

산학연 연구실 소개(2)

서강대학교 화공생명공학과 지속가능 플라스틱 연구실 (Sustainable Plastics Lab. (SPL), Sogang University)

주소: 서울 마포구 백범로 35 서강대학교 리치과학관 R415호 (우: 04107)
 전화: 02-705-8477, E-mail: jeypark@sogang.ac.kr
 홈페이지: <https://sites.google.com/view/jyp-plastic-research/>



연구책임자 | 박제명 부교수
 서강대학교 화공생명공학과

1. 연구실 소개

기후 위기와 자원 고갈 문제에 대한 전 지구적 대응이 가속화되면서, 플라스틱 산업 역시 “지속가능성 (sustainability)”을 핵심 가치로 재편되고 있다. 특히 일회용 플라스틱의 과도한 사용과 낮은 재활용률은 생태계에 심각한 위협을 가하고 있으며, 이에 따라 생분해성 플라스틱, 바이오매스 기반 소재, 플라스틱 수명 연장 기술, 친환경 복합재 개발에 대한 수요가 급증하고 있다. 이와 같은 배경 속에서, 서강대학교 화공생명공학과와 “지속가능 플라스틱 연구실(Sustainable Plastics Lab)”은 플라스틱의 전 생애주기 (life cycle) 관점에서 지속가능성을 향상시키기 위해, 다음의 네 가지 연구 축을 중심으로 연구를 수행하고 있다:

- ① 생분해성 고분자 소재 개발
- ② 바이오매스 유래 고분자 합성 및 특성 제어
- ③ 자가치유 기능성 고분자와 스마트 응용
- ④ 나노소재-고분자 융합 기반 고기능 플라스틱 개발

이러한 융합적 접근을 통해 플라스틱의 성능, 수명, 환경적 영향 사이의 균형을 도모하고, 장기적으로 플라스틱 폐기물 없는 사회(plastic-waste-free society) 실현에 기여하고자 한다. 아래에서는 각 연구 분야별 핵심 주제와 대표 연구 성과를 소개한다(그림 1).



그림 1. “지속가능 플라스틱 연구실”의 주요 연구분야.

2. 주요연구분야

2.1 생분해성 고분자 소재 개발

플라스틱 폐기물 문제에 대응하기 위해 생분해성 고분자는 사용 후 자연환경에서 미생물과 효소, 수분 등에 의해 무해 물질로 환원된다는 장점을 지닌다. 하지만 낮은 기계적 강도와 인장 인성, 열 안정성 부족 등의 한계로 실용화에 제약이 많았다. 특히 일회용 봉투나 포장재, 종이컵 코팅처럼 내구성과 내습성이 요구되는 분야에서 기존 생분해성 소재는 상용 플라스틱을 대체하기에 부족함이 있었다.

본 연구실에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 폴리(부틸렌 석시네이트) 기반 공중합체에 디메틸 카보네이트(dimethyl carbonate, DMC)를 도입하여 결정성을 제어하고 연신 특성을 개선한 poly(butylene succinate-co-carbonate, PBS-C)를 설계하였다. 소량의 구연산(citric acid)을 첨가함으로써 고분자 사슬 간 상호작용을 강화하고 네트워크 밀도를 조절하여 인장 강도와 인성을 동시에 향상시키며, 상온에서의 필름 가공성을 확보하였다.

이와 더불어 셀룰로오스 나노결정(cellulose nanocrystals, CNC)을 보강제로 활용하여 PBS-3C/CNC 나노복합체를 구현하였다. 해당 복합체는 순수 PBS 대비 인장 인성이 두 배 이상 증가하였으며, 인장 강도 64 MPa, 파단 신장률 690%를 달성함으로써 LDPE 및 PBAT/PLA 블렌드보다 우수한 기계적 성능을 보였다. 또한 일회용 비닐봉투의 요구조건을 모두 충족하였으며, 나노보강제의 도입은 단순한 물리적 충진을 넘어 고분자-나노입자 계면에서의 응력 분산과 결정 성장 제어 측면에서도 중요한 역할을 한다는 것을 확인하였다(그림 2).

더 나아가 실제 환경에서의 분해 특성을 평가하기 위해 PBS, PBAT, PLA, PCL을 실제 자연을 모사한 토양과 해수 조건에서 비교 분석한 결과, PBS와 PCL이 수개월 내에

완전 분해되는 우수한 성능을 보인 반면 PBAT는 분해율이 상대적으로 낮았다. 분해 메커니즘은 초기 표면 가수분해와 체적 확산에 기반하며, 말단 구조와 결정성 조절이 분해 속도에 주요하게 영향을 미친다는 사실을 규명하였다. 이러한 구조-기능-환경 상관성 분석을 통해, 단순한 분해 평가를 넘어서 실사용 환경을 고려한 소재 설계 방향을 제시할 수 있게 되었다.

응용 측면에서는 종이 빨대용 생분해성 코팅 소재를 적용하였다. 기존 종이 빨대는 액체와 접촉 시 구조가 흐물거리는 문제가 있었는데, PBS/CNC 기반 코팅층을 도입해 수분 저항성과 기계적 내구성을 높였다. 반복적인 압축 조건에서도 코팅층이 안정적으로 유지되었으며, 탄산음료와 접촉 시 기포 발생을 억제하여 사용자 경험을 개선하였다. 또한 이 코팅층은 산업용 코팅 공정에 적합한 점도와 건조 특성을 갖추어 상용화 가능성이 높다.

이처럼 본 연구실은 고분자 구조 설계, 나노보강 기술, 실환경 분해 평가를 통합하여 생분해성과 기계적 성능을 모두 만족시키는 차세대 플라스틱 소재를 개발하고 있으며, 플라스틱의 전 생애주기 지속가능성을 확보하기 위한 기반 기술을 구축하고 있다.

2.2 바이오매스 기반 고분자

재생 가능한 바이오매스로부터 얻은 단량체를 활용해 고분자를 합성하는 전략은 진정한 지속가능 플라스틱 기술의 핵심이다. 기존 PBAT와 같은 석유 유래 방향족 디카복실산 함유 고분자는 분해성은 확보하였으나 탄소포집 및 친환경성에는 한계가 있는데, 이를 해결하기 위해 본 연구실은 FDCA(2,5-furandicarboxylic acid)와 ISB(isosorbide) 등 바이오 단량체를 도입한 차세대 고분자 개발에 집중해왔다.

먼저 PBAT 구조에서 테레프탈산을 FDCA로 대체한 poly(butylene adipate-co-furanoate, PBAF)를 합성하였다.

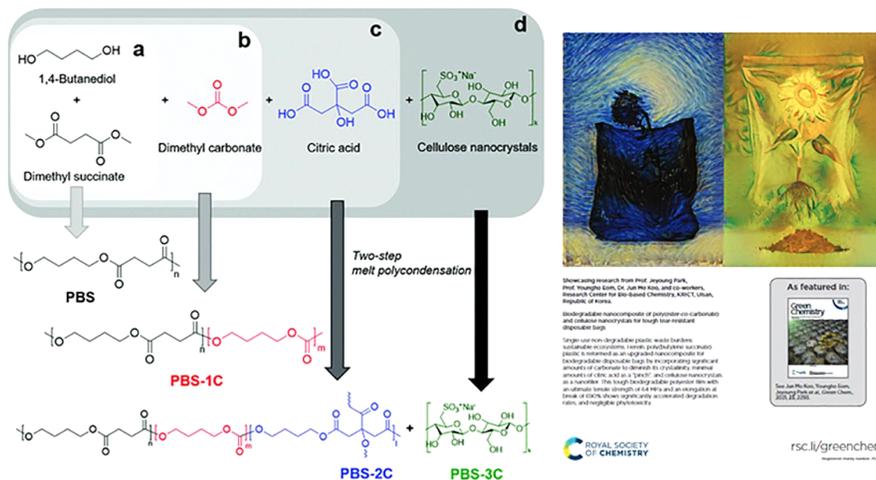


그림 2. 생분해성과 기계적 강도를 동시에 향상시킬 수 있는 고분자 설계(*Green Chem.*, 23, 2293 (2021)).

PBAF는 800% 이상 변형 후에도 즉시 원상 회복하는 우수한 탄성 회복력을 보였으며, 인장 강도도 50-70 MPa 수준으로 나타나 기존 PBAT과 유사하거나 우수하였다. Lipase 효소를 이용한 가수분해 실험에서는 FDCA 에스터 결합 부위가 분해의 시작점으로 작용하여 PBAT 대비 두 배 이상의 분해 속도를 기록하였다.

이와 함께 ISB 기반 폴리카보네이트에 0.3 wt% 수준의 CNC를 in-situ 도입하면, 인장 강도는 93 MPa, 인성은 40 MJ/m³까지 향상되며 투명성이 유지되는 나노복합체를 구현할 수 있었다. 이는 나노보강재와 고분자 사슬 간 수소결합 및 계면 안정성 향상을 통한 에너지 분산 및 균열 억제 메커니즘이 주효했기 때문이다.

한편 본 연구팀에서는 생분해성 종이 기반 친환경 플라스틱 포장재를 위한 설계로 머셔화(mercerization) 처리된 셀룰로오스 매트릭스를 이용하여 PBSA (poly(butylene succinate-co-butylene adipate)) 올리고머 및 고분자가 종이 섬유 깊숙이 침투하도록 설계하였다. NaOH 용액을 활용해 셀룰로오스 표면의 수산기 노출을 극대화한 후, 용해된 PBSA를 종이 섬유에 균일하게 분산시켜 종이-고분자 계면에서 기계적, 화학적 결합을 강화하였다. 이로써 복합체 내 코팅층이 반복 굴곡에도 파단 없이 구조를 유지하며, 가스·수분 차단 성능이 일반 종이 대비 산소 투과율을 수십 배, 수분 투과율을 대폭 저감하는 수준으로 향상되었다(그림 3). 이러한 연구 성과는 단일 공정으로 식음료용 포장재의 장벽성과 생분해성을 동시에 만족시키는 새로운 설계 전략을 제시하며, 지속가능 포장재 상용화의 핵심 기술적 기반으로 자리매김하고 있다.

2.3 자가치유 고분자 및 스마트 응용

자가치유 고분자는 손상된 부위를 스스로 복구하여 소재 수명을 연장할 수 있는 혁신적 재료이다. 본 연구실은 고분자 사슬 간 동적 공유결합과 비가역적 물리결합을 이용해 반복적인

자가치유와 우수한 기계적 강도를 동시에 확보한 스마트 고분자망을 설계하였다.

본 연구실에서는 방향족 디설파이드 결합을 가교로 도입한 투명 열가소성 폴리우레탄(TPU) 엘라스토머를 개발하였다. 이 재료는 상온에서 절단 후 2시간 이내에 인장 강도의 75% 이상을 복구하면서도 높은 투명도(>90%)를 유지하였고, 스크래치 센서용 코팅으로의 응용 가능성을 입증하였다. 이어서, 연구실에서는 mechano-responsive hydrogen-bonding array를 적용한 카보네이트계 TPU를 제시하였다. 외부 기계적 자극 시 강력한 수소 결합이 응력 분산 네트워크로 작용하여, 35 °C에서 인장 강도 43 MPa와 90% 이상의 자가치유 복원력을 동시에 달성하였다. 이 시스템은 내구성과 치유 속도의 상충을 해소함으로써, 구조용 스마트 코팅 및 웨어러블 전자소자 분야로 연구를 확장하는 계기가 되었다. 가장 최근의 연구로는 전통적 방향족 디설파이드 결합의 착색 문제를 해결하기 위해 지방족 디설파이드(aliphatic disulfide)와 과잉 수소 결합 수용체를 도입한 분자 설계를 제안하였다. MD 시뮬레이션을 통해 최적의 수용체/공여체 비율을 규명하고, 투명도 99%, 인장 강도 45 MPa, 빠른 치유 속도를 동시에 만족시키는 무색/방수성/고강도 자가치유 엘라스토머를 구현하였다(그림 4). 본 연구실은 이러한 연속적 성과를 바탕으로, 향후에도 다양한 동적 결합을 융합한 하이브리드 네트워크 설계와, 이를 활용한 구조용 스마트 코팅, 센서, 생체 이식용 소재 등으로 응용 범위를 꾸준히 확대해 나갈 예정이다.

2.4 나노소재-고분자 융합 기술

플라스틱의 성능을 향상시키거나 새로운 기능을 부여하기 위해 나노 첨가제를 활용하는 연구도 중요한 축을 이룬다. 특히 본 연구실은 나노셀룰로오스와 나노키틴(키토산 나노입자)과 같이 재생 가능하고 생분해되는 바이오 나노물질을 고분자 매트릭스에 복합화하는 기술을 개발하여 왔다. 바이오

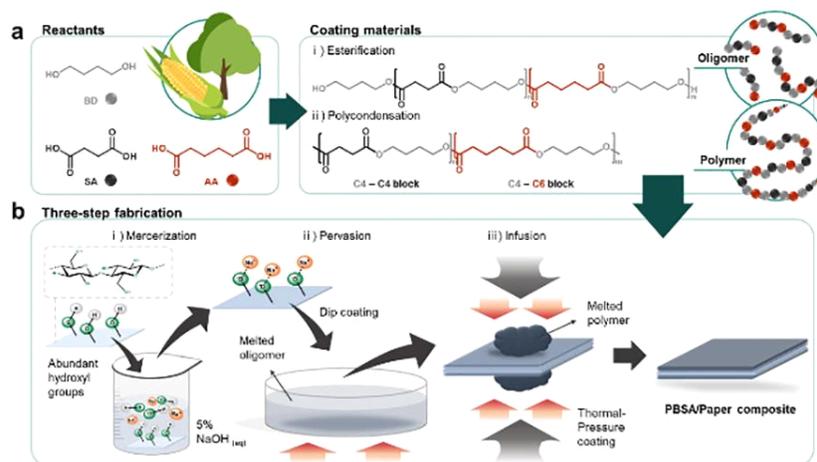


그림 3. 우수한 가스·수분 차단성과 변형 저항성을 갖는 바이오 기반 종이/플라스틱 복합소재 설계(Chem. Eng. J., 484, 149651 (2024)).

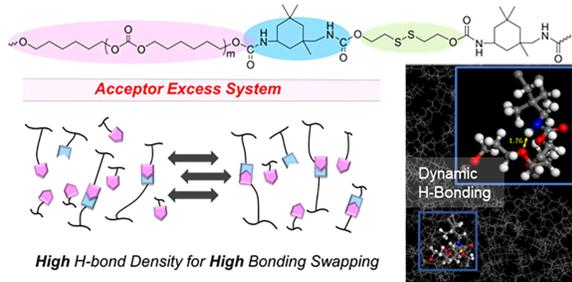


그림 4. 지방족 디설파이드 결합과 과잉 수소 결합 수용체를 활용한 자가치유 고분자 설계(*J. Mater. Chem. A*, 11, 22737 (2023)).

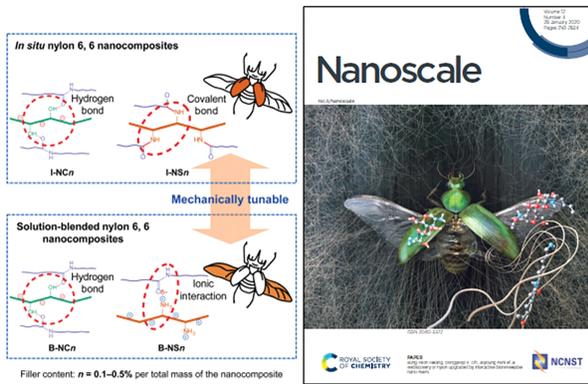


그림 5. 나일론에 바이오 기반 나노충전재를 소량 도입해 강성과 연성을 조절하는 연구(*Nanoscale*, 12, 2393 (2020)).

기반 나노소재는 무기 나노필러에 비해 환경 친화적일 뿐 아니라, 고분자와의 계면 친화도가 높아 적은 함량으로도 뛰어난 물성 개선 효과를 낼 수 있다. 예를 들어, 나일론(nylon) 수지에 셀룰로오스 나노결정이나 키토산 나노위스커를 첨가한 연구에서, 단 0.3~0.4중량%의 매우 적은 보강재 함량으로도 나일론의 기계적 물성이 크게 향상됨을 확인하였다. 구체적으로, 키토산 나노위스커를 나일론 중합 과정에 in-situ 방식으로 포함시켜 제작한 나노복합체는 순수 나일론 대비 탄성률(Young's modulus)이 약 1.9배 증가(2.6 GPa)하고 인장 강도도 1.7배 향상(106 MPa)되었으며, 용액 혼합을 통해 분산시킨 경우에는 인성(toughness)이 2.1배까지 증가하는 뛰어난 강화 효과를 나타냈다. 동일 함량에서의 보강 효과를 무기 필러와 비교하면, 이와 같은 바이오나노 필러의 기계적 성능 향상 효율은 탁월하며, 동시에 나노필러 자체가 재생가능 자원으로부터 얻어져 최종 복합재의 친환경성을 저해하지 않는다(그림 5). 이러한 연구는 플라스틱의 강도와 내구성을 개선하는 동시에 폐기 시 생분해 가능한 고성능 친환경 소재 구현의 가능성을 제시한다.

최근에는 새로운 고분자-나노소재-융합기술로써, CY-ANF(cyano-*p*-aramid nanofiber) 기반의 하이드로스폰젤(hydrospongel)을 개발한 연구도 주목받고 있다. 해당 소재는 90% 이상의 수분을 함유하면서도 최대 80 MPa의 압축

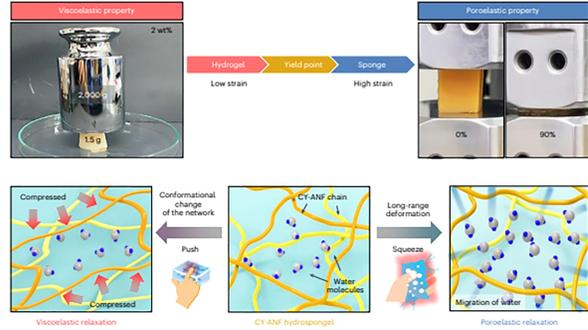


그림 6. 극성 아라미드 고분자를 나노화하여 하이드로젤과 스폰지의 물성을 동시에 구현하는 시스템 설계(*Nat. Mater.*, 23, 414 (2024)).

탄성률과 2.3 MPa의 인장 탄성률을 나타내는 초고강도 물성을 구현하였고, 동시에 비팽윤성과 반복 압축 회복성까지 갖춘 것으로 보고되었다. 특히 CY-ANF 네트워크는 강한 나노섬유 간 상호작용과 계면의 양친매성으로 인해, 매우 낮은 고형분 함량(0.05 wt%)에서도 자가 조직화 구조를 형성할 수 있으며, 이는 생체적합성까지 만족시키는 고기능 나노복합재료의 가능성을 보여준다(그림 6).

현재는 투명 필름, 기능성 코팅 등 첨단 응용으로 연구를 확장 중이며, 산업 현장 적용을 목표로 지속적인 기술 이전과 산학 협력을 진행하고 있다.

3. 연구실 비전과 향후 방향

지속가능 플라스틱 연구실(그림 7)은 고분자 화학, 재료공학, 나노기술을 융합하여 플라스틱의 전 생애주기 지속가능성 향상을 목표로 한다. 화석 기반 원료를 바이오 기반으로 전환하면서도 성능을 강화하고, 손상 시 스스로 복원되며, 최종적으로 자연에서 무해하게 분해되는 미래형 플라스틱 구현이 궁극적인 지향점이다. 이를 통해 탄소 중립과 자원 순환에 기여하고 플라스틱으로 인한 환경 오염을 근본적으로 해결하고자 한다. 앞으로도 학제간 융합 연구와 산학 협력을 강화하여 순환경제에 기여하는 소재 기술을 선도하며, 혁신적 아이디어와 첨단 기술을 통합해 지속가능한 미래 사회를 앞당기는 데 일익을 담당할 것이다.



그림 7. 지속가능 플라스틱 연구실 구성원.