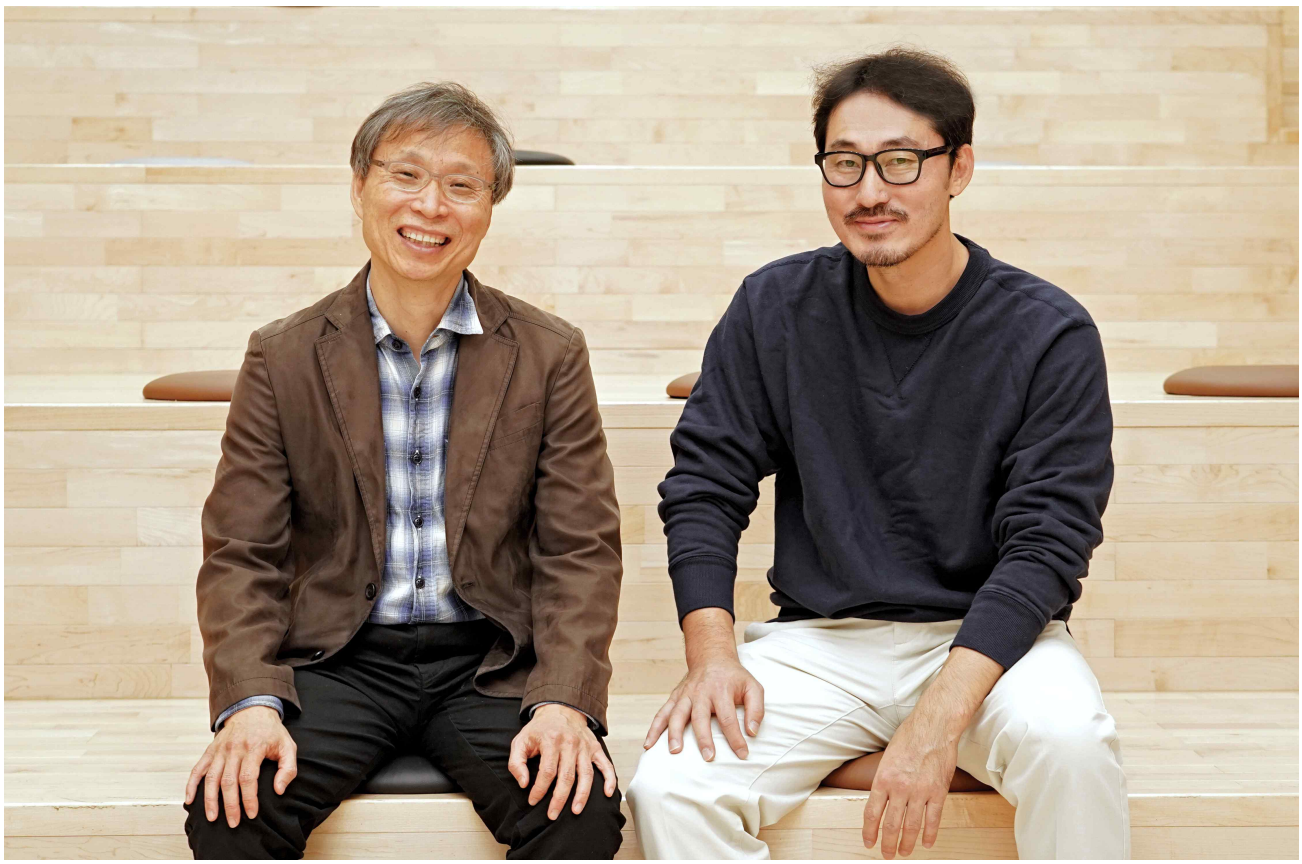
GIST, 새로운 표면 전자기파의 존재 발견

- 고등광기술연구소 기철식 수석연구원 연구팀, 기존 물리학적 지식의 틀을 깨고 '양의 유전율' 갖는 물질 간의 경계에서도 표면 전자기파가 존재할 수 있음을 최초로 확인
- 기존의 표면 전자기파 이용한 바이오 센서, 고해상도 이미징 등 다양한 분야에 새로운 표면 전자기파 응용 기대... 국제학술지《Physical Review Letters》게재



▲ (왼쪽부터) GIST 고등광기술연구소 기철식 수석연구원과 김성한 박사후연구원

표면 전자기파는 두 물질이 만나 형성되는 계면을 따라 전파하는 전자기파로, '**음의 유전율*'을 갖는 물질과 '양의 유전율'을 갖는 물질이 형성하는 경계에만 존재**하는 것으로 알려져 있다.

대표적인 것이 음의 유전율을 갖는 금속과 양의 유전율을 갖는 공기층 사이에 존재하는 표면 플라즈몬*이다. 표면 플라즈몬의 에너지는 금속과 공기층의 경계인 금속표면에만 강하게 집중되어 있기 때문에 금속표면에 화학물질이나 바이오물질 등을 놓아두면 **표면 플라즈몬과 그 물질들 간에 강한 상호작용이 유발될 수 있다. 이 같은 상호작용은 고감도 센서나 고해상도 이미징 구현 등에 응용**되고 있다.

* **유전율**: 외부 전기장에 의해 물질내부에서 유도되는 전기 쌍극자의 세기를 나타내는 물리상수이다. 가시광 영역에서 대부분의 물질의 유전율은 양이지만, 금속은 음의 유전율을 갖는다.

* **표면 플라즈몬(surface plasmons, SPs):** 유전 함수의 부호가 변하는 계면을 따라 생기는 전자의 집단적인 진동을 의미한다. 음의 유전 함수를 가지는 금속과 양의 유전함수를 가지는 공기 사이에서 형성되는 표면 플라즈몬이 대표적이다.

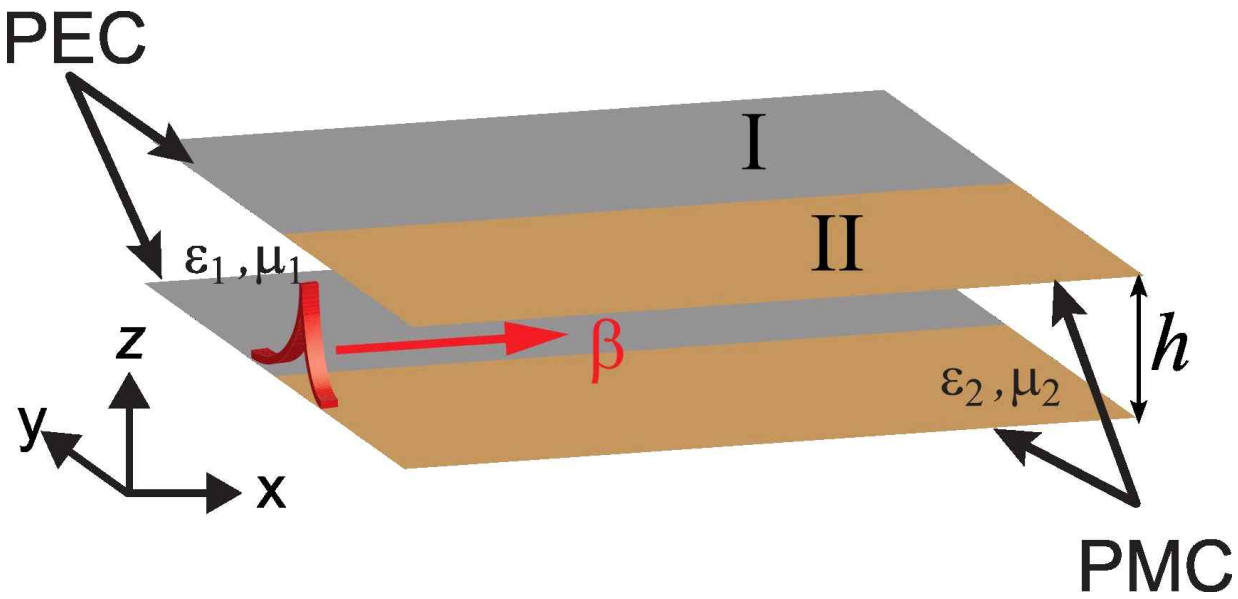
광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 고등광기술연구소 광응용시스템연구부 기철식 수석연구원과 김성한 박사후연구원이 **양의 유전율을 갖는 물질을 포함하는 완전 전기 도체(PEC)*와 완전 자기 도체(PMC)* 평행판 도파관*을 연결하여 형성된 경계('PEC-PMC 경계')에 새로운 표면 전자기파가 존재한다는 사실을 발견**했다고 밝혔다.

이는 **표면 전자기파가 음의 유전율을 갖는 물질과 양의 유전율을 갖는 물질이 이루는 경계에만 존재한다는 기존 물리학적 지식의 틀을 깨고, 이례적 환경에서는 양의 유전율을 갖는 물질들로 이루어진 경계에서도 표면 전자기파가 존재**할 수 있음을 최초로 확인한 것이다.

* **완전 전기 도체(**Perfect Electric Conductor**)**: 표면에 나란한 전기장 성분이 없는 이상적인 물질로 보통 전도도가 높은 금속이 낮은 주파수의 전자기파에 대해 효과적으로 기능한다.

* **완전 자기 도체(**Perfect Magnetic Conductor**)**: 표면에 나란한 자기장 성분이 없는 이상적인 물질로 자연상에 존재하지 않지만, 인위적으로 만든 구조물이 특정 주파수 영역에서 기능한다.

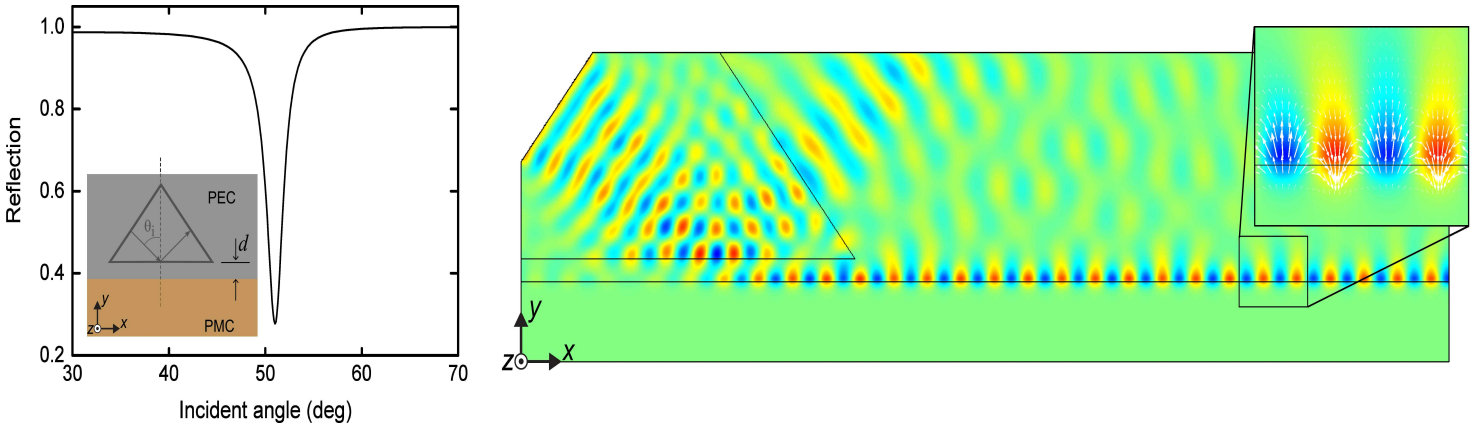
* **평행판 도파관(Parallel plates waveguide)**: 일정한 간격으로 떼어진 같은 두 PEC나 PMC plates으로 이루어진 구조로 두 판들 사이로 전자기파가 전파한다.



▲ 유전율ε_1 과 자화율μ_1의 물질로 채워진 PEC 평행판 도파로(I)와 유전율ε_2 과 자화율μ_2 의 물질로 채워진 PMC 평행판 도파로(II)가 접합된 PEC-PMC 평행판 도파로 개략도.

연구팀은 **이론적 모드 분석과 수치해석을 통해 PEC-PMC 경계에서 새로운 표면 전자기파의 존재를 증명**하고, 통상적으로 **표면 전자기파 발생에 사용되는 프리즘 결합 실험을 컴퓨터 시뮬레이션으로 구현하여 PEC-PMC 경계에서 새로운 표면 전자기파의 발생을 검증**하였다.

또한, PEC-PMC 경계에서는 자유전자가 존재하지 않는데도 불구하고 새로 발견된 표면 전자기파의 특성은 금속의 자유전자로부터 유발되는 **표면 플라즈몬과 유사성이 있다는 사실**도 밝혔다.



▲ (좌) PEC-PMC 경계에 대한 프리즘 결합 실험을 이용한 반사율 전산모사. 입사각 51도 근처에서 표면 전자기파 발생으로 반사율의 큰 감소가 발생. (우) PEC-PMC 경계에서 발생된 표면 전자기파 전파와 전기장 특성의 전산모사.

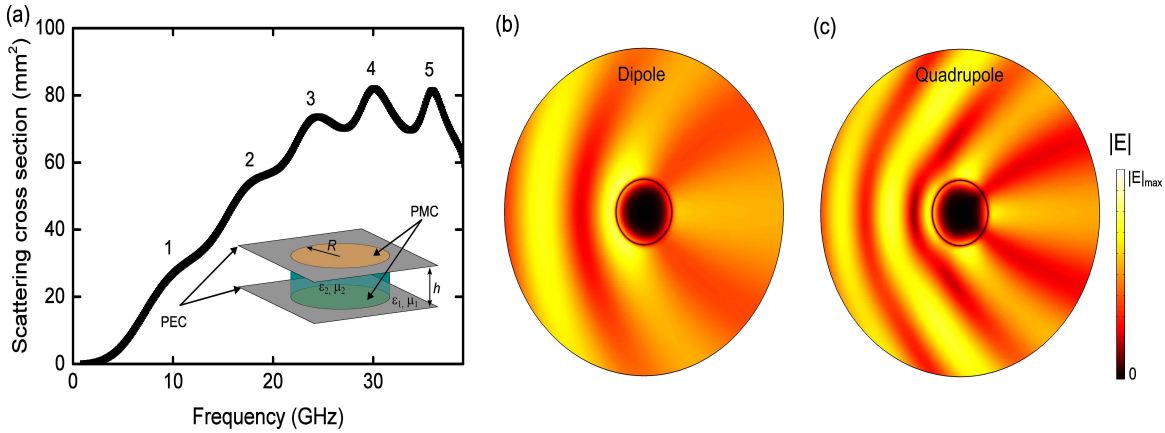
연구팀은 이와 같은 규명을 토대로, 원형으로 닫힌 PEC-PMC 경계에만 **강하게 에너지가 집중되는 새로운 표면 전자기파의 공명모드가 존재**한다는 것도 확인했다.

* **자유전자**: 외부전압에 의해 자유롭게 움직이는 금속내부의 전자로 전류를 유발함

* **공명모드**: 에너지 공명이 일어나는 전자기파의 특정한 공간적인 분포들로 에너지 흡수가 높음

PMC는 자연상에 존재하지 않는 물질이기 때문에 새로운 표면 전자기파의 존재를 실험적으로 증명하기 위해서는 PMC의 특성을 인위적으로 구현해야만 한다.

연구팀은 **이차원으로 배열된 사각 금속 막대를 사용하여 특정 주파수 범위 내에서 자기 도체로 작동할 수 있는 실제로 제작 가능한 구조를 제안**하고, **그 구조의 표면에서 새로운 표면 전자기파의 존재와 발생을 입증**하였다.



▲ (a) 원형으로 닫친 PEC-PMC 경계를 갖는 PEC-PMC 실린더의 산란특성과 개략도. 원형으로 닫친 PEC-PMC 경계에서 발생하는 (b) 쌍극자(dipole)와 (c) 사극자(quadrupole)의 공명산란(resonant scattering) 전기장 세기의 전산모사.

기철식 수석연구원은 "이번 연구 성과는 **표면 전자기파의 생성 조건에 대한 지식을 확장하는 한편, 전자기 현상에 대하여 보다 깊은 이해를 가능**하게 했다는 데 학문적인 의의가 있다"면서 "기존의 표면 전자기파를 이용한 바이오 센서, 고해상도 이미징 등 **다양한 분야에 새로운 표면 전자기파도 응용될 수 있을 것으로 기대**된다"고 말했다.

이번 연구는 과학기술정보통신부의 중견연구자지원사업과 교육부의 창의도전연구사업의 지원을 받아 수행되었으며, 미국 물리학회가 발행하는 물리학 분야 권위지 《피지컬 리뷰 레터스(Physical Review Letters)》에 2024년 10월 30일 온라인 게재되었다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Physical Review Letters (IF:8.1, JCR 물리 분야 상위 7.2 %, 2023년 기준)
- 논문명 : Discovery of Electromagnetic Surface Waves at the Interface Between Perfect Electric Conductor and Perfect Magnetic Conductor Parallel-Plate Waveguides
- 저자 정보 : 김성한(제1저자, GIST), 기철식(교신저자, GIST)