다중 모드 빛의 비고전도

Nonclassical measure of multi-mode light field

김기식*, 김영철+
*인하대학교 물리학과, +선문대학교 신소재과학과
kisik@inha.ac.kr

일반적으로 고전적 파동 이론의 범주 내에서 설명할 수 없는 빛의 성질을 빛의 비고전성이라 부르고, 이러한 비고전성을 갖는 빛을 비고전적 빛이라 부른다. 빛의 비고전성은 비고전도를 통하여 정량적으로 기술될 수 있다. 본 논문에서는 단일 모드 빛에 대하여 정의된 빛의 비고전도를 다중 모드 빛으로 확장시키고, 이를 다중 모드 빛의 얽힘성과 비교하여 분석하고자 한다.

빛의 밀도 연산자에 대한 결맞음 상태 표현을 통하여 고전적 빛과 비고전적 빛을 구분할 수 있다. 결맞음 상태 표현을 통하여 도입되는 준확률 밀도함수의 형태를 고찰함으로써 빛의 다양한 비고전성을 분석할 수 있다.[(1)] 특히, 준확률 밀도함수를 정규화시키는 과정을 이용하여 빛의 비고전도를 정량화할 수 있다. 단일 모드 빛에 대하여 정규화 과정은 다음과 같다. 준확률 밀도함수 $\phi(v)$를 폭이 τ인 가우시안 함수와 포개어 새로운 밀도함수 $R_\tau(v)$를 얻는다. 가우시안 함수의 폭 τ를 증가시키면서 $R_\tau(v)$는 점점 정규 함수의 성질을 띠게 되고, $R_\tau(v)$가 완전히 정규화하는 τ의 최소값을 비고전적 빛의 비고전도로 정의한다.[(2)]

$$R_\tau(v) = \int G_\tau(v-v')\phi(v')d^2v'$$

위에서 정의한 단일 모드 빛에 대한 비고전도를 다중 모드 빛에 대하여 단순히 확장하여 적용하기는 어렵다. 이러한 어려움을 피하기 위하여 때때로 특정 하나의 모드만을 제외하고 다른 모드들에 대하여 부분 대각합을 취함으로써 단일 모드 빛에 대한 비고전도를 활용하였다. 그러나 특정 하나의 모드만을 제외하고 다른 모드들에 대하여 부분 대각합을 취하는 과정에서 다중 모드 사이의 흥미로운 양자적 상관성을 잃게 되고, 특히 얽힘성과 관련한 비고전적 특성은 단일 모드 상황에서는 논의할 수 없다.

본 논문에서는 다중 모드 빛에 대한 비고전도를 모든 모드에 대하여 동일한 가우시안 함수를 포개는 과정을 통하여 정의하였다. 이렇게 정의함으로써 단일 모드의 경우에서와 같이 단일 변수 τ로 다중 모드 빛의 비고전도를 정량화하였다.

$$R_\tau(\{v\}) = \int \cdots \int \Pi_i G_\tau(v_i - v_i')\phi(\{v'\})\Pi_i d^2v_i'$$

이렇게 정의한 다중 모드 비고전도를 살다발 가르개를 통과하여 나오는 빛에 적용하였다. 부분 대각합을 취하고 단일 모드 비고전도를 적용하였을 때, 반사 또는 투과하여 나오는 빛의 비고전도는 입사한 빛의 비고전도보다 작게 나타났으나, 다중 모드 비고전도를 적용하였을 경우, 입사한 빛의 비고전도가 얽힌 출력 빛에서도 그대로 보존되었다. 다중 모드 비고전도가 입력과 출력 빛에 대하여 보존되는 물리적 원인을 살다발 가르개에 의하여 발생되는 출력 빛의 얽힘성으로 분석하였다.

(1) L. Mandel and E. Wolf, "Optical Coherence and Quantum Optics," Cambeidge Univ. Press (1995).
(2) C. T. Lee, Phys. Rev. **A45**, 6586 (1992); K. Kim, Phys. Rev. **A59**, 1566 (1999).