

# Mid-Span Spectral Inversion을 이용한 광 펄스 왜곡의 보상에서 전력 대칭을 통한 광대역 WDM 전송

## Wideband WDM Transmission through the Power Symmetry Method in the Mid-Span Spectral Inversion

이 성 려 · 이 윤 현

Seong Real Lee · Yun Hyun Lee

### 요 약

본 논문에서는 분산 천이 광섬유를 전송로로 채택한 10 Gbps, 20 Gbps, 40 Gbps 전송 시스템에서의 전력 대칭 MSSI(mid-span spectral inversion)에 의한 보상 정도를 변조된 광 펄스의 다양한 첨 파라미터에 따라 분석하였다. 우선 각각의 전송 속도에서 입력 전력 변화에 따른 수신단에서의 EOP(eye-opening penalty)를 계산하여 수신 성능을 양호하게 유지할 수 있는 최대 입력 전력의 크기를 첨 파라미터에 따라 살펴보았다. 또한 MSSI의 장거리 광대역 WDM 전송 시스템에의 적용 가능성을 확인해 보기 위하여 송신단부터 광 위상 공액기(OPC; optical phase conjugator)까지의 첫 번째 광섬유의 분산 계수  $D_{11}$  변동에 따른 EOP의 고찰을 통해 수신 성능이 양호하게 유지될 수 있는 송신 파장의 범위를 살펴보았다. 본 논문에서 제안된 최적 펌프 전력 조건을 유지하는 MSSI 방법은 이상 분산(anomalous dispersion) 영역에서 변조 과정을 통해 광 펄스에 인가된 초기 첨이 up-chirp인 경우보다 down-chirp인 경우에서 더욱 효과적임을 확인할 수 있었고, 장거리 WDM 전송에서 비트율에 따라 3.5 dBm 이상의 비교적 높은 전력으로 수~수십 nm 이상의 광대역 전송이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

### Abstract

In this paper, we investigated the degree of compensation for optical pulse shape distortion due to both chromatic dispersion and SPM(self phase modulation) in high speed optical transmission system with dispersion shift fiber. We adopted the power symmetric MSSI(mid-span spectral inversion) as compensation method. We used EOP(eye-opening penalty) parameter in order to evaluate the compensation efficiency of distorted optical pulse. We evaluated input signal power range being able to maintain stable reception performance in the case of various chirp parameter of modulated optical pulse. And, in order to verify the applicable to wideband WDM system, we evaluated the wavelength range being able to maintain stable reception performance through the EOP calculation of various dispersion coefficient of first fiber  $D_{11}$ . We showed that proposed MSSI is effective compensation method to down chirped optical pulse transmission rather than up chirped optical pulse transmission in anomalous dispersion range. And we showed that this method have possibility of relative high power transmission and wideband transmission in WDM system.

### I. 서 론

장거리 초고속 광 전송 시스템에서 Kerr 효과와 그룹 속도 분산(GVD; group velocity dispersion)의

한국항공대학교 전자·정보통신·컴퓨터공학부(School of Electro., Telecomm. and Computer Eng., Hankuk Aviation Univ.)

· 논문 번호 : 20010914-122

· 수정완료일자 : 2001년 10월 24일

상호 작용에 의한 비선형적인 파형의 왜곡은 시스템의 전송 능력을 제한한다<sup>[1]</sup>. 이러한 한계를 극복하기 위하여 과거 수년 동안 진행된 여러 방법 중<sup>[2]~[4]</sup>에서도 광 솔리톤 전송에 필적할만한 전송 성능 향상 방법으로 전송로 중간에 광 위상 공액기(OPC; optical phase conjugator)를 사용하여 신호 왜곡을 보상하는 MSSI(mid-span spectral inversion)<sup>[5],[6]</sup>가 제안되어 한창 연구 중에 있다.

그러나 MSSI 방법은 광 중계기를 채택한 장거리 전송 시 광섬유의 손실과 증폭기의 증폭 이득의 주기적 변동에 기인하는 광섬유 전 링크에서의 일정하지 않은 광 신호의 강도 분포 때문에 자기 위상 변조(SPM; self phase modulation)에 의한 왜곡의 보상에는 한계가 있다<sup>[7]</sup>. 이러한 강도 변화의 영향에 의한 보상 효율 저하를 줄여주기 위한 대표적인 방법으로 경로 평균 강도 근사법(PAIA; path-averaged intensity approximation)이 제안되었는데, 이 방법은 전 링크에 걸쳐 광 신호 강도의 크기가 일정하지 않아도 광 위상 공액기 앞단의 첫 번째 광섬유에서 겪게 되는 광 신호의 평균 강도가 광 위상 공액기부터 수신단까지의 두 번째 광섬유에서 겪게 되는 광 신호의 평균 강도와 같으면 효율 좋은 보상이 이루어질 수 있는 방법<sup>[8]</sup>이다.

경로 평균 강도 근사법에 있어 전송 링크 중간에 위치한 광 위상 공액기에서 공액파(conjugate wave)를 얻기 위한 펌프(pump) 신호의 전력에 따라 광 위상 공액기 다음의 두 번째 광섬유로 입력되는 공액파의 전력이 변하기 때문에 자기 위상 변조 효과의 보상 정도가 달라지게 됨을 예상할 수 있는데, 이러한 펌프 신호 전력의 변화에 대한 광 신호의 보상 정도와 광 신호 전송 시 최상의 색 분산과 자기 위상 변조 효과 보상이 일어지는 광 위상 공액기에서의 펌프 신호의 최적 전력 도출을 선행한 연구(참고 문헌 [9])에서 살펴보았다.

앞선 연구를 통해 얻었던 중요한 결과는 전체 링크를 구성하는 광 증폭기의 간격에 따라 광 신호의 왜곡을 보상할 수 있는 최적 펌프 전력이 결정된다는 것으로, 증폭기 간격이 40 km와 50 km의 각각의 경우에 펌프 전력이 각각 19 dBm와 20 dBm로 결정되어야 한다는 것을 알 수 있었다. 또한 증폭기 간격이 100 km 이상으로 증가하면 경로 평균 근사

법이 적용될 수 없고 광섬유의 실제적인 전력 분포, 광 위상 공액기 내에서의 비선형 매질의 길이와 공액파 전력의 크기를 고려해야만 최적의 보상이 이루어진다는 것을 알 수 있었다.

강도 변조 직접 검파(IM/DD; intensity modulation/direct detection) 시스템에서 반도체 레이저는 신호에 의해 직접 변조된다. 이 때 레이저는 주파수 침(chirp)을 갖는 광 펄스를 만든다. 이러한 광 펄스의 주파수 침 현상은 광통신에서의 전송 비트율에 영향을 주기 때문에<sup>[10]</sup> 변조 과정에서 광 펄스에 부가되는 주파수 침에 따른 전송 성능의 변동을 고려하여 실제적인 장거리 광 전송 시스템을 설계하여야 한다.

따라서 본 논문에서는 앞선 연구의 결과를 바탕으로 설계된 광 전송 시스템 모델의 시뮬레이션을 통하여 안정된 수신 성능 유지를 위한 초기 입력 광 신호 전력의 범위를 송신부에서의 광 변조의 영향을 고려하여 살펴보았다. 본 논문에서 모델링한 전송 시스템의 비트율은 10 Gbps, 20 Gbps와 40 Gbps 으로 하였고, EOP(eye-opening penalty)를 사용하여 광 신호의 보상 정도를 평가하였다. 아울러 양호한 수신 성능을 유지할 수 있는 송신 파장의 범위를 각 전송 속도별로 도출하여 MSSI를 이용한 보상법이 장거리 광대역 파장 분할 다중(WDM; wavelength division multiplexing)전송 시스템에 적용될 수 있는 가능성을 확인해 보았다.

## II. 광 위상 공액기를 이용한 보상 원리

매체에 손실, 그룹 속도 분산, 비선형 효과가 존재하는 경우 이 매체를 전파하는 광 신호는

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = -i \frac{\alpha}{2} A + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{n_2 \omega_0}{c A_{eff}} |A|^2 A \quad (1)$$

으로 표현되는 비선형 쉬뢰딩거 방정식을 따른다<sup>[11]</sup>. 여기서  $A$ 는 광 펄스의 복소 진폭(slowly varying complex envelope),  $\alpha$ 는 매체의 손실,  $\beta_2$ 는 매체의 최저차 그룹 속도 분산 파라미터이다. 또한 식 (1) 우변의 마지막 항에 있는 계수들은 비선형 계수( $\gamma$ )로, 여기서  $n_2$ 는 비선형 굴절 계수,  $\omega_0$ 는 광파의 중

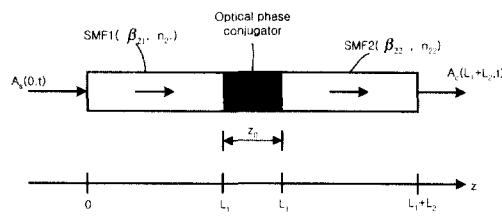


그림 1. OPC를 이용한 색 분산 및 SPM 보상의 개념도

Fig. 1. Schematic configuration of GVD and SPM compensation by OPC.

심 주파수,  $c$ 는 전파속도,  $A_{eff}$ 는 광섬유 유효 코어 직경이다.

광 링크에서의 색 분산과 자기 위상 변조 효과의 보상은 그림 1에서와 같이 길이  $L_1$ 의 첫 번째 광섬유(SMF1)와 길이  $L_2$ 의 광섬유(SMF2) 사이에 광 위상 공액기(길이  $z_0$ )를 삽입하여 전송하면 이루어질 수 있다. 우선 신호파  $A_s$ 는 길이  $L_1$ 의 SMF1을 통해  $+z$  방향으로 전파해 간다. 그런 후 광 위상 공액기는  $A_s$ 를 광 위상 공액기 내의 펌프 신호  $A_p$ 의 펌프 주파수에 대한 스펙트럼 반전을 통해 위상 공액파  $A_c$ 로 변환시킨다. 광 위상 공액기를 빠져 나온  $A_c$ 는 길이  $L_2$ 의 SMF2를 통해 수신단에 도착하게 된다. 수신단에서 검출된 광 신호의 출력은

$$Ac(L_1 + L_2, t) = \exp[i(\omega_c t + \beta_{11}L_1 - \beta_{12}L_2)] \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} d\Omega F^*(\Omega) \exp(-\Omega t) \\ \times \exp\left\{-\frac{i}{2}\Omega^2(-\beta_{21}L_1 + \beta_{22}L_2)\right\} \\ \times \exp\{i(\Delta\phi_1(\Omega, t) - \Delta\phi_2(\Omega, t))\} \quad (2)$$

으로 표현된다. 여기서  $\beta_{j1}$ 는  $j$ 번째 광섬유에서의 그룹 속도 분산 파라미터,  $\Omega$ 는 퓨리에 차원에서의 주파수,  $F(\Omega)$ 는 퓨리에 차원에서의 펄스 진폭이다. 그리고  $\Delta\phi_j(\Omega, t)$ 는  $j$ 번째 광섬유에서 자기 위상 변조에 의해 겪게 되는 위상 천이이다.

식 (2)를 통해 알 수 있듯이 수신단에서 왜곡없이 광 신호가 검출되려면, 우선

$$\beta_{21}L_1 = \beta_{22}L_2 \quad (3)$$

의 조건을 만족하여야 한다. 이것은 두 광섬유에서 겪게 되는 전체 그룹 속도 분산량이 같아지면 색 분

산에 의한 신호 왜곡이 보상된다는 것을 의미하는 조건식이다.

또한 식 (2)우변의 마지막 항은 두 광섬유에서 자기 위상 변조에 의해 겪게 되는 위상 천이의 크기가 같아지면 자기 위상 변조에 의한 신호 왜곡을 보상 할 수 있다는 조건을 의미한다. 광섬유에서의 Kerr 효과에 의한 위상 천이는  $\omega_0/cA_{eff}P$ 에 비례하기 때문에 자기 위상 변조에 의한 신호파 왜곡의 보상 조건을 식으로 표현하면

$$\gamma_1 \bar{P}_s L_1 = \gamma_2 \bar{P}_c L_2 \quad (4)$$

이다. 여기서  $\bar{P}_s$ 와  $\bar{P}_c$ 는 각각 아래의 식들로 표현되는 SMF1에서의 신호파의 경로 평균 전력과 SMF2에서의 공액파의 경로 평균 전력이다.

$$\bar{P}_s = P_s(0, t) \frac{[1 - \exp(-\alpha_1 L_1)]}{\alpha_1 L_1} \quad (5)$$

$$\bar{P}_c = P_c(L_1, t) \frac{[1 - \exp(-\alpha_2 L_2)]}{\alpha_2 L_2} \quad (6)$$

### 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.

#### 3-1 송신부와 전송 링크의 모델링

송신부에서는 128( $=2^7$ ) PRBS(pseudo random bit sequence)를 발생시키며, 외부 광 변조기를 통해 발생되는 NRZ 형식의 광 신호의 출력 전계를 아래의 식 (7)을 따르는 2차 가우시안 펄스(Gaussian pulse)로 하였다.

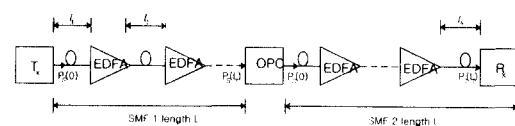


그림 2. MSSI를 채택한 광 전송 시스템의 모델

Fig. 2. Simulation model of optical transmission system using optical phase conjugator.

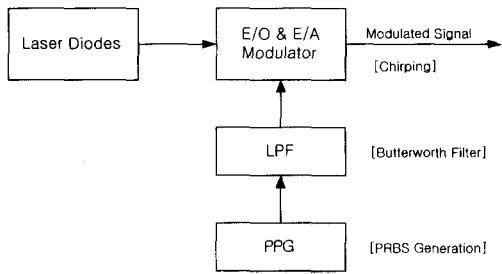


그림 3. 광 송신부의 구조

Fig. 3. Configuration of optical transmitter.

$$A(0, t) = \sqrt{P_0} \exp \left[ -\frac{(1+iC_0)}{2} \left( \frac{t}{t_0} \right)^{2m} \right] \quad (7)$$

여기서,  $P_0$ 는 입사 광 전력,  $m$ 은 펄스의 차수이고,  $t_0$ 는 반치폭( $1/e$ -강도점에서의 폭)으로  $t_0 = \frac{1}{1.825 \times \text{비트율}}$ 의 관계로 10 Gbps, 20 Gbps와 40 Gbps의 비트율에 따라 모델링하였다<sup>[12]</sup>.

또한 식 (7)에서  $C_0$ 는 데이터에 의해 직접 변조된 레이저 다이오드나 외부 광 변조기(external optical modulation)의 주파수 변화 정도를 나타내는 첨(chirp) 파라미터로

$$C_0 = \frac{d \operatorname{Arg}(A_0)}{dt} / \left( \frac{1}{|A_0|} \frac{d |A_0|}{dt} \right) \quad (8)$$

와 같이 정의된다<sup>[13]</sup>. 본 논문에서는 광 송신부에서의 첨 파라미터 변동에 대한 MSSI를 통한 광 펄스의 보상 정도를 살펴보기 위하여 초기 첨 파라미터를 각각 -1.0과 -0.5의 down chirp, 첨이 없는 경우( $C=0$ ), 그리고 +0.5의 up chirp을 가정하여 시뮬레이션 하였다.

전송 링크는 광 손실 보상을 위하여 광섬유의 일정 간격( $L$ )마다 이득이  $G=\exp(a)$ 인 EDFA를 이용한 선로 증폭기를 갖는 전체 길이  $L$ 의 분산 천이 광섬유(DSF; dispersion shift fiber)로 하였다. 송신부로부터 OPC까지의 SMF1의 길이( $L_1$ )와 OPC부터 광 수신부까지의 SMF2의 길이( $L_2$ )를 각각 동일하게 1,000 km로 하였다. 또한 앞서 수행된 연구의 결과에 따라 선로 증폭기의 간격을 50 km로 설정하여 시뮬레이션 하였다.

$L_D = t_0^2 / |\beta_2|$ 로 정의되는 분산 거리를 같은 조건 하에서 비교하기 위하여 분산 계수(dispersion coef-

ficient)를 각각 10 Gbps 전송인 경우  $D = 0.4 \text{ ps/nm/km}$ , 20 Gbps 전송인 경우  $D = 0.2 \text{ ps/nm/km}$ , 40 Gbps 전송인 경우  $D = 0.1 \text{ ps/nm/km}$ 로 설정하여 계산하였다

### 3-2 위상 공액파의 생성과 광 위상 공액기 모델링

그림 4는 4-광파 혼합(FWM; four wave mixing)을 이용한 광 위상 공액기의 구조를 나타낸 것이다<sup>[14]</sup>. 광 위상 공액기는 SMF1을 통해 미약하게 수신된 신호를 증폭하는 EDFA와 광 신호의 반송파 파장만을 통과시키는 광 필터의 입력단, 펌프 신호와 신호파에 의해 스펙트럼 반전이 발생하는 4-광파 혼합단, 공액파의 중심 파장만을 통과시켜서 SMF2로 출력하는 광 필터와 이를 증폭하는 EDFA의 출력단으로 구성된다.

Undepleted pump approximation을 통해 광 위상 공액기에서 생성되는 신호파와 공액파의 진폭을 아래와 같이 구했다.

$$A_s(z_0) = \exp \left( -\frac{\alpha}{2} z_0 \right) \exp[i\phi(z_0)] \cdot [1 + i\phi(z_0)] A_s(0) \quad (9)$$

$$A_c(z_0) = \exp \left( -\frac{\alpha}{2} z_0 \right) \exp[i\phi(z_0)] \cdot [i\phi(z_0)] A_s^*(0) \quad (10)$$

여기서  $A_s$ 와  $A_c$ 는 각각 신호파와 공액파 진폭이고  $z_0$ 는 OPC 내 비선형 매질의 길이이다. 그리고  $\phi(z_0)$ 는 비선형 계수가  $\gamma$ 인 매질(길이  $z_0$ ) 내에서 4-광파 혼합을 통해 나타나는 비선형 위상 천이로

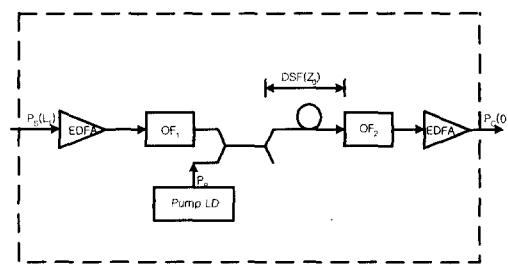


그림 4. 광 위상 공액기의 구조

Fig. 4. Configuration of optical phase conjugator.

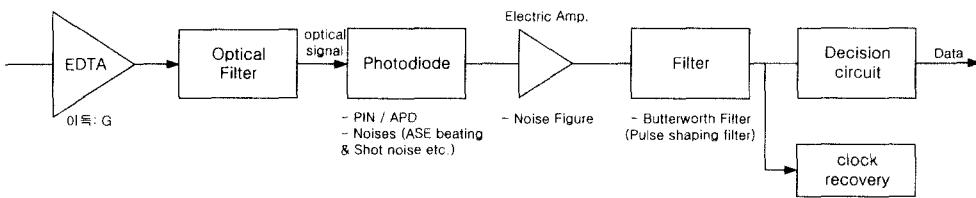


그림 5. 직접 검파 수신부 모델

Fig. 5. Model of direct detection receiver.

$$\begin{aligned}\phi(z_0) &= \gamma P_p(0) \left[ \frac{1 - \exp(-\alpha z_0)}{\alpha} \right] \\ &= \gamma P_p(0) L_{eff}\end{aligned}\quad (11)$$

이다.

본 논문에서 펌프 신호의 중심 파장은 1,549 nm로 하였고, 4-광파 혼합에 의해 발생되는 공액파의 중심 파장은 1,546 nm로 하였다. 스펙트럼 반전을 통해 공액파를 생성하는 비선형 매체로는 영 분산 파장이 펌프 신호의 파장과 같은 분산 천이 광섬유를 사용하였고, 이의 길이는 20 km로 하였다. DSF의 손실 계수는 0.23 dB/km로, 비선형 계수는  $2.6 W^{-1} km^{-1}$ 로 각각 설정하였다.

### 3-3 수신부 모델링

그림 5는 직접 검파 수신부의 모델을 나타낸 것이다<sup>[15]</sup>. 광 수신부는 미약한 신호를 증폭하는 EDFA, 인접한 광 필스와의 간섭 효과를 줄여주기 위한 광 필터, 광 신호 전력을 전류로 변환하는 광 다이오드(PD; photodiode), 그리고 필스 정형 필터(pulse shaping filter), 클록 재생기(clock recovery), 판별 회로(decision circuit)로 이루어진 전기적 수신 회로(electrical receiver circuit)로 구성된다.

광 필터는 광 필스가 전송로에서 겪게 되는 자기 위상 변조에 의해 특히 필스의 첨두 부분에 생성된 첨예한 진폭의 리플 성분을 제거하는 역할을 수행한다. 수신부에서 뿐만 아니라 광 위상 공액기의 입력단과 출력단의 광 필터는 로렌치안(Lorentzian) 필터로 모델링하여 시뮬레이션 하였다.

### 3-4 시뮬레이션 수행 과정

단계 분할 푸리에 변환(SSF; split-step Fourier) 방

법<sup>[11]</sup>을 이용하여 식 (1)을 풀어서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 필요한 파라미터들은 앞 절에서 언급한 값들을 이용하였고, 전송로 중간 위치의 광 위상 공액기를 통한 보상 정도를 송신단에서의 eye-opening과 수신단에서의 eye-opening의 비인 EOP를 통해 평가해 보았다.

본 논문에서는 분산 천이 광섬유를 전송로로 채택한 10 Gbps, 20 Gbps, 40 Gbps 전송 시스템에서의 MSSI에 의한 보상 정도를 앞서 언급된 변조된 광 필스의 다양한 첨 파라미터에 따라 분석하였다. 우선 각각의 전송 속도에서 입력(송신) 전력 변화에 따른 수신단에서의 EOP를 계산하여 수신 성능을 양호하게 유지할 수 있는 최대 입력 전력의 크기를 첨 파라미터에 따라 살펴보았다.

광대역 WDM 시스템 구현에 있어 양호한 수신 성능이 유지될 수 있는 송신 파장의 범위를 신장시키는 것이 무엇보다 중요하다. 제안한 MSSI 보상법을 통해 수신 성능이 양호하게 유지될 수 있는 송신 파장의 범위를 살펴보기 위하여 본 논문에서는 SMF1의 분산 계수  $D_{11}$  변동에 따른 EOP의 변화 정도를 고찰하였고, 그 결과를 바탕으로 광섬유의 2차 분산 계수를 이용하여 MSSI를 WDM에 적용했을 경우의 송신 파장 범위를 계산해 보았다.

## IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

### 4-1 10 Gbps 전송 시스템

그림 6은 초기 첨 파라미터( $C_0$ ) 값이 각각 -1.0, -0.5, 0, +0.5를 갖는 광 필스를 2,000 km 전송한 후 수신단에서의 EOP를 입력 전력 변화에 따라 구한 것이다. 그림을 통해 알 수 있듯이 1 dB의 EOP를 기준으로  $C_0 = +0.5$ 인 경우보다  $C_0 = -1.0$ 인 경

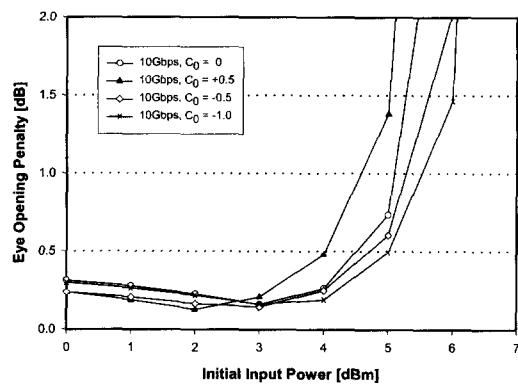


그림 6. 10Gbps 전송 시스템에서 입력 전력 변화에 따른 EOP

Fig. 6. Eye opening penalty dependence on the variation of input signal power in 10 Gbps transmission system.

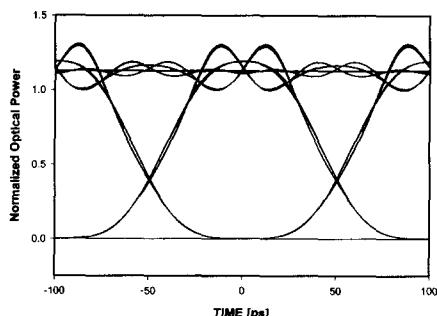
우(MSSI 보상을 통해 5.4 dBm까지 송신이 가능하다) 입력 전력을 1 dBm 정도 개선시키는 것을 알

수 있다.

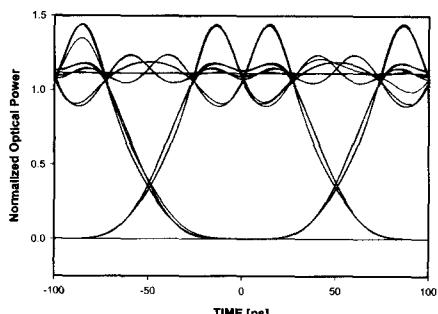
그림 7은 광 변조기의 다양한 초기 첨 파라미터에 대한 5 dBm의 비교적 큰 입력 전력에서의 아이다이어그램을 나타낸 것이다. 변조된 광 펄스의 첨 파라미터 값이 up-chirp일수록 수신된 광 펄스의 앞과 뒤 가장자리 부분에 리플이 심하게 나타남을 알 수 있다. 이는 MSSI 보상법을 적용하더라도 초기 전력 값과 up-chirp 정도가 큰 광 펄스는 장거리 전송을 하면서 겪게 되는 자기 위상 변조의 영향에 의한 비선형 위상 천이와 그로 인한 주파수 천이가 심하게 나타나 수신된다는 것을 의미한다.

그림 8은 그림 6과 같은 조건에서의 SMF1의 분산 계수  $D_{11}$  변동에 따른 EOP를 나타낸 것이다.  $C_0 = 0$ 인 경우 수신단에서의 1 dB의 EOP의 특성을 얻을 수 있는 SMF1의 분산 계수는 1.85 ps/nm/km,  $C_0 = +0.5$ 인 경우는 1.73 ps/nm/km이고,  $C_0 = -0.5$ 와  $C_0 = -1.0$ 인 경우는 1.93 ps/nm/km로 얻어졌다.

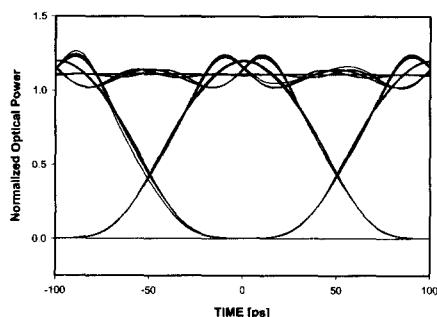
SMF1의 분산 계수  $D_{11}$  변동에 따른 EOP의 변화



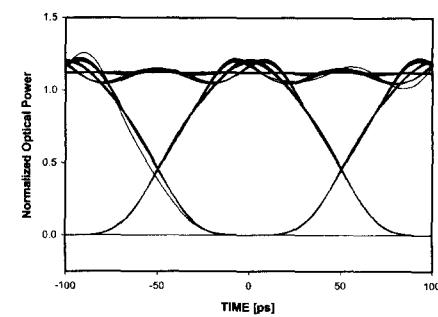
(a)  $C_0 = 0, P_s(0) = 5$  dBm



(b)  $C_0 = +0.5, P_s(0) = 5$  dBm



(c)  $C_0 = -0.5, P_s(0) = 5$  dBm



(d)  $C_0 = -1.0, P_s(0) = 5$  dBm

그림 7. 10 Gbps 전송 시스템에서의 아이다이어그램

Fig. 7. Eye diagram of the received signal in 10 Gbps transmission system.

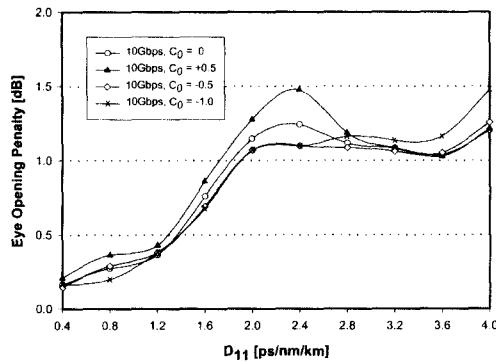


그림 8. 10 Gbps 전송 시스템에서  $D_{11}$  변동에 따른 EOP ( $P_s(0)=3 \text{ dBm}$ ).

Fig. 8. Eye opening penalty dependence on the variation of dispersion coefficient of SMF1 in 10 Gbps transmission system.

정도를 통해 양호한 수신 성능을 유지할 수 있는 송신 파장의 범위를 고찰할 수 있게 해 주는 파라미터로 광섬유의 2차 분산 계수(second-order dispersion coefficient)가 있다. 이것은 WDM과 같은 다중 채널 전송에서 광섬유의 영 분산 파장에 대한 각 채널의 파장 차이에 따른 분산의 정도를 나타낸 값이다. 분산 천이 광섬유의 2차 분산 계수는 일반적으로  $0.08 \text{ ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ 이다. 따라서 그림 7을 통해  $C_0 = -0.5$ 인 경우 MSSI를 통한 광 신호 보상이 양호하게 얻어지는 SMF1에서의 분산 계수 범위가  $\Delta D_{11} = 1.93 \text{ ps}/\text{nm}/\text{km}$ 로 얻어졌는데, 이것은 MSSI를 채택하면 WDM 입력단에서 24 nm 이상의 입력 대역을 이용할 수 있다는 것을 의미한다(만일 채널 당 파장 분할 간격이 0.1 nm가 가능하다면 최대 240개의 채널 전송이 가능하다는 것을 의미한다).

그림 6부터 그림 8을 종합적으로 검토해 보면, SMF1의 분산 계수를 비교적 적은 값으로 적절히 선택하면 광 펄스의 초기 첨파라미터에 상관없이 MSSI를 통해 장거리를 고속으로 전송하는 광 펄스의 색 분산과 자기 위상 변조에 의한 왜곡을 보상할 수 있지만, MSSI는 down-chirp을 갖는 광 펄스 보상에 더욱 효율적이고, 따라서 광대역 전송이 가능하다는 것을 알 수 있다.

#### 4-2 20 Gbps 전송 시스템

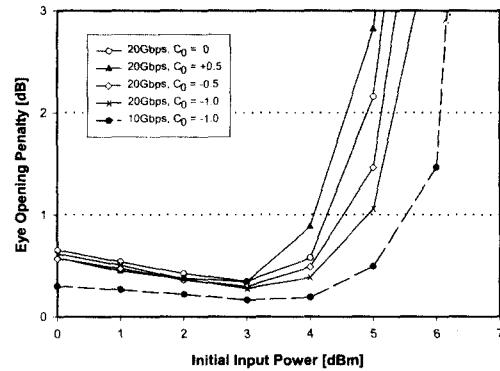


그림 9. 20 Gbps 전송 시스템에서 입력 전력 변화에 따른 EOP

Fig. 9. Eye opening penalty dependence on the variation of input signal power in 20 Gbps transmission system.

그림 9는 20 Gbps 전송 시스템에서의 다양한 초기 첨파라미터에 대한 수신단에서의 EOP를 입력 전력 변화에 따라 구한 것이다. 그림을 통해 알 수 있듯이 1 dB의 EOP를 기준으로  $C_0 = +0.5$ 인 경우보다  $C_0 = -1.0$ 인 경우 입력 전력을 약 1 dBm 정도 개선시키는 것을 알 수 있다. 10 Gbps에서 가장 양호한 수신 특성이 나타나는  $C_0 = -1.0$ 인 경우와 비교해 보면, 20 Gbps의  $C_0 = -1.0$ 인 경우 최대 입력 전력이 0.5 dBm 정도 감소하는 것과 4 dBm 이하의

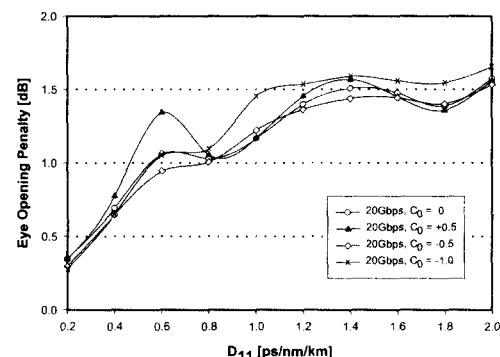


그림 10. 20 Gbps 전송 시스템에서  $D_{11}$  변동에 따른 EOP ( $P_s(0)=3 \text{ dBm}$ ).

Fig. 10. Eye opening penalty dependence on the variation of dispersion coefficient of SMF1 in 20 Gbps transmission system.

송신 전력에서 10 Gbps 전송 시스템에서 보다 전반적인 EOP가 0.2~0.3 dB 열화되는 것을 확인할 수 있다.

그림 10은 20 Gbps 전송에서 광 펄스의 초기 전력이 3 dBm인 경우 SMF1의 분산 계수  $D_{11}$  변동에 따른 EOP 변화를 나타낸 것이다. 그림 10을 통해 광 펄스의 보상을 얻을 수 있는  $D_{11}$ 의 범위가 10 Gbps 전송 시스템에서 보다 전반적으로 줄어드는 것을 확인할 수 있고, 초기 첨파라미터가 -0.5일 때 수신단에서의 1 dB의 EOP의 특성을 가장 양호하게 얻을 수 있는 최대 분산 계수의 크기가 0.8 ps/nm/km임을 알 수 있다. 이는 WDM 입력단에서 10 nm 이상의 입력 대역을 이용할 수 있다는 것을 의미한다.

#### 4-3 40 Gbps 전송 시스템

그림 11은 40 Gbps 전송 시스템에서의 다양한 초기 첨파라미터에 대한 수신단에서의 EOP를 입력 전력 변화에 따라 구한 것이다. 그림을 통해 알 수 있듯이 1 dB의 EOP를 기준으로  $C_0 = +0.5$ 인 경우 보다  $C_0 = -1.0$ 인 경우 입력 전력이 약 0.5 dBm 정도 개선되는 것을 알 수 있다. 10 Gbps에서 가장 양호한 수신 특성이 나타나는  $C_0 = -1.0$ 인 경우와 비교해 보면,  $C_0 = -1.0$ 인 경우 최대 입력 전력이 1.6

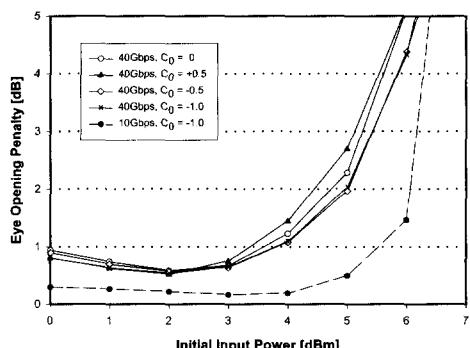


그림 11. 40 Gbps 전송 시스템에서 입력 전력 변화에 따른 EOP

Fig. 11. Eye opening penalty dependence on the variation of input signal power in 40 Gbps transmission system.

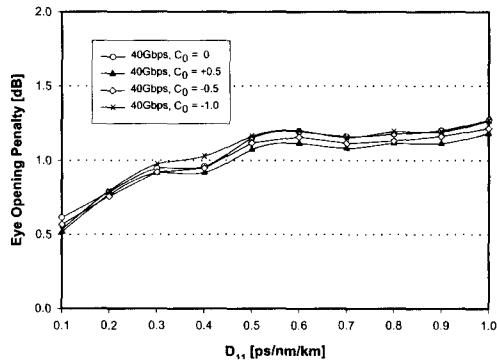


그림 12. 40 Gbps 전송 시스템에서  $D_{11}$  변동에 따른 EOP ( $P_s(0)=2$  dBm)

Fig. 12. Eye opening penalty dependence on the variation of dispersion coefficient of SMF1 in 40 Gbps transmission system.

dBm 정도 감소하는 것과 3.3 dBm 이하의 송신 전력에서 10 Gbps 전송 시스템보다 전반적인 EOP가 0.5~0.7 dB 열화되는 것을 확인할 수 있다.

그림 12는 40 Gbps 전송에서 광 펄스의 초기 전력이 2 dBm인 경우 SMF1의 분산 계수  $D_{11}$  변동에 따른 EOP 변화를 나타낸 것이다. 초기 첨파라미터가 -0.5일 때 수신단에서의 1 dB의 EOP의 특성을 가장 양호하게 얻을 수 있는 최대 분산 계수의 크기가 0.44 ps/nm/km임을 알 수 있다. 이는 WDM 입력 단에서 5 nm 이상의 입력 대역을 이용할 수 있다는 것을 의미한다.

또한 광 펄스의 보상을 얻을 수 있는  $D_{11}$ 의 범위가 10 Gbps와 20 Gbps 전송 시스템에서 보다 전반적으로 줄어들지만  $D_{11}$  변동에 따른 EOP 변화에 광 펄스 초기 첨파라미터가 크게 영향을 미치지 않고 거의 비슷한 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

## V. 결 론

광 위상 공액기의 최적 펌프 전력 조건을 유지하는 MSSI 방법에서 안정된 수신 성능 유지를 위한 10 Gbps, 20 Gbps, 40 Gbps 등의 다양한 전송 속도에서의 광 신호의 입력 전력 범위를 광 변조 과정에서 발생되는 주파수 첨의 영향을 고려하여 살펴보

았고, WDM 전송 시스템의 활용 정도를 알아보기 위하여 송신 파장의 변화에 대한 보상 정도를 SMF1에서의 분산 계수( $D_{11}$ ) 변화에 따른 EOP 평가를 통해 살펴보았다.

제안된 최적 펌프 전력 조건을 유지하는 MSSI 방법은 변조 과정에서 광 펄스에 인가된 초기 첨이 up-chirp인 경우보다 down-chirp인 경우에서 더욱 효과적임을 확인할 수 있었고, down chirp을 갖는 광 펄스의 MSSI 보상을 통한 장거리 WDM 전송에서 전송 속도에 따라 3.5 dBm 이상의 비교적 높은 전력으로 수~수십 nm 이상의 광대역 전송이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 본 논문에서 제안한 방법을 바탕으로 한 전송 속도 및 성능에 맞는 최적 펌프 전력, 신호파 초기 전력, 증폭기 간격, 송신 파장 범위 등의 도출과 이의 적용으로 전송 능력이 매우 증대된 파장 분할 다중 전송 시스템의 실현이 가능할 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

- [1] N. Shibata, K. Nosu, K. Iwashita and Y. Azuma, "Transmission limitations due to fiber nonlinearities in optical FDM systems", *IEEE J Select. Areas in Comm.*, vol. 8, no. 6, pp. 1068-1077, 1990.
- [2] T. L. Koch and R. C. Alferness, "Dispersion compensation by active predistorted signal synthesis", *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-3, pp. 800-805, 1985.
- [3] A. M. Vengsakar and 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 and 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 and 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] C. Lorattanasane and 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.
- [8] 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.
- [9] 이성렬, 이윤현, "Mid-span optical phase conjugator를 이용한 장거리 광 전송 시스템에서의 색 분산과 자기 위상 변조의 보상에 관한 연구", 한국전자과학회논문지, 제12권, 4호, pp. 576-585, 2001년 6월.
- [10] G. P. Agrawal, and N. K. Dutta, *Semiconductor Lasers*, Chap. 6, van Nostrand-Reinhold Press, 1993.
- [11] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, pp. 34-44, 1989.
- [12] N. Kikuchi and S. Sasaki, "Analytical evolution technique of self phase modulation effect on the performance of cascaded optical amplifier system", *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-13, no. 5, pp. 868-878, 1995.
- [13] F. Koyama and K. Iga, "Frequency chirping in external modulators", *J. Lightwave Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 87-92, 1988.
- [14] A. Yariv, "Phase conjugation optics and real time holography", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-14, no. 9, pp. 650-660, 1978.
- [15] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 149-152, 1992.

이 성 렬



1967년 1월 11일 생  
1990년 2월: 한국항공대학교 항공  
통신정보공학과 (공학사)  
1992년 8월: 한국항공대학교 대학  
원 항공통신정보공학과 (공학硕  
士)  
1997년 2월: 한국항공대학교 대학  
원 항공통신정보공학과 박사과정 수료  
1992년 8월 ~ 1994년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학  
과 조교  
[주 관심분야] 솔리톤 전송 시스템, 광 파장 분할 다중화,  
광의 비선형 현상 분석

이 윤 현



1941년 8월 24일생  
1965년 2월: 한국항공대학교 전자  
공학과 (공학사)  
1985년 2월: 경희대학교 대학원 전  
자공학과 (공학박사)  
1979년 9월: 정보통신 기술사  
1988년 7월: New York State Univ  
ersity at Buffalo 교환교수  
1980년 ~ 현재: 한국항공대학교 항공통신정보공학과 교수  
[주 관심 분야] 초고주파 회로 설계, 마이크로파 및 광통  
신, 안테나 및 전파 전파, EMI/EMC