

단 1초 만에 정밀한 디자인...

AI 기술 적용한 광학 파노(Fano) 공진기 개발

- 기존 파노 공진기 설계 과정의 불규칙성과 구조적 복잡성 극복
- 광학 필터의 색 변조, 코로나19 감염 확인 등 바이오센서에 응용 기대



▲ (앞줄 오른쪽부터 시계 방향으로) 송영민 교수, 전해곤 교수, 고주환 박사과정, 박진휘 석박통합과정, 강지원 석사
국내 연구진이 **광학 분야에 인공지능(AI) 기술을 결합하여 약 1초 만에 빠르고 정확하게 필름 형태의 파노 공명(Fano resonance)을 디자인하는 데 성공했다.**

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철) 전기전자컴퓨터공학부 송영민 교수와 AI대학원 전해곤 교수 공동 연구팀은 인공지능(AI)을 활용해 1.14초 만에 오차율 7% 이내로 **광학 파노(Fano) 공명***을 디자인할 수 있는 시스템을 개발했다.

* **광학 파노 공명:** 두 광학 구조 사이에서 발생하는 빛과 물질의 상호 작용을 기반으로 특정한 파장에서 빛의 집중이나 반사/투과를 유도하여 스펙트럼 형태를 조절할 수 있는 광학 구조

기존의 파노 공명은 복잡한 나노 구조를 갖고 있어 제작이 어렵고, 스펙트럼 모양을 예측하는 데 변수가 많아 디자인 과정에서 많은 시간이 소요됐다.

연구팀은 **단순한 형태인 필름형 적층 구조에 다공성 층을 삽입하여 모든 범위의 스펙트럼 형태를 설계했다.** 다층 퍼셉트론(multi-layer perceptron, MLP)* 기반의 인공지능(AI) 기술을 활용하여 빠르고 정확하게 스펙트럼 형태를 도출했다.

* **다층 퍼셉트론(multi-layer perceptron, MLP):** 여러 층의 뉴런으로 구성된 인공 신경망. 입력층에서 시작하여 은닉층을 거쳐 출력층까지 데이터 처리와 패턴 학습에 활용되며, 복잡한 비선형 관계를 모델링하는 데 사용된다.

머신러닝 기반의 AI 기술을 적용한 효율적인 설계법 및 다각화된 딥러닝 인공지능을 통해 **다양한 결합 기반 광학 구조 디자인으로 확장이 가능하며, 박막 구조의 파노 공진기는 빛을 투과할 수 있어 양방향 디스플레이로도 활용할 수 있다.**



▲ 광학 파노공명 설계 및 구현과정을 나타내는 그래픽 이미지

추후 더욱 정교한 광학 결합 공진 설계를 통해 **자율주행 자동차의 센서용 카메라, 검사장비 등 초정밀 광학 센서 분야**에 널리 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

‘파노 공명’은 연속 상태(continuum state)*의 ‘다공성 초박막’ 공진기와 이산상태(discrete state)*의 ‘패브리 페로(Fabry-Perot)’ 공진기 결합을 통해 구현된다.

‘파노 공명’은 독특한 비대칭성과 급격한 스펙트럼선 모양 변화로, 광학 필터의 색 변조 및 나노 크기의 매우 작은 바이러스 감염을 감지하는 바이오센서 등에 응용되고 있다.

* **연속 상태(continuum state)**: 광물리학과 수학에서 연속 상태는 일반적으로 시간, 공간 또는 에너지와 같은 매개 변수가 특정 범위 내에서 연속적인 값들을 가질 수 있는 상황을 의미한다.

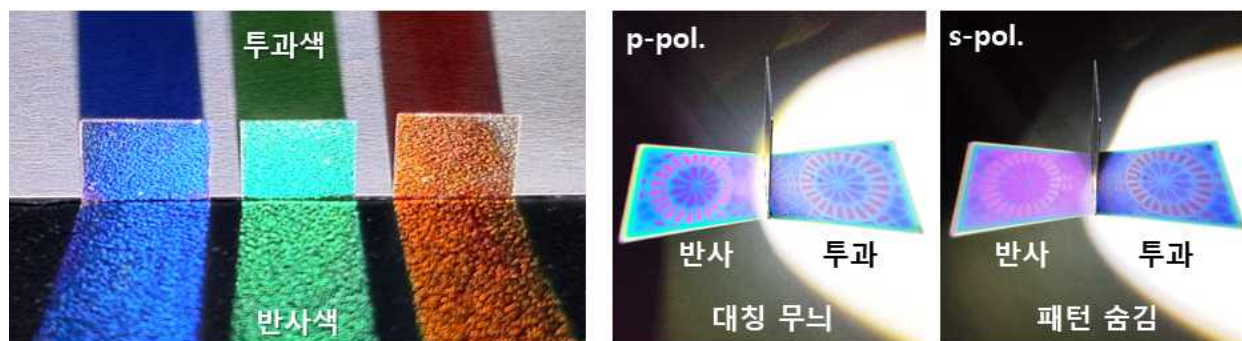
* **이산상태(discrete state)**: 연속 상태와 반대되는 개념으로 매개 변수가 분리된 값만 가질 수 있는 상황을 의미한다.

최근 파노 공명의 설계 및 제작의 복잡성을 해결하기 위해 단순한 박막 형태의 파노 공진 구조가 개발되어 왔으나, 대부분 제한된 물질 선택과 정형화되어 있지 않은 설계 방식으로 원하는 형태의 스펙트럼을 구현하기 어려웠다.

스펙트럼 형태는 파장에 따른 빛의 세기 변화로, 센서/디스플레이 분야에서 성능을 결정짓는 중요한 요소이기에 정확하고 빠른 설계법이 필요하다.

스펙트럼 조절은 가시광 영역에서 색 변화로 나타나는데 연구팀은 **다공성 초박막 공진기가 비등방성(anisotropic)*을 갖도록 제작함으로써** 편광 방향에 따라 색을 자유자재로 변형시킬 수 있는 **양방향 디스플레이**를 구현했다.

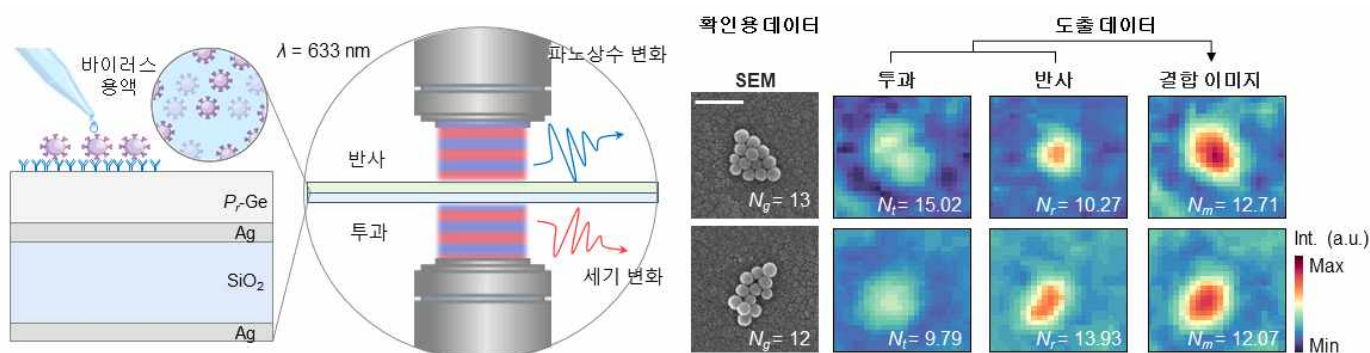
* **비등방성(anisotropic)**: 방향에 따라 물체의 물리적 성질이 다른 것을 말한다. 예를 들어 술질이 된 알루미늄, 섬유, 옷감, 근육 등의 표면은 들어오는 빛의 방향에 따라 반사율이 다른 광학적 비등방성을 지닌다.



▲ **양방향 디스플레이 및 편광에 따른 반사색 변화**: 파노공진 디자인을 통해 설계된 양방향 디스플레이(좌). 편광 방향에 따라 반사색의 조절을 통해 패턴을 숨기거나 드러낼 수 있다(우).

연구팀은 이를 **전자 운동 모델에 적용**해 두 공진기 간의 결합 관계를 설계했으며, 이를 기반으로 학습데이터를 조합해 **다공성 파노 공진구조의 두께 및 물질 정보를 도출**했다.

연구팀은 스펙트럼 변화량이 극대화되도록 다공성 초박막 공진기를 설계했다. 낮은 굴절률을 갖는 바이러스에 공진 특성이 민감하게 변화함에 따라 색 변화를 관찰할 수 있도록 하기 위해서다. 연구팀이 제작한 공진기는 **코로나19 등 매우 작은 크기의 바이러스입자를 감지할 수 있음**을 실험을 통해 확인했다.



▲ **정량적 분석으로 측정된 바이러스 입자 수와 실제 바이러스 입자 수 비교**: AI 설계를 통한 바이러스 감지용 플랫폼 모식도(좌). 부착된 바이러스에 따라 반사 및 투과 세기가 달라지며 입자의 부착 여부를 감지한다(우).

송영민 교수는 "**기존 파노 공진기 설계 과정의 불규칙성과 구조적 복잡성을 극복**하고, 강화된 빛과 물질 간의 작용을 통해 **정밀하게 스펙트럼 모양 설계가 가능한** 시스템을 개발했다"고 말했다.

전해곤 교수는 "해당 기술은 **인공지능 기술을 적용해 효율적인 설계법을 제시한 사례**이며 다양한 결합 기반 광학 구조 디자인으로 확장이 가능해 앞으로 **더욱 정교한 광학 결합 공진 설계에 널리 응용**될 수 있을 것으로 기대된다"고 덧붙였다.

이번 연구는 과학기술정보통신부와 한국연구재단이 추진하는 나노 및 소재 기술개발사업, 미래기술연구실사업, 미래유망융합기술파이오니어사업, 학문 후속세대지원사업, 세종과학펠로우십과 GIST GRI사업의 지원을 받아 수행되었으며, 연구 결과는

논문의 주요 내용

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Advanced Science (IF=15.1)
- 논문명 : Full-control and switching of optical Fano resonance by continuum state engineering
- 저자 정보 : 고주환 박사과정(공동 제1저자.지스트 전기전자컴퓨터공학부), 박진휘 박사과정(공동 제1저자.지스트 AI대학원), 유영진 박사(공동 제1저자.지스트 전기전자컴퓨터공학부), 장세희 박사과정(공동저자.지스트 전기전자컴퓨터공학부), 강지원 석사(공동저자.지스트 전기전자컴퓨터공학부), Aiguo Wu 박사(공동저자.Chinese Academy of Sciences Cixi Institute of Biomedical Engineering), Fang Yang 교수(공동저자.Chinese Academy of Sciences Cixi Institute of Biomedical Engineering), 김세정 교수(공동저자.University of Melbourne Department of Electrical and Electronic Engineering), 전해곤 교수(공동 교신저자.지스트 AI대학원), 송영민 교수(공동 교신저자.지스트 전기전자컴퓨터공학부)