

Polarization-maintained Single-mode 400-W Yb-doped Fiber Laser with 2.5-GHz Linewidth from a 3-stage MOPA System

Young Ho Park^{1†}, Young Seok Youn¹, Min Wan Jung², Changsu Jun³, Bong-Ahn Yu³, and Woojin Shin³

¹Hanwha Systems, 491-23, Gyeonggidong-ro, Namsa-myeon, Cheoin-gu, Yongin 17121, Korea

²Hanwha, 305, Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam 13488, Korea

³Advanced Photonics Research Institute, GIST, 123, Cheomdangwagi-ro, Buk-gu, Gwangju 61005, Korea

(Received June 4, 2018; Revised June 25, 2018; Accepted June 25, 2018)

In this paper, we report on the high power amplification of a narrow-linewidth Yb-doped polarization-maintained (PM) fiber laser in a 3-stage, all-fiber master oscillator power amplifier (MOPA) system. The linearly polarized single-mode output power was 400 W with an 85% slope efficiency, with a linewidth of 2.5 GHz (full width at half maximum). Furthermore, mitigation of mode instability (MI) has been demonstrated by tightly coiling the gain fiber to a diameter of 11 cm. In addition, methods for higher power scaling are discussed.

Keywords: Stimulated Brillouin scattering, Mode instability, Fiber amplifier
OCIS codes: (140.3510) Lasers, fiber; (140.3280) Laser amplifiers

3단 MOPA 시스템에서 2.5 GHz 선폭을 가지는 편광유지 단일모드 400 W 이터블 첨가 광섬유 레이저 연구

박영호^{1†} · 윤영석¹ · 정민완² · 전창수³ · 유봉안³ · 신우진³

¹한화시스템 용인종합연구소

Ⓞ 17121 경기도 용인시 처인구 남사면 경기동로 491-23

²한화 종합연구소

Ⓞ 13488 경기도 성남시 분당구 판교로 305

³광주과학기술원 고등광기술연구소

Ⓞ 61005 광주광역시 북구 첨단과기로 123

(2018년 6월 4일 받음, 2018년 6월 25일 수정본 받음, 2018년 6월 25일 게재 확정)

본 논문에서는 3단으로 구성된 전광섬유(all-fiber) Master Oscillator Power Amplifier (MOPA) 구조의 협대역 이터블 첨가 편광유지 광섬유 레이저 증폭에 대해 보고한다. 편광유지 단일모드 출력은 85%의 기울기 효율을 가지는 400 W 출력을 얻을 수 있었고, 레이저 반치폭은 2.5 GHz였다. 더불어, 이득매질 광섬유를 11 cm 지름으로 코일링하여 모드 불안정성을 완화할 수 있었다. 추가적으로 레이저 출력 증가를 위한 방법들에 대해 논하였다.

Keywords: 유도 브릴루앙 산란, 모드 불안정성, 광섬유 증폭기
OCIS codes: (140.3510) Lasers, fiber; (140.3280) Laser amplifiers

[†]E-mail: youngho76.park@hanwha.com, ORCID: 0000-0002-1340-0359

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

I. 서 론

단일모드 편광유지 고출력 광섬유 증폭기에 관한 연구는 전 세계적으로 비선형 파장 변환 및 레이저 빔결합의 효율 증대를 목적으로 활발하게 진행되고 있다. 이 가운데 최적인 계에 가까운 빔품질을 갖는 광섬유 레이저의 고출력화는 광섬유 내에 발생하는 유도 브릴루앙 산란(stimulated Brillouin scattering, SBS) 비선형현상 및 모드 불안정성(mode instability, MI) 등의 제한적 요소들에 의해 수 kW 수준으로 제한된다. 이와 관련하여 여러 실험적 및 이론적 연구들에서 광섬유 내에서 발생하는 SBS 비선형 현상 억제 및 모드 불안정성 경감에 관해서 발표하고 있다. 광섬유 레이저의 출력 한계를 극복하기 위한 SBS 비선형 현상 억제 방법에 관해서는, 광섬유 길이 방향에 대해 불균일한 굴절을 변화시켜 브릴루앙 이득을 줄이는 방법^[1-5], 넓은 시드 선폭을 적용하여 브릴루앙 이득을 줄이는 방법^[6-11], 온도 구배나 장력 분포를 통해 브릴루앙 이득을 줄이는 방법^[12,13], 광섬유 코어 크기를 증가시켜 비선형 현상 발생 문턱 값을 높이는 방법, 이온 도핑농도를 높임으로써 요구되는 광섬유 길이를 최소화하는 방법 등이 연구되었다. 본 연구에서는 협대역 시드(수 MHz)를 사용하고, PRBS (Pseudo Random Binary Sequence) 위상변조 방식을 적용하여 레이저 선폭을 수 GHz로 넓혀서 SBS 비선형 현상이 억제되도록 하였다.

또한 모드 불안정성(MI) 발생 문턱을 높이기 위한 방법으로는, 횡 모드 개수가 최소가 되도록 코어 직경을 최소화한 대구경 광섬유를 적용하는 방법, 코일링을 통해 고차모드 발생을 억제하는 방법^[14-16], 이온 도핑농도를 높인 이득 광섬유를 적용하는 방법^[17-21]이 연구되었다. 본 연구에서는 코일링 지름에 따른 모드 불안정성 발생 경향을 확인한 후, 코일링 지름을 조정하여 신호광 출력을 증가시킬 수 있었다.

특히 편광유지 광섬유에서는 무편광 광섬유에 비해 협대역 고출력 발진 시, SBS와 MI 발생 문턱 값이 낮아 출력을 증

대하기 어려운데, 본 연구에서는 상용 편광유지 25/400 μm 대구경 광섬유를 사용하고 위와 같은 비선형 현상 억제 방법을 적용하여, 2.5 GHz 유효 선폭을 가지는 400 W급 연속발진 출력을 얻을 수 있었다. 또한 시드레이저, 전치증폭기 및 주증폭기로 구성된 최소한의 구조로 이루어진 3단 MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) 시스템으로써, 고출력 협대역 광섬유 레이저를 매우 간소화할 수 있었다.

II. 실험 방법 및 결과

본 연구에서는 실험에 앞서 상용 RP Fiber Power 소프트웨어를 활용하여 1064 nm 대역의 이터븀 광섬유 레이저의 증폭단 구성, 증폭단 광섬유 길이, 코어직경, 펌프광 대비 출력광 변환효율 등 레이저 발진을 위한 주요 변수들을 전산모사하였다. 이를 통해 증폭기 구성은 시드레이저, 전치증폭단, 그리고 주증폭단으로 구성된 3단 전광섬유(all-fiber) MOPA 구조를 채택하였다.

그림 1은 전치증폭단에 대한 전산모사 결과를 나타낸다. 상용 RP Fiber Power 소프트웨어를 이용하여 전산모사를 수행하였다. 편광유지 10/125 μm 이중 클래드 이터븀 첨가 광섬유 약 6 m에 976 nm 파장의 펌프광 8.5 W를 넣을 경우, 광섬유 길이 대비 증폭된 신호광 세기, 펌프광 세기 대비 증폭된 신호광 세기를 나타내는 전산모사 결과이다. 전치증폭단에서 8.5 W의 펌프광에 대해 약 6.5 W의 신호광 출력을 얻을 수 있다. 이 때, 입사된 신호광 세기는 50 mW, 이득매질 광섬유 손실은 0.15 dB/m, 976 nm에서 이득매질의 펌프광 흡수율은 7.4 dB/m로 계산하였다.

이어서 주증폭단에 대한 전산모사를 수행하였다. 그림 2는 코어/클래드 직경이 25/400 μm 인 편광유지 이중 클래드 이터븀 첨가 이득매질 광섬유를 적용한 주증폭단에 대한 전산모사 결과이다. 광섬유 길이 대비 증폭된 신호광 세기, 펌프광 세기, 밀도반전 변화, 펌프광 세기 대비 증폭된 신호광 세기

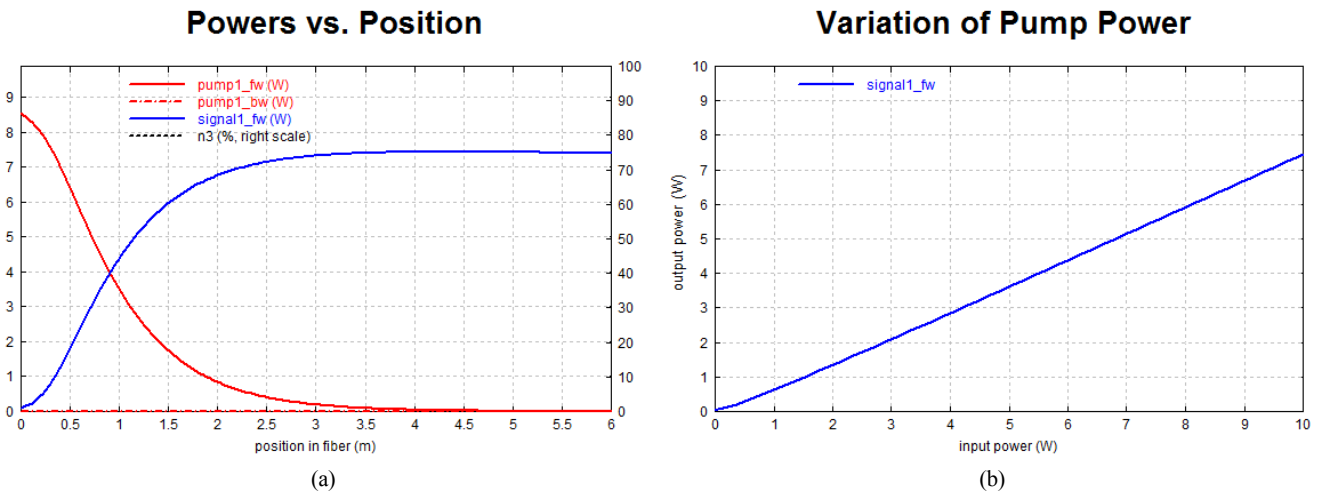


Fig. 1. Numerical simulation results of (a) Amplified signal power versus fiber length and (b) Amplified signal power versus pump power in PM Yb doped DCF (10/125 μm) laser using RP Fiber Power software.

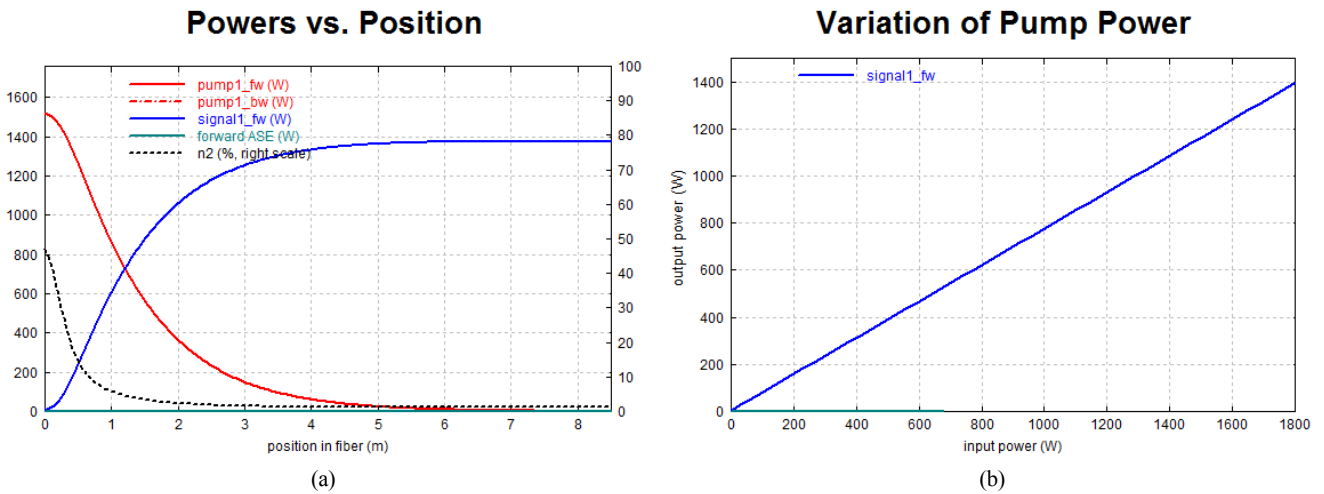


Fig. 2. Numerical simulation results of (a) Amplified signal power versus fiber length and (b) Amplified signal power versus pump power in PM Yb doped DCF (25/400 μm) laser using RP Fiber Power software.

등을 나타낸다. 광섬유 길이 8.5 m에 976 nm 파장 펌프광을 정방향으로 1.5 kW 이상 펌프할 때, 소자 손실들을 감안하더라도 1.1 kW 이상의 신호광 출력을 얻을 수 있다. 이 때, 입사된 신호광 세기는 4.5 W, 이득매질 광섬유 손실은 0.15 dB/m, 976 nm에서 이득매질의 펌프광 흡수율은 3 dB/m로 계산하였다. 이와 같은 전산모사에서는 신호광 입사세기 및 펌프광 세기만을 고려했을 때, 증폭된 출력세기를 얻은 결과로서, 레이저 선폭, 광섬유 편광비, 코일링 손실, 모드 불안정성, SBS 비선형 현상 등의 특수한 변수들의 영향은 별개의 독립적인 계산을 통해 확인하거나, 실험을 통해 확인한다.

기존의 많은 협대역 고출력 광섬유 레이저는 4~6단 MOPA 구성을 가지고 있는데, 대부분 낮은 출력의 시드빔 레이저를 사용하면서 전치증폭단까지 여러 단의 증폭기를 사용한다. 본 연구에서는 100 mW급 시드빔 레이저를 사용하고, 1단의 전치증폭만으로 4~10 W급의 출력을 얻을 수 있음을 확인한 후, 최소한의 구성인 3단 MOPA 시스템을 구현하여 레이저 시스템을 간소화하였다.

전산모사를 반영한 본 실험의 단일모드 편광유지 광섬유 레이저 증폭기 구성은 그림 3과 같이 주발진기 역할을 하는 시드빔 레이저와 2단의 증폭기로 이루어져 있다. 시드빔 레이저는 중심파장 1063.5 nm, 선폭 ~10 MHz의 DFB (Distributed Feedback) LD (Laser Diode)를 사용하였다. 단일 주파수에

가까운 좁은 선폭의 레이저광을 고출력으로 증폭할 경우, 실리카 광섬유의 경우 일반적으로 약 16 GHz 정도 장파장으로 천이된 SBS 비선형 신호가 발생한다. 이런 비선형 현상은 원하는 신호광의 증폭을 방해하여 출력 효율을 떨어뜨리는 주요 원인이 된다. Pseudo Random Binary Sequence (PRBS) 위상변조방식은 이를 가장 효과적으로 억제할 수 있는 방법으로서^[6,7] 본 연구에서도 이를 적용하였다. PRBS 위상변조기는 입사광 중심 주파수에 특정 간격의 주변모드(side-mode) 주파수를 생성하는 방식으로 시드빔 레이저의 ~MHz급 좁은 선폭을 GHz 영역으로 넓히는 역할을 한다. 변조 주파수는 Voltage Controlled Oscillator (VCO)로 조절하는데, 1~6 GHz 범위 내에서 조절하였다. PRBS 위상변조기 다음에는 광고립기(optical isolator)와 시드빔 파장, 선폭, 출력 등을 모니터링하기 위한 99:1 광섬유 빔분할기(tap coupler)를 연결하였다.

전치증폭기는 편광유지 10/125 μm 이중 클래드 이터븀 첨가 이득매질 광섬유(Nuferm PLMA-YDF-10/125-M) 6 m로 구성되었으며, 최대 25 W 수준의 파장고정형 976 nm LD로 펌핑하여 신호광을 증폭하도록 하였다. 증폭 후 남은 펌프광은 펌프광 제거기를 통하여 제거된다. 이후에는 2x2 타입 99:1 비율의 빔분할기를 연결하여 순방향 신호광과 주증폭기로 부터 되돌아오는 역방향 SBS 비선형신호 혹은 ASE (amplified spontaneous emission) 신호를 동시에 모니터링 하도록 하였다.

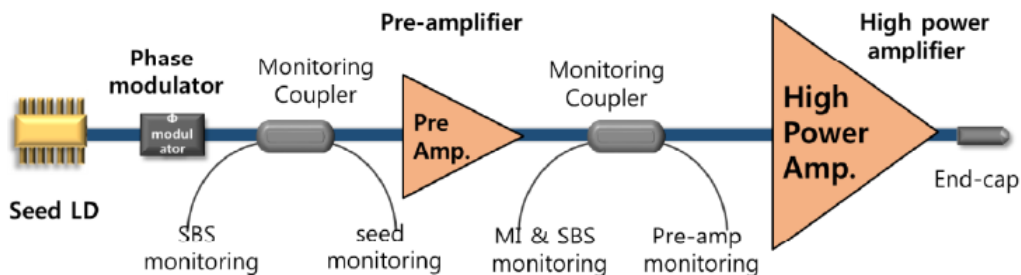


Fig. 3. Experimental setup for narrow linewidth high power fiber laser with a 3-stage MOPA system (seed laser, pre-amplifier, main-amplifier).

주증폭기는 편광유지 25/400 μm 이중 클래드 이터븀 첨가 이득매질 광섬유(Nuferm PLMA-YDF-25/400-M) ~8 m로 구성하여 이득매질에서 펌프 흡수율이 18 dB 이상 되도록 하였다. 펌핑은 100 W급 976 nm 펌프 LD를 (18+1)×1 펌프 광 결합기를 통해 연결함으로써, 최대 1.8 kW급까지 확장할 수 있도록 하였다. 이때 발생하는 다량의 열을 효과적으로 배출할 수 있도록 그림 4와 같이 펌프 LD 모듈 기구부 및 주증폭기 기구부에 대한 열해석(ANSYS ICEPAK)을 통하여 최대온도가 35°C를 넘지 않도록 냉각 기구부 규격 및 수냉 변수를 설정 및 제작하였다. 그리고 전치증폭기와 주증폭기 사이에도 광고립기 및 모니터링 할 수 있는 빔결합기를 통해 모드 불안정성 및 SBS 비선형 현상 발생을 실험적으로 관측하였다.

이터븀 첨가 이득매질 광섬유의 코일링 가이드 및 방열판은 깊이가 >0.6 mm인 원형 그루브(groove)로 되어 있고, 이러한 그루브의 지름이 15 cm에서 10 cm까지 나선형으로 새겨진 구리판을 우선적으로 사용하였다. 광섬유 부품 간 용착접속(splicing) 후, 이득매질 광섬유를 열전도물질(thermal interface material, TIM)이 도포된 원형 그루브를 따라 감고, 구리테이프를 뒷면에 부착하여 사방으로 열전도가 균일하게 일어나

고 동시에 감긴 광섬유를 고정하도록 하였다.

그림 5는 시드빔 레이저 및 전치 증폭기의 출력 특성을 나타낸다. 시드빔 레이저는 1063.5 nm 파장, ~10 MHz 선폭의 DFB LD를 사용하였고, 뒤따르는 위상변조기의 손상 문턱값으로 인해 100 mW 이하의 출력 값을 가지는 모델을 사용하였다. 이 신호광은 PRBS 위상 변조기에서 선폭 ~2.5 GHz 정도로 넓혀진 후에 전치증폭기로 입사된다. 선폭 측정결과는 그림 7에서 자세히 설명한다. 부품 손실 후 전치증폭기로 입사하는 시드빔 세기는 47 mW이다. 전치증폭기에서는 4~10 W급 출력으로 증폭된 후 주증폭기로 입사하게 되는데, 전치증폭기 출력 값에 따라 미미한 ASE 차이는 있지만 전체적인 증폭 효율에 큰 영향을 미치지 않으므로 전치증폭기 증폭 후 신호광 출력이 4 W 이상이면 최종 출력에 크게 영향을 미치지 않는다. 본 실험에서는 4.4 W 출력이 주증폭기로 입사하였다.

그림 6은 주증폭기에서 편광유지 25/400 μm 광섬유를 나선형 방열판에 코일링 한 경우, 펌프출력 증가에 따른 신호광 출력 결과이다. MI 발생에 의해 100 W 근방부터 기울기 효율이 감소하고, 빔 모양이 고차모드 및 기본모드가 불규칙하게 발진되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 주증폭기 펌프

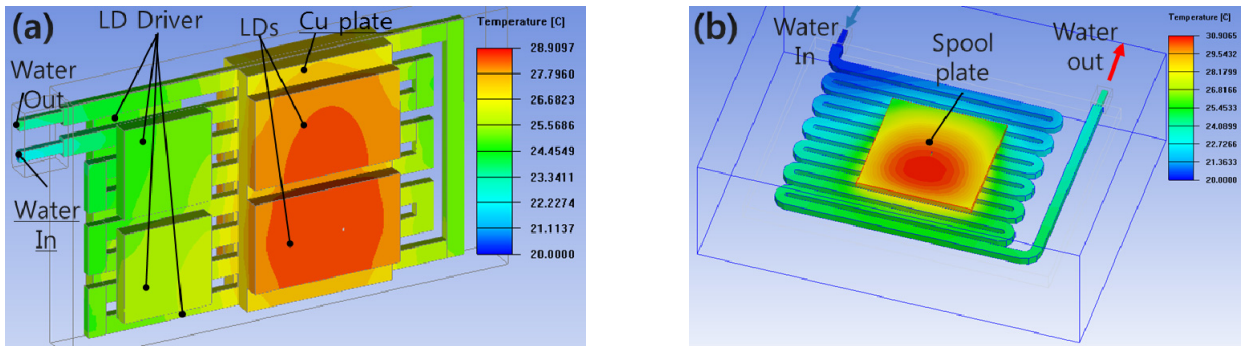


Fig. 4. Thermal analysis results of (a) pump LD part and (b) main-amplifier part using ANSYS ICEPAK tool.

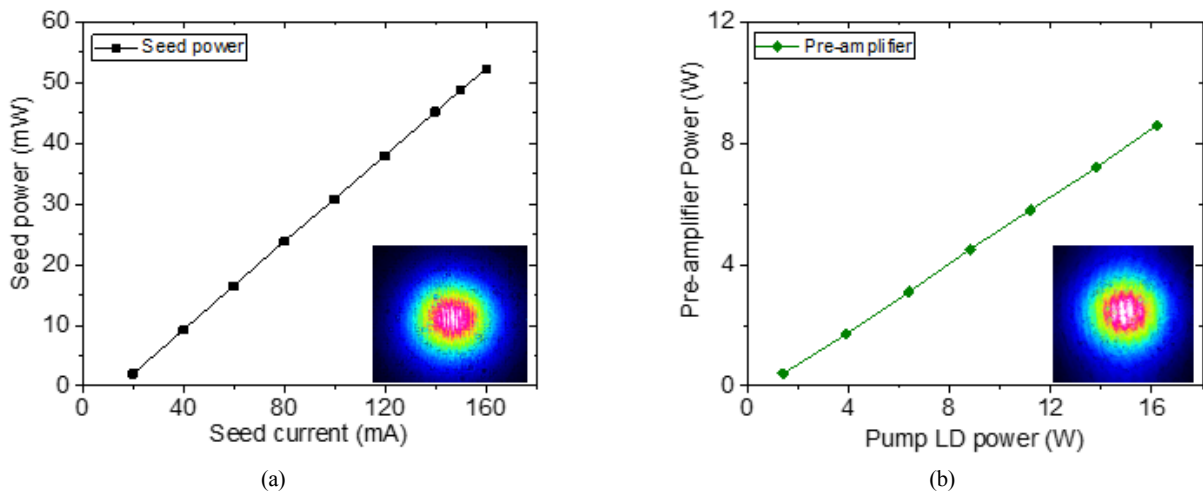


Fig. 5. Experimental results of (a) seed power and beam shape depending on the seed current and (b) output signal power and beam shape depending on the pump power in pre-amplifier.

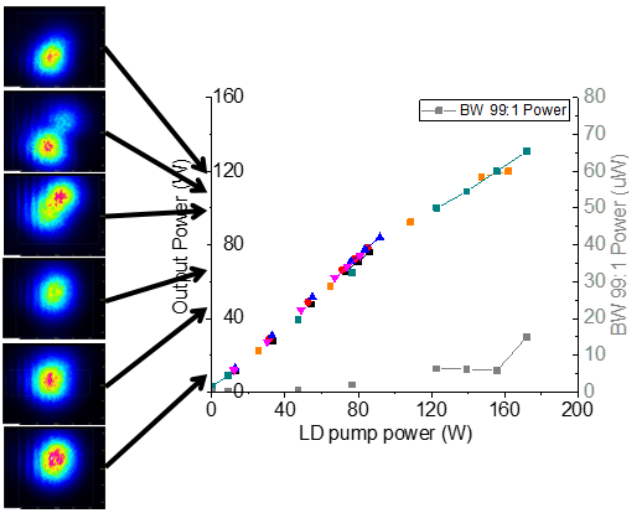


Fig. 6. Output result of PM Yb doped DCF (25/400 um) at a spinal design with diameter coil from 15 cm to 11 cm: It shows degradation of output signal power and laser beam shapes near to 100 Watt due to mode instability.

광 제거기 온도 상승 및 역 방향으로 산란되는 신호광 세기가 증가하는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 앞서 보고된 경향들과 일치하고^[22,23], 발생한 고차모드가 펌프광 제거기를

통해 빠져나가면서 온도를 높이고 레일리 산란 정도를 높이기 때문에 발생한다. 이러한 결과는 SBS에 의한 영향과 분명히 구별되어야 하며, 그림 7의 레이저 시스템 구조로 변경 후 400 W 출력까지 얻은 결과를 통해 이를 확인할 수 있다. 즉, 400 W 출력까지 얻은 경우의 파장인 그림 7(c)를 보면, 신호광 파장을 비대칭으로 만드는 SBS 파장이 매우 작은 세기로 오른쪽에 존재한다. SBS 효과가 클 경우에는, 이러한 SBS 파장 세기가 신호광 세기보다 약 10 dB 이상까지 커지게 되는데, 400 W 출력에서의 SBS 파장의 세기는 매우 낮게 관측되었으며, 100 W급 출력에서는 SBS는 발생하지 않는다. 또한 PM 25/400 um 광섬유의 경우 SBS는 최소 수백 Watt 이상에서 발생하는 것으로 보고되었다^[22,23].

앞서 MI 발생 경향은 주증폭기 이득매질 광섬유 코일링 지름을 나선형에서 약 11 cm 지름으로 변경하여 원통형 방열 기구부에 코일링 함으로써 완화할 수 있었다. 즉 코일링 반경을 작게 유지함으로써 고차모드 손실을 크게 하여 단일 모드 조건에 더욱 가깝게 함으로써, MI 발진 경향을 억제할 수 있다. 그림 7은 주증폭기 편광유지 25/400 um 이터븀 광섬유의 코일링 후 출력결과를 보여준다. 먼저 그림 7(a)는 주증폭단 이후에서 scanning Fabry-Perot Interferometer (s-FPI) 장비(Thorlabs SA210-8B)를 이용하여 측정한 신호광 선폭 결과이다. PRBS 위상변조기 동작 전(붉은색)에는 신호광 선

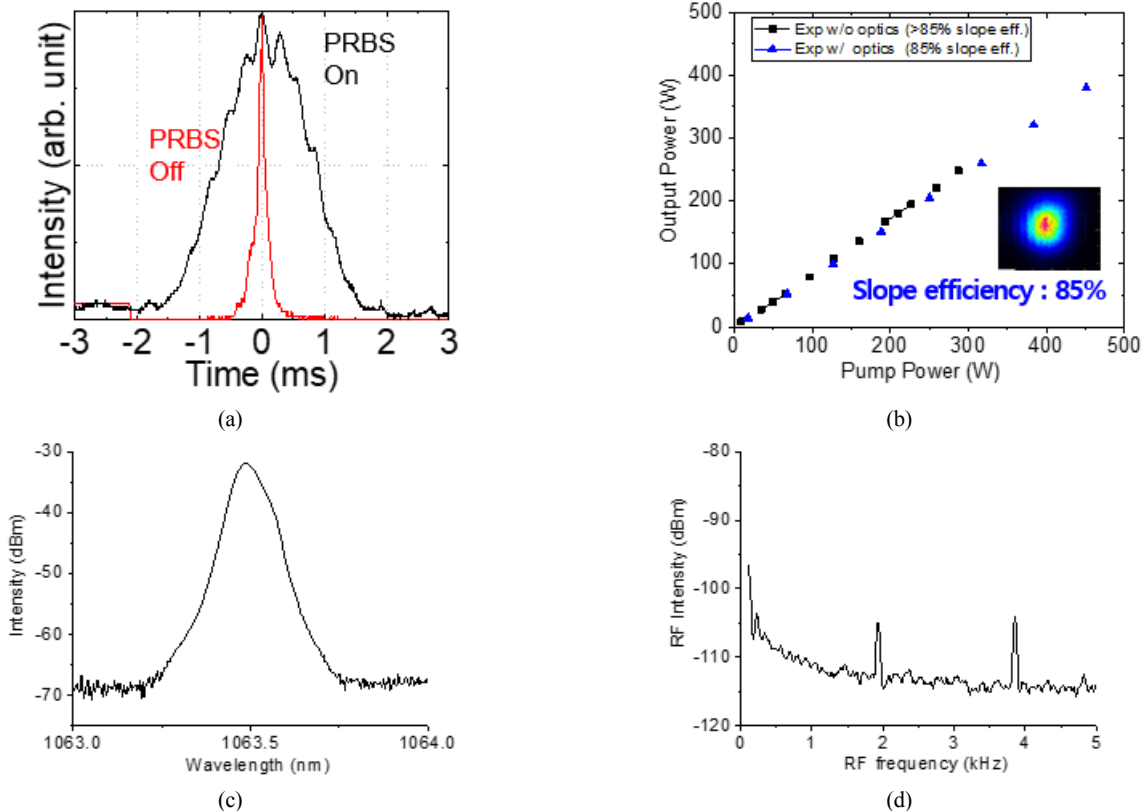


Fig. 7. Output results of PM Yb doped DCF (25/400 um) at a cylinder design with 11 cm diameter coil: (a) Narrow linewidth measurement from scanning Fabry-Perot interferometer (6.4 ms : 10 GHz = 1.6 ms : 2.5 GHz), (b) Output signal power and laser beam shape, (c) Backward Rayleigh scattering and SBS spectrum from optical spectrum analyzer, (d) RF frequency for TMI (Transverse Mode Instability).

폭이 MHz 정도로 측정되지만, 이는 장비의 분해능이 ~60 MHz 이하이기 때문에 정확한 값을 확인할 수 없다. 위상변조기 동작 후(검은색)에는 선폭이 GHz 정도로 넓어지므로 정확한 값을 측정하였다. s-FFI 장비의 10 GHz free spectral range는 오실로스코프로 측정 결과 시간단위로 6.4 ms에 해당한다. 신호광의 시간단위 측정값은 1.6 ms이며, 이는 신호광 선폭 2.5 GHz 반지폭을 나타낸다. 나선형 방열판의 경우 출력이 약 130 W까지로 제한되었던 결과에 비해, 작은 지름의 원통형 방열판을 사용한 결과 85%의 기울기 효율, 400 W 급 출력까지 증가시킬 수 있었다(그림 7(b)). 이때 그림 7(c)에서 보는 바와 같이, 역 방향으로 진행하는 SBS 파장의 세기는 레일리 파장의 세기에 비해 미미하므로 SBS 문턱 값에는 아직 이르지 않았음을 확인할 수 있다. 또한 그림 7(d)는 RF spectrum analyzer를 이용하여 측정한 MI 주파수이다. 코일링 지름을 조정하여 400 W까지 출력을 증가시킬 수는 있었으나, 출력이 증가함에 따라 MI 주파수 세기 또한 점점 커지는 것을 확인할 수 있었다. 신호광 출력이 400 W 이상으로 더 증가 시에는 고차모드 빔 모양이 다시 나타나면서 MI 현상이 다시 뚜렷해지는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 상용 편광유지 25/400 um 광섬유를 사용할 경우 약 400 W 출력 근방이 MI 문턱 값 한계라고 할 수 있다. 코일링 지름을 더 작게 하면 MI 문턱 값을 더 높일 수 있을 것으로 예상되지만, 기본모드 손실까지 커지면서 레이저 효율이 저하되기 때문에 다른 접근방법이 필요하다. 이 외에도 편광 소거율은 약 20 dB로 측정되었다.

본 연구의 레이저 구조에서 최종 출력을 더 높이기 위해서는 모드 불안정성을 완화하고, SBS 비선형 현상 발생 문턱 값을 높이는 방법들을 추가적으로 모색해야 한다. 본 연구에서 사용한 NA 0.06~0.065인 상용제품 25/400 um 광섬유의 경우, 존재 가능한 횡 모드 개수가 4개 이상이다. 따라서 매우 작은 지름으로 코일링 하지 않으면 출력이 증대할수록 MI 현상이 발생하게 된다. 코어 지름을 20/400 um 등으로 줄일 경우, 존재 가능한 횡 모드 개수가 2개로 줄어들게 되어 MI 경향을 크게 완화할 수 있을 것이다. SBS 비선형 현상은 PRBS 주파수 및 주파수 간격 등의 변수를 더 최적화할 경우, 문턱 값을 높일 수 있을 것으로 예상된다. 이 외에도 주증폭기 광섬유로서 20/400~25/400 um 혼종 광섬유를 적용 시, 모드 불안정성 및 SBS 비선형 현상을 동시에 효과적으로 억제할 수 있을 것으로 예상된다. 이 밖에도 PRBS 위상 변조기의 고주파성분을 제거하기 위한 low-pass filter를 적용하여 SBS 주파수를 회피하는 방안^[24]도 있으며, 향후 이러한 방안들을 복합적으로 적용할 경우 kW 이상의 고출력 편광유지 협대역 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

III. 결 론

본 연구에서는 편광유지 광섬유를 이용한 협대역 단일모드 고출력 MOPA 레이저 시스템 연구결과에 대해 보고하였다. 특히 레이저 출력 증가를 제한하는 모드 불안정성에 대한 실

험적 연구를 수행하였다. 3단의 최소화된 MOPA 구조에서 주증폭기 편광유지 25/400 um 광섬유를 코일링 반경을 조절하여 모드 불안정성 문턱값을 높임으로써 기울기 효율 85% 이상, 400 W 출력 결과를 얻을 수 있었다.

향후 레이저 출력을 더욱 증대하기 위해서는 주증폭기에 코어 크기가 작은 편광유지 광섬유를 적용한 MOPA 시스템을 연구하거나, 20/400~25/400 um 혼종 광섬유를 적용하거나, PRBS 위상 변조기의 고주파성분을 제거하기 위한 low-pass filter를 적용함으로써 모드 불안정성과 SBS 비선형 현상을 보다 효과적으로 억제할 필요가 있다. 이를 통해 단일모드 협대역 편광유지 고출력 광섬유 레이저 출력을 kW급 이상으로 높일 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 기업체 R&D 자체투자, 민간기술협력사업(UM16211RD2) 및 광주과학기술원 “2018 첨단 레이저 기술 연구” 지원을 받아 수행하였습니다.

References

1. L. Zhang, J. Hu, J. Wang, and Y. Feng, “Stimulated-Brillouin-scattering-suppressed high-power single-frequency polarization-maintaining Raman fiber amplifier with longitudinally varied strain for laser guide star,” *Opt. Lett.* **37**, 4796-4798 (2012).
2. C. Zeringue, C. Vergien, and I. Dajani, “Pump-limited, 203 W, single-frequency monolithic fiber amplifier based on laser gain competition,” *Opt. Lett.* **36**, 618-620 (2011).
3. 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).
4. P. D. Dragic, J. Ballato, S. Morris, and T. Hawkins, “Pockels’ coefficients of alumina in aluminosilicate optical fiber,” *J. Opt. Soc. Am. B* **30**, 244-250 (2013).
5. 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).
6. 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).
7. N. A. Naderi, I. Dajani, and A. Flores, “High-efficiency, kilowatt 1034 nm all-fiber amplifier operating at 11 pm linewidth,” *Opt. Lett.* **41**, 1018-1021 (2016).
8. L. Yingfan, L. Zhiwei, D. Yongkang, and L. Qiang, “Research on SBS suppression based on multi-frequency phase modulation,” *Chin. Opt. Lett.* **7**, 29-31 (2009).
9. J. Edgecumbe, T. Ehrenreich, C. H. Wang, K. Farley, J. Galipeau, R. Leveille, D. Bjork, I. Majid, and K. Tankala, *Solid State and Diode Laser Technical Review*, 17 June 2010.

10. D. Brown, M. Dennis, and W. Torruellas, "Improved phase modulation for SBS mitigation in kW-class fiber amplifiers," in *Proc. SPIE Photonics West*, San Francisco, California, 24 January 2011.
11. J. O. White, M. Harfouche, J. Edgecumbe, N. Satyan, G. Rakuljic, V. Jayaraman, C. Burner, and A. Yariv, "1.6 kW Yb fiber amplifier using chirped seed amplification for stimulated Brillouin scattering suppression," *Appl. Opt.* **56**, B116-B122, (2017).
12. J. Hansryd, F. Dross, M. Westlund, P. Andrekson, and S. Knudsen, "Increase of the SBS threshold in a short highly nonlinear fiber by applying a temperature distribution," *J. Lightw. Technol.* **19**, 1691-1697 (2001).
13. J. Boggio, J. Marconi, and F. Frangito, "Experimental and numerical investigation of the SBS-threshold increase in an optical fiber by applying strain distributions," *J. Lightw. Technol.* **23**, 3808-3814 (2005).
14. C. Jauregui, H. Otto, F. Stutzki, F. Jansen, J. Limpert, and A. Tunnermann, "Passive mitigation strategies for mode instabilities in high-power fiber laser system," *Opt. Express* **21**, 19375-19386 (2013).
15. A. V. Smith and J. J. Smith, "Maximizing the mode stability threshold of a fiber amplifier," arXiv:1301. 3489 [physics. optics] (2013).
16. H. J. Otto, C. Jauregui, F. Stutzki, F. Jansen, J. Limpert, and A. Tunnermann, "Controlling mode instabilities by dynamic mode excitation with an acousto-optic deflector," *Opt. Express* **21**, 17285-17298 (2013).
17. R. Tao, P. Ma, X. Wang, P. Zhou, and Z. Liu, "1.4 kW all-fiber narrow-linewidth polarization-maintained fiber amplifier," *Proc. SPIE* **9255**, 92550B (2015).
18. D. Engin, W. Lu, M. Akbulut, B. McIntosh, H. Verdun, and S. Gupta, "1 kW cw Yb-fiber-amplifier with <0.5 GHz linewidth and near-diffraction limited beam quality, or coherent combining application," *Proc. SPIE* **7914**, 791407 (2011).
19. C. Wirth, O. Schmidt, I. Tsybin, T. Schreiber, J. Limpert, R. Eberhardt, and A. Tunnermann, "1 kW narrow-linewidth fiber amplifier for spectral beam combining," Presented at the Adv. Solid State Photon, Nara, Japan, 2008, Paper WA6.
20. G. D. Goodno, S. J. McNaught, J. E. Rothenberg, T. S. McComb, P. A. Thielen, M. G. Wickham, and M. E. Weber, "Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier," *Opt. Lett.* **35**, 1542-1544 (2010).
21. J. P. Koplow, D. A. V. Kliner, and L. Goldberg, "Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier," *Opt. Lett.* **23**, 442-444 (2000).
22. K. Brar, M. Savage-Leuchs, J. Henrie, S. Courtney, C. Dille, 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**, 8961R (2014).
23. 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**, 65501 (2016).
24. 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).