

광섬유 유도 브릴루앙 산란 문턱 측정과 레이저의 선폭

Stimulated Brillouin scattering threshold measurement of optical fiber and laser linewidth

김승관, 길성철*, 이동훈, 전민용*

한국표준과학연구원 광기술표준부, *충남대학교 물리학과

skkfiber@kriss.re.kr

광섬유에서 발생하는 비선형 산란 가운데 하나인 유도 브릴루앙 산란 (SBS: stimulated Brillouin scattering)은 광증폭기, 광섬유 레이저, 광섬유 센서 등 많은 응용성을 가지고 있는 반면, 장거리 광전송에 있어서는 광섬유에 입력 가능한 광세기와 그에 따르는 전송 거리를 제한하는 장애 요인이 된다. 따라서 전송용 광케이블의 설계와 제작에 있어서 SBS 문턱을 높이고자 하는 연구가 진행되고 있으며 제작된 광섬유의 SBS 문턱 값의 측정과 규격의 제정이 국제 표준화의 안건이 되고 있다⁽¹⁾.

본 연구에서는 광통신용 광원으로 사용되는 distributed feedback laser diode (DFBLD, Avanex A1905LMI)와 넓은 파장 영역에서 가변할 수 있도록 제작된 external cavity laser diode (ECLD, Agilent 81640A), 그리고 fiber ring laser (FRL)를 단일 모드 광섬유의 SBS 문턱 값 측정에 적용해 보았다. FRL은 실험실에서 직접 제작한 것을 사용하였는데, 어븀 첨가 광섬유를 이득 매질로 하고 공간 홀버닝 현상을 없애기 위한 광아이솔레이터, 중심 파장 선택을 위한 파장 가변 필터, 그리고 복잡한 전기적 피드백 없이도 단일 종모드의 안정적 유지를 위한 포화 흡수체로서의 어븀 첨가 광섬유 등을 사용하였다. 스폰지 케이스에 패키징한 후 FRL의 출력을 광섬유 고리 공진기를 사용하여 분석한 결과 장시간 모드 호핑이 없이 단일 종모드로 동작하는 것을 실험적으로 확인할 수 있었다.

먼저 레이저의 선폭을 delayed self-heterodyne (DSH) 방법으로 측정하였다. Mach-Zehnder (MZ) 간섭계의 delay line으로는 일반 단일 모드 광섬유 22.5 km를 사용하였으며, 주파수 이동이 50 MHz인 acousto-optic frequency shifter (IntraAction 501E5C)를 MZ 간섭계의 한 쪽 팔에 연결하여 사용하였다. MZ 간섭계의 출력은 1 GHz 대역폭을 가진 photo-receiver (New Focus 1611)를 통해 광전변환하고 electrical spectrum analyzer (ESA, Agilent E4440A)를 사용하여 분석하였다. 세 가지 레이저 광원의 선폭 측정 결과는 그림 1의 (a)-(c)와 같다. 각각의 그림은 single sweep, average, maximum hold 스펙트럼을 보여주고 있는데, 상대적으로 느린 ESA의 sweep에 비하여 빠른 광주파수의 이동성이 관측되었다. 각각의 레이저 광원에 대하여 최적의 resolution bandwidth (RBW)와 sweep time을 설정한 후 100회의 평균을 취한 결과 레이저의 선폭은 2.5 MHz (DFBLD), 250 kHz (ECLD), 그리고 4.3 kHz (FRL)로 측정되었다.

SBS 문턱을 측정하기 위한 장치에는 최대 출력 23 dBm인 어븀 첨가 광섬유 증폭기를 사용하여 각각의 레이저를 증폭시킨 후 가변 광감쇠기로 출력을 조절할 수 있도록 하였고, FWHM이 0.8 nm인 파장 가변 필터를 사용하여 증폭기에 의한 ASE를 제거한 후 20 km 길이의 단일모드 광섬유 (Corning SMF-28)에 입사시켜 SBS 문턱을 측정하였다. 측정하고자 하는 광섬유로 입사되는 광세기와 SBS에 의해 후방 산란된 반사광의 세기를 측정하기 위해 분기율 9:1인 광섬유 결합기를 사용하였다.

측정 결과 그림 2와 같이 세 가지 서로 다른 선폭을 가진 레이저에 대하여 비슷한 투과광과 반사광의 세기 변화 곡선을 얻었다. FRL과 ECLD에서는 실험적으로는 그 차이를 구분할 수 없었으며, DFBLD는 다른 두 경우보다 약간 큰 문턱 값이 측정되었으나 그 차이는 1% 미만이었다. 실험적으로 측정된 각 레이저의 선폭을 통해 이론적으로 추정해 본다면 이러한 결과는 측정에 사용한 광섬유의 브릴루앙 선폭이 300 MHz 정도 되어야 가능함을 알 수 있다. 일반적인 광섬유의 브릴루앙 선폭이 20~50 MHz 정도인 점을 감안한다면^(1,2), 이를 통해 우리는 SBS 문턱 값의 측정에 관여하는 레이저의 선폭이 DSH 방법으로 측정된 선폭과 다르다는 사실을 알 수 있다.

그림 1의 DSH 스펙트럼을 관찰해 보면, single sweep 스펙트럼의 경우 평균 선폭보다 좁은 선폭의 맥놀이 신호가 관측되며, maximum hold 스펙트럼을 통해 이러한 맥놀이 신호들이 불규칙적으로 움직여 다짐을 알 수 있다. 길이가 20 km인 광섬유에서 브릴루앙 상호작용에 필요한 시간은 대략 100 μ s 정도가 되므로 DFBLD와 같이 선폭이 큰 레이저도 적어도 100 μ s 동안은 수백 kHz 정도의 짧은 선폭을 유지하고 있음을 알 수 있다.

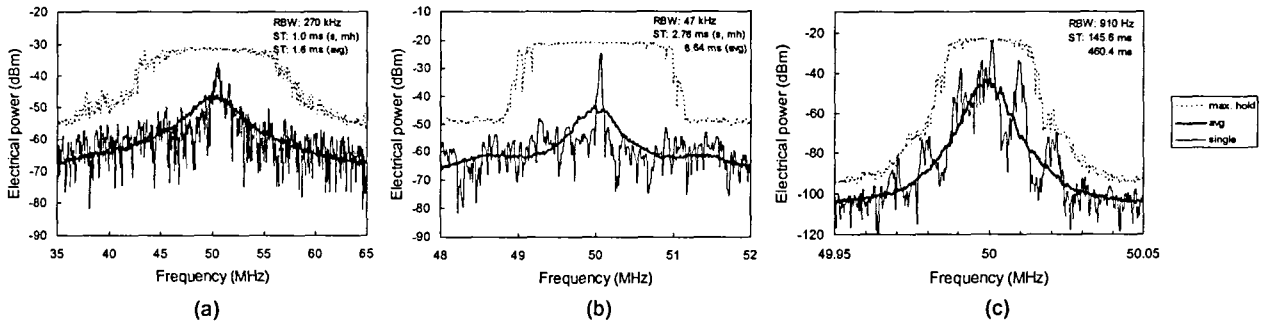


그림 1. Delayed self-heterodyne 방법에 의한 (a) DFBLD, (b) ECLD, (c) FRL의 선폭 측정 결과.

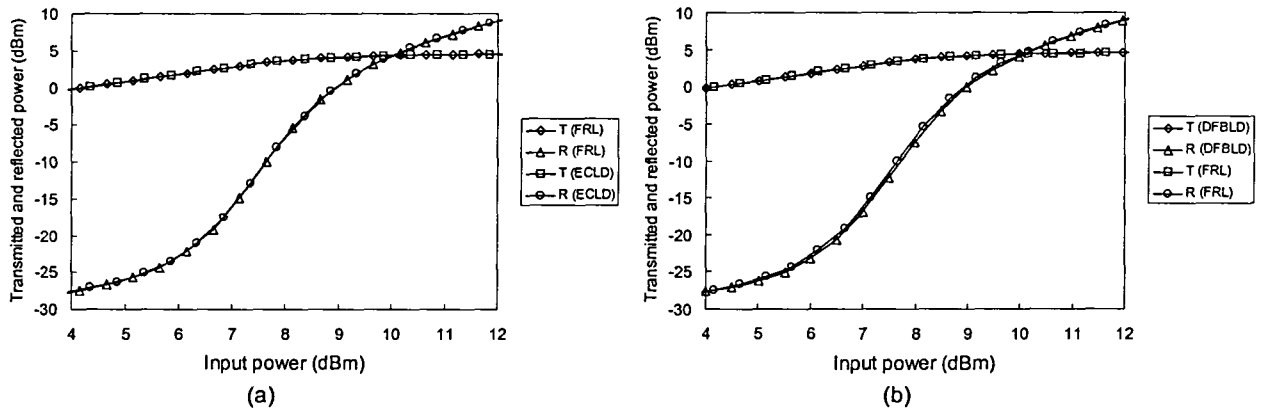


그림 2. 입력 펌핑광의 세기에 대한 출력광과 반사광의 세기 측정 결과. (a) FRL과 ECLD에 의한 결과, (b) FRL과 DFBLD에 의한 결과.

[1] A.B. Ruffin, Technical Digest of Symposium on Optical Fiber Measurements 2004 (NIST, Boulder, Colorado, USA), pp. 23-28.

[2] G.P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, 3rd ed. (Academic Press, 2001), Ch. 9.