《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 27, No. 3, June 2016, pp. 95-100 ISSN : 1225-6285(Print)
DOI: http://dx.doi.org/10.3807/KJOP.2016.27.3.095 ISSN : 2287-321X(Online)

Quasi-continuous-wave Yb-doped Fiber Lasers with 1.5 kW Peak Power

Minjee Jeon[1,2], Yeji Jung[1,2], Jiwon Kim[2], and Hoon Jeong[1†]

[1]*Manufacturing System R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology, Cheonan-si 331-822, Korea*
[2]*Department of Applied physics, University of hanyang ERICA, Ansan-si, 15588, Korea*

(Received April 15, 2016; Revised manuscript June 8, 2016; Accepted June 9, 2016)

High-power quasi-continuous-wave (qcw) operation in Yb-doped double-clad fiber lasers with near-diffraction-limited quality of the output beam is reported. Based on numerical simulation, we built a simple, all-fiberized Yb fiber laser, and a fiber-based master-oscillator power amplifier (MOPA). Both laser systems have successfully produced qcw output with average power greater than 150 W at 1080 nm and 10 ms pulse duration at 10 Hz repetition rate, corresponding to a peak power greater than 1.5 kW for 205 W of pump power at 976 nm. Laser performance, including beam quality and slope efficiency, was characterized in both configurations. Prospects for power scaling and applications are discussed.

Keywords: Fiber laser, Quasi-cw, Near infrared laser, Yb laser
OCIS codes: (060.3510) Lasers, fiber, (140.3538) Lasers, pulsed

첨두 출력 1.5 kW급 준연속 이터븀 첨가 광섬유 레이저

전민지[1,2] · 정예지[1,2] · 김지원[2] · 정 훈[1†]

[1]청정생산시스템연구소, 한국생산기술연구원
㊞ 31056, 충청남도 천안시 서북구 입장면 양대기로길 89

[2]한양대학교 응용물리학과
㊞ 15588 경기도 안산시 상록구 한양대학로 55

(2016년 4월 15일 받음, 2016년 6월 8일 수정본 받음, 2016년 6월 9일 게재 확정)

본 논문에서는 이터븀(Yb)이 첨가된 이중 클래딩 광섬유를 이용한 고출력 고품질 준연속 레이저 시스템에 대한 연구 개발과 레이저 특성에 대해 보고한다. 이론적 수치 모사를 통해 최적화된 준연속 레이저 발진 조건을 찾았고, 그것을 바탕으로 공진기 구조와 MOPA (Master-Oscillator Power-Amplifier) 구조를 가진 광섬유 레이저 시스템을 각각 구축하였다. 두 레이저 시스템 모두 10 Hz 반복률, 10 ms로 작동시킬 때 최고 평균 출력 >150 W, 첨두 출력 >1.5 kW 이상의 준연속 레이저 빔을 발생시키는데 성공하였고, 레이저 발진 특성 및 빔 특성을 각각 비교하였다. 그리고 향후 더 높은 출력을 얻기 위한 방법과 전망에 대해 논의할 것이다.

Keywords: 광섬유 레이저, 준연속 레이저, 근적외선 레이저, Yb 레이저
OCIS codes: (060.3510) Lasers, fiber, (140.3538) Lasers, pulsed

I. 서 론

광섬유 레이저는 다른 레이저에 비해서 높은 전기-광에너지 변환 효율과 좋은 빔 품질, 넓은 레이저 발진 파장 폭을 가질 뿐 아니라 소형화가 가능하고 유지보수가 쉬운 장점 등이 있어 최근 20년간 눈부신 발전을 이루었다. 특히 이중 클래딩 구조의 광섬유 레이저는 열이 발생하는 이득 매질의 부피 대비 열 발생 표면적이 극단적으로 큰 도파로 구조의 장점으로 인해 열 문제를 크게 줄일 수 있어 기존 고체 레이저에서 구현하기 불가능한 kW 급의 높은 레이저 연속 발진이 가능하다 [1-7]. 이로 인해 용접, 절단, 드릴링, 천공, 표면 처리 등 이미 레이저를 사용중인 기존의 기계 가공 분야뿐 아니라 LED 및 디스플레이, 반도체 및 의료 분야 등 다양한 산업 분야에서 널리 응용되고 있다.

†E-mail: hoonj@kitech.re.kr
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

레이저 발진은 크게 연속 발진 작동과 펄스 발진 작동으로 나눌 수 있다. 전자는 연속적으로 높은 출력을 내는 방식이므로 금속 커팅, 용접 등 큰 에너지가 필요한 가공 분야에 많이 쓰이고 있고, 후자의 펄스 작동은 천공, 드릴링, 메시 가공 등 높은 첨두 출력을 요구하는 응용 분야에 주로 적용되고 있다. 하지만 많은 가공 분야에서 연속 발진 레이저 빔의 높은 에너지가 필요함과 동시에 가공의 품질을 높이기 위해 열적 손상을 최소화시킬 수 있는 방법을 요구하고 있는데 이를 해결할 수 있는 방법 중 가장 잘 알려진 것이 준연속 레이저 발진 (Quasi-cw laser operation)이다. 준연속 레이저 발진은 수 kW급의 높은 출력의 레이저 광원을 밀리초에서 수십 밀리초 정도의 펄스로 구동하는 방식으로 펄스당 높은 에너지를 가지고 있기 때문에 연속 출력 레이저에 상응하는 가공성을 보일 뿐만 아니라, 필요한 시간만 에너지를 가해주는 펄스 형태이기 때문에 타겟에서 발생하는 열로 인한 추가 손상을 줄여 가공 품질을 크게 향상시킬 수 있다. 또한 펄스형 작동이므로 소모되는 전기 에너지가 크게 줄어들고, 레이저 펄스 형태를 쉽게 조절할 수 있기 때문에 다양한 가공에 응용될 수 있는데 실제 준연속 발진 레이저는 점-용접 (spot-welding), 금속 드릴링, 절단 등의 금속 가공에 널리 사용되고 있다 [8-10].

본 논문에서는 광섬유를 기반으로 한 고출력 준연속 광섬유 레이저 시스템에 대해 보고한다. 우선 수치 모사 프로그램을 활용하여 Yb 이중 클래딩 광섬유를 레이저 매질로 사용하는 레이저 시스템의 작동에 대한 최적 조건을 알아보았다. 그리고 얻은 이론적 결과를 바탕으로 모든 광소자가 광섬유 소자로 구성된 공진기 구조 레이저 시스템과 MOPA 구조 레이저 시스템을 각각 구축하였고, 두 시스템 모두 >1.5 kW의 첨두 출력을 가진 10 ms의 레이저 펄스를 10 Hz로 발진시키는데 성공하였다.

II. 실험 및 결과

고출력 광섬유 레이저를 얻기 위한 시스템을 설계할 때 반드시 고려해야 할 중요 변수는 이득 광섬유의 길이와 코어 직경 대비 클래딩 직경비, 흡수율, 여기광 대비 레이저 변환효율 (fraction of pump light converted to laser power) 및 여기광 대비 열 변환효율 (fraction of pump light converted to heat in laser core) 등이 있으므로 최적화된 레이저 발진을 위하여 반드시 이들을 고려해서 시스템을 설계해야 한다 [2].

고출력 준연속 광섬유 레이저 시스템을 개발하기 전에 상용 소프트웨어인 RP fiber power를 사용하여 Yb 첨가 이득 광섬유 레이저 시스템의 최적화 조건을 조사하였다. Figure 1은 주어진 광섬유의 주요 변수를 사용하여 (Table 1 참조) 얻은 수치 모사 결과를 보여주고 있다. Figure 1(a)는 20/400 ㎛ Yb 첨가 이중 클래딩 광섬유 12 m와 반사율 99%와 10%의 광섬유 브래그 격자 (FBG)를 사용하여 레이저 공진기를 구성하고, 1 kW의 연속 펌프 출력이 가해졌을 때 입사된 부분으로부터 거리에 따라 남는 펌프 세기(빨간 선)와 각 위치에서 레이저 신호의 세기(점선)를 보여주고 있다. 공진기 구조이므로 내부에는 양방향으로 공진하는 레이저 신호가 존재하게 되는데, 작은 반사율의 FBG 방향인 순방향으로 진행하는 레이저 출력(파란 점선)이 역방향(녹색 점선)에 비해 훨씬 크지만 공진기 구조이므로 두 방향 출력을 합친 값은 모든 위치에서 일정하다는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 1(a)에서 확인할 수 있듯이 광섬유 길이가 8 m 이상이 되면 20 dB 이상의 펌프 빔이 흡수됨을 알 수 있고 약 10 m가 넘어가면 레이저 출력이 약간 감소하고 있는 것을 볼 수 있는데 이는 여기되지 않은 기저 상태 전자들이 레이저 신호를 재흡수하여 나타나는 출력 저하 현상이다. 수치 모사 결과로부터 Yb 첨가 광섬유는 약 10 m 정도로 사용해야 최적화된 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있으며 그때 얻을 수 있는 이론적 최고 레이저 출력은 870 W 이다. Figure 1(b)는 10 m 길이의 광섬유를 사용하여 1 kW의 펌핑빔을 10 ms, 10 Hz로 준연속 펌핑할 때 광섬유 레이저 공진기의 수치 모사 결과를 보여주고 있다. 거의 모든 펌핑 출력이 흡수되었음을 확인할 수 있으며 최고 레이저 출력 또한 앞선 연속발진 출

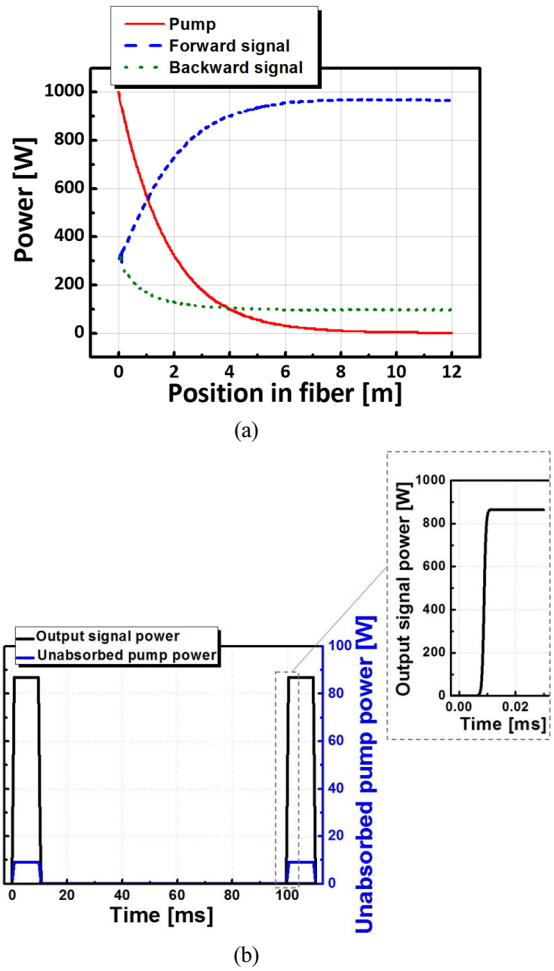


FIG 1. A numerical simulation results of (a) continuous-wave pumping and (b) QCW pumping in Yb fiber laser using RP fiber software.

TABLE 1. Main parameters of Yb doped fiber in RP fiber power software

Core/Cladding diameter	20/400 μm
Core/Cladding NA	0.07/0.46
Pump absorption	3.0 dB/m @ 976 nm
Background loss	15 dB/km
Pump/Signal wavelength	976/1080 nm
Mirror reflectivity	99% for HR (High Reflection) 10% for OC (Output Coupler)
Pump duration	10 ms @ 10 Hz

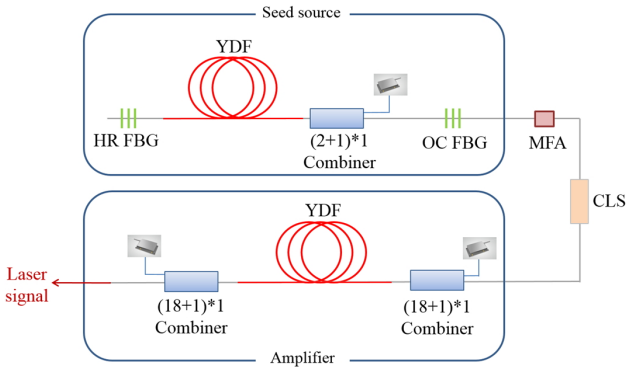
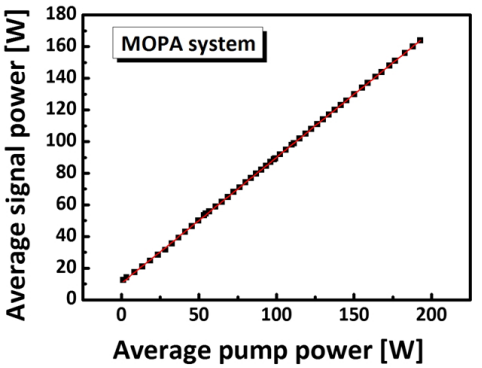


FIG. 2. Experimental setup for the YDF laser with the MOPA system.

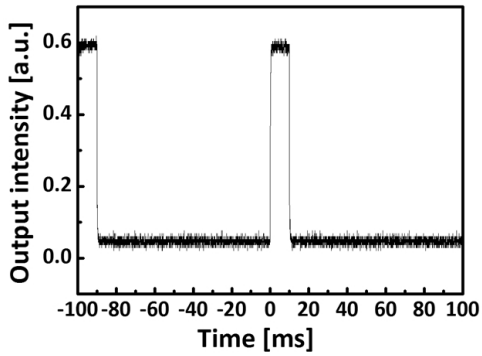
력과 같음을 확인할 수 있다. Figure 1(b)의 삽입 그림을 보면 펌프 신호의 변화 후 레이저 신호가 어떻게 증가하는지 보여주고 있는데, 공진기에서 레이저 신호가 양방향으로 왕복하면서 이득을 얻어 출력이 증가하는 구조임에도 펌프 신호 변화 후 수 마이크로초 정도의 매우 빠른 시간 내에 레이저 신호가 펌프 신호 변화를 따라가고 있음을 확인할 수 있다. 이는 광섬유 레이저의 이득이 매우 커서 수 차례의 레이저 신호 왕복에도 충분히 증폭이 이루어져서 나타나는 현상이며, 이 결과를 바탕으로 수 ms 이상의 준연속 레이저 발진용 레이저 공진기에서는 펌프 출력의 변조가 매우 효율적인 방법일 수 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 광섬유 MOPA와 공진기 형태의 레이저 시스템을 구축하고 펌프 광원을 변조시켜 준연속 레이저 발진을 구현하였다.

Figure 2는 본 연구에서 구축한 광섬유 레이저 MOPA 시스템의 개략도이다. 먼저 MOPA 시스템에서 씨앗 광원(seed source)은 직경 10 μm, NA 0.08의 Yb이 첨가된 코어를 직경 125 μm, NA 0.46의 실리카 내부 클래딩이 둘러싼 이중 클래딩 구조의 단일 모드 광섬유 4.5 m를 사용하였고, 공진기 구성을 위해 광섬유의 양 끝 단에 1080 nm에서 반사율이 99%인 고반사율 광섬유 브래그 격자(HR FBG)와 10%의 저반사율 광섬유 브래그 격자(OC FBG)를 각각 접합시켰다. 펌핑용 광원으로는 976 nm 에 파장 안정화가 되어 있는 2개의 25 W 다이오드 레이저를 사용하였고 역방향 펌프/신호광 결합기를 통하여 펌핑하였으며 펌프/신호광 결합기에서 발생한 신호광의 클래딩 모드는 제거하였다. 이러한 조건 하에서 42.8 W의 펌핑이 가해졌을 때 24 W의 연속 발진 최고 출력을 낼 수 있었고, 이 때 기울기 효율은 59%로 측정되었다. 이론적으로 예측되는 기울기 효율이 ~87% 인 걸 고려하면 본 실험 결과는 큰 차이가 있는 것처럼 보이는데 이는 접합 손실과 펌프/신호광 결합기가 광섬유 레이저 공진기 내부에 있어 신호광의 투과 손실 및 기저 손실(background loss)로 인한 것으로 판단된다. 사용한 펌프/신호광 결합기에서 신호광에 대한 투과 손실은 약 1 dB로 측정되었는데, 이를 고려한 이론적 기울기는 약 65% 정도가 되므로 추가적인 기저 손실까지 감안한다면 본 실험에서 얻은 씨앗 광원의 효율은 이론적 예상치로부터 크게 벗어나지 않다는 것을 알 수 있다. 씨앗 광원에서 나오는 레이저 출력 빔을 자체 제작한 모드 변환 결합기(Mode field adaptor)를 사용해서 증폭단에 연결하였다. 증폭단을 구성한 이중 클래딩 멀티 모드 Yb 첨가 광섬유는 코어가 직경 20 μm, NA 0.07를 가지고 있고, 내부 클래딩은 직경이 400 μm, NA는 0.46으로 976 nm에서 ~2.5 dB/m의 흡수율을 가지고 있었다. 앞 선 수치 모사의 결과를 바탕으로 길이 ~10 m를 사용하였으며, 2개의 (18+1)×1 펌프/신호광 결합기를 통해서 36개의 50 W 급 976 nm 파장 안정화 다이오드 레이저로 양방향 펌핑을 하였다. 그리고 광섬유 표면에서 발생하는 4%의 프레넬 반사로 인한 기생 발진(parasitic lasing)을 막기 위해 출력단 면을 약 10°의 각도로 연마하였다. 증폭단의 안정적 발진을 위해서 12 W의 연속 발진 씨앗 레이저를 증폭단에 입사시켰으며 준연속으로 발진시키기 위하여 증폭단 펌핑 다이오드를 10 ms, 10 Hz로 동작시켰다. Figure 3(a)는 구축한 MOPA 시스템에서 가해준 펌프 출력에 따른 레이저 출력을 보여주고 있다. 평균 펌핑 출력이 205 W 일 때, 최대 164 W의 평균 레이저 출력을 얻을 수 있었는데, 여기서 12 W의 연속 발진 씨앗 레이저의 출력을 고려하면 준연속 펄스당 최대 에너지는 15.3 J, 첨두 출력은 1.53 kW 이다. 주어진 펌핑 출력에 대한 증폭단의 기울기 효율은 79.6%로 신호광의 증폭이 매우 효율적으로 이루어졌음을 확인할 수 있다. 레이저 신호광의 펄스 모양은 10 MHz의 대역폭을 가지고 있는 광검출기와 500 MHz의 대역폭을 가지고 있는 오실로스코프로 측정하였으며, Fig. 3(b), 측정 결과로부터 신호광의 펄스 폭은 10 ms, 반복률은 10 Hz로, 펌핑 광원의 변화와 같은 사각형 펄스 모양을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 펄스와 펄스 사이에 존재하는 신호는 연속 발진된 씨앗 레이저로 인해 측정되는 것으로 확인되었다.

공진기 형태로 구축한 광섬유 레이저 시스템의 구조는 Fig. 4에서 볼 수 있다. MOPA의 증폭단에서 사용한 것과 같은 사양(20/400 μm)의 Yb 첨가 이중 클래딩 광섬유를 사용하였고, 공진기 구성을 위하여 1080 nm에서 고반사율(R>99%)을 가진 광섬유 브래그 격자(HR FBG)와 저반사율(R~10%) 광섬유 브래그 격자(OC FBG)를 광섬유 양 끝단에 접합시켰다. 앞 MOPA 시스템과 마찬가지로 36개의 50 W 급 976 nm 파장 안정화 레이저 다이오드를 10 Hz 반복률로 10 ms 동안 동작시켜 Yb 광섬유를 양방향으로 펌핑하였다. 이러한 조건



(a)



(b)

FIG. 3. (a) Average signal output power vs pump power for the MOPA system with 79.6 % slope efficiency and (b) output pulse shape with 10 ms pulse width at 10 Hz repetition rate.

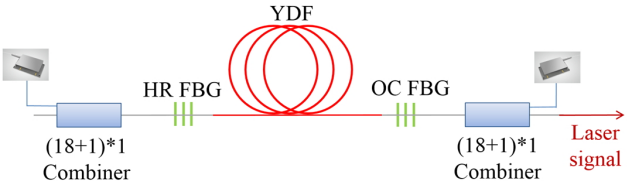
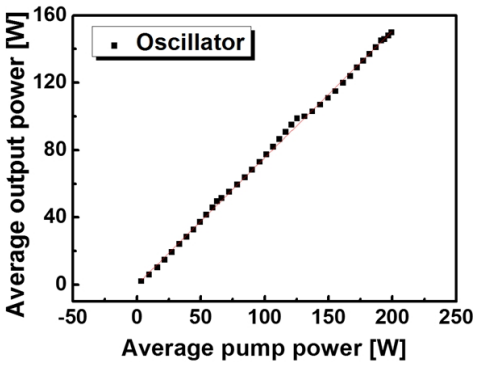
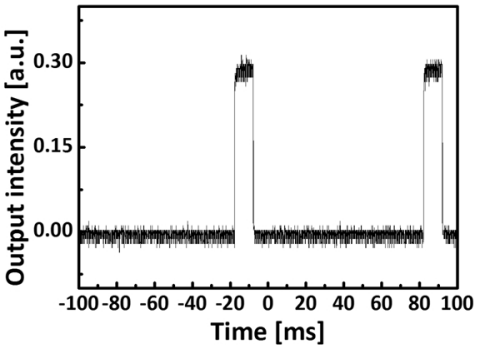


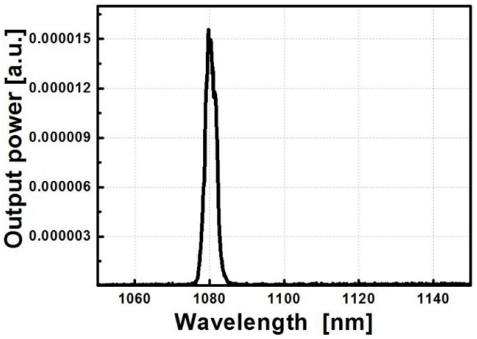
FIG. 4. Experimental setup for the YDF laser with the oscillator system.



(a)



(b)



(c)

FIG. 5. (a) Average output power vs pump power for the oscillator system with 75.5 % slope efficiency, (b) output pulse shape with 10 ms pulse width at 10 Hz repetition rate and (c) optical spectrum measured at the maximum signal power (center wavelength at 1079.7 nm).

하에서 광섬유 레이저는 평균 펌핑 출력이 205 W 일 때, 최대 150 W의 평균 레이저 출력을 발진시켰고 (Fig. 5(a)), 이때 레이저 펄스당 에너지는 15 J로 첨두 출력은 1.5 kW가 된다. 기울기 효율은 75.5%로 공진기 시스템도 역시 높은 효율의 레이저 발진이 이루어졌음을 확인할 수 있었고, 광 스펙트럼 분석기를 통해서 발진된 레이저의 파장의 첨두 파장은 Fig. 5(c)와 같이 1079.7 nm 임을 확인하였다. Figure 5(b)는 광검출기로 측정한 레이저 신호광의 펄스 모양을 보여주고 있는데 펄스폭 10 ms, 반복률 10 Hz로 수치 모사에서 예측한 대로 펌핑 광원의 변화를 잘 따라 변하고 있음을 확인할 수 있었다. 이 때 펄스 모양의 첨두 출력 부분에서 잡음이 발생하는 것으로 보이지만, 레이저 신호를 받아 전기로 증폭하는 광검출기 특성상 레이저의 광량이 낮아 이 부분은 광검출기의 잡음 레벨에 해당되며 실제 광량을 높이면서 펄스 모양을 측정해본 결과 잡음 레벨이 감소하는 현상을 확인하였다.

레이저 시스템에서 출력과 함께 고려해야 할 가장 중요한 값은 출력 레이저 빔의 빔질(M^2)로 광원의 휘도(Brightness)를 결정하는 값인데, 광섬유 레이저에서 빔질은 가이드 되는 모드의 수 및 모드별 성분비에 의해 결정된다 (열 효과에 의한 빔의 변형으로 인해 빔질의 저하가 나타날 수 있으나 일반적으로 광섬유의 특성상 무시될 수 있다). 만약 능동 멀티모드 광섬유에 충분한 펌핑 출력이 가해져 발진 가능한 모드들의 이득이 모두 포화되면 각 모드별 성분비가 일정한 값으로 수렴되게 되는데 모드의 수가 많지 않을 때 이를 고려한

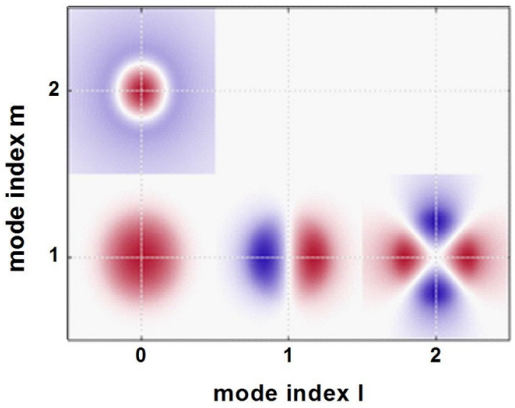
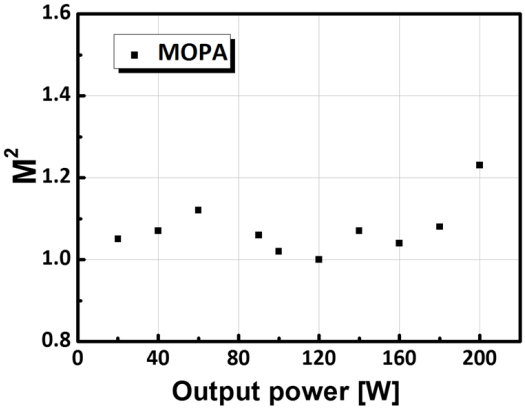
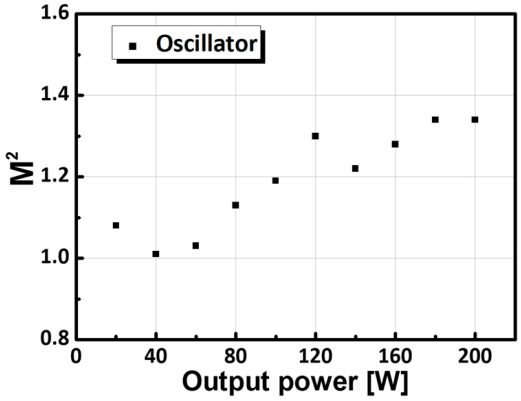


FIG 6. Intensity distributions and transverse mode of lasing modes in this experiment.



(a)



(b)

FIG. 7. Laser beam qualities depending on the output power : (a) The MOPA Yb fiber laser system, (b) the oscillator Yb fiber laser system.

계량화된 이론적 빔질의 한계 값은 $M^2 \approx \pi/12+V/3$으로 주어진다 [2]. 본 실험에서 사용한 멀티 모드 광섬유는 V 값이 4.1로 4개의 횡모드를 가이드 할 수 있으며 (Fig. 6), 이론적으로 기대되는 빔질은 약 1.63이다. 광섬유 MOPA 시스템과 광섬유 레이저 공진기 시스템으로 발진된 출력 레이저 빔에 대하여 출력별 빔질을 측정한 결과를 Fig. 7에서 볼 수 있다. 실제 실험에서는 사용한 빔프로파일러의 한계로 인해 연속적이지 않은 레이저 빔의 빔질을 측정하기 어려워 준연속 발진 레이저를 얻은 동일한 레이저 시스템을 연속 발진시켜 20~200 W 연속광 출력에서의 빔질을 측정하였다. 앞서 말한 광섬유 레이저 빔의 특성으로 인해 Fig. 7의 결과로부터 준연속 발진 레이저 빔의 빔질의 변화 및 범위를 예측해 볼 수 있다. MOPA 시스템 구조에서 발진한 레이저 빔의 빔질은 최고 1.23로 측정되었고, 공진기 구조 시스템에서 발진한 레이저 빔의 빔질은 최고 1.34였다. 앞서 이론적으로 예측한 값보다 좋은 빔질을 가지고 있는데 이는 광섬유의 휘어짐 등으로 인해 고차 모드의 손실이 큰 탓으로 볼 수 있다. Table 2는 두 레이저 시스템 구조로부터 발진한 레이저 출력의 특성을 정리한 것이다. 두 레이저 시스템 모두로부터 >1.5 kW 첨두 출력을 가지고 펄스당 에너지가 >15 J인 준연속 펄스 레이저 빔을 효율적으로 얻을 수 있었으며 우수한 빔질을 가지고 있음을 확인하였다.

Table 2. Comparison of QCW fiber laser output characteristics in MOPA system and Oscillator system

	MOPA	Oscillator
Maximum output peak power [kW]	1.53	1.50
Slope efficiency [%]	79.6	75.5
Pulse energy [J]	15.3	15.0
Maximum beam quality	1.23	1.34

III. 결 론

점-용점 (spot-welding), 금속 드릴링 및 절단 등의 금속 가공에 널리 사용 가능한 1.5 kW급 첨두 출력을 가지는 고출력 준연속 광섬유 레이저를 MOPA 시스템과 공진기 시스템으로 각각 개발하였다. 준연속 발진을 위해 펌핑 광원을 변조시키는 방법을 사용하였는데, 그 결과 MOPA 시스템은 10 ms 동안 최대 15.3 J의 에너지, 1.53 kW의 첨두 출력을 가지는 레이저 빔을 10 Hz로 동작시키는데 성공하였고 79.6%의 높은 기울기 효율과 1.23의 좋은 빔질을 가지는 것을 확인하였다. 마찬가지로 공진기 시스템에서는 최대 15.0 J 에너지, 1.50 kW 첨두 출력을 가지는 10 ms 펄스를 10 Hz로 동작시켰고, 75.5%의 높은 기울기 효율과 1.34의 좋은 빔질을 가지고 있음을 측정하였다. 본 실험 결과로부터 MOPA 레이저 시스템과 공진기 레이저 시스템의 레이저 발진 특성들이 거의 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있었지만, 시스템의 간소성 및 안정성을 고려하면 공진기 형태의 레이저 시스템이 실제 사용 현장에 보다 적합한 것으로 보인다. 또한 현재 최고 출력으로 동작시키더라도 광섬유가 타거나 손상을 입는 일이 없이 60분 이상 안정적으로 동작하는 것을 확인하였으므로 향후 더 높은 펌핑 다이오드 레이저를 사용하면 수 kW

급의 최고 첨두 출력을 가지는 준연속 레이저 발진도 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부의 재원으로 신성장동력장비경쟁력 강화사업의 지원으로 수행된 연구임 (과제번호 : 10043479).

References

1. D. J. Richardson, J. Nilsson, W. A. Clarkson, "High power fiber lasers : current status and future perspectives," J. Opt. Soc. Am. B **27**, B63-B92 (2010).
2. Michalis N. Zervas, Christophe A. Codemard, "High Power Fiber Lasers : A Review," Int. J. Mod. Phys. B, **28**, 1442009 (2014).
3. Hailong Yu, Hanwei Zhang, Haiben Lv, Xiaolin Wang, Jinyong Leng, Hu Xiao, Shaofeng Guo, Pu Zhou, Xiaojun Xu, Jinbao Chen, "3.15 kW direct diode-pumped near diffraction-limited all-fiber-integrated fiber laser," Appl. Optics **54**, 4556-4560 (2015).
4. Y. C. Jeong, Alexander J. B, Jayanta K. Sahu, S. H. Chung, Johan Nilsson, David N. Payne, "Multi-kilowatt Single-mode Ytterbium-doped Large-core Fiber Laser," JOSK, **13**, 416-422 (2009).
5. J. W. Dawson, M. J. Messerly, R. J. Beach, M. Y. Shverdin, E. A. Stappaerts, A. K. Sridharan, P. H. Pax, J. E. Heebner, C. W. Siders, C. P. J. Barty, "Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power," Opt. Express **16**, 13240-13266 (2008).
6. V. Fomin, M. Abramov, A. Ferin, A. Abramov, D. Mochalov, N. Platonov, V. Gapontsev, "10 kW single-mode fiber laser," International Symposium on High-Power Fiber Lasers and Their Applications (St. Petersburg, June 28-July 1, 2010), SyTu-1.3.
7. Jiajian Zhu, Pu Zhou, Yanxing Ma, Xiaojun Xu, Zejin Liu, "Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers," Opt. Express **19**, 18645-18654 (2011)
8. P.R. Morkel, K. P. Jedrzejewski, E. R. Taylor, D. N. Payne, "Short-Pulse, High-Power Q-Switched Fiber Laser," Photonics Technology Letters, IEEE, **4**, 545-547 (1992)
9. Tim Westphäling, "Pulsed Fiber Lasers from ns to ms range and their applications," Physics Procedia. A, **5**, 125-136 (2010).
10. Colin Woratz, Noémie Dury, Christoph Ruettimann, Ulrich Dürr, Ronald Holtz, "Expansion of Pulsed Laser Process Limits through Pulsed Fiber Lasers," Laser Optics, IEEE, **14544983** (2014).