

All-fiber 1.5-kW-class Single-mode Yb-doped Polarization-maintaining Fiber Laser with 10 GHz Linewidth

Seongmook Jeong^{1†}, Kihyuck Kim¹, Taekyun Kim¹, Sunghun Lee¹, Hwanseok Yang¹,
Junsu Lee², Kwang Hyun Lee², Jung Hwan Lee², and Min-Sik Jo²

¹Laser R&D Laboratory, LIGNex1, 207, Mabuk-ro, Giheung-gu, Yongin 16911, Korea

²Ground Technology Research Institute, Agency for Defense Development, Yuseong P.O.Box 35, Daejeon 34188, Korea

(Received August 12, 2020; Revised August 26, 2020; Accepted August 27, 2020)

In this paper, we have studied the characteristics of stimulated Brillouin scattering (SBS) and mode instability (MI) in a ytterbium-doped polarization-maintaining fiber laser with master oscillator power amplifier configuration. We measured the laser output power and back-reflection spectrum for a variety of ytterbium-doped fibers and seed lights, to investigate the power-scaling limits of fiber lasers. By optimizing the laser structure, we demonstrated an all-fiber high-power polarization-maintaining fiber laser with near-diffraction-limited beam quality. The output power of 1.5 kW was achieved with a linewidth of 10 GHz, generated by pseudo-random binary sequence (PRBS) phase modulation. The beam quality M^2 was about 1.15 at the maximum output power. The polarization extinction ratio (PER) was greater than 17 dB.

Keywords: Fiber laser, Stimulated Brillouin scattering, Mode instability

OCIS codes: (140.3510) Lasers, fiber; (140.3280) Laser amplifiers

전광섬유 MOPA 시스템 기반 10 GHz 선폭을 갖는 1.5 kW 단일모드 이터븀 첨가 편광유지 광섬유 레이저

정성묵^{1†} · 김기혁¹ · 김태균¹ · 이성현¹ · 양환석¹ · 이준수² · 이광현² · 이정환² · 조민식²

¹LIG넥스원 레이저연구팀

☎ 16911 경기도 용인시 기흥구 마북로 207

²국방과학연구소 지상기술연구원

☎ 34188 대전광역시 유성우체국 사서함 35호

(2020년 8월 12일 받음, 2020년 8월 26일 수정본 받음, 2020년 8월 27일 게재 확정)

본 논문에서는 전광섬유 master oscillator power amplifier (MOPA) 구조의 이터븀(ytterbium) 첨가 편광유지 광섬유 레이저의 유도 브릴루앙 산란 및 모드 불안정 특성에 대해 연구하였다. 이터븀 첨가 광섬유 및 신호 광원의 종류에 따라 레이저 출력 및 역반사 스펙트럼을 측정하여 광섬유 레이저의 출력 증폭 한계를 분석하였다. 레이저 구조의 최적화를 통해 단일모드 빔 품질을 갖는 전광섬유 고효율 편광유지 광섬유 레이저를 구현하였다. Pseudo-random binary sequence (PRBS) 신호에 의해 위상변조된 10 GHz의 선폭을 갖는 신호 광원을 적용하여 1.5 kW의 출력을 얻었다. 최대 출력에서 1.15의 빔 품질을 가지며, 17 dB 이상의 편광소광률 특성을 확인하였다.

Keywords: 광섬유 레이저, 유도 브릴루앙 산란, 모드 불안정성

OCIS codes: (140.3510) Lasers, fiber; (140.3280) Laser amplifiers

[†]E-mail: seongmook.jeong@lignex1.com, ORCID: 0000-0001-7104-5677

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

I. 서 론

최근 단일모드 빔 품질의 고출력 레이저 광원에 대한 수요가 제조 산업, 의료, 국방 등의 다양한 분야에서 요구됨에 따라 고출력 광섬유 레이저에 대한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다^[1-3]. 특히 협대역 선폭을 갖는 단일모드 편광유지 고출력 광섬유 레이저는 spectral beam combining (SBC) 및 coherent beam combining (CBC) 등의 빔 결합 기술을 이용하여 레이저 출력을 증대시키는 광원으로 많은 관심을 받고 있다^[4-6]. 하지만 수 kW급 고출력 광섬유 레이저 시스템을 개발하는데 있어서 광섬유의 높은 비선형성에 기인한 유도 브릴루앙 산란(stimulated Brillouin scattering, SBS)이 발생되어 레이저 출력을 증가시키기에 따라 역반사되는 SBS 출력도 함께 증가하게 되며, 문턱값을 넘게 되면 역반사 SBS 출력이 급격하게 증가되어 광섬유 레이저 시스템에 손상을 줄 수 있어 레이저 출력 증대에 제한이 된다^[7,8]. 협대역 선폭과 편광유지 특성을 갖는 레이저 시스템은 식 (1)과 같이 유도 브릴루앙 산란 문턱값(P_{th_SBS})을 낮추는 영향을 주어 레이저 출력을 증대시키는데 추가적인 제한요인으로 작용한다.

$$P_{th_SBS} = 21(k \cdot A_{eff}/g_B \cdot L_{eff})(1 + \Delta\nu_s/\Delta\nu_p) \quad (1)$$

여기서 k 는 편광도에 대한 효과($1 < k < 2$)를 나타내며, g_B , A_{eff} , L_{eff} , $\Delta\nu_s$ 및 $\Delta\nu_p$ 는 각각 브릴루앙 이득계수, 유효 면적, 유효 길이, 신호 광원 선폭 및 브릴루앙 이득 선폭이다^[9,10]. 유도 브릴루앙 산란을 억제하기 위하여 신호 광원의 선폭 증대 및 PRBS 위상변조 기술, 광섬유의 온도/변형을 구배, 특수 광섬유 개발 및 역방향 펌핑 기술 등 다양한 방법이 연구되고 있으며^[11-14], 일반적으로 유효면적이 넓은 대구경 코어 광섬유를 이용하여 광섬유의 비선형성을 완화시켜 주고 펌프 흡수율을 증가시켜 광섬유 사용 길이도 줄여주는 효과를 통해 유도 브릴루앙 산란 문턱값을 높이는 방법을 적용하고 있다^[15,16]. 하지만 광섬유의 코어 직경이 커짐에 따라 고차모드 비율이 증가되며 펌프 흡수율 증가에 따른 열 부하의 증가로 광섬유 코어 내 굴절률 변화가 크게 나타나게 되어, 코어가 보다 작은 광섬유에 비해 낮은 레이저 출력에서 고차모드가 갑자기 증가하는 구간이 발생하게 된다. 이때 단일모드 조건이던 빔 품질이 다중모드로 변화되어 심하게 요동치는 모드 불안정 현상(mode instability)이 발생하게 된다^[17-20]. 식 (2)와 같이 광섬유 코어 직경이 증가함에 따라 모드 불안정 문턱값이 낮아져 대구경 코어 광섬유를 이용한 고출력 광섬유 레이저 시스템에서 출력이 증가함에 따라 단일모드 빔 품질을 유지하기 어렵고 광섬유의 급격한 열화에 의해 출력 증가에도 제한을 받는다.

$$P_{th_TM} = \left\{ \kappa U_{11}^2 (U_{11}^2 - U_{01}^2) / 2\pi n_{eff} \right\} \cdot \left\{ (\eta_{laser} \cdot L) / \eta_{heat} \right\} \cdot (dT/dn) \cdot (\lambda_0/d_0)^2 \quad (2)$$

여기서, κ 는 실리카 유리의 열전도율, U_{11} 과 U_{01} 은 각각 LP₁₁ 모드와 LP₀₁ 모드의 횡파수(transverse wavenumber), n_{eff} 는 유효 굴절률, η_{laser} 는 레이저 효율, η_{heat} 는 발열 상수, L 은 광섬유 길이, dn/dT 는 열광학(thermo-optic) 상수, λ_0 은 레이저 중심파장, d_0 은 광섬유 코어 직경을 의미한다^[21]. 또한 모드 불안정 현상이 발생할 경우, 복굴절 특성도 저하되기 때문에 편광을 유지하며 출력을 증대하는데 한계가 발생하게 된다. 모드 불안정 현상을 억제하기 위해서 낮은 개구수의 광섬유, 도핑 이온 농도 설계, 광섬유 클래드 직경 증가, 광섬유 코일링 직경 감소 및 횡수 증가, 펌프 파장 이동 및 변조, 양방향 펌프 기술 등 다양한 방법이 연구되고 있다^[22-27]. kW급 고출력 광섬유 레이저를 개발하기 위해 대구경 코어 광섬유를 사용하여 유도 브릴루앙 산란을 억제할 수 있지만, 그에 따라 모드 불안정 현상이 발생하여 단일모드 빔 품질 및 편광유지 특성을 저해하는 상관관계에 있다.

본 논문에서는 kW급 고출력 단일모드 편광유지 고출력 광섬유 레이저 개발을 위해 20 μm 및 25 μm 의 코어 직경을 갖는 편광유지 대구경 광섬유를 이용하여 각각의 유도 브릴루앙 산란 특성 및 모드 불안정 특성을 비교 분석하였으며, 이를 최적화하기 위해 이중 광섬유를 함께 구성하였을 때 얻어지는 출력 증대 효과를 분석하였다. 또한 광섬유 브래그 회절격자 안정화 레이저 다이오드(fiber-Bragg-grating-stabilized laser diode, FBG-LD) 신호 광원 및 분포 귀환형 레이저 다이오드(distributed-feedback laser diode, DFB-LD)를 PRBS 위상변조한 신호 광원에 따른 특성을 비교하였다.

II. 실험 구성

MOPA 구조의 편광유지 광섬유 레이저는 그림 1과 같이 신호 광원과 다단 증폭부로 구성하였다. 신호 광원에 따른 광 특성 개선 효과 비교분석을 위해 2가지 종류의 신호 광원을 준비하였다. 첫째, FBG-LD (Innolume, LD-1064-FBG-400)를 사용하여 20 GHz 선폭을 갖는 신호 광원을 구성하였으며, 다른 하나로 DFB-LD (Innolume, DFB-1064-PM-50) 출력광의 PRBS 위상변조를 통해 10 GHz 선폭을 갖는 신호 광원을 구성하였다. mW급 신호 광원은 2단 증폭 구조의 전치 증폭부를 통하여 25 W의 레이저 출력으로 증폭하였다. 주 증폭부는 976 nm 파장의 140 W급 펌프 레이저 다이오드(BWT, K976AN1RN-140.0 W) 18개와 (18+1)×1 펌프-신호 다중모드 결합기(ITF, PMC1811C10286)로 클래드 펌핑이 되도록 구성하고, 코어/클래드 직경이 각각 20/400 μm 및 25/400 μm 인 이터븀(ytterbium, Yb) 첨가 편광유지 광섬유(Nuferm, PLMA-YDF-20/400-M & PLMA-YDF-25/400-M)를 이용하여 구성하였다. 레이저 출력단은 잔여 펌프광 제거 기능이 포함되어 있는 수냉형 엔드캡(end-cap, Lightcomm, LLC-M-1064-665-0-0.5-1 m)을 사용하여 kW급 광 출력을 운용할 수 있도록 구성하였다. 또한 주 증폭부 전단의 역반사 모니터링 포트를 통해 레이저 시스템의 구성 조건에 따른 유도 브릴루앙 산란 특성을 분석하였다.

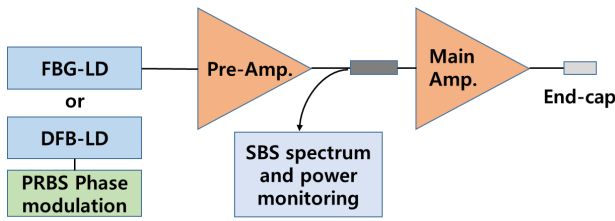


Fig. 1. Schematic diagram of the all-fiber MOPA system.

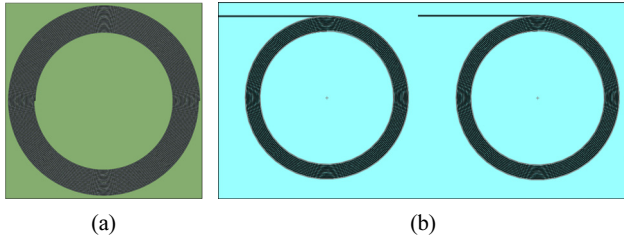


Fig. 2. Fiber coiling spiral plates in the main amplifier. (a) Single coiling type. (b) Double coiling type.

그림 2와 같이 Yb 첨가 편광유지 대구경 광섬유의 코일링 및 냉각을 위해 평균 13 cm의 직경을 갖는 단일 나선형 기구부와 평균 10 cm의 직경을 갖는 이중 나선형 기구부를 각각 제작하였다. 단일 나선형 기구부를 이용하여 20 μm 및 25 μm 의 코어 직경의 대구경 광섬유 각각에 대한 유도 브릴루앙 산란 및 모드 불안정성에 대한 특성을 분석하였으며, 이중 나선형 기구부를 이용하여 이중 광섬유를 함께 구성함에 따른 유도 브릴루앙 산란 및 모드 불안정성 특성을 분석하였다.

III. 실험 방법 및 결과

실험 조건별 유도 브릴루앙 산란 특성은 역반사 모니터링 포트를 통해 측정되는 레이저 중심파장에 해당하는 레일리(Rayleigh) 산란에 의한 광 스펙트럼과 레이저 중심파장에서 약 16 GHz 떨어진 위치의 유도 브릴루앙 산란에 의한 광 스펙트럼의 침투 차이를 측정하여 분석하였다. 일반적으로 유도 브릴루앙 산란에 따른 출력 증대 한계의 기준치는 레일리 산란에 의한 광 스펙트럼 침투 대비 유도 브릴루앙 산란에 의한 광 스펙트럼 침투가 커지는 정도에 따라 판단하며, 두 광 스펙트럼의 침투세기의 차이가 0-30 dB까지 다양한 기준으로 연구되고 있다^{5,28-30}. 본 실험에서는 고풍출력 레이저 시스템의 안정성을 고려하여 두 광 스펙트럼의 침투치가 동일해지는 수준(침투세기의 차이=0 dB)을 출력 증대 제한 기준으로 설정하였다. 또한, 모드 불안정 특성은 고차모드가 증

가될 때 펌프 출력을 높여도 레이저 출력이 증가되지 않고 증폭 효율이 감소하기 때문에 입력되는 펌프 출력 대비 레이저 출력의 증폭 효율을 측정하여 급격히 감소하는 구간을 분석하였다. 추가적으로 광 검출기(Thorlabs, DET10A/M) 및 오실로스코프(Teledyne LeCroy, WaveSurfer 3034)를 이용하여 레이저 출력 증가에 따른 출력요동의 시간적 변화를 푸리에 변환(Fourier transform)한 주파수 성분 또한 측정하여 모드 불안정 현상을 분석하였다^{31,32}.

광섬유 종류에 따른 특성 분석을 위해 20/400 μm 및 25/400 μm Yb 첨가 편광유지 광섬유의 길이를 각각 8 m 및 6 m를 사용하여 12-13 dB의 펌프광 흡수율을 갖도록 구성하였다. 두 광섬유에 대한 광학적 성능지수는 표 1과 같으며, 펌프 레이저 다이오드의 파장인 976 nm에 대한 클래드 흡수율은 915 nm 파장의 클래드 흡수율 대비 3배 큰 1.5 dB/m 및 2.19 dB/m 값을 각각 적용하였다. 그림 2(a)의 단일 나선형 기구부를 이용하여 Yb 첨가 광섬유를 코일링하였으며, 앤드캡까지의 전송 광섬유 약 1.5 m 길이로 주 증폭부를 구성하였다. 신호 광원은 20 GHz 선폭을 갖는 FBG-LD를 이용하였으며, 입력되는 펌프 출력의 증가에 따른 레이저 출력 및 역반사 스펙트럼의 특성을 분석하였다. 그림 3(a)와 같이 20/400 μm Yb 첨가 편광유지 광섬유를 사용한 레이저 시스템은 입력되는 펌프 출력의 증가에 따라 선형적으로 레이저 출력이 증가하였으며, 출력 증폭 효율이 80% 정도로 일정하게 유지되어 모드 불안정 현상이 발생하지 않음을 확인하였다. 하지만, 그림 3(b)의 출력 증가에 따른 역반사 광 스펙트럼 측정 결과와 같이 480 W 출력에서 역반사 스펙트럼의 두 침투 높이가 유사해졌으며, 690 W 출력에서는 유도 브릴루앙 산란에 의한 광 스펙트럼 침투가 더 높아짐을 확인하였다. 모드 불안정 특성은 없어 출력 증대는 가능하지만, 역반사 광 스펙트럼 침투세기의 차이 0 dB 기준의 시스템 안정성을 고려하여 출력 증대 한계는 480 W로 분석하였다.

반면, 25/400 μm Yb 첨가 편광유지 광섬유를 사용한 레이저 시스템은 그림 4(a)와 같이 입력되는 펌프 출력의 증가에 따라 레이저 출력이 490 W까지 선형적으로 증가하며 출력 증폭 효율도 약 80% 수준을 유지하고 있으나, 이후 출력 증폭 효율이 68%까지 감소되며 출력이 증가되지 않는 모드 불안정 현상이 확인되었다. 490 W 이후부터 고차모드 비율이 증가하여 앤드캡에서 잔여 펌프광과 함께 제거됨에 따라 최종 레이저 출력이 증가하지 않고 증폭 효율이 감소하여 레이저 출력 증폭에 제한이 되었다. 하지만 그림 4(b)와 같이 출력 증가에 따른 역반사 스펙트럼 측정 결과, 모드 불안정 특성이 발생하는 시점인 490 W 출력에서 유도 브릴루앙 산란에 의한 스펙트럼 침투가 레일리 산란 스펙트럼 침투에 비해

Table 1. Optical specifications of 20/400 μm & 25/400 μm Yb-doped polarization-maintaining fiber

Fiber	Core NA	Cladding NA	Cladding absorption	Birefringence
PLMA-YDF-20/400-M	0.065 ± 0.005	≥0.46	0.5 ± 0.1 dB/m @ 915 nm	Nominal 4 × 10 ⁻⁴
PLMA-YDF-25/400-M	0.065 ± 0.005	≥0.46	0.73 ± 0.07 dB/m @ 915 nm	Nominal 3.5 × 10 ⁻⁴

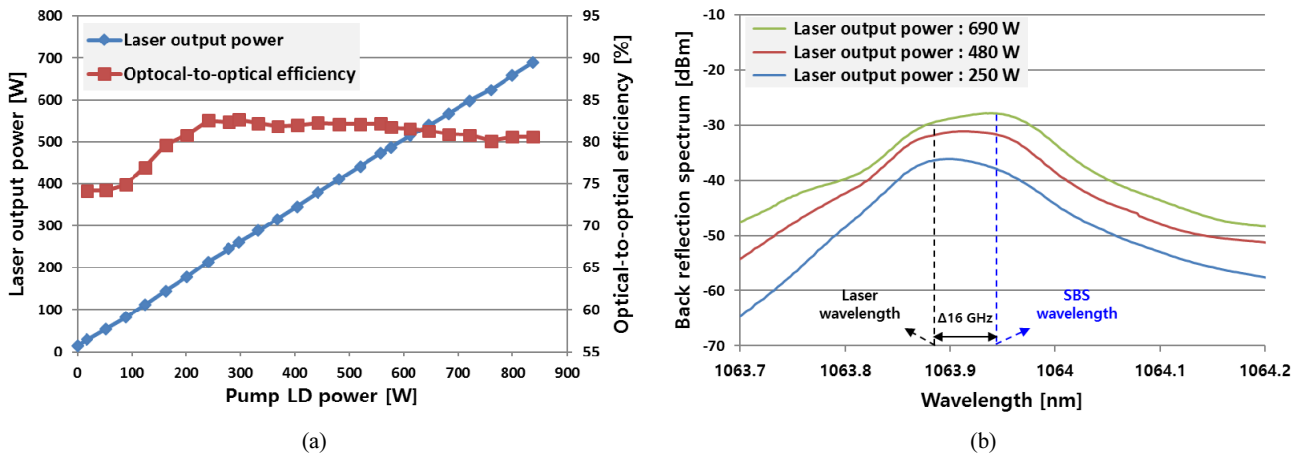


Fig. 3. Characteristics of the 20/400 μm Yb-doped polarization-maintaining fiber laser. (a) Measurement results of the laser output power and optical-to-optical efficiency. (b) Measurement results of the back-reflection optical spectrum.

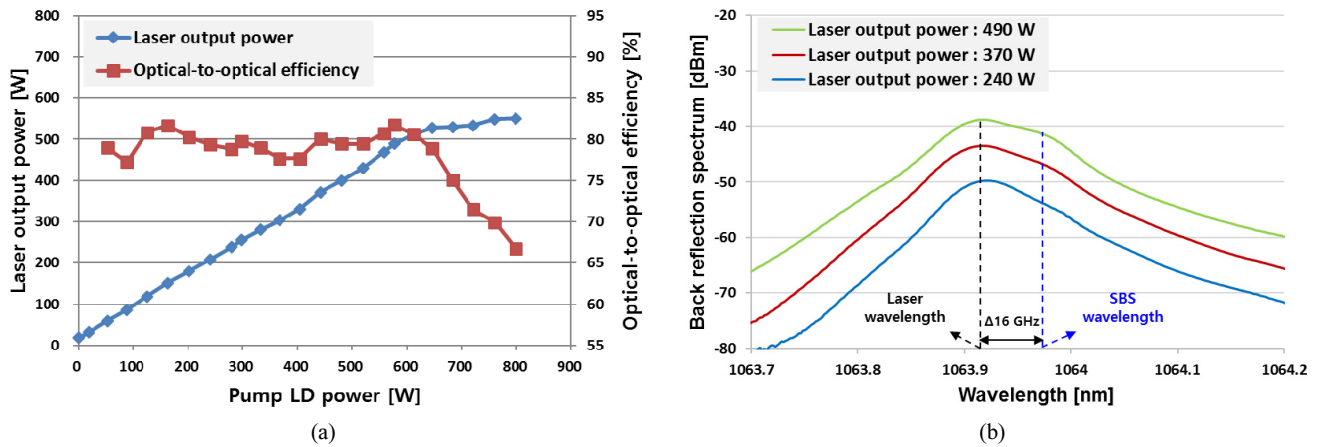


Fig. 4. Characteristics of the 25/400 μm Yb-doped polarization-maintaining fiber laser. (a) Measurement results of the laser output power and optical-to-optical efficiency. (b) Measurement results of the back-reflection optical spectrum.

약 3 dB 정도 낮은 수준으로 측정되었다. 이는 20/400 μm Yb 첨가 편광유지 광섬유 조건과 비교해보았을 때, 광섬유 코어 직경의 증가에 따른 비선형성이 완화되어 유도 브릴루앙 산란이 억제되었기 때문이다. 유도 브릴루앙 산란 특성을 기준으로 볼 때 출력 증대가 가능한 상황이지만, 모드 불안정 현상에 의해 출력 증대 한계는 490 W로 분석하였다. 또한, 모드 불안정 현상을 분석하기 위해 광 검출기 및 오실로스코프를 통해 광섬유 종류별 출력 증가에 따라 출력 요동의 시간적 변화를 푸리에 변환한 주파수 성분을 분석한 결과, 그림 5(a)와 같이 20/400 μm Yb 첨가 편광유지 광섬유 조건에서는 690 W로 출력이 증가함에 따라 주파수 특성이 유사하게 나타났다. 하지만 그림 5(b)의 25/400 μm Yb 첨가 편광유지 광섬유 조건에서는 출력 효율이 감소하는 시점인 490 W 출력에서 저주파수 성분이 증가하기 시작하였으며, 출력 효율이 급격히 감소한 550 W 출력에서는 3 kHz 이하의 주파수 성분이 매우 증가함을 확인할 수 있었다. 기본 모드(fundamental mode) 및 고차 모드(higher-order mode) 간에

에너지 교환이 일어날 때 모드 불안정 현상이 일어나게 되며, 이 때 발생하는 요동에 대한 주파수 성분이 0-5 kHz 영역에 해당한다^[18,33]. 이를 통해 광섬유 코어 직경이 증가함에 따라 모드 불안정의 문턱값이 낮아짐을 확인하였다.

보다 높은 출력에서 단일모드 특성을 갖는 안정적인 레이저 시스템 개발을 위해 유도 브릴루앙 산란과 모드 불안정 특성을 함께 억제할 수 있는 방안으로, 20/400 μm 및 25/400 μm Yb 첨가 편광유지 광섬유를 함께 적용한 고출력 레이저 시스템을 구성하였다. 열부하가 큰 펌프 입력부에 20/400 μm Yb 첨가 편광유지 광섬유를 사용하여 25/400 μm Yb 첨가 편광유지 광섬유만 사용하였을 때보다 모드 불안정 현상이 개선될 수 있으며, 20/400 μm Yb 첨가 편광유지 광섬유만 사용하는 조건 대비 광섬유 코어 면적이 증가함에 따라 비선형성이 저감되어 유도 브릴루앙 산란이 억제될 수 있다^[34-36]. 추가적으로 유도 브릴루앙 산란에 의해 역반사되어 되돌아오는 광원이 이중 광섬유간 융착지점에서 코어 직경이 작아짐에 따라 클래드 영역으로 진행하여 제거되어 역반사

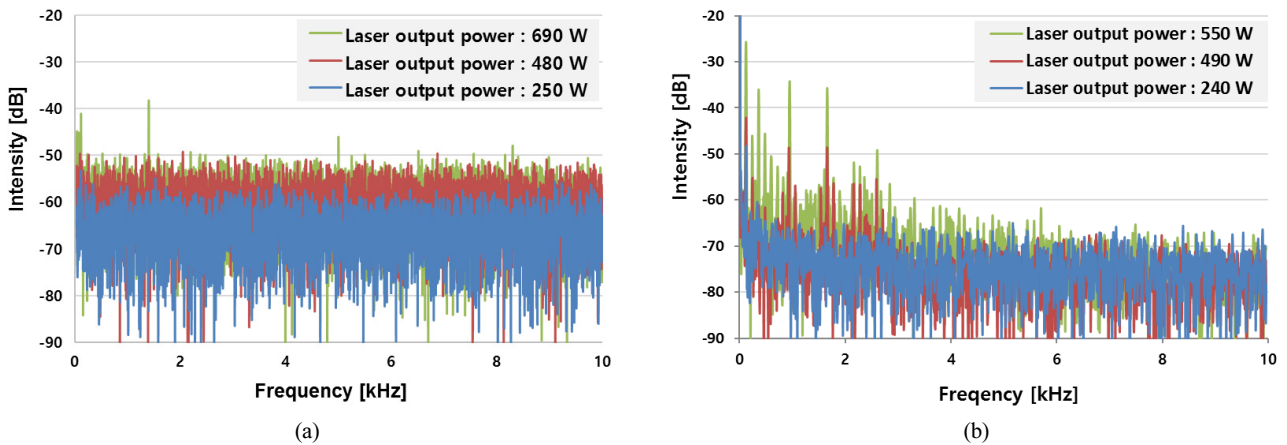


Fig. 5. Measurement results of the RF frequency for different laser output powers. (a) 20/400 μm Yb-doped polarization-maintaining fiber laser. (b) 25/400 μm Yb-doped polarization-maintaining fiber laser.

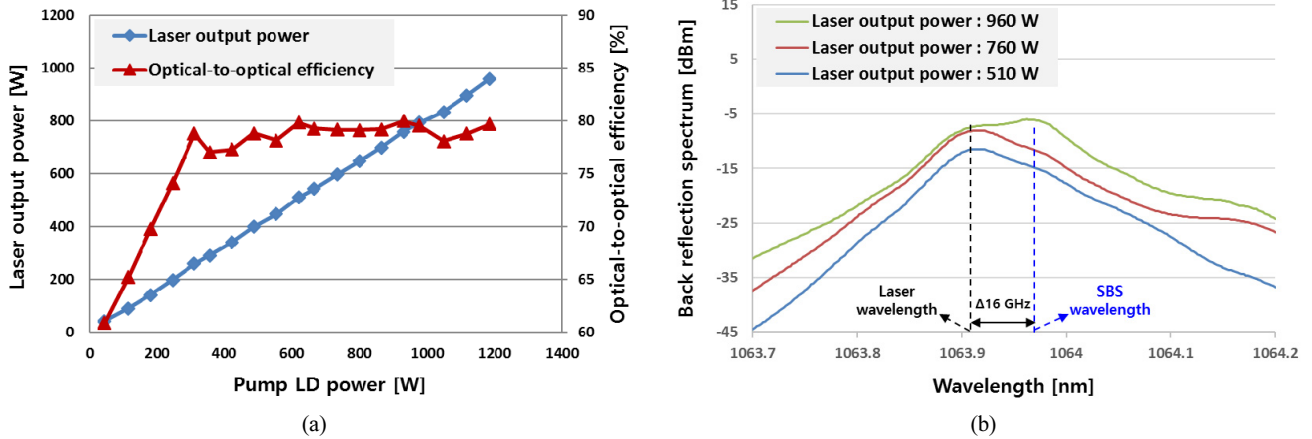


Fig. 6. Characteristics of the 20/400 μm & 25/400 μm Yb-doped polarization-maintaining fiber laser with a seed light of 20 GHz FBG-LD. (a) Measurement results of the laser output power and optical-to-optical efficiency. (b) Measurement results of the back-reflection optical spectrum.

Table 2. Power scaling limits under the types of ytterbium-doped fibers with a seed light of 20 GHz FBG-LD

Power scaling limits	20/400 μm Yb-doped polarization-maintaining fiber laser	25/400 μm Yb-doped polarization-maintaining fiber laser	20/400 μm + 25/400 μm Yb-doped polarization-maintaining fiber laser
SBS peak	<480 W	X	<960 W
Mode instability	X	<490 W	X

출력이 감소되는 효과를 얻을 수 있다. 20/400 μm 및 25/400 μm Yb 첨가 편광유지 광섬유의 길이는 각각 3.4 m 및 3.5 m로 구성하여 12-13 dB의 펌프광 흡수율을 갖도록 설계하였으며, 광섬유간 융착 후 그림 2(b)의 이중 나선형 기구부에 각각 나누어 코일링하였다. 그리고 end-cap까지의 전송 광섬유 길이를 0.6 m로 줄여 구성함으로써, 출력단 전송 광섬유에 의해 발생하는 유도 브릴루앙 산란도 추가적으로 완화시켰다. 또한, 고차모드 손실을 증가시켜 모드 불안정 현상을 억제하기 위해 나선형 기구부의 코일링 직경을 13 cm에서 10 cm로 작게 구성하였다^{33,37}. 20 GHz 선폭을 갖는 FBG-LD

신호 광원을 사용하여 그림 6(a)와 같이 입력되는 펌프 출력 증가에 따라 레이저 출력이 960 W까지 선형적으로 증가하였으며, 출력 증폭 효율도 약 80% 수준으로 유지하며 모드 불안정 현상이 없음을 확인하였다. 하지만 그림 6(b)의 출력 증가에 따른 역반사 광 스펙트럼 측정 결과와 같이 960 W에서 유도 브릴루앙 산란에 의한 광 스펙트럼 첨두가 약 1 dB 정도 더 높아짐을 확인하였으며, 이는 역반사 광 스펙트럼 첨두세기의 차이 0 dB 기준을 넘어서 출력 증대에 제한이 되었다. 표 2와 같이 20 GHz 선폭을 갖는 FBG-LD 신호 광원을 사용하였을 때의 Yb 첨가 편광유지 광섬유 종류에 따

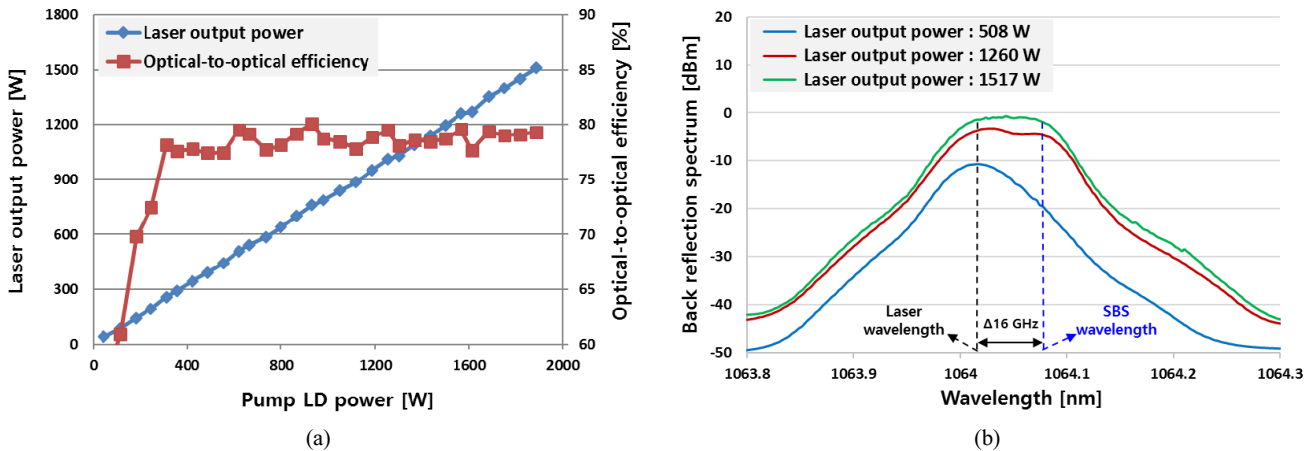


Fig. 7. Characteristics of the 20/400 μm & 25/400 μm Yb-doped polarization-maintaining fiber laser with a seed light of 10 GHz PRBS phase modulation. (a) Measurement results of the laser output power and optical-to-optical efficiency. (b) Measurement results of the back-reflection optical spectrum.

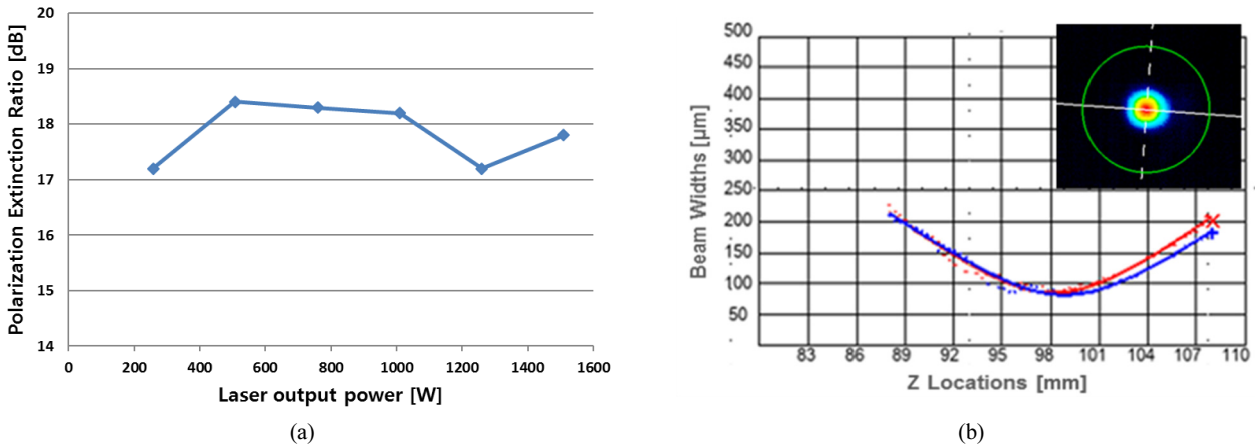


Fig. 8. Characteristics of the 20/400 μm & 25/400 μm Yb-doped polarization-maintaining fiber laser with a seed light of 10 GHz PRBS phase modulation. (a) Measurement results of the polarization extinction ratio. (b) Measurement result of the beam quality at 1,517 W.

른 레이저 특성을 비교한 결과, 유도 브릴루앙 산란 및 모드 불안정 현상에 의해 480-490 W로 제한되던 레이저 출력이 이중 광섬유를 함께 사용함에 따라 960 W로 증가함을 확인하였다.

이중 광섬유를 함께 사용하여 더 높은 출력을 얻기 위해서 유도 브릴루앙 산란 특성을 추가적으로 억제하는 방안이 요구되었다. 이에 DFB-LD (Innolume, DFB-1064-PM-50)를 PRBS 위상변조를 통해 10 GHz 선폭을 갖는 신호 광원을 사용하여 유도 브릴루앙 산란을 억제하도록 구성하였으며, 그에 따르는 모드 불안정 현상을 분석하였다. PRBS 위상변조된 신호 광원의 중모드 간격이 약 10 MHz일 때 유도 브릴루앙 특성이 가장 억제되었던 실험 결과를 참고하여 10 GHz의 신호 주파수 조건에서 PRBS 위상변조 패턴(n)을 10으로 설정하였다^[38]. 또한 low-pass filter를 사용하여 추가적인 유도 브릴루앙 산란 억제 효과를 얻도록 설계하였다^[39,40]. 그림 7(a)와 같이 펌프 출력 증가에 따라 선형적으로 레이저 출력이 증가하며 모드 불안정 현상 없이 1,517 W 출력을 확인하였으며, 이

때 그림 7(b)의 역반사 광 스펙트럼 결과와 같이 스펙트럼 첨두세기의 차이는 0 dB 수준을 확인하였다. 모드 불안정 현상이 없어 추가적인 출력 증대가 가능한 상황이지만 시스템 안정성을 고려하여 더 이상 출력은 증대하지 않았다. 이를 통해 PRBS 위상변조에 의한 선폭 확대가 유도 브릴루앙 산란 억제에 큰 효과가 있음을 알 수 있으며, 이중 광섬유를 함께 구성하였을 때 1,517 W 출력까지 모드 불안정 현상이 발생되지 않음을 확인하였다. 또한 그림 8과 같이 출력이 증가함에 따라 편광 소광률은 17 dB 이상으로 유지되었으며, 빔 품질(M^2) 측정장비(WinCamD-LCM4, Dataray)를 이용하여 측정된 빔 품질은 1,517 W 레이저 출력에서 1.15로서 단일모드 빔 품질 특성을 확인하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 전광섬유 MOPA 구조의 협대역 단일모드 편광유지 고효율 광섬유 레이저에 대해 Yb 첨가 편광유지

광섬유 및 신호 광원에 따른 유도 브릴루앙 산란 및 모드 불안정 현상을 분석하였다. 20 GHz 선폭의 FBG-LD 신호 광원을 사용하였을 때 20/400 μm Yb 첨가 편광유지 광섬유 레이저는 유도 브릴루앙 산란에 의해 레이저 출력이 480 W로 제한되었으며, 25/400 μm Yb 첨가 편광유지 광섬유 레이저는 모드 불안정 현상에 의해 레이저 출력이 490 W로 제한됨을 확인하였다. 20/400 μm 및 25/400 μm Yb 첨가 편광유지 광섬유를 함께 적용한 광섬유 레이저는 유도 브릴루앙 산란 및 모드 불안정 현상을 함께 억제시킬 수 있었으며, 960 W의 레이저 출력을 확인하였다. 또한, 유도 브릴루앙 산란 특성을 추가적으로 억제하기 위해 10 GHz 선폭의 PRBS 위상 변조 신호 광원을 적용하여 1,517 W 레이저 출력을 확인하였으며, 이때 레이저 출력의 빔 품질(M^2)은 1.15이고 17 dB 이상의 편광 소광률을 갖는 단일모드 편광유지 특성을 확인하였다.

References

1. M. N. Zervas and C. A. Codemard, "High power fiber lasers: a review," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **20**, 0904123 (2014).
2. D. J. Richardson, J. Nilsson, and W. A. Clarkson, "High power fiber lasers: current status and future perspectives," *J. Opt. Soc. Am. B* **27**, B63-B92 (2010).
3. J. Lee, K. H. Lee, H. Jeong, M. Park, J. H. Seung, and J. H. Lee, "2.05 kW all-fiber high-beam-quality fiber amplifier with stimulated Brillouin scattering suppression incorporating a narrow-linewidth fiber-Bragg-grating-stabilized laser diode seed source," *Appl. Opt.* **58**, 6251-6256 (2019).
4. T. J. Wagner, "Fiber laser beam combining and power scaling progress, Air Force Research Laboratory Laser Division," *Proc. SPIE* **8237**, 823718 (2012).
5. N. A. Naderi, A. Flores, B. M. Anderson, and I. Dajani, "Beam combinable, kilowatt, all-fiber amplifier based on phase-modulated laser gain competition," *Opt. Lett.* **41**, 3964-3967 (2016).
6. B. Anderson, A. Flores, R. Holten, and I. Dajani, "Comparison of phase modulation schemes for coherently combined fiber amplifiers," *Opt. Express* **23**, 27046-27060 (2015).
7. C. Zeringue, I. Dajani, S. Naderi, G. T. Moore, and C. Robin, "A theoretical study of transient stimulated Brillouin scattering in optical fibers seeded with phase-modulated light," *Opt. Express* **20**, 21196-21213 (2012).
8. B. G. Ward, "Maximizing power output from continuous-wave single-frequency fiber amplifiers," *Opt. Lett.* **40**, 542-545 (2015).
9. R. G. Smith, "Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering," *Appl. Opt.* **11**, 2489-2494 (1972).
10. R. Engelbrecht, J. Hagen, and M. Schmidt, "SBS-suppression in variably strained fibers for fiber-amplifiers and fiber-lasers with a high spectral power density," *Proc. SPIE* **5777**, 795-798 (2005).
11. A. Flores, C. Robin, A. Lanari, and I. Dajani, "Pseudo-random binary sequence phase modulation for narrow linewidth, kilowatt, monolithic fiber amplifiers," *Opt. Express* **22**, 17735-17744 (2014).
12. I. Dajani, C. Vergien, C. Robin, and C. Zeringue, "Experimental and theoretical investigations of photonic crystal fiber amplifier with 260 W output," *Opt. Express* **17**, 24317-24333 (2009).
13. J. D. Marconi, J. M. C. Boggio, and H. L. Fragnito, "Narrow linewidth fibre-optical wavelength converter with strain suppression of SBS," *Electron. Lett.* **40**, 1213-1214 (2004).
14. C. Robin, I. Dajani, and F. Chiragh, "Experimental studies of segmented acoustically tailored photonic crystal fiber amplifier with 494 W single-frequency output," *Proc. SPIE* **7914**, 79140B (2011).
15. R. Tao, P. Ma, X. Wang, P. Zhou, and Z. Liu, "Comparison of the threshold of thermal-induced mode instabilities in polarization-maintaining and non-polarization-maintaining active fibers," *J. Opt.* **18**, 065501 (2016).
16. Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne, and J. Nilsson, "Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power," *Opt. Express* **12**, 6088-6092 (2004).
17. T. Eidam, C. Wirth, C. Jauregui, F. Stutzki, F. Jansen, H.-J. Otto, O. Schmidt, T. Schreiber, J. Limpert, and A. Tünnemann, "Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers," *Opt. Express* **19**, 13218-13224 (2011).
18. C. Jauregui, T. Eidam, H.-J. Otto, F. Stutzki, F. Jansen, J. Limpert, and A. Tünnemann, "Temperature-induced index gratings and their impact on mode instabilities in high-power fiber laser system," *Opt. Express* **20**, 440-451 (2012).
19. B. Ward, C. Robin, and I. Dajani, "Origin of thermal modal instabilities in large mode area fiber amplifiers," *Opt. Express* **20**, 11407-11422 (2012).
20. A. V. Smith and J. J. Smith, "Mode instability in high power fiber amplifiers," *Opt. Express* **19**, 10180-10192 (2011).
21. M. N. Zervas, "Power scaling limits in high power fiber amplifiers due to transverse mode instability, Thermal Lensing and Fiber Mechanical Reliability," *Proc. SPIE* **10512**, 1051205 (2018).
22. S. Naderi, I. Dajani, T. Madden, and C. Robin, "Investigations of modal instabilities in fiber amplifiers through detailed numerical simulations," *Opt. Express* **21**, 16111-16129 (2013).
23. K. R. Hansen, T. T. Alkeskjold, J. Broeng, and J. Lægsgaard, "Theoretical analysis of mode instability in high-power fiber amplifiers," *Opt. Express* **21**, 1944-1971 (2013).
24. C. Schulze, A. Lorenz, D. Flamm, A. Hartung, S. Schröter, H. Bartelt, and M. Duparré, "Mode resolved bend loss in few-mode optical fibers," *Opt. Express* **21**, 3170-3181 (2013).
25. R. Tao, P. Ma, X. Wang, P. Zhou, and Z. Liu, "1.3 kW monolithic linearly-polarized single-mode master oscillator power amplifier and strategies for mitigating mode instabilities," *Photon. Res.* **3**, 86-93 (2015).

26. C. X. Yu, O. Shatrovov, T. Y. Fan, and T. F. Taunay, "Diode-pumped narrow linewidth multi-kilowatt metalized Yb fiber amplifier," *Opt. Lett.* **41**, 5202-5205 (2016).
27. R. Tao, P. Ma, X. Wang, P. Zhou, and Z. Liu, "Mitigating of modal instabilities in linearly-polarized fiber amplifiers by shifting pump wavelength," *J. Opt.* **17**, 045504 (2015).
28. A. Kobayakov, M. Sauer, and D. Chowdhury, "Stimulated Brillouin scattering in optical fibers," *Adv. Opt. Photon.* **2**, 1-59 (2010).
29. V. R. Supradeepa, "Stimulated Brillouin scattering thresholds in optical fibers for lasers linewidth broadened with noise," *Opt. Express* **21**, 4677-4687 (2013).
30. N. Platonov, R. Yagodkin, J. D. L. Cruz, A. Yusim, and V. Gapontsev, "Up to 2.5 kW on non-PM fiber and 2.0 kW linear polarized on PM fiber narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifiers in all-fiber format," *Proc. SPIE* **10512**, 105120E (2018).
31. R. Tao, P. Ma, X. Wang, P. Zhou, and Z. Liu, "Influence of core NA on thermal-induced mode instabilities in high power fiber amplifiers," *Laser Phys. Lett.* **12**, 085101 (2015).
32. H.-J. Otto, F. Stutzki, F. Jansen, T. Eidam, C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tünnermann, "Temporal dynamics of mode instabilities in high-power fiber lasers and amplifiers," *Opt. Express* **20**, 15710-15722 (2012).
33. R. Su, R. Tao, X. Wang, H. Zhang, P. Ma, P. Zhou, and X. Xu, "2.43 kW narrow linewidth linearly polarized all-fiber amplifier based on mode instability suppression," *Laser Phys. Lett.* **14**, 085102 (2017).
34. K. Brar, M. Savage-Leuchs, J. Henrie, S. Courtney, C. Dilley, R. Afzal, and E. Honea, "Threshold power and fiber degradation induced modal instabilities in high-power fiber amplifiers based on large mode area fibers," *Proc. SPIE* **8961**, 89611R (2014).
35. E. C. Honea, M. P. Savage-Leuchs, S. M. Courtney, K. S. Brar, J. D. Henrie, and C. D. Dilley, "Fiber amplifier system for suppression of modal instabilities and method," US Patent 9214781 B2 (2015).
36. M. P. Savage-Leuchs, "Method and apparatus for optical gain fiber having segments of differing core size," US Patent 7768700 B1 (2010).
37. R. Tao, R. Su, P. Ma, X. Wang, and P. Zhou, "Suppressing mode instabilities by optimizing the fiber coiling methods," *Laser Phys. Lett.* **14**, 025101 (2017).
38. S. Jeong, K. Kim, S. Lee, S. Hwang, H. Yang, B. Moon, Y. M. Jhon, M. K. Park, and J. H. Lee, "Characteristics of stimulated Brillouin scattering suppression in high-power fiber lasers using temperature gradients," *Korean J. Opt. Photon.* **30**, 167-173 (2019).
39. B. M. Anderson, A. Flores, and I. Dajani, "Filtered pseudo random modulated fiber amplifier with enhanced coherence and nonlinear suppression," *Opt. Express* **25**, 17671-17682 (2017).
40. M. Liu, Y. Yang, H. Shen, J. Zhang, X. Zou, H. Wang, L. Yuan, Y. You, G. Bai, B. He, and J. Zhou, "1.27 kW, 2.2 GHz pseudo-random binary sequence phase modulated fiber amplifier with Brillouin gain-spectrum overlap," *Sci. Rep.* **10**, 629 (2020).