

단일 주파수로 발진하는 파장 가변 어븀 첨가 광섬유 링 레이저

김륜경 · 추수호 · 한영근[†]

한양대학교 물리학과

☉ 133-791 서울특별시 성동구 행당동 산 17

(2010년 8월 26일 받음, 2010년 10월 5일 수정본 받음, 2010년 10월 7일 게재 확정)

본 논문에서는 단일 주파수를 가지는 파장 가변 어븀 첨가 광섬유 링 레이저를 제안하고 실험적으로 구현하였다. 레이저 공진기에 포화 흡수체로서 어븀 첨가 광섬유를 삽입하여 좁은 선폭의 단일 편광모드를 가지고 단일 주파수로 발진하는 광섬유 레이저를 구현하였다. 대칭적 구부림 기술을 이용하여 레이저의 발진파장을 넓게 가변할 수 있으며, 양방향 구부림에 의한 인장력과 수축력을 광섬유 격자 내에 유도하여 약 5 nm 이상의 파장 변환이 가능한 레이저를 구현하였다. 광섬유 레이저는 약 400 mW의 펄스파워를 인가하여 1540.72 nm의 중심파장에서 -1.85 dBm의 출력파워를 가지고 발진하였고, 약 60 dB 이상의 소광비를 보였다. 약 5 nm 이상의 파장범위에서 거의 동일한 출력파워를 유지하며 안정적으로 파장 변환이 가능하였다.

Single-frequency Wavelength Tunable Erbium-doped Fiber Ring Laser

Ryun Kyung Kim, Suho Chu, and Young-Geun Han[†]

Department of Physics, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

(Received August 26, 2010; Revised manuscript October 5, 2010; Accepted October 7, 2010)

We demonstrate a single-frequency wavelength tunable erbium-doped fiber (EDF) ring laser. We used an unpumped-EDF as a saturable-absorber in order to obtain a stable single-frequency with a narrow-linewidth single-polarization mode in the ring cavity. The lasing wavelength was controlled by using bending-induced strain, such as tension and compression strain corresponding to the bending direction, applied to the fiber gratings. The fiber laser exhibited an output power of -1.85 dBm at a wavelength of 1540.72 nm for a pumping power of ~400 mW. An extinction ratio was measured to be more than 60 dB. The proposed tunable fiber laser maintains nearly the same output power while its lasing wavelength is controlled over in a wavelength range of 5 nm.

Keywords: Single-frequency, Fiber Bragg grating, Erbium-doped fiber, Optical heterodyne detection, Beat frequency

OCIS codes: (060.0060) Fiber optics and optical communications; (060.2320) Fiber optics amplifiers and oscillators; (140.0140) Lasers and laser optics; (140.3510) Lasers, fiber

I. 서 론

광섬유 레이저는 광섬유 광학(fiber-optic) 시스템의 광원으로로서 계속적으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 모드 호핑(mode hopping) 없이 발진파장을 변환할 수 있는 단일 주파수(종모드) 광섬유 레이저는 wavelength division multiplexing (WDM), coherent 통신 시스템, 광 센서 시스템 등에서 높은 활용성을 가지고 있다^[1-4]. 그러나, 광섬유 레이저는 보통 긴 공진기 길이와 좁은 종모드간 간격으로 인하여 발생하는 모

드 호핑 현상과 함께 다수의 주파수 모드로 동작한다. 이러한 모드 호핑 현상을 억제하기 위하여 긴 길이의 Fabry-Perot 레이저 공진기에 unpumped 어븀 첨가 광섬유를 포화 흡수체(saturable-absorber)로 사용하여 레이저의 선폭을 좁히고 단일모드로 동작하도록 한 연구가 발표되었다^[5]. 그러나 일반적으로 레이저가 단일 종모드로 발진하기 위해서는 레이저 광이 이득매질 내에서 진행파(travelling wave)의 형태를 가짐으로써 단일모드 발진을 저해하는 공간적인 hole burning 현상이 생기지 않도록 해야 하므로 링 형태의 광섬유 레이저

[†]E-mail: yghan@hanyang.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

시스템이 더욱 적합하다. 더욱이, 광섬유 링 레이저는 넓은 범위의 파장변환이 가능하다는 장점도 가지고 있다. 광섬유 링 레이저 구조의 단일 주파수 발진을 이룬 몇 가지 방식의 연구가 제안되었는데, 복합 링 공진기^[6], 수동형 다수 링 공진기^[7] 등을 이용한 다소 복잡한 구조의 시스템이 구현되었고, 포화 흡수체를 사용한 광섬유 루프(loop) 레이저^[1, 4]도 발표되었다.

본 논문에서는 어븀 첨가 광섬유를 포화 흡수체로 이용하여 안정적인 단일 주파수로 발진하는 광섬유 링 레이저를 구현하였고 양방향 구부림(bending) 기법을 이용하여 안정적으로 넓은 범위에서 발진파장을 가변할 수 있는 광원을 제안하였다. 레이저의 파장선택 소자로서 광섬유 격자를 사용하였으며, 선택된 파장은 어븀 첨가 광섬유 기반 포화 흡수효과에 의하여 고차 종모드가 제거되어 단일 주파수를 가지는 레이저 출력 구현이 가능하였다. 여기서, 포화 흡수체는 파장의 좁은 선평의 대역만을 통과시키는 대역통과 (bandpass) 필터와 같은 작용을 하는데, 이때, 하나의 편광모드만 통과시키는 편광기 (polarizer)의 역할을 동시에 수행하였다. 발진 파장의 변환을 위하여 광섬유 격자에 양방향으로 구부림을 인가하여 구부림 방향에 따른 인장력과 수축력이 광섬유 격자에 유도되었고 레이저 발진파장이 장파장 또는 단파장으로 이동하였다. 광섬유 링 레이저는 파장 분할 커플러를 통하여 약 400 mW의 펌프 광원 출력이 인가되어 1540.72 nm의 파장에서 -1.85 dBm의 출력파워를 가지고 발진하였고, 약 60 dB 이상의 소광비(extinction ratio)를 보였다. 그리고, 약 5 nm 이상의 파장범위에서 거의 동일한 출력파워를 가지며 안정적으로 파장변환이 가능하였다.

II. 광섬유 링 레이저의 구성과 동작원리

레이저가 발진하기 위해서는 모드, 편광 및 위상에 대한 공진조건을 만족해야 하는데 공진기를 한번 왕복(roundtrip)한 후의 모드, 위상 및 편광상태가 원래의 상태로 되는 조건을 만족하는 신호만 발진하게 된다. 일반적으로 광섬유 레이저는 레이저 공진기 길이가 길기 때문에 다수의 주파수(종모드)를 가지므로 불안정한 레이저 출력 특성을 나타낸다. 또한 광섬유가 비등방성(anisotropic) 매질이므로 두 개의 편광상태 (편광모드)를 가지고 있어서 광섬유 레이저의 공진기에는 두 개의 편광모드가 존재하며, 각 편광모드는 한번 공진기를 진행한 후에 다른 위상이동을 가지므로 두 편광모드의 발진 주파수는 각각 다르다. 단일 종모드는 광섬유의 불균질로 인하여 두 개의 편광 모드로 나뉘어지고, 이 두 모드들 사이의 모드 경쟁(competition)은 모드 호핑과 편광 불안정성을 야기한다. 따라서, 안정적인 단일 주파수로 발진하는 레이저 출력을 얻기 위하여는 무엇보다도 고차 종모드를 제거하고 편광 상태도 안정시켜야 한다^[8].

단일 주파수로 발진하며 발진파장의 변환이 가능한 광섬유 레이저를 구현하기 위하여 그림 1(a)와 같은 구성의 레이저 시스템을 제안하였다. 레이저 시스템은 펌핑 광원으로 980

nm에서 발진하는 LD와 1550/980nm WDM 커플러, 12 m 길이의 어븀 첨가 광섬유, 3 m 길이의 unpumped 어븀 첨가 광섬유, 90:10 광 커플러, 광 써큘레이터, 광 아이솔레이터, 발진 파장 선택을 위한 광섬유 격자, 그리고 광섬유 격자에 양방향 구부림을 인가하는 장치로 구성되어 있다. 980 nm의 펌프광이 WDM 커플러를 통해서 어븀 첨가 광섬유에 입사되면서 amplified spontaneous emission(ASE)이 발생하고 링형 공진기의 위상 조건에 의해 레이저 발진이 유도된다. 이때 파장 선택 소자인 광섬유 격자에 의해서 발진 파장이 결정되며 unpumped 어븀 첨가 광섬유를 지나면서 포화 흡수효과를 겪으면서 고차 종모드가 제거되어 단일 모드로 발진한다. 포화 흡수체인 3 m의 unpumped 어븀 첨가 광섬유를 진행하는 레이저 광은 두 선형 편광축에 따라 속도가 다르므로 위상차가 발생한다. 따라서, 포화흡수 현상에서 더 선호되는 하나의 편광축이 생긴다. 즉, 하나의 편광모드는 편광 선택적인 손실을 겪게 되고 다른 하나의 편광모드는 편광 선택적 투과를 겪게 되어 포화 흡수체는 편광기(polarizer)로서의 역할을 하여 공진기 내의 레이저 광이 단일 편광모드로

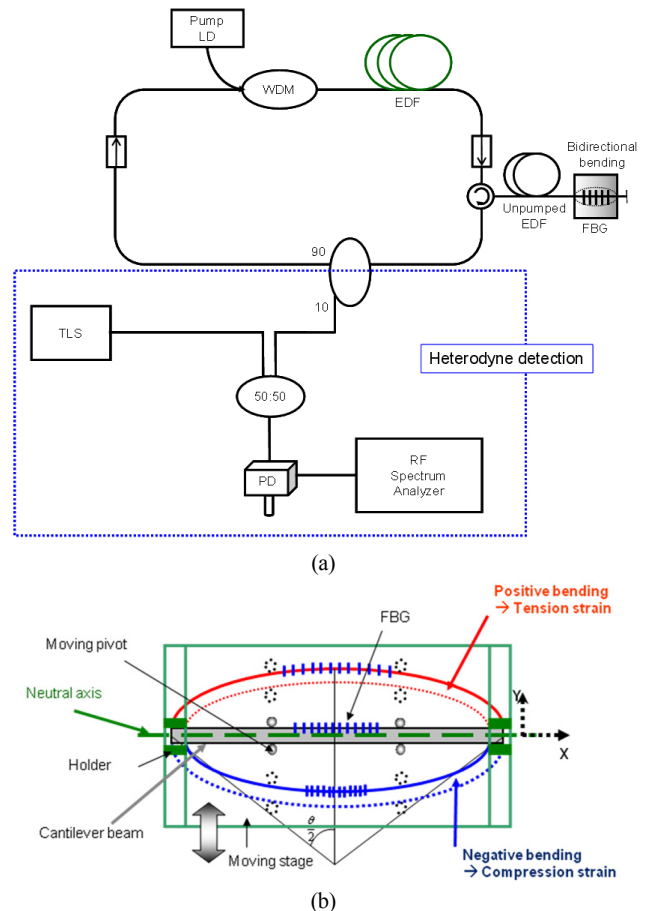


FIG. 1. (a) Scheme for the proposed single-frequency wavelength tunable EDF ring laser and (b) for apparatus for induction of bidirectional bending into the FBG. The heterodyne detection technique for measurement of the RF beating frequency was shown in Fig. 1(a) (Blue dash line).

동작하도록 한다¹¹⁾. 이렇게 좁은 선폭의 단일 편광모드의 빔은 다시 서큘레이터를 통해 90:10 커플러로 입사된다. 커플러를 통하여 10%의 레이저 광이 출력되고, 나머지 90% 출력단자의 레이저 광은 또다른 아이솔레이터를 지나서 WDM 커플러로 다시 입사되어 링 공진기를 회전하면서 발진하게 된다. 여기서 광 아이솔레이터는 공진기를 회전하는 레이저 광이 단일 방향으로만 회전하도록 하는 역할을 한다. 커플러의 10% 출력단자를 통하여 출력된 레이저 광은 광 스펙트럼 분석기(OSA)를 통하여 발진된 출력 스펙트럼을 실시간으로 관측하는데 이용되었다. 광섬유 링 레이저 시스템의 전체 공진기 길이는 18 m이며, 이에 따른 발진 종모드들의 간격은 5.7 MHz이다. 그림 1(b)는 레이저의 발진파장을 변환시키기 위하여 광섬유 격자에 양방향 구부림을 인가하기 위한 장치 구성도이다^{10), 11)}. 광섬유 격자가 새겨진 광섬유를 에폭시를 이용하여 금속판(cantilever beam)에 붙이고 이를 장치의 중앙 축(neutral axis)에 맞춰서 놓은 후 좌우의 홀더로 금속판을 고정시켜 준다. 장치의 아래부분에 있는 마이크로미터를 이용하여 이동 스테이지를 움직일 수 있으므로, 그림과 같이 y축의 양/음의 방향으로 구부림을 인가함으로써 광섬유 격자에 인장과 수축을 가하여 식 (1)과 같이 레이저의 발진파장을 이동($\Delta\lambda$)시킬 수 있다^{10), 11)}.

$$\Delta\lambda = (1-\rho)\epsilon\lambda P \quad (1)$$

여기서, λ_p 는 광섬유 레이저의 발진파장이고, ρ 는 광탄성 계수, $\epsilon(d/2R)$, d 와 R 은 각각 금속판의 두께와 곡률반경)은 광섬유에 구부림을 가함으로써 가해지는 압력이다. 광섬유 격자에 가해지는 인장과 수축에 따라서 레이저의 발진파장이 각각 장파장과 단파장 쪽으로 이동하게 되므로 효율적으로 레이저의 발진파장을 가변시킬 수 있다.

III. 광섬유 링 레이저의 특성 측정

그림 2는 제안한 광섬유 링 레이저의 출력 스펙트럼이며, 삽입된 그림은 레이저의 파장선택을 위하여 사용된 광섬유 격자의 투과 스펙트럼을 나타낸다. 광섬유 격자는 Frequency doubled Ar^+ 레이저 ($\lambda=244$ nm)를 게르마늄과 붕소가 함께 도핑된 광민감성 광섬유에 위상 마스크를 통하여 주기적으로 노출하여 제작하였다. 사용된 위상 마스크의 주기는 1065 nm였으며, 광 스펙트럼 분석기를 이용하여 0.05 nm의 분해능으로 제작 과정을 실시간 관측하였다. 제작된 광섬유 격자의 투과 스펙트럼을 보면 1540.88 nm의 중심파장을 가진다. 980 nm의 LD를 WDM 커플러를 통하여 12 m의 길이를 가지는 어븀 첨가 광섬유에 입사시켰다. 입사 펄스광 출력은 403 mW로 측정되었다. 최대 펄스광 출력에 따른 광섬유 레이저 출력의 최대값을 관찰하기 위해서 펄스광의 최대 출력인 403 mW를 어븀 첨가 광섬유에 입사시켰다. 광섬유 격자에 의하여 발진파장이 선택되어 그림 2와 같은 레이저 출력 스펙트럼을 얻었다. 이 때, 어븀 첨가 광섬유는 1530 nm에서

6.5 dB/m의 흡수계수를 가지고 있다. 레이저의 출력은 광 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정하였으며, 측정 분해능은 0.05 nm였다. 레이저는 1540.72 nm의 파장에서 -1.85 dBm의 출력파워를 가지고 발진하였고, 약 60 dB 이상의 소광비(extinction ratio)를 보였다. 여기서, 레이저 공진기의 광소자들을 연결할 때 사용된 커넥터들을 제거하고 모든 소자들을 fusion splicing 하고 이득 효율이 높은 어븀 첨가 광섬유를 사용하면 광섬유 레이저의 출력파워를 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

제안된 광섬유 링 레이저가 단일 주파수로 발진하는지를 검증하기 위하여 광 헤테로다인(Heterodyne) 검파방식을 이용하였다. 광섬유 링 레이저 출력과 단일 주파수로 동작하는 가변 레이저 광원의 출력을 50:50 광 커플러를 이용하여 함께 혼합시키고 이를 광 검출기에서 검출 시 발생한 비트 주파수를 RF 스펙트럼 분석기로 실시간 관측하였다. RF 스펙트럼 분석기의 측정 가능 주파수가 3 GHz 이내 이므로 두 레이저 광원의 비트 신호에 의한 주파수가 1.1 GHz가 되도록 레이저 발진 파장 간격을 0.009 nm가 되게 가변 레이저 광원의 파장을 1540.711 nm로 조절하였다. 그리고 가변 레이저 광원의 출력은 광섬유 링 레이저의 출력파워와 동일하게 조절하였다. 그림 3(a)는 50:50 광 커플러에서 출력되는 두 레이저 광원에 의한 출력들을 측정 분해능 0.01 nm의 광 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정한 스펙트럼이다. 3(b)는 광 검출기와 RF 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정한 RF 출력 스펙트럼이다. 실제적으로는 광섬유 링 레이저 출력광과 가변 레이저 광원을 통하여 출력되는 레이저 광이 50:50 광 커플러를 통해 혼합되면서 두 개의 출력이 광 스펙트럼 분석기에서 측정되어야 하지만, 두 광원의 파장 간격이 0.009 nm로 아주 좁기 때문에 두 개의 레이저 광원 출력들을 구별할 수 없기 때문에 단일 파장의 출력처럼 측정되었다. 하지만 두 신호의 비트 주파수를 측정해 보면 예상한 주파수인 1.1 GHz의 단일 주파수가 정확하게 측정되었다. 그림 3(b)에서 볼 수 있듯이, 3 GHz 대역까지 다른 비트 주파수가 발생하

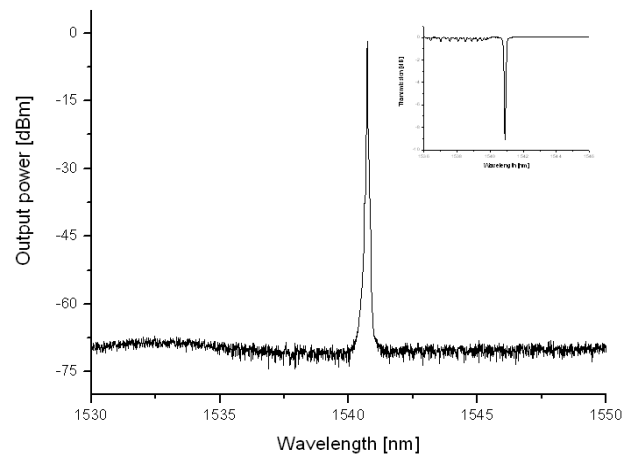
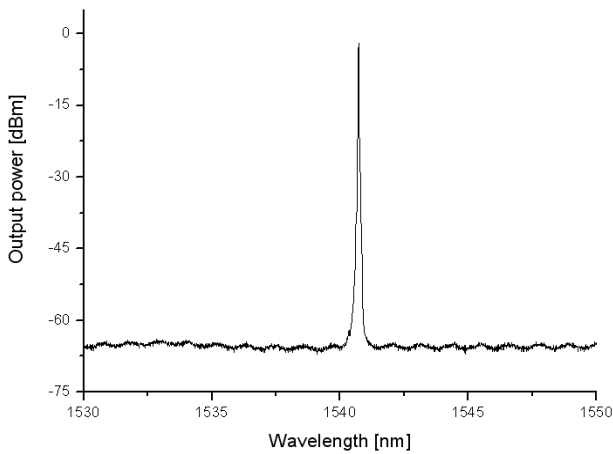
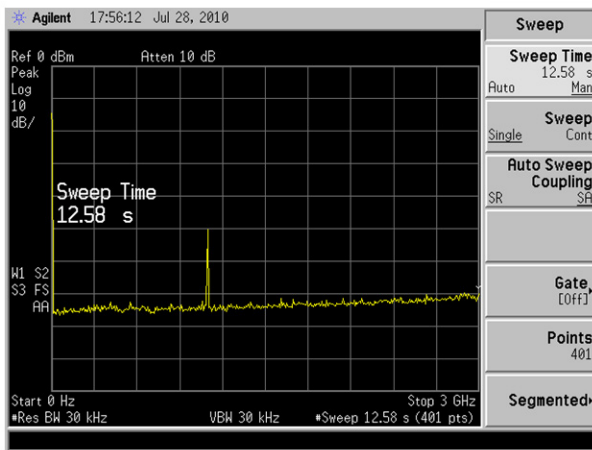


FIG. 2. Output spectrum of the single-frequency EDF ring laser. The transmission spectrum of the FBG was shown in the inset.



(a)



(b)

FIG. 3. (a) Output spectrum measured at 3 dB coupler after combining two laser outputs between the proposed EDF fiber ring laser and a tunable laser and (b) RF spectrum of beat signal between two laser outputs.

지 않았고, 이는 제한한 링 레이저가 단일 편광모드를 가지는 단일 주파수로 동작하고 있음을 나타낸다. 레이저 공진기에 포화 흡수체를 사용하지 않고 광섬유 링 레이저 출력을 관측하였을 때에는 두 개의 모드가 발진하였는데, 이는 두 편광모드에 의한 것으로서 편광 조절기를 이용하여 조절하면 불안정하게 하나의 모드만 나타나기도 하였었다. 만약에 이를 가변 레이저 광원과 함께 혼합하여 RF 스펙트럼 분석기로 관측한다면, 가변 레이저 광원의 단일 주파수 레이저 광은 수직한 두 편광모드와 각각 비팅(beat)을 일으키어 RF 스펙트럼에서 두 개의 비트 주파수가 나타날 것이다. 왜냐하면 두 모드는 서로 직각으로 편광되어 있으므로 coherent하게 영향을 주고받지 않기 때문이다. 광섬유 링 레이저에서 관측되었던 두 편광 모드들에 의해서 나타나는 주파수들은 각각 1.1 GHz 와 2.4 GHz이다. 하지만 실험 결과에서는 단일 주파수인 1.1 GHz에서만 레이저 출력이 측정되었다. 따라서, 제한한 광섬유 링 레이저 시스템에서 3 m의 포화 흡수체가 단일 편광모드로 동작하도록 하는 편광기와

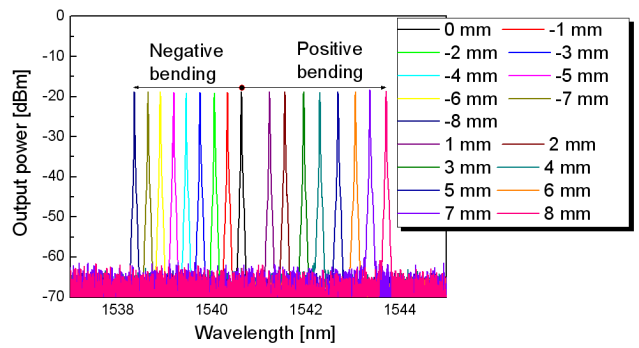


FIG. 4. Output spectra of the wavelength tunable single-frequency EDF ring laser with variations in moving distance (y-axis in Fig. 1(b)).

발진파장에서 좁은 선폭의 대역만을 통과시키는 필터로서 역할을 하였음을 알 수 있다. 보통 포화 흡수체의 길이가 너무 짧으면 레이저의 단일 주파수 발진이 잘 이루어지지 않고, 너무 길면 큰 공진기 손실이 발생하여 레이저의 출력 파워가 낮아지게 된다^[9].

그림 4는 양방향 구부림에 따른 단일 주파수의 광섬유 레이저 출력 스펙트럼 변화를 나타내고 있다. 광섬유 레이저 발진파장은 광섬유 격자에 구부림 방향에 따라 각각 인장력과 수축력을 유도하여 발진파장이 각각 장파장과 단파장으로 이동하였다. 이 때, 광섬유 링 레이저는 WDM 커플러를 통하여 약 285 mW의 펌프파워가 입사되었다. 여기서, 높은 출력의 펌프광을 입사시켰을 때에는 사용한 어븀 첨가 광섬유의 낮은 효율로 인하여 광섬유 레이저 출력이 약간 변화하는 특성을 보였으며 시간에 따른 출력 변화가 0.5 dB로 나타났다. 파장 가변을 위한 광섬유 레이저의 출력 변화를 억제하기 위해서 펌프광의 출력을 285 mW로 감소시켰으며 시간에 따른 출력 변화는 거의 나타나지 않다 (0.01 dB 이하). 광섬유 격자에 구부림을 가하지 않았을 때, 1540.64 nm의 중심파장에서 약 -18.8 dBm의 출력파워를 가지고 발진하였고, 레이저의 소광비는 약 45 dB였다. 광섬유 격자는 금속판에 팽팽하게 당겨진 채로 양 끝단을 에폭시를 이용하여 고정하였는데, 이때 광섬유의 당겨진 정도가 그림 2의 금속판에 고정시키지 않았을 때와 약간의 차이가 있으므로 레이저의 발진파장이 약간 달라진 것으로 사료된다. 이렇게 금속판에 고정된 광섬유 격자는 광섬유 고정기를 이용하여 이동 스테이지의 중앙 축에 놓여졌고, 마이크로미터를 이용하여 이동 스테이지를 y-축 방향으로 양/음 방향으로 이동시키면서 레이저의 출력 스펙트럼을 측정하였다. 이때, 이동 스테이지를 y-축 방향으로 ± 8 mm 이동하여 광섬유 레이저의 발진 파장 변화를 측정하였다. 금속판이 +y축 방향으로 이동할 때 광섬유 격자에 인장력이 유도되고 레이저의 발진파장이 장파장 쪽으로 이동하였다. 8번째 측정된 스펙트럼을 보면, 레이저 출력은 약 1543.71 nm의 파장에서 -18.7 dBm의 파워를 가졌다. 금속판이 -y축 방향으로 이동할 때는 광섬유 격자에 수축력이 가해지고 레이저의 발진파장은 단파장 쪽으로 이

동하였다. 마지막으로 측정된 스펙트럼을 통하여 레이저는 약 1538.4 nm에서 -18.82 dBm의 출력파워를 가지고 발진하고 있음을 알 수 있다. 제안된 파장변환 방법을 이용하여 광섬유 링 레이저의 발진파장은 5.3 nm 이상의 범위에서 변환되었고, 양방향으로 각각 더 많은 구부림을 가함으로써 더 넓은 범위에서의 파장변환이 가능할 것이다. 그림 4에서 볼 수 있듯이, 레이저는 비교적 비슷한 출력파워를 가지고 안정적으로 발진파장의 변환이 이루어졌다.

IV. 결 론

본 논문에서는 광섬유 격자로부터 파장을 선택하고 단일 주파수로 발진하며 넓은 파장변환이 가능한 어븀이 도핑된 광섬유 링 레이저를 설계하고 구현하였다. 광섬유 링 레이저의 공진기내에 *umpumped* 어븀 첨가 광섬유를 삽입하여 공진기 내에서 포화 흡수효과가 발생하여 단일 주파수로 동작하는 광섬유 레이저를 구현하였고 단일 편광모드를 가지는 좁은 선폭의 빔만 통과시킴으로써 안정적인 단일 주파수로 동작하는 광섬유 링 레이저를 구현하였다. 그리고 양방향 구부림(*bending*) 기술을 이용하여 발진파장 가변형 레이저 광원을 제안하였다. 발진파장의 변환을 위하여 광섬유 격자에 양방향 구부림을 인가하였고 구부림 방향에 따라 인장력과 수축력이 광섬유 격자에 유도되어 각각 장파장과 단파장으로의 레이저 발진파장의 변환이 가능하였다. 광섬유 링 레이저는 WDM 커플러를 통하여 403 mW의 펄스파워를 인가하여 1540.72 nm의 파장에서 -1.85 dBm의 출력파워를 가지고 발진하였고, 약 60 dB 이상의 소광비(*extinction ratio*)를 보였다. 그리고, 약 5 nm 이상의 파장범위에서 거의 동일한 출력파워를 가지며 안정적으로 파장변환이 가능하였다. 제안한 모드 호핑 없이 발진 파장을 변환할 수 있는 단일 주파수 광섬유 레이저는 WDM과 *coherent* 통신 시스템 등에 좋은 광원으로서 적합하다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0016146).

References

1. Y. Cheng, J. T. Kringlebotn, W. H. Loh, R. I. Laming, and D. N. Payne, "Stable single-frequency traveling-wave fiber loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter," *Opt. Lett.* **20**, 875-877 (1995).
2. G. A. Ball and W. W. Morey, "Continuously tunable single-mode erbium-doped fiber laser," *Opt. Lett.* **17**, 420-422 (1992).
3. R. K. Kim, C. S. Kim, K. N. Park, J. R. Kim, and K. S. Lee, "Wavelength-switchable erbium-doped fiber ring laser combined with a Fabry-Perot laser diode and a sampled grating," *Opt. Comm.* **273**, 28-31 (2007).
4. N. J. C. Libatique, L. Wang, and R. K. Jain, "Single-longitudinal-mode tunable WDM-channel-selectable-fiber laser," *Opt. Exp.* **10**, 1503-1507 (2002).
5. M. Horowitz, R. Daisy, B. Fischer, and J. Zyskind, "Narrow-linewidth, singlemode erbium-doped fibre laser with intracavity wave mixing in saturable absorber," *Electron. Lett.* **30**, 648-649 (1994).
6. J. L. Zhang, C. Y. Yue, G. W. Schinn, W. R. Clements, and J. W. Lit, "Stable single-mode compound-ring erbium-doped fibre laser," *IEEE J. Lightwave Technol.* **14**, 104-109 (1996).
7. C. C. Lee, Y. K. Chen, and S. K. Liaw, "Single-longitudinal-mode fiber laser with a passive multiple-ring cavity and its application for video transmission," *Opt. Lett.* **23**, 358-360 (1998).
8. Y. Takushima, S. Yamashita, K. Kikuchi, and K. Hotate, "Polarization-stable and single-frequency fiber lasers," *IEEE J. Lightwave Technol.* **16**, 661-669 (1998).
9. J. Liu, J. Yao, J. Yao, and T. H. Yeap, "Single-longitudinal-mode multiwavelength fiber ring laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, 1020-1022 (2004).
10. Y. G. Han and J. H. Lee, "Multiple elements photonic microwave true-time delay beamforming incorporating a tunable chirped fiber Bragg grating with symmetrical bending technique," *Opt. Lett.* **32**, 1704-1706 (2007).
11. Y. G. Han, F. Fresi, L. Poti, J. H. Lee, and X. Dong, "Continuously spacing-tunable multiwavelength SOA-based fiber ring laser incorporating a superimposed chirped fiber Bragg grating," *Opt. Lett.* **32**, 1032-1034 (2007).