

A Study of the Fiber Fuse in Single-mode 2-kW-class High-power Fiber Amplifiers

Junsu Lee[†], Kwang Hyun Lee, Hwanseong Jeong, Dong Jun Kim, Jung Hwan Lee, and Minsik Jo
Agency for Defense Development, Yuseong P.O.BOX 35, Daejeon 34186, Korea

(Received November 8, 2019; Revised December 10, 2019; Accepted December 13, 2019)

In this paper, we experimentally investigate the fiber fuse in single-mode 2-kW-class high-power fiber amplifiers, depending on the cooling method at the splicing point. We measured the temperature of the splicing point between the pump-signal combiner and gain fiber as a function of laser output power. The temperature of the splicing point increased from 20 to 32°C with a slope of 0.01°C/W, up to 1.2 kW of laser output power. At higher powers the temperature of the splicing point increased dramatically, with a slope of 0.08°C/W. After that, the fiber amplifier was destroyed during operation at 1.96 kW of output power by fiber fuse. The bullet shape, a common feature of fiber fuse, was observed in the damaged passive fiber core of the pump-signal combiner. Later, we adopted an improved water-cooled cold plate to increase the cooling efficiency at the splicing point, and investigated the laser output power. The temperature at the splicing point was 35.8°C with a temperature-rise slope of 0.007°C/W at the maximum output power of 2.05 kW. The beam quality M^2 was measured to be less than 1.3, and the output beam's profile was a stable Gaussian shape. Finally, neither fiber fuse nor mode instability was observed in the fiber amplifier at the maximum output power of 2.05 kW.

Keywords: Fiber lasers, Fiber amplifiers

OCIS codes: (060.3510) Lasers, fiber; (140.3280) Laser amplifiers

단일 모드 2 kW급 고출력 광섬유 증폭기 내의 광섬유 용융 현상에 관한 연구

이준수[†] · 이광현 · 정환성 · 김동준 · 이정환 · 조민식

국방과학연구소

Ⓞ 34186 대전광역시 유성우체국 사서함 35호

(2019년 11월 8일 받음, 2019년 12월 10일 수정본 받음, 2019년 12월 13일 게재 확정)

본 연구에서는 단일 모드 2 kW급 고출력 광섬유 증폭기에서 발생한 광섬유 용융 현상을 용착점 냉각 특성에 따라 실험적으로 분석한 결과를 소개한다. 레이저 출력에 따른 펌프 광 결합기와 주증폭기 이득 광섬유 사이의 용착점 온도를 레이저 출력에 따라 측정하였다. 용착점 온도는 레이저 출력 1.2 kW까지는 20°C에서 32°C까지 온도 상승 기울기 0.01°C/W로 증가율이 작았으나 1.2 kW 이후부터 온도 상승 기울기 0.08°C/W로 용착점 온도가 급격하게 증가하였고 1.96 kW 출력에서 동작 중 광섬유 용융 현상에 의해 광섬유 증폭기가 손상되었다. 손상된 펌프 광 결합기의 전송 광섬유 코어에는 광섬유 용융의 전형적인 탄환모양손상 형상이 나타났다. 이후 수냉식 냉각판을 적용하여 용착점 부위의 냉각 성능을 향상시킨 후 레이저 출력 특성 변화를 조사하였다. 최대 출력 2.05 kW에서 광섬유 용착점 온도는 35.8°C였고 레이저 출력에 따른 온도 상승 기울기는 0.007°C/W로서 급격한 증가 없이 일정하게 유지되었다. 광섬유 증폭기에서 광섬유 용융 현상은 발생하지 않았으며 최대 출력 2.05 kW에서 모드 불안정성 역시 발생하지 않았다. 최대 출력 2.05 kW까지 빔 프로파일은 안정적인 가우시안 형태였으며 빔 품질 1.3 이하를 유지하였다.

Keywords: 광섬유 레이저, 광섬유 증폭기

OCIS codes: (060.3510) Lasers, fiber; (140.3280) Laser amplifiers

I. 서 론

우수한 빔 품질, 열 방출능력, 안정성, 유지 보수의 편리성 등의 장점을 갖는 고출력 광섬유 레이저는 재료 가공, 비선

형 파장 변환, 빔 결합 등에 이용될 수 있기 때문에 많은 관심을 받고 있다^[1-3]. 일반적으로 kW급 고출력 광섬유 레이저는 멀티모드 펌프 레이저 다이오드와 대구경 더블 클래딩 광섬유를 이용하여 구현되며 광섬유 레이저 고유의 장점 및 안

[†]E-mail: ljs@add.re.kr, ORCID: 0000-0001-5806-4742

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

정성 향상을 위해서 광섬유 용착 기반 전-광섬유 구성이 선호된다.

kW급 고출력 광섬유 레이저 구현을 위해서는 유도 브릴루앙 산란, 유도 라만 산란, 모드 불안정성 등의 다양한 비선형 현상을 효과적으로 억제해야 한다⁴⁻⁶. 또한 비선형 현상뿐만 아니라 광섬유 레이저에서 발생하는 열을 적절하게 냉각하고 관리해야 한다. 특히 고출력 펄스 광이 이득 광섬유로 입사되는 펌프 광 결합기와 이득 광섬유 사이의 용착점은 열이 가장 많이 발생하는 곳으로 냉각 및 열 관리가 매우 중요하다. 용착점 냉각 특성에 관한 연구는 기존에 실험 및 이론적으로 수행되었다^{7,8}.

광섬유 레이저에서 발생하는 광섬유 용융 현상은 1988년에 처음으로 보고되었고⁹ 이후 다양한 종류의 광섬유 및 출력 파워에서 광섬유 용융 현상이 보고되었다¹⁰⁻¹². 이중클래딩 이득 광섬유를 이용한 광섬유 레이저에서 발생한 광섬유 용융 현상은 2012년 400 W급 출력에서 최초로 보고된 이후 kW급 출력에 대해 여러 보고가 있었다¹³⁻¹⁵. 광섬유 용융 현상의 원인으로는 광섬유 끝단의 먼지, 실리카 광섬유의 온도 상승에 따른 광섬유 손실 증가 등 열 문제와 관련이 있는 것으로 알려져 있다^{10,16}. 하지만 우리가 아는 한 아직까지 kW급 고출력 광섬유 레이저에서 용착점 냉각 성능이 광섬유 용융에 미치는 영향에 관한 실험적 연구는 수행되지 않았다.

본 연구에서는 이중클래딩 Yb첨가 광섬유를 이용한 단일 모드 2 kW급 고출력 광섬유 증폭기에서 발생한 광섬유 용융 현상을 펌프 광 결합기와 이득 광섬유 용착점의 냉각 특성에 따른 온도 변화의 관점에서 분석한 결과를 소개한다. 냉각 성능 개선 전 레이저 출력에 따라 용착점 온도 변화를 측정 한 결과, 용착점 온도 상승 기울기는 레이저 출력 1.2 kW까지는 0.01°C/W이었으며 이후 레이저 출력 증가에 대해서는 온도 상승 기울기 0.08°C/W로 용착점 온도가 급격하게 증가하였고 1.96 kW 출력에서 동작 중 광섬유 용융 현상에 의해 광섬유 증폭기가 손상되었다. 손상된 펌프 광 결합기의 전송 광섬유 코어에는 전형적인 광섬유 용융 현상에서 나타나는 탄환모양손상이 관측되었다. 이에 수냉식 냉각판을 적용하여 용착점 부위의 냉각 성능을 향상시킨 후 레이저 출력 특성 변화를 조사하였다. 펌프 광 결합기와 이득 광섬유의 용착점 온도 상승 기울기는 0.007°C/W로 유지되어 용착점 온도의 급격한 상승은 없었으며 2.05 kW 출력에서 측정된 용착점 온도는 35.8°C이었다. 최대 출력 2.05 kW에서 빔 품질은

1.28이었고 광섬유 용융 현상은 발생하지 않았다. 또한 비선형 현상인 모드 불안정성 역시 발생하지 않았으며 안정적인 가우시안 빔 프로파일을 유지하였다.

II. 고출력 광섬유 증폭기 실험

본 연구에서 수행한 고출력 광섬유 증폭기 실험 셋업은 그림 1에 나타나 있다. 광섬유 증폭기는 3단계의 주공진기 파워 증폭기(master oscillator power amplifier, MOPA)로 구성되었다. 시드 빔으로는 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating)에 의해 파장 안정화된 레이저 다이오드(LD-1064-FBG-400, Innolume)를 이용하였다. 1단, 2단 전치 증폭기는 코어/클래딩 직경 10/125 μm의 Yb첨가 광섬유(LMA-YDF-10/125-9Gen, Nufern)로 구성되었으며 펌핑 광원으로는 파장 안정화된 976 nm 펌프 레이저 다이오드를 사용하였다. 시드 빔은 2단 전치 증폭기 통과 후 30 W 수준으로 증폭되었다. 각 증폭기 사이에는 고출력 광 고립기를 위치시켜 역방향 신호로부터 전치 증폭기 손상을 보호하였으며 역방향 신호를 모니터링 하였다. 전치 증폭기에 의해 증폭된 빔은 (24+1)×1 펌프 광 결합기를 통해 주증폭기로 입사되었다. 펌프 광 결합기의 신호 입력 포트의 코어/클래딩 직경은 10/125 μm이며 신호 출력 포트의 코어/클래딩 직경은 20/400 μm이었다. 파장 안정화된 976 nm 펌프 레이저 다이오드 24개가 주증폭기 펌핑 광으로 이용되었고 주증폭기의 이득 광섬유로는 코어 클래딩 직경 20/400 μm인 비편광유지 이중클래딩 Yb첨가 광섬유(LMA-YDF-20/400-M+, Nufern)를 사용하였다.

펌프 광 결합기와 이득 광섬유의 용착 이미지는 그림 2(a)에 나타나 있으며 광섬유 용착 손실 최소화를 위해서 광섬유 절단 각도는 0.2도 이하 조건을 유지하였다. 광섬유 용착점은 냉각을 위해 수냉식 냉각판 위에 고정되었으며 그림 2(b)와 같은 형태였다. 광섬유 용착점과 수냉식 냉각판 사이의 간극을 메우기 위해 열 전도도가 5 W/m·K인 물질을 그림 2(b)와 같이 광섬유에 도포하였다. 레이저 출력에 따른 광섬유 용착점의 온도 특성을 확인하기 위해서 그림 1과 같이 열화상 카메라(T650SC, FLIR)를 이용하여 광섬유 용착점 온도를 실시간으로 모니터링하였다. 고출력 광섬유 증폭기에서 발생하는 모드 불안정성을 효율적으로 억제하기 위해서 이득 광섬유는 직경 100 mm의 수냉식 원통에 코일링되었다¹⁷.

먼저 펌프 파워 증가에 따른 레이저 출력 파워와 용착점

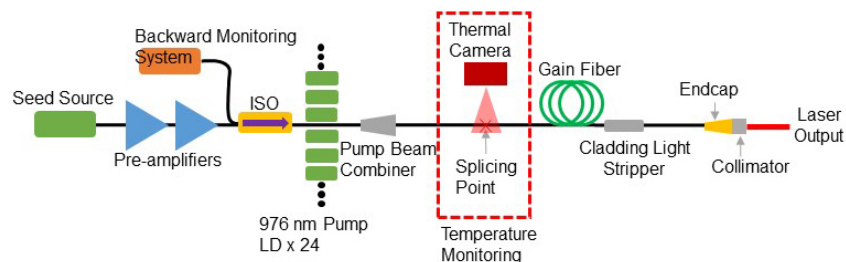


Fig. 1. Experimental setup of the high-power fiber amplifier.

온도를 측정했다. 그림 3(a)에 나타나 있듯이 레이저 출력은 펌프 파워에 따라 선형적으로 증가했으며 기울기 효율은 83.4%이었다. 레이저 출력은 수냉식 10 kW급 파워미터 (10K-W-BB-45, Ophir)에 의해 측정되었으며 모드 불안정성의 징조로 나타나는 출력 롤오버(roll over) 현상은 관찰되지 않았다^[18]. 레이저 출력에 따라 측정된 용착점 온도는 그림 3(b)에 나타나 있으며 수냉식 냉각판에 입력되는 냉각수 온도는 20°C이었다. 레이저 출력 1.2 kW까지 용착점 온도는

20°C에서 33°C까지 온도 상승 기울기 0.01°C/W로 증가했으며 레이저 출력 1.2 kW부터 1.5 kW까지는 33°C에서 62°C까지 온도 상승 기울기 0.08°C/W로 증가하였다. 온도 상승 기울기가 증가한 이유는 그림 2(b)의 구조에서는 광섬유와 냉각 플레이트의 접점이 하나이기 때문에 광섬유 용착점에서 발생하는 열을 냉각시키기에 충분하지 않았던 것으로 추정된다. 광섬유가 접촉된 지점에서 최대 방출시킬 수 있는 발열량 이상으로 열이 발생할 경우 온도 상승 기울기가 증가할

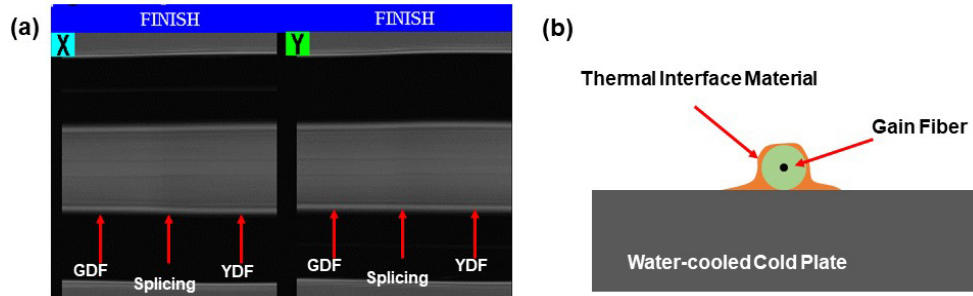


Fig. 2. (a) Image of the splicing point between the pump-signal combiner and the gain fiber. (b) Schematic of contact between the gain fiber and the water-cooled cold plate.

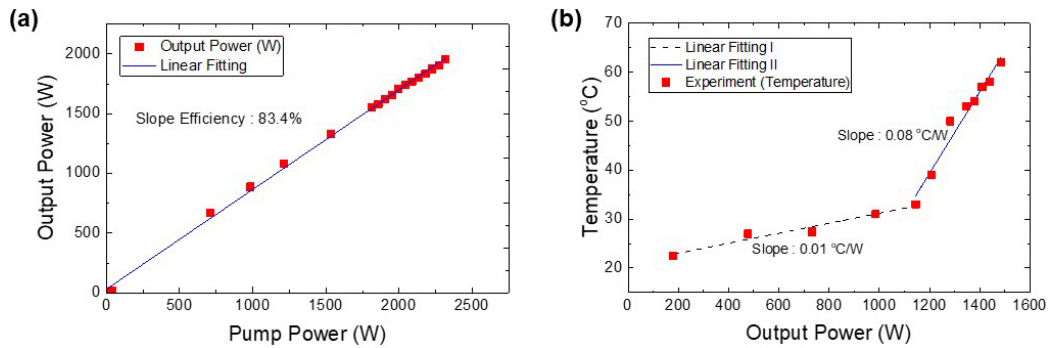


Fig. 3. (a) Measured output power as a function of pump power. (b) Measured temperature of the splicing point between the pump-signal combiner and the gain fiber as a function of output power.

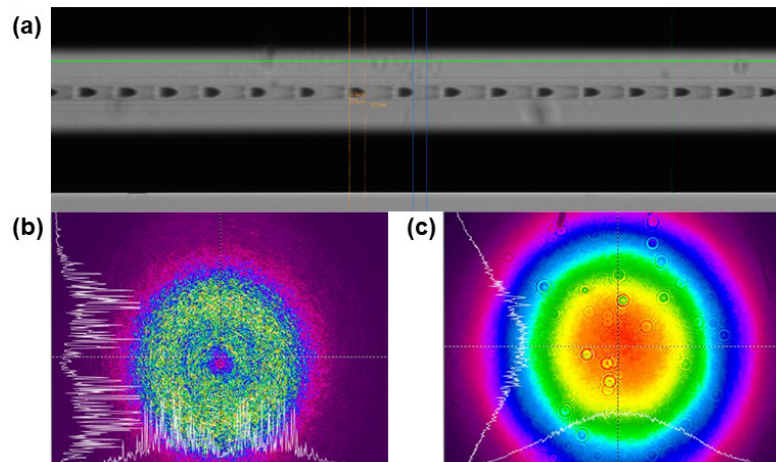


Fig. 4. (a) Observed bullet shape in the passive fiber core. (b) Beam profile after propagating the damaged passive fiber. (c) Beam profile after propagating the normal passive fiber.

수 있다⁷⁾.

이후 레이저 출력은 1.96 kW까지 증폭되었으며 동작 중 광섬유 용융 현상에 의해 광섬유 증폭기는 손상되었다. 펌프 광 결합기와 이득 광섬유 사이의 용착점부터 펌프 광 결합기 사이의 광섬유 코어가 손상됐으며 광섬유 용융의 전형적인 탄환모양손상 형상이 그림 4(a)처럼 광섬유 코어에 나타났다¹³⁻¹⁵⁾. 그림 4(b)는 광섬유 용융 현상에 의해 손상된 광섬유 통과 후 측정된 빔 프로파일을 나타내고 있다.

광섬유 코어 부분이 손상됐기 때문에 도넛 모양의 프로파일 일이 측정됨을 확인할 수 있다. 비교를 위해 정상적인 광섬유 통과 후 빔 프로파일러(SP501, Ophir)에 의해 측정된 빔 프로파일을 그림 4(c)에 나타냈으며 가우시안 모양의 빔 프로파일을 확인할 수 있다. 광섬유 용융의 원인은 먼지, 온도 상승 등의 다양한 원인이 있지만 본 연구에서는 온도 상승에 의한 실리카 광섬유의 흡수 증가가 광섬유 용융의 원인으로 추정된다^{10,16)}. 용착 포인트의 온도 상승 기울기가 0.01°C/W에서 0.08°C/W로 변하면서 실리카 광섬유의 흡수가 급격하게 증가했을 것으로 판단된다¹⁰⁾. 본 연구에서는 쿼츠 헤드

블록(quartz head block) 타입의 수냉식 엔드캡과 상용 시준기(2-9670X01, Optoskand)를 사용했기 때문에 광섬유 끝 단 반사나 먼지는 광섬유 용융의 원인으로 고려하지 않았다. 광섬유 엔드캡은 광섬유 용융 현상 이후에 손상되지 않았고 광섬유 용융 현상이 일어난 시작점은 광섬유 끝단이 아니라 온도가 가장 높은 펌프 광 결합기와 이득 광섬유 사이의 용착점이었기 때문이다.

펌프 광 결합기와 이득 광섬유는 새로 교체했으며 절단 각도 0.2도 이하로 이득 광섬유를 용착하였다. 광섬유 용착 결과는 그림 5(a)에 나타나 있으며 그림 2(a)와 유사한 수준이었다. 기존의 한 면만 냉각 플레이트 접촉되어 냉각되는 것보다 냉각 성능을 향상시키기 위해서 그림 5(b)와 같이 넓이 및 깊이 1 mm인 홈에 광섬유 용착점을 위치시켰다. 또한 광섬유 접촉 형태에 따른 냉각 성능 차이를 분석하기 위해서 그림 2(b)와 5(b) 구조를 유한요소해석 소프트웨어(COMSOL Multiphysics)를 활용하여 이득 광섬유의 온도 변화를 분석하였다. 그림 6(a)와 6(b)는 냉각 플레이트에 위치한 광섬유와 메시 구조를 각각 나타내고 있다. 광섬유 코어 20 μm에서

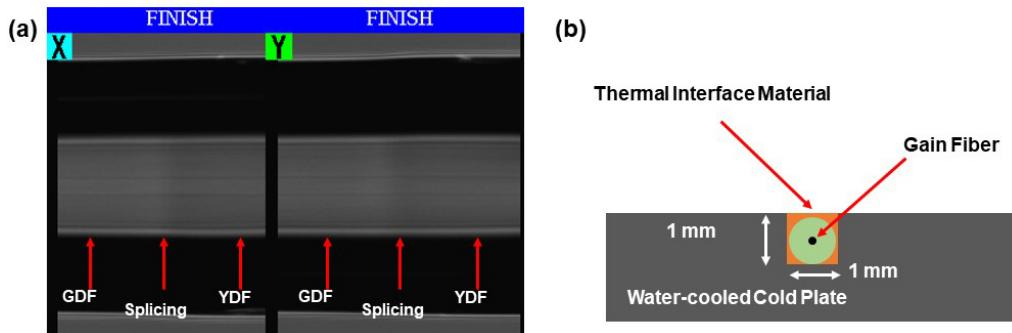


Fig. 5. (a) Image of the splicing point between the pump-signal combiner and the gain fiber. (b) Schematic of contact between the gain fiber and the water-cooled cold plate.

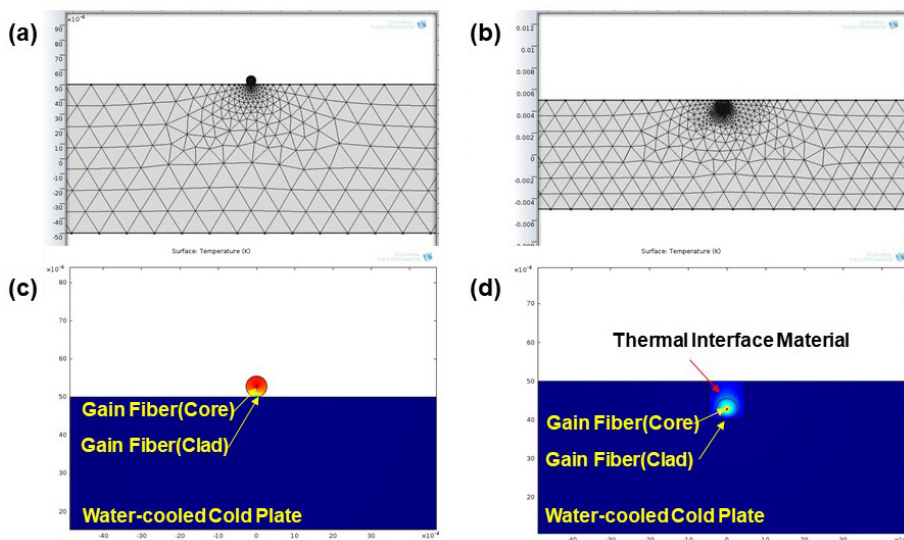


Fig. 6. (a, b) Schematic and mesh-configuration of the contact between the gain fiber and the water-cooled cold plate. (c, d) Numerical simulation results of the contact between the gain fiber and the water-cooled cold plate.

열이 발생한다고 가정했으며 열전도 물질은 $5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 로 실제 실험과 동일하게 적용하였다. 그림 6(c)와 6(d)는 광섬유 접촉 형태에 따른 시뮬레이션 결과를 각각 나타내고 있으며 냉각판에 광섬유가 한 점만 접촉됐을 때보다 1 mm인 홈에 광섬유를 위치시킨 후 열전도 물질로 도포한 결과가 2배 이상의 냉각 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 이는 열전도도가 높은 냉각 플레이트와 이득 광섬유의 접촉 포인트가 하나에서 셋으로 증가됐기 때문으로 판단된다⁷⁾.

냉각 성능 향상 및 이에 따른 레이저 출력 증가를 확인하기 위해서 펌프 파워에 따라 레이저 출력과 융착점 온도를 측정했다. 그림 7(a)는 펌프 파워 증가에 따른 레이저 출력을 나타내고 있다. 레이저 출력은 최대 2.05 kW까지 선형적으로 증가하였으며 기울기 효율은 81.8%이었다. 그림 7(b)는 레이저 출력에 따른 펌프 광 결합기와 이득 광섬유 사이의 융착점 온도를 나타내고 있으며 온도 상승 기울기는 $0.007 \text{ }^\circ\text{C/W}$ 의 낮은 값으로 일정하게 유지되어 최대 출력 2.05 kW

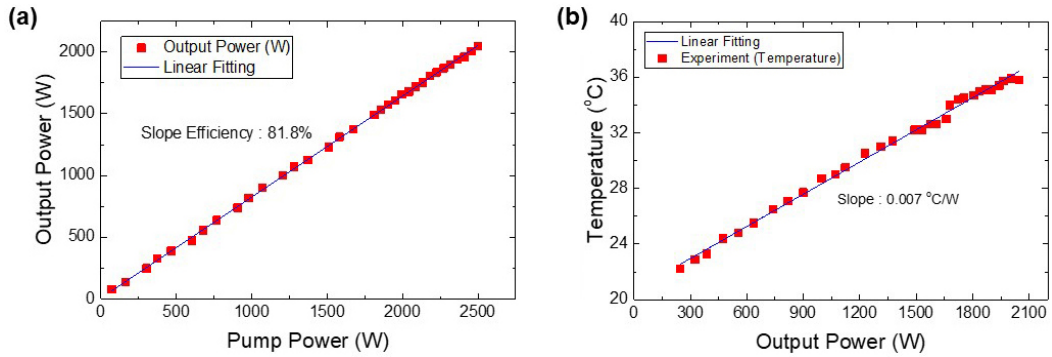


Fig. 7. (a) Measured output power as a function of pump power. (b) Measured temperature of the splicing point between the pump-signal combiner and the gain fiber as a function of output power.

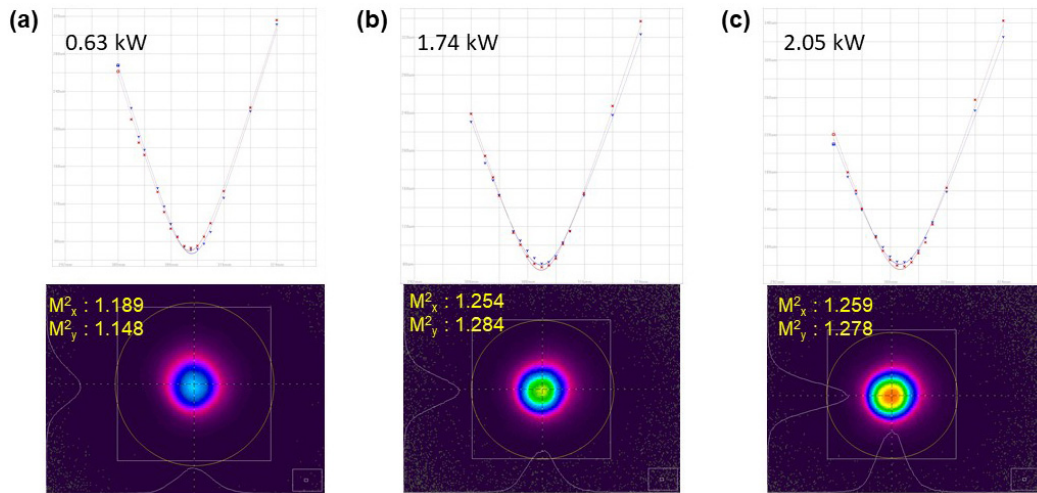


Fig. 8. (a) Measured output beam characteristics as a function of output power. (a) 0.63 kW. (b) 1.74 kW. (c) 2.05 kW.

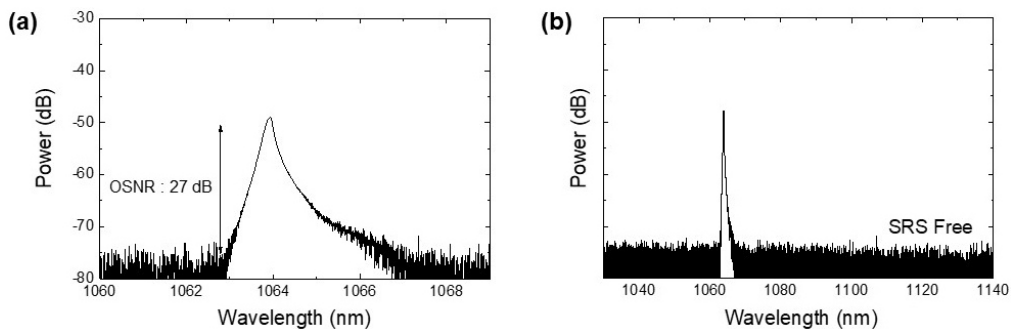


Fig. 9. Measured output spectrum at the maximum output power. (a) Narrow span. (b) Wide span.

에서도 35.8°C에 불과하여 그림 3(b)와 같이 온도가 급격히 증가하는 현상은 없음을 확인할 수 있다. 최대 출력에서 광섬유 용융 현상은 발생하지 않았으며 안정적으로 동작하였다. 레이저 출력에 따라 빔 품질과 빔 프로파일을 측정했으며 그림 8에 나타나 있다. 빔 품질은 모든 출력 범위에서 1.3 이하로 회절 한계에 가깝고 안정적인 가우시안 형태임을 확인할 수 있다.

그림 9는 최대 출력 2.05 kW에서 측정한 순방향 광 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림 9(a)에 나타나 있듯이 광-신호 잡음비는 27 dB 이상이었으며 3-dB 파장 대역폭은 0.24 nm 이었고 중심 파장은 1064 nm이었다. 그림 9(b)는 1030~1140 nm의 넓은 영역에서 측정한 광 스펙트럼을 나타내고 있다. 1120 nm 대역에서 유도 라만 산란 현상은 관찰되지 않았다.

III. 결 론

본 연구에서는 2 kW급 광섬유 증폭기에서 발생한 광섬유 용융 현상을 용착점 냉각 특성에 따라 실험적으로 분석하였다. 펌프 광 결합기와 이득 광섬유 사이의 용착점 온도를 레이저 출력에 따라 측정했으며 냉각 특성에 따른 온도 상승 기울기를 분석하였다. 레이저 출력 1.2 kW까지는 온도 상승 기울기 0.01°C/W로 용착점 온도는 20°C에서 33°C까지 상승하였으며 레이저 출력 1.2 kW 이후부터는 온도 상승 기울기 0.08°C/W로 용착점 온도가 급격히 증가하였다. 광섬유 증폭기는 1.96 kW에서 광섬유 용융 현상에 의해 손상되었으며 광섬유 용융의 전형적인 탄환모양손상 형상이 광섬유 코어에 나타났다. 광섬유 용착점 냉각 성능 개선 후 출력 2.05 kW를 달성할 수 있었으며 온도 상승 기울기는 0.007°C/W로 급격한 상승 없이 일정하게 유지되었다. 레이저 출력 2.05 kW에서 광섬유 용착점 온도는 35.8°C였으며 광섬유 용융 현상은 발생하지 않았다. 최대 출력에서 빔 품질은 1.28로 회절 한계에 가까웠으며 모드 불안정성은 발생하지 않았다. 본 연구를 통해 고출력 광섬유 증폭기 구현을 위해서는 광섬유 용착점 냉각 성능과 온도 상승 기울기 분석이 중요함을 확인할 수 있었다. 본 연구 결과는 2 kW급 이상의 고출력 광섬유 레이저 및 증폭기 연구에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. 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).
2. C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tünnermann, "High-power fiber lasers," *Nat. Photon.* **7**, 861-867 (2013).
3. M. N. Zervas and C. A. Codemard, "High power fiber lasers: a review," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **20**, 0904123 (2014).
4. A. Liu, "Stimulated Brillouin scattering in single-frequency fiber amplifiers with delivery fibers," *Opt. Express* **17**, 15201-15209 (2009).
5. G. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, Cambridge, US, 2012).
6. T. Eidam, C. Wirth, C. Jauregui, F. Stutzki, F. Jansen, H.-J. Otto, O. Schmidt, T. Schreiber, J. Limpert, and A. Tünnermann, "Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers," *Opt. Express* **19**, 13218-13224 (2011).
7. Y. Fan, B. He, J. Zhou, J. Zheng, H. Liu, Y. Wei, J. Dong, and Q. Lou, "Thermal effects in kilowatt all-fiber MOPA," *Opt. Express* **19**, 15162-15172 (2011).
8. Z. Huang, T. Y. Ng, C. P. Seah, S. H. T. Lim, and R. F. Wu, "Thermal modeling of active fiber and splice points in high power fiber laser," *Proc. SPIE* **7914**, 79142W (2011).
9. R. Kashyap and K. J. Blow, "Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibres," *Electron. Lett.* **24**, 47-49 (1988).
10. Y. Shuto, S. Yanagi, S. Asakawa, M. Kobayashi, and R. Nagase, "Evaluation of high-temperature absorption coefficients of optical fibers," *IEEE Photonics Technol. Lett.* **16**, 1008-1010 (2004).
11. E. M. Dianov, I. A. Bufetov, and A. A. Frolov, "Destruction of silica fiber cladding by the fuse effect," *Opt. Lett.* **29**, 1852-1854 (2004).
12. J. Wang, S. Gray, D. Walton, and L. Zenteno, "Fiber fuse in high power optical fiber," *Proc. SPIE* **7134**, 71342E (2008).
13. H. Zhang, P. Zhou, X. Wang, H. Xiao, and X. Xu, "Fiber fuse effect in high-power double-clad fiber laser," in *Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim* (Kyoto, Japan, Jun. 2013), paper WPD-4.
14. J.-Y. Sun, Q.-R. Xiao, D. Li, X.-J. Wang, H.-T. Zhang, M.-L. Gong, and P. Yang, "Fiber fuse behavior in kW-level continuous-wave double-clad field laser," *Chin. Phys. B* **25**, 014202 (2015).
15. Q.-R. Xiao, J.-D. Tian, Y.-S. Huang, X.-J. Wang, Z.-H. Wang, D. Li, P. Yan, and M.-L. Gong, "Internal features of fiber fuse in a Yb-doped double-clad fiber at 3 kW," *Chin. Phys. Lett.* **35**, 054201 (2018).
16. Q. Xiao, J. Tian, P. Yan, D. Li, and M. Gong, "Exploring the initiation of fiber fuse," *Sci. Rep.* **9**, 11655 (2019).
17. 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).
18. 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).