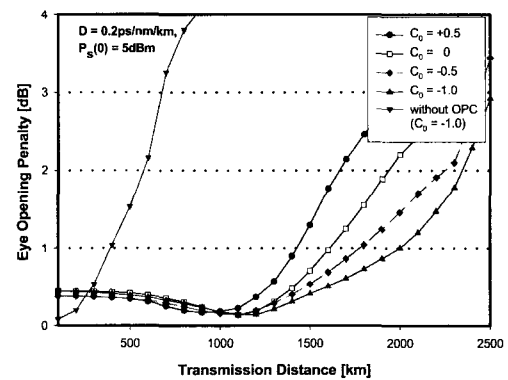
그림 4는 20 Gbps에서의 전송 거리에 대한 보상 정도를 다양한 첩 파라미터와 광섬유 분산 계수에 따라 나타낸 것이다. 20 Gbps 전송 시스템에서도 그림 1의 10 Gbps와 비슷한 보상 특성이 나타남을 알 수 있다. 즉 광섬유의 분산 계수 값이 $D = 0.1$ ps/nm/km인 경우의 보상에서는 1,200 km까지, $D = 0.2$ ps/nm/km인 경우에는 1,000 km까지, 그리고 $D = 0.4$ ps/nm/km인 경우에는 600 km까지 초기 첩의 크기에 관계없이 전송 거리에 따라 거의 비슷한 보상이 얻어지고, 그 이상으로 전송 거리가 증가하면 광 펄스의 초기 첩 파라미터 값이 커질수록 전송 거리에 따라 보상 정도가 줄어드는 것을 알 수 있다.

그림 5는 40 Gbps에서의 전송 거리에 대한 보상 정도를 다양한 첩 파라미터와 광섬유 분산 계수에 따라 나타낸 것이다. 40 Gbps 전송 시스템에서는 앞서의 10 Gbps와 20 Gbps에서와는 조금은 다른 보상 특성이 나타남을 알 수 있다. 광섬유의 분산 계수 값이 $D = 0.1$ ps/nm/km인 경우의 보상에서는 600 km까지 초기 첩의 크기에 관계없이 전송 거리에 따라 거의 비슷한 보상이 얻어지고 그 이상으로 전송 거리가 증가하면 광 펄스의 초기 첩 파라미터 값이 커질수록 전송 거리에 따라 보상 정도가 줄어들지만, 비트율과 관련한 분산 계수 값이 큰 광섬유를 채택한 전송 시스템에서는 이러한 특성이 더 이상 유지되지 않는 것을 확인할 수가 있다. 즉 그림 5의 (b)와 (c)를 통해 분산 계수 값이 비교적 큰 경우에는 광 펄스의 초기 첩 파라미터 값에 따른 보상 정도의 차이가 거의 없는 것을 알 수 있다.

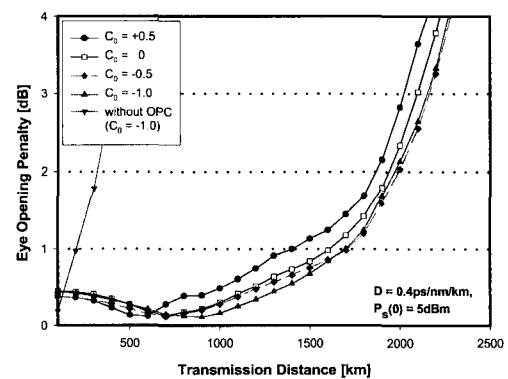
엄격히 말해 10 Gbps와 20 Gbps 전송 시스템에



(a) $D = 0.1$ ps/nm/km



(b) $D = 0.2$ ps/nm/km

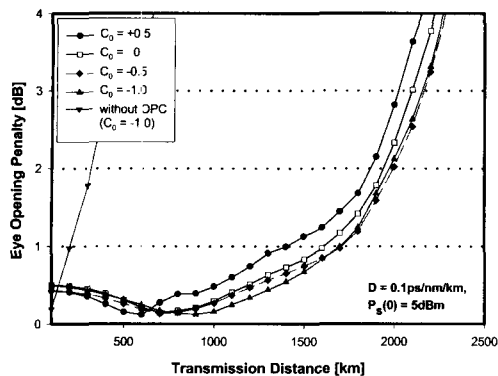


(c) $D = 0.4$ ps/nm/km

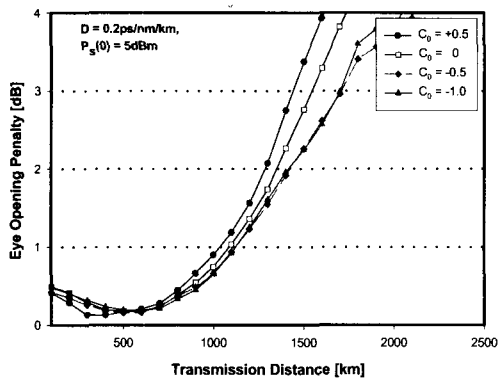
그림 4. 20 Gbps 전송 시스템에서 전송 거리에 따른 EOP 변화

Fig. 4. Variation of eye opening penalty dependence on the transmission distance(20 Gbps).

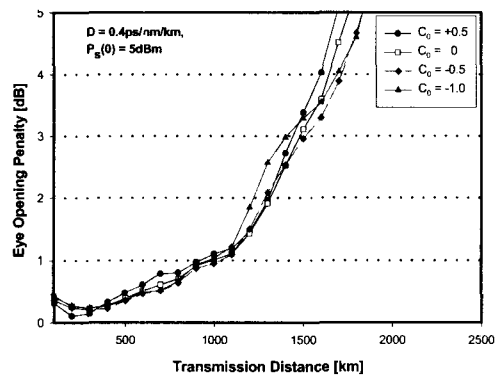
서도 이러한 보상 특성이 나타난다. 우선 그림 3(b)를 통해 분산 계수가 $D = 0.8$ ps/nm/km인 전송 시



(a) $D = 0.1$ ps/nm/km



(b) $D = 0.2$ ps/nm/km



(c) $D = 0.4$ ps/nm/km

그림 5. 40 Gbps 전송 시스템에서 전송 거리에 따른 EOP 변화

Fig. 5. Variation of eye opening penalty dependence on the transmission distance(40 Gbps).

스텝에서 광 펄스의 초기 칩 파라미터 값이 -1.0 인 경우 전송 거리가 $2,000$ km 정도에서 1 dB EOP가 나타나고, 초기 칩 파라미터 값이 $+0.5$ 인 경우 이 거

리에서의 EOP가 2.884 dB로 Eye Opening Margin이 약 1.8 dB로 크게 나타났다. 하지만 분산 계수가 $D = 1.6$ ps/nm/km인 전송 시스템에서는 초기 칩 파라미터가 -1.0 인 광 펄스의 EOP가 1 dB가 되는 전송 거리 $1,700$ km에서 초기 칩 파라미터가 $+0.5$ 인 광 펄스와의 margin이 0.48 dB로 감소하여 분산 계수 값이 커지면 광 펄스의 초기 칩 파라미터 값에 따른 보상 정도의 차이도 줄어드는 것을 확인할 수 있다 (그림 4의 20 Gbps에서도 비슷한 특성을 보인다).

이는 분산 계수 값이 비교적 적은 광섬유를 통과하는 광 펄스는 비교적 늦게 퍼지게 되므로 광 신호의 상대적 순시 강도의 증가와 그로 인한 SPM에 의한 위상 변화가 초기 down chirp의 정도가 큰 광 펄스일수록 광 펄스 내부적으로 지니고 있는 위상 변화와 상쇄되는 정도가 커지게끔 발생해 진폭 변조로 전환되는 양이 적기 때문이다. 하지만 분산 계수 값이 커지면 광 펄스가 매우 빨리 퍼지게 되어 SPM에 의해 펄스들의 위상이 변화되기 전에 펄스들이 흩어져서 비선형성이 작용할 시간을 충분히 갖지 못하기 때문에 광 펄스의 chirp의 정도와 큰 상관없이 보상되어 전송되는 것이라고 판단할 수 있다. 이러한 특성은 40 Gbps 전송의 경우와 같이 광 펄스의 폭이 좁을수록 아주 적은 분산 계수에서 더욱 강하게 나타난다.

그림 3부터 그림 5까지를 종합적으로 비교해 보면, 10 Gbps 전송 시스템에서는 $D = 1.6$ ps/nm/km의 경우, 20 Gbps 전송 시스템에서는 $D = 0.4$ ps/nm/km의 경우, 그리고 40 Gbps 전송 시스템에서는 $D = 0.1$ ps/nm/km의 경우에서 초기 칩 파라미터에 관계없이 매우 비슷한 보상 특성이 얻어지는 것을 알 수 있다.

그림 6은 이러한 특성을 살펴볼 수 있는 각 전송 속도별 전송 거리에 따른 보상 정도를 나타낸 것이다. 송신 전력을 동일하게 하는 등 다른 모든 전송 파라미터가 같은 경우 동일한 보상 특성을 얻을 수 있는 비트율에 따른 광섬유의 분산 계수 값은 전송 비트율 증가 비율을 k 라고 하면 2^k 의 관계로 줄어들어야 하는 것을 그림 6을 통해 확인할 수 있다. 즉 $D = 1.6$ ps/nm/km의 10 Gbps 전송 시스템과 같은 보상 특성을 얻기 위해서는 40 Gbps 전송 시스템에서는 분산 계수 값이 0.1 ps/nm/km가 되어야 한다.

광 펄스 주파수 첩과 Kerr 효과의 상호 관계가 장거리 광 전송을 위한 MSSI 보상 기법에 미치는 영향 분석

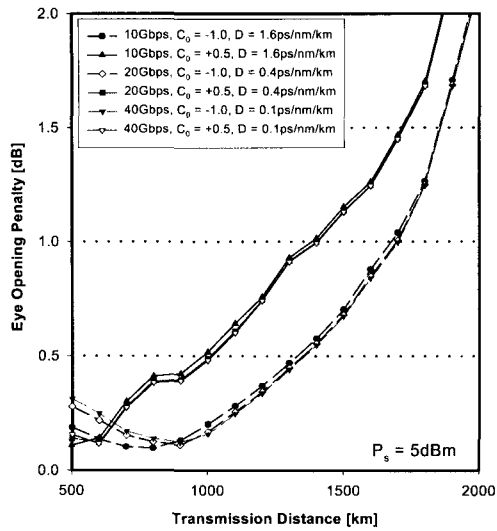


그림 6. 다양한 비트율의 전송 시스템에서 전송 거리에 따른 EOP 변화

Fig. 6. Variation of eye opening penalty dependence on the transmission distance in the various bit rate system.

V. 결 론

지금까지 송신 전력이 비교적 높은 5 dBm인 광 펄스를 MSSI 보상을 통해 다양한 비트율로 전송할 때 분산 계수에 따른 전송 거리의 개선 정도를 다양한 광 펄스의 주파수 첩에 따라 살펴보았고, 광 펄스의 주파수 첩과 Kerr 효과에 의한 위상 변화의 상호 관계가 다양한 비트율에서의 광섬유 분산 계수 변화에 따라 MSSI 보상에 어떠한 영향을 주는 지를 시뮬레이션을 통해 분석해 보았다.

우선 광섬유의 분산 계수 값에 관계없이 광 펄스가 down chirp될수록 MSSI에 의한 광 펄스의 보상을 통해 전송 거리가 더욱 신장되고, MSSI를 적용하지 않은 경우의 전송 거리에 비해 초기 첩 파라미터 값에 따라 전송 거리가 2.4~8배 정도 신장되는 것을 확인하였다. 더욱이 MSSI를 통한 전송 거리의 신장은 분산 계수가 큰 광섬유일수록 더욱 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

또한 광섬유의 분산 계수 값이 비교적 낮은 경우에는 광 펄스가 광섬유를 전파하면서 겪게 되는 SPM에 의한 위상 변화가 광 변조 과정에서 인가된

광 펄스의 초기 첩 파라미터가 down chirp일수록 광 펄스 내부적으로 지니고 있는 위상 변화와 상쇄되는 정도가 커져서 down chirp인 광 펄스가 MSSI 보상을 통해 up chirp의 경우보다 더욱 먼 거리를 전송할 수 있고, 분산 계수 값이 커지면 광 펄스가 매우 빨리 퍼지게 되어 SPM에 의한 광 펄스의 비선형성이 충분히 나타나지 못하기 때문에 광 펄스의 chirp의 정도와 큰 상관없이 보상된다는 것을 확인할 수 있었다.

마지막으로 다른 모든 전송 파라미터가 같은 경우 동일한 보상 특성을 얻을 수 있는 비트율에 따른 광섬유의 분산 계수 값은 전송 비트율 증가 비율을 k 라고 하면 2^k 의 관계로 줄어들어야 하는 것을 알 수 있었다.

이러한 결과들은 주파수 첩된 광 펄스를 최적 펄프 전력 조건에서의 MSSI 보상 기법을 통해 큰 OSNR로 전송하는 장거리 대용량 WDM 시스템을 설계할 때 최적의 분산 계수와 비트율에 따른 전송 거리를 결정하는 데 중요한 지표를 제공하는 결과라고 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] D. Marcuse, "Single-channel operation in very long nonlinear fibers with optical amplifiers at zero dispersion", *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-8, no. 10, pp. 1548-1557, 1990.
- [2] T. L. Koch, R. C. Alfemess, "Dispersion compensation by active predistorted signal synthesis", *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-3, pp. 800-805, 1985.
- [3] A. M. Vengsakar, W. A. Reed, "Dispersion-compensating single-mode fibers : Efficient designs for first- and second-order compensation", *Opt. Lett.*, vol. 18, pp. 924-926, 1993.
- [4] A. Hasegawa, F. Tappert, "Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers I. Anomalous dispersion", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 23, pp. 142-144, 1973.
- [5] A. Yariv, D. Fekete and D. M. Pepper, "Compensation for channel dispersion by nonlinear

- optical phase conjugation", *Opt. Lett.*, vol. 4, pp. 52-54, 1979.
- [6] S. Watanabe, M. Shirasaki, "Exact compensation for both chromatic dispersion and Kerr effect in a transmission fiber using optical phase conjugation", *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-14, no. 3, pp. 243-248, 1996.
- [7] F. Forgiieri, R. W. Tkach and A. R. Chraplyvy, *Optical Fiber Telecommunications*, 3rd Ed., Academic Press, San Diego, 1989.
- [8] C. Lorattanasane, K. Kikuchi, "Design of long-distance optical transmission systems using midway optical phase conjugation", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 11, pp. 1375-1377, 1995.
- [9] S. Watanabe, T. Chikama, G. Ishikawa, T. Terahara and H. Kuwahara, "Compensation of pulse shape distortion due to chromatic dispersion and Kerr effect by optical phase conjugation", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 10, pp. 1241-1243, 1993.
- [10] 이성렬, 이윤현, "Mid-span optical phase conjugator를 이용한 장거리 광 전송 시스템에서의 색 분산과 자기 위상 변조의 보상에 관한 연구", 한국전자파학회 논문지, 12(4), pp. 576-585, 2001년 6월.
- [11] G. P. Agrawal, N. K. Dutta, *Semiconductor Lasers*, Chap. 6, van Nostrand-Reinhold Press, 1993.
- [12] 이성렬, 이윤현, "Mid-Span Spectral Inversion을 이용한 광 펄스 왜곡의 보상에서 전력 대칭을 통한 광대역 WDM 전송", 한국전자파학회 논문지, 12(7), pp. 1157-1166, 2001년 12월.
- [13] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, pp. 34-44, 1989.

이 성 렬



1967년 1월 11일 생
 1990년 2월: 한국항공대학교 항공통신정보공학과 (공학사)
 1992년 8월: 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 (공학석사)
 2002년 2월: 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 (공학박사)

1992년 8월~1994년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 조교
 1996년 1월~2002년 8월: (주)세영통신 전파기술연구소 책임연구원
 2002년 8월~현재: (주)ATN 부설연구소 소장
 [주 관심분야] 솔리톤 전송 시스템, 광 파장 분할 다중화, 광의 비선형 현상 분석

이 윤 현



1941년 8월 24일생
 1965년 2월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학사)
 1985년 2월: 경희대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
 1979년 9월: 정보 통신 기술사
 1988년 7월: New York State University at Buffalo 교환교수

1980년~현재: 한국항공대학교 전자정보통신컴퓨터공학부 교수
 [주 관심분야] 초고주파 회로 설계, 마이크로파 및 광통신, 안테나 및 전파 전파, EMI/EMC