

광섬유에서 브릴루앙 이득 스펙트럼의 파장과 선폭에 따른 의존성 연구

한영옥, 은재정, 최평석
창원대학교 전자공학과

전화: (055) 279-7520 / 팩스: (055) 281-5070

Analysis of the wavelength and linewidth dependence of Brillouin gain spectrum in optical fiber

Young-ok Han, Jae-jung Eun, Pyung-suk Choi
Electronics Engineering, Changwon University
oky7501@cosmos.changwon.ac.kr

Abstract

Since stimulated Brillouin scattering (SBS) impact wavelength division multiplexing (WDM) optical transmission systems, it is important to understand the implication of SBS in the design of such lightwave systems. Therefore, Brillouin gain spectrum (BGS) is measured to characterize the effect of SBS in optical fiber. The Brillouin gain coefficient is found to vary as the wavelength and linewidth of source. Theoretically measurement of BGS shows a dependence on wavelength(λ) and on linewidth($\Delta\nu$), respectively.

I. 서론

광통신 시스템에서 전송매체인 광섬유는 수십 μm 의 매우 큰 전송 대역폭을 갖는다. 따라서 여러 개의 전송 채널들을 다중화 하여 하나의 광섬유로 전송할 수 있는 다중화 전송기술은 초고속 광대역 전송망의 실현을 위해 매우 중요하다. 파장분할 다중방식(WDM)은 광섬유의 저손실 파장대역을 여러 개의 좁은 채널파장 대역으로 분할하고 각 입력 채널마다 하나의 파장대역을 할당하여 동시에 광을 전송하는 방식이다. 더 좁은 채널간격으로 많은 수의 채널을 다중화 할 수 있

는 방식이 고밀도 파장분할 다중방식(Dense WDM)이며 이는 채널이 밀접한 간격으로 다중화 되므로 각 레이저의 파장은 할당된 대역 내에서 안정되어야 한다. 또한 실제 광시스템에서 발생할 수 있는 비선형 현상 중 하나인 유도 브릴루앙 산란(SBS: Stimulated Brillouin Scattering)은 낮은 입력 파워 레벨에서도 발생할 수 있기 때문에 다른 손실요인과 마찬가지로 광전송 시스템에 큰 영향을 주는 현상이다. 그러므로 고풍력의 신호를 광섬유에 입사시켜 광전송 시스템의 전송 거리를 길게 하기 위해서는 광섬유에서 발생하는 SBS에 대한 고려가 필요하다[1].

SBS는 입사 광이 브릴루앙 임계값이라고 하는 어떤 최소 강도를 초과할 때 발생한다[1, 2]. 만일 광섬유를 통해 전송되는 강도가 브릴루앙 임계값을 초과한다면 입력 광의 많은 부분이 주파수 천이 된 Stokes 광으로 후방 반사되고 광섬유의 실제 진행 방향으로 전송되지 않는다. 그러므로 실제 광통신에서는 광섬유로 입사하는 전송기 파워를 브릴루앙 임계값 이하로 주는 것이 필수적이다[1].

브릴루앙 이득 스펙트럼(BGS: Brillouin Gain Spectrum)은 브릴루앙 주파수 천이, 브릴루앙 선폭, 이득 계수 뿐 아니라 SBS 임계값에 대한 정보를 제공한다. 또한 BGS는 브릴루앙 주파수 천이 ν_B 에 의해 펌프 광 주파수에 대해 더 낮은 주파수로 천이 된다[3].

본 논문에서는 광섬유에서 이러한 SBS 영향을 알아보고 SBS 임계 파워를 측정하기 위해 새로운 방법을 제시하였고 오차를 줄이기 위해 정확한 브릴루앙 이득 계수를 측정하였다. 우선 유도 브릴루앙 산란에 관해 이론적으로 설명하고 브릴루앙 이득 계수를 구하는 전체 실험 장치를 설명하였다. 마지막으로 실험으로 구한 BGS를 나타내고 이론적으로 파장에 따른 BGS 특성과 광원의 선폭에 따른 BGS의 특성을 각각 살펴보았다.

II. 이론

SBS는 광섬유에 발생할 수 있는 비선형 과정으로 브릴루앙 임계에 도달되는 대부분의 입력 에너지를 수행하는 후방 전파 Stokes 파를 생성한다. SBS 과정은 펄프 파, Stokes파, 음향 파 사이의 상호 작용에 의해 일반적으로 표현될 수 있다.

광섬유 내에서 유도되는 SBS 현상은 매질의 포논과 상호 작용하여 고유 주파수만큼 벗어나 산란되는 현상이며[2] 이 과정에서 발생된 주파수를 브릴루앙 주파수 천이(Brillouin frequency shift) ν_B 라 하며 다음과 같이 나타낸다.

$$\nu_B = \frac{2nV_a}{\lambda} \quad (1)$$

여기서 V_a 는 광섬유 내에서 음향 속도, n 은 굴절률, λ 는 진공에서 광의 파장이다.

단일 모드 광섬유에서 SBS는 펄프와 Stokes 강도 사이에 다음과 같은 두 개의 부분 미분 방정식으로 표현될 수 있다[1].

$$\frac{dI_p}{dz} = -\alpha I_p - g_B I_S I_p \quad (2)$$

$$\frac{dI_S}{dz} = \alpha I_S - g_B I_p I_S \quad (3)$$

$$I_S(0) = I_S(L) \exp(g_B I_p(0) L_{eff} - \alpha L) \quad (4)$$

여기서 I_p 와 I_S 는 광섬유에서 펄프 파와 Stokes 파의 강도, g_B 는 주파수에 따른 브릴루앙 이득, α 는 광섬유 손실 계수, L 은 총 광섬유 길이이며 유효 상호 작용 길이 L_{eff} 는 $L_{eff} \approx 1/\alpha(1 - e^{-\alpha L})$ 이다. 유효 단면적 A_{eff} 는 스팟 크기 w_0 로부터 $A_{eff} = \pi w_0^2$ 로 구해진다. $z=L$ 에서 광섬유의 먼 쪽 끝단에서 결합되는 Stokes 광은 광섬유 감쇠

에 의해 약해지지만, 동시에 광섬유를 따라 이동할 때 브릴루앙 이득을 얻게 된다.

BGS는 브릴루앙 주파수 천이 ν_B 에 의해 펄프 광 주파수에 대해 더 낮은 주파수로 천이 된다. BGS는 이득 $g_B(\nu)$ 에서 Lorentz 스펙트럼 형태로 나타난다[1].

$$g_B(\nu) = g_0 \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \quad (5)$$

여기서 $\Delta\nu_B$ 는 최대치의 절반에서 전체 폭(FWHM)이며 BGS는 브릴루앙 주파수 천이 ν_B 에서 최대이며 최대 값은 브릴루앙 이득 계수 g_0 에 의해 주어진다.

$$g_B(\nu_B) = g_0 = \frac{2\pi n^7 p_{12}^2}{c\lambda_p^2 \rho_0 V_a \Delta\nu_B} \quad (6)$$

여기서 p_{12} 는 횡 탄성 광 계수, ρ_0 는 밀도, λ_p 는 펄프 파장이며 c 는 광의 진공에서 속도이다 [1]. 브릴루앙 이득 계수는 펄프 파장과 광섬유 파라미터에 의존함을 알 수 있다.

브릴루앙 이득은 스펙트럼 폭 $\Delta\nu_p$ 가 $\Delta\nu_B$ 를 초과한다면 실제로 감소된다. Lorentz 스펙트럼형의 폭(FWHM) $\Delta\nu_p$ 를 가지는 펄프의 특정한 경우에, 브릴루앙 이득 스펙트럼은 최대 이득을 가지며 다음과 같다[1].

$$g_B(\nu) = \frac{\Delta\nu_B}{\Delta\nu_B + \Delta\nu_p} g_0 \quad (7)$$

여기서 g_0 는 식 (6)에 의해 주어진다.

BGS는 음향 모드의 도파 형태와 광섬유 내 파라미터 값의 차이로 인한 것이며 이는 각 광섬유마다 다르기 때문에 브릴루앙 이득 선폭은 일반적으로 광섬유마다 다르다. 그러므로 브릴루앙 이득 계수 g_0 는 이론적으로 구하기 어려우므로 정확한 실험을 통하여 구한다.

III. 실험 및 결과

실험에서 사용된 전기 광 변조기는 편극 유지 단일 모드 광섬유를 사용하는 LiNbO₃ 진행파 변조기이다[3]. 그림 1은 EOM 전극에 적용된 전기 구동 신호의 타이밍과 변조 전압 함수로써의 EOM 전송 강도를 보여준다. 그림 1에서 LiNbO₃ 변조기의 바이어스 점이 정해지며 그 전압은 ~2.5V이다.

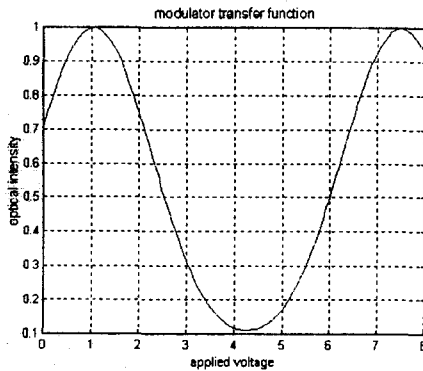


그림 1. EOM 전달 함수

이러한 EOM 사용은 두 개의 광원을 사용하거나 단일 레이저 원 사용 시에 복잡한 실험 장치를 이용해야 했던 이전의 실험을 그 동작을 더욱 더 간단하게 하도록 하였으며 정확하고 안정된 측정을 가능하게 하였다. 또한 매우 높은 변조 광 전력이 발생하며 송신기가 온도나 외부 환경에 대해 훌륭한 안정성을 갖게 한다.

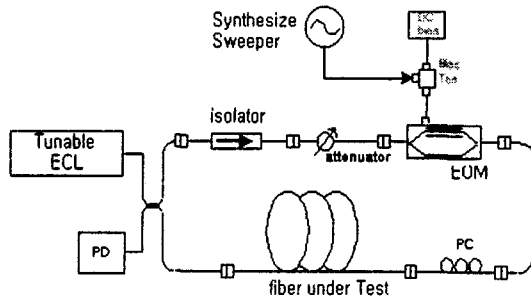


그림 2. BGS 측정을 위한 실험 장치

그림 2는 브릴루앙 이득 스펙트럼을 측정하기 위한 실험 장치이다. 광원으로 사용된 외부 캐비티 레이저(ECL)는 그 출력이 10mW인 파장 가변 레이저이다. ECL에서 나온 광은 10:90 커플러에 의해 분리되어 한 쪽 출력(90)은 시험 광섬유에 가해지는 입력이 되며 다른 나머지 출력(10)은 아이솔레이터(ISO)를 통과하여 감쇠기를 거친다. 여기서 아이솔레이터는 간섭을 피하기 위한 것이고 감쇠기는 광섬유에 가해지는 입력 신호에 대한 초기 값을 조정하기 위한 것이다. 감쇠기를 통과한 후 신호는 EOM로 향한다. 변조기에 가하는 입력은 DC 바이어스와 RF 신호이며 바이어스 tee를 사용하여 변조기의 같은 전극에 두 신호를 가한다. 편극 제어기는 EOM을 통과한

후 나오는 파가 CW 파와 상호 작용할 때 파의 편극 상태를 제어하기 위해 사용된다. 후방 산란된 신호는 광 검출기(PD)에 의해 검출되어 출력된다.

1550nm 파장에서 186kHz 선폭을 가지는 파장 가변 ECL을 사용하여 주파수에 따른 브릴루앙 이득 스펙트럼을 측정한다. 그림 3은 10.560km 기준 통신 광섬유($\alpha=0.30\text{dB/km}$, 코어 직경 $10.5\mu\text{m}$)에서 측정된 BGS를 나타낸 것이다. 측정은 실내 온도 (25°C)에서 광섬유에 어떠한 응력도 가하지 않는 조건에서 수행하였다. ECL에서 시험 광섬유로 가해진 펄스 강도 I_p 는 4.406mW 이며 EOM을 통과하여 시험 광섬유의 다른 끝 쪽으로 가해지는 Stokes 강도 I_s 는 $1.564\mu\text{W}$ 이다.

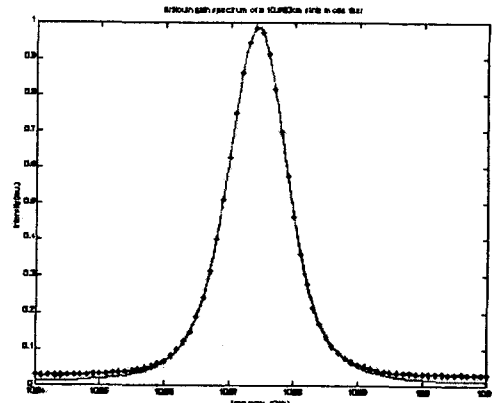


그림 3. 10.560km 단일 모드 광섬유의 BGS

그림 3에서 보는 것처럼, 식 (4)을 이용하여 이론적으로 구한 브릴루앙 이득 스펙트럼과 실험으로 측정된 브릴루앙 이득 스펙트럼의 형태는 거의 일치한다. 측정된 $\Delta\nu_B$ 는 28.3MHz, 브릴루앙 주파수 천이 ν_B 는 1.55 μm 파장에서 10.8743GHz이다. 브릴루앙 이득 계수 g_0 는 식 (5)을 이용하여 얻어지며 1550nm에서 $1.5430 \times 10^{-11}\text{m/W}$ 이다.

IV. 파장과 선폭에 따른 BGS 의존성에 관한 시뮬레이션

다음으로 186kHz 선폭을 가지는 ECL의 파장 가변 특성을 이용하여 1480nm에서 1580nm까지 파장을 가변시키며 파장에 따른 브릴루앙 이득 스펙트럼의 특성을 살펴본다. 그림 4에 파장에 따

큰 브릴루앙 이득 계수의 특성을 나타내었다. 브릴루앙 이득 계수는 식 (5)과 (6)에서 나타나는 것처럼 파장에 역으로 비례한다. 즉 사용하는 파장대에 따라 브릴루앙 이득 계수는 달라진다.

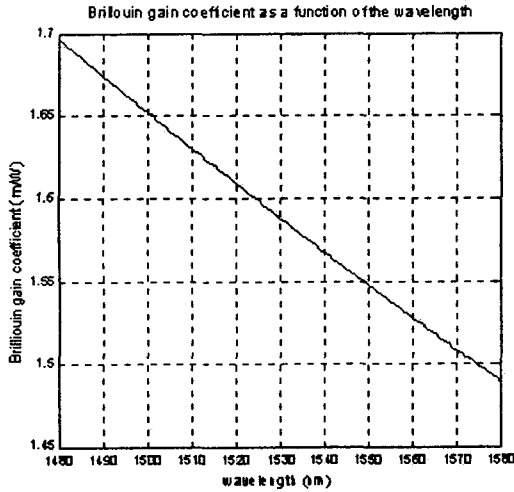


그림 4. 파장에 따른 브릴루앙 이득 계수

마지막으로 사용한 광원의 선폭을 변화시켜가며 선폭에 따른 브릴루앙 이득 스펙트럼의 특성을 살펴본다. 그림 5에서 1550nm 대역에서 광원의 선폭에 따른 브릴루앙 이득 계수를 구하였다. 이러한 광원의 선폭은 식 (6)과 (7)에서 알 수 있는 것처럼 브릴루앙 선폭과 브릴루앙 이득 계수에 따라 달라진다.

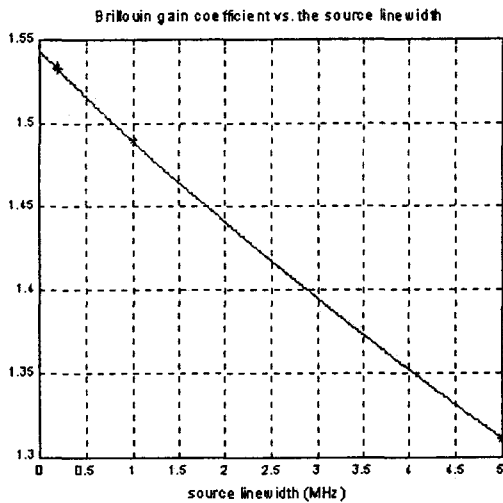


그림 5. 광원의 선폭에 따른 브릴루앙 이득 계수

V. 결 론

파장분할 다중 방식(WDM) 광전송 시스템에서 SBS는 낮은 입력 파워 레벨에서도 발생할 수 있기 때문에 다른 손실요인과 마찬가지로 광전송 시스템에 큰 영향을 주는 현상이다. 그러므로 광전송 시스템의 전송 거리를 길게 하기 위해서는 광섬유에서 발생하는 SBS에 대한 고려가 필요하다. 이러한 SBS 임계 강도를 알아보기 위해 BGS를 측정하였다. 이 때 EOM과 하나의 레이저 원만을 사용하여 펄프와 프로브 신호를 안정되고 정확하게 발생시킬 수 있게 한다. 이로부터 브릴루앙 이득 계수 g_0 를 구하였으며 그 값은 $1.5430 \times 10^{-11} \text{m/W}$ 이다. 또한 BGS가 파장과 선폭에 따라 각각 비례함을 이론적으로 확인하였다. 이 시뮬레이션 결과를 바탕으로 BGS의 파장과 선폭에 따른 의존성이 이론과 일치함을 실험적으로 증명하고 이를 이용하여 광섬유에서 SBS가 발생하는 임계값을 구할 예정이다.

참고문헌

- [1] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, New York: Academic, 1995.
- [2] D. Cotter, *J. Opt. Commun.*, Vol. 4, no. 1, pp. 10-19, 1983.
- [3] M. Niklès, L. Thévenaz, and P. Robert, *J. Lightwave Technol.* Vol. 15, no. 10, pp. 1842-1851, 1997.