

FBG를 이용한 광 파이버 분산 보상에 관한 연구

Dispersion Compensation in the Optical Fiber Transmission system using the Fiber Bragg Grating

신희성, 홍성철, 손용환, 이종윤, 이창원, 정진호
호서대학교 전자공학과 광파통신연구실
전화 : 041-540-5663 / 핸드폰 : 016-361-7622

Hee-Sung Shin, Sung-Chul Hong, Yong-Hwan Son, Jong-Yun Lee, Chang-Won Lee,
Jin-Ho Jung
Dept. of Electronics Hoseo University
E-mail : learn2op@hitel.net

Abstract

We propose the cascade FBG(Fiber Bragg Grating)s to compensate the dispersion, discuss the dispersion characteristics of such cascaded FBGs, compare with the single FBG dispersion compensator. For these, we theoretically consider the second- and third-order group-velocity dispersion(GVD) in the single fiber grating using plane wave solution and the coupled mode equation. We also theoretically find the group-velocity dispersion in the cascaded fiber gratings from the results in the single fiber grating and present the optimum design data of the cascaded FBGs dispersion compensator in the N-channel WDM system through the numerical simulation.

I. 서론

최근의 정보화 사회에서는 정보량의 급격한 증가로 인해 보다 빠르고, 보다 많은 양의 정보를 동시에 전송할 수 있는 통신시스템의 필요성이 절실히 요구되고 있다. 기존의 동축 선로를 이용한 통신 시스템은 전송 거리가 짧고 대역폭이 좁은 단점이 있어, 이로 인해 급증하는 통신 수요를 만족시키기에는 기술적인 부족함이 있다. 이를 해결하기 위해 많은 정보를 초고속으로 전송할 수 있는 광파이버 통신 시스템이 대두되었다. 그러나, 광파이버 통신 시스템에서 입력 신호는 광

파이버를 통해 전송될 때, 흡수, 산란, 및 분산이 발생하게 되고, 특히 디지털 통신 시스템에서는 분산이 전송 속도 및 전송거리를 제한하는 주요 원인이 된다[1]. 본 논문은 광통신시스템에서 중요한 제한요소의 하나인 분산보상을 하기 위한 연구로서, 신호가 파이버를 통해 전송될 때 파이버의 길이와 분산계수를 고려하여 이에 따른 분산과 단일 파이버 격자에서 펄스전송에 따른 2차 3차 군속도 분산[2] 그리고 이를 이용하여 두 개의 격자가 종속 접속된 경우에서의 군속도 분산을 고찰함으로써 파이버 격자를 이용한 분산 보상에 대해 연구하고자 한다. 또한, 단일 격자의 경우에서의 분산 및 종속 접속된 격자에서의 분산을 수치해석을 통해 비교 검토하고, 격자 길이에 따른 분산 보상 효과에 대해 고찰하고자 한다.

II. 광 파이버 통신링크에서의 분산

그림 1에서처럼 광파이버 전송시스템에서 가우시안(Gaussian) 펄스가 파이버를 통해 전송될 때, 그 형태는 그대로 유지되지만 펄스폭은 군속도 분산(Group Velocity Dispersion)으로 인해 증가되어 펄스 퍼짐, 즉 분산이 발생하게 된다. 따라서, 그림 1의 광 파이버 전송 시스템에서 펄스폭이 τ_0 인 입력 펄스가 분산계수 β_2^f 인 길이 L_f 의 파이버를 통해 전송된 후의 펄스 폭 τ_f 는 다음 식으로 주어진다.[3]

$$\tau_f = \tau_0 \sqrt{1 + \frac{(L_f \beta_2^f)^2}{\tau_0^4}} \quad (2-1)$$

여기서, 고차 파이버 분산은 2차 파이버 분산에 비해 작으므로 무시하였다. 또한, 전송된 펄스는 칩(chirp)효과로 인해 전송 주파수가 다음 식으로 주어지는 칩 계수 α_f 에 의해 펄스 전반에 걸쳐 선형적으로 변하게 된다[3].

$$\alpha_f = \frac{L_f}{\beta_2' \left[L_f^2 + \left(\frac{\tau_0^2}{\beta_2'} \right)^2 \right]} \quad (2-2)$$

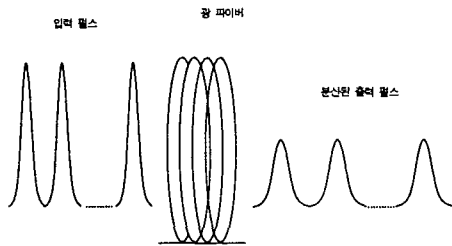


그림 1 광파이버 전송시스템

III. 단일 파이버 격자 : SFG (Single Fiber Grating)

III-1. SFG에서의 분산

SFG에서의 분산 효과를 간소화하기 위하여 격자를 통해 전송 시 발생하는 지연 스펙트럼상의 발진현상이나 반사 스펙트럼의 사이드로브(sidlobes)에서 발생하는 유한 격자 효과 및 격자의 비선형 효과와 고차 분산 효과는 무시하였다. 이러한 조건하에서 브래그(Bragg) 격자를 통해 입력 펄스가 전송될 때, 분산 효과는 다음 식으로 표현되는 주파수 동조 이탈(detuning)계수 (δ) 및 전파 정수 (γ)와 관련이 있게 된다[4, 5].

$$\delta = \frac{n}{c} (\omega - \omega_B) \quad (3-1)$$

$$\gamma = \beta - \beta_B \quad (3-2)$$

여기서, n 은 단일 모드 실리카 파이버의 굴절율, ω 는 캐리어(carrier) 광 주파수, ω_B 는 브래그 공진 주파수, β 는 전파상수이고, β_B 는 브래그 파수(wave number)이다. 따라서, 이 분산식은 모드 결합 방정식에 파동 방정식의 평면파 해를 대입함으로써 다음 식으로 된다[4].

$$\delta^2 = \gamma^2 + x^2 \quad (3-3)$$

여기서, 결합계수 $x = \pi \Delta n \eta / \lambda_B$ 로 주어지며, 굴절율 변화 Δn 과 코어 내에서의 에너지 η 에 의해 정의

된다.

이상의 격자 분산 효과로 인해 2차 및 3차 군속도 분산항 $\beta_2^g(\delta)$ 와 $\beta_3^g(\delta)$ 는 각각 다음 식으로 주어진다[2].

$$\beta_2^g(\delta) = - \left(\frac{n}{c} \right)^2 \frac{x^2}{(\delta^2 - x^2)^{3/2}} \times \text{sign}(\delta) \quad (3-4)$$

$$\beta_3^g(\delta) = 3 \left(\frac{n}{c} \right)^3 \frac{x^2 \delta}{(\delta^2 - x^2)^{5/2}} \quad (3-5)$$

분산으로 퍼진 펄스를 전송 제한된 펄스 폭으로 재압축시키는 이상적인 분산 보상기에서 필터의 분산은 파이버의 분산과 정합되므로 다음 식이 성립한다[2].

$$L_g |\beta_2^g| = L_f |\beta_2^f| \quad (3-6)$$

여기서, β_2^g 는 식 (3-4)로 주어진 격자의 2차 분산이고, β_2^f 는 파이버의 2차 분산이다.

III-2. SFG에서의 펄스 전송

2차 및 3차 분산항을 포함하는 경우, 입력 rms 펄스 폭과 출력 rms 펄스 폭의 비로 정의되는 압축율은 다음 식으로 된다[2, 6, 7].

$$C = \left\{ (1 - \alpha_f \beta_2^g z)^2 + \left(\frac{\beta_2^g z}{\tau_f^2} \right)^2 + \left[1 + (\alpha_f \tau_f^2)^2 \right] \left(\frac{\beta_3^g z}{2 \tau_f^3} \right)^2 \right\}^{-1/2} \quad (3-7)$$

$z = L_g$ 인 경우, 식(2-1), (2-2)와 (3-7)로부터 압축비는 다음 식으로 된다.

$$C = \left\{ (1 - \beta_2^g L_g \alpha_f)^2 + \left(\frac{\beta_2^g L_g}{\tau_f^2} \right)^2 + \left[1 + \left(\frac{\beta_3^g}{2 \beta_2^g \tau_0} \right)^2 \right] \right\} \quad (3-8)$$

여기서, α_f 는 칩 계수로써 (2-2)로 표현된다.

IV. 종속 접속된 파이버 격자 : CFG (Cascaded Fiber Grating)

IV-1. CFG에서의 분산

본 절에서는 분산 보상을 위해 종속 접속된 파이버 격자에 대해 고찰한다. 브래그 주파수 ν_1 , ν_2 를 갖는 두 개의 격자가 종속 접속된 경우, 주파수 분리 $\Delta \nu = |\nu_1 - \nu_2|$ 는 각 격자의 차단 대역폭보다 커

FBG를 이용한 광 파이버 분산 보상에 관한 연구

지게 된다. 따라서, 스펙트럼의 중복이 발생하지 않으므로 격자간의 간섭효과는 무시될 수 있다. 간소화를 위해 두 격자의 결합 계수 χ 가 같다고 가정하면, 두 번째 격자에 대한 분산식은 식(3-3)으로부터 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$(\gamma + \Delta)^2 = (\delta + \Delta)^2 - \chi^2 \quad (4-1)$$

여기서, Δ 는 $2\pi n \Delta \nu / c$ 이다. 따라서, 두 균일 파이버 격자의 차단 대역 사이에 존재하는 군속도 분산 계수 β_2^g 와 3차 분산 계수 β_3^g 는 식(3-4)와 (3-5)로부터 다음 식으로 표현될 수 있다[2, 4].

$$\beta_2^g = - \left(\frac{c}{n} \right)^2 \left[\frac{\chi^2}{[(\delta + \Delta)^2 - \chi^2]^{3/2}} - \frac{\chi^2}{(\delta^2 - \chi^2)^{3/2}} \right] \times \text{sign}(\delta) \quad (4-2)$$

$$\beta_3^g = 3 \left(\frac{c}{n} \right)^3 \left[\frac{\chi^2 (\delta + \Delta)}{[(\delta + \Delta)^2 - \chi^2]^{5/2}} - \frac{\chi^2 \delta}{(\delta^2 - \chi^2)^{5/2}} \right] \quad (4-3)$$

IV-2. CFG를 이용한 WDM 시스템에서의

분산 보상

본 절에서는 앞 절의 해석 결과를 이용하여 그림 3에 나타난 N-채널 WDM 시스템의 분산 보상기를 고찰하고자 한다.

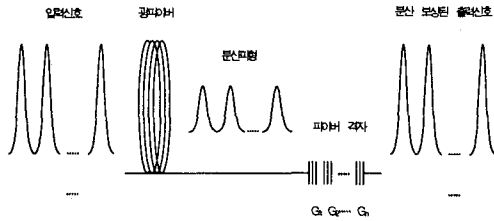


그림 2. 군속도 분산의 동시 보상을 위해 다중으로 종속 접속된 격자를 갖는 WDM 전송시스템 구성도

그림 2의 WDM 통신 시스템에서 rms 폭이 σ_0 로 전송 제한된 가우시안 입력 펄스가 파이버 분산 계수가 β_2^f 인 길이 L_f 의 파이버를 통해 전송될 때, 가우시안 입력 펄스는 II장에서 논의된 대로 펄스의 형태는 그대로 유지되지만 입력 펄스의 rms 폭은 군속도 분산으로 인해 식(2-1)처럼 다음 식과 같이 증가되어 펄스 분산이 일어나게 된다[3].

$$\sigma_1 = \sigma_0 \sqrt{1 + (L_f / L_D)^2} \quad (4-5)$$

여기서, $L_D = 2 \sigma_0^2 / |\beta_2^f|$ 는 분산 길이이다. 또

한, 입력 펄스는 식(2-2)로 주어진 쉘 계수에 의해 선형적으로 쉘이 발생하게 된다.

분산으로 퍼진 펄스를 원래의 입력 펄스 폭으로 재압축시키는 이상적인 분산 보상기는 식(3-6)과 같이 다음 식을 만족하여야 한다.

$$\beta_2^g L_g = - \beta_2^f L_f \quad (4-5)$$

여기서, L_g 는 격자 길이, β_2^f 는 파이버의 2차 분산 계수이고, β_2^g 는 식(4-2)로 주어진다.

이상의 결과로부터 그림 2의 두 인접 격자를 이용한 분산 보상기의 최적 동작을 위한 최적 파라미터들은 식(4-4)와 (4-5)로부터 구할 수 있음을 알 수 있다.

분산 보상기의 성능을 나타내는 압축비는 입력/출력 펄스 폭의 비로 정의되며[2, 6, 7], 격자 길이 L_g 만큼 전송된 후 압축비는 rms 펄스 폭의 함으로 표현하면 식(3-7)로부터 다음 식과 같이 2차 및 3차 분산을 포함하는 식으로 주어진다.

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_2} = \frac{\sigma_0}{\sigma_1} \left\{ (1 - \beta_2^g \alpha_f z)^2 + \left(\frac{\beta_2^g z}{2 \sigma_1^2} \right)^2 + [1 + (2 \alpha_f \sigma_1^2)^2] \frac{1}{8} \left(\frac{\beta_3^g z}{2 \sigma_1^3} \right)^2 \right\} \quad (4-6)$$

여기서, σ_0 는 초기 rms 펄스 폭, σ_2 는 재압축된 rms 펄스 폭이고, β_2^g 와 β_3^g 는 각각 식(4-2)와 (4-3)에 나타나 있다.

$z = L_g$ 인 경우, 식(2-2), (4-4)와 (4-6)로부터 압축비는 다음 식으로 구해진다.

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_2} = \frac{\sigma_0}{\sigma_1} \left\{ (1 - \beta_2^g L_g \alpha_f)^2 + \left(\frac{\beta_2^g L_g}{2 \sigma_1^2} \right)^2 + [1 + (2 \alpha_f \sigma_1^2)^2] \frac{1}{8} \left(\frac{\beta_3^g L_g}{2 \sigma_1^3} \right)^2 \right\} \quad (4-7)$$

V. 수치 해석 및 결과 고찰

본 절에서는 그림 2의 WDM 시스템에서 가우시안 입력 펄스가 파이버를 통해 전송될 때 격자를 사용한 경우와 격자를 사용하지 않은 경우에서의 펄스 분산 효과를 시뮬레이션하였다. 특히, 격자를 사용하는 경우 단일 격자와 종속 접속된 격자를 사용한 경우를 비교 검토하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 입력 rms 펄스 폭 $\sigma_0 = 12$ [psec], 파이버 전송거리 $L_f = 100$ [km], 파이버 분산 계수 $\beta_2^f = -20$ [ps²/km], 굴절률 $n = 1.5$, 채널 간격 $\Delta \nu = 100$ [GHz], 격자의 길이 $L_g = 30$ [cm], 결합계수 $\chi = 11.8$ [cm⁻¹]로 하

였으며, 그 결과가 그림 3에 나타나 있다. 그림 3로부터 종속 접속된 경우 입력 펄스와 거의 유사하게 되므로 단일 격자의 경우보다 분산 보상이 월등히 잘 이루어짐을 알 수 있다. 따라서, 종속 접속된 경우 단일 격자를 사용한 시스템보다 전송거리 및 전송 속도를 향상시킬 수 있다.

그림 4는 격자가 종속 접속된 WDM 시스템에서 채널 간격 $\Delta\nu = 100 [GHz]$ 일 때, 격자 길이(L_g)의 변화에 따른 분산 보상 효과를 나타내었으며, 그 결과 $L_g = 24 [cm]$ 에서 입력 펄스와 출력 펄스가 동일해져서 최적 보상이 이루어짐을 알 수 있다. 여기서, 입력 rms 펄스 폭은 $\sigma_0 = 12 [psec]$ 로 하였다.

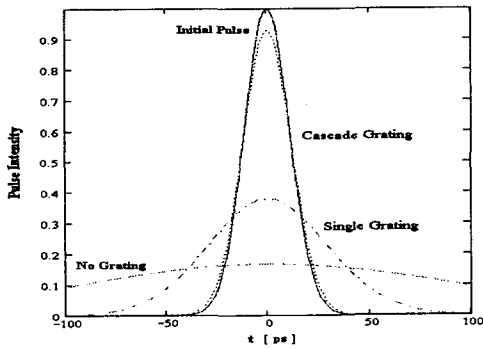


그림 3. 입력, 분산 및 재압축된 펄스 형태

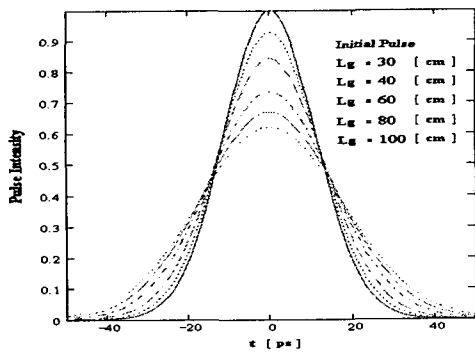


그림 4. 여러 가지 격자 길이에 대한 입력, 분산 및 재압축된 펄스 형태

VI. 결론

본 논문에서는 신호가 파이버를 통해 전송될 때 광파이버의 분산 및 모드 결합 방정식의 평면파 해를 이용하여 단일 파이버 격자에서 펄스 전송에 따른 2차 3차 군속도 분산을 이론적으로 고찰하였으며, 단일 파이버

격자의 해석결과를 이용하여 두 개의 격자가 종속 접속된 경우에서의 군속도 분산을 이론적으로 해석하였다. 또한, WDM 시스템에서 가우시안 입력 펄스가 파이버를 통해 전송될 때 격자를 사용한 경우와 격자를 사용하지 않은 경우에서의 펄스 분산 효과를 시뮬레이션 하였으며, 특히 격자를 사용하는 경우에서 단일 격자와 종속 접속된 격자를 사용한 경우를 비교 검토하였다. 그 결과로부터 종속 접속된 경우가 입력펄스와 거의 유사하게 되므로 단일 격자의 경우보다 분산 보상이 월등히 잘 이루어짐을 알 수 있다. 따라서 종속 접속된 경우가 단일 격자를 사용한 시스템보다 전송거리 및 전송속도를 향상시킬 수 있을 것이다. 또한, 격자길이가 24cm일 때 입력 펄스와 출력 펄스가 동일해져서 최적 보상이 이루어짐을 알 수 있다.

이상의 본 논문 결과 데이터들은 분산 보상이 가능한 종속 접속된 격자를 갖는 광통신 시스템의 최적 설계에 이용될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Pollock, C. R., "Fundamentals of Optoelectronics," Richard D. Irwin, INC., 1995.
- [2] N. M. Litchinitser, B. J. Eggleton, and D. B. Patterson, "Fiber Bragg gratings for dispersion compensation in transmission : Theoretical model and design criteria for nearly ideal pulse recompression," J. of lightwave tech., vol. 15, no. 8, pp. 1303-1313, 1997.
- [3] G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics," New York : Academic, 1995.
- [4] J. E. Sipe, L. Poladian, and C. M. de Sterke, "Propagation through nonuniform Bragg gratings," J. opt. Soc. Amer. A, vol. 11, pp. 1307-1320, 1994.
- [5] H. Kogelnik and C. V. Shank, "Coupled-wave theory of distributed feedback lasers," J. Appl. phys., vol. 43, pp. 2327-2335, 1972.
- [6] D. Marcuse, "Pulse distortion in single-mode fibers, 3 : Chirped pulses," Appl. Opt., vol. 20, pp.3573-3579, 1981.
- [7] S. A. Akhmanov, V. A. Vysloukh, and A. S. Chirkin, "Optics of Femtosecond Laser Pulses," New York : AIP, 1992.
- [8] P. St. J. Russell, "Bloch wave analysis of dispersion and pulse propagation in pure distributed feedback structures," J. Mod. Opt., vol. 38, pp. 1599-1619, 1991.