

부문위원회 특별기고

플라스틱과 함께 살아가는 미래: 에코소재의 도전과 혁신

1. 서론

인류의 문명사는 소재의 발전과 궤를 같이해 왔으며, 현대 문명을 대표하는 가장 상징적인 소재는 단연 고분자라 할 수 있습니다. 화학 공정을 통해 상대적으로 저렴한 가격에 대량 생산되는 고분자는 타 소재에 비해 가벼우면서도 가공성이 뛰어나 다양한 응용 분야에서 폭넓게 소비되고 있습니다. 그러나 상업화 이래 꾸준히 증가해 온 고분자 생산량과 달리, 매립·소각에 의존해 온 폐고분자 처리 방식은 이미 한계에 도달하였습니다. 전 세계적으로 연간 4억 톤 이상의 플라스틱이 생산되고, 그 중 상당량이 자연환경과 해양으로 유입되어 생태계와 인체 건강을 위협하는 미세플라스틱 문제로 이어지고 있습니다.

이에 대응하여 유럽연합(EU)의 순환경제 실행계획, 유엔 글로벌 플라스틱 협약 등 국제 규범이 빠르게 구체화되고 있으며, 대한민국 역시 2050 탄소중립 목표 아래 플라스틱 전주기 관리 정책을 강화하고 있습니다. 우리 사회는 더 이상 '플라스틱 오염'이라는 거대한 환경적 난제를 외면할 수 없으며, 이제는 선형 소비 양식에서 벗어나 쓰임을 다한 고분자 소재를 다시 원료로 재사용하는 순환경제로 패러다임을 전환할 때입니다.

한국고분자학회 에코소재 부문위원회는 이러한 시대적 요구에 부응하여 2023년 창립된 이래, 전주기적 관점에서 고분자 소재의 친환경 기술 혁신을 주도하고자 노력해 왔습니다. 『한국고분자학회 50년사』에 부치는 본 기고문에서는 에코소재 분야의 핵심 연구 현안을 짚어보고, 학계와 산업계가 함께 나아가야 할 방향에 대한 통찰을 공유하고자 합니다.

2. 현재 핵심 연구 이슈

2.1 바이오플라스틱과 생분해성 고분자: 성능·분해성·탄소중립의 삼각 균형

바이오매스로부터 단량체를 유도하여 합성되고, 사용 후 물과 이산화탄소로 분해되도록 설계된 바이오플라스틱은 탄소 순환의 관점에서 가장 이상적인 에코소재입니다. 포도당에서 유도되는 락타이드를 중합하여 얻어지는 폴리젓산(PLA)이 대표적인 사례이며, 폴리하이드록시알카노에이트(PHA), 폴리부틸렌숙시네이트(PBS) 등도 주목받고 있습니다. 이들 소재는 화석연료 의존도를 낮추고 토양·해양 환경에서의 자연 분해를 가능하게 한다는 점에서 기대를 모으고 있습니다.

그러나 생분해성 고분자는 상반특성(trade-off properties)의 문제를 피하기 어렵습니다. 빠른 생분해성을 확보하면 기계적 강도와 내열성이 저하되고, 이를 보완하면 분해 속도가 현저히 느려지는 딜레마가 발생합니다. 따라서 분해 속도를 조절할 수 있는 분자 구조 설계, 미생물 효소의 고분자 매트릭스 내 고정화, 블렌딩·공중합·나노복합체 설계 등을 통해 이 상반관계를 극복하는 분자 수준의 전략 개발이 활발히 이루어지고 있습니다. 더욱 많은 바이오플라스틱이 실용화되기 위해서는 기존 석유계 플라스틱 대비 우월한 물성과 함께, 바람직하게는 비식용 바이오매스를 원료로 활용하는 경로 탐색도 가속화되어야 합니다.

2.2 물리적 재활용의 혁신: 혼합 폐플라스틱의 고도화

이미 막대한 양이 누적된 석유계 플라스틱을 순환경제에 참여시키기 위해서는 재활용 공정의 고도화가 필수적입니다. 기계적 재활용(mechanical recycling)은 에너지 효율이 가장 높은 방법이지만, 반복 처리에 따른 물성 저하와 혼합 폐플라스틱의 분리 한계라는 구조적 제약이 있습니다. 특히 가소제 등 첨가물이 포함되거나, 이종 소재와 접착·복합화된 경우 물리적 분리 자체가 원천적으로 불가능하여, 실제 물리적 재활용률은 전체 고분자 생산량 대비 미미한 실정입니다.

이를 극복하기 위해 서로 다른 플라스틱 사이의 혼화성을 증대시키는 상용화제(compatibilizer) 연구와 반응성 사출 공정 개발이 활발히 이루어지고 있습니다. 특히 현재 고분자 소재의 대부분을 차지하는 폴리올레핀에 극성 기능기를 도입하여

다른 고분자와의 계면 결합을 유도하는 업사이클링 연구가 큰 주목을 받고 있습니다. 또한 재활용 원료는 시간·장소에 따라 조성이 상이할 수 있으므로, 이에 대응 가능한 유연한 공정 설계와 함께, 가공 과정에서 절단된 고분자 사슬의 분자량을 복원하는 기술 개발도 병행되고 있습니다.

2.3 화학적 재활용과 해중합: 무한 순환의 열쇠

고분자를 단량체나 원료 화합물로 되돌리는 화학적 재활용(chemical recycling)–해중합(depolymerization), 열분해(pyrolysis), 용해 기반 정제–은 물리적 재활용이 겪는 원료 순도 문제를 근본적으로 해결하는 기술로 각광받고 있습니다. 회수된 순수 단량체는 목표 품질의 고분자 재합성에 활용되고, 나아가 보다 고부가가치의 소재를 합성하는 업사이클링으로 이어질 수 있습니다. 특히 PET를 비롯한 폴리에스터, 폴리우레탄 등 작용기를 포함한 고분자의 선택적 결합 절단 촉매 연구가 빠르게 발전하고 있습니다.

한편, 본래 재가공이 불가능한 열경화성 플라스틱에 동적으로 교환 가능한 공유결합을 도입함으로써 전체 분해 없이도 재생형이 가능한 공유결합 적응형 네트워크(CANs, 비트리머) 소재도 폭넓게 연구되고 있습니다. 다만, 화학적 재활용은 분해 과정에 상당한 에너지를 소요하므로, 전과정평가(LCA)를 통해 보다 친환경적인 공정 조건을 수립하는 것이 반드시 병행되어야 합니다.

3. 향후 전망 및 발전 방향

3.1 전주기 순환경제 패러다임과 LCA 기반 연구의 통합

에코소재 고분자 연구는 이제 소재 개발 단계를 넘어, 원료 조달에서 제품 설계·사용·수거·재활용 또는 분해에 이르는 전 과정을 하나의 폐쇄 루프(closed-loop)로 설계하는 전주기적 순환경제 관점에서 재정립되어야 합니다. 고분자는 종류·제조 방법·쓰임새가 무척 다양하여 단일 기술만으로 순환경제를 구축하는 것은 사실상 불가능한 만큼, 합성·공정·바이오·데이터 과학 등 다양한 기술적 접근을 융합하는 총합적 시도가 필수적입니다.

이를 위해 전과정평가를 연구 초기 단계부터 통합하고, '재활용 용이성 지수'와 같은 표준화된 평가 지표 개발이 시급합니다. 고분자 합성 단계에서 에너지 소모를 낮추어 탄소 배출량을 저감하거나, 용매 사용을 최소화하는 친환경 공정 개발 등 다양한 측면에서의 기술 혁신이 탄소중립 달성 시나리오의 과학적 동력을 제공할 것입니다.

3.2 글로벌 규제 강화와 산업 기회의 선점

유럽의 지속가능제품 규정(ESPR), 포장재 규정(PPWR), 그리고 유엔 글로벌 플라스틱 협약은 에코소재 분야에 전례 없는 시장 수요를 창출하고 있습니다. 이는 단순한 규제 부담이 아니라, 기술 선도 연구 그룹과 기업에게는 거대한 기회의 창입니다. 국내 고분자 연구자들이 이 기회를 선점하기 위해서는 소재 개발과 함께 국제 표준화 활동 참여, 특허 포트폴리오 구축, 그리고 생분해 인증 체계 정비가 병행되어야 합니다.

고분자 소재가 올바르게 순환되기 위해서는 생산자·소비자·정부 등 각 주체가 순환 과정에 적극적으로 참여할 수 있도록 사회적 합의를 이루는 것이 선행되어야 합니다. 에코소재 부문위원회는 학계·산업계·정부를 아우르는 협력 플랫폼으로서 실효성 있는 플라스틱 순환 정책 수립과 예측 가능한 투자 환경 조성을 위해 적극적으로 의견을 제시할 것입니다.

3.3 초학제 융합 연구와 디지털 기술의 접목

에코소재 연구의 미래는 고분자화학 단독이 아닌, 합성생물학·촉매공학·데이터과학과의 깊은 융합에서 열립니다. 인공지능·기계학습을 활용한 분자 설계 및 물성 예측, 다중스케일 분자 시뮬레이션 기반의 생분해 메커니즘 규명, 디지털 트윈 기반의 재활용 공정 최적화, 그리고 자율주행 실험실(self-driving laboratory) 기반의 고속 소재 탐색은 연구의 속도와 정확성을 획기적으로 높일 것으로 기대됩니다. 이러한 개념들을 소재 설계·합성·가공의 전 과정에 적극 도입함으로써 사회적 난제를 시의적절하게 해결하는 데 앞장서고자 합니다.

또한 신진 연구자들이 이 융합 역량을 갖추 수 있도록, 부문위원회가 주관하는 신진연구자 웨비나·동계·하계 심포지엄 프로그램을 통해 교육·훈련의 기반을 지속적으로 확충해 나가는 것이 중요합니다. 서로 다른 전공의 연구자들이 '에코소재'라는 공통의 키워드 아래 자유롭게 토론하고 공동 연구의 청사진을 그려내는 초융합 연구 생태계 구축이 부문위원회의 핵심 사명입니다.

4. 결론

과거 고분자 소재를 평가하는 주된 잣대가 성능과 가격이었다면, 미래의 고분자 소재는 성능과 가격을 유지하면서도 환경 부하를 최소화하는 '지속가능성'을 함께 공존시켜야 하는 시험대 위에 서 있습니다. 이는 고분자 연구자들에게는 전례 없이 광범위하고 복잡한 도전이지만, 동시에 새로운 패러다임을 주도할 수 있는 역사적 기회이기도 합니다.

한국고분자학회 에코소재 부문위원회는 창립 이래 불과 3년여의 짧은 역사에도 불구하고, 동계·하계 심포지엄, 신진연구자 웨비나, 국제 연사 초청 등 활발한 학술 활동을 통해 국내 친환경 고분자 연구의 담론을 이끄는 중심 플랫폼으로 성장하였습니다. 기후위기와 자원 고갈이라는 이중의 도전 앞에서 에코소재 고분자 연구는 선택이 아닌 필수가 되었습니다.

한국고분자학회 창립 50주년이라는 역사적 이정표 위에서, 에코소재 부문위원회는 시대적 사명감을 가지고 지속가능한 미래에 한 발짝 더 가까워질 수 있도록 진력할 것입니다. 연구자들의 창의와 열정이 모이는 혁신의 거점으로서, 대한민국 지속가능 소재 산업의 미래를 학계·산업계·정부와 함께 열어가겠습니다.

한국고분자학회 에코소재 부문위원회 제4대 위원장
이종휘(중앙대학교)