

적응 광학계를 이용한 레이저 펄스의 파면 보정과 focal spot의 맞춤화

Wavefront Correction and Customization of the Focal Spot by Use of an Adaptive Optics System

정태문, 최일우, Nasr Hafz, 이성구, 고도경, 이종민
 광주과학기술원, 고등광기술연구소, 펄스과학연구소
jeongtm@apri.gist.ac.kr

극초단 고출력 레이저 펄스와 표적과의 상호 작용은 X선, 전자 및 양성자 빔과 같은 2차 선원을 발생시키며 전세계적으로 연구가 활발히 이루어지고 있다. 극초단 고출력 레이저 펄스 에너지의 효율적인 사용을 위해서는 레이저 펄스를 회절 한계까지 집속하는 것이 필요하다. 레이저 펄스의 파면 수차(wavefront aberration)는 레이저 펄스를 회절 한계(diffraction-limited)까지 집속하는 것을 어렵게 한다. 따라서, 회절 한계의 집속 빔을 얻기 위해서는 레이저 펄스의 파면 수차를 보정하여야 한다. 특히, 고차 파면 수차는 일반적인 광학 렌즈나 거울을 이용해서 교정할 수 없다. 이러한, 고차 파면 수차를 보정하기 위해서 변형 거울을 이용하는 적응 광학계(Adaptive Optics System)가 사용되고 있다. 적응 광학계를 이용한 레이저 펄스의 파면 보정은 1998년 F. Druon등이 처음으로 극초단 고출력 레이저에 적용하여 레이저 펄스를 회절 한계 가까이 집속할 수 있었다.¹ 현재 고등광기술연구소에도 100 TW Ti:sapphire 레이저 시설에 파면 보정용 적응 광학계가 설치되어 100 TW 레이저 펄스를 회절 한계 가까이 집속하고 있다.

본 논문에서는 고등광기술연구소에 설치된 100 TW Ti:sapphire 레이저 시설용 적응 광학계로 집속된 레이저 빔의 특성, 예를 들면, 잔여 파면 수차(residual wavefront aberration), 집속된 레이저 빔의 크기(size of a focal spot), 및 Strehl ratio등에 대해서 발표하고자 한다. 고등광기술연구소에 설치된 적응 광학계의 자세한 광학적 배치도 및 특성은 다른 문헌에 이미 소개되어 있다.² 이 적응 광학계를 이용하여 100 TW Ti:sapphire 레이저 펄스의 파면 보정을 수행하였을 때, 잔여 파면 수차 및 Strehl ratio 와 집속된 레이저

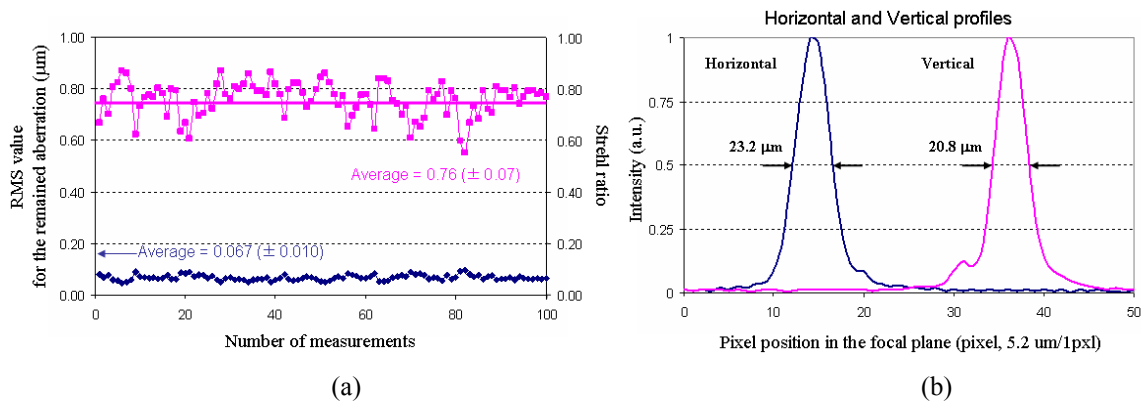


그림 1. (a) 측정된 잔여 파면 수차(residual wavefront aberration)의 rms 값 및 Strehl ratio. (b) 집속된 레이저 펄스의 횡방향 및 종방향 세기 분포 및 집속된 빔의 크기.

펄스의 모양이 그림 1에 나타나있다. 그림 1에서 보는 바와 같이, 적응 광학계를 이용하여 극초단 고출력 레이저 펄스의 파면을 보정하였을 때, 잔여 파면 수차는 Zernike 계수의 root-mean-square 값으로 $0.067 \mu\text{m}$ 까지 줄일 수 있었고, 이 때, Strehl ratio는 0.76까지 증가하였다. 파면이 보정된 레이저 펄스를 1.5 m의 초점거리를 갖는 렌즈로 집속하였을 때, 집속된 레이저 빔의 크기는 반치폭(FWHM)을 기준으로 가로 방향으로 $23.2 \mu\text{m}$, 세로 방향으로 $20.8 \mu\text{m}$ 인 것으로 관측되었다. 이것은 이론적으로 계산된 회절 한계 빔의 크기에 비해서 단지 1.21배와 1.09배 큰 값이다. 이로써 본 연구에서 사용된 적응 광학계가 100 TW 레이저 펄스의 파면을 성공적으로 보정함을 알 수 있었다.

극초단 고출력 레이저를 이용한 2차 선원 발생 실험 시, 경우에 따라서는 긴 상호 작용 길이 (interaction length)가 요구된다. 이 때, 적응 광학계를 이용하면 집속되는 레이저 빔의 모양과 상호 작용 길이 즉 레일레이 영역(Rayleigh range)을 조절할 수 있다는 장점이 있다. 그림 2는 적응 광학계를 이용하여 레이저 펄스의 파면에 $0.15 \mu\text{m}$ 의 spherical aberration(Z_4^0)을 강제로 유도하였을 때, 유도된 spherical aberration의 모양과 집속된 레이저 펄스의 세기 분포를 보여주고 있다. 적응 광학계는 실제로 레이저 펄스의 파면에 $0.159 \mu\text{m}$ 의 spherical aberration을 유도하였으며, 그림에서 보는 바와 같이 이로부터 얻어진 집속된 레이저 펄스의 세기 분포는 계산된 결과와 아주 유사함을 알 수 있다. 또한, $0.15 \mu\text{m}$ 의 spherical aberration을 레이저 펄스에 강제로 유도하였을 때, 레일레이 영역이 spherical aberration에 의해서 두 배 이상 증가하는 것을 알 수 있었다.

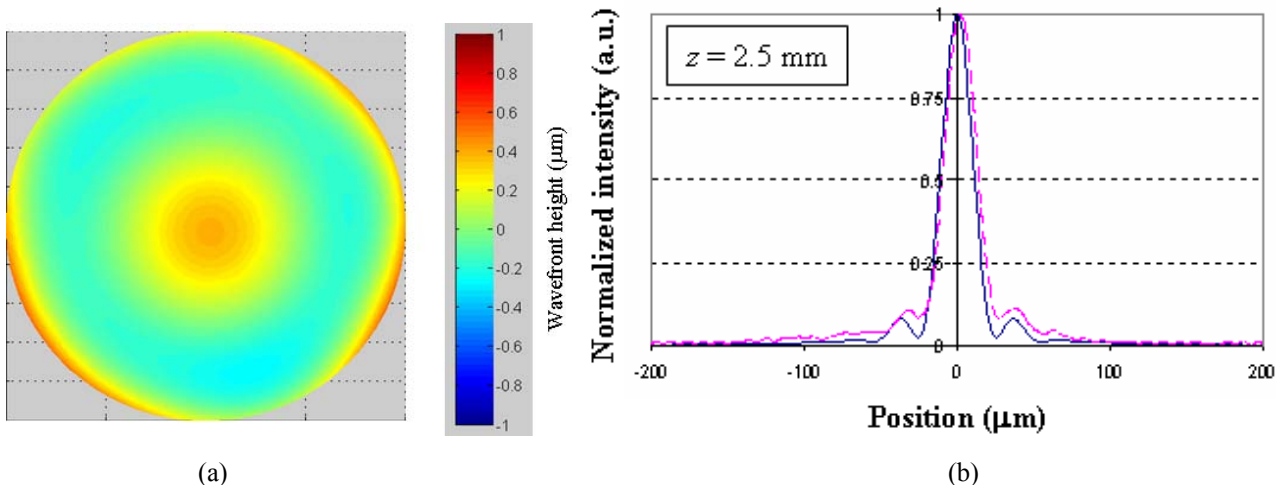


그림 2. (a) 적응 광학계에 의해서 레이저 펄스의 파면에 유도된 $0.15 \mu\text{m}$ 의 spherical aberration.

(b) 유도된 spherical aberration으로 집속된 레이저 펄스의 모양(파란색 실선은 계산치, 분홍색 점선은 측정치).

참고문헌

1. F. Druon, *et al.*, "Wave-front correction of femtosecond terawatt lasers by deformable mirrors," *Opt. Lett.*, **23**, 1043-1045 (1998).
2. Tae Moon Jeong, *et al.*, "Generation of $1.2 \times$ Diffraction-Limited Focal Spot from the 100 TW Ti:sapphire Laser System," *SPIE 6584*, 468-473 (2007).