

## SMF 길이와 RDPS가 랜덤하게 분포하는 분산 제어 광전송 링크에서 전체 잉여 분산 조절 위치에 따른 왜곡된 WDM 채널의 보상

# Compensation of the Distorted WDM Channels Depending on the Control Position of Net Residual Dispersion in Dispersion-managed Optical Link with the Randomly Distributed SMF Lengths and RDPS

이성렬

목포해양대학교 항해정보시스템학부

Seong-Real Lee

Division of Navigation Information System, Mokpo National Maritime University, Jeollanam-do, 530-729, Korea

### [요 약]

단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)의 길이와 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)이 랜덤하게 분포하는 광 위상 공액과 결합된 분산 제어 (DM; dispersion management)가 적용된 장거리 (50 fiber spans  $\times$  80 km) 전송 링크에서 SMF와 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber) 배열과 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)을 조절하는 위치에 따른 왜곡된 WDM 채널의 보상 특성을 수치적으로 분석해 보았다. NRD 조절 위치는 중계 구간을 구성하는 SMF와 DCF의 배열과 관계되어 있지만, NRD 조절의 구체적 위치보다 중계 구간을 이루는 SMF와 DCF의 배열이 WDM 채널의 수신 성능에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

### [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  $\times$  80 km) transmission link with the randomly distributed single mode fiber (SMF) length and residual dispersion per spans (RDPS) are investigated as a function of the arrangement of SMF and dispersion compensating fiber (DCF) and the control position of net residual dispersion (NRD). It is confirmed that the compensation effect of the distorted WDM channels strongly depends on the arrangement of SMF and DCF, rather than the control position of NRD.

**Key word** : Dispersion management, Optical phase conjugation, Residual dispersion per span, Random distribution of RDPS and SMF length, Net residual dispersion.

<https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.2.187>



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 28 March 2017; Revised 30 March 2017

Accepted (Publication) 24 April 2017 (30 April 2017)

\*Corresponding Author; Seong-Real Lee

Tel: +82-61-240-7264

E-mail: reallee@mmu.ac.kr

## I. 서론

단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)를 통해 1 Tbps 이상의 대용량 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexing) 신호를 전송하는 광통신 시스템에서 전송 성능을 저하시키는 주요 원인은 색 분산 (chromatic dispersion)과 비선형성(nonlinearity) 효과이다 [1]. 이를 극복하는 기술들 중 분산 제어 (DM; dispersion management)와 광 위상 공액 (optical phase conjugation)이 있다. DM은 양의 분산 계수를 갖는 SMF에서 축적된 분산량을 음의 분산 계수를 갖는 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)를 추가하여 전체 분산량을 제거하거나 조절하는 링크 구성 기술로 색 분산에 의한 왜곡 보상에 탁월하고[2],[3], 광 위상 공액 (optical phase conjugation)은 전체 전송로의 중간에 광 위상 공액기 (OPC ; optical phase conjugator)를 두어 전송되는 광 신호의 스펙트럼을 반전시켜 나머지 구간을 전송시킴으로써 왜곡, 특히 비선형성에 의한 왜곡에 효과적인 기술이다 [4],[5].

특히 이 두 기술을 결합하면 DM이 갖는 단점인 비선형 효과에 의한 광 신호 왜곡의 보상에는 한계와 광 위상 공액 기술에서의 선결 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 대칭화 문제를 어느 정도 해결할 수 있다 [5],[6]. 본 논문의 저자도 앞선 연구를 통해 다양한 형태의 DM과 MSSI를 결합시켜 시스템 성능이 개선되는 전송 링크를 보고하였다 [7]-[10].

DM이 적용된 광 링크의 설계 파라미터는 각 중계 구간 (fiber span)마다 축적되는 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)과 전송로 최종단에서 축적된 총 분산량으로 정의되는 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)이다[2]. DM이 적용된 광전송 링크의 기본 구조는 광 전송로를 구성하는 각 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS를 균일하게 분포시키는 것이다. 이러한 구성 방법은 링크 구조를 간단히 할 수 있다는 장점이 있지만 동시에 링크 구조의 융통성 (reconfigurable)을 제약하기 때문에 다양한 네트워크 구조를 어렵게 할 수 있다.

DM 광전송 링크가 다양한 광 네트워크에 적용되려면 (즉 완전한 융통성 링크로서의 이용) 각 중계 구간에서 SMF 길이와 RDPS의 크기가 제한되지 않은 랜덤 분포가 가장 바람직하다. 이러한 이유로 본 논문의 저자는 앞선 연구를 통해 50개의 중계 구간 모두에서 SMF 길이와 RDPS가 랜덤한 값을 갖는 DM 링크를 제안하고 960 Gbps WDM 채널의 보상 특성을 살펴보고 있다 [10].

DM 전송 링크에서 보상 특성에 영향을 미치는 요소는 한 중계 구간을 구성하는 SMF와 DCF의 배열 순서와 NRD를 조절하는 위치이다 [11]. 일반적으로 SMF와 DCF의 배열 순서와 NRD를 조절하는 위치는 서로 관계한다. 즉 중계 구간을 구성하는 SMF와 DCF의 배열 순서에 따라 NRD를 조절 위치가 달라질 수 있다. 그러나 랜덤 분포 DM 링크에 대한 저자의 참고

문헌 [7]의 연구에서는 SMF와 DCF의 배열 순서와 NRD를 조절하는 위치와 관계하여 하나의 구조만을 제안하였다.

따라서 본 연구에서는 참고 문헌 [7]에서 제안한 SMF 길이와 RDPS가 랜덤하게 분포된 DM 링크와는 다른 3가지의 새로운 SMF 길이와 RDPS가 랜덤하게 분포된 DM 링크를 제안하고, 각 링크에 0.96 Tbps (40 Gbps × 24 채널) WDM 신호를 전송시킨 경우의 보상 특성을 분석해보고자 한다.

## II. 시뮬레이션 모델링과 성능 분석

그림 1은 24 채널 × 40 Gbps의 WDM 전송 시스템과 이를 위한 광전송 링크의 구조를 나타낸 것이다. 그림 1의 24개 송신기(Tx), 수신기(Rx), 그리고 전체 전송로 중간에 위치한 OPC는 저자의 선행 연구인 참고 문헌 [10]과 동일하게 모델링하였다.

전체 전송 링크는 OPC를 중심으로 FHTS와 LHTS에 각각 동일하게 25개의 중계 구간으로 구성된다. 전체 전송로 중간에 OPC를 가지고 있기 때문에 OPC를 중심으로 FHTS와 LHTS의 축적 분산량의 분포와 광 전력이 대칭되도록 전체 링크를 구성해야 할 필요가 있다. 이를 위해 2가지 구성법을 고려하였다. 그 중 하나는 FHTS에서는 DCF를 SMF 앞에 삽입시키고, LHTS에서는 DCF를 SMF 다음에 삽입시키는 구성 (그림 1(a))이고, 또 다른 하나는 그림 1(a)와 반대되는 배열로, FHTS에서는 DCF를 SMF 다음에 삽입시키고, LHTS에서는 DCF를 SMF 앞에 삽입시키는 구성 (그림 1(b))을 고려하였다.

각 중계 구간의 SMF에서 축적된 분산량과 DCF에서 축적된 분산량의 차이가 RDPS가 된다. 본 연구에서 제안하는 링크 구조는 SMF 길이와 RDPS가 모든 중계 구간마다 서로 다른 값을 랜덤하게 갖지만 전송 반 구획 (즉 FHTS와 LHTS) 전체에서의 평균 SMF 길이는 80 km로, 평균 RDPS는 200 ps/nm가 되도록 하였다. 즉 각 전송 반 구획을 구성하는 각 중계 구간의 SMF 길이는 전체 평균이 80 km가 되도록 44 km부터 116 km까지의 범위에서 3 km 간격으로 구분되는 25개 길이 중 하나의 값을 랜덤하게 가지도록 하였다. 또한 RDPS는 전체 평균이 200 ps/nm가 되도록 0 ps/nm부터 400 ps/nm까지 사이(RDPS 간격은 정하지 않음)의 24개 값 중 하나의 값을 랜덤하게 가지도록 하였다.

FHTS와 LHTS 각각에서의 평균 RDPS가 200 ps/nm이기 때문에 각 전송 반 구획에서의 NRD는 4,800 ps/nm로 매우 커서 왜곡된 WDM 채널의 보상을 제대로 수행할 수 없다. 따라서 24개 WDM 채널 모두를 최선으로 보상할 수 있는 값이 되도록 NRD를 조절하는 역할 (즉 4,800 ps/nm를 줄여주는 역할)을 특정 중계 구간이 수행하여야 한다. 지난 연구에서는 그림 1(a) 구조의 링크에서 NRD 조절 방법으로 첫 번째 중계 구간의 DCF를 통한 pre-DC (dispersion calibrator)만을 제안하였다.

하지만 그림 1(a)의 링크 구조를 살펴보면 DeMUX 바로 전에 50번째 중계 구간의 DCF가 연결되어 있기 때문에 이를 통

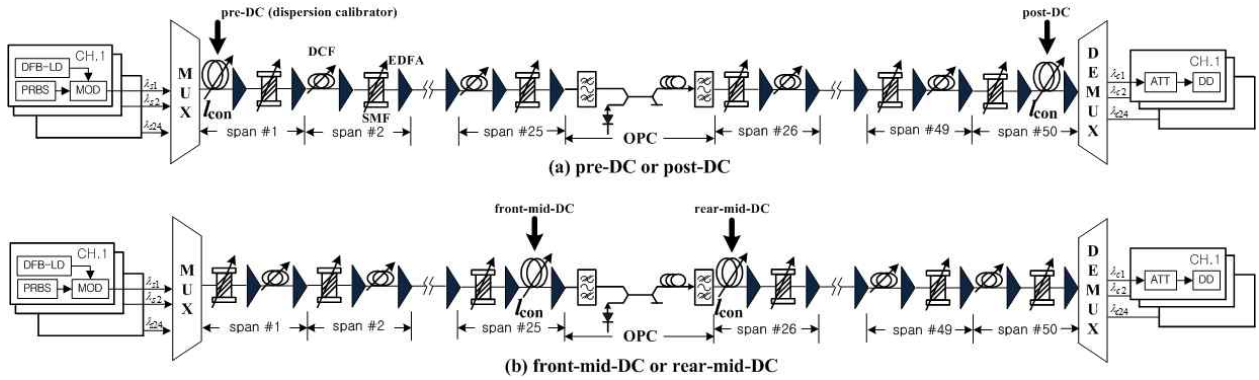


그림 1. 24x40 Gbps WDM 전송 시스템 구조  
 Fig. 1 Configuration of 24x40 Gbps WDM transmission system.

한 전체 전송 링크의 NRD 조절도 가능하다. 즉 그림 1(a) 구조의 링크에서 MUX 다음의 첫 번째 중계 구간의 DCF의 길이를 61.6 km로 고정하여 FHTS에서의 NRD를 0 ps/nm로 설정해 놓은 상태에서 50번째 중계 구간의 DCF 길이를 가변하여 전체 전송 링크의 NRD를 조절하는 방법인 post-DC에 의한 조절이 가능하다. 그러나 그림 1(b)의 링크 구조에서는 MUX 다음과 DeMUX 전에 DCF가 아닌 SMF가 연결되어 있기 때문에 이러한 NRD 조절보다는 OPC 전과 후에 연결된 DCF를 통한 NRD 조절이 가능하고 간편할 수 있다. 즉 OPC 바로 앞에 있는 25번째 중계 구간의 DCF 길이의 가변을 통한 전체 링크에서의 NRD 조절 (이를 front-mid-DC라 칭함)과 OPC 바로 뒤에 있는 26번째 중계 구간의 DCF 길이의 가변을 통한 전체 링크에서의 NRD 조절(이를 rear-mid-DC라 칭함)이 가능하다.

즉 중계 구간에서의 SMF와 DCF 배열에 따라 가능한 각각 2개씩의 NRD 조절 위치에 따른 왜곡된 WDM 채널의 보상 정도를 분석해보고자 하는 것이 본 연구의 목적이다. 그리고 본 연구에서 검토하는 전체 NRD 범위는 10 ps/nm 간격으로 -50 ps/nm부터 50 ps/nm이다. 이는 모든 DC의 경우 그림 1에서  $l_{con}$ 를 0.1 km 간격으로 61.5 km부터 62.1 km까지 변화시켜 얻을 수 있다.

SMF의 기타 파라미터는 중계 구간에 상관없이 아래와 같은 하나의 동일한 값으로 그림 1의 링크에 적용하였다; 손실 계수 0.2 dB/km, 분산 계수 17 ps/nm /km(@1,550 nm), 비선형 계수  $1.35 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ (@1,550 nm). 또한 DCF의 고정 파라미터 값들은 다음과 같다; 손실 계수 0.6 dB/km, 분산 계수 -100 ps/nm/km (@ 1,550 nm), 비선형 계수  $5.06 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ (@1,550 nm).

본 연구의 목적인 SMF 길이와 RDPS가 랜덤으로 분포하는 50개의 중계 구간으로 이루어진 전송 링크에서 NRD 조절 위치에 따른 보상 정도를 상대적으로 분석하기 위한 비교 대상으로 모든 중계 구간의 SMF 길이는 80 km, RDPS는 200 ps/nm로 균일하게 분포한 그림 1과 동일한 구조도 고려하였다. 각 경우 WDM 채널의 수신 성능 평가는 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)를 통해 수행하였다.

광전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE;

nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다[12]. 본 논문에서 40 Gbps의 24 채널 WDM 전송을 위한 NLSE의 수치적 분석은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법[12]에 따라 Matlab으로 구현하여 이루어졌다.

### III. 시뮬레이션 결과 및 검토

각 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS의 랜덤 분포에 대한 경우의 수는 무수히 많기 때문에 모든 경우를 시뮬레이션을 통해 살펴보는 데 대단히 많은 시간이 소모된다. 따라서 본 연구에서는 분석의 정확성을 비교적 높이고 동시에 시간 소모를 줄이기 위하여 30번의 랜덤 분포를 발생시켜 시뮬레이션을 수행하였다.

광통신 시스템에서 수신 성능 기준은 주로 1 dB EOP를 사용한다. 이는  $10^{-12}$  비트 에러율 (BER ; bit error rate)에 상응하는 값이다. 따라서 본 연구에서도 1 dB EOP를 기준으로 성능을 분석하도록 한다.

그림 2는 그림 1(a)에서 pre-DC에 의해 NRD를 조절하는 링크에서 1 dB 이하의 EOP를 얻을 수 있는 NRD 범위 (이를 유효 NRD 범위라고 정의)를 WDM 채널의 입사 전력에 따라 나타낸 것이다. SMF 길이와 RDPS의 30가지 랜덤 분포 중 보상이 가장

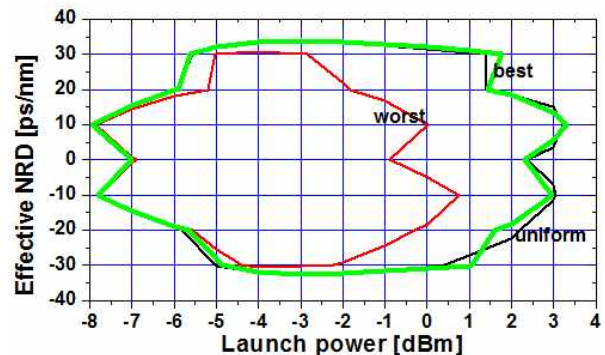


그림 2. 입사 전력에 따른 유효 NRD 범위 (pre-DC 경우)  
 Fig. 2. The effective NRD range as a function of the launch power in case of pre-DC.



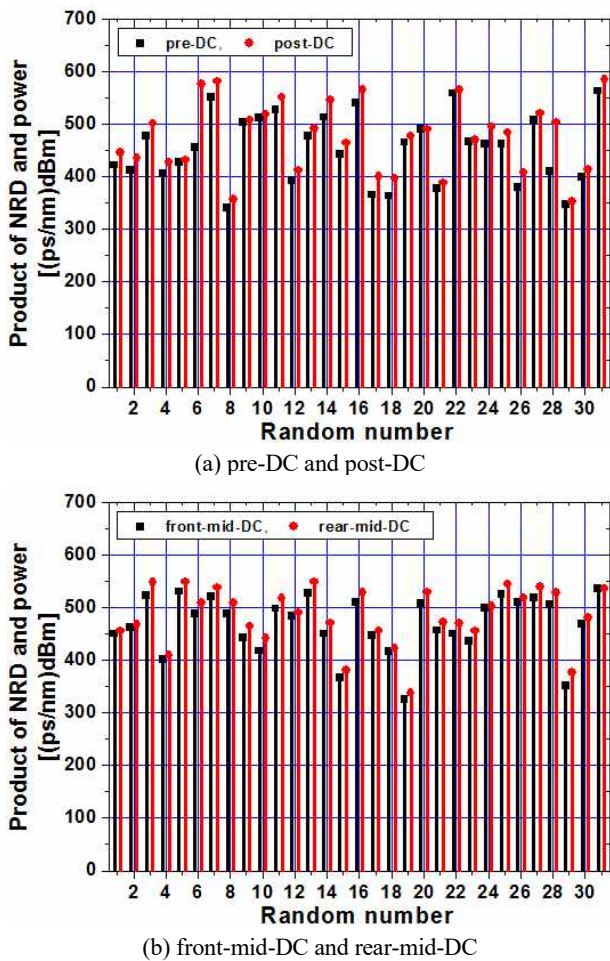


그림 3. NRD와 입사 전력의 곱  
**Fig. 3.** The product of NRD and launch power.

우수하게 얻어지는 랜덤 분포 (best)에서의 유효 NRD 범위, 가장 최악으로 얻어지는 랜덤 분포 (worst)에서의 유효 NRD 범위, 그리고 균일 분포의 링크에서 얻은 유효 NRD 범위 (uniform)을 동시에 나타냈다. 그림 2를 통해 각 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 랜덤하게 분포하더라도 그 분포 패턴을 어떻게 하느냐에 따라 보상 특성이 달라지는 것을 알 수 있다. 즉 그림 2에서 best의 유효 NRD 범위가 uniform의 유효 NRD 범위보다 다소 넓어지지만 worst의 유효 NRD 범위는 uniform에 비해 매우 협소해지는 것을 확인할 수 있다.

그림 2에 나타난 pre-DC 외에 나머지 3가지의 링크 구조에서 입사 전력에 따른 유효 NRD 범위를 30가지의 랜덤 분포에 대해 모두 나타내고 분석하기에는 한계가 있기 때문에 이들을 일목요연하게 비교할 수 있는 분석 지표가 필요하다. 이를 위해 product of NRD and launch power를 정의하고 사용하였다. 이 지표는 그림 2와 같이 얻어지는 유효 NRD 범위 등고선 (contour)의 가로 축과 세로 축의 곱 (즉 면적)을 나타낸 것으로, 그림 3에 4가지 NRD 조절 위치에서의 30가지 랜덤 분포 패턴별 (그림 3의 x축의 random number 1부터 30까지) product of NRD and launch power과 균일 분포에서의 곱 (그림 3의 x축의

random number 31)을 동시에 나타낸 것이다.

그림 3을 통해 각 랜덤 분포 패턴별 product of NRD and launch power가 pre-DC와 post-DC에서 거의 비슷하고, front-mid-DC와 rear-mid-DC에서 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다. 즉 pre-DC와 post-DC를 사용하는 링크와 front-mid-DC와 rear-mid-DC를 사용하는 링크에서 각 중계 구간의 SMF와 DCF의 배열은 각각 동일하기 때문에 DM과 OPC를 통한 왜곡된 WDM 채널에 대한 보상 특성은 SMF와 DCF의 배열에 크게 의존하는 것을 알 수 있다.

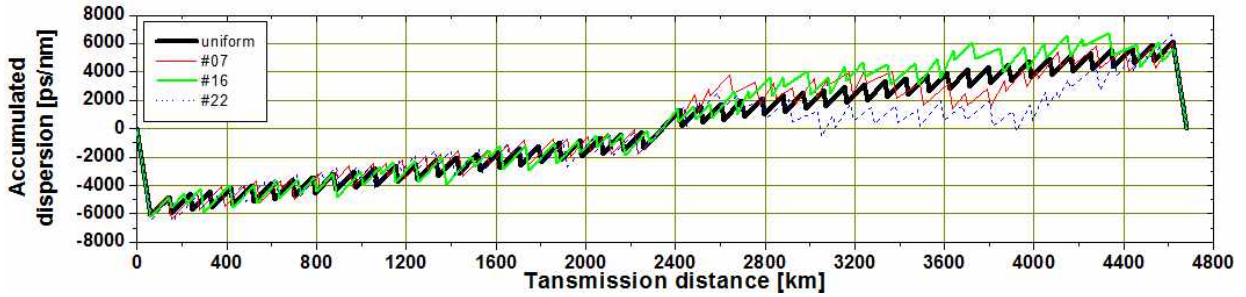
그림 4는 그림 3의 결과 중 product of NRD and launch power가 가장 큰 상위 3가지의 랜덤 분포와 가장 작은 하위 3가지의 랜덤 분포에서의 분산 맵 (dispersion map; 전송 거리에 따라 축적된 분산량)을 나타낸 것이다. NRD 조절을 pre-DC와 post-DC로 하는 링크에서 공통된 상위 3가지 분포 패턴은 7, 16와 22이고 하위 3가지 분포 패턴은 8, 21와 29이다. 그리고 NRD 조절을 front-mid-DC와 rear-mid-DC로 하는 링크에서 공통된 상위 3가지 분포 패턴은 3, 5와 13이고 하위 3가지 분포 패턴은 15, 19와 29이다.

그림 4를 분석해 보면, FHTS보다 LHTS에서 전송 거리가 증가할수록 축적된 분산량의 편차가 균일 분포에 비해 매우 커지고 동시에 매우 어지러운 형태를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 FHTS에서의 랜덤 패턴의 영향 때문이라고 볼 수 있다. 즉 FHTS이나 LHTS 모두 SMF 길이와 RDPS가 랜덤하게 분포하지만 FHTS까지는 LHTS보다 전송 거리가 짧아 축적된 분산량이 균일 분포와 비교해 큰 편차를 가지지 않지만 LHTS에서는 누적된 전송 거리가 더욱 증가하게 되고, 앞서 축적된 분산량의 영향을 받기 때문으로 볼 수 있다.

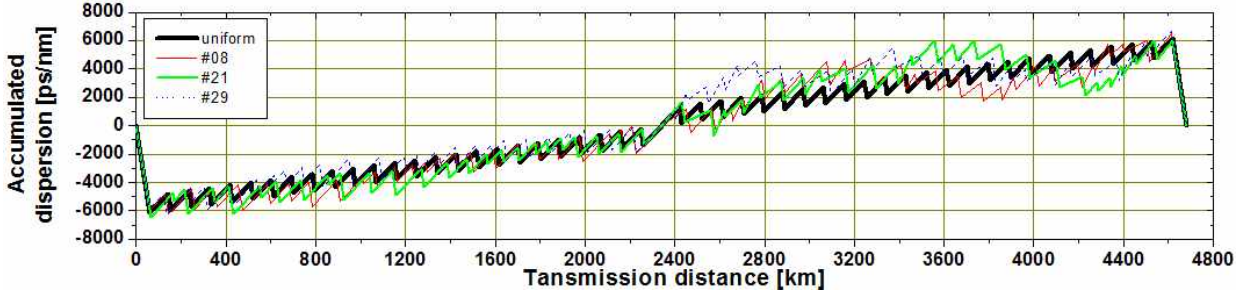
LHTS에서의 축적 분산량 편차와 어지러움의 정도는 상위 3개 패턴이나 하위 3개 패턴 모두 비슷하다. 즉 LHTS에서의 분산 맵이 보상 특성에 영향을 미치는 정도는 크지 않다고 보아야 할 것이다. 반면 상위 3개 패턴에서의 분산 맵과 하위 3개 패턴에서의 분산 맵을 비교해 보면, 오히려 FHTS에서의 분산 맵이 균일 분포에서의 분산 맵에 어느 정도 일치하면서 랜덤하게 분포하느냐에 따라 보상 효과가 결정되는 것을 알 수 있다. 즉 FHTS에서의 전송 거리에 따른 축적 분산량이 균일 분포와 유사할수록 보상 효과가 증가하여 큰 유효 NRD 범위를 얻을 수 있다고 판단할 수 있다.

이를 확인하기 위해 post-DC에 의해 NRD가 조절되는 그림 1(a) 링크 구조에서 FHTS의 모든 중계 구간들의 SMF 길이는 80 km로, RDPS는 200 ps/nm로 균일하게 구성한 반면 LHTS에서의 중계 구간들의 SMF 길이와 RDPS는 가장 최악의 보상이 이루어진 29번째 랜덤 패턴으로 구성시킨 링크에서의 유효 NRD 범위와 rear-mid-DC에 의해 NRD가 조절되는 그림 1(b) 링크 구조에서 FHTS는 균일 분포로 구성한 반면 LHTS에서의 중계 구간들의 SMF 길이와 RDPS는 가장 최악의 보상이 이루어진 19번째 랜덤 패턴으로 구성시킨 링크에서의 유효 NRD 범위를 구해 나타낸 결과가 그림 5이다.

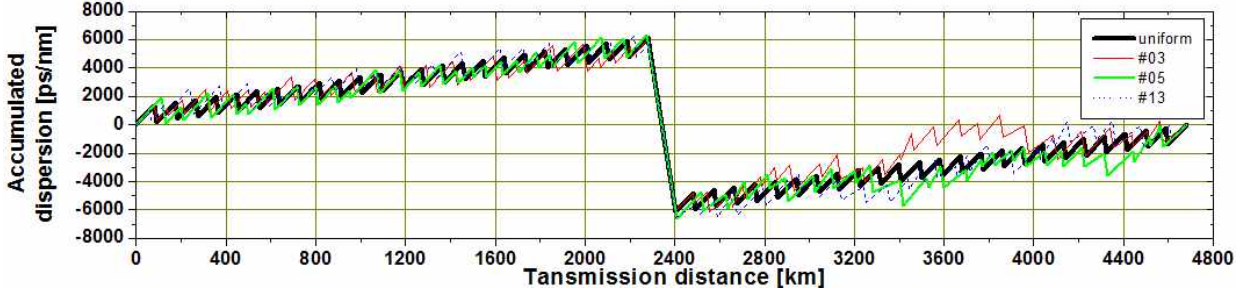
두 경우 모두 FHTS과 LHTS 모두 랜덤하게 분포한 링크 (그림 5에서 random의 경우)에서보다 FHTS은 균일 분포로 LHTS



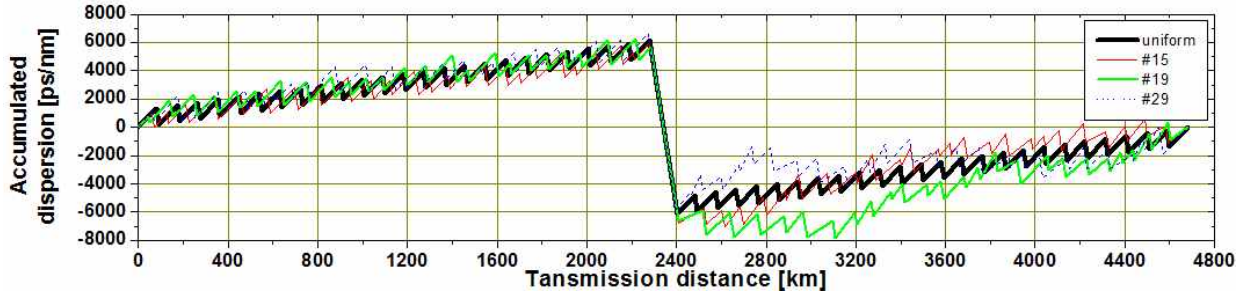
(a) best cases in pre-DC and post-DC



(b) worst cases in pre-DC and post-DC



(c) best cases in front-mid-DC and rear-mid-DC



(d) worst cases in front-mid-DC and rear-mid-DC

그림 4. 분산 맵  
Fig. 4. Dispersion maps.

은 랜덤하게 분포시킨 링크(그림 5에서 half random의 경우)에서 유효 NRD 범위가 크게 신장되는 것을 알 수 있다. 또한 등고선의 모양은 random의 등고선 모양을 거의 그대로 유지한 채 허용 입사 전력의 크기만 증가한 것을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

SMF 길이와 RDPS가 랜덤하게 분포된 전송 링크에서 각 중계 구간을 구성하는 SMF와 DCF 배열과 NRD를 조절하는 위치에 따른 왜곡된 WDM 채널의 보상 특성을 수치적으로 분석해 보았다. NRD 조절 위치는 중계 구간을 구성하는 SMF와 DCF의 배열과 관계되어 있지만, NRD 조절의 구체적 위치보다 중계 구간을 이루는 SMF와 DCF의 배열이 WDM 채널의 수신 성능에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

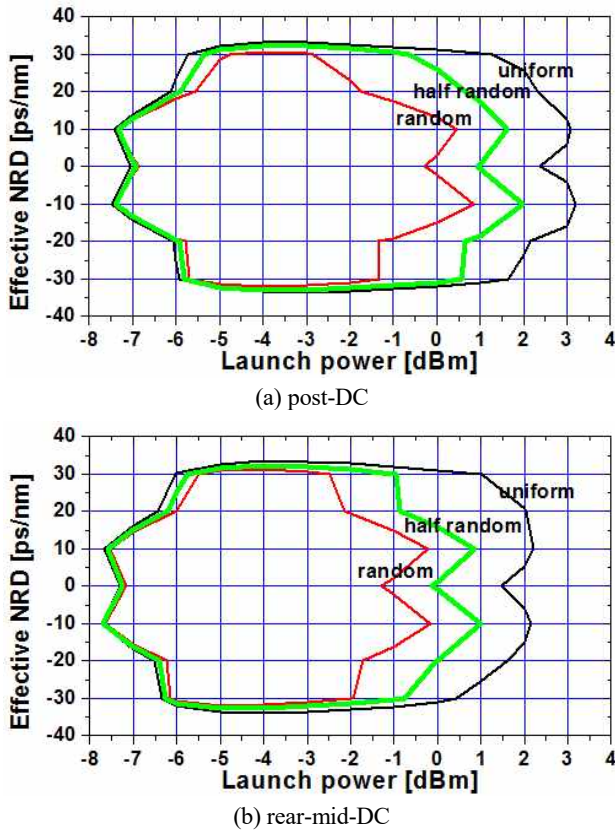


그림 5. 입사 전력에 따른 유효 NRD 범위 (pre-DC 경우)  
**Fig. 5.** The effective NRD range as a function of the launch power in case of pre-DC.

아울러 SMF 길이와 RDPS의 랜덤 분포 패턴을 통해 링크 구조의 융통성을 얻고 왜곡된 WDM 채널 보상에 대해 더 나은 보상 효과를 얻으려면 OPC 이전의 FHTS에서의 랜덤 분포 패턴이 균일 분포의 분산 맵에서 크게 벗어나지 않도록 DM 링크를 설계해야 한다는 것도 수치적으로 확인하였다.

**References**

[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] 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.  
 [3] 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.  
 [4] 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.  
 [5] A. Chowdhury and R.-J. Essiambre, "Optical phase conjugation and pseudolinear transmission," *Optics Letter*, Vol. 29, No. 10, pp. 1105~1107, 2004.  
 [6] P. Minzioni and A. Schiffrini, "Unifying theory of compensation techniques for intrachannel nonlinear effects," *Optical Express*, Vol. 13, No. 21, pp. 8460-8468, 2005.  
 [7] 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.  
 [8] 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.  
 [9] S. R. Lee, "Dispersion managed optical transmission links with an artificial distribution of the SMF length and residual dispersion per span," *Journal of Information and Communication Convergence Engineering (JICCE)*, Vol. 12, No. 2, pp. 75~82, June 2014.  
 [10] S. R. Lee, "Compensation for the distorted WDM channels in the long-haul transmission link with the randomly distributed SMF lengths and RDPS," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 19, No. 4, pp. 323-329, Aug. 2015.  
 [11] D. M. Rothnie and J. E. Midwinter, "Improved standard fiber performance by positioning the dispersion compensating fiber," *Electronics Letters*, Vol. 32, No. 20, pp.1907~1908, 1996.  
 [12] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd ed. San Francisco:CA, Academic Press, 2001.



**이 성 열 (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 항해정보시스템학부 교수  
 ※관심분야 : WDM 전송 시스템, 광의 비선형 현상 분석, 광 솔리톤 전송