

# 단일 모드 광섬유의 유도 브릴루앙 산란 특성에 관한 연구

정회원 한영옥\*, 최평석\*, 은재정\*

## A Study on Characterization of Stimulated Brillouin Scattering in Single-Mode Optical Fiber

Young Ok Han\*, Pyung Suk Choi\*, Jae Jung Eun\* *Regular Members*

### 요 약

광시스템에서 발생할 수 있는 비선형 현상 중 하나인 유도 브릴루앙 산란은 낮은 입력 파워 레벨에서도 발생할 수 있기 때문에 광전송 시스템에 큰 영향을 주는 현상이다. 그러므로 고출력의 신호를 광섬유에 입사시켜 광전송 시스템의 전송 거리를 길게 하기 위해서는 광섬유에서 발생하는 유도 브릴루앙 산란에 대한 고려가 필요하다. 특히 현재 광통신에 사용되고 있는 파장 분할 다중방식(WDM) 광전송 시스템에서는 채널 간격이 좁으므로 유도 브릴루앙 산란의 영향을 고려해야만 한다. 브릴루앙 이득 스펙트럼은 브릴루앙 주파수 천이, 브릴루앙 선폭과 이득 계수에 대한 정보뿐만 아니라 브릴루앙 임계값에 대한 정보를 포함한다. 이러한 유도 브릴루앙 산란 신호를 1550 nm 파장대에서 실험적으로 확인하였으며 실험으로 관측한 SBS 신호를 이론적으로 계산된 값과 비교하였다. 실험으로 구한 신호 주파수는 10.8825GHz로서 이론상의 값 10.9GHz와 일치하였으며 브릴루앙 이득 스펙트럼을 측정된 결과  $1.5436 \times 10^{-11} \text{m/W}$ 의 브릴루앙 이득 계수  $g_0$ 을 얻었다.

### ABSTRACT

Stimulated Brillouin scattering(SBS) is one of dominant phenomena in wavelength division multiplexing(WDM) optical transmission systems because it occurs at a relatively low-power level. Therefore, to increase the transmission distance when the input power is launched high, SBS has to be considered. In a WDM system, it is desirable to pack the channels as closely together as possible in order to maximize the number of channels, and so the effect of stimulated Brillouin scattering must be considered further. The Brillouin gain spectrum(BGS) contains important information about the SBS threshold as well as the Brillouin frequency shift, the Brillouin spontaneous linewidth, and the gain coefficient. In this paper, we observed the stimulated Brillouin scattering signal experimentally in standard 1550-nm optical transmission system. The experimental result is compared with the theoretical one. Besides, the measured Brillouin frequency shift of 10.8825GHz agreed with the theoretical value of 10.9GHz. To see that the stimulated Brillouin scattering plays a critical role in the WDM optical transmission systems, we also measured the Brillouin gain spectrum to characterize the implication of the SBS in the design of such lightwave systems. The Brillouin gain coefficient  $g_0$  was  $1.5430 \times 10^{-11} \text{m/W}$  experimentally.

### I. 서론

광통신 시스템에서 전송매체인 광섬유는 수십

THz의 매우 큰 전송 대역폭을 갖는다. 따라서 여러 개의 전송 채널을 다중화하여 하나의 광섬유로 전송할 수 있는 다중화 전송기술은 초고속 광대역 전

\* 창원대학교 전자공학과 광전자실험실(jjeun@sarim.changwon.ac.kr)  
 논문번호 : 010150-0626, 접수일자 : 2001년 6월 26일

송망의 실현을 위해 매우 중요하다. 파장분할 다중방식(WDM)은 광섬유의 저손실 파장대역을 여러 개의 좁은 채널파장 대역으로 분할하여 각 입력 채널마다 하나의 파장대역을 할당하는 것으로 입력 채널신호들을 할당된 채널 파장대역을 통하여 동시에 광을 전송하는 방식이다. 초기의 파장분할 다중방식은 저밀도 파장분할 다중방식(Coarse WDM)이라 부르며 파장의 선별하는 기술이 충분하지 않아 소수의 채널만으로 다중화 하였다. 그러나 오늘날 DFB(Distributed FeedBack)나 DBR(Distributed Bragg Reflector)와 같이 좁은 선폭을 갖는 레이저의 발달로 인해 더 좁은 채널간격으로 많은 수의 채널을 다중화 할 수 있게 되었으며, 이를 고밀도 파장분할 다중방식(Dense WDM)이라고 부른다. 고밀도 파장분할 다중방식은 다채널의 파장을 다중화 하기 위해 회절 격자를 사용함으로써 1~2nm 채널간격으로 약 20개의 채널을 수용할 수 있다.

파장분할 다중전송 시스템의 성능은 수용 가능한 채널 수, 채널간 간격 등에 의해 좌우되므로 레이저와 광 필터의 스펙트럼 특성은 시스템에서 고려해야 할 중요한 변수이다. 고밀도 파장분할 다중전송 시스템에서는 성능이 우수한 가변 레이저와 가변 필터를 필요로 한다. 즉, 고밀도 파장분할 다중화 시스템은 DFB 레이저 다이오드와 같은 좁은 선폭을 갖는 레이저를 사용해야 하며, 이와 같은 좁은 선폭을 갖는 레이저를 이용한 고밀도 파장분할 다중화 시스템에서는 채널이 밀접한 간격으로 다중화 되므로 각 레이저의 파장은 할당된 대역 내에서 안정되어야 한다. 특히, 파장다중 전송방식의 가장 큰 문제점 중 하나는 전송 시스템의 파워 마진(power margin)의 확보이다. 즉, 다중화 및 각종 광전송 소자의 삽입손실, 전송손실, 그 밖의 손실 요인에 대한 광 파워 보상을 필요로 하며 이러한 광 파워를 보상하기 위한 방법으로 현재 EDFA(Erbium-doped Fiber Amplifier)와 같은 광섬유 증폭기가 사용되고 있다. 그러나, 실제 광시스템에서 발생할 수 있는 비선형 현상중 하나인 유도 브릴루앙 산란(SBS : Stimulated Brillouin Scattering)은 1550nm 대역에서 그 영향이 증대되며 다채널 레이저의 선폭이 좁아질 수록(~100MHz) 발생임계치가 낮아진다. 또한 수 mW의 낮은 입력 파워 레벨에서도 발생할 수 있기 때문에 다른 손실요인과 마찬가지로 10Gbps 이상의 DWDM 광전송 시스템에 큰 영향을 주는 현상임으로 고풍력의 신호를 광섬유에 입사시켜 광전송 시스템의 전송 거리를 길게 하기 위해서는 광

섬유에서 발생하는 SBS에 대한 고려가 필요하다<sup>[1]</sup>.

SBS는 입사 광이 브릴루앙 임계값이라고 하는 어떤 최소 강도를 초과할 때 발생한다<sup>[1,2]</sup>. 만일 광섬유를 통해 전송되는 강도가 브릴루앙 임계값을 초과한다면, 입력 광의 많은 부분이 주파수 천이된 Stokes 광으로 후방 반사되고, 광섬유의 실제 진행 방향으로 전송되지 않는다. 그러므로 펄프 소멸로 인해 SBS가 일어나지 않을 때 예상되는 것보다 훨씬 더 낮은 신호 파워를 수신기에서 수신하게 된다. 또한, 후방 반사된 Stokes 광은 피드백 되어 레이저 동작을 불안정하게 하는 요인으로써 동작하게 된다. 그러므로 실제 광시스템에서는 광섬유로 입사하는 전송기 파워를 브릴루앙 임계값 이하로 주는 것이 필수적이다<sup>[1]</sup>. 브릴루앙 이득 스펙트럼(Brillouin Gain Spectrum : BGS)은 브릴루앙 주파수 천이, 브릴루앙 선폭, 이득 계수뿐만 아니라 SBS 임계값에 대한 정보를 제공한다. 또한 BGS는 브릴루앙 주파수 천이  $\nu_B$ 에 의해 펄프 광 주파수에 대하여 더 낮은 주파수로 천이된다<sup>[3]</sup>.

브릴루앙 이득 계수에 대한 연구는 분포형 광섬유 센서에서 브릴루앙을 이용하려는 목적과 광통신에서 중요한 제한 요소인 SBS 임계값을 구하기 위한 목적으로 계속되어 왔으며 그 값이 여러 논문에서 이용되었다. Horiguchi 등<sup>[4]</sup>은 1.3 $\mu$ m에서 펄프로 Nd:YAG, 프로브로 DFB LD를 사용하여 BOTDA 시스템에 대하여 해석하였으며, 이 때 이득 계수는  $1.1 \times 10^{-12}$  m/W였다. 또한, Niklès 등<sup>[5]</sup>은 1.32 $\mu$ m에서 다이오드 펄프 단일 주파수 Nd:YAG 레이저를 사용하여 브릴루앙 이득 계수  $2.6 \times 10^{-11}$  m/W를 측정하였다. 이러한 브릴루앙 이득 계수는 코어의 도핑 농도에 따라 변하며, 1556nm에서 ECL을 사용할 때  $g_B$ 는  $1.6 \times 10^{-11}$  m/W이고 순수 실리카의 경우에는  $5 \times 10^{-11}$  m/W<sup>[6]</sup>이다. 그리고 펄프와 프로브로 DFB 레이저를 사용하여 브릴루앙 선폭은 1550nm에서 32MHz이며 파장에 따라 변함<sup>[7]</sup>을 보고하였다. 1555nm에서 외부 캐비티 LD를 사용할 때  $g_B$ 는  $4.5 \times 10^{-11}$  m/W<sup>[8]</sup>이며 브릴루앙 임계값을 구하기 위해  $g_B = 3 \times 10^{-11}$  m/W<sup>[9]</sup>를 이용하였다.

최초의 브릴루앙 스펙트럼 측정이 1950년<sup>[10]</sup>에 이루어진 이후, 더 최근에 BGS 측정은 단일 모드 아르곤 레이저를 사용하여 광 유리에서 수행되었다<sup>[9]</sup>. 이러한 실험은 자연 BGS 폭과 음파에 일치하는 제동 과정에 정보를 제공한다. 또한, 1979년에 Rowell 등은 Fabry-Perot 스펙트럼 분석기를 사용

하여 514.5nm 파장에서 단일 모드 광섬유에 대한 자연 BGS(DML) 측정을 보고하였다<sup>[11]</sup>.

본 논문에서는 광섬유 내에서 발생하는 SBS 현상에 대하여 논의하고, 브릴루앙 주파수 천이, 브릴루앙 이득에 대하여 고찰함으로써, 브릴루앙 천이 주파수 및 SBS 신호에 대하여 여러 가지 정보를 제공하는 브릴루앙 이득 계수를 측정하였다. 먼저, II장에서는 광섬유 내에서 발생하는 비선형 산란 현상에 대해 설명하고 본 논문에서 다룰 유도 브릴루앙 산란 특성에 관해 논의하였으며, III장에서는 유도 브릴루앙 산란을 수식적으로 설명하고 브릴루앙 임계값과 이득에 관하여 이론적으로 해석하였다. 또한, IV장에서는 실험을 통하여 브릴루앙 천이 주파수 및 브릴루앙 산란에 대한 여러 가지 정보를 포함하는 BGS 측정에 대하여 논의하였고, 끝으로 V장에서는 결론을 맺는다.

## II. 비선형 유도 브릴루앙 산란

광이 매질을 진행할 때 대부분은 앞으로 진행하지만 그 광 중 일부는 산란되며 그러한 산란된 광은 그 특성상 탄성 산란과 비탄성 산란으로 나눌 수 있다. 탄성 산란의 대표적인 형태인 레일리 산란은 그 특징이 입사광의 주파수가 변하지 않는다는 것이다. 반면에 비탄성 산란은 입사광의 주파수와 산란광의 주파수가 달라지는 것으로서, 그 대표적인 형태는 라만 산란(Raman scattering)과 브릴루앙 산란(Brillouin scattering)으로 나눌 수 있다. 라만 산란은 광으로부터 입사되는 전력을 매질의 진동 모드에 의해 결정되는 양에 의해 더 낮은 주파수에서 다른 빔으로 변환시킨다. 그에 반해, 브릴루앙 산란은 전송 매질을 진행하는 음파의 입력 차에 의해 야기된 굴절률 변동으로 광을 산란시킨다. 이 산란은 Bragg 격자의 경우에 주어진 방향에 대해 발생하고 산란된 광이 Doppler 주파수 천이를 발생시키며 이는 음파의 압력 변동이 주기적이고 매질에서 진행하기 때문이다. 또한 자연 브릴루앙 산란은 양자 역학으로 표현이 가능하다. 펌프 광으로부터 포톤은 낮은 주파수의 새로운 Stokes 포톤과 음향 파에 새로운 포톤으로 변화되는데, 이 동작에서 총 에너지 양은 변하지 않고 동일한 산란 과정은 마치 펌프 포톤 소멸이 Stokes 포톤과 음향 포톤을 동시에 창조하는 것처럼 양자 역학적으로 볼 수 있다.

유도 브릴루앙 산란은 비선형 매질에 의해 결정되는 입사 펌프파 주파수로부터 더 낮은 주파수로

천이된 Stokes 파 생성의 증거가 되기 때문에 SRS(stimulated Raman scattering)와 유사하다. 그러나, SBS와 SRS 사이에는 중요한 차이가 있다. 그것은 Stokes파는 SBS가 광섬유에서 발생할 때 후방으로 전파되는데 반해 SRS는 양방향으로 발생한다는 것이다. 또한, SBS의 Stokes 천이(~10GHz)는 SRS Stokes 천이와 비교할 때 차수가 3배정도 작으며, SBS는 광 포톤이 발생시킨다.

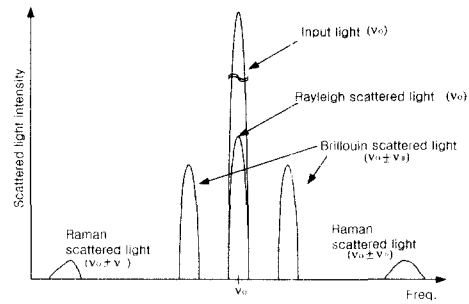


그림 1. 비탄성 산란 현상의 산란된 광 스펙트럼 강도 분포

그림 1은 입력 광에 대해 나타나는 주파수에 따른 산란된 광 신호의 강도를 나타낸 것으로 레일리 산란, 브릴루앙 산란, 라만 산란이 입력된 광에 대해 가지는 강도와 그 주파수를 알 수 있다. 탄성 산란인 레일리 산란은 입력 광에 대해 주파수 천이가 발생하지 않으며, 다른 산란에 비해 그 강도가 크므로 이를 이용하여 광섬유에서 발생하는 손실을 측정할 수 있다. 그와 달리 주파수 천이를 발생시키는 비탄성 산란을 살펴보면, 그림 1에서 보는 것처럼 브릴루앙 산란이 ~GHz대로 주파수 천이하는데 비해, 라만 산란은 ~THz의 주파수 천이를 한다. 하지만, 주파수에 따른 출력 광 강도는, 브릴루앙 산란 광이 라만 산란 광에 비해 수백 배 더 크다. 이러한 이유 때문에 광통신 시스템에서 라만 산란에 비해 브릴루앙 산란이 더 큰 영향을 주고, 광섬유 센서로서 라만 산란보다 브릴루앙 산란을 이용하는 것이 더 효율적임을 알 수 있다.

SBS는 광섬유에서 발생하는 기본 비선형 과정이며, 여기서 더 낮은 주파수로 천이된 산란 파(Stokes)는 음향 파와 입력 펌프 파의 상호 작용으로부터 발생한다. 그림 2는 SBS가 발생하는 과정을 보여주는 것으로, 여기서 주파수  $\omega_1$ 의 입사 펌프파는 주파수  $\Omega$ 를 갖는 음향 파에 대해 굴절률 변동으로부터 산란된다. 음향 파가 입사 레이저 파로부터 이동하기 때문에 산란된 Stokes 파  $\omega_2$ 는 주파

수에서 더 낮은 주파수로 천이된다.

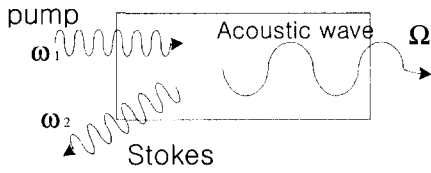


그림 2. 유도 브릴루앙 산란 발생 과정의 도식적 다이어그램

### III. 유도 브릴루앙 산란의 이론적 해석

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

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

여기서  $V_a$ 는 광섬유 내에서 음향 속도,  $n$ 은 굴절률,  $\lambda$ 는 진공에서 입사 광 파의 파장이다.

단일 모드 광섬유에서 SBS는 펌프와 Stokes 강도 사이에 다음과 같은 두 개의 미분 방정식으로 표현될 수 있다<sup>[1]</sup>.

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

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

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

여기서  $I_p$ 와  $I_S$ 는 광섬유에서 펌프 파와 Stokes 파의 강도,  $I_p(0)$ 는 주파수  $\nu_0$ 에서 광섬유에 가해지는 입력 강도,  $I_S(L)$ 는 광섬유에서 발생하는 초기 Stokes 강도,  $g_B$ 는 주파수에 따른 브릴루앙 이득,  $\alpha$ 는 광섬유 손실 계수이며  $L$ 은 총 광섬유 길이이며 비선형 효과에 대한 보통의 유효 상호 작용 길이는  $L_{eff} = 1/\alpha[1 - \exp(-\alpha L)]$ 로 나타난다.

Lorentz 스펙트럼 형태를 가지는 펌프 레이저의 경우에 브릴루앙 임계값은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[1]</sup>.

$$P_{th}(mW) \cong \frac{21A_{eff}}{g_B(\nu_B)L_{eff}} \quad (5)$$

여기서  $A_{eff}$ 는 유효 단면적이며 스팟 크기  $w_0$ 로부터  $A_{eff} = \pi w_0^2$ 으로 구해진다.

BGS는 브릴루앙 주파수 천이  $\nu_B$ 에 의해 펌프 광 주파수에 대하여 더 낮은 주파수로 천이되고, 이득  $g_B(\nu)$ 에서 Lorentz 스펙트럼 형태로 나타난다<sup>[10]</sup>.

$$g_B(\nu) = g_0 \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \quad (6)$$

여기서  $\Delta\nu_B$ 는 반치폭(FWHM)이며  $\Delta\nu_B = (\pi T_B)^{-1}$ 로 포논 생존시간  $T_B$ 에 관련된다. BGS는 브릴루앙 주파수 천이  $\nu_B$ 에서 최대이며, 최대 값은 브릴루앙 이득 계수  $g_0$ 에 의해 주어진다.

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

여기서  $p_{12}$ 는 횡 탄성 광 계수,  $\rho_0$ 는 밀도,  $\lambda_p$ 는 펌프 파장이며  $c$ 는 진공에서 광속을 나타낸다<sup>[11]</sup>. 브릴루앙 이득 계수는 펌프 파장과 광섬유 파라메타에 의존함을 알 수 있다. 위의 식에서  $\Delta\nu_B$ 는 브릴루앙 천이에 의존하고  $\nu_B$ 는  $\lambda_p$ 에 역 비례하고  $\Delta\nu_B$ 는 펌프 파장에  $\lambda_p^{-2}$ 형태로 의존할 것으로 예상된다. 브릴루앙 스펙트럼은 광섬유의 코어와 클래딩 영역에서 음속의 차로 인해 측정되고 해석되며, 그에 따라 각기 다르게 나타난다. BGS는 음향 모드의 도파 형태와 광섬유 내 파라메타 값의 차이로 인한 것이며, 이는 각 광섬유마다 다르기 때문에 브릴루앙 이득 선폭은 일반적으로 광섬유마다 다르다. 따라서, 브릴루앙 이득 계수  $g_0$ 는 이론적으로 구해 질 수 없으며, 정확한 실험을 통해서만 구할 수 있다. 브릴루앙 이득은 스펙트럼 폭  $\Delta\nu_p$ 가  $\Delta\nu_B$ 를 초과한다면, 실제로 감소하게 된다. Lorentz 스펙트럼 형태의 폭(FWHM)  $\Delta\nu_p$ 을 가지는 펌프의 특정한 경우에, 브릴루앙 이득 스펙트럼은 최대 이득을 가지며 다음과 같다.

$$g_B(\nu) = \frac{\Delta\nu_B}{\Delta\nu_B + \Delta\nu_p} g_B(\nu_B) \quad (8)$$

여기서  $g_B(\nu_B)$ 는 식(7)로 주어짐으로, 브릴루앙 이득은  $\Delta\nu_p \gg \Delta\nu_B$ 인 경우  $\Delta\nu_p/\Delta\nu_B$ 로 간단히 나타낼 수 있다.

식(2)와 (3)으로부터 단일 모드 광섬유에서 입력 펌프에 대한 전송된 신호와 후방 산란된 신호 세기

는 다음으로 나타낼 수 있다<sup>[12]</sup>.

$$I_p(z) = [I_p(0) - I_s(0)] \times \frac{I_p(0) \exp\{g_B[I_p(0) - I_s(0)]z\}}{I_p(0) \exp\{g_B[I_p(0) - I_s(0)]z\} - I_s(0)} \quad (9)$$

$$I_s(z) = [I_p(0) - I_s(0)] \times \frac{I_s(0)}{I_p(0) \exp\{g_B[I_p(0) - I_s(0)]z\} - I_s(0)} \quad (10)$$

여기서  $g_B$ 는 이득 계수,  $I_s(0)$ 는 초기 Stokes 파워,  $I_p(0)$ 는 광섬유에 가해지는 초기 입력 펄스이며,  $I_p(z)$ 와  $I_s(z)$ 는 각각 전송된 펄스 파워와 후방 산란된 Stokes 파워이다.

식(9)와 (10)에 따르면, SBS는 순수한 이득 과정이며  $z=L$ 에서 나타나는 Stokes 신호의 작은 값은 선형 손실을 극복한 후에 지수함수로 증가한다. 그림 3은 단일 모드 광섬유에서 SBS 과정의 수치적으로 적분된 입력-출력 특성을 보여준다. 이 그림에서 전송된 펄스와 후방 산란된 Stokes 신호의 시간 평균 출력은 펄스 신호 세기( $g = g_0 L I_p$ ) 함수로 그려지고, 여기서  $I_p$ 는  $z=0$ 에서 입사 펄스의 절대 강도이다<sup>[11]</sup>. 임계값 후에 입력되는 펄스 강도가 증가할 때, Stokes 강도는 선형으로 증가하는 반면에 전송된 펄스 강도는 완전히 포화된다.

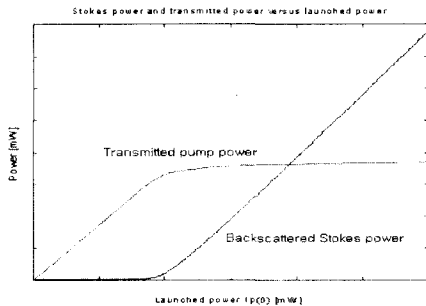


그림 3. 입력 펄스 함수  $I_p(0)$ 에 대한 전송된 펄스 신호와 후방 산란된 Stokes 신호

SBS는 설치된 광섬유 케이블에서 스트레인과 분포형 온도 모니터링과 같은 센싱 응용에 적합할 뿐만 아니라 광통신 시스템에서 특히, DWDM 시스템을 제한하는 요소로써 작용될 수 있다. 이러한 모든 경우에 대하여, BGS는 브릴루앙 주파수 천이, 브릴루앙 자연 선폭과 선형 이득 계수와 같은 주요한 정보를 포함한다. 이러한 BGS를 측정하는 방법으로 변조기를 이용할 수 있는데, 이 때 광섬유를 따라 광이 입력되는 양쪽에서 두 측파대 강도는 초기에

동일한 크기를 갖는다. 즉, 총 검출 강도는 다음에 비례함을 알 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$I_{out} = 2 \exp\{-\alpha L\} I_s(0) \cosh\{g_B(\nu) I_p(0) L_{eff}\} \quad (11)$$

실험에 사용된 전기 광 변조기는 편극 유지 단일 모드 광섬유를 사용하는 LiNbO<sub>3</sub> 전기 광 변조기이며, 이를 사용함으로써 레이저 주파수 드리프트에 의존하지 않고 파장 가변 레이저 광원을 필요로 하지 않는다는 측정 상의 장점을 제공한다<sup>[5]</sup>. 전기 광 변조기에 대한 전달 함수는 코사인 함수이며 변조기의 출력은 다음과 같이 주어진다.

$$I(t) = \alpha I_0 \cos^2\left(\frac{V(t)\pi}{2V_\pi}\right) \quad (12)$$

여기서  $I(t)$ 는 전송 강도,  $\alpha$ 는 소자의 삽입 손실,  $I_0$ 는 레이저로부터의 입력 강도,  $V(t)$ 는 소자에 적용되는 전압이며,  $V_\pi$ 는 적절한 최소와 최대 사이 값에서 소자를 구동하기 위해 필요한 전압이다. 이러한 변조기 전달 함수의 특성은 변조기의 기본적인 성질이며 변조기의 특성을 결정한다.

#### IV. 실험 및 결과 고찰

##### 1. 브릴루앙 산란 광 측정 실험

그림 4는 실험에서 사용한 실험 장치들 나타낸 것으로, 여기서 1550nm 파장을 가지는 DFB-LD를 광원으로 사용하였다. 이는 빔 분리기를 통해 분리되어 한 쪽은 어븀 도핑 광섬유 증폭기(EDFA)를 통해 증폭되어 광섬유로 들어간다. 광섬유로 들어간 광은 브릴루앙 증폭을 하게 되며, 후방 산란된 광과 DFB-LD에서 빔 분리기를 통해 반사된 광이 검출된다. 여기서 광섬유를 통해 반사되어 온 광이 다시 되돌아 반사되어 그 전력이 줄어드는 것을 막기 위해 3 포트 광 순환기를 사용하여 검출한다. 검출되는 광의 한 쪽은 광 검출기(Photodetector : PD)에서 검출되며 이 신호는 Mixer로 입력된다. Mixer는 이 신호와 또 다른 입력 신호인 국부 발진기(Local Oscillator : LO)의 신호를 혼합하여 두 신호의 차에 해당되는 주파수의 신호를 출력한다. 그림 4의 실험장치에서 사용된 검출 기법은 RF주파수대역에서의 신호처리를 위한 가간섭검출기법(coherent detection)으로서, 이득스펙트럼의 반치대역폭인 ~30MHz를 고려하여 국부발진기(LO)의 주파수를 10.4GHz로 설정하였다. Mixer를 통과한 신호는

20GHz 저 잡음 증폭기(Low Noise Amplifier : LNA)를 통해 스펙트럼 분석기로 측정된다. 그리고, 다른 한 쪽은 동일 초점 Fabry-Perot 간섭계(Con-focal Fabry-Perot : CFP)를 통해 간섭되어 오실로스코프로 검출된다.

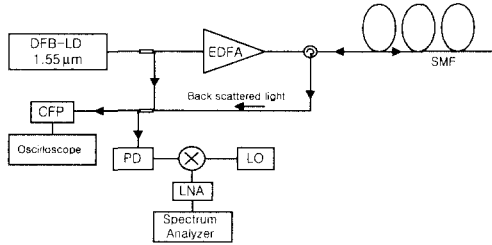


그림 4. SBS 신호 측정을 위한 실험 장치

그림 5는 8GHz 자유 스펙트럼 범위(FSR)와 대략 30MHz 주파수 분해능을 가지는 CFP를 통해 나타난 후방 산란된 유도 브릴루앙 광 신호의 파형을 보여주는 것이다. 그림 5에서 후방 산란된 브릴루앙 신호를 확인할 수 있으며, 유도 산란된 광의 브릴루앙 주파수는 대략 11GHz로 나타난다. 식(1)을 통해 이론적으로 계산한 유도 브릴루앙 주파수  $\nu_B$ 는 10.9GHz이며, 이는 실험으로 확인한 값과 일치했다.

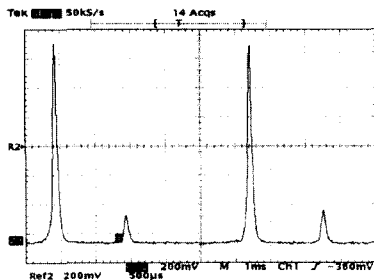


그림 5. 시간 영역에서 패브리 패롯 간섭계를 통해 나타난 브릴루앙 신호

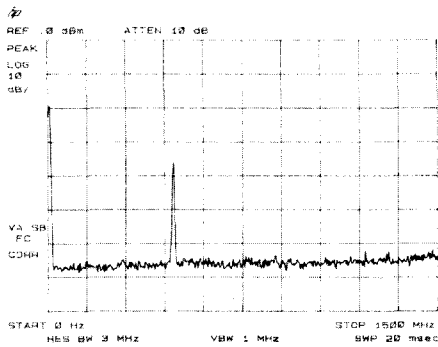


그림 6. 주파수 영역에서 스펙트럼 분석기를 통해 나타난 SBS 신호 파형

그림 6은 광 결합기의 또 다른 포트에서 PD로 검출된 파형과 LO의 신호를 Mixer로 혼합하여 두 신호의 차에 해당하는 주파수 신호를 LNA를 통과시킨 후 스펙트럼 분석기로 나타낸 것이다. 그림 6에서, 그 주파수는 482.5MHz이고 최대 전력은 -38.78dBm으로 측정되었으며, LO의 주파수는 10.4GHz이므로 이 그림으로부터 검출기로 검출된 신호의 주파수가 10.8825GHz임을 알 수 있었다. 이로부터 주파수 영역에서 관측한 브릴루앙 주파수 역시 이론과 일치함을 알 수 있다.

## 2. 브릴루앙 이득 스펙트럼 측정

### 1) $LiNbO_3$ 전기 광 변조기 특성

실험에 사용된  $LiNbO_3$  전기 광 변조기는 편극 유지 단일 모드 광섬유를 사용함으로써, 레이저 주파수 드리프트에 의존하지 않고 파장 가변 레이저 광원을 필요로 하지 않는다는 측정 상의 장점을 제공한다.

그림 7은 실제로 실험에서 사용한  $LiNbO_3$  전기 광 변조기의 전달 함수 특성을 구한 것이다. 변조기의 전달 함수를 구하기 위해, 그림 7(a)에서처럼 우선 변조기에 입력으로 DC 전압만을 가하여 시간에 따른 출력 값을 구했다. 입력된 DC 전압에 따른 출력 값을 구함으로써 변조기의 전달 함수 특성을 알

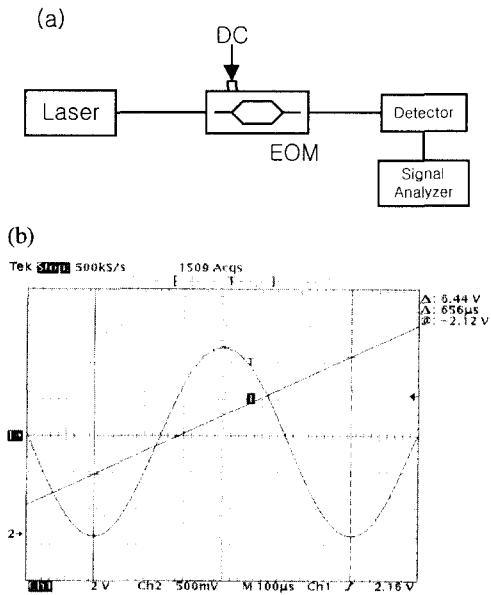


그림 7. (a)  $LiNbO_3$  변조기의 전달 함수를 구하기 위한 실험 장치 형태, (b) 가해진 DC 전압에 따른 변조기의 전달 함수

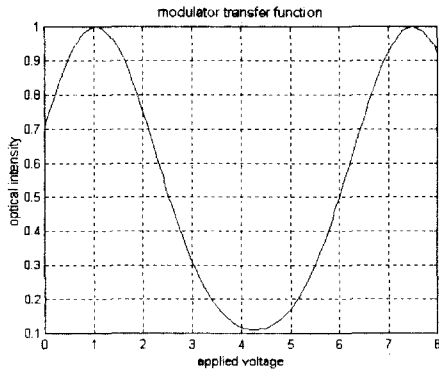


그림 8.  $LiNbO_3$  전기 광 변조기 전달 함수

수 있으며, 그 형태는 그림 7(b)와 같다. 그림 8은 전기 광 변조기 전극에 적용된 전기 구동 신호의 타이밍과 변조 전압 함수로서의 전기 광 변조기 전송 강도를 보여주는 것으로, 그림에서  $LiNbO_3$  변조기의 바이어스 점이 정해지며, 그때의 전압은 ~2.5V이다.

2) 브릴루앙 이득 계수 측정 실험 및 결과 고찰

그림 9는 BGS를 측정하기 위한 실험 장치로, 광원으로 사용된 외부 캐비티 레이저(External Cavity Laser : 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 아이솔레이터를 통과하여 감쇠기로 향한다. 이 때, 시험 광섬유에 가해지는 입력 파워는 브릴루앙을 발생시키기 위해 식(5)에 의해 3.7726mW로 브릴루앙 임계값 이상으로 주어진다. 여기서 아이솔레이터는 간섭을 피하기 위한 것이고, 감쇠기는 광섬유에 가해지는 입력 신호에 대한 초기 값을 조정하기 위한 것이다. 따라서, 감쇠기를 통과한 신호는  $LiNbO_3$  전기 광 변조기를 향하게 되는데, 실험에 사용된 전기 광 변조기는 편극 유지 단일 모드 광섬유를 사용하는  $LiNbO_3$  전기 광 변조기로, 변조기에 가해지는 입력은 DC 바이어스와 RF 신호이며 바이어스 tee를 사용하여 변조기의 같은 전극에 두 신호를 가한다. 또한 펌프파와 브릴루앙 광의 가간섭 혼합시 편극이 일치하지 않을 경우 발생하는 이득저하를 막기 위해 편극조절기를 사용하여 최대이득이 얻어지도록 편극 상태를 제어하였다. 후방 산란된 신호는 광 검출기(PD)에 의해 검출된 다음 컴퓨터에 의해 해석되었다. 실험에 사용된 시험 광섬유는 광통신 시스

템, 광케이블, 데이터 전송 네트워크에서 “기준” 광섬유로 간주되는 Corning SMF-28™ CPC 6 단일 모드 광섬유를 사용하였다.

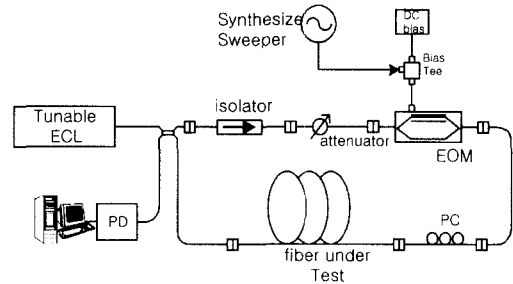


그림 9. BGS 측정을 위한 실험 장치

1550nm 파장에서 186kHz 선폭을 가지는 파장 가변 ECL을 사용하여 주파수에 따른 BGS를 측정했다. 실험에 사용된 광섬유는 10.560km 기준 광통신용 광섬유( $\alpha=0.30dB/km$ , 코어 직경 10.5 $\mu m$ )이며, 측정은 실내 온도(25°C)에서 광섬유에 어떠한 스트레인도 가하지 않은 상태에서 수행하였다. 식(6)에서 알 수 있듯이, 브릴루앙 이득 계수는 브릴루앙 반치폭  $\Delta\nu_B$ 의 함수이고  $\Delta\nu_B$  또한 BGS를 통해 알 수 있다. 그리고 식(11)을 통해, 주파수에 따른 출력 강도는 입력되는 펌프 강도  $I_p(0)$ 와 광섬유 출력 단에서 초기에 발생하는 Stokes 강도  $I_s(0)$ 에 의해 결정된다. 그러므로 브릴루앙 이득 계수는 입력 펌프 강도와 초기 Stokes 강도에 영향을 받는다.

그림 10은 입력되는 펌프 파워가 4.406mW이고 초기에 발생하는 Stokes 파워가 10 $\mu W$ 인 경우 나타나는 BGS이다. 이 경우, 그림에서 보는바와 같이 실험으로 관측한 값과 그 시험에서 구해진 값으로 구한 이론치가 일치하지 않음을 알 수 있다. 그림

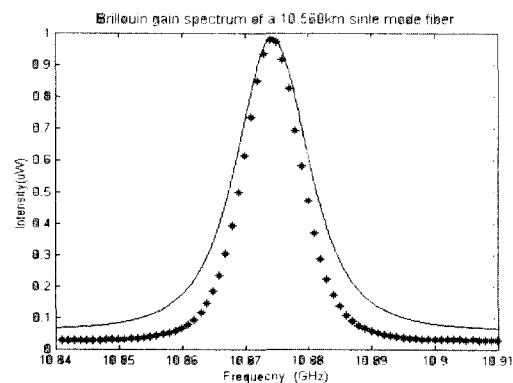


그림 10. 입력 파워가 4.406mW, 초기 Stokes 파워가 10 $\mu W$ 인 경우의 BGS

11은 그림 10과 마찬가지로 조건에서 초기에 발생하는 Stokes 신호를  $0.3414\mu\text{W}$ 로 둔 경우이고 그림 12는 가해진 입력 펌프 파워가  $7.943\text{mW}$ , 초기에 발생하는 Stokes 파워가  $0.3141\mu\text{W}$ 인 경우에도 마찬가지로 실험치와 이론치가 차이가 없을 수 있다.

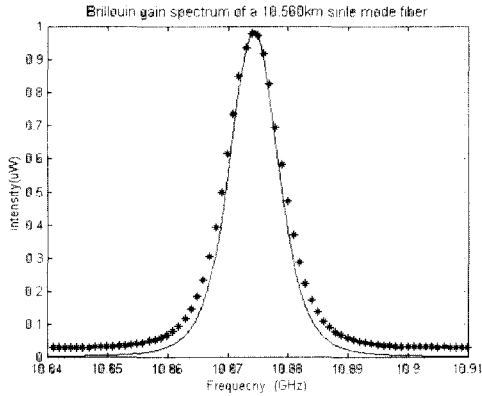


그림 11. 입력 파워가  $4.406\text{mW}$ , 초기 Stokes 파워가  $0.3414\mu\text{W}$ 인 경우의 BGS

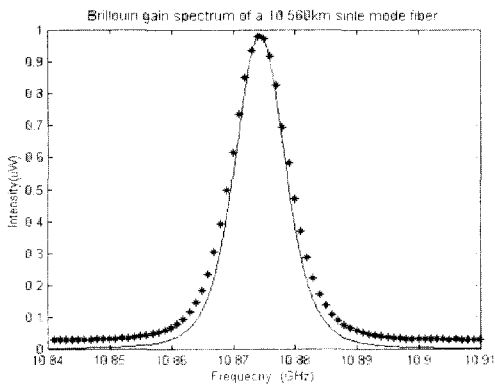


그림 12. 입력 파워가  $7.943\text{mW}$ , 초기 Stokes 파워가  $0.3141\mu\text{W}$ 인 경우의 BGS

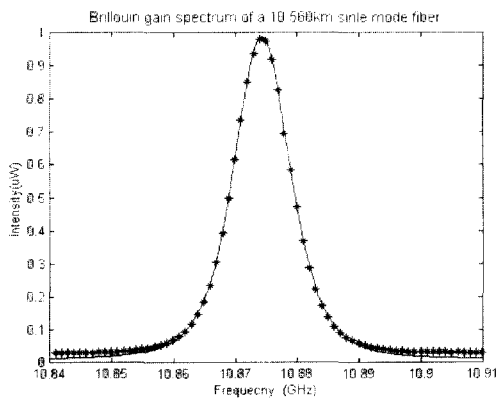


그림 13. 입력 파워가  $4.406\text{mW}$ , 초기 Stokes 파워가  $1.564\mu\text{W}$ 인 경우의 BGS

하지만, 그림 13은 ECL에서 시험 광섬유로 가해진 펌프 강도  $I_p$ 를  $4.406\text{mW}$ , 전기 광 변조기를 통과 하여 시험 광섬유의 다른 끝 쪽으로 가해지는 Stokes 강도  $I_s$ 가  $1.564\mu\text{W}$ 일 경우에 BGS를 구한 것이다. 그림 13에서 보는 것처럼, 식(6)을 이용하여 이론적으로 구한 BGS와 실험으로 측정된 BGS의 형태는 거의 일치한다. 이때, 측정된  $\Delta\nu_B$ 는  $28.3\text{MHz}$ 이었고, 브릴루앙 주파수 천이  $\nu_B$ 는  $1.55\mu\text{m}$  파장에서  $10.8743\text{GHz}$ 로 측정되었다. 또한, 브릴루앙 이득 계수  $g_0$ 는 식(7)을 이용하여 얻어지며  $1550\text{nm}$ 에서  $1.5430 \times 10^{-11}\text{m/W}$ 이었다.

### V. 결론

광통신 시스템에서 전송매체인 광섬유는 매우 큰 전송 대역폭을 가지므로 여러 개의 전송 채널들을 다중화하여 하나의 광섬유로 전송할 수 있는 다중화 전송기술은 초고속 광대역 전송망의 실현을 위해 매우 중요하다. 그러한 고밀도 파장분할 다중방식(DWDM) 광시스템에서 발생할 수 있는 비선형 현상 중 하나인 유도 브릴루앙 산란은 낮은 입력 파워 레벨에서도 발생할 수 있기 때문에 광전송 시스템에 큰 영향을 주는 현상이다. 그러므로 고풍력의 신호를 광섬유에 입사시켜 광전송 시스템의 전송 거리를 길게 하기 위해서는 광섬유에서 발생하는 유도 브릴루앙 산란에 대한 고려가 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 광섬유 내에서 발생하는 유도 브릴루앙 산란 신호에 대한 이론을 기술하고 유도 브릴루앙 산란 신호를 실험을 통해 확인하였다. 후방 산란된 브릴루앙 산란 신호는 이론상으로 그 값이  $10.9\text{GHz}$ 이었으며, 시간 영역과 주파수 영역에서 실험으로 구한 브릴루앙 산란 신호는  $10.8825\text{GHz}$ 로서 그 값이 이론과 일치함을 확인하였다. 또한 DWDM 광전송 시스템에서 광섬유에서 발생하는 유도 브릴루앙 산란 임계값을 알아보기 위해, BGS를 측정하였다. 이때  $\text{LiNbO}_3$  전기 광 변조기와 하나의 레이저 원만을 사용하였으며, 이로부터 브릴루앙 이득 계수  $g_0$ 를  $1.5430 \times 10^{-11}\text{m/W}$ 으로 구했다. 이는 기존 광통신 파장 대역인  $1550\text{nm}$ 에서 기존 광섬유를 이용하여 구한 브릴루앙 이득 계수를 통해 브릴루앙 임계값을 구할 수 있으며, 이를 이용하여 광전송 링크에서 광통신 시에 발생할 수 있는 제한 요소인 브릴루앙 신호를 억제할 수 있다.



참고 문헌

[1] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, New York : Academic, 1995.

[2] D. Cotter, "Stimulated Brillouin scattering in monomode optical fiber," *J. Opt. Commun.*, vol. 4, no. 1, pp. 10-19, 1983.

[3] Marc Niklès, Luc Thévenaz, Philippe-Alain Robert and Jean-Pierre von der Wiold, "Optical sampling using wideband electrooptic modulators," *Optical Engineering*, vol. 34. no. 7, pp. 2078-2083, 1995.

[4] T. Horiguchi, T. Kurashima, and Y. Koyamada, "Measurement of temperature and strain distribution by Brillouin frequency shift in silica optical fibers," *SPIE vol. 1797 Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensor II*, 1992.

[5] M. Niklès, L. Thévenaz, and P. A. Robert, "Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers," *J. Lightwave Technology*, vol. 15, pp. 1842-1851, 1997.

[6] C. McIntosh, A. Yeniay, J. Toulouse, and J.-M. P. Delavaux, "Stimulated Brillouin Scattering in Dispersion-Compensating Fibers," *Optical Fiber Technology* 3, pp. 173-176, 1997.

[7] O. Ogawa, T. Kato, and M. Kamikato, "Technique for measuring the dynamic strain on an optical fiber based on Brillouin ring amplification," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 2, pp. 234-242, 1999.

[8] K. Inoue, "Brillouin threshold in an optical fiber with bidirectional pump lights," *Optics Commun.*, vol. 120, pp. 34-38, 1995.

[9] R. S. Krishnan, *Nature*, pp. 933, 1950.

[10] D. Heiman, D. S. Hamilton, and R. W. Hellwarth, "Brillouin scattering measurements on optical glasses," *Phys. Rev. B.*, vol. 19, pp. 6583, 1979.

[11] N. L. Rowell, P. J. Thomas, H. M. van Driel, and G. I. Stegeman, "Brillouin spectrum of single-mode optical fibers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 34, p. 139, 1979.

[12] L. Chen and X. Bao, "Analytical and numerical

solutions for steady state stimulate Brillouin scattering in a single mode fiber," *Optics Commun.*, vol. 152, pp. 65-70, 1998.

한 영 옥(Young Ok Han)

정회원



1999년 2월 : 창원대학교  
전자공학과 학사  
2001년 2월 : 창원대학교  
전자공학과 석사  
<주관심 분야> 광통신,  
광섬유 센서

최 평 석(Pyung Suk Choi)

정회원



1978년 2월 : 성균관대학교  
전자공학과 학사  
1980년 2월 : 연세대학교  
전자공학과 석사  
1985년 2월 : 연세대학교  
전자공학과 박사

1979년 3월 ~ 1986년 2월 : 유한공업전문대학 전자과  
조교수

1986년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 전자공학과 교수  
<주관심 분야> 광신호처리, 광섬유 센서

은 재 정(Jae Jung Eun)

정회원



1982년 2월 : 연세대학교  
전자공학과 학사  
1986년 2월 : 연세대학교  
전자공학과 석사  
1994년 2월 : 연세대학교  
전자공학과 박사

현재 : 창원대학교 전자공학과 교수

<주관심 분야> 광섬유 센서, 광계측, ESPI, 광신호  
처리