

Double-pass forward 방식으로 구성된 자이로스코프용 Erbium 첨가 광섬유 광원의 특성

진영준 · 허영순 · 김택중 · 박희갑[†]

전북대학교 물리학과

☎ 561-756 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

(2003년 3월 21일 받음, 2003년 6월 20일 수정본 받음)

Double-pass forward(DPF) 방식으로 구성되고 0.98 μm 파장 대역으로 펄핑된 자이로스코프용 erbium 첨가 광섬유(EDF) 광원의 출력광 특성을 수치계산을 이용하여 분석하였다. EDF 길이, 펄프 power, 그리고 펄프 파장 등의 변화에 따른 출력광 power, 파장선폭, 중심파장 안정성 등을 분석하였으며 일부 특성에 대하여 실험결과와 비교·검증하였다. 그 결과, DPF 방식의 EDF 광원에서 광원의 특성이 EDF 길이에 크게 의존함을 알 수 있었으며 펄프 power와 펄프 파장의 변화에 대해서 안정된 중심파장을 얻을 수 있는 최적 동작조건도 존재함을 알 수 있었다.

주제어 : erbium-doped fiber, fiber optic gyroscope, optical fiber, fiber source.

I. 서 론

광대역폭 Er 첨가 광섬유 광원은 1.55 μm 파장대의 넓은 선폭을 가진 광원으로서 광통신이나 광섬유 자이로스코프와 같은 광센서에 많이 활용되고 있다. 광섬유 자이로스코프에서 안정된 환산계수(scale factor)를 얻기 위해서는 광원의 중심파장이 주변환경의 변화에 관계없이 일정하게 유지되어야 한다.^[1] 희토류 원소인 Er이 첨가된 광섬유(Er-doped fiber: EDF)를 이용한 자이로스코프용 광원은 반도체 광원에 비하여 상대적으로 안정된 온도특성을 얻을 수 있는 가능성으로 인하여 이에 관한 연구가 많이 이루어져 왔다.^[2-11] 이러한 EDF 광원의 출력 스펙트럼 특성과 안정성은 광원의 구성방식과 EDF 길이, 그리고 구동된 펄프 LD의 파장과 power 등에 따라서 달라지게 되므로, 광원의 적정 동작조건을 찾아주어야 한다. EDF 광원의 적정조건을 찾는 연구는 주로 펄프와 반대방향의 ASE(amplified spontaneous emission)를 광출력으로 삼는 single-pass backward 방식을 대상으로 다루어져 왔다.^[3,4,8]

그런데 최근에 광섬유 복굴절의 임의 변화와 구성요소의 편광의존특성으로 인하여 출력광의 중심파장이 변화하는, 이른바 '편광효과'가 EDF 광원의 중심파장 안정성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려졌다.^[7] 그리고 이러한 편광문제에 대한 해법의 하나로서, double-pass forward(DPF) 방식으로 광원을 구성하고 반사경으로 Faraday-rotating mirror(FRM)를 사용하는 새로운 방식이 제안되었다.^[11] DPF 방식은 ASE광이 EDF를 왕복하며 증폭되도록 반사경을 사용하는 구성방식(configuration)인데, 펄프광 진행방향과 같은 방향의 출력을 광원으로 사용한다. 이때 반사경으로서 FRM을 사용하는 경우에는 양방향으로 진행되는 ASE광의 편광상태가 서로 직교하

로 편광효과의 상당부분을 상쇄할 수 있는 장점이 있는 것으로 나타났다.^[12]

이제까지 DPF 방식은 출력특성 면에서나 펄프 power 변화에 대한 중심파장 안정성 면에서 다른 방식에 비해 뒤떨어지는 것으로 알려져 있었기 때문에 자이로스코프용 광원의 구성방식으로서 특별히 주목받지 못하였다. 그러나, 앞에서 언급한 바와 같이, 다른 구성방식에서는 해결이 어려운 편광효과를 억제할 수 있는 가능성을 지닌 방식이기 때문에, DPF 방식으로 구성된 광원의 출력 및 스펙트럼 특성을 깊이있게 분석하고 예측할 필요성이 대두되었다.

이 논문에서는 일반 반사경을 사용하는 DPF 방식에 대해서 컴퓨터 수치계산을 이용하여 EDF 길이와 펄프 파장, 펄프 power를 변화시키면서 광원의 출력특성, 즉, 출력광 power, 파장선폭, 중심파장 안정성 등을 분석하였다. 일부항목에 대해서는 계산결과와 실제 측정결과를 비교함으로써 수치계산의 전반적인 정확성과 타당성을 검증하였다. 이러한 수치계산을 이용하여 DPF 방식 광원의 특성을 종합적으로 검토하여 고성능 자이로스코프용 광원 방식으로서 적합성을 조사하였다. 특히 이 DPF 방식에서 큰 출력과 넓은 파장선폭, 그리고 안정된 중심파장을 얻을 수 있는 최적 EDF 길이를 찾고자 하였다.

II. 이론과 수치계산 과정

그림 1은 DPF 방식으로 구성된 EDF 광원의 구성도이다. 펄프 LD에서 나온 빛이 WDM(wavelength division multiplexer)을 통해 위치 $z=0$ 인 지점에서 EDF내로 입사된다. EDF내에서 발생하는 자연방출광이 양방향으로 진행하면서 증폭되어 ASE(amplified spontaneous emission)의 형태로 EDF의 양 끝단으로 방출된다. 이때 양방향 ASE 중 펄프광과 반대방향으로 진행되는 ASE는 반사경에서 반사 후, 다시 EDF를 거쳐 증폭되

[†]E-mail: hgpark@chonbuk.ac.kr

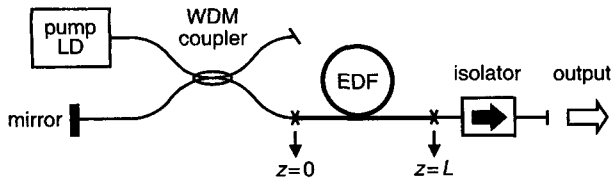


그림 1. Double-pass 방식 EDF 광원의 구성도.

어 광원의 출력이 된다. 광원의 출력 중에는 반사경을 거치지 않고 펌프광과 같은 방향으로 진행하면서 증폭된 single-pass 성분도 일부 포함되는데, double-pass 성분에 비해 그 크기가 작다.

EDF 광원은 전형적인 3 준위 레이저 구조하에서 동작하는데, 펌프 준위의 lifetime이 매우 짧은 것을 고려하여 단순화하면 상위와 하위의 2개만의 준위에 대한 수식으로 광증폭 과정을 표현할 수 있다. 이때 신호광(광원으로 사용되는 ASE광을 의미함) power와 펌프광 power의 진행거리에 따른 변화를 묘사하는 방정식은 다음과 같은 형태가 된다.^[3]

$$\frac{dP_s^{\pm}(v_{s,j})}{dz} = \pm \left[\eta_s(z, v_{s,j}) \cdot P_s^{\pm}(z, v_{s,j}) + \eta_{es}(z, v_{s,j}) \cdot 2hv_{s,j} \cdot \left(\frac{\Delta v}{m} \right) \right] \quad (1)$$

$$\frac{dP_p(v_p)}{dz} = -\eta_p(z, v_p) \cdot P_p(z, v_p) \quad (2)$$

위의 식에서 P_s 는 신호광 power이고 P_p 은 펌프광 power이며, +와 - 부호는 각각 신호광이 펌프광과 같은 방향으로 진행하는 경우와 반대방향으로 진행하는 경우에 해당하는 것으로서 사실상 2개의 식을 하나로 표현한 것이다. 그리고 (1)~(5)식에서 사용된 변수들의 의미를 표 1에 정리하여 나타내었다. (1)식에서 우변의 첫째 항은 신호광이 EDF를 따라 진행하면서 유도방출(또는 흡수)에 의해 증폭(또는 감쇠)됨을 나타내며, 둘째 항은 자연방출에 의한 광 power의 추가를 나타낸다. 자연방출과 관련된 두 번째 항은 단위 주파수 대역폭당 2개의 광자(각 편광성분마다 한개씩)가 생성됨을 의미한다. (2)식은 위치에 따른 펌프광 power의 변화율을 나타내는데, 펌프광이 진행하면서 감쇠됨을 보여준다. (1), (2)식에서 η_s , η_{es} , 그리고 η_p 는 각각 신호광과 자연방출광에 대한 증폭률과 펌프광의 감

표 1. (1)식~(5)식에 나타난 변수들에 대한 설명

변수	설 명
$v_{s,j}$	j번째 스펙트럼 구간을 대표하는 신호광 주파수
v_p	펌프광 주파수
Δv	방출 스펙트럼의 주파수 대역폭
m	스펙트럼 구간의 수
$g_e(v_p)$	ASE 신호광의 이득계수(gain coefficient)
$\alpha_a(v_p)$	ASE 신호광의 흡수계수(absorption coefficient)
$\alpha_{pa}(v_p)$	펌프광의 흡수계수
n_1	규격화된 바닥상태의 erbium 이온밀도
n_2	규격화된 준안정상태의 erbium 이온밀도
γ_s	신호광의 배경 손실계수
γ_p	펌프광의 배경 손실계수
n_c	erbium 이온의 뭉쳐짐으로 인하여 실제 밀도반전에는 기여하지 못하는 erbium 이온밀도의 비율

쇠율의 의미를 가지는데, 흡수계수와 이득계수를 이용하여 각 에너지 준위에서의 이온밀도로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_s(z, v_{s,j}) = [g_e(v_{s,j}) \cdot n_2(z) - \alpha_a(v_{s,j}) \cdot n_1(z) - \alpha_a(v_{s,j}) \cdot n_c(z)] - \gamma_s \quad (3)$$

$$\eta_{es}(z, v_{s,j}) = g_e(v_{s,j}) \cdot n_2(z) \quad (4)$$

$$\eta_p(z, v_p) = [\alpha_{pa}(v_p) \cdot n_1(z) + \alpha_{pa}(v_p) \cdot n_c(z)] + \gamma_p \quad (5)$$

EDF 광원의 특성은 모든 스펙트럼 구간에 대해서 (1)식과 (2)식의 해를 구함으로써 예측할 수 있다. 그런데, 이 수식들에 포함된 변수들은 독립적인 값이 아닌 특별한 상관관계에 의해서 연관된 값이므로, 방정식의 해를 구하기 위해서는 최소한 EDF 한쪽 끝에서의 경계치를 알고 있어야 한다. 즉, 그림 1에서 펌프광이 EDF내로 입사되는 시작점이나 끝점에서의 펌프 power와 ASE 출력의 spectral power를 알고 있어야 하는데, 이러한 경계치는 방정식의 해를 구하기 전에는 정확히 알 수 없는 값이다. 따라서, 이러한 방정식의 해를 구하기 위해서 한쪽 경계치에 임의의 초기 값을 대입하고 EDF 양 끝에서의 경계조건을 모두 만족시킬 때까지 relaxation 방법^[13]을 이용하여 계산하였다.

한편, 수치계산 과정에서 ASE 출력의 spectral power가 방정식의 해로 수렴해야 되는데, pump power가 작거나 EDF 길이가 긴 경우에는 수렴하는 해를 구하지 못하는 경우가 종종 발생하였다. 이러한 수렴의 문제를 해결하기 위하여 이 논문에서는 전 단계의 relaxation 과정에서 구해진 spectral power와 펌프광 power 값을 이용하여 EDF내의 위치에 따른 바닥 상태와 준안정상태에 있는 erbium의 이온밀도를 계산하였다. 이러한 방법으로 수렴조건을 크게 개선시킴으로써 실제로 의미있는 EDF 길이 범위에 대하여 방정식의 해를 구할 수 있었다.

수치계산과 실험에 사용된 EDF의 특성제원을 표 2에 정리하였다. EDF의 erbium 이온의 밀도는 $2.65 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 였고, ASE 신호광의 최대 흡수계수는 17.1 dB/m였으며, 실험에서 사용된 EDF의 흡수계수와 방출계수의 스펙트럼은 그림 2에 나타내었다. 그리고 이 논문 전체에 걸쳐 펌프파장은 0.98 μm 대역이며, 수치계산시 신호광 파장대역은 1500~1620 nm에 걸쳐 2 nm 간격의 61개 소구간으로 나누어 계산하였다. 한편, EDF와 반사경 사이에 WDM이 삽입되어 있으므로, 신호광이 반사경에서 반사된 후 WDM에서 손실을 겪고 EDF내로 재입사되는데, 이 논문에서는 특별한 언급이 없는 경우, EDF에서

표 2. 실험에 사용된 erbium 첨가 광섬유의 특성표

Parameter	Value
Erbium 이온 밀도	$2.65 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
밀도반전에 기여하지 않는 이온밀도	$1.06 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
코어 반경	0.96 μm
ASE 신호광에 대한 최대 흡수계수	17.1 dB/m @ 1529 nm
펌프광에 대한 최대 흡수계수	14.1 dB/m @ 978 nm
ASE 신호광의 손실계수	0.0011/m
펌프광에 대한 배경 손실계수	0.0068/m
준안정상태의 lifetime	11 msec

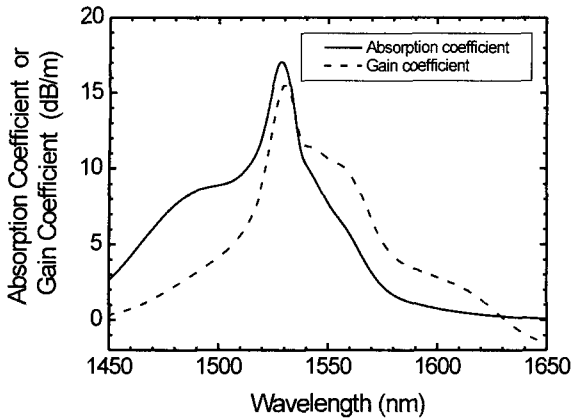


그림 2. EDF의 흡수계수와 이득계수.

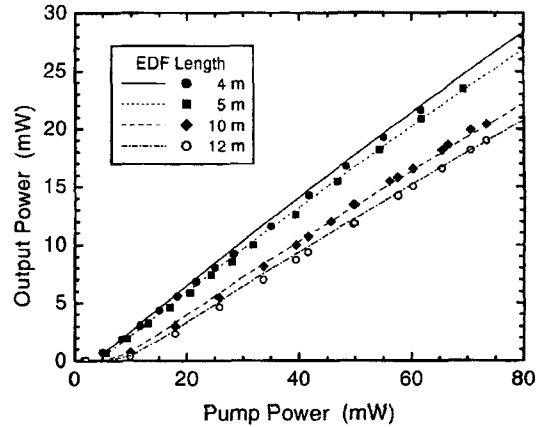


그림 3. 펌프 power에 대한 출력광 power.

나와 EDF로 귀환되는 비율을 50%로 계산하였다. 중심파장 $\bar{\lambda}$ 와 파장선폭 $\delta\lambda$ 는 수치계산으로 구한 신호광의 spectral power density $P(\lambda)$ 로부터 참고문헌 [4]의 방식에 의해 다음의 (6)식과 (7)식에 따라 계산하였다.

$$\bar{\lambda} = \frac{\int P(\lambda) \cdot \lambda d\lambda}{\int P(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

$$\delta\lambda = \frac{\left[\int P(\lambda) d\lambda \right]^2}{\int P^2(\lambda) d\lambda} \quad (7)$$

IV. 수치계산 결과와 실험치와의 비교

수치계산이 실험결과와 얼마나 잘 일치하는지 확인하기 위해서 몇 가지 경우에 대해 직접 실험을 하고, 실험결과와 수치계산 결과를 비교해 보았다. 우선, EDF의 여러 길이에 대하여 펌프 power를 변화시키면서 출력광 power를 계산한 결과를 실험결과와 함께 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 수치계산 결과는 선으로 표시했는데, 각각의 길이에 대해서 펌프 power의 threshold와 출력광 power가 모두 거의 일치함을 알 수 있다. 그림 3에서 길이가 길어질수록 출력광 power가 감소함을 볼 수 있는데, 이는 긴 길이에서 EDF 끝단쪽으로 갈수록 펌프광 power가 감소하여 forward 방향의 ASE가 흡수되면서 출력광 power가 감소하기 때문이다.

한편, 광섬유 자이로스코프에서 정확한 회전속도를 구하기 위해서는 광원의 중심파장($\bar{\lambda}$)이 일정한 값을 가져야 되는데, 이러한 중심파장의 안정성은 펌프 power와 펌프 파장의 변화에 의하여 영향을 받는다. 이 중에서 펌프 power의 변화에 대한 중심파장의 안정성을 조사하기 위하여, 펌프 power의 변화에 대한 중심파장의 변화율을 계산하여 실험결과와 함께 그림 4에 나타내었다. 그림 4는 중심파장 변화율을 중심파장으로 나누어 규격화한 후 ppm(part per million: 1×10^{-6}) 단위로 실험결과와 함께 나타낸 것이다. 그림 4에서 펌프 power가 증가할수록 모든 길이에 대해서 중심파장 변화율의 절대값이 감소하는데, 계산결과가 실험치와 그 경향이 대체적으로 일치

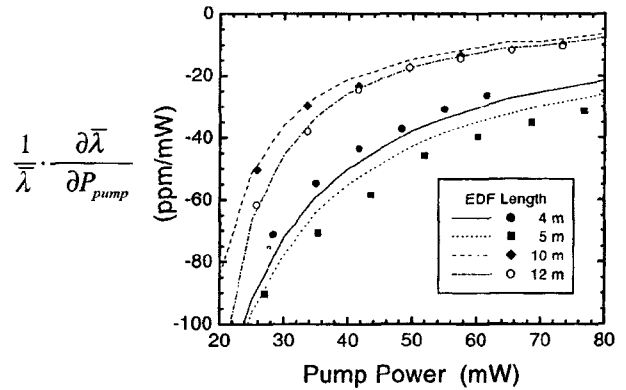


그림 4. 펌프 power 변화에 따른 광원의 중심파장 변화율.

하였다. 또한, 긴 길이의 경우가 짧은 길이에 비해서 펌프 power 변화에 대한 불안정도가 감소함을 알 수 있다.

그림 5는 EDF 길이가 4 m와 10 m인 두가지 경우에 대한 출력광 스펙트럼을 나타낸 결과로, 그림 5(a)는 수치계산 결과이고 그림 5(b)는 실험결과이다. 이때 펌프 power는 모두 60 mW였다. 그림 5에서 보면, 길이에 따라서 출력광 스펙트럼이 상당히 달라짐을 알 수 있다. 짧은 길이(4 m)에서는 출력광 스펙트럼이 1530 nm 대역이 큰 peak를 가지면서 1520~1580 nm 대역에 걸쳐 다소 복잡한 형태로 있는 반면에, 긴 길이(10 m)의 경우에는 1560 nm 부근의 장파장에서 한 개의 peak를 갖는 gaussian 함수와 비슷한 형태의 스펙트럼을 가지고 있다. 수치계산 결과인 그림 5(a)와 실험결과인 5(b)를 비교할 때 거의 동일한 형태의 스펙트럼 결과를 얻었다. 이와 같이 몇 가지 특성에 대해서 수치계산 결과를 실험치와 비교해본 결과, 서로 잘 일치함을 확인할 수 있었으므로, 본 논문에서의 수치계산에 의존하여 DPF 방식 광원의 다른 특성들도 상세히 파악할 수 있을 것으로 여겨진다.

V. 수치계산을 이용한 광원 특성 예측

광섬유 자이로스코프용 광원은 큰 출력광 power와 넓은 파장선폭을 갖추어야 회전속도의 측정감도를 높일 수 있다. SPB

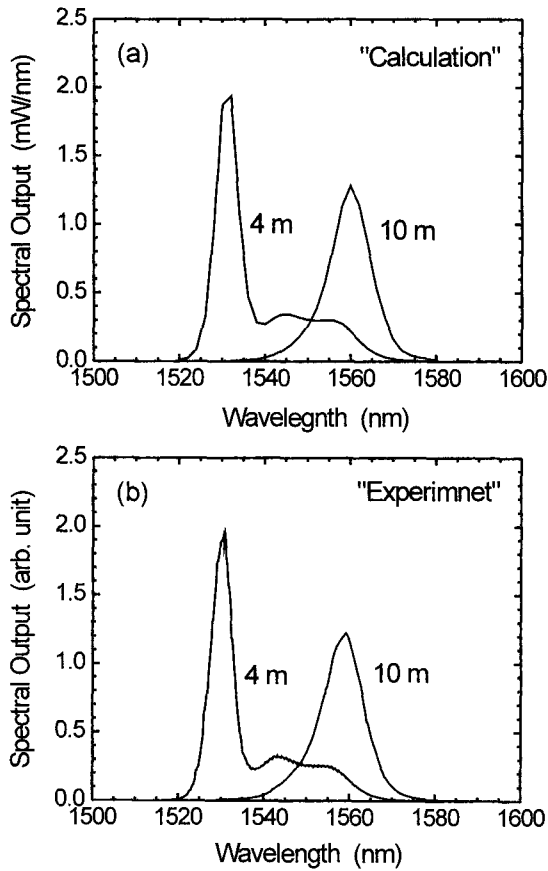


그림 5. 출력광 스펙트럼; (a) 수치계산 결과, (b) 실험 결과.

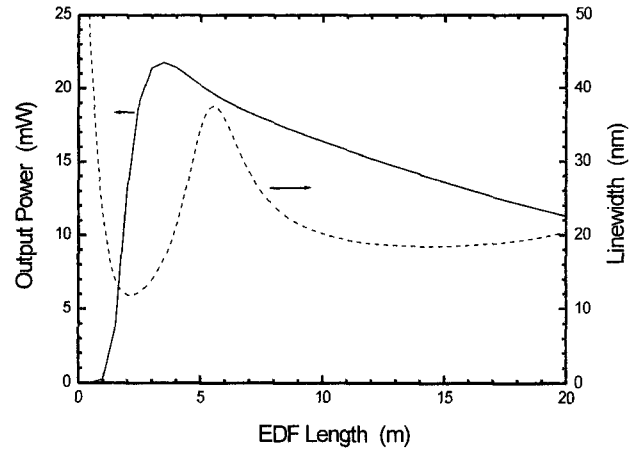


그림 6. EDF 길이에 대한 출력광 power와 파장선폭.

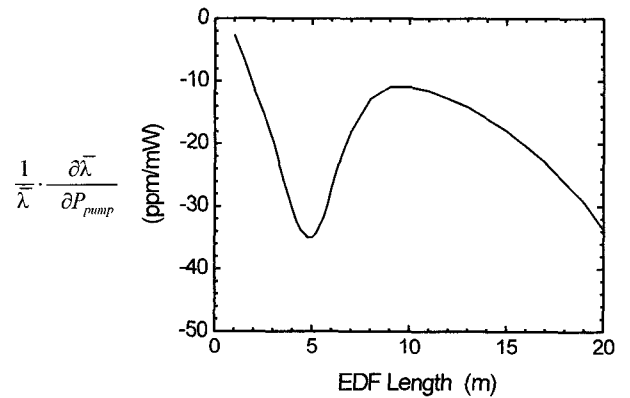


그림 7. 펌프 power 변화에 대한 광원의 중심파장 변화율.

방식에서는 EDF의 길이가 일정길이 이상이 되면 출력광 스펙트럼이 거의 일정하게 유지되며, 출력광 power와 파장선폭도 크게 변하지 않는다.^[3] 이와 달리, DPF 방식에서는 앞의 그림 3과 그림 5에서 본 바와 같이 반사경으로부터 EDF내로 재입사되는 ASE광의 영향으로 EDF 길이에 따라서 광원의 특성이 크게 달라진다. 따라서 광원의 특성을 최적화하기 위해서는 적절한 EDF 길이의 선택이 매우 중요하다.

DPF 방식에서 EDF 길이에 따른 출력광 power와 파장선폭의 변화를 관찰하기 위해서 펌프 power가 60 mW인 경우에 대해 계산한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 출력광 power가 최대가 되는 EDF 길이와 파장선폭이 가장 넓은 EDF 길이는 서로 달랐지만, 파장선폭이 최대인 길이(5.5 m)에서 20 mW 정도의 비교적 큰 출력 power를 얻을 수 있었다. 이는 가능한 최대 출력의 약 90%에 해당한다. 그림 6의 결과만을 놓고 보면 4~7 m의 길이에서 비교적 높은 출력 power와 넓은 파장선폭을 동시에 얻을 수 있어서, 출력과 파장선폭만을 고려한다면 이 길이가 최적 길이처럼 보일 수 있다. 그러나 그림 5에서도 보았듯이, 출력 스펙트럼의 형태에서 짧은 길이에서는 다소 복잡한 양상을 보이는 반면에, 긴 길이에서는 단순한 gaussian 모양의 스펙트럼을 나타내는 등 각기 장단점이 있다. 그 뿐만 아니라, 다음에 언급하겠지만, 펌프 power나 펌프 파장의 요동(fluctuation)에 대한 중심파장의 안정성 면에서는 짧은 길이보다는 긴 길이에서 더욱 안정적인 측면이 있

므로 EDF 길이의 선택은 여러 가지 측면을 고려하여 신중히 이루어져야 한다.

EDF 광원의 중심파장 안정성은 앞서도 언급했듯이 여러 가지 요인에 의해 영향받을 수 있는데, 우선 펌프 power 변화에 의한 효과가 EDF 길이에 따라 어떻게 달라지는지 조사하였다. 펌프 power 흔들림이 중심파장에 미치는 효과를 살펴 보기 위해서, EDF 길이를 변화시키면서 펌프 power 변화에 대한 중심파장의 변화율을 계산하고 규격화하여 그림 7에 나타내었다. 이때 사용된 펌프 power는 60 mW로 가정하였다. 그림 7에서 보면 EDF의 길이에 따라 중심파장의 변화율이 달라지는데, 안정된 중심파장을 얻기 위해서는 펌프 power 변화에 대한 중심파장의 변화율이 0에 근접할수록 유리하다. 그림 7에서 중심파장 변화율의 절대치가 최소가 되는 EDF 길이는 약 10 m인 것으로 나타났다(이후 짧은 길이 영역은 제외). 한편, 파장선폭이 최대가 되는 EDF 길이인 5.5 m의 경우에는 중심파장 변화율의 절대치가 상당히 큰 영역에 속함을 볼 수 있다. 길이 5.5 m에서 중심파장 변화율의 절대값이 최소치(10 m의 경우에 비하여 3배 이상 되었다. 앞서 언급하였듯이, 5.5 m의 길이가 파장선폭만을 고려하면 최적 길이라 할 수 있지만 펌프 power 변화에 대한 중심파장 안정성 측면에서는 불리한 길이가 된다. 따라서 최적화된 EDF 길이의 선택을 위해서는 어떤 특성항목이 더욱 중요시되는냐에 따라 종합적으로 고려

되어야 함을 알 수 있다.

한편, 그림 7의 결과로부터 WDM에 편광의존손실(PDL: polarization dependence loss)이 존재하는 경우에 이 PDL로 인한 EDF 광원 중심파장 변화량을 유추할 수 있다. 펌프 LD의 빛은 WDM을 통해서 EDF 내로 입사되는데, 펌프 WDM의 편광특성, 특히 PDL로 인하여 EDF내로 실제로 결합되는 펌프 power는 펌프광의 편광상태에 따라서 변하게 된다. 예를 들어 WDM의 펌프광에 대한 PDL이 0.01 dB인 경우를 상정할 때, 펌프광이 모든 편광상태를 경험하는 최악의 경우, EDF 내로 결합되는 펌프 power는 0.2% 정도 흔들리게 된다. 그림 7의 경우(60 mW 펌핑)에 적용하면, EDF내 펌프 power의 흔들림은 0.1 mW 정도이고, 이로 인한 광원 중심파장의 최대 변화량은 10 m의 길이에서 약 1 ppm, 5.5 m의 길이에서는 약 3 ppm으로 추산된다. 펌프 WDM의 PDL이 클수록 중심파장의 불안정성이 증가하므로, 가급적 PDL이 작은 WDM을 사용하는 것과 펌프 power 변화가 중심파장에 미치는 영향이 작은 적절한 EDF 길이를 선택하는 것이 중요하다.

이번에는 펌프파장이 중심파장 안정성에 미치는 효과를 살펴보기로 하겠다. 대부분의 펌프 LD는 파장과 출력의 특성을 안정시키기 위하여 펌프 LD의 pigtail에 반사율이 수 %인 광섬유 Bragg 격자를 두어 펌프 LD가 광섬유 격자의 파장에 고정되어 발진하도록 한다. 그런데, 광섬유 격자의 반사파장은 온도에 대해서 대략 0.01 nm/°C의 비율로 변한다. 이 자이로용 EDF 광원이 균용으로 사용되어 100°C 정도의 온도변화를 겪는 경우를 가정하면 펌프 LD의 파장은 최대 1 nm 정도의 변화를 겪게 된다. 따라서 이러한 펌프 파장 변화에 대해 중심파장의 안정성이 높은 EDF 길이를 선정하는 것이 바람직하다. 그림 8은 펌프 파장에 따른 광원의 중심파장을 계산한 결과이다. 펌프 power가 60 mW이고 EDF 길이가 각각 5.5 m와 10 m인 경우에 대해서 계산하였는데, 길이에 따라서 양상이 다르게 나타났다. 그림 8에서 5.5 m의 길이에서는 중심파장이 최소가 되는 펌프파장(983 nm)이 존재하였고, EDF 길이가 10 m인 경우에는 중심파장이 최대가 되는 펌프 파장(977 nm)이 존재하였다. 따라서 펌프 파장 변화에 대하여 중심파장 변화가 0이 되는 펌프 파장, 즉, 중심파장이 최소나 최대가 되는 펌프 파장을 선택한다면 펌프 파장의 미소변화에도 불구하고

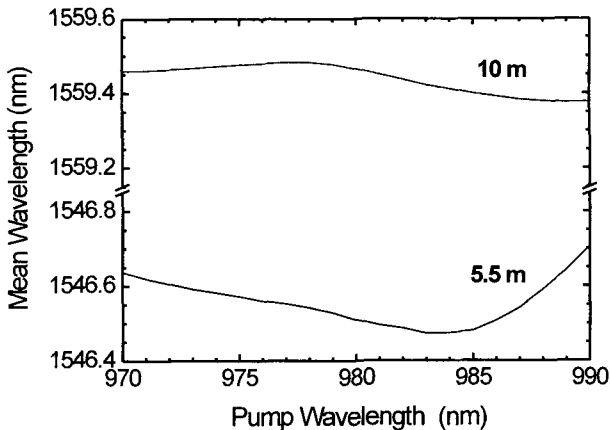


그림 8. 펌프 파장 변화에 대한 광원의 중심파장.

고 안정된 중심파장을 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 이처럼 중심파장이 최소나 최대가 되는 적정 펌프 파장을 중심으로 광원을 동작시킬 때, 최적 펌프 파장을 중심으로 펌프 파장이 1 nm 변화할 경우, 중심파장의 변화량은 5.5 m와 10 m의 EDF 길이에 대해서 각각 1.7 ppm과 1.3 ppm으로 계산되었다. 긴 길이(10 m)의 경우가 짧은 길이(5.5 m)의 경우에 비해 중심파장이 다소 덜 민감하게 변함을 알 수 있다. 요약하면, 안정된 중심파장을 얻기 위해서는 중심파장의 변화가 최소가 되는 적정 펌프 파장을 찾아서 구동시켜야 하며, 적정 펌프 파장이 EDF 길이에 따라 달라지는 점이 광원의 최적 설계시에 충분히 고려되어야 할 것이다.

VI. 요약 및 결론

이 논문에서는 0.98 μm 파장 대역으로 펌핑된 DPF 방식의 EDF 광원에 대하여 수치계산과 일부 실험적 방법을 이용하여 전반적인 특성을 예측 분석함으로써 고성능 자이로스코프용 광원으로서의 적용 가능성을 타진하였다.

본 논문의 수치계산(E_r 이온밀도 $2.65 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 60 mW 펌핑) 경우의 예를 들면, 최대의 파장선평(34 nm)과 비교적 큰 출력 power(20 mW)를 얻을 수 있는 최적 길이는 5.5 m인 것으로 나타났다. 그러나 이 길이에서는 펌프 power의 요동에 대한 중심파장의 안정성이 비교적 낮은 것으로 평가되었다. 펌프 power와 펌프 파장의 요동이 있는 경우에도 안정적인 중심파장 특성을 얻을 수 있는 EDF 길이는 비교적 긴 길이인 약 10 m인 것으로 계산되었다. 이 길이에서는 짧은 길이(5.5 m)의 경우에 비하여 출력 power(17 mW)와 파장선평(20 nm)은 다소 작으나, 펌프 power와 펌프 파장 변화에 대한 중심파장 안정성 면에서는 큰 장점을 가지고 있었다. EDF 길이가 10 m의 영역에서는 펌프 power의 요동을 0.1 mW 이내로 억제하는 경우와 WDM에서 0.01 dB 이하의 편광의존손실이 있는 경우, 그리고 펌프 파장이 최적 펌프 파장(977 nm)을 중심으로 1 nm 변화하는 경우에 모두 2 ppm 이하의 중심파장 흔들림만을 허용하는 수준으로서, 이는 고급 항법용 자이로스코프에 적용 가능한 수준인 것으로 판단된다. 그 뿐만 아니라 이 길이에서는 거의 gaussian에 가까운 형태의 출력광 스펙트럼을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있었다.

결론적으로, DPF 방식의 EDF 광원에서는 광원의 특성이 EDF 길이에 따라 크게 달라지므로 적정 EDF 길이의 선택이 매우 중요함을 알 수 있었다. 특히 펌프 power와 펌프 파장의 요동에 대해 안정된 중심파장을 얻을 수 있는 최적 동작조건(펌프 power 60 mW에서 EDF 길이 10 m, 펌프파장 977 nm)이 존재함도 알 수 있었다. 또한, 자이로스코프의 응용분야에 따라 측정감도와 안정성 중에서 어떠한 특성이 보다 중요시되는냐가 달라지므로 이 점을 고려하여 광원의 최적 설계가 이루어져야 할 것으로 생각한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술원 전자광학특화연구센터를 통한 국

방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] R. P. Moeller, W. K. Burns, and N. J. Frigo, "Open-loop output and scale factor stability in a fiber-optic gyroscope," *J. Lightwave Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 262-269, 1989.

[2] K. Iwatsuki, "Er-doped superfluorescent fiber laser pumped by 1.48 μm laser diode," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, no. 4, pp. 237-238, 1990.

[3] P. F. Wysocki, M. J. F. Digonnet, B. Y. Kim, and H. J. Shaw, "Characteristics of erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications," *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 550-567, 1994.

[4] D. C. Hall, W. K. Burns, and R. P. Moeller, "High-stability Er^{3+} -doped superfluorescent fiber sources," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 7, pp. 1452-1460, 1995.

[5] H. G. Park, K. A. Lim, Y.-J. Chin, and B. Y. Kim, "Feedback effects in erbium-doped fiber amplifier/source for open-loop fiber-optic gyroscope," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1587-1593, 1997.

[6] 임경아, 진영준, 박희갑, "Gyroscope용 광대역폭 Erbium 첨가 광섬유 광원의 구성과 특성 측정," *한국광학회지*, 제 8권 4호, pp. 320-326, 1997.

[7] J. L. Wagener, M. J. F. Digonnet, and H. J. Shaw, "A high-stability fiber amplifier source for the fiber optic gyroscope," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 9, pp. 1689-1694, 1997.

[8] 진영준, 박희갑, "광대역폭 Erbium 첨가 광섬유 광원의 중심파장 안정성," *한국광학회지*, 제 8권 6호, pp. 476-481, 1997.

[9] H. G. Park, Y.-J. Chin, and B. Y. Kim, "Gain-clamped fibre amplifier/source for gyroscope," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 2, pp. 167-168, 1999.

[10] H. G. Park, Y.-J. Chin, and B. Y. Kim, "Stabilization of fibre-amplifier/source gyroscope by optimum modulation amplitude tracking," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 13, pp. 1100-1102, 1999.

[11] D. G. Falquier, M. J. F. Digonnet, and H. J. Shaw, "A polarization-stable Er-doped superfluorescent fiber source including a Faraday rotator mirror," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 11, pp. 1465-1467, 2000.

[12] S. Yamashita, K. Hotate, and M. Ito, "Polarization properties of a reflective fiber amplifier employing a circulator and a faraday rotator mirror," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 3, pp. 385-390, 1996.

[13] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C : The Art of Scientific Computing* (Cambridge University Press, USA, 1993), Chapter 17.

Characteristics of erbium-doped fiber sources with double-pass forward configuration for gyroscope application

Young-Jun Jin, Young Soon Heo, Taek Jung Kim, and Hee Gap Park[†]

Department of Physics, Chonbuk National University, Chonju 561-756, KOREA

[†]E-mail: hgpark@chonbuk.ac.kr

(Received March 21, 2003, Revised manuscript June 20, 2003)

Characteristics of 0.98 μm -pumped erbium-doped fiber (EDF) sources with double-pass forward (DPF) configuration are analyzed by numerical calculation. Various source characteristics such as output power, spectral width and mean-wavelength stability are investigated with the variation of EDF length, pump power and pump wavelength. Some of the numerical results are compared with experimental ones for verification. The results show that the characteristics of sources with DPF configuration can change considerably with the EDF length. It is also found that an optimum design can exist for stable mean-wavelength against fluctuations of pump power and pump wavelength.

OCIS Code : 250.4480.