

### 3-channel Tiled-aperture Coherent-beam-combining System Based on Target-in-the-loop Monitoring and SPGD Algorithm

Youngchan Kim<sup>1</sup>, Youngsun Yun<sup>1</sup>, Hansol Kim<sup>2</sup>, Hanbyul Chang<sup>2</sup>, Jaedeok Park<sup>4</sup>, Yunjin Choe<sup>4</sup>, Jeongkyun Na<sup>2</sup>, Joochan Yi<sup>2</sup>, Hyungu Kang<sup>2</sup>, Minsu Yeo<sup>2</sup>, Kyuhong Choi<sup>1</sup>, Young-Chul Noh<sup>1</sup>, Yoonchan Jeong<sup>2,3</sup>, Hyuk-Jae Lee<sup>2,3</sup>, Bong-Ahn Yu<sup>1</sup>, Dong-Il Yeom<sup>4,5</sup>, and Changsu Jun<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>Advanced Photonics Research Institute, GIST, 123, Cheomdan-gwagiro, Buk-gu, Gwangju 61005, Korea

<sup>2</sup>Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea

<sup>3</sup>ISRC, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea

<sup>4</sup>Department of Energy Systems Research, Ajou University, 206, World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon 16499, Korea

<sup>5</sup>Department of Physics, Ajou University, 206, World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon 16499, Korea

(Received November 24, 2020; Revised December 8, 2020; Accepted December 8, 2020)

We have studied a tiled-aperture coherent-beam-combining system based on constructive interference, as a way to overcome the power limitation of a single laser. A 1-watt-level, 3-channel coherent fiber laser and a 3-channel fiber array of triangular tiling with tip-tilt function were developed. A monitoring system, phase controller, and 3-channel phase modulator formed a closed-loop control system, and the SPGD algorithm was applied. Eventually, phase-locking with a rate of 5–67 kHz and peak-intensity efficiency comparable to the ideal case of 53.3% was successfully realized. We were able to develop the essential elements for a tiled-aperture coherent-beam-combining system that had the potential for highest output power without any beam-combining components, and a multichannel coherent-beam-combining system with higher output power and high speed is anticipated in the future.

**Keywords:** Interference, Tiled-aperture coherent beam combining, Fiber laser, SPGD algorithm

**OCIS codes:** (030.1670) Coherent optical effects; (060.3510) Lasers, fiber; (070.7345) Wave propagation; (140.3298) Laser beam combining

### 목표물 신호 모니터링 및 SPGD 알고리즘 기반 3 채널 타일형 결맞음 빔결합 시스템 연구

김영찬<sup>1</sup> · 윤영선<sup>1</sup> · 김한솔<sup>2</sup> · 장한별<sup>2</sup> · 박재덕<sup>4</sup> · 최윤진<sup>4</sup> · 나정균<sup>2</sup> · 이주한<sup>2</sup> · 강현구<sup>2</sup> · 여민수<sup>2</sup> · 최규홍<sup>1</sup> · 노영철<sup>1</sup>  
정윤찬<sup>2,3</sup> · 이혁재<sup>2,3</sup> · 유봉안<sup>1</sup> · 염동일<sup>4,5</sup> · 전창수<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>광주과학기술원, 고등광기술연구소

Ⓞ 61005 광주광역시 북구 첨단과기로 123

<sup>2</sup>서울대학교, 전기정보공학부

Ⓞ 08826 서울특별시 관악구 관악로 1

<sup>3</sup>서울대학교 반도체공동연구소

Ⓞ 08826 서울특별시 관악구 관악로 1

<sup>4</sup>아주대학교 에너지시스템학과

Ⓞ 16499 경기도 수원시 영통구 월드컵로 206번길

<sup>†</sup>E-mail: changsu.jun@gist.ac.kr, ORCID: 0000-0003-0585-0517

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

(2020년 11월 24일 받음, 2020년 12월 8일 수정본 받음, 2020년 12월 8일 게재 확정)

단일 레이저의 출력 한계를 뛰어넘기 위한 빔결합 방법으로서, 보강간섭 원리를 이용한 타일형 결맞음 빔결합 시스템에 대해 연구하였다. 와트급 출력의 3 채널 결맞음 광섬유 레이저 및 삼각형 배치의 팁-틸트(tip-tilt) 기능을 갖춘 3 채널 출력단을 자체제작 하였다. 모니터링 시스템, 위상제어기, 3 채널 위상변조기 간의 궤환 제어 시스템(closed-loop system)을 구성하고 SPGD 알고리즘을 적용하여, 위상잡음 속도 5~67 kHz, 이상적인 계산값 대비 중심부 광세기 효율 53.3%의 성공적인 3 채널 위상잡음을 구현하였다. 빔결합 소자가 필요 없고, 가장 고출력 가능성을 가진 타일형 결맞음 빔결합을 위한 요소기술 개발이 완료되어, 향후 다채널, 고출력, 고속 제어 연구로 이어질 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** 간섭, 타일형 결맞음 빔결합, 광섬유 레이저, SPGD 알고리즘

**OCIS codes:** (030.1670) Coherent optical effects; (060.3510) Lasers, fiber; (070.7345) Wave propagation; (140.3298) Laser beam combining

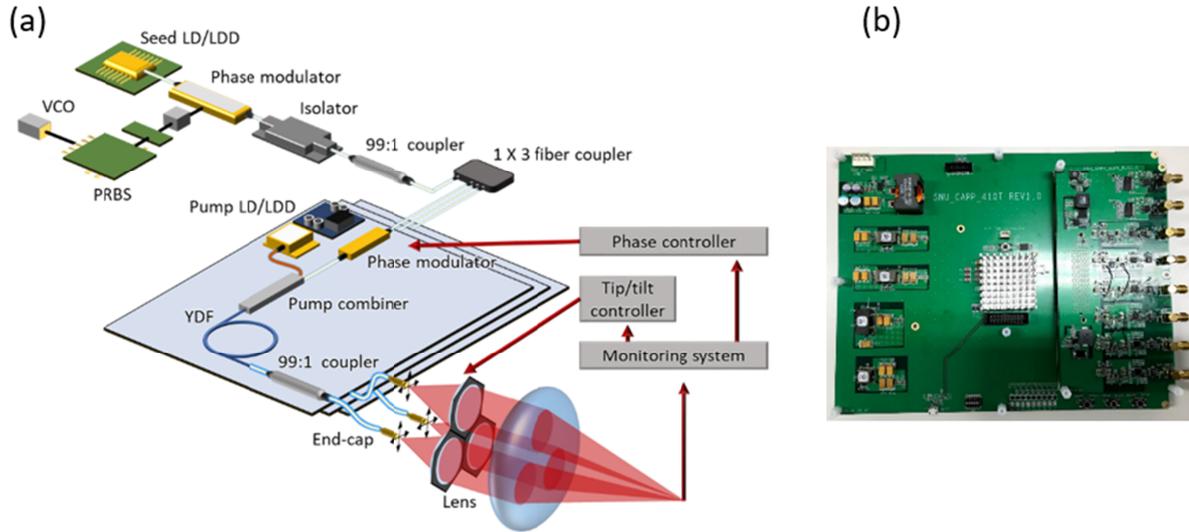
## I. 서 론

단일 레이저의 출력 한계를 극복하기 위해 여러 개의 레이저를 결합하는 연구가 국내외적으로 많이 이루어지고 있다<sup>[1-4]</sup>. 특히 광섬유 레이저는 분리된 광학부품을 이용한 빔 정렬 없이 광섬유 부품 간 용착을 통해 제작하기 때문에 유지관리에 좋고, 일반적으로 소형, 경량의 장점을 가지는데, 광섬유 부품 및 광섬유 레이저 기술의 발달로 좋은 빔품질의 고출력 광섬유 레이저가 소개되면서, 출력 한계를 더욱 뛰어넘기 위한 빔결합 연구 또한 활발히 진행되고 있다<sup>[1-4]</sup>. 높은 빔품질의 고출력 광섬유 레이저는 산업용 근거리 응용분야에서는 광학계의 부담이 줄어들 수 있고, 더 효율적인 레이저빔 집속 효과를 볼 수 있다. 또한 무선 광통신, 국방, 우주 분야 등 레이저 빔의 원거리 전송이 필요한 응용에 매우 유용하다.

대표적인 빔결합 방법으로는 여러 개의 레이저를 단순히 한 목표지점에 조사하는 공간 빔결합이 있고, 프리즘 혹은 회절 격자의 색깔에 따른 각도 변화 원리를 역으로 이용하는 파장 빔결합이 있다. 이 방법들은 단순 중첩 혹은 다른 파장의 레이저들을 결합하는 비결맞음 방식인데 반해, 여러 레이저의 결맞음을 유지한 채로 빔결합을 할 경우에는 보강간섭에 의해 첨두 광세기가 결합 레이저 개수( $N$ )의 제곱에 비례( $N^2$ )하여 증가하는 효과를 꾀할 수 있다. 이러한 결맞음 빔결합 방식은 레이저 시스템 구성이 까다로워 현재 비결맞음 방식들만큼의 출력을 선보이지는 못하고 있지만, 가장 고출력 가능성으로 인해 여러 해외 그룹에서 경쟁적으로 연구 개발이 이루어지고 있다<sup>[5-11]</sup>.

본 연구에서는 기술적 난이도는 높지만 고출력 가능성 또한 가장 높은 타일형(tiled-aperture) 결맞음 빔결합 시스템

을 개발하였다. 협대역 선풍을 가진 주공진기(master oscillator)를 3 채널로 분배하고 각 채널 간 광경로길이(optical path length) 차이가 결맞음 길이 이내가 되게 함으로써 결맞음을 유지하였다. 3 채널 출력단은 광섬유 엔드캡(end-cap)을 X-Y 방향으로 팁-틸트 할 수 있는 구조로 자체제작 하였다. 본 실험에서 목표물은 반사거울을 사용하였다. 목표물에서 돌아오는 신호를 모니터링하여 FPGA (field programmable gate array) 제어기의 입력신호로 사용하고, 각 채널에 위치한 위상변조기 인가전압을 제어기의 출력신호로 사용하는 target-in-the-loop 시스템<sup>[6]</sup>을 구성하였고, 인공지능 알고리즘의 일종인 SPGD (stochastic parallel gradient descent) 알고리즘<sup>[3,6,8,12-14]</sup>을 통해 각 채널간 위상잡음을 최적화하였다. 고출력 레이저로의 응용가능성을 고려하여 광섬유 tip이 아니라 패키징 된 광섬유 엔드캡을 팁-틸트<sup>[10,11,15-17]</sup> 할 수 있도록 자체 설계 및 제작한 3 채널 출력단을 사용하여 국내에서는 처음으로 타일형 결맞음 빔결합 시스템을 개발하였고 그 성능을 실험하였다. 이와 같이 개발된 결맞음 빔결합 시스템 요소기술은 향후 다채널, 고출력, 고속 제어 연구로 이어질 경우, 별도의 빔결합 소자 없이 고품질의 가장 고출력 레이저 성능을 기대할 수 있다. 또한 다채널 간 위상제어는 국소적인 위상변화를 주거나 전체적인 파면 기울기를 변경할 수도 있어, 별도의 적응광학계 없이 적응광학 역할을 포함할 수 있는 장점<sup>[1,3]</sup>이 있어 앞으로의 연구가 기대되는 분야이다. 이러한 결맞음 빔결합 시스템은 산업용 레이저 가공, 무선 광통신, 국방용 고에너지 레이저, 펨토초 레이저 결맞음 빔결합을 통한 기초과학용 고에너지 레이저 등에 활용될 수 있다.



**Fig. 1.** (a) Schematic of 3-channel fiber laser systems for coherent beam combining. (b) FPGA board for phase control. LD, laser diode; LDD, laser diode driver; VCO, voltage controlled oscillator; PRBS, pseudo-random binary sequence; YDF, ytterbium-doped fiber; FPGA, field programmable gate array.

## II. 3 채널 결맞음 빔결합 시스템

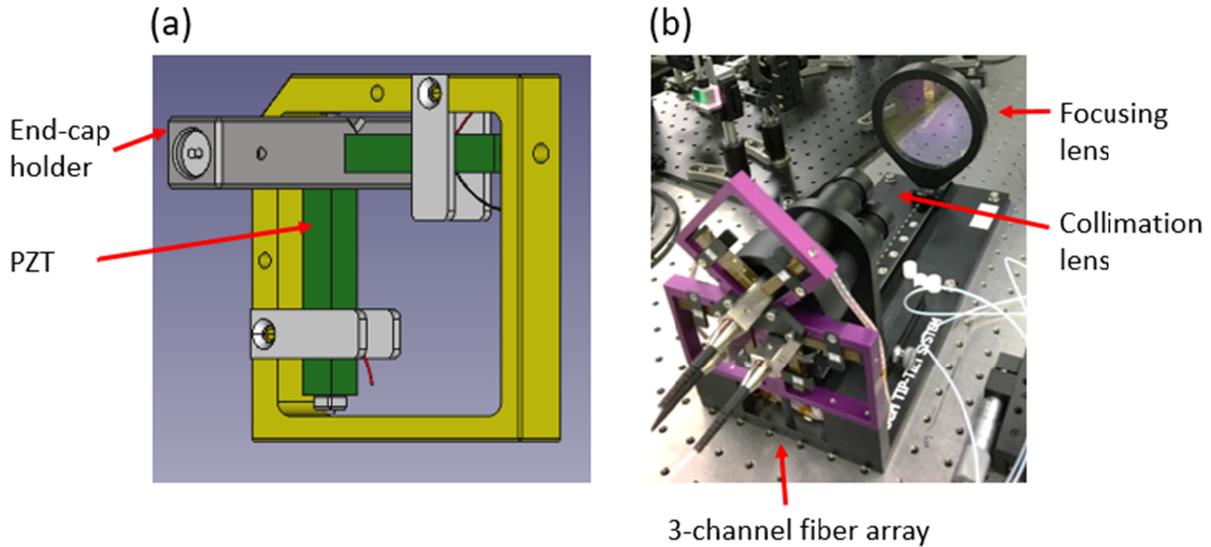
본 연구에서는 결맞음 빔결합 시스템의 요소기술을 개발하고 향후 확장성을 검토해 보기 위해, 우선 와트급 3 채널 편광유지 광섬유 레이저를 기반으로 시스템을 구성하였다. 레이저 구성 및 3 채널 출력단, 모니터링 시스템, 위상제어기에 대해 설명하고자 한다.

그림 1(a)은 결맞음 빔결합을 위한 광섬유 레이저 개략도이다. 출력이 약 100 mW이고 파장이 1064 nm인 편광유지, DBR (distributed Bragg reflector) 레이저 다이오드(laser diode, LD)를 시드레이저로 사용하고, PRBS (pseudo-random binary sequence) 위상변조를 통해 레이저 선폭을 조절하였다<sup>[18,19]</sup>. 위상변조 회로 구성은, 500 MHz 중심 주파수의 VCO (voltage controlled oscillator), PRBS 신호 생성 보드, RF (radio frequency) 증폭기, 바이어스 티(bias-T) 그리고 위상 변조기로 이루어져 있다. 위상변조 된 레이저는 약 443 MHz의 유효선폭을 가지면서 선폭 모양에 따라 최소 215 mm 이상의 결맞음 길이를 가지기 때문에, 3 채널 간 광경로 차이가 이 범위 이내일 경우에는 충분히 보강간섭을 만들 수 있다. 또한 향후 kW 급 출력으로 확장할 경우, SBS (stimulated Brillouin scattering) 비선형현상을 완화하기 위해 선폭을 조절하게 된다<sup>[20,21]</sup>. 대역투과필터 일체형 광고립기(optical isolator)를 사용하여, 주증폭기에서 역방향으로 진행되는 레일리 산란 및 ASE (amplified spontaneous emission) 광을 차단하였다. 99:1 광섬유 커플러는 시드광 및 역방향으로 진행되는 광신호 모니터링에 사용한다. 이후 1x3 광섬유 분배기를 통해 3 채널로 분리한 후 각각 광섬유

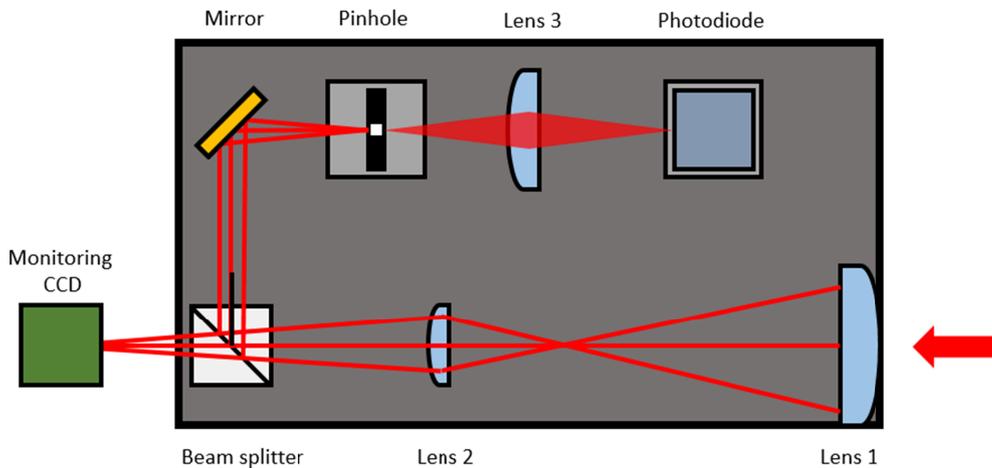
주증폭기를 구성하였다. 각 주증폭기 채널은 채널 간 위상차극을 위해 미세 위상제어를 할 수 있는 위상변조기를 포함하고 있고, 이는 FPGA 위상제어기의 출력단과 연결된다. 위상 변조기를 지난 레이저빔은 편광유지 10/125 μm 이터븀 광섬유를 통해 와트급 출력으로 증폭된다. 그리고 주증폭기 신호 모니터링을 위한 99:1 광섬유 커플러를 지나 광섬유 엔드캡으로 마무리하였다. 이후 각 엔드캡은 삼각형 모양으로 배치된 3 채널 출력단과 조립된 후 시준렌즈, 집속렌즈를 거쳐 목표물에 조사된다.

결맞음 빔결합을 위해서는 3 채널 간 위상을 맞춘 후 유지를 해야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 target-in-the-loop 시스템을 적용하였다<sup>[6,15]</sup>. 즉 각 레이저 채널의 위상을 미리 측정된 후 맞추어 조사하는 방식이 아니라, 목표물에서 돌아오는 신호를 모니터링 하면서, 그 신호가 최대가 되도록 3 채널 위상변조기를 실시간으로 제어해 주는 방식이다. 이를 위해서는 모니터링 시스템, 최소 1개의 입력단자와 최소 3개의 출력 단자를 가지는 위상제어기(그림 1(b))가 필요하다. 본 실험에서는 우선 반사거울을 목표물로 사용하였고, 향후 산란체를 사용할 예정이다.

목표물에서 반사 혹은 산란된 신호는 레이저 출력단 옆에 구성된 모니터링 시스템을 통하여 검출한다. 그림 1(b)와 같이 FPGA 보드 형태로 제작한 위상제어기는 모니터링 광검출기 전압 신호를 입력신호로 받은 후 디지털 신호로 변환하고, 특정 알고리즘에 의해 계산된 출력 신호는 다시 아날로그 전압 신호로 변환된 후 3 채널 증폭기에 위치한 위상변조기들에 인가된다. 3 채널 출력단 팁-틸트도 제어기를 통해 최적화할 수 있으나, 본 실험에서는 우선 수동으로 팁-틸트 증첩을 맞추었



**Fig. 2.** (a) Design of a fiber end-cap tilt system including two axis PZTs and (b) setup of a 3-channel fiber array for coherent beam combining. PZT, lead zirconate titanate.



**Fig. 3.** Monitoring setup for coherent beam combining. CCD, charge-coupled device.

고, 제어기는 3 채널 위상변조기에만 적용하였다. 향후 후속 연구에서는 3 채널 X-Y 틸트 또한 자동으로 제어할 예정이다. 위상제어에는 SPGD 알고리즘을 적용하였다<sup>[3,6,8,12-14]</sup>. 레이저빔 모드성분 분석 및 광섬유 레이저 능동제어 등에 최근 많이 이용되는 SPGD 알고리즘은 임의의 초기조건에서 시작하여, +/- 양방향으로 섭동을 주면서 더 나은 결과값을 도출하는 방향을 선택하고, 이 과정을 반복하면서 가장 최적의 결과를 얻는 방식으로서 인공지능에도 많이 적용되는 기본 알고리즘 중 하나이다. 본 논문에서는 결맞음 빔결합 시스템 및 통합실험 결과 위주로 기술하였고, 알고리즘에 대한 자세한 설명은 생략하였다.

그림 2는 3 채널 출력단(3-channel fiber array) 구조를

보여준다. 광섬유 엔드캡을 포함하여 하나의 틸트-틸트 가능한 출력단을 만들고, 이들 3개를 삼각형 배치하여 3 채널 출력단(3-channel fiber array)을 제작하였다. 그림 2(a)는 한 채널에 대한 모식도로서, 광섬유 엔드캡을 고정하는 지지대(holder), X-Y 방향으로 변위를 주기 위해 직각으로 배치된 PZT 한 쌍, PZT 움직임을 일정한 방향으로 가이드 하기 위한 볼베어링, 홈, 지지 기구부, 외형 기구부 등으로 구성되어 있다. 광섬유 엔드캡은 회전 후 나사로 고정할 수 있어, 3 채널 간 편광축을 맞출 수 있다. 이와 같은 구성으로 제작된 3 채널 출력단은 그림 2(b)와 같다. 광섬유 엔드캡에서 조사된 레이저빔은 1 인치 지름의 초점거리 100 mm 시준렌즈를 통해 평행광으로 변환하였다. 시준렌즈는 경통 기구부에 조립되어 있

고, 경통 회전을 통해 초점거리를 미세조정 후 고정하게 된다. 3 채널 배치는 내부 채움값(fill-factor)를 최대화하기 위해 삼각형 모양으로 구성하였다. 마지막으로 시준된 3 채널 레이저 빔은 4 인치 지름의 초점거리 1.4 m 집속렌즈를 통해 목표물에 집속되었다. 목표물에서 중첩된 3 채널의 레이저빔은 간섭 무늬 형상을 만들게 되고, 반사 혹은 산란된 신호를 모니터링 시스템에서 검출하게 된다.

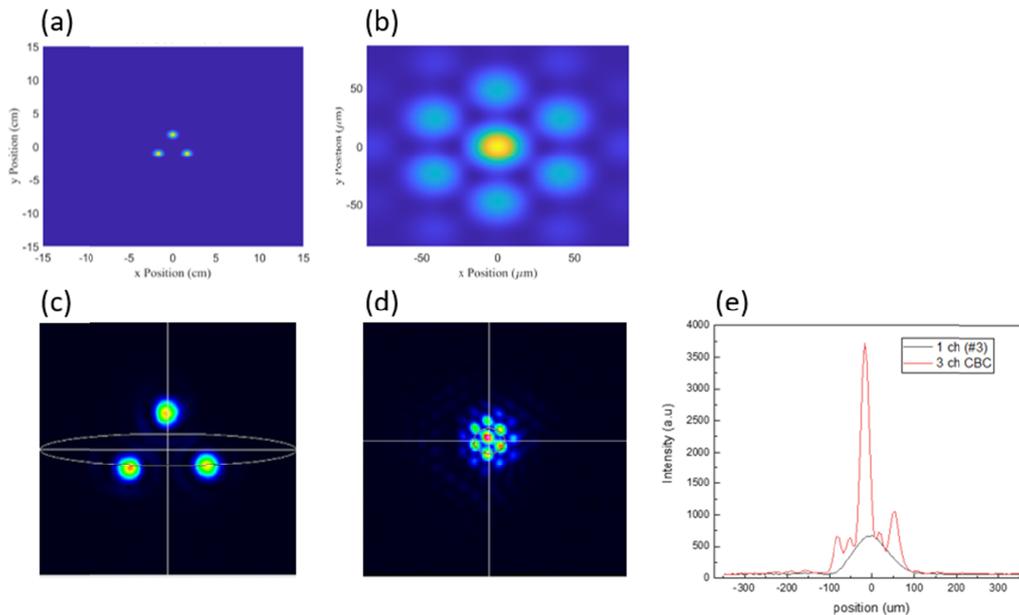
그림 3은 모니터링 시스템의 개략도이다. 결맞음 3 채널의 2차원 보강간섭 결과는 1개의 주엽(central lobe)과 육각 배치의 측엽(side lobe) 등으로 구성된다. 모니터링 시스템은 이러한 신호빔을 측정 편의상 확대하고, 주엽(central lobe)만을 핀홀(pinhole)로 분리한 후 광검출기로 측정하여 위상제어기 입력신호로 활용하게 된다. 이론적으로는 주엽(central lobe) 크기 혹은 그 절반 크기를 유효지름 내 출력(PIB, power-in-the-bucket)로 정의하곤 하는데, 본 실험 모니터링에서는 주엽(central lobe)보다 작은 크기로 핀홀 크기를 맞추었다. 목표물로부터 모니터링 시스템에 도달한 레이저 빔은 렌즈 1, 2를 통해 크기가 확대되고, 빔 분배기에서 빔형상 모니터링을 위해 일부 빔은 CCD (charge-coupled device)로 나눠지고, 대부분은 반사거울을 통해 핀홀로 입사한다. 본 실험에서는 50  $\mu\text{m}$  크기의 핀홀을 사용하였다. 핀홀을 지난 레이저빔은 광검출기(photodiode)에서 전압신호로 변환된 후 위상제어기 입력신호로 활용된다. 핀홀을 지난 레이저빔의 형상 관찰 및 안정성 등을 확인하기 위해, 추가적인 CCD를 설치하여 측정하기도 하였고, 광검출기 신호를 분기하여 오실로

스코프(oscilloscope) 혹은 RF (radio frequency) 스펙트럼 분석기 등으로 신호 세기 및 안정성 등을 측정하였다.

### III. 결맞음 빔결합 결과 및 토의

3 채널 결맞음 빔결합은 각 채널 출력 1 W로 실험을 진행하였다. 각 채널 레이저의 1 시간 동안의 출력 요동의 표준편차는 1% 이하로 측정되었다. 파장은 1064 nm, 편광소광비(PER, polarization extinction ratio)는 20~24 dB 이고, 빔품질은  $M^2 < 1.2$  로서 단일모드로 발진하였다. 출력단 시준렌즈 지름 대비 렌즈 간 간격을 의미하는 conformal 내부 채움값(fill-factor)은 1.29로 제작되었고, 출력단 시준렌즈 지름 대비 시준빔 크기를 의미하는 sub-aperture 내부 채움값(fill-factor)은 0.48로 측정되었다. 이론적으로는 0.86~0.88 근처에서 최고 빔결합 효율을 보이지만, 렌즈의 clear aperture 고려 및 모니터링 편의성을 위해 목표물 위치에서의 빔 크기를 크게 하기 위해 본 실험에서는 위와 같은 값으로 실험이 진행되었다.

먼저 각 채널 레이저빔을 목표물 위치에서 중첩시키지 않은 상태에서, 동일한 크기 및 출력이 되도록 레이저 및 출력단 광정렬을 미세조정하였다. 이후 출력단 틸-틸트를 수동으로 미세조정하여 2 채널, 3 채널 순서로 중첩하면서 이상적인 간섭 무늬에 가까워지도록 중첩을 조절하였다. 이후에는 모니터링 시스템의 광검출기 신호를 기반으로 위상제어기 알고리즘 변수들을 최적화하여 위상잠금을 달성하고자 하였다.



**Fig. 4.** Result of coherent beam combining (CBC). Simulation of (a) the beam geometry at the output of 3-channel fiber array and (b) the combined beam pattern at the target, and the measured ones (c) before and (d) after overlapping for CBC. (e) Peak intensity ratio between 1 beam and coherently combined 3 beams.

그림 4는 3 채널 결맞음 빔결합 시뮬레이션 및 실험결과를 보여준다. 그림 4(a)는 본 실험에서 제작된 출력단으로부터 나오는 빔 형상을 나타내고, 그림 4(b)는 목표물 위치에서 이상적으로 결맞음 빔결합 된 빔 패턴을 보여준다. 이때 중심부에서의 광 세기는  $922.5 \text{ W/mm}^2$ 로 계산되었다. 그림 4(c)와 4(d)는 목표물 위치에서 3 채널의 중첩 전/후의 측정 결과를 보여준다. SPGD 알고리즘을 통해 위상잠금을 하기 전에는 그림 4(d)와 같은 간섭 패턴이 불안정하게 흔들리는 것을 확인할 수 있었고, SPGD 알고리즘으로 위상잠금 후에는 간섭 패턴이 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 그림 4(e)는 1 채널 레이저빔과 3 채널 결맞음 빔결합 된 레이저빔의 광 세기를 동시에 보여준다. 3 채널 보강간섭 시, 이상적으로는 9 배( $=3^2$ )의 중심부 광 세기 비율을 보여야 하는데, 본 실험에서는 5.58배의 비율로 측정되었다. 향후 출력단 틸트-틸트를 자동으로 조절하여 3 채널 간 중첩도를 개선하고, sub-aperture 내부 채움값(fill-factor)을 높일 경우 이상적인 비율에 가깝게

효율을 향상시킬 수 있다. 측정된 집속빔 크기와 중심부 광 세기 비율을 이용한, 그림 4(d) 실제 간섭빔의 중심부 광 세기는  $491.7 \text{ W/mm}^2$ 를 얻을 수 있었다. 그림 4(b)의 이상적인 경우와 비교하여 약 53.3%의 효율을 보이는 것을 알 수 있다.

SPGD 알고리즘을 통해 3 채널 간에 위상잠금이 완료되면, 간섭 패턴의 흔들림이 현격히 줄어들면서 모니터링 시스템의 핀홀을 통과하는 간섭빔의 출력 또한 안정적으로 유지된다. 이는 광검출기를 오실로스코프에 연결하여 시간축에서의 흔들림 정도로도 확인할 수 있고, 그림 5와 같은 RF 스펙트럼 측정 결과로도 확인할 수 있다. 즉 SPGD 알고리즘 적용 전에는 검은색과 붉은색 데이터 사이에서 약 20 dB 이상 불규칙하게 흔들리는데 반해, 알고리즘 적용 후에는 붉은색 데이터 위치에서 안정적인 RF 스펙트럼을 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 0~1 MHz 주파수 영역뿐만 아니라, 그래프 내부에 작은 크기로 삽입된 0~1 GHz 주파수 영역에서도 동일한 현상을 보였다. RF 스펙트럼에서 관측되는 peak 주파수들은 위상제어 보드와 스펙트럼 분석기를 BNC T-분배기로 동시에 연결함으로 인해 발생하는 성분들로서, 시스템 성능과는 관계없음을 확인하였다.

본 실험의 타일형 결맞음 빔결합 시스템은 불안정하게 흔들리는 다채널 간 위상을 일정하게 유지하여 빔결합 상태를 유지함과 더불어, 다채널 레이저빔이 자유 공간을 진행할 때 대기요동에 의한 국소적 위상변화 또한 어느 정도 보상할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 하지만 이러한 장점을 유효하게 활용하기 위해서는 SPGD 알고리즘에 의한 위상잠금 속도가 충분히 빨라야 한다. 그림 6은 이러한 위상잠금 속도의 한 예를 보여준다. 위상제어 보드에 내장된 약 40 MHz (25 ns/tic)의 고속 데이터 저장 기능을 활용하여 SPGD 알고리즘 작동 전후 약 0.5 ms 동안의 데이터를 기록하였다. 알고리즘 작동 후 위상잠금이 될 때까지 약 67  $\mu\text{s}$ 가 걸린 것을 알 수 있고, 이는 약 16 kHz의 위상잠금 속도에 해당한다. 다양한 경우에 대한 반복실험 결과, 현재 시스템 구성에서는 5~67 kHz 범위의 위상잠금 속도를 얻을 수 있었다.

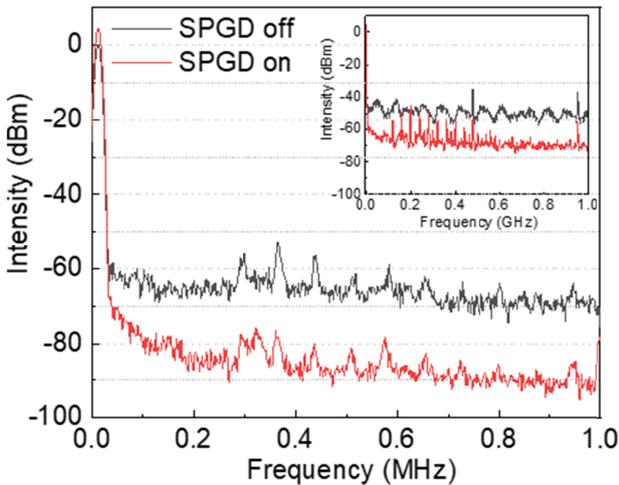


Fig. 5. RF spectrum before and after SPGD algorithm is applied. The frequency range of the inset is up to 1 GHz.

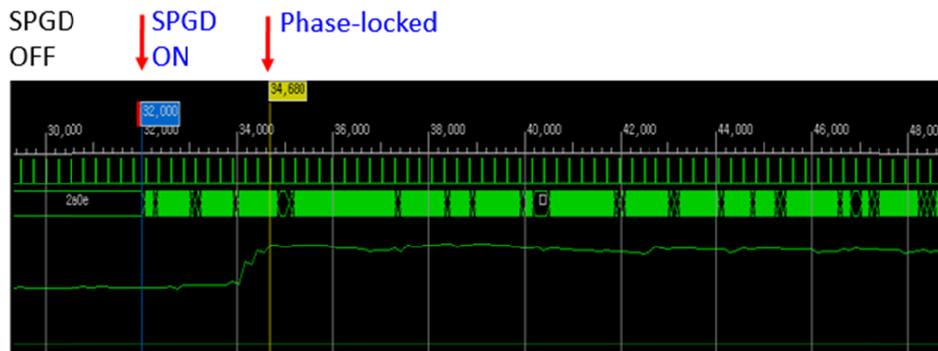


Fig. 6. PIB signal before and after SPGD algorithm is applied. PIB, power-in-the-bucket; SPGD, stochastic parallel gradient descent.



Fig. 7. PIB signal on a long-term scale.

SPGD 알고리즘 적용 전후 30초 이상의 긴 시간 동안의 광검출기 신호 변화는 그림 7과 같다. 모니터링 시스템의 편환을 통과 후 광검출기에 측정된 유효지름 내 출력(PIB) 신호가 알고리즘 적용 전에는 100~270 mV 사이에서 매우 불안정하게 흔들리는 것을 알 수 있고, 알고리즘 적용 후에는 위상잠금되어 평균 270 mV의 값을 유지하는 것을 알 수 있다. 본 논문에 자세히 기술하지는 않았지만 그림 7과 같은 결과를 얻기 위해, 광학부품 변경을 통한 모니터링 신호 세기 증가, 저잡음 광검출기로 교체, 몇 개의 신호값 평균을 통한 요동세기 완화 후 SPGD 알고리즘 적용, 위상변조기  $V_{2\pi}$  값과 위상제어 보드 출력전압 범위의 정수배 일치 등 많은 개선 작업을 거쳐 결과를 얻을 수 있었다. 한편 위상잠금 된 유효지름 내 출력(PIB) 세기가 이따금씩 낮은 값으로 떨어지는 것을 관측할 수 있는데, 위상잠금이 유지되는 30초 동안, 약 35회 발생하고 매 회 최대 100 ns 이내에 회복된다. 따라서 그 비율을 계산해 보면 0.000012%로서 무시할 만한 수준인 것을 알 수 있다. 그 원인으로서는, 먼저 순간적인 레이저 위상 변화가 있다. 즉 위상제어기 출력신호는 일정하게 유지되는 상황에서, 25 ns 이내에 순간적으로 위상이 변했다가 저절로 회복됨을 확인하였다. 또 다른 경우로는, SPGD 알고리즘 동작 중에, 위상제어 보드 출력전압이 경계지점에서 0 V로 순간적으로 변경되는 경우가 생기는데 이때 위상변조기의 위상 또한 순간적으로 변하면서 위상잠금이 일시적으로 풀리게 되고, 최대 100 ns 이내에 재수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 원인들은 SPGD 알고리즘과는 무관하게 발생하는 것을 알 수 있고, 앞서 언급한 비율과 같이 위상잠금 성능에 큰 영향을 미치지 않는다.

#### IV. 결 론

단일 레이저의 출력 한계를 뛰어넘기 위한 빔결합 방법의 하나로서, 타일형 결맞음 빔결합 시스템에 대하여 연구하였다. 시드레이저 공유형 3 채널 협대역 편광유지 광섬유 레이저를 제작하였고, 광섬유 엔드캡의 X-Y 방향 틸트-틸트 기능을 갖춘 3 채널 출력단을 자체제작 하였다. Target-in-the-loop

시스템을 적용하여 결맞음 빔결합을 이루기 위해, 목표물로부터의 신호 모니터링 시스템, 위상제어 보드, 3 채널 위상변조기 간의 궤환 제어 시스템을 구성하였다. 이와 같은 서브 시스템들을 통합 후, 위상제어기에서는 모니터링 입력신호를 극대화하기 위해, 3 채널 위상변조기의 위상을 실시간으로 최적화하는 SPGD 알고리즘을 구현하였다. 와트급 광섬유 레이저 출력에서 성공적으로 SPGD 알고리즘 기반 위상잠금을 달성할 수 있었고, 위상잠금 속도는 약 5~67 kHz, 이상적인 계산값 대비 중심부 광세기 효율은 53.3%를 달성하였다. 추후 출력단의 내부 채움값(fill factor)을 개선하고 틸트-틸트 자동제어 시스템까지 적용되면, 결합 레이저 개수의 제곱값에 더욱 가까운 중심부 광 세기를 얻을 수 있을 것으로 기대한다. 이와 같이 개발된 결맞음 빔결합 시스템 요소기술은 향후 다채널, 고출력, 고속 제어 연구로 이어질 경우, 별도의 빔결합 소자 없이 고품질의 가장 고출력 레이저 성능을 기대할 수 있다. 또한 다채널 위상제어를 통해 별도의 적응광학계 없이 적응광학 역할을 할 수 있는지 확인해 볼 수 있을 것이다. 이러한 결맞음 빔결합 시스템은 산업용 레이저 가공, 무선 광통신, 국방용 고에너지 레이저, 펄초 레이저 결맞음 빔결합을 통한 기초과학용 고에너지 레이저 등에 활용될 수 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 국방과학연구소(UD180040ID)의 지원으로 수행되었습니다.

#### References

1. R. A. Motes, *Introduction to High Power Fiber Lasers* (Directed Energy Professional Society, NM, USA, 2009).
2. S. J. Augst, S. M. Redmond, C. X. Yu, D. J. Ripin, T. Y. Fan, G. D. Goodno, P. A. Thielen, J. E. Rothenberg, and A. Sanchez-Rubio, "Coherent and spectral beam combining of fiber lasers," *Proc. SPIE* **8237**, 823704 (2012).
3. Z. Liu, X. Jin, R. Su, P. Ma, and P. Zhou, "Development status

- of high power fiber lasers and their coherent beam combination,” *Sci. China Inf. Sci.* **62**, 41301 (2019).
4. H. Jeong, K. H. Lee, J. Lee, D.-J. Kim, J. H. Lee, and M. Jo, “High-beam-quality 2-kW-class spectrally combined laser using narrow-linewidth ytterbium-doped polarization-maintaining fiber amplifiers,” *Korean J. Opt. Photon.* **31**, 218-222 (2020).
  5. D. C. Jones, A. J. Turner, A. M. Scott, S. M. Stone, R. G. Clark, C. Stace, and C. D. Stacey, “A multi-channel phase locked fibre bundle laser,” *Proc. SPIE* **7580**, 75801V (2010).
  6. T. Weyrauch, M. Vorontsov, J. Mangano, V. Ovchinnikov, D. Bricker, E. Polnau, and A. Rostov, “Deep turbulence effects mitigation with coherent combining of 21 laser beams over 7 km,” *Opt. Lett.* **41**, 840-843 (2016).
  7. M. A. Vorontsov and T. Weyrauch, “High-power lasers for directed-energy applications: comment,” *Appl. Opt.* **55**, 9950-9953 (2016).
  8. H. Chang, Q. Chang, J. Xi, T. Hou, R. Su, P. Ma, J. Wu, C. Li, M. Jiang, Y. Ma, and P. Zhou, “First experimental demonstration of coherent beam combining of more than 100 fiber lasers,” *Photon. Res.* **8**, 1943-1948 (2020).
  9. E. Shekel, Y. Vidne, and B. Urbach, “16 kW single mode CW laser with dynamic beam for material processing,” *Proc. SPIE* **11260**, 1126021 (2020).
  10. L. A. Beresnev, R. A. Motes, K. J. Townes, P. Marple, K. Gurton, A. R. Valenzuela, C. Williamson, J. J. Liu, and C. Washer, “Design of a noncooled fiber collimator for compact, high-efficiency fiber laser arrays,” *Appl. Opt.* **56**, B169-B178 (2017).
  11. L. Beresnev, A. Flores, R. Holten, A. Valenzuela, A. Taliaferro, A. Schweinsberg, K. Gurton, D. Ligon, C. Williamson, and S. Bilyk, “Multi-kW, uncooled densely packed fiber array for laser beam combining,” in *Proc. 2019 IEEE Research and Applications of Photonics in Defense Conference-RAPID* (Miramar Beach, FL, USA, August. 2019), pp. 1-4.
  12. Y. An, J. Li, L. Huang, L. Li, J. Leng, L. Yang, and P. Zhou, “Numerical mode decomposition for multimode fiber: from multi-variable optimization to deep learning,” *Opt. Fiber Technol.* **52**, 101960 (2019).
  13. K. Choi and C. Jun, “High-precision modal decomposition of laser beams based on globally optimized SPGD algorithm,” *IEEE Photon. J.* **11**, 7103110 (2019).
  14. R. Su, Y. Liu, B. Yang, P. Ma, X. Wang, P. Zhou, and X. Xu “Active polarization control of a 1.43 kW narrow linewidth fiber amplifier based on SPGD algorithm,” *J. Opt.* **19**, 045802 (2017).
  15. M. A. Vorontsov, T. Weyrauch, L. A. Beresnev, G. W. Carhart, L. Liu, and K. Aschenbach, “Adaptive array of phase-locked fiber collimators: analysis and experimental demonstration,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **15**, 269-280 (2009).
  16. D. Zhi, P. Ma, Y. Ma, X. Wang, P. Zhou, and L. Si, “Novel adaptive fiber-optics collimator for coherent beam combination,” *Opt. Express* **22**, 31520-31528 (2014).
  17. D. Zhi, Y. Ma, R. Tao, P. Zhou, X. Wang, Z. Chen, and L. Si, “Highly efficient coherent conformal projection system based on adaptive fiber optics collimator array,” *Sci. Rep.* **9**, 2783 (2019).
  18. 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).
  19. C. Jun, M. Jung, W. Shin, B.-A. Yu, Y. S. Yoon, Y. Park, and K. Choi, “818 W Yb-doped amplifier with <7 GHz linewidth based on pseudo-random phase modulation in polarization-maintained all-fiber configuration,” *Laser Phys. Lett.* **16**, 015102 (2019).
  20. 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).
  21. V. R. Supradeepa, “Stimulated Brillouin scattering thresholds in optical fibers for lasers linewidth broadened with noise,” *Opt. Express* **21**, 4677-4687 (2013).