

Non-midway 광 위상 공액기를 갖는 분산 제어 전송 링크를 통한 WDM 채널의 왜곡 보상

Compensation for the Distorted WDM Channels through the Dispersion-managed Optical Links with Non-midway Optical Phase Conjugator

이 성 렬

목포해양대학교 해양정보통신공학과

Seong-Real Lee

Department of Marine Information and Communication Engineering, Mokpo National Maritime University, Jeollanam-do 530-729, Korea

[요 약]

전통적인 midway 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)가 아닌 non-midway OPC를 분산 제어 (DM; dispersion-managed) 광전송 링크에 적용하여 파장 분할 다중 전송 (WDM; wavelength division multiplexed)을 위한 융통적인 네트워크의 구성 가능성을 분석하였다. 중계 구간의 수가 많을수록, 또한 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)이 클수록 non-midway OPC를 통한 유연한 링크의 구성 가능성이 커지는 것을 확인하였다. 아울러 OPC 이후의 후반 전송 구획을 구성하는 각 중계 구간의 RDPS를 OPC 이전의 전반 구획의 RDPS의 평균값으로 설정하는 링크 구조가 융통적 링크 구성에 더욱 유리하다는 것을 확인하였다.

[Abstract]

The implementation possibility of the flexible optical network configuration using the non-midway optical phase conjugator (OPC) in the dispersion-managed (DM) optical link for wavelength division multiplexed (WDM) transmission is demonstrated in this paper. It is confirmed that the implementation possibility of flexible link configuration is more increased, as number of fiber spans is more bigger and the residual dispersion per span (RDPS) is more large. It is also confirmed that the non-midway OPC link, in which RDPS of the latter half transmission section (after OPC) is decided by the averaged RDPS of the former half transmission section (before OPC), has more advantage for the flexible network configuration.

Key word : Dispersion management, Optical phase conjugation, Non-midway OPC, Residual dispersion per span, Net residual dispersion.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2015.19.6.595>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 27 October 2015; Revised 25 November 2015
Accepted (Publication) 24 December 2015 (30 December 2015)

*Corresponding Author; Seong-Real Lee

Tel: +82-61-240-7264

E-mail: reallee@mmu.ac.kr

1. 서론

한 채널의 데이터 전송률이 40 Gbps 이상인 파장 분할 다중(WDM; wavelength division multiplexed) 시스템과 같은 대용량 데이터를 장거리로 전송하는 광통신 시스템에서 대역폭 거리 곱(product of bandwidth and length)을 제한하는 대표적 요인은 그룹 속도 분산(GVD; group velocity dispersion)과 비선형성(nonlinearity)의 상호 작용에 의한 신호 왜곡이다 [1],[2]. 이러한 한계를 극복하기 위하여 제안된 광이나 전기적인 다양한 부가 처리 기술들 중 분산 제어(DM; dispersion management)는 색 분산에 의한 왜곡 보상에 탁월하고 [3],[4], 광 위상 공액(optical phase conjugation) 기술은 비선형성에 의한 왜곡 보상에 우수한 기술이다 [5]-[7]. DM은 주 전송로인 양의 분산 계수를 갖는 단일 모드 광섬유(SMF; single mode fiber)에서 축적된 분산량을 음의 분산 계수를 갖는 분산 보상 광섬유(DCF; dispersion compensating fiber)를 부가하여 제거하거나 조절하는 링크 구성 기술이다. 광 위상 공액은 전체 전송로의 중간에 광 위상 공액기(OPC; optical phase conjugator)를 두어 전송되는 광 신호의 스펙트럼을 반전시켜 신호 왜곡을 보상하는 기술이다.

그러나 광 위상 공액 기술은 신호 왜곡의 효과적 보상 조건인 OPC를 중심으로 국부 분산과 광 전력이 대칭화되어야 하기 때문에 OPC를 중심으로 한 전반 전송 구획(FHTS; former half transmission section)과 후반 전송 구획(LHTS; latter half transmission section)의 길이와 구조가 같아야 한다는 한계(이를 midway OPC라 함)를 갖는다 [6]. 장거리 광전송 링크에 비선형 보상을 위하여 midway OPC를 채택한다는 것은 링크 구조의 융통성(reconfigurable)을 제약하기 때문에 다양한 네트워크 구조를 어렵게 할 수 있다. 따라서 OPC가 전체 전송 링크의 중간이 아닌 곳(non-midway OPC)에 위치하면서도 비선형 효과에 의한 왜곡을 보상할 수 있어야 하고, DM이 동시에 적용되어 GVD에 의한 왜곡도 보상할 수 있도록 하는 링크 구성 기술이 필요하다.

저자가 이는 왜곡된 WDM 채널을 효과적으로 보상하는 DM과 non-midway OPC가 결합된 링크 구성 기술에 대한 연구는 아직까지 보고되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 non-midway OPC를 갖는 DM 링크를 제안하고, 이러한 구조의 링크에서 중계 구간 수에 따른 보상 정도를 분석하여 제안하는 링크 구조의 융통성 관점에서의 실효성을 검토해보도록 한다. 제안하는 non-midway의 위치는 FHTS의 중계 구간 수보다 LHTS의 중계 구간 수가 4개가 많은 곳이고, 각 전송 반 구획에서의 중계 구간 당 잉여 분산(RDPS; residual dispersion per span) 분포에 따라 2가지 형태로 제안되고, 2가지 구조 각각에서의 WDM 보상 정도를 대칭 구조, 즉 midway OPC를 갖는 링크에서의 WDM 보상 정도와의 비교를 통해 분석해 보고자 한다.

II. WDM 전송 시스템의 구조

그림 1은 24 채널 × 40 Gbps의 WDM 전송 시스템과 이를 위한 광전송 링크의 구조를 나타낸 것이다. 그림 1에 표현했듯이 전체 전송로는 $m+n$ 개의 중계 구간으로 구성된다. 즉 OPC를 중심으로 FHTS의 중계 구간 개수는 m 개이고, LHTS의 중계 구간 개수는 n 개이다. midway OPC를 갖는 대칭 구조와 non-midway OPC를 갖는 비대칭 구조 모두 각 중계 구간의 SMF 길이, 즉 l_{SMF} 는 80 km로 하였다. 또한 전체 중계 구간의 수는 10개부터 4개 간격으로 90까지 고려하였다. 좀 더 구체적으로 짚어보면, OPC 중심 FHTS와 LHTS의 중계 구간 개수 분포가 대칭인 경우에는 $m = n = 5, 7, 9, \dots, 45$ 로 하였고, 비대칭 구조에서는 $m = 3, 5, 7, \dots, 43, n = m + 4$ 로 구성하였다.

각 중계 구간에 동일하게 적용된 SMF와 DCF의 파라미터는 다음과 같다. SMF의 손실 계수 $\alpha_{SMF} = 0.2$ dB/km, SMF의 분산 계수 $D_{SMF} = 17$ ps/nm/km(@1,550 nm), SMF의 비선형 계수 $\gamma_{SMF} = 1.35$ W⁻¹km⁻¹(@1,550 nm). DCF의 손실 계수 $\alpha_{DCF} = 0.6$ dB/km, DCF의 분산 계수 $D_{DCF} = -80$ ps/nm/km(@1,550 nm), DCF의 비선형 계수 $\gamma_{DCF} = 5.06$ W⁻¹km⁻¹(@1,550 nm).

또한 대칭과 비대칭 분포 모두에서 각 중계 구간에 동일하게 적용되는 RDPS는 40 ps/nm와 1,200 ps/nm의 두 가지를 고려하였다. RDPS는 아래 식으로 주어지는 각 중계 구간의 DCF의 길이, l_{DCF} 에 의해 결정된다.

$$l_{DCF} = \frac{RDPS + (l_{SMF} \times D_{SMF})}{|D_{DCF}|} \quad (1)$$

그러나 l_{DCF} 를 구체적으로 결정하는 방법에 따라 비대칭 구조의 링크 구성을 2가지로 다르게 하여 각 경우에서의 보상 정도를 비교하였다. 그 중 하나는 첫 번째와 마지막 중계 구간을 제외하고 FHTS와 LHTS의 모든 중계 구간의 RDPS가 40 ps/nm 또는 1,200 ps/nm로 일정한 구조(이를 “uniformly asymmetric 구조”라고 칭함)이다. 나머지 하나는 FHTS의 두 번째 중계 구간부터 m 번째 중계 구간까지의 DCF 길이는 일정하지만, LHTS의 첫 번째 중계 구간부터 $n-1$ 번째 중계 구간까지의 DCF 길이는 FHTS의 RDPS를 평균($m-1$ 로 평균)한 RDPS에 의해 결정(소수점 이하가 나오면 가장 가까운 정수로 근사화)되는 l_{DCF} 를 적용하는 구조(이를 “averaged asymmetric 구조”라고 칭함)이다.

각 중계 구간마다 존재하는 RDPS 때문에 NRD는 매우 큰 값을 가질 수 밖에 없고, WDM 채널의 효과적 보상을 위해서는 NRD를 없애거나 낮추어주어야 한다. 본 연구에서는 그림 1에 보인 바와 같이 첫 번째 중계 구간(spans 1)과 마지막 중계 구간(span n)의 DCF가 각 전송 반 구획에서의 전체 잉여 분산(NRD; net residual dispersion)을 조절하는 역할을 수행하도록 하였다.

본 연구에서 살펴보는 전송 링크의 최대 개수가 90개까지로

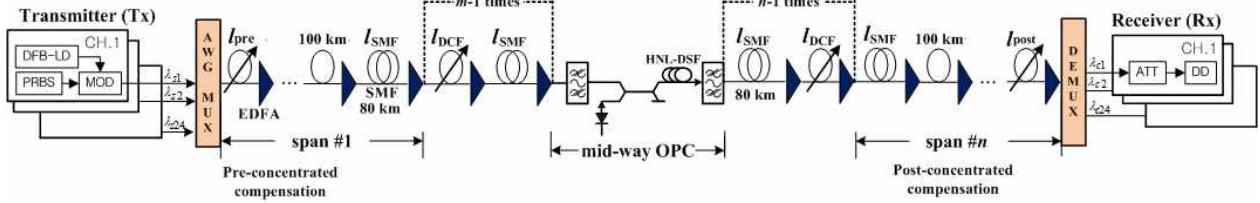


그림 1. 24×40 Gbps WDM 전송 시스템 구조
 Fig. 1. Configuration of 24×40 Gbps WDM transmission system.

많고, 또한 중계 구간 수가 적다고 하더라도 RDPS = 1,200 ps/nm로 설정된 경우에는 각 전송 반 구획에서의 NRD가 매우 크기 (예를 들어, RDPS = 1,200 ps/nm의 90 fiber spans의 uniformly asymmetric 구조에서의 LHTS의 NRD = 57,760 ps/nm) 때문에 이를 없애거나 줄여 주기 위한 첫 번째와 마지막 중계 구간의 DCF 길이를 매우 길게 해야 하는데, 이는 DCF의 손실 때문에 현실적으로 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 NRD 제어를 위해 필요한 DCF 길이는 그림 1에 보인 바와 같이 연쇄적인(cascaded) DCF의 배열에 의해 이루어지도록 하였다. 여기서 NRD 제어를 위한 하나의 DCF 최대 길이는 120 km로 하였다. 즉 예를 들어, 57,760 ps/nm의 NRD를 완전히 제거하는데 필요한 DCF의 길이는 722 km인데, 이는 120 km의 DCF 6개와 2km 길이의 DCF 1개가 직렬 접속된 구조로 설계하였다.

각 전송 반 구획의 NRD를 첫 번째 중계 구간의 DCF와 마지막 중계 구간의 DCF가 없애거나 낮추기 때문에 이러한 구조를 “집중 보상 (concentrated compensation)”이라고 부를 수 있다. FHTS의 NRD를 첫 번째 중계 구간의 DCF, LHTS의 NRD를 마지막 중계 구간의 DCF에 의해 보상하기 때문에 각각 pre-concentrated compensation과 post-concentrated compensation이라고 명명하였다. 그러나 두 DCF에 의해 집중 보상이 각기 다른 값으로 동시에 이루어지면 전체 전송로의 NRD 제어가 쉽지 않기 때문에 본 연구에서는 마지막 중계 구간의 DCF 길이는 후반 전송 구획의 NRD가 0 ps/nm가 되도록 (즉 후반 전송 구획은 complete compensation됨) 고정시켰다. 반면 전체 전송로의 총 NRD는 pre-concentrated compensation (즉 첫 번째 중계 구간의 DCF)에 의해서만 제어되도록 하였다.

그림 1의 24개 송신기(Tx) 각각은 중심 파장을 1,550 nm부터 1,568.4 nm까지 100 GHz (즉 0.8 nm) 간격으로 갖는 분포 제한 레이저 다이오드 (DFB-LD; distributed feedback laser diode)로 가정하였다. 각 DFB-LB는 서로 독립적인 128(=2⁷)의 사 랜덤 비트열 (PRBS; pseudo random bit sequence)에 의해 소광비 (ER; extinction ratio)가 10 dB인 2차 가우시안 펄스의 RZ (return-to-zero)를 발생시키는 것으로 모델링하였다.

수신기는 5 dB의 잡음 지수를 갖는 전치 증폭기, 1 nm 대역폭의 광 필터, PIN 다이오드, 버터워스 형태의 펄스 정형 필터와 편별 회로로 구성된 직접 검파 (direct detection) 방식의 수신기로 모델링하였다. 수신 대역폭은 0.65 x 비트율로 가정하였다. 전체 전송로 중간에 위치한 OPC는 HNL-DSF (highly nonlinearity – dispersion shifted fiber)를 비선형 매질로 갖는 구

조로 모델링하였고, 그 세부 구성과 파라미터 값은 저자의 DM 관련 논문과 동일하게 모델링하였다 [8],[9].

광전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다. 본 논문에서 40 Gbps의 24 채널 WDM 전송을 위한 NLSE의 수치적 분석은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법[10]에 따라 Matlab으로 구현하여 이루어졌다.

III. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 2는 3가지 구조의 링크에서 중계 구간 수 변화에 따른 최악 채널의 눈 열림 페널티 (EOP; eye opening penalty)를 나타낸 것으로, 그림 2(a)는 RDPS가 40 ps/nm로 설정된 링크에서, 그림 2(b)는 1,200 ps/nm로 설정된 링크에서 얻은 결과이다. 비교적 낮은 입사 전력 (-2 dBm)의 WDM 채널은 링크 구조와 RDPS에 크게 영향 받지 않고 중계 구간 수에 반비례하여 보상되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 높은 입사 전력 (3 dBm의 경우)의 WDM 채널 보상은 RDPS뿐만 아니라 링크 구조의 영향에 민감한 것을 알 수 있다. 일반적으로 중계 구간의 수가 증가하면 보상 효과가 줄어들지만, 눈여겨 볼 결과는 RDPS가 40 ps/nm가 아닌 1,200 ps/nm (그림 2(b))로 크게 설정된 링크에서의 보상은 중계 구간 수보다 OPC 위치에 따르는 링크의 구조에 더 큰 영향을 받는다는 것이다.

광전송 시스템의 수신 성능 판단을 EOP로 수행하는 경우 판단의 기준은 일반적으로 1 dB EOP이다. 이 값은 10⁻¹²의 비트 에러율 (BER; bit error rate)에 해당하고, 1.25의 펄스 폭 확장 비율 (pulse broadening factor)에 상응한다 [11]. 그림 3은 RDPS가 40 ps/nm와 1,200 ps/nm로 설정된 각각의 경우 3가지 링크 구조별 유효 입사 전력 (effective launch power) 범위를 중계 구간 수에 따라 나타낸 것이다. 유효 입사 전력은 EOP를 1 dB 이하로 얻을 수 있는 입사 전력을 의미한다.

RDPS가 40 ps/nm로 낮게 설정된 경우 3가지 링크 구조 모두 중계 구간 수가 증가할수록 유효 입사 전력의 범위가 줄어드는 것을 알 수 있다. 하지만 RDPS가 1,200 ps/nm로 크게 설정된 2가지 비대칭 구조의 경우에는 중계 구간 수 증가에 의한 유효 입사 전력 범위의 감소가 일정하지 않다는 것을 알 수 있다. 오히려 중계 구간 수에 영향을 받지 않고 유효 입사 전력 범위가

-8 dBm부터 1 dBm까지 일정(flat)하다고 판단할 수 있다.

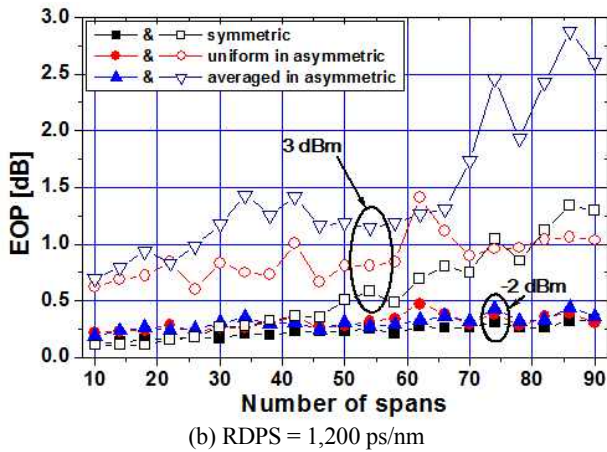
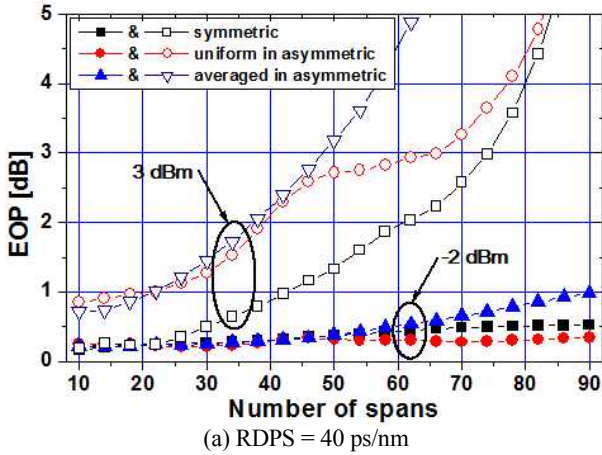


그림 2. 중계 구간 수에 따른 최악 채널의 눈 열림 페널티

Fig. 2. The eye opening penalty of the worst channels as a function of number of spans.

그림 3의 결과로부터 알 수 있는 또 다른 하나의 특징은 RDPS가 1,200 ps/nm로 크게 설정된 장거리 전송의 경우 (중계 구간의 수가 82개 이상인 경우) 대칭 구조에 비해 비대칭 균일 구조 (즉 uniformly asymmetric 구조)가 높은 전력의 WDM 전송에 유리하다는 것이다.

그림 4는 그림 3의 결과를 다른 관점에서 살펴보기 위한 그래프로, 중계 구간 수가 30개와 90개로 구성된 3가지 구조의 링크에서 최악 채널의 EOP를 입사 전력 변화에 따라 나타낸 것이다. RDPS가 40 ps/nm인 경우에 비해 1,200 ps/nm인 경우 모두 입사 전력에 따른 EOP가 양호하지만, RDPS가 1,200 ps/nm로 설정된 링크에서는 입사 전력에 따른 EOP 개선 정도가 중계 구간의 개수가 30개인 링크보다 90개인 링크에서 더욱 신장되는 것을 확인할 수 있다. 또한 1 dB EOP 기준으로 본다면 중계 구간의 개수가 90개이고 RDPS가 1,200 ps/nm로 설정된 링크 (그림 4(b))중 uniformly asymmetric 구조에서 1 dB EOP가 되는 최대 입사 전력이 가장 크다는 중요한 결과를 확인할 수 있다.

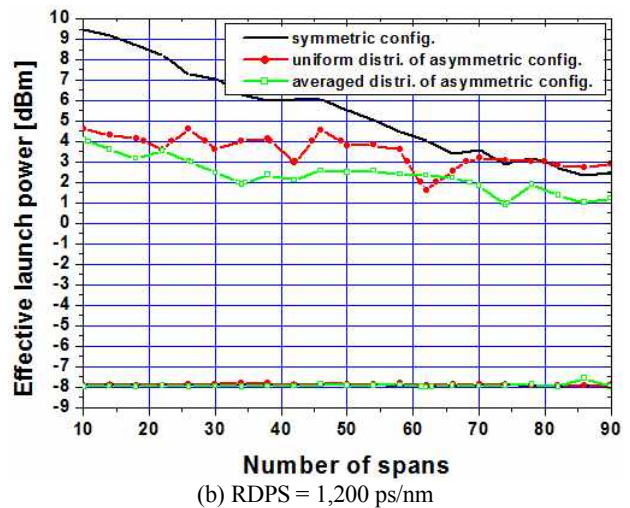
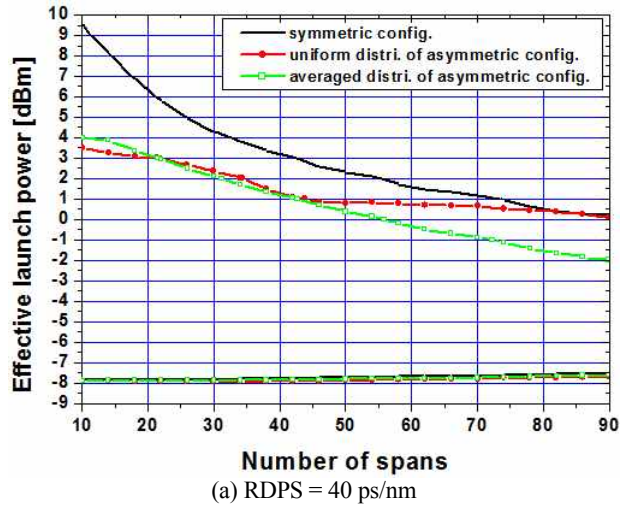
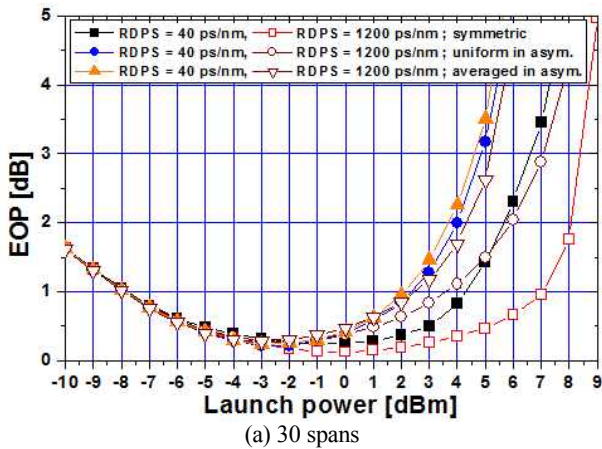


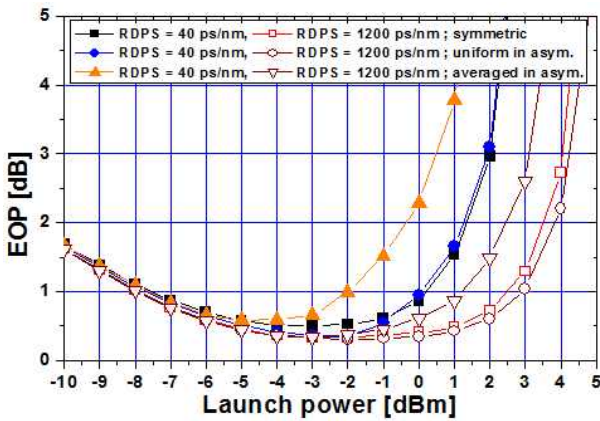
그림 3. 중계 구간 수에 따른 유효 입사 전력

Fig. 3. The effective launch power as a function of number of spans.

지금까지 살펴본 시뮬레이션 결과들을 종합하여 보면, 전송 링크의 RDPS를 크게 할수록 왜곡된 WDM 채널들의 보상 효과를 더욱 개선시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 큰 RDPS에 의한 보상 효과는 광전송 링크를 구성하는 중계 구간 수가 많을수록, 또한 입사 전력이 클수록 더욱 신장되는 것을 동시에 알 수 있다. 이러한 현상은 전송 링크의 RDPS가 커질수록, 또한 중계 구간의 수가 증가할수록 축적되는 분산량이 더욱 증가하여 광 펄스의 폭이 시간적으로 더욱 확산되고, 이는 광 펄스 순시 전력을 약화시켜 광섬유의 비선형 현상에 의한 왜곡이 상대적으로 감소된 상황에서 OPC에 의한 비선형 왜곡 보상 효과가 상대적으로 증대되어 발생했다고 판단할 수 있다. 이러한 비선형성에 의한 왜곡의 상대적 보상 효과 증대는 입사 전력이 클수록 더욱 좋아지고, 상기 언급한 현상과 과정에 의한 보상 효과는 OPC 중심 대칭 구조보다 비대칭 균일 구조에서 다소 증가된다고 판단할 수 있다.



(a) 30 spans



(b) 90 spans

그림 4. 입사 전력에 따른 최악 채널의 EOP

Fig. 4. The EOP of the worst channel as a function of the launch power.

IV. 결 론

대용량 장거리 WDM 전송을 위한 유연한 네트워크 구성의 가능성을 확인하기 위하여 모든 중계 구간에 DM이 수행되고 midway OPC가 아닌 non-midway OPC를 결합시킨 광전송 링크에서 RDPS와 중계 구간의 개수에 따른 왜곡된 WDM 채널의 보상 효과를 비교 검토하였다. 우선 RDPS가 적게 설정된 링크보다 크게 설정된 링크에서의 보상 특성이 더욱 우수한 것을 확인하였다. 큰 RDPS를 통한 WDM 채널들의 왜곡 보상 효과는 중계 구간의 수가 많을수록 더욱 커지는 것을 동시에 확인하였다.

본 연구의 목적인 non-midway OPC를 통한 보상에서는 중계 구간의 수가 많고, 각 중계 구간의 RDPS가 매우 큰 경우 OPC를 중심으로 LHTS의 각 중계 구간의 RDPS가 FHTS의 평균 RDPS로 설정된 비대칭 구조 (즉 uniformly asymmetric 구조)가 대칭 구조 (midway OPC 구조)에 비해 보상 효과가 개선된다는 것을 확인하였다. 즉 본 연구를 통해 non-midway OPC를 통해 왜곡된 WDM 채널 보상이 효과적으로 이루어질 수 있

고, 이를 통해 대용량 장거리 광 네트워크의 유연한 구성이 가능하다는 것을 확인하였다.

그러나 본 연구에서의 non-midway OPC 위치는 FHTS와 LHTS의 중계 구간 수 차이가 4인 지점에 국한되었다는 한계를 갖기 때문에 향후 연구에서는 OPC가 더욱 다양한 곳에 위치한 링크에서의 보상 효과 분석을 통해 보다 더욱 유연한 구조를 위한 non-midway OPC의 가능성을 연구할 예정이다.

참고 문헌

- [1] A. R. Chraplyvy, "Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 8, No. 10, pp. 1548~1557, 1990.
- [2] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 3rd ed. New York, NY: Wiley, 2002
- [3] X. Xiao, S. Gao, Y. Tian, and C. Yang, "Analytical optimization of the net residual dispersion in SPM-limited dispersion-managed systems," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 24, No. 5, pp. 2038~2044, May 2006.
- [4] M. Suzuki and N. Edagawa, "Dispersion-managed high-capacity ultra-long-haul transmission," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, No. 4, pp. 916~929, 2003.
- [5] S. L. Jansen, D. van den Borne, P. M. Krummrich, S. Spälter, G.-D. Khoe, "Long-haul DWDM transmission systems employing optical phase conjugation," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 12, No. 4, pp. 505~520, 2006.
- [6] S. Watanabe and M. Shirasaki, "Exact compensation for both chromatic dispersion and Kerr effect in a transmission fiber using optical phase conjugation," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 14, No. 3, pp 243~248, 1996.
- [7] A. Chowdhury and R.-J. Essiambre, "Optical phase conjugation and pseudolinear transmission," *Optics Letter*, Vol. 29, No. 10, pp. 1105~1107, 2004.
- [8] S. R. Lee, "Effects of residual dispersion in half transmission section on net residual dispersion in optical transmission links with dispersion management and mid-span spectral inversion compensation characteristics of distorted WDM signals depending on distribution patterns of SMF length and RDPS," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 18, No. 5, pp. 455~460, 2014.
- [9] J. P. Chung and S. R. Lee, "Pseudo-symmetric link configuration in dispersion-managed WDM transmission system with optical phase conjugator," *Information*, Vol. 17, No. 11B, pp. 5963~5968, Nov. 2014.
- [11] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd ed. San

Francisco:CA, Academic Press, 2001.

[12] N. Kikuchi and S. Sasaki, "Analytical evaluation technique of self-phase modulation effect on the performance of

cascaded optical amplifier systems," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, no. 5, pp. 868-878. 1995.



이 성 렬 (Seong-Real Lee)

1990년 2월 : 한국항공대학교 항공통신정보공학과 (공학사),

2002년 2월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학박사),

2004년 3월~현재 : 국립목포해양대학교 해양정보통신공학과 교수

※관심분야 : WDM 전송 시스템, 광의 비선형 현상 분석, 광 솔리톤 전송

1992년 8월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학석사)

2002년 6월~2004년 2월 : (주)에이티엔 기술연구소장