

산학연 연구실 소개(1)

한국과학기술연구원 차세대태양전지연구센터 유기 광전자 소재 및 에너지 소자 연구실 (Organic Optoelectronic Materials & Energy Devices Lab, KIST)

주소: 서울시 성북구 화랑로 14길 5 한국과학기술연구원 차세대태양전지연구센터 (우: 02792)

전화: 02-958-5320, E-mail: hjson@kist.re.kr

홈페이지: <https://sites.google.com/view/oomed/home>

연구책임자 | 손해정 박사
한국과학기술연구원
차세대태양전지연구센터

1. 연구실 소개

본 “유기 광전자 소재 및 에너지 소자 연구실”에서는 유기 및 고분자 소재의 경량성, 유연성, 분자구조 제어 특성을 기반으로 소재의 기능성을 극대화하고, 이를 활용한 차세대 광전자 소자 개발을 목표로 연구를 수행하고 있다. 특히, 소재의 분자 설계뿐만 아니라 인쇄 공정, 박막 증착, 대면적 박막 제조 등 다양한 공정기술을 융합하여 실용화 가능한 고성능·고안정성 에너지 소자 구현을 지향하고 있다.

주요 연구 분야로는 유기 및 고분자 기반의 고성능 태양전지 소재 개발과 이를 활용한 유연 태양전지 및 대면적 공정 기술 개발이 있으며, 습도 조절이 가능한 대면적 제조 공정과 친환경적으로 완전 분해 가능한 유기 태양전지 소재 개발을 통해 차세대 지속가능 에너지 소자 연구를 수행하고 있다. 또한, 고효율·고안정성을 동시에 확보한 페로브스카이트 태양전지 소재 및 소자 구조 설계, 계면 안정성 확보 기술 등을 통해 상용화 수준의 안정성과 효율을 동시에 추구하는 연구를 진행 중이다. 나아가, 유기 및 페로브스카이트 소재의 융합을 기반으로 한 탠덤 태양전지 모듈 개발을 통해 고효율화 및 대면적 모듈 구현에 대한 기술 개발도 활발히 수행하고 있다.

이와 함께 태양광 에너지를 이용한 수소 생산 기술 개발에도 연구를 확장하여, 태양광 기반 수전해 시스템의 전극 소재 및 광전극 설계, 수소 생산 효율 향상 및 시스템 안정성 확보를 위한 연구를 진행 중이다.

본 연구팀의 기술들은 경량·유연·투명 등 다양한 장점을 바탕으로 아웃도어, 의료, 웨어러블 디바이스, IT 기기뿐 아니라 가정 및 건물용 분산형 에너지 시스템 등 다양한 분야로의 응용 가능성을 보유하고 있다. 궁극적으로는 차세대 도심형 분산 발전 시스템, 플렉서블·웨어러블 스마트 전자기기, 자립형 에너지 공급원의 실현과 상용화를 목표로 연구를 수행하고 있다.

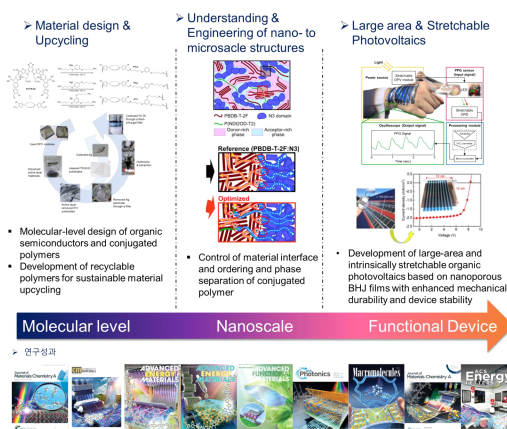


그림 1. 유기 광전자 소재 및 에너지 소자 연구실 소개.

2. 주요 연구 분야

2.1 고성능 유기/고분자 소재 및 태양전지

2.1.1 대면적 스트레처블 태양전지 연구

기계적 유연성과 고효율을 동시에 갖춘 스트레처블 유기 태양전지를 개발하였다. 열가소성 폴리우레탄을 활용하여 나노다공성 벌크헤테로접합(np-BHJ) 박막을 대면적으로 구현하는 전략을 선보였다.

이 구조는 계면 접촉력 향상과 응력 완화를 동시에 만족시켜 인장 조건에서도 소자의 기계적 안정성을 높였으며, 12.0%의 효율을 달성하고 40% 인장 조건에서도 초기 성능의 89%를 유지하는 성과를 확인했다. 또한 1,000회 반복 인장(10%) 후에도 10% 이하의 성능 저하를 나타내는 내구성을 확보했다.

해당 np-BHJ 구조는 10.17 cm² 크기의 대면적 모듈에도 적용 가능하며, 7.06%의 효율을 구현한 바 있다. 이를 기반으로 제작한 photoplethysmography 센서를 통해 웨어러블 응용 가능성도 입증했다.

2.1.2 습도 제어 가능한 대면적 유기 태양전지 소재(공정 기술 개발)

다양한 환경 조건에서도 고성능을 유지할 수 있는 유기 태양전지 소자 개발을 목표로, 습도 제어 기반 대면적 공정 기술을 연구하고 있다. 기존 스핀 코팅 방식의 한계를 극복하고,

인쇄 기반 블레이드 코팅 공정을 적용하여 20.4 cm² 면적에서 16.27%의 높은 효율을 달성하였다.

주요 전략으로 도입된 유연성 첨가제 Carvone(CV)은 활성층 내 엑셉터와 비공유 복합체를 형성하여 전하 생성과 결정화를 유도하고, 용매 증발 시 발생하는 Marangoni 흐름을 활용해 다양한 기판 위에서도 균일한 박막 형성을 가능하게 한다.

본 기술은 단일 셀뿐만 아니라 대면적 모듈에서도 우수한 성능을 입증하였으며, 상대습도 10~70% 범위에서도 안정적인 소자 제작이 가능해 계절별 대기 변화와 무관한 roll-to-roll 대면적 인쇄 공정 기반 상용화 가능성을 제시한다.

2.1.3 기능성 고분자의 업사이클링 기술 개발

전자 폐기물 저감과 지속 가능한 전자소자 개발을 목표로, 기능성 고분자의 재활용 및 업사이클링 기반 기술을 연구하고 있다. 특히, 고성능 유기 반도체 소재의 화학적 재활용을 구현하고, 이를 통해 회수된 모노머로부터 새로운 구조의 고분자를 재합성하는 소재 업사이클링 기술을 개발하고 있다.

재활용 가능한 고분자의 설계뿐만 아니라, 재활용된 모노머를 기반으로 한 박막 내 in-situ 중합을 통해 네트워크 고분자를 형성하고, 이를 유기 태양전지 및 유기 박막트랜지스터에 적용하여, 소재의 열적·기계적 안정성과 우수한

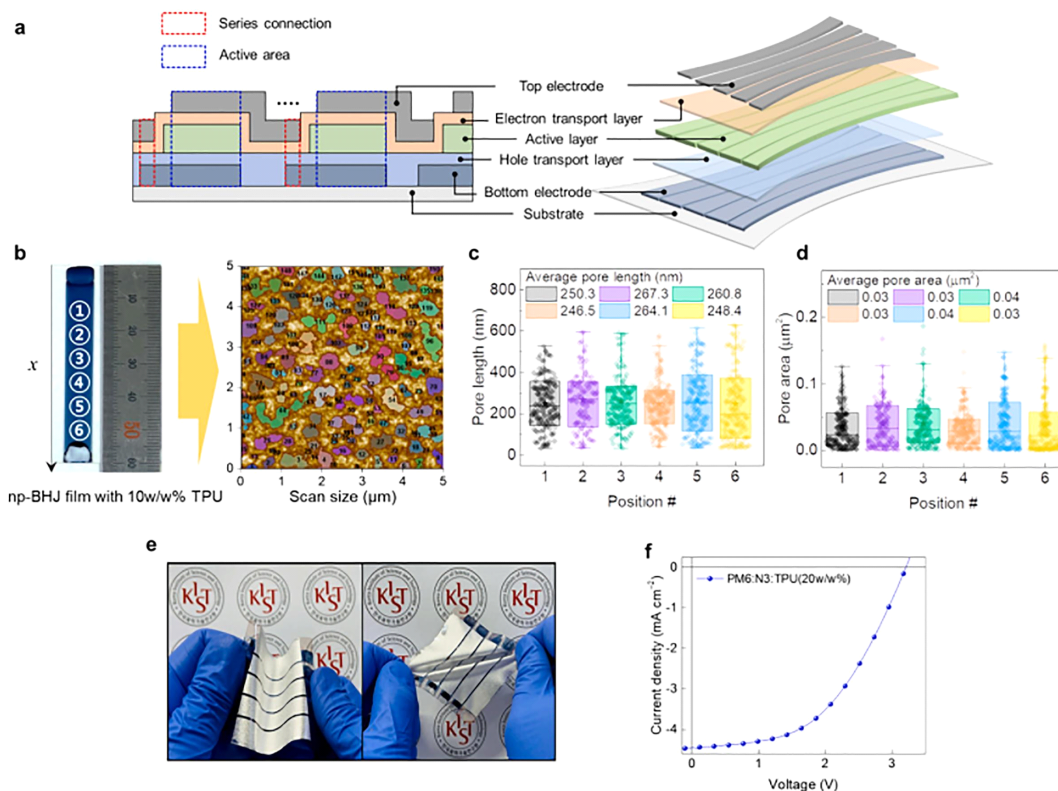


그림 2. 기계적 유연성과 고효율을 동시에 갖춘 스트레처블 유기 태양전지.

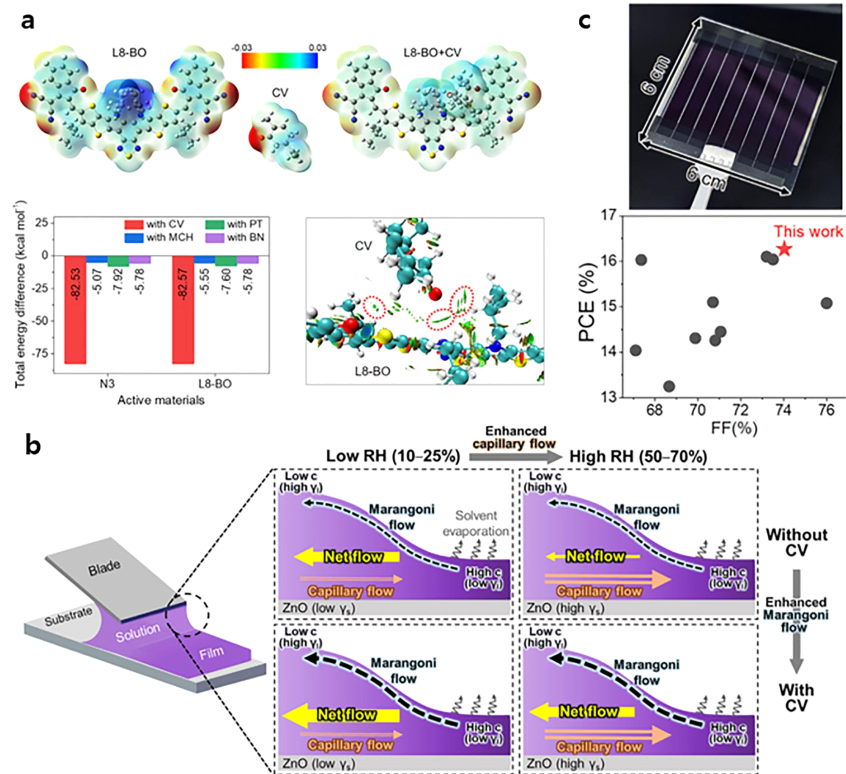


그림 3. Carvone 첨가제를 활용한 비공유 복합체 형성과 습도 환경에 따른 Marangoni 흐름 제어를 통해 대면적 유기태양전지의 균일성과 효율 향상을 달성함.

전기적 성능을 동시에 확보하였다.

이와 같은 기술은 유연전자소자, 일회용 바이오센서, 환경친화형 웨어러블 전자소자 등 다양한 응용 분야에 활용 가능하며, 재활용 고분자 기반 소자의 성능 및 신뢰성을 획기적으로 향상시킬 수 있는 새로운 패러다임을 제시한다.

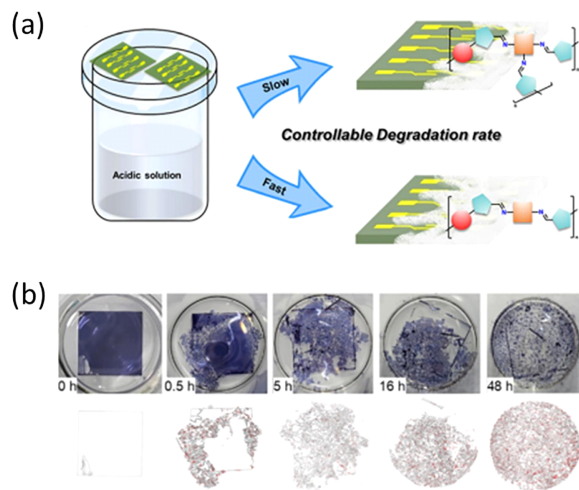


그림 4. 고분자의 분자 구조 설계를 통해 산성 조건에서의 분해 속도를 조절할 수 있으며, 시간에 따른 박막 분해 과정을 통해 기능성 고분자의 가역적 업사이클링 가능성을 입증함.

2.2 고효율, 고안정성 페로브스카이트 태양전지 기술 개발

2.2.1 고효율 태양전지 소재 개발

페로브스카이트 태양전지는 높은 광흡수 계수, 긴 전하 확산 거리, 용액 공정 기반의 낮은 제조 비용 등의 장점을 갖추어 차세대 태양전지로 주목받고 있다. 그러나 고효율 구현에 주로 사용되는 금속 할라이드 기반 소재는 열적·화학적 불안정성이 크며, 이에 따라 장기 안정성과 대면적 공정에서의 성능 재현성 확보가 핵심 기술 과제로 남아 있다.

본 연구실에서는 고효율 페로브스카이트 광흡수층 소재의 분자 설계와 정밀한 공정 조건 제어를 통해 고성능 소재 개발을 추진하고 있으며, 특히 결정 성장 과정에서의 필름 균일도 향상과 계면 결함 저감을 위한 전략적 접근을 병행하고 있다.

2.2.2 고안정성 태양전지 공정 기술 개발

페로브스카이트 태양전지는 열, 습기, 산소 등에 대한 민감성으로 인해 장기 구동 시 내구성에 한계가 존재한다. 특히, 고효율을 달성한 소자에서도 실온 조건에서 수십 시간 이내에 급격한 성능 저하가 발생하는 경우가 많아, 상용화를 위해서는 고안정성 소재 및 소자 구조의 개발이 필수적이다.

본 연구실에서는 페로브스카이트 결정 구조와 계면 특성의 안정화를 위한 전략을 기반으로, 다양한 안정화 기법을 적용한 소자의 초기 열화 거동 및 장기 구동 특성을 평가하고 있다.

2.3 고효율 탠덤 모듈 태양전지

태양전지의 활성 물질이 넓은 흡수 스펙트럼을 가질수록 더 많은 광자를 흡수할 수 있지만, 밴드갭을 초과하는 고에너지 광자는 열로 손실되어 광전 변환 효율(PCE)의 한계로 작용한다. 따라서, 광 흡수 효율을 높이는 동시에 열 손실을 최소화하는 균형 설계가 중요하다.

이러한 한계를 극복하기 위한 전략으로 멀티접합(multi-junction) 또는 탠덤(tandem) 구조가 제안되었으며, 일반적으로 상부 셀에는 밴드갭이 큰 페로브스카이트 소재가, 하부 셀에는 유기, 페로브스카이트 또는 실리콘 등 밴드갭이 작은 소재가 적용된다.

본 연구실은 페로브스카이트/유기 탠덤 구조를 기반으로 한 고효율 탠덤 모듈 태양전지를 개발하고 있다.

2.4 태양광 에너지를 이용한 수소 생산 방법 개발

태양광 기반 수소 생산 기술은 지속 가능한 에너지 전환과 탄소 중립 실현을 위한 차세대 청정에너지 기술로 주목받고 있다. 특히, 암모니아를 수소 저장 매체로 활용하는 방식은 이산화탄소를 배출하지 않으면서 저온에서도 반응이 가능해, 높은 친환경성과 공정 유연성을 갖춘 수소 생산 전략으로 평가된다.

그러나 암모니아 분해 반응의 낮은 반응 효율과 선택성 문제는 여전히 극복해야 할 기술적 과제로 남아 있다. 본 연구실은 금속 나노입자의 표면 플라즈몬 공명(surface

plasmon resonance, SPR) 현상을 이용한 플라즈모닉 광촉매를 적용하여, 암모니아로부터 선택적이고 고효율적인 수소 생산 시스템을 개발하고 있다.

또한, 고분자 기반 폐기물(예: polystyrene, PET 등)을 활용한 태양광 기반 광개질(photoreforming) 시스템을 도입함으로써, 고분자 폐기물의 광촉매 분해와 연계된 수소 생산 가능성을 탐색하고 있다. 이러한 전략은 자원순환과 에너지 전환을 동시에 달성할 수 있는 융합형 수소 생산 기술로 이어질 수 있다.

3. 연구실 현황 및 비전

현재 본 연구실은 손해정 박사를 중심으로 박사후연구원 2명, 박사과정 2명, 석사과정 5명으로 구성되어 있으며, 소재 합성부터 소자 제작·평가까지 유기광전자소자 연구의 전 주기를 아우르는 체계적인 연구 시스템을 갖추고 있다. 지난 10여 년간 유기 및 고분자 반도체, 전도성 고분자 등 다양한 소재 합성 연구를 바탕으로, 대면적 유기태양전지 공정 및 플렉서블·스트레처블 소자 기술을 지속적으로 개발해왔다.

특히 고성능·고안정성 유기 태양전지 기술을 기반으로 페로브스카이트 등 차세대 광전소자의 성능 향상에도 기여하고 있으며, BIPV(Building Integrated Photovoltaics), Rooftop 모듈 등 도심형 태양광 시스템의 실용화를 적극 추진 중이다. 이를 통해 도심형 에너지 자립 시스템 구축과 청정에너지 기술 선도라는 연구실의 비전을 실현해 나가고 있다.

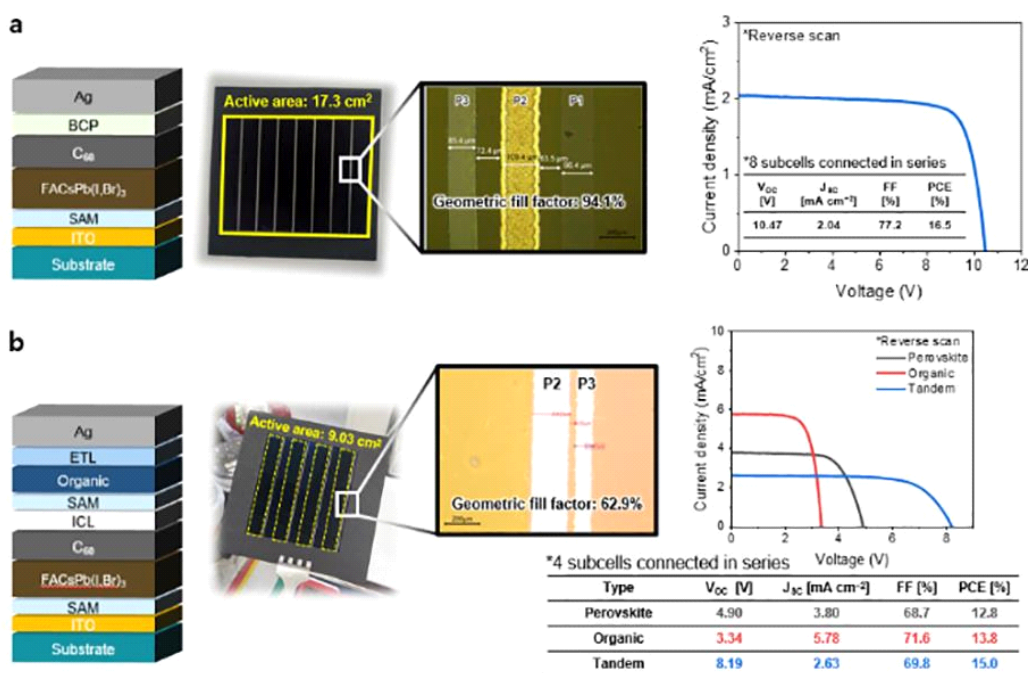


그림 5. (a) 대면적 페로브스카이트 태양전지 모듈의 구조와, 활성 면적, 효율 그래프. (b) 대면적 페로브스카이트/유기 탠덤 태양전지 모듈의 구조와, 활성 면적, 각 단일 셀과 탠덤 셀의 효율 그래프.