

# Mid-span Optical Phase Conjugator를 이용한 장거리 광 전송 시스템에서의 색 분산과 자기 위상 변조의 보상에 관한 연구

## Compensation of Chromatic Dispersion and Self Phase Modulation in Long-haul Optical Transmission System using Mid-span Optical Phase Conjugator

이 성 렬 · 이 윤 현

Seong-Real Lee · Yun-Hyun Lee

### 요 약

본 논문에서는 광 전송 링크의 전송 성능 향상 방안으로써 표준 단일 모드 광섬유에서 발생하는 색 분산과 자기 위상 변조(SPM ; self phase modulation)에 의한 광 펄스의 왜곡을 최적으로 보상할 수 있는 광 위상 공액기(OPC ; optical phase conjugator)에서의 펌프 신호의 최적 전력을 시뮬레이션을 통한 분석적인 방법으로 도출하고, 최적 펌프 전력 조건 하에서의 안정된 수신 성능 유지를 위한 초기 입력 광 신호 전력의 범위를 살펴보았다. 본 논문에서 사용한 보상 기법은 전송 링크 중간에 광 위상 공액기를 두어 신호 왜곡을 보상하는 MSSI(mid-span spectral inversion)이고, 보상 정도에 대한 평가는 EOP(eye-opening penalty)를 통해 수행하였다. 자기 위상 변조 등의 비선형 현상에 의한 신호 왜곡의 보상에 있어 전력 조절 문제가 매우 중요하기 때문에 본 연구에서 수행한 결과를 바탕으로 한 시스템 전송 거리, 속도 및 성능에 맞는 최적 펌프 전력, 신호파 초기 전력, 증폭기 간격 등의 도출과 이의 적용으로 전송 능력이 매우 증대된 시스템 구현이 가능하다는 것을 입증하였다.

### Abstract

In this paper, we investigated the method of compensation for optical pulse shape distortion due to both chromatic dispersion and SPM(self phase modulation) in a single mode fiber. We selected MSSI(mid-span spectral inversion) as compensation method using OPC(optical phase conjugator). We used EOP(eye-opening penalty) parameter in order to evaluate the efficiency of waveform distortion compensation. In this paper, we induced optimum pump power level in optical phase conjugator through analytic method of computer simulation. And we investigated input signal power range being able to maintain stable reception performance under the condition of optimum pump power. We verified the possibility of high performance optical transmission system realization through the inducement and application of optimum pump power, input signal power and in-line amplifier spacing, because power control is important in the compensation for optical pulse distortion.

### I. 서 론

최근 광통신의 동향은 장거리 전송, 높은 데이터

전송률, 높은 레이저 출력, 적은 광섬유 코어 직경 등으로 요약할 수 있다. 장거리 전송을 위해서 광섬유에 존재하는 손실을 보상하기 위한 광증폭기의

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

· 논문 번호 : 20010129-013

· 수정완료일자 : 2001년 3월 12일

도입이 필수 불가결한 요소가 되었다. 다행히 최근 개발된 어븀 첨가 광 증폭기(EDFA ;  $\text{Er}^{3+}$  -doped fiber amplifier)를 이용하면 전기적인 재생 중계기 없이도 수 천 킬로미터 이상의 광전송이 가능하다<sup>[1]</sup>. 그러나 광증폭기를 사용함으로써 강도에 의존하는 굴절계수 변화 때문에 발생하는 자기 위상 변조(SPM ; self phase modulation), 상호 위상 변조(XPM ; cross phase modulation) 등의 비선형 현상으로 인해 데이터의 고속 전송에 한계를 동시에 갖고 있다<sup>[2]</sup>.

광 전송 시스템의 이러한 비선형 현상과 색 분산(chromatic dispersion)을 극복하기 위한 연구가 과거 수 년 동안 진행되어 왔다. 그간 수행된 광 전송 링크 성능 향상 방법으로는 광 필터(in-line optical filter)를 사용하는 방법<sup>[3]</sup>, 송신단에서 광 변조시에 광섬유에서의 색 분산과 반대되는 처핑(chirping)을 갖도록 pre-chirping하는 방법<sup>[4]</sup>, 단일 모드 광섬유(SMF ; single mode fiber)에서의 광 신호 왜곡을 분산 보상 광섬유(DCF ; dispersion compensation fiber)를 통해 보상하는 방법<sup>[5]</sup> 등이 있다. 하지만 이들 방법은 광 전송 링크에서 겪게 되는 색 분산의 영향에 의한 광 신호 왜곡만을 보상할 뿐 자기 위상 변조에 의해 발생하는 왜곡은 보상하지 못하는 한계를 갖고 있다.

색 분산과 자기 위상 변조의 영향을 보상하기 위한 가장 좋은 방법은 광 솔리톤 전송(optical soliton transmission)이 있다<sup>[6]</sup>. 솔리톤 전송 방식은 보상 효과가 뛰어나지만 광전력이 매우 커야 하고, 기존에 설치된 전송 장치 구성에 변경이 필요하다는 번거로움이 있다. 따라서 이미 매설되어진 표준 단일 모드 광섬유(1,300 nm zero dispersion wavelength)를 사용하여 손실이 최소가 되는 1,500 nm 파장대의 광 신호를 전송할 때 발생하는 색 분산과 자기 위상 변조에 의한 신호 왜곡을 보상하는 방법이 필요한데, 이러한 보상법으로 광 전송 링크 중간 지점에 광 위상 공액기(OPC ; optical phase conjugator)를 사용하는 MSSI(mid-span spectral inversion) 방법이 있다<sup>[7]</sup>.

광 위상 공액기를 이용한 분산의 보상 개념은 Yariv 등에 의해 처음 제안되었다<sup>[8]</sup>. 이 방법은 첫 번째 광 전송 링크에서 겪게 되는 그룹 속도 분산

(GVD ; group velocity dispersion)에 의한 광 펄스의 왜곡을 링크 중간에 위치한 광 위상 공액기와 첫 번째 링크의 그룹 속도 분산과 같은 크기의 그룹 속도 분산을 갖는 두 번째 광 전송 링크를 통해 보상하는 원리를 갖는다. 그러나 광 전송 링크 상에서의 광 위상 공액기 위치에 대한 Kerr 효과의 비대칭성 때문에 광 위상 공액기에 의한 자기 위상 변조 효과에 의한 신호 왜곡의 보상은 한계가 있다. 즉 이 방법은 광섬유의 손실과 증폭기의 증폭 이득 변동 때문에 광섬유에서의 광 신호 강도가 전 링크에 걸쳐 일정하지 않고 그로 인한 광 신호의 강도 변동으로 인해 자기 위상 변조에 의한 왜곡의 보상은 한계가 있었다. 하지만 이러한 강도 변화의 영향을 줄여주기 위한 방법으로 경로 평균 강도 근사법(PAIA ; path-averaged intensity approximation)이 제안되어 한창 연구 중에 있다<sup>[7]</sup>. 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 지금까지의 여러 연구들에서는 이러한 펌프 신호의 전력에 대한 광 신호의 보상 정도와 광 신호 전송시 최상의 색 분산과 자기 위상 변조 효과 보상이 얻어지는 광 위상 공액기에서의 펌프 신호의 최적 전력을 도출하는데 있어서는 이렇다할 성과가 없었다.

따라서 본 논문에서는 광 전송 링크의 전송 성능 향상 방안으로써 표준 단일 모드 광섬유에 1,552 nm 파장의 광 신호를 전송할 때 발생하는 색 분산과 자기 위상 변조에 의한 신호 왜곡을 보상할 수 있는 MSSI 방법을 채택하여 최상의 보상이 얻어질 수 있는 광 위상 공액기에서의 펌프 신호의 최적 전력을 시뮬레이션을 통한 분석적인 방법(analytic method)으로 도출하고, 최적 펌프 전력 조건 하에서의 안정된 수신 성능 유지를 위한 초기 입력 광 신호 전력의 범위를 살펴보고자 한다. 연구 수행의 구체적 방법은 광 선로 증폭기(in-line amplifier)의 간격과 광 필터에 따른 광 신호의 보상 정도를 EOP(eye-opening penalty)를 통해 평가해 볼 것이다.

## II. 광 위상 공액기를 이용한 보상 원리와 공액파 생성

### 2-1 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 슈뢰딩거 방정식을 따른다<sup>[9]</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 중심 주파수,  $c$ 는 전파속도,  $A_{eff}$ 는 광섬유 유효 코어 직경이다.

장거리 전송을 하기 위해서는 광섬유에서의 손실 보상이 필요한데, 이는 광 전송 링크에 손실 보상을 위한 광 증폭기를 두면 된다. 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 신호 파  $A_s$ 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

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

으로 표현된다. 여기서  $\beta_{2j}$ 는  $j$ 번째 광섬유에서의 그룹 속도 분산 파라미터,  $\Omega$ 는 푸리에 차원에서의 주파수,  $F(\Omega)$ 는 푸리에 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 왜곡 없이 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 분산에 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 보상할 수 있다는 조건을 의미한다. 광섬유에서의 Kerr 효과에 의한 위상 천이는  $(\omega n_2/cA_{eff})P$ 에 비례하기 때문에 자기 위상 변조에 의한 신호와 왜곡의 보상 조건을 식으로 표현하면

$$\gamma_1 \overline{P_s} L_1 = \gamma_2 \overline{P_c} L_2 \quad (4)$$

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

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

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

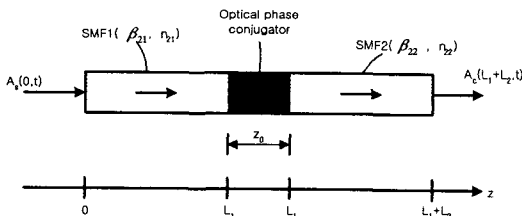


그림 1. OPC를 이용한 색 분산 및 SPM 보상의 개념도

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

이다.

### 2-2 위상 공액파의 생성

광 위상 공액기로는 반도체 증폭기를 이용하는 방법<sup>[10]</sup>, 영 분산 파장의 단일 모드 광섬유를 이용하는 방법<sup>[11]</sup>, 비선형 매질에서의 4-광파 혼합(FWM ; four wave mixing)을 이용한 방법<sup>[12]</sup> 등이 있는데, 본 논문에서는 4-광파 혼합을 이용한 광 위상 공액기를 채택하였다.

undepleted pump approximation에서 펌프 신호의 진폭  $A_p$ , 신호파의 진폭  $A_s$ , 공액파의 진폭  $A_c$ 는 아래의 파동 방정식을 따른다<sup>[9]</sup>.

$$\frac{dA_p}{dz_0} = -\frac{\alpha}{2} A_p + i\gamma P_p(z_0)A_p \quad (7)$$

$$\frac{dA_s}{dz_0} = -\frac{\alpha}{2} A_s + 2i\gamma P_p(z_0)A_s + i\gamma A_p^2 A_c^* \quad (8)$$

$$\frac{dA_c}{dz_0} = -\frac{\alpha}{2} A_c + 2i\gamma P_p(z_0)A_c + i\gamma A_p^2 A_s^* \quad (9)$$

먼저 식 (7)의 해를 구하면

$$A_p(z_0) = A_p(0) \exp\left(-\frac{\alpha}{2} z_0\right) \exp[i\phi(z_0)] \quad (10)$$

이다. 여기서  $\phi(z_0)$ 는 비선형 계수가  $\gamma$ 인 매질(길이  $z_0$ ) 내에서 4-광파 혼합을 통해 나타나게 되는 비선형 위상 천이로

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

이다. 식 (10)을 식 (8)과 (9)에 대입하여 다시 표현하면

$$\frac{dA_s}{dz_0} = -\frac{\alpha}{2} A_s + i\gamma P_p(z_0) \cdot \{2A_s + A_c^* \exp[2i\phi(z_0)]\} \quad (12)$$

$$\frac{dA_c}{dz_0} = -\frac{\alpha}{2} A_c + i\gamma P_p(z_0) \cdot \{2A_c + A_s^* \exp[2i\phi(z_0)]\} \quad (13)$$

이 된다. 먼저 초기 조건  $A_c(0)=0$ 를 가지고 식 (12)의 해를 구하고, 차례로 이 해를 식 (13)에 대입하면 광 위상 공액기에서 생성되는 신호파와 공액파의 진폭을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$A_s(z_0) = \exp\left(-\frac{\alpha}{2} z_0\right) \exp[i\phi(z_0)] \cdot [1 + i\phi(z_0)] A_s(0) \quad (14)$$

$$A_c(z_0) = \exp\left(-\frac{\alpha}{2} z_0\right) \exp[i\phi(z_0)] \cdot [i\phi(z_0)] A_s^*(0) \quad (15)$$

### III. 시뮬레이션 모델과 수행 절차

그림 2는 본 논문에서 시뮬레이션을 수행할 광 전송 시스템의 모델을 나타낸다. 시스템은 크게 송신부, 전송부, 수신부로 구성된다. 송신부에서는 128 (=2<sup>7</sup>) PRBS(pseudo random bit sequence)를 발생시키며, 외부 광 변조기를 통해 발생되는 NRZ 형식의 광 신호의 출력 전계를 식 (16)을 따르는 2차 가우시안 펄스(Gaussian pulse)로 하였다<sup>[13]</sup>.

$$A(0, t) = \sqrt{P_0} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{t_0}\right)^2\right] \quad (16)$$

여기서,  $P_0$ 는 초기 입사 광 신호의 첨두 전력,  $m$ 은 펄스의 차수(=2)이다. 그리고  $t_0$ 는 펄스 폭과 관계된 값으로  $t_0 = 1/(1.825 \times \text{비트율})$ 으로 모델링하

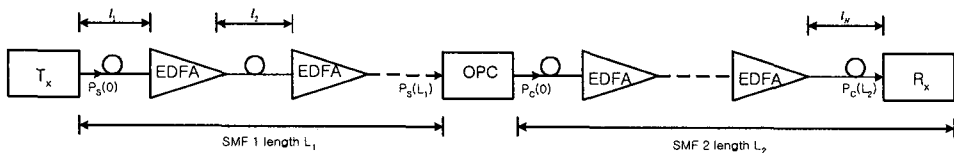


그림 2. 광 전송 시스템의 시뮬레이션 모델

Fig. 2. Simulation model of optical transmission system.

었다<sup>[14]</sup>. 또한 본 논문에서 비트율은 5 Gbps로 하였다.

전송부는 전체 길이(L) 1,200 km를 갖는 단일 모드 광섬유로 구성하였다. 광 손실 보상을 위하여 광섬유의 일정 간격(L)마다 이득이  $G = \exp(\alpha L)$ 인 EDFA를 이용한 선로 증폭기를 두었다. 선로 증폭기의 간격이 광 위상 공액기를 이용한 전송 성능 개선에 어느 정도 영향을 미치는지 고찰하기 위하여 증폭기 간격을 각각 40 km, 50 km와 100 km로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

광 위상 공액기를 통한 색 분산 및 자기 위상 변조에 의한 신호와 왜곡 보상의 영향을 살펴보기 위하여 전체 전송 거리 중간에 광 위상 공액기를 두는 MSSl 방법을 채택하였다. 즉 전체 전송 링크를 길이  $L_1 = 600$  km의 SMF1과 길이  $L_2 = 600$  km의 SMF2로 구성하고, 그 중간에 4-광파 혼합을 이용한 광 위상 공액기를 두어 신호파의 스펙트럼 반전을 수행하도록 하였다. SMF1과 SMF2의 손실 계수는 모두  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.2$  dB/km로 하였고, 그룹 속도 분산 파라미터는 1,552 nm 파장에서 SMF의 전형적인 값인  $\beta_{21} = \beta_{22} = -21$  ps<sup>2</sup>/km로 설정하였다. 또한 비선형 굴절 계수는  $n_{21} = n_{22} = 2.36 \times 10^{-26}$  km<sup>2</sup>/W로 하였고, 유효 코어 직경은 60  $\mu$ m<sup>2</sup>으로 선정하였다.

그림 3의 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. 펌프 신호의 중심 파장은

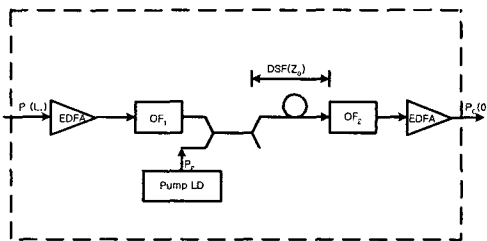


그림 3. OPC의 구조

Fig. 3. Configuration of optical phase compensator.

1,549 nm로 하였고, 4-광파 혼합에 의해 발생하는 공액파의 중심 파장은 1,546 nm로 하였다. 스펙트럼 반전을 통해 공액파를 생성하는 비선형 매체로는 영 분산 파장이 펌프 신호의 파장과 같은 분산 천이 광섬유(DSF ; dispersion shift fiber)를 사용하였고, 이의 길이는 20 km로 하였다. DSF의 손실 계수는 0.23 dB/km로, 비선형 계수는  $2.6$  W<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup>로 설정하였다.

광 수신부는 미약한 신호를 증폭하는 EDFA와 인접한 광 펄스와의 간섭 효과를 줄여주기 위한 광 필터로 구성된다. 또한 광 필터는 광 펄스가 전송로에서 겪게 되는 자기 위상 변조에 의해 특히 펄스의 첨두 부분에 생성된 첨예한 진폭의 리플 성분을 제거하는 역할을 수행한다. 수신부에서 뿐만 아니라 광 위상 공액기의 입력단과 출력단에 존재하는 광 필터에 따른 색 분산과 자기 위상 변조 보상의 영향을 살펴보기 위하여 광 필터를 가우시안 필터와 로렌치안(Lorentzian) 필터 두 종류에 대해 시뮬레이션하였다. 가우시안 광 필터가 갖는 주파수 차원에서의 전달 함수는

$$H(\omega) = \exp\left[-\frac{\ln 2}{2} \frac{(\omega - \omega_0)^2}{B_o^2}\right] \quad (17)$$

이고, 로렌치안 광 필터의 전달 함수는

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + \left\{\frac{2}{B_o}(\omega - \omega_0)\right\}^2} \quad (18)$$

이다. 여기서  $B_o$ 는 3-dB 광 대역폭(optical bandwidth)으로 광 위상 공액기 입력단의 광 필터(OF1)와 시스템 수신단의 광 필터에서는 1 nm(= 124 GHz)로, 광 위상 공액기 출력단의 광 필터(OF2)에서는 0.7nm로 설정하였다.

#### IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

단계 분할 푸리에 변환(SSF ; split-step Fourier) 방법<sup>[15]</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 비

인 EOP(eye-opening penalty)를 통해 평가해 보았다.

우선, 광 위상 공액기에서의 최적의 펌프 전력을 구하기 위하여 SMF1에 입사하는 광 신호의 입력 전력( $P_s(0)$ )을 2 dBm으로 하여 선로 증폭기 간격이 각각 40 km, 50 km와 100 km이고, 각 경우에 대해 광 필터를 각각 가우시안 필터와 로렌치안 필터로 하여 광 위상 공액기에서의 펌프 전력( $P_p$ )을 0~30 dBm로 변화시켜 EOP를 계산하였다. 여기서  $P_s(0)$ 를 2 dBm으로 한 이유는 입사 광 전력이 크면 클수록 자기 위상 변조의 영향이 커져서 수신단에서 검출된 신호의 왜곡이 매우 심해지기 때문에 (식 (1) 우변의 마지막 항) 상대적으로 적은 값을 임의로 선택한 것이다.

각각의 경우에 대한 광 위상 공액기에서의 펌프 전력에 따른 EOP 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 알 수 있듯이 선로 증폭기 간격이 100 km인 경우가 가장 좋은 특성을 보인다. EOP 값이 작을수록 수신단에서의 광전 변환 후의 BER 특성을 양호하게 얻을 수 있기 때문에 0.5 dB의 EOP 값을 기준으로 한 광 위상 공액기에서의 허용 가능한 펌프 전력을 구하면 선로 증폭기 간격이 40 km인 경우에 가우시안 필터와 로렌치안 필터 모두 17~19 dBm, 선로 증폭기 간격이 50 km인 경우에 가우시안 필터와 로렌치안 필터 모두 16~20 dBm, 선로 증폭기 간격이 100 km이고 가우시안 필터인 경우 0

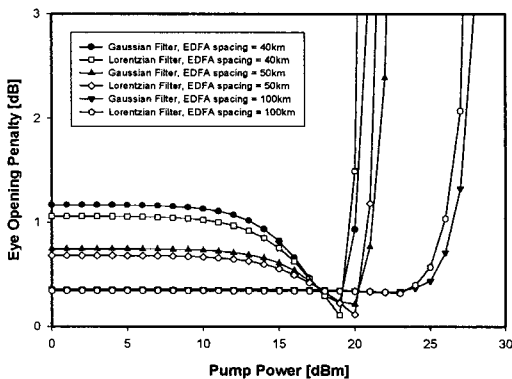


그림 4.  $P_s(0)$ 가 2dBm인 경우 OPC 펌프 전력( $P_p$ ) 변화에 따른 Eye Opening Penalty  
Fig. 4. Eye opening penalty dependence on pump power( $P_p$ ) in OPC.

~25 dBm, 그리고 선로 증폭기 간격이 100 km이고 로렌치안 필터인 경우에는 0~24 dBm로 얻어졌다.

식 (3)과 (4)를 통해서 알 수 있듯이, MSSI 방법에서의 색 분산 보상은 SMF1에서의 전체 그룹 속도 분산량과 SMF2에서의 전체 그룹 속도 분산량을 같게 하면 된다. 그리고 본 논문에서는 SMF1과 SMF2의 손실 계수, 전송로 길이와 비선형 계수를 같게 설정했기 때문에 결국 식 (5)와 (6)을 통해

$$P_s(0) = P_c(L_1) \quad (19)$$

의 조건을 만족하면 자기 위상 변조에 의한 신호파의 왜곡을 보상할 수 있다. 그러나 식 (11)과 식 (15)로부터

$$P_c(L_1) = \gamma^2 P_p^2 L_{eff}^2 P_s(L_1) \quad (20)$$

이므로 광 위상 공액기를 통해 SMF2로 입사되는 공액파의 전력은 SMF1에 입사되는 신호파 전력( $P_s(0)$ )의 함수로 표현될 수 없기 때문에, 그리고 광 위상 공액기 내의 광 필터 OF1과 OF2에 의한 신호파와 공액파의 전력 변동을 고려하여야 하기 때문에 식 (19)의 조건이 만족되는 지를 앞서 유도된 식들을 통해 수치적으로 확인하기가 쉽지 않다.

그러나 고정된 차단 특성을 갖도록 광 필터를 설계하면 식 (11), (15), (19)와 (20)으로부터 알 수 있듯이 광 위상 공액기로부터 발생된 초기의 공액파

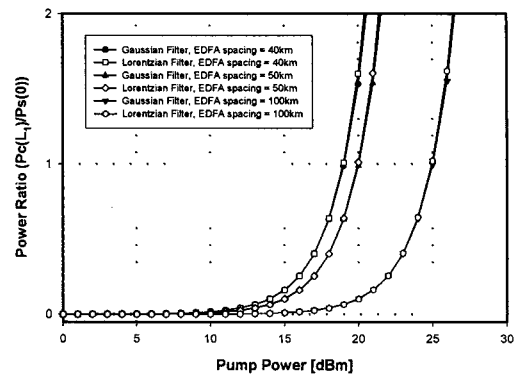


그림 5.  $P_s(0)$ 가 2dBm인 경우 OPC 펌프 전력 변화에 따른 Power Ratio( $P_c(L_1)/P_s(0)$ )  
Fig. 5. Power ratio( $P_c(L_1)/P_s(0)$ ) dependence on pump power in OPC.

의 전력( $|A_c(z_0)|^2$ )의 크기는 광 위상 공액기 내의 펌프 전력에 관계한다. 즉 펌프 전력의 세기 변화에 따라 SMF2에 입사하는  $P_c(L_1)$ 이 변화하고, 따라서 펌프 전력의 세기에 따라 식 (4)의 조건이 만족되지 못하기 때문에 보상 정도에 변화가 있는 것을 예상할 수 있다. 즉 달리 말하면 특정한 펌프 전력에 대해서만 식 (19)의 보상 조건이 만족되는데 이러한 펌프 전력은 최소의 EOP를 결과하는 펌프 전력과 일치한다.

광 위상 공액기에서의 펌프 전력과 그에 따른 식 (19)의 보상 조건 변동에 따른 전송 성능의 변화를 살펴보기 위하여 아래와 같은 전력비(power ratio)를 정의해서 펌프 전력 변화에 대한 전력비를 구하여 그림 5에 나타냈다.

$$\begin{aligned} \text{Power Ratio} &= \frac{P_c(L_1)}{P_s(0)} \\ &= \frac{\text{SMF2에 입사하는 공액파 전력}}{\text{SMF1에 입사하는 신호파 전력}} \end{aligned}$$

그림 5를 통해 알 수 있듯이 펌프 전력에 비례하여 전력비는 지수 함수적으로 증가한다. 그림 5에서 선로 증폭기의 간격이 40 km인 경우 펌프 전력이 19 dBm인 값에서, 선로 증폭기 간격이 50 km인 경우 펌프 전력이 20 dBm에서 전력비가 1이 되는데, 이 값에서  $P_c(L_1)$ 가  $P_s(0)$ 와 같아져서 식 (4)의 조건이 만족된다는 것을 알 수 있다. 이는 그림 4를 통해 증폭기의 간격이 40 km인 경우 펌프 전력이 19 dBm인 값에서, 증폭기 간격이 50 km인 경우 펌프 전력이 20 dBm에서 EOP가 최소로 나타나는 것을 통해서도 확인할 수 있다.

하지만 그림 4와 그림 5를 통해서 선로 증폭기의 간격이 100 km인 경우에는 전력비가 0.4인 23 dBm의 펌프 전력에서 최소의 EOP가 얻어졌다(또한 이 경우 전력비가 1이 되는 펌프 전력은 25 dBm으로 이 값에서의 EOP는 가우시안 필터를 사용한 경우 0.44 dB, 로렌치안 필터를 사용한 경우 0.57 dB로 양호하게 나타났다). 이는 증폭기 간격이 길어지면 SMF1과 SMF2에서의 평균 전력이 동일하다는 개념에서의 식 (4)의 조건을 식 (19)의 조건으로 근사적·분석적으로 더 이상 접근할 수 없다는 것을 의미한다. 즉 증폭기 간격이 증가하면 광섬유에서의 실제

전력 분포를 고려해야 하고 광 위상 공액기 내에서의 비선형 매질의 길이와 공액파 전력의 크기를 고려해야 한다는 것을 의미한다.

지금까지의 분석 결과 식 (3), 식 (4)와 식 (19)를 만족하는 최적의 펌프 전력은 증폭기 간격이 40 km, 50 km, 100 km에 있어 각각 19 dBm, 20 dBm, 23 dBm이다. 지금까지의 시뮬레이션은  $P_s(0)$ 를 비선형 효과의 영향을 고려해 비교적 적은 값으로 가정하여 수행했다. 하지만 수신단에서의 SNR을 증가시키기 위해서는 초기 입사 광 전력이 커야 하기 때문에 색 분산과 SPM 보상을 통한 최적 전송 조건을 찾기 위해서는 최적의 펌프 전력 하에서의 입사 광 신호의 전력 변동에 대한 EOP를 구함으로써 가능하다.

그림 6에서는 증폭기 간격이 40 km인 경우 펌프 전력을 19 dBm으로, 증폭기 간격이 50 km인 경우 펌프 전력을 20 dBm으로, 증폭기 간격을 100 km인 경우 펌프 전력을 23 dBm으로 각각 설정하여  $P_s(0)$  변화에 따른 EOP를 광 위상 공액기 없이 광 펄스를 100 km 전송하는 경우의  $P_s(0)$  변화에 따른 EOP와 비교하여 나타냈다. 그리고 그림 7은 여러 경우에 대한 아이 다이어그램을 나타낸 것이다.

우선 그림 6을 통해 알 수 있듯이 광 위상 공액기에서의 펌프 전력이 광섬유에서의 색 분산과 자기 위상 변조에 의한 신호 왜곡을 보상할 수 있는 최적

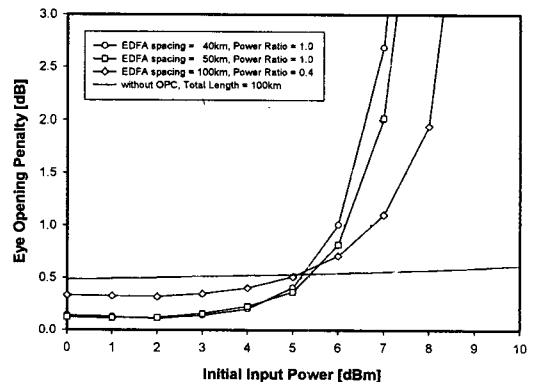


그림 6. 최적인 OPC 펌프 전력에서의  $P_s(0)$  변화에 따른 Eye Opening Penalty

Fig. 6. Eye opening penalty dependence on input signal power ( $P_s(0)$ ).

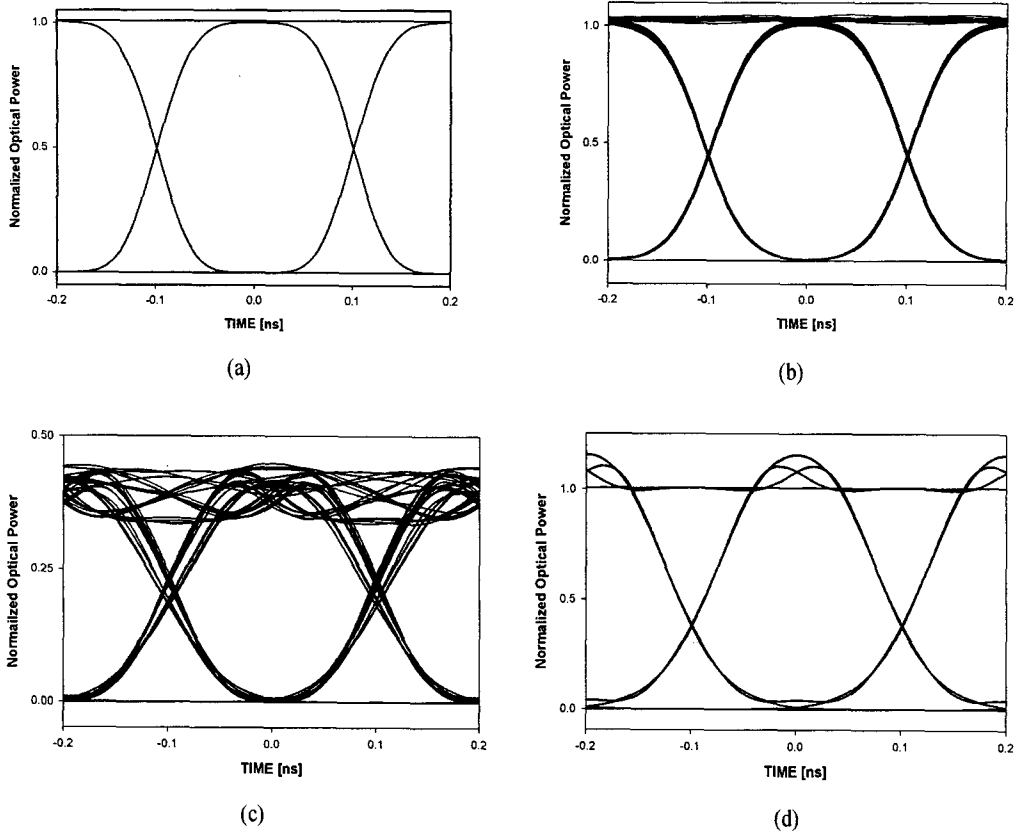


그림 7. 아이 다이어그램 (a) SMF1에 입력되는 광 신호, (b)  $P_s(0) = 2$  dBm,  $P_p = 19$  dBm, 증폭기 간격 = 40 km인 경우 1,200 km 전송 후 수신 광 신호, (c)  $P_s(0) = 5$  dBm,  $P_p = 23$  dBm, 증폭기 간격 = 100 km인 경우 1,200 km 전송 후 수신 광 신호, (d) 광 위상 공액기를 통한 보상 없이 100km 전송된 후의 수신 광 신호( $P_s(0) = 5$  dBm).

Fig. 7. Eye diagram (a) input signal into SMF1, (b) received optical signal after 1,200 km transmission in case of  $P_s(0) = 2$  dBm,  $P_p = 19$  dBm, EDFA spacing = 40 km, (c) received optical signal after 1,200km transmission in case of  $P_s(0) = 5$  dBm,  $P_p = 23$  dBm, EDFA spacing = 100 km, (d) received optical signal after 100km transmission without OPC.

의 펌프 전력을 유지하면 증폭기 간격에 상관없이 입사 광 신호 전력이 5 dBm(3.2 mW)까지 증가해도 0.5 dB 이하의 양호한 EOP로 광 위상 공액기를 이용한 보상이 없는 경우보다 10배 이상의 장거리 전송이 가능함을 알 수 있다.

하지만 증폭기 간격이 100 km 이상으로 증가하고(그림 7(c)), 입력 전력이 비교적 커지면 앞서 언급했듯이 전체 전송로에서의 실제 전력 분포 영향을 고려해야 하기 때문에 평균 전력의 대칭 조건만으로는 보상을 얻을 수 없다. 반면에 그림 6과 7(b)

를 통해 확인할 수 있듯이 신호 전력이 비교적 낮고 증폭기 간격이 짧으면 광섬유의 비선형 효과는 전송로 상의 실제 전력 분포가 아닌 평균 전력에 크게 의존하기 때문에 식 (19)의 조건, 즉 두 광섬유에서의 평균 전력이 같아지도록 광 위상 공액기의 펌프 전력 등을 결정하면 양호한 보상을 얻을 수 있다.

또 한가지 주목해야 할 사항은  $P_s(0)$ 가 5 dBm 이하인 경우에 있어 증폭기 간격이 100 km에서의 EOP보다 증폭기 간격이 40 km와 50 km에서의 EOP가 더욱 적은 값으로 비슷하다는 것이다. 이는



수신 특성이 양호한 증폭기 간격은 50 km 이하라는 것을 의미한다. 아울러 수신단에서의 BER 성능에 영향을 주는 가장 큰 요인 중의 하나로 EDFA에서 발생하는 증폭 자연 방출(ASE ; amplified spontaneous emission) 잡음을 들 수 있는데, ASE 총 잡음 전력은 전체 전송로 구간에 있는 증폭기 개수에 비례하기 때문에 양호한 전송 품질의 유지를 위한 가장 최적의 증폭기 간격은 50 km라는 사실을 알 수 있다.

본 연구에서 수행된 최적 펌프 전력 결정에 의한 MSSI 방법은 파장 분할 다중 시스템에서 채널 증가에 따른 총 전송 전력의 증가로 광섬유에서의 자기 위상 변조 효과 등의 비선형 왜곡을 광 위상 공액기를 통해 효과적으로 보상할 수 있고, 결과적으로 보상이 허용되는 전력 범위 내에서 많은 수의 채널 다중 전송이 가능할 것(예를 들어, MSSI에 의한 보상 가능 최대 입사 전력이 5 dBm이고 각 채널의 평균 전력이 -10 dBm인 경우 총 32개 채널 다중화가 가능하다)이라는 활용성을 지니고 있는 방법이라고 하겠다.

## V. 결 론

지금까지 장거리 광전송 링크에서 발생하는 색 분산과 SPM을 보상하는 방법인 MSSI에서 4-광파 혼합을 통한 광 위상 공액기 내의 펌프 전력이 보상에 미치는 영향을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 살펴 보았다. 즉 색 분산과 자기 위상 변조의 영향을 보상할 수 있는 증폭기 간격에 따른 최적의 펌프 전력을 도출하였다. 아울러 최적의 펌프 전력을 유지하면 SMF1에 입사하는 광 신호 전력이 5 dBm까지 증가하여도 전력 증가에 따른 자기 위상 변조의 영향을 MSSI 방법을 통해 보상시킬 수 있다는 사실과 수신측에서의 우수한 전송 품질 유지가 가능한 선로 증폭기의 간격이 50 km라는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 손실은 최소이지만 그룹 속도 분산 값이 큰 1,500 nm 대역을 이용한 단일 모드 광섬유에서의 전송 시스템을 대상으로 하였기 때문에 데이터 전송률이 5G bps로 비교적 낮다. 하지만 전송 속도의 개선은 사용 파장 대역을 정상 분산 영역

(normal dispersion region)의 1,300 nm로 하거나 1,500 nm 대역에서 그룹 속도 분산 값을 최소화시킬 수 있는 분산 천이 광섬유를 사용하여 가능하기 때문에 광 전송 시스템에서의 이들의 채택과 장거리의 고품질 전송을 위한 색 분산 및 자기 위상 변조 영향 보상의 적용으로 전송 성능을 크게 신장시킬 수 있을 것이다. 다시 말해 신호 왜곡의 보상, 특히 자기 위상 변조 등의 비선형 현상에 대한 보상에 있어 전력 조절 문제가 매우 중요하기 때문에 본 연구에서 수행한 결과를 바탕으로 한 시스템 전송 거리, 속도 및 성능에 맞는 최적 펌프 전력, 신호파 초기 전력, 증폭기 간격 등의 도출과 이의 적용으로 전송 능력이 매우 증대된 파장 분할 다중 전송 시스템 등에서의 전송 기술로써의 적용이 가능할 것으로 기대된다.

## 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] 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.
- [3] F. Quellet, "Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides", *Opt. Lett.*, vol. 12, pp. 847-849, 1987.
- [4] T. L. Koch and R. C. Alfarness, "Dispersion compensation by active predistorted signal synthesis", *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-3, pp. 800-805, 1985.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, pp. 34-44, 1989.
- [10] S. Watanabe, “Compensation of phase fluctuation in a transmission line by optical phase conjugation”, *Opt. Lett.*, vol. 17, pp. 1355-1357, 1993.
- [11] S. Watanabe, T. Naito, and T. Chikama, “Compensation of chromatic dispersion in a single mode fiber by optical phase conjugation”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 1, pp. 92-95, 1993.
- [12] A. Yariv, “Phase conjugation optics and real time holography”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-14, no. 9, pp. 650-660, 1978.
- [13] S. Wen, “Bi-end dispersion compensation for ultralong optical communication system”, *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-17, no. 5, pp. 792-198, 1999.
- [14] 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.
- [15] G. P. Agrawal, and M. J. Potasek, “Nonlinear pulse distortion in single-mode optical fibers at the zero-dispersion wavelength”, *Phys. Review A*, vol. 33, no. 3, pp. 1765-1776, 1986.

## 이 성 렬



1967년 1월 11일 생  
 1990년 2월: 한국항공대학교 항공통신정보공학과(공학사)  
 1992년 8월: 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과(공학석사)  
 1997년 2월: 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 박사과정 수료

1992년 8월~1994년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 조교

[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 전자·정보통신·컴퓨터공학부 교수

[주 관심분야] 초고주파 회로 설계, 마이크로파 및 광통신, 안테나 및 전파 전파, EMI/EMC