

“단 한 번의 촬영으로 물질 성분 정밀 분석”

GIST, 실시간 정밀 성분 분석 가능한 초소형 AI 분광 센서 개발

- 전기전자컴퓨터공학과 이흥노 교수팀, 초소형 박막 필터 센서에 AI 복원 알고리즘 결합해 고정밀·저전력·소형화 달성... 기계적 스캔 없이 파장 정보 복원하는 신개념 계산 분광기
- 단일 촬영만으로 500~850nm 스펙트럼 정밀 복원해 실시간 혈당 측정·식품 안전 검사·위조 문서 판별 등에 활용 기대... 국제학술지 《Scientific Reports》 게재



▲ (왼쪽부터) 전기전자컴퓨터공학과 최영인 학생, 이흥노 교수, 데이비드 사무엘 바티(David S. Bhatti) 연구원

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 전기전자컴퓨터공학과 이흥노 교수 연구팀이 2022년 발표한 다층 박막 필터* 기반 초소형 센서에 인공지능(AI) 복원 알고리즘을 결합해, 단 한 번의 이미지 촬영만으로 정밀한 스펙트럼 정보를 재구성할 수 있는 신개념 계산 분광기* 기술을 개발했다고 밝혔다.

연구팀은 앞선 연구(*Scientific Reports*, 2022년 3월)를 통해 반도체 공정 수준의 초정밀 공정으로 제작한 다층 박막 필터 구조를 CMOS 센서*와 결합하고, 단일 이미지 촬영만으로 500~850nm 스펙트럼을 정밀 복원할 수 있는 ‘단일 촬영 계산 분광기(single-shot spectrometer)’의 하드웨어 구현 가능성을 성공적으로 입증한 바 있다.

* 다층 박막 필터(MTF, Multilayer Thin-Film Filter): 서로 다른 굴절률의 박막(수십~수천 나노미터 두께)을 여러 층으로 쌓아 만든 광학 필터로, 특정 파장 대역의 빛만을 선택적으로 투과시킬 수 있다. 이 필터를 격자 형태로 배열하면 다양한 파장 정보를 동시에 수집할 수 있어, 분광기에서 스펙트럼 정보를 효율적으로 추출하는 데 활용된다.

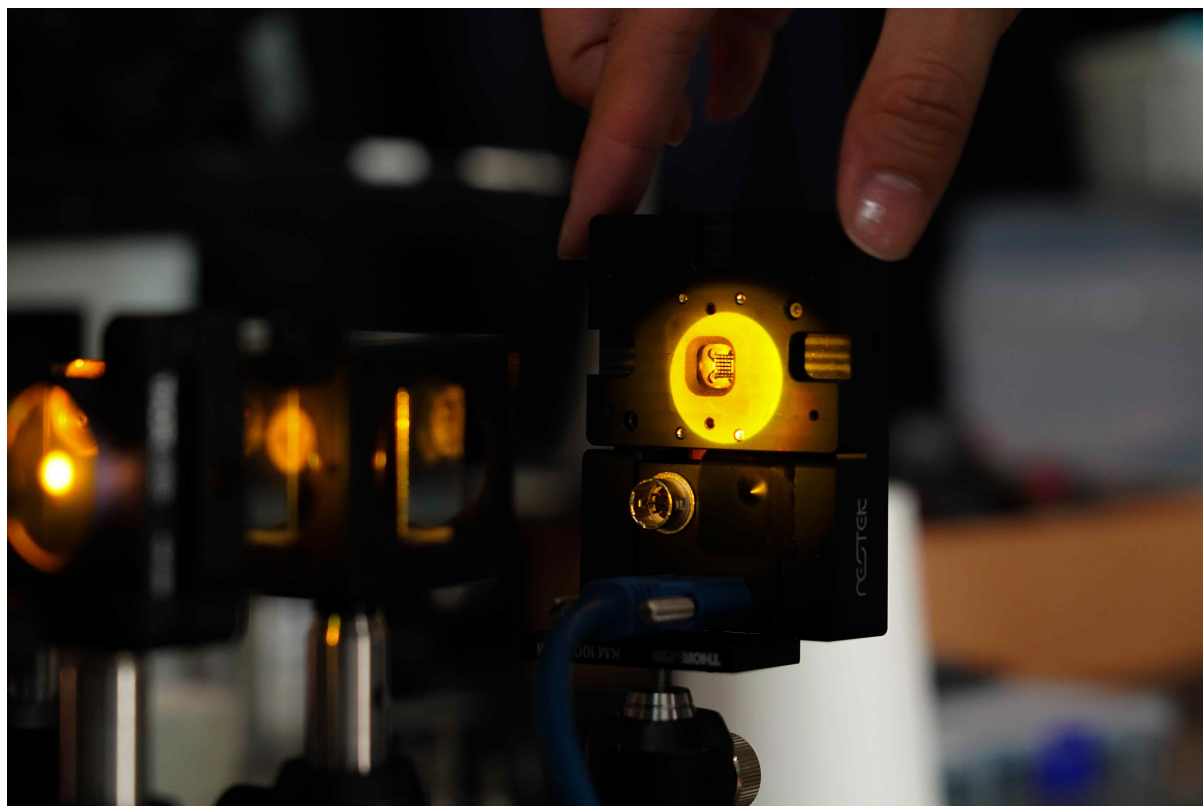
* **계산 분광기(Computational Spectrometer):** 기존 분광기처럼 파장을 기계적으로 분리하지 않고, 필터로 압축 측정된 데이터를 인공지능 등 계산 알고리즘을 통해 전체 스펙트럼으로 복원하는 방식의 디지털 분광기이다.

* **CMOS(Complementary Metal-Oxide Semiconductor) 센서:** 빛을 전기 신호로 변화하는 반도체 기반 센서로, 스마트폰 카메라와 같은 대부분의 영상 기기에 사용된다. 저전력·고속 특성이 뛰어나 소형 광학 측정 시스템과의 결합에 적합하다.

이번 연구에서는 이를 한 단계 발전시켜, **AI 복원 알고리즘을 정밀 설계하고 시스템 전체를 최적화함으로써 측정 정확도와 처리 속도를 대폭 향상시켰다.**

특히 광학 신호를 필터 단위로 압축 측정한 뒤, AI를 통해 전체 스펙트럼을 복원하는 하드웨어-소프트웨어 융합 구조를 실제로 구현함으로써, 기계적 스캔 없이도 고정밀 파장 분석이 가능한 초분광 융합 기술을 완성한 것이다.

이로써 기존 분광기의 한계를 뛰어넘는 고정밀·저전력·소형화를 동시에 실현했으며, 모바일 기기나 현장 진단 센서 등 차세대 광학 센서 플랫폼으로서의 활용 가능성도 구체적으로 제시했다.



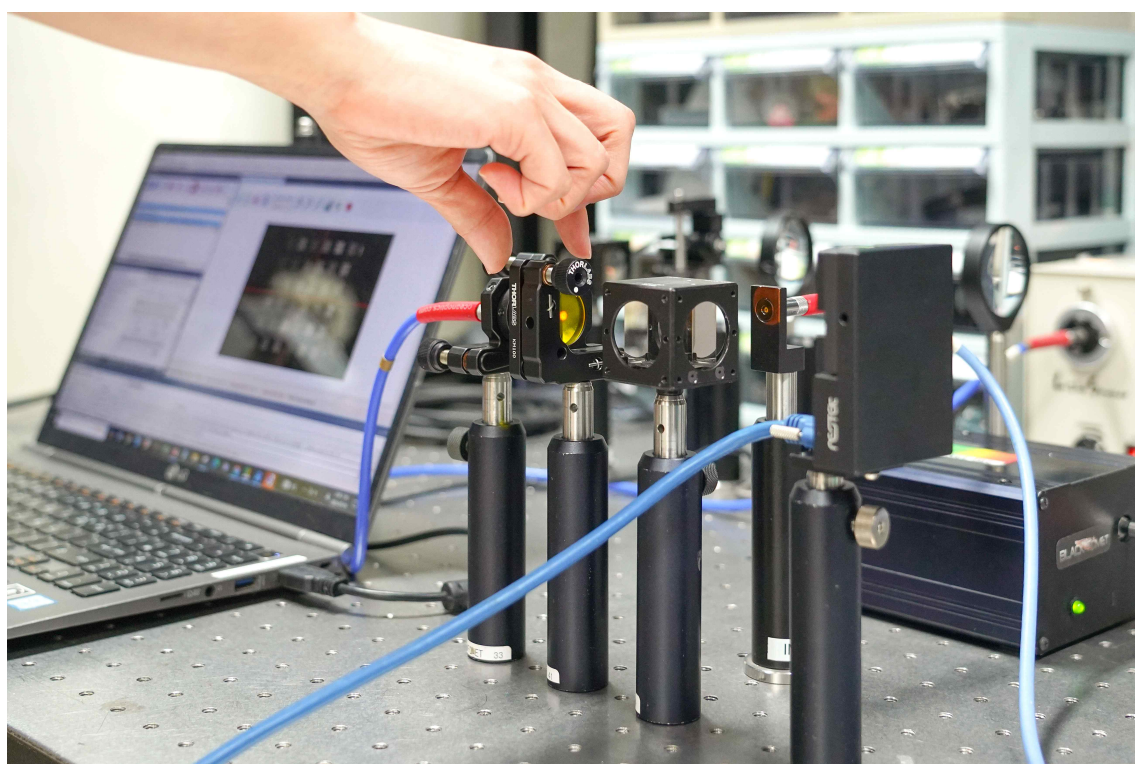
▲ 제안된 계산 분광기 실험 구성 및 센서 시제품. 실험 시스템을 통해 다층 박막 필터가 부착된 CMOS 센서를 통과한 빛을 단일 이미지로 수집하고, 이를 인공지능(AI) 기반 알고리즘으로 실시간 복원한다. 사진은 실험 중 필터에 빛이 입사되는 모습을 보여준다.

분광기는 물질이 빛과 상호작용할 때 나타나는 고유한 파장 특성을 분석해 성분·구조·상태 등을 비침습적으로 파악할 수 있는 핵심 분석 장비다. 의료 진단, 식품 품질 검사, 환경 오염 감시, 예술품 감별 등 다양한 분야에서 정확하고 신속한 분석을 위한 필수 도구로 활용되고 있다.

그러나 기존의 고해상도 분광기는 정밀한 파장 분석을 위해 크고 무거운 기계적 장치를 필요로 하고, 복잡한 구조와 긴 측정 시간 때문에 실시간 현장 적용에 제약이 많았다.

특히 휴대용 또는 모바일 센서에 적합하려면 '소형화·실시간화·저비용화'를 동시에 만족해야 하는데, 현재까지 개발된 계산 분광기는 복원 정확도나 필터 해상도의 한계로 인해 상용화에는 어려움을 겪어왔다.

이에 연구팀은 다층 박막 필터 기반의 초소형 필터 센서와 U-Net* 기반 AI 복원 알고리즘을 결합한 새로운 계산 분광기 구조를 제안하고, 실험을 통해 그 성능을 입증했다.



▲ 광원과 필터 어레이, 검출기 배열이 정밀하게 정렬된 측정 환경을 보여주고 있다.

연구팀은 굴절률이 다른 이산화타이타늄(TiO_2)*과 이산화규소(SiO_2)* 박막을 조합해 36개의 서로 다른 필터를 설계하고, 이를 6×6 배열로 구성해 상용 CMOS 이미지 센서 위에 장착했다.

이렇게 제작된 센서는 단일 이미지 촬영만으로 500~850nm 범위의 파장 정보를 필터 단위로 분산 측정할 수 있다.

* **U-Net:** 이미지 분할에 특화된 인공지능 딥러닝 모델 구조로, U자형의 인코더-디코더 구조를 통해 입력 이미지를 고해상도 출력으로 복원한다. 의학 영상 분석 및 광학 신호 복원 등에 널리 활용된다.

* **TiO_2 (이산화타이타늄):** 타이타늄과 산소로 이루어진 무기 산화물로, 주로 백색 안료, 자외선 차단제, 광촉매 등에 널리 사용된다. 높은 굴절률과 안정된 화학적 성질 덕분에 광학 코팅 및 전자소자에도 활용되며, 특히 자외선 흡수 및 분해 능력이 뛰어나 환경 정화 분야에서도 주목받고 있다.

* **SiO₂(이산화규소)**: 규소와 산소로 이루어진 무기 화합물로, 모래나 유리의 주성분이다. 높은 절연성과 투명성을 지니며, 반도체 제조 공정에서 절연막이나 보호막으로 많이 사용된다. 또한, 광학 재료로서도 중요하며, 열과 화학적 안정성이 뛰어나다.

측정된 이미지 신호는 **U-Net** 구조에 **잔차 연결***을 적용한 딥러닝 모델을 통해 전체 스펙트럼으로 복원된다.

총 3,223개의 실측 스펙트럼 데이터를 학습한 이 모델은 기존의 최적화 기반 방식보다 빠르고 정밀한 복원이 가능하며, 파장 범위 500~850nm에서 평균제곱근오차(RMSE)* 0.0288 이라는 높은 정확도를 달성했다.

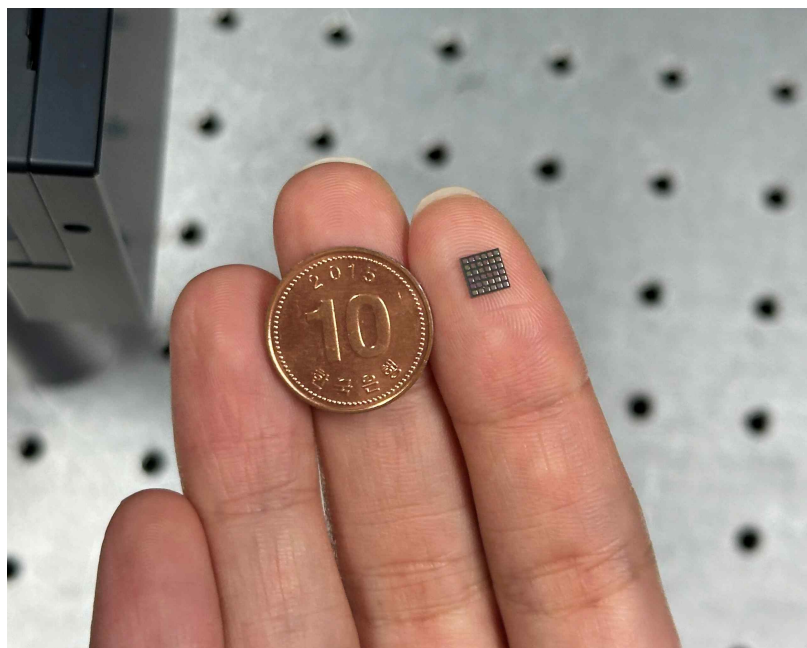
또한, 단일 촬영만으로 전체 스펙트럼을 측정하는 **비스캐닝*** 구조를 구현해 측정 속도를 높였으며, **CMOS 센서***와의 높은 호환성을 바탕으로 소형화·대량 생산·저전력 구동 등 상용화 가능성도 확보했다.

* **잔차 연결**: 딥러닝 모델에서 학습 안정성과 정확도를 높이기 위해 입력 신호를 출력에 직접 더해 주는 연결 방식이다. 신호 손실 없이 정보를 전달할 수 있어 깊은 신경망 구조에서도 효과적인 학습을 가능하게 한다.

* **평균제곱근오차(RMSE, Root Mean Square Error)**: 예측값과 실제값 사이의 평균적인 오차를 나타내는 지표로, 값이 작을수록 모델의 예측 정확도가 높음을 의미한다. 분광 복원 성능 평가에서 정량적 지표로 사용된다.

* **비스캐닝(Computational Spectrometer)**: 기존 분광기처럼 파장을 한 줄씩 스캔하지 않고, 단일 촬영만으로 전체 스펙트럼 정보를 동시에 측정할 수 있는 구조이다. 측정 속도가 빠르고 기계적 부품이 없이 소형화에 유리하다.

연구팀은 주사전자현미경(SEM)*을 이용해 다층 박막 필터의 구조적 균일성과 높은 제조 수율도 확인했다. 센서의 전체 크기를 4.5×4.5mm² 으로 줄여 모바일 기기, 웨어러블 기기, 현장 진단 플랫폼 등 다양한 응용 환경에 직접 탑재할 수 있는 수준의 초소형화를 실현했다.



▲ 동전 크기와 비교한 센서 시제품으로, 손톱보다 작은 초소형 구조임을 확인할 수 있다.

이 기술은 **모바일 의료 진단, 식품 안전 검사, 위조 문서 판별, 실시간 환경 모니터링 등 다양한 분야에 활용될 수 있는 차세대 정밀 광센서 플랫폼으로 주목되는 한편, AI 기반 광학 기술로서 광학 산업의 패러다임 전환을 이끄는 핵심 원천기술이 될 것으로 기대된다.**

* **주사전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscope):** 시료 표면에 전자빔을 주사해 나오는 신호를 이용하여 고해상도 이미지를 얻는 장비로, 수십 나노미터 수준의 미세 구조까지 관찰할 수 있다. 나노소재의 구조 분석이나 박막 제조 균일성 확인 등에 널리 활용된다.

이흥노 교수는 “이번 연구는 **초소형 하드웨어와 AI 알고리즘을 통합해 계산 분광기의 정밀도와 효율성을 동시에 끌어올린 사례**”라며, “향후 거대언어모델(LLM)과도 결합하면, 사용자가 스마트폰 내부에 장착한 초분광 카메라로 건강 상태나 식품 품질을 스캔하고, 그 결과를 자연어로 실시간 안내받는 사용자 경험도 가능해질 것”이라고 말했다.

이번 연구는 GIST 전기전자컴퓨터공학과 이흥노 교수가 지도하고 데이비드 사무엘 바티(David S. Bhatti) 박사후연구원, 최영인 박사과정생, 그리고 반도체공학과 윤훈한 교수가 공동으로 참여했으며, 과학기술정보통신부·정보통신기획평가원(IITP)의 지원을 받았다. 연구 결과는 국제학술지 《사이언티픽 리포트(Scientific Reports)》에 2025년 7월 1일 온라인으로 게재됐다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Scientific Reports (IF: 3.9, 2024년 기준)
- 논문명 : Deep Learning-Based Single-Shot Computational Spectrometer Using Multilayer Thin Films
- 저자 정보 : David S. Bhatti(제1저자, EECS), 이흥노(교신저자, EECS)