

색분산이 존재하는 광섬유의 출력단에서의 상대강도 잡음에 관한 해석

正會員 金 富 均*

Analysis of the Relative Intensity Noise at the Output of a Dispersive Fiber

Boo-Gyoun Kim* Regular Member

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관(과제관리번호 : 94-61) 으로 수행되었습니다.

要 約

Wang과 Petermann이 유도한 변환 행렬을 이용하여 광섬유 출력단에서의 상대 강도 잡음을 최소로 하는 광섬유의 색분산에 관한 엄밀한 식을 주파수와 선폭 증가 계수의 함수로써 유도하였다. 이와 같이 유도되어진 엄밀한 식은 완화 공명주파수(Relaxation resonance frequency)에서 선폭 증가 계수가 1보다 상당히 크고 완화 공명주파수가 감쇄율(damping rate)과 비슷한 값을 가질 때 Wang과 Petermann이 유도한 근사식과 같아짐을 확인하였다. 엄밀한 식으로부터 계산된 광섬유의 색분산 값과 근사식으로부터 계산된 색분산 값의 차이는 선폭 증가 계수가 감소할 수록 커짐을 볼 수 있었다. 광섬유의 분산값이 엄밀한 식과 근사식에 의하여 주어지는 각각의 경우와 광섬유의 분산값이 존재하지 않는 세가지 경우에 대하여 상대 강도 잡음을 주파수의 함수로써 계산하였다. 관심이 있는 거의 전 주파수 영역에 걸쳐 엄밀한 식으로 주어지는 경우의 상대 강도 잡음이 가장 작았으며 다음이 근사식으로 주어지는 경우이고 분산이 존재하지 않는 경우가 가장 컸다.

ABSTRACT

We derive a rigorous equation for a fiber dispersion necessary for minimizing the relative intensity noise(RIN) at the fiber output as a function of frequency and linewidth enhancement factor using the transfer matrix. The rigorous equation is the same as the approximate equation already published at the relaxation resonance frequency when the linewidth enhancement factor is much larger than 1, and the relaxation resonance frequency is nearly equal to the damping rate. The difference between the values of a fiber dispersion calculated from the rigorous equation and the approximate one increases as the linewidth enhancement factor decreases. We calculate the RIN at the fiber output as a function of frequency for three dispersion values: zero dispersion, one given by the rigorous equation, and the other given by the approximate equation. The RIN for a fiber dispersion calculated from the rigorous equation is the least, that from the approximate equation is in the middle, and that for a nondispersive fiber is the largest for almost all frequency ranges of interest.

* 숭실대학교 전자공학과
 論文番號 : 95092-0302
 接受日字 : 1995年 3月 2日

1. 서 론

단일모드 광섬유에서 발생하는 분산 효과는 광통신 시스템의 특성을 결정짓는 중요한 요소들 중 하나이다⁽¹⁾. 따라서 단일모드 광섬유에서 발생하는 분산 특성을 조정하기 위하여 많은 연구가 진행되어왔다⁽²⁾. 광섬유 전송로의 출력단에서의 상대 강도 잡음(Relative Intensity Noise)은 광통신 시스템의 특성을 결정짓는 중요한 요소들 중 하나라고 알려져 있다⁽³⁾. 따라서 광섬유 전송로의 출력단에서의 상대 강도 잡음 특성에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔다^(4,5).

광섬유 입력단에서 발생하는 강도 잡음과 위상 잡음은 광섬유의 색분산에 의하여 FM-AM 잡음 변환과 AM-FM 잡음 변환에 의하여 광섬유 수신단에서의 강도 잡음과 위상 잡음으로 나타나게 된다. 따라서 광섬유 전송로의 출력단에서의 상대 강도 잡음은 광섬유 전송로의 송신단에서 발생하는 강도잡음과 위상잡음 뿐만 아니라 광섬유의 색분산에 의해서도 영향을 받는다.

또한 광섬유의 분산에 의하여 발생하는 광통신 시스템의 성능 저하를 막기 위하여 선폭이 매우 좁은 광원을 구현하기 위하여 distributed feedback(DFB) 구조, Coupled cavity 구조, distributed bragg reflector(DBR) 구조를 가진 레이저 다이오드와 같이 선폭(linewidth)이 매우 좁은 광원을 구현하기 위한 연구를 진행하여왔다⁽⁶⁾. 그러나 위와 같은 광 변조시 단일모드로 방사하는 레이저인 경우도 직접 변조시 처핑(Chirping) 현상이 발생하여 광원의 선폭이 넓어지게 된다. 따라서 처핑현상을 최소화하기 위하여 선폭 증가 계수(linewidth enhancement factor)가 작은 레이저 다이오드의 개발을 위하여 많은 연구가 진행되어왔다. Modulation doped strained 다중양자우물구조의 레이저 다이오드의 경우 선폭 증가 계수가 1정도 까지 감소되었다⁽⁷⁾.

Wang과 Petermann⁽⁴⁾은 소신호 해석 가정 아래에서 광섬유 입력단에서의 강도 잡음과 주파수 잡음(혹은 강도변조와 주파수 변조)이 색분산이 있는 광섬유를 따라 전송시 광섬유 출력단에서의 강도 잡음과 주파수 잡음(혹은 강도 변조와 주파수 변조)으로 어떻게 바뀌는가를 나타내는 변환 행렬을 유도하였다. 또한 변환 행렬을 이용하여 광섬유 출력단에서의 상대 강도 잡음에 관한 식을 유도하고 완화 공명주파수에서 상대 강도 잡음이

최소가 되는 광섬유의 색분산에 관한 근사식을 유도하였다.

본 논문에서는 Wang과 Petermann이 유도한 변환 행렬을 이용하여 광섬유 출력단에서의 상대 강도 잡음을 최소로 하는 광섬유의 색분산에 관한 엄밀한 식을 주파수와 선폭 증가 계수의 함수로써 유도하였다. 이와 같이 유도되어진 엄밀한 식은 완화 공명주파수(Relaxation resonance frequency)에서 선폭 증가 계수가 1보다 상당히 크고 완화 공명주파수가 감쇄율(damping rate)과 비슷한 값을 가질 때 Wang과 Petermann이 유도한 근사식과 같아짐을 확인하였다. 엄밀한 식으로부터 계산된 광섬유의 색분산 값과 근사식으로부터 계산된 색분산 값의 차이는 선폭 증가 계수가 감소할 수록 커짐을 볼 수 있었다. 또한 선폭 증가 계수가 일정할 때 광섬유의 색분산 값은 완화 공명 주파수 근방에서 최대값을 가지고 주파수가 더 높아지게 되면 색분산 값의 부호가 바뀔 수 있었다. 선폭 증가 계수가 작아질수록 주파수에 따른 분산값의 변화가 큼을 볼 수 있었다. 따라서 광통신 시스템에 사용되는 신호의 주파수 영역에 따라 광섬유의 분산값이 달라져야 함을 알 수 있었다.

광섬유의 분산값이 엄밀한 식과 근사식에 의하여 가지는 각각의 경우와 광섬유의 분산값이 존재하지 않는 세 가지 경우에 대하여 상대 강도 잡음을 주파수의 함수로써 계산하였다. 거의 전 주파수 영역에 걸쳐 엄밀한 식으로 주어지는 경우의 상대 강도 잡음이 가장 작았으며 다음이 근사식으로 주어지는 경우이고 분산이 존재하지 않는 경우가 가장 컸다. $\alpha=1$ 인 경우 완화 공명 주파수 근방에서 엄밀한 식으로 주어지는 분산값을 가지는 경우가 근사식으로 주어지는 분산값을 가지는 경우보다 상대 강도 잡음이 5 dB 이상 작았고 분산이 존재하지 않는 경우보다는 12dB 이상 작았다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 Wang과 Petermann이 유도한 변환행렬로부터 광섬유의 출력단에서의 상대 강도 잡음을 최소로 하여 주는 광섬유의 분산에 관한 엄밀한 식을 주파수와 선폭 증가 계수의 함수로써 유도한다. 엄밀한 식은 완화 공명 주파수에서 선폭 증가 계수가 1보다 상당히 크고 완화 공명 주파수가 감쇄율과 비슷한 값을 가질때 근사식과 같아짐을 보인다. 3장에서는 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 보이며 4장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 광섬유 출력단에서의 상대 강도 잡음을 최소로 하는 색분산에 관한 엄밀한 식

Wang과 Petermann은 소신호 해석 가정 아래에서 단일 모드 광섬유의 입력단과 출력단에서의 광자수의 변화와 순시 위상과의 관계를 설명하는 변환 행렬을 다음과 같이 유도하였다⁽⁴⁾.

$$\begin{pmatrix} \Delta S_{out}(t) \\ 2\langle S \rangle \\ \phi_{out}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(D \frac{d^2}{dt^2}) & \sin(D \frac{d^2}{dt^2}) \\ -\sin(D \frac{d^2}{dt^2}) & \cos(D \frac{d^2}{dt^2}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta S_{in}(t) \\ 2\langle S \rangle \\ \phi_{in}(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 $\langle S \rangle$ 는 평균 광자수, $\Delta S_{in}(t)$ 와 $\Delta S_{out}(t)$ 는 각각 광섬유의 입력단과 출력단에서의 광자수의 변화를 나타낸다. 또한 $\phi_{in}(t)$ 와 $\phi_{out}(t)$ 는 각각 입력단과 출력단에서의 순시 위상을 나타내며 D는 단일 모드 광섬유의 색분산을 나타내는 파라메타로서 다음과 같이 정의된다.

$$D = \frac{L}{2} \frac{d\tau}{dz} \frac{\lambda^2}{2\pi c} = -\frac{L}{2} \frac{d\tau}{dz} \quad (2)$$

여기서 τ 는 단위 길이당 균지연 시간이고 L은 광섬유 전송선로의 길이를 나타낸다.

위의 변환은 선형 변환이므로 주파수 영역에서 (1)식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} \Delta S_{out}(\Omega) \\ 2\langle S \rangle \\ \phi_{out}(\Omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\Omega^2 D) & \sin(\Omega^2 D) \\ \sin(\Omega^2 D) & \cos(\Omega^2 D) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta S_{in}(\Omega) \\ 2\langle S \rangle \\ \phi_{in}(\Omega) \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서 $\Omega = \omega - \omega_{th}$ 로서 순시 주파수 ω 가 레이저 다이오드에 주입되는 전류가 임계 전류(threshold current)값일때 방출하는 광파의 평균 주파수 ω_{th} 로부터 얼마나 벗어나 있나를 나타낸다. 실제 광통신 시스템에서는 위상 변조나 잡음보다는 주파수 변조나 잡음에 더 큰 관심이 있다. 따라서 입력단과 출력단에서의 순시 위상 대신에 순시 주파수에 대하여 표현하면 (3) 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} \Delta S_{out}(\Omega) \\ \phi_{out}(\Omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\Omega^2 D) & \frac{2j\langle S \rangle \sin(\Omega^2 D)}{\Omega} \\ j\Omega \frac{\sin(\Omega^2 D)}{2\langle S \rangle} & \cos(\Omega^2 D) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta S_{in}(\Omega) \\ \phi_{in}(\Omega) \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서 $\phi_{in}(\Omega)$ 와 $\phi_{out}(\Omega)$ 는 각각 입력단과 출력단에서의 순시주파수를 나타낸다.

레이저 다이오드에서 발생하는 잡음이 자연 방출에 의해서만 발생한다면 광섬유 입력단에서의 광자수의 변화 $\Delta S_{in}(\Omega)$ 와 순시주파수 $\phi_{in}(\Omega)$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$\Delta S_{in}(\Omega) = \frac{1}{\Omega^2} \left(-\frac{1}{\tau_a} + j\Omega \right) H(\Omega) \Delta F_s(\Omega) \quad (5)$$

$$\phi_{in}(\Omega) = -\frac{\alpha}{2\langle S \rangle} H(\Omega) \Delta F_s(\Omega) + \Delta F_\phi(\Omega) \quad (6)$$

여기서 Ω_r 은 레이저 다이오드의 완화 공명 주파수, $\tau_a(1/\tau_a = \Omega_r^2 \tau_{ph} + 1/\tau_e)$ 는 유효 캐리어 수명 시간, τ_{ph} 는 광자의 수명 시간, τ_e 는 캐리어의 수명 시간이고 $\Delta F_s(\Omega)$ 와 $\Delta F_\phi(\Omega)$ 는 각각 Langevin 잡음의 광자수와 위상 변화에 대한 기여 분이다. $H(\Omega)$ 는 레이저 다이오드에 주입되는 전류의 변화와 방출되는 광자수의 변화와의 관계를 나타내는 전달함수(transfer function)로서 다음과 같이 표현된다⁽⁴⁾.

$$H(\Omega) = \frac{\Omega^2}{(j\Omega)^2 + j\Omega\Gamma + \Omega_r^2} \quad (7)$$

여기서 Γ 는 감쇄율을 나타낸다.

이때 $\Delta F_s(\Omega)$ 와 $\Delta F_\phi(\Omega)$ 의 전력 스펙트럼 밀도(Power spectral density)는 다음과 같이 주어진다⁽⁴⁾.

$$\langle |\Delta F_s(\Omega)|^2 \rangle = 2R\langle S \rangle \quad (8)$$

$$\langle |\Delta F_\phi(\Omega)|^2 \rangle = R/2\langle S \rangle \quad (9)$$

$$\langle \Delta F_s(\Omega) \Delta F_\phi^*(\Omega) \rangle = 0 \quad (10)$$

여기서 R은 자연 방출율(spontaneous emission rate)이다.

광섬유 출력단에서의 상대 강도 잡음(RIN)은 아래 식과 같이 정의되어지므로

$$RIN(f)/\Delta f = \frac{2\langle |\Delta S_{out}(\Omega)|^2 \rangle}{\langle S \rangle^2} \quad (11)$$

(6)식과 (7)식을 (4)식에 집어넣고 (8), (9)식과 (10)식을 사용하여 정리하면 상대 강도 잡음은 아래와 같이 표현된다.

$$RIN(f)/\Delta f = \frac{4R}{\langle S \rangle} \left\{ \frac{\sin^2(\Omega^2 D)}{\Omega^2} (\alpha^2 |H(\Omega)|^2 + 1) \right.$$

$$+ \frac{\Omega_r^2 + 1/\tau_a^2}{\Omega_r^4} |H(\Omega)|^2 \cos^2(\Omega^2 D) - \frac{\alpha}{\Omega_r^2} |H(\Omega)|^2 \sin(2\Omega^2 D) \quad (12)$$

식 (12)를 분산 D에 대하여 미분함으로써 상대 강도 잡음을 최소로 해 주는 D 값을 구할 수 있으며 그 결과는 주파수와 선폭 증가계수의 함수로써 다음과 같이 표현된다.

$$D = \frac{1}{2\Omega_r^2} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{2\alpha\Omega_r^2\Omega_r^2}{\Omega_r^2(\Gamma^2 - 2\Omega_r^2 - (1/\tau_a)^2) + \Omega_r^2(\alpha^2 + 1)} \right] \right\} \quad (13)$$

보통 레이저 다이오드에서 상대 강도잡음이 최대가 되는 주파수는 완화 공명 주파수 근처이므로 완화 공명 주파수에서 광섬유의 출력단에서 상대 강도 잡음이 최소화 되는 D값은 위의 식으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$D = \frac{1}{2\Omega_r^2} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{2\alpha\Omega_r^2}{(\alpha^2 - 1)\Omega_r^2 + \{(\Gamma^2 - (1/\tau_a)^2)\}} \right] \right\} \quad (14)$$

임계전류 이상에서 동작하는 레이저 다이오드에서는 $\Omega_r \gg (1/\tau_a)$ 이므로 이 경우 위 식은 다음과 같이 간략화된다.

$$D = \frac{1}{2\Omega_r^2} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{2\alpha\Omega_r^2}{\{(\alpha^2 - 1)\Omega_r^2 + \Gamma^2\}} \right] \right\} \quad (15)$$

$\alpha \gg 1$ 이고 $\Omega_r \approx \Gamma$ 이면 위의 식은 참고문헌 [4]의 식 (41)과 같은 식이 된다.

$$D = \frac{1}{\alpha\Omega_r^2} \quad (16)$$

III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 검토

컴퓨터 시뮬레이션을 수행하기 위하여 사용한 레이저 다이오드의 파라메타 값들을 표 1에 보였다^[9,10].

일반적으로 광섬유의 색분산을 나타내는 파라메타는 식 (2)로써 나타낸 D가 아니라 $L \frac{d\tau}{d\lambda}$ 가 사용되어진다^[2]. 따라서 다음 결과들에 의한 광섬유의 색분산은 $L \frac{d\tau}{d\lambda}$ 로 나타내었으며 파장값은 1.55 μm 를 사용하였다.

그림 1은 광섬유 출력단에서의 상대 강도 잡음을 최소로 하여 주는 광섬유의 분산에 관한 엄밀한 식(13)를 주파수를 100 MHz에서 10 GHz까지 변화시켜 가며 $\alpha = 1$ 인 경우와 $\alpha = 5$ 인 경우에 도시한 결과이다.

$\alpha = 1$ 인 경우와 $\alpha = 5$ 인 경우는 각각 점선과 실선으로 표시하였다. $\alpha = 1$ 인 경우에는 100 MHz에서 분산값이 496 ps/nm이며 주파수가 증가할 수록 분산값은 증가하기 시작하여 5.39 GHz 근방에서 최대 분산

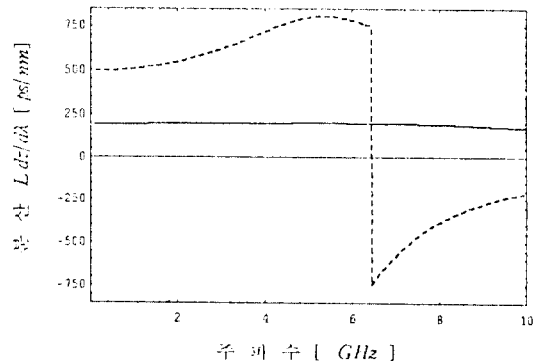


그림 1. $\alpha=1$ 인 경우 (점선) 와 $\alpha=5$ 인 경우 (실선) 에 주파수의 함수로써 엄밀한 식을 이용하여 계산한 상대 강도 잡음을 최소로 하는 광섬유의 분산.

Fig. 1. Fiber dispersion necessary for minimizing the relative intensity noise as a function of frequency using the rigorous equation for $\alpha = 1$ (dashed line) and $\alpha = 5$ (solid line).

표 1. 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하기 위하여 사용한 레이저 다이오드의 파라메타 값들.
Table 1. Parameters of a laser diode used for computer simulations.

파라메타	부호	값
완화 공명 주파수	$\Omega_r/2\pi$	6.33 GHz
감쇄율	Γ	$1.25 \times 10^{10} \text{s}^{-1}$
자연 방출 율	R	$0.53 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$
평균 광자수	$\langle S \rangle$	10^6
유효 캐리어 수명 시간	τ_a	$1.46 \times 10^{-10} \text{s}$

값 806 ps/nm을 가지고 다시 감소하기 시작하여 6.44 GHz 근방에서 분산값의 부호가 바뀌어 6.46 GHz에서 -745 ps/nm의 분산값을 가진다. 주파수가 더 증가하면 분산값은 증가되어 10 GHz에서 -210 ps/nm의 분산값을 가진다.

$\alpha=5$ 인 경우에는 100 MHz에서 분산값이 191 ps/nm이며 5.39 GHz 근방에서 최대 분산값 196 ps/nm를 가지고 주파수가 증가할수록 감소하기 시작하여 10 GHz에서 172 ps/nm의 분산값을 가진다. 엄밀한 식 (13)으로 부터 계산된 분산값의 부호가 바뀌는 주파수는 23.2 GHz이다.

그림 1을 보면 사용하는 주파수 영역에 따라 광섬유 출력단에서의 상대 강도 잡음을 최소로 하여주는 광섬유의 분산값은 달라져야 함을 알 수 있다. 또한 $\alpha=1$ 인 경우가 $\alpha=5$ 인 경우에 비교하여 주파수에 따른 분산값의 변화가 큼을 알 수 있고 분산값의 부호가 바뀌는 주파수가 작음을 알 수 있다. 그 이유는 식 (12)에서 보는 것처럼 광섬유 출력단의 강도 잡음은 광섬유 입력단에서의 위상 잡음이 분산에 의하여 광섬유 출력단에 나타나는 강도 잡음 성분과 분산이 없을 때의 광섬유 출력단에서의 강도 잡음 성분의 합으로 나타나기 때문에 선폭 증가 계수가 작을수록 주파수에 따른 광섬유의 색분산값의 변화가 크다고 생각된다.

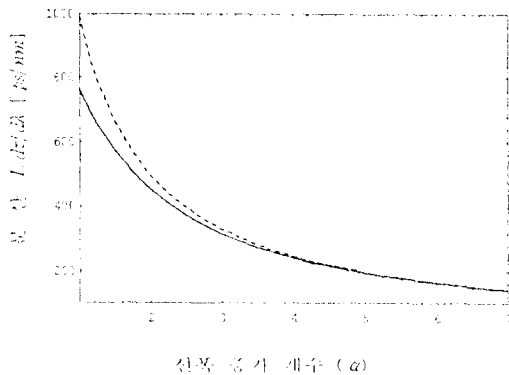


그림 2. 엄밀한 식 (14) (실선) 와 근사식 (16) (점선) 을 사용하여 선폭증가 계수의 함수로써 계산된 광섬유의 분산.
Fig. 2. Fiber dispersion using the rigorous equation (14) (solid line) and the approximate equation (16) (dashed line) as a function of linewidth enhancement factor.

그림 2는 완화 공명 주파수에서 상대 강도 잡음을 최소로 하여 주는 광섬유의 분산에 관한 엄밀한 식 (14)와 근사식 (16)을 α 를 1에서 7까지 변화시키며 도시한 그림이다. 실선은 엄밀한 식에 의한 결과이고 점선은 근사식에 의한 결과이다. α 가 작아질 수록 분산값은 커지며 또한 근사식으로부터 구한 분산값과 엄밀한 식으로부터 구한 분산값의 차이는 증가함을 볼 수 있다. $\alpha = 1$ 인 경우 근사식으로부터 구한 분산값은 엄밀한 식으로부터 구한 분산값의 1.3 배이다. α 가 1보다 작아지게 되면 근사식에 의한 분산값은 계속 증가하나 엄밀한 식의 경우는 $\alpha = 0.965$ 에서 분산값의 부호가 바뀐다.

그림 3과 4는 각각 $\alpha=1$ 인 경우와 5인 경우에 광섬유 출력단에서의 상대 강도 잡음을 주파수를 100 MHz에서 10 GHz까지 변화시켜 가며 광섬유의 분산값이 다음과 같은 3가지 경우에 대하여 도시한 결과이다. 첫 번째 경우(실선)와 두 번째 경우(일점쇄선)는 각각 광섬유의 분산값이 완화 공명 주파수에서 엄밀한 식과 근사식에 의하여 주어진 값을 가지는 경우이며 세 번째 경우(점선)는 광섬유의 분산이 존재하지 않는 경우이다.

그림 3에서 보면 관심이 있는 거의 전 주파수 영역에 걸쳐 상대 강도 잡음은 분산값이 엄밀한 식으로부터 얻은 값을 가지는 경우가 가장 작으며, 그 다음이 근사식으로부터 얻은 값을 가지는 경우이며 광섬유의 분산이

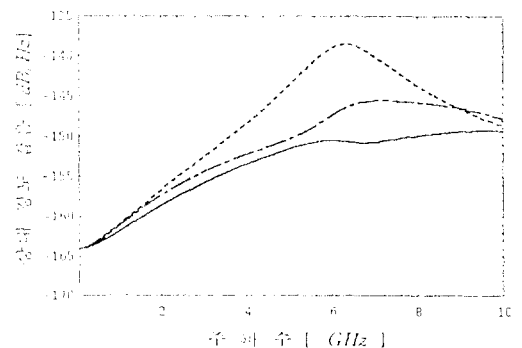


그림 3. $\alpha=1$ 인 경우에 광섬유의 분산값이 엄밀한 식 (14)으로 주어지는 경우(실선), 근사식 (16)으로 주어지는 경우(일점쇄선)와 분산이 존재하지 않는 경우(점선)에 대하여 주파수의 함수로써 계산된 상대 강도 잡음.
Fig. 3. Relative intensity noise as a function of frequency for a fiber dispersion calculated from the rigorous equation (14) (solid line) and the approximate equation (16) (dot-dashed line), and a nondispersive fiber (dashed line) when $\alpha=1$.

존재하지 않는 경우가 가장 큼을 볼 수 있었다. 완화 공명주파수 근방에서 광섬유의 분산값이 엄밀한 식으로부터 얻어지는 경우의 상대 강도 잡음과 존재하지 않는 경우의 상대 강도 잡음의 차이는 12dB 이상이며 근사식으로 부터 얻어지는 경우에서 발생하는 상대 강도 잡음과의 차이는 5dB 이상임을 알 수 있다.

그림 4에서 보면 엄밀한 식으로부터 구한 광섬유의 분산인 경우와 근사식으로부터 구한 광섬유의 분산인 경우에 주파수의 함수로써 계산된 상대 강도 잡음의 차이는 거의 없음을 알 수 있다. 그 이유는 그림 2에서 본 것처럼 $\alpha = 5$ 인 경우에 엄밀한 식과 근사식으로 주어지는 광섬유의 분산값이 거의 같기 때문이다. 엄밀한 식과 근사식으로부터 구한 분산을 가지는 발생하는 광섬유 출력단의 상대 강도 잡음을 광섬유 분산이 없는 경우에 발생하는 출력단의 상대 강도 잡음과 비교하였을 때 완화 공명 주파수 근방에서는 15dB 이상의 차이가 발생한다.

그림 3과 4에서 세 가지 경우의 분산값에 대하여 구한 상대 강도 잡음의 차이가 완화 공명주파수 보다 작은 값을 가지는 주파수 영역과 큰 값을 가지는 주파수 영역에서 작아지는 이유는 광섬유의 분산값을 완화 공명주파수에서 상대 강도 잡음을 최소로 해주는 분산값을 선택했기 때문이라 생각된다.

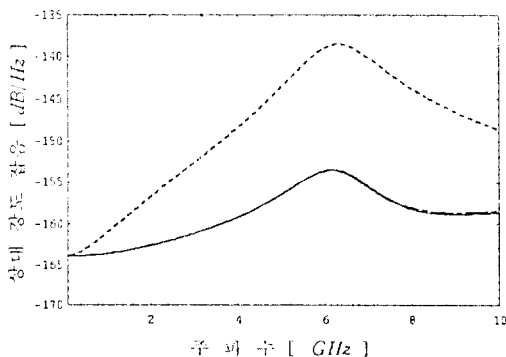


그림 4. $\alpha=5$ 인 경우에 광섬유의 분산값이 엄밀한 식 (14)으로 주어지는 경우(실선), 근사식 (16)으로 주어지는 경우(일점 쇄선)와 분산이 존재하지 않는 경우(점선)에 대하여 주파수의 함수로써 계산된 상대 강도 잡음.

Fig. 4. Relative intensity noise as a function of frequency for a fiber dispersion calculated from the rigorous equation (14) (solid line) and the approximate equation (16) (dot-dashed line), and a nondispersive fiber (dashed line) when $\alpha=5$.

IV. 결 론

본 논문에서는 Wang과 Petermann이 유도한 변환 행렬을 이용하여 광섬유 출력단에서의 상대 강도 잡음을 최소로 하는 광섬유의 색분산에 관한 엄밀한 식을 주파수와 선폭 증가 계수의 함수로써 유도하였다. 이와 같이 유도되어진 엄밀한 식은 완화 공명주파수(Relaxation resonance frequency)에서 선폭 증가 계수가 1보다 상당히 크고 완화 공명주파수가 감쇄율(damping rate)과 비슷한 값을 가질 때 Wang과 Petermann이 유도한 근사식과 같아짐을 확인하였다. 엄밀한 식으로부터 계산된 광섬유의 색분산 값과 근사식으로부터 계산된 색분산 값의 차이는 선폭 증가 계수가 감소할 수록 커짐을 볼 수 있었다. 또한 선폭 증가 계수가 일정할 때 광섬유의 색분산 값은 완화 공명 주파수 근방에서 최대값을 가지고 주파수가 더 높아지게 되면 색분산 값의 부호가 바뀔 수 있었다. 선폭 증가 계수가 작아질수록 주파수에 따른 분산값의 변화가 큼을 볼 수 있었다. 따라서 광통신 시스템에 사용되는 신호의 주파수 영역에 따라 광섬유의 분산값이 달라져야 함을 알 수 있었다.

광섬유의 분산값이 엄밀한 식과 근사식에 의하여 가지는 각각의 경우와 광섬유의 분산값이 존재하지 않는 세 가지 경우에 대하여 상대 강도 잡음을 주파수의 함수로써 계산하였다. 거의 전 주파수 영역에 걸쳐 엄밀한 식으로 주어지는 경우의 상대 강도 잡음이 가장 작았으며 다음이 근사식으로 주어지는 경우이고 분산이 존재하지 않는 경우가 가장 컸다. $\alpha=1$ 인 경우 완화 공명 주파수 근방에서 엄밀한 식으로 주어지는 분산값을 가지는 경우가 근사식으로 주어지는 분산값을 가지는 경우보다 상대 강도 잡음이 5dB 이상 작았고 분산이 존재하지 않는 경우보다는 12dB 이상 작았다.

참고문헌

1. G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, John Wiley&Sons, New York, 1993.
2. L. B. Jeunhomme, Single-Mode Fiber Optics, 2nd ed., Marcel Dekker Inc., New York, 1990.
3. H. B. Killen, Fiber Optic Communications, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1991.
4. J. Wang and K. Petermann, "Small Signal

- Analysis for Dispersive Optical Fiber Communication Systems," IEEE J. Lightwave Technol., Vol. 10, No. 1, pp.96-100, 1992.
5. S. Yamamoto, N. Edagawa, H. Taga, Y. Yoshida, and H. Wakabayashi, "Analysis of laser phase noise to intensity noise conversion by chromatic dispersion in intensity modulation and direct detection optical-fiber transmission," IEEE J. Lightwave Technol., Vol. 8, No. 11, pp.1716-1722, 1990.
 6. G. P. Agrawal and N. K. Dutta. Semiconductor Lasers, 2nd ed., Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.
 7. F. Kano, T. Yamanaka, N. Yamamoto, H. Mawatari, Y. Tohmori, and Y. Yoshikuni, "Linewidth Enhancement Factor in InGaAsP/InP Modulation-Doped Strained Multiple-Quantum-Well Lasers," IEEE J. Quantum Electron., Vol. 30, No. 2, pp.533-546, 1994.
 8. K. Petermann. Laser Diode Modulation and Noise, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991.
 9. S. Mohrdiek, H. Burkhard, and H. Walter, "Chirp Reduction of Directly Modulated Semiconductor Lasers at 10 Gb/s by Strong CW Light Injection," IEEE J. Lightwave Technol., Vol. 12, No. 3, pp.418-424, 1994.
 10. S. F. Yu, R. G. S. Plumb, L. M. Zhang, M. C. Nowell, and J. E. Carroll, "Large-Signal Dynamic Behavior of Distributed-Feedback Lasers Including Lateral Effects," IEEE J. Quantum Electron., Vol. 30, No. 8, pp.1740-1750, 1994.

金 富 均(Boo-Gyoun Kim)

정희원

한국통신학회 논문지 제20권 제2호 참조
현재 : 송실대학교 전자공학과