

광증폭 전송시스템에서 Modulation Instability에 의한 비선형 왜곡의 분석 및 광링크 보상구조의 제안

정희원 이 용 원*, 김 용 범**, 이 명 문***, 유 진 태*, 박 진 우*

Analysis on Nonlinear Distortion due to Modulation Instability and Proposal of Link Structure for Compensation in Optical Amplified Transmission Systems

Yong-Won Lee*, Yong-Bum Kim**, Myung-Moon Lee***, Jin-Tae Yu*, Jin-Woo Park* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 광증폭 전송시스템에서 중요한 성능제한 요소인 modulation instability (MI)에 의한 비선형 왜곡을 보상하기 위해서 그 특성을 이론적으로 분석하고, 이를 토대로 MI를 보상하는 광 링크 구조를 제안한다. MI 보상 광링크 구조는 optical phase conjugators (OPCs)와 dispersion compensating fibers (DCFs)를 이용하여 MI에 의한 분산을 보상하도록 설계하였다. 제안된 보상구조는 시뮬레이션 실험에서 500 km 광전송의 경우에 기존의 구조에 비해 그 성능이 크게 향상됨을 확인할 수 있었다.

Key Words : modulation instability, dispersion compensation, optical link design

ABSTRACT

We theoretically analyze the properties of nonlinear distortion due to modulation instability (MI), which is a major factor of performance degradation in optical amplified transmission systems, and propose an optical link structure to compensate MI based on the analysis. The proposed MI compensating link structure is composed of optical phase conjugators (OPCs) and dispersion compensating fibers (DCFs) in order to suppress nonlinear effects in optical transmission links. It has been confirmed through computer simulations that the performance of the proposed compensation scheme is superior to that of conventional compensation schemes for 500 km transmission.

I. 서 론

광 증폭기의 등장이후 수 천 km이상의 무중계 광 링크의 구현이 가능케 되었지만, 주기적으로 위치된 광 증폭기에서 발생하는 amplified spontaneous emission(ASE) 잡음 때문에 광 링크의 SNR이 나빠지게 되었다. 더 좋은 SNR을 얻기 위

해서는 광 신호의 높은 전력이 요구되지만, 이는 곧 광섬유의 비선형 현상을 증가시키기 때문에 전송 성능이 더욱 떨어지게 된다.

특히 전송매체로 사용되는 광섬유에서 group velocity dispersion(GVD)과 self-phase modulation (SPM)에 의한 상호작용으로 ASE 잡음이 증가되는데, 이러한 현상을 modulation in-

* 고려대학교 전자컴퓨터공학과 광통신망연구실 (leeyw@korea.ac.kr), ** KT 서비스개발연구소

*** 수원과학대학 정보통신과

논문번호 : 030112-0317, 접수일자 : 2003년 3월 17일

※본 연구는 두뇌한국21(BK21) 사업과 광인터넷연구센터(OIRC) 과제를 통한 한국과학재단(KOSEF) 지원으로 수행되었습니다. 두 기관의 지원에 감사드립니다.

stability(MI)라고 한다^[1]. 이 현상은 ASE 잡음이 "probe"로, 광 신호가 "pump"로 작용함으로써 발생하는데, 그 결과로 ASE 잡음이 이득을 얻게 된다. 즉, 광 신호의 전력이 ASE 잡음으로 전달되어 ASE 잡음의 스펙트럼 모양을 변화시키면서 시스템 성능을 저하시킨다. 특히 anomalous dispersion을 갖는 광섬유에서는 MI 현상으로 인해 ASE 잡음이 전송거리의 증가에 따라 지수함수적으로 증가되어 광 신호가 크게 왜곡된다. 그러므로, 기존에 가장 많이 포설되어 사용되고 있는 SMF와 최근 새로운 광섬유로 주목받고 있는 NZ-DSF를 이용한 광전송 링크에 대해서 MI 현상에 의한 신호왜곡을 보상할 필요가 있다.

이미 MI 현상에 대하여 이론적인 연구와 실험이 많이 진행되어 왔고^{[2]-[6]}, MI에 의한 잡음 증가를 억제하기 위한 광 링크 구조도 제안되었다^[3]. 이 연구들 중, [4]는 MI 효과가 분산보상을 이용하여 줄어 들 수 있음을 실험적으로 보여주었으나, 다양한 광섬유 파라미터에 대한 최적의 보상구조를 제안하지는 못했다. [5]에서는 SMF를 이용한 광 링크의 주기적인 분산보상구조에서 MI현상이 분석적으로 조사되었고, [6]에서는 축적된 ASE 잡음의 파라메트릭 증폭 효과를 무중계 장거리 광증폭 시스템의 시뮬레이션을 통해서 확인하였다.

본 논문에서는 SMF와 NZ-DSF를 전송매체로 이용하는 광증폭 전송시스템에서 MI 현상에 의한 신호왜곡을 보상하는 구조를 제안한다. 먼저, MI 현상을 이론적으로 분석하기 위해 MI 이득과 시간 지연을 통하여 유효시간지연을 정의하고, 광전송 링크에 따른 특성들을 비교하였다. 그리고, MI 현상이 보상되는 DCF의 길이를 유효시간지연을 통해 결정하고, 이를 토대로 OPC와 DCF를 혼합한 MI 보상구조를 제안하였다. 마지막으로 기존의 보상구조와 제안된 보상구조의 성능을 시뮬레이션을 통해 비교하고, 결과적으로 기존의 보상구조에 비해 제안된 MI 보상구조가 전송성능면에서 뛰어난함을 확인하였다.

II. Modulation instability의 이론적 분석

일반적으로, GVD와 SPM의 상호작용으로 인해 발생하는 MI 이득은 다음과 같이 표현된다^[1].

$$G(\Delta\omega, z) = \exp\left\{\int |\beta_2 \Delta\omega| \sqrt{\omega_c^2 - \Delta\omega^2} dz\right\} \quad (1)$$

여기서, $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ 는 광 캐리어(optical carrier)의 중심 주파수(ω_0)로부터의 차이를 나타내고, z 는 전송거리, β_2 는 광섬유의 GVD 파라미터이다. 그리고, ω_c 는 MI 이득의 임계주파수(cutoff-frequency)이다.

$$\omega_c = \sqrt{\frac{4\gamma\bar{P}}{|\beta_2|}} \quad (2)$$

$$\bar{P} = \int_0^z P_0 \exp(-\alpha z') dz' \quad (3)$$

식 (2)와 (3)은 각각 MI 이득의 임계주파수와 거리에 대한 광신호의 평균 전력(average power)을 나타낸다. 여기서, γ, P_0, α 는 각각 광섬유의 비선형 계수, 입력 전력, 손실 계수를 나타낸다. 위 식들로부터, MI 이득이 거리와 주파수와 전력에 관한 함수이므로 전송과정에서 광섬유의 손실에 의한 광전력의 감소가 MI 이득의 분포와 임계주파수를 연속적으로 달라지게 함을 알 수 있다. 즉, MI 현상에 의해 발생된 잡음성분들이 식 (1)에서 표현된 것과 같이 전송거리에 따라 다른 임계주파수와 다른 크기의 이득을 갖는다. 이러한 MI 현상은 광 신호에 위상변조(PM: phase modulation)를 일으키게 되고 광섬유의 분산에 의하여 세기변조(IM: intensity modulation)로 변환된다. 그러므로, PM-IM 변환은 IM/DD (Intensity modulation/direct detection) 시스템의 성능을 크게 열화시키는 요인이 된다.

이미 언급한 바와 같이, 광섬유 분산은 PM-IM 변환과 관계된다. 이러한 관계에 따르면 MI에 의해

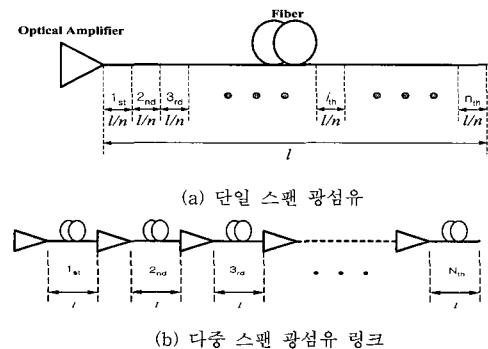


그림 1. 광전송 시스템의 구조 모델

발생된 새로운 주파수 성분들은 광섬유 분산에 의하여 각각 다른 시간 지연을 겪게 되고, 이것이 전송과정에서 세기 변조를 일으킨다. 그러므로, MI

현상에 의해 발생하는 성능 열화를 파악하기 위해서 광섬유 분산에 의한 주파수 성분들의 시간지연 차이가 고려되어야 한다.

일반적으로, 광섬유 분산에 의한 주파수 성분들 간의 시간 지연 차이는 다음과 같이 표현된다^[1].

$$\Delta T = L\beta_2\Delta\omega \quad (4)$$

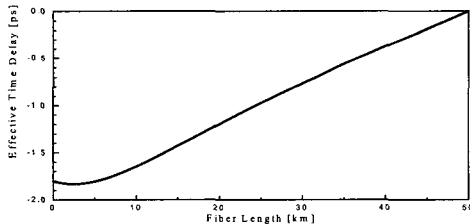
여기서 L 은 광섬유의 길이이다. 식 (4)는 광섬유를 통해 진행하는 광 펄스가 분산에 의해서 겪는 시간지연을 나타내고 있다.

식 (1)과 (4)의 곱을 통해서 MI에 의한 신호왜곡의 영향을 식 (5)처럼 표현할 수 있다.

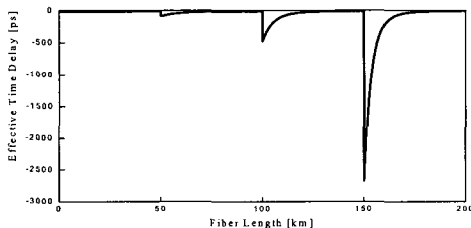
$$\Delta T_{eff} = G(\Delta\omega, z) \times \Delta T \quad (5)$$

이 식은 MI 이득과 분산에 의한 시간지연을 곱함으로써 얻을 수 있는 유효시간지연 (effective time delay)으로 정의한다. 즉, 이 식에서는 전송 거리에 따라서 다르게 발생하는 MI 이득과 MI에 의해 발생한 잡음성분들이 그 발생된 지점부터 전송 링크 끝에 도달하기까지 겪는 시간지연이 고려된다.

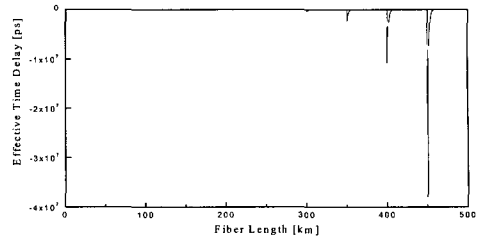
MI 현상의 분석을 위해서 본 논문에서는 in-line 광 증폭기를 이용하여 주기적으로 광섬유의 손실을



(a) 단일 스펠 광섬유의 경우



(b) 4 스펠 광섬유 링크의 경우(200 km)



(c) 10 스펠 광섬유 링크의 경우(500 km)

그림 2. MI에 의한 유효시간지연

극복하는 장거리 전송선로를 가정하였다. 그림 1은 MI 현상의 분석을 위한 광 증폭 전송시스템의 모델이다. 적용된 광 증폭기는 동일한 간격과 동일한 크기의 이득을 갖고 동일한 양의 ASE 잡음을 방출하는 것으로 가정한다. 광전송 시스템 모델을 통해서 얻어진 MI 현상에 대한 유효시간지연을 아래 식 (6)과 (7)로 표현할 수 있다.

식 (6)과 (7)은 각각 단일 스펠의 광섬유와 다중 스펠의 광섬유 링크의 경우에 대한 유효시간지연이다. 즉, 식 (6)은 n 등분된 광섬유의 i 번째에서 발생하는 MI에 의한 새로운 주파수 성분들의 유효시간

표 7. 분석에 사용된 광섬유 파라미터

광섬유 스펠의 길이 (l)	50 km
분산 (β_2)	-20 ps ² /km
비선형 계수 (γ)	2 W ⁻¹ km ⁻¹
손실 계수 (α)	0.22 dB/km

지연이고 식 (7)은 N 개의 광섬유 스펠 중 j 번째에서 발생하는 성분들의 유효시간지연이다.

그림 2는 앞에서 유도된 식들을 통해 얻은 MI의 유효시간지연을 보인다. 그림 2의 (a), (b), (c)는 각각 단일 스펠의 광섬유, 4 스펠의 광섬유 링크, 10 스펠의 광섬유 링크에 대한 결과이다. 분석에 사용된 광섬유 파라미터는 표 1과 같다. 그림 2의 (a)에서 단일 스펠의 경우, 약 2.4 km의 거리에서 최대의 유효시간지연을 가지는데, 이는 MI 이득과 분산에 의한 시간지연이 전송 초기에 최대가 되기 때문이다. 그러나, in-line 광 증폭기를 이용한 다중 스펠 광섬유 링크의 경우, 광 전력의 회복이 주기적

$$\Delta T_{eff,i} = \frac{n+1-i}{n} \beta_2 \Delta\omega \exp \left[\frac{|\beta_2 \Delta\omega| il}{n} \times \sqrt{\frac{4\gamma P_0 n}{|\beta_2| |\alpha|} \exp \left(-\frac{\alpha il}{n} \right) \left\{ \exp \left(\frac{\alpha l}{n} \right) - 1 \right\} - \Delta\omega^2} \right] \quad (6)$$

$$\Delta T_{eff,i,j} = \left(\frac{n+1-i}{n} + N-j \right) \beta_2 \Delta\omega \times \exp \left[\frac{|\beta_2 \Delta\omega| l \left(\frac{i}{n} + j - 1 \right) \sqrt{\frac{4\gamma P_0 n}{|\beta_2| |\alpha|} \exp \left(-\frac{\alpha il}{n} \right) \left\{ \exp \left(\frac{\alpha l}{n} \right) - 1 \right\} - \Delta\omega^2}}{n} \right] \quad (7)$$

으로 이루어지므로 광 신호의 전력에 의존되는 특성을 가진 MI 이득도 주기적으로 발생되어서 그 특성이 단일 스패의 경우와 달라지게 된다. 특히, 광 증폭기로부터의 ASE 잡음들의 축적으로 인하여 전송거리가 길어질수록 MI 이득도 증가되는데, 그 결과가 그림 2의 (b),(c)와 같이 나타난다. 이 결과들로부터 다중 스패 광섬유 링크에서는 맨 마지막 스패에서 발생하는 MI 효과가 전송성능에 가장 큰 영향을 끼침을 알 수 있다.

III. 분산보상 구조에서의 modulation instability 특성

일반적으로, 광섬유의 분산을 보상하기 위해서 칩 광섬유 브래그 격자(chirped fiber Bragg grating), OPC와 DCF 등의 보상방법들이 제안되었다. 보고된 많은 방법들 가운데 DCF를 이용한 보상방법이 가장 실제적인 것으로 알려져 왔다^[7]. 이는 전송용 광섬유로 쓰이는 SMF와 NZ-DSF의 양의 분산값에 대해 반대 부호인 음의 분산값을 갖는 DCF를 제작하여 분산을 보상하는 방법이다. 이와 같은 보상구조에서 MI 현상은 양의 분산값을 갖는 전송용 광섬유에서만 발생된다^[2]. MI 현상의 분석에 있어서 분산보상 방식은 유효시간지연을 줄이는 효과를 갖는데, 이는 분산보상기로 쓰이는 DCF가 전송용 광섬유와 반대 부호의 분산을 가지므로 식 (4)에 의해 다른 주파수들의 시간지연 차이가 줄어들게 되기 때문이다. 그러므로, DCF를 이용한 분산보상 방식은 유효시간지연을 줄어뜨리게 함으로써 광신호의 왜곡을 줄일 수 있다^[4].

분산보상구조에서 DCF에 의한 시간지연을 구하면 다음과 같다.

$$\Delta T_{(DCF)} = L_{(DCF)}\beta_{2(DCF)}\Delta\omega \quad (8)$$

이 식은 식 (4)에 대해 DCF의 길이와 GVD 파라미터를 적용한 것이다.

분산보상 구조에서 MI 특성에 관한 식은 식 (7)과 (8)을 통해서 구할 수 있다.

$$\Delta T_{total} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n \int_0^{\omega_i} (N+1-j) \{ (\Delta T_{eff, i, j} + \Delta T_{(DCF)}) \times G_{i, j} \} d\Delta\omega \quad (9)$$

식 (9)는 분산보상구조를 갖는 광전송 링크 내에서 발생하는 MI 현상에 의한 유효시간지연을 모두 합한 것으로서, 전체 유효시간지연(total effective time delay)을 나타낸다.

그림 3은 분산보상구조를 갖는 광전송 링크에서 최소의 전체 유효시간지연을 얻는데 필요한 DCF의 길이를 보이고 있다. 이것은 식 (9)에서 전송거리와 입력 전력을 가변시켜 구한 것으로서, 이 결과에 의하면 GVD만을 보상하는 경우에는 최소의 MI 현상을 일으키는 DCF 길이가 선형적으로 계속 증가되지만, MI를 보상하는 경우에는 특정한 전송거리 이후에 결코 DCF 길이가 증가될 필요가 없음을 알 수 있다. 이는 그림 2에서 보듯이 MI 효과가 마지막 광섬유 스패에서 가장 강하기 때문이다. 또한,

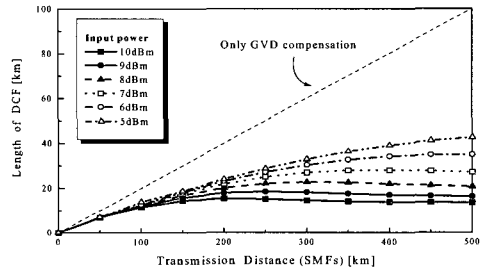


그림 3. 최소 유효시간지연을 갖는 DCF 길이

입력 전력이 증가될수록 DCF 길이가 점점 줄어드는데, 400 km의 거리에서 GVD만을 보상할 경우에 80 km의 DCF가 요구되고, MI 보상의 경우에 5 dBm의 입력 전력에서는 39 km, 10 dBm에서는 14 km의 DCF가 요구된다. 그러므로, DCF에 의한 분산보상에서 GVD만을 보상할 때의 DCF 길이에 비해 MI를 보상할 때의 DCF 길이가 훨씬 더 줄어든다는 것을 알 수 있다.

IV. MI 보상을 위한 광링크 구조

앞 절에서 분석된 바와 같이 분산보상된 광전송 링크에서 GVD만을 보상할 때와 MI를 보상할 때에 요구되는 DCF의 길이가 각각 다르다. 즉, MI를 보상할 경우는 GVD가 보상되지 않고 GVD만을 보상할 경우는 MI가 보상되지 않기 때문에 이를 동시에 보상할 수 있는 구조가 필요하다.

앞에서 분석한 MI 특성을 토대로 GVD와 MI를 동시에 보상하는 구조를 제안할 수 있다. 먼저 MI

를 보상하는데 요구되는 DCF의 길이를 선택하고 이로 인해 보상되지 않는 GVD는 OPC를 도입한다. 즉, 그림 4에서와 같이 OPC와 DCF를 혼합하여 GVD와 MI를 동시에 보상할 수 있는 구조를 제안한다.

그림 4의 제안된 구조에서 전송용 광섬유의 스펠 수를 N 개라고 할 때, $N = 2 \times n + x$ 인 관계를 갖는다. x 는 DCF의 길이와 OPC의 위치에 의해 결정될 수 있는데, N 개의 광섬유 스펠의 길이가 모두 같다고 하면, x 는 식 (10)에 의해 구할 수 있다.

$$l_{DCF} \times D_{DCF} + x \times l_{SMF} \times D_{SMF} = 0 \quad (10)$$

여기서 D_{DCF} 와 D_{SMF} 는 각각 DCF와 SMF의 분산이고, l_{DCF} 와 l_{SMF} 는 각각 DCF와 SMF 스펠의 길이이다.

제안된 구조에 대한 성능분석은 시뮬레이션에 의해 수행되었다^[8]. 채널 신호속도인 10 Gb/s와 40 Gb/s에서 각각 30 ps와 10 ps의 FWHM을 갖는 가우시안 펄스를 사용하였고, 신호 파장은 1547.6 nm로 하였다. 전송로의 광섬유로는 기존에 가장 많이 포설되어 사용되고 있는 SMF와 최근 새로운 광섬유로 주목받고 있는 NZ-DSF를 선택하였으며, 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 2와 같다. 입력 전력은 MI 현상이 발생할 수 있도록 8 dBm을

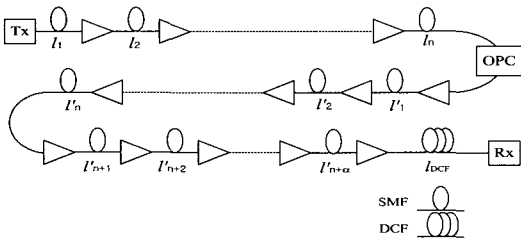


그림 4. OPC와 DCF를 혼합한 MI 보상구조

표 8. 시뮬레이션에 사용된 파라미터

파라미터	단위	SMF	NZ-DSF	DCF
손실계수 (α)	dB/km	0.2	0.2	0.5
분산 (D)	ps/nm/km	16	2.5	-80
분산기울기 (D')	ps/nm ² /km	0.01	0.01	-0.05
비선형계수 (γ)	W ⁻¹ km ⁻¹	2	2	10

사용하였다. 광 증폭기는 그 간격이 광섬유 한 스펠의 길이인 50 km이고 광섬유 스펠의 손실을 보상할만큼의 이득과 6 dB의 잡음지수를 가진다고 가정했다.

그림 5는 제안된 구조의 x 값 변화에 따른 전송 성능을 10 Gb/s와 40 Gb/s의 전송속도에 대하여 보여준다. 여기서 x 값이 0이면 OPC에 의해서만 보상되는 구조가 되고, x 값이 N 과 같다면 DCF에 의해서만 보상되는 구조가 된다. 사용된 광섬유인 SMF 스펠의 수(N)가 10이므로 전송거리는 500 km가 된다. 결과에서 볼 수 있듯이, $x=2$ 일 때 가장 좋은 결과를 나타내는데 10 Gb/s와 40 Gb/s에서 각각 23 dB와 14.6 dB의 Q값을 갖는다. 일반적으로 10^{-9} 의 BER을 갖기 위해서는 Q값이 15.5 dB이어야 하므로, $x=2$ 인 보상구조에서 성공적으로 MI와 GVD가 보상됨을 알 수 있다. 이 때, 사용된 DCF의 길이는 20 km가 된다.

그림 6은 SMF를 이용하여 전송거리를 증가시키기에 따라 나타나는 성능의 변화를 x 값의 변화에 따라 보여준다. 전송 거리에 따라 성능의 변화가 크게 나타나는 부분은 x 값이 0과 2인 경우이다. 전송거리가 400 km이상 증가하게 되면 $x=2$ 일 때 가장 성능이 좋아지는데, 이것은 400 km이상 광 펄스가 전송되면 MI에 의한 비선형 왜곡이 우세하게 되기 때문이다. $x=2$ 이면 광 전송 링크의 마지막 2개의 광섬유 스펠들을 보상하기 위해 DCF가 사용되

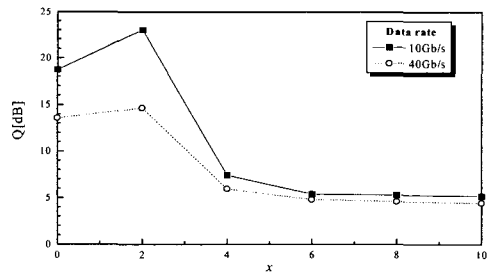


그림 5. x 값에 대한 전송속도별 성능 ($N=10$, SMF)

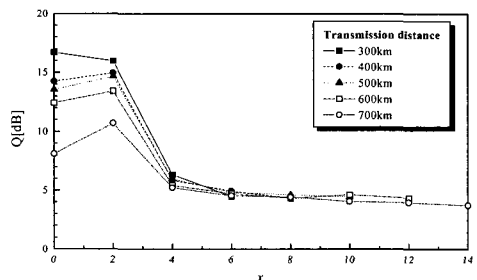


그림 6. x 값에 대한 전송거리별 성능 (40 Gb/s, SMF)

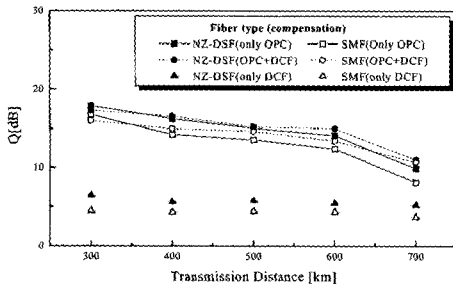


그림 7. SMF와 NZ-DSF에 대한 MI 보상성능 비교 (40 Gb/s)

는데, 그림 3의 결과에서 이미 증명된 것처럼 다른 x 값에 비해서 가장 많은 MI에 의한 왜곡을 보상할 수 있게 된다.

그림 7에서는 40 Gb/s에서 광섬유 종류에 따른 MI보상 성능을 비교하고 있다. SMF와 NZ-DSF는 분산값이 다르므로 MI 현상이 발생하는 주파수 범위가 달라진다. 그러므로, 광섬유에 따라 MI보상 결과가 다르게 나타난다. 그림에서 보듯이, 폐쇄된 기호로 표시된 NZ-DSF의 결과가 개방된 기호된 SMF의 결과에 비해 더 좋은 결과를 나타냄을 알 수 있다. 이는 NZ-DSF에서의 MI 이득의 주파수 범위가 증가하여 많은 잡음성분이 필터에 의해서 제거될 뿐 아니라, 분산값이 작으므로 PM-IM 변환이 적게 일어나기 때문이다. 그림 7을 통해서 OPC와 DCF를 혼합하여 제안된 구조(-●- 와 -○-)에서 $x=2$ 일 때가 가장 최적의 성능을 가지고, SMF와 NZ-DSF의 두 광섬유 모두에 대해서 500 km 이상의 전송일 때 제안된 보상구조가 가장 좋은 성능을 얻음을 확인할 수 있다.

V. 결론

40Gb/s 이상의 고속의 광전송에서 단일채널의 신호전력을 점차 높여가고 있는데, 이를 위해서는 비선형 현상에 대한 제어가 필수적이다. 특히, in-line 광증폭기를 사용하여 전송거리를 증가시키는 경우에 신호와 잡음의 상호간섭으로 인한 MI 현상이 우세한 성능제한 요소가 된다.

본 논문에서는 이와 같은 MI 현상에 의한 성능 제한이 DCF의 적절한 길이를 통해 해소될 수 있음을 이론적으로 분석하고, 이를 토대로 MI를 보상할 수 있는 보상구조를 제안하였다. 제안된 구조는

OPC와 DCF를 혼합한 것으로써, MI를 보상하기 위해서 최소의 유효지연시간을 가지는 DCF의 길이를 사용하였고, 보상되지 않고 남은 GVD를 보상하기 위해서 OPC를 사용하였다.

제안된 구조에 대한 시뮬레이션을 통해 500 km 전송거리를 갖는 SMF의 광링크에서 20 km의 DCF와 OPC를 사용할 때 10 Gb/s에서는 23 dB, 40 Gb/s에서는 14.6 dB의 Q값을 얻을 수 있었는데, 이 값들은 기존의 보상구조들에 비해서 개선된 결과를 보이는 것이다. 또한 SMF 대신에 NZ-DSF를 전송용 광섬유로 이용할 때 MI 보상성능이 더 좋아짐을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 2nd ed, Academic Press, 1995.
- [2] G. Hui, M. O. Sullivan, A. Robinson, and M. Taylor, "Modulation Instability and Its Impact in Multispan Optical Amplified IMDD Systems : Theory and Experiments," *J. Lightwave Technol.*, Vol.15, No.7, pp.1071-1082, 1997.
- [3] N. Henmi, Y. Aoki, T. Ogata, T. Saito, and S. Nakaya, "A New Design Arrangement of Transmission Fiber Dispersion for Suppressing Nonlinear Degradation in Long-Distance Optical Transmission Systems with Optical Repeater Amplifiers," *J. Lightwave Technol.*, Vol.11, No.11, pp.1615-1621, 1993.
- [4] R. A. Saunders, B. L. Patel, and D. Garthe, "System Penalty at 10Gb/s Due to Modulation Instability and Its Reduction Using Dispersion Compensation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.9, No.5, pp.699-701, 1997.
- [5] E. Ciaramella and M. Tamburrini, "Modulation Instability in Long Amplified Links with Strong Dispersion Compensation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.11, No.12, pp.1608- 1610, 1999.
- [6] R. T. R. de Almeida, M. Freitas, and M. R. N. Ribeiro, "Modulational Instability in Multi- amplified Optical Systems with Dispersion Compensation," *SBMO/IEEE MTT-S IMOC99 Proceeding*, p.350, 1999.

- [7] R. J. Nuyts, Y. Park and P. Gallion, "Dispersion Equalization of a 10Gb/s Repeated Transmission System Using Dispersion Compensating Fibers," *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol.15, No.1, pp.31-42, 1997.
- [8] 김용범, 이용원, 이명문, 유진태, 박진우, "전파 매개변수 매핑을 통한 광 증폭 전송시스템의 시뮬레이션," *한국통신학회 논문지*, Vol.26, No.7B, pp.884-890, 2001.

<주관심분야> 광통신망 설계, 광통신망 관리

유진태(Jin-Tae Yu)

정회원



1996년 2월 : 고려대학교 전자공학과 학사
 1998년 2월 : 고려대학교 전자공학과 석사
 2003년 2월 : 고려대학교 전자공학과 박사

이용원(Yong-Won Lee)

정회원



1997년 2월 : 고려대학교 전자공학과 학사
 1999년 8월 : 고려대학교 전자공학과 석사
 1999년 9월 ~ 현재 : 고려대학교 전자공학과 박사과정

<주관심분야> 광전송시스템, 광/무선 통신망 설계

박진우(Jin-Woo Park)

정회원



1979년 3월 : 고려대학교 전자공학과, 학사
 1983년 8월 : 클렘슨대학교 전기공학과, 석사
 1987년 11월 : 버지니아 주립대학교, 박사
 1988년 3월~1989년 2월 : 명지대학교 전자공학과 교수
 1989년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 전자컴퓨터공학과 교수

<주관심분야> 광전송, 광통신망, 비선형 분산보상

김용범(Yong-Bum Kim)

정회원



1985년 2월 : 고려대학교 전자공학과 학사
 1987년 2월 : 서울대학교 전자공학과 석사
 2001년 8월 : 고려대학교 통신시스템기술학과 박사

1987년~현재 : KT(구 한국통신) 선임연구원

<주관심분야> 광전송시스템, 광교환시스템, 광통신망

<주관심분야> 초고속 광전송시스템, 광섬유분산보상, 광통신망, 초고속 무선접속망

이명문(Myungmoon Lee)

정회원



1991년 2월 : 고려대학교 전자공학과 학사
 1993년 2월 : 고려대학교 전자공학과 석사
 2002년 2월 : 고려대학교 전자공학과 박사

1993년 2월~1996년 10월 : LG 전자 멀티미디어 연구소 주임연구원
 2003년 3월 ~ 현재 : 수원과학대 정보통신과 전임강사