JANT 한국항행학회논문지
Journal of Advanced Navigation Technology

기반 기술

J. Adv. Navig. Technol. 19(4): 323-329, Aug. 2015

SMF 길이와 RDPS가 랜덤하게 분포하는 장거리 전송 링크에서의 왜곡된 WDM 채널의 보상

Compensation for the Distorted WDM Channels in the Long-Haul Transmission Link with the Randomly Distributed SMF Lengths and RDPS

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]

장거리 (50 fiber spans × 80 km) 전송 링크의 융통적 구성을 위해 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)의 길이와 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)이 랜덤하게 분포하는 링크에서 광 위상 공액과 결합된 분산 제어 (DM; dispersion management)를 통한 왜곡된 WDM 채널의 보상 특성을 살펴보았다. WDM 채널들의 입사 전력이 0 dBm 이하로 제한된다면 SMF 길이와 RDPS가 랜덤하게 분포하는 링크를 통한 보상 효과가 균일하게 분포하는 링크에서의 보상 효과와 유사하게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 제안한 랜덤 분포 링크 구조를 이용하면 장거리 WDM 전송 링크 설계와 구축에서 융통성을 확보할 수 있다는 것을 의미한다.

[Abstract]

The compensation characteristics of the distorted WDM channels compensated for by dispersion management (DM) and optical phase conjugation in the long-haul (50 fiber spans × 80 km) transmission link with the randomly distributed single mode fiber (SMF) length and residual dispersion per spans (RDPS) for implementing of the flexible link configuration are investigated. It is confirmed that the compensation effect in the link with the randomly distributed SMF length and RDPS is similar with that in the link with the uniform distribution, when the launch power of WDM channels are restricted within 0 dBm. This result means that the proposed link configuration is useful for designing and deploying the long-haul WDM transmission link.

Key words : Dispersion management, Optical phase conjugation, Residual dispersion per span, Single mode fiber, Random distribution of RDPS and SMF length.

http://dx.doi.org/10.12673/jant.2015.19.4.323

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-CommercialLicense(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 2 August 2015; **Revised** 3 August 2015
Accepted (Publication) 15 August 2015 (30 August 2015)

***Corresponding Author; Seong-Real Lee**

Tel: +82-61-240-7264
E-mail: reallee@mmu.ac.kr

Ⅰ. 서 론

40 Gbps 이상의 진폭 변조를 기초로 한 광전송 시스템에서 전송 성능을 저하시키는 주요 원인들 중 하나는 색 분산 (chromatic 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 전체 분산량을 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 DM은 색 분산만 존재하는 광전송 링크에서만 신호 보상 효과가 나타난다는 한계가 있다. 또한 광 위상 공액 기술은 비선형성에 의한 신호 왜곡의 효과적 보상을 위해 필요한 조건인 OPC를 중심으로 한 전반 전송 구획 (FHTS; former half transmission section)과 후반 전송 구획 (LHTS; latter half transmission section)의 전체 색 분산량과 광 전력의 대칭을 광섬유에 존재하는 손실 때문에 구현하기 매우 어렵다는 한계를 갖는다.

그러나 다행히도 이 두 기술을 링크 구성 조건에 따라 결합하면 색 분산과 비선형에 의한 왜곡, 특히 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexing) 신호 왜곡까지도 효과적으로 보상할 수 있다고 최근 다양한 연구를 통해 보고되고 있다 [8]-[10].

본 논문의 저자도 DM과 OPC를 전송 링크에 적용한 그간의 연구들을 통해 WDM 채널을 고품질로 장거리 전송할 수 있다는 것을 밝힌 바 있다 [11]-[13]. 특히 광 신호 보상을 위해 DM과 OPC를 적용하는 경우 링크 구조가 고정되어야 한다는 기술적 한계를 중계 구간 (fiber span)을 구성하는 SMF 길이와 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)을 랜덤하게 분포시킴으로써 극복될 수 있다는 것을 확인하였다 [13].

그러나 랜덤 분포 전송 링크에 대한 앞선 연구 (참고 문헌 [11])에서 고려한 전체 링크의 길이는 이를 구성하는 중계 구간의 개수가 14로 비교적 길지 않았다. 이는 RDPS 분포 패턴을 랜덤하게 구성할 때 선정해야 할 실제 RDPS 값에 제한을 두었기 때문이다. DM과 OPC를 결합한 전송 링크의 구성에 융통성을 높이기 위해서는 SMF 길이와 RDPS의 분포를 랜덤하게 할 수 있어야 하지만 이러한 분포 패턴이 전체 전송 거리를 제한해서는 안 된다. 따라서 본 연구에서는 SMF 길이와 RDPS가 랜덤하게 분포된 중계 구간의 개수가 50 개(즉 50 fiber spans)인 전체 전송 링크 중간에 OPC가 적용된 전송 링크를 통해 40 Gbps ×24 채널 WDM 신호를 전송하는 경우의 보상 특성을 SMF 길이와 RDPS 분포가 균일한 전통적인 링크에서의 보상 특성과의 비교를 통해 분석해보고자 한다.

Ⅱ. WDM 전송 시스템과 광전송 링크의 구성

그림 1은 24 채널 × 40 Gbps의 WDM 전송 시스템과 이를 위한 광전송 링크의 구조를 나타낸 것이다. 그림 1의 24개 송신기(Tx) 각각은 중심 파장을 1,550 nm부터 1,568.4 nm까지 100 GHz (즉 0.8 nm) 간격으로 갖는 분포 궤환 레이저 다이오드 (DFB-LD; distributed feedback laser diode)로 가정하였다. 각 DFB-LB는 서로 독립적인 128(=2^7) 의사 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 판별 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 구조로 모델링하였고, 그 세부 구성과 파라미터 값은 저자의 DM 관련 논문과 동일하게 모델링하였다 [11]-[13].

그림 1에 표현했듯이 전체 전송로는 50개의 중계 구간으로 구성된다. OPC를 중심으로 FHTS과 LHTS의 중계 구간 개수는 25개로 하였다. 아래와 같은 SMF의 고정된 파라미터 값들을 그림 1의 모든 중계 구간에 동일하게 적용하였다; 손실 계수 α_{SMF} = 0.2 dB/km, 분산 계수 D_{SMF} = 17 ps/nm/km(@1,550 nm), 비선형 계수 γ_{SMF} = 1.35 $W^{-1}km^{-1}$(@1,550 nm). 또한 DCF의 고정 파라미터 값들은 다음과 같다; 손실 계수 α_{DCF}는 0.6 dB/km, 분산 계수 D_{DCF} = -100 ps/nm/km(@ 1,550 nm), 비선형 계수 γ_{DCF} = 5.06 $W^{-1}km^{-1}$(@1,550 nm).

본 논문의 목적인 각 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS를 랜덤하게 분포시키는데 있어 두 가지의 기본 전제 조건을 두었다. 그 중 하나는 랜덤하게 분포하는 SMF의 길이가 현재 사용되고 있는 범위인 50 km 이상에서 110 km 이하이어야 하고, 각 전송 반 구획 (half transmission section)에서의 전체 평균 길이는 80 km가 되도록 각 중계 구간의 SMF의 랜덤 길이가 선택되어야 한다는 것이다. 또 하나의 전제 조건은 각 중계 구간의 RDPS는 0 ps/nm부터 400 ps/nm 사이의 값이어야 하고, 각 전송 반 구획에서의 전체 평균 값은 200 ps/nm가 되도록 각 중계 구간의 RDPS가 선택되어야 한다는 것이다.

이러한 전제 조건 하에서 우선 각 전송 반 구획의 각각의 중계 구간의 SMF의 길이를 랜덤하게 분포시킨 방법부터 살펴보면, 선택될 수 있는 SMF 길이의 최대치와 최소치의 편차 (즉

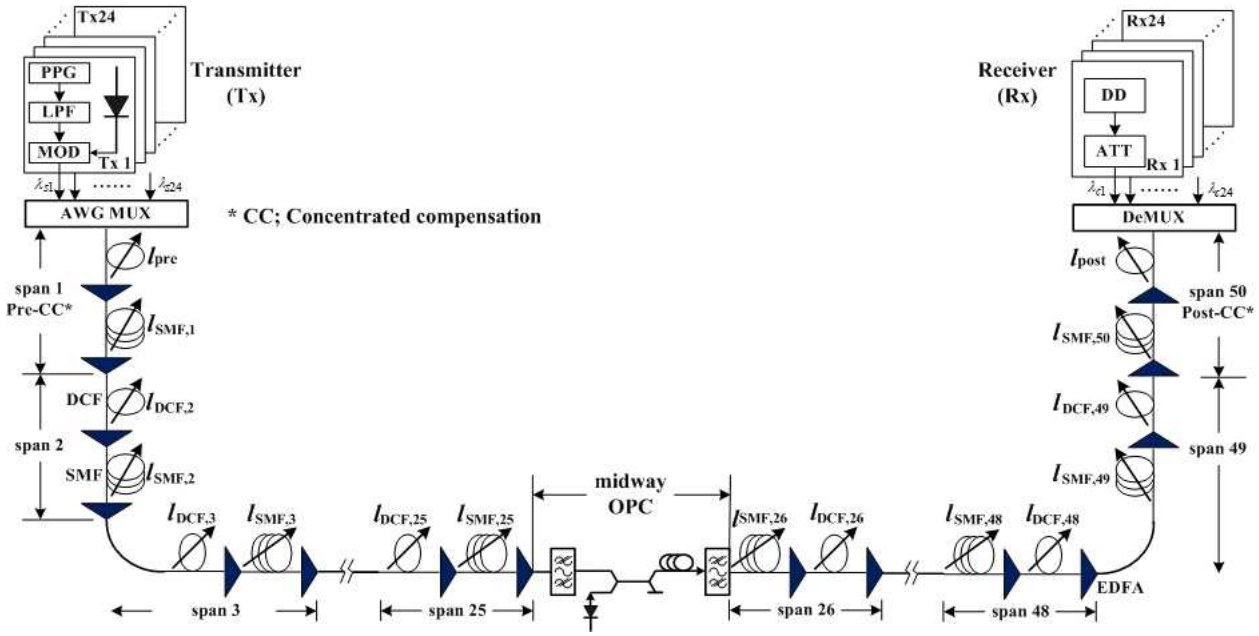


그림 1. 24×40 Gbps WDM 전송 시스템 구조
Fig. 1. Configuration of 24×40 Gbps WDM transmission system.

60 km)를 각 전송 반 구획의 중계 구간 개수에서 하나를 뺀 24의 반인 12로 나누어서 길이 변화분을 얻고, 이 변화분에 1부터 12까지의 가중치를 곱한 후 전제 조건인 전체 평균치 80 km에서 12개의 (가중치×변화분) 만큼 더하고 뺀 24 종류의 SMF 길이와 80 km로 총 25 종류의 SMF 길이들을 랜덤하게 분포하도록 하였다.

본 논문에서는 그림 1에 보인 바와 같이 첫 번째 중계 구간 (spans 1)과 마지막 중계 구간 (span 50)의 DCF는 각각 각 전송 반 구획에서의 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)을 조절하는 역할을 수행하도록 하였다. 따라서 FHTS에서는 두 번째부터 24번째의 중계 구간, LHTS에서는 25번째부터 49번째 중계 구간의 총 48개 구간에서만 RDPS가 랜덤하게 분포하도록 설계하였다. 구체적인 설계 방법은 SMF 길이의 랜덤 분포 방법과 유사하게 하였다. 즉 선택될 수 있는 RDPS의 최대치와 최소치의 편차 (즉 400 ps/nm)를 각 전송 반 구획의 중계 구간 개수에서 하나를 뺀 24의 반인 12로 나누어서 RDPS 변화분을 얻고, 이 변화분에 1부터 12까지의 가중치를 곱한 후 전제 조건인 전체 평균치 200 ps/nm에서 12개의 (가중치×변화분) 만큼 더하고 뺀 24 종류의 RDPS들을 랜덤하게 분포하도록 하였다.

각 중계 구간의 랜덤한 RDPS는 랜덤하게 선택된 SMF 길이 (l_{SMF})와 아래 식 (1)과 같은 관계를 통해 DCF의 길이 (l_{DCF})로써 나타나게 된다.

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

FHTS의 첫 번째 중계 구간과 LHTS의 마지막 중계 구간을 제외한 24개 중계 구간을 통해 축적되는 각 전송 반 구획에서의 NRD는 평균 RDPS가 200 ps/nm이기 때문에 4,800 ps/nm이다. 여기에 첫 번째 중계구간의 SMF에서 축적한 랜덤 분포에서 제외되는 첫 번째와 마지막 중계 구간의 SMF에서 축적된 분산량을 각각 추가하면 6,160 ps/nm가 된다. 따라서 WDM 채널들의 효과적인 전송을 위하여 각 전송 반 구획의 NRD를 이 값보다 낮추어 주거나 제거해 주는 역할을 누군가는 수행해야 한다. 본 연구에서는 그림 1에 보인 바와 같이 첫 번째 중계 구간과 마지막 중계 구간의 DCF들이 원하는 전반 전송 구획과 후반 전송 구획의 NRD 값에 따라 각각 길이 (l_{pre}와 l_{post})가 변동되도록 설계하였다. 즉 이 두 DCF의 길이 변동에 따라 각 전송 반 구획에서의 NRD가 조절되도록 하였다.

본 연구에서 살펴보는 링크 구조는 각 중계 구간마다 존재하는 RDPS 때문에 NRD는 매우 큰 값을 가질 수 밖에 없고, 이 큰 NRD를 첫 번째 DCF와 마지막 DCF가 길이로써 없애거나 낮추기 때문에 "집중 보상 (concentrated compensation)"이라고 부를 수 있다. 그리고 두 DCF가 각 전송 반 구획의 NRD를 나누어 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 compensation 됨) 61.6 km로 고정시켰다. 반면 전체 전송로의 총 NRD는 pre-concentrated compensation (즉 첫 번째 중계 구간의 DCF)에 의

해서만 제어되도록 하였다. 다시 말해 l_{post} = 61.6 km로 고정되어 LHTS의 NRD는 0 ps/nm가 되게 하고, l_{pre}에 의해 제어되는 FHTS의 NRD가 전체 링크의 총 NRD가 되는 구조로 설계하였다. 그리고 본 연구에서 검토하는 전체 NRD 범위는 10 ps/nm 간격으로 -50 ps/nm부터 50 ps/nm이다 (이는 l_{pre}를 0.1 km 간격으로 61.5 km부터 62.1 km까지 변화시켜 얻는다).

본 연구의 목적인 SMF 길이와 RDPS가 랜덤으로 분포하는 50개의 중계 구간으로 이루어진 전체 링크를 전송하는 WDM 신호의 왜곡 보상 정도를 효과적으로 분석하기 위하여 SMF 길이를 80 km, RDPS를 200 ps/nm로 균일하게 설계한 그림 1의 링크 구조를 통해 전송되는 WDM 채널의 보상 정도와 비교 분석하였다. 각 경우 WDM 채널의 수신 품질 평가는 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)를 통해 수행하였다.

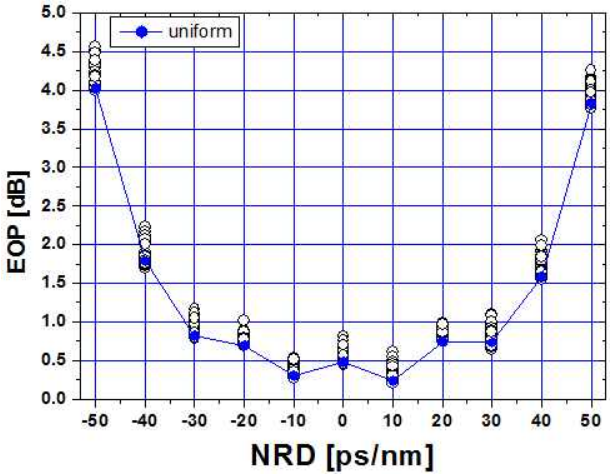
광전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 쉬뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödiger equation)에 의해 표현된다. 본 논문에서 40 Gbps의 24 채널 WDM 전송을 위한 NLSE의 수치적 분석은 단계 분할 퓨리에 (SSF; split-step Fourier) 기법[14]에 따라 Matlab으로 구현하여 이루어졌다.

III. 시뮬레이션 결과 및 검토

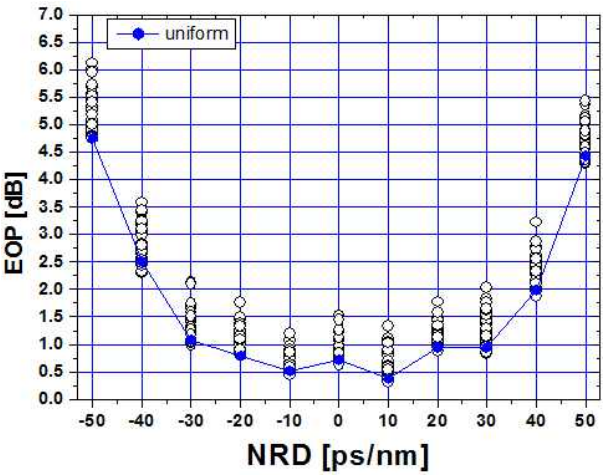
각 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 랜덤하게 분포하는 경우 수가 무수히 많기 때문에 모든 경우를 시뮬레이션을 통해 살펴보는데 대단히 많은 시간이 소모된다. 따라서 본 연구에서는 분석의 정확성을 비교적 높이고 동시에 시간 소모를 줄이기 위하여 30번의 랜덤 분포를 발생시켜 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 2는 SMF 길이와 RDPS의 30가지 랜덤 분포 각각에 대하여 그림 1의 링크에서 l_{pre}에 변화를 준 경우, 즉 전체 NRD의 변화에 따른 최악 채널의 EOP를 나타낸 것이다. 그림 2 (a)와 (b)는 각각 WDM 입사 전력이 -2 dBm과 1 dBm인 경우이고, 비교 분석을 위하여 이 두 경우 모두 모든 중계 구간의 SMF 길이는 80 km로, RDPS는 200 ps/nm로 균일하게 분포하는 링크에서의 EOP를 동시에 보여주고 있다. 쉽게 예측할 수 있듯이 각 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 랜덤한 값으로 설정되는 경우 선택되는 랜덤 패턴에 따라 EOP 특성이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 그림 2의 결과를 통해 확인해야 하는 중요한 사항은 랜덤 분포에 의한 EOP 변동 폭이 가장 적으면서 동시에 전체적으로 EOP 값을 최소로 만드는 NRD가 존재한다는 것이다. 그림 2 (a)와 (b) 두 경우 모두 NRD가 -10 ps.nm 또는 10 ps/nm로 설정된 링크에서 이러한 특성이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉 -10 또는 10 ps/nm가 최적의 NRD인 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 그림 2에서 얻은 결과에 따라, 즉 l_{pre}를 조정하여 전체 NRD를 -10 ps/nm와 10 ps/nm로 설정하고 SMF 길이와 RDPS를 30가지로 랜덤하게 분포한 경우에서 수신 특성이 가장



(a) @ −2 dBm



(b) @ 1 dBm

그림 2. NRD에 따른 최악 채널의 EOP

Fig. 2. The EOPs of the worst channel as a function of the NRD.

나쁘게 얻어지는 하나의 랜덤 경우에서의 EOP를 입사 전력에 따라 나타낸 것이다. 비교 분석을 위하여 SMF 길이와 RDPS 분포가 균일한 경우에서의 EOP도 동시에 나타냈다. NRD가 최적으로 설정되어 있더라도 WDM 채널의 입사 전력이 커질수록 랜덤 경우의 EOP가 균일 분포와 비교해 상대적으로 더욱 저하되는 것을 확인할 수 있다.

1 dB EOP를 기준으로 비교해보면, 균일 분포에 비해 SMF 길이와 RDPS를 랜덤하게 분포시킨 링크에서의 전력 마진이 약 3 dB 정도 나빠진다. 이는 입사 전력이 높은 곳에서의 수신 성능 저하 때문에 나타나는 것이라고 쉽게 알 수 있는데, OPC를 중심으로 한 두 전송 반 구획의 국부 분산과 광 전력의 랜덤 분포에 의한 비대칭화가 고 전력에서 더욱 심화되었기 때문이라고 판단해 볼 수 있다. 하지만 고 전력 전송은 수신기에서의 신호 대 잡음비를 낮추어서 비트 에러율을 높이는 원인이 되기 때문에 일반적으로 WDM 채널의 입사 전력은 0 dBm 이하로 낮게 하여 전송시킨다. 즉 그림 3의 결과를 실제 WDM 전송 시

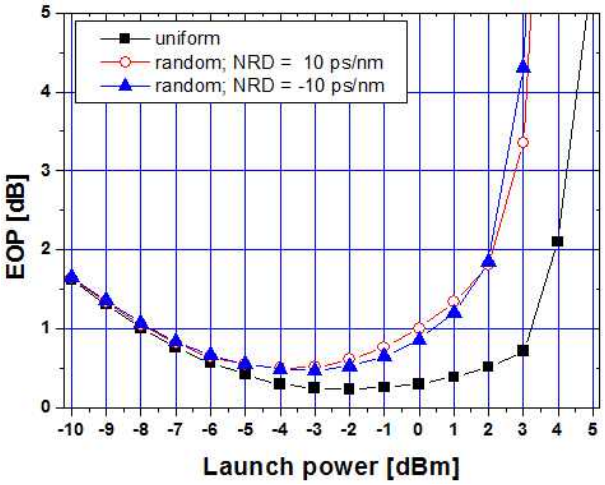


그림 3. 최적 NRD에서 입사 전력에 따른 최악 채널의 EOP
Fig. 3. The EOPs of the worst channel as a function of the launch power.

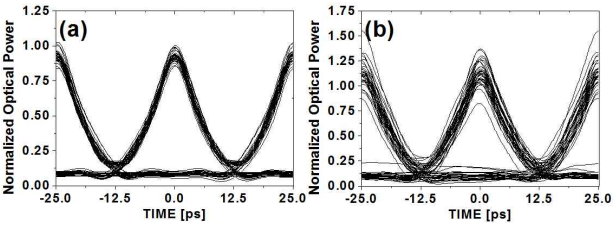


그림 4. NRD = 10 ps/nm에서 입사 전력이 3 dBm인 최악 채널의 아이 다이어그램 (a) 균일 분포, (b) 랜덤 분포
Fig. 4. Eye diagrams of the worst channel with 3 dBm launch power in the case of NRD = 10 ps/nm (a) uniform distribution, (b) random distribution of the SMF length and RDPS, respectively.

스템에 적용하여 분석하여 보면, WDM 채널의 입사 전력을 통상적 사용 범위 내로 제한한다면 각 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 랜덤하게 분포된 링크도 WDM 전송 링크로 채택될 수 있다는 것을 의미하고, 더욱이 링크 구조 설계 시 SMF 길이와 RDPS를 랜덤하게 선택할 수 있으므로 엔지니어에게 편의성과 확장성을 더욱 제공할 수 있는 구조라고 할 수 있다.

그림 4는 전체 NRD가 10 ps.nm로 설정된 경우 모든 중계 구간의 SMF 길이는 80 km로, RDPS는 200 ps/nm로 균일하게 분포된 링크 (그림 a)와 SMF 길이와 RDPS가 랜덤하게 분포된 링크 (그림 b)를 통해 입사 전력이 3 dBm로 전송시킨 WDM 채널들 중 수신 성능이 최악인 채널의 아이 다이어그램을 나타낸 것이다. SMF 길이와 RDPS 분포가 랜덤한 링크에서의 최악 채널의 눈 열림 정도가 균일 분포의 링크에서의 눈 열림에 비해 좋지 않지만, 수신기에서 어떠한 비트도 에러를 발생시킬 만큼의 눈 닫힘 (eye closure)을 만들지는 않는 것을 확인 할 수 있다. 즉 전송 링크의 SMF 길이와 RDPS를 랜덤하게 분포시키면 OPC와 DM에 의한 보상 정도가 균일한 링크에 비해 떨어지기는 하지만 WDM 채널 전송에 큰 문제를 발생시키지는 않는 설계 방법인 것을 알 수 있다.

지금까지의 성능 분석은 NRD가 10 ps/nm 또는 -10 ps/nm로 설정된 광전송 링크에서 이루어졌다. 하지만 실제적으로 전송 링크의 NRD를 항상 이 값만을 갖도록 고정하는 것은 시스템 구성의 융통성을 제한하는 요소가 된다. 다행히도 10 ps/nm이나 -10 ps/nm 외에 이들 근처의 다른 NRD 값들을 링크에 적용해도 최악 채널의 최대 EOP를 1 dB EOP 이하로 유지할 수 있다. 즉 수신 성능을 1 dB EOP 이하로 만드는 각 경우의 NRD 범위를 구할 수 있고 이 범위 내의 특정 값으로 NRD가 유지되도록 링크 구조를 설계하면 시스템 구조의 유연성을 높일 수 있다. EOP를 1 dB 이하가 되게 하는 NRD 범위를 유효 NRD라고 정의하여 이들을 WDM 채널의 입사 전력에 따라 구한 것이 그림 5이다.

즉 그림 5의 각각의 경우에 나타낸 입사 전력에 따른 등고선(contour)의 범위 내에서 NRD를 선택하고 해당 입사 전력으로 WDM 채널들을 전송하면 최악 채널의 최대 EOP를 1 dB 이내로 얻을 수 있다. SMF 길이와 RDPS의 랜덤 분포 중 최악 채

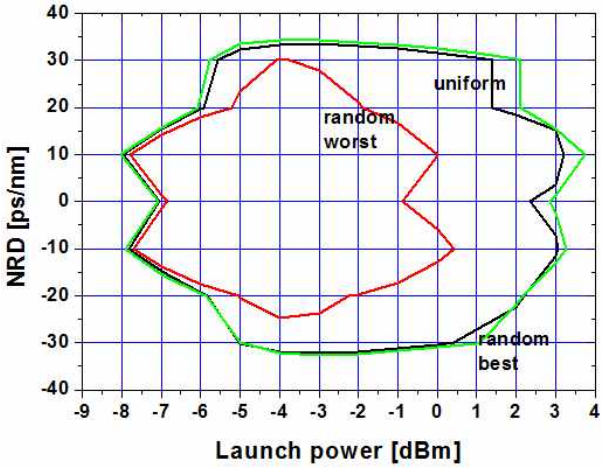


그림 5. 입사 전력에 따른 1 dB EOP 등고선
Fig. 5. The contour of 1 dB EOP as a function of the launch power.

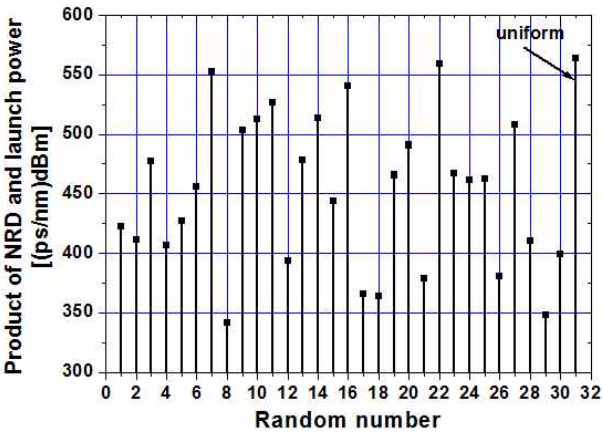


그림 6. NRD와 입사 전력의 곱
Fig. 6. The product of NRD and launch power.

널의 수신 성능을 최악으로 만드는 랜덤 패턴 (그림 5에서 random worst)과 동시에 최악 채널의 수신 성능을 최선으로 만드는 랜덤 패턴 (random best)에 의한 등고선도 그림 5에 동시에 나타냈다.

그림 5에서 랜덤 분포 패턴 중 최선의 수신 성능을 얻을 수 있는 랜덤 분포 패턴에 의한 등고선은 균일 분포 링크에서의 등고선보다 크게 개선되지 않는다는 것에 주목해야 한다. 즉 각 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS를 랜덤하게 분포시키는 것은 어렵지 않지만 균일 분포보다 개선된 성능을 얻을 수 있는 분포 패턴을 찾는 것은 쉽지 않고, 더불어 그 패턴을 찾았다고 하더라도 개선 정도가 크지 않다는 것이다.

이러한 결과를 일목요연하게 단순하게 비교할 수 있도록 하는 그래프가 그림 6이다. 그림 6은 그림 5와 같이 얻어지는 등고선의 가로 축과 세로 축의 곱 (즉 면적, 또는 NRD와 입사 전력의 곱)을 나타낸 것으로, 본 연구에서 수행한 30가지 랜덤 분포 패턴 각각에서의 곱 (그림 6 그래프의 *x*축의 random number 1부터 30까지)과 균일 분포에서의 곱 (그림 6 그래프의 *x*축의 random number 31)을 동시에 나타낸 것이다. 그림 6의 결과를 살펴보면, SMF 길이와 RDPS가 균일하게 분포된 링크에서 1 dB EOP 이하를 얻을 수 있는 NRD와 입사 전력의 곱에 버금가는 랜덤 분포 패턴들은 30가지 경우 중 단지 3개 (경우 7, 16, 22)뿐임을 알 수 있다.

하지만 이러한 결과는 모든 입사 전력을 고려 대상으로 한 경우의 결과로써 앞서 언급한 실제 WDM 전송에서의 입사 전력 범위 (즉 0 dBm 이하)로 논의를 국한한다면 그림 5의 등고선에서 보는 바와 같이 SMF 길이와 RDPS 분포가 랜덤한 링크를 설계하는데 있어 입사 전력에 따른 NRD 범위의 선택 폭이 10 ps/nm와 -10 ps/nm보다 넓어지기 때문에 좀 더 융통성을 확보할 수 있을 것이다.

Ⅳ. 결 론

SMF 길이와 RDPS가 랜덤하게 분포된 중계 구간의 개수가 50 개로 구성된 전송 링크를 통해 40 Gbps ×24 채널 WDM 신호를 전송하는 경우의 보상 특성을 SMF 길이와 RDPS 분포가 균일한 전통적인 링크에서의 보상 특성과의 비교를 통해 분석해 보았다.

WDM 채널의 전송 전력이 0 dBm 이하로 제한된다면 각 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS를 랜덤하게 선택하여 분포시키는 링크 구조도 WDM 전송에 적합할 수 있다는 것을 수치적 분석으로 확인하였고, 실제 링크 설계 시 설정된 입사 전력에 따른 최적 NRD의 선택 범위도 20 ps/nm 이상으로 늘릴 수 있다는 것을 확인하였다.

즉 고 전력의 WDM 채널 전송에 있어 SMF 길이와 RDPS 분포가 균일한 링크에 비해 랜덤 분포 링크에서의 DM과 OPC를 통한 보상 효과는 떨어지지만, 0 dBm 이하의 입사 전력에 대해서는 보상 효과가 거의 유사하게 나타나고, 각 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS를 랜덤하게 선정하여 구성할 수 있기 때문에 본 연구에서 제안한 링크 구조가 장거리 전송 링크 구성 면에서 융통성을 갖는 바람직한 구조라고 판단할 수 있었다.

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] X. Xiao, C. Yang, S. Gao, and Y. Tian, “Partial compensation of Kerr nonlinearities by optical phase conjugation in optical fiber transmission systems without power symmetry,” *Optical Communication*, Vol. 265, No. 1, pp. 326-330, 2006.

[9] P. Minzioni and A. Schiffini, “Unifying theory of compensation techniques for intrachannel nonlinear effects,” *Optical Express*, Vol. 13, No. 21, pp. 8460-8468, 2005.

[10] P. Minzioni, F. Alberti, and A. Schiffini, “Optimized link design for nonlinearity cancellation by optical phase conjugation,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 16, No. 3, pp. 813–815. 2004.

[11] S. R. Lee, “Dispersion management and optical phase conjugation in optical transmission links with a randomly distributed single-mode fiber length,” *Journal of Information*

and Communication Convergence Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 1～6, 2013.

[12] 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.

[13] 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.

[14] G. P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, 3rd ed. San Francisco:CA, Academic Press, 2001.

이 성 렬 (Seong-Real Lee)

1990년 2월 : 한국항공대학교 항공통신정보공학과 (공학사),
1992년 8월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학석사)
2002년 2월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학박사),
2002년 6월～2004년 2월 : (주)에이티엔 기술연구소장
2004년 3월～현재 : 국립목포해양대학교 해양정보통신공학과 부교수
※관심분야 : WDM 전송 시스템, 광의 비선형 현상 분석, 광 솔리톤 전송