

# Concentration Quenching 현상을 고려한 비스무쓰 기반 어븀 첨가 광섬유 증폭기의 모델링 기법에 관한 연구

이주한 교수, 신재현 석사과정 (서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부)

## 1. 서론

최근 인터넷 등의 발달로 정보 전송량의 증가에 따라 대용량의 정보를 전송할 수 있는 통신 방법인 광대역 Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) 시스템에 대한 연구 및 활용이 활발히 이루어져 왔다. 이러한 DWDM 시스템을 구현함에 있어 필수적인 소자가 Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)이다 [1, 2]. 통상적으로 사용되는 실리카 기반의 EDFA는 C-band인 1.53  $\mu\text{m}$  ~ 1.56  $\mu\text{m}$ 의 대역에서 이득을 가지고 있으나 EDF의 길이와 입사되는 펄스파워를 조절함으로써 L-band인 1.57  $\mu\text{m}$  ~ 1.60  $\mu\text{m}$  대역에서도 이득을 얻을 수 있음이 알려져 있다 [3]. 이러한 실리카 기반 EDFA의 제한된 증폭대역을 극복하기 위하여 기존의 Host 물질인 실리카를 대신하는 새로운 물질에 대한 다양한 연구가 수행되어 왔다. 더 넓은 증폭대역을 얻기 위하여 높은 굴절률을 가진 Host물질을 선택해야 한다는 것이 보고된 바 있으며 [4, 5] 그 이유는 희토류 이온들의 전기 쌍극자 모멘트 천이로 인해 Stimulated Emission Cross Section의 대역폭이 증가하므로 낮은 굴절률의 Host 물질보다 더 넓은 대역의 이득을 얻을 수 있기 때문이다 [5]. 현재 많은 관심을 끌고 있는 호스트 물질은 Tellurite와 Bismuth이다. Tellurite와 Bismuth 기반의 EDFA의 경우 하나의 증폭기로 C-와 L-band의 이득을 동시에 줄 수 있고, 고농도 어븀 이온의 첨가가 가능하여 짧은 길이로 증폭기 구현

이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 특히 Bismuth 기반의 EDFA (Bi-EDFA)의 경우 기존의 실리카 기반 광섬유에 쉽게 융착시킬 수 있다는 장점으로 인해 현재 많은 관심을 받고 있으며 그 물리적, 광학적 특성을 이해하기 위한 다양한 실험적 연구가 진행되어져 왔다 [6-8]. 하지만 현재까지 물리적, 광학적 현상을 정확히 이해하기 위한 이론적인 모델링 기법에 대한 연구는 Homogeneous Gain Broadening 현상만을 고려한 논문 이외에는 수행되었던 적이 없었다 [6-8]. 여기서 우리가 주목해야 할 것은 Bismuth 기반 어븀 첨가 광섬유와 같이 첨가된 어븀 농도가 아주 높을 경우  $E_{3+}$  이온간 상호작용에 기인한 Inhomogeneous Broadening 현상인 Concentration Quenching 효과에 의해 이득이 감쇄될 수 있다는 사실이다. 그러므로 기존의 Homogeneous Model을 사용하면 정확한 출력 특성 예측이 어렵다는 것이 알려져 있다 [9-12]. 이러한 현상은 실리카 기반의 어븀 첨가 광섬유 증폭기에서 이론적 실험적 연구를 통하여 발표되었으나 현재까지 Bismuth 기반의 어븀 첨가 광섬유 증폭기의 경우 연구되어진 바 없었다.

따라서 본 연구에서는 Bismuth 기반 어븀 첨가 광섬유 증폭기의 출력 특성을 정밀하게 예측하기 위하여 기존의 Homogeneous 현상만을 고려한 Modeling 기법이 아닌 Homogeneous 현상과 Inhomogeneous 현상을 동시에 고려한 Modeling 기법에 관한 연구를 수행하였다. 특히 Concentration Quenching 효과가 Bismuth 기반의 어븀 첨가 광섬



유 증폭기의 이득에 미치는 영향을 이론적으로 분석하였으며 이론적 결과는 실험적 측정치와 비교하여 검증하였다.

다음의 네 가지 모델링 기법에 대하여 이론적 결과를 도출하고 실험치와 비교하여 정밀한 모델링을 하기 위하여 Homogeneous 현상과 Inhomogeneous 현상을 동시에 고려해야만 함을 밝힌다.

- (1) Homogeneous Effect Modeling
- (2) Up-conversion 현상이 포함된 Homogeneous Effect Modeling
- (3) Inhomogeneous Effect Modeling
- (4) Up-conversion 현상이 포함된 Inhomogeneous Effect Modeling

모델링의 정확성을 검증하기 위하여 실험적으로 Forward Pumping (160 mW Pump Power) 시 얻은 출력 Spectrum을 전산 모사 결과와 비교하였다. 또한 Concentration Quenching 현상에 따른 Gain 감쇄를 확인하기 위해 Forward Pumping (160 mW Pump Power) 시 1550~1620 nm의 시그널을 넣었을 때 Internal Gain의 측정결과와 전산모사 결과를 비교하였다.

## 2. Bi-EDFA의 모델링 기법

### 2.1 Homogeneous Ideal Effect Modeling

본 연구에서는 Bismuth 기반의 어븀 첨가 광섬유 증폭기를 그림 1과 같이 Ground State ( $4I_{15/2}$ )와 Excited State ( $4I_{13/2}$ ) 만 존재하는 2-Level System으로 가정하였으며 각각의 State에  $N_1$ 과  $N_2$ 의 이온 Population이 존재함을 가정하였다. 광섬유 내에 이온들이 고르게 분포한다는 가정 하에 Homogeneous Broadening 현상만을 고려하고, Up-conversion 현상 [13, 14]과 Concentration Quenching 현상을 고려하지 않고 수치해석 하였기 때문에 Homogeneous Ideal Effect Modeling 이라 명칭 하였다. 이때 사용된 Rate Equation은 다음과 같다 [1].

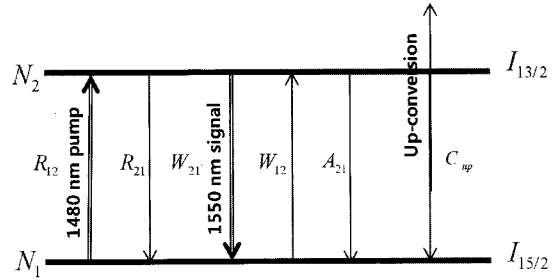


그림 1. Bismuth 기반 어븀 첨가 광섬유 내에서  $E_r^{3+}$  이온의 에너지 레벨 [7].

표 1. Bismuth 기반 어븀 첨가 광섬유 파라미터 [6].

Parameter	Symbol	Unit	Value
Spontaneous Emission Rate	$A_{21}$	1/s	300
Up-conversion coefficient	$C_{up}$	$m^3/s$	$2.2 \times 10^{-24}$
Emission Cross-section	$\sigma_{se}$	dB/m	168
Absorption Section	$\sigma_{sa}$	dB/m	134
Propagation Loss	$\alpha$	dB/m	0.7
Density of Erbium Ions	$N_t$	$m^{-3}$	$7.9 \times 10^{26}$
Mode Field Diameter	$r$	$\mu m$	6.2
Quenching Effect Ratio	$k$	%	8
Plank Constant	$h$	$J^*s$	$6.62 \times 10^{-34}$
Fiber Length		m	2

$$N_t = N_1 + N_2 \quad (1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{12}N_1 - R_{12}N_1 + R_{21}N_2 + A_{21}N_2 + W_{21}N_2 \quad (2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} \quad (3)$$

$$= W_{12}N_1 + R_{12}N_1 - R_{21}N_2 - A_{21}N_2 - W_{21}N_2$$

여기서  $N_i$ 는 전체의 어븀 이온 농도이다.  $A_{21}$ 는 Spontaneous Emission 계수,  $R_{12}$ ,  $R_{21}$ ,  $W_{12}$ ,  $W_{21}$ 은 펌프의 Absorption과 Emission 계수 그리고 시그널의 Absorption과 Stimulated Emission 계수로써 다음과 같은 관계식으로 표시된다 [1].

$$R_{12} = \left( \frac{P_p^+ + P_p^-}{hv_p \pi r_m^2} \right) \sigma_{pa} \quad (4)$$

$$R_{21} = \left( \frac{P_p^+ + P_p^-}{hv_p \pi r_m^2} \right) \sigma_{pe} \quad (5)$$

$$W_{12} = \left( \frac{P_{ASE}^+ + P_{ASE}^-}{hv_s \pi r_m^2} \right) \sigma_{sa} \quad (6)$$

$$W_{21} = \left( \frac{P_{ASE}^+ + P_{ASE}^-}{hv_s \pi r_m^2} \right) \sigma_{se} \quad (7)$$

$\sigma_{pa}$ 과  $\sigma_{pe}$ 는 펌프 Absorption Cross-section과 Emission Cross-section,  $\sigma_{sa}$ 과  $\sigma_{se}$ 는 신호 Absorption Cross-section과 Emission Cross-section을 나타낸다.  $h$ 와  $v$ 는 플랑크상수와 시그널의 주파수,  $r_m$ 은 Mode Field Diameter를 나타낸다.  $P_p^+$ 와  $P_p^-$ 는 각각 순방향과 역방향으로 진행되는 펌프를 표시하며 본 연구에서는 역방향 펌프는 고려하지 않으므로  $P_p^- = 0$ 이 된다.  $P_{ASE}^+$ 와  $P_{ASE}^-$ 는 각각 순방향과 역방향으로 진행되는 신호 및 ASE를 표시한다.

두 레벨에 존재하는 Population을 구해주기 위해 식 (1)~(3)을 Steady State상태로 풀어주면 다음과 같이 전개된다.

$$N_2^{ideal} = \frac{(R_{12} + W_{12})}{A_{21} + R_{12} + W_{12} + W_{21} + R_{21}} N_1 \quad (8)$$

여기서  $N_2^{ideal}$ 은 Homogeneous Effect Modeling에서  $4I_{13/2}$  Level에 존재하는 Population을 말한다.  $N_1 = N_t - N_2$ 를 이용해  $N_1$ 과  $N_2$ 에 존재하는 이온들의 Population을 구할 수 있다. 펌프 파워와 ASE 파워가 Bi-EDFA를 진행해 나가는 Propagation Equation은 다음과 같다 [1].

$$\frac{dP_p^\pm}{dz} = -(\sigma_{pa}N_1 \mp \sigma_{pe}N_2)P_p^\pm \mp \alpha_p P_p \quad (9)$$

$$\frac{dP_{ASE}^\pm(v)}{dz} = \pm(\sigma_{se}N_2 - \sigma_{sa}N_1)P_{ASE}^\pm \pm 2\sigma_{sc}N_2 hv \Delta v \mp \alpha_s P_{ASE}^\pm \quad (10)$$

식 (1)~(10), 그림 2의 Absorption, Emission Spectrum, 표 1의 파라미터들을 이용하여 Runge-Kutta 알고리즘으로 전산모사 해 주면 비스무스 기반 어븀첨가 광섬유 증폭기의 출력을 얻을 수 있다.

구현된 시뮬레이터의 정확성을 검증하기 위하여 그림 3과 같은 증폭기를 실험적으로 구현하였다. 1480 nm Forward Pumping 구조를 사용하였으며 Bi-EDF의 길이는 2 m이다. Homogeneous Ideal

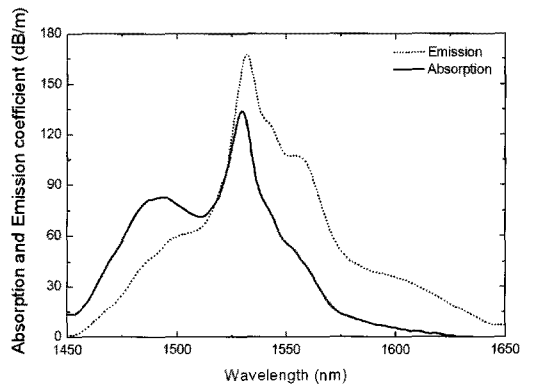


그림 2. 본 연구에 사용된 Bismuth기반 어븀첨가 광섬유 증폭기의 Absorption 및 Emission Spectrum [15].

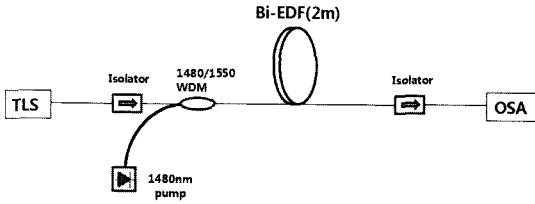


그림 3. Bismuth 기반 광섬유 증폭기의 실험 구성도.

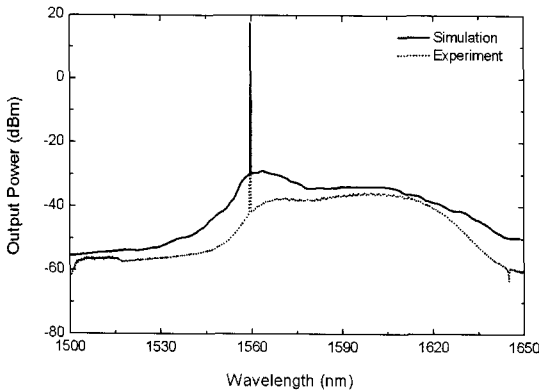


그림 4. Homogeneous Ideal Effect Modeling 기법에 의한 전산모사 결과와 실험치의 비교.

Effect Modeling 기법에서는 광섬유에 어븀 이온을 고농도로 도핑 시켰을 때 이온간의 결합이 일어나지 않는다는 가정 하에 전산모사 하였다. 그림 4는 전산모사에 의한 증폭기 출력 스펙트럼과 실험에 의해 얻은 출력 스펙트럼을 동시에 보여 준다. Homogeneous Ideal Effect Modeling 기법에 의해 얻은 전산 모사 결과는 실험치와 비교 시 상당한 오차를 발생시킴을 알 수 있었다.

### 3. Homogeneous Up-conversion Effect Modeling

Up-conversion 현상이란 그림 5에서 보듯이

Excited State인  $4I_{13/2}$  Level에 두 개의 이온이 여기되어 있을 때 Donor 이온과 Acceptor 이온들의 상호작용을 말한다. 즉 에너지를 준 Donor 이온은 Ground State로 Non-radiative 에너지 변위가 일어나고, 에너지를 얻은 Acceptor 이온은 더 높은 에너지 상태인  $4I_{9/2}$  Level로 천이된다.  $4I_{9/2}$  Level로 천이된 이온은 Non-radiative로 Excited State인  $4I_{13/2}$  Level로 천이되기 때문에 하나의 손실로 작용한다. Up-conversion 현상을 고려한 Rate Equation은 다음과 같다 [13].

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{12}N_1 - R_{12}N_1 + R_{21}N_2 \quad (11)$$

$$+ A_{21}N_2 + W_{21}N_2 + C_{up}N_2^2$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12}N_1 + R_{12}N_1 - R_{21}N_2 \quad (12)$$

$$- A_{21}N_2 - W_{21}N_2 - C_{up}N_2^2$$

또한 식 (11), (12)을 Steady State로 정리해주면 다음 식을 얻을 수 있다. 다음의 식에서  $N_2^{lum}$ 는 Up-conversion 현상을 고려하였을 때  $4I_{13/2}$  Level에 존재

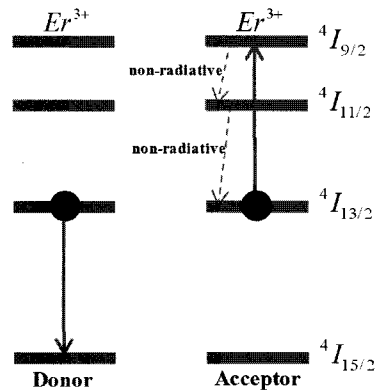


그림 5. 고농도의 어븀 첨가 광섬유 증폭기에서 Cooperative Up-conversion 현상을 보여주는 에너지 레벨 다이어그램.

하는 Population을 말한다.

$$N_2^{hm} = \frac{(R_{12} + W_{12})}{A_{21} + R_{12} + W_{12} + C_{up} N_2^{hm} + W_{21} + R_{21}} N_i \quad (13)$$

Homogeneous Ideal Effect Modeling에서 사용하였던 수치 해석 방식을 그대로 적용하면서 Up-conversion 현상을 고려하여 전산모사 해주면 Up-conversion 현상이 일어나는 만큼 출력 세기의 감소가 일어나는 것을 알 수 있었으나 그림 6에서 보듯이 실험치와는 아직도 상당한 격차를 갖고 있음을 확인할 수 있다.

## 4. Inhomogeneous Effect Modeling

Homogeneous 현상만을 고려한 모델링의 경우 실제 실험 결과와 상이하므로 Bismuth 기반 어븀 첨가 광섬유 내에서 Inhomogeneous 현상을 고려해야 함을 인지하였다. Inhomogeneous 모델은 Bismuth 광섬유 내에 어븀 이온들이 고르게 분포하지 않고 Cluster 이온들이 형성됨을 가정하였다. 이러한 Inhomogeneous 모델링을 하기 위하여 다음의 두 가

지 가정을 하였다. 하나는 Cluster 이온과 하나로 존재하는 Singled 이온들은 절대 상호작용하지 않는다는 것이고, 또 다른 하나는 Cluster 이온은 오직 Ground State와 Excited State로만 존재한다는 것이다 [12]. 본 논문에서 Cluster 이온들의 크기는 모두 동일하고, 한 쌍으로 존재한다고 가정하여 Paired 이온이라고 하였다. Bismuth에 도핑된 어븀이온의 전체농도는  $N_i$ 이고, Cluster 이온들의 전체농도는  $N(Paired)=mkN_i$ 이다. 여기서, Cluster 이온들은 한 쌍으로 존재한다고 하였으므로  $m = 2$ 이다.  $k$ 는 Cluster 이온들이 존재하는 비율을 나타낸 것이다. 그러면, 하나로 존재하는 Singled 이온의 전체농도는  $N(Singled)=(1-mk)N_i$ 로 나타낼 수 있다. 이를 식 (1)~(13)에 적용하여 Steady State로 정리하면 다음과 같은 Paired Ion Equation과 Singled Ion Equation으로 각각 나타낼 수 있다. 다음의  $N_2(Paired)$ 와  $N_2(Singled)$ 는 Excited State에 존재하는 Paired 이온과 Singled 이온의 농도를 각각 나타낸다.

$$N_2(Paired) = \frac{mk(R_{12} + W_{12})}{A_{21} + m(R_{12} + W_{12}) + W_{21} + R_{21}} N_i \quad (14)$$

$$N_2(Singled) = \frac{(1-mk)(R_{12} + W_{12})}{A_{21} + R_{12} + W_{12} + W_{21} + R_{21}} N_i \quad (15)$$

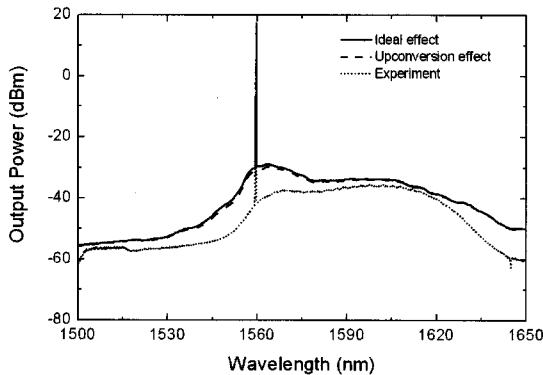


그림 6. Homogeneous Up-conversion Effect Modeling 기법에 의한 전산모사 결과와 실험치의 비교.

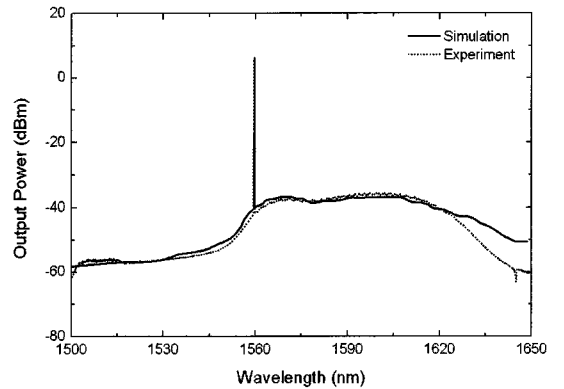


그림 7. Inhomogeneous Effect Modeling 기법에 의한 전산모사 결과와 실험치의 비교.

Cluster의 Ratio를 7.3%로 넣어주고, 앞서 사용하였던 수치해석 방법을 사용하여 전산모사 해주면 그림 7과 같은 결과를 얻을 수 있다. Homogeneous Modeling에 비하여 출력 스펙트럼이 실험치에 가까워짐을 알 수 있다. Bismuth 기반 어븀 첨가 광섬유 내에서 이온끼리 결합하는 Paired 이온들의 존재를 Inhomogeneous Effect Modeling을 통해 확인 할 수 있었다.

### 5. Combined Effect Modeling

앞서 소개된 Homogeneous 모델링과 Inhomogeneous 모델링을 토대로 Bismuth 기반 어븀 첨가 광섬유 내에는 두 가지 현상이 공존하고 있다는 것을 인지하여 두 현상을 모두 고려한 Combined 모델링이 필요함을 알 수 있었다. Inhomogeneous 현상을 고려하기 위해 Paired Ion Equation과 Singled Ion Equation으로 나누었고, Up-conversion 현상을 고려하기 위해 Singled Ion Equation에 적용하였다. 다음의  $N_2(Singled)$ 와  $N_2(Paired)$ 는 Up-conversion 현상을 고려할 때 Excited State에 존재하는 Paired 이온과 Singled 이온의 농도를 나타낸다.

$$N_2(Paired) = \frac{mk(R_{12} + W_{12})}{A_{21} + m(R_{12} + W_{12}) + W_{21} + R_{21}} N_i \quad (16)$$

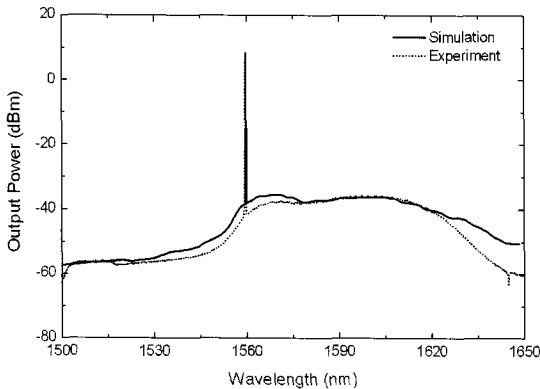


그림 8. Combined Modeling 기법에 의한 전산모사 결과와 실험치의 비교.

$$N_2(Singled) \quad (17)$$

$$= \frac{(1 - mk)(R_{12} + W_{12})}{A_{21} + R_{12} + W_{12} + C_{sp}N_2^{SC} + W_{21} + R_{21}} N_i$$

Combined Model의 정확성을 검증하기 위하여 실험치와의 비교 검증을 수행하였으며 그림 8은 전산모사 결과와 실험치를 비교하여 보여주고 있다. 이론적인 전산모사를 검증하기 위해서 1560 nm 신호를 포함한 Forward 펌프 160 mW와 실험측정치를 그림 8과 같이 비교하여 검증하였다. 1530 ~ 1620 nm 대역에서 실험치와 계산치가 거의 정확하게 일치함을 확인하였다. 하지만 1621 ~ 1650 nm 대역에서는 실험치와 아직도 상당한 차이를 보였다. 이 현상은 1600 nm 대역에서 발생하는 Excited State Absorption (ESA) 때문인 것으로 추정된다 [16]. 그림 9는 0-dBm의 입력신호를 파장 (1550~1620 nm)에 따라 입사 시켜주었을 때 Internal Gain의 전산모사 결과와 실험치를 비교한 것이다. Combined Model을 사용할 경우 실험치와 상당히 근접한 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

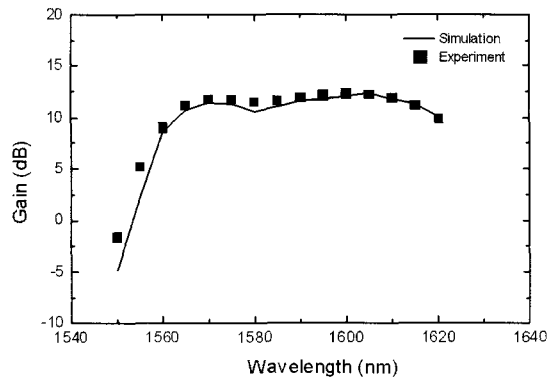


그림 9. 전산 모사 결과와 실험치 비교: 0-dBm 입력 신호 입사 시 파장에 따른 출력 이득.

## 6. 결론

본 연구에서는 Bismuth 기반 어븀 첨가 광섬유 증폭기의 정밀한 모델링 기법에 관한 연구를 수행하였으며 기존의 Homogeneous 현상만을 고려한 Modeling 기법이 아닌 Homogeneous 현상과 Inhomogeneous 현상을 동시에 고려한 Modeling 기법이 필요함을 알 수 있었다. 특히 Concentration Quenching 효과를 고려한 이론적 모델을 제시하였으며 이의 유효성을 실험을 통하여 확인하였다. 본 논문에서는 2-Level 시스템으로 가정하여 펌프 ESA 현상과 시그널 ESA 현상을 고려하지 않았다. 향후 과제로는 4-Level 시스템으로 ESA 현상을 포함하는 추가적인 연구가 필요하다.

## 감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2009-0064477)

## 참고 문헌

- [1] C. R. Giles, E. Desurvire., "Propagation of Signal and Noise in Concatenated Erbium-Doped Fiber Optical Amplifiers" , Journal of lightwave technology, vol.9, no.2, pp.147-154, 1991.
- [2] Robert E. Tench, M. Shimizu, "Fluorescence-Based Measurement of  $g^*(\lambda)$  for Erbium-Doped Fluoride Fiber Amplifiers" , Journal of lightwave technology, vol.15, no.8, pp.1559-1564, 1997.
- [3] C. L. Chang, L. Wang, and Y. J. Chiang., "A dual pumped double-pass L-band EDFA with high gain and low noise", Optics Communications, vol.267, pp.108-112, 2006.
- [4] Y. Ohishi, A. Mori, and Makoto Yamada ,and Hirotaka Ono, and Yoshiki Nishida, and Kiyoshi Oikawa, "Gain characteristics of tellurite-based erbium-doped fiber amplifiers for 1.5-um broadband amplification" , Optics Letters, vol.23, pp.274-276, 1998.
- [5] J. S. Wang, E. M. Vogel and E. Snitzer, "Tellurite glass : a new candidate for fiber devices", Opt. Materials, vol.3, pp.187-203, 1994.
- [6] S. Ohara, N. Sugimoto, and K. Ochiai and H. Hayashi, and Y. Fukasawa, and T. Hirose, and T. Nagashima, and M. Reyes, "Ultra-Wideband amplifiers based on Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-EDFAs", Optical Fiber Technology, vol.10, pp283-295, 2004.
- [7] H. Hayashi, N. Sugimoto, and S. Tanabe, "High-performance and wideband amplifier using bismuth-oxide-based EDF with cascade configurations", Optical Fiber Technology vol.12, pp282-287, 2006.
- [8] H. Hayashi, S. Tanabe, and N. Sugimoto, "Quantitative analysis of optical power budget of bismuth oxide-based erbium-doped fiber", Journal of Luminescence, vol.128, pp.333-340, 2008.
- [9] P. Myslinski, D. Nguyen, and J. Chrostowski, "Effect of concentration on the performance of erbium doped fiber amplifiers" , Journal of Lightwave Technology, vol.15, pp.112-120, 1997.
- [10] E. Delevaque, T. Georges, and M. Monerie, and P. Lamouleer, and J.-F. Bayon, "Modeling of Pair-Induced Quenching Erbium-Doped Silicate Fibers", IEEE Photonics Technology Letters, vol.5, pp.73-75, 1993.
- [11] P. F. Wysocki, J. L. Wagener, and M. J. F. Digonnet, and H. J. Shaw, "Evidence and modeling of paired ions and other loss mechanisms in erbium-doped silica fibers", SPIE vol.1789, pp.66-79, 1992.
- [12] C. Jiang, W. Hu, and Q. Zeng, "Numerical Analysis of Concentration Quenching Model of Er<sup>3+</sup>-Doped Phosphate Fiber Amplifier", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol.39, pp.1266-1271, 2003.
- [13] P. Blixt, J. Nilsson, T. Carlnas, and B. Jaskorzynska, " Concentration-Dependent Upconversion in Er<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup>-Doped Fiber Amlifiers : Experiments and Modeling", IEEE Photonics Technology Letters, vol.3, pp.996-998, 1991.
- [14] H. Hayashi, S. Ohara, N. Sugimoto, and S. Tanabe, "Effects of Lanthanum and Boron Addition on Suppression of Cooperative Upconversion in Bismuth Oxide-Based Erbium-



Doped Fibers”, Japanese Journal of Applied Physics, vol.46, pp.3452-3454, 2007.

[15] Asahi Glass company product catalog <http://www.agc.co.jp/english/biedf/bi5web.pdf>.

[16] M. Bolshtyanski, I. Mandelbaum, and F. Pan, “Signal Excited-state Absorption in the L-band EDFA: simulation and Measurements,” Journal of Lightwave Technology, vol.23, pp.2796-2799, 2005.

### 저|자|약|력



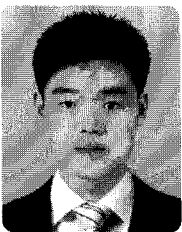
성 명 : 이주한

◆ 학 력

- 1995년  
서울대학교 전자공학과 공학사
- 1998년  
서울대학교 대학원 전기공학부  
공학석사
- 2003년  
영국 Univ. of Southampton, Department of Electronics and Computer Science 공학박사

◆ 경 력

- 1999년 - 2000년 KVC창업투자 대리
- 2002년 - 2002년 Technical University of Denmark, Research Center COM 방문연구원
- 2003년 - 2003년 영국 University of Southampton, Optoelectronics Research Centre (ORC) Post-Doc
- 2004년 - 2005년 일본, Univ. of Tokyo, Research Center for Advanced Science and Technology (RCAST), Post-Doc
- 2005년 - 2007년 한국과학기술연구원 (KIST) 선임연구원
- 2007년 - 현재 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 조교수



성 명 : 신재현

◆ 학 력

- 2009년  
서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 공학사
- 현재  
서울시립대학교 대학원 전자전기컴퓨터공학부 석사과정

