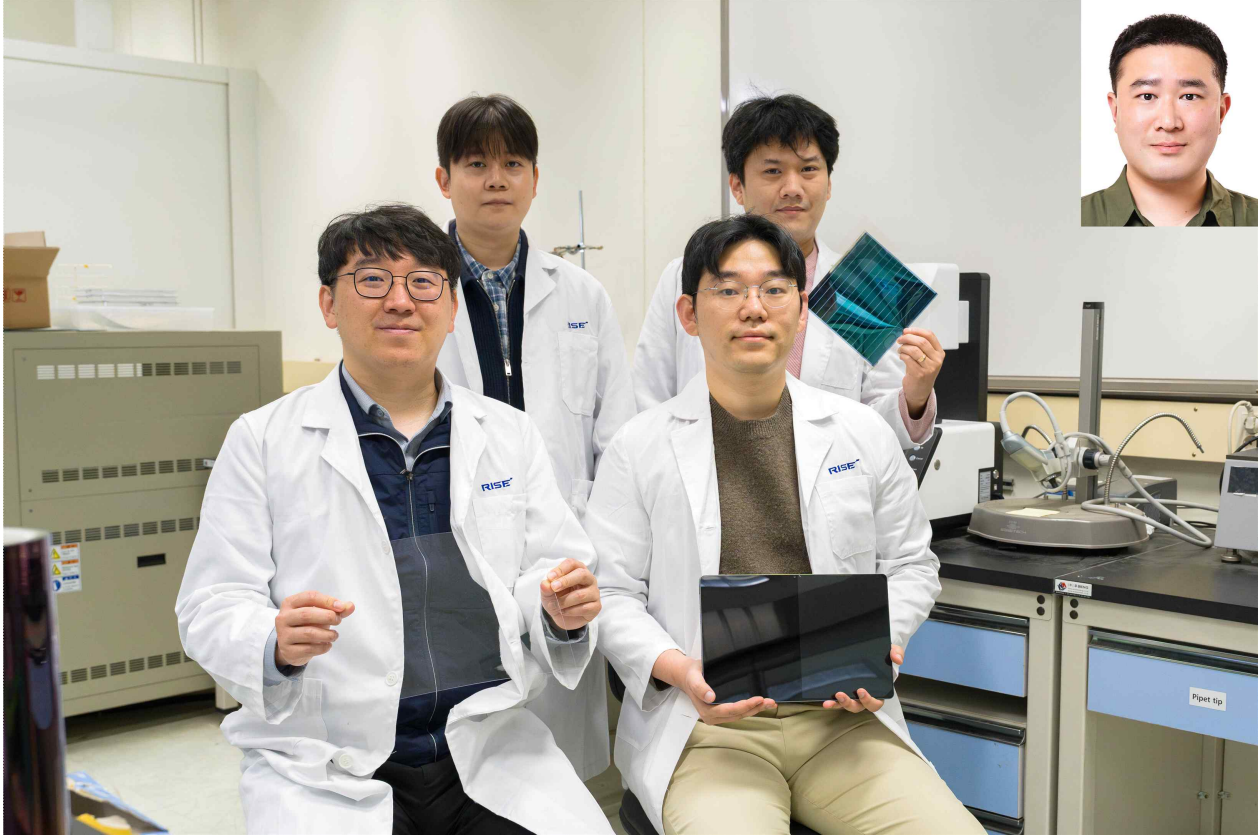


“연필심으로 힘껏 긁어도, 높은 데서 쿵 떨어뜨려도 OK” GIST, 스크래치와 충격에 모두 강한 차세대 투명 보호필름 개발

- 차세대에너지연구소 강홍규 부소장 연구팀, 계면공학 기반으로 단단함과 유연성 동시에 확보한 소재 구현... 유기 태양전지 적용 및 반복 굽힘 시험 통해 내구성 입증
- 곡면 디스플레이태양전지 등 대면적 패널에 적용 가능한 고내구성 보호 플랫폼 제시



▲ (뒷줄 왼쪽부터) 정현석 (주)리셀 연구원, 장준호 히거연구센터 연구원, (앞줄 왼쪽부터) 차세대에너지연구소 강홍규 부소장, 김상조 연구원, (오른쪽 위) 김인복 유니테스트 연구원

스마트폰 액정에 생기는 자잘한 스크래치와 예기치 못한 낙하로 인한 파손은 사용자들에게 꾸준한 불편으로 남아 있다. 특히 차세대 에너지원으로 주목받는 유기 태양전지나 유연 디스플레이 역시 외부 충격과 마찰에 취약해 상용화의 한계로 지적돼 왔다. 하지만 소재의 계면을 정밀하게 제어하는 ‘계면 공학’ 기술을 통해, 굽힘에는 강하고 충격에는 유연하게 대응할 수 있는 차세대 보호 소재가 개발됐다.

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 강홍규 차세대에너지연구소 부소장 연구팀이 소재 자체를 바꾸는 대신, 서로 다른 재료가 만나는 ‘경계면’을 정밀하게 제어하는 전략을 통해 단단하면서도 잘 깨지지 않는 보호 필름 제조 기술을 개발했다고 밝혔다.

이번 연구는 굽힘에는 강하지만 충격에 약하거나, 반대로 충격에는 강하지만 쉽게 굽히는 기존 소재의 한계를 동시에 해결한 기술로, 실제 사용 환경에서 요구되는 내구성을 충족할 수 있는 보호 소재의 구현 가능성을 제시했다는데 의미가 있다.

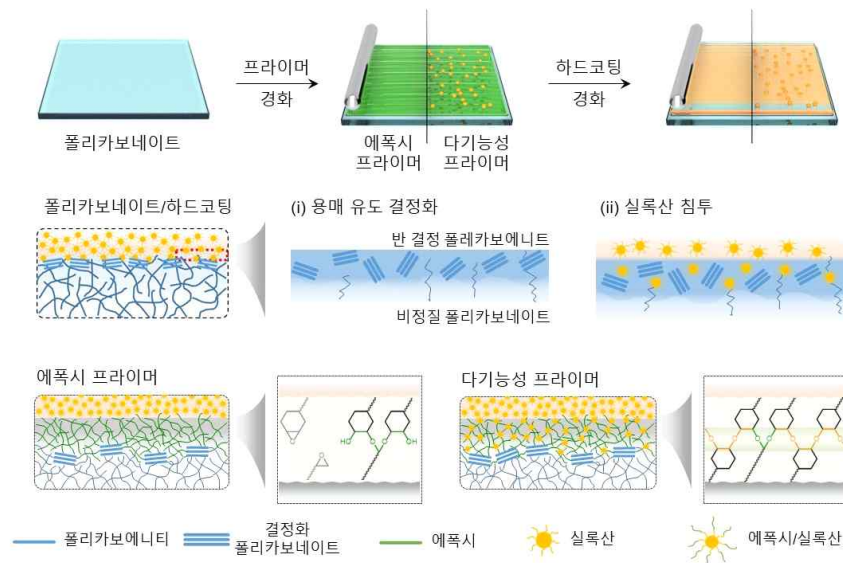
건물 외벽(BIPV, 건물일체형 태양광), 웨어러블 기기, 실내 조명 등에 활용되는 유기 태양전지(OPV)는 전기를 흐르게 할 수 있는 전도성 유기 소재를 활용해 빛을 전기로 변환하는 차세대 태양전지 기술이다.

하지만 외부 충격과 마찰, 자외선·수분 등 환경 요인에 취약해 보호를 위한 커버 윈도우(Cover Window) 소재가 필수적이다.

마치 스마트폰에 강화 필름을 붙여 긁힘과 파손을 막는 것처럼, 커버 윈도우는 유기 태양전지의 수명과 안정성을 좌우하는 핵심 보호층이다.

그러나 기존 소재인 폴리카보네이트(PC)는 표면이 상대적으로 부드러워 스크래치에 약하고, 자외선이나 수분에 장기간 노출될 경우 미세 균열이 발생해 성능 저하를 유발하는 한계가 있었다.

* 유기태양전지(OPV): 유기 소재를 기반으로 제작된 태양전지로, 가볍고 유연해 다양한 형태의 표면에 적용 가능한 차세대 태양전지 기술이다.

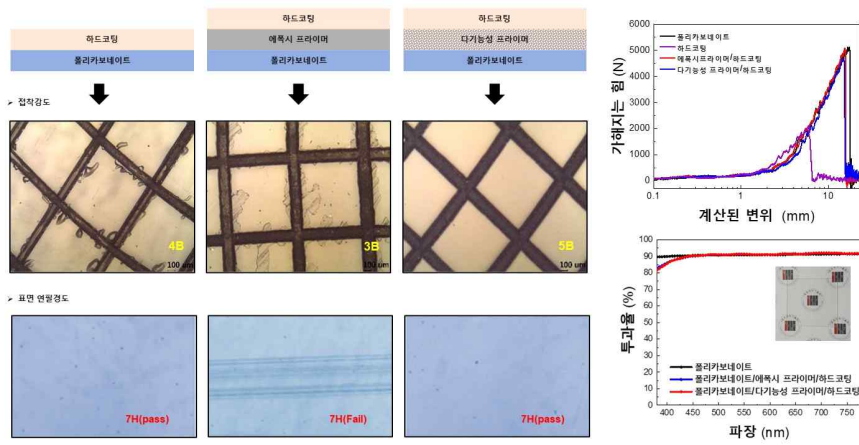


▲ 폴리카보네이트 기반 커버윈도우의 프라이머 및 하드코팅 공정과 계면 구조 변화 모식도. 프라이머·하드코팅 순차 공정(위), 프라이머 미적용 시 용매 유도 결정화(가운데), 실록산 침투에 따른 계면 불안정화(아래) 및 에폭시 프라이머와 실록산-에폭시 하이브리드 프라이머의 계면 결합 구조를 나타낸다.

연구팀은 이러한 한계를 해결하기 위해 소재를 변경하는 대신, 서로 다른 물질이 맞닿는 '계면'을 정밀하게 설계·제어하는 계면 공학(Interface Engineering) 전략을 적용했다.

핵심은 폴리카보네이트와 표면 보호층 사이에 존재하는 응력 집중과 접착 불균형 문제를 해결하는 것이다.

이를 위해 고내구성의 실록산(siloxane)과 접착성이 우수한 에폭시(epoxy)를 결합한 중간 접착층을 구축했다.

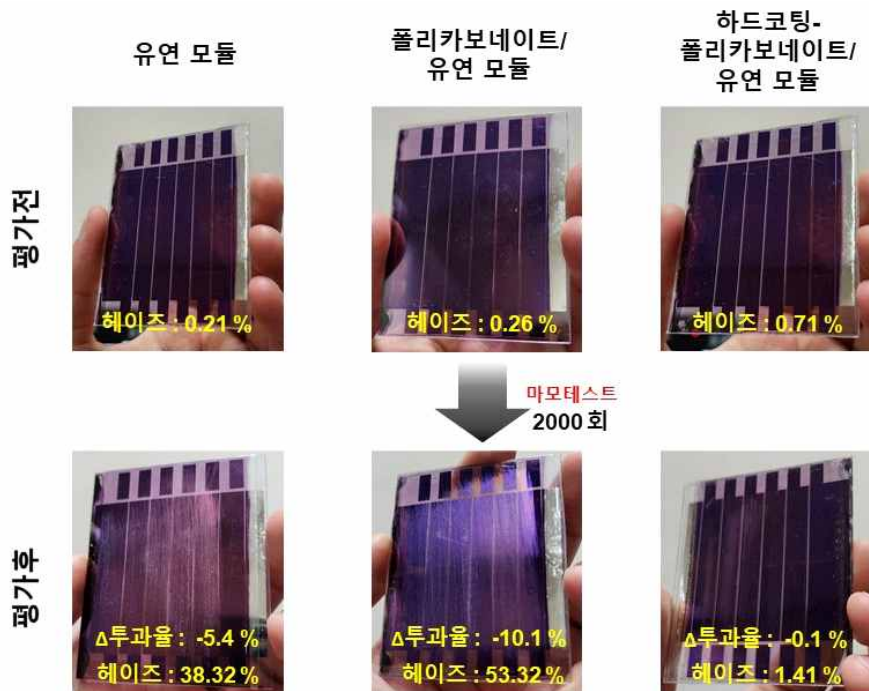


▲ 중간 접착층 구조에 따른 커버윈도우의 기계적·충격·광학 성능 비교. 하이브리드 프라이머 기반 구조는 cross-cut 및 연필경도(7H) 시험에서 우수한 접착성과 내구성을 보였으며(왼쪽), 충격 시험에서 파손 없이 안정적인 거동을 나타냈다(오른쪽 위). 또한 가시광 영역에서 높은 투과도를 유지하여 우수한 광학 성능을 확인했다(오른쪽 아래).

실록산은 실리콘(Si)과 산소(O) 결합이 반복되며 그물처럼 얽힌 3차원 네트워크 구조를 형성하고, 이 구조가 외부 충격을 효과적으로 분산시키는 동시에 표면 경도를 높여 재료의 안정성을 향상시킨다.

여기에 고리형 에폭시(cycloaliphatic epoxy)와 글리시딜 에폭시(glycidyl epoxy)를 함께 활용해 경화 이후에도 일부 반응 가능한 부분이 남아 있도록 설계했으며, 이 부분이 상부 코팅층과 추가적인 화학 결합을 형성해 계면 접착력이 더욱 강화되는 것을 확인했다.

연구팀은 ▲스크래치 테스트 ▲낙하·충격 시험 ▲광학 투과도 측정 ▲반복 내구성 시험 등을 통해 성능을 종합적으로 검증했다.



▲ **유연 유기태양전지 적용 시 본 연구 코팅 구조의 마모 내구성 및 광학 특성 변화.** 폴리카보네이트 및 하드코팅 폴리카보네이트 적용 시편 비교(위)와 2000회 마모 테스트 후 투과율 및 헤이즈 변화(아래) 결과를 통해, 하드코팅 적용 모듈의 우수한 기계적 안정성과 광학 특성 유지성을 확인함.

그 결과, 연필 경도(7H, 매우 단단한 연필심 수준) 수준의 강한 마찰에도 흠집이 거의 발생하지 않았으며, 약 40J(작은 물체가 빠르게 떨어지는 충격에 해당하는 수준)의 충격에서도 파손 없이 구조 안정성을 유지하는 것으로 확인됐다.

또한 유기 태양전지 모듈에 적용한 결과, 기존 폴리카보네이트 기반 구조 대비 기계적 안정성과 신뢰성이 모두 향상된 것으로 나타났다.

추가로 실시한 반복 굽힘 시험에서도 성능 저하 없이 유연성이 유지돼 대면적 패널이나 곡면 디스플레이 등 다양한 형태로의 적용 가능성이 확인됐다.

이는 단일 공정 내에서 계면 결합과 구조 형성을 동시에 구현함으로써 표면 경도와 충격 저항성은 물론 광학 특성과 유연성까지 모두 만족시키는 보호 소재 플랫폼을 구현했다는 점에서 의미가 있다.

강흥규 부소장은 "이번 연구는 표면 경도와 충격 저항성 간의 상충 관계를 계면 공학적으로 해결해 두 특성을 동시에 확보한 범용 보호 소재 기술"이라며 "디스플레이, 태양전지, 모빌리티 등 다양한 산업 분야와 대면적 공정에 적용 가능한 플랫폼 기술로 확장될 수 있다"고 밝혔다.

이번 연구는 과학기술정보통신부·한국연구재단 나노 및 소재기술개발사업과 중소벤처기업부 딥테크 팁스(Deep-Tech TIPS) 프로그램의 지원을 받았다.

이 기술은 한국발명진흥회(KIPA)의 특허분석평가시스템(SMART5)에서 AA 등급을 획득하며 우수성을 인정받았으며, 연구 결과는 재료 및 코팅 분야 국제학술지 《Progress in Organic Coatings》 6월 호에 게재가 확정됐다.

한편 GIST는 이번 연구 성과가 학술적 의의와 함께 산업적 응용 가능성까지 고려한 것으로, 기술이전 관련 협의는 기술사업화실(hgmoon@gist.ac.kr)을 통해 진행할 수 있다고 밝혔다.

논문의 주요 내용

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Progress in Organic Coatings (2024 JCR 상위 6.8%, Impact Factor: 7.3)

- 논문명 : Simultaneous Enhancement of Surface Hardness and Impact Strength in Flexible and Transparent Cover Windows for Organic Photovoltaic Films
- 저자 정보 : 김상조(GIST 차세대에너지연구소, 공동제1저자), 김인복(GIST 차세대에너지연구소, 현 유니테스트, 공동제1저자), 정현석(주식회사 리셀 연구원), 기태윤(GIST 신소재공학과), 안유경(GIST 히거연구센터), 장준호(GIST 히거연구센터 연구원), 노은지(엠에스웨이), 박애리(엠에스웨이), 이민수(엠에스웨이), 장영식(케이로체), 김진호(한국세라믹기술연구원), 박지웅(GIST 신소재공학과), 이광희(GIST 신소재공학과), 장수영(GIST 차세대에너지연구소), 강홍규(GIST 차세대에너지연구소, 교신저자)