《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 30, No. 4, August 2019, pp. 167-173
DOI: https://doi.org/10.3807/KJOP.2019.30.4.167
ISSN : 1225-6285(Print)
ISSN : 2287-321X(Online)

Characteristics of Stimulated Brillouin Scattering Suppression in High-power Fiber Lasers Using Temperature Gradients

Seongmook Jeong[1†], Kihyuck Kim[1], Sunghun Lee[1], Soonhwi Hwang[1], Hwanseok Yang[1], Byunghyuck Moon[2], Young Min Jhon[2], Min Kyu Park[3], and Jung Hwan Lee[3]

[1]*Future Technology R&D-2., LIGNex1, 207, Mabuk-ro, Giheung-gu, Yongin 16911, Korea*
[2]*Sensor System Research Center, Korea Institute of Science and Technology, 5, Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Korea*
[3]*Ground Technology Research Institute 3rd Directorate, Agency for Defense Development, Yuseong P.O.Box 35, Daejeon 34188, Korea*

(Received April 5, 2019; Revised May 14, 2019; Accepted May 29, 2019)

In this paper, we studied characteristics of stimulated Brillouin scattering (SBS) suppression in high-power fiber lasers by using apparatuses applying a temperature gradient (i.e. a step, a sine shape, and random temperature distribution) along the fiber. From the ytterbium-doped polarization-maintaining fiber master oscillator power amplifier built in house, we measured the back-reflection spectrum and power for each temperature gradient, showing that the step shape temperature distribution was the most effective way to suppress SBS. In addition, we investigated the interaction of pseudo-random binary sequence phase modulation conditions and temperature gradients for SBS suppression.

Keywords: Fiber laser, Stimulated Brillouin scattering, Temperature gradients
OCIS codes: (140.3510) Lasers, fiber; (140.3280) Laser amplifiers

온도구배에 의한 고출력 광섬유 레이저의 유도 브릴루앙 산란 억제 특성

정성묵[1†] · 김기혁[1] · 이성헌[1] · 황순휘[1] · 양환석[1] · 문병혁[2] · 전영민[2] · 박민규[3] · 이정환[3]

[1]LIG넥스원 미래기술연구소 2팀
㉾ 16911 경기도 용인시 기흥구 마북로 207

[2]한국과학기술연구원 센서시스템 연구센터
㉾ 02792 서울특별시 성북구 화랑로14길 5

[3]국방과학연구소 지상기술연구원 3부
㉾ 34188 대전광역시 유성우체국 사서함 35호

(2019년 4월 5일 받음, 2019년 5월 14일 수정본 받음, 2019년 5월 29일 게재 확정)

본 논문에서는 고출력 광섬유 레이저의 유도 브릴루앙 산란 억제 특성을 분석하기 위하여, 구형파, 사인파, 임의파 조건의 온도구배 기구부를 설계 및 제작하였다. 또한 전광섬유 MOPA (master oscillator power amplifier) 구조의 이터븀 첨가 편광유지 광섬유 증폭기를 제작하였으며, 온도구배 조건별 역반사 스펙트럼 및 출력을 측정하였다. 구형파 조건의 온도구배에 의해 유도 브릴루앙 산란이 가장 효과적으로 억제되었으며, PRBS (pseudo-random binary sequence) 위상변조 조건과 온도구배 간의 유도 브릴루앙 산란 특성에 끼치는 상호 영향성을 분석하였다.

Keywords: 광섬유 레이저, 유도 브릴루앙 산란, 온도구배
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 제조 산업, 의료, 국방 등의 다양한 분야에서 고출력 고품질 레이저 광원의 수요가 증가함에 따라 높은 발진효율, 소형화 및 유지 관리 측면에서 큰 장점을 갖는 고출력 광섬유 레이저 분야가 많은 관심을 받고 있다. 특히 kW급 고출력 고품질 광섬유 레이저 개발을 위해 이터븀(Yb) 첨가 광섬유를 이용한 레이저 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 광섬유의 높은 비선형성에 의해 고출력 발진 시 다양한 문제점들이 발생하며, 그 중 유도 브릴루앙 산란(stimulated Brillouin scattering, SBS)에 기인한 광섬유 레이저의 출력 한계가 주요한 문제점으로 대두되고 있다[1-3]. 유도 브릴루앙 산란 문턱값(P_{th})은 식 (1)과 같으며,

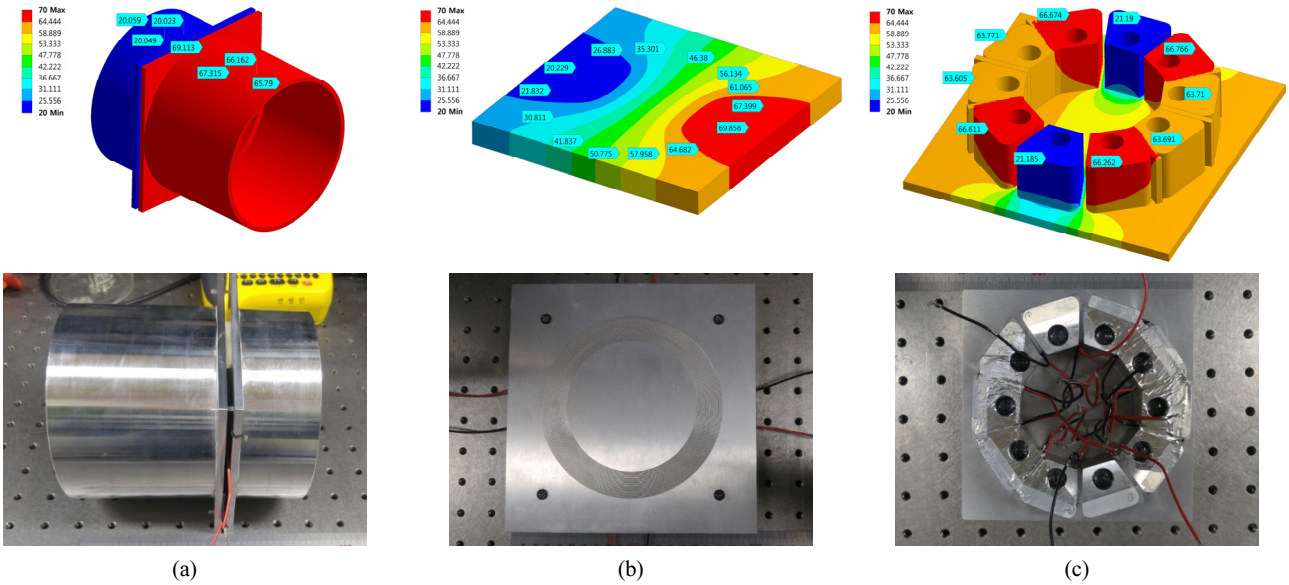
$$P_{th} = 21(k \cdot A_{eff} / g_B \cdot L_{eff})(1+\Delta\nu_s / \Delta\nu_p) \quad (1)$$

여기서 k는 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, 신호광원 선폭 및 브릴루앙 이득 선폭이다[4,5]. 편광유지 광섬유를 이용한 레이저를 개발할 경우, 무편광 광섬유에 비해 유도 브릴루앙 산란 문턱값이 최대 절반까지 감소하므로 편광유지 고출력 광섬유 레이저 개발을 위해서는 유도 브릴루앙 산란을 억제하는 기술이 필수적으로 요구된다. 이에 유도 브릴루앙 산란을 억제하기 위한 다양한 기술들이 연구되고 있으며, 대표적인 기술로 신호광의 선폭 증대 및 PRBS (pseudo-random binary sequence) 위상변조 기술, 광섬유의 온도/변형률 구배, 특수 광섬유 개발 및 역방향 펌핑 기술 등이 있다[6-11]. 이 중 온도구배 기술은 브릴루앙 이득 선폭의 변화에 의해 유도 브릴루앙 산란을 억제하는 기술로서, 광섬유 길이별 온도차이를 주어 광섬유 코어의 굴절률 변화로 음향 파의 속도가 달라져 브릴루앙 주파수 천이(약 1~2 MHz/°C) 현상이 발생된다. 이에 따라 브릴루앙 이득 스펙트럼이 분산됨으로써 선폭이 증가하고 이득이 감소되는 효과를 통해 유도 브릴루앙 산란을 억제하는 효과를 얻을 수 있다[12-15]. 온도구배 기술은 이득 광섬유 및 전송 광섬유 모두에 대해 유도 브릴루앙 산란을 억제할 수 있는 장점을 가지며, 광섬유 길이별 온도구배 구현 조건에 따라 브릴루앙 이득 스펙트럼의 분산되는 경향이 달라져 그에 따른 유도 브릴루앙 산란 억제 효과가 다양하게 나타난다[14,16].

본 논문에서는 PRBS 위상변조로 5 GHz 선폭을 갖는 신호광원을 사용하여 수백 W급 광섬유 증폭기를 구성하였으며, 50°C 이하의 온도편차를 갖는 구형파(step), 사인파(sine) 및 임의파(random) 온도구배 조건을 구현하기 위한 기구부를 설계 및 제작하였다. 이를 통해 온도구배 조건에 따른 광섬유 증폭기에 발생하는 역반사 스펙트럼 및 역반사 출력을 측정하여 유도 브릴루앙 산란 억제 특성을 분석하였다. 또한, 신호광원의 PRBS 위상변조 조건과 온도구배 조건 간의 유도 브릴루앙 산란 특성에 끼치는 상호 영향성을 분석하였다.

II. 온도구배 기구부 설계 및 제작

50°C 이하의 온도편차를 갖는 구형파, 사인파, 임의파 형상의 온도구배 조건을 구현하기 위해 보빈형, 나선형, 디스크형 기구부를 설계하였다. 보빈형 기구부는 두 개의 알루미늄 원통 기구부 사이에 열전소자를 장착하여 상부 및 하부를 각각 가열 및 냉각하도록 설계하였다. 가열부는 광섬유 코팅의 손상 방지를 고려하여 최대온도를 70°C 이하로 운용하였으며, 냉각부는 20°C로 열전소자를 운용하여 온도 편차가



(a) (b) (c)

Fig. 1. Design and development of temperature gradient apparatus. (a) Stepwise temperature gradient using bobbin-type apparatus. (b) Sinusoidal temperature gradient using spiral-type apparatus. (c) Random temperature gradient using disk-type apparatus.

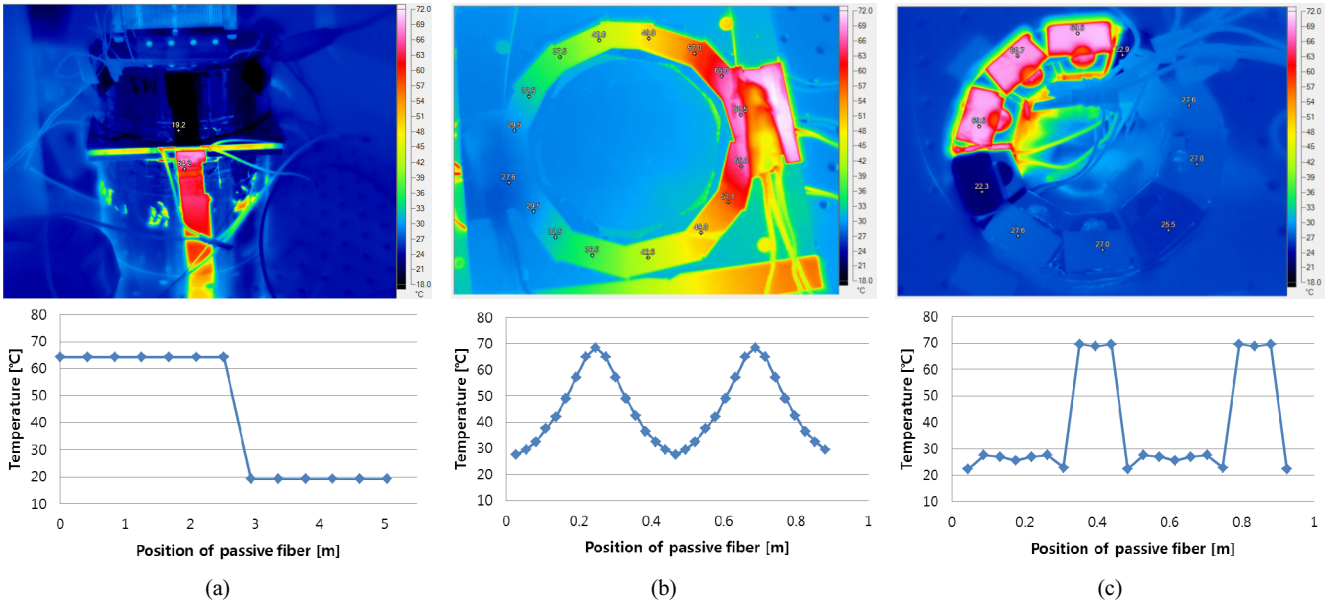


Fig. 2. Measurement results of temperature distribution by the thermal camera. (a) Stepwise temperature gradient using bobbin-type apparatus. (b) Sinusoidal temperature gradient using spiral-type apparatus. (c) Random temperature gradient using disk-type apparatus.

50°C 이하로 구현되도록 설계하였다. 두 개의 원통 기구부 경계를 기준으로 전송 광섬유를 절반씩 나눠 권선함으로써 길이방향으로 구형파 형상의 온도구배 조건을 갖도록 설계하였다. 나선형 기구부는 나선형 홈이 가공된 알루미늄 판의 아래면 좌우에 각각 열전소자를 장착하고 열전소자의 입력 전류 방향을 서로 반대로 인가해줌으로써 한쪽은 가열(70°C)되고 다른 한쪽은 냉각(20°C)되도록 구성하여, 나선형 홈에 권선될 광섬유의 길이방향으로 사인파 형상의 온도구배 조건을 갖도록 설계하였다. 디스크형 기구부는 금속 블록 사이에 열전소자를 임의로 장착하고 블록 크기 및 구간별 가열(최대 70°C)과 냉각(20°C) 조건이 다르도록 설계하였으며, 블록 바깥면으로 전송광섬유를 권선함으로써 광섬유 길이방향으로 임의파 형상의 온도구배를 갖도록 설계하였다.

그림 1의 (a)~(c)는 구형파, 사인파, 임의파 형상의 온도구배 조건들을 구현하기 위하여 기구부 형상을 ANSYS V17.2를 이용하여 디자인 및 열 해석한 분석 결과와 이를 반영하여 제작된 보빈형, 나선형 및 디스크형 기구부 형상이다. 보빈형, 디스크형 기구부의 외경은 14 cm로 설계하였으며, 나선형 기구부는 최대 14.6 cm 및 최소 13.4 cm로 평균 14 cm 외경의 나선형 홈을 갖도록 설계하여 전송 광섬유가 유사한 조건으로 권선되도록 하였다. 그림 1의 열해석 결과와 같이 50°C 이하의 온도편차를 갖는 구형파, 사인파 및 임의파 온도구배가 구현됨을 확인하였으며, 이를 기반으로 3종의 온도구배 기구부를 제작하였다.

그림 2는 열화상 카메라(Fluke TiX660)를 이용하여 제작한 온도구배 기구부에 권선된 전송 광섬유의 5 m 길이에 대한 온도분포를 측정한 결과이다. 그림 2(a)에서 보빈형 기구부는 전송 광섬유 2.5 m에 64.2°C, 남은 2.5 m에 19.2°C로 최대 45°C의 온도편차를 갖는 구형파 온도구배 조건이 구현됨을 확인하였으며, 그림 2(b)와 2(c)의 나선형 기구부와 디스크형 기구부는 전송 광섬유 5 m에 대해 약 0.48 m당 각각 최대 43°C와 47°C의 온도편차를 갖는 사인파 및 임의파 온도구배 조건이 구현됨을 확인하였다.

III. 유도 브릴루앙 산란 억제 특성 실험 및 결과

온도구배 조건에 따른 유도 브릴루앙 산란 억제특성을 분석하기 위해 그림 3과 같이 신호광원과 다단 증폭부로 구성된 MOPA (master oscillator power amplifier) 구조의 편광유지 광섬유 증폭기를 제작하였다. 신호광원은 1,064 nm 파장의 DFB-LD (distributed feedback laser diode)를 PRBS 위상변조를 통해 5 GHz 선폭을 갖도록 구성하였으며, 신호광원의 선폭을 측정하기 위해 그림 4(a)와 같이 수 MHz의 선폭을 갖는 DFB-LD와 5 GHz로 선폭 변조된 신호광원을 이용하여 자체-헤테로다인(self-heterodyne)을 구성하였으며 RF (radio frequency) 분석기(Keysight, DSA91304A)로 스펙트럼을 측정하였고, 그림 4(b)의 결과를 통해 대칭되는 전체 스펙트럼 형상의 반치전폭(FWHM)이 5 GHz임을 확인하였다. 이를 이용하여 전치 증폭부를 통해 25 W 출력으로 증폭하였으며, 주 증폭부는 코어와 클래드 직경이 각각 25 μm와 400 μm인 이터븀(Yb) 첨가 편광유지 광섬유(Nufern, PLMA-

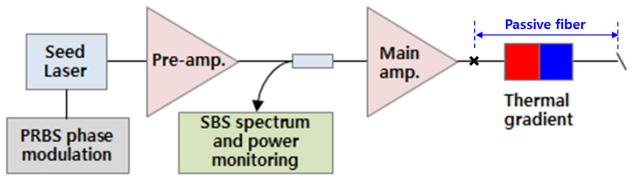
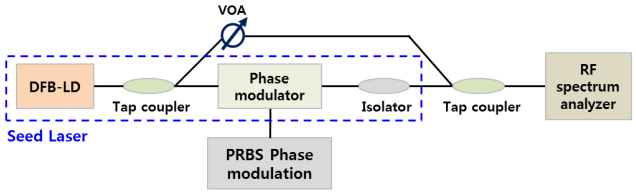
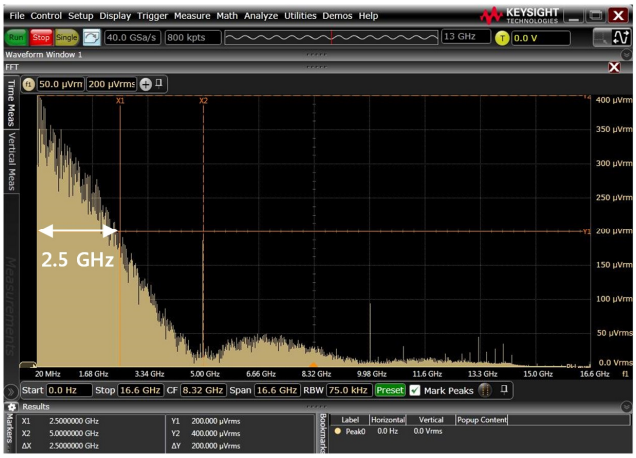


Fig. 3. Schematic diagram of the SBS measurement step.



(a)

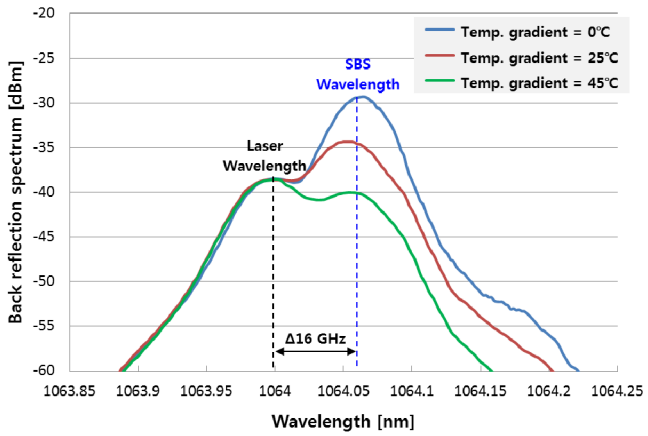


(b)

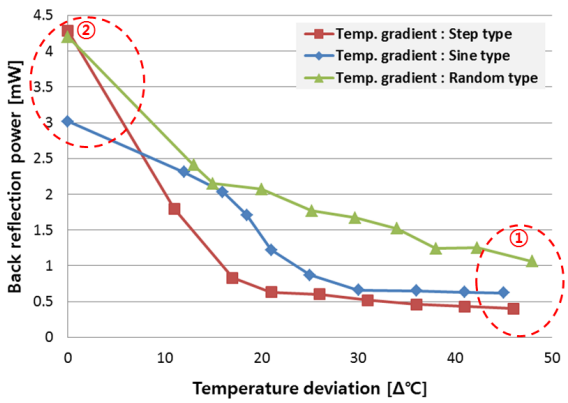
Fig. 4. Measurement result of the seed laser linewidth. (a) Schematic diagram of the self-heterodyne step. (b) Result of the seed laser linewidth.

YDF-25/400-M)를 8 m 길이로 구성하여, 976 nm 파장의 펌프 레이저 다이오드(Han's TCS, M976±0.5-100-F105/22-D1S)와 (18+1)*1 펌프-신호 다중모드 결합기(ITF, PMC1811C10286)를 통해 250 W급 출력을 갖는 편광유지 광섬유 레이저 증폭기를 제작하였다. 위상변조 패턴에 따른 유도 브릴루앙 산란 특성을 분석하기 위해 PRBS 위상변조 패턴 n을 4부터 11까지 구동될 수 있도록 구성하였으며, 온도구배 조건이 적용될 코어와 클래드 직경이 각각 25 μm와 400 μm인 편광유지 전송 광섬유(Nufern, PLMA-GDF-25/400-M)를 5 m 길이로 광섬유 증폭기 출력단에 추가 융착한 후, 전송 광섬유 끝단은 약 8° 각도로 절단하였다. 5 m의 전송 광섬유에 적용되는 온도구배 조건별 발생되는 유도 브릴루앙 산란 특성은 주 증폭기 앞단의 역반사 모니터링 포트를 통하여 역반사 스펙트럼 및 출력을 측정하여 분석하였다.

온도구배 조건별 유도 브릴루앙 산란 억제특성을 분석하기 위해, 보빈형, 나선형 및 디스크형 기구부에 5 m의 전송 광섬유를 권선하였으며, 광섬유 증폭기는 SBS에 대한 영향을 효과적으로 비교하기 위해 PRBS 위상변조 패턴 $n=4$으로 설정하였으며, 역반사 출력에 대한 시스템 안정성을 고려하여 155 W의 동일한 레이저 출력조건에서 특성을 비교하였다. 이 때 기구부별 온도편차를 점점 증가시킴에 따라 유도 브릴루앙 산란에 의한 역반사 스펙트럼 및 출력을 측정하였다. 그림 5(a)는 온도구배 기구부 중 보빈형 기구부의 온도편차별 역반사 스펙트럼 특성을 측정한 결과로, 1,064 nm 레이저 중심파장에서 16 GHz 떨어진 지점인 1,064.06 nm 파장의 유도 브릴루앙 산란에 의한 스펙트럼을 분석하였다. 구형파 온도구배 조건에 대해 온도편차가 0°C에서 45°C까지 증가함에 따라 유도 브릴루앙 산란에 의한 스펙트럼의 첨두치가 11 dB 감소되는 결과를 확인하였다. 그림 5(b)는 온도구배 기구부별 온도편차에 따른 역반사 출력을 분석한 결과로, 모든 온도구배 조건에 대해서 온도편차가 증가함에 따라 역반사 출력이 감소하였으며, 점차 수렴됨을 확인하였다. 그림 5(b)의 ①과 같이 약 45°C의 온도편차에서 구형파, 사인파, 임의파 조건에 대한 역반사 출력은 각각 0.4 mW, 0.6 mW, 1.1 mW였다. 온도구배 중 구형파 조건이 유도 브릴루앙 산란을 가장 효과적으로 억제함을 확인하였으며, 이는 브릴루앙 이득 대역폭(약 60 MHz) 범위 내의 주파수 천이가 이뤄지는 50°C 이하의 온도편차에서는 구형파 형상이 가장 효과적으



(a)



(b)

Fig. 5. Characteristics of SBS suppression using temperature gradients at 155 W laser output power. (a) Measurement results of the back reflection optical spectrum by changing the temperature deviation of stepwise temperature gradients. (b) Measurement results of the back reflection optical power by temperature gradients.

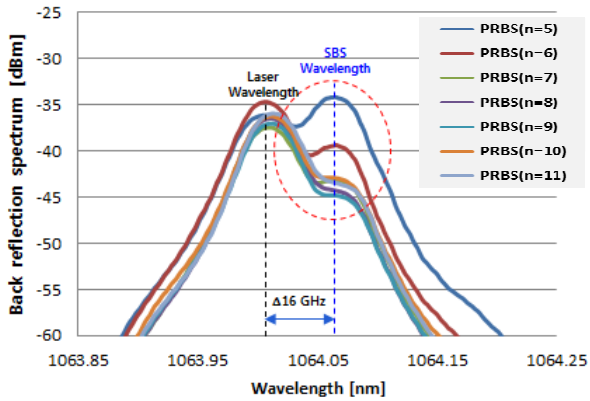


Fig. 6. Characteristics of SBS suppression by changing the PRBS patterns at 217 W laser output power.

로 이득 첨두치를 감소시키기 때문이다[14,16]. 또한 그림 5(b)의 ②는 온도구배 조건은 적용되지 않고 기구부 형상에 의한 변형률 구배 효과가 발생하여 얻어진 역반사 출력에 대한 결과로, 보빈형과 디스크형 기구부에 대한 역반사 출력은 4.1~4.2 mW이며, 나선형 기구부에 대한 역반사 출력은 3.0 mW였다. 보빈형 및 디스크형 기구부는 동일 직경으로 권선됨에 따라 일정한 변형률이 적용되어 구배가 발생되지 않았으며, 이에 비하여 나선형 기구부는 점점 작은 직경으로 광섬유가 권선되어 구조적으로 변형률이 점점 증가하는 구배가 적용되어 유도 브릴루앙 산란에 의한 역반사 출력이 억제됨을 확인하였다[17,18]. 이에 나선형 기구부는 온도구배 영향뿐만 아니라 변형률 구배에 의한 효과가 함께 나타난 결과이며, 온도구배가 적용하지 않은 광섬유 증폭기의 이득 광섬유의 권선방법은 보빈형에 비해 나선형 기구부를 적용한 경우 유도 브릴루앙 산란 억제 효과를 얻을 수 있다.

온도구배와 PRBS 위상변조 조건과의 상호 영향성을 분석하기 위해, 50°C 이하의 온도편차에서 유도 브릴루앙 산란 억제효과가 가장 좋은 구형파 조건의 보빈형 기구부를 적용하였으며, PRBS 위상변조 패턴을 다양하게 변화시켜 줌에 따라 유도 브릴루앙 산란특성에 대한 상호 영향성을 분석하였다. 우선 온도구배 없이 PRBS 위상변조 패턴의 변화에 따른 유도 브릴루앙 산란 특성을 분석하였다. 그림 6은 위상변조 패턴(n)별 성능비교를 위해 217 W의 동일한 레이저 출력 조건에서 측정된 역반사 스펙트럼을 비교한 결과로, PRBS 위상변조 패턴(n)이 5에서 9까지 증가함에 따라 유도 브릴루앙 산란에 의한 스펙트럼이 점점 감소하는 경향을 보이며 PRBS 위상변조 패턴(n)이 9보다 커지면 유도 브릴루앙 산란에 의한 스펙트럼이 다시 증가하는 경향을 보였다. 이를 통해 5 GHz 선폭에서 유도 브릴루앙 산란을 억제하기 위한 PRBS 위상변조의 최적 패턴은 n = 9임을 확인하였다. 이는 PRBS 위상변조 패턴(n)이 5에서 9로 증가할수록 종모드가 좁은 간격으로 배치되어 이득을 분산시키는 효과가 발생하지만, 10 이상으로 증가될 경우 Stokes spectra의 중첩영역이 증가됨에 따라 분산효과가 저감된다. 또한 9 이하의 PRBS 위상변조 패턴(n)에서는 음향양자 수명시간(phonon lifetime) 전에 위상이 바뀌게 되어 유도 브릴루앙 산란 억제 효과가 나타나지만, 9보다 커지게 되면 PRBS 패턴 중에 음향양자 수명시간보다 길어지는 구간이 존재하여 유도 브릴루앙 산란이 증가하는 영향을 준다[19,20].

또한 PRBS 위상변조와 온도구배를 동시에 적용하였을 때 유도 브릴루앙 산란 특성에 대해 상호 영향성을 분석하기 위하여 PRBS 위상변조 패턴에 따라 온도구배 적용 전후의 역반사 출력을 측정하였으며, 온도구배 조건은 45°C 온도편차에서 SBS 억제효과가 가장 좋은 구형파 조건을 적용하였다. 시스템 안정성을 고려하여 역반사 출력을 약 4 mW를 기준으로 레이저 출력 증폭을 제한하였으며, 레이저 출력은 최대 245 W에 대해서 온도구배 적용 전후에 따른 역반사 출력을 분석하였다. 그림 7의 (a)와 (b)를 비교해볼 때, PRBS 위상변조 패턴(n)이 4~6인 조건에서는 온도구배가 적용됨에 따라 추가적인 유도 브릴루앙 산란 특성이 억제됨을 확인하였다. PRBS n=4의 경우, 약 4 mW의 역반사 출력을 기준으로 온도구배 적용 전후에 따라 레이저 출력이 155 W에서 192 W로 증가된 결과를 확인하였다. PRBS n=5, 6의 경우, 217 W의 레이저 출력에서 온도구배 적용을 통해 역반사 출력이 각각 0.7 mW 및 0.6 mW 감소되었으며, 245 W 출력으로 증폭

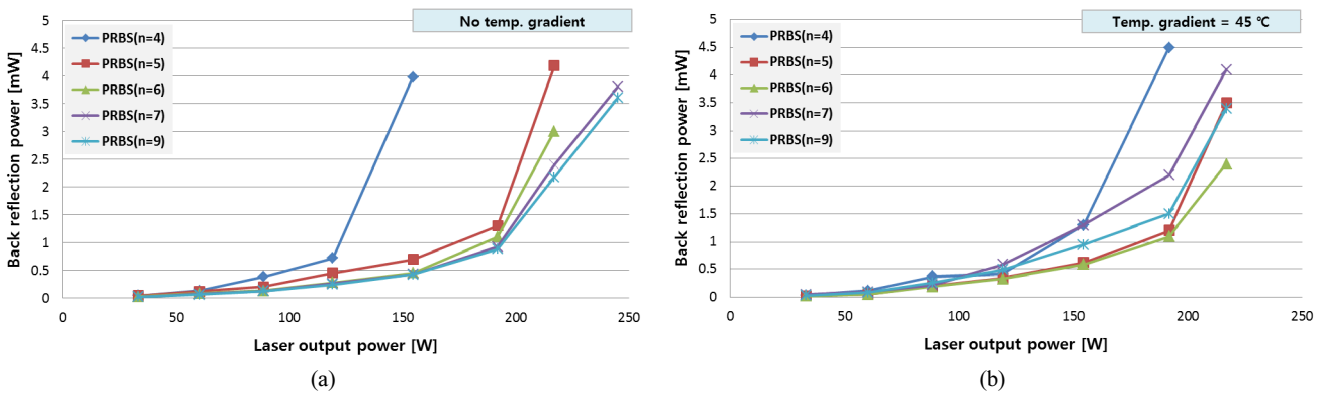


Fig. 7. Interaction of the PRBS pattern and temperature gradient for SBS suppression. (a) Changing the PRBS pattern without temperature gradient. (b) Changing the PRBS pattern with stepwise temperature gradient of 45°C.

Table 1. Back reflection power with and without temperature gradient for various conditions of PRBS pattern at 217 W laser power

PRBS pattern	Back reflection power [mW] without temperature gradient	Back reflection power [mW] with temperature gradient	Laser power [W]
PRBS $n=5$	4.2	3.5	217
PRBS $n=6$	3.0	2.4	
PRBS $n=7$	2.4	4.1	
PRBS $n=9$	2.2	3.4	

시 역반사 출력이 5 mW 이상으로 증가하여 더 이상 출력을 올리지 않았다. PRBS 위상변조 패턴(n)이 4~6인 조건에서는 브릴루앙 이득 선폭(60 MHz)보다 큰 종모드 간격을 갖는 경우로, 브릴루앙 주파수 천이에 따른 이득 분산효과로 SBS 억제효과가 발생하였다. 하지만 PRBS 위상변조 패턴(n)이 7 이상일 경우, 온도구배 적용에 따른 추가 억제효과는 없었으며 약 4 mW의 역반사 출력을 기준으로 온도구배 적용 여부에 따라 레이저 출력이 245 W에서 217 W로 오히려 저하되는 경향을 보였다. 이는 그림 6의 Stokes spectra의 중첩이 증가될 때 유도 브릴루앙 산란 억제효과가 줄어들게 되는 결과와 같은 경우로, PRBS 위상변조 패턴(n)이 7 이상인 조건에서 온도구배를 함께 적용하여 발생되는 브릴루앙 이득 분산효과에 의해 온도구배 적용 전과 비교하여 종모드가 상대적으로 좁게 배치되는 현상이 발생한다. 이로 인해 중첩영역이 증가되어 추가적인 SBS 억제효과가 발생하지 않았다[21,22].

또한 그림 7과 표 1의 217 W 레이저 출력에 대한 역반사 출력 결과를 비교하였을 때, 온도구배가 없이 유도 브릴루앙 산란이 가장 억제된 조건인 PRBS $n=9$일 때의 역반사 출력은 2.2 mW였으며, 온도구배를 적용하여 유도 브릴루앙 산란이 가장 억제된 조건인 PRBS $n=6$일 때의 역반사 출력은 2.4 mW였다. 이를 비교해볼 때 5 GHz 선폭에서 온도구배가 없는 PRBS $n=9$의 조건이 온도구배를 함께 적용한 경우에 비해 SBS 억제 특성이 유사 혹은 더 우수한 결과를 보임을 확인하였다. 또한 참고문헌 [21]에서 2 GHz 선폭 및 PRBS $n=4$의 조건을 갖는 신호광원을 사용하여 SBS에 의해 550 W 출력 이상 증폭이 어려웠던 광섬유 레이저 모듈을 온도구배를 함께 적용함으로써 1 kW 출력을 획득한 실험결과를 분석해 볼 때, 광섬유 레이저 모듈 구성 시 유도 브릴루앙 산란 특성을 최소화하기 위해 신호 광원에 사용되는 선폭 및 위상변조 패턴(n) 조건에 적절한 온도구배 조건을 적용하는 게 바람직하다.

IV. 결 론

유도 브릴루앙 산란의 억제특성을 분석하기 위해 구형파, 사인파, 임의파 형상의 온도구배 기구부를 설계 및 제작하였다. 또한 250 W급 MOPA 구조의 이터븀 첨가 편광유지 광섬유 증폭기를 제작하였으며, 증폭기 출력단의 5 m 길이 전송광섬유에 50°C 이하의 온도편차를 갖는 온도구배 조건별 역반사 스펙트럼 및 출력 특성을 분석한 결과, 구형파의 온도구배 조건이 유도 브릴루앙 산란의 억제에 가장 효과적이었다. 그리고 나선형 기구부는 광섬유가 권선되어 길이방향으로 변형률이 점점 증가하는 구배 조건이 적용되어 유도 브릴루앙 산란이 억제되는 특성을 보였다. 또한 신호광원의 PRBS 위상변조 패턴(n)에 따라 온도구배에 의한 유도 브릴루앙 산란 억제 효과가 다르게 나타났으며, 5 GHz PRBS $n=4$, 5, 6의 위상변조 조건에서 온도구배를 함께 적용할 때 유도 브릴루앙 산란 억제 효과가 증가하였다.

References

1. T. J. Wagner, "Fiber laser beam combining and power scaling progress, Air Force Research Laboratory Laser Division," Proc. SPIE **8237**, 823718 (2012).
2. Y. H. Park, Y. S. Youn, M. W. Jung, C. Jun, B.-A. Yu, and W. Shin, "Polarization-maintained single-mode 400-W Yb-doped fiber laser with 2.5-GHz linewidth from a 3-stage MOPA system," Korean J. Opt. Photon. **29**, 159-165 (2018).
3. M. D. Mermelstein, M. J. Andrejco, J. Fini, A. Yablon, C. Headley, D. J. DiGiovanni, and A. H. McCurdy, "11.2 dB SBS gain suppression in a large mode area Yb-doped optical fiber," Proc. SPIE **6873**, 68730N (2008).
4. 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).
5. 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**, 795-799 (2005).
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. J. B. Coles, B. P.-P. Kuo, N. Alic, S. Moro, C.-S. Bres, J. M. C. Boggio, A. A. Andrekson, M. Karlsson, and S. Radic, "Bandwidth-efficient phase modulation techniques for Stimulated Brillouin Scattering suppression in fiber optic parametric amplifiers," Opt. Express **18**, 18138-18150 (2010).
8. 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).
9. P. D. Dragic, J. Ballato, S. Morris, and T. Hawkins, "The

Brillouin gain coefficient of Yb-doped aluminosilicate glass optical fibers," Opt. Mater. **35**, 1627-1632 (2013).
10. 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).
11. 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).
12. T. Kurashima, T. Horiguchi, and M. Tateda, "Thermal effects of Brillouingain spectra in single-mode fibers," IEEE Photon. Technol. Lett. **2**, 718-720 (1990).
13. S. Gray, A. Liu, D. T. Walton, J. Wang, M.-J. Li, X. Chen, A. B. Ruffin, J. A. DeMeritt, and L. A. Zenteno, "502 Watt, single transverse mode, narrow linewidth, bidirectionally pumped Yb-doped fiber amplifier," Opt. Express **15**, 17044-17050 (2007).
14. J. Hansryd, F. Dross, M. Westlund, P. A. Andrekson, and S. N. Knudsen, "Increase of the SBS threshold in a short highly nonlinear fiber by applying a temperature distribution," J. Lightwave Technol. **19**, 1691-1697 (2001).
15. V. R. Supradeepa, "Stimulated Brillouin scattering thresholds in optical fibers for lasers linewidth broadened with noise," Opt. Express **21**, 4677-4687 (2013).
16. J. E. Rotenberg, P. A. Thielen, M. Wickham, and C. P. Asman, "Suppression of stimulated Brillouin scattering in single-frequency multi-kilowatt fiber amplifiers," Proc. SPIE **6873**, 68730O (2008).
17. J. M. C. Boggio, J. D. Marconi, and H. L. Fragnito, "Experimental and numerical investigation of the SBS-threshold increase in an optical fiber by applying strain distributions," J. Lightwave Technol. **23**, 3808-3814 (2005).
18. R. Engelbrecht, A. Dobroschke, and B. Schmauss, "SBS shaping and suppression by arbitrary strain distributions realized by a fiber coiling machine," in *Proc. IEEE/LEOS Winter Topicals Meeting Series* (Austria, Jan. 2009), **WC1.3**, 248-249 (2009).
19. 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).
20. 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).
21. I. Dajani, A. Flores, R. Holten, B. Anderson, B. Pulford, and T. Ehrenreich, "Multi-kilowatt power scaling and coherent beam combining of narrow-linewidth fiber lasers," Proc. SPIE, **9728**, 972801 (2016).
22. A. Motil, A. Bergman, and M. Tur, "State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing," Opt. Laser Technol. **78**, 81-103 (2016).