산학연 연구실 소개

KAIST 생명화학공학과 고분자-나노 전자재료 연구실 (Polymer Nano-Electronics Lab.)

주소: (우: 305-701) 대전광역시 유성구 대학로 291 한국과학기술원 응용공학동 W1-3 5116호
Tel: 042-350-3975, Fax: 042-350-3901
E-mail: bjkim02@kaist.ac.kr
Homepage: http://pnel.kaist.ac.kr

연구책임자 | **김범준** 교수
KAIST 생명화학공학과

1. Polymer Nano-Electronics Lab. (PNEL) 소개

본 연구실에서는 차세대 태양전지로 각광을 받고 있는 유기태양전지의 상용화를 위하여 효율과 안정성을 향상시킬 수 있는 소재들을 설계·합성하여 물성을 평가하고 더 나아가 소재들의 화학적 구조와 특성 사이의 상관관계를 규명하는 연구를 하고 있으며 기능성 고분자를 기반으로 하는 유/무기 하이브리드 소재 합성도 활발히 연구하고 있다. 특히, 본 연구실에서는 p-type 전도성 고분자와 n-type 전도성 고분자를 동시에 합성하여 현재 세계 최고 수준의 광전환효율을 나타내는 all-polymer solar cell을 성공적으로 개발하였다. 또한, 유기전자소자뿐만 아니라 유/무기 하이브리드 소재 개발 분야에 있어서도 활발히 연구를 진행하고 있다. 고분자 소재 내에서 나노입자의 분산성 및 나노위치 조절을 할 수 있는 기반 기술을 바탕으로 비등방성 구조의 콜로이드 제작 및 이의 나노구조 제어기술을 개발하였으며, 하이브리드 소재기반의 색변환형 센서에도 연구를 확대하여 진행하고 있다. 이러한 성과를 바탕으로 미래창조과학부 '중견연구자지원사업' 의 도약-전략연구를 2013년부터 수행하고 있다. 현재 본 연구실에서는 박사후과정 1명, 박사과정 14명, 석사과정 9명이 각자 개인의 창의적이고 혁신적인 연구주제를 바탕으로 실험을 진행 중이며 국내외 유수의 연구실과 협력하여 공동 연구 또한 활발히 진행 중이다.

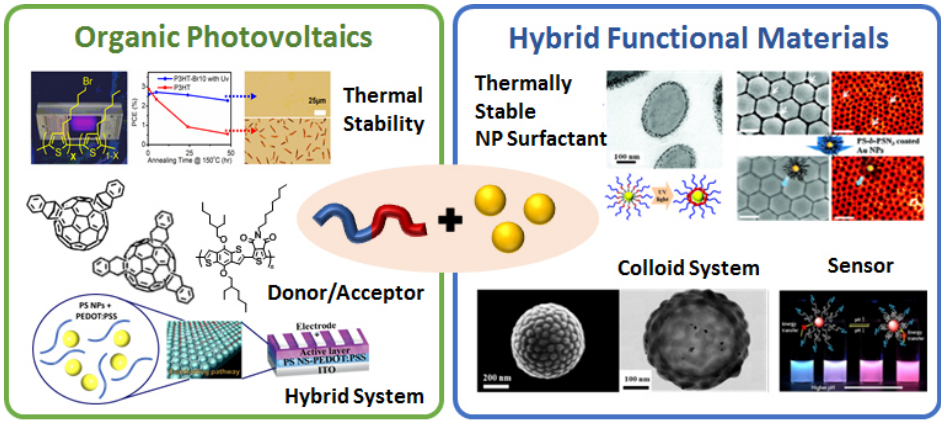

그림 1. PNEL 중점연구분야.

2. 현재 진행되는 연구들의 간략한 소개

2.1 고효율 고안정성 유기태양전지 소재 개발

전도성 고분자 기반의 유기태양전지는 가볍고, 유연하며, 롤투롤 (Roll-to-Roll) 연속 인쇄 공정을 통해서 제작이 가능하기 때문에 태양전지 생산 자체에 소비되는 에너지가 적고 짧은 시간에 대량생산이 가능하여 차세대 태양전지로서 각광을 받고 있다. 하지만 상용화를 위해서는 효율과 안정성이 뒷받침 되어야 하기 때문에 새로운 소재의 합성이 불가피하다. 본 연구실에서는 이를 위해 효율뿐만 아니라 안정성 향상에 초점을 맞추어 새로운 소재 설계와 합성에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다.

태양광의 효율적인 흡수를 위해 D(electron-rich unit)-A (electron-deficient unit) alternating 구조의 저밴드갭 고분자에 대한 연구가 현재 많이 이루어지고 있다. 본 연구실에서는 이에 더하여 저밴드갭을 가지면서도 넓은 흡수스펙트럼을 가질 수 있는 전도성 고분자를 개발하기 위해 세 개의 각기 다른 단량체(2D/1A or 1D/2A)로 구성된 terpolymer 형태의 전도성 고분자를 설계하고 합성하였다(*Macromolecules*, **46**, 6806 (2013)). 이와 더불어 전도성 고분자의 흡수 영역 조절뿐만 아니라 결정성, 홀 이동도 등의 특성을 조절하고 이에 따른 유기 태양전지 효율 변화를 연구하고자 다양한 구조의 전도성 고분자 합성을 진행하였으며, review 논문도 발간하였다(*Chem. Mater.*, DOI: 10.1021/cm502991d, (2014) *J. Mater. Chem A*, **2**, 15252 (2014)). 또한, 흔히 전자 받개로 많이 사용되고 있는 풀러렌의 구조변화를 통해 높은 개방전압을 가지는 유기태양전지도 개발하였다(*Chem. Mater.*, **23**, 5090 (2011); *Chem. Mater.*, **24**, 2373 (2012)).

전도성 고분자 태양전지의 상업화에 있어서 가장 큰 걸림돌은 낮은 안정성인데 열적, 광학적 안정성 향상을 위해서는 새로운 물질 개발이 필수적이며, 유기태양전지의 유연성, 휴대용 전자소자로의 응용 등을 고려한다면 기계적 안정성 확보 또한 필수적이다. 일반적으로 유기태양전지가 높은 열에 장시간 노출되면 광활성층의 모폴로지가 변형되어 전자 주개와 받개 각각의 도메인이 마이크로미터 단위로 커지게 되고 이러한 상분리는 광전환효율을 급격하게 감소시킨다. 이에 본 연구 그룹에서는 가교화가 가능한 아자이드 그룹을 전자 주개로 가장 많이 사용되고 있는 Poly(3-hexyl-thiophene) (P3HT)에 도입하여 열적 안정성이 매우 높은 모폴로지와 태양전지 개발이 가능함을 입증하였다(*Chem. Mater.*, **24**, 215 (2012); *Macromolecules*, **46**, 8472 (2013); *ACS Nano*, **8**, 10461 (2014)). 또한, 이를 응용하여 유기용매에 녹지 않는 유기트랜지스터 기반의 센서를 제작하는 것도 포항공대 오준학 교수팀과의 공동연구를 통해 성공적으로 진행하였다 (*Adv. Mater.*, In Press (2014)).

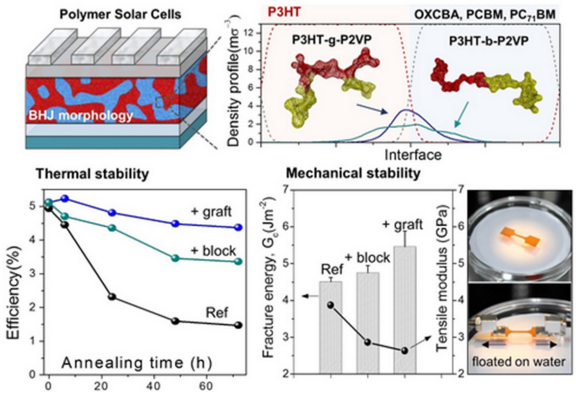

그림 2. 유기태양전지의 열적, 기계적 안정성향상에 관한 연구.

이외에도 유기태양전지의 홀전도층에 크기가 조절된 균일한 polystyrene입자를 템플레이트로 사용하여 대기 안정성과 기계적 안정성을 동시에 높이는 연구를 진행하였고, 이러한 템플레이트 기법을 유기태양전지뿐만 아니라 유기발광소자에도 쉽게 적용하였다(*ACS Nano*, **6**, 7902 (2012); *Adv. Energy Mater.* **4**, 1301345 (2014)).

특히, 기계적, 열적 안정성 향상을 더욱 높이기 위하여 전자 주개와 받개가 모두 전도성 고분자인 all-polymer solar cell용 소재 개발에 박차를 가하고 있다. 흔히 전자 받개로 많이 사용되고 있지만, 빛을 흡수하는 능력이 낮은 플러렌을 대체하여 n-type 형태의 전도성 고분자를 설계하고 합성하여 유기태양전지에 도입하는 연구를 진행 중이다. 본 연구실에서는 신규 고분자의 합성뿐만 아니라 구조변화에 따른 전자 주개와 받개 사이의 인력, 패킹 형태 변화 등을 체계적으로 연구하고 있고 이에 대한 원천기술을 확보하고 있으며, 최근 세계 최고수준의 all polymer solar cell 광전환효율을 달성하였다(*ACS Macro Letter*, **3**, 1009 (2014); *Adv. Mater.*, Accepted for Publication (2014)).

2.2 기능성 고분자 기반의 유/무기 복합 나노소재

서로 다른 특성을 가지는 두 가지 물질의 장점을 취해 새로운 성질을 가지는 복합재료를 개발하는 것은 많은 연구그룹에 의해 진행되어 왔다. 특히, 유연하면서도 쉽게 가공될 수 있는 고분자 소재에 광학적, 전기적 특성을 가지는 무기물질을 도입하면 우수한 특성을 가지는 유/무기 하이브리드 물질을 제조할 수 있다. 본 연구실에서는 고분자 블렌드, 블록공중합체, 자극반응성 고분자 등에 기계적, 광학적, 전기적 물성이 조절된 나노입자를 도입하여 코팅, 촉매나 센서 등에 응용 가능한 신규 하이브리드 소재를 개발해왔다. 또한, 고분자 matrix내에서 나노입자의 분산성 및 배열을 조절할 수 있는 원천 기술을 확보하고 있는데, 이는 복합재료의 특성을 좌우하는 가장 중요한 요소기술이다. 본 연구실에서는 다양한 나노입자를 합성하고 이의 표면특성을 제어하

여 하이브리드 소재를 개발하였다. 일례로 열적으로 안정한 고분자로 코팅된 무기나노입자 개발을 통해 열적 가공이 필요한 고분자 시스템에 적용할 수 있는 기반기술을 확보하였다. 촉매 특성이 우수한 CuPt 나노막대기의 표면을 수용성 고분자로 개질하고 이를 산화그래핀에 도입해 수용액 상에서의 우수한 촉매적 특성을 확인할 수 있었다(*Small*, **8**, 3161 (2012)). 더 나아가, 이러한 무기나노입자를 고분자 블렌드 시스템에도 적용하고, 나노입자의 위치를 선택적으로 조절할 수 있는 기술을 확보하였다. 특히 나노입자를 고분자 블렌드의 계면에 위치시킬 때, 효율적인 계면활성제로써 활용될 수 있다는 연구결과를 보고하였다. 나노입자의 크기나 구조(구형, 막대형)에 따른 계면활성제로써의 효과를 해석하고, 이를 전기적 특성 및 안정성이 우수한 전도성 필름 제조에 적용하였다.(*ACS Nano*, **5**, 9017 (2011); *ACS Macro Lett.*, **3**, 398 (2014)).

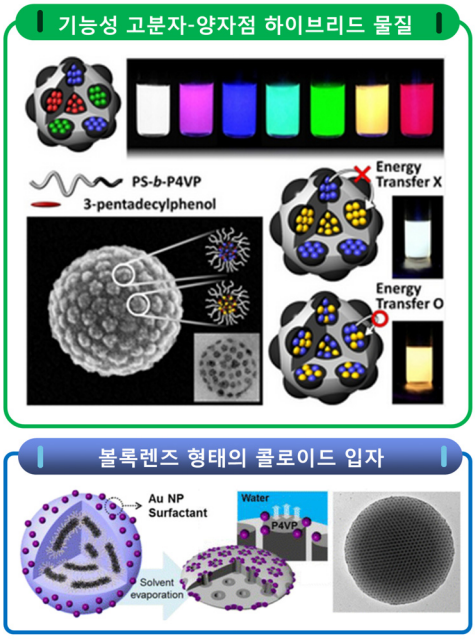

그림 3. 블록 공중합체 기반의 하이브리드 에멀젼 입자.

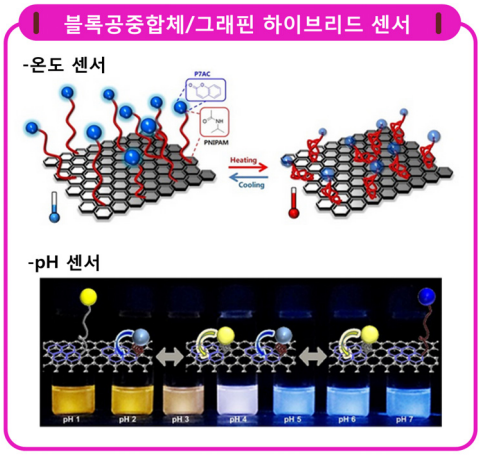

그림 4. 자극반응형 고분자기반 센서.

이러한 나노입자 계면활성제를 페인팅이나 광학필름으로도 많이 사용되는 고분자 콜로이드 제작에 적용하여 구형이 아닌 라즈베리 형태, 다공성 형태, 볼록렌즈 형태 등의 독특한 구조를 가지는 콜로이드 입자 제조가 가능함을 보고하였다(*ACS Nano*, **6**, 2750 (2012); *J. Am. Chem. Soc.*, **136**, 9982 (2014)). 이외에도 입자의 표면구조 제어 및 광학적, 전기적 특성 향상에 대한 연구도 병행하여 진행하고 있다.

또한, 본 연구실은 온도, pH, 빛, 중금속 등과 같은 외부 반응의 변화에 따라 물성이 변하는 센서를 자극 반응성 고분자와 나노입자 혹은 그래핀 기반 물질을 이용하여 개발하였다. 예를 들어 광학적, 전기적 특성을 지닌 양자점을 이용하여 pH sensor를 제작하고 이를 산화그래핀 플랫폼과 결합시켜 색변환이 가능한 pH sensor에 대한 연구를 진행하였다 (*ACS Nano*, **8**, 2848 (2014)). 이에 더하여 더욱 보편적이고 실용적인 센서 제작을 위하여 여러 자극을 한 번에 감지할 수 있는 고감도 센서를 제작 중에 있다.

3. 본 연구실의 비전 및 전망

본 연구실에서 확보하고 있는 독자적인 광활성층 고분자 소재 합성법이 유기태양전지 상용화의 걸림돌이 되는 효율 향상과 안정성 확보 문제를 해결해 줄 수 있을 것이라 기대한다. 또한 본 연구실에서의 유/무기 복합시스템 구현 기술은 물리적, 화학적 특성이 우수한 물질 개발을 가능하게 하고 여러 가지 입자 기반의 기술들에 다양하게 활용될 수 있다. 따라서 본 연구실의 연구가 전도성 필름, 센서, 촉매, 광학 입자 등의 개발에서 더 나아가 거시적인 범위로 확장된 다양한 기술들로 이어질 수 있을 것이라 전망한다.