

## 이득과 분산을 조절한 광섬유의 변조 불안정성 분석

최병훈 · 김상인<sup>†</sup>

아주대학교 전자공학부

Ⓣ 443-749 경기도 수원시 영동구 원천동 산 5번지

(2006년 2월 10일 받음, 2007년 4월 17일 수정본 받음)

본 논문에서는 주기적으로 분산 값의 부호가 바뀌는(dispersion managed: DM) 선로에서 급작스런 분산 변화로 인한 scattering을 완화시키도록 이득을 공간적으로 변조(gain management: GM)하는 시스템을 제안하고 이에 대한 modulation instability(MI) 변화에 대한 이론적인 분석과 수치해석적인 분석을 보고한다. 연구결과 어떤 경우에도 GM을 가한 시스템이 DM만을 한 시스템 보다 MI 이득의 크기와 cutoff frequency, side band peak 모두가 작아짐을 확인하였다. 동일한 광신호 세기에 대해서 MI 이득이 작아지는 것은 four wave mixing 등 광섬유의 비선형 현상을 완화시킴으로써 파장분할다중화 전송의 품질 향상에 도움이 될 뿐 아니라, 솔리톤(soliton)을 이용한 전송에 있어서 하나의 펄스에 더 많은 에너지를 갖게 함으로써 신호대 잡음비를 개선할 수 있음을 의미한다. 본 논문에서는 분산과 이득이 동시에 조절된 선로의 효과를 솔리톤 전송 시스템의 개선된 특성을 편광모드분산(polarization mode dispersion: PMD)가 존재하는 선로에서의 펄스 폭 증가를 통하여 살펴본다.

주제어 : Soliton, Dispersion managed soliton, Gain management, Modulation instability, Polarization mode dispersion

### I 서 론

광통신 기술의 발전으로 인해 수 천 km의 전송거리와 40 Gb/s 이상의 전송용량을 갖는 광통신 시스템이 가능한 시대가 도래하였다. 초고속 장거리 전송시대가 다가옴에 따라 이전에는 크게 문제되지 않았던 광섬유의 비선형과 분산 특성들에 의한 문제들이 광통신시스템에 새로운 현상으로 대두되고 있다. 예를 들어, 편광모드분산(polarization mode dispersion: PMD)은 저속, 단거리 통신시에는 크게 고려할 만한 요소가 아니지만, 채널 당 전송속도가 40 Gb/s 이상으로 증가할 때에는 PMD에 의한 전송거리의 제약이 매우 심각할 것으로 예상되고 있다.<sup>[1]</sup> 이 같은 전송속도의 증가로 인해 발생하는 신호의 품질저하 요소들을 해결하기 위해서는 전과는 다른 새로운 전송 포맷이 필요하다. 이에 대한 해결책 중에 하나로 솔리톤(soliton) 시스템이 꾸준히 연구 되고 있다.<sup>[2,3]</sup> 솔리톤이란 광섬유내에서 매질의 비선형특성과 분산특성이 상호 보상적인 작용을 하여 신호가 산란이나 확산없이 펄스 폭을 유지하면서 진행되는 것을 말한다. 솔리톤 시스템은 신호의 시간폭이 짧을수록 파형의 유지가 용이하고 기존 방식보다 중계기 없이 전송거리를 대폭 향상시킬 수 있기 때문에 초고속 장거리 통신망의 대안으로 많은 연구가 이어져 왔다. 또한, 솔리톤의 입자적인 특성은 PMD에도 비교적 강한 것으로 보고 되고 있다.<sup>[4-6]</sup> 하지만, 솔리톤 시스템은 광섬유의 분산과 비선형특성의 상호 작용의 유지를 위해서 입력신호의 파워를 적절히 조절해야 하므로 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio: SNR)를 임의로 늘리기 어렵다. 이를 해결하기

위한 수단으로 선로의 분산 값을 주기적으로 반전시키는(dispersion management: DM) 전송 시스템이 제안되었고, 이러한 경우에도 솔리톤이 형성 될 수 있는데 이를 DM 솔리톤이라 일컫는다.<sup>[7]</sup> DM 솔리톤 시스템은 동일한 평균 분산에 대해 일반적인 솔리톤 광통신보다 더 큰 에너지를 갖게 되므로 timing jitter의 증가와 펄스 폭의 감소 없이도 큰 SNR을 유지할 수 있으므로 전송 품질 개선에 도움이 된다.<sup>[7-9]</sup> 또한, DM 솔리톤은 일반적인 솔리톤에 비하여 PMD에 대한 저항력도 더욱 커지게 됨이 보고 된 바 있다.<sup>[10,11]</sup>

이러한 장점을 가지는 DM 시스템은 많은 장점에도 불구하고 초고속 전송 시스템이 갖는 문제점에 대한 완벽한 해결책이 아니다. 이론적으로 DM 시스템상에서 완벽하게 입자의 특성을 가지면서 진행되는 펄스 모양이 존재하지 않으며, 이론적인 문제를 제외하더라도 실질적인 전송에 있어서 분산 값의 부호가 바뀌는 부분에서의 scattering이 전송 성능향상에 걸림돌이 된다.

본 논문에서는 DM 시스템이 갖는 문제점들을 개선하기 위한 방법에 하나로 이득의 공간적인 변조(gain management: GM)란 개념을 적용하였다. 본 논문에서는 선로의 분산 값의 공간적인 변화가 이득의 공간적인 변화와 동등함에 착안하여, DM 시스템에서의 급격한 분산 값 변화를 보상하도록 이득을 조절하여 DM 시스템의 성능 향상을 꾀하였다. DM에 GM이 추가된 시스템의 성능 향상을 확인하는 방법으로서 modulation instability(MI) 이득에 대한 이론적인 분석과 수치 해석적인 분석을 수행하였다. MI 이득은 솔리톤 형성 원리에 대한 하나의 해석 방법이며, four-wave mixing(FWM) 등의 선로의 비선형 현상의 영향의 정도를 알 수 있는 척도이다.<sup>[12]</sup> 동일한 광신호 파워에 대해서 MI 이득이 작은 시스

<sup>†</sup> E-mail: sangin@ajou.ac.kr

탐은 솔리톤 전송 시에 단일 펄스당 에너지를 크게 하여 SNR 개선하며, 선형 펄스의 전송에 있어서도 FWM의 감소로 인한 전송 품질이 개선됨은 자명하다. MI 이득의 감소가 coherent 광통신에도 유리함이 이미 보고 된 바 있다.<sup>[13]</sup> 본 논문에서는 DM과 GM이 동시에 이루어지는(DM/GM) 시스템의 장점을 DM/GM 솔리톤 시스템의 PMD 효과 덜 민감해짐을 수치 해석적으로 확인함으로써 검증하였다.

## II 이론적 배경

광섬유에서 광신호의 전송을 기술하는 nonlinear Schrödinger equation에 따르면 분산 값의 공간 변화는 이득/손실의 공간 변화와 등가인데, 이는  $\Gamma(z) = -0.5D_z/D$ (여기서  $D(z)$ 는 dispersion함수,  $D_z = dD/dz$ ,  $\Gamma(z)$ 는 gain함수를 나타낸다.) 관계로 기술 된다.<sup>[12]</sup> 따라서, 분산 값의 변화가 있는 지점에서 이를 상쇄하도록 이득/손실을 가해 준다면 분산 값의 불연속으로 인한 효과를 최소화 할 수 있을 것이다. 따라서, 본 연구에서는 주기적인 반전을 가지는 분산 맵에 대하여  $\Gamma(z) = 0.5D_z/D$ 의 gain map을 추가로 가한 DM/GM 시스템의 특성을 분석하였다.

이와 같은 이론적인 배경을 바탕으로 DM/GM 시스템의 modulation instability(MI)를 분석하였다. DM 시스템의 MI는 이미 연구 된 바 있는데<sup>[14]</sup>, 본 논문에서는 참고 문헌에 제시된 방법론을 적용하였다. DM/GM 시스템의 MI 이득을 계산하기 위하여 일반화 된 Nonlinear Schrödinger equation은 다음과 같다.

$$i \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{2} [\ddot{\beta}_{av} + \ddot{\beta}_g(z)] \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - \gamma |U|^2 U + i\Gamma(z)U \quad (1)$$

여기서  $\ddot{\beta}_{av}$ 와  $\ddot{\beta}(z)$ 는 group-velocity dispersion을 나타내는데, 각각 평균값과 주기적으로 변화하는 값을 나타낸다.  $\gamma$ 는 비선형 계수이고,  $\Gamma(z)$ 는 gain management함수를 나타낸다. 계산을 간단히 하기 위해 fiber의 손실은 없다고 가정하였다. 먼저  $U = u(z, t) \exp(\int_0^z \Gamma(z') dz')$ 로 치환하여 (1)식에 대입한다.

$$i \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{2} [\ddot{\beta}_{av} + \ddot{\beta}_g(z)] \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \gamma \left( \exp \left[ 2 \int_0^z \Gamma(z') dz' \right] \right) |u|^2 u \quad (2)$$

stability를 알아보기 위해 (2)식의 steady solution에 small fluctuation을 더한  $u(z, t) = (\sqrt{P_0} + a) \exp(i\gamma P_0 \int (\exp[2 \int_0^z \Gamma(z') dz']) dz)$ 를 대입하여 정리한다. 이때 ansatz  $a$ 는  $a(z, t) = [a(z, \Omega) \exp(i\Omega t) + a(z, -\Omega) \exp(-i\Omega t)]/2$ 이다.

$$i \frac{da(z, \Omega)}{dz} = -\frac{1}{2} [\ddot{\beta}_{av} + \ddot{\beta}_g(z)] \Omega^2 a(z, \Omega) - (\gamma P_0 \exp[2 \int_0^z \Gamma(z') dz']) [a(z, \Omega) + a^*(z, -\Omega)] \quad (3)$$

DM에서의 MI계산과 마찬가지로  $a(z, \Omega) = b(z, \Omega) \exp[-\frac{1}{2} i\Omega^2 \int_0^z \ddot{\beta}_g(z') dz']$ 로 치환하여 식 (3)을 정리한다.

$$i \frac{db(z, \Omega)}{dz} = -\frac{1}{2} \ddot{\beta}_{av} \Omega^2 b(z, \Omega) - \gamma P_0 \exp[2 \int_0^z \Gamma(z') dz'] [b(z, \Omega) + b^*(z, -\Omega) \exp[i\Omega^2 \int_0^z \ddot{\beta}_g(z') dz']] \quad (4)$$

여기까지의 과정은 DM 시스템의 해석과 크게 다르지 않다. 이제 GM을 적용하기 위하여 앞서 언급한 바와 같이 다음의 분산과 이득의 관계식을 고려한다.

$$\Gamma(z) = \frac{1}{2} \frac{(\partial \ddot{\beta} / \partial z)}{\ddot{\beta}} = \frac{1}{2} \frac{\partial \ln \ddot{\beta}}{\partial z} \quad (5)$$

이제 (5)의 관계를 이용하여 gain function  $\exp[2 \int_0^z \Gamma(z') dz']$ 을 정리하면 다음과 같다.

$$\exp[2 \int_0^z \Gamma(z') dz'] = \exp[2 \int_0^z \frac{1}{2} \frac{\partial \ln \ddot{\beta}}{\partial z} dz] = \exp(\ln \ddot{\beta}(z) - \ln \ddot{\beta}(0)) = \frac{\exp(\ln \ddot{\beta}(z))}{\exp(\ln \ddot{\beta}(0))} = \frac{\ddot{\beta}(z)}{\ddot{\beta}(0)} \quad (6)$$

간단히 정리된 식(6)의 gain function을 대입한다. 이때 dispersion은 거리에 따라 주기적인 함수형태를 이루기 때문에 Fourier series로 변환이 가능하다. 이 같은 성질을 적용한  $g(z, \Omega) = b(z, \Omega) \exp\left(\frac{ink_p z}{2}\right)$ 로 치환하여 식 (4)를 변환한다.

$$i \frac{dg(z, \Omega)}{dz} = -\left(\frac{nk_p}{2} + \frac{1}{2} \ddot{\beta}_{av} \Omega^2\right) g(z, \Omega) + \gamma P_0 d(z) g(z, \Omega) - \gamma P_0 c(z) \exp(ink_p z) g^*(z, -\Omega) \quad (7)$$

$$d(z) = \frac{\ddot{\beta}(z)}{\ddot{\beta}(0)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_n \exp(-jk_p n z)$$

$$c(z) = \frac{\ddot{\beta}(z)}{\ddot{\beta}(0)} \exp[i\Omega^2 \int_0^z \ddot{\beta}(z') dz'] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \exp(-jk_p n z)$$

gain function은 dispersion function과 같은 주기를 갖기 때문에 이 역시 Fourier series 변환 가능하다.<sup>[13]</sup> 이러한 이유로 함수  $c(z)$ 와  $d(z)$ 는 위와 같이 표현가능하며 같은  $k_p$ 값을 갖게 된다.  $c(z)$ 와  $d(z)$ 를 Fourier series로 표현하여 (7)식을 정리하면 아래 식(8)과 같은 형태를 갖게 된다.

$$i \frac{dg(z, \Omega)}{dz} = - \left( \frac{1}{2} \ddot{\beta}_{av} \Omega^2 + \frac{nk_p}{2} + \gamma P_0 D_0 \right) g(z, \Omega) - \gamma P_0 C_n g^*(z, -\Omega) \quad (8)$$

이제 MI를 계산하기위해 group-velocity dispersion이 코사인형태로 변하는 특수한 경우를 가정하였다. Fundamental MI gain spectrum을 보기위해서  $p=0$ 이라 하였다. 계산 과정은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \text{if) } \ddot{\beta}(z) &= \beta_{av} + \beta_p \cos(k_p z) \quad , \quad n=0 \\ d(z) &= \frac{\ddot{\beta}(z)}{\ddot{\beta}(0)} = \frac{\beta_{av} + \beta_p \cos(k_p z)}{\beta_{av} + \beta_p} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_n \exp(-jk_p n z) \\ D_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d(z) dz = \frac{\beta_{av}}{\beta_{av} + \beta_p} \\ c(z) &= \frac{\ddot{\beta}(z)}{\ddot{\beta}(0)} \exp[i\Omega^2 \int_0^z \ddot{\beta}(z') dz'] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \exp(-jk_p n z) \\ \exp \left[ i\Omega^2 \int_0^z \ddot{\beta}(z') dz' \right] &= \exp \left[ \frac{i\Omega^2 \beta_p}{k_p} \sin(k_p z) \right] \\ &= \cos \left( \frac{\Omega^2 \beta_p}{k_p} \sin(k_p z) \right) + i \sin \left( \frac{\Omega^2 \beta_p}{k_p} \sin(k_p z) \right) \\ \left( \begin{aligned} \cos(x \sin \theta) &= J_0(x) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(x) \cos(2n\theta) \\ \sin(x \sin \theta) &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(x) \sin[(2n-1)\theta] \end{aligned} \right) \\ &= J_0 \left( \frac{\Omega^2 \beta_p}{k_p} \right) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m} \left( \frac{\Omega^2 \beta_p}{k_p} \right) \cos(2mk_p z) \\ &\quad + 2i \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m+1} \left( \frac{\Omega^2 \beta_p}{k_p} \right) \sin[(2m+1)k_p z] \\ c(z) &= \frac{\beta_{av} + \beta_p \cos(k_p z)}{\beta_{av} + \beta_p} \left\{ J_0 \left( \frac{\Omega^2 \beta_p}{k_p} \right) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m} \left( \frac{\Omega^2 \beta_p}{k_p} \right) \cos(2mk_p z) \right. \\ &\quad \left. + 2i \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m+1} \left( \frac{\Omega^2 \beta_p}{k_p} \right) \sin[(2m+1)k_p z] \right\} \\ &= \frac{\beta_{av}}{\beta_{av} + \beta_p} \left\{ J_0 \left( \frac{\Omega^2 \beta_p}{k_p} \right) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m} \left( \frac{\Omega^2 \beta_p}{k_p} \right) \cos(2mk_p z) \right. \\ &\quad \left. + 2i \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m+1} \left( \frac{\Omega^2 \beta_p}{k_p} \right) \sin[(2m+1)k_p z] \right\} \\ &\quad + \frac{\beta_p \cos(k_p z)}{\beta_{av} + \beta_p} \left\{ J_0 \left( \frac{\Omega^2 \beta_p}{k_p} \right) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m} \left( \frac{\Omega^2 \beta_p}{k_p} \right) \cos(2mk_p z) \right. \\ &\quad \left. + 2i \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m+1} \left( \frac{\Omega^2 \beta_p}{k_p} \right) \sin[(2m+1)k_p z] \right\} \\ C_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} c(z) dz = \frac{\beta_{av}}{\beta_{av} + \beta_p} J_0 \left( \frac{\Omega^2 \beta_p}{k_p} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i \frac{dg(z, \Omega)}{dz} &= - \left( \frac{1}{2} \ddot{\beta}_{av} \Omega^2 + \gamma P_0 \frac{\beta_{av}}{\beta_{av} + \beta_p} \right) g(z, \Omega) \\ &\quad - \gamma P_0 \frac{\beta_{av}}{\beta_{av} + \beta_p} J_0 \left( \frac{\Omega^2 \beta_p}{k_p} \right) g^*(z, -\Omega) \end{aligned} \quad (9)$$

$J_m$ 은 Bessel functions of the first을 나타낸다. 식(10)으로부터 weak perturbation의 phase velocity  $K$ 를 구하면 다음과 같다.  $K$ 값은 복소수 값을 갖게 되는데  $K$ 의 imaginary값의 2배가 바로 DM/GM의 modulation instability이다.

$$\begin{aligned} -K^2 &= -\ddot{\beta}_{av} \Omega^2 \left( \gamma P_0 \frac{\ddot{\beta}_{av}}{\beta_{av} + \beta_p} + \frac{\ddot{\beta}_{av} \Omega^2}{4} \right) \\ &\quad + \gamma^2 P_0^2 \left( \frac{\ddot{\beta}_{av}}{\beta_{av} + \beta_p} \right)^2 \left[ J_0 \left( \frac{\ddot{\beta}_{av} \Omega^2}{k_p} \right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)은 DM의 MI와 매우 비슷한 형태이다. 차이점은 GM에 의해  $\ddot{\beta}_{av}/(\beta_{av} + \beta_p)$ 항이 추가 되었다. 이 추가된 항으로 인해 DM/GM의 MI는 전과는 다른 특성을 보일 것이다. 다음절에서는 GM에 의해 달라진 DM/GM의 MI gain을 컴퓨터 모의실험 하였다.

### III. 전송 시뮬레이션 결과

이제 우리가 제시한 gain management의 영향을 분석하기 위하여 MI를 계산해 보았다. 이때 dispersion map은 200 km의 주기를 갖고 100 km마다 dispersion 값이 변화하는 형태이다. 모든 경우에 평균 dispersion 값은  $-1 \text{ ps}^2 / \text{km}$ 이며, 비선형  $\gamma$ 는  $2.65 \text{ radW}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 였다. 1 mW의 CW와 아주 작은 크기와 파장을 갖는 신호를 초기신호로 정하였다. DM의 MI와의 비교를 위해 같은 조건으로 dispersion의 값을 변화시켰다. 표 1은 5가지의 dispersion 값을 나타낸다. A의 경우 dispersion값이 일정한 fundamental 솔리톤을 나타내며 다른 여러 경우의 비교기준이다. DM 솔리톤 시스템에서는 map strength라는 것으로 시스템의 특성을 구분 할 수 있다. Map strength란 두 개의 dispersion값의 차의 절대값을 광신호의 full width half maximum값으로 나눈 것으로 정의된다. 아래 표는 A에서 E로 갈수록 map strength가 커진다.

그림 1은 수학적으로 계산한 이론적인 식으로 DM의 MI와 DM/GM의 MI gain값을 계산한 결과이다. DM의 경우는 DM

표 1. 시뮬레이션에 사용되는 다섯 가지 dispersion map

| Dispersion<br>(ps <sup>2</sup> /km) | A    | B    | C    | D    | E     |
|-------------------------------------|------|------|------|------|-------|
| $\ddot{\beta}_1$                    | -1.0 | -2.0 | -4.0 | -8.0 | -16.0 |
| $\ddot{\beta}_2$                    | -1.0 | 0.0  | +2.0 | +6.0 | +14.0 |

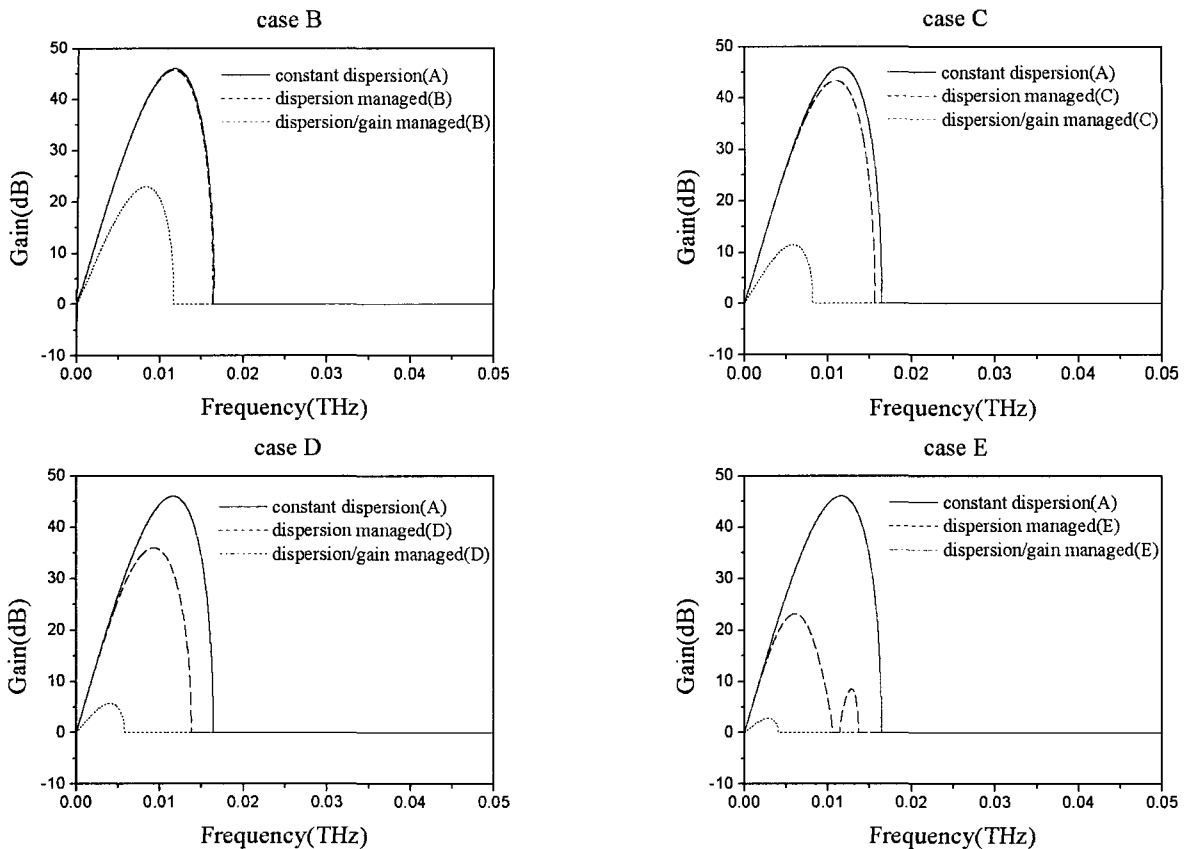


그림 1. 이론적으로 계산한 DM MI gain과 GM MI gain. 좌측 위 case B, 우측 위 case C, 좌측 아래 case D, 좌측 아래 case E. 모든 경우에 solid line은 constant dispersion(fundamental), dash line은 dispersion managed(DM), dot line은 dispersion/gain managed(DM/GM).

의 MI gain 연구논문의 식을 사용하였고<sup>[14]</sup> GM의 경우는 앞에서 계산한 식 (10)을 사용하였다. 먼저 모든 경우에 DM의 MI가 fundamental 솔리톤의 MI보다 작아짐을 볼 수 있다. Map strength가 커질수록 그 감소량도 커지는데 이것은 이전의 연구결과와 같다.<sup>[14]</sup> 이제 GM의 영향을 보면 각각의 경우마다 GM이 추가되면 MI gain이 fundamental은 물론이고 DM만의 MI gain보다도 더 작아짐을 확인할 수 있다. DM에서의 MI와 같은 방식으로 해석해보면 DM/GM이 DM보다 더 많은 에너지를 보낼 수 가능성을 유추해 볼 수 있다. 그림에서 B에서 D로 갈수록 즉, map strength가 증가할수록 gain management의 효과가 줄어드는데 이것은 map strength가 증가할수록 gain보다는 map strength의 영향이 더 커지기 때문이다.<sup>[14]</sup>

DM 솔리톤의 MI는 fundamental 솔리톤의 MI보다 peak gain, cutoff frequency, side bands effect 등이 작다. DM 솔리톤의 에너지증가는 이러한 MI의 차이와 밀접한 관계가 있다.

즉, energy enhancement에 의해 갖는 DM 솔리톤의 많은 장점들을 MI의 변화로부터 유추해 볼 수 있다. 이러한 MI의 차이가 DM 솔리톤과 DM/GM 솔리톤 사이에도 발견되기 때문에 DM/GM 솔리톤의 에너지증가 및 그에 따른 신호전송 특성의 향상을 유추해 볼 수 있다.

실제 fiber를 이용한 광통신시스템상에서 GM의 의한 MI의 변화를 확인하기 위해서 전송 전산모사를 실행하였다. 광신호의 진행은 split-step Fourier method(SSFM)를 이용해서 non-linear Schrödinger equation를 계산함으로써 구현하였다. 식 (10)은 코싸인형태의 dispersion과 그에 상응하는 연속적인 형태의 gain/loss에 의해 계산된 결과이다. 하지만 실제 광통신에서 dispersion은 discrete한 값을 갖게 되며 이에 따른 gain/loss는 무한대 값을 갖게 된다. 무한히 큰 값으로 발산하는 gain/loss는 구현할 수 없기 때문에 lumped된 gain/loss로 이를 대체 하였다. 사용된 gain/loss값은 각각의 map strength에서 MI값을 최소화 시키는 값으로 approximated gain 함수로부터 구하였다. 이때 approximated gain 함수는 실제 discrete한 dispersion과 근접한 approximated dispersion함수를 구한 후  $\Gamma(z) = 0.5 / D(z) * (dD / dz)$  관계로부터 얻었다. 그림 2는 이러한 관계를 나타낸 그림이고 effective gain이고 그림 3은 이를 바탕으로 전송 전산모사에서 사용한 discrete dispersion과 gain map이다.

그림 4는 SSFM을 사용하여 2000 km 전송 후에 DM/GM의 MI gain을 수치해석적으로 계산한 것이다. Case B는 DM의 MI가 fundamental soliton과 거의 차이가 없고, 오히려 side band peak이 크게 발생한다. GM을 가하면 MI gain값이

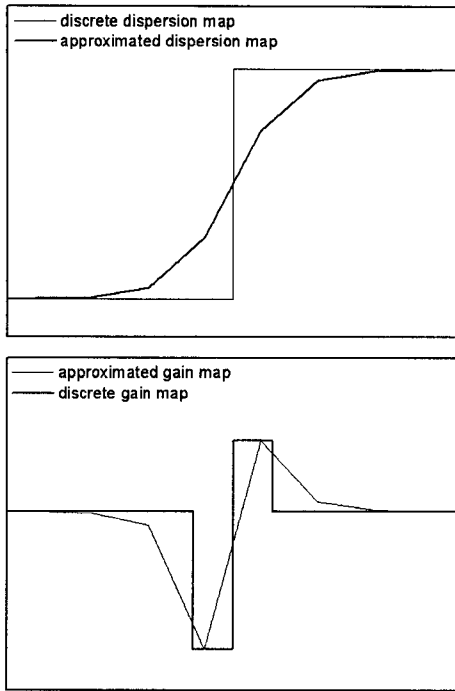


그림 2. 대략적으로 계산된 map과 실제 시뮬레이션에 이용된 discrete과의 관계.

작아지는 것은 물론이고 side band값이 사라진다. Case C는 DM의 효과가 보이기 시작하는데, 그림에서 보듯이 DM/GM의 의한 효과가 더 크다. Case D에서는 좀 더 뚜렷한 DM과 DM/GM의 효과를 볼 수 있다. Case E는 DM과 DM/GM의 MI peak값은 거의 비슷하지만 DM에서 보이는 peak이 DM/GM에서는 보이지 않는다. 전체적으로 fundamental, DM, DM/

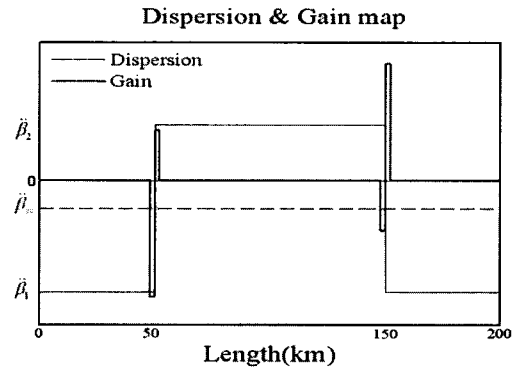


그림 3. discrete한 dispersion & gain map. 가는 solid line은 dispersion, 굵은 solid line은 gain, dot line은 averaged dispersion(gain map의 값은  $\text{km}^{-1}$ 의 단위로 그려졌음).

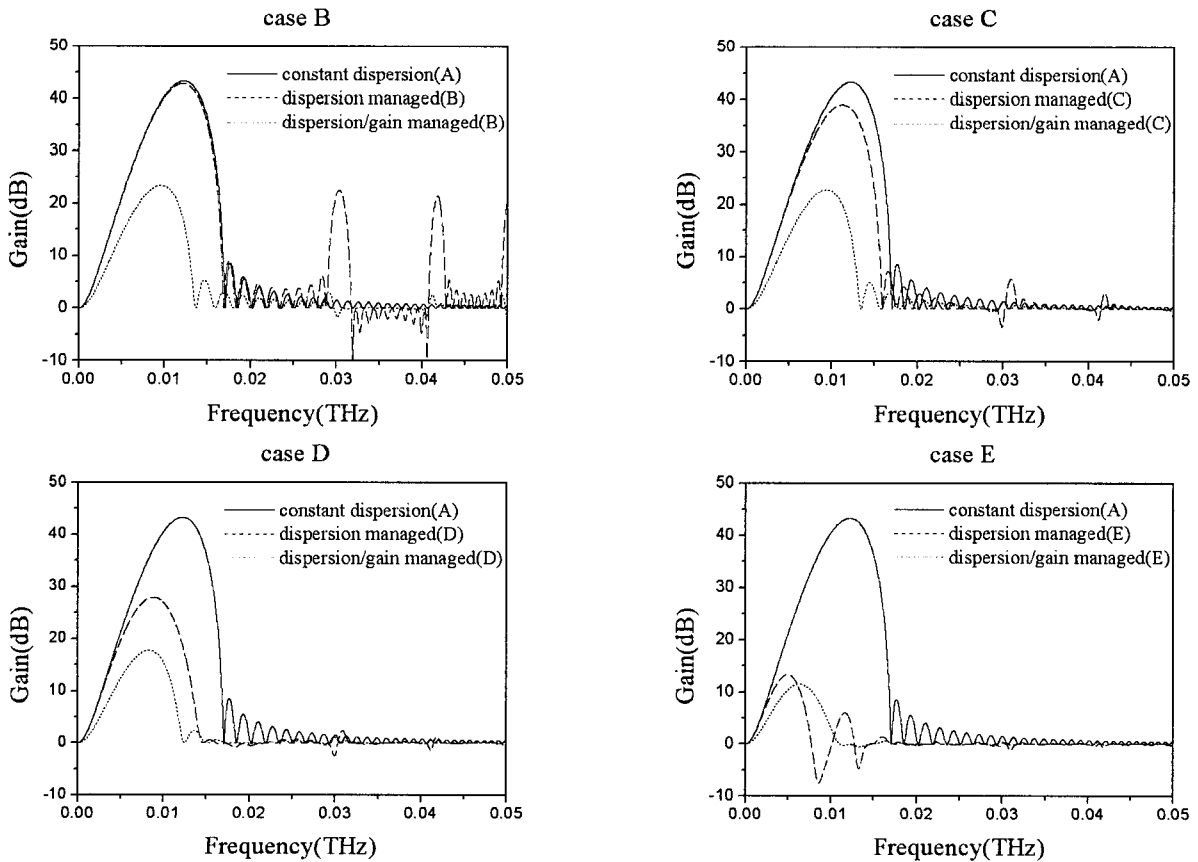


그림 4. 3000 km 전송후의 DM MI gain & DM/GM MI gain. 좌측 위 case B, 우측 위 case C, 좌측 아래 case D, 우측 아래 case E. solid line은 constant dispersion(fundamental), dash line은 dispersion managed(DM), dot line은 dispersion/gain managed(DM/GM).

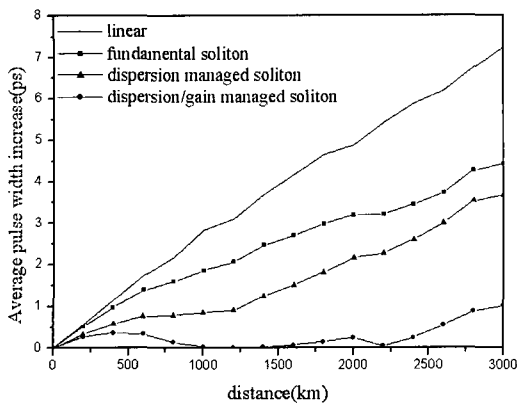


그림 5. PMD가 존재하는 선로에서의 전송 거리에 따른 펄스폭 증가

GM 순으로 MI gain값을 갖게 되는데 이는 그림 1의 이론적인 계산결과와 거의 비슷하다. 이론적인 결과와 경향은 유사하나 다소의 차이가 있는 이유는 앞서 언급한 바와 같이 식 (10)의 유도 과정에서는 계산의 편의를 위해서 cosine 함수 형태의 dispersion map을 고려했고 전송 시뮬레이션에서는 그림 3과 같은 map을 고려한 했기 때문이다. 그러나, 전체적인 경향으로 보건대, 결과적으로 gain management에 의해 MI gain값이 DM만의 값보다 작아짐을 볼 수 있고 DM에 의해 감소되는 side band의 peak도 gain management를 가하면 더 많이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

#### IV. DM/GM 시스템의 PMD 억제 효과

앞서 기술했듯이 MI 이득의 감소는 펄스 에너지 증가 및 신호의 전송특성 향상과 관련이 있다. DM soliton은 fundamental soliton보다 PMD억제 효과가 크며,<sup>[11]</sup> 이는 DM soliton의 증가된 에너지가 신호의 입자적인 성질을 더 강화시켜주기 때문이다. 이와 마찬가지로 GM에 의해 증가되는 에너지는 더욱 soliton의 입자적인 성질을 강화시켜서 DM/GM soliton은 PMD에 더욱더 강해질 것을 기대할 수 있다. 이를 확인하기 위하여 DM/GM soliton 전송 시스템에서 PMD 억제 효과를 분석하였다. 이를 위해 coarse step method를 사용하여 3000 km 전송을 전산모사 하였다.

PMD 계수가  $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  인 선로에 대해서 correlation length는 100 m인 랜덤한 방향의 복굴절 요소의 연결로 선로를 가정하고 계산하였다. 전송 신호는 모두 20 ps의 폭을 가지는 Gaussian를 사용하였고 평균 분산은  $-1 \text{ ps}^2/\text{km}$ 이고 map strength는 1인 분산 분포를 적용하였다. DM/GM 시스템의 전송 파워는 MI gain peak를 고려하여 최적의 값을 사용하였다. 그림 5는 여러 가지 전송 시스템에 대한 PMD에 의한 펄스 폭 증가를 계산한 결과이다. 모든 경우에 PMD 환경은 동일하게 적용하였다. 그림에서 보듯이 DM/GM soliton의 펄스 폭 증가가 DM soliton보다 매우 적은 것을 확인할 수 있다.

#### V. 결 론

본 논문에서는 분산 값이 주기적인 부호 반전을 가지도록 분산이 조절된 선로에 적절한 이득 분포를 추가한 선로 시스템의 특성을 MI 이득을 통하여 분석하였다. DM/GM 시스템의 MI 이득은 DM 시스템보다 전체적으로 크기가 작고 side band의 peak도 훨씬 작음을 확인 할 수 있었다. 이러한 MI 이득 특성을 볼 때 DM/GM 시스템은 DM보다도 더 큰 에너지를 가지는 솔리톤을 형성하게 되고 이는 솔리톤의 입자적인 성질을 강화하여 전송 성능을 개선 하게 된다. 이러한 특성은 PMD가 존재하는 선로에서의 펄스폭 증가를 계산함으로써 확인하였다. DM/GM 시스템의 개선된 비선형 특성은 솔리톤을 이용한 전송 이외에도 four-wave mixing을 감소시킴으로써 일반적인 파장분할다중 전송 시스템의 성능 개선도 기대할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 학술진흥재단의 연구 지원(KRF-2004-041-D0045)을 통하여 수행되었다.

#### 참고문헌

- [1] V. Chernyak, M. Chertkov, I. Gabitov, I. Kolokolov, and V. Lebedev, "PMD-Induced Fluctuations of Bit-Error Rate in Optical Fiber Systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 22, pp. 1155-1168, 2004.
- [2] L. F. Mollenauer, J. P. Gordon, and M. N. Islam, "Soliton Propagation in Long Fibers with Periodically Compensated Loss," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 22, pp. 157-173, 1986.
- [3] H. Kubota and M. Nakazawa, "Soliton Transmission Control in Time and Frequency Domains," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, pp. 2189-2197, 1993.
- [4] M. Matsumoto, Y. Akagi, and A. Hasegawa, "Propagation of Solitons in Fibers with Randomly Varying Birefringence : Effects of Soliton Transmission Control," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, pp. 584-589, 1997.
- [5] X. Zhang, M. Karlsson, P. A. Andrekson, and K. Bertilsson, "Soliton Stability in Optical Fibers With Polarization-Mode Dispersion," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, pp. 376-378, 1998.
- [6] C. Xie, M. Karlsson, and P. A. Andrekson, "Soliton Robustness to the Polarization-Mode Dispersion in Optical Fibers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, pp. 801-803, 2000.
- [7] N. J. Smith, N. J. Doran, W. Forysiak, and F. M. Knox, "Soliton Transmission Using Periodic Dispersion Compensation," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, pp. 1808-1822, 1997.

- [8] M. Nakazawa, H. Kubota, A. Sahara, and K. Tamura, "Marked Increase in the Power Margin Through the Use of a Dispersion-Allocated Soliton," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, pp. 1088-1090, 1996.
- [9] J. H. B. Nijhof, N. J. Doran, W. Forysiak, and A. Berntson, "Energy enhancement of dispersion-managed solitons and WDM," *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 481-482, 1998.
- [10] H. Sunnerud, J. Li, C. Xie, and P. A. Andrekson, "Experimental Quantification of Soliton Robustness to Polarization Mode Dispersion in Conventional and Dispersion-Managed Systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 19, pp. 1453-1461, 2001.
- [11] C. Xie, M. Karlsson, P. A. Andrekson, and H. Sunnerud, "Robustness of Dispersion-Managed Solitons to the Polarization-Mode Dispersion in Optical Fibers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, pp. 121-123, 2001.
- [12] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*. New York : Academic Press, 1993.
- [13] D. Anderson and M. Lisak, "Modulational instability of coherent optical-fiber transmission signals," *Opt. Lett.*, vol. 9, pp. 468-470, 1984.
- [14] N. J. Smith and N. J. Doran, "Modulational instabilities in fibers with periodic dispersion management," *Opt. Lett.*, vol. 21, pp. 570-572, 1996.
- [15] P. Kaewplung, T. Angkaew, and K. Kikuchi, "Complete Analysis of Sideband Instability in Chain of Periodic Dispersion-Managed Fiber Link and Its Effect on Higher Order Dispersion-Managed Long-Haul Wavelength-Division Multiplexed Systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 20, pp. 1895-1907, 2002.

## Modulation Instability in Dispersion and Gain Managed Fibers

Byunghoon Choi and Sangin Kim<sup>†</sup>

*School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University*

<sup>†</sup>*E-mail: sangin@ajou.ac.kr*

(Received February 10, 2006, Revised manuscript April 17, 2007)

We investigated analytically and numerically the occurrence of modulation instability in fibers with periodic changes both in dispersion and gain. Previously, it has been known that the modulation instability is suppressed in dispersion managed solitons where dispersion is managed in such a way that the local dispersion alternates between the normal and the anomalous regimes. In this work, we enhanced the advantage of the dispersion management scheme by additionally introducing proper gain/loss profiles in fibers. The gain/loss profile is given by  $\Gamma(z) = 0.5 / D(z) * (dD / dz)$ , where  $D(z)$  represents the dispersion profile. The fundamental gain spectra of the modulation instability in the dispersion and gain managed fibers have been derived analytically and confirmed by numerical calculation. Our investigation reveals that in the dispersion and gain fibers the modulation instabilities are always much more suppressed compared to the case with only dispersion managed. In practical dispersion management schemes, dispersion profiles show discontinuity, and thus, the corresponding gain/loss profiles tend to be finite. In these cases, the gain/loss profiles were approximated by lumped gains/losses of finite values. Our numerical calculations confirm that this approximation also works well.