한국정밀공학회지 제 31 권 9 호 pp. 805-811 September 2014 / 805
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 31, No. 9, pp. 805-811 http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2014.31.9.805
ISSN 1225-9071(Print), ISSN 2287-8769(Online)

Seed 레이저용 정상분산 영역에서 발진하는 간단한 구조의 이터븀 기반 모드 잠금 광섬유 레이저

A Simple Yb-Doped Mode-Locked Fiber Oscillator under Normal Dispersion as a Seed Laser

김병권 [1], 주기남 [1,✉]
Byeong Kwon Kim[1] and Ki-Nam Joo[1,✉]

1 조선대학교 광기술공학과 (Department of Photonic Engineering, Chosun University)
✉ Corresponding author: knjoo@chosun.ac.kr, Tel: +82-62-230-7235

Manuscript received: 2014.5.13 / Revised: 2014.6.24 / Accepted: 2014.7.2

In this investigation, we constructed and demonstrated a simple Yb-doped fiber laser, of which longitudinal modes are mode-locked without any additional devices to compensate the dispersion caused by optical components. Non-linear polarization rotation (NPR) was adopted for the mode-locking mechanism and a polarization controller (PC) was used for a kind of spectral filters to restrict the bandwidth for mode-locking. As the result, the laser was successfully operated as mode-locked with the repetition rate of 42.2 MHz and the spectrum was broadened up to approximately 16 nm at 1033 nm center wavelength when the laser was mode-locked. In this paper, the operation of the developed Yb-doped mode-locked laser is explained with the concept of Lyot filter realized by a PC, which enables mode-locking under normal dispersion. In the industrial applications, this laser can be used as a seed laser of the high power lasers for optical manufacturing.

Key Words: Yb-Doped Fiber Laser (이터븀 광섬유 레이저), Mode-Locking (모드 잠금), Polarization Control (편광 조절), Normal Dispersion (정상 분산), Lyot Filter (리오 필터)

기호설명

$\Delta\phi$ = phase difference by birefringent material
L = length of birefringent material
λ = wavelength
$\Delta n(\lambda)$ = birefringence dependent on wavelength

1. 서론

최근 들어, 광계측, 광가공 분야에서 광섬유 레이저 (optical fiber laser)에 대한 수요가 급증하고 있다. 이는 광섬유 레이저가 가지는 안정성, 사용 편리성, 낮은 전력 소비, 좋은 빔 성능, 낮은 열발생 등의 장점들을 기반으로 기존에 사용되고 있는 기체 레이저 (gas laser)나 고체 레이저 (solid state laser)를 대체할 수 있다는 기대감과 현실적으로 각 분야에서 대체되어 가는 추세를 반영하고 있다.

Copyright ⓒ The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이 중에서도 이터븀 기반 광섬유 레이저 (Yb-doped fiber laser)는 높은 광 변환 효율 (optical conversion efficiency)로 인하여 많은 연구가 진행되고 있으며, 이를 상용화하기 위한 노력이 이루어지고 있다. 특히, 이터븀 기반 광섬유 레이저는 1560 nm 대역에서 발진하는 어븀 기반 광섬유 (Er-doped fiber laser)와는 달리 파장 대역이 광섬유의 정상 분산 (normal dispersion) 영역에 위치하여 일반적인 공진기 구조에서 펄스 발진을 위한 모드 잠금 (mode-locking)이 어려운 실정이기 때문에 이를 극복하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 이들 중 대부분은 공진기 내에 분산을 보상하기 위한 포화흡수체 (saturable absorber)[1] 나 회절격자 쌍 (diffraction grating pair),[2] 특수 광섬유[3-6] 등의 소자를 삽입하여 모드 잠금을 가능하게 하는 공진기 구조를 제시하고 있어 좁은 펄스폭을 가지는 레이저 발진이 가능하지만, 비교적 복잡한 구조로 인해 상용화에 제약이 따른다.

한편, Andy Chong은 이러한 방법과는 달리 분산 보상 없이 이터븀 기반 광섬유 레이저를 정상 분산 영역에서 모드 잠금시키는 방법을 제시하였다.[7] 제안된 레이저는 공진기 내의 분산을 보상하는 대신 파장 대역 필터 (band pass filter)를 사용하여 분산이 발생하는 파장 영역을 제한함으로써, 분산이 발생하더라도 그 정도가 작아서 모드 잠금이 가능한 구조였다. 또한 최근에는 공진기가 모두 광섬유로 만든 이터븀 기반 모드 잠금 광섬유 레이저가 제안되었는데, 이 연구에서는 공진기 내부에 파장대역 필터 역할을 할 수 있도록 편광 유지 광섬유 (polarization maintaining fiber) 2개를 서로 다른 각도로 융착 (splicing)시켜서 광섬유 타입의 Lyot 필터를 구성하고 이를 통해 파장 대역 필터를 구현하였다.[8]

기존의 연구들에서는 펨토초 수준의 좁은 펄스를 생성하기 위해 공진기 내부에 회절 격자나 특수 광섬유 등의 추가 장치 등이 포함되어 공진기의 구조가 비교적 복잡하고, 시스템 비용이 증가하였다. 이를 개선하기 위해 본 연구에서는 앞서 제시한 선행 연구 중의 하나인 Lyot 필터를 이용한 공진기 구조[8]에서 착안하여, 편광 유지 광섬유 대신에 일반적인 단일모드 광섬유 (single mode fiber)와 편광 조절기 (polarization controller)를 이용한 Lyot 필터를 구성하고, 이를 통해 모드 잠금된 이터븀 기반 광섬유 레이저를 제작하였다. 공진기 내부에는 추가적인 장치 없이 비선형 편광 회전

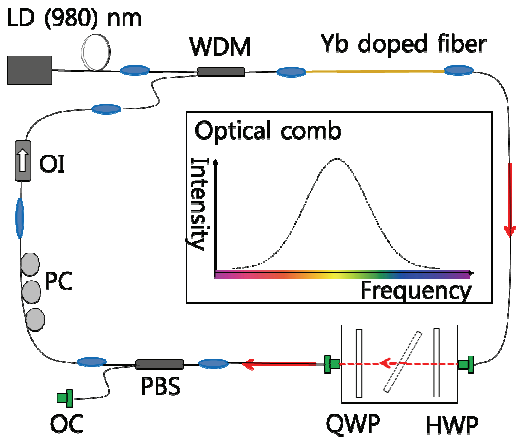

Fig. 1 Optical configuration of a simple Yb-doped mode-locked fiber laser

(non-linear polarization rotation)을 구현할 수 있는 단일모드 광섬유, 위상 지연판 (wave plate)과 편광 광분할기 (polarizing beam splitter) 등이 사용되었으며 레이저는 비교적 간단한 원형 구조의 공진기 (ring type cavity)로 구성되었다. 제작한 레이저는 비록 분산이 완벽히 보상되지 않으나, 기존의 연구 결과와 비교하여 비교적 간단한 광학 구성을 통해 모드 잠금이 가능하고 별도의 고가 장치들을 필요로 하지 않기 때문에, 광원의 제작 비용을 줄일 수 있고 안정적인 펄스 발진을 통해 고출력 레이저의 초기 펄스 (seed pulse)로 사용될 수 있다.

현재, 고출력 모드 잠금 레이저에서는 광 증폭을 위해 seed 레이저의 펄스를 분산에 의해 펄스 폭을 늘려주어 펄스 레이저의 첨두 출력에 의한 광학 부품의 손상을 막는다. 이러한 이유로 고출력 레이저용 seed 레이저는 본 연구에서 제작한 레이저와 같이 출력에 분산이 어느 정도 포함되는 것이 이후 펄스 폭을 늘려주는 단계를 줄일 수 있어 고출력 레이저 생성에 있어 더욱 효과적이라 할 수 있다.

2. 제작한 이터븀 기반 광섬유 레이저

2.1 모드 잠금 원리

Fig. 1은 본 연구에서 제작한 이터븀 기반 모드 잠금 광섬유 레이저의 광학 구성도를 나타낸다. 980 nm 대역의 레이저 다이오드 (laser diode)를 이용하여 이터븀 첨가 광섬유 (Yb-doped fiber)를 광펌핑 (optical pumping)시켜 주었으며, 이때 발생한

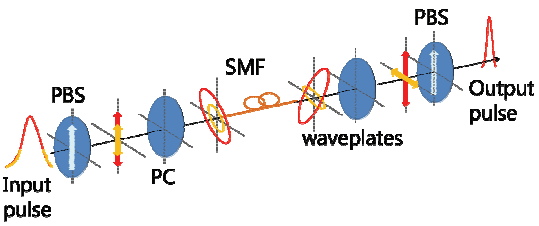

Fig. 2 Mode-locking mechanism based on nonlinear polarization rotation (NPR)

1030 nm 대역의 빛은 Fig. 1에서와 같이 단일모드 광섬유, 반파장판 (half-wave plate), 1/4파장판 (quarter-wave plate), 편광 광분할기, 편광 조절기, 광 차폐기 (optical isolator)를 통과하여 다중 파장 분할기 (wavelength division multiplxer)로 입사하여 원형 공진기를 구성한다.

이때, Fig. 2와 같이 공진기 내에서 발생하는 초기의 불안정한 작은 펄스 (perturbation)는 진폭의 크기에 따라 단일모드 광섬유를 지나면서 비선형 편광 회전 현상을 겪게 되고, 진폭이 큰 영역은 Kerr 효과에 의해 진폭이 작은 영역과 비교하여 더 크게 편광 방향이 회전하게 되어, 펄스 내에 진폭이 큰 영역과 작은 영역이 분리된다. 위상 지연판과 편광 조절기는 이러한 광들의 편광 방향을 조절해 주는 역할을 하며, 진폭이 큰 영역은 편광 광분할기에서 손실없이 투과하고 진폭이 작은 영역은 손실이 발생하게 되어, 최종적으로 진폭이 큰 영역의 펄스는 계속 성장한다. 이러한 펄스가 공진기 내부에서 계속 진행하며, 출력부 (output coupler)에서는 주기적인 펄스열이 발생된다. 이러한 원리로 이터븀 기반 광섬유 레이저는 모드 잠금이 이루어진다.[7]

그러나 앞서 서론에서 밝힌 바와 같이 이터븀 레이저에서 발진하는 1030 nm 파장 대역은 단일모드 광섬유, 위상 지연판, 편광 광분할기 등의 광학 소자에 있어서 정상 분산 영역에 위치하기 때문에, 공진기 내부에서는 분산 보상이 이루어지지 않는다. 이는 결론적으로 각 파장별 위상을 달리 해주는 결과를 초래하여 레이저의 모드 잠금을 방해한다. 이를 극복하기 위해 공진기 내부에 분산을 보상하기 위한 추가 장치들을 삽입할 수 있으나 이는 공진기의 구조를 복잡하게 하고 동시에 안정성을 저해한다. 반면, 공진기 내부의 분산을 보상하는 대신 발진하는 레이저의 파장 대역을 제한하는 방법으로도 이터븀 기반 광섬유 레이저의 모드 잠금을 유도할 수 있다.[7] 이를 위해 본 연구에서는 공진기 내에 편광 조절기를 이용하여 파장 대역 필터를 구현함으로써, 추가적인 장치없이 모드 잠금된 이터븀 기반 광섬유 레이저를 발진시켰다.

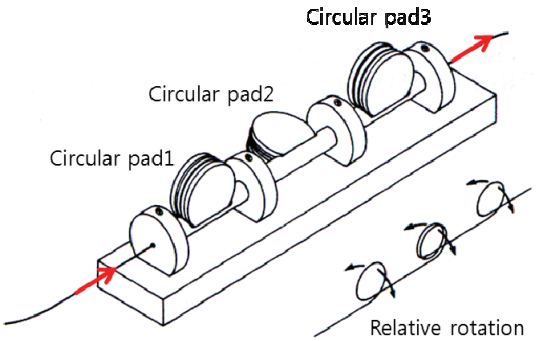

Fig. 3 Fiber type polarization controller and its operation

이때 사용한 편광 조절기는 광섬유용 편광조절기로써 Fig. 3과 같이 일정한 크기의 반경을 가지는 패드들에 광섬유를 감고, 각각의 패드를 상대적으로 회전시킴에 따라 광섬유에 스트레스 (stress)를 가해서 복굴절성 (birefringence)을 유도한다. 이렇게 발생한 광섬유의 복굴절성은 결국 위상 지연판과 같은 효과를 가지게 되어 입사광의 편광을 조절할 수 있다. 또한 이때 발생하는 광섬유의 복굴절성은, 광섬유를 이루는 물질이 파장에 따라 굴절률이 다르다는 사실에 의거하여, 기본적으로 파장에 따라 달라진다. 이 경우, 파장에 따라 달라지는 광섬유의 복굴절성은 편광 광분할기와 함께 Lyot 필터를 구성한다. Lyot 필터는 기본적으로 2개의 편광기 (polarizer) 사이에 복굴절 물질을 삽입하여 구성되며, 복굴절 물질에서 파장에 따라 다르게 회전한 편광 성분들 중 임의의 편광 성분만을 선택적으로 추출할 수 있고, 이는 결과적으로 파장 대역 통과 필터의 역할을 한다. 이때 Lyot 필터의 투과 특성 (T)은 식 (1)과 같이 주어진다.[8]

$$T(\lambda) = \cos^2 \Delta\phi = \cos^2\left(\frac{2\pi L \Delta n(\lambda)}{\lambda}\right) \quad (1)$$

식 (1)에서 $\Delta\phi$는 복굴절 물질을 통과하면서 발생하는 위상 차이를 의미하며 $(2\pi/\lambda)L\Delta n(\lambda)$로 나타낼 수 있다. 여기서 L은 복굴절 물질의 길이, λ는 입사광의 파장, $\Delta n(\lambda)$는 파장에 따른 복굴절성을 나타낸다. 식 (1)을 살펴보면, 투과하는 광의 파장 대역은 복굴절 물질의 길이나 복굴절성 정도의 변

화를 통해 변화시켜줄 수 있다. 본 연구에서 제작한 이터븀 기반 광섬유 레이저 역시 이러한 원리를 적용하여 3개의 패드를 가지는 편광 조절기에 단일모드 광섬유를 각각 감고, 이들의 상대적인 각도를 조절함으로써 적절한 파장 대역 필터를 구성하여 모드 잠금을 구현하였다.

2.2 이터븀 기반 모드 잠금 레이저 제작 및 성능 평가

본 연구에서 목표로 하는 seed 레이저의 성능은 펄스 반복률이 40 MHz, 펄스폭은 200 ps 이하, 평균 출력은 50 mW 이상이다. 이는 W급 고출력 레이저 개발을 위해 2단 증폭 등을 고려하면 충분한 출력이다. 목표 성능을 달성하기 위해 레이저 공진기의 광학부품들은 Table 1과 같은 사양으로 설계, 구성되었다. 각 광학부품들을 토대로 전체 레이저 공진기는 Fig. 4와 같이 대략 5 m (광섬유 길이 기준)로, 레이저의 반복률은 대략 40 MHz로 설계되었고, 레이저 다이오드의 출력을 조절하여 발진하는 이터븀 레이저의 평균 출력을 조절하였다.

제작한 이터븀 광섬유 레이저는 처음에 모드 잠금이 이루어지지 않은 채 연속파 (continuous wave) 형태의 단일모드로 발진하였고, 이후 비선형 편광 회전과 주파수 대역 필터 효과를 위해 위상지연판과 편광조절기의 각도를 실험적으로 조절하여 모드 잠금을 구현하였다.

Fig. 5(a)와 (b)는 제작한 레이저가 처음에 연속파의 형태로 발진할 때와 모드 잠금이 이루어진 후의 파장 분포를 광주파수 분석기 (optical spectrum analyzer)를 통해 측정한 결과를 보여준다.

모드 잠금 결과, 중심 파장은 1033 nm였으며, 스펙트럼 파장 폭은 16 nm (FWHM)였다. 스펙트럼의 모양은 가운데 부분이 움푹 들어간 형태로, 이터븀 기반 모드 잠금 레이저의 출력단을 편광 광분할기로 설정하였을때 나타나는 전형적인 파장 분포를 나타내었다.[7] 이는 공진기 내에서 자기 상관 위상 변조 (self-phase modulation, SPM)의 결과로 중심파장에서 멀어질수록 그 세기가 세어짐을 보여준다. 이와 동시에 Fig. 5(c)는 오실로스코프 상에서 시간 영역에 따른 모드 잠금 펄스 열을 나타내며, Fig. 5(d)는 5GHz의 대역폭을 가지는 고속 광검출기 (high speed photodetector)로 측정한 펄스의 모습을 보여준다. 펄스간 시간 간격은 23.7 ns로, 이를 펄스 반복률로 환산하면 42.2 MHz 였고, 펄스폭은 200 ps (FWHM) 였다. 레이저 평균 출력은 펌핑 레이저의 출력에 따라 변화하며 펌핑 출력 320 mW에서 57 mW의 출력이 확인되었다.

Table 1 Specifications of optical components used in a simple Yb-doped mode-locked laser

Optical components	Specifications
Laser diode (LD)	980 nm, (FBG), 280 mW (0.5 A injection current)
Wavelength division multiplexer (WDM)	980/1030 WDM
Yb-doped fiber	SM-YSF-HI @Nufern, (single-mode, Length: 300 mm)
Single-mode (SM) fiber	HI1060, Total length: 3.5 m
Polarizing beam splitter (PBS)	Fiber type PBS
Polarization controller (PC)	3 pads (Diameter: 27 mm)
Optical isolator	1060 nm center wavelength, isolation > 25dB
Free space optics	63.5 mm U-bench, λ/4, λ/2 wave plates

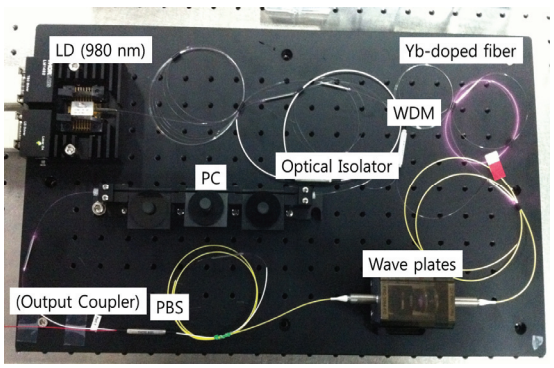

Fig. 4 Construction of a simple Yb-doped mode-locked laser

Fig. 5에서 알 수 있듯이 제작된 레이저는 성공적으로 모드잠금이 이루어졌으며, 동시에 편광조절기를 통해 발진하는 파장 영역이 16 nm 정도로 제한되고 있는 것을 확인하였다. 이와 더불어, 본 레이저는 Lyot filter에 의해 발진 파장이 결정 및 제한되기 때문에, 편광조절기를 이용하여 레이저의 중심 파장을 변화시키는 것이 가능하다. Fig. 6은 편광 조절기의 패드를 수동으로 대략 1° 씩 변화시키면서 측정한 레이저의 스펙트럼을 보여주며 편광조절기를 통해 발진하는 중심 파장이 5~10 nm 정도 이동하는 것을 확인하였다.

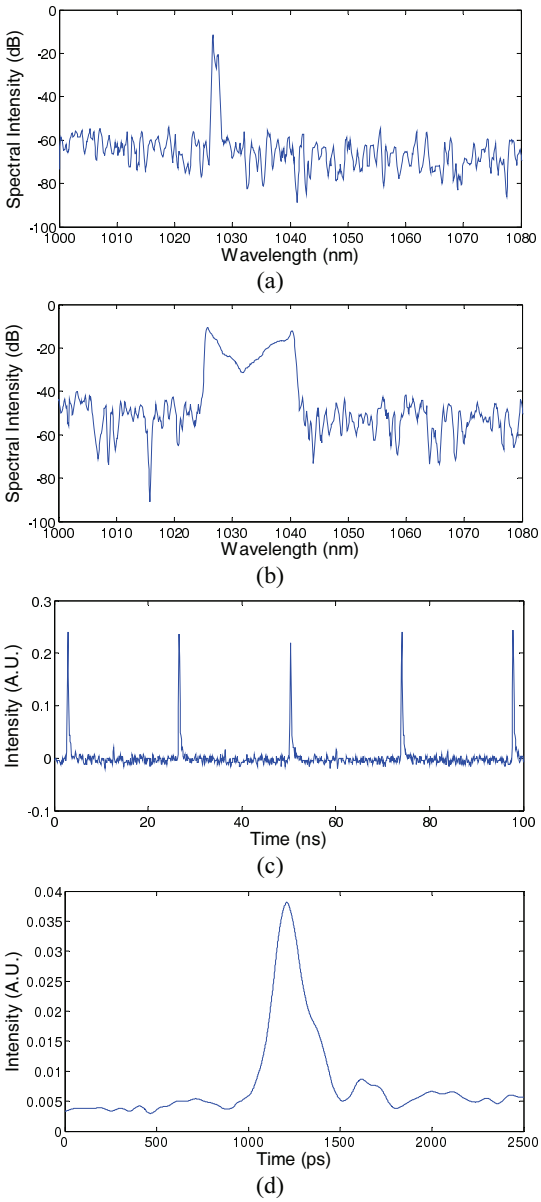

Fig. 5 (a) spectrum before mode-locking, (b) spectrum after mode-locking, (c) pulse train of mode-locked laser and (d) a single pulse obtained by high speed photodetector

3. 광섬유로만 구성된 모드잠금 이터븀 레이저

제작된 이터븀 기반 광섬유 레이저는 모드 잠금에는 성공하였으나, 이를 산업적으로 응용하기 위해서는 안정성을 개선해야 하며 레이저 공진기

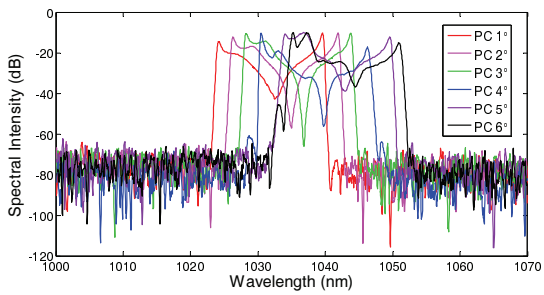

Fig. 6 Spectrum shift of mode-locked Yb-doped fiber laser as the PC was adjusted

에서 안정성을 저해하는 가장 큰 요소인 공기 중의 광경로를 제거해야 한다. 그 이유는 레이저의 안정성을 저해하는 가장 큰 요소인 진동 등에 의해 공진기 내부의 공기 중 광경로는 직접적으로 정렬 등에 영향을 받기 때문이다. 이를 위해, 본 연구에서는 또다른 편광 조절기를 이용하여 기존의 위상 지연판들의 역할을 대체하였다. 이로써 레이저 공진기는 광섬유만으로 구성이 가능해졌고, 시간에 따른 레이저의 모드 잠금에 있어 안정성이 향상되었다. 변경 전에는 모드 잠금 유지가 진동에 의해 영향을 크게 받아 주변의 진동에 의해 모드 잠금이 깨어지는 현상이 발생하였으나, 광섬유만으로 구성된 공진기는 이러한 진동에 대해 모드 잠금이 유지됨을 확인하였다. 이때, 공기 중의 기존 위상 지연판들은 단일 모드 광섬유에서 발생하는 비선형 편광 회전에 대해, 광강도가 큰 펄스와 그외의 펄스를 편광에 따라 구분해 주는 역할을 수행하는데, 이는 광섬유 구조의 편광 조절기로 대체되었다.

Fig. 7(a)는 광섬유로만 구성된 공진기를 나타내고 있으며, Fig. 7(b)와 (c)는 모드 잠금이 이루어진 후, 펄스의 반복률과 발진 파장 분포를 보여준다. 공진기는 광섬유 구조의 편광조절기의 삽입으로 인해 길이가 조금 길어져서, 반복률은 39.4 MHz였고 파장 스펙트럼은 중심파장이 1037 nm에 파장폭은 13 nm였다.

한편, 본 연구에서 개발한 이터븀 기반 모드 잠금 레이저는 공진기 자체에서 발생하는 정상 분산에 의해서 분산 보상기를 이용하지 않으면 펄스 폭이 다소 넓다. 그러나 이러한 분산에 위한 넓은 펄스 폭은, 펄스 에너지 및 첨두 출력을 증폭하기 위한 처프 펄스 증폭 (chirped pulse amplification, CPA) 기법을 이용할 경우,[9] 기존의 구성에서 사용

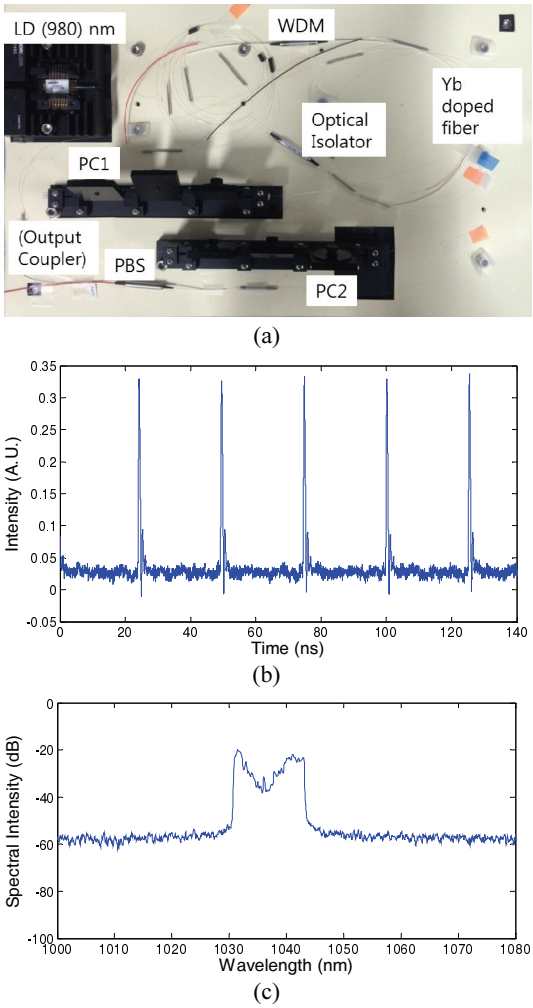

Fig. 7 (a) optical configuration, (b) pulse train and (c) spectrum of all-fiber Yb-doped mode-locked fiber laser

되는 레이저 앞 단의 펄스를 넓히기 위한 (pulse spreading) 장치 없이 바로 증폭할 수 있는 장점으로 작용할 수 있다. 즉, 공진기 내부의 분산 보상 장치가 없어 간단한 공진기 구성이 가능한 동시에, 펄스 증폭시 추가적인 장치 없이 바로 펄스 증폭이 가능한 장점이 있어, 향후 고출력 모드 잠금 레이저의 seed 레이저로 응용이 기대된다.

4. 결론

본 논문에서는 정상분산 영역에서 발진하는 이터븀 기반 모드 잠금 광섬유 레이저를 설계하고 이를 제작하였다. 1030 nm의 발진 파장 대역을 갖는 이터븀 기반 광섬유 레이저는 광학 부품들이 대부분 정상 영역의 분산을 보이기 때문에, 일반적으로 모드 잠금으로 발진하기 어려운 특징이 있으나, 제작된 레이저는 Lyot 필터의 개념을 도입하고, 단일모드 광섬유와 편광조절기를 이용하여 주파수 대역 필터를 구현함으로써, 부가적인 광주파수 대역 필터나 편광 유지 광섬유를 사용하지 않고 간단한 구조로 구성되었다. 성능 평가 결과, 제작된 레이저는 파장 영역에서는 1033 nm의 중심파장으로 16 nm의 대역폭을 갖는 것을 확인하였으며, 42.2 MHz의 반복률과 200 ps의 펄스폭을 측정하였다. 본 연구에서 설계/제작된 이터븀 기반 모드 잠금 레이저는 간단한 구조와 비용 절감을 통해 광계측, 광가공 분야에 널리 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 2013학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

REFERENCES

1. Prochnow, O., Ruehl, A., Schultz, M., Wandt, D., and Kracht, D., “All-Fiber Similariton Laser at 1 μm without Dispersion Compensation,” Optics Express, Vol. 15, No. 11, pp. 6889-6893, 2007.
2. Deng, Y. and Knox, W. H., “Self-Starting Passive Harmonic Mode-Locked Femtosecond Yb3+-Doped Fiber Laser at 1030nm,” Optics Letters, Vol. 29, No. 18, pp. 2121-2123, 2004.
3. Lim, H., Ilday, F. Ö., and Wise, F., “Femtosecond Ytterbium Fiber Laser with Photonic Crystal Fiber for Dispersion Control,” Optics Express, Vol. 10, No. 25, pp. 1497-1502, 2002.
4. Schultz, M., Prochnow, O., Ruehl, A., Wandt, D., Kracht, D., et al., “Sub-60-Fs Ytterbium-Doped Fiber Laser with a Fiber-Based Dispersion Compensation,” Optics Letters, Vol. 32, No. 16, pp. 2372-2374, 2007.
5. Isomńki, A. and Okhotnikov, O., “All-Fiber Ytterbium Soliton Mode-Locked Laser with Dispersion Control by Solid-Core Photonic Bandgap Fiber,” Optics Express, Vol. 14, No. 10, pp. 4368-4373, 2006.
6. Deng, Y. and Knox, W. H., “Self-Starting Passive

Harmonic Mode-Locked Femtosecond Yb3+-Doped Fiber Laser at 1030nm," Optics Letters, Vol. 29, No. 18, pp. 2121-2123, 2004.
7. Chong, A., Buckley, J., Renninger, W., and Wise, F., "All-Normal-Dispersion Femtosecond Fiber Laser," Optics Express, Vol. 14, No. 21, pp. 10095-10100, 2006.
8. Fedotov, Y., Kobtsev, S., Arif, R., Rozhin, A., Mou, C., et al., "Spectrum-, Pulsewidth-, and Wavelength-Switchable All-Fiber Mode-Locked Yb Laser with Fiber based Birefringent Filter," Optics Express, Vol. 20, No. 16, pp. 17797-17805, 2012.
9. Maine, P., Strickland, D., Bado, P., Pessot, M., and Mourou, G., "Generation of Ultrahigh Peak Power Pulses by Chirped Pulse Amplification," IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 24, No. 2, pp. 398-403, 1988.