

광펄스신호와 연속광원을 이용한 광섬유내의 stimulated Brillouin scattering 비교 연구

이한협 · 최현범 · 이동한[†]

충남대학교 자연과학대학 물리학과 광전자연구실

Ⓣ 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220 번지

남성현 · 김대연 · 윤형규

국방과학 연구소

Ⓣ 645-600 경상남도 진해시 진해우체국 사서함 18호

(2002년 11월 8일 받음, 2003년 4월 28일 수정본 받음)

최근 활발하게 연구되고 있는 광섬유 센서에 사용되는 광펄스신호가 광섬유에 입력될 때 발생할 수 있는 stimulated Brillouin scattering 현상에 대하여 연구하였다. 펄스광원의 평균 광세기가 연속광원의 광세기와 같으면 SBS 현상도 같아진다는 것을 알 수 있었다. 연구결과를 통해 연속광원을 이용한 SBS 측정 결과를 이용하여 광펄스신호가 입력되었을 때 SBS 현상을 예측할 수 있다.

주제어 : optical pulses, continuous wave lights, stimulated Brillouin scattering.

I. 서 론

Stimulated Brillouin scattering(SBS)는 1964년에 발견된 이후로 지속적으로 연구되어 왔다.^[1] 최근에는 wavelength division multiplexing(WDM) 광통신에서 입력세기가 증가함에 따라 발생하는 SBS 현상에 대한 연구가 진행되고 있다.^[2,3] 또한 광섬유 센서 등의 응용분야에 대한 연구가 활발해지고 입력광신호의 크기가 증가함에 따라서 광섬유내의 SBS 현상에 대한 연구가 진행되고 있다.^[4,5] SBS 현상의 특징은 입력광원 선폭이 좁을수록 잘 일어난다는 것과 1.5 μm 의 입력광원에 대해서 주파수 천이가 약 10~11 GHz정도인 Stokes파가 신호와 반대방향으로 진행한다는 것이다. 이러한 이유로 SBS 임계치가 넘어선 입력세기부터는 입력이 증가하여도 입력의 대부분이 Stokes파로 변환되어 진행방향에 위치한 수신단으로 도달하는 광 세기가 전혀 증가하지 못하게 된다.

최근 음향센서 연구에서 연속광원을 이용했을 때 SBS 현상이 입력이 10 mW 이하의 비교적 낮은 광 세기에서도 발생해 수신단에 도달하는 광 세기를 아주 낮게 만들며 또한 SBS로 인한 잡음발생으로 탐지감도가 급격하게 나빠진다는 사실이 발표되었다.^[6] 최근 관심의 대상이 되고 있는 광섬유 음향 센서 배열 시스템은 장거리 감시를 위해 수십개의 배열된 센서를 사용한다. 따라서 간섭을 잘 일어나게 하기 위하여 입력신호로 선폭이 좁은 distribute feedback laser diode(DFB LD)를 광세기변조기로 변조시켜 폭이 10~100 ns 정도이며 duty cycle이 적은 펄스신호를 만들어 사용한다. 또한 여러 개의 센

서로 입력광을 분배하고 장거리를 보내야 하기 때문에 큰 입력신호를 필요로 한다.^[6]

본 논문에서는 광섬유에 큰 세기의 펄스신호를 입력했을 때 SBS 현상이 어떻게 발생하는지에 대해서 분석하였다. 만일, 펄스신호와 연속 광원을 각각 입력했을 때에 서로의 SBS 현상이 같거나 일정한 관계를 가진다면 정확한 결과를 얻기 쉬운 연속 광원을 사용하여 필요로 하는 실험자료를 얻을 수 있으며 발표된 결과를 사용할 수 있다. 최근 연구들은 입력신호가 연속 광원일 때의 결과들이 대부분이며 입력신호가 펄스신호일 때의 현상에 대해서는 펄스신호의 폭이 Phonon의 life time(<10 ns)보다 작은 경우에 대해서 알려져 있다.^[6] 하지만 폭이 10~100 ns 정도이며 duty cycle이 적은 펄스신호에 대한 SBS 현상에 대해서는 잘 알려져 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 광섬유에 큰 세기의 연속광원과 펄스신호가 입력되었을 때 각각의 SBS 현상을 측정하고 비교 분석하여 서로의 상관관계를 알아내고자 한다.

II. 실험구성 및 측정

그림 1은 SBS 현상과 임계치를 측정하기 위한 실험 구성도이다. 실험구성은 입력광원과 polarization controller(PC), 연속광원을 펄스신호로 변조하기 위한 LiNbO₃ electro-optic modulator(EOM), 신호를 증폭하기 위한 erbium doped fiber amplifier(EDFA), 광세기를 조절하기 위한 attenuator와 single mode fiber(SMF) 20 km등으로 구성되어 있다.

서론에서 언급한 것과 같이 SBS 현상은 입력광원의 선폭이 좁을수록 잘 발생하므로 선폭이 좁은 광원을 사용하면 SBS

[†]E-mail: dleece@cnu.ac.kr

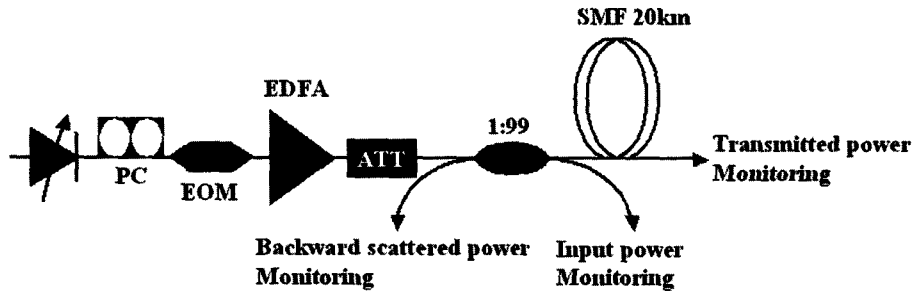


그림 1. SBS 현상을 측정하기 위한 실험구성도.

현상의 측정을 낮은 세기의 입력에서 쉽게 측정할 수 있다. 이를 위해 입력광원으로 선폭이 100 kHz 정도인 tunable external cavity laser diode(TLD)를 사용하였다. 실제 시스템에서는 선폭이 3~10 MHz로 넓은 DFB LD를 사용하므로 TLD를 이용하여 측정된 SBS현상은 실제 시스템에서의 lower limit 결과를 잘 예측할 수 있다. 펄스 신호를 만들기 위해 사용된 EOM은 강한 편광 특성이 있기 때문에 그 앞에 편광조절기를 설치하여 입력신호의 편광이 TE-polarization을 갖도록 하였다. 그리고 bias 전압을 조절하여 extinction ratio가 가장 크도록 하였다. SBS 현상을 측정하기 위하여^[7]의 측정방법을 사용하였으며 SMF 입력단에 1:99 양방향 커플러를 삽입하였다. 광섬유로 입력되는 신호의 광세기와 광섬유에서 반대방향으로 진행해서 나오는 SBS 세기는 1% 단자를 통해서 optical power meter와 optical spectrum analyzer를 이용하여 측정하였다. optical power meters는 시간에 대한 평균치로 광세기를 측정한다. 또한 1% 단자의 connector의 반사로 인해 실험오차를 줄이기 위하여 index matching gel을 이용하여 반사를 최소화하였다. 입력 세기를 크게 하기 위하여 EDFA를 이용하여 신호를 증폭시켰다.

III. 실험 결과 비교

그림 2는 SMF 20 km에 연속광원이 입력되었을 때 SBS 현상을 입력신호의 크기에 따라 측정된 것이다. 잘 알려진 대로

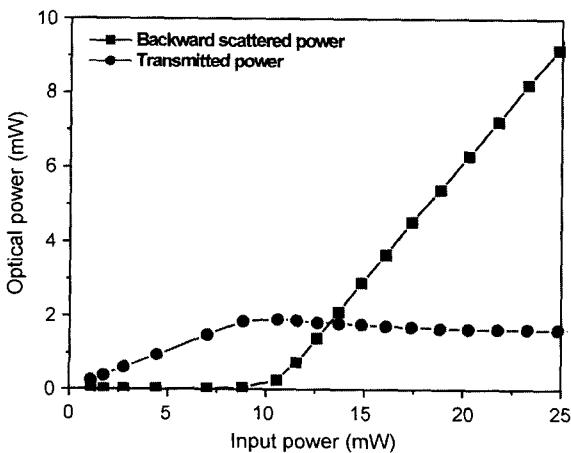


그림 2. 연속광원에 대한 SBS 현상.

입력이 SBS 임계치에 도달하기 전에는 입력이 증가함에 따라 출력이 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 하지만 SBS 임계치를 넘은 입력부터 출력은 더 이상 증가하지 않고 약 2 mW로 고정되며 Backward scattered power는 임계치 이후의 입력에 비례하여 증가함을 알 수 있었다. 실험적으로 많이 쓰이는 SBS 임계치는 Backward scattered power가 입력의 1% 세기와 같아지는 입력이다.^[7] 측정된 SBS 임계치는 9.2 mW이다.

그림 4는 EDFA에서 증폭된 펄스신호를 oscilloscope로 측정 한 결과이다. 펄스의 폭은 70 ns이고 펄스사이의 간격은 3 μm이다. 증폭후의 펄스신호의 모양이 찌그러짐이 없이 정확히 증폭되고 있음을 알 수 있다. 이 때 증폭된 신호광의 세기가 너

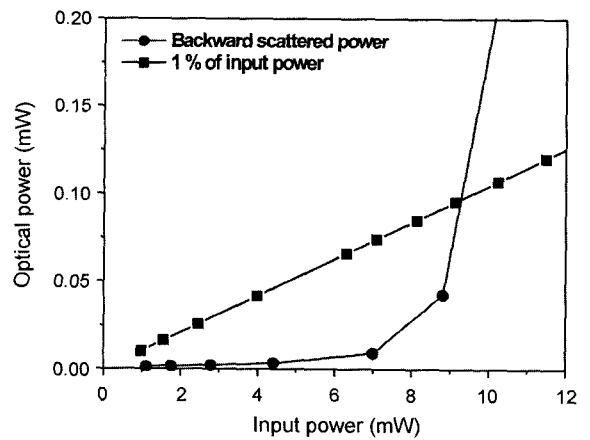


그림 3. 연속광원에 대한 SBS 임계치.

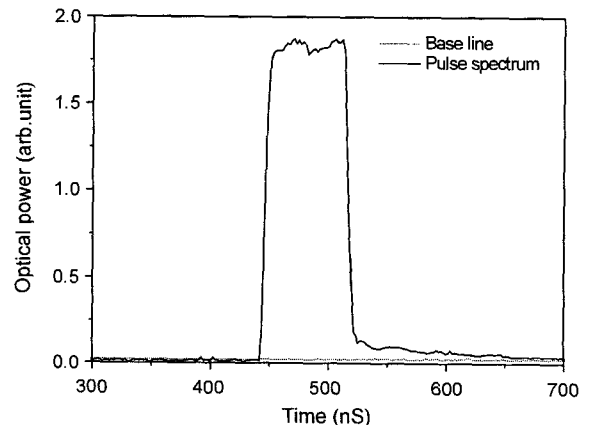


그림 4. EDFA에서 증폭된 펄스 신호.

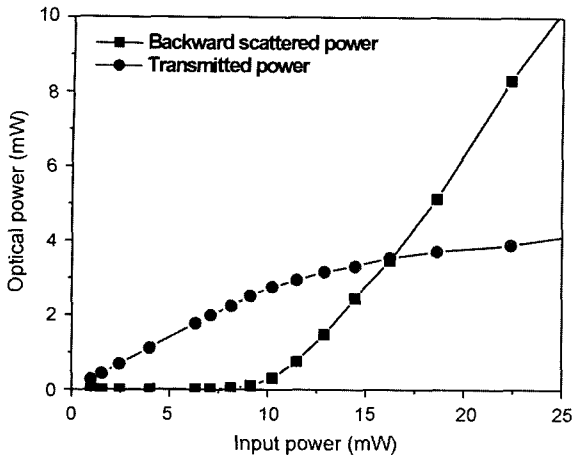


그림 5. 펄스신호에 대한 SBS 현상.

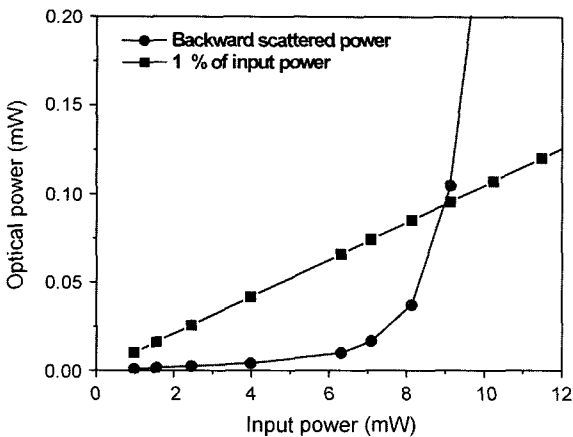


그림 6. 펄스신호에 대한 SBS 임계치.

무 커 광검출기의 포화를 막기 위해 33 dB의 광감쇠를 한 후 측정하였다.

펄스신호를 만들기 위해 사용된 EOM의 extinction ratio는 약 30 dB 정도이므로 EOM이 off된 시간에도 extinction ratio 만큼 크기가 줄어든 연속신호가 EDFA로 입력된다. 따라서 SMF로 EDFA에서 증폭된 펄스신호와 연속신호 그리고 EDFA에서 발생하는 amplified spontaneous emission(ASE)이 입력된다. 펄스신호와 크기가 줄어든 연속신호에 의한 Brillouin scattering으로 발생한 Stokes파는 신호의 역방향으로 진행하면서 펄스신호에 의한 SBS로 이득을 얻게 된다. 따라서 그림 5에서처럼 시간에 대한 평균 광세기로 나타낸 입력의 세기에 따른 Backward scattered power는 SBS 임계치를 넘어선 입력부터 그 세기가 증가하기 시작한다. 측정된 Backward scattered power는 입력광원이 연속광원일 때와 같은 세기로 측정되었으며 임계치 역시 9 mW로 입력광원이 연속광원일 때와 비슷한 크기로 측정되었다. 이것으로 펄스신호와 입력신호의 평균 광세기가 같은 세기에서 SBS 임계치가 나타남을 알 수 있었다. 펄스신호가 입력신호일 때 출력이 증가하는 이유는 증폭된 신호와 같이 실린 ASE의 선포이 매우 넓어 Brillouin scattering을 일으키지 않고 출력되기 때문이다.

IV. 실험 결과 분석

이 장에서는 실험 결과를 잘 알려진 식을 통하여 분석하고자 한다. SBS는 비선형 효과로서 강한 빛이 있을 때 나타나며 life time은 약 10 ns로 매우 짧다.^[6] 따라서 EDFA에서와 같이 수 ms의 life time을 가지고 증폭해주는 과정과는 다르다. 역방향으로 진행하는 Stokes파는 입력 펄스가 있는 시간에만 증폭이 되고 펄스가 없는 더 긴 시간동안은 증폭되지 않는다. 실험에 사용된 펄스의 주기는 3 us이고 폭은 70 ns이므로 Stokes파가 증폭되는 시간은 연속광원일 때 비해 1/43 배로 줄어든다. 실험에 사용된 EOM의 extinction ratio는 30 dB이므로 펄스 peak의 광세기는 pulse가 off 되었을 때의 광세기보다 1000배 크다. 그러나 pulse가 off 되었을 때의 광세기가 작다고 해도 긴 주기의 펄스에서는 무시할 수 없는 값이 된다. 하지만 실험에 사용된 펄스의 주기는 1/43이고 EOM의 extinction ratio가 30 dB임을 감안하면 pulse가 off 되었을 때의 광세기는 펄스 peak의 광세기에 비해 무시할 만하므로 펄스의 대부분의 세기는 펄스의 peak에 있다고 할 수 있다. 따라서 peak 광세기는 펄스의 평균 광세기보다 43배 정도 큰 값이 된다. 수식적으로 SBS 임계치는 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$P_0^{cr} \cong 21 \times \frac{K_B A_{eff}}{g_B L_{eff}} \quad (1)$$

식 (1)에서 A_{eff} 는 광섬유의 유효 단면적이며 g_B 는 Brillouin 이득의 극대값이고 L_{eff} 는 광섬유의 유효길이이다. 21이라는 수치는 Brillouin 이득 선포의 정확한 값을 따르기 때문에 단지 근사적인 값이다. 또한 K_B 는 입력파와 Stokes파가 자신의 편광을 광섬유를 따라 유지하느냐 아니냐에 따라 1에서 2 사이의 값을 가진다. 편광이 완전히 무작위로 변하는 경우 Brillouin 임계치가 두배로 증가하게 된다.^[6] 펄스 신호에 의한 Brillouin scattering으로 Stokes파는 이득을 얻게 되므로 펄스가 있는 시간에만 이득을 얻게된다. 따라서 L 이라는 길이를 진행하더라도 이득은 $L/43$ 의 길이 동안만 얻을 수 있으므로 펄스신호의 경우 식 (1)에서 L_{eff} 를 $L_{eff}/43$ 으로 볼 수 있다. 따라서 펄스신호일 때 P_0^{cr} 은 연속신호일 때 임계치에 비해 43 배 큰 값이 되며 이 값은 peak power에 해당한다. 그러므로 평균 광세기로 나타낸 P_0^{cr} 은 peak값에 관계없이 항상 같아진다. 또한 역방향으로 출력된 Stokes파의 세기도 거의 같음을 볼 수 있는데 식 (2)을 보면 알 수 있다.

$$I_s(0) = I_s(L) \exp\left(\frac{g_B P_0 L_{eff}}{A_{eff}} - \alpha L\right) \quad (2)$$

식 (2)에서 Stokes파의 세기 P_0 는 L_{eff} 가 같으면 항상 같을 것이라는 것을 알 수 있는데 peak값과 duty cycle을 감안하면 이 값은 펄스의 평균 광세기가 된다.

결론적으로 SBS 현상은 펄스신호의 평균 광세기가 같으면 동일하다는 실험결과는 식 (1)과 (2)에 잘 부합한다. 앞서 말한 것처럼 펄스신호의 평균 광세기는 펄스의 주기와 폭에 관련되어 있으며 펄스신호의 peak 광세기와의 관계는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$Power_{average} = Power_{peak} \times \frac{Width}{Period} \quad (3)$$

따라서 연속광원의 SBS 임계치와 펄스신호의 SBS 임계치 (peak 값)를 간단한 식으로 나타내면 식 (4)과 같이 표현할 수 있다.

$$SBS_{th}^{Pulse} = SBS_{th}^{C,W} \times \frac{Period}{Width} \quad (4)$$

Brillouin optical time domain analysis(BOTDA)는 광섬유의 양단에 각각 광펄스신호와 연속신호광을 입사시켜 두 광원에서 발생하는 유도 Brillouin 증폭을 이용한다. BOTDA의 경우 펄스신호의 폭이 BOTDA의 거리 분해능을 결정하므로 10 ns 정도의 SBS의 life time 보다 긴 시간을 가지는 100 ns 정도의 펄스 폭을 가지는 펄스 신호를 펌프광원으로 사용한 BOTDA 대한 연구가 많이 진행되어 있다.^[8,9] BOTDA와 광섬유 음향센서는 구조적으로 다르므로 SBS에 대해서 다른 해석이 필요하다. BOTDA에서 연속신호광은 광펄스신호에서 산란된 Brillouin 신호로 항상 이득은 얻는다. 반면에 펄스신호만을 이용하는 경우에 펄스신호에 의한 Brillouin 신호는 역방향으로 진행하고 이 신호는 펄스신호가 존재하는 시간에만 이득을 얻게 된다. 또한 BOTDA의 경우 증폭광과 Brillouin 신호가 같이 진행하므로 편광에 민감하나 펄스신호만을 이용하는 이 논문의 경우는 서로 역방향으로 진행하며 편광이 무작위로 변하기 때문에 평균값으로 나타나게 된다.

V. 결 론

본 논문에서는 SMF에 펄스신호가 입력될 때의 SBS 현상에 대해서 연구하였다. 또한 입력광원이 연속광원일 때와 비교 분석하였다. SMF 20 km에 연속광원과 펄스신호가 각각 입력되었을 때 평균 광세기로 비교한 각각의 SBS광 세기와 임계치가 비슷하게 측정되었다. 결과를 분석하여 펄스광원의 평균 광세기가 연속광원의 광세기와 같으면 SBS 현상도 같아진다는 것을 알 수 있었다. 이것은 SBS 증폭이 광원이 있는 동안에만 진행되기 때문이다. 이와 같은 결과로 연속광원을 이용한 SBS 측정 결과를 이용하여 펄스신호가 입력되었을 때 SBS

현상을 잘 예측할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 행해졌습니다.

참고문헌

- [1] Y. Aoki, K. Tajima, and I. Mito, "Input power limits of single-mode optical fibers due to stimulated Brillouin scattering in optical communication systems," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 6, pp. 710-719, 1988.
- [2] M. A. Davis, A. D. Kersey, and A. Dandridge, "Effect of SBS on the noise performance of a remotely interrogated interferometric sensor," in *Optical Fiber Sensors Conference'93*, 1993, pp. 139-142.
- [3] S. S. Lee, H. J. Lee, W. Seo, and S. G. Lee, "Stimulated Brillouin scattering suppression using cross-phase modulation induced by an optical supervisory channel in WDM Links," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 13, pp. 741-743, July, 2001.
- [4] 권일범, 최만용, 유재왕, "광섬유 BOTDA 센서의 개발," 한국광학회지, 제 12권 4호, pp. 294-298, 2001.
- [5] A. R. Davis, C. K. Kirkendall, A. Dandridge, and A. D. Kersey, "64 channel all optical deployable acoustic array," in *Optical Fiber Sensors Conference'97*, 1997, pp. 616-619.
- [6] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (3rd edition, Academic Press, New York, 2001), Chapter 9.
- [7] R. Billington, "Measurement methods for stimulated Raman and Brillouin scattering in optical fiber," NPL report COEM 31, 1999.
- [8] C. C. Lee and S. Chi, "Measurement of stimulated-Brillouin-scattering threshold for various types of fibers using Brillouin optical-time-domain reflectometer," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 12, no. 6, pp. 672-674, 2000.
- [9] R. Bernini, A. Minardo, and L. Zeni, "A reconstruction technique for stimulated Brillouin scattering fiber-optic sensors for simultaneous measurement of temperature and strain," *Proceedings of IEEE*, Vol. 2, pp. 1006-1011, 2002.

Stimulated Brillouin scattering in optical fiber for pulsed lights compared to continuous wave lights

Han Hyub Lee, Hyun Beom Choi, and Donghan Lee[†]

Department of Physics, Chungnam National University, Daejeon 305-764, KOREA

[†]*E-mail: dlee@cnu.ac.kr*

Sung Hyun Nam, Dae Yeon Kim, and Hyung Gyu Yoon

Agency for Defense Development, Jinhae 645-600, KOREA

(Received November 8, 2002, Revised manuscript April 28, 2003)

We have studied the properties of stimulated Brillouin scattering (SBS) in an optical fiber using optical pulses and continuous wave light. We find that the thresholds for SBS are the same when the averaged power of pulse light is the same as the power of cw light. From this result, the SBS threshold of pulse light can be deduced from that of continuous wave light, which can be obtained easily and accurately.

OCIS codes : 290.5900, 060.4370, 060.2310.