

논문 2019-14-35

고해상도 카메라 기반 파장 빔 결합 시스템의 다중 광원의 모니터링과 파장 제어 기법 연구

(Control and Monitoring of Wavelengths in Spectral Beam Combining System Based on High Resolution Camera)

승지훈*, 이광현, 이정환
(Ji Hoon Seung, Kwang Hyun Lee, Jung Hwan Lee)

Abstract : Spectral Beam Combining (SBC) is used for a high-power fiber laser in order to overcome the power limitation of single fiber laser. In SBC, several laser beams with different wavelengths are combined to obtain a single-aperture beam by diffraction grating. The combining efficiency is dependent on a linewidth, beam quality and specific wavelength of each beam among others. In this paper, we consider the method of a wavelength monitoring and a feedback control of laser diodes used as seeds of laser beams to obtain optimum combining conditions. In order to measure the wavelengths of multi-beam, we use the high resolution camera and diffraction grating with $1,800l/mm$. The experiment results show the possibility of feedback control of a current and temperature of multi-seed laser diodes to obtain optimum wavelengths for SBC.

Keywords : High power laser, Spectral beam combining, Wavelength monitoring, Diffraction grating, Seed laser diode control

1. 서론

고출력 레이저는 정밀 가공, 기계, 측정, 전자 통신, 국방 등의 분야에 다양한 용도로 사용되고 있다 [1-4]. 다양한 레이저 발전 방법 중에서 광섬유 레이저는 작은 직경의 코어를 통해 발전하여 단일모드 빔 출력과 높은 빔 품질, 특정 파장의 출력 및 안정성, 효율 측면에서 매우 우수한 특징을 가진다 [1]. 하지만 고출력 광섬유 레이저는 유도 라만 산란, 유도 브릴루앙 산란과 같은 비선형 광학 효과, 모드 불안정성으로 인한 빔 품질 저하 등의 문제로 인해 단일 광섬유 레이저 시스템에서 기대할 수 있는 출력에 한계가 있다 [5]. 이러한 모듈 당 출력 한계는 다중 레이저 시스템을 결합하여 극복 가능하며, 그 방법으로는 자유공간에서 물리적으로 빔을 결합하는 비간섭성 빔 결합 (Incoherent Beam

*Corresponding Author (jehun@nate.com)

Received: Sep. 6, 2019, Revised: Sep. 18, 2019,

Accepted: Oct. 21, 2019.

J.H. Seung, K.H. Lee, J.H. Lee : Agency for Defence Development.

Combining, IBC) [6], 결맞음 빔 결합 (Coherent Beam Combining, CBC) [6, 7], 회절격자를 활용하여 다중 레이저의 파장을 맞춰 결합하는 파장 빔 결합 (Spectral Beam Combining, SBC) [8], 등이 있다.

파장 빔 결합을 적용한 고출력 광섬유 레이저 시스템은 다중 광원으로 증폭된 레이저 빔을 회절격자에 계산된 입사각(Littrow)으로 입사하여 다중 레이저 빔을 단일 빔으로 결합한다. 결합된 단일 빔의 품질은 다중 광원의 선폭, 파장 안정성, 입사각에 직접적인 영향을 받는다.

파장 빔 결합에 이용되는 고출력 광섬유 레이저 광원은 의도 난수 이진 수열 (Pseudorandom Binary Sequence, PRBS) [9] 또는 백색 잡음 (White Gaussian Noise, WGN)으로 변조된 수 GHz의 선폭을 갖는다. 또한, 선폭은 유도 브릴루앙 산란의 문턱 값과 비례하며, 유도 브릴루앙 산란의 문턱 값은 레이저의 출력에 밀접한 영향을 갖는다. 반대로 선폭은 결합 빔 품질과는 반비례 관계에 있어 선폭이 높을수록 회절격자를 통한 결합 빔 품질은 나빠진다. 따라서 파장 빔 결합은 선폭과 다중 광원이 특정 파장을 일정하게 유지해야 높은 빔 품질

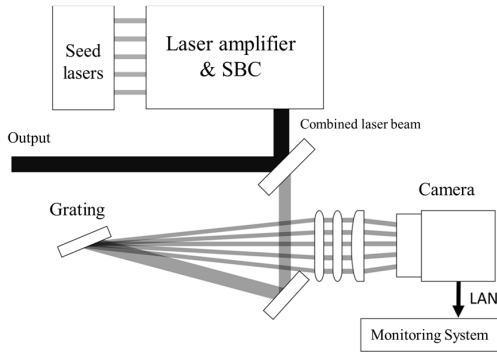


그림 1. 다중 광원 모니터링 구조
Fig. 1 Structure of Multi-wavelength Monitoring

질과 결합 효율을 기대할 수 있다 [10]. 또한, 증폭된 광원의 파장 및 선폭 안정성은 시드 광원의 안정성과 밀접한 관계를 가지고 있으며 안정성은 결합 빔의 빔 품질 및 파장 빔 결합 효율에도 영향을 미친다 [11]. 추가적으로 고출력에서 광원의 파장 불안정성은 레이저 발전 시스템에 유도 브릴루앙 산란의 문턱 값에 영향을 준다 [12]. 결합 빔의 높은 빔 품질 및 안정성을 확보하기 위하여 다중 광원의 모니터링 및 피드백 제어 루프가 요구된다.

본 논문에서는 다중 광원 5조를 모니터링 할 수 있는 구조와 카메라를 통한 다중 광원의 중심점 계산, 외란의 영향으로 카메라에 맺힌 상이 흔들리는 것을 보상하기 위한 갈만 필터를 적용하였다. 또한, 다중 광원 5조에 대하여 파장에 따른 카메라 픽셀 변화를 측정함으로써 실시간 모니터링과 동시에 피드백 제어를 위한 방법을 연구하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 파장 빔 결합 시스템의 다중 광원의 실시간 모니터링 구조와 그 특성을 서술하고, 3장에서 다중 광원의 파장 제어에 관한 실험을 보였다. 마지막으로 4장에서 실험 결과를 기반으로 결론을 맺었다.

II. 실시간 모니터링

다중 광원의 실시간 모니터링은 파장 빔 결합으로부터 결합된 단일 빔을 빔 분할기를 통해 일부 빔을 다시 회절 격자에 입사하여 카메라를 통해 측정하며, 구조는 그림 1과 같다.

그림 1에서 다중 광원으로부터 발생한 신호 레이저 빔은 광원마다 1, 2, 3단 증폭을 통해 출력되며 빔 결합 장치를 통해 단일 빔으로 만들어진다. 전치 증폭단과 주 증폭단의 이득 매질은 Yb 광섬유

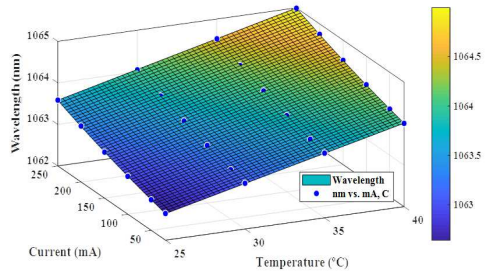


그림 2. 인가 전류와 제어 온도에 따른 출력 파장 Fitting 평면

Fig. 2 Plane of output wavelength referred to constant current and controlled thermal inputs

이며, 복수 개의 펌프 레이저 다이오드와 펌프광 결합기를 통해 증폭이 이뤄진다. 파장 빔 결합에 사용된 회절 격자는 Fused silica 기판을 적용하였다.

1. 다중 광원 상태 모델

광원의 파장 상태 방정식은 입력 값인 전류, TEC 온도 제어 값과 출력 파장의 관계를 통해 계산할 수 있으며, 가변 입력 값에 대한 측정 데이터로부터 다음과 같은 fitting 값을 구할 수 있다. 실험에 사용된 광원은 Innolume 사의 DFB-1064 - PM-150이며 열전소자 (TEC : Thermoelectric cooler)가 포함되어 있다.

$$\begin{aligned}
 \lambda &= a + bT + cI + dTI + eI^2 \\
 \therefore a &= 1060 \\
 b &= 9.105 \times 10^{-2} \\
 c &= 2.585 \times 10^{-3} \\
 d &= 1.228 \times 10^{-5} \\
 e &= 4.378 \times 10^{-6}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기에서 λ 는 출력 파장, T 는 온도, I 는 입력 전류를 의미한다.

그림 2는 측정값과 fitting 값의 평면을 나타냈다. 파란 점은 측정값을 의미하며, x 축은 인가 전류, y 축은 열전소자를 통해 제어되는 온도를 의미한다. 출력 파장 λ 는 온도가 높을수록, 인가 전류가 높을수록 파장이 길어지는 것을 확인할 수 있다.

$$\lambda \propto T, I \tag{2}$$

2. 카메라 영상 처리

모니터링 시스템으로부터 측정된 다중 광원의 영상을 분석하기 위해 다음과 같은 영상 처리 과정을 수행한다.

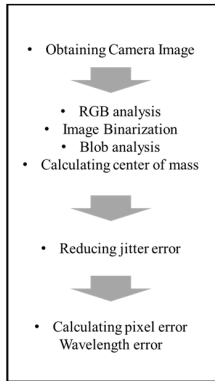


그림 3. 카메라 영상처리

Fig. 3 Scheme of image processing

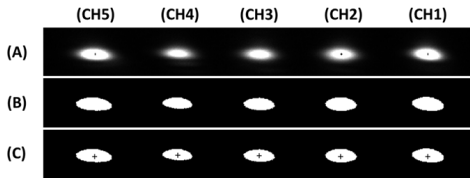


그림 4. 카메라 영상 처리 과정 (A) 원본 영상 (B) 영상 이진화 (C) 무게 중심점 계산
Fig. 4 Image Processing (A) Raw image (B) Binarization (C) Calculated center of mass

그림 3은 카메라 영상 처리 과정을 나타내며, 측정된 카메라 영상은 RGB 분석을 통해 Median 필터 통과와 영상 이진화 등의 과정을 거치며 그림 4와 같다.

그림 4의 (C) 무게 중심점 계산은 아래 식을 통해 계산된다.

$$x_{center} = \frac{\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^n x I_n}{\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^n I_n} \quad (3)$$

여기에서 x 는 카메라 영상의 Pixel 가로축 픽셀 값이며, y 는 세로축 픽셀 값을 의미한다. I_n 은 해당 픽셀의 세기 (Intensity)를 나타낸다.

계산된 무게 중심점의 이동 변위를 통해 레이저 빔이 요동도를 계산할 수 있다.

$$\theta_{jitter} = \tan^{-1} \frac{d}{f} \quad (4)$$

여기에서 d 는 무게 중심점의 이동 변위를 나타내며, f 는 파장 빔 결함의 변수인 초점 거리이다.

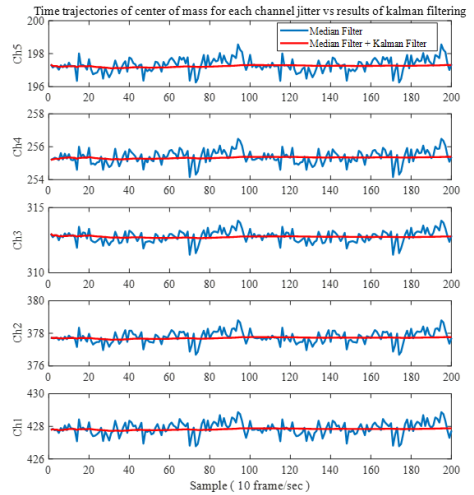


그림 5. Median 필터와 칼만 필터를 통과한 무게중심점 계산 결과

Fig. 5 Time trajectories of center of mass for each channel jitter vs results of kalman filtering

무게 중심점의 이동 변위값의 변동은 다중 광원의 파장 변화가 아닌 측정 오차 및 외부 요인으로 써 오차를 개선하기 위해 칼만 필터를 적용한 결과는 다음 그림 5와 같다.

그림 5에서 파란 실선은 Median 필터만 통과한 결과이며 빨간 실선은 Median 필터와 칼만 필터를 순차적으로 통과한 결과 값을 나타낸다. Median 필터만 통과한 경우 측정된 카메라 영상에 따라 노이즈가 분포하는 것을 보이며, Ch1~Ch5 다중 광원의 오차의 형태가 유사한 것을 확인 할 수 있다. 칼만 필터의 적용 결과 측정 영상의 오차가 개선된 결과를 볼 수 있다. 그림 6은 2 차원의 무게 중심점을 나타낸 결과이다.

그림 6에서 마찬가지로 측정 영상의 오차에 기인하여 Median 필터만 통과한 결과는 x, y -Pixel에 표준 편차를 갖고 있으며, 칼만 필터를 통과한 결과는 Median 필터를 통과한 결과보다 현저하게 오차가 개선된 것을 볼 수 있다.

III. 실험

다중 광원 파장 모니터링과 최적 결합 파장으로 광원의 출력 파장을 제어하는 구조는 다음 그림 7과 같다. 여기에서 제어 입력은 다중 광원의 온도와

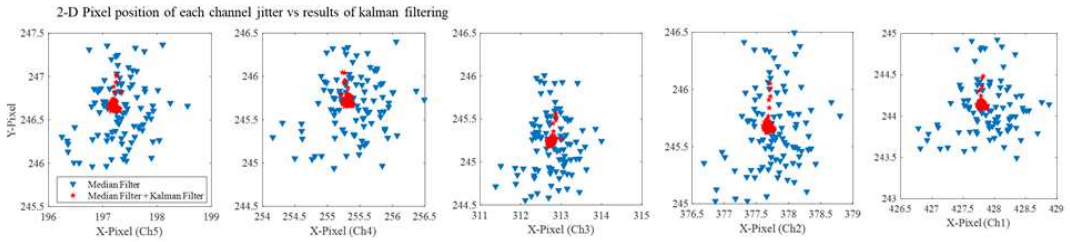


그림 6. 다중 광원의 2차원 무게중심점 계산 결과

Fig. 6 2-D pixel position of each channel jitter vs results of kalman filtering

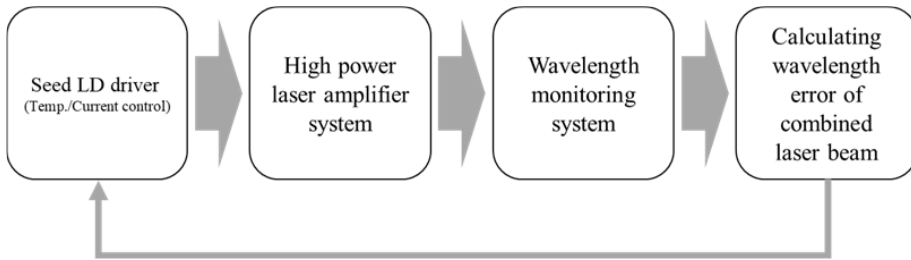


그림 7. 다중 광원 파장 제어 구성도

Fig. 7 Structure of wavelength control method for multi-seed laser diodes

전류 제어 값이며 파장 모니터링 시스템의 출력은 고해상도 카메라에 맺힌 회절 빔의 위치 값이다.

실험에 사용한 파장 빔 결합 구조에 최적의 파장 값은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 다음과 같이 계산됐다.

$$\begin{aligned}
 Ch1 &= 1062.08937 \text{ nm} \\
 Ch2 &= 1063.04968 \text{ nm} \\
 Ch3 &= 1064.00000 \text{ nm} \\
 Ch4 &= 1064.94026 \text{ nm} \\
 Ch5 &= 1065.87041 \text{ nm}
 \end{aligned}$$

(5)

식 (5)에서 계산된 파장으로 다중 광원의 출력을 설정하고, 설정 값은 Wavelength Meter로 측정 한다.

파장 빔 결합을 통해 결합된 레이저 빔은 다중 파장 모니터링 시스템의 카메라로 입사되기 전에 그림 1의 외부 회절 격자에 입사되고 회절 효과에 의해 결합 빔은 그림 4와 같이 각 채널 별로 광원이 분리가 된다.

모니터링 카메라의 분해능을 측정하기 위해 TEC 온도 제어 값과 인력 전류에 대한 변화를 카메라를 통해 무게 중심 값 변화를 측정한다. 여기에서 다중 광원에서 Ch3의 경우 파장 빔 결합의 중심이 되는 값으로 값의 변화는 없다는 가정을 하며,

Ch3을 제외한 광원에 대한 실험을 통해 제어 가능성을 확인했다.

그림 8은 온도 0.5°C에 대한 카메라 측정 변화를 나타내었다. 온도 제어 값의 변화에 따른 광원의 파장 변화는 오버슈트가 발생하며 이후 정상 상태 값을 유지하는 것을 확인 하였다. 측정 파장 변위는 41.8±3.7pm 이며 픽셀 변화는 26.4430±3.3227이다.

그림 9는 전류 1mA에 따른 광원의 파장 변화 결과이며, 측정 파장 변위는 2.1±0.3pm 내외이며 픽셀 변화는 1.3418±0.1443이다.

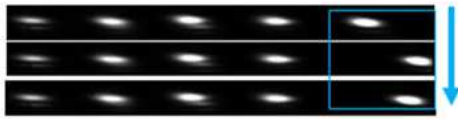
이러한 변위 값을 통한 파장과 픽셀 간 파장 상수를 계산할 수 있으며 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \Phi_{Ch1} &= 1.524558 \times 10^{-3} \\
 \Phi_{Ch2} &= 1.534406 \times 10^{-3} \\
 \Phi_{Ch3} &= 1.622269 \times 10^{-3} \\
 \Phi_{Ch4} &= 1.621858 \times 10^{-3} \\
 \Phi_{Ch5} &= 1.575773 \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

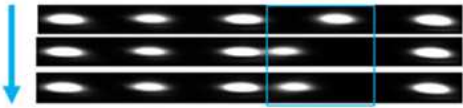
(6)

앞서 구한 모든 변수를 모니터링 시스템에 적용하여 다중 광원의 파장 차이에 따른 픽셀 간격을 계산할 수 있으며, 앞서 계산한 식 (5)의 값을 적용하여 설계한 파장 빔 결합 구조의 최적 빔 결합을 위한 다중 광원의 제어 신호를 발생 시킬 수 있다.

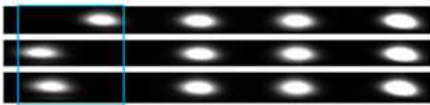
- Result of temp. 0.5°C control for CH1



- Result of temp. 0.5°C control for CH2



- Result of temp. 0.5°C control for CH4



- Result of temp. 0.5°C control for CH5

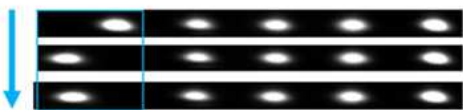


그림 8. TEC 온도(0.5°C) 제어에 따른 무게 중심 값 측정

Fig. 8 Measurement of center of mass based on TEC control (0.5°C)

그림 10은 다중 광원의 모니터링 시스템을 통해 출력된 제어 신호를 나타낸다.

다중 광원의 모니터링 시스템으로부터 피드백된 제어 신호를 통해 최대 ±0.5pm 이내로 정상상태 오차를 줄일 수 있는 제어 신호를 전달한다.

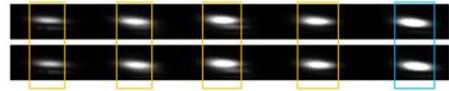
IV. 결론

파장 빔 결합은 단일 광섬유 레이저의 출력 한계를 극복하기 위해 적용되며 이러한 구조는 다중 광원의 파장을 파장 빔 결합 시스템의 구조에 맞는 배열을 유지하는 것이 중요하다.

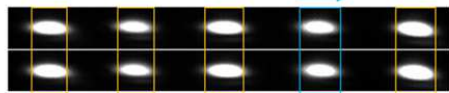
본 논문에서는 다중 광원의 파장을 실시간으로 모니터링하는 것과 동시에 피드백 제어에 관한 연구를 수행하였다. 파장 빔 결합을 위해 최적의 다중 광원의 파장 배열을 계산하였고, 광원의 열전소자와 입력 전류에 따른 파장 변위를 측정하여 분석했다.

또한 고해상도 카메라와 회절격자를 통해 다중

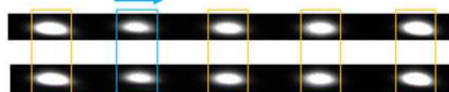
- Result of cur. 1mA control for CH1 2pm shift



- Result of cur. 1mA control for CH2 2pm shift



- Result of cur. 1mA control for CH4 2pm shift



- Result of cur. 1mA control for CH5 2pm shift



그림 9. 입력 전류 (1mA)에 따른 무게 중심 값 측정
Fig. 9 Measurement of center of mass based on input current (1mA)

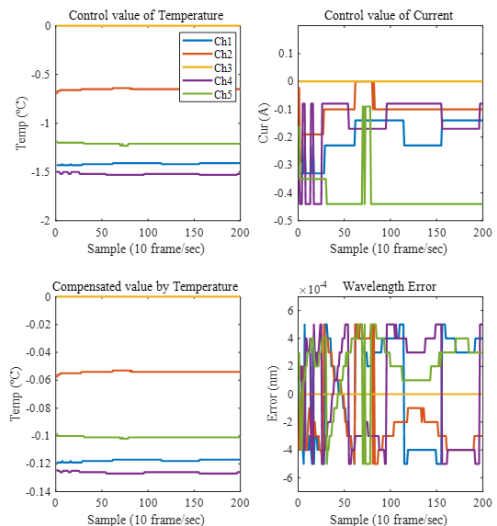


그림 10. 다중 광원의 파장 제어 신호와 파장 오차
Fig. 10 Control input and wavelength error of multi-seed laser diode

광원의 파장 간격을 카메라 픽셀 간격으로 치환하

는 방법을 사용했다. 측정된 영상에 Median 필터와 칼만 필터를 사용하여 측정 오차 및 빔 요동의 효과를 감소하였다. 이러한 결과를 통해 파장 오차를 피드백하여 다중 광원의 열전 소자와 입력 전류를 제어 할 수 있음을 확인했다.

References

- [1] C. Jauregui, J. Limpert, A. Tünnermann, "High-power Fibre Lasers," *Journal of Nature Photonics*, Vol. 7, No. 11, pp. 861-867, 2013.
- [2] S. M. Lee, "Fast Laser Triangular Measurement System using ARM and FPGA," *IEMEK J. Embed. Sys. Appl.*, Vol. 8, No. 1, pp. 25-29, 2013 (in Korean).
- [3] G. Kim, J. Eom, J. Choi, Y. Park, "Mutual Interference on Mobile Pulsed Scanning LIDAR," *IEMEK J. Embed. Sys. Appl.*, Vol. 12, No. 1, pp. 43-62, 2017 (in Korean).
- [4] S.H. Han, Y. Han et al., "Recognition System of Slope Condition Using Image and Laser Measuring Instrument," *IEMEK J. Embed. Sys. Appl.*, Vol. 9, No. 4, pp. 219-227, 2014 (in Korean).
- [5] J.W. Dawson, M.J. Messerly, R.J. Beach, M.Y. Shverdin, E.A. Stappaerts, A.K. Sridharan, C.P.J. Barty, "Analysis of the Scalability of Diffraction Limited Fiber Lasers and Amplifiers to High Average Power," *Journal of Optics Express*, Vol. 16, No. 17, pp. 13240 - 13266 2008.
- [6] T.Y. Fan, "Laser Beam Combining for High-power, High-radiance Sources," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electron*, Vol. 11, No. 3, pp. 567 - 577, 2005.
- [7] I. Dajani, A. Flores, R. Holten, B. Anderson, B. Pulford, T. Ehrenreich, "Multi-kilowatt Power Scaling and Coherent Beam Combination of Narrow-linewidth Fiber Lasers," *Proceedings of International Society for Optics and Photonics*, pp. 9728, 2016.
- [8] T.H. Loftus, A.M. Thomas, P.R. Hoffman, M. Norsen, R. Royse, A. Liu, E.C. Honea, "Spectrally Beam-combined Fiber Lasers for High-average-power Applications," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 13, No. 3, pp. 487-497, 2007.
- [9] A. Flores, C. Robin, A. Lanari, I. Dajani, "Pseudo-random Binary Sequence Phase Modulation for Narrow Linewidth, Kilowatt, Monolithic Fiber Amplifiers," *Journal of Optics Express*, Vol. 22, No. 15, pp. 17735 - 17744, 2014.
- [10] R. Tao, R. Su, P. Ma, X. Wang, P. Zhou, "Suppressing Mode Instabilities by Optimizing the Fiber Coiling Methods," *Journal of Laser Phys. Lett.* Vol. 14, No. 2, pp. 1-7, 2017.
- [11] A. V. Harish, J. Nilsson, "Optimization of Phase Modulation Formats for Suppression of stimulated Brillouin Scattering in Optical Fibers," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 24, No. 3, pp. 1-10, 2018.
- [12] J. Lee, K.H. Lee, H. Jeong, M. Park, J.H. Seung, J.H. Lee, J. H. "2.05 kW All-fiber High-beam-quality Fiber Amplifier with Stimulated Brillouin Scattering Suppression Incorporating a Narrow-linewidth Fiber-bragg-grating-stabilized Laser Diode Seed Source," *Applied Optics*, Vol. 58, No. 23, pp. 6251-6256, 2019.

Ji Hoon Seung (승지훈)

He received Ph. D in Department of Electronic Engineering, from Chonbuk National University in Korea.

He is currently a researcher of Ground Technology Research Institute at Agency for Defence Development. His research interest is parameter identification, adaptive estimation and robust control.

Email: jeehun@nate.com

Kwang Hyun Lee (이광현)

He received Ph. D degree in Applied physics Engineering from Yonsei University in 2012.

He is currently a senior researcher of Ground Technology Research Institute at Agency for Defence Development. His research interest are spectral beam combining system, seed laser, and polarization control.

Email: khlee82@add.re.kr

Jung Hwan Lee (이정환)

He received the Ph.D. degree in physics from the Korea Advanced Institute of Science and Technology in 1991.

He is currently a principal researcher at Ground Technology Research Institute of the Agency for Defence Development, where his main research interest is in the area of spectrally beam-combined high power fiber lasers.

Email: junghwan@add.re.kr