

광대역폭 Erbium 첨가 광섬유 광원의 중심파장 안정성*

진영준 · 박희갑
전북대학교 물리학과

(1997년 10월 13일 받음)

0.98 μm 파장으로 펌핑되는 광대역폭 erbium 첨가 광섬유 광원에서 중심파장의 변화를 최소화할 수 있는 최적 동작 조건을 실험적으로 도출하였다. 중심파장의 안정을 위한 최적 조건은 광원이 isolation된 경우와 광원에 귀환광이 존재하는 경우에 각기 다르게 나타났다. 귀환광이 있는 경우에는 isolation된 경우에 비해 적정 펌프 power가 낮은 power 영역에서 존재하였으며 더욱 넓은 펌프 power 범위에 걸쳐 중심파장의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 다만 isolation된 경우에 비해 광출력이 감소하였으며 중심파장의 변화가 귀환수준의 변화에 대해 민감하였다. 따라서 귀환수준만 일정하게 유지된다면 귀환광이 존재하는 경우에 중심파장 안정성면에서 더 나은 특성을 얻을 수 있으며, 광원에 일정한 수준의 dc 귀환광을 넣어 줄으로써 중심파장 안정성을 강화시킬 수 있다.

I. 서 론

광센서 및 간섭계 중에는 넓은 선폭의 광원을 필요로 하는 분야가 있다. 이 중에서 간섭계의 원리를 이용한 광섬유 자이로스코프(이하 줄여 자이로라 함)는 광대역폭 광원을 필요로 하는 대표적인 분야이다.^[1] 자이로에서는 회전속도의 측정값도와 함께 안정성이 매우 중요한 특성이다. 자이로가 고도의 안정성을 유지하기 위해서는 광원이 매우 안정된 특성을 가져야 한다. 특히 광원의 중심파장이 자이로의 동작상태나 온도와 같은 외부환경의 변화에도 불구하고 변함이 없어야 자이로의 scale factor가 일정하게 유지될 수 있다.^[2]

그런데 기존에 자이로용 광원으로 주로 사용되고 있는 Superluminescent diode는 온도변화에 대해서 중심파장의 변화가 대개 수백 $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 정도로 항법용 고급 자이로에는 적용하기 어려운 면이 있다. 온도변화에 대한 중심파장의 안정성을 향상시키기 위해서 erbium 첨가 광섬유(erbium-doped fiber: EDF)를 광원으로 이용하는 광섬유 광원 방식이 제안되었고, 이에 관한 연구가 많이 이루어져 왔다.^[3-9] EDF 광원은 온도변화에 대한 직접적인 중심파장의 변화율이 수 $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 정도로 상당히 안정된 특성을 가지고 있다. 그러나 온도변화에 따른 펌프 LD의 파장과 펌프 power의 변화로 인한 간접적인 효과에 의해 중심파장 변화가 일어날 수 있다.^[6] 따라서, 항법용 자이로의 경우처럼 광원의 중심파장이 매우 안정된 상태가 요구되는 경우에는 이러한 간접적인 효과들을 최소화시켜야 한다. 이러한 광원의 중심파장의 안정성은 EDF 길이와 펌프 파장, 펌프 power 등의 동작 조건을 최적화함으로써 극대화할 수 있으며, 이에 대한 실험은 자이로로부터 광원으로 feedback되는 귀환광을 광 isolator로써 차단한 경우에 대해

이루어진 바 있다.^[6,7] 그러나, 귀환광이 존재하는 광원에 대해서는 중심파장 안정화를 위한 적정 동작 조건에 대한 연구나 광원이 isolation된 경우와의 광원 특성상 차이점에 대한 분석이 이루어진 바 없다.

그런데, 자이로의 방식에 따라서는 구조적으로 광원을 isolation시킬 수 없는 경우가 있다. Fiber Amplifier/Source 방식^[8,9]에서는 EDF 광원이 광원의 역할과 함께 자이로로부터 돌아오는 광신호에 대한 광증폭기의 역할까지 겸하게 된다. 따라서 이 방식에서는 광원의 출력단에 isolator를 사용할 수 없으므로 광원이 귀환광의 영향을 받는 것이 불가피하며 이러한 귀환광에 의한 효과가 충분히 연구되어야 한다. 또한, closed-loop 방식의 신호처리^[10]를 하는 자이로에서는 자이로의 출력광 power, 즉, 광원으로서의 귀환광 power가 동작중에 일정한 크기로 유지된다. 이러한 경우에는 귀환광에 의한 자이로의 성능저하가 특별히 문제되지 않을 수 있으므로 경제성 차원에서 광원의 출력단에 광 isolator를 배제한 설계도 고려할만한 가치가 있다.

본 논문에서는 EDF 광원이 isolation된 경우와 귀환광이 존재하는 경우에 대하여, EDF 길이와 펌프 power를 변화시키며 중심파장의 변화를 측정하여 이러한 측정치로부터 중심파장 안정을 위한 최적조건을 도출하였다. 특히, 귀환광이 존재하는 경우의 광원특성을 광원이 isolation된 경우와 비교하고 그 결과와 응용성에 대해서 논의하였다.

II. Erbium 첨가 광섬유 광원의 중심파장 안정 조건

광섬유 자이로스코프는 광섬유로 이루어진 Sagnac 루프내에서 시계 방향과 반시계 방향으로 회전한 빛들간의 위상차 $\Delta\phi_R$ 를 측정함으로써 시스템의 회전속도 Ω 를 구하는 광센서이다. 이때 위상차와 회전속도와의 관계는 다음 식으로 표현된다.^[1]

$$\Delta\phi_R = \frac{2\pi L D}{\lambda c} \cdot \Omega \quad (1)$$

*본 연구의 과정에서 도움을 주신 한국과학기술원의 김병운 교수님께 감사를 드립니다. 이 연구는 한국과학기술원 전자광학특화연구센터를 통한 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

여기에서 L 은 Sagnac 루프의 길이, D 는 광섬유 코일의 직경, λ 는 광원의 중심파장, 그리고 c 는 진공중에서의 빛의 속도를 나타낸다. 따라서 측정된 위상차로부터 정확한 회전속도를 구하기 위해서는 광원의 중심파장 λ 가 일정한 값을 가져야 한다. 그러나 일반적으로, 광원의 중심파장은 온도변화와 같은 주위환경의 변화의 영향을 받을 뿐 아니라, 특히 펌프광 power와 펌프광 파장의 변화에 대해 민감하다. EDF 광원의 펌핑에는 주로 고출력 LD가 사용되는데 LD의 출력 power와 파장은 무엇보다도 온도에 따라 예민하게 변화한다. 따라서 온도를 가장 중요한 변수로 볼 수 있는데 온도 T 에 대한 광섬유 광원의 중심파장 λ 의 변화율은 다음과 같은 식으로 표현된다.^[6]

$$\frac{d\bar{\lambda}}{dT} = \frac{\partial\bar{\lambda}}{\partial T} + \left(\frac{\partial\bar{\lambda}}{\partial\lambda_{pump}} \right) \cdot \left(\frac{\partial\lambda_{pump}}{\partial T} \right) + \left(\frac{\partial\bar{\lambda}}{\partial P_{pump}} \right) \cdot \left(\frac{\partial P_{pump}}{\partial T} \right) \quad (2)$$

윗식에서 P_{pump} 와 λ_{pump} 는 각각 펌프 power와 펌프 파장을 의미한다. 첫번째 항인 $\frac{\partial\bar{\lambda}}{\partial T}$ 펌프 power와 펌프 파장이 일정하게 유지되는 상태에서 온도만이 변화할때의 변화율을 의미하는데, 매질 자체의 고유한 특성으로서 더이상 줄일 수 없으며 EDF의 경우에 대략 3~5 ppm/°C 정도이다.^[7] 둘째항은 온도변화에 의해 펌프 파장이 변화하게 되고 이로 인해 EDF 광원의 중심파장이 변화할 수 있음을 보여준다. 그런데 펌프 파장을 0.98 μm 부근의 EDF 흡수선 스펙트럼의 absorption peak에 맞추면 $\partial\bar{\lambda}/\partial\lambda_{pump}$ 를 0으로 만들 수 있으므로^[6] 이 둘째항의 효과를 최소화할 수 있다. 마지막 항은 온도변화에 의한 펌프 power 변화가 EDF 광원의 중심파장에 미치는 효과인데, 만일 $\partial\bar{\lambda}/\partial P_{pump}$ 를 0이 되는 조건에서 EDF 광원을 동작시키면 이 효과 역시 최소화할 수 있다. 따라서, 0.98 μm 대역의 흡수 peak 파장으로 펌핑하고, 펌프 power에 대한 중심파장의 변화율이 0이 되는 펌프 power에서 동작시키면, 온도변화에 대한 중심파장의 변화를 최소화할 수 있으며 아울러 펌프 power와 파장이 다소 fluctuation하더라도 중심파장을 안정시킬 수 있다. 본 연구에서는 여러 경우에 대하여 이러한 중심파장 안정 조건을 만족시키는 최적 동작 조건에 관해 실험적으로 조사하였다.

III. 실험방법

EDF 광원이 isolation된 경우와 귀환광이 존재하는 경우의 실험장치 구성을 각각 그림 1(a)과 1(b)에 나타내었다. 펌프 LD에서 나온 빛이 wavelength division multiplexer(WDM)를 통해 EDF내로 입사되며, EDF 내에서 발생하는 자연방출광이 양방향으로 진행하면서 증폭되어 ASE(amplified spontaneous emission)의 형태로 EDF의 양끝단으로 방출된다. 여기에서 후방출력(펌프광의 진행과 반대방향의 출력)을 광원의 출력으로 삼았다. 전방출력 방향의 EDF 끝단의 사선은 단

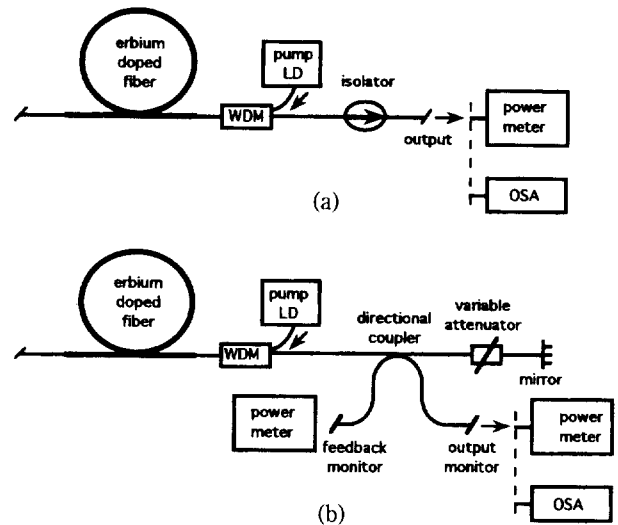


그림 1. EDF 광원 특성 측정 장치 구성도. (a) 광원이 isolation된 경우, (b) 광원에 귀환광이 존재하는 경우(WDM : wavelength division multi plexer, LD : laser diode, OSA : optical spectrum analyzer)

면 반사광이 EDF 내로 다시 유입되지 않도록 경사지게 연마된 것을 나타낸다. 광원이 isolation된 경우는 후방출력 방향에 isolator를 삽입하여 광원에서 나온 빛이 EDF로 귀환되는 것을 차단하였다. 실험에서 사용된 EDF는 1.53 μm 와 1.55 μm 파장에서의 흡수율이 각각 2.2 dB/m와 1.7 dB/m이고, erbium과 Al이 함께 첨가되었다. Erbium 첨가밀도는 약 300 ppm 정도로 추정되며, LP₁₁ 모드의 차단파장(cutoff wavelength)이 1.02 μm 이고 코어와 클래딩간의 굴절률 차이가 0.023이다. 광 isolator는 역방향 손실(return loss)이 1.55 μm 에서 38 dB로 최대이고 1.5 μm 와 1.6 μm 에서는 32 dB였다. 사용한 펌프 LD의 파장은 979 nm로서 EDF 흡수 peak와 거의 일치하였다.

한편, 광원이 isolation되지 않은 경우에 귀환광에 의한 EDF 광원의 특성변화는 주로 dc 성분에 의해서 발생되므로^[9,11] 본 실험에서는 dc 귀환광 효과만을 실험하였다. 그림 1(b)에서 후방출력 방향에 반사경을 설치하고, 반사경과 EDF 사이에 가변 광감쇠기(variable attenuator)를 설치하여 귀환수준(feedback level), 즉, 출력광 power에 대한 귀환광 power의 비율을 조절하였다. 출력광 power와 스펙트럼의 특성은 그림 1(b)에서 'output monitor'단에서 측정하였으며, 귀환광 power를 'feedback monitor'단에서 측정하여 두 power의 비로부터 귀환수준을 결정하였다. 분해능이 0.1 nm인 optical spectrum analyzer(OSA)를 이용하여 출력광의 spectral power density $P(\lambda)$ 를 측정하였으며, $P(\lambda)$ 의 측정 data로부터 중심파장 $\bar{\lambda}$ 와 파장선폭 $\Delta\lambda$ 를 각각 식 (3)과 식 (4)에 따라 계산하였다.^[7]

$$\bar{\lambda} = \frac{\int P(\lambda) \cdot \lambda d\lambda}{\int P(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

$$\Delta\lambda = \frac{[\int P(\lambda) d\lambda]^2}{\int P^2(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

광원이 isolation된 경우에는 isolator를 거쳐나온 출력을 광원의 출력으로 삼았으며, isolation되지 않는 경우에는 'output monitor'단에서 측정된 광 power로부터 방향성 결합기에서의 손실을 고려하여 WDM과 방향성 결합기의 중간에서의 power를 광원의 출력 power로 취하였다.

IV. 실험결과 및 논의

4.1. 광원이 isolation된 경우

광원이 isolation된 경우에 여러 가지의 EDF 길이에 대하여 펌프광 power를 변화시키며 광원의 중심파장을 측정하여 그림 2에 나타내었다. 각각의 EDF 길이에 대한 결과를 분석하면, EDF의 길이가 32 m인 경우에는 펌프광 power가 증가할수록 중심파장이 일방적으로 감소했으나, 45 m 이상인 경우에는 펌프광 power에 대한 중심파장의 변화율이 0이 되는 지점들이 존재하였다. 특히 45 m인 경우에는 펌프광 power 45 mW에서 중심파장의 변화율이 0이었으며, 59 m인 경우에도 70 mW의 펌프광 power에서 중심파장의 변화율이 거의 0에 접근하였다. 중심파장의 특성이 길이에 따라 다르게 나타나는 이유는 EDF의 길이에 따라서 동일한 펌프 power에 대한 단파장 peak(1.53 μm)와 장파장 peak(1.55 μm)의 펌핑 효율이 다르기 때문이다.^[11] 이밖에도 펌프 power 15 mW 부근에서 기울기가 0이 되는 부분이 존재하나, 이처럼 낮은 펌프 power에서는 충분한 광출력을 얻을 수 없으므로 논의에서 제외하기로 한다.

그림 2의 결과를 보면, EDF의 길이가 45 m와 59 m사이인 경우에 45~70 mW 범위내에서 펌프광 power 변화에 대한 중심파장의 변화율이 0이 되는 적정 펌프 power가 존재함을 유추할 수 있다. 그림 2의 그래프에서 기울기가 0이 되는 적정 펌프 power에서 EDF 광원을 동작시키면 펌프 LD의 power에 흔들림이 다소 있더라도 이로 인한 중심파장의 변화는 매우 작을 것이며, 식 (2)에서 보는 바와 같이 중심파장의 온도의존성도 최소화될 것임을 알 수 있다. 예를 들어, 측정치를

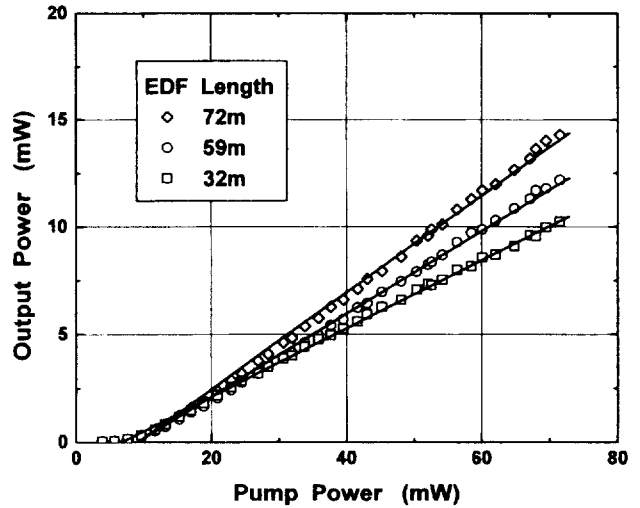


그림 3. 광원이 isolation된 경우에 펌프광 power에 대한 출력광 power 변화

fitting한 곡선으로부터 추정해 볼때, 45 m의 EDF 길이에 대해 45 mW의 적정 펌프 power를 중심으로 $\pm 0.5\%$ 의 펌프 power 변화에 대한 중심파장의 변화는 0.3 ppm 이내가 된다. 반면에 72 m의 경우에는 같은 펌프 power 변화에 대해 무려 50 ppm 정도 변화하는 것으로 나타났다.

그림 3은 여러 EDF의 길이에 대하여 펌프광 power를 변화시키며 광원의 출력광 power를 측정한 결과이다. 펌프광 power와 광원의 출력광 power 사이의 관계가 거의 선형적이었으며, 출력광 power의 크기는 EDF 길이가 길수록 증가하여 기존의 결과와 유사하다.^[6] 중심파장 안정을 위한 적정 펌프 power도 EDF 길이가 길수록 더 커지는데, 적정 펌프 power가 가용한 펌프 power 범위내의 가능한 한 큰 값에서 존재하도록 EDF 길이를 결정하는 것이 광출력 면에서 유리하다.

각각의 EDF의 길이에 대하여 펌프광 power를 변화시키며 측정된 출력광 스펙트럼으로부터 식 (4)식에 의해 계산하여 그림 4에 나타내었다. 펌프 power에 대한 파장선폭의 곡선 형

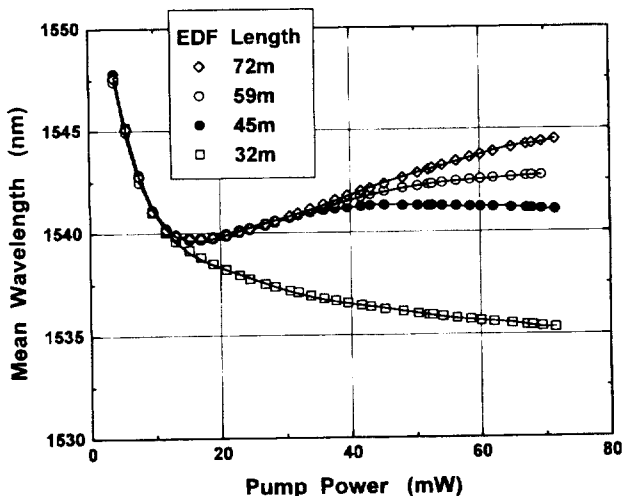


그림 2. 광원이 isolation된 경우에 펌프광 power에 대한 중심파장의 변화

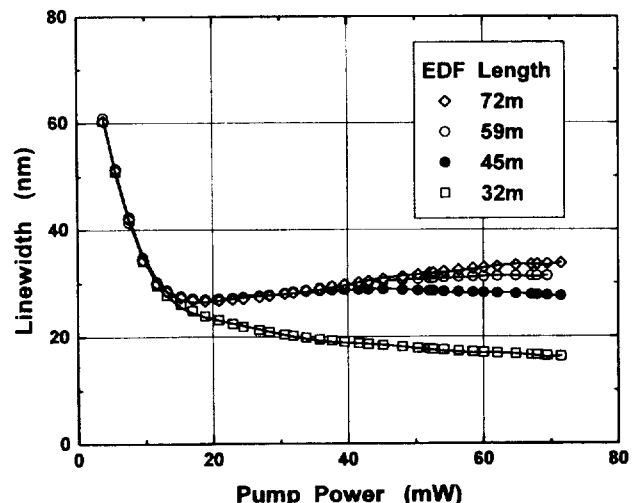


그림 4. 광원이 isolation된 경우에 펌프광 power에 대한 파장선폭의 변화

태가 중심파장 곡선과 유사한 경향을 나타내고 있음에 주목할 필요가 있다. 이는 중심파장이나 파장선폭의 변화가 출력 스펙트럼상의 두 peak 중 단파장 peak에 의해 주도되고 있기 때문이며, 펌프 power의 증가에 따라 단파장 peak의 성장률이 감소하는 영역에서 최대 파장선폭과 함께 중심파장의 안정이 이루어졌다. EDF 길이가 32 m의 경우를 제외하면 대부분의 펌프 power 범위에서 25 nm 이상의 파장선폭을 얻었으며, 특히 EDF 길이 59 m의 경우에 중심파장을 안정화시키는 적정 펌프 power(70 mW)에서 31 nm의 넓은 파장선폭을 얻었다.

4.2. 광원에 귀환광이 존재하는 경우

그림 1(b)의 실험장치에서 여러 EDF 길이에 대해 가변 광 감쇄기로 귀환율을 변화시키며 출력 스펙트럼을 측정하였다. 그림 5는 귀환수준이 -10 dB로 비교적 큰 경우에, 각각의 길이에 대해서 펌프광 power를 변화시키며 광원의 중심파장을 측정한 결과이다. 그림 2의 결과와 비교해 볼 때, 광원에 귀환광이 존재하는 경우에 isolation된 경우와 비교하여 중심파장 변화율이 0이 되는 적정 펌프 power가 전반적으로 감소함을 볼 수 있다. 또한 EDF 길이가 긴 경우, 예를 들어 72 m 길이의 경우, 그림 2에서는 본 실험에서 가용한 펌프 power 범위 내에 적정 펌프 power가 존재하지 않았으나 그림 5에서는 40~50 mW 범위에서 존재함을 볼 수 있다. 따라서 펌프 power 변화에 대한 중심파장 안정성면에서만 보면 귀환광이 존재하는 경우에 isolation된 광원의 경우와 비교해서 더 나은 특성을 얻을 수도 있음을 알 수 있다. 특히 EDF 길이 59 m의 경우에는 30~55 mW의 넓은 펌프 power 영역에 걸쳐 평탄한 고원(plateau) 형태를 나타내고 있어서 매우 바람직한 특성을 보여 주었다. 따라서 EDF 길이 59 m의 경우에 대해 귀환수준에 따른 중심파장 변화를 조사하였다. 그림 6은 EDF 길이가 59 m인 경우에 여러 가지 귀환수준에 대하여 펌프광 power를 변화시키면서 광원의 중심파장을 측정한 결과이다. 귀환수준이 -40 dB인 경우에는 isolator를 사용한 경우와 거의 동일한 결과를 얻었다. 귀환수준이 증가할수록 중심파장은 전반적으로 장파장쪽으로 이동하였으며 중심파장의 변화율은 감소하

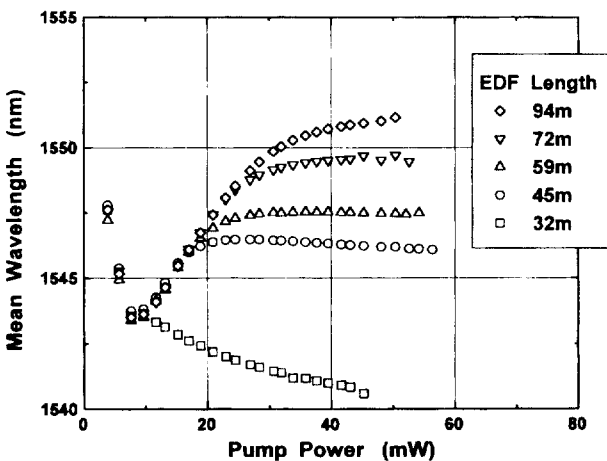


그림 5. 귀환수준이 -10 dB인 경우에 펌프광 power에 대한 중심파장의 변화

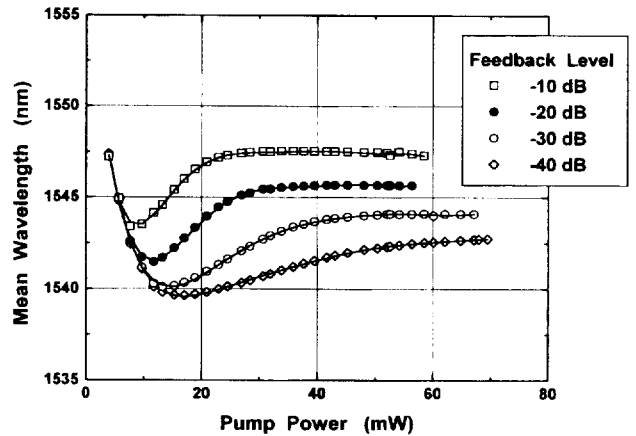


그림 6. EDF 길이가 59 m인 경우에 펌프광 power에 대한 중심파장의 변화

였다. 이는 귀환광이 EDF의 이득을 포화시키면서 출력 스펙트럼의 단파장 peak가 장파장 peak보다 더욱 크게 감소하고^[5], 중심파장 특성도 달라졌기 때문으로 여겨진다. 귀환수준이 -10 dB인 경우로부터 거의 isolation된 경우에 이르기까지 적정 펌프 power가 가용한 펌프 power 범위내에 존재함을 볼 수 있다. 대부분의 광섬유 자이로스코프에서 isolator를 사용하지 않을 경우에 광섬유 광원으로의 귀환수준이 대략 -10에서 -30 dB 사이일 것임을 예상할 때 59 m 길이는 펌프 power 변화에 대한 중심파장 안정성면에서 매우 적절한 길이임을 알 수 있다.

그림 7은 EDF 길이가 59 m이고 펌프광 power가 50 mW인 경우에 귀환수준을 변화시키면서 광원의 중심파장을 측정한 결과이다. 귀환수준의 변화에 대한 중심파장의 변화는 약 0.18 nm/dB로서 거의 선형적인 것으로 나타났는데 이는 약 120 ppm/dB에 해당한다. 일반적으로 광원을 isolation 시켜주지 않은 open-loop 방식의 자이로에서는 회전 속도에 따라 귀환수준이 변화할 수 있다. 또한 closed-loop 자이로에서 이론적으로는 귀환수준이 일정하게 유지될 수 있지만 실제로는

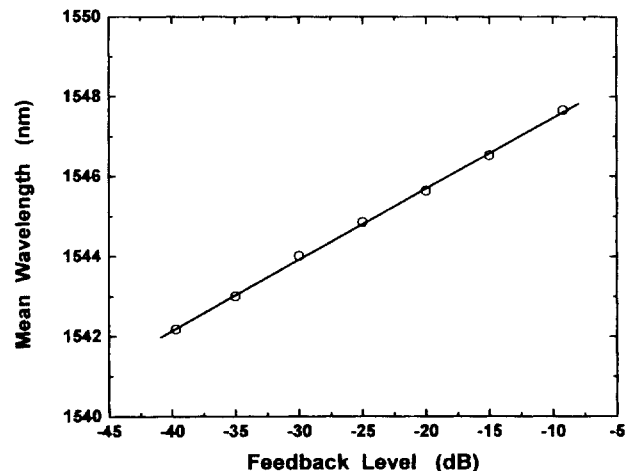


그림 7. EDF 길이가 59 m인 경우에 귀환수준에 대한 중심파장의 변화

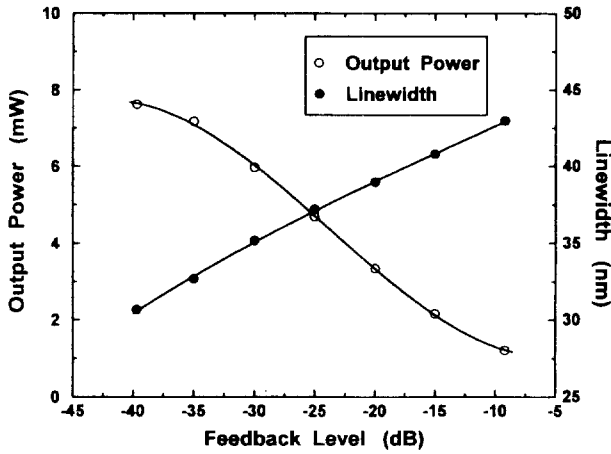


그림 8. EDF 길이가 59 m인 경우에 귀환수준에 대한 출력광 power와 파장선폭의 변화

어떤 이유에서든지 자이로 동작중에 귀환수준이 소폭 변화할 수 있다. 어느 경우든지 그림 7과 같은 조건에서 중심파장 변화를 10 ppm 이내로 억제하기 위해서는 귀환수준의 변화를 0.08 dB 이내로 유지시켜야 함을 알 수 있다.

귀환수준을 변화시키면서 광원의 출력광 power와 파장선폭을 측정 한 결과를 그림 8에 나타내었다. 이때의 EDF 길이는 59 m이고 구동 펌프광 power는 50 mW였다. 귀환수준이 증가할수록 파장선폭은 더욱 넓어졌으며 출력광 power는 감소하였다. 이는 귀환광이 출력과 반대방향으로 EDF를 따라 전방(펌프광 진행 방향)으로 진행하면서 EDF의 이득을 포화시키기 때문인 것으로 해석된다.

이상의 실험결과들을 종합해 볼 때, EDF 광원에 귀환광이 존재하는 경우에 isolation된 경우와 비교하여 광출력은 감소하지만 파장선폭과 중심파장 안정성 면에서는 오히려 유리한 면이 있음을 알 수 있다. 자이로용 광원에서 높은 광출력과 중심파장 안정성, 그리고 넓은 파장선폭이 모두 중요한 특성이기는 하지만 응용분야에 따라서는 중심파장의 안정성과 파장선폭이 광출력보다 더욱 중요시되는 분야도 있다. 이러한 경우에 귀환광 효과를 광원 설계에 보다 적극적으로 활용할 수 있을 것이다. 광원과 자이로가 상호 isolation된 경우에도 의도적으로 광원에 일정한 귀환광을 넣어줌으로써 광원의 특성을 설계자가 원하는 방향으로 변화시킬 수 있다. 가령 그림 9와 같이 광원과 자이로가 isolator로 분리된 경우에 광원의 출력단에서 약간의 tap을 내어 자이로 회전신호와는 무관하게 일정한 크기의 dc 귀환광이 있도록 하고, 귀환수준까지 포함한 여러 설계 변수들을 최적화하면 중심파장 면에서 더욱

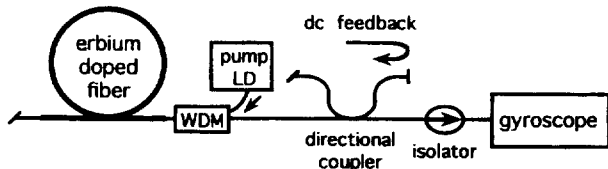


그림 9. DC 귀환광 효과를 이용한 광원 특성 조절

안정된 광원 특성을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

V. 결 론

0.98 μm 파장으로 펌핑되는 자이로용 EDF 광원에서 온도와 펌프 power 변화에 대해 중심파장의 변화를 최소화할 수 있는 최적 동작 조건을 구하였다. 즉, 펌프 power에 대해 중심파장의 변화율이 0이 되는 적정 펌프 power를 결정하였으며, 가용 펌프 power 범위내에 적정 펌프 power를 가지는 EDF의 최적 길이가 존재함을 알 수 있었다. 이와 같은 최적 동작 조건은 광원이 isolation된 경우와 광원에 귀환광이 있는 경우에 각기 다르게 나타났다. 광원이 isolation된 경우에는 EDF 길이가 45~59 m의 경우에 펌프 power 45~70 mW 범위내에 적정 펌프 power가 존재하였다. 귀환광이 있는 경우에는 귀환광이 없는(isolation된) 경우에 비해 적정 펌프 power가 낮은 power 영역에서 존재하였으며 보다 넓은 펌프 power 범위에 걸쳐 중심파장의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 다만 귀환광이 없는 경우에 비해 광출력은 감소하였고 파장선폭은 증가하였으며 중심파장의 변화가 귀환수준의 변화에 대해 민감하였다. 따라서 귀환수준만 일정하게 유지된다면 중심파장 안정성면에서는 귀환광이 존재하는 경우에 더욱 안정된 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 자이로의 응용 분야에 따라서는 큰 광출력보다 중심파장의 안정성과 넓은 파장선폭이 보다 중요시되는 경우가 있을 수 있다. 이러한 경우에 EDF 광원에 의도적으로 일정한(자이로의 회전신호와는 무관한) 귀환광이 있도록 함으로써 중심파장 안정성을 더욱 강화하는 것이 가능할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] H. Lefevre, *The Fiber-Optic Gyroscope*, Boston, MA: Artech House, 1993.
- [2] R. P. Moeller, W. K. Burns and N. J. Frigo, *J. Lightwave Technol.* **7**, 262 (1989).
- [3] K. Liu, M. Dignonnet, H. J. Shaw, B. J. Ainslie and S. P. Craig, *Electron. Lett.* **23**, 1320 (1987).
- [4] H. Fevrier, J. F. Marcerou, P. Bousselet, J. Auge and M. Jurczyszyn, *Electron. Lett.* **27**, 261 (1991).
- [5] 임경아, 진영준, 박희갑, *한국광학회지*, **8**, 320 (1997).
- [6] Paul F. Wysocki, M. J. F. Dignonnet, B. Y. Kim and H. J. Shaw, *J. Lightwave Technol.* **12**, 550 (1994).
- [7] Douglas C. Hall, William K. Burns and Robert P. Moeller, *J. Lightwave Technol.* **13**, 1452 (1995).
- [8] K. A. Fesler, M. J. F. Dignonnet, B. Y. Kim and H. J. Shaw, *Opt. Lett.* **15**, 1321 (1990).
- [9] Hee Gap Park, Kyoung Ah Lim, Young-Jun Chin and Byoung Yoon Kim, *J. Lightwave Technol.* **15**, 1587 (1997).
- [10] A. Ebborg and G. Schiffner, *Opt. Lett.* **10**, 300 (1985)
- [11] Emmanuel Desurvire, C. Randy Giles and Jay R. Simpson, *J. Lightwave Technol.* **7**, 2095 (1989).

Mean wavelength stability of broadband erbium-doped fiber sources

Young-Jun Chin and Hee Gap Park

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

(Received : October 13, 1997)

Optimum operating conditions of the 0.98 μm -pumped broadband erbium-doped fiber sources, where the mean wavelength variation is minimized, have been experimentally investigated. The optimum conditions for the mean wavelength stabilization were found to be different between the case of the isolated source and the case of the presence of feedback. In case of feedback, the proper pump power that yields zero slope of mean wavelength variation was found to be lower than that of the isolated case, and the mean wavelength was found nearly unchanged over the wide range of pump power. However, the feedback resulted in lower output power and the mean wavelength was found to be sensitive to the variation of feedback level. In the respect of mean wavelength stability, the better performance could be obtained with some feedback, provided that the feedback level is kept constant. Thus we could also enhance the mean wavelength stability by allowing appropriate constant feedback into the source.