

산학연 연구실 소개 (2)

KAIST 고분자 나노소재 연구실 (Polymer Nanomaterials Laboratory)

대전광역시 유성구 대학로 291 한국과학기술원(KAIST) 생명화학공학과
전화 : 042) 350-3963, Fax : 042) 350-3910
E-mail: oopark@kaist.ac.kr, Homepage: http://stereo.kaist.ac.kr



연구책임자 | 박오욱 교수
KAIST 생명화학공학과

1. 연구실 소개

1985년 서울 홍릉캠퍼스에서 고분자 유체 연구실이라는 이름으로 분자유변학 및 광유변학 연구를 시작한 이래로 비상용성 고분자 블렌드의 유변학 이론, 고분자 중합 반응공학, 각종 고분자 블렌드 연구를 거쳐 2000년대 초부터 기능성 고분자의 나노복합화, 고분자 광섬유 제조 공정 연구, 유기 발광소자(organic light-emitting diode), 고분자 태양전지(polymer solar cell) 및 하이브리드 초고용량 커패시터(supercapacitor) 등 고분자 소재 기반 에너지 저장 및 변환 기술 분야에서 독창적이고 선도적인 연구를 진행하여 왔다. 이에 따라 연구실 이름도 자연스럽게 고분자 나노소재 연구실로 바꾸었다. 최근에는 금속 나노입자 제조와 활용, 고분자와 탄소 나노소재의 복합화 연구를 시도하여, 기존의 기술적 한계를 극복하고 에너지 응용을 위한 새로운 소재개발에 주력하고 있다. 연구 주제의 특성 상 주로 산학연 협력 과제를 수행하여왔고 지금까지 약 290여편의 SCI 논문과 20여편의 국내외 특허를 발표하였으며 총 인용횟수 5,100여회, H-index 39의 실적을 보이고 있다.

현재 진행 중인 연구 주제는 크게 다섯 가지로 나뉘는데 1) 유기 화합물을 이용한 고성능 고분자 태양전지 및 유기 발광소자의 개발, 2) 금속 나노입자의 합성 및 응용, 3) 유기 콜로이드 입자를 이용한 나노패터닝 기술, 4) 고분자 블렌드 및 나노복합체의 유변물성 연구, 5) 탄소 나노소재 기반 기능성 나노복합체 개발로 구성되어 있다. 각 연구주제에 대한 독립적인 연구와는 별개로, 상호간의 기술 접목을 통하여 현존 기술과는 차별되는 새로운 융복합 연구를 모색하고 있다.

2. 주요 연구내용

2.1 고성능 고분자 태양전지 및 유기 발광소자의 개발

전도성 고분자의 반도체 성질에 기초한 고분자 태양전지는 기존의 무기 태양전지에 비해 간단한 제작 공정, 저렴한 공정단가와 대면적화의 가능성, 그리고 뛰어난 기계적 유연성을 바탕으로 활발한 연구가 진행되고 있다. 그러나 고분자 태양전지는 활성층의 흡수 스펙트럼이 태양광을 비효율적으로 흡수하고, 엑시톤(exciton)의 짧은 확산길이(diffusion length)로 인하여 생성

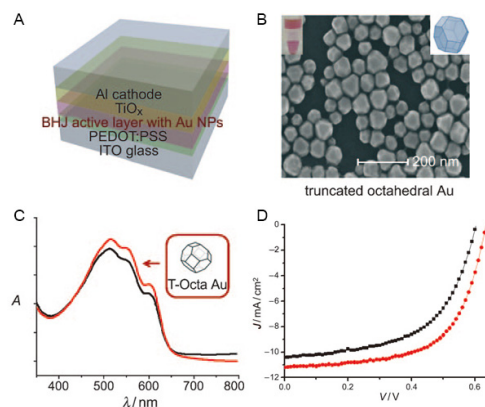


그림 1. 금 나노입자 도입을 통한 고효율 고분자 태양전지 개발. (A) 소자 구조 모식도, (B) 깎은 정팔면체(truncated octahedron) 금 나노입자의 SEM 이미지, (C) P3HT/PC₇₀BM 필름의 UV-Vis 스펙트럼, (D) J-V 곡선.

된 전하의 분리 및 수집 효율이 낮은 까닭에 무기 태양전지에 비하여 전환 효율이 떨어지는 문제가 발생한다. 따라서 본 연구실은 양극의 나노 패턴 도입을 통한 광 산란 효과의 증대, 스탬핑 전사(stamping transfer) 기법으로 새로운 형태의 농도 구배를 갖는 활성층의 도입, 활성층 전사를 통한 TiO₂ 층의 기능 향상, 팽윤현상(swelling)을 이용한 고분자 활성층의 결정성 강화 등의 공정을 통해 이러한 단점을 극복하고자 노력했다. 또한 다양한 크기와 형태를 갖는 금/은 나노입자를 활성층 내에 도입하여 효과적인 광산란으로 인한 광흡수의 개선과 원활한 정공 및 전자 수송을 통해 광변환 효율을 향상시켰으며, 중간층으로 CdSe 양자점을 도입한 연구에서는 양자점이 원활한 전자 수송을 유도함으로써 유기 태양전지의 효율 향상에 기여함을 밝힌 바 있다.

유기 발광소자는 정량성과 기계적 유연성, 제조방법의 용이함을 장점으로 최근 차세대 광원으로써 학계와 산업계의 많은 주목을 받아왔다. 특히 유기 발광소자의 높은 전력효율을 실현하기 위하여, 국내외 유수의 연구 그룹이 광추출 효율의 향상과 낮은 전압구동을 위하여 노력을 기울였다. 본 연구실은 최근 다년간 낮은 공정단가의 대면적 고효율 유기 발광소자의 제작을 위한 나노패터닝 방법을 적용하여, 용액 공정을 통한 광추출 구조의 도입, 다발광층의 크로스 패터닝 기술 및 삼차원 콜로이드 결정과 소프트 리소그래피 공정을 활용한 탑에미팅(top-emitting) 유기 발광 소자의 백색광 구현에 관한 연구를 수행하였다. 또한 최근에는 무기 금속 나노입자 및 수용액상 양자점을 활용한 고기능성 하이브리드 발광소자의 개발에 주안점을 두고 있다.

2.2 금속 나노입자의 합성 및 응용

금속 나노입자는 벌크 금속재료와는 다른 독특한 물리적, 화학적, 전기적, 광학적 특성을 지니고 있어 이를 바탕으로 센싱, 이미징, 의학소재, 촉매, 광전자소자에 이르기까지 그 응용 분야를 점차 넓혀가고 있다. 금속 나노입자의 특성은 주로 입자의 형태,

크기, 구조, 조성 등에 의하여 결정되므로, 이러한 요인을 통한 입자 특성의 정교한 제어가 요구된다. 본 연구실에서는 크기와 형태가 제어된 다양한 금속 나노입자를 용액 상에서 합성하고, 이들의 성장 메커니즘을 규명함으로써 금속 나노입자의 특성을 보다 용이하게 구현하고 활용할 수 있는 방안을 모색하였다.

대표적으로 시드 매개 성장법(seed-mediated growth)을 이용하여 형태가 각각 정팔면체와 사방 십이면체로 제어된 금 나노입자를 정교하게 합성하는 연구를 진행하였다. 두 종류의 입자들은 높은 수율과 균일한 형상을 가지도록 재현성 있게 합성되었으며, 입자의 크기를 보다 넓은 범위에 걸쳐서 조절함으로써 광학적 특성을 폭넓게 제어할 수 있었다. 또한 본 연구를 바탕으로 정팔면체의 금 나노입자에 선택적으로 추가적인 성장을 유도하여 나노 헥사포드(nano-hexapod) 형태를 지니는 금 나노입자를 합성하였다. 특히 과성장된 가지 부분의 길이를 조절하여, 가시광은 물론 근적외선 영역에 걸친 광학적 특성까지 제어한 점은 주목할 만하다.

한편으로는 금 입자를 시드로 활용하고 그 위에 팔라듐을 성장시켜 정육면체 형태와 열린 나노구조를 지닌 꽃 모양 형태의 금@팔라듐 나노입자를 고수율로 균일하게 합성한 바 있다. 이러한 구조는 팔라듐 입자의 촉매특성 및 선택성을 증강시키고 포이즈닝(poisoning)으로 인한 활성저하를 금으로 방지할 수 있다는 장점을 가진다.

현재 본 연구실에서는 에탄올 산화반응의 전기화학적 촉매 특성이 우수한 팔라듐 나노 덴드라이트(dendrite) 구조의 합성에 관한 연구를 수행하는 한편 사방 십이면체 금 나노입자의 꼭지점에 선택적 성장을 유도하고 형태를 조절함으로써 효과적인 광학적 특성 조절 및 표면증강 라만 분광(surface-enhanced Raman spectroscopy, SERS)으로의 응용을 시도하고 있다.

2.3 유기 콜로이드 입자를 이용한 나노패터닝 기술

콜로이드 입자들의 자기 조립과정을 통해 일정 규칙으로

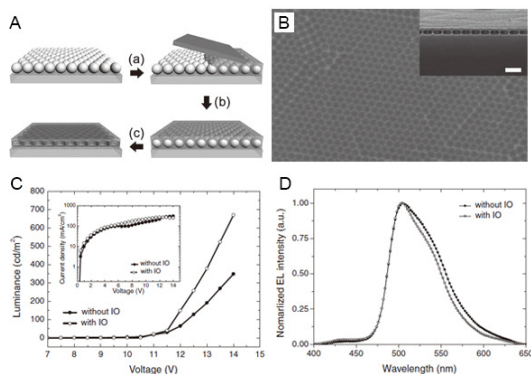


그림 2. 2차원 TiO₂ 역오팔(inverse opal) 광추출 구조를 이용한 고성능 고분자 발광소자 제작. (A) 역오팔 구조의 제작과정의 모식도, (B) SEM 이미지, (C) 휘도-전압 특성, (D) 발광 스펙트럼.

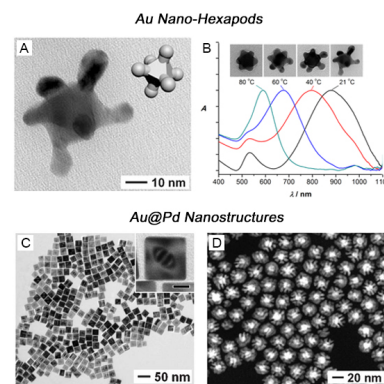


그림 3. 금 나노 헥사포드 입자의 (A) TEM 이미지, (B) 가지 부분의 길이에 따른 광학적 특성. (C) 정육면체 금@팔라듐 나노입자의 TEM 이미지, (D) 꽃 모양 형태 금@팔라듐 나노입자의 HAADF-STEM 이미지.

배열되어 형성되는 콜로이드 결정은 포토리소그래피(photolithography)나 이온빔 식각(ion beam etching)과 같은 top-down 형태의 제작 기술에 비하여, 비교적 간단하고 저렴한 공정을 통해 마이크로 및 나노 수준의 규칙적인 구조체를 제조할 수 있다. 이러한 장점을 토대로, 콜로이드 결정 구조를 광학, 광전자소자 및 센서 등의 연구 분야에 적용하기 위한 나노 구조체나 패턴을 제작하는 연구가 주목받고 있다. 본 연구실에서는 미세공간 대류조립 방법을 통한 콜로이드 구조의 제작, 수용성 고분자의 첨가를 통한 콜로이드 구조체의 물리적 안정성 향상 등 독창적인 제조 공정의 개발을 포함하여 광 필터 및 스마트 윈도우로의 활용, 그리고 소프트 리소그래피(soft lithography) 방법을 이용해 콜로이드 결정 구조체의 표면을 복제하고 전사하는 방법을 개발하였다. 이러한 복제 및 전사 과정에서 폴리디메틸실록산(PDMS)의 연성과 열처리 등의 공정을 활용함으로써 구형 콜로이드가 갖고 있는 구조적 한계를 극복하고 기존의 콜로이드 결정 연구에서 보고되지 않은 다양한 구조체를 제조할 수 있었다. 최근에는 콜로이드 기반 리소그래피 공정을 이용한 금속 패턴링을 통해 금속 특유의 LSPR(localized surface plasmon resonance) 특성을 제어하고 나노 구조를 제작함으로써 광전자소자 및 센서로의 응용이 가능할 것으로 기대된다.

2.4 고분자 블렌드 및 나노복합체의 유변물성 연구

고분자 블렌드는 단일 고분자로부터 충족되지 않는 물성의 한계를 극복하기 위해 적어도 두 가지 이상의 단일 고분자 혹은 공중합체를 혼합함으로써 얻어지는 고분자 소재이다. 한편으로는 무기재료 등의 이종 물질을 고분자 기재(matrix)와 혼합하고 미세구조를 조절하여 우수한 물성을 가진 고분자 나노복합체를 제조할 수 있다. 이러한 고분자 블렌드 혹은 나노복합체의 가공을 위해서는 복잡한 계면을 가지는 고분자 시스템의 유변물성에 대한 이해가 반드시 선행되어야 한다. 이론적 접근과 실험적 연구를 병행함으로써, 미세구조와 계면특성에 대한 이해를 토대로 거시적 성질과의 연관성을 예측하고 원하는 물성을 보다 용이하게 구현할 수 있다. 본 연구실에서는 고분자 나노복합체의 모폴로지와 유

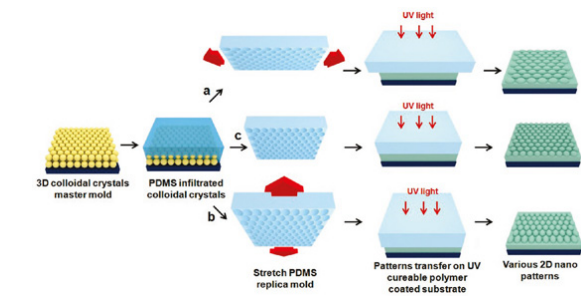


그림 4. 3차원 콜로이드 결정 구조와 레플리카 몰딩(replica molding)을 활용한 2차원 나노패터닝 기술의 모식도.

변물성의 상호관계, 나노복합체 형성의 시간적 추이와 유변물성의 관계, 비상용성 고분자 블렌드의 유변물성에 대한 이론 정립 등 이론적 접근뿐 아니라, 신디오택틱 폴리스타이렌 나노복합체의 제조 공정, 반응성 불포화폴리에스터 나노복합체의 제조 공정, 폴리카보네이트/ABS 블렌드의 상용성 연구와 신규 상용화제의 개발 등 산업계의 수요에 맞는 다양한 고분자 블렌드 및 복합체의 유변물성에 대한 연구를 수행하여 왔다.

2.5 탄소 소재 기반 기능성 나노복합체 개발

본 연구실에서는 탄소 소재와 전도성 고분자 또는 금속 산화물과의 복합체 전극 개발을 통하여 성능이 획기적으로 향상된 하이브리드 초고용량 커패시터를 개발한 바 있다. 초고용량 커패시터는 다공성 전도체인 카본전극이나 빠른 레독스 반응을 가지는 전도성 고분자 혹은 금속 산화물을 전극 물질로 사용하여 전해질과의 상호작용을 통해 에너지를 저장할 수 있는 기기로서, 일반 축전기에 비해 비축전 용량이 1,000-10,000배 이상 높고, 수 초 내지 수십 초 이내의 신속한 충방전 속도를 특징으로 한다. 본 연구실은 가격대비 높은 전기 용량(capacitance)을 가지는 전도성 고분자 폴리피롤(polypyrrole)을 전극으로 사용하기 위해 폴리피롤/그래파이트 복합체를 화학 중합에 의해 대량 생산하였고, 초고용량 커패시터 전극으로서의 성능이 우수함을 확인하였다. 이 외에도 폴리아닐린(polyaniline)/활성 탄소 복합체 전극, 탄소나노튜브/RuO₂ 복합체 전극을 활용한 초고용량 커패시터 연구를 수행한 바 있다.

비교적 최근에 연구가 시작된 탄소나노튜브와 그래핀 등 탄소 나노소재는 우수한 기계적 강도와 유연성과 더불어 고 유하고 독특한 전기적, 물리적 특성을 보유하고 있어 21세기 꿈의 신소재로 새롭게 주목받고 있다. 본 연구실에서는 탄소 나노소재의 표면을 효과적으로 개질하여 대상 고분자와

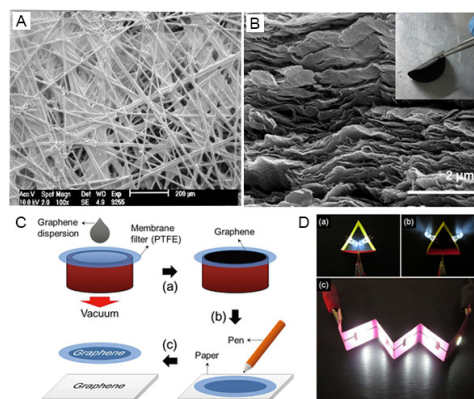


그림 5. 탄소 소재 기반 기능성 나노복합체의 개발의 예. (A) 초고용량 커패시터 용 폴리피롤/그래파이트 복합체 전극(SEM 이미지), (B) 리튬-이온 전지 용 플렉서블 그래핀 전극(SEM 이미지), (C~D) 접을 수 있는 종이 기반 그래핀 전자회로.

표 1. 고분자 나노소재 연구실 박사 학위 취득자 현황

졸업연도	성명	현 소속	직위	전공 관심 분야
1992	한도홍	영남대학교	교수	전자빔 이용한 방사선 화학
1992	윤관한	금오공과대학교	교수	고분자 나노소재
1992	권무현	우석대학교	교수	고분자유변학
1993	김동학	순천향대학교	교수	고분자 가공
1993	오영락	한국타이어	이사	고무 가공
1994	전명석	한국과학기술연구원 (KIST)	책임연구원	미세유체, 복잡유체
1995	황창익	도레이첨단소재	이사	고분자 가공
1995	이영실	제일모직	수석연구원	탄소 나노소재
1996	이항목	LG화학	상무	리튬이차전지
1997	박준용	삼성종합기술원	전문연구원	Nano Fabrication
1998	문도영	미국국립표준기술연구소 (NIST)	객원연구원	고분자물성 및 가공
1998	김웅진	삼성디스플레이	수석	OLED
1999	김영진	충남대학교	교수	기능성 고분자
1999	김승범	(주)상보	R&D 센터장	광학시트, 투명전극패널재료
2000	이시춘	충원대학교	교수	탄소나노재료, 에너지소재
2000	진병두	단국대학교	교수	OLED, OPV, 프린팅 공정
2001	박천일	LG화학	부장	전기 분리막
2002	임용택	충남대학교	교수	나노의학
2002	서덕중	삼성디스플레이	수석연구원	디스플레이 재료
2002	이태우	포항공과대학교	교수	유기광전자 소자
2002	임재곤	삼성토탈	수석연구원	자동차용 복합PP
2003	임상혁	경희대학교	교수	나노에너지융합시스템
2004	박종혁	성균관대학교	교수	태양전지
2005	최원목	울산대학교	교수	탄소 나노재료
2005	허승현	울산대학교	교수	그래핀, 탄소 나노소재
2005	최진성	㈜토파즈	연구소장	고분자 및 전자재료
2006	김태호	삼성종합기술원	전문연구원	QD-LED
2006	김문호	한국화학연구원	선임연구원	고분자소재
2007	문현식	성호폴리텍	연구소장	고분자가공
2008	박민주	삼성전자	책임연구원	Nanoimprinting
2008	최연범	삼성토탈	수석연구원	고분자합성과 분석
2009	강경보	롯데케미칼	이사	고분자가공
2009	윤기철	삼성정밀화학	수석연구원	고분자 종합 및 가공
2010	이행근	LG화학	차장	태양전지
2010	최홍균	Massachusetts Institute of Technology	박사후 연구원	나노패터닝
2012	정진원	LG전자기술원	책임연구원	태양전지
2012	박금환	삼성전자	책임연구원	터치스크린 패널, 인쇄전자 기술
2012	왕동환	UC Santa Barbara	박사후 연구원	유기태양전지
2012	김도엽	한국화학연구원	박사후 연구원	금속입자합성, 이차전지
2013	전지혜	SK케미칼	주임연구원	고분자 분석
2013	현우진	University of Minnesota	박사후 연구원	Printed Electronics
2014	이진우	한국기계연구원 부설 재료연구소	선임연구원	전자파흡수체
2014	정혁진	제일모직	책임연구원	고분자블렌드

의 상용성을 크게 향상시키고, 물폴로지 제어를 통해 정전기 분산 용도의 전도성 고분자 나노복합체를 개발하였다. 용융 혼합법을 통한 고분자 나노복합체의 개발 외에도 용액혼합법, 층상 자기조립법(layer-by-layer assembly), 진공여과법 등의 가공방법을 통해 접을 수 있는 종이 기판 기반 그래핀 전자 회로, 리튬-이온 전지 용 그래핀 전극, 기체 차단성 그래핀 다층층 코팅, 발광 용도의 그래핀 양자점 응용 등 최근 탄소 나

노소재를 이용한 차세대 기능성 복합소재의 개발에 주력하고 있다.

3. 향후 전망

본 연구실에서는 고분자 소재의 나노복합화에 대한 이론적 접근 및 해석뿐 아니라 신규 원천소재의 발굴을 통하여, 첨단 기능성 고분자 나노복합소재의 개발 및 응용을 꾸준히 시도하고 있다. 특히 친환경 미래 에너지에 대한 수요가 날로 증가하는 가운데, 혁신적인 에너지 기술의 개발이 절실히 요구되고 있다. 고분자 소재를 도입한 초고용량 커패시터와 유기 태양전지는 고분자 재료 특유의 유연성과 구조 제어 용이성을 바탕으로 청정 에너지 저장 및 변환 매체로서 활용 가치가 우수하며, 유기 발광 소자는 향후 구부리고 접고 늘릴 수 있는 단계로의 진전을 통해 새로운 유형의 디스플레이 및 조명산업 외에도 의류, 건물 등에 이르기까지 폭넓게 적용될 것으로 예상된다. 한편으로는 금속 나노입자나 탄소 나노소재와 같은 신규 나노소재를 활용한 복합화 연구에서 최근 괄목할 만한 기술적 진보가 이루어지고 있는 만큼, 기능성 고분자 소재의 산업적 활용에 대한 전망은 앞으로도 매우 밝을 것으로 기대된다. 특히 최근 고령화 사회로의 진입이 가속화 되고 있어 여러 형태의 정신적, 신체적, 환경적 웰니스(wellness) 융합분야와 연관된 기술 개발 및 신성장 산업에서도 그 활용이 크게 확대될 것이며 이에 대한 원천기술 연구도 바람직할 것으로 보인다.

4. 연구실 구성원 소개

본 연구실은 지금까지 총 40여 명의 박사와 60여 명의 석사 인력을 양성하여 관련 학계/연구계/산업계에 진출시켰고, 현재 박사과정 13명, 석사과정 2명의 학생이 연구에 매진하고 있다. 다음 표에서는 박사 학위 취득 졸업생의 학위 취득연도, 현 소속, 직위 및 관심분야를 나타내었다. 약 50% 정도가 연관 산업계 연구원으로 진출하여 각 분야에서 선도적 연구를 수행하고 있고, 약 30%는 국공립 및 사립 대학 교수로 진출하여 후학 양성에 매진하고 있으며, 이 외에도 정부 출연 연구기관으로 진출하거나 해외에서 박사후 연구원(post-doc.)으로 현재 근무하고 있다.

