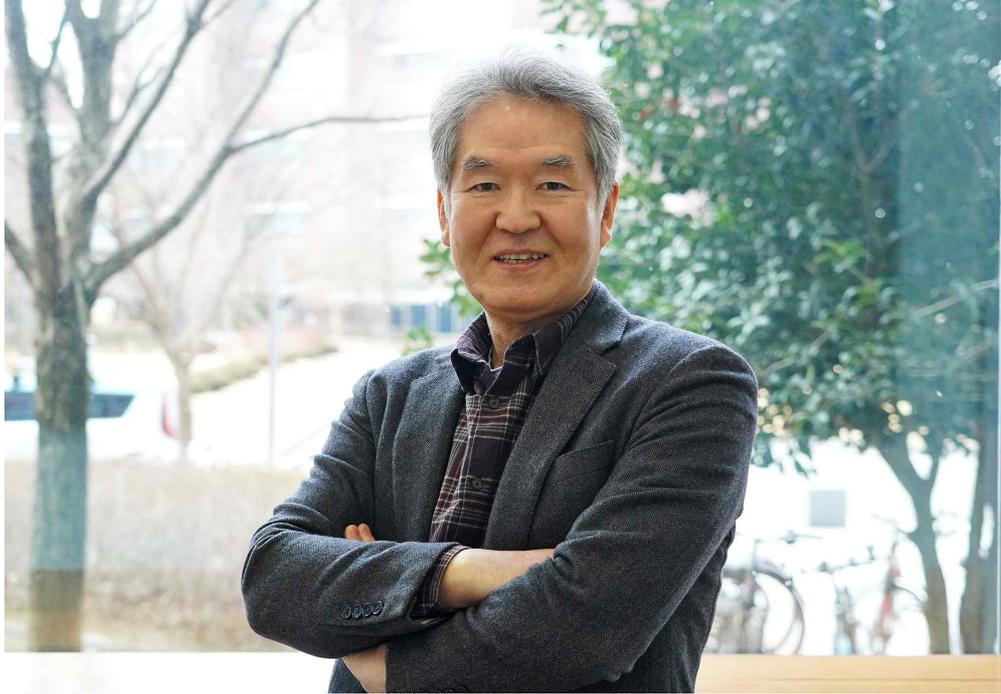


“기존 물리학의 한계 넘어선 초정밀 측정이 가능하다”

GIST, 초고해상도 양자분광기 구현 기술 개발

- 전기전자컴퓨터공학과 함병승 교수, 독자적으로 구축한 '초해상 양자센싱' 이론에 기초하여 기존 분광기에 탑재 가능한 '양자분광기' 구현 방법 제안... 혁신적 분광 측정 기술 제시
- 간단한 구성만으로 양자 수준의 감도·해상도 확보 가능하고 정밀 계측, 의료용 이미징, 원격 탐사 등 다양한 분야에 응용 기대... 국제학술지 《Scientific Reports》 게재



▲ 전기전자컴퓨터공학과 함병승 교수

광주과학기술원(GIST, 임기철 총장)은 전기전자컴퓨터공학과 함병승 교수가 그동안 독자적으로 구축한 '초해상 양자센싱'*이론에 기초하여, 기존 분광기에 탑재 가능한 '양자분광기' 구현 방법을 제안했다고 밝혔다.

'양자분광기'는 기존 분광기의 물리학적 한계(회절 한계 또는 표준양자한계)를 극복하여 현존하는 어떠한 고전적인 물리 법칙이나 기기로도 달성할 수 없었던 초정밀 측정을 가능하게 한다.

* 함병승 교수는 지난 2024년에 발표한 '초해상 양자센싱' 이론에서 고전광학과 호환가능한 새로운 개념의 양자센싱 이론을 제시한 바 있다.

이번 연구는 기존 분광기의 성능을 획기적으로 개선할 위상 감도 및 해상도를 확보함으로써, 양자센서 기술의 새로운 가능성을 제시하고 광학 계측 분야의 패러다임 전환을 예고하고 있다.

분광기는 물질이 빛을 흡수하고 방출하는 방식을 정량적으로 측정하는 장치로, 알려진 파장(헬륨네온 레이저)과의 주파수 차이를 분석하여 미지의 빛의 파장을 정확히 파악할 수 있다.

이를 통해 화학물질의 구성, 농도, 반응 동역학 등을 분석하며, 환경 모니터링, 품질 관리, 생화학 연구 등 다양한 분야에서 폭넓게 활용된다.

이때, 주파수 차이를 정확하게 표현하는 해상도가 중요한데 이 해상도의 한계를 결정하는 고전역학적 한계가 '회절 한계*' 또는 '표준양자한계*'이다.

* **회절 한계(diffraction limit):** 진행 중에 슬릿(slit)이나 장애물을 만난 파동이 퍼져서 진행되는 현상을 회절(diffraction)이라고 하며, 회절 한계는 빛의 회절 현상에 의한 광학 현미경 해상도의 한계를 말한다.

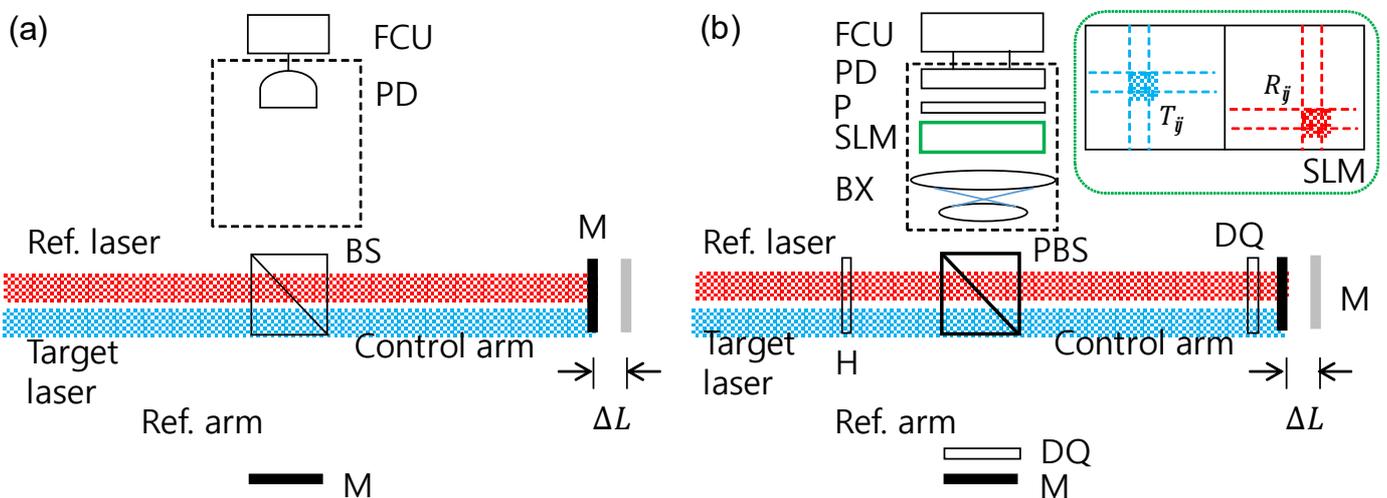
* **표준 양자 한계(Standard Quantum Limit, SQL):** 양자 역학의 불확정성 원리에서 비롯된 측정의 정밀도 한계로서 어떤 물리량(위치, 속도, 위상, 진동수 등)을 측정할 때, 관측 장비와 측정 방법에 관계없이 기본적인 양자적 잡음에 의해 도달할 수 있는 최상의 정밀도에 제한이 걸린다.

기존의 광학 분광기는 회절 한계에 의해 주파수 해상도에 제한이 있었다. 그러나 이번 연구에서는 **고차 세기 상관관계***를 기반으로 하는 **위상 제어 기술을 활용**해 이 **회절 한계를 극복**했다.

함 교수가 개발한 이 기술은 **빛의 세기곱의 차수***에 비례해 **위상 감도와 주파수 해상도가 선형적으로 향상**되는 특징을 갖는다.

* **고차 세기 상관관계(higher-order intensity correlations):** 광학 및 양자물리에서 빛의 강도(intensity) 신호 사이의 통계적 상관관계를 고차원적으로 분석하는 방법이다. 현존하는 모든 광센서는 1차 세기 상관관계에 기초한 측정방식인데, 고차 세기 상관관계는 양자측정 방식으로서 빛의 2차 세기간섭 이상을 의미하여 위상 및 광자간 상호작용을 훨씬 더 정밀하게 측정하는 데 사용된다.

* **빛의 세기곱의 차수(order of intensity product):** 광학적 신호의 강도를 여러 번 곱하여 고차 상관관계를 분석하는 개념으로서 회절 한계를 뛰어넘는 초고해상도 기술과 위상 감도 향상에 중요한 역할을 한다.



▲ **양자스펙트로미터 구조.** (a) 기존 스펙트로미터. (b) 양자스펙트로미터. SLM: 공간광변조기, FCU: 주파수차계수기, P: 편광기, PD: 광검출기, PBS: 편광빔가르개

또한 기존 양자 센싱은 얽힘 광자를 사용해야 하는 복잡성과 환경적 노이즈에 취약하다는 문제가 있었다.

함 교수는 간섭계*의 스캐닝 모드를 이용해 간섭무늬의 변화를 정확하게 세는 고전적인 방식으로 노이즈 저항성과 높은 안정성을 동시에 확보했다.

* **간섭계(interferometer)**: 빛 또는 전자기파의 간섭 현상을 이용해 파동의 특성(위상, 진동수, 파장 등)을 고도로 정밀하게 측정하는 장치로서, 두 개 이상의 빛이 서로 만나 간섭 무늬를 형성하는 원리를 사용해 거의 원자 수준의 거리 변화도 감지할 수 있는 고감도 측정 장비이다.

이번 연구의 가장 큰 성과는 단일광자 기반의 고차원 얽힘 광자쌍을 사용하는 대신, 일반적인 레이저를 활용해 '위상조절 세기곱(Phase-Controlled Intensity Product)'이라는 혁신적인 이론을 창안한 것이다. 이를 통해 하이젠베르크 한계*를 만족하는 양자분광기를 구현할 수 있는 방법을 제시했다.

위상조절 세기곱은 빛의 위상 정보를 정밀하게 제어하고, 광 강도(intensity)의 고차 상관관계(higher-order correlation)를 결합함으로써 해상도와 측정 감도를 극대화하는 기술이다. 광학 간섭계와 위상 제어 장치를 활용해 빛의 위상(phase)과 세기(intensity)를 동기화(이 둘 사이의 관계를 정확하게 제어해 일치시키는 과정)하고, 이를 곱해 기존 회절 한계(diffraction limit)를 뛰어넘는 고해상도 측정을 가능하게 한다.

* **하이젠베르크 한계(Heisenberg Limit)**: 양자센싱 이론에서 측정오류가 모집단 수에 역비례하는 관계로서 고전센싱 이론 한계가 되는 표준양자한계 대비 모집단 수의 제곱근에 해당하는 양자이득을 나타낸다.

함 교수는 이번 연구에서 마이켈슨 간섭계(Michelson interferometer)* 기반의 전통적인 센서 구조에서 위상 제어된 출력 필드의 위상조절된 세기곱(intensity product)을 활용해 현재 고차얽힘광자에 기초한 양자센싱에 있어 20 미만의 차수한계를 획기적으로 극복했다.

이 방법은 공간광변조기*의 다중 픽셀 기반 위상 제어 시스템을 통해 해상도를 수백만 배 높일 수 있다는 점에서 실용성이 매우 높다.

* **마이켈슨 간섭계(Michelson interferometer)**: 광학 간섭 현상을 이용해 빛의 위상 차이와 경로 차이를 초정밀하게 측정하는 장치이다. 1887년 앨버트 마이켈슨(Albert A. Michelson)이 고안한 이 간섭계는 회절 한계를 뛰어넘는 해상도와 나노미터 수준의 거리 측정 능력을 가지고 있어 광학, 천문학, 중력파 검출(LIGO) 등 다양한 과학 기술 분야에서 필수적인 장비로 사용되고 있다.

* **공간광변조기(SLM, Spatial Light Modulator)**: 빛의 공간적 특성을 제어하여 영상을 표시하거나 변조하는 장치로서 주로 전자광학 소자나 액정 디스플레이 기술을 활용하여 빛의 세기, 위상, 편광 등을 조절한다. 픽셀 수에 비례하여 해상도가 향상되며, 픽셀 수가 많을수록 더 세밀한 빛의 조절이 가능해져 고해상도의 영상 표현이 가능하다. 또한, 외부 환경의 노이즈나 간섭에 강한 안정성을 보이는 경우가 많아 다양한 조건에서도 안정적인 동작을 유지한다.

함 교수는 수치 시뮬레이션과 실험을 통해 주파수 해상도가 10배에서 최대 100만 배까지 향상될 가능성을 검증했다. 특히, SLM 픽셀 수 K 에 비례해 K 배 향상된 해상도를 보였으며, 주변 소음에도 강한 안정성을 갖춘 것을 확인했다.

이는 기존 양자 광학 기반 기술이 요구하는 복잡한 장비 없이도 비교적 간단한 구성만으로 양자 수준의 감도와 해상도를 확보할 수 있다는 점에서 큰 의미가 있다.

함병승 교수는 "이번 연구는 미래 양자센서 기술의 핵심 토대로서 광학 센서, 분광 분석, 양자 정보 처리 등 다양한 첨단 분야에 즉각적인 파급 효과를 미칠 것으로 예상된다"며, "특히 환경 변화에 강한 정밀 계측 장비, 의료용 이미징 기술, 원격 탐사 시스템, 레이더/라이다 등에서 폭넓게 활용될 것"이라고 전망했다. 또한, "앞으로도 실용적 양자센싱 장비 개발 및 양자센서 상용화 연구에 박차를 가할 계획"이라고 덧붙였다.

이번 연구는 과학기술정보통신부 ITRC 양자인터넷 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 연구 결과는 국제학술지 《사이언티픽 리포트(Scientific Reports)》에 2025년 2월 22일 온라인 게재됐다.

논문의 주요 내용

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Scientific Reports (IF: 3.8, 2023년 기준)
- 논문명 : A superresolution-enhanced spectrometer beyond the Cramer-Rao bound in phase sensitivity
- 저자 정보 : 함병승(단독저자)