

**푸리에 변환을 이용하여 수차를 갖는 레이저 빔의
beam quality factor를 계산하는 방법
Method of determining beam quality factor
of an aberrated laser beam by use of Fourier transform**

정태문, 고도경, 이종민

광주과학기술원, 고등광기술연구소, 펄스과학연구소

jeongtm@apri.gist.ac.kr

레이저 빔의 집속 특성은 흔히 beam quality factor(M^2)로 기술되어 진다. 레이저 빔의 beam quality factor는 실험적으로 인위적인 초점 근방의 여러 지점에서 빔의 크기를 측정하는 방식으로 결정되어진다.¹ 하지만, 레이저 빔의 공간 분포가 가우션이 아니거나 혹은 다량의 파면 수차(wavefront aberration)를 포함할 경우, 초점 근방에서 빔의 크기를 결정하기 어려워서 beam quality factor를 결정하는데 어려움이 있다. 본 논문에서는 이와 같은 어려움을 극복하고자, 기존의 beam quality factor를 결정하는 방법과 다른 새로운 방식의 beam quality factor를 결정하는 방법을 소개한다. 이 방법은 초점 근처에서 레이저 빔의 크기를 직접적으로 측정하는 기존의 방법과 달리 입사하는 레이저 빔의 세기 분포와 파면 수차를 측정하고 이 측정된 값으로부터 초점 근처에서 레이저 빔의 세기 분포를 계산하는 방식으로 레이저 빔의 beam quality factor를 결정한다. 이 방식은 기존의 방식보다 빠르고 정확하게 레이저 빔(특히, 수차를 갖는 레이저 빔)의 beam quality factor를 결정할 수 있는 장점이 있다.

일반적으로 초점 근방에서 레이저 빔의 세기 분포는 circular symmetry를 가정할 때, analytic하게 Lommel 함수로 주어지나, 실제로 임의의 파면 수차나 세기 분포(intensity distribution)를 갖는 레이저 빔을 고려할 때 Fourier 변환으로 계산하는 것이 유용하다. Fraunhofer 회절 이론에 의하면, 어떤 집속 렌즈의 초점에서 레이저 빔의 세기 분포는 입사하는 레이저 빔의 세기 분포 및 파면 수차와 집속 렌즈의 모양 함수(aperture function)의 Fourier 변환(transform)으로 주어진다. 초점에서 약간 떨어진 어느 위치에서 정확한 레이저 빔의 세기 분포는 적절한 양의 defocus를 레이저 빔의 파면 수차에 더함으로써 쉽게 계산할 수 있다. 계산된 레이저 빔의 세기 분포로부터 빔의 반경에 대한 second order intensity moment²를 계산할 수 있고, 초점 근방의 여러 위치에서 계산된 second order intensity moment를 2차 함수에 fitting하여 레이저 빔 허리에서 빔의 반경(beam waist radius)과 레일레이 영역(Rayleigh range)을 계산하면, $M^2 = \pi w_0^2 / z_0 \lambda$ 로부터 레이저 빔의 beam quality factor(M^2)를 쉽게 구할 수 있다.

그림 1은 현재 광주과학기술원 고등광기술연구소에서 운영중인 10 Hz, 100 TW 레이저 빔의 세기 분포와 파면 수차를 보여주고 있다. 레이저 빔의 세기 분포와 파면 수차는 파면 수차 측정기(wavefront sensor)를 통해서 얻어졌다. 그림 2(a)는 Fourier 변환 방법을 이용하여 초점 근방의 여러 위치에서 계산한 레이저 빔의 세기 분포와 반경에 대한 second order moment이다. 그림에서 보는 바와 같이 레이저 빔이 파면 수차를 갖을 때, 집속 특성이 좋지 않음을 알 수 있다. 기존의 방법을 이용하면, 이러한 세기 분포를 갖는 레이저 빔의 반경 측정은 쉽지 않다. 하지만, 본 논문에서 소개된 방법을 이용하면, 그림 2(a)에서 표시된 바와 같이 second order moment로 초점 근방에서 레이저 빔의 반경을 정확히 기술할 수 있고,

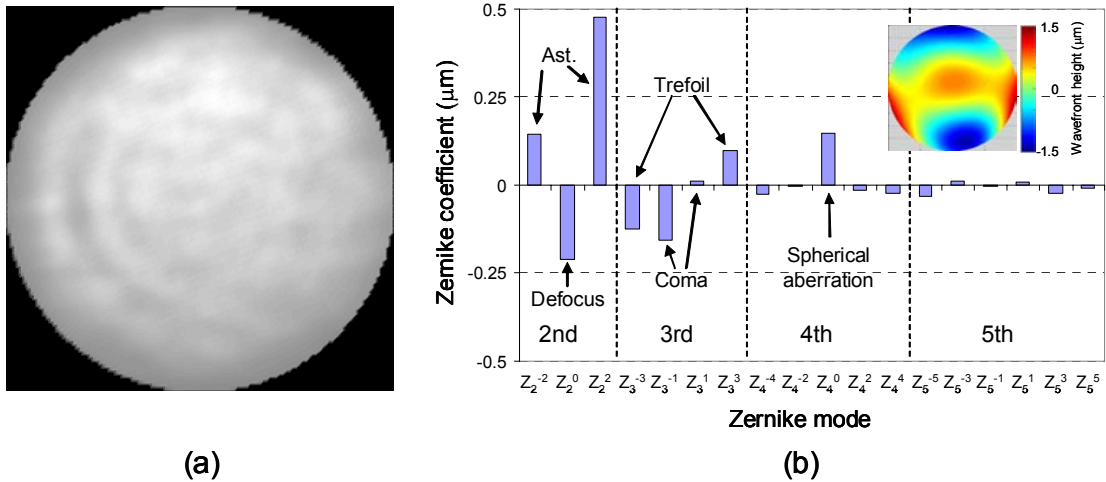


그림 1. (a) 측정된 100 TW 레이저 빔의 세기 분포. (b) 측정된 100 TW 레이저 빔의 파면 수차.

기술된 레이저 빔의 반경은 2차 함수에 거의 정확히 fitting되서 레이저 빔의 beam quality factor를 거의 정확히 계산할 수 있다. 그림 2(a)로부터 수차를 갖는 레이저 빔의 beam quality factor는 가로 방향으로 약 8.0, 세로 방향으로 약 7.4가 됨을 알 수 있었다. 고등광기술연구소에서 보유한 적응광학계를 이용하여 레이저 빔의 파면을 보정한 후, 초점 근방의 여러 위치에서 계산된 레이저 빔의 세기 분포가 그림 2(b)에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 레이저 빔의 파면을 보정하였을 때, 초점 근처에서 레이저 빔의 집속 특성이 현저히 개선됨을 알 수 있다. 레이저 빔의 파면을 보정하였을 때, 레이저 빔의 beam quality factor는 가로 방향으로 약 3.6, 세로 방향으로 약 3.4까지 줄어들음을 알 수 있었다.

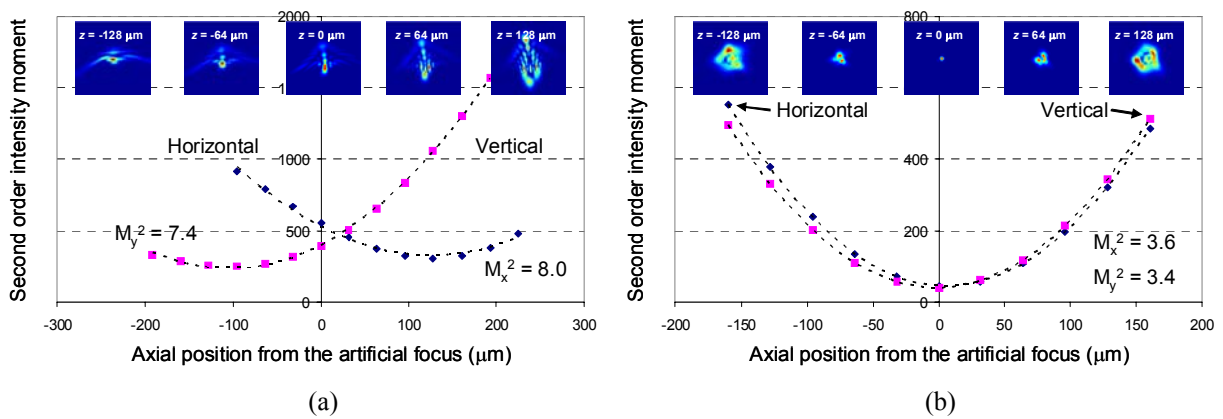


그림 2. (a) 수차를 갖는 100 TW 레이저 펄스의 집속 특성 및 계산된 beam quality factor. (b) 적응 광학계로 수차가 보정된 100 TW 레이저 펄스의 집속 특성 및 계산된 beam quality factor.

참고문헌

1. D. Wright, P. Greve, J. Fleischer, and L. Austin, "Laser beam width, divergence and beam propagation factor – an international standardization approach," *Opt. Quantum Electron.* **24**, S993-S1000 (1992).
2. N. Hodgson and H. Weber, *Laser Resonator and Beam Propagation* (Springer, New York, 2005), chap. 2.