

광 파이버 전송 시스템에서 광 등화기에 의한 레이저 처핑 및 색분산 보상

Compensation for Laser Chirping and Chromatic Dispersion Using Optical Equalizer in Fiber Optic Transmission Systems

장진현** · 정진호* · 한 욱** · 김영권**

Jin-hyeon Chang** · Jin-Ho Jung* · Wook Han** · Yung-Kwon Kim**

요 약

직접 변조방식을 사용한 장거리 고속 광통신 시스템에서 파이버 색분산은 송신단의 레이저에서 발생된 처핑과 결합하여 심각한 시스템 성능감퇴를 일으킨다. 본 논문에서는 1550[nm] 파장에서 동작하는 2.5[Gbps] 광통신 시스템에서 레이저 처핑이 색분산과 결합하여 시스템에 미치는 영향을 해석하였다. 또한, 레이저 처핑과 파이버 분산을 보상하기 위해서 광 등화기를 사용하였고, 그결과 수신기 감도가 2~4[dB]정도 개선되었음을 알 수 있었다.

Abstract

In a high speed long haul fiber optic communication system using direct modulation, fiber chromatic dispersion and laser chirping can cause serious performance degradations. In this paper, the combined effect of laser chirping and chromatic dispersion on the performance of 2.5[Gbps] rate lightwave systems operating at a wavelength of 1550[nm] was investigated. Also we used an optical equalizer to compensate the laser chirping and fiber dispersion, and knew that the receiver sensitivity was improved by about 2~4[dB].

I. 서 론

레이저 직접변조시에는 처핑현상이 심하게 발생하며, 이러한 처핑현상은 파이버내에서의 색분산과 결합되어 수신단에서 신호간 간섭을 일으키고, 나아가 시스템의 성능을 감퇴시켜서 궁극적으로 장거리 고속 광 전송 시스템을 구현하는데 있어서 장애요인이 되고 있다^{[1]~[3]}. 그 동안 이러한 장애요인에

대한 연구가 진행되어 왔으며, 가장 근본적인 해결 방법은 기존의 파이버를 분산천이 파이버나 분산보상 파이버로 대체하는 방법과 격자기술 등을 적용한 외부변조기를 사용하는 방법 등이 두각을 나타내고 있으나 실용성과 복잡성으로 인하여 실제로 이루어지기는 힘들 것으로 판단된다. 본 논문에서는 레이저 처핑과 색분산의 영향을 보상하기 전에 먼저 비울방정식을 이용하여 처핑이 발생하는 정도를 나타내었고, 광원으로부터 발생한 처핑이 파이

*호서대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Eng., Hoseo University)

**건국대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Eng., Kun-Kuk University)

· 논문 번호 : 970714-045

· 수정완료일자 : 1997년 11월 13일

버내에서의 색분산과 결합하여 수신단에 미치는 영향을 선폭확장계수(α)와 이득압축계수(ε) 및 소광비(r) 등의 파라미터에 대해서 구하였다. 보상방법으로 파이버의 매질과 반대의 강한 색분산을 제공하는 특성을 갖는 광등화기를 사용하였다. 결과적으로 광 등화기를 사용하여 처핑과 색분산을 최소화시켜서 수신단에서의 신호간 간섭을 상당히 감소시킬 수 있었다.

II. 광 파이버 전송시스템

2-1 광 파이버 전송시스템 해석

그림 1의 광 파이버 전송 시스템에서 레이저 광원에 인가된 입력 신호전류는 다음과 같은 연속적인 펄스열로 표현할 수 있다.

$$I(t) = I_b + \sum_{-\infty}^{\infty} B_k I_p(t-kT) \quad (1)$$

여기서 I_b 는 레이저의 바이어스 전류, B_k 는 일정하게 분포된 데이터이고, T 는 신호주기, 그리고 I_p 는 인가된 단일전류 펄스이다.

입력 신호전류에 대한 반도체 레이저의 출력 광전력과 처핑은 활성층에서의 광자밀도와 캐리어 밀도와의 관계 및 레이저 출력 광위상을 나타내는 비울방정식에 의해 결정되며, 비울방정식은 다음식으로 표현된다.^{[1]~[3]}

$$\frac{dP}{dt} = \left(\Gamma G_0 V_g \frac{(N-N_0)}{1+\varepsilon P} - \frac{1}{\tau_p} \right) P + \frac{\beta \Gamma N}{\tau_n} \quad (2)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I(t)}{qV_{act}} - \frac{N}{\tau_n} - V_g G_0 \frac{(N-N_0)}{1+\varepsilon P} P \quad (3)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{2} \alpha \left[\Gamma V_g G_0 (N-N_0) - \frac{1}{\tau_p} \right] \quad (4)$$

여기서 P 와 N 은 활성층에서의 광자와 전자의 밀도, Φ 는 출력광의 위상, Γ 는 모드제한계수, N_0 는 트랜스퍼런트 전자밀도, β 는 자연방출계수, α 는 선폭확장계수, ε 는 이득압축계수, v_g 는 군속도, G_0 는 활성층에서의 이득상수, V_{act} 는 활성층의 두께이다.

식 (2)~(4)를 수치적분함으로써 레이저 처핑현상을 구할 수 있다. 입력신호가 $I(t)$ 일 때 레이저 출력 광신호의 전력과 위상은 다음 식과 같이 얻어진다.^{[2],[3]}

$$m(t) = \frac{P(t)V_{act} \eta_0 h\nu}{2\Gamma\tau_p} \quad (5)$$

$$\Delta v(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi}{dt} \quad (6)$$

여기서 $h\nu$ 는 주파수 ν 에서의 광자 에너지이고, η_0 는 전체 미분양자 효율이다.

광 파이버 전송 시스템에서 단일모드 광 파이버 전송로의 임펄스 응답은 다음과 같이 주어진다.

$$h_f(t) = \left(\frac{c}{2^{\beta} DL} \right)^{1/2} (1-j) \exp\left(-j\pi \frac{c}{2^{\beta} DL} t^2\right) \quad (7)$$

여기서 L 은 파이버의 전송길이, D 는 파이버의 분산계수, c 는 광속도이다.

파이버를 통해 전송된 레이저 칩신호의 출력은 다음 식으로 된다.

$$P(t) = |(m^{1/2}(t)e^{j\phi(t)} * h_f(t))|^2 \quad (8)$$

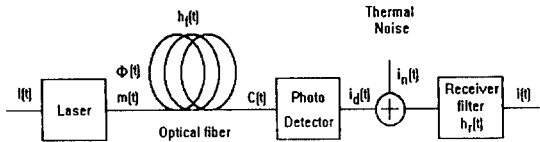


그림 1. 광 파이버 전송 시스템의 블록 다이어그램
Fig. 1. Block diagram of optical fiber transmission system.

광 파이버 전송시스템에서 광수신기의 출력신호는 다음 식과 같다.^{[4],[5]}

$$\begin{aligned} i_0(t) &= i(t) * h_R(t) \\ &= [i_s(t) + i_r(t)] * h_R(t) \\ &= i_d(t) + i_n(t) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $i_d(t)$ 는 광수신기 출력신호, $i_n(t)$ 는 랜덤 가우시안 잡음신호이다. $h_R(t)$ 는 수신기의 임펄스 응답으로 다음 식으로 표시될 수 있다.

$$h_R(t) = 2f_R \exp[-\pi(2f_R t)^2] \quad (9)$$

광수신기 출력신호는 다음식으로 표현될 수 있다.^{[5],[6]}

$$i_d(t) = q \sum_{n=1}^{\infty} g_n h_R(t-t_n) \quad (11)$$

여기서 t_n 은 n 번째 전자의 랜덤 발생시간이고, g_n 은 APD의 증배계수이며, 광수신기 출력신호 $i_d(t)$ 의 세기는 다음 식으로 나타낼 수 있다.^[6]

$$C(t) = \frac{\eta}{h} v P(t) + C_0 \quad (12)$$

여기서는 η 는 검검파기의 양자효율, C_0 는 암전류이다.

임의의 시간 τ 에서 $i_0(t)$ 의 표본 데이터 비타 A_0 에 대한 평균 에러확률은 다음과 같이 간략화된 식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} Pe &= \frac{1}{2^{2M+2}} \sum_1^{2^M} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{S - E(i_0(\tau) | A_M)}{\sqrt{2} \sigma_0} \right) \right. \\ &\quad \left. + \operatorname{erfc} \left(\frac{E(i_1(\tau) | A_M) - S}{\sqrt{2} \sigma_1} \right) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 S 는 디시전 레벨, $i_1(\tau)$ 와 $i_0(\tau)$ 는 $A_0 = 1$ 과

$A_0 = 0$ 에 대한 $i_d(\tau)$ 의 랜덤변수이고, $\operatorname{erfc}(\)$ 는 에러 보합수이며, $E(\)$ 는 통계적 기대치이다.

2-2 광 등화기

본 논문에서는 색분산 보상을 위해 진폭 응답이 평평하고 위상응답이 파이버의 2차 위상응답 효과를 줄일 수 있는 ALL pass 등화기를 사용하였다.

ALL pass 광 등화기는 거울의 반사비가 정확히 100 %인 단일 공진기를 사용한다. 이 반사 구조를 전송 구조로 전환시키기 위해서 그림 2의 a), b), c)와 같이 3 dB의 결합기 또는 편광 무의존형 서큐레이터 그리고 동일한 2개의 에탈론과 3 dB의 결합기를 사용하는 방법이 있다.

단일 공진기 등화기의 주파수 응답은 다음과 같으며, 그림 3과 같은 진폭특성을 갖는다^[7].

$$H_{eq}(\omega) = A \frac{1+R e^{j\omega T}}{1+R e^{-j\omega T}} = A e^{j\phi(\omega)} \quad (14)$$

여기서

$$\phi(\omega) = 2 \tan^{-1} \frac{R \sin \omega T}{1 + R \cos \omega T} \quad (15)$$

R 은 거울의 반사도이고, T 는 공진기의 일주 왕복지연, 그리고 $A (< 1)$ 는 ALL pass 등화기 손실을 나타내는 상수이다.

식 (14)로부터 얻은 지연 응답은 다음과 같이 $1/T$ Hz의 주기를 가지며 주기적인 주파수를 갖는다.

$$\begin{aligned} \tau(\omega) &= \frac{-d \Psi(\omega)}{d\omega} \\ &= 2RT \frac{R + \cos \omega T}{1 + 2R^2 \cos \omega T} \end{aligned} \quad (16)$$

그림 3은 각기 다른 반사비 R 에 대한 정규화된

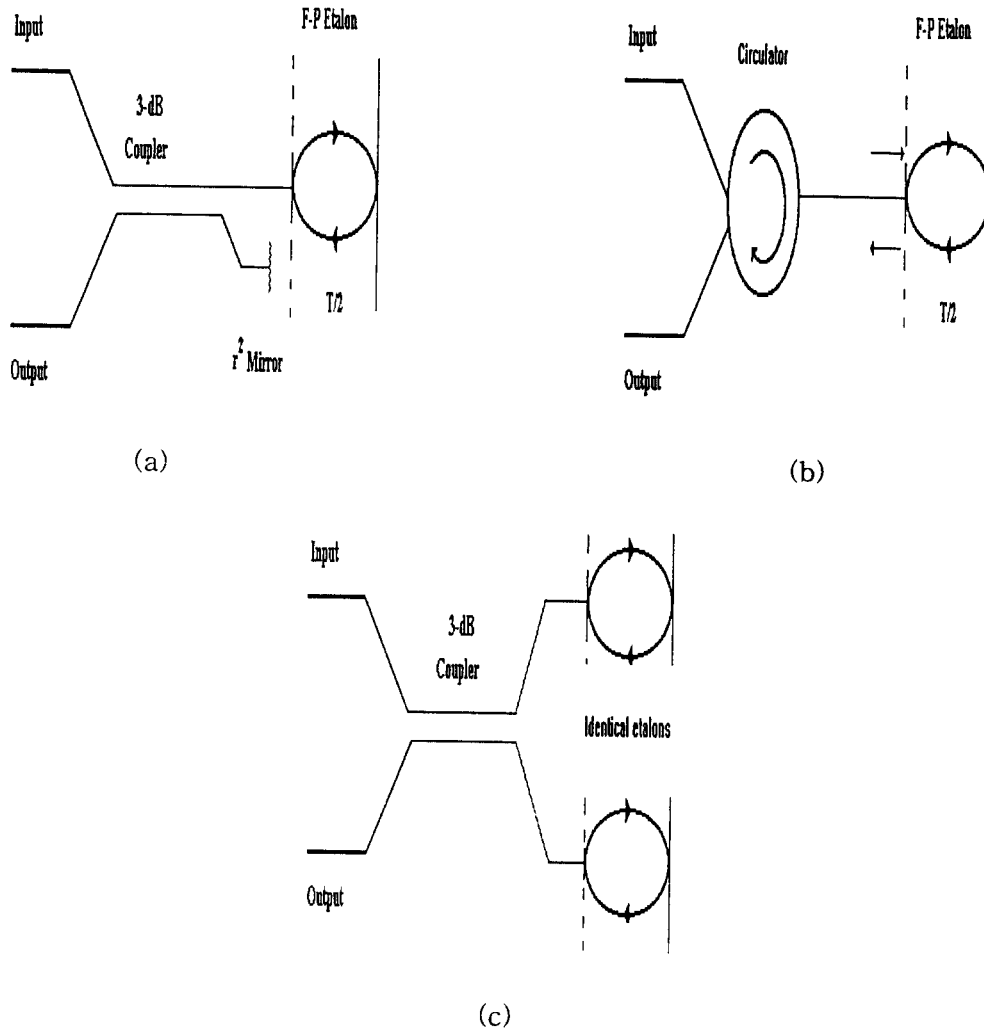


그림 2. ALL pass 광 등화기의 구조 : (a) 3 dB 결합기를 사용한 경우 (b) 서큘레이터를 사용한 경우 (c) 3 dB 결합기와 2개의 동일한 에탈론을 사용한 경우

Fig. 2. ALL pass optical equalizer structuresn : (a) Using 3 dB Coupler (b) Using Circulator (c) Using 3 dB Coupler and 2 identical etalons.

지연 예를 보여준다.

지연 응답 중 선형부분은 파이버 분산을 줄이는데 사용되며, 적당한 기울기에서 신호의 중심 주파수에 대해서는 최적으로 위치되도록 한다.^[8]

III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 고찰

3-1 광 등화기를 가진 전송시스템

광 등화기를 채택하여 처핑과 색분산을 보상한 전송시스템이 그림 4에 나타나 있다. 이 때 데이터 발생기는 NRZ(Non Return Zero) 방식이고 전송 속도는 2.5 Gbps이다. 광원은 1550 nm의 파장을

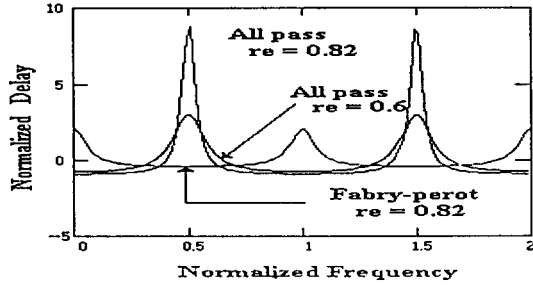


그림 3. 반사비에 따른 지연특성
Fig. 3. Delay characteristics due to reflection ratio.

갖는 반도체 레이저를 사용하였으며 레이저로부터 출력된 신호가 광 등화기를 거쳐 파이버로 들어가도록 설계하였다. 파이버는 표준 단일모드 파이버를 사용하였고, 광검파기는 APD를 사용하였다. 파형정형을 위해서 수신기 필터를 달았으며, 수신기 필터로부터 나온 신호를 수신단에서 BER대 수신기 감도로 평가하였다.

3-2. 시뮬레이션 결과 및 고찰

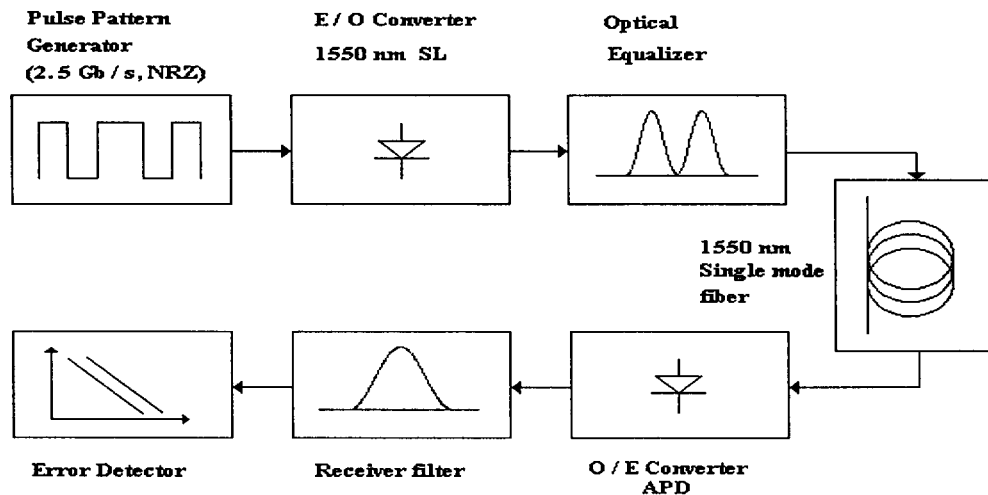


그림 4. 광 등화기를 가진 광 파이버 전송시스템의 블럭 다이어그램
Fig. 4. Block diagram of optical fiber transmission system with optical equalizer.

본 논문에서 시뮬레이션을 위해 사용된 단일 입력펄스 전류 $I_p(t)$ 는 다음 식으로 표현되며, 입력전류신호는 PRBS 데이터를 사용하지 않고 1011의 펄스를 인가했다.

$$I_p(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ I_m[1 - \exp(-t^2/t_r^2)] & 0 < t < T \\ I_m \exp(-(t-T)^2/t_r^2) & t > T \end{cases} \quad (17)$$

여기서 I_m 은 최대 변조전류, t_r 은 상승시간, T 는 입력펄스의 주기이며, $I_p(t)$ 는 연속적인 NRZ 형태이다.

수신기 필터는 식 (10)으로 표현되는 가우시안 응답을 갖는다. 여기서 f_c 은 $0.68/T$ 이다. 또한, 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 사용된 각 변수값은 표 1에 나타나 있으며, 전송비트율은 2.4 Gbit/s ($T=417$ ps)이고, 입력 펄스 $I(t)$ 에서 $t_r=100$ ps, $I_{bas} = 38$ mA 이고 $I_m = 28$ mA이다.

이득압축계수 (ϵ)가 각각 4.83×10^{-20} cm³, 1.42×10^{-19} cm³, 1.68×10^{-19} cm³인 경우에 대한 레이저 출력이 그림 5에 나타나 있으며, ϵ 값이 커질수록

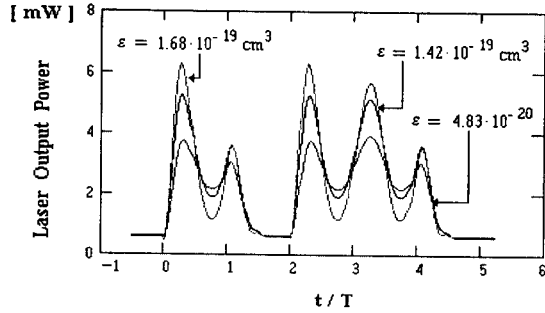


그림 5. 레이저 출력 전력

Fig. 5. Laser output power.

진폭이 심하게 왜곡됨을 알 수 있다.

전송거리가 100 km이고, 선폭확장계수 $\alpha=5$, 이득압축계수가 $1.42 \times 10^{-19} \text{ cm}^3$ 일 때, 소광비 ($r=7.8, 12.6, 18$)에 대한 BER이 그림 6에 나타나 있다. 전송거리가 0 km, 100 km, 150 km에 대한 BER이 그림 7에 나타나 있으며, 여기서 거리가 증가함에 따라 수신광전력 및 비트에러율이 나빠짐을 알

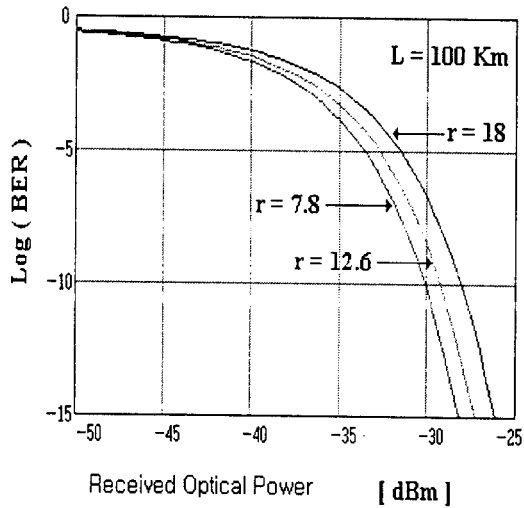


그림 6. 소광비에 대한 수신 광전력 대비 비트에러확률 ($L=100 \text{ km}$)

Fig. 6. BER vs. received optical power for extinction ratios ($L=100 \text{ km}$, $\epsilon=1.42 \times 10^{-19}$, $\alpha=5$).

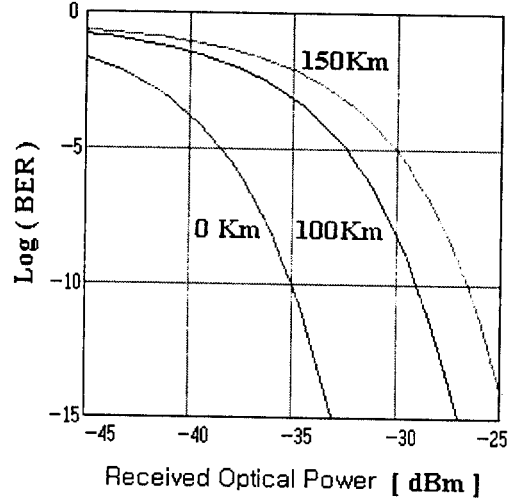


그림 7. 거리에 대한 수신 광전력 대 비트에러확률

Fig. 7. BER vs. received optical power for various distances ($\epsilon=1.42 \times 10^{-19}$, $\alpha=5$, $r=12.6$).

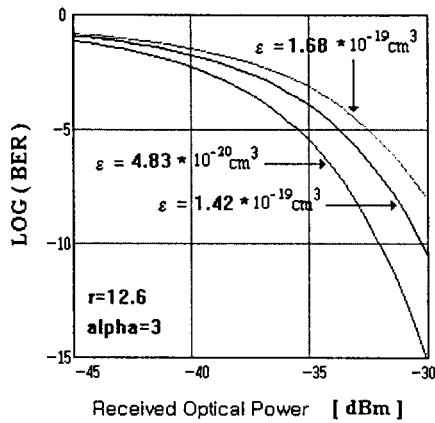
수 있다.

전송거리가 100 km 일 때, 그림 8(a)에는 소광비=12.6, $\alpha=3$, 그림 8(b)에는 소광비=20, $\alpha=3$,

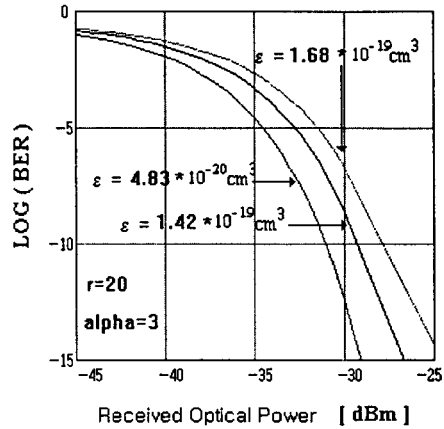
표 1. 변수값

Table 1. Parameter values for simulation.

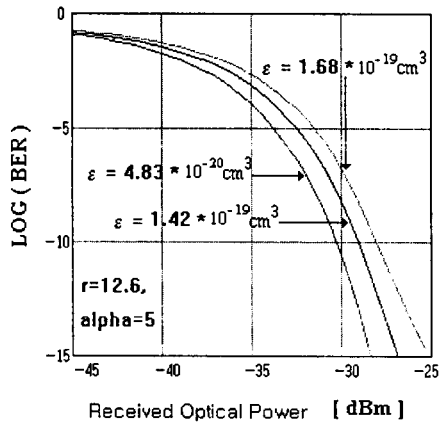
Γ 모드제한 계수	0.4
N_0 트랜스페어런트 전자밀도	10^{18} cm^{-3}
τ_p 광자 수명시간	3 ps
β 자연방출 양	3×10^{-5}
τ_n 전자 수명시간	1 ns
V_{act} 활성층의 체적	$1.5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3$
v_g 군속도	$8.5 \times 10^9 \text{ cm/s}$
α_0 활성층이득계수	$2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$
η_0 총 미분 양자효율	0.4
D 파이버분산계수	-17 ps/km/nm
η 광검파기 양자효율	0.8
C_0 암전류	$6.25 \times 10^{10} \text{ electron/s}$
x 이온화 상수비	0.3



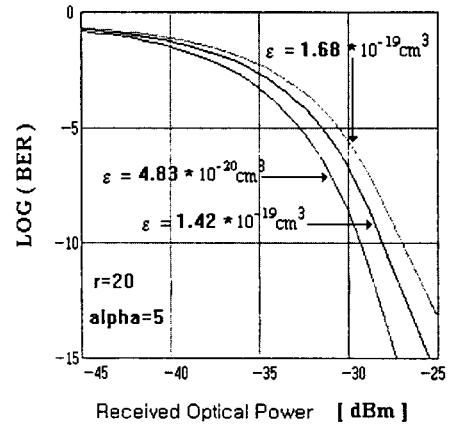
(a) $r = 12.6, \alpha = 3$



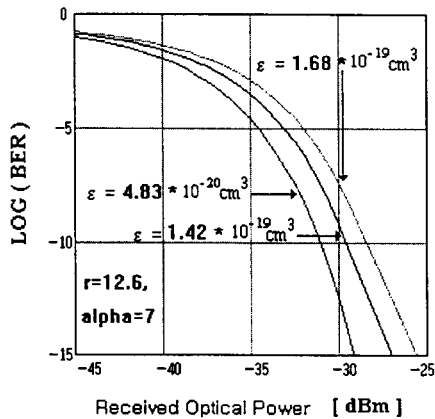
(b) $r = 20, \alpha = 3$



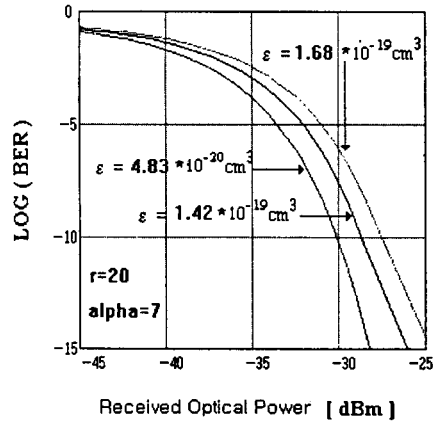
(c) $r = 12.6, \alpha = 5$



(d) $r = 20, \alpha = 5$



(e) $r = 12.6, \alpha = 7$



(f) $r = 20, \alpha = 7$

그림 8. 이득압축요소에 대한 수신광전력 대 비트에러확률($L=100$ km)

Fig. 8. BER vs. received optical power for various gain confinement factors($L=100$ km).

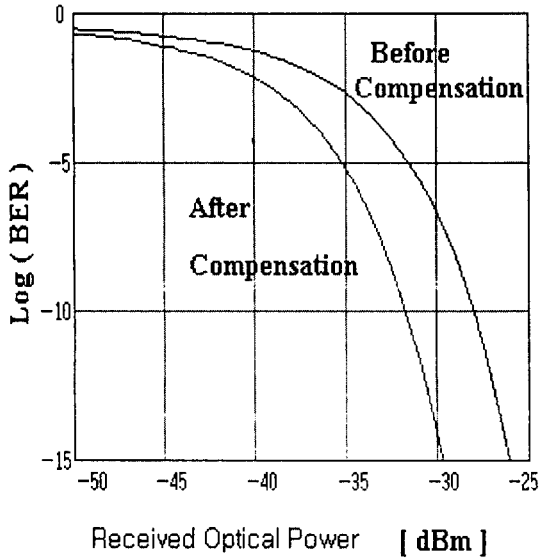


그림 9. 보상전과 후의 BER 비교

Fig. 9. BER Competition before and after the compensation ($\epsilon=1.68 \times 10^{-19}$, $\alpha=5$, $r=12.6$, $R=0.82$).

그림 8(c)는 소광비=12.6 $\alpha=5$, 그림 8(d)는 소광비 = 20, $\alpha=5$, 그림 8(e)는 소광비=12.6, $\alpha=7$ 그림 8(f)는 소광비=20, $\alpha=7$ 일 때 이득압축 요소에 대한 BER을 각각 나타내었다. 이와같이 서로 다른 소광비와 선폭확장요소에 대해서, 이득압축 요소가 수신단에 미치는 영향은 선형성을 갖지 않는다.

보상시 최적으로 등화기 위치를 조정하기 위해서 ALL pass 등화기를 반주기 주파수 천이시켰으며, 등화기의 반사비를 0.82로하여 최적의 기울기를 주었다. 이때 반사비 R과 등화기의 주파수 천이 정도가 적당하지 않으면 오히려 보상전에 비해서 나쁜 결과가 발생되므로 두가지 파라미터를 최적화시키는 것이 매우 중요하다. 그림 9에는 처핑의 발생정도가 가장 큰 경우인 $\epsilon=16.8 \times 10^{-19}$, $\alpha=5$, $r=12.6$ 에 대해서 광 등화기로 보상시키기 전과 보상후의 성능을 비교한 것으로 이때 4 dB 정도 개선되었음

을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 고속 장거리 광통신 시스템에서 심각한 문제가 되는 레이저 처핑현상을 구현하고 이러한 처핑현상이 파이버에서의 색분산과 결합하여 수신단에 미치는 영향을 소광비, 이득압축요소, 선폭확장요소 등의 다양한 파라미터 값에 대해 알아보고, ALL pass 광 등화기를 이용하여 효과적으로 색분산을 보상할 수 있음을 알 수 있었으며, 특히 색분산이 심할수록 광 등화기가 더 유용하게 작용함을 알 수 있었다.

결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 거리가 증가하면 수신기 감도 대 비트에러확률이 나빠졌다.
2. 소광비가 증가하면 무전송시에는 수신기 감도가 좋아지고, 장거리 전송시에 수신기 감도를 나쁘게 한다.
3. 서로 다른 선폭확장요소와 소광비의 조합에 대해서 이득압축요소가 수신단에 미치는 영향은 선형성을 갖지 않는다.
4. BER vs 수신기 감도상으로, 보상후의 시스템 성능이 이득압축요소의 정도에 따라서 2~4 dB 정도 개선되었음을 알 수 있었다.
5. 광 등화기의 삽입손실은 2 dBm 정도가 발생하였다.
6. 광등화기가 효과적으로 색분산을 보상하기 위해서는 등화기의 반사비와 주파수 천이정도를 최적으로 맞추어 주어야 한다.

앞으로, 초고속 장거리 광파시스템을 구축하기 위해서 처핑현상과 색분산에 대한 연구가 보다 다양한 방법으로 이루어져야 하며 실용적이고 효과적인 색분산 보상방법이 제시되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Minoru Ito, Takeshi Ito and Tatsuya Kimura "Dynamic Properties of Semiconductor Lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 10, Oct. 1979.
2. Govind P. Agrawal and M. J. Potasek, "Effect of Frequency Chirping on the Performance of Optical Communication Systems," *Optics letters*, vol. 11, no. 5, May 1986.
3. D. Welford, "A Rate Equation Analysis for the Frequency Chirp to Modulated Power Ratio of a Semiconductor Diode Laser," *IEEE J. Quantum Electron*, vol. QE-21, no. 11, pp. 1749-1751, 1985.
4. A. f. Elrefaie, R. E. wagner, D. A. Atlas, and D. G. Daut "Chromatic Dispersion Limitation in Coherent Optical Fibre Transmission Systems," *Electronics Letter*, vol. 23, no. 14, pp. 756-758, Jul. 1987.
5. Waldemar Hauk, Franz Bross, and Manfred Ottka, "The Calculate of Error Rates for Optical Fiber Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. com-26, no. 7, July 1978.
6. Renato Dogliotti, Angelo Luvisio and Giancarlo Pirani, "Error Probability in Optical Fiber Transmission Systems," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. IT-25, no. 2, March, 1979.
7. I. Tokohama, K. Okamoto, and J. Noda, "Polarization-independent optical circulator consisting of two fibre optic polarizing beam splitters and two Yig spherical lenses," *Electron. Lett.*, vol. 22, no. 7, pp. 370-372, Mar. 27, 1986.
8. L. J. Cimini, Jr., L. J. Greenstein, and A. A. M. Saleh, "Optical equalization for high bit rate fiber optic communications," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, accepted for publication.

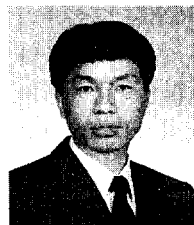
장 진 현



1995년 2월 : 호서대학교 전자공학과 (공학석사)
 1997년~현재 : 두일전자통신 광부품팀 근무
 1997년~현재 : 건국대학교 전자공학과 박사과정 재학중

[주관심분야] 광소자, 광통신

한 옥



1997년~현재 : 삼성전자 정보통신본부 선임연구원
 1997년~현재 : 건국대학교 전자공학과 박사과정 재학중
 [주관심분야] 광통신, 광소자

정 진 호



1989년 2월 : 건국대학교 전자공학과 (공학박사)
 1997년~현재 : 호서대학교 전기, 전자, 제어공학부 부교수
 [주관심 분야] 고속광통신, 대기광통신

김 영 권

1970년 2월 : 연세대학교 전기공학과 (공학박사)
 1997년~현재 : 건국대학교 전기, 전자공학부 교수