

## 두 대의 펄스 레이저를 사용한 Brillouin OTDA의 이론적 분석

홍용현 · 이호준<sup>†</sup>

호서대학교 정보통신공학과

Ⓞ 336-795 충남 아산시 배방면 세출리 165

(2007년 4월 16일 받음, 2007년 6월 14일 수정본 받음)

두 대의 펄스 레이저를 사용한 BOTDA(Brillouin optical time-domain analysis)의 이론적 연구가 수행되었다. 비록 펄스 펌프 펄스 주기 동안 한 점의 정보만을 측정할 수 있지만 시스템의 동적 범위 성능은 광섬유 길이가 140 km이고 스톡스(Stokes) 전력이 1 mW일 때 펄스와 CW 레이저를 사용한 시스템 보다 5 dB 큰 것으로 분석되었다.

주제어 : Fiber optics, Fiber optics sensors, Nonlinear fiber optics, Fiber measurements, Stimulated Brillouin scattering

### I 서 론

광섬유의 손실 특성을 측정하기 위해 후방 레일리 산란(Rayleigh scattering)을 시간 영역에서 측정하는 OTDR(optical time-domain reflectometry)이 1976년 개발되었으나<sup>[1]</sup>, 그 후 보다 큰 신호 대 잡음 비를 얻기 위하여 광 펄스와 반대 방향으로 진행되는 CW 광 사이에 발생하는 브릴루앙 산란(Brillouin scattering)<sup>[2,3]</sup>을 이용한 BOTDA가 개발되었다.<sup>[4]</sup>

자연 브릴루앙 산란(SPBS: spontaneous Brillouin scattering)을 이용하는 BOTDR(Brillouin optical time-domain reflectometry) 방식<sup>[5]</sup>은 하나의 펄스 펌프 레이저로 구성되며 BOTDA(Brillouin optical time-domain analysis) 방식<sup>[6,7]</sup>은 일반적으로 펄스 펌프와 CW 스톡스 레이저로 구성된다. BOTDR 방식과 BOTDA 방식은 펄스 형태의 펌프 레이저를 사용하여 광섬유 내에서 발생하는 브릴루앙 산란 광을 시간 영역에서 관찰하는 방식으로 공간 분해능이 펌프 광원의 펄스 폭에 의해 결정된다. 두 방식 모두 장거리 계측이 가능하고 광섬유 전체 길이에 걸쳐 분포 측정이 가능하다는 장점을 가진다. BOTDA 방식의 경우 피 측정 광섬유의 양단에 레이저를 연결하여야 하는 단점을 가지고 있으나 BOTDR 보다 큰 신호 대 잡음 비를 가지고 광섬유의 손실 분포를 측정할 수 있기 때문에 평균화 횟수 감소로 인한 계측 시간의 단축이 가능하다. 또한 높은 산란 광의 파워로 인해 BOTDR 방식보다 계측 거리를 길게 할 수 있다. 하지만 프로브 광원이 추가되고 펌프 광원과 프로브 광원 사이의 주파수 차를 브릴루앙 주파수 천이 값과 일치시키는 과정이 필요하다.

기존의 OTDA의 관한 연구에서는 브릴루앙 산란을 이용하여 장거리 BOTDA를 구성하기 위하여 펄스-CW 레이저를 사용한 경우에 대해 동적 범위 성능을 이론적으로 연구하였고, 저 출력 레이저를 이용한 광섬유 손실의 측정에서 높은 동적 범위를 갖는 것을 보였다.<sup>[6]</sup> 본 연구에서는 펄스-펄스

레이저를 사용한 경우에 대한 이론 식을 유도하고 시뮬레이션하여 광섬유의 손실 측정을 위한 동적 범위를 구하였다. 이 결과를 OTDR, 펄스-CW를 사용하는 브릴루앙 OTDA와 비교하여 설명하였다. 또한 광섬유 길이에 따른 측정 가능한 광섬유 거리와 스톡스 전력에 따른 측정 가능한 광섬유 거리를 시뮬레이션하였다.

### II. 두 대의 펄스 레이저를 사용한 브릴루앙 OTDA 시스템

BOTDA의 기본 구조는 그림 1(a)와 같다. 단일 주파수 레이저 1이 펄스를 발생하고 레이저 2는 레이저 1과 브릴루앙 천이 주파수만큼 차이가 나는 펄스 광을 발생하고 발생된 펄스들은 광섬유 내부를 서로 다른 방향에서 진행한다. BOTDA는 두 가지 방법으로 동작된다. 첫 번째 경우는 레이저 1이 브릴루앙 증폭을 위한 펌프로 동작하는 방식이고 두 번째 경우는 레이저 2가 브릴루앙 증폭을 위한 펌프로 동작하는 방식이다. 첫 번째 방식은 레이저 1이 광섬유 내에서 후방 브릴루앙 이득을 발생시킨다. 그림 1(b)에 나타난 것과 같이 브릴루앙 이득 대역폭의 중심 주파수는  $\nu$ 로부터 스톡스 주파수  $\nu-\nu_B$ 로 감소 천이된다. 레이저 2의 주파수가 브릴루앙 천이 주파수와 같을 때 레이저 2의 광은 레이저 1과 브릴루앙 산란을 통하여 증폭된다. 증폭된 레이저 2의 광은 빔 분리기와 광 주파수 필터를 통해 시간 축 상에서 측정된다. 광 주파수 필터는 단지  $\nu-\nu_B$ 의 광만을 통과시키고 레이저 1의 후방 레일리 산란을 포함하는 다른 주파수로 입사되는 광을 제거한다. 광 검파기에 도착하는 레이저 2의 광은 그림 2에 나타난 것과 같다. 광섬유 종단에서 증폭된 레이저 2의 광은 광섬유에 레이저 1의 펄스가 입사된 후 시간  $t=2z/v$ 이 경과된 후에 광섬유 입력단에 도착한다. 여기서  $v$ 는 광섬유 내에서 광의 속도이다. 레이저 2의 광의 변화는 광섬유 내에서 위치에 따라, 펌프와 스톡스 사이의 상호 작용에 의하여 발생한다.

레이저 2의 광이 펌프로 사용되었을 때(case 2) 브릴루앙 손

<sup>†</sup> E-mail: hojoon@hoseo.edu

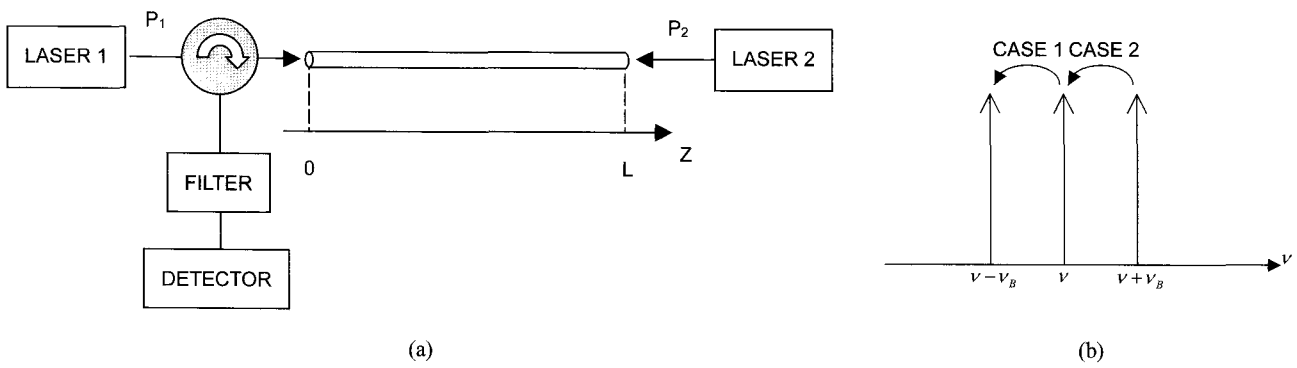


그림 1. (a) BOTDA의 기본 구조, (b) 브릴루앙 주파수 천이.

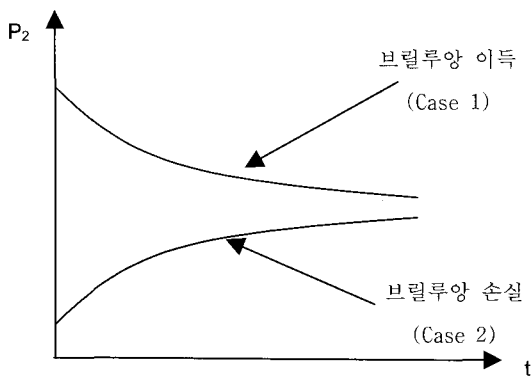


그림 2. 광 수신기의 검파 신호.

일이 발생하며 레이저 2와 레이저 1의 주파수는 각각  $\nu + \nu_B$ ,  $\nu$ 이다. 레이저 2의 광이 펌프로 사용되고 레이저 1의 광이 스톱스로 사용된 경우로 볼 수 있다. 첫 번째 방식과 달리 레이저 2의 광 전력은 레이저 1의 펄스 광과 브릴루앙 현상이 일어나는 동안 감소한다. BOTDA의 성능은 브릴루앙 현상의 양에 의존한다.

브릴루앙 산란 과정의 설명을 위하여 각각 광섬유 입력 단으로 입사되는 레이저와 출력 단으로 입사되는 레이저의 광 강도  $I_1$ 과  $I_2$ 로 표시되는 두 개의 결합 파동 방정식은<sup>[2]</sup>

$$\frac{d}{dz} I_1 = -g_B I_1 I_2 - \alpha I_1 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dz} I_2 = -g_B I_1 I_2 + \alpha I_2 \quad (2)$$

여기서

$$g_B = \frac{\gamma g_0 (\Gamma_B / 2)^2}{[\Omega_B - \Omega]^2 + (\Gamma_B / 2)^2} \quad (3)$$

이고  $z$ 는 광섬유의 입력 단으로부터 거리이고,  $g_0$ 는 브릴루앙 스펙트럼 중심에서 이득 인자이다.  $\alpha$ 는 광섬유 손실 계수,  $\Gamma_B$ 는 브릴루앙 선폭,  $\Omega$ 는 레이저들 사이의 주파수 차이이고,

그리고  $\Omega_B$ 는 온도나 스트레인에 따라 변화하는 브릴루앙 천이 주파수이다.  $\gamma$ 는 편광 인자이고 두 레이저 빔 사이의 편광에 따른 이득 변화를 나타낸다. 식 (1)과 (2)는 엄격히 말해 단지 정상 상태에서만 적용된다. 이것은 펄스 폭이 좁은 레이저를 사용하는 센서 시스템에서는 사용이 제한된다. 그러나 10 ns 정도인 포논 수명과 비교하여 긴 펄스를 사용하는 시스템에 대해 이 방정식이 사용될 수 있다.

브릴루앙 이득 인자  $g_B$ 가 양수인 경우 광 전력은 레이저 1로부터 레이저 2로 결합된다. 이 과정을 브릴루앙 이득이라 부른다. 반면에  $g_B$ 가 음수일 경우 레이저 2로부터 레이저 1로 전력 이동이 발생하며 이것을 브릴루앙 손실이라 부른다.<sup>[7]</sup>

식 (2)에서 펄스 폭의 반이 광섬유 내에서 점유하는 거리  $d$ 에 대해 적분하면

$$\int_{I_2(z)}^{I_2(z+d)} \frac{dI_2(z)}{I_2(z)} = \int_z^{z+d} [-g I_1(z) + \alpha] dz \quad (4)$$

이 된다.

펌프와 스톱스를 모두 펄스를 사용하였을 때 레이저 2를 만나기 전에 광섬유 위치에 따른 레이저 1의 강도는 광섬유 손실에만 관계하기 때문에

$$I_1(z) = I_1(0) \cdot \exp[-\alpha z] \quad (5)$$

이고, 식 (4)에 식 (5)를 대입하고 적분하면

$$\frac{I_2(z)}{I_2(z+d)} = \exp \left[ \frac{\kappa \exp(-\alpha z)}{\alpha} \{1 - \exp(-\alpha d)\} - \alpha d \right] \quad (6)$$

이다. 여기서  $k = g \alpha I_1(0)$ 이다.

식 (6)은  $I_2(z) = I_{dc} \pm I_b^+(z)$ 로 표현되며  $I_{dc}$ 는 레이저 1의 펄스와 레이저 2의 펄스가 작용하지 않았을 때  $z=0$  점에도 착하는 스톱스 광의 강도를 나타내고,  $I_b^+(z)$ 는 레이저 1의 펄스와 브릴루앙 상호작용에 의한 레이저 2의 광 강도 변화를 나타낸다.

신호 대 잡음 비의 계산을 위해서 Ge-APD가 사용되었다.

$I_2, I_{dc}, I_b (= I_2 - I_{dc})$  그리고  $I_n$ 은 각각 광 펄스에 의해 증폭된 레이저 2, 증폭되지 않은 레이저 2, BOTDA에서 광 신호 그리고 SPBS를 APD에서 수신하였을 때의 광전류이다.

$$I_2(z) = \eta_c \eta_d (e/h\nu) P_2^+(z) \quad (7)$$

$$I_{dc}(z) = \eta_c \eta_d (e/h\nu) P_{dc}(z) \quad (8)$$

$$I_b(z) = \eta_c \eta_d (e/h\nu) P_b^+(z) \quad (9)$$

$$I_n(z) = \eta_c \eta_d (e/h\nu) P_{sp}(z) \quad (10)$$

여기서  $\eta_c$ 는 광섬유-검파기 결합 계수,  $\eta_d$ 는 APD 양자 효율,  $e$ 는 전자의 전하량이고,  $h$ 는 Plank 상수이다. 그리고 SPBS 전력은 다음과 같이 주어진다.<sup>[8]</sup>

$$P_{sp}(z) = P_1(0) \cdot \exp(-2\alpha_1 z) \alpha_b S \nu W / 2 \quad (11)$$

여기서, 절대 온도 300°K에서  $\alpha_b = 0.31/\lambda^4$  (dB/km) 이고, 여기서  $\lambda$ 는  $\mu\text{m}$  단위의 파장이다.<sup>[9]</sup>  $S = (\lambda/n)^2 / 4\pi A_{eff}$ 는 후방 포획 비,  $\nu$ 는 광섬유 내에서 광속도,  $n$ 은 광섬유 코어의 실효 굴절률, 그리고  $W$ 는 광 펄스 폭이다.

광 검파기에서 수신된 브릴루앙 신호 대 잡음 비는<sup>[10,11]</sup>

$$SNR = 4(I_b M)^2 / (\sqrt{\sigma_1^2} + \sqrt{\sigma_2^2}) B \quad (12)$$

이고, 여기서

$$\sigma_1^2 = 2e(I_2 + I_n)M^{2+x} + (4I_2 I_n / \Delta\nu_b + 2I_n^2 / \Delta\nu_b + RIN \cdot I_2^2)M^2 + \sigma_d^2 \quad (13)$$

$$\sigma_0^2 = 2eI_{dc}M^{2+x} + RIN \cdot I_{dc}^2 M^2 + \sigma_d^2 \quad (14)$$

$$\sigma_d^2 = 2eI_{d0} + 2eI_{dm}M^{2+x} + \langle i_t^2 \rangle \quad (15)$$

이고, 여기서 RIN은 레이저 2의 상대 강도 잡음이다. 두 번째 괄호의 첫 항과 두 번째 항은 레이저 2와 SPBS 사이에 비트 잡음과 SPBS와 그 자체 잡음을 나타낸다.

본 논문에서는 펄스-CW 레이저를 사용한 BOTDA의 경우와 펄스-펄스 레이저를 사용한 경우가 비교되며 이 때  $I_2(z)$ 는 다음 식과 같다.<sup>[7]</sup>

$$\frac{I_2(z)}{I_2(z+u)} = \exp \left[ \frac{\kappa \exp(\beta)}{\alpha} \left\{ \frac{E_2(\beta x_1)}{x_1} - \frac{E_2(\beta x_2)}{x_2} \right\} - \alpha u \right] \quad (16)$$

여기서  $\beta = gI_2(L)\exp(-\alpha L) / \alpha$ ,  $E_2$ 는 2계 exponential 적분 이고  $x_1 = \exp[\alpha z]$ 와  $x_2 = \exp[\alpha(z+u)]$ 이다.

OTDR의 신호대 잡음비는<sup>[6]</sup>

$$SNR = 4(I_s' M)^2 / (\sqrt{2eI_s' + 2eI_s' M^{2+x} + \sigma_d^2} + \sqrt{\sigma_d^2}) B \quad (17)$$

$$I_s'(z) = \eta_c \eta_d (e/h\nu) P_r(z) \quad (18)$$

이고, 여기서 OTDR에서 얻어진 광 신호 전력은 브릴루앙 산란과 비슷하게

$$P_r(z) = P_1(0) \cdot \exp(-2\alpha_1 z) \alpha_r S \nu W / 2 \quad (19)$$

이다. 여기서  $\alpha_r$ (np/m)는 레일리 산란 손실 계수이고 순수 실리카 코어 광섬유일 때  $\alpha_r = 0.75/\lambda^4$  (dB/km) 이고, 여기서  $\lambda$ 는  $\mu\text{m}$  단위의 파장이다.<sup>[12]</sup>

### III. BOTDA 시뮬레이션

본 연구의 시뮬레이션에서는 1.55  $\mu\text{m}$  광통신 시스템에서 사용되는 광섬유의 전형적인 값을 사용하여 시뮬레이션하였다. 광섬유 길이  $L$ 이 150 km, 광섬유 코어 실효 면적  $A_{eff}$ 가 64  $\mu\text{m}^2$ , 굴절률  $n$ 이 1.45, 브릴루앙 선폭  $\Delta\nu_B$ 가 35 MHz, 광섬유 손실  $\alpha$ 가 0.2 dB/km, 편광 인자  $\gamma$ 가 0.5, 브릴루앙 이득  $g_0$ 가  $3.6 \times 10^{-12}$  m/W이고 임계 펌프 강도  $P_0^{cr}$ 은 0.8 mW로 계산된다. 그리고 펌프와 스톱스 펄스 폭  $W$ 는 100 ns이고 펌프 파워  $P_1$ 과 프루브  $P_2$ 가 각각 1.5 mW, 0.4 mW이다. 상대 강도 잡음  $RIN = -130$  dB/Hz, 광섬유-검파기 결합 계수  $\eta_c$ 는 0.5, APD 양자 효율  $\eta_d$ 가 0.75, APD 증폭율  $M$ 이 6, APD 과잉 잡음 지수  $x$ 가 0.95, APD 암전류  $I_{d0}$ 가 0.3  $\mu\text{A}$ , 수신기 대역 폭  $B$ 가 1 MHz, 입력 잡음 전류  $\sqrt{\langle i_t^2 \rangle} = 2pA/\sqrt{\text{Hz}}$  이다.

그림 3은  $P_2$ 가 각각 1 mW, 그리고 0.1 mW일 때 레이저 전력  $P_1$ 의 거리에 따른 변화를 나타낸다. 점선은 펄스-펄스를 사용했을 때 브릴루앙 이득과 감소의 경우 광섬유 길이에 따라 레이저 전력이 선형적으로 감소하며 실선은 펄스-CW의

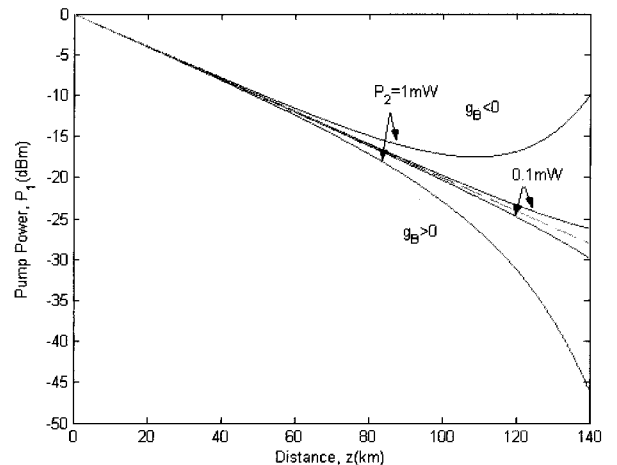


그림 3. 레이저 전력  $P_1$ 의 거리에 따른 변화.  $P_2 = 1$ , 그리고 0.1 mW (실선: 펄스-CW 사용 OTDA 그리고 점선: 펄스-펄스 사용 OTDA).

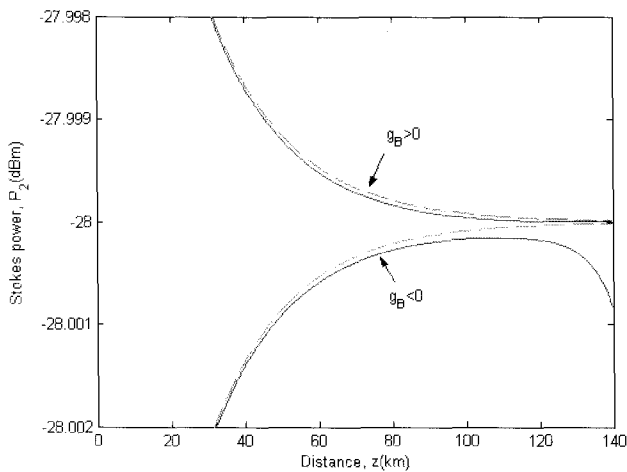
경우를 나타내며 브릴루앙 이득의 경우 펄스-펄스의 경우보다 아래쪽에 나타나며 브릴루앙 손실의 경우는 광섬유 길이에 따라 레이저 전력이 서서히 감소하거나 오히려 증가한다.

그림 4는 펄스 폭은 100 ns이고  $P_2(L)$ 이 각각 (a) 1 mW, 그리고 (b) 0.1 mW일 때 브릴루앙 이득과 손실이 발생할 때  $P_2(z)$  신호를 나타낸다. 실선은 펄스-CW를 점선은 펄스-펄스를 나타낸다. 두 경우 모두 브릴루앙 이득일 경우 펄스-펄스의 경우 더 큰 신호가 얻어짐을 알 수 있고, 브릴루앙 손실일 경우 펄스-CW의 경우가 더 큰 신호를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그리고  $P_2$ 가 클 때 광섬유 종단에서의 정확한 정보를 얻을 수 있다.

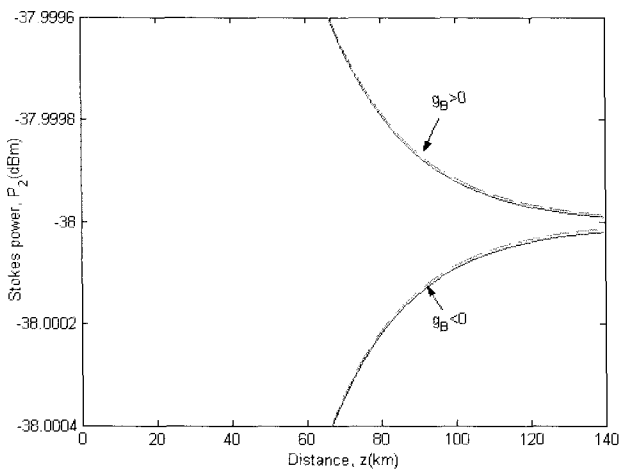
그림 5는  $P_2$ 가 각각  $P_2=1$ , 그리고 0.1 mW일 때 브릴루앙 신호 전력  $P_B$ 의 거리에 따른 변화를 나타낸다. 쇄선은 펄스-펄스 레이저를 사용하였을 때를 나타내며 실선은 펄스-CW를 나타내고 양의 브릴루앙 이득을 가질 경우 쇄선의 아래쪽에 나타나며 음의 브릴루앙 이득을 가질 경우 쇄선의 위쪽에 나타난다. 펄스-펄스 레이저를 사용하였을 때는 직선으로 나타나고 펄스-CW인 경우는 음의 브릴루앙 이득일 때 신호 대 잡음 비가 좋으

를 나타내고 양의 브릴루앙 이득을 가질 경우 쇄선의 아래쪽에 나타나며 음의 브릴루앙 이득을 가질 경우 쇄선의 위쪽에 나타난다. 펄스-펄스 레이저를 사용하였을 때는 직선으로 나타나기 때문에 이 신호로부터 거리에 따른 손실을 쉽게 얻을 수 있다. 펄스-CW인 경우는  $P_2$ 가 작을 때 쇄선에 가까우나 정확한 측정을 위하여  $P_B(z) = \sqrt{P_B^+(z)P_B^-(z)}$ 로부터 손실을 계산하여야 하는 불편한 점이 있다.

그림 6은  $P_2$ 가 각각  $P_2=1$ , 그리고 0.1 mW일 때 거리에 따른 신호 대 잡음 비이다. 쇄선은 펄스-펄스 레이저를 사용하였을 때를 나타내며 실선은 펄스-CW를 나타내고 양의 브릴루앙 이득을 가질 경우 쇄선의 아래쪽에 나타나며 음의 브릴루앙 이득을 가질 경우 쇄선의 위쪽에 나타난다. 펄스-펄스 레이저를 사용하였을 때는 직선으로 나타나고 펄스-CW인 경우는 음의 브릴루앙 이득일 때 신호 대 잡음 비가 좋으



(a)



(b)

그림 4. 브릴루앙 이득과 손실 신호 펄스 폭은 1 ms.  $P_2$ =(a) 1, 그리고 (b) 0.1 mW (실선: 펄스-CW 사용 OTDA 그리고 점선: 펄스-펄스 사용 OTDA).

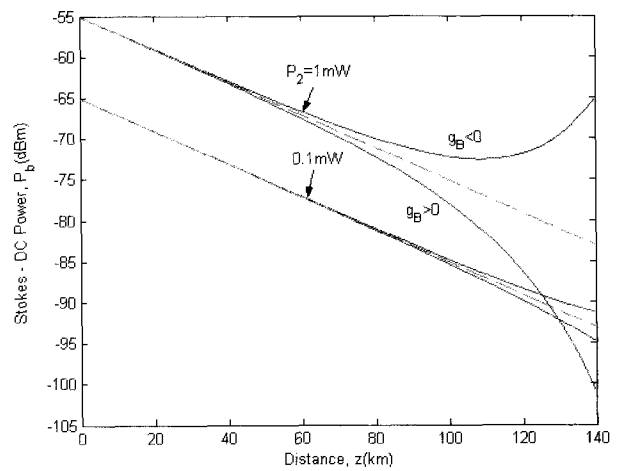


그림 5. 브릴루앙 신호 전력,  $P_B$ 의 거리에 따른 변화.  $P_2=1$ , 그리고 0.1 mW (실선: 펄스-CW 사용 OTDA 그리고 점선: 펄스-펄스 사용 OTDA).

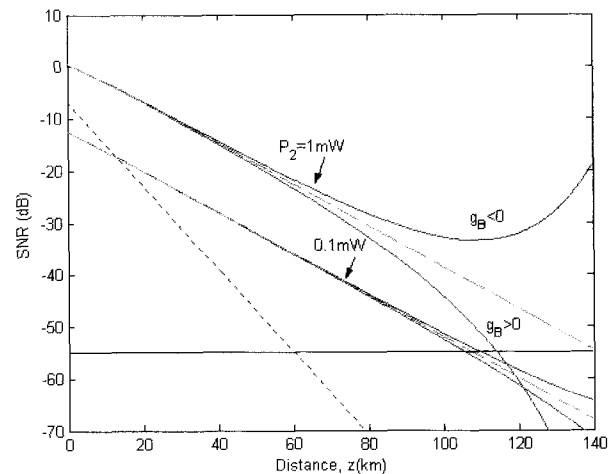


그림 6. 거리에 따른 신호 대 잡음비.  $P_2=1$ , 그리고 0.1 mW (점선: 레일리 산란, 실선: 펄스-CW 사용 OTDA 그리고 쇄선: 펄스-펄스 사용 OTDA).

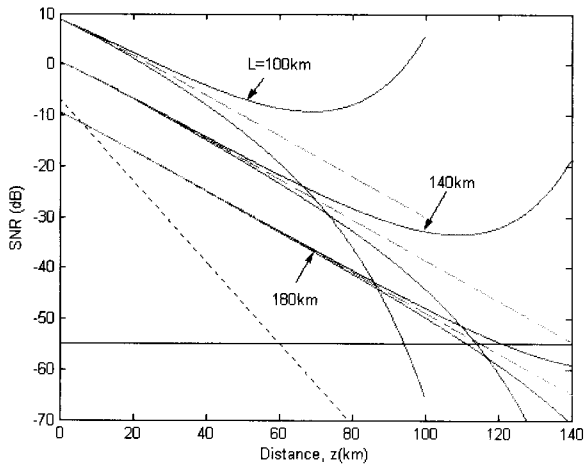


그림 7. 거리에 따른 신호 대 잡음비. 광섬유 길이  $L=100, 140,$  and  $180$  km (점선: 레일리 산란, 실선: 펄스-CW 사용 OTDA 그리고 쇄선: 펄스-펄스 사용 OTDA).

나 양의 브릴루앙 이득일 때 신호 대 잡음 비가 나쁜 것을 볼 수 있다.  $3 \times 10^5$  회 평균을 구했을 때  $55$  dB의 신호 대 잡음 비가 개선되기 때문에 그림 6에서  $SNR = -55$  dB를 나타내는 선을 표시하고 이 값을 측정 한계로 가정한다. 점선은 OTDR을 나타내었고, 쇄선은 펄스-펄스 레이저, 실선은 펄스-CW 레이저를 사용한 BOTDR을 나타낸다. 레일리 산란에 의한 OTDR의 경우 측정 거리가 약  $60$  km 정도 되며  $P_2 = 1$  mW 일 때 양의 이득을 갖는 펄스-CW 레이저를 사용한 경우 약  $115$  km까지 측정 가능하다.  $140$  km 부근에서는 펄스-펄스 레이저와 음의 이득을 갖는 펄스-CW 레이저를 사용한 경우만 측정 한계 내에 있다. 펄스-펄스 BOTDA의 경우  $25$  km의 측정 거리 향상을 보여  $5$  dB정도 동적 범위 성능이 큰 것을 알 수 있다.

그림 7은 광섬유 길이  $L=100, 140,$  그리고  $180$  km일 때 거리에 따른 신호 대 잡음 비를 나타낸다. 광섬유 길이를 길게 할수록 전반적으로 신호 대 잡음 비가 감소 함을 볼 수 있다. 광섬유 길이에 따라 신호 대 잡음 비가  $-55$  dB 이상 되는 거리가 변화한다.

그림 8에서는 광섬유 길이에 따라 신호 대 잡음 비가  $-55$  dB 이상 되는 거리를 표시하였다. O는 펄스-펄스의 경우이고 X는 음의 브릴루앙 이득을 갖는 펄스-CW의 경우를 나타낸다. 펄스-펄스의 경우는 거리가  $140$  km일 때 전체 광섬유에 대하여 신호 대 잡음 비가  $-55$  dB 이상이었고 광섬유 길이가 길어질수록 측정 가능한 거리가 감소하여  $200$  km의 광섬유의 경우  $100$  km 정도 되는 것을 알 수 있다. 펄스-CW를 사용하였을 때는  $160$  km의 광섬유에서  $117$  km까지 측정 가능한 것을 알 수 있다.

그림 9는 광섬유 길이가  $L=140$  km일 때 스톡스 전력에 따른 신호 대 잡음 비가  $-55$  dB 이상인 광섬유 거리를 나타내었다. 펄스-펄스의 경우에 스톡스 전력을 증가시켜서 측정 가능한 광섬유의 길이가 증가 되지만 펄스-CW의 경우는 특정한 스톡스 전력에서 최대값을 갖는 것을 볼 수 있다. 펄스-

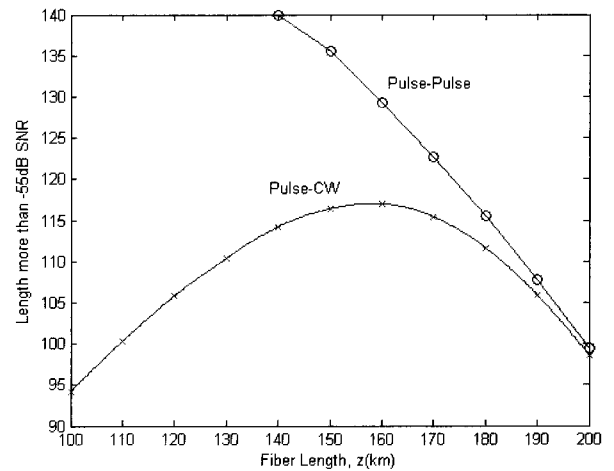


그림 8. 광섬유 길이에 따른 신호 대 잡음 비가  $-55$  dB 이상 얻을 수 있는 광섬유 거리.  $P_2 = 1$  mW (X: 펄스-CW 사용 OTDA 그리고 O: 펄스-펄스 사용 OTDA).

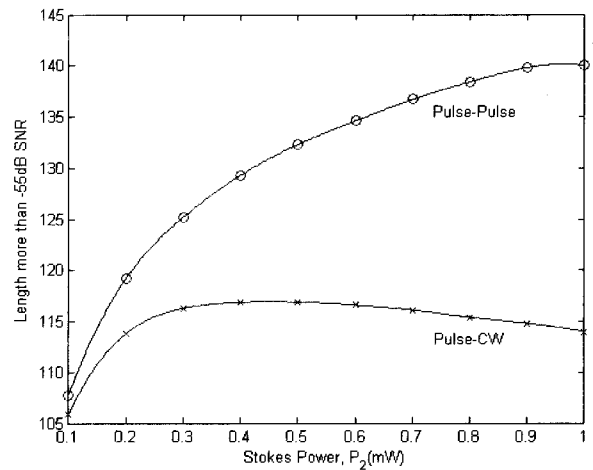


그림 9. 스톡스 전력에 따른 신호 대 잡음 비가  $-55$  dB 이상 얻을 수 있는 광섬유 거리.  $L=140$  km (X: 펄스-CW 사용 OTDA 그리고 O: 펄스-펄스 사용 OTDA).

펄스 레이저를 이용한 BOTDA는 펄스-펄스를 사용하기 때문에 한번 펌프 펄스 발생시에 한 점의 손실 정보 밖에는 취득할 수 없는 단점이 있으나 신호 대 잡음 비가 특히 광섬유의 종단 부분에서 크다는 장점이 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 펄스-펄스 레이저를 사용한 BOTDA에 대한 특성을 시뮬레이션하였고 대부분의 BOTDA에서 일반적으로 사용되는 펄스-CW 레이저를 사용한 BOTDA와 특성을 비교 하였다. 펄스-CW 레이저를 사용한 BOTDA는 펌프 펄스 주기 내에서 전체 피 측정 광섬유의 손실 정보를 모두 취득할 수 있으나 펄스-펄스 레이저를 사용한 BOTDA는 한 점의 손실 정보 밖에는 취득 할 수 없다. 그러나 펄스-CW BOTDA에서는 광섬유의 손실과 광섬유 전 구간에 걸친 브릴루앙 현

상에 의해 감소한 펌프 펄스가 광섬유 종단에 도착하기 때문에 종단에서 큰 신호를 산란 시킬 수 없다. 광섬유 길이가 140 km이고 레이저 2가 1 mW일 때 펄스-펄스 BOTDA의 경우 펄스-CW BOTDA 보다 25 km의 측정 거리 향상을 보여 5 dB의 동적 범위가 큰 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 수행한 시뮬레이션을 통하여 펄스-펄스 BOTDA의 경우 장거리 측정이 가능하다는 것을 알 수 있다.

### 감사의 글

본 논문은 (주)동민정보통신의 위탁과제에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] M. K. Barnoski and S. M. Jensen, "Fiber waveguides: A novel technique for investigating attenuation characteristics," *Appl. Opt.*, vol. 15, no. 9, pp. 2112-2115, 1976.
- [2] Govind P. Agrawal, "Nonlinear fiber optics" (OPTICS AND PHOTONICS), pp. 355-384, 2002.
- [3] T. Kurashima, T. Horiguchi, and M. Tateda, "Thermal Effects of Brillouin Gain Spectra in Single-Mode Fibers" *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, no. 10, Oct. 1990.
- [4] T. Horiguchi and M. Tateda, "Optical fiber attenuation investigation using stimulated Brillouin scattering between a pulse and a continuous wave," *Opt. Lett.*, vol. 14, no. 8 pp. 408-410, 1989.
- [5] K. Shimizu, T. Horiguchi, Y. Koyamada, and T. Kurahima, "Coherent self-heterodyne detection of spontaneously Brillouin-scattered light waves in a single-mode fiber," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 3, pp. 185-187, 1993.
- [6] T. Horiguchi and M. Tateda, "BOTDA-Nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 7, no. 8, pp. 1170-1176, 1989.
- [7] X. Bao, J. Dhliwayo, N. Heron, D. J. Webb, and D. A. Jackson, "Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 7, pp. 1340-1348, 1995.
- [8] S. D. Personick, "Photon probe-An optical fiber time-domain reflectometer," *Bell syst. Tech. J.*, vol. 56, no. 3, pp. 355-366, 1977.
- [9] T. C. Rich and D. A. Pinnow, "Evaluation of fiber optical waveguides using Brillouin spectroscopy," *Appl. Opt.*, vol. 52, no. 6, pp. 1376-1378, 1974.
- [10] S. D. Personick, "Applications for quantum amplifiers in simple digital communication systems," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 52, no. 1. pp. 117-133, 1973.
- [11] Y. Aoki, "Properties of the Raman amplifiers and their applicability to digital optical communication systems," *J. of Lightwave Technol.*, vol. LT-6, no. 7, pp. 1225-1239, 1988.
- [12] T. Miya, A. Kawana, Y. Terunuma, and T. Hosaka, "Fabrication of single-mode fibers for 1.5- $\mu$ m wavelength region," *Trans. IECE Japan*, vol. E63, no. 10, pp. 514-519, 1980.

## Theoretical Study of Brillouin OTDA using Two Pulse Lasers

Yonghyun Hong and Hojoon Lee<sup>†</sup>

*Dept. of Information Communication, Hoseo Univ. 165 Sechul-ri, Baebang-Myun, Asan 336-795, Korea.*

<sup>†</sup>*E-mail: hojoon@hoseo.edu*

(Received April 16, 2007, Revised manuscript June 14, 2007)

A theoretical study of Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) using two pulse lasers is performed. Even though a point detection is made for a pump pulse period, the dynamic range of BOTDA using two pulse lasers is approximately 5 dB more than that of a pulse and a CW laser when the fiber length is 140 km and the Stokes power is 1 mW.

OCIS code : 060.2310, 060.2370, 060.4370, 060.2300, 290.5900.