

Numerical Modeling of Optical Energy Transfer Based on Coherent Beam Combination under Turbulent Atmospheric Conditions

Jeongkyun Na¹, Byungho Kim¹, Hyesun Cha¹, and Yoonchan Jeong^{1,2†}

¹Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea

²ISRC & IAP, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea

(Received November 10, 2020; Revised November 20, 2020; Accepted November 20, 2020)

In this paper, the effect of atmospheric turbulence is numerically modeled and analyzed via a phase-screen model, in regard to long-range optical energy transfer using coherent beam combination. The coherent-beam-combination system consists of three channel beams pointing at a target at a distance of 1-2 km. The phase and propagation direction of each channel beam are assumed to be corrected in an appropriate manner, and the atmospheric turbulence that occurs while the beam propagates through free space is quantified with a phase-screen model. The phase screen is statistically generated and constructed within the range of fluctuations of the structure constant C_n^2 from 10^{-15} to 10^{-13} [$\text{m}^{-2/3}$]. Particularly, in this discussion the shape, distortion, and combining efficiency of the 3-channel combined beam are calculated at the target plane by varying the structure constant used in the phase-screen model, and the effect of atmospheric turbulence on beam-combination efficiency is analyzed. Analysis with this numerical model verifies that when coherent beam combination is used for long-range optical energy transfer, the received power at the target can be at least three times the power obtainable by incoherent beam combination, even for maximal atmospheric fluctuation within the given range. This numerical model is expected to be effective for analyzing the effects of various types of atmospheric-turbulence conditions and beam-combination methods when simulating long-range optical energy transfer.

Keywords: Coherent beam combination, Optical energy transfer, Turbulence, Free space propagation

OCIS codes: (030.1670) Coherent optical effects; (060.2605) Free-space optical communication; (260.2160) Energy transfer

대기 외란 상황에서 결맞음 빔결합을 통한 광학 에너지의 전달 방법 수치 모델링

나정균¹ · 김병호¹ · 차혜선¹ · 정윤찬^{1,2†}

¹서울대학교 전기정보공학부

☎ 08826 서울특별시 관악구 관악로 1

²서울대학교 반도체공동연구소 및 응용물리연구소

☎ 08826 서울특별시 관악구 관악로 1

(2020년 11월 10일 받음, 2020년 11월 20일 수정본 받음, 2020년 11월 20일 게재 확정)

본 논문에서는 결맞음 빔결합 방식을 이용한 원거리 광학 에너지 전달 방법에 있어서 대기 외란의 영향을 위상판 모델을 사용하여 수치해석하고 분석한다. 결맞음 빔결합 방식은 3채널로 구성하고, 전송 거리는 1~2 km, 각 채널별 위상 및 조사 방향은 적절한 방식으로 보정된 것으로 가정하며, 각 채널 빔들이 자유공간을 진행할 때 발생하는 대기 외란 영향은 위상판 모델로 정량화한다. 위상판은 구조상수 C_n^2 값의 변동 범위 10^{-15} 에서 10^{-13} [$\text{m}^{-2/3}$] 내에서 통계적으로 생성하여 구성한다. 특별히, 본 논의에서는 대기 요동의 강도가 최종 빔결합 효율에 미치는 영향을 분석하기 위해 위상판 모델의 구조 상수를 변화시켜가며 해당 목표 지점에서 3채널 결맞음 빔결합 방식을 통해 전송된 빔의 결합 형태, 왜곡 정도 및 빔결합 효율을 계산한다. 본 수치 모델을 통해 분석한 결과, 상기 주어진 대기 요동 조건하에서도 원거리 광학 에너지 전송에 결맞음 빔결합 방식을 사용할 경우, 수신부 유효 도달 전력을 비결맞음 빔결합 방식 대비 최소 3배 이상 확보할 수 있음을 확인할 수 있다. 본 수치 모델은, 원거리 광학 에너지 전송을 전산모사함에 있어서 다양한 형태의 대기 외란의 영향 및 빔결합 방식을 분석하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

Keywords: 결맞음 빔결합, 광학 에너지 전달, 난류, 자유공간 진행

OCIS codes: (030.1670) Coherent optical effects; (060.2605) Free-space optical communication; (260.2160) Energy transfer

†E-mail: yunchan@snu.ac.kr, ORCID: 0000-0001-9554-4438

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

I. 서 론

자유공간을 통해 광학 에너지를 목표로 하는 대상에 적절히 전달하기 위해서는 지향성 있는 빛을 이용해야 한다. 또한, 광원이 가지고 있는 결맞음 특성도 중요한 요소이다. 결맞음 특성을 가지지 않은 광원으로부터 발생한 빛들은 자유공간을 진행하면서 쉽게 퍼져버리므로 자유공간을 통한 에너지 전달의 효율성이 매우 낮아지게 된다. 따라서 원거리로 광학적 에너지를 전달할 때에 높은 효율의 에너지 전송을 구현하고 싶다면 결맞음 특성을 가진 지향성 빛인 레이저를 이용하여야 한다¹⁾. 광학적 에너지 전달에 가장 적합한 형태의 광원인 레이저는 지속적인 발전을 이루어 왔으며 특히 광섬유를 이용한 레이저는 빔품질 및 사용의 용이성으로 인해 많은 주목을 받으며, 빠르게 발전, 응용되고 있다^{2,3)}. 하지만, 단일모드 광섬유 레이저의 최대 출력은 광섬유를 구성하는 물질 및 구조가 가지는 한계로 인해 20 kW 수준에서 그 출력이 제한되고 있는 상황이다^{4,5)}. 따라서 그 이상의 출력을 구현하기 위해서는 다른 방식의 접근이 필요하며, 그 유력한 방안으로 다수의 광섬유 레이저를 이용한 고휘출력 레이저 시스템 및 이를 자유 공간에서 결합하는 빔결합 기술이 도입되고 있다⁶⁾. 다수의 광섬유 레이저를 이용하면 고휘출력을 구현할 수 있으므로, 이를 빔품질의 손실 없이 결합할 수 있다면 고휘출력과 고킴품질의 두 가지 장점을 동시에 구현할 수 있게 된다. 다수의 레이저 빔을 결합하는 방법은 레이저 빔 사이의 상호 결맞음 특성을 유지시키는 결맞음 빔결합 방식과 상호 결맞음 특성이 없는 비결맞음 방식으로 나뉜다. 이 중 결맞음 특성을 유지시킨 빔결합이 상대적으로 더 높은 빔강도 및 빔 품질을 유지할 수 있다는 장점을 가지므로 결맞음 빔결합을 도입하여 원거리 광학 에너지 전달 방식의 효율을 높이고자 하는 시도가 계속되고 있다⁶⁾.

한편, 지표면 근처의 자유공간을 통한 광학 에너지 전파 과정 중에는 대기 요동에 의한 레이저 빔의 품질 저하가 발생하고 이로 인해 광학 에너지 전송 효율이 감소하는 현상이 발생한다⁷⁾. 대기 요동으로 인한 공간적 위상 오차를 보정하기 위해 기존에는 주로 적응광학계를 사용하였다^{8,9)}. 이는 주로 천문학에서 사용되어온 방식으로 망원경의 수신부로 입사되는 빛의 파면에 대해 공간적 분포를 측정하고 이를 보정할 수 있는 피드백 장치를 활용하는 방식이다. 따라서 수신부에 파면 측정 및 보정을 위한 피드백 광학계를 구성해야 하며, 이를 구성하는데 제한이 있는 상황에서는 적응광학계의 적용이 용이하지 않다. 반면 결맞음 빔결합 방식은 수신부에서 파면을 측정하는 대신 일정 영역으로 수신되는 광학 에너지 혹은 전력(power in the bucket, PIB)만을 측정하고, 최종적으로 이 값이 최대가 되도록 광학 에너지 전송부에서 직접 채널별 레이저 빔의 위상을 조정하는 피드백 방식을 택한다. 참고로 이 전송된 광학 에너지는 반드시 수신부에서만 측정될 필요는 없고 일정 거리를 둔 지점에서 간접적으로 측정될 수도 있다. 대기 요동에 의한 영향도 추가적인 장치 없이 같은 방식으로 보정될 수 있으므로 기존의 파면 측정을

통한 적응광학계 방식과는 매우 차별화된 장점을 가지고 있다⁶⁾. 다시 말해서, 결맞음 빔결합 시스템은 파면 측정을 통한 적응광학계 방식에 비해서 수신부 시스템이 단순하기 때문에 광학 에너지 전달의 대상이 되는 수신부가 물리적으로 접근하기 어려운 상황에 있거나, 규모 있는 복잡한 장치를 설치하기 어려운 경우에도 대기 요동 현상에 대응이 가능한 시스템을 구축하여 광학 에너지를 고효율로 전송할 수 있다. 결맞음 빔결합을 구현하기 위해 구체적으로 사용되는 알고리즘으로는 stochastic parallel gradient descent (SPGD), locking of optical coherence by single-detector electronic-frequency tagging (LOCSET) 및 frequency dithering 등의 방식이 알려져 있다¹⁰⁻¹³⁾. 이 중 SPGD 방식을 적용한 시스템의 경우 고속 보정이 가능하다는 장점을 가지고 있으며, 그 대역폭이 수십 kHz 수준에 도달하여 있다¹⁴⁻¹⁶⁾. 이를 토대로 일상적인 상황에서 대기의 상태가 변화하는 속도보다 결맞음 빔결합 시스템의 보정 속도가 빠르도록 구현하는 것이 가능하다는 것을 확인하였으며, 다음에서는 이러한 조건에 한하여 결맞음 빔결합을 통한 효율 개선에 대해 모델링하였다¹⁷⁾.

II. 결맞음 빔결합 및 대기 요동 모델링

결맞음 빔결합 시스템은 그림 1과 같이 상호 결맞음 특성을 갖는 다수의 레이저 빔을 생성하는 부분, 레이저 빔이 자유공간을 진행하여 목표 지점에서 결합하는 부분 및 결합한 빔을 확인하여 보정하는 부분으로 구성될 수 있다. 다수의 레이저 빔이 원거리에서 서로 결맞게 결합되는 방식이기 때문에, 우선 상호 결맞음 특성을 가지는 다수의 레이저 빔을 생성하여야 한다. 일반적으로 서로 다른 광원에서 얻어진 레이저들은 상호 결맞음 특성을 가지고 있지 않으므로 상호 결맞음 특성을 가진 다수의 레이저들을 생성하기 위해서는 하나의 공진기에서 발생한 레이저를 다수로 분할하여야 한다. 분할된 레이저들은 상호 결맞음 특성을 가지므로 분할된 레이저들을 각각 개별적으로 증폭하면 원하는 출력의 상호 결맞음 특성을 가진 레이저들을 얻을 수 있다⁶⁾.

하나의 공진기에서 얻어진 레이저가 분할되며 상호 결맞음 특성을 가진 다수의 레이저들을 얻더라도, 레이저들이 효율적으로 결맞음 빔결합되기 위해서는 공진기를 통해 최초로 발진된 레이저의 특성 중 선폭(lineewidth)이 결맞음 빔결합에 적절하여야 한다. 레이저 선폭은 결맞음 길이(coherence length) 및 결맞음 시간(coherence time)을 결정하기 때문에, 다수의 레이저들이 분할된 후 수신부의 결합지점에 도달하기까지 발생하는 공간적 거리차 및 시간적 지연의 차이로 인한 결맞음 효율의 감소 정도를 결정한다. 본 모델에서는 고품질 결맞음 광원 혹은 협대역 레이저를 전제하여¹⁸⁾ 레이저 선폭이 충분히 짧아 채널별 공간적 거리차 및 시간 지연에 의한 효율 감소 효과가 충분히 작다고 가정하고 진행하였다.

상호 결맞음 특성을 가진 레이저들을 각각 정렬하여 자유공간을 통해 광학 에너지를 전달하고자 하는 목표지점으로 진행시키면 각각 목표지점에 도달하여 최종적으로 빔의 결

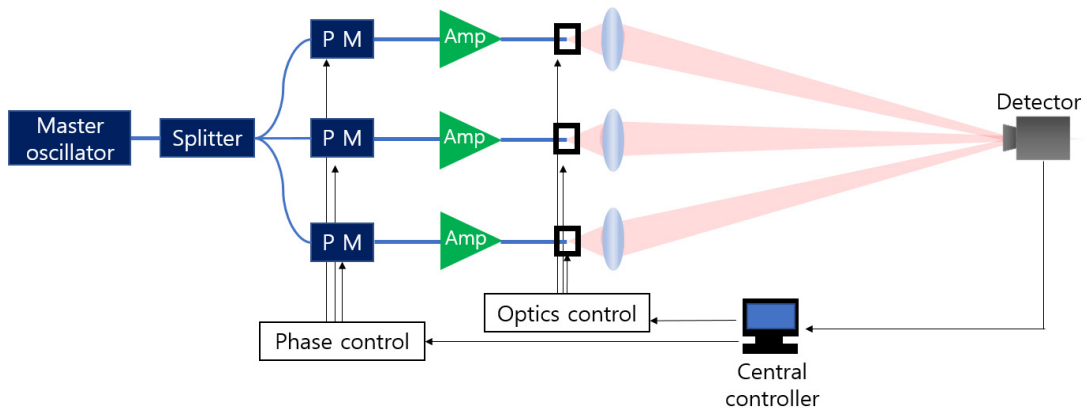


Fig. 1. Overall configuration of the coherent beam combination system.

합이 일어난다. 이때, 수신부에서 광학 에너지를 수신받을 수 있는 유효 영역에 도달하는 광학 에너지의 크기가 유효 도달 에너지(bucket energy)가 되며, 단위 시간에 대한 유효 도달 에너지가 유효 도달 전력이 된다. 광학 에너지 전송 시스템에서 효율 향상을 위해 목표로 하는 것은 주어진 상황 내 유효 도달 전력의 최대화이다. 결맞음 빔결합 시스템을 통한 유효 도달 전력 최대화를 위해, 수신부에서는 도착한 유효 도달 전력 정보를 송신부로 전달하고, 송신부의 중앙제어장치(central controller)는 송신부에서 위상 변조기를 통해 개별 레이저의 상대적인 위상(piston phase)을 조정하며 전송 광학계의 광섬유 팁 미세 조정(optical fiber tip/tilt) 등의 방식을 통해 전송 방향을 지속적으로 조정한다. 즉, 결맞음 빔결합 에너지 전송방식은 다채널 간의 위상 및 송신 방향 조정을 통해 유효 도달 전력을 최대화하는 방식이며, 레이저 사이의 상대적인 위상만을 보정하기 때문에 개별 레이저가 대기를 통해 진행하며 각각 겪게 되는 채널별 파면에 대한 보정 및 레이저 송신 광학계에서 발생하는 수차 등에 대한 보정은 적용되지 않는다.

본 논의에서 전제하는 결맞음 빔결합 알고리즘은 고속 보정이 가능한 SPGD 알고리즘이다. SPGD 알고리즘은 변수가 되는 각 채널의 상대적인 위상 및 시준 방향에 대해 무작위로 변동치를 부여한 후, 이 변화에 대한 유효 도달 전력의 변화를 확인하여 유효 도달 전력값이 상승하는 방향으로 위상 및 시준 방향에 변화를 가한다. 이러한 과정을 빠르게 지속적으로 반복하며 유효 도달 전력이 최고 효율 상태 근처에서 유지되도록 시스템을 운용한다. 현재 SPGD 알고리즘을 통해 수십 kHz 수준의 보정 대역폭이 구현되고 있으며¹⁶⁾, 일상적인 환경에서 레이저 빔이 진행되는 공간의 대기 요동 상태를 변화시키는 주요 요인인 통상적인 바람의 속도는 수 m/s 수준이다¹⁷⁾. SPGD 알고리즘을 통한 보정 시간과 그 동안 발생할 수 있는 대기 상태의 점진적 변화를 고려해 볼 때 일반적인 대기 환경 조건에 한하여서는 결맞음 빔결합 시스템을 통한 위상 보정이 대기 상태의 점진적 변화 시간보다 충분히 더 빠른 시간 내에 이루어질 수 있다. 따라서 이러한 조건을 전제로 한 대기 외란 상황에 대해서 본 결맞음 빔결

Table 1. Parameters used in the simulations

Parameter	Value
Wavelength	1064 nm
Power of beam (single beam case)	3 kW
Power of each beam (triangle case)	1 kW
Lens diameter	25.4 mm
Beam diameter	20 mm
Distance between lenses	28 mm
Inner scale of atmospheric fluctuation	1 cm
Outer scale of atmospheric fluctuation	100 m

합 모델을 적용하였다.

다음에서는 대칭성이 보존되는 가장 기본적인 형태의 결맞음 빔결합인 3채널 삼각형 빔결합을 통해 형성된 레이저 빔의 형태를 단일 채널로 진행한 레이저에 대비하여 논의하고자 한다. 즉, 3채널 삼각형 결맞음 빔결합 방식을 파동 광학 이론에 기반하여 수치분석을 진행하며¹⁹⁾, 이를 위해 사용되는 주요 매개변수들은 표 1에 명기하였다.

그림 2의 (a), (b)에서 2 km 떨어진 위치에 단일빔을 전송한 빔형상과 3채널 결맞음 빔결합을 진행해 전송한 빔형상을 나타내었다. 총 출력이 일정하도록 하기 위하여 단일빔의 경우 3 kW의 출력, 3채널의 경우 각 채널 출력이 1 kW가 되게 하여 총 3 kW의 출력을 가지게 하였다. 3채널 결맞음 빔결합을 진행하면 단일 채널로 전송하였을 때 비하여 빔이 중심부로 집중되는 것을 확인할 수 있다. 그림 2(c)에서는 그 효과를 수치적으로 확인하기 위하여 광학 에너지 송신부와 수신부의 거리를 1 km부터 2 km까지 변화시켜가면서 각각의 경우 중심 세기를 비교하여 보았다. 결맞음 빔결합의 경우 레이저 빔 각각의 전기장이 합해지고 중심 세기는 합해진 전기장의 제곱에 비례한 크기를 가지기 때문에 총 출력이 일정한 상태라면 3채널 결맞음 빔결합의 경우 3배 강한 중심 세기를 보인다. 또한 3채널 결맞음 빔결합한 결과로 형성되는 중심 빔의 크기를 기준으로 비교하기 위해, 3채널로 진행한 광학계의 회절 한계 빔 크기의 절반을 다음의 식 (1)과 같

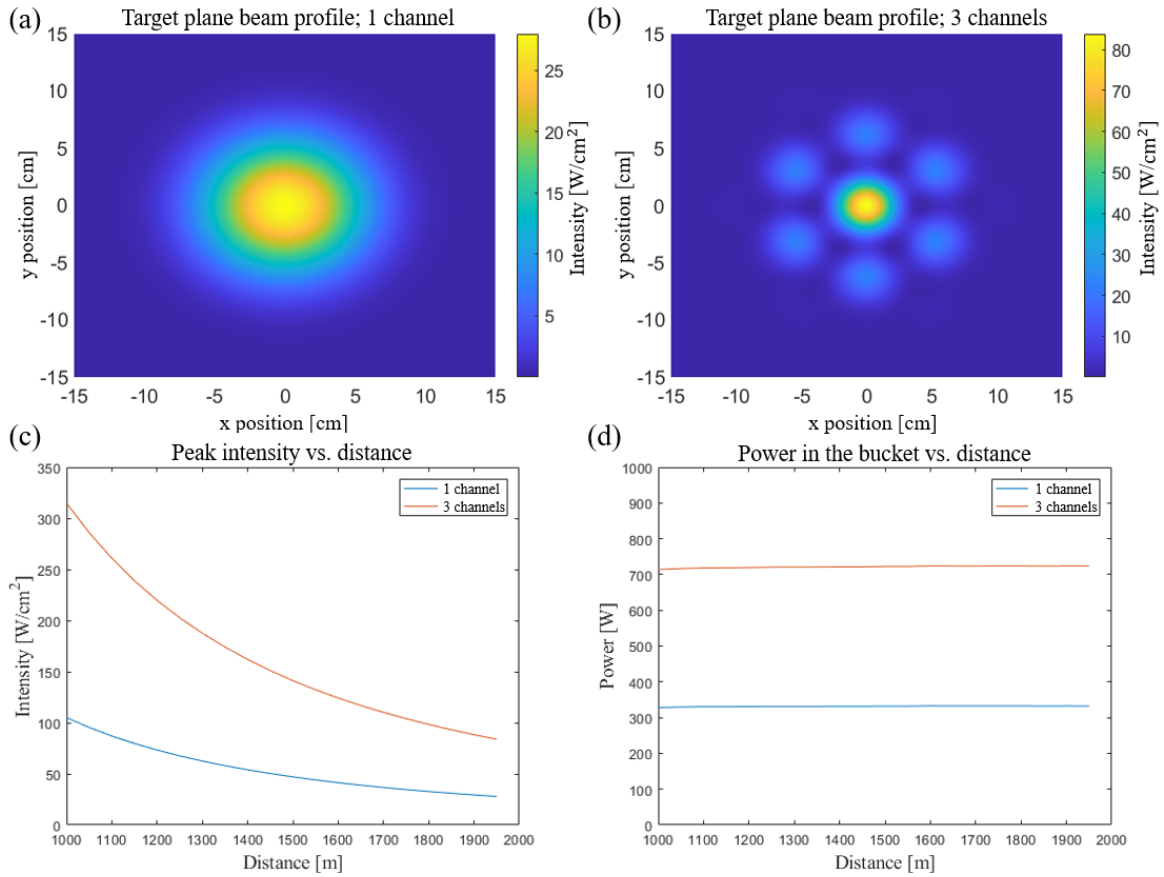


Fig. 2. Laser beam profiles at the target plane located at a distance of 2 km from the transmitter: (a) for a single-input beam, (b) for a 3-channel-input beam, (c) for the peak intensities, and (d) for the PIBs with respect to the distance of transmission for single- and 3-channel-input beams.

이 계산하여 수신부의 유효 영역으로 가정하고 유효 도달 전력을 비교하였다^[19]. 그 결과 그림 2(d)에서 결맞음 빔결합을 통해 진행된 경우가 2배 이상 높은 유효 도달 전력을 가지게 됨을 확인할 수 있다.

$$\text{(half of diffraction limited beam radius)} = 1.22 \frac{L\lambda}{2D} \quad (1)$$

자유공간을 통해 광학 에너지가 레이저 빔의 형태로 전송 되면 지표면 근처에 존재하는 대기의 영향을 받아 빔품질 저하가 발생하게 된다. 대기 요동 현상은 불균일한 온도 분포가 지속적으로 변화하는 것으로, 온도 분포로부터 굴절률 분포가 발생해 대기를 통과해 진행되는 레이저 빔의 파면에 공간적으로 위상 오차를 야기한다^[20]. 요동의 구체적인 형태는 Kolmogorov 출력 스펙트럼에 기반하여 그 분포가 아래의 식 (2)와 같이 알려져 있으며^[21], 이를 통해 대기 요동을 수치적으로 표현하고 레이저 빔이 어떠한 형태로 변화하는지 구체적으로 모델링할 수 있다. 해당 식의 공간 주파수는 대기의 요동 단위가 되는 공기 덩어리의 크기에 의해서 그 영역이 제한되는데 본 모델링에서 사용한 값은 표 1에서 확인할 수 있다.

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033 C_n^2 \kappa^{-11/3}, \text{ (Kolmogorov power spectrum)} \quad (2)$$

여기서 C_n^2 는 주어진 대기의 굴절률 비균질성을 나타내는 구조상수이며, κ 는 대기 요동의 공간 주파수이다. 레이저 빔이 특정한 거리를 진행할 때에 진행한 거리에 따라 파면의 공간적인 위상 오차가 변화하게 되고 이를 수치적 모델로 반영하기 위해서 위상 오차를 직접적으로 반영하는 위상판을 생성하여 적용할 수 있다^[22]. 생성된 위상판은 특정 시점의 대기 요동 상태로 인한 위상 오차를 반영시키므로 특정 시점의 대기 요동 상태를 대표하는 것이다. 즉, 특정 위상판을 통해 진행된 레이저 빔이 결합된 형태는 특정 시점의 대기 외란에 짧은 시간동안 레이저 빔이 노출(short exposure)된 결과를 나타낸다. 그림 3(a)에서는 $C_n^2 = 10^{-15} [\text{m}^{-2/3}]$ 일 때, 1 km 진행하면 발생하는 파면의 위상 오차에 해당되는 위상판의 위상분포를 확인할 수 있다. 이 위상판은 푸리에 방법을 통해 생성되었으며, 정규분포에 따라 통계적인 특징을 가지도록 생성되지만, 개별 위상판은 생성될 때마다 서로 다르게 생성된다. 한 채널에서 생성된 레이저 빔이 생성된 위상판을 거치며 1 km씩 두 번 진행해 총 2 km 진행한 레이저 빔의 형상이 그림 3(b)에서 제시되었다. 대기 요동에 의한 영향이

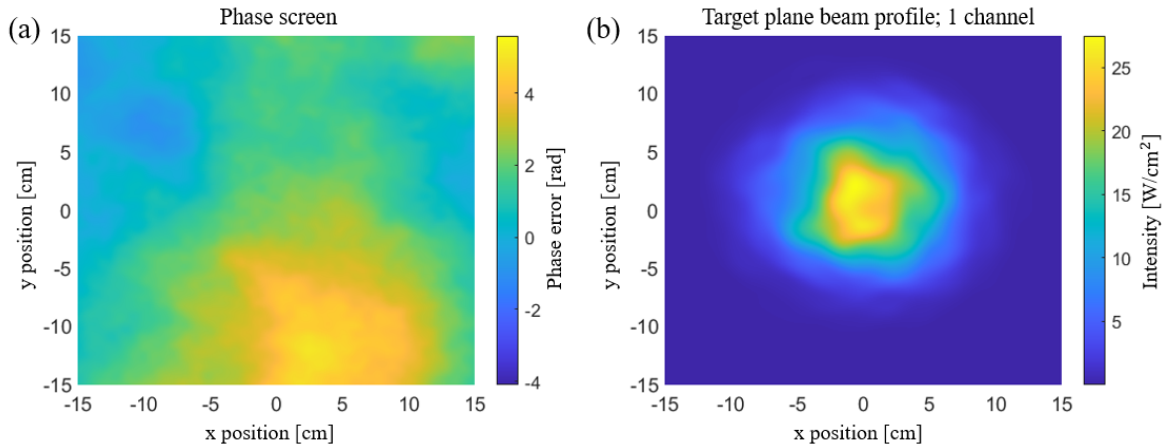


Fig. 3. A typical phase screen model representing the atmospheric turbulence. (a) Generated phase screen with $C_n^2 = 10^{-15} [m^{-2/3}]$ and propagation length = 1 km. (b) Beam profile at a distance of 2 km from the transmitter, which is degraded by the atmospheric turbulence effect via the phase screen.

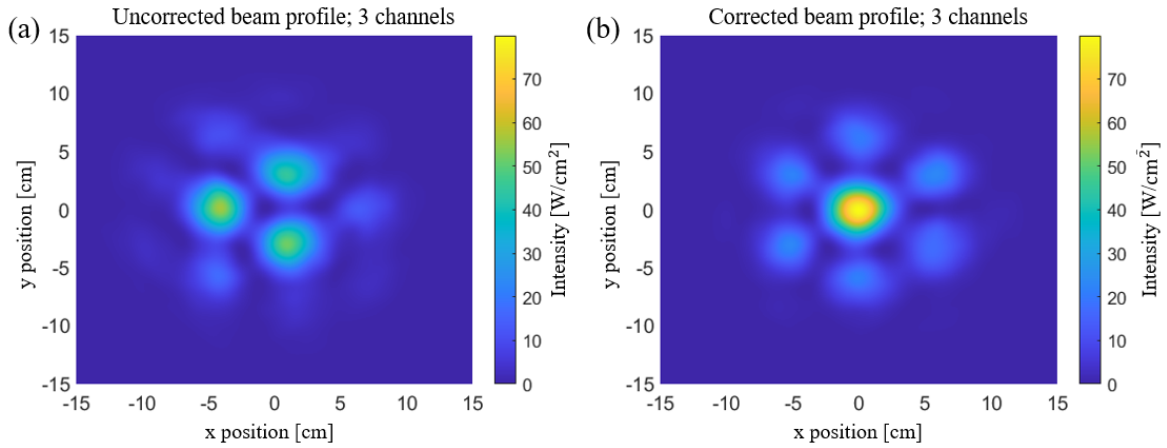


Fig. 4. Combined beam profiles after transmission over 2 km (a) with atmospheric turbulence effect only and (b) with phase-correction by the coherent-beam-combination system along with atmospheric turbulence effect.

없다면 가우시안 빔의 형태를 가져야 하지만 대기 요동 효과에 의한 위상 오차가 위상판을 통해 반영되었고, 이로 인해 빔품질이 저하되며 변형되어 있다.

III. 대기 요동 강도에 따른 전송 효율 분석

결맞음 빔결합을 이용하면 총 출력을 증가시키기 용이할 뿐 아니라, 단일 레이저를 이용하는 것보다 효율의 측면에서도 우위에 있을 수 있음을 확인하였다. 이러한 장점에 더해 결맞음 빔결합은 대기 요동이 존재하는 환경에서도 이에 대응할 수 있다는 장점을 가진다.

단일 레이저 빔이 대기 요동에 의한 공간적 위상 오차를 겪으며 진행하는 것을 근본적으로 차단할 수는 없지만, 다채널 결맞음 빔결합을 이용하면 공간적 위상 오차로 인한 빔품질의 감소가 최소화되는 방향으로 빔을 보정할 수 있다. 다시 말해서, 각 채널의 위상과 진행 방향에 대한 보정을 통

해 각 빔이 결합된 결과 유효 전달 전력이 최대화되도록 보정을 반복하게 된다. 그림 4에서는 $C_n^2 = 10^{-15} [m^{-2/3}]$ 일 때, 위상 및 빔의 진행 방향에 대해 보정하지 않고 진행한 빔들의 결합 형태와 이상적인 보정과정을 거친 후 결합된 형태를 비교하여 나타냈다. 3채널에서 각각 진행해온 레이저 빔들이 상호 결맞음 특성은 있으나 상대적인 위상이 서로 맞지 않아 결합된 빔 형상이 어그러지며 전송 효율이 감소되고 있으며, 본 그림 4에 나타난 빔 형상만으로도 명백히 이상적으로 보정된 빔의 경우가 더 높은 광학 에너지 전송 효율을 가지게 될 것임을 충분히 예상할 수 있다.

빔 형상을 확인하여 전송 효율이 높아짐을 정성적으로 확인하였으며, 추가적으로 광학 에너지 전달 효율 증가를 정량적으로 확인하기 위하여 대기 요동의 강도인 구조상수 C_n^2 를 변화시키며 결맞음 빔결합을 통해 보정할 수 있는 효율에 대한 모델링을 진행하였다. 기존에 측정된 대기 요동의 구조상수 값을 바탕으로 $10^{-15} < C_n^2 < 10^{-13} [m^{-2/3}]$ 영역에서 3

km 떨어진 대상에 대한 전달 효율을 유효 도달 전력 및 첨두강도(peak intensity)의 비교를 통하여 분석하였다^[23,24].

Kolmogorov 전력 스펙트럼에 기반을 두고 생성되는 개별 위상판은 특정한 대기 상태를 나타낸다. 특정 시점의 어떤 대기 요동 상태가 구조상수를 통해 나타낼 수 있는 무수히 많은 대기 요동 상태를 대표할 수는 없으며, 실질적으로 광학 에너지를 전달하려면 특정 대기 요동 상태가 유지되는 특성 시간(혹은 점진적 변화를 나타내는 특성 시간)보다도 더 오랜 시간 동안 광학 에너지의 전송 및 수신 상태를 유지하여야 되기 때문에 대기 요동이 지속적으로 변화하는 상황이 전송 효율 변화에 미치는 영향을 면밀히 분석할 필요가 있다. 즉, 수신부가 장시간 동안 레이저 빔에 노출(long exposure) 되었을 때, 얻을 수 있는 유효 도달 출력에 대한 수치적인 분석이 필요하다. 따라서 주어진 구조상수에 대해 다수의 위상판을 생성하여 앙상블을 구성하고, 다수의 위상판을 통과해 진행한 레이저 빔의 결합 상태를 수치적으로 분석하였다. 본 모델에서는 구조상수마다 100개의 위상판을 생성하여 앙상블로 구성하였으며, 이를 통과해 결합된 레이저 빔의 결과값을 독립적으로 얻은 후 모든 결과값의 평균값을 취하여 분석하였다.

그림 5의 그래프에서 비결맞음 빔결합인 경우, 보정이 없는 경우, 빔의 진행 방향만 보정한 경우 및 이상적인 보정을 진행한 경우의 네 가지에 대해서 결과를 도출하였다. 각각의 경우 대기를 통해 전달된 광학 에너지의 전송 효율은 그림 5(a)에서 유효 도달 전력 관점에서 확인할 수 있다. 비결맞음 빔결합에 비해 결맞음 빔결합의 경우가 대기 요동의 구조상수 값이 증가함에 따라 3배 이상 높아지는 것을 확인할 수 있으며, 대기 요동의 크기를 최대로 증가시킨 상황에 대해서도 대기 요동이 최소화한 경우 대비 30% 이내의 감소 효과만이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5(b)에서는 전송되는 결합빔의 첨두강도를 대기 요동의 구조상수에 대해서 나타내었다. 전송되는 결합빔의 첨두강도 관점에서도 결맞음 빔결합을 도입한 경우에서 가장 높은 값이 유지되는 것을 확

인할 수 있다. 즉, 대기 요동이 존재하는 상태에서도 결맞음 빔결합을 이용한 보정을 적절히 시행하면 높은 전송 효율을 유지한 상태에서 광학 에너지를 원거리로 전달하는 것이 가능함을 의미한다.

IV. 결 론

상호 결맞음 특성을 가진 다수의 광섬유 레이저가 각각 시준되어 자유공간을 통해 진행하고, 개별 레이저 빔에 대한 위상 제어를 통해 목표지점에서 서로 결맞게 결합되도록 구현하면 대기 요동이 있는 상황에서도 높은 효율로 광학 에너지를 전달할 수 있음을 확인하였다. 자유공간을 통해 레이저 빔이 진행하면 빔 확산도에 따라 레이저 빔이 퍼지게 되지만, 다수의 레이저 빔을 목표 지점에서 서로 결맞게 빔결합하면 결합된 레이저의 상대적인 위상에 따라 빔이 그 중심에 집중되며 높은 빔 품질을 유지할 수 있으므로 원거리 전송된 광학 에너지가 수신부에 도달되는 효율을 현저히 상승시킬 수 있다. 특히, 다채널 결맞음 빔결합을 통한 효율 증가 방식은 레이저 빔이 자유공간을 진행할 때 빔의 품질을 저하시키는 요인인 대기 외란에 대응할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 레이저 빔의 대칭성이 보존된 기본적 형태인 3채널 레이저에 대한 모델링을 통해 수신부에 도달되는 광학 에너지의 효율을, 비결맞음 빔결합인 경우, 보정이 없는 경우, 빔의 진행 방향만 보정한 경우 및 이상적인 보정을 진행한 경우의 네 가지 경우에 대해서 그 유효 도달 출력 및 결합빔의 첨두강도 통해 분석하였다. 대기 요동으로 인한 빔 변형에도 각 채널에서 송신된 레이저 빔 사이의 상대적 위상 및 진행방향 조절을 통해 보정하면 대기 요동의 강도를 나타내는 구조상수 $10^{-15} < C_n^2 < 10^{-13} [m^{-2/3}]$ 인 경우에 대해서 최소 70%를 상회하는 충분히 높은 광학 에너지 전달 효율을 확보할 수 있다. 결맞음 빔결합을 통한 광학 에너지 전송 효율 개선 방법은 단일모드 광섬유의 출력 에너지의 상한을 극복할 수 있는 방법일 뿐 아니라, 대기 요동이 있는 경우에도 광학 에너지

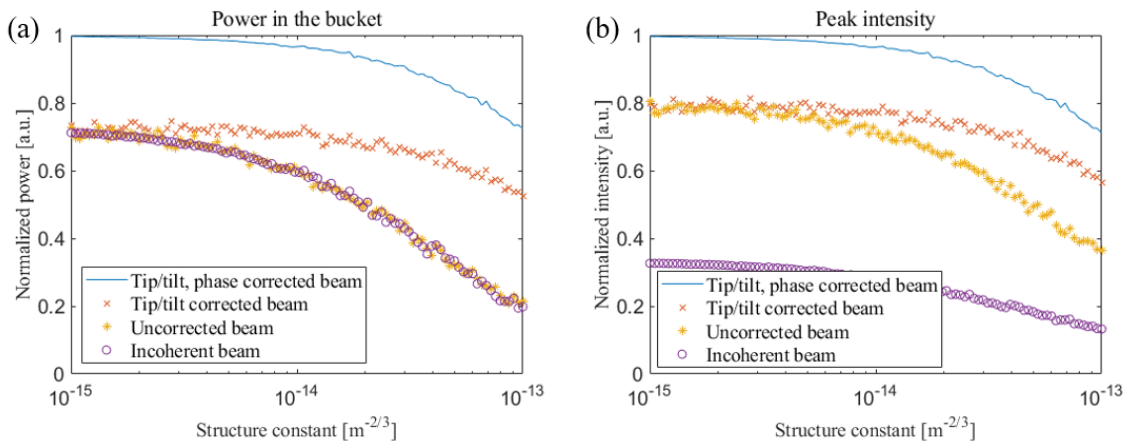


Fig. 5. Characteristics of the combined beams: (a) PIBs of the combined beams and (b) peak intensities of the combined beams with respect to structure constant (C_n^2) for incoherent, uncorrected coherent, direction corrected (via tip-tilt) and direction and phase-corrected cases.

지를 전달받을 대상에 안정적으로 전송효율을 유지할 수 있는 기술로 다양하게 응용될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문의 연구는 국방과학연구소(UD180040ID)의 지원으로 수행되었습니다. 연구과제 진행과 관련한 전창수 박사의 도움과 논의에 진심으로 감사의 뜻을 표합니다.

References

- O. Svelto, *Principles of Lasers, Translated by D. C. Hanna*, 5th ed. (Springer, MA, USA, 2010).
- Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne, and J. Nilsson, "Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power," *Opt. Express* **12**, 6088-6092 (2004).
- W. Shi, Q. Fang, X. Zhu, R. A. Norwood, and N. Peyghambarian, "Fiber lasers and their applications," *Appl. Opt.* **53**, 6554-6568 (2014).
- M. N. Zervas and C. A. Codemard, "High power fiber lasers: a review," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **20**, 219-241 (2014).
- 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).
- Z. Liu, P. Zhou, X. Xu, X. Wang, and Y. Ma, "Coherent beam combining of high power fiber lasers: Progress and prospect," *Sci. China Tech. Sci.* **56**, 1597-1606 (2013).
- J. C. Wyngaard, "Atmospheric turbulence," *Annu. Rev. Fluid Mech.* **24**, 205-234 (1992).
- J. M. Beckers, "Adaptive optics for astronomy: principles, performance, and applications," *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **31**, 13-62 (1993).
- J. H. Lee, S. Shin, G. N. Park, H.-G. Rhee, and H.-S. Yang, "Atmospheric turbulence simulator for adaptive optics evaluation on an optical test bench," *Curr. Opt. Photon.* **1**, 107-112 (2017).
- P. Zhou, Y. Ma, X. Wang, H. Ma, X. Xu, and Z. Liu, "Coherent beam combination of three two-tone fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm," *Opt. Lett.* **34**, 2939-2941 (2009).
- R. Uberna, A. Bratcher, T. G. Alley, A. D. Sanchez, A. S. Flores, and B. Pulford, "Coherent combination of high power fiber amplifiers in a two-dimensional re-imaging waveguide," *Opt. Express* **18**, 13547-13553 (2010).
- H. K. Ahn and H. J. Kong, "Cascaded multi-dithering theory for coherent beam combining of multiplexed beam elements," *Opt. Express* **23**, 12407-12413 (2015).
- Y. Ma, X. Wang, J. Leng, H. Xiao, X. Dong, J. Zhu, W. Du, P. Zhou, X. Xu, L. Si, Z. Liu, and Y. Zhao, "Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique," *Opt. Lett.* **36**, 951-953 (2011).
- C. Geng, W. Luo, Y. Tan, H. Liu, J. Mu, and X. Li, "Experimental demonstration of using divergence cost-function in SPGD algorithm for coherent beam combining with tip/tilt control," *Opt. Express* **21**, 25045-25055 (2013).
- P. Zhou, Z. Liu, X. Wang, Y. Ma, H. Ma, and X. Xu, "Coherent beam combination of two-dimensional high power fiber amplifier array using stochastic parallel gradient descent algorithm," *Appl. Phys. Lett.* **94**, 231106 (2009).
- Z. M. Huang, C. L. Liu, J. F. Li, and D. Y. Zhang, "A high-speed, high-efficiency phase controller for coherent beam combining based on SPGD algorithm," *Quantum Electron.* **44**, 301 (2014).
- Z.-S. Liu, D. Wu, J.-T. Liu, K.-L. Zhang, W.-B. Chen, X.-Q. Song, J. W. Hair, and C.-Y. She, "Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with an iodine filter," *Appl. Opt.* **41**, 7079-7086 (2002).
- Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu, D. N. Payne, R. Horley, L. M. B. Hickey, and P. W. Turner, "Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **13**, 546-551 (2007).
- J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 3rd ed. (Roberts and Company Publishers, USA, 2005).
- R. Frehlich, "Simulation of laser propagation in a turbulent atmosphere," *Appl. Opt.* **39**, 393-397 (2000).
- A. Consortini, F. Cochetti, J. H. Churnside, and R. J. Hill, "Inner-scale effect on irradiance variance measured for weak-to-strong atmospheric scintillation," *J. Opt. Soc. Am. A* **10**, 2354-2362 (1993).
- R. G. Lane, A. Glindemann, and J. C. Dainty, "Simulation of a Kolmogorov phase screen," *Waves. Random Media* **2**, 209-224 (1992).
- K. S. Gage, J. L. Green, and T. E. VanZandt, "Use of Doppler radar for the measurement of atmospheric turbulence parameters from the intensity of clear-air echoes," *Radio Sci.* **15**, 407-416 (1980).
- A. Rocca, F. Roddier, and J. Vernin, "Detection of atmospheric turbulent layers by spatiotemporal and spatioangular correlation measurements of stellar-light scintillation," *J. Opt. Soc. Am.* **64**, 1000-1004 (1974).