

비선형흡수 물질을 이용한 레이저빔의 초점크기 어림측정

Estimation of the focused spot size of a laser beam using nonlinear absorption material

변지수 (Clare C. Byeon)
광주과학기술원 고등광기술연구소
byeon@gist.ac.kr

현대의 레이저는 물리, 화학, 생물 등의 기초과학부터 공학, 의학 등의 응용분야와 기계, 전자 등 실생활에 보편적으로 사용되는 여러 소재, 소자 개발에 광범위하게 이용되고 있다. 레이저빔의 특성 측정은 레이저를 이용하는 모든 분야에서 매우 중요한 문제임에도 불구하고, 기본 특성중의 하나인 빔크기(*beam width*)는 레이저빔의 *spatial profile*에 의존도가 높아서 표준화된 정의조차도 확립하기 어려운 것이 현실이다.⁽¹⁾ 일반적인 레이저를 이용한 실험에서 연구자가 직접 측정이 가능한 양은 단위시간당 적분된 평균 *power*(W)나 펄스레이저의 경우 펄스에너지(J)인데, 대부분의 연구에서 실질적으로 요구되는 것은 *Intensity*(W/cm²)나 *Fluence*(J/cm²)이다. 대부분의 경우, *Intensity*(I)나 *Fluence*(F)를 알기위해서 보편화된 몇 가지 임의의 정의를 기준하여 *knife-edge* 방법을 이용하거나⁽²⁾ 고가의 CCD를 사용하는 *beam profiler*를 이용하여 빔크기를 측정할 수 있다. 이러한 방법을 통하여 수 mm 대의 저출력 레이저 빔크기를 측정하는 것은 그리 어려운 일이 아니라 할 수 있다. 그러나, 렌즈를 사용하여 레이저빔을 작은 공간에 집적할 경우 초점영역(*focal spot*)에서의 빔크기(*beam waist*) 측정은 여러 가지 현실적인 제약으로 인해 그리 간단한 과정이 아니다. 초점영역에서는 빔크기가 수십 μm 에서 수 μm 대 혹은 그 이하로 작아지기 때문에 *Intensity*가 매우 높아지므로 고가의 CCD를 손상시킬 수 있으며 수 μm 크기의 일반적인 CCD *pixel size*를 고려할 때 공간해상도의 저하도 문제점으로 대두된다. 또한 초점영역에서의 *knife-edge* 방법은 정밀한 해상도를 제공할 수 있는 고가의 초정밀 *translation stage*를 필요로 한다. 더욱이 두 방법 모두 초점거리에 정확히 CCD와 *knife-edge*를 위치해야 하기 때문에 최소 크기(*beam waist*) 측정을 위해서는 초점영역 근처에서 거리에 따른 여러 번의 측정 과정이 필요하다. 본 연구에서는 비선형흡수 물질을 이용하여 고가의 CCD나 *knife-edge*를 이용하지 않고도 손쉽게 초점영역에서의 빔크기를 어림측정 할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

먼저 *collimate*된 수 mm 크기의 레이저빔을 비선형흡수 시료에 조사하여 조사세기에 따른 투과율(T)을 측정한다. (그림1) 이때 T는 선형물질과는 달리 상수가 아니며 조사되는 빔의 *Intensity*나 *Fluence*의 함수, T(I or F)로 나타내어지는데, 수 mm 크기의 *beam size*는 비교적 정확하게 일반적인 방법으로 측정될 수 있으므로 측정된 *power*나 *energy*로부터 *Intensity*나 *Fluence*를 얻어낼 수 있다. (그림 2의 *low F region*) 다음은 렌즈를 이용하여 *focal spot*에서의 비선형흡수시료의 투과율을 측정한다. 이 과정에서는 초점영역에서의 빔크기가 측정되지 않았으므로 T vs. Energy만을 plot 할 수 있다. 이후 렌즈를 사용하지 않았을 때의 T vs. F의 *high F region*(right end)과 렌즈를 사용하였을 때의 T vs. Energy의 *low energy region*(left end)에서 동일한 T 값을 가지는 겹치는 영역이 생기게 된다. T는 F의 단가함수이므로 동일한 F 값은 동일한 T 값을 가져야만 한다. 그러므로 *polynomial*이나 *exponential* 형식의 임의 함수를 이용하여 겹치는 부분의 T(F)를 *fitting*하고 *fitting* 결과의 역함수 F(T)를 이용하여 T vs. Energy curve에서 투과율이 겹치는 부분에 한하여 각각의 T에 따른 *Fluence*

를 계산한다. 계산된 Fluence값과 해당되는 Energy값을 이용하여 effective area, $A_{eff} = Energy/F$, 를 계산하고, A_{eff} 로부터 beam waist, ω_o 을 계산해 낸다. ($\pi\omega_o^2 = 2A_{eff}$). A_{eff} 를 이용하여 Energy를 Fluence로 변환한다.⁽³⁾

본 연구에서는 532nm 파장의 Nd:YAG 피코초(35ps) 레이저를 조사광으로 사용하였고, 30cm 초점거리의 일반 렌즈를 사용하였다. 초점영역에서의 빔크기 계산을 위해 일반적으로 흔히 사용되는 Gaussian beam waist 공식 ($\omega_o = \lambda f / \pi\omega_1$; ω_1 :radius of collimated beam before the lens, $\omega_o \ll \omega_1$)을 사용할 경우 ω_o 은 38 μ m이나, 이는 레이저빔이 완벽하게 Gaussian, 완벽하게 collimated 되어있고 사용된 렌즈 또한 고가의 diffraction limited (best-form) 렌즈임을 전제로 한다. 이러한 전제는 일반적인 광학 실험실에서 쉽게 얻을 수 있는 조건이 아니며, 따라서 계산된 빔크기도 실제 빔크기와는 현저하게 다르다. 본 연구에서 비선형흡수시료를 이용하여 알아낸 ω_o 는 170 μ m이며 knife-edge방법을 통한 87% 투과 ω_o 는 240 μ m이고 이를 미분한 다음 gaussian fitting한 결과에 따른 gaussian radius는 139 μ m이다. 이는 비선형흡수시료를 통한 본 방법이 gaussian beam waist 공식을 이용한 초점영역의 빔크기 계산보다 실제 빔크기에 월등히 가까운 값을 얻을수 있으며, 비록 CCD나 knife-edge에서 처럼 spatial profile까지 측정할 수는 없으나 상대적으로 손쉽게 CCD나 knife-edge에서 측정할 수 없는 매우 작은 초점크기까지 대략적인 어림측정을 할 수 있다는 장점이 있음을 증명한다. 본 방법은 특히 침투출력이 높은 고출력 펄스레이저의 초점크기나 수 μ m 이하의 매우 작은 초점크기를 어림 측정하는데 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

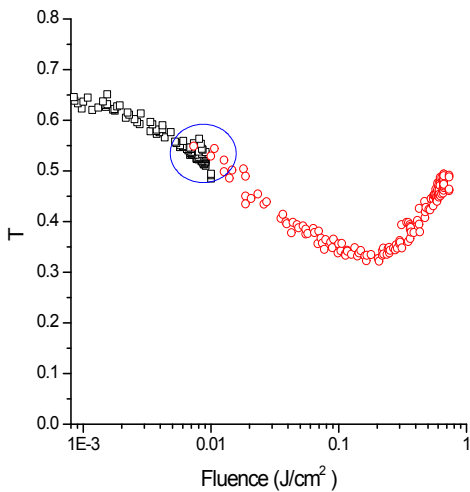


그림 2. 비선형흡수물질에 조사되는 레이저빔 세기에 따른 투과율. □: Low F region, collimated beam에 의한 조사. ○: High F region, focused beam에 의한 조사. 파란 원은 동일한 T 값을 가지는 겹치는 영역을 표시함.

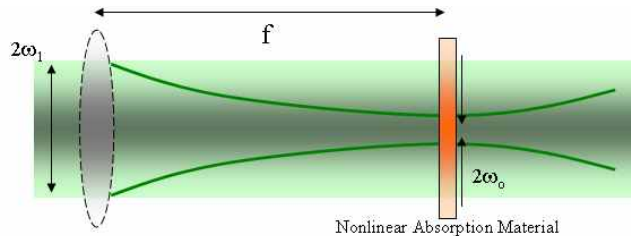


그림 1. 비선형흡수물질의 초점영역에서의 투과율 측정

1. Siegman, A. E., "How to (Maybe) Measure Laser Beam Quality", OSA TOPS **17**, 184-199 (1998).
2. Skinner, D. R. and Whitcher, R. E., Measurement of the radius of a high-power laser beam near the focus of a lens", J. Phys. E **5**, 237-238 (1972).
3. Byeon, C. C. and Lawson, C. M. "Direct Measurement of Fluence using Fluence-dependent Transmittance of Nonlinear Optical Materials", presented at OSA Annual Meeting in Santa Clara, CA, Sept. 26-30 (1999).