

고전 전자기론의 근접장 각 운동량

Near-field angular momentum in classical electrodynamics

신동재*, Arturo Chavez-Pirson**, 이용희*

*한국과학기술원 물리학과, **NTT 기초연구소

s_djshin@cais.kaist.ac.kr

광원의 근처에만 존재하는 근접장(Near-field)이 먼장(Far-field)과는 매우 다른 특성을 보인다는 것은 널리 알려진 사실이다. 일반적으로 먼장은 횡파(transverse wave)이며 광원에서 멀어질수록 $1/r$ 의 함수로 그 세기가 감소하는데 반하여, 근접장은 시간의존항을 제외하고는 정적인 분포를 보이고(static), 종파(logitudinal wave)성분이 오히려 크며 광원의 미세구조에 직접 관련되어 있다. 이러한 근접장이 근접장 주사 광학현미경(Near-field Scanning Optical Microscopy)의 발전으로 인해 실험적으로 연구되기 시작하면서 여러 가지 예기치 못한 현상들이 발견되고 있다. 그중 하나로서, 원편광된 빛(Circularly polarized light)을 내는 광원의 근접장을 측정할 실험에서 광원에 접근할수록 원편광이 사라지는 현상이 실험적으로 보고된 바 있다.⁽¹⁾ 본 발표에서는 Bethe의 모델과 다중극 장(Multipole field)의 근접장을 분석하여 고전전자기론 내에서 근접장의 각 운동량에 대해 논의한다.

원편광된 빛이 $\pm \hbar$ 의 스핀(Spin) 각 운동량을 가진다는 것은 널리 알려져 있다. 반면 빛이 그 위상 구조에 따라 궤도(Orbital) 각 운동량도 가진다는 것은 그리 널리 알려져 있지 않다. 그동안 이론적으로 다루어 지던 빛의 궤도 각 운동량은 최근 마이크로파(Microwave) 영역에서 직접 측정되었으며 스핀과 궤도 각 운동량이 기계적으로 동일함도 보고된 바 있다.⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ 이러한 실험들은 빛의 먼장이 빛의 진행 방향으로 스핀과 궤도 각 운동량에 대해 동시에 고유상태(Eigenstate)에 있음을 보여준다. 반면에 근접장에서는 가로조건(Transversality condition)이 충족되지 못함으로 인하여 스핀과 궤도 각 운동량이 구별되지 못하고 결합되어 스핀과 궤도 각 운동량의 합인 전체 각 운동량(Total angular momentum)만이 고유상태에 있게 된다.

Bethe 모델의 경우 국소적인 편광상태를 계산해 보면, 원편광 상태의 빛이 구멍에 입사된 후 근접장에서는 선편광 상태로 존재함을 알 수 있다.[그림 1]⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 이는 원편광된 빛이 작은 구멍에서 일어나는 편광의존 회절현상에 의하여 선편광상태로 분리되기 때문인데, 마치 근접장에서 빛의 각 운동량이 사라졌다가 구멍에서 멀어지면서 다시 회복되는 것으로 보인다. 이러한 현상은 바로 빛의 궤도 각 운동량을 고려하지 않았기 때문에 나타나는 것이다.

다중극 장의 광자당 각 운동량은 먼장에서는 자기 양자수(Magnetic quantum number) m 에 의해 결정된다. 근접장에서 광자당 각 운동량을 계산해 보면 그림 2와 같이 광원에 다가갈수록 0으로 감소하는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 따라서 근접장 에너지의 대부분을 차지하는 진행하지 않는 빛의 각 운동량이 0일 것이라는 추측은 고전 전자기론에서 어느 정도 근거를 가지는 것으로 보인다.

1. J. Levi, V. Nikitan, J. Kikakawa, A. Cohen, N. Samarth, R. Garcia, and D. Awschalom, Phys. Rev. Lett. 76, 1948 (1996)

2. L. Allen M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman, Phys. Rev. A 45,

8185 (1992)

3. N. B. Simpson, K. Dholakia, L. Allen, and M. J. Padgett, *Opt. Lett.* 22, 52 (1997)
4. J. Courtial, D. A. Robertson, K. Dholakia, L. Allen, and M. J. Padgett, *Phys. Rev. Lett.* 81, 4828 (1998)
5. H. Bethe, *Phys. Rev.* 66, 163 (1944)
6. D. J. Shin, A. Chavez-Pirson, and Y. H. Lee, *J. Microsc.* 194, 353 (1999)

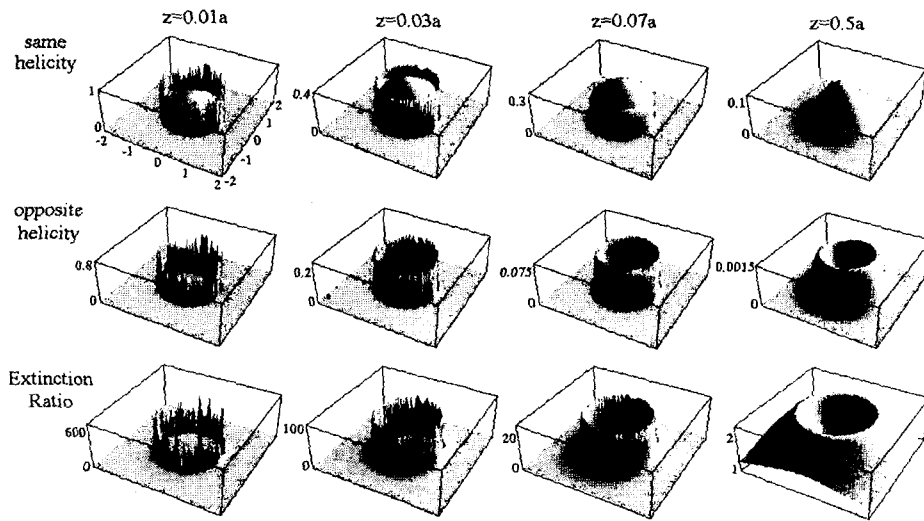


그림 1 원편광된 빛이 구멍을 통과할 때 근접장의 편광상태 변화. 구멍에서 매우 가까운 거리에서는 선편광이 되었다가 구멍에서 멀어지면서 원편광 상태가 다시 회복되는 것을 알 수 있다.

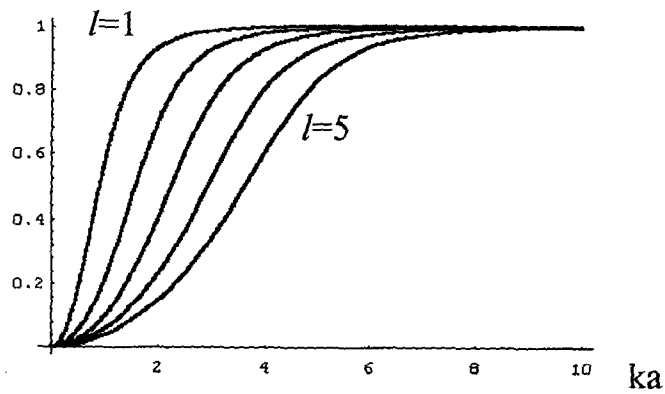


그림 2 광원으로부터의 거리에 따른 다중극 장의 광자당 각 운동량의 변화.