

Fabrication and Output Characteristics of an (18+1)×1 Polarization-maintaining Pump and Signal Combiner for a High-power Fiber Laser

Sung Hun Lee^{1†}, Ki Hyuck Kim¹, Hwan Seok Yang¹, Seung Yong Cho², Seon Ju Kim²,
Min Kyu Park³, and Jung Hwan Lee³

¹Future Technology R&D-2., LIGNex1, 207, Mabuk-ro, Giheung-gu, Yongin 16911, Korea

²Research Center, LS-tech, 33-3, Cheomdan venture so-ro 38beon-gil, Buk-gu, Gwangju 61007, Korea

³The GTRI-3rd, Agency for Defense Development, P.O.Box 35, Yuseong, Daejeon 34186, Korea

(Received July 22, 2019; Revised August 23, 2019; Accepted August 30, 2019)

In this paper a pump combiner, a key component of a high-power fiber laser, was fabricated, and its output characteristics measured using a high-power performance measuring instrument. The (18+1)×1 pump combiner consists of an optical-fiber bundle of one signal fiber and 18 pump fibers, an output optical fiber, and housing. The signal and output fibers were fabricated using polarization-maintaining optical fiber. By measuring the loss of signal light along the tapering length of the optical-fiber bundle, the tapering length was optimized to 18 mm. Signal-light insertion loss, pump-light transmittance, and polarization extinction ratio of the fabricated (18+1)×1 pump combiner were measured as 6.5%, 98.07%, and 18.0 dB respectively. The temperature distribution of the pump combiner, at a high power of 2 kW using 18 pump laser diodes, was measured and analyzed using a thermal-imaging camera.

Keywords: High-power fiber laser, Pump combiner, Polarization-maintaining fiber

OCIS codes: (060.2310) Fiber optics; (140.3510) Lasers, fiber; (140.3280) Laser amplifiers

고출력 광섬유 레이저용 (18+1)×1 편광유지 펌프 및 신호광 결합기 제작 및 출력 특성

이성현^{1†} · 김기혁¹ · 양환석¹ · 조승용² · 김선주² · 박민규³ · 이정환³

¹LIG넥스원, 미래기술연구소 2팀
Ⓞ 16911 경기도 용인시 기흥구 마북로 207

²이상테크 기술연구소
Ⓞ 61007 광주광역시 북구 첨단벤처소로38번길 33-3

³국방과학연구소 지상기술연구원 3부 1팀
Ⓞ 34186 대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 35호

(2019년 7월 22일 받음, 2019년 8월 23일 수정본 받음, 2019년 8월 30일 게재 확정)

본 논문에서는 고출력 광섬유 레이저의 핵심 부품인 펌프광 결합기를 제작하였으며, 고출력 성능시험 장비를 이용하여 출력특성을 측정하였다. (18+1)×1 펌프광 결합기는 1개의 신호광 광섬유와 18개의 펌프광 광섬유들로 이뤄진 광섬유 다발, 출력 광섬유와 하우징으로 구성되어 있다. 신호광 광섬유와 출력 광섬유는 편광유지 광섬유를 사용하여 제작하였다. 광섬유 다발의 테이퍼링 길이에 따른 신호광의 손실을 측정하여 테이퍼링 길이를 18 mm로 최적화하였다. 제작된 (18+1)×1 펌프광 결합기의 신호광 삽입 손실, 펌프광 투과율 및 편광 소광률은 각각 6.5%, 98.07% 및 18.0 dB로 측정되었다. 18개의 펌프 레이저 다이오드를 이용하여 2 kW의 고출력에서 펌프광 결합기의 온도 분포를 열화상 카메라를 이용하여 측정 및 분석하였다.

Keywords: 고출력 광섬유 레이저, 펌프광 결합기, 편광유지 광섬유

OCIS codes: (060.2310) Fiber optics; (140.3510) Lasers, fiber; (140.3280) Laser amplifiers

[†]E-mail: sunghun.lee25@lignex1.com, ORCID: 0000-0002-6108-2156

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

I. 서 론

광섬유 레이저는 계측, 통신, 의료, 군사 등 여러 분야에서 다양하게 활용되고 있다. 최근 고출력 광섬유 레이저 분야의 획기적인 기술 발전으로 기존의 고체 또는 기체 레이저가 했던 역할을 광섬유 레이저가 대체할 수 있게 되면서 산업 및 군사 분야에 수요가 급속도로 증가하고 있다. 고출력 광섬유 레이저 개발을 위하여 필요한 핵심기술의 하나가 펄프 레이저 다이오드에서 나오는 고출력 펄프광을 광섬유 레이저의 광섬유 이득매질로 효율적으로 입사시킬 수 있어야 한다는 것이다. 이러한 고출력 펄프광을 전송할 수 있는 광 부품인 고출력 펄프광 결합기 개발이 요구되고 있다^[1-8].

기존의 단일모드 펄프광 결합기 기술은 저출력의 광통신용 소자기술로 사용되고 있으며 코어의 크기가 작아서 고출력 펄프광을 전송할 수 없는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 코어와 클래드 직경이 각각 105 μm와 125 μm인 대구경 광섬유로 여러 채널의 펄프광들을 전송할 수 있는 광 결합 기술 개발이 필요하다. 또한, 고출력 광섬유 레이저에서 펄프광 및 신호광의 손실로 발생하는 열을 방열할 수 있는 패키징 기술도 매우 중요하다^[9,10].

고출력 펄프광 결합기의 종류에는 측면에서 클래드로 펄프광을 전송하는 측면 광 펌핑 방식의 펄프광 결합기와 클래드의 끝단면에서 펄프광을 전송하는 클래드 끝단면 광 펌핑 방식의 펄프광 결합기가 있다. 측면 광 펌핑의 경우 신호광의 손실이 낮으며 펄프광 광섬유의 개수에 제한이 없지만 펄프광 손실이 크고 역방향의 빔에 펄프광 레이저 다이오드가 손상의 위험이 있는 단점이 있다. 클래드 끝단면 광 펌핑 방식의 펄프광 결합기 제작 방법은 이중 클래드의 대구경 광섬유를 사용하여 높은 효율로 펄프광을 전달할 수 있지만 신호광 삽입 손실이 크고 펄프광 광섬유의 크기로 물리적인 제한을 가진다^[11,12].

고출력 펄프광 결합기의 광섬유 다발을 제작하는 방식은 크게 광섬유들을 유리 튜브 내부에 적층 후 테이퍼링하여 제작하는 방식과 전용 치구를 사용하여 광섬유를 적층 후 테이퍼링하여 제작하는 방식으로 나뉜다. 유리 튜브 내에 적층하는 방식은 펄프광 광섬유의 개수가 유리 튜브의 직경에 제한을 가지며, 테이퍼링 시 유리 튜브 내에 공기 기포가 발생하는 단점이 있다. 전용 치구를 사용하여 적층하는 방식은 펄프광 광섬유의 개수에 제한이 없지만 테이퍼링 공정 조건을 최적화시켜야 한다.

본 연구에서는 고출력 연속발전 편광유지 광섬유 레이저에 사용되는 핵심부품인 클래드 끝단면 광 펌핑 방식의 (18+1)×1 고출력 펄프광 결합기를 국내에서 최초로 제작하였다. 펄프광 결합기는 18개의 펄프광 입력 광섬유와 1개의 신호광 편광유지 광섬유로 이뤄진 광섬유 다발부와 광섬유 이득매질로 펄프광을 전송하기 위한 출력광 편광유지 광섬유 및 광 손실에 의한 열을 방열하기 위한 하우징으로 구성되어 제작하였다. 광섬유 다발의 테이퍼링 길이에 따른 신호광 손실을 측정하여 광섬유 다발의 길이를 최적화하였다. 제작된 펄프

광 결합기의 신호광 삽입손실, 펄프광 투과율, 편광 소광률 (polarization extinction ratio), 빔 품질 등의 출력 특성을 전용 시험장비를 제작하여 측정하였다. 고출력 펄프광 레이저 다이오드와 전용 측정장치를 이용하여 2 kW 이상의 고출력 광 펌핑에서 펄프광 결합기의 발열과 내구성 검증을 위해 58 분 동안 출력을 측정하여 분석하였다.

II. (18+1)×1 펄프광 결합기 제작

광 특성이 우수한 펄프광 결합기를 만들기 위해서는 펄프광 광섬유와 광섬유 이득매질 사이에 사용되는 출력 광섬유의 코어와 클래드의 직경 및 개구수를 적절히 선택하여 설계 및 제작하여 한다. 그림 1은 광 커플링 분석을 수행하기 위한 광섬유 다발 조립체의 모델링이다.

먼저, 펄프광 결합기의 광섬유 다발에서 출력 광섬유로 손실 없이 빔을 전송하기 위해서는 두 광섬유의 밝기(brightness) 조건을 고려하여야 한다. 밝기는 다음과 같이 광섬유 코어 지름(D)과 굴절률 분포에 의하여 결정되는 개구수(numerical aperture, NA)에 의하여 주어진다.

펄프광 결합기의 펄프 광이 광섬유 이득매질로 손실 없이 전송되기 위한 광섬유의 직경(D)과 개구수(NA)의 곱으로 정의되는 빔 커플링 조건은 아래와 같이 표현된다^[13,14].

$$\text{Brightness} = D \times \text{NA}, \quad \text{NA} = \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2} \tag{1}$$

$$D_{\text{bundle}} \times \text{NA}_{\text{in}} \leq D_{\text{out}} \times \text{NA}_{\text{out}}$$

여기서, n_{core} 와 n_{clad} 는 각각 광섬유 코어와 클래드의 굴절률이며, NA_{in} 와 D_{bundle} 는 각각 펄프 광섬유의 개구수와 광섬유 다발의 직경이며, NA_{out} 와 D_{out} 은 각각 출력 광섬유의 개구수와 직경을 나타낸다. 구조적인 용착 손실이 없기 위해서는 광섬유 다발의 밝기보다 출력 광섬유의 밝기가 커야 한다.

펄프광 결합기의 펄프광 광섬유들의 적층(layer) 수 및 그에 따른 입력 포트의 수(N)는 입력 광섬유와 출력 광섬유의 밝기 비율(brightness ratio, k)에 의하여 결정된다^[15].

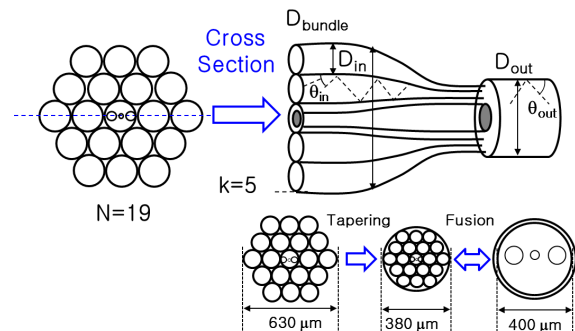
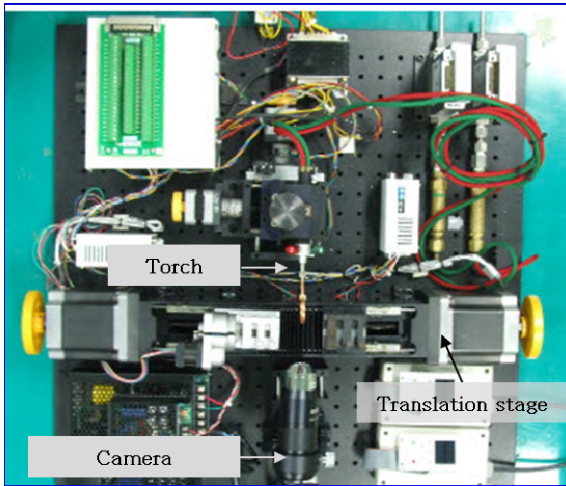


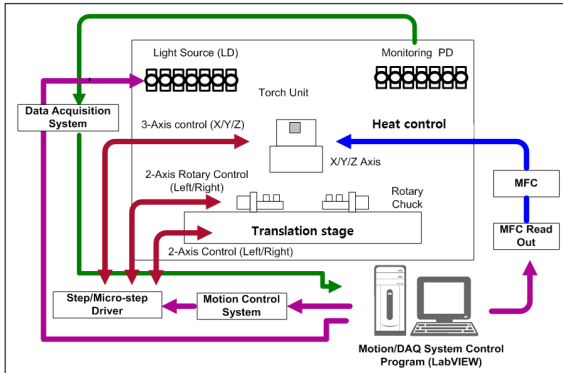
Fig. 1. Modeling of the (18+1)×1 pump combiner for analysis of the optical coupling efficiency of pump beam. N: number of fibers, k: brightness ratio, D_{in} : diameter of pump fiber, D_{out} : diameter of output fiber, θ_{in} : angle of pump beam, θ_{out} : angle of output beam.

$$k = D_{out} \times NA_{out} / D_{bundle} \times NA_{in}, N = (3k^2 + 1) / 4 \quad (2)$$

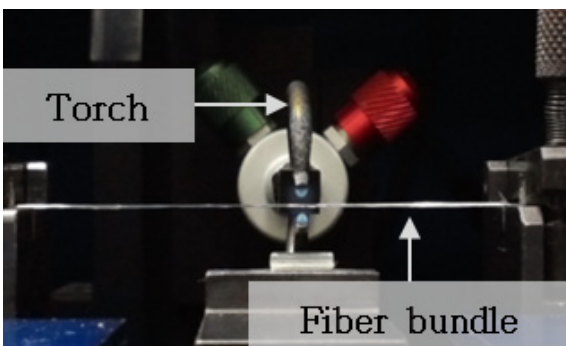
그림 2(a)는 펌프광 결합기의 광섬유 다발을 제작하기 위해 자체 제작된 장비 사진을 나타낸다. 그림 2(b)와 같이 제작 장비는 광섬유 다발 용융 후 인장을 위한 이송 스테이지, 광섬유 다발에 열을 가하는 토치를 포함하는 열원부, 열원부에 가스 주입량을 조절하기 위한 제어부, 스테이지 구동을



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. (a) Photograph and (b) diagram of home-made equipment for tapering a fiber bundle. (c) Photograph of tapering a fiber bundle using torch. MFC: mass flow controller, PD: photo diode, LD: laser diode.

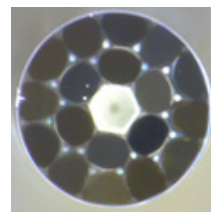
위한 제어부, 공정 모니터링을 위한 10배율의 대물렌즈가 장착된 디지털 카메라와 시스템 제어기로 구성되어 있다. 그림 2(c)는 제작 장비의 토치를 이용하여 광섬유 다발을 테이퍼링하는 사진을 나타낸다. 토치의 열원을 위한 가스는 산소 (O₂)와 액화석유가스(liquid petroleum gas, LPG)를 2:1의 혼합비로 사용하였으며, 가스의 유량을 조절하여 열원의 세기를 조절하였다.

제작 장비를 이용하여 광섬유 다발의 테이퍼링 길이에 따른 펌프광 결합기의 신호광 삽입손실 변화를 표 1에 나타내었다. 광섬유 다발의 테이퍼링 길이가 18 mm일 때 6.5%로 최소값을 얻을 수 있었으며, 손실 값이 테이퍼링 길이에 따라 변화하는 원인은 테이퍼링 길이에 따라 신호광 광섬유와 출력 광섬유의 개구수의 차이로 빔 커플링 조건이 맞지 않은 것으로 판단된다.

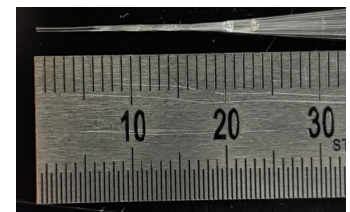
그림 3은 펌프광 광섬유를 적층하여 광섬유 다발을 형성한 후 절단된 단면 이미지(a), 측면 이미지(b)와 펌프광 결합기의 외부 형상(c)을 나타낸다. 펌프광 결합기는 광섬유 다발 조립체와 하우징으로 구성되어 있다. 광섬유 다발 조립체는 18개의 펌프광 광섬유와 1개의 신호광 편광유지 광섬유, 1개의 출력광 편광유지 광섬유로 (18+1)×1형으로 구성되었다. 펌프광 광섬유(Nuferm, MM-S105/125-22A)의 코어의 크기와 개구수는 각각 105 μm와 0.22이며, 클래드의 크기는 125 μm이다. 광섬유 증폭기에 신호광을 전송하기 위한 신호광 편광유지 광섬유(Nuferm, PLMA-GDF-15/130)의 코어와 클래드의 크기는 15 μm, 130 μm이다. 클래드 펌핑을 위해서 이중 클

Table 1. Signal loss according to the tapering length of fiber bundle

Parameter	Measurement data				
	22	21	20	19	18
Tapering length of fiber bundle (mm)	22	21	20	19	18
Signal light loss (%)	9.8	98.53	16.4	6.5	24.1



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. (a,b) Photograph of the cross section (a) and side (b) of the fabricated fiber bundle. (c) Photograph of the fabricated (18+1)×1 pump combiner.

래드를 가지는 대구경 출력 편광유지 광섬유(Nuferm, PLMA-GDF-20/400-M)의 코어의 크기와 개구수는 각각 20 μm 와 0.065이며, 클래드의 크기와 개구수는 각각 400 μm 와 0.46이다. 식 (1)과 같이 펌프광의 빔 커플링 손실을 최소화하기 위해 광섬유 다발과 출력 편광유지 광섬유의 개구수와 직경을 설계 및 제작하였다. 광섬유의 개구수와 직경으로 설계된 최대 적층 수와 최대 펌프광 광섬유의 개수는 각각 7층과 37개이다. 광섬유 다발은 펌프광 광섬유와 신호광 편광유지 광섬유로 구성되어 있으며, 전용 치구를 이용하여 광섬유들을 5층으로 적층하여 전용 장비로 테이퍼링 후 설계된 직경에서 절단하였다. 광섬유 다발과 출력 편광유지 광섬유는 광섬유 용착기(Fujikura, FSM-100P)를 이용하여 레이저 광을 이용하여 능동 정렬을 통해 편광 축 정렬 후 용착하였다. 제작된 광섬유 다발 조립체를 보호 및 손실에 의한 열을 방열하기 위해서 열전도율이 높은 알루미늄 재질의 하우징에 고정하였다. 하우징의 크기는 12(W) mm \times 90(L) mm \times 12(H) mm 이다.

III. 펌프광 결합기 출력특성 측정 장치

그림 4는 제작된 (18+1) \times 1 펌프광 결합기의 출력 특성을 측정하기 위한 실험 장치의 구성도(a)와 고출력 출력 특성을 측정하기 위한 실험 장치의 사진(b)이다. 신호광 삽입 손실의 측정에 사용된 신호 광원은 1064 nm 중심 파장의 자체 제작된 광섬유 레이저이며, 최대 출력은 25 W이다. 편광 소광률(polarization extinction ratio)은 반파장판(Newport, 10RP32-1064)과 편광자(Newport, 10GL08AR18)를 이용하여 측정하

였다. 고출력 펌프 광원으로는 중심 파장과 최대 출력이 각각 915 nm와 140 W인 18개의 레이저 다이오드(JDSU, ST-915B-100)를 방열하기 위해 냉각판에 고정하였으며, 전용 레이저 다이오드 드라이버를 제작하여 전류를 인가하였다. 레이저 다이오드의 출력 광섬유와 펌프광 결합기의 펌프광 광섬유를 용착하여 냉각판에 고정하였다. 펌프광 투과 출력을 측정할 때 출력 광섬유의 끝단면을 보호하기 위해 허용 출력이 3 kW 이하인 출사면이 무반사 코팅된 전용 엔드캡(end-cap, Optoskand, SCP100C10193)의 전송광섬유와 용착하여 지지대에 고정하였다. 펌프광 결합기의 내부에서 손실된 광으로 발생하는 하우징의 열을 효과적으로 냉각하기 위해서 펌프광 결합기의 하우징 바닥면에 그래파이트 시트를 사용하여 냉각판에 고정하였다. 냉각판에 유입되는 냉각수의 온도는 20°C로 설정하였다. 펌프광 결합기의 투과 출력을 측정하기 위해 허용 출력이 5 kW 이하인 출력 센서(Spiricon, 5000W-LP1-50)를 사용하였다. 펌프광 결합기의 하우징, 펌프광 광섬유 및 출력 광섬유 코팅의 온도를 열화상 카메라(Fluke, TiX620)를 이용하여 측정하였다.

IV. 펌프광 결합기 출력특성 측정 결과

본 연구에서 제작된 (18+1) \times 1 펌프광 결합기의 성능을 검증하기 위해 동일 사양의 해외 상용(ITF, PMC1811C10286) 제품과 그림 3(a)의 측정장치를 이용하여 표 2와 같이 성능을 측정하여 비교하였다. 그림 3(a)의 측정장치를 이용하여 상용 제품과 제작된 펌프광 결합기의 신호광 삽입손실, 펌프광 투과율, 편광 소광률을 측정하였다. (18+1) \times 1 펌프광 결합기의 신호광 삽입손실을 측정하기 위해, 선폭 20 GHz, 중심 파장 1064 nm 및 출력 25 W인 신호광 레이저를 이용하였다. 신호광 레이저의 출력 광섬유와 펌프광 결합기의 입력 광섬유의 코어/클래드는 15/130 μm 의 편광유지 이중 클래드로 서로 용착하여 연결하였으며, 20/400 μm 의 출력 광섬유의 끝단면을 대구경 광섬유 절단기(Vytran, LDC-400)를 이용하여 절단 후 출력센서에 정렬하였다. 20 W의 출력을 신호광 광섬유로 입사한 후 출력센서로 측정한 펌프광 결합기의 출력 광섬유의 출력은 18.7 W로 신호광 삽입손실은 6.5%로 측정되었다. 출력 광섬유로부터 출력되는 빔을 초점 거리가 100 mm인 렌즈로 시준시킨 후 편광자와 반파장판을 이용하여 측정된 최대 출력과 최소 출력은 각각 17.5 W, 275 mW로 편광 소광률은 18.0 dB로 측정되었다. 표 2의 결과와 같이

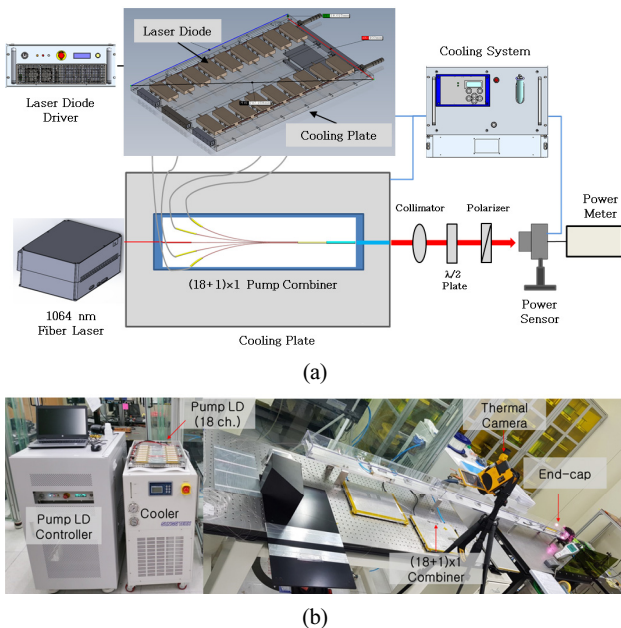


Fig. 4. (a) Experimental setup for measuring the signal loss, optical coupling efficiency and polarization extinction ratio. (b) Experimental setup for measuring the temperature of the fabricated (18+1) \times 1 pump combiner in the high-power transmittance.

Table 2. Comparison between the fabricated (18+1) \times 1 pump combiner and a commercial (18+1) \times 1 pump combiner

	Signal light loss (%)	Pump efficiency (%)	PER (dB)
Fabricated (18+1) \times 1 pump combiner	6.5	98.07	18.0
Commercial (18+1) \times 1 pump combiner	9.8	98.53	16.4

제작된 (18+1)×1 펌프광 결합기와 상용 제품의 성능이 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

표 3은 레이저 다이오드를 이용하여 펌프광 결합기의 포트별 펌프광 투과율을 측정한 결과이다. 파장이 915 nm인 레이저 다이오드의 120 W 출력으로 측정한 펌프광 결합기 18 채널의 평균 펌프광 투과율은 98.07%이며, 펌프광 투과율의 최대값과 최소값은 각각 98.5%, 98.0%로 측정되었다.

제작된 (18+1)×1 펌프광 결합기의 고출력 투과 출력을 측정하기 위하여 그림 4(b)와 같이 실험장치를 구성하였다. 파장이 915 nm인 18개의 레이저 다이오드의 출력 광섬유와 (18+1)×1 펌프광 결합기의 18개 펌프광 광섬유는 용착하여 연결하였다. 그림 5는 고출력 광섬유 레이저에 적용하기 전에 고출력에서 (18+1)×1 펌프광 결합기의 내구성을 검증하기 위해 58분 동안 측정된 펌프광의 투과된 출력을 나타낸다. 펌프광 레이저 다이오드의 총 입사 출력이 2,087 W일 때, 펌프광 결합기의 투과된 출력이 2,002 ± 4.3 W로 측정되었다.

그림 6은 (18+1)×1 펌프광 결합기의 투과 출력이 2,002 W일 때의 온도를 열화상 카메라로 측정한 이미지 결과이다. 펌프광 결합기의 하우징의 온도는 초기 온도 25.6°C에서 30.7°C로 출력에 따라 온도가 0.003°C/W의 비율로 상승하였으며, 펌프광 결합기에서 최고 온도로 측정된 출력 광섬유 코팅부의 온도는 34.8°C로 투과 출력에 따라 온도가 0.005°C/W의 비율로 상승하였다. 출력 광섬유의 코팅부에서의 발열의 원인은 광섬유 다발과 출력 광섬유의 용착 손실 및 개구수 차이로 인해 손실된 광에 의해서 발생된다. 고출력 광섬유 레이저를 장시간 운용 시에는 광섬유의 코팅부의 온도가 80°C 이하가 되도록 사용하여야 한다^[16].

V. 결 론

본 연구에서는 고출력 광섬유 레이저의 핵심 부품인 (18+1)×1 펌프광 결합기를 국내 제작하여, 전용 성능측정 장비를 이용하여 출력특성을 측정하였다. 자체 제작한 광섬유 다발 제작 장비를 이용하여 18 mm 광섬유 다발의 길이에서 6.5% 신호광 손실로 측정되었다. (18+1)×1 펌프광 결합기는 전치 증폭기의 신호광 전송과 펌프광 전송을 위해 1개의 편광유지 신호광 광섬유와 18개의 펌프광 광섬유로 이뤄진 광섬유 다발과 주 증폭기로 신호광과 펌프광을 전송하기 위한 20 μm의 코어 직경과 400 μm의 클래드 직경을 가진 편광유지 출력 광섬유를 서로 용착하여 제작되었다.

제작된 (18+1)×1 펌프광 결합기의 성능을 검증하기 위해 상용 제품과 출력 특성을 측정하여 비교하였다. 제작된 (18+1)×1 펌프광 결합기의 삽입손실, 펌프광 투과율과 편광 소광률은 각각 6.5%, 98.07%, 18.0 dB로 상용제품과 출력 성능이 유사하게 측정되었다. 고출력에서의 장시간 동안 동작에 대한 내구성을 검증하기 위해, 제작된 (18+1)×1 펌프광 결합기에 2,087 W의 고출력의 펌프광을 58분 동안 입사시켜 최대 온도를 측정하였다. (18+1)×1 펌프광 결합기의 투과 출력이 2,002 W일 때, 펌프광 결합기의 최고 온도는 출력 광섬유의 코팅에서 34.8°C로 측정되었으며, 투과 출력에 따라 온도는 0.005°C/W의 비율로 상승하였다. 제작된 (18+1)×1 펌프광 결합기의 발열은 광섬유 다발과 출력 광섬유의 용착 손실에서 발생하는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 본 연구에서 제작된 펌프광 결합기를 고출력 편광유지 광섬유 레이저에 적용 가능함을 보여준다.

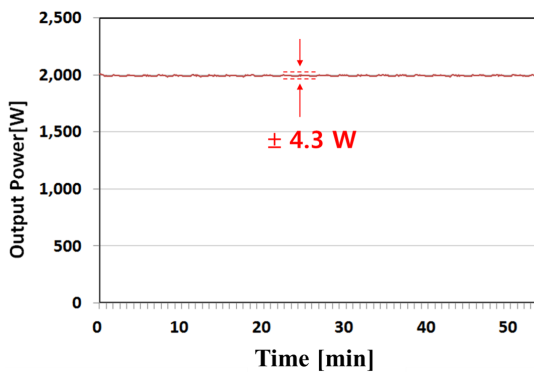


Fig. 5. Transmittance power of the fabricated (18+1)×1 pump combiner during 58 minutes.

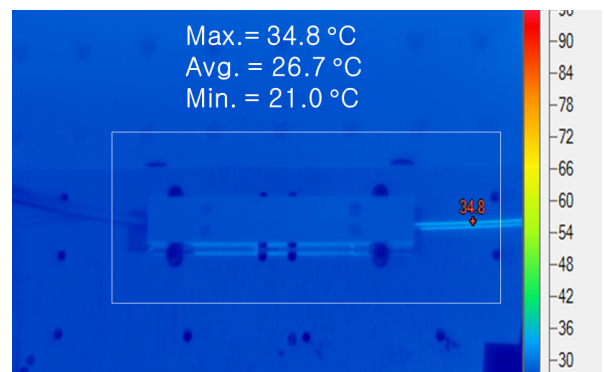


Fig. 6. Thermal image of the fabricated (18+1)×1 pump combiner at 2,002 W output power after 58 minutes.

Table 3. Optical coupling efficiencies of the fabricated (18+1)×1 pump combiner

	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4	Port 5	Port 6	Port 7	Port 8	Port 9
Output power (W)	117.9	117.9	118.0	117.8	118.0	117.7	118.1	117.6	117.9
Efficiency (%)	98.25	98.25	98.33	98.17	98.33	98.08	98.42	98.00	98.25
	Port 10	Port 11	Port 12	Port 13	Port 14	Port 15	Port 16	Port 17	Port 18
Output power (W)	117.8	118.0	117.7	117.6	117.9	118.1	118.2	118.1	118.0
Efficiency (%)	98.17	98.33	98.08	98.00	98.25	98.42	98.50	98.42	98.33

References

1. E. Shcherbakov, V. Fomin, A. Abramov, A. Ferin, D. Mochalov, and V. P. Gapontsev, "Industrial grade 100 kW power CW fiber laser," in *Proc. Advanced Solid State Lasers Congress* (Optical Society of America, France, Oct. 2013), paper AT4A.2.
2. V. Fomin, M. Abramov, A. Ferin, A. Abramov, D. Mochalov, N. Platonov, and V. Gapontsev, "10 kW single mode fiber laser," in *Proc. International Symposium on High-Power Fiber Lasers and Their Applications* (Russia, St. Petersburg, Jun. 2010), SyTu-1.3.
3. 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).
4. F. Stutzki, F. Jansen, T. Eidan, A. Steinmetz, C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tunnermann, "High average power large-pitch fiber amplifier with robust single-mode operation," *Opt. Lett.* **36**, 689-691 (2011).
5. 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).
6. N. A. Naderi, A. Flores, B. M. Anderson, and I. Dajani, "Kilowatt-level narrow-linewidth monolithic fiber amplifier based on laser gain competition," *Proc. SPIE* **9728**, 972804 (2016).
7. F. Chen, J. Ma, C. Wei, R. Zhu, W. Zhou, Q. Yuan, S. Pan, J. Zhang, Y. Wen, and J. Dou, "10 kW-level spectral beam combination of two high power broad-linewidth fiber lasers by means of edge filters," *Opt. Express* **25**, 32783-32791 (2017).
8. Y. H. Park, Y. S. Youn, M. W. Jung, C. S. Jun, B.-A. Yu, and W. J. 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).
9. F. Gonthier, L. Martineau, N. Azami, M. Faucher, F. Seguin, D. Stryckman, and A. Villeneuve, "High-power all-fiber components: The missing link for high power fiber lasers," *Proc. SPIE* **5335**, 266-276 (2004).
10. M.-A. Lapointe, S. Chatigny, M. Piché, M. Cain-Skaff, and J.-N. Maran, "Thermal effects in high-power CW fiber laser," *Proc. SPIE* **7195**, 71951U (2009).
11. Q. Xiao, H. Ren, X. Chen, P. Yan, and M. Gong, "Tapered fiber bundle 7×1 end-pumping coupler capable of high power CW operation," *IEEE Photonics Technol. Lett.* **25**, 2442-2445 (2013).
12. J. Wu, Y. Sun, Y. Wang, T. Li, Y. Feng, and Y. Ma, "The study of the thermally expanded core technique in end-pumped $(N+1) \times 1$ type combiner," *Proc. SPIE* **9255**, 925501 (2015).
13. B. Seigny, P. Poirier, and M. Faucher, "Pump combiner loss as function of input numerical aperture power distribution," *Proc. SPIE* **7195**, 719523 (2009).
14. B. Wang and E. Mies, "Review of fabrication techniques for fused fiber components for fiber lasers," *Proc. SPIE* **7195**, 71950A (2009).
15. I. S. Choi, J. Park, H. Jeong, J. W. Kim, M. Y. Jeon, and H. S. Seo, "Fabrication of 4×1 signal combiner for high-power lasers using hydrofluoric acid," *Opt. Express* **26**, 30667-30677 (2018).
16. M. A. Lapointe, S. Chatigny, M. Piché, M. C. Skaff, and J. N. Maran, "Thermal effects in high power CW fiber lasers," *Proc. SPIE* **7195**, 71951U (2009).