

★ 2026년 7월 22일(수) 조간 (온라인 7.21.(화), 낮 12:00 이후) 보도해 주시기 바랍니다.

보도자료	 한국연구재단 National Research Foundation of Korea
청렴한 연구지원 신뢰받는 NRF	<대외홍보실> 조은혜 팀장, 고흥숙 연구원 ☎ 042-869-6119

<자료문의> 한국재료연구원 김소연 책임연구원(055-280-3441)

물에 잠겨도 끄떡없다... 상식 뒤집은 태양전지 개발 - 낚시 그물 구조 모사해 물에 강한 페로브스카이트 태양전지 구현 -

- 비를 맞아도 물에 잠겨도 성능을 유지하는 차세대 태양전지 기술이 개발됐다.
- 페로브스카이트 태양전지의 최대 약점으로 꼽혀온 수분 안정성 문제를 해결해 차세대 태양전지의 상용화 가능성을 높였다.
- 한국연구재단(이사장 홍원화)은 한국재료연구원 김소연·임동찬 책임연구원 연구팀이 낚시 그물(Fishing-net) 구조를 모사한 분자 네트워크를 페로브스카이트 계면에 형성해 수분 침투를 막는 기술을 개발했다고 밝혔다.
- 이번 연구 성과는 과학기술정보통신부와 한국연구재단이 추진하는 미래유망융합기술파이오니어사업 및 한국재료연구원 기본사업의 지원으로 수행됐으며, 나노과학·나노기술 및 재료과학 분야 최상위 국제학술지 ‘나노-마이크로 레터(Nano-Micro Letters)’에 7월 17일 게재됐다.
- 페로브스카이트 태양전지는 기존 실리콘 태양전지에 버금가는 효율을 가지면서도 낮은 비용으로 제작할 수 있어 차세대 태양전지의 가장 유력한 후보로 평가받고 있다.

- 하지만 페로브스카이트 소재는 수분과 산소에 매우 취약해 비나 습기에 노출되면 성능이 급격히 떨어지는 치명적인 약점이 있다.
- 지금까지는 두꺼운 보호막*으로 외부의 물을 막는 방식이 주로 사용됐지만 제조 비용이 증가하고 유연성이 떨어지는 문제가 있었다.

* 보호막(인캡슐레이션): 물이나 공기가 통하지 않도록 보호막을 씌우는 것으로 ‘봉지(封止) 기술’ ‘봉지층’이라고 부른다.

- 연구팀은 외부를 막는 대신 소재 자체를 물에 강하게 만드는 새로운 접근법을 제시했다.
- 금속 이온(Cu^{2+})을 연결 고리로, 단단한 유기분자(BCP)와 유연한 고분자(PEIE)*를 결합해 낚시 그물처럼 촘촘한 분자 네트워크를 페로브스카이트 계면에 형성했다.
- * 단단한 유기분자(BCP, Bathocuproine)와 유연한 고분자(PEIE, Polyethylenimine ethoxylated): 물에 취약한 페로브스카이트 태양전지를 보호하기 위해 연구팀이 도입한 핵심 분자 소재들. BCP는 수분이 침투하지 못하도록 방어벽 역할을 해주고, PEIE는 단단한 BCP 사이를 부드럽게 연결해 접착제와 완충제 역할을 한다.
- 이 구조는 수분이 내부로 침투하는 것을 막는 동시에 태양전지 성능 저하의 원인인 이온 이동도 효과적으로 억제했다.
- 특히 기존 연구들과는 달리, 연구팀은 태양전지를 실제 물속에 반복적으로 담그는 침수 시험을 통해 내수성을 검증했다.
- 또한 별도의 글로브박스* 없이 공기 중에서 제작한 태양전지로 26% 이상의 광변환 효율을 달성했으며, 반복적인 침수 시험 후에도 성능이 회복되는 우수한 내수성을 입증했다.
- * 글로브박스: 보통 페로브스카이트 태양전지를 만들 때 수분, 산소 등을 완벽히 차단한 채 고순도 불활성 기체로만 채워진 밀폐 상자에서 까다롭게 작업하게 된다.
- 김소연·임동찬 책임연구원은 “이번 연구는 태양전지 소재 자체를 물에 강하게 만든 것이 가장 큰 차별점”이라며, “향후 대량 생산 공정과 실리콘 태양전지와 결합한 탠덤 태양전지에 적용해 건물일체형 태양광과 영농형 태양광 등 다양한 분야에서 조기 상용화를 추진할 계획”이라고 밝혔다.

주요내용 설명

<작성 : 한국재료연구원 김소연 책임연구원>

논문명	Air-processed and water-stable perovskite solar cells enabled by a fishing-net-inspired interfacial network
저널명	Nano-Micro Letters
키워드	공기 중 공정 페로브스카이트 태양전지(Air-processed perovskite), 유연 페로브스카이트 태양전지(Flexible perovskite solar cells), 고효율(High efficiency), 계면 개질(Interfacial modification), 수분 저항성(Water resistance)
URL	https://rdcu.be/fubeb
저자	김소연, 임동찬 책임연구원(교신저자/한국재료연구원), 무흐 파딜 알밥(Muh Fadhil Albab) 박사(제1저자/한국재료연구원)

1. 연구의 필요성

- 페로브스카이트 태양전지는 높은 광변환 효율과 저온 용액 공정이 가능해 차세대 태양전지로 주목받고 있다. 또한 얇고 가볍게 만들 수 있어 유연 태양전지, 건물일체형 태양광(BIPV), 자동차일체형 태양광(VIPV), IoT 자립 전원 등 다양한 분야로 확장이 가능하다. 그러나 페로브스카이트 소재는 수분과 산소에 취약하고, 소자 내부 이온 이동으로 성능이 저하되는 한계가 있다. 이 한계를 극복하기 위해 주로 외부 봉지층, 즉 인캡슐레이션*을 통해 수분을 차단하는 방식을 사용한다.

* 인캡슐레이션: 태양전지를 수분과 산소로부터 보호하기 위해 외부에 보호막을 씌우는 봉지 공정.

- 인캡슐레이션은 소자 보호에 효과적이지만, 보호막이 손상되면 급격한 성능 저하가 발생할 수 있고 제조 공정이 복잡해지며 비용이 증가한다. 또한 두꺼운 보호층은 유연·경량 태양전지 구현에도 불리하다. 따라서 페로브스카이트 태양전지의 상용화를 위해서는 외부에서 수분을 차단하는 기술을 넘어, 소재와 계면 자체가 수분과 습기에 강한 본질적 내구성을 갖도록 설계하는 새로운 접근이 필요하다.

2. 연구내용

- 본 연구에서는 페로브스카이트 태양전지의 계면에 낚시 그물(Fishing-net) 구조를 모사한 분자 네트워크를 형성해 수분 침투와 이온 이동을 동시에 억제하는 계면 개질* 기술을 개발했다. 구리 이온(Cu^{2+}), 유기 분자 BCP, 아민기를 가진 고분자 PEIE를 이용해 페로브스카이트 표면에 촘촘한 계면 네트워크를 형성했으며, 이는 수분 저항성을 높이는 동시에 계면 결함을 줄이고 전하 추출을 돕도록 설계됐다.

* 계면 개질: 태양전지 내부 층 사이의 경계면 특성을 조절해 결함을 줄이고 전하 이동과 안정성을 개선하는 기술.

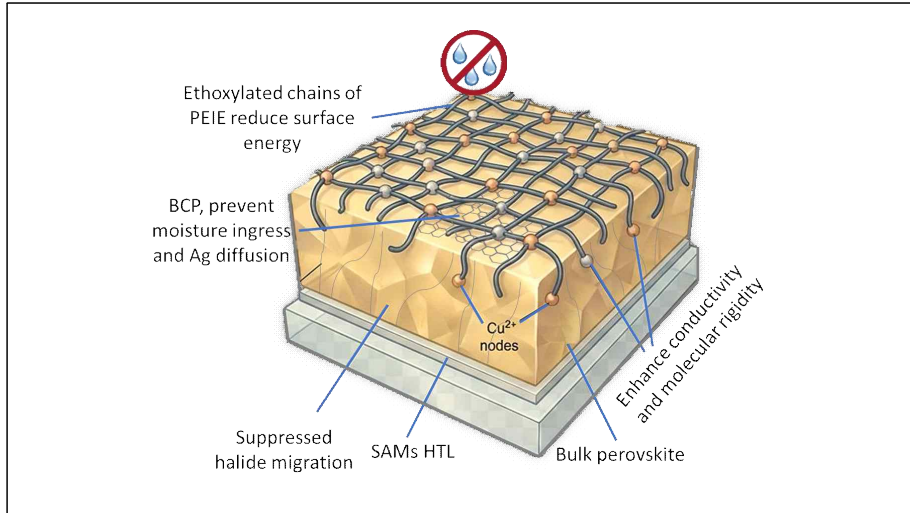
- 연구팀은 글로브박스 없이 일반 공기 중 공정 조건에서도 고효율 페로브스카이트 태양전지를 구현했다. 저밴드갭*부터 고밴드갭까지 서로 다른 밴드갭의 페로브스카이트 태양전지에서 인증 효율을 확보했으며, 대표적으로 1.53 eV 조성에서 26% 이상의 광변환 효율을 달성했다. 또한 1.61 eV 및 1.77 eV 조성에서도 높은 효율을 확보해, 본 기술이 특정 조성에 국한되지 않는 범용 기술임을 입증했다. 또한 안정성 평가에서는 기존의 고습 노출 평가를 넘어 소자를 물에 직접 담그는 침수 테스트를 수행했다. 그 결과 비봉지 상태에서도 물 침수 후 성능 유지 및 회복 가능성을 확인했으며, 유연 기판 기반 소자에서도 10,000회 이상의 반복 굽힘 시험 후 높은 성능 유지율을 보여 유연·경량 태양전지 응용 가능성을 함께 입증했다.

* 밴드갭: 반도체가 흡수할 수 있는 빛의 에너지 범위를 결정하는 물성.

3. 연구성과/기대효과

- 본 기술은 수중·실외 IoT 센서의 자립 전원, 스마트 농업 및 양식장 모니터링 시스템, 건물일체형 태양광, 자동차일체형 태양광, 웨어러블·휴대형 전원 등에 적용 가능하다. 특히 수분과 습기가 많은 환경에서도 안정적으로 작동할 수 있어, 기존 태양전지가 활용되기 어려웠던 응용 분야로 확장성이 크다.
- 또한 다양한 밴드갭의 페로브스카이트 태양전지에 적용 가능해 탠덤 태양전지로 확장될 수 있다. 향후 연구팀은 대면적 모듈, 롤투롤 연속 공정, 장기 실외 신뢰성 평가로 연구를 확장해 고효율·고안정성 페로브스카이트 태양전지 상용화에 기여할 계획이다.

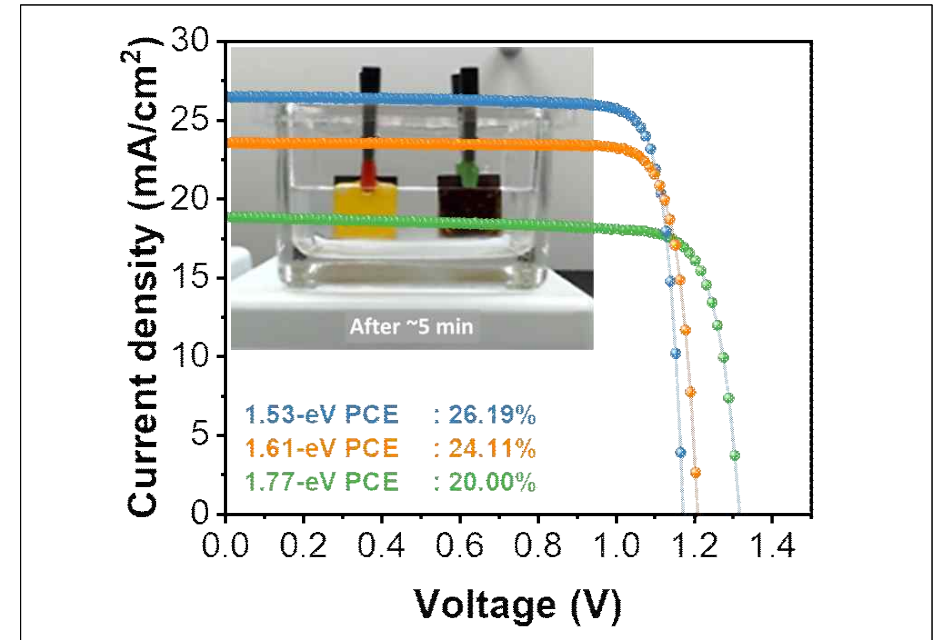
그림 설명



(그림1) 낚시 그물 구조 계면층을 이용한 수분 저항성 페로브스카이트 태양전지 개념도

본 그림은 페로브스카이트 태양전지 계면에 형성된 낚시 그물 형태의 분자 네트워크 구조를 나타낸다. Cu^{2+} 결합점과 BCP, PEIE가 촘촘한 계면층을 형성해 수분 침투와 은(Ag) 전극 확산을 억제한다. 이 계면 설계는 외부 봉지층에만 의존하지 않고 소재·계면 자체의 수분 저항성을 높였다는 점에서 의미가 있다.

그림설명 및 그림제공 : 한국재료연구원 김소연 책임연구원



(그림2) 물 침수 후에도 성능을 유지하는 밴드갭별 고효율 페로브스카이트 태양전지

본 그림은 태양전지의 전류-전압 특성과 물 침수 후 페로브스카이트 박막을 나타낸 것이다. 1.53 eV, 1.61 eV, 1.77 eV 조성에서 각각 26.19%, 24.11%, 20.00%의 광전 변환 효율을 보였으며, 물 침수 후에도 계면 네트워크 적용 소자가 안정적으로 유지됨을 확인했다. 이는 본 기술이 다양한 밴드갭에서 고효율과 수분 저항성을 동시에 확보했음을 보여준다.

그림설명 및 그림제공 : 한국재료연구원 김소연 책임연구원

연구 이야기

<작성 : 한국재료연구원 김소연 책임연구원>

□ 연구를 시작한 계기나 배경은?

이 연구는 실험실에서 자주 겪던 작은 에피소드에서 시작됐습니다. 비가 오는 날이면 학생이 “오늘은 이상하게 실험이 잘 안 됩니다”라고 찾아오곤 했습니다. 같은 조건으로 실험했지만, 습도가 높은 날에는 글러브박스 안의 습도도 평소보다 높아지고, 그 미세한 차이가 페로브스카이트 태양전지의 성능과 재현성에 영향을 주고 있었습니다. 그때 이런 생각이 들었습니다. “실험실 안에서도 날씨에 따라 결과가 달라지는 기술이라면, 과연 실제 산업 현장이나 생활 환경에서도 살아남을 수 있을까?” 아무리 높은 효율을 기록하더라도, 특정한 조건에서만 잘 되는 기술이라면 국민이 체감할 수 있는 실제 성과로 이어지기 어렵다고 보았습니다.

그래서 극도로 제한된 환경에서만 구현되는 기술이 아니라, 일반 대기 환경에서도 제조할 수 있고, 장마철과 같은 습한 조건에서도 안정적으로 작동하며, 향후 대면적·양산 공정으로 확장 가능한 기술을 개발하고자 했습니다. 실험실 안에서만 성공하는 기술이 아니라, 실험실 밖에서도 살아남는 차세대 태양전지 기술을 만드는 것이 이 연구의 출발점이었습니다.

□ 연구 전개 과정에 대한 소개

재료 연구자로서 약점을 단순히 외부 봉지층으로 가리는 것이 아니라, 소재 본연의 특성을 새롭게 설계해 극복하는 연구 하고자 했다.

기존의 접근은 태양전지 외부에 인캡슐레이션을 적용해 수분과 산소의 유입을 차단하는 방식이 주를 이뤘다. 그러나 이 방식은 보호막이 손상되면 성능 저하를 피하기 어렵고, 공정 복잡도와 제조 단가를 높이며, 유연·경량 태양전지로 확장하는 데에도 한계가 있다. 그래서 페로브스카이트 태양전지가 실제 환경에서 살아남기 위해서는 ‘인캡슐레이션으로 버티는 기술’이 아니라, ‘소재 자체가 물과 습기에 강한 기술’이 필요하다고 판단했다. 이에 페로브스카이트 계면에 낚시 그물처럼 촘촘하게 얹힌 분자 네트워크를 형성하는 전략을 설계했다. 이 계면 네트워크는 수분이 침투할 수 있는 통로를 줄이고, 소자 내부에서 성능 저하를 유발하는 이온 이동을 억제하도록 고안됐다. 동시에 계면 결함을 제어하고 전하 이동을 돕도록 설계함으로써, 안정성 향상과 효율 개선을 동시에 달성하고자 했다.

그 결과 공기 중 공정으로도 높은 효율을 구현하면서, 물에 직접 노출된 뒤에도 성능이 회복되는 페로브스카이트 태양전지를 선보였다. 이번 성과는 페로브스카이트 태양전지의 취약성을 외부 보호막으로 보완하는 기존 방식에서 벗어나, 소재와 계면의 본질적 내구성을 강화한 새로운 접근이라는 점에서 의미가 크다.

□ 이번 성과, 무엇이 다른가?

이번 성과의 핵심은 “물에 약한 태양전지”라는 페로브스카이트의 상식을 뒤집었다는 점이다. 기존 페로브스카이트 태양전지는 수분 안정성을 확보하기 위해 주로 외부 봉지층에 의존했다. 그러나 보호막이 두꺼워질수록 제조 공정은 복잡해지고, 비용은 증가하며, 유연 소자로 확장하는 데에도 제약이 따른다. 반면 이번 연구는 외부 보호막에 의존하지 않고, 페로브스카이트 계면 자체를 물에 강한 구조로 바꾸었다. 낚시 그물처럼 촘촘한 계면 네트워크가 수분 침투와 이온 이동을 동시에 억제해, 공기 중 공정에서도 높은 광변환 효율과 우수한 수분 안정성을 함께 구현했다.

특히 이번 기술은 단순히 습한 환경에서 견디는 수준을 넘어, 물과 직접 접촉한 뒤에도 성능 회복성을 보였다는 점에서 의미가 크다. 이는 페로브스카이트 태양전지의 신뢰성 평가 기준을 한 단계 끌어올린 결과이며, 기존에는 적용이 어려웠던 수분·다습 환경으로 응용 범위를 넓힐 수 있는 중요한 전환점이다.

□ 실용화된다면 어떻게 활용될 수 있나? 실용화를 위한 과제는?

이 기술이 실용화되면 기존 태양전지가 사용되기 어려웠던 습기 많고 물과 가까운 환경에서도 태양전지를 안정적으로 활용할 수 있다. 대표적으로 노지 농업 현장, 스마트팜, 양식장, 하천·저수지 주변에서 수온, 수질, 이온 농도 등을 실시간으로 측정하는 수중·실외 IoT 센서의 자립 전원으로 활용될 수 있다. 또한 가볍고 유연한 태양전지로 확장하면 건물 외벽이나 창호에 부착하는 건물일체형 태양광(BIPV), 자동차 차체와 곡면 구조물에 적용하는 자동차일체형 태양광(VIPV), 웨어러블·휴대형 전원, 스마트팩토리용 독립 전원 등으로 응용 범위가 넓어진다.

특히 페로브스카이트 태양전지는 얇고 가볍게 만들 수 있고, 용액 공정을 기반으로 제작할 수 있어 기존 실리콘 태양전지가 적용되기 어려운 다양한 표면과 공간에 적용할 가능성이 크다. 이번 기술은 이러한 장점에 수분 안정성까지 더해, 차세대 태양전지의 활용 영역을 실내외, 육상과 수중, 평면과 곡면으로 확장할 수 있는 기반 기술이 될 것으로 기대된다.

실용화를 위해서는 소면적 셀에서 확인한 성능과 안정성을 대면적 모듈에서도 균일하게 구현하는 것이 가장 중요하다. 실제 제품화 단계에서는 넓은 면적에서 박막을 균일하게 형성해야 하며, 모듈 간 성능 편차, 전극 안정성, 장기 신뢰성, 제조 단가 등을 함께 해결해야 한다. 또한 물과 습기에 대한 안정성뿐 아니라 고온·고습, 자외선, 열충격, 장기 실외 노출, 반복 굽힘 등 실제 사용환경을 반영한 종합적인 신뢰성 평가가 필요하다. 이번 연구가 페로브스카이트 태양전지의 수분 안정성 한계를 넘는 중요한 가능성을 보여준 만큼, 앞으로는 이를 대면적 제조 공정과 모듈 패키징, 실증 평가, 인증 기준 대응까지 연결하는 후속 연구가 필요하다. 연구팀은 소재 설계, 계면 제어, 소자 제작, 모듈화, 실증 평가를 단계적으로 연계해 실험실 성과가 실제 산업 현장에서 활용될 수 있도록 연구를 이어갈 계획이다.

□ 꼭 이루고 싶은 목표나 후속 연구계획은?

연구팀이 꼭 이루고 싶은 목표는 실험실 안에서만 좋은 성능을 보이는 태양전지가 아니라, 실제 생활환경에서도 오래 버티고 안정적으로 전기를 생산하는 페로브스카이트 태양전지를 구현하는 것이다. 이번 연구에서는 특정 조성이나 단일 밴드갭에 국한되지 않고, 저밴드갭부터 고밴드갭까지 다양한 밴드갭의 페로브스카이트 태양전지에서 인증 효율을 확보함으로써 기술의 범용성과 확장 가능성을 입증했다.

후속 연구에서는 이미 검증된 기술을 바탕으로, 대면적 모듈과 실제 응용 환경으로 확장하는 데 집중할 계획이다. 특히 이번 계면 네트워크 기술을 대면적 코팅 공정과 롤투롤 연속 생산 공정에 적용하고, 유연 태양전지, 건물일체형 태양광, 자동차일체형 태양광, 수중·실외 IoT 센서용 자립 전원 등 실제 응용 분야에 맞춘 모듈화 연구를 추진할 예정이다. 또 나아가 탠덤 태양전지에도 이 기술을 적용해 고효율과 고안정성을 동시에 만족하는 상용화 기반 기술로 발전시키고자 한다.