

Optical manipulation with Laguerre–Gaussian mode

우제훈, 최현희, 이종구, 우정원
 이화여자대학교 물리학과
cellis07@ewhain.net

김성필, 송석호
 한양대학교 물리학과

빛이 가지는 각운동량은 스핀각운동량과 궤도각운동량으로 구분될 수 있다. 스핀각운동량은 빛의 편광과 관련되며, 원편광 된 빛에서 각각의 광자는 \hbar 의 스핀각운동량을 갖는다. 한편 빛의 궤도각운동량은 편광과는 관계없이 전자기파의 공간적 분포에 의존한다.

궤도각운동량을 가지는 빛은 위상이 $\exp(-il\phi)$ 항의 의존도를 갖는다는 점에서 평면파와 다르다. 여기서 ϕ 는 빛의 단면의 방위각이고 l 은 정수이다. 때문에 이러한 빛의 Poynting 벡터는 방위각 성분을 가지게 되고, 이로부터 궤도각운동량이 생성되며 광자 당 $L = l\hbar$ 인 각운동량을 가질 수 있다. 1992년에 네덜란드의 Les Allen을 포함한 Leiden대학 그룹은 Laguerre gaussian(LG) 빛이 이와 같은 phase 의존도를 갖는다는 것을 발견하였다. Laguerre gaussian(LG) 빛의 세기분포는 정중앙에 특이점을 가지는 데, 이것은 빛의 위상이 $\exp(-il\phi)$ 항에 의존하기 때문에 생기는 현상이다. 따라서 이 빛은 단면적상에서 항상 도넛모양의 세기 분포를 가지게 된다. 또한 일반 레이저에서 흔히 사용하는 gaussian beam과 간섭을 시켰을 때 이와 같은 위상분포 때문에 간섭무늬가 선풍기 모양으로 나타난다. 그림 1은 지금까지 설명한 Laguerre gaussian(LG) 빛의 세기 분포, 그리고 LG^2_0 mode와 gaussian beam과의 간섭무늬를 사진으로 찍은 모습이다.[1,2]

또한 광 제어(manipulation)와 제한(confinement)은 여러 가지 응용분야에서(특히 생물학 분야)에서 큰 관심을 받고 있다. 빛으로 인한 제어가 샘플의 오염이나 물리적 손상을 최소화 할 수 있기 때문인데, 특히 optical gradient force가 microscopic particle을 빛의 세기가 가장 강한 부분으로 끌어당겨 강하게 집광된 빛이 microparticle을 제어하도록 하는 기술은 “optical tweezer”라고 불리우며, 지금까지 연구가 활발히 진행되어 왔다. 또한 빛을 이용하여 microparticle을 제어하는 것에서 더 나아가, 회전시키는 것에 대한 연구도 이루어졌다. 위에서 설명한 Laguerre gaussian 빛으로도 particle을 회전시킬 수 있는데, Laguerre gaussian 빛이 가지고 있는 궤도각운동량이 microparticle에 전달되면 particle의 크기에 따라 제자리에서 혹은 도넛모양의 세기분포를 따라 회전한다는 사실이 잘 알려져 있다.[3]

M. P. Macdonald는 Laguerre gaussian beam과 gaussian beam의 간섭으로부터 생성된 선풍기 모양의 빛으로 optical tweezer를 만들어 microparticle을 회전 시켰다. 간섭무늬를 생성하는 간섭계의 한쪽 팔에 유리판을 삽입하여 경로차를 줌으로써 선풍기 모양의 간섭무늬를 회전시킬 수 있었다. microparticle은 optical gradient force에 의해 선풍기 모양 간섭무늬 중 빛의 세기가 가장 강한 부분에 잡히게 되며, 유리판의 회전에 의해 간섭무늬가 회전하게 되면 잡혀있던 microparticle도 따라서 같이 회전하게 된다.[4]

본 연구에서는 Laguerre gaussian beam을 이용하여 위에서 설명한 바와 같은 microparticle의 제어가 가능한지 볼 예정이다. 그림 3는 실제 실험에서 구성한 장치도이다. 그림 2은 그림 1에서 생성한 간섭무늬가 그림 3에서 표시된 glass plate의 회전에 의해서 회전하는 모습을 사진으로 찍은 모습이다.

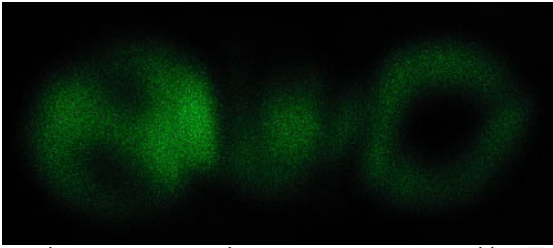


그림1. LG beam의 intensity pattern과(오른쪽) Gaussian beam과 LG²₀의 간섭무늬(왼쪽)

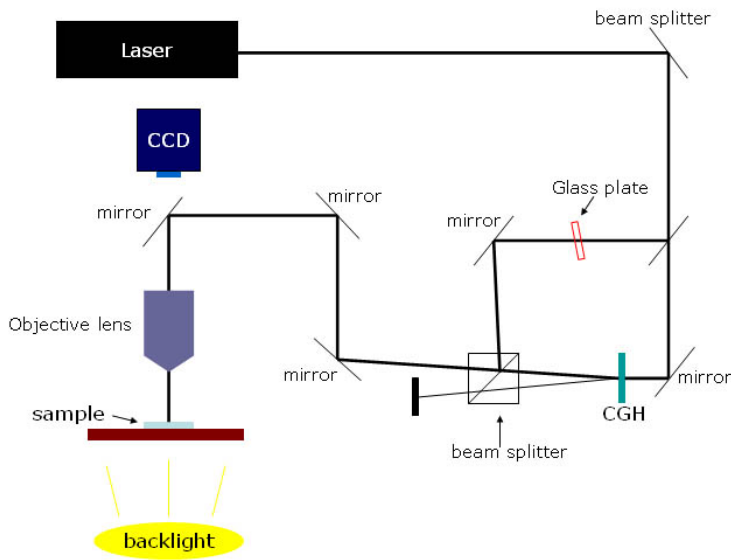


그림 3 실험장치도

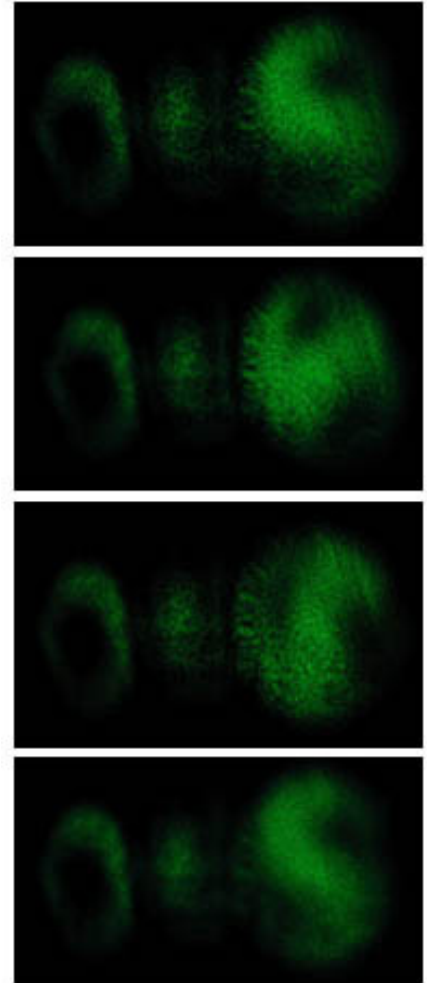


그림 2 Gaussian beam과 LG²₀의 간섭무늬가 glass plate의 회전에 의해 회전하는 모습

Reference

1. Miles Padgett, Johannes Courtial, and Les Allen, " Light's orbital angular momentum", Physics Today, May, 35(2004).
2. Les Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman, " Orbital angular momentum of light and transformation of Laguerre-Gaussian laser mode, Physical Review A, 45 8185(1992).
3. H. He, M. E. J. Friese, N. R. Heckenberg, and H. Rubinsztein-Dunlop, "Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from laser beam with phase singularity", Physical Review Letters, 75 826(1995).
4. M. P. Macdonald, K. Volke-Sepulveda, L. Parterson, J. Arlt, W. Sibbett, and K. Dholakia, "Revolving interference patterns for the rotation of optically trapped particles", Optics Communications 201, 21-28(2001).