

Inline 분산 제어 광전송 링크에서 전체 잉여 분산

Net Residual Dispersion in Inline Dispersion Managed Optical Transmission Link

이성렬*

Seong-Real Lee*

요 약

단일 모드 광섬유(SMF single mode fiber)로 구성된 광전송 링크에서 축적되는 색 분산과 비선형 효과를 효과적으로 보상하는 광전송 링크 구성 방법을 제안하였다. 제안된 광전송 링크는 전체 전송로 중간에 광 위상 공액기 (optical phase conjugator)를 두고 SMF의 각 광 중계 간격에서 축적된 분산을 분산 보상 광섬유 (DCF dispersion compensating fiber)를 통해 보상하는 inline 분산 제어 (DM; dispersion management)가 적용된 구조이다. 광전송 링크의 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)은 송신기 다음에 있는 DCF에 의해 결정되는 선치 보상 (precompensation)과 수신기 전에 있는 DCF에 의해 결정되는 후치 보상 (postcompensation)을 통해 조절하도록 설계하였다. 선치 보상이나 후치 보상 중 하나를 이용해 NRD을 결정하는 구조보다 선치 보상과 후치 보상을 동시에 변화시키면서 분산 맵의 구조가 OPC를 중심으로 대칭이 되는 링크 구조가 더욱 효과적이고 융통적이라는 것을 확인하였다.

Abstract

A configuration scheme of optical link effectively compensating chromatic dispersion and nonlinear effects accumulated in optical link with single mode fibers (SMFs) is proposed. The proposed optical link configuration consist of optical phase conjugator (OPC) placed at middle of total transmission length and inline dispersion management (DM) as a role of compensating cumulated in each optical repeater of SMF by dispersion compensating fiber (DCF). Net residual dispersion (NRD) of this optical link is designed to be controlled through precompensation and postcompensating. The precompensation and postcompensation are designed to be determined by DCF after transmitter and before receiver, respectively. It is confirmed that optical link configuration with symmetric dispersion map with respect to OPC, which is implemented by controlling NRD through both precompensation and postcompensation, is better to be effective and adaptive than other configuration with NRD controlled by only precompensation or postcompensation.

Key words : Dispersion management, Dispersion map, OPC, Net residual dispersion, pre(post)compensation, Dispersion compensating fiber.

* 목포해양대학교 해양전자통신공학부 (Div. of Marine Electro. & Comm. Eng., Mokpo National Maritime University)

- 제1저자 (First Author) : 이성렬
- 투고일자 : 2008년 7월 7일
- 심사(수정)일자 : 2008년 7월 8일 (수정일자 : 2008년 7월 31일)
- 게재일자 : 2008년 8월 30일

I. 서론

현재 광범위하게 설치되어 1,550 nm로 운용중인 단일모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)를 이용한 대용량 광전송 시스템에서 색 분산 (chromatic dispersion) 때문에 전송거리를 늘리는데 많은 제약이 있는 것은 잘 알려진 사실이다. 분산 천이 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)를 이용한 수동적인 분산 보상인 분산제어 (DM; dispersion management)는 이러한 제한을 극복하는 방법 중 하나로 널리 알려져 있다[1],[2]. 그러나 SMF들로 구성된 광전송 링크에 DM이 적용되어 있다고 하더라도 광섬유의 손실을 보상하여 전송 거리를 늘리기 위해 에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA; erbium-doped fiber amplifier) 등의 증폭기를 광 증계기로 사용하게 되면 광 신호의 전력이 증가하여 Kerr 효과에 의한 비선형 현상, 특히 자기 위상 변조 (SPM; self phase modulation) 현상에 의한 신호 왜곡이 부가적으로 생겨 광 신호의 품질을 더욱 저하시킨다[3].

광통신 시스템에서 색 분산뿐만 아니라 비선형 효과를 보상하기 위한 기술로 광 위상 공액(optical phase conjugation)이 있다[4],[5]. 그러나 광 위상 공액 기술에서 비선형 효과를 보상하기 위해서는 광 신호의 전력이 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)를 중심으로 대칭적이어야 한다는 단점이 있다. 2000년 OPC에 대한 광 전력 대칭화를 반대로 전파하는 라만 펌핑 (counterpropagating Raman pumping)에 의해 실현할 수 있다는 연구가 발표되었다 [6]. 하지만 이 방법은 전력의 대칭 분포를 얻기 위해서는 큰 라만 이득 (약 2~3 dB net gain)이 필요하게 되어 이중 레일리 역산란 (double Rayleigh back

scattering)을 생성하는 문제를 안고 있다[7]. 본 논문의 저자는 OPC가 적합한 분산 맵 (dispersion map)의 DM 기술과 결합하면 비선형성에 의한 광 신호 왜곡은 OPC가, 분산에 의한 왜곡은 DM 기술이 각각 보상하는 효과를 나타내게 되어 궁극적으로 광 전력 대칭의 문제가 완화되어 성능 저하에 대한 한계가 개선되어 장거리 대용량 광전송 시스템의 구현이 가능하리라 판단한다. 따라서 본 논문에서는 17 ps/nm/km의 분산 계수를 갖는 SMF 광전송 링크에 OPC와 DM 기술을 결합하고자 할 때 시스템 성능을 개선할 수 있는 조건을 도출해 보고자 한다. 도출되는 조건들은 40 Gbps 전송률을 갖는 24 채널 파장 분할다중 (WDM; wavelength division multiplexing) 시스템의 구현을 전제로 한 것들이다. 즉 본 논문에서 살펴보는 전송 링크를 통해 100 GHz (0.8 nm) 간격의 24개 WDM 채널들을 효과적으로 보상할 수 있는 DM 설계 기준을 제시하고자 한다.

각 채널의 성능 평가 파라미터는 수신된 신호의 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)이고, 최적의 DM 설계 기준은 수신단에서 축적된 총 분산량으로 정의되는 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)에 따른 EOP를 평가하여 제시한다. 전송 링크에 적용하는 DM의 구조는 매 증계간격에서 축적된 분산을 보상하기 위해 증계기 사이마다 DCF를 설치한 inline DM이다. 그리고 송신기 바로 다음에 있는 DCF와 수신기 바로 앞에 있는 DCF가 각각 전체 전송 링크의 분산을 선치 보상 (precompensation) 하고 후치 보상 (postcompensation) 하도록 설계했다. WDM 신호의 변조 형식은 의사 선형 전송 영역 (pseudo linear transmission regime)이 가능한 RZ를 사용하였다[8].

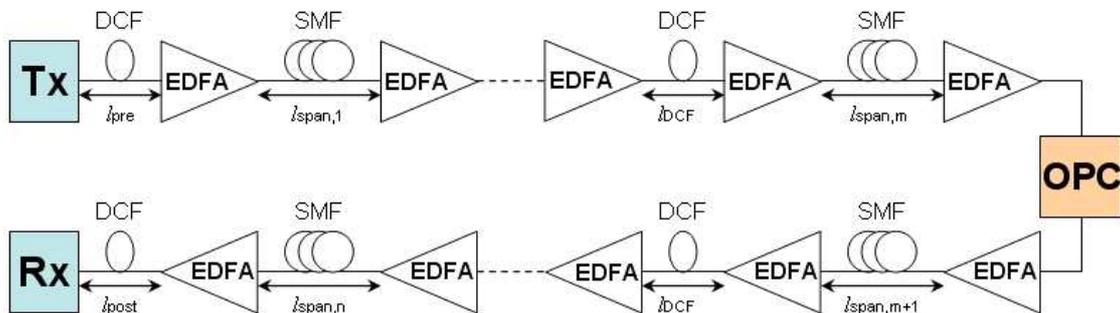


그림 1. 광전송 링크의 구조
Fig. 1. The schemes of optical transmission link.

II. 광전송 링크의 구성과 성능 해석 방법

그림 1은 본 논문에서 살펴보는 광전송 링크를 나타낸 것으로, 우선 전체 전송로 중간에 OPC가 위치하고, 각 중계 구간은 분산 계수 D_{SMF} 가 17 ps/nm/km인 SMF를 80 km의 간격 $l_{span,n}$ 으로 구성하고 (본 논문에서 n은 12로 하였다), 각 중계 구간에서 축적된 분산을 보상하기 위해 각 중계 구간의 앞이나 뒤에 분산 계수 D_{DCF} 가 -85 ps/nm/km인 DCF를 두는 inline DM 구조로 설계하였다. 서론에서 언급했듯이 OPC를 통해 비선형성을 보상하기 위해서는 전력 분포가 OPC를 중심으로 대칭이 되어야 한다. 이와 더불어 효율적인 분산 보상을 위해서는 분산의 분포도 OPC에 대해 대칭이 되어야 한다. 이를 위해 본 논문에서 살펴보는 전송 링크의 분산 맵의 기본 구조가 OPC를 중심으로 대칭이 되게 설계하였다. 즉 그림 1에서 보는 바와 같이, 송신기(Tx)부터 OPC까지의 전반 구간의 링크들은 DCF+SMF의 구조로, OPC부터 수신기(Rx)까지의 후반 구간의 링크들은 SMF+DCF의 구조로 설계하였다. 한 중계 구간에서 축적된 분산을 하나의 DCF 링크를 통해 0 ps/nm/km로 보상하기 위해서는 DCF의 길이 l_{DCF} 는 16 km가 되어야 한다 (17 ps/nm/km × 80 km / -85 ps/nm/km). 이러한 이유로 2번째 DCF 링크부터 11번째 DCF 링크까지는 l_{DCF} 가 16 km로 설계했다. 그러나 첫 번째 DCF 링크와 마지막 DCF 링크의 길이는 각각 전체 전송 링크의 선치 보상과 후치 보상을 조절하고 결정하기 위하여 가변적으로 설계했다. 이 경우 DCF 링크의 길이를 각각 l_{pre} 와 l_{post} 로 표시했다. SMF의 손실 계수 α_{SMF} 는 0.2 dB/km, 비선형 계수 γ_{SMF} 는 1.41 W-1km-1(@1,550 nm)로 하였다. 그리고 DCF의 손실 계수 α_{DCF} 는 0.4 dB/km, 비선형 계수 γ_{DCF} 는 4.83 W-1km-1(@1,550 nm)로 하였다.

그림 1의 송신기(Tx)는 레이저 다이오드가 40 Gbps 128(=27) PRBS(pseudo random bit sequence)에 의해 강도 변조되는 것으로 가정하였다. 이 때 외부 광 변조기로부터 발생하는 출력 전계 강도는 10 dB의 소광비 (extinction ratio)를 갖는 RZ 형식의 2차 가우시안 펄스로 모델링하였다. 광 변조기로부터 출력되는 광 펄스는 그림 1의 광전송 링크를 통해 아래

식 (1)의 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 따라 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 수신단에 도착한다[9].

$$\frac{\partial A_j}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A_j - \frac{i}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 A_j}{\partial T^2} + \frac{1}{6} \beta_{3j} \frac{\partial^3 A_j}{\partial T^3} + i \gamma_j |A_j|^2 A_j + 2i \gamma_{jk} |A_k|^2 A_j \quad (1)$$

여기서 $j, k=1,2,\dots,16$, A_j 는 WDM의 j-번째 채널의 포락선, α 는 광섬유의 손실 계수, β_{2j} 는 색 분산 파라미터, β_{3j} 는 3차 색 분산 파라미터, $\gamma_j = (2\pi n_2 / A_{eff} \lambda_j)$ 는 비선형 계수, n_2 는 비선형 굴절 계수, A_{eff} 는 광섬유의 유효 코어 영역, λ_j 는 j-번째 채널의 신호 파장, $T = t - z/v_j$ 이다. 본문에서 식 (1)의 수치적 분석은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법을 이용하여 Matlab으로 구현하여 이루어졌다[9].

그림 1에서 수신기(Rx)는 5 dB의 잡음 지수를 갖는 전치 증폭기, 1 nm 대역폭의 광 필터, PIN 다이오드, 버터워스 형태의 펄스 정형 필터와 판별 회로로 구성된 직접 검파 (direct detection) 방식의 수신기로 가정하였다[10]. 수신 대역폭은 0.65 x 비트율로 가정하였다. 그리고 전체 전송 링크 중간에 위치한 OPC는 참고 문헌 [11]에서와 동일한 파라미터를 갖는 HNL-DSF (highly nonlinearity - dispersion shifted fiber)를 비선형 매질로 갖는 구조로 모델링하였다.

ITU-T는 WDM 전송에서 채널 간격을 100 GHz (즉 0.8 nm)로 권고하고 있다[12]. 만일 첫 번째 채널의 파장을 1,550 nm로 고정한 WDM 전송 시스템이라면 24번째 채널 파장은 1,568.4 nm이다. 본 논문에서는 0.8 nm의 파장 간격을 갖는 24 채널 WDM 전송 시스템에서 그림 1 구조의 전송 링크 설계 기준을 도출한다.

설계 기준 도출은 3가지 각기 다른 조건에 의한 NRD 값의 변화에 따른 수신 성능 평가와 비교를 통해 이루어진다. NRD 값의 변화를 위한 첫 번째 조건 (case 1)은 그림 1에서 선치 보상만으로 NRD를 결정하는 경우이다. 즉 l_{post} 와 10개의 l_{DCF} 는 16 km로 고정해 놓고 l_{pre} 만으로 NRD를 결정하는 경우이다. 두 번째 조건 (case 2)은 그림 1에서 후치 보상만으로 NRD를 결정하는 경우이다. 즉 l_{pre} 와 10개의 l_{DCF} 는

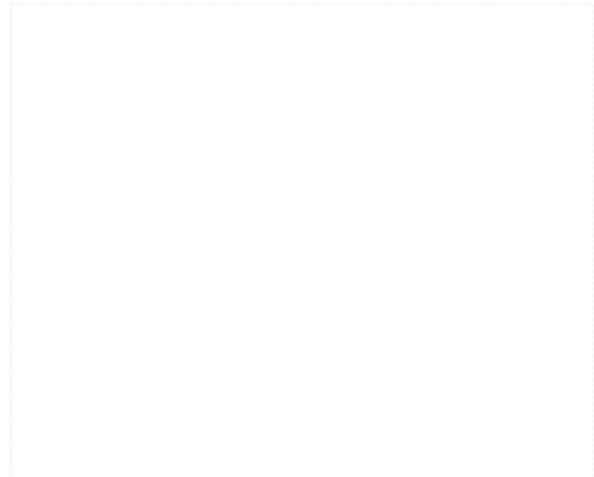
16 km로 고정해 놓고 l_{post} 만으로 NRD를 결정하는 경우이다. 마지막 세 번째 조건 (case 3)은 선치 보상과 후치 보상을 동시에 같은 크기로 변화를 주어, 즉 10개의 l_{DCF} 는 16 km로 고정해 놓고 l_{pre} 와 l_{post} 를 같은 크기로 변화를 주어 NRD를 결정하는 경우이다. 우선 각각의 조건들에서 WDM 채널 중 수신 성능이 최악으로 나타나는 채널의 EOP를 구하고 세 조건들의 EOP를 WDM 채널수에 따라 비교하여 각각의 조건에서 수신 성능을 1dB EOP 이하로 얻을 수 있는 NRD 범위를 도출하는 것으로 전송 링크의 설계 기준을 제시하도록 한다.

III. 시뮬레이션을 통한 유효 NRD 도출

그림 2는 3 가지 조건에 따라 결정한 NRD 값에 따른 최악 채널의 EOP를 입사 전력 P_s 에 대해 나타낸 것이다. 우선, NRD를 결정하는 조건에 상관없이 입사 전력이 증가할수록 최악 채널의 수신 품질을 1 dB EOP 이하로 얻을 수 있는 유효 NRD 범위가 줄어드는 것을 그림 2를 통해 알 수 있다. 그리고 3 가지 조건 모두 NRD가 0 ps/nm로 선택된 경우 (이를 full compensation이라고 한다)보다 조건에 따라 적절한 값으로 NRD가 선택된 경우가 EOP를 더 양호하게 만드는 것을 알 수 있다.

그림 2의 결과에서 무엇보다 중요한 것은 선치 보상이나 후치 보상만으로 NRD를 결정하는 case 1과 2의 경우보다 선치 보상과 후치 보상을 동시에 같은 크기로 조절해 NRD를 결정하는 case 3의 DM 전송 링크에서 유효 NRD 범위가 매우 넓어진다는 것이다. 즉 $P_s = 5$ dBm의 광 신호를 전송하여 1 dB EOP 이하의 성능을 얻고자 한다면 case 1의 구조로 전송 링크를 설계한 경우 NRD를 -21 ~ +21 ps/nm (이 값은 l_{pre} 가 15.75 ~ 16.25 km에 상응하는 값이다), case 2의 구조인 경우 NRD를 -24 ~ +24 ps/nm (이 값은 l_{post} 가 15.72 ~ 16.28 km에 상응하는 값이다)의 매우 좁은 범위 내에서 결정해야 하는 반면, case 3의 구조로 전송 링크를 설계하는 경우 유효 NRD는 -860.5 ~ +830 ps/nm의 매우 넓은 범위 내에서 결정해야 한다. 이 유효 NRD 범위 값은 l_{pre} 와 l_{post} 를 동

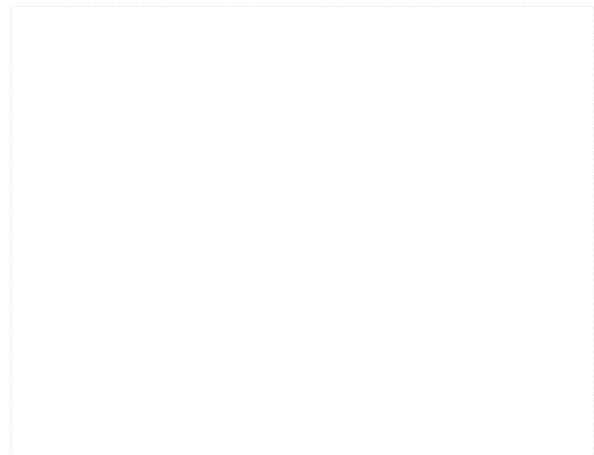
시에 11.12 ~ 21.06 km에서 결정해서 얻을 수 있다.



(a) case 1



(b) case 2



(c) case 3

그림 2. 전체 잉여 분산 대 눈 열림 패널티
Fig. 2. Net residual dispersion versus eye opening penalty.



그림 3. NRD가 0 ps/nm와 +17 ps/nm인 경우의 눈 열림 페널티
 Fig. 3. Eye opening penalty obtained in NRD = 0 ps/nm and +17 ps/nm.

그림 2로부터 얻은 결과를 통한 성능개선 정도를 확인하기 위하여 최악과 최선의 WDM 채널의 입사 전력에 따른 EOP를 나타낸 결과들이 그림3과 4이다. 우선 그림 3은 NRD가 0 ps/nm로 설계된 전송 링크에서의 EOP와 NRD를 선치 보상이나 후치 보상 중 하나만으로 결정하는 링크구조에서 최상의 성능을 얻을 수 있는 그림 2(b)에서, 즉 case 2의 구조로 결정된 NRD = +17 ps/nm로 설계된 전송 링크에서의 EOP를 나타낸 것으로, 1 dB EOP의 수신 품질 기준으로 비교해 보면 후치 보상만으로 NRD가 +17 ps/nm인 전송링크를 통해 WDM 신호를 전송하는 경우에서 최악 채널의 입사 전력에 따른 EOP가 NRD = 0 ps/nm로 설계된 전송링크를 통해 최선의 채널의 입사 전력에 따른 EOP보다 더 좋아질 정도로 그림 2의 결과에서처럼 NRD가 0이 아닌 어느 정도 값을 갖도록 설계한 경우 더욱 효율적인 보상이 이루어지는 것을 알 수 있다.

그림 4는 그림 2의 결과에서 살펴보았듯이 유효 NRD 측면에서 더욱 효과적인 설계를 제공하는 case 3의 구조로 NRD를 결정하는 전송링크에서 NRD 값 별로 각 채널의 EOP를 나타낸 것이다. 큰 NRD 값에 대해서도 최악 채널과 최선 채널 사이의 1 dB EOP 기준 전력 페널티가 1.5 dB 정도로 WDM 채널별 시스템 성능 차이가 크게 나타나지 않는 매우 효과적인 보상이 이루어지는 것을 확인할 수 있다.



그림 4. 경우 3으로 설계된 전송의 눈 열림 페널티
 Fig. 4. Eye opening penalty obtained in transmission link designed by case 3.

그림 2~4를 통해 얻은 이러한 결과는 DM을 전체 전송링크 중간에 있는 OPC와 결합시키는 경우에 분산 맵의 형태도 OPC를 중심으로 대칭적으로 설계해야 더욱 효과적인 보상과 시스템의 융통적 설계가 가능하다는 것을 의미한다. 이는 대용량 WDM 전송을 위해서는 채널수의 증가에 따른 비선형성의 보상도 동시에 수반되어야 하는데 이를 위해서는 앞서 언급했듯이 OPC를 중심으로 전력의 대칭화가 되도록 링크 설계가 이루어져야 하고 분산 보상을 위해 사용되는 DCF에 의한 분산 맵의 기본 구조도 이와 관련하여 대칭 구조가 되어야 분산과 비선형성 보상이 동시에 효과적으로 나타나기 때문이라고 할 수 있다.

광섬유의 색 분산은 광 펄스를 퍼지게 해 결국 신호 왜곡이 생겨 시스템 성능을 저하시키지만 광 펄스가 퍼지면 광 전력이 감소하여 비선형성의 정도를 줄여주는 특성도 있다. 이러한 이유로 광전송 링크 설계 시 최상의 시스템 성능이 나타나도록 광섬유의 색 분산과 비선형성을 결합할 수 있도록 설계한다. 즉 광전송 시스템에서 적절한 분산은 비선형성의 감소를 가져오고 결국 시스템 성능 개선을 나타낼 수 있다. 그림 2~4에서 NRD가 0이 아닌 임의의 값에서 최상의 시스템 성능을 얻을 수 있는 것은 이러한 이유에 기인하기 때문이다.

IV. 결 론

지금까지 장거리 대용량 WDM 전송을 위해 OPC가 inline DM 기술과 결합하면 광 전력 대칭의 문제가 완화되어 성능 저하에 대한 한계가 개선된다는 것을 살펴보았다. 그리고 SMF 광 전송 링크에 OPC와 inline DM 기술을 결합하고자 할 때 시스템 성능을 개선할 수 있는 조건을 도출해 보았다.

본 논문에서 살펴본 OPC와 inline DM 기술이 결합된 전송 링크에서 NRD는 선치 보상과 후치 보상의 값에 따라 결정되도록 설계하였는데, 선치 보상이나 후치 보상 중 하나를 이용해 NRD를 결정하는 구조보다 선치 보상과 후치 보상 동시에 변화시키면서 분산 맵의 구조가 OPC를 중심으로 대칭적으로 되도록 해야 더욱 효과적인 보상과 시스템의 융통적 설계가 가능하다는 것을 확인하였다. 그리고 NRD를 제어하는 모든 경우에 있어 NRD가 0이 아닌 값으로 결정되어야 채널 간 성능 개선의 차이가 줄어들어 효과적인 보상이 이루어지는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] C. Caspar, et al., "RZ versus NRZ modulation format for dispersion compensated SMF-based 10-Gb/s transmission with more than 100-km amplifier spacing," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 11, pp. 481-483, Apr. 1999.
- [2] A. Bertaina, S. Bigo, C. Francia, S. Gauchard, J.-P. Hamaide, and M. W. Chbat, "Experimental investigation of dispersion management for an 8×10 -Gb/s WDM transmission system over non zero dispersion shifted fiber," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 8, pp. 1045-1047, Aug. 1999.
- [3] A. Färbert, C. Scheerer, J.-P. Elbers, C. Glingener, and G. Fischer, "Optimized dispersion management scheme for long-haul optical communication systems," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 21, pp. 1865-1866, Oct. 1999.
- [4] 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.

- [5] 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.
- [6] I. Brener, et al., "Cancellation of all Kerr nonlinearities in long fiber spans using a LiNbO conjugator and Raman amplification," *presented at the Opt. Fiber Comm. Conf. (OFC 2000)*, Paper PD33, 2000.
- [7] J. Bromage, P. J. Winzer, and R.-J. Essiambre, "Multiple path interference and its impact on system design," in *Raman Amplifiers for Telecommunications 2*, M. N. Islam, Ed. New York: Springer-Verlag, 2003.
- [8] A. Chowdhury and R.-J. Essiambre, "Optical phase conjugation and pseudolinear transmission," *Opt. Lett.*, vol. 29, pp. 1105-1107, 2004.
- [9] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 2001.
- [10] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [11] 이성렬, "WDM 채널수에 따른 최적의 OPC 위치 및 광섬유 분산 계수", *한국항행학회논문지 제 11 권 2 호*, pp. 177-186, 2007.
- [12] ITU Recommendation "Spectral grids for WDM applications : DWDM frequency grid" G.694.1, 2006.

이 성 렬 (李成烈)



1990년 2월 : 한국항공대학교 통신정보공학과 (공학사)

1992년 8월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학석사)

2002년 2월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학박사)

2002년 6월~2004년 2월 : (주)에이티엔 기술연구소장

2004년 3월~현재 국립목포해양대학교 해양전자통신공학부 조교수

관심분야 : WDM 시스템, 광의 비선형 현상 분석, 광솔리톤 전송