

“오묘한 에메랄드빛 나비 날개에 착안하다” 초박막 재귀반사 플랫폼 활용, 관측 방향에 따라 달리 보이는 다중이미지 디스플레이 개발

- 에메랄드 제비꼬리나비 날개의 광학 구조 모사해 금속층과 다공성 매질 층으로 구성된 단순한 구조의 초박막 재귀반사 플랫폼 개발... 다양한 조명과 관측 조건에서 선명한 무지개색 확인
- 사거리 진입 방향에 따라 달리 보이는 교통 표지판 등 양방향 디스플레이로 활용 가능, “픽셀화된 색상 조정이 가능한 재귀반사 디스플레이로의 발전 기대”
- 생물리학 분야 저명 국제학술지「Biosensors & Bioelectronics」 게재



▲ (오른쪽부터) 전기전자컴퓨터공학부 송영민 교수, 고주환 박사, 여지은 학생, 정효은 학생
광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 전기전자컴퓨터공학부 송영민 교수 연구팀이
에메랄드 제비꼬리나비(Papilio Palinurus)의 날개를 모방한 단순한 구조의 초박막 재
귀반사 플랫폼을 활용해 관측 방향에 따라 변화하는 다중이미지 디스플레이 시스템
을 개발했다고 밝혔다.

기존의 비동축* 조건에서만 무지개빛 특성을 갖는 생체모방 재귀반사 플랫폼의 한
계를 극복한 이번 연구 성과는 저조도(low-light) 환경 등 까다로운 조건에서도 가
시성 높은 인식 기능을 가진 생체모방 센서 및 디스플레이에 활용될 수 있을 것으
로 기대된다.

* 동축/비동축: 입사광 축과 관측 축 사이의 관계. 서로 같은 축을 갖는 경우 동축, 서로 다른 축
을 갖는 경우 비동축으로 정의.

재귀반사란 빛이 어느 방향에서 어느 각도로 들어오더라도 빛을 내는 방향으로
빛을 반사하는 특성으로, 교통안전 표지판과 야간 안전장비 제작 등에 널리 활용되
고 있다.

벌새, 딱정벌레, 그리고 일부 나비는 무늬와 색상을 통해 효과적으로 의사소통을 하는데 특히 에메랄드 제비꼬리나비의 날개는 여러 겹의 큐티클*과 공기가 오목한 구조로 배열되어 있어 **선명한 재귀반사 색상 유도**가 가능하다.

* **큐티클**: 생물의 체표 세포에서 분비하여 생긴 딱딱한 층.

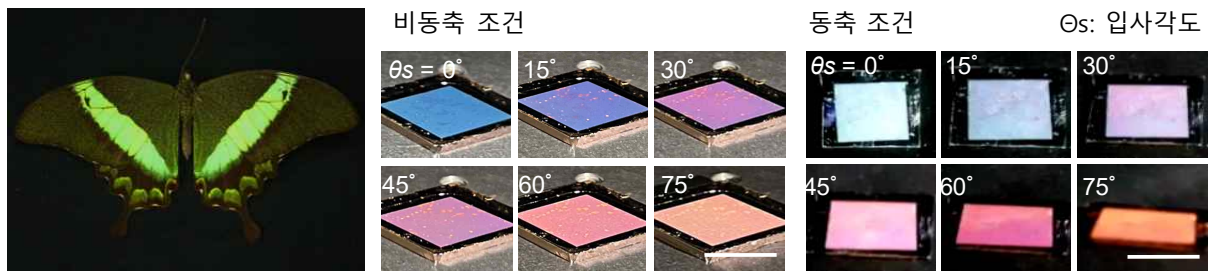
이러한 에메랄드 제비꼬리나비의 날개 구조를 모방하기 위해 기존 연구들은 **포토닉 크리스탈***과 **마이크로 반구 배열이 결합되어 있는 광학 구조 시스템**을 주로 사용하였다. 하지만 이러한 시스템은 제조 과정이 매우 복잡하며, 능동적이고 선명한 색상을 구현하는 데 한계가 있다.

효과적인 재귀반사와 함께 선명한 색상 변화를 구현하려면 **세심한 구조 디자인과 섬세한 빛-물질 상호작용에 대한 구조적 색상에 대한 이해가 필요하다**. 이를 위해 마이크로 단위의 구면 내, 외부의 굴절률 차이로 인한 **전반사***에 기반한 방법이 연구되었지만 **비동축 조건에서만 무지갯빛 특성을 가지며 정확한 패터닝이 어렵다**는 한계가 있다.

* **포토닉 크리스탈**: 굴절률이 주기적으로 변하는 광학 나노 구조체. 물질의 광학적인 성질을 이용할 수 있는 구조를 가지고 있거나 구조를 갖도록 만들어낸 물질.

* **전반사**: 빛이 특정 면에서 완전히 반사되는 현상.

이러한 문제를 해결하기 위해 연구팀은 단순한 형태인 필름형 금속 층에 다공성 층을 추가하여 **선명한 무지갯빛 색상을 갖는 재귀반사 플랫폼**을 구현하였다.



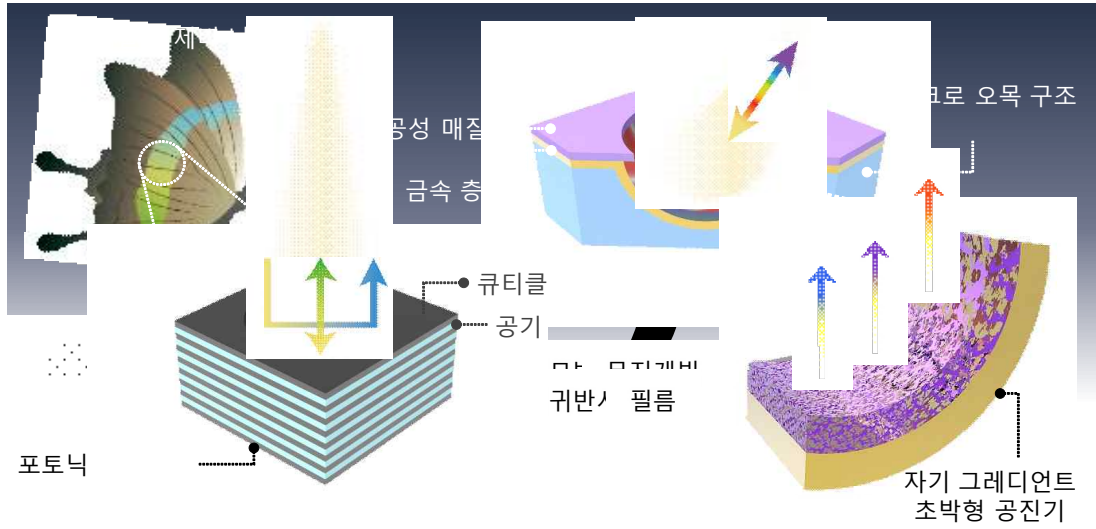
▲ **에메랄드 제비꼬리나비 날개와 연구진이 개발한 초박막 재귀반사 플랫폼의 사진**. 에메랄드 제비꼬리나비 날개는 저조도 환경에서 눈에 띄는 색을 가진다(왼쪽). GIST 송영민 교수는 나비 날개의 광학 구조를 모방해 입사광 축과 관측 축에 상관없이 눈에 띄는 무지갯빛을 나타내는 초박막 재귀반사 플랫폼을 개발했다(오른쪽).

마이크로 오목 구조의 곡률에 의해 점진적인 다공성*을 갖는 구조가 증착되며 이로 인한 유효 굴절률 차이는 재귀반사의 특성을 유지하면서 동축 및 비동축을 포함한 **다양한 조명 및 관측 조건에서 선명한 무지갯빛 색상**을 갖는다.

나아가 이번 연구 성과는 **박막 증착 방법을 활용하여 색을 구현하기 때문에 넓은 확장성**을 가지며 **다양한 패턴을 구현할 수 있다**는 장점이 있다.

* **다공성**: 물질의 내부 또는 표면에 여러 개의 작은 구멍이 있는 성질.

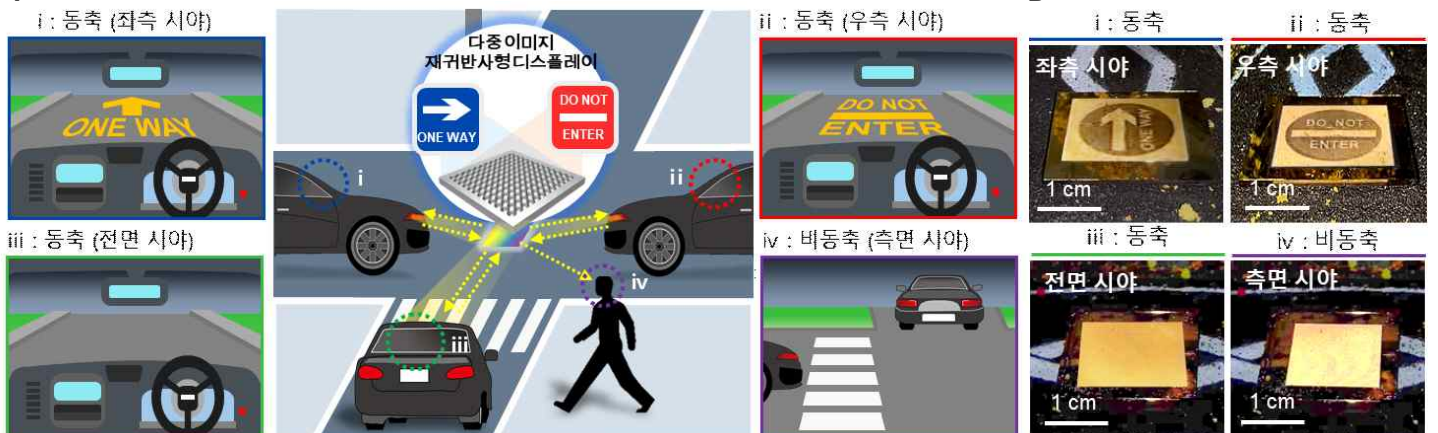
이러한 장점을 바탕으로 연구팀은 다공성 매질 층의 패턴을 서로 다른 각도에서 증착함으로써 관측 방향에 따라 변화하는 패턴을 가지는 양방향 디스플레이 구현에 성공하였다.



▲ 연구진이 개발한 생체모방 재귀반사 플랫폼의 구조적 특징. 에메랄드 제비꼬리나비의 날개 구조를 모방하여 금속층과 다공성 매질 층으로 구성된 단순한 구조의 초박막 재귀반사 플랫폼을 개발했다.

또한 실제 응용 분야에서 범용성을 높이기 위해 색 구현 층의 광학 특성을 사용 목적에 맞게 디자인할 수 있으며, 향상된 가시성을 가지는 수소 센서 및 동적인 색상 변화로의 응용이 가능하다.

송영민 교수는 “기존 생체모방 재귀반사 플랫폼에서 갖는 구조적 복잡성을 극복하고, 다양한 조건에서 선명한 무지갯빛 색상을 보이는 시스템을 개발했다”며, “무엇보다 다중이미지를 가지는 양방향 디스플레이에서 나아가 픽셀화된 색상 조정이 가능한 재귀반사 디스플레이로의 발전 가능성을 가지고 있으며, 향후 다기능적인 생체모방 센서 및 디스플레이 분야에 널리 응용될 수 있을 것으로 기대된다”고 말했다.



▲ 다중이미지 재귀반사형 디스플레이의 응용 개략도 및 측정 결과. 다공성 매질 층을 서로 다른 방향으로 패턴링하여 증착함으로써 양방향 관찰이 가능한 다중이미지 디스플레이를 개발할 수 있다. 이러한 특징을 기반으로 관측자와 광원의 방향에 맞춰 다양한 각도에서 맞춤형 정보를 전달하는 새로운 교통 표지판 등에 응용될 것으로 기대된다.

전기전자컴퓨터공학부 송영민 교수가 지도하고 고주환 박사후연구원과 여지은 석박통합과정생이 수행한 이번 연구는 과학기술정보통신부와 한국연구재단이 추진하는 중견사업, 미래기술연구실사업, 세종과학펠로우십, GIST-MIT AI융합 국제협력사업, GIST GRI사업 및 International Technology Center Indo-Pacific(ITC IPAC)의 지원을 받아 수행되었으며, 연구 결과는 생물리학(biophysics) 분야 상위 2.1% 저널인 국제학술지 '바이오센서 앤 바이오일렉트로닉스(Biosensors & Bioelectronics, IF: 12.6)에 2024년 6월 2일 온라인 게재되었다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Biosensors and Bioelectronics (IF=12.6)
- 논문명 : Switchable and Conspicuous Retroreflective Sensors Inspired by the Wing Scale of an Emerald Swallowtail
- 저자 정보 : 고주환 박사(공동 제1저자 GIST 전기전자컴퓨터공학부), 여지은 석박통합과정(공동 제1저자 GIST 전기전자컴퓨터공학부), 정효은 석사과정(공동저자 GIST 전기전자컴퓨터공학부), 김현명 박사(공동저자 GIST 전기전자컴퓨터공학부), 유영진 박사(공동저자 MIT 기계공학과), 육연지 석박통합과정(공동저자 GIST 신소재공학부), 이상한 교수(공동저자 GIST 신소재공학부), 송영민 교수(교신저자 GIST 전기전자컴퓨터공학부)