

## 라만 증폭기에서 광섬유 구조에 따른 성능 분석

박재형 · 민범기 · 박남규<sup>†</sup>

서울대학교 전기·컴퓨터공학부

Ⓣ 151-742 서울시 관악구 신림동 산56-1

(2001년 1월 8일 받음, 2001년 3월 9일 수정본 받음)

이 논문에서는 광섬유의 구조에 따라 증폭기 이득과 이중 레일레이 교차 잡음의 함수로서의 라만 광섬유 증폭기의 성능을 살펴보았다. 라만 증폭은 높은 펄프 파워를 필요로 하는 비선형 현상이므로 작은 유효 면적을 갖는 광섬유를 사용하면, 펄프 파워의 효율면에서 장점을 가질 수 있다는 것을 쉽게 생각할 수 있다. 여기서 쉽게 간과할 수 있는 사실이 레일레이 후방 산란에 대한 것이다. 레일레이 후방 산란 역시 광섬유의 유효 면적이 작아짐에 따라 증가하므로, 증폭기의 이득 증가에 따른 잡음의 증가도 고려해야 한다. 더구나, 이중 레일레이 산란은 증폭 매질인 광섬유 내에서 두 번 반사하면서 더욱 크게 증폭된다. 그러므로, 이와 같은 이중 레일레이 산란에 의한 시스템 성능 저하가 크게 문제가 될 수 있다. 그러므로, 라만 광섬유 증폭기에서 광섬유 구조의 변화에 대해서, 얻어지는 이익(증가된 이득)과 시스템 페널티(이중 레일레이 교차 잡음)에 대한 분석이 필요하다. 이를 바탕으로 적절한 광섬유를 디자인 함으로써 라만 광섬유증폭기에서 시스템 페널티 없이 라만 증폭 효율을 증가시킬 수 있다.

분류코드 : OC.010, FO.020, LO.010, NL.010.

### I. 서 론

최근 대용량의 장거리 전송을 위해서 넓고 평탄한 이득 대역폭을 가지는 DWDM 시스템용 광증폭기가 요구되고 있다. 이를 위해서 C-L Band EDFA를 이용한 연구들이 많이 진행되어 왔고, 이러한 상용화되어 있는 EDFA보다도 더 넓은 대역폭을 얻기 위한 방법들이 많이 연구되어 왔다.<sup>[1,2]</sup> 이런 연구들 중에서 라만 광섬유증폭기가 가지고 있는 장점은 다른 광대역 증폭기들에 비해 넓고 유연성 있는 이득 대역폭을 가지고, 시스템 SNR에 영향을 미치는 잡음 지수가 낮다는 것이다.<sup>[3]</sup> 이러한 라만 광섬유증폭기를 이용해서 높은 효율과 넓은 이득 대역폭을 얻기 위해서는 충분한 파워의 펄프 광원의 선택과 더불어 적절한 광섬유의 선택이 중요하다. 라만 증폭은 높은 세기의 빛을 필요로 하는 비선형 현상이기 때문에, 작은 유효 면적을 갖는 광섬유가 펄프의 효율 면에서 좋다는 것을 쉽게 생각할 수 있다. 그러므로, 코어 반지름이 줄어들거나 인덱스 차이가 커질수록 라만 광섬유증폭기는 낮은 문턱값에서 동작하고, 주어진 펄프 파워에 대해서도 더 큰 이득을 얻을 수 있다.<sup>[4]</sup> 여기에서 쉽게 놓칠 수 있는 것이 유효 면적이 작아짐에 따라 레일레이 후방 산란이 커진다는 사실이다. 더군다나 이중 레일레이 산란(DARB)은 라만 광섬유증폭기 내에서 두 번을 반사되어 진행하면서 신호에 비해 더 큰 이득을 얻게 되므로, 광섬유의 구조에 따라 더욱 큰 영향을 받게 된다. 그러므로, 광섬유의 구조 변화에 따라 이득이 증가하면서 더욱 커진 레일레이 산란의 효과를 고려해야 한다.

본 논문에서는 유도 라만 산란(SRS)과 라만 광섬유증폭기의

이득 및 잡음에 대해 소개를 하고, 단일 모드 광섬유에서의 후방 레일레이 산란을 일으키는 현상에 대해 살펴보겠다. 그리고, 시뮬레이션을 통해 광섬유 구조에 따른 이득의 변화와 이중 레일레이 산란에 의한 시스템 페널티와의 관계에 대해 분석하겠다.

### II. 이론적 배경

#### 2.1. 유도 라만 산란(Stimulated Raman Scattering)

유도 라만 산란은 빛과 분자 진동 사이에서 일어나는 비선형적인 파라메트릭한 상호 작용이다. 광섬유에 입사된 빛은 일부가 산란되어 낮은 주파수로 전이된다. 이러한 현상을 라만 효과라고 하고, 이렇게 해서 생긴 자발적인 라만 산란은 입사된 빛의 약  $10^{-6}$  정도만 스토크스 주파수로 산란된다. 하지만, 강한 레이저 신호광이 입사되었을 경우에 유도 라만 산란이 일어나게 되면, 입사된 빛의 약 10% 정도가 스토크스 주파수로 전이되게 된다. 그림 1에서처럼, 주파수  $w$ 의 광자가 들어가서 진동에너지에 해당하는  $\hbar w_v$ 의 에너지를 가진 광학적 포논이 생성되고,  $w_s = w - w_v$ 로 주파수 전이가 된 광자가 생성된다. 그러므로, 이와 같은 유도 라만 산란 현상을 이용하여, 라만 광섬유레이저나, 라만 광섬유증폭기들의 구현이 가능하게 된다.

#### 2.2. 라만 광섬유증폭기의 원리 및 라만 광섬유증폭기 내에서의 이득 및 잡음

광섬유는 강한 펄프를 넣어주었을 때, 이 펄프의 라만 이득 스펙트럼의 대역폭 내에서 입사된 신호를 증폭시킬 수 있다. 유도 라만 산란이 이 증폭을 일으키는 현상이므로, 이것을 라

<sup>†</sup>E-mail: nkpark@plaza.snu.ac.kr

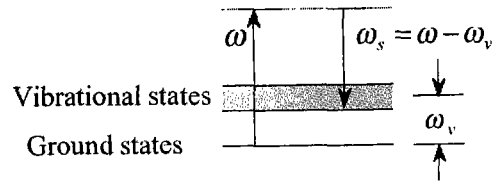
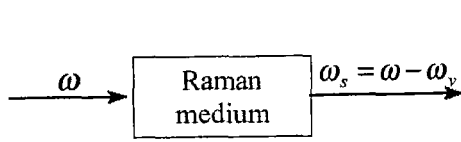


그림 1. 유도 라만 산란(Stimulated Raman Scattering).

만 광섬유증폭기라고 부른다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, 광섬유의 비결정질의 특성 때문에, 진동 에너지 레벨이 넓은 대역폭을 형성한다. 그러므로, 입사된 펄스 파워에 대해서 약 12 THz 정도의 넓은 이득 대역폭을 얻을 수 있다. 그림 2는 일반적인 광섬유에서 펄스 파장  $\lambda_p = 1.55 \mu\text{m}$  일 때의 라만 이득 스펙트럼을 보여준다.

라만 이득 상수  $g_R$ 는 펄스 파장  $\omega_p$ 에 선형적으로 비례한다. 광학적인 이득  $g$ 가 펄스 세기  $I_p$ 에 비례하기 때문에, 라만 광섬유증폭기의 이득은 다음 식과 같이 얻을 수 있다.

$$g(\omega) = g_R(\omega) (P_p/a_p) \tag{1}$$

여기서,  $P_p$ 는 펄스 파워이고,  $a_p$ 는 광섬유 내에서 펄스 빔의 유효 면적이다. 그림 2에서 볼 수 있는 것처럼, 최대 이득을 가지는 주파수는 약 14 THz 정도 전이되어 있고, FWHM으로 정의되는 이득 대역폭은 약 6 THz 정도가 됨을 알 수 있다. 이 그림에서 보이는 것처럼 라만 광섬유증폭기는 넓은 이득 대역폭을 가지고, 펄스 파장에 따른 이득 대역폭의 유연성을 가지고 있다. 그리고, 몇 개의 다른 파장의 펄스를 동시에 사용함으로써 더욱 넓은 대역의 평탄한 이득을 얻을 수 있다는 것이 이 라만 광섬유증폭기의 장점이다. 하지만, 이러한 라만 광섬유증폭기는 광섬유의 비선형 현상을 이용하기 때문에 큰 파워의 펄스를 넣어 주어야 충분한 이득을 얻을 수 있다. 이러한 문제는 위 식 (1)에서 볼 수 있듯이 라만 이득을 얻는 광섬유의 유효 면적을 줄임으로써 해결할 수 있고, 광섬유의 길이를 길게 함으로써 같은 펄스 파워를 가지고 어느 정도 더 큰 이득을 얻을 수 있다. 하지만, 광섬유의 길이가 길어지면, 광섬유 손실에 의한 이득 감소가 일어나게 되므로 이 두 가지

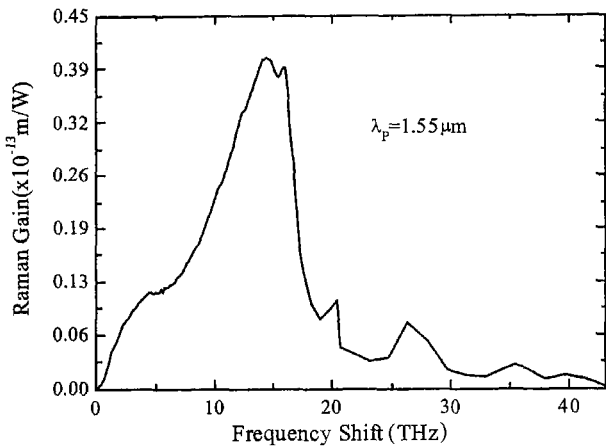


그림 2. 측정된 라만 이득 스펙트럼.

를 함께 고려해 주어야 한다.

그러면, 라만 광섬유증폭기에서 이득이 포화되는 경우에 대해서 살펴보자. 라만 광섬유증폭기에서는 신호의 파워  $P_s$ 가 커짐에 따라 펄스가 고갈되기 시작한다. 이러한 펄스 파워의 감소 때문에 식 (1)에서 알 수 있듯이 라만 이득이 감소하고, 이득 포화가 일어나게 된다. 광섬유 길이에 따라 이러한 신호와 펄스 파워의 변화는 다음 두 개의 결합된 식을 푸는 것을 통해 알 수 있다.<sup>[5]</sup>

$$\frac{dP_s}{dz} = -\alpha_s P_s + \frac{g_R}{a_p} P_p P_s \tag{2}$$

$$\frac{dP_p}{dz} = -\alpha_p P_p - \frac{\omega_p g_R}{\omega_s a_p} P_s P_p \tag{3}$$

여기서  $\alpha_s$ ,  $\alpha_p$ 는 각각 주파수  $\omega_s$ ,  $\omega_p$ 에서의 광섬유 손실을 나타낸다.

우선, 작은 신호의 경우에 대해 생각해 보면, 식 (3)에서 둘째 항은 무시할 수 있고, 펄스 파워를  $P_p(z) = P_0 \exp(-\alpha_p z)$ 라고 놓으면, 길이  $L$ 에서의 신호의 파워는 다음과 같이 된다.

$$P_s(L) = P_s(0) \exp(g_R P_0 L_{eff}/a_p - \alpha_s L) \tag{4}$$

여기서  $L_{eff}$ 는 다음과 같이 정의되고,

$$L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha_p L)]/\alpha_p \approx \frac{1}{\alpha_p} \tag{5}$$

$\alpha_p L \gg 1$  일 때,  $L_{eff}$ 는 위의 식과 같이 근사할 수 있다. 이 때, 증폭기의 이득은 다음과 같이 된다.

$$G_A = \frac{P_s(L)}{P_s(0) \exp(-\alpha_s L)} = \exp(g_0 L) \tag{6}$$

여기서 소신호 이득  $g_0$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$g_0 = g_R \left( \frac{P_0}{a_p} \right) \approx \frac{g_R P_0}{a_p \alpha_p L} \tag{7}$$

이제 이득 포화가 일어났을 경우에 대해 생각해 보자. 신호와 펄스의 광섬유 내에서의 손실이 같다고 가정을 하면, 대략적인 포화 이득을 얻을 수 있다. 식 (1)과 식 (2)에서  $\alpha_s = \alpha_p$ 라고 놓으면, 포화 이득  $G_s$ 는 다음 식과 같다.

$$G_s = \frac{1 + r_0}{r_0 + G_A^{-(1+r_0)}} \tag{8}$$

여기서  $r_0$ 는 증폭기 입력 단에서 신호 대 펄스 파워의 비이다.

$$r_0 = \frac{\omega_p P_s(0)}{\omega_s P_p(0)} \quad (9)$$

이러한 특징을 가지는 라만 광섬유증폭기는 앞에서 언급한 것처럼, 펌프 광원의 파장에 따른 유연하고 넓은 이득 대역폭을 가진다는 장점을 가지고 있다. 하지만, 라만 광섬유증폭기의 가장 큰 단점은 큰 펌프 파워를 필요로 한다는 것이다. 그러므로, 라만 광섬유증폭기의 상용화를 위해서는 낮은 펌프 파워에서 충분한 라만 이득을 주는 광섬유가 필요하다. 이를 위해서는 코어에 도핑하는 물질을 바꾸거나 도핑 농도를 높임으로써 라만 이득 효율을 높이는 방법이 가능하다. 또한 라만 증폭은 비선형 현상이므로, 광섬유의 코어 반지름을 작게 하면, 비선형 효과를 높임으로써 더 큰 라만 이득을 얻을 수 있다. 하지만, 코어가 작아지면 다른 비선형 현상들도 같이 커지게 되므로 시스템 성능에 영향을 줄 수 있다. 코어가 작아질 경우에 레일레이 산란에 영향을 주는 back capture fraction이 커지게 되므로 레일레이 산란이 커지게 된다. 더불어 이중 레일레이 산란도 커지게 되고, 이 산란된 빛이 증폭 매질인 광섬유 내에서 이중 경로를 지나면서 증폭되기 때문에 시스템 페널티가 더욱 커지게 된다. 3장에서 광섬유 코어 크기 및 인덱스에 따른 이득 및 잡음에 대한 성능을, 시뮬레이터를 통해 도출한 결과를 바탕으로 분석하겠다.

### 2.3. Simulator

이 논문에서는 다양한 광섬유 구조에 대해서 이득과 이중 레일레이 산란 교차 잡음에 대한 페널티를 조사하였다. 이 과정에서 V 파라미터는 일정하게 고정하고, 코어 사이즈와 코어와 클래딩 사이의 인덱스 차이를 다르게 한 광섬유들에 대해서 조사하였다. 그런데, 실제로 이런 파라미터들을 가지는 광섬유들은 상용화된 것으로 구하기 어려우므로, 시뮬레이터를 이용하여 검증해 보았다.

이 논문에서 사용한 시뮬레이션 방식은 average power analysis의 적용이 가능하도록 라만 광섬유증폭기의 전송 방정식을 재구성하여, 그 결과 동일한 정확도와 급격히 단축된 소요 시간을 유지하면서 시스템의 성능을 예측할 수 있는 Average Power Raman Amplifier Modelling이다.<sup>[6]</sup> 라만 광섬유증폭기는 큰 대역폭과 긴 광섬유 길이가 고려되어야 하므로, 상관된 상미방 방정식을 직접 이용하는 현재의 해석기법들은 정확한 해석을 하려면 대단히 많은 시간을 필요로 한다. 그래서 본 연구에서 사용된 시뮬레이터에서는 반도체 광증폭기와 EDFA에서 이용된 average power analysis<sup>[7]</sup>를 라만 광섬유증폭기에서의 새로운 해석 기법으로 도입하여 수치 해석 시간을 10~100배 이상 비약적으로 단축한, 집약된 증폭 시스템 사양을 구현하였다.

기존의 라만 시뮬레이터에는 이중 레일레이 산란의 효과를 고려한 것이 없었다. 실제로 이중 레일레이 산란은 in-band 잡음이기 때문에, 신호 자신과 더해져 있는 형태로 나타난다. 그러므로, 실험으로 이중 레일레이 산란을 구하려면, 일종의 시간 축 상에서의 측정 방법을 사용하여야 한다. 즉, 연속된 신호가 아니라, 펄스를 입력으로 넣어주고 이 때 생기는 교차

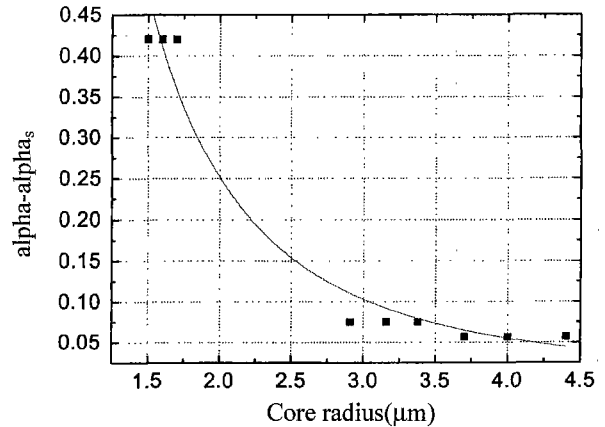


그림 3. 측정된 자료를 바탕으로 한 광섬유 손실 상수.

잡음 등을 측정해야 한다.<sup>[11]</sup> 이 논문에서는 시뮬레이터에서 이중 레일레이 교차 잡음에 필요한 인덱스를 따로 잡아주어서 전파방정식 상에서 풀어줌으로써 라만 광섬유증폭기 내에서 생성되는 이중 레일레이 산란 파워를 구하였고, 이를 바탕으로 이중 레일레이 교차 잡음을 계산하였다. 그리고, 이 시뮬레이터에서 레일레이 산란 상수  $\gamma$ 는 다음 장에서 구한 back capture fraction과 레일레이 산란 손실의 곱으로 표현되는 식 (13)을 이용하였다. 또한, 광섬유의 손실은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.<sup>[12]</sup>

$$\alpha = \alpha_s + \frac{2.542}{d^{2.2} \lambda^{1.8}} = \frac{(0.76 + 0.51 \Delta n)}{\lambda^4} + \frac{2.542}{d^{2.2} \lambda^{1.8}} \quad (10)$$

광섬유의 손실은 주로 레일레이 산란 손실과 광섬유 구조에 따른 손실 그리고, 자외선 손실과 적외선 손실 등의 합으로 나타난다. 여기서 시뮬레이션에 사용하는 대역은 자외선 손실과 적외선 손실이 작은 대역이므로 위와 같이 모델링하였다. 그림 3에 볼 수 있는 것처럼 실제 광섬유를 가지고 측정된 자료를 바탕으로 위의 식을 도출하였다.

## III. 광섬유 구조에 따른 라만 광섬유증폭기의 성능 분석

### 3.1. 광섬유 구조에 따른 이득과 Back Capture Fraction의 변화

라만 광섬유증폭기는 보통 10 km 정도 이상의 광섬유를 사용하고, 또 사용하는 펌프 파워가 상당히 크므로, 광섬유 내에서 일어나는 비선형 현상을 무시할 수 없게 된다. 그러므로, 라만 광섬유증폭기에서 레일레이 후방 산란의 효과는 시스템 성능에 무시할 수 없을 정도로 충분히 큰 영향을 미친다. 그림 4(a)에서 볼 수 있는 것처럼, 입사된 빛은 광섬유 내에서의 레일레이 산란에 의해서 반사되는 신호가 생기게 된다. 이 레일레이 산란에 의한 신호가 증폭되면서 펌프 파워를 소모하므로, 시스템 성능을 약간 감소시킨다. 더욱 심각한 것은 신호에 의한 이중 레일레이 산란이 in-band 교차 잡음으로 작용한다는 것이다. 이 현상은 데이터의 안전한 전송을 위하여 충분히 고려해 주어야 한다.<sup>[13]</sup>

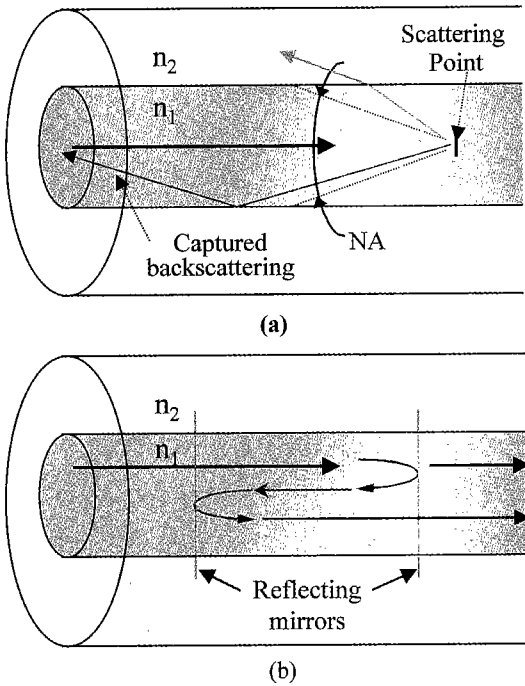


그림 4. (a) 광섬유 내에서의 레이징이 후방 산란, (b) 광섬유 내에서의 이중 레일레이 산란.

광섬유의 구조-광섬유의 유효 면적이나 코어와 클래딩 사이의 인덱스-가 달라질 경우에 라만 이득이 변하게 되고, 라만 펌프의 잡음으로 작용하게 되는 레일레이 후방 산란, 이중 레일레이 산란 등 또한 달라지게 된다. 그림 4(a)에서 볼 수 있듯이 광섬유 내에서 일어나는 레일레이 산란 중 상당 부분이 클래딩 바깥으로 새어나가고 일부만이 후방으로 산란되게 된다. 그림 4(b)에서는 이렇게 후방으로 레일레이 산란된 신호가 다시 레일레이 산란에 의해 신호와 같은 방향으로 진행하는 현상을 보여준다. 실제 이러한 이중 레일레이 산란에 의한 신호는 원래 진행되는 신호와 같은 파장을 가지고 같은 방향으로 진행하기 때문에, RIN과 같은 시스템 페널티로 작용하게 된다. 또한, 그림 4(b)처럼 레일레이 산란에 의한 반사에 의해 캐비티가 형성되므로, 시스템 노이즈에도 영향을 미치게 된다.

광섬유 구조에 따라 달라지는 레일레이 산란의 효과를 살펴 보기 위해서는 그림 4(a)에서 보이는 후방으로 산란되는 레일레이 산란의 비율을 구해야 한다. 이러한 레일레이 후방 산란의 back capture fraction과 레일레이 손실을 가장 구체적이고 기본적으로 표현한 식이 다음과 같다.<sup>[12,14]</sup>

$$S = \frac{3 (NA)^2 \int_0^\infty R \alpha_S(R) \Psi_N^4(R) dR}{4V^2 n^2 \int_0^\infty R \alpha_S(R) \Psi_N^2(R) dR \int_0^\infty R \Psi_N^2(R) dR} \quad (11)$$

$$\alpha_S = \frac{0.76 + 0.51 \Delta n}{\lambda^4 (\mu m)^2} \left[ \frac{dB}{Km} \right] \quad (12)$$

$$\gamma = S \alpha_S \quad (13)$$

여기서 S는 back capture fraction,  $\Psi_N$ 은 near field distribution,

$\alpha_S$ 와  $\gamma$ 는 레일레이 산란 손실과 레일레이 상수이다. V를 고정시킨 경우에, S는 NA와 광섬유 코어 반지름에 따라 달라진다. 또한, 레일레이 산란 손실  $\alpha_S$ 는  $\Delta n$ 에 대해 큰 영향을 받지 않으므로, 거의 파장 의존성만을 가지고 있다.

여기서는 단일 모드 광섬유를 가정하고, 균일한 산란 손실 분포를 가정하였다. 이러한 상황에서, back capture fraction은 다음과 같이 표현된다.

$$S = \frac{3 (NA)^2 \int_0^\infty R \Psi_N^4(R) dR}{4V^2 n^2 \left[ \int_0^\infty R \Psi_N^2(R) dR \right]^2} \quad (14)$$

또한, 스텝 인덱스 분포를 가지는 단일 모드 광섬유에서 near field distribution  $\Psi_N$ 은 다음 식처럼 잘 알려진 Bessel 함수가 된다.

$$\Psi_N(R) = \begin{cases} J_0(UR)/J_0(U), & R \leq 1 \\ K_0(WR)/K_0(W), & R \geq 1 \end{cases} \quad (15)$$

여기서  $W^2 = V^2 - U^2$ 이고, back capture fraction S는 다음과 같이 표현된다.

$$S = 3 \frac{W^4 J_0^4(U) (NA)^2 \left[ \int_0^1 R \frac{J_0^4(UR)}{J_0^4(U)} dR + \int_1^\infty R \frac{K_0^4(WR)}{K_0^4(W)} dR \right]}{V^6 J_1^4(U) n^2} \quad (16)$$

이 식에 의한 그림 5는 V와 코어 반지름의 함수로 계산된 back capture fraction을 보여준다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 일반적인 광섬유들이 가지는 V 값의 범위 내에서는 back capture fraction이 크게 차이가 나지 않고, V 값을 고정시킨 상태에서 코어 반지름을 줄이고 코어와 클래딩 사이의 인덱스 차이를 크게 해 주면, 레일레이 산란 중 광섬유 내에서 후방으로 진행되는 비율인 back capture fraction이 커짐을 알 수 있다. 이 계산된 값은 기존의 보고된 자료와 어느 정도 일치하고,<sup>[11]</sup> 또한 SMF, DSF, DCF들의 7개의 자료에 대해서 back-reflector와 OTDR을 이용해 측정된 값과 잘 맞는다.<sup>[15]</sup> 이 그림과 식 (13)에서 알 수 있는 것처럼 레일레이 상수는 코어 반지름과 코어와 클래딩의 인덱스 차이에 깊은 관련이 있다. 그러므로, 레일레이 산란과 이중 레일레이 산란에 의한

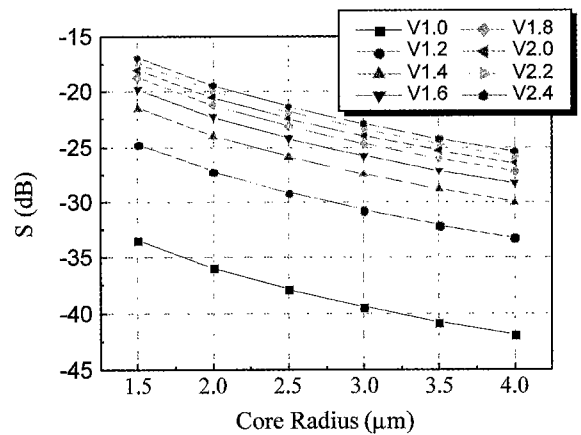


그림 5. 코어 반지름과 V에 대한 Back capture fraction.

잡음도 광섬유의 구조에 따라 큰 영향을 받을 수 있다.

**3.2. 라만 광섬유증폭기에서 광섬유 구조에 따른 이득 증가와 이중 레일레이 산란 교차 잡음에 의한 성능 감소**

다음 장의 그림 6(a)와 그림 6(b)는 시뮬레이션에 의해 얻어진, 여러 가지 광섬유 코어 크기에 대한 이득과 이중 레일레이 산란 교차잡음에 대한 관계를 보여준다. 코어 반지름이 다른 각각의 광섬유에 대해서 시뮬레이션을 통해서 얻어진 증폭기 이득과 이중 레일레이 산란에 의한 신호의 크기와 실제 전송하는 신호의 크기의 비인 in-band 교차 잡음에 대한 관계가 잘 나타나 있다.

이 그림은 균일 이득 근사 하에서의 해석 결과이다. 그림에서 데이터 포인트들이 있는 선은 라만 시뮬레이터의 시뮬레이션 결과이고, 점선은 식 (17)의 식에 의한 결과이다. 이 결과에서 라만 광섬유증폭기에서 사용된 광섬유의 길이는 15 km 이고, 펌프는 후방으로 넣어주었다. 그림 6(a)는  $V=2.2$  일 때이고, 그림 6(b)는  $V=1.8$  일 때의 시뮬레이션 결과이다. 이 두 개의 그림에서 데이터 포인트들 사이의 간격은 각각 100 mW의 펌프 증가를 의미한다. 또한, 그림에서 보이는 데이터 포인트들에서 시작하는 펌프 파워는 그림 6(a)에서 코어 반지름이 2.0  $\mu\text{m}$  일 때부터 4.0  $\mu\text{m}$  로 갈 때, 시작하는 펌프 파워는 200 mW에서 600 mW이고, 그림 6(b)에서는 2.0  $\mu\text{m}$  일 때,

300 mW, 2.5  $\mu\text{m}$  일 때, 400 mW 3.0  $\mu\text{m}$  일 때, 600 mW, 3.5  $\mu\text{m}$  일 때, 700 mW이고, 4.0  $\mu\text{m}$  일 때, 900 mW가 된다. 그러므로, 이 그림에서 작은 유효 면적을 가진 광섬유에 대해서 작은 펌프 파워의 증가만으로도 큰 이득 증가를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 여기서 이중 레일레이 산란은 라만 광섬유증폭기에서 신호가 한번 증폭되는 동안 두 번의 증폭과정을 거치기 때문에, 이중 레일레이 산란 교차잡음은 증폭기 이득이 증가함에 따라 어느 한도까지는 더 빠르게 증가한다. 또한, 코어 반지름이 줄어들 때, 레일레이 back capture fraction이 줄어들기 때문에, 이중 레일레이 산란 교차잡음은 더욱 빠르게 증가하게 된다. 또한, 여기서 시스템의 이중 레일레이 산란에 의한 power penalty는 다음 식 (18)를 통해 계산할 수 있다.<sup>[13,16]</sup>

$$Crosstalk_{DARB}(dB) = 10 \log \left( \frac{\gamma^2 L^2}{4(\ln G)^2} (G^2 - 2 \ln G - 1) \right) \quad (17)$$

$$Penalty(dB) = -10 \log \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{P_{DARB}(L)}{P_{Sig}} N Q^2 \right) \quad (18)$$

이 식에서  $G$ 는 광섬유 손실을 포함한 순수한 이득을 말하며,  $P_{DARB}$ 는 이중 레일레이 산란된 파워이고,  $N$ 은 증폭기의 개수를 말한다. 시스템에서 원하는 BER 여유를 충족시키기 위해, 이중 레일레이 산란 교차 잡음은 일정 값 이하로 유지되어야 한다. 한 개의 증폭기에서  $10^{-12}$  BER을 얻기 위해, 1 dB power penalty를 유발하는 이중 레일레이 산란 교차 잡음들은 그림 6(a)에 수평선으로 나타나 있다. 일반적으로 여러 개의 증폭기를 사용하는 시스템에서는 증폭기 하나 당 이중 레일레이 산란 교차잡음의 한계 값을 더 작게 유지해야 한다. 그러므로, 그림 6(a)로부터 코어 반지름에 따른 증폭기 이득과 시스템 페널티 사이의 상충 관계에 대해 알 수 있다.

다음 장의 그림 7은 라만 광섬유증폭기에서, 원하는 이득 하에서의 코어 반지름과 이중 레일레이 교차 잡음에 대한 결과이다. 이 그림에서 코어 반지름이 작아지면, 같은 이득을 얻기 위한 조건에서 이중 레일레이 교차 잡음이 커짐을 알 수 있다. 또한, 원하는 이득이 클 경우에 시스템 페널티가 커지고, 원하는 BER에 대한 파워 페널티 여유를 넘어설 수 있다. 그림에서 수평선은  $10^{-12}$ 의 BER을 얻기 위한 1 dB 파워

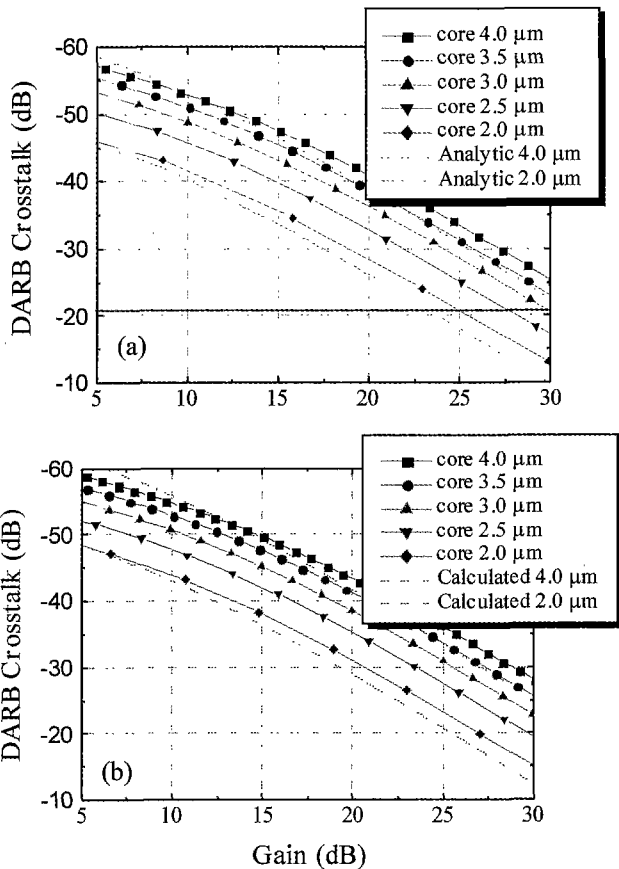


그림 6. 코어 반지름에 대한 이중 레일레이 교차 잡음. (a)  $V=2.2$ , (b)  $V=1.8$ .

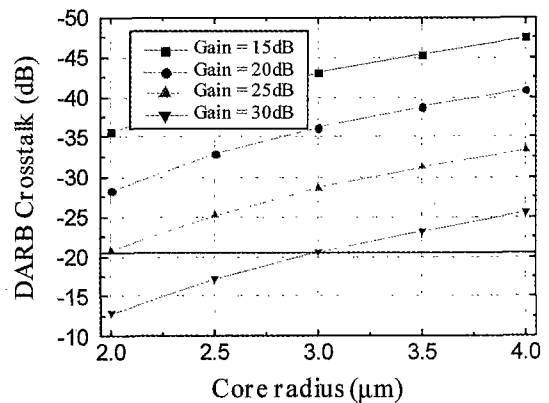


그림 7. 고정이득에서 코어 반지름과 이중 레일레이 잡음과의 관계.

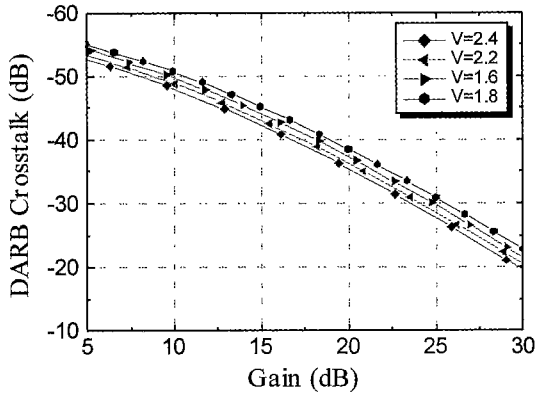


그림 8. V 파라미터에 대한 이중 레일레이 산란 교차잡음의 관계.

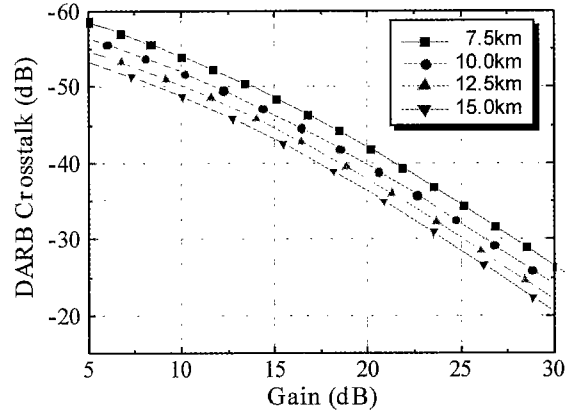


그림 9. 광섬유 길이에 따른 이중 레일레이 교차 잡음.

페널티를 나타내고(식 (18)에서 계산된 값), 원하는 이득이 30 dB일 경우에 라만 광섬유증폭기에 사용된 광섬유의 코어 반지름이 3.0 μm 이하로 작아지면, 원하는 BER을 얻기 위한 파워 페널티 여유를 초과하므로 결과적으로 정해진 시스템에서 BER이 나빠짐을 알 수 있다. 실제 전송 라인에서 다단 증폭기를 사용할 경우에는 식 (18)에서 알 수 있는 것처럼, 더 작은 이득 조건에서도 원하는 BER을 얻기 위한 파워 페널티가 커지기 때문에, 심각한 시스템 페널티로 작용할 수 있음을 알 수 있다.

$$V = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx (2\pi/\lambda) a n_1 \sqrt{2\Delta} = (2\pi/\lambda) a NA = kaNA \quad (19)$$

V와 NA의 관계를 식 (14)에 대입하면, back capture fraction은 다음과 같이 된다.

$$S = \frac{3}{4k^2 a^2 n^2} \frac{\int_0^\infty R \psi_N^4(R) dR}{\left[ \int_0^\infty R \psi_N^2(R) dR \right]^2} \quad (20)$$

이 식에서 알 수 있는 것처럼 V 파라미터가 back capture fraction에 미치는 영향은 인덱스 분포에 미치는 작은 영향이므로, 실제로 광섬유를 선택함에 있어서 V 파라미터는 이중 레일레이 산란 교차 잡음에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다(일반적인 광섬유인 경우). 그림 8은 이와 같은 결과를 보여 준다.

라만 광섬유 증폭기에서 실제로 이득 및 시스템 성능에 영향을 미치는 중요한 파라미터 중 하나가 증폭기 매질로 사용된 광섬유의 길이이다. 그림 9는 광섬유 코어 사이즈를 3 μm로 고정시킨 상태 하에서 길이를 다르게 했을 때, 증폭기 이득과 이중 레일레이 교차 잡음이 어떻게 달라지는 지를 보여 준다. 이 그림에서도 앞의 그림 5(a), 그림 5(b)에서와 같이 각각의 데이터 포인트들은 100 mW의 펌프 증가를 의미한다. 이 그림에서는 광섬유 길이를 길게 하면 작은 펌프에서 더 큰 이득을 얻을 수 있지만, 이중 레일레이 교차 잡음은 커짐을 볼 수 있다. 이 그림에서 이득이 가장 작을 때의 펌프 파워들은 각각의 경우 모두 400 mW이다.

그림 5(a)와 그림 9의 사실을 종합해 볼 때, 광섬유의 코어

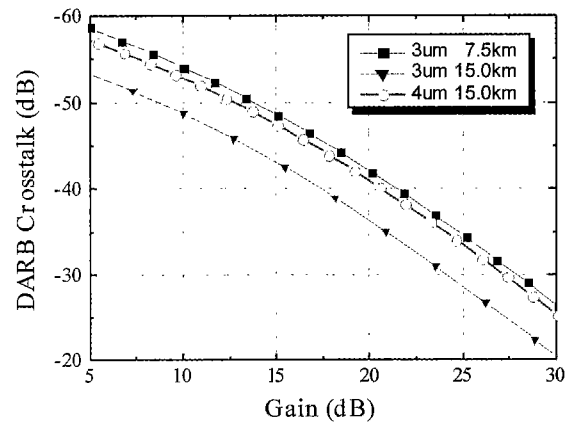


그림 10. 광섬유길이와 코어반지름에 따른 이중 레일레이 교차 잡음.

사이즈를 줄여서 더 큰 이득을 얻음으로써 나빠진 이중 레일레이 교차 잡음을 광섬유의 길이를 줄여 줄으로써 어느 정도 해결할 수 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 시스템 페널티를 작게 유지하면서 높은 이득을 얻는 라만 광섬유 증폭기를 설계하기 위해서는 작은 back capture fraction을 갖는 광섬유의 디자인과 함께 증폭기에 사용되는 광섬유의 길이도 적절히 선택함으로써 최적의 증폭기를 설계할 수 있다. 그림 10을 보면, 광섬유 코어 반지름을 줄이고 적절한 길이의 광섬유를 사용함으로써 더 적은 파워의 펌프로 동일한 이득과 이중 레일레이 교차 잡음 값을 가지는 증폭기를 설계할 수 있음을 알 수 있다.

이 그림에서 보면, 3 μm의 코어 반지름을 가지는 광섬유 15 km로 구성된 라만 광섬유 증폭기의 이득과 이중 레일레이 산란 교차 잡음에 대한 관계를 볼 수 있다. 이 상태에서 광섬유의 길이를 7.5 km로 줄임으로써 교차 잡음을 줄인 경우와 광섬유의 코어 반지름을 크게 함으로써 교차 잡음을 줄인 경우를 보면 시스템 성능이 비슷하게 나옴을 볼 수 있다. 하지만, 증폭기 이득이 15 dB일 경우에 두 가지 경우에 펌프 파워를 비교해 보면, 3 μm, 7.5 km인 경우에는 1 W의 펌프 파워가 필요하고, 4 μm, 15 km인 경우에는 1.7 W의 펌프 파워가 필요하다. 그러므로, 광섬유를 짧게 사용해서 이중 레일레이 교차 잡음을 줄이고, 이 때 생기는 증폭기 이득의 감소는 코어 반지름이 작은 광섬유를 사용해서 보상함으로써 시스템 성

능을 향상시킬 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는, 광섬유 구조에 따른 라만 광섬유증폭기의 성능에 대해서 알아보았다. 큰 펌프 파워를 필요로 하는 라만 광섬유증폭기에서 사용되는 광섬유의 코어 크기가 줄어들고, 코어와 클래딩 사이에 인덱스 차이가 증가함에 따라, 증폭기 이득 값이 증가함을 알 수 있다. 하지만, 동시에 시스템 성능을 저하시키는 이중 레일레이 산란 교차잡음을 더 큰 비율로 증가한다. 그러므로, 라만 광섬유증폭기 용 광섬유를 선택할 때, 이러한 이중 레일레이 산란 교차 잡음에 대한 시스템 여유를 고려해서 광섬유를 선택해 주어야 한다. 또한, 광섬유의 back capture fraction이 미세한 인덱스 분포 모양이나 코어의 도핑 농도 등에 따라 달라지기 때문에, 같은 코어 반지름을 가지고, 다른 인덱스 분포를 갖는 광섬유의 구조를 디자인하고, 앞서 보인 것처럼 라만 광섬유증폭기에 사용되는 광섬유의 길이와 종류를 조절함으로써 보다 적은 펌프 파워에서 충분한 이득을 가지고 낮은 이중 레일레이 산란 교차 잡음을 가지는 증폭기를 설계할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- [1] B. Min, H. Yoon, W. J. Lee, and N. Park, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, p. 480, 2000.
- [2] H. Masuda, *Optical Fiber Communication Conference 2000* (Optical Society of America, USA 2000), Paper TuA1, March 2000.
- [3] V. Curri, "System advantages of Raman amplifiers," *NFOEC 2000*, pp. 35-46, October 2000.
- [4] Z. Gills and A. Judy, "New requirements for long haul optical transmission fiber," *NFOEC 2000*, pp. 20-26, October 2000.
- [5] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems* (Second edition, John Wiley & Sons, New York), Ch. 8.
- [6] Bumki Min, Won Jae Lee, and Namkyoo Park, "Efficient formulation of Raman amplifier propagation equations with average power analysis," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 11, pp. 1-3, 2000.
- [7] T. G. Hodgkinson, "Average power analysis technique for erbium-doped fiber amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 12, pp. 1082-1084, 1991.
- [8] T. G. Hodgkinson, "Improved average power analysis technique for erbium-doped fiber amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 11, pp. 1273-1275, 1992.
- [9] W. A. Reed, W. M. Coughran, and S. G. Grubb, "Numerical modeling of cascaded CW Raman fiber amplifiers and lasers," *Technical Memorandum* (AT&T Bell Laboratories, 1994).
- [10] H. Kidorf, K. Tottwitt, M. Nissov, M. Ma, and E. Rabarjona, "Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 5, pp. 530-532, 1999.
- [11] S. A. E. Lewis, S. V. Chernikov, and J. R. Taylor, "Characterization of double Rayleigh scatter noise in Raman amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 5, pp. 528-530, May 2000.
- [12] D. Derickson, Editor, Josef Beller et al., *Fiber Optic Test and Measurement* (Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, 1998).
- [13] M. Nissov, K. Rottwitt, H. D. Kidorf, and M. X. Ma, "Rayleigh crosstalk in long cascades of distributed unsaturated Raman amplifiers," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 12, pp. 997-998, 10th June 1999.
- [14] A. H. Hartog and M. P. Gold, "On the theory of backscattering in single-mode optical fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-2, no. 2, pp. 76-82, April 1984.
- [15] Namkyoo Park and Changsup Shim, "Design considerations on double Rayleigh backscattering effect in distributed amplifiers for analog CATV and digital transmission applications," *OECC '97*, 10A1, pp. 362-363, July 1997.
- [16] P. Wan and J. Conradi, "Impact of double Rayleigh backscatter noise on digital and analog fiber systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 3, March 1996.

## System performance with different fiber structures in Raman amplifier

Jaehyoung Park, Bumki Min, and Namkyoo Park<sup>†</sup>

*School of EECS, Seoul National University, Seoul 151-742, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: nkpark@plaza.snu.ac.kr*

(Received January 8, 2001 ; Revised manuscript received March 9, 2001)

We examine the performance of a Raman amplifier as a function of fiber structure with respect to amplifier gain and double Rayleigh crosstalk penalty. Variations on fiber core radius or index affect both the Raman gain efficiency and Rayleigh back-scattering. Contrary to the common concept, the penalty from the doubly amplified Rayleigh scattering could exceed the benefits of higher gain efficiency of small effective area fibers. Appropriate fiber designing parameters are required to increase Raman amplifier efficiency without system penalties.

*Classification codes* : OC.010, FO.020, LO.010, NL.010.