

수치해석에 의한 광대역폭 Erbium 첨가 광섬유 광원 특성 예측 및 최적화

Prediction and Optimization of Broadband Erbium-Doped Fiber Source Characteristics by Numerical Simulation

박태용*, 진영준^o, 박희갑

전북대학교 물리학과

hgpark@phy0.chonbuk.ac.kr

광대역폭 erbium 첨가 광섬유(erbium-doped fiber : EDF) 광원은 반도체 광원에 비해서 파장안정성이 우수하여 광섬유 자이로스코프(이하 줄여 자이로라 함)의 광원으로 많이 사용되고 있다.^[1,2] 특히 항법용 고급 자이로에서는 광원의 중심파장 안정성이 매우 중요하므로 온도와 같은 외부변화에 관계없이 광원의 중심파장이 일정하게 유지되도록 광원의 최적 설계가 필요하다. 또한 광섬유 광원의 중심파장은 온도 변화 뿐만이 아니라 펌프 파장과 펌프 power의 변화에 대해 민감하다. 그러므로 위와 같은 변화가 최소화 될 수 있는 동작조건의 선정이 중요하다. 이 논문에서는 수치 해석을 통해서 EDF의 길이와 펌프 power, 그리고 펌프 파장을 변화에 대해 중심파장의 변화가 최소가 되는 최적동작조건을 도출하였다.

중심파장 ($\bar{\lambda}$)의 변화는 온도(T), 펌프 파장(λ_p), 펌프 power (P_p)의 변화에 대해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\bar{\lambda} = \frac{\partial\bar{\lambda}}{\partial T} \cdot \Delta T + \frac{\partial\bar{\lambda}}{\partial P_p} \cdot \Delta P_p + \frac{\partial\bar{\lambda}}{\partial \lambda_p} \cdot \Delta \lambda_p \quad (1)$$

우변의 첫번째 항은 펌프 power와 펌프 파장이 일정한 상태에서 온도만의 변화에 의한 중심파장의 변화율을 의미한다. 둘째 항은 펌프 power의 변화가 중심파장에 미치는 효과이며, 셋째 항은 펌프 파장의 변화가 중심파장에 미치는 효과이다. 식 (1)에서 표현된 광원의 중심파장의 변화를 single-pass 방식으로 구성된 EDF 광원(erbium 농도 200 wt ppm)에 대해서 수치 계산으로 구하였다.

수치계산에 사용한 식(rate equation)은 다음과 같다.^[1]

$$\frac{dP_{s,i}^{\pm}(z, \nu_{s,i})}{dz} = \pm \left[\gamma_s(z, \nu_{s,i}) P_{s,i}^{\pm}(z, \nu_{s,i}) + \gamma_{as}(z, \nu_{s,i}) 2h\nu_{s,i} \left(\frac{d\nu_h}{n} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{dP_p(z, \nu_p)}{dz} = - \gamma_p(z, \nu_p) P_p(z, \nu_p) \quad (3)$$

수치 계산을 위해 1525~1562 nm 파장 대의 스펙트럼을 $\nu_{s,i}$ ($i = 1 \sim 10$)로 대표되는 10개의 주파수 구간으로 나누었으며, $P_{s,i}^+(z, \nu_{s,i})$ 는 EDF 상의 z 의 위치에서 전방(펌프광 진행 방향과 같은 방향) 신호광 power, $P_{s,i}^-$ 는 후방 신호광 power, 그리고 P_p 는 펌프광 power를 나타낸다. 또한 γ_s , γ_p , γ_{as} 는 각각 증폭된 자연방출(ASE) 신호광, 펌프광, 자연방출광에 대한 증폭계수인데, 이들은 모두 흡수/방출 단면적과 반전 밀도의 함수로 나타난다. 신호 파장대역과 펌프 파장대역의 흡수/방출 단면적 스펙트럼은 참고문헌[1]의 data를 사용하였다.

그림 1은 EDF 길이를 변화시키면서 펌프 power의 변화에 대한 중심파장의 변화율 ($\partial\bar{\lambda}/\partial P_p$)을 계산한

*진영준 : 한국과학기술원 전자광학특화연구센터에서 전북대 기초과학연구소로 파견중

결과이다. 그림 1의 결과를 보면 펌프 power의 변화에 대한 중심파장의 변화가 최소가 되는 적정 EDF 길이가 존재함을 알 수 있다. 펌프 power가 65 mW인 경우 EDF의 적정길이가 69 m, 53 mW의 펌프 power에서는 64 m, 그리고 88 mW의 펌프 power에서는 78 m가 EDF의 적정길이가 된다. 그림 2는 펌프 파장의 변화에 대한 중심파장의 변화율 ($\partial\lambda/\partial\lambda_p$)을 계산한 것이다. 세 종류 길이 모두에 대해 펌프 파장 976 nm에서 중심파장의 변화가 최소가 되었으며, 976 nm 부근에서 펌프 파장변화가 0.1 nm 이내로 안정될 경우, 펌프 파장의 변화에 의한 중심파장의 변화는 ~0.2 ppm 정도로 계산되었다. 반면에 펌프 파장이 980 nm인 경우에는 같은 조건에서 중심파장의 변화가 ~25 ppm 정도로 나타났다. 그림 3은 EDF 길이가 65 m와 70 m인 경우에 펌프 power를 변화시키면서 온도변화에 대한 중심파장의 변화율 ($\partial\lambda/\partial T$), 즉, intrinsic thermal coefficient를 계산한 결과이다. 충분히 큰 펌프 power에 대해 중심파장의 변화율이 5 ppm/°C 정도가 됨을 알 수 있었다.

중심파장 안정을 위한 최적 동작 조건으로서 EDF 길이 69 m에 대해 최적 펌프 파장(976 nm)에서 65 mW의 power로 펌핑하고, 펌프 power의 흔들림을 0.1 mW 이내, 펌프 파장의 흔들림을 0.1 nm 이내로 안정시킬 경우, 식(1)에서 온도 의존성은 약 5 ppm/°C, 펌프 power 변화에 의한 효과는 0 ppm, 펌프 파장 효과는 0.2 ppm으로 나타났다. 이 경우에 중심파장 안정도는 거의 온도효과에 의해 주도됨을 알 수 있다. 반면에 펌프 파장이 최적화 되지 않은 경우, 예컨대 980 nm인 경우에는 0.1 nm의 펌프 파장 흔들림에 대해 중심파장 흔들림이 25 ppm 정도로 크게 나타났다. 따라서 중심파장 안정을 위해서는 펌프 파장의 안정도를 높이거나 최적 펌프 파장을 사용하는 것이 관건임을 알 수 있다.

[참고문헌]

- [1] P. F. Wysocki, M. J. F. Digonnet, B. Y. Kim, and H. J. Shaw, J. Lightwave Technol. 12, 550 (1994).
- [2] 진영준, 박희갑, 한국광학회지 8, 476, (1997).

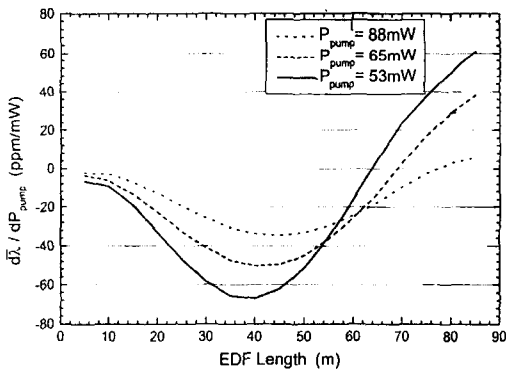


그림 1. EDF 길이와 펌프 power변화에 대한 중심파장의 변화율 ($\partial\lambda/\partial P_p$)

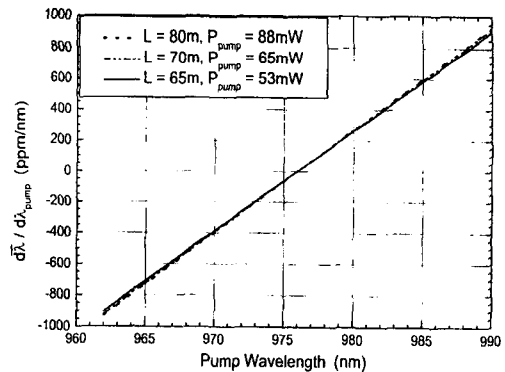


그림 2. 펌프 파장에 대한 중심파장의 변화율 ($\partial\lambda/\partial\lambda_p$)

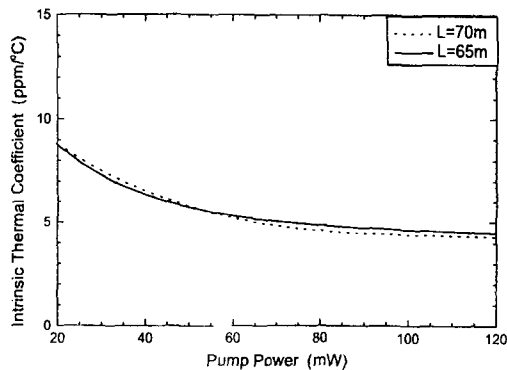


그림 3. 중심파장의 온도 특성 ($\partial\lambda/\partial T$)