

“비슷해 보여도, 결코 똑같지 않은 자연에서 답을 찾다”

GIST-KAIST, 자연의 구조색 모사한 복제 불가능 광학지문 보안기술 개발

- GIST 전기전자컴퓨터공학과 정현호 교수팀, KAIST 송영민 교수팀과 공동으로 나노 광학 기반 선택적 인증 광보안 소자 구현.. 디자인 손상 없이 위변조 차단, 정품 인증 혁신 기대
- 의약품 등 실물 적용 결과 고온고습마찰 환경에서도 안정성 입증하고, 대면적 공정 적용으로 산업적 활용 가능성도 확보.. 국제학술지 《Nature Communications》 게재



▲ (좌측 상단부터 시계 방향으로) GIST 전기전자컴퓨터공학과 정현호 교수, KAIST 전기 및 전자공학부 송영민 교수, GIST 전기전자컴퓨터공학과 김규린 연구원, 허세연 박사, 김주환 연구원, 이주형 연구원, 김도은 박사

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 전기전자컴퓨터공학과 정현호 교수와 한국과학기술원(KAIST) 전기 및 전자공학부 송영민 교수 공동연구팀이 자연에서 영감을 받은 나노 광학 기술을 통해 복제할 수 없는 보안 인증 기술을 개발했다고 밝혔다.

이 기술은 ID 카드나 QR 코드 등 다양한 실물 제품에 쉽게 삽입할 수 있으며, 육안으로는 기존 제품과 구별되지 않기 때문에 디자인을 해치지 않으면서도 강력한 위·변조 방지 기능을 제공하는 것이 특징이다. 특히 고급 소비재, 의약품, 전자제품 등 정품 인증이 중요한 분야에서 폭넓게 활용될 수 있다.

지금까지 위·변조 방지를 위해 사용되던 QR 코드, 바코드 등은 복제가 쉽고, 제품마다 고유한 정보를 부여하기 어렵다는 한계가 있었다.

이를 보완하기 위한 기술로 최근 주목받는 것이 '물리적 복제 불가 함수(PUF)'다.

이는 제품 제조 과정에서 자연적으로 생기는 무작위성을 이용해, 각 제품마다 고유한 물리적 특성을 소자에 부여하는 방식으로 보안성과 인증 신뢰도를 높일 수 있다.

하지만 기존 PUF 기술은 무작위성과 고유성은 확보했지만, 표면 색상 조절이 어렵고, 외부에서 쉽게 식별돼 보안성에 취약하다는 단점이 있었다.

* 물리적 복제 불가 함수(PUF, Physically Unclonable Function): 공정 단계에서 형성되는 물리적 변화를 이용하여 고유한 인증 키를 생성하는 기술이다. 공정 단계의 무작위성은 복제 불가능하므로, 인증 정보가 탈취되어도 실제 인증을 위한 하드웨어를 제작할 수 없다는 장점이 있다.

이에 연구팀은 자연계 생물에서 관찰되는 독특한 구조색* 현상에 주목했다. 예를 들어 나비의 날개, 새의 깃털, 해조류의 잎 등은 나노미터 크기의 미세 구조체들이 완전한 질서도, 완전한 무질서도 아닌 '준질서(quasi-order)*' 형태로 배열되어 있다.

이러한 구조는 육안으로는 균일한 색상을 띠지만, 내부적으로는 미세한 무작위성이 존재해 위장, 의사소통, 포식자 회피 등 생존에 유리한 기능의 수행을 가능하게 한다.

* 준질서(quasi-order): 완전히 규칙적이지도, 완전히 무질서하지도 않은 배열 형태로, 미세 구조체들이 일정한 패턴을 따르되 부분적으로 무작위성이 섞인 중간 형태의 구조를 의미한다. 자연계에서는 나비 날개, 해조류 잎, 새 깃털 등에서 흔히 발견되며, 균일한 색상과 동시에 고유한 광학 특성을 만들어낸다.

* 구조색(structural color): 색소가 아닌, 나노미터 수준으로 정렬된 미세 구조가 빛과 상호작용하며 나타나는 색상으로, 동식물의 표면에서 자주 관찰되는 자연 현상이다. 예컨대, 나비 날개나 공작 깃털의 색이 대표적인 구조색에 해당한다.



▲ 준질서형 구조를 통한 구조색: (좌) 자연계의 준질서형 구조에 의한 구조색과 (우) 이를 모방하여 본 연구에서 제작한 광 보안 소자

연구팀은 이러한 자연 원리를 모사해 금속 거울 위에 유전체(HfO₂)를 얇게 증착한 뒤, 그 위에 수십 나노미터 크기의 금 나노입자를 정전기적 방식으로 자가조립시켜 준질서 구조의 플라즈모닉 메타표면*을 제작했다.

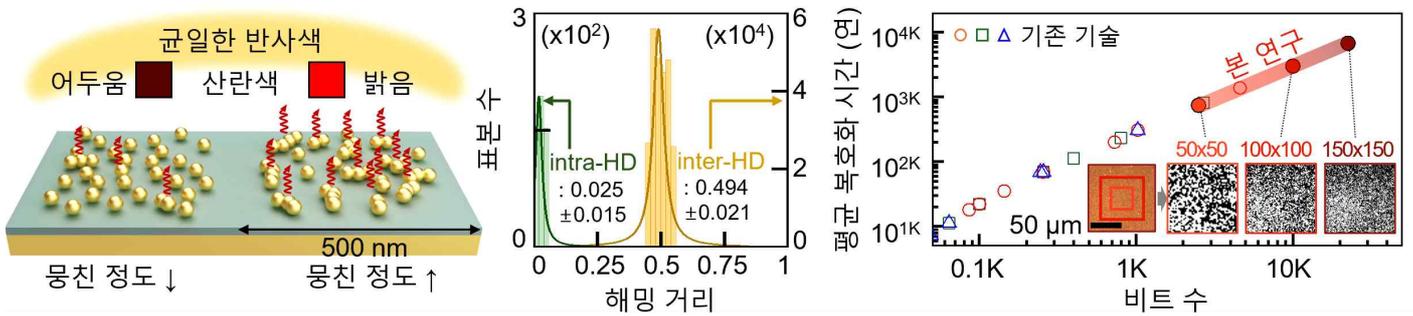
이 구조는 육안으로 볼 때는 일정한 반사색을 띠지만, 고배율 광학 현미경으로 관찰하면 영역마다 서로 다른 무작위 산란 패턴, 즉 광학 지문*이 나타난다.

이처럼 겉보기에는 동일하지만 내부 구조는 절대 복제할 수 없는 나노 구조 덕분에, 눈에 보이지 않는 고유 정보를 은닉하거나 선택적으로 노출할 수 있는 고차원 보안 인증 장치로 응용할 수 있다.

* **플라즈모닉 메타표면(plasmonic metasurface):** 나노미터 크기의 금속 구조체를 평면상에 정밀하게 배열하여, 빛의 위상·편광·세기 등을 자유롭게 제어할 수 있도록 설계된 초박형 광학 구조물이다. 금속 표면에서 발생하는 표면 플라즈몬 공명 현상을 이용해 국소적으로 강한 전자기장을 형성함으로써, 기존 광학 소자보다 훨씬 더 작고 정밀하게 빛과 상호작용할 수 있다.

* **광학 지문(Optical Fingerprint):** 빛을 구조체에 조사했을 때 나타나는 고유한 반사·산란·간섭 패턴을 활용해 각 구조체를 식별하는 기술로, 복제가 사실상 불가능한 물리적 보안 수단이다. 나노 또는 마이크로미터 규모에서 무작위적으로 형성된 미세 구조는 동일한 방식으로 복제하기 어려우며, 이 구조에서 생성되는 광학적 응답은 각 소자마다 고유한 식별값으로 작용한다.

이처럼 나노 구조체에서 생성되는 무작위 패턴을 활용하면 소자의 PUF 성능이 기존보다 향상된다는 것도 연구팀은 확인했다.

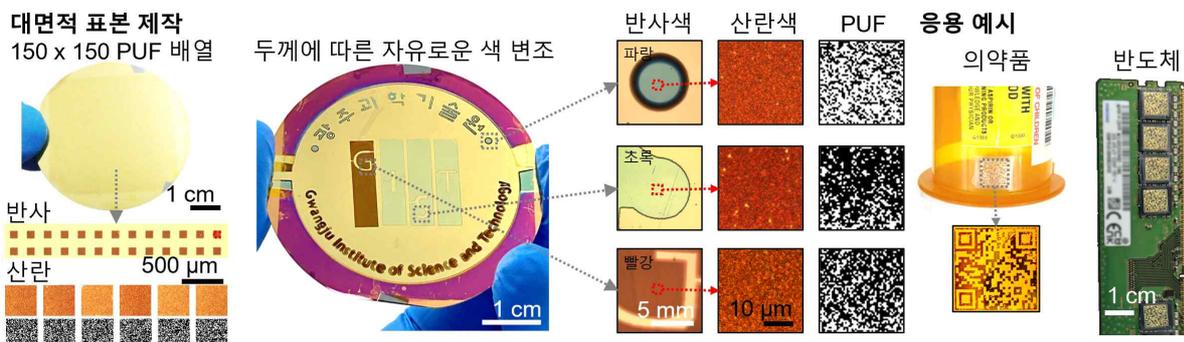


▲ **제작된 PUF의 동작 원리와 주요 성능 지표:** (좌) 금속 나노입자의 뭉침 정도에 의한 무작위적 산란색상. (우) 본 연구에서 개발한 광보안 소자의 대표적 성능 지표

구조체 자체는 수십 마이크로미터 크기이지만, 정보를 담고 있는 패턴은 나노미터 수준이기 때문에 전 세계 인구 수를 초과하는 방대한 정보를 저장할 수 있다.

또한, 이 보안 시스템을 해킹하기 위해 해커가 임의로 소자를 제작한다고 가정했을 때, 이를 복호화하는 데 걸리는 시간은 지구의 나이보다도 길어 사실상 복제가 불가능하다.

연구팀은 개발한 보안 소자를 의약품, 반도체, QR 코드 등에 적용한 기술 시연을 통해 실제 산업적 활용 가능성을 입증했다.



▲ **실생활 응용을 위한 예시:** (좌) 광학 PUF를 활용한 대면적 제작 예시 (우) 실제 위/변조 방지 물품에 대한 적용 예시

500개 이상의 PUF 키를 생성해 분석한 결과, 비트 값 분포의 평균은 0.501로 이상적인 균형(0.5)에 가까웠고, 서로 다른 키 간 차이를 나타내는 해밍 거리 역시 평균 0.494로 측정되어, 높은 고유성과 안정성을 보였다.

또한 고온·고습·마찰 등 다양한 환경 변화에도 산란 패턴이 안정적으로 유지되어, 내구성도 우수한 것으로 확인되었다.

GIST 정현호 교수는 "자연의 질서와 무질서가 공존하는 구조를 나노 기술로 재현함으로써, 외형은 같아 보여도 본질적으로 복제할 수 없는 광학 정보를 구현할 수 있었다"며 "이 기술은 고급 소비재부터 의약품 정품 인증이나 국가 보안 등 다양한 분야에서 강력한 위조 방지 수단으로 활용될 수 있을 것"이라고 설명했다.

KAIST 송영민 교수는 "기존 보안 라벨은 미세한 손상에도 쉽게 변형될 수 있는 반면, 이번 기술은 구조적 안정성과 복제 불가능성을 동시에 확보했다"며, "특히 눈에 보이는 컬러 정보와 보이지 않는 고유 키 정보를 분리할 수 있다는 점에서 보안 인증의 새로운 패러다임을 제시할 수 있을 것"이라고 강조했다.

GIST 전기전자컴퓨터공학과 정현호 교수와 KAIST 전기 및 전자공학부 송영민 교수가 지도하고 김규린·김도은·이주형·김주환·허세연 연구원이 수행한 이번 연구는 과학기술정보통신부·한국연구재단 우수신진연구사업, 연구개발특구 지역혁신 메가프로젝트, 광주과학기술원 GIST-MIT AI국제협력사업의 지원을 받았다. 연구 결과는 국제학술지 《네이처 커뮤니케이션즈(Nature Communications)》에 2025년 7월 8일 온라인으로 게재됐다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Nature Communications (IF: 15.7, Multidisciplinary Science 분야 상위 7.4% 2024년 기준)
- 논문명 : Quasi-ordered plasmonic metasurfaces with unclonable stochastic scattering for secure authentication
- 저자 정보 : 김규린(제1저자, GIST), 김도은, 이주형, 김주환, 허세연, 송영민 (교신저자, KAIST), 정현호 (교신저자, GIST)