

Analysis of Power Degradation and Distortion in Coherent-Beam Combining with Lens Aberration

Byungho Kim¹, Jeongkyun Na¹, 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 17, 2020; Accepted November 17, 2020)

In this paper, we quantitatively analyze the effect of lens aberration on the degradation of beam-coupling efficiency of a tiled coherent-beam combining system. The Zernike polynomial is used to quantify the aberration of the lens, and Fresnel diffraction is applied to numerically simulate the change in the peak light intensity when combined at a distance. The results of this paper will be useful for quantitative prediction of the beam-combining efficiency that is degraded by aberration of the lens, and it is expected to be helpful for the optimal design of a practical tiled coherent beam-combining system.

Keywords: High power laser, Coherent beam combining, Aberration, Fresnel diffraction

OCIS codes: (080.1010) Aberrations (global); (080.3630) Lenses; (140.0140) Lasers and laser optics; (140.3298) Laser beam combining

렌즈 수차에 의한 타일형 빔 결합 출력 감소와 왜곡 현상 분석

김병호¹ · 나정균¹ · 정윤찬^{1,2†}

¹서울대학교 공과대학 전기·정보공학부
☎ 08826 서울특별시 관악구 관악로 1

²서울대학교 반도체공동연구소 및 응용물리연구소
☎ 08826 서울특별시 관악구 관악로 1

(2020년 11월 10일 받음, 2020년 11월 17일 수정본 받음, 2020년 11월 17일 게재 확정)

본 논문에서는 타일형 결합 빔 결합 시스템에서 렌즈의 수차가 빔 결합 효율 저하에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 렌즈의 수차를 정량화하기 위하여 Zernike 다항식 방법을 사용하고, 프레넬 회절을 적용하여 빔 결합 상황에서 침투강도의 변화를 수치적으로 시뮬레이션하였다. 본 논문의 결과는 향후, 실제 상황에서 주어진 렌즈의 수차에 의해 저하되는 빔 결합 효율에 대한 정량적인 예측과 또한, 실제 타일형 결합 빔 결합 시스템의 최적 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords: 고출력 레이저, 타일형 빔 결합, 수차, 프레넬 회절

OCIS codes: (080.1010) Aberrations (global); (080.3630) Lenses; (140.0140) Lasers and laser optics; (140.3298) Laser beam combining

I. 서 론

렌즈의 정밀도는 현미경에서부터 망원경까지 매우 중요한 문제로 대두되어왔다¹⁻³⁾. 특히 에너지 전달 및 가공을 위해 사용되는 고출력 광섬유 레이저는 초점을 정확하게 맞추기 위해 더욱 정밀한 렌즈를 사용해야한다. 그럼에도 불구하고 실제 렌즈를 제작함에 있어서는 이상적인 렌즈와는 달리, 렌

즈의 두께, 표면의 불순물 혹은 왜곡 등 다양한 원인에 의하여 수차가 발생하게 된다. 특히 렌즈의 직경이 증가할수록 렌즈의 표면을 균일하게 가공하는 것에는 큰 제한요소가 존재하며⁴⁾, 초점거리가 짧은 렌즈의 경우 렌즈의 두께가 두껍기 때문에 렌즈 수차가 급증하게 된다⁵⁾. 따라서 실제 상황에서 렌즈를 투과한 레이저 빔(beam)의 형상은 이론적인 얇은 렌즈를 통과한 빔 형상이 아닌 수차를 고려한 빔 형상으로

†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.

분석하여야 한다. 일반적으로 발생하는 렌즈 수차에는 코마 수차, 구면수차 등이 존재한다. 실제 렌즈를 설계하고 렌즈를 통과한 빔은 단일 수차만 발생하지 않고, 복합적으로 중첩된 수차가 관찰된다. 이러한 복합적으로 중첩된 렌즈 수차를 해석하기 위하여 사용되는 방법으로 Zernike 다항식을 이용한다⁶⁾. Zernike 다항식은 렌즈에서 발생하는 수차를 위상 변화의 관점으로 해석하여, 수차의 종류에 따라서 다양한 다항식으로 위상 변화를 나타낸다. 이를 이용하면, 렌즈를 통과한 뒤의 레이저의 빔 형상은 Zernike 다항식을 바탕으로 위상이 변화된 빔의 진행으로 수치해석할 수 있다.

최근 고출력 광섬유 레이저가 급속한 발전을 하며 다양한 방면에서 사용이 되고 있다⁷⁾. 그러나 유도 브릴루앙 산란, 유도 라만 산란, 모드 불안정 효과 등 출력 제한요소에 의하여 현재 단일 채널에서 발전되는 고출력 레이저의 출력은 최대 20 kW 정도로 제한된다⁸⁻¹⁰⁾. 이러한 단일 채널 레이저의 한계를 극복하기 위하여 최근 대두된 기술이 타일형 결맞음 빔 결합 기술이다^{11,12)}. 타일형 결맞음 빔 결합 기술은 다중 채널을 이용하여 목표지점에서 다수의 빔을 결맞게 결합하는 기술이다. 이 기술을 이용하여 단일 채널 레이저의 출력 한계를 극복할 수 있으며, 특히 중심부의 에너지 집속을 높여 빔의 강도(intensity)를 더욱 증대시킬 수 있는 장점이 있다¹²⁾.

본 논문에서는 렌즈의 수차가 타일형 결맞음 빔 결합에 미치는 영향을 이론적으로 분석하고자 한다. 렌즈의 수차에 의한 빔의 위상 변화를 Zernike 다항식으로 표현하고, 이를 프레넬(Fresnel) 회절을 이용하여 목표 지점까지 진행한 뒤의 타일형 결맞음 빔 결합 형상을 관찰하는 방법적 접근을 논의한다¹³⁾. 특히, 논의된 방법을 통해 실제 렌즈의 수차 중 가장 흔하게 나타나는 코마수차와 비점수차, 그리고 구면수차가 존재하였을 때 빔 형상이 변화되는 것과 또한, 이 경우 중심부에 집속된 빔의 강도가 현저하게 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서 논의된 방법을 활용할 시, 실제 렌즈 수차의 영향을 고려하여 타일형 결맞음 빔 형상 및 최종 집속 빔의 강도를 정밀하게 계산할 수 있다.

II. 빔 결합 및 수차 수치해석 시뮬레이션 설정

렌즈의 수차를 고려한 타일형 결맞음 빔 결합을 위한 수치 해석 시뮬레이션은 크게 세 단계로 나누어진다. 그림 1은 시뮬레이션의 단계를 나타낸 것이다. 그림 1의 (a)는 다수의 가우시안 빔이 각각의 렌즈를 통과한 뒤 파면의 위상 변화를 겪게되는 단계, (b)는 위상 변화된 각각의 빔이 진행되는 단계, (c)는 목표 지점에서 출력 빔이 최종적으로 결합되는 단계를 나타낸다.

첫째로, 각각의 가우시안 빔이 렌즈를 통과한 뒤 렌즈 수차에 의하여 위상이 변하는 단계는 곧 Zernike 다항식을 이용하여 위상 변화를 표현하는 단계이다. 가장 지배적으로 발생하는 코마수차, 구면수차, 그리고 비점수차에 대응하는 Zernike 다항식은 다음 식으로 나타내어진다⁶⁾.

$$Z_5 = \sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\sin\phi \quad (1)$$

$$Z_7 = \sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1) \quad (2)$$

$$Z_8 = \sqrt{6}\rho^2\sin 2\phi \quad (3)$$

Z_i 의 i 는 Zernike 다항식의 Wyrant index를 나타내며, ρ 는 원점 좌표계에서 원점까지의 거리, ϕ 는 위상각을 나타낸다. 복합적인 수차는 Zernike 다항식의 선형적인 결합으로 표현하여 다음과 같이 ΔW 로 나타낸다.

$$\Delta W = a_5 Z_5 + a_7 Z_7 + a_8 Z_8 \quad (4)$$

이 때의 상수 a_i 는 각각의 수차의 크기를 표현한다. 위의 방식으로 구해진 위상 변화를 가우시안 빔에 적용하여, 렌즈를 통과한 뒤의 평면에서 가우시안 빔의 변화를 수치적으로 나타낼 수 있다.

두 번째로, 렌즈를 통과한 빔의 진행을 나타내는 단계는

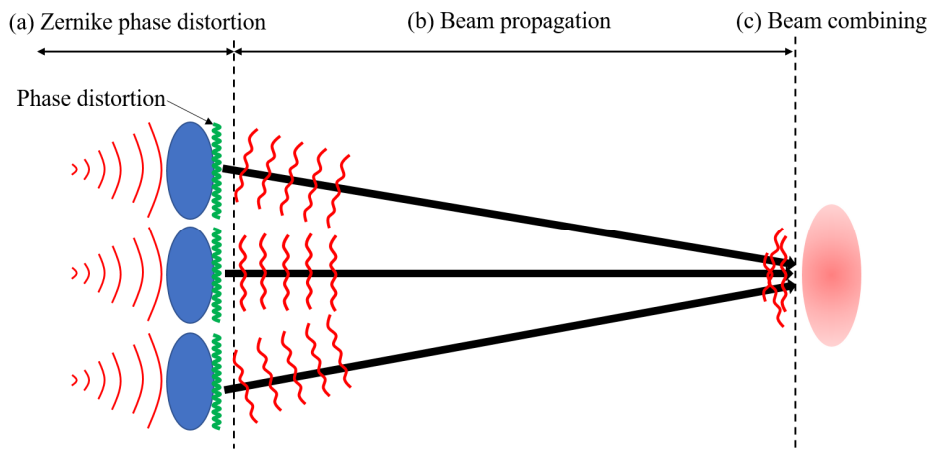


Fig. 1. Schematic of the coherent beam combining system for simulations.

프레넬 회절을 이용하는 단계이다. 이는 렌즈에 의한 수차를 고려하여 프레넬 근사를 적용한 프레넬 회절 결과로서, 그 목표 지점에서의 생성되는 빔의 전기장은 다음에 주어진 식으로 나타내어진다^[13].

$$E(x,y,z) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \int \int_{-\infty}^{\infty} E(x',y',0) e^{-ik\Delta W(x',y')} \exp\left\{\frac{ik}{2z}[(x-x')^2 + (y-y')^2]\right\} dx' dy' \quad (5)$$

이 때, λ 는 빔의 파장, k 는 파수(wave number), z 는 목표 지점까지의 거리, 그리고 $\Delta W(x',y')$ 는 식 (4)에서 수치해석적으로 구한 총 수차의 크기를 직교좌표계로 변환한 수식을 나타낸다. 목표 지점까지의 거리 z 가 빔의 파장 λ 에 비해 충분히 큰 것을 고려하여 프레넬 근사를 적용한다. 마지막 단계는, 타일형 결맞음 빔 결합을 위하여 빔의 중심을 맞추고, 빔들 간의 진행방향 위상을 변화시키는 단계이다. 빔의 강도를 최대화하기 위해서는, 결합되는 빔들의 위상이 그 중심부에서 일치해야 한다. 따라서 레이저 발진 시의 빔들의 진행방향 위상을 개별적으로 변화시킨 후, 목표지점에 도달하였을 때 각 빔들의 위상이 그 중심부에서 일치되도록 만든다.

다음 절에서 논의될 시뮬레이션에서는 코어 직경 10 μm 인 광섬유에서 발진된 1064 nm의 레이저가 직경 25.4 mm, 초점거리 14.25 cm의 렌즈를 통과한 뒤 생성되는 타일형 결맞음 빔결합을 가정한다. 단일 채널에서 빔이 각각의 수차에 의하여 변하는 양상을 관찰한 뒤, 3개의 채널을 일직선으로 배치한 결과와 삼각형 형태로 배치한 뒤의 결과를 다양한 수차를 적용하여 관찰한다. 본 논문의 시뮬레이션은 상용프로그램 Matlab을 이용하여 진행하였다.

III. 시뮬레이션 결과

단일 채널에서 수차가 있는 렌즈를 통과한 가우시안 빔의 형상은 그림 2와 같이 나타난다. 그림 2의 (a)는 수차가 없는 이상적인 렌즈를 통과한 뒤 목표 지점에서 생성되는 빔의 형상을 나타내며, (b)는 코마수차, (c)는 구면수차, (d)는 비점수차가 있는 렌즈를 통과한 뒤의 경우를 나타낸다. 그림 2의 (e)는 각각의 경우에 대해서 최종적으로 생성되는 빔의 강도를 정규화 과정을 거친 뒤 나타낸 결과이다. 수차가 발생하였을 때, 중심부의 강도가 낮아짐을 알 수 있고, 특히 구면수차가 존재할 경우에는 주변부에 다른 고점이 생기는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여, 수차가 존재하는 렌즈를 통과한 빔에 대해서 그 중심부 강도 저하 정도를 수치적으로 상세히 분석해 낼 수 있다. 특히, (e)에서 확인할 수 있듯이

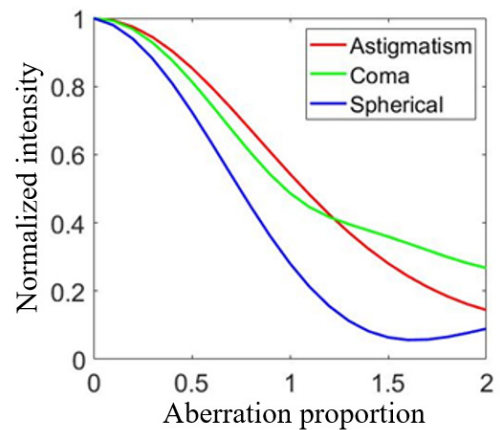


Fig. 3. Peak intensity degradation with respect to the magnitude of aberration.

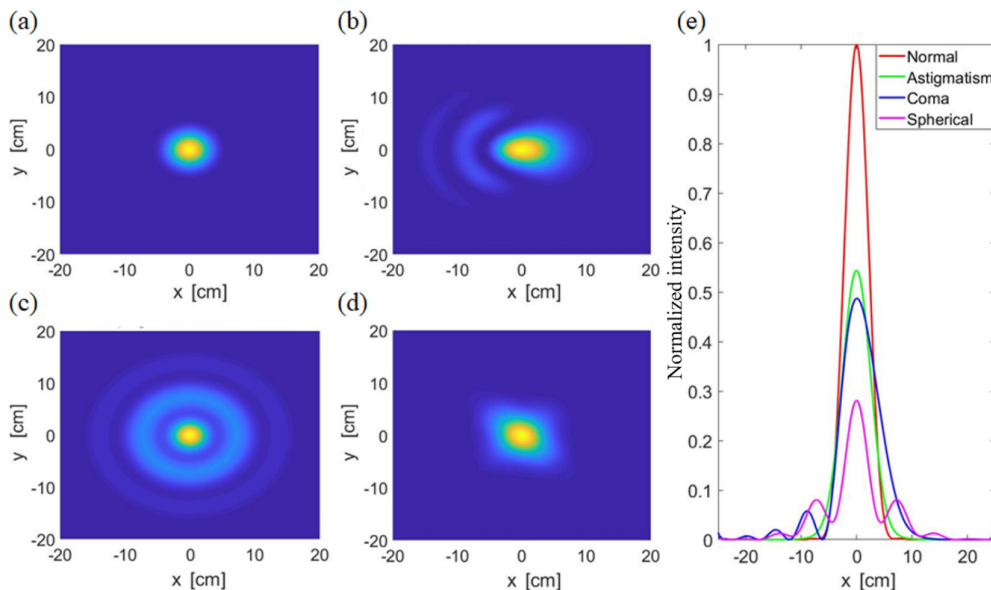


Fig. 2. Beam shapes after Fresnel diffraction of a single beam: (a) ideal case; (b), (c), and (d) the cases with coma, spherical aberration, and astigmatism, respectively; (e) intensity patterns in the x direction with or without aberration.

빔의 첨두강도(peak intensity)는 구면수차가 발생하였을 때 가장 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 각각의 수차의 크기에 따라서 첨두강도의 변화를 분석하기 위하여, 수차의 크기를 $0 \sim \lambda/\pi$ 로 변경하여 그림 3에 나타내었다. 일반적으로, 3가지의 수차 모두, 그 수차의 크기가 증가할수록 첨두강도는 감소하는 양상을 띠나, 구면수차의 경우 수차의 크기가 $0.8 \lambda/\pi$ 이상이 되는 경우에는 첨두강도가 소폭 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 강한 수차에 의하여 회절이 된 빛이 그 대칭성에 의해 중심부에 집중되기 때문으로 해석할 수 있다. 이를 토대로 타일형 빔 결합 환경에서 빔의 첨두강도

를 보다 포괄적으로 분석하고자, 다음에서 3개 채널의 배열을 변경하여 시뮬레이션을 진행하고 그 결과를 확인하고자 한다. 각각의 채널 배열에서 수차의 왜곡이 첨두강도에 주는 악영향은 동일하다고 가정하여, 일반적인 렌즈의 수차 크기를 고려하여 각 렌즈의 수차의 크기는 동일하게 $\lambda/2\pi$ 로 적용하였다¹⁴⁾.

그림 4는 3개의 채널을 일직선으로 설정한 뒤 타일형 결합을 적용한 결과이다. 그림 4의 (a)는 이상적인 경우에서 목표 지점에서의 빔 형상을 나타내며, (b)는 코마수차, (c)는 구면수차, (d)는 비점수차가 존재할 경우의 빔 형상을

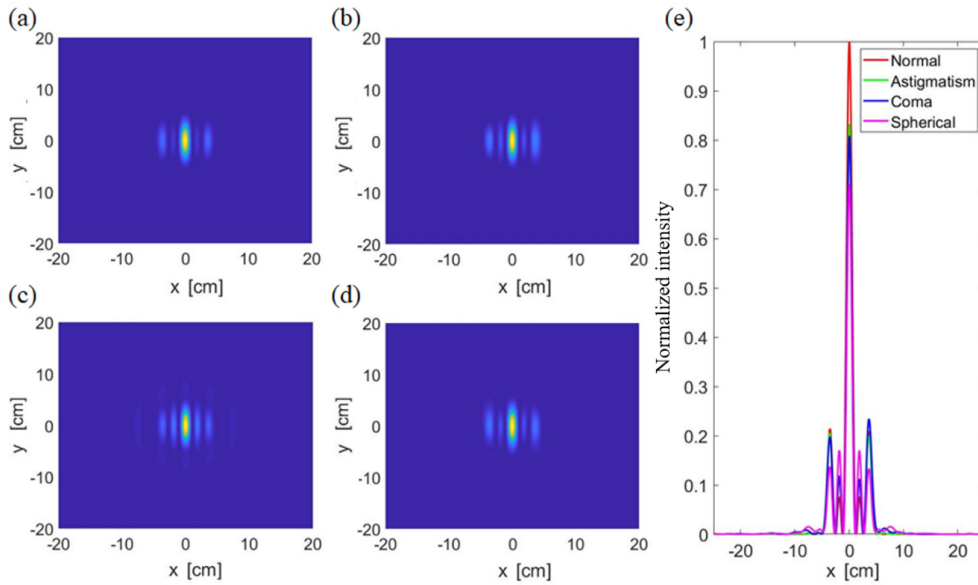


Fig. 4. Beam shapes after Fresnel diffraction of the combined beam in a straight-line form: (a) ideal case; (b), (c), and (d) the cases with coma, spherical aberration, and astigmatism, respectively; (e) intensity patterns in the x direction with or without aberration.

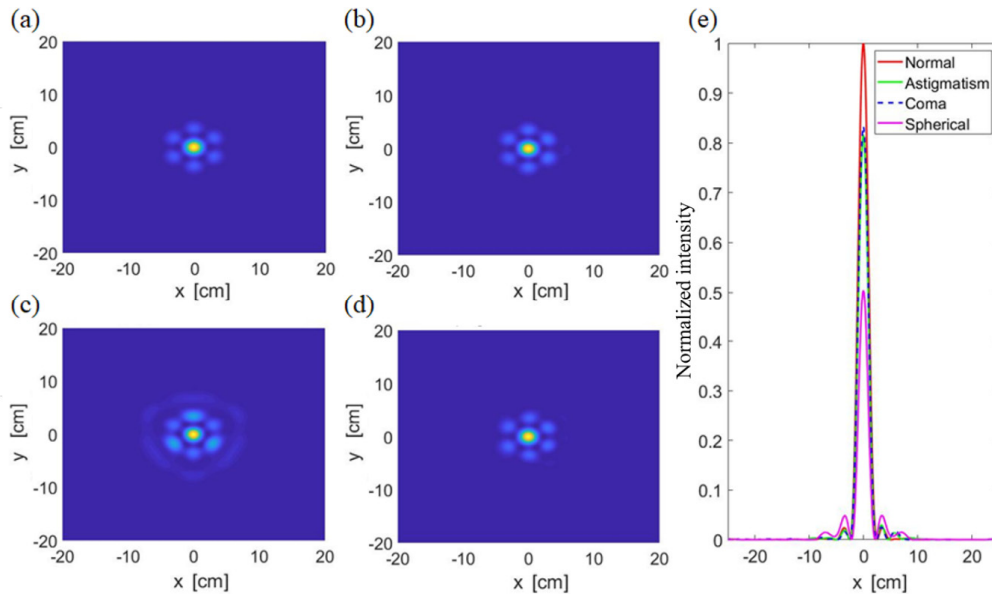


Fig. 5. Beam shapes after Fresnel diffraction of the combined beam in a triangular form: (a) ideal case; (b), (c), and (d) the cases with coma, spherical aberration, and astigmatism, respectively; (e) intensity patterns in the x direction with or without aberration.

나타낸다. 각각의 빔 형상에서, 코마수차에 의하여 빔이 한 쪽 방향으로 치우친 형상을 띠고, 구면수차가 존재할 때에는 2번째 지점에서의 침투강도가 증가하는 양상을 보인다. 그림 2의 (e)에서 관찰할 수 있듯이, 수차에 의하여 침투강도가 감소하는 형태를 볼 수 있으며, 특히 그림 1에서 예측한 바와 같이 침투강도가 감소하는 정도는 구면수차에 의한 경우가 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 침투강도는 코마수차가 존재할 때는 이상적인 경우에 비하여 0.81, 구면수차는 0.71, 비점수차는 0.82배로 감소하게 된다.

그림 5는 3개의 채널을 삼각형으로 설정한 뒤, 그림 4와 같은 방식으로 타일형 결맞음 빔결합을 적용한 결과이다. 일직선으로 빔을 배열한 경우와 마찬가지로 수차에 의하여 결합된 빔의 침투강도가 감소한 것을 확인할 수 있다. 특히, 구면수차가 존재할 경우에는 다른 링이 관찰이 되며, 중심부의 침투강도가 수차가 없을 때에 비하여 1/2 가까이로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 침투강도는 코마수차가 존재할 때는 이상적인 경우에 비하여 0.81, 구면수차는 0.51, 비점수차는 0.81배로 감소함을 알 수 있다. 본 결과로 볼 때, 렌즈의 수차는 그 정도에 따라 타일형 결맞음 빔 결합 효율에 상당한 악영향을 끼칠 수 있음을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 단일 채널 고출력 레이저의 한계를 극복하기 위하여 사용되는 타일형 결맞음 빔 결합에서, 사용되는 렌즈의 수차가 빔 결합 효율에 끼치는 영향을 상세히 분석하였다. 수치해석적 시뮬레이션을 위하여 Zernike 다항식을 적용하여 렌즈의 수차를 정량적으로 표현하였고, 프레넬 회절을 이용하여 서로 다른 채널에서 진행되는 빔들을 결맞게 결합하는 방식을 취하였다. 수치해석적 시뮬레이션 결과, 수차가 있는 렌즈를 통과하였을 때 단일 빔, 일직선 결합 빔, 삼각형 결합 빔 모두에서 침투강도가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 특히, 삼각형 배열의 경우, 각각의 수차의 크기를 $\lambda/2\pi$ 로 설정하였을 때 구면수차가 있는 렌즈는 이상적인 경우에 비하여 빔 결합 침투강도가 약 0.51배로 가장 크게 감소하였고, 코마수차와 비점수차가 0.81배로 감소함을 알 수 있었다. 전술한 내용과 같이, 이상적인 렌즈와는 다르게 실제 렌즈는 두께와 표면의 불순물 혹은 왜곡 등에 의하여 수차가 존재한다. 따라서 이상에서 논의된 방법은 다중 채널 레이저 빔이 렌즈를 통과한 뒤 결합되는 형식을 취하는 타일형 결맞음 빔 결합 방식의 정량적 분석에 있어서 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문의 연구는 국방과학연구소(UD180040ID)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. M. Haider, H. Rose, S. Uhlemann, E. Schwan, B. Kabius, and K. Urban, "A spherical-aberration-corrected 200 kV transmission electron microscope," *Ultramicroscopy* **75**, 53-60 (1998).
2. M. J. Booth, M. A. A. Neil, R. Juškaitis, and T. Wilson, "Adaptive aberration correction in a confocal microscope," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **99**, 5788-5792 (2002).
3. J. Kim, "Analysis of corneal higher-order aberrations after myopic refractive surgery," *Curr. Opt. Photon.* **3**, 72-77 (2019).
4. D. Daly, R. F. Stevens, M. C. Hutley, and N. Davies, "The manufacture of microlenses by melting photoresist," *Meas. Sci. Tech.* **1**, 759 (1990).
5. A. Mikš and J. Novák, "Third-order aberration coefficients of a thick lens with a given value of its focal length," *Appl. Opt.* **57**, 4263-4266 (2018).
6. R. J. Noll, "Zernike polynomials and atmospheric turbulence," *J. Opt. Soc. Am.* **66**, 207-211 (1976).
7. 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).
8. A. Kobayakov, M. Sauer, and D. Chowdhury, "Stimulated Brillouin scattering in optical fibers," *Adv. Opt. Photonics* **2**, 1-59 (2010).
9. 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).
10. A. V. Smith and J. J. Smith, "Mode instability in high power fiber amplifiers," *Opt. Express* **19**, 10180-10192 (2011).
11. Y. Kwon, K. Park, D. Lee, H. Chang, S. Lee, L. A. Vazquez-Zuniga, Y. S. Lee, D. H. Kim, H. T. Kim, and Y. Jeong, "Current status and prospects of high-power fiber laser technology," *Korean J. Opt. Photon.* **27**, 1-17 (2016).
12. S. J. Augst, T. Y. Fan, and A. Sanchez, "Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers," *Opt. Lett.* **29**, 474-476 (2004).
13. W. H. Southwell, "Validity of the Fresnel approximation in the near field," *J. Opt. Soc. Am.* **71**, 7-14 (1981).
14. J. Y. Wang and D. E. Silva, "Wave-front interpretation with Zernike polynomials," *Appl. Opt.* **19**, 1510-1518 (1980).