

부문위원회 특별기고

탄소중립 시대, 고분자가 여는 에너지 기술의 다음 50년 — 학술대회 부문위 세션 발표를 토대로 —

1. 서론

한국고분자학회가 반세기의 여정을 돌아보는 이 자리에서, 에너지 부문위원회는 학회 내에서 비교적 늦게 출발한 부문위원회임에도 매우 활발한 활동을 이어가는 곳으로 자리매김하고 있다. 탄소중립과 에너지 안보라는 시대적 과제가 부각되면서, 부문위가 다루는 주제 자체가 우리 사회와 산업계의 가장 시급한 질문들과 직결되어 있기 때문이다. 2026년 동계 심포지엄에 130여 명, 신진연구자 웨비나에 140여 명이 참여한 사실은 학계와 산업계가 이 분야에 보내는 관심의 폭과 깊이를 잘 보여준다.

이차전지의 바인더와 분리막, 전고체전지의 고체전해질, 연료전지의 전해질막, 수전해 셀의 이온교환막, 그리고 이산화탄소 전환용 이오노머에 이르기까지, 에너지 디바이스의 성능과 수명은 결국 고분자 소재의 분자 설계와 거시 구조에 크게 영향을 받는다. 본 기고문에서는 2024년 추계부터 2026년 춘계까지 최근 네 차례 학술대회의 부문위원회 세션 발표를 토대로, 에너지용 고분자 연구의 현재 흐름과 향후 전망을 조망해 보고자 한다.

2. 현재 핵심 연구 이슈

2.1 차세대 이차전지를 위한 고분자 아키텍처

리튬이온전지가 성숙 단계에 접어든 오늘날, 연구의 초점은 전고체전지와 리튬금속전지로, 그리고 포타슘·아연·나트륨 등 새로운 화학종으로 빠르게 확장되고 있다. 이러한 전환의 가장 깊은 자리에는 늘 고분자 소재가 있다.

차세대 전지의 핵심은 고분자 고체전해질의 재설계이다. 오랫동안 표준이 되어 온 PEO 일변도를 벗어나, 새로운 주쇄 구조와 측쇄 화학을 갖춘 전해질이 활발히 보고되고 있다. 결정상과 비정질상의 비율, 자유 부피, 사슬-이온 상호작용을 정밀하게 제어함으로써, 고분자 전해질은 단순한 이온 수송체에서 전기화학적 환경을 능동적으로 조율하는 기능성 소재로 재정의되고 있다. 농축 고분자 전해질이 만들어내는 나노스케일 이온 네트워크나 강유전성 고분자 매트릭스는, 사슬의 미세 거동이 셀의 거시 성능을 결정짓는다는 점을 잘 보여준다.

분리막과 바인더 분야에서도 고분자 설계의 정교화가 두드러진다. 자기조립 기반의 나노섬유 분리막은 리튬금속전지의 덴드라이트 억제에 기여하고, 폴리이미드 기반 분리막은 고온 안정성과 기계적 강도를 동시에 확보한다. 전도성 고분자 바인더는 활물질의 전자 전달까지 통합적으로 관리하는 능동 소재로 진화하고 있으며, 비불소계 수계 바인더 개발은 환경 부담을 줄이는 동시에 후막 전극 구현을 가능하게 하는 핵심 기술로 자리 잡고 있다.

리튬계의 외연 또한 빠르게 넓어지고 있어, 포타슘 이온 저장용 하드카본 음극, 고용량 실리콘 음극, n-형 공액 고분자 양극을 활용한 새로운 셀 화학이 함께 보고되었다. 동시에 양극재의 응력·균열 거동, 셀 내 화학종 간 교차 영향과 열폭주, 전극 용출을 억제하는 전해액 설계 등 디바이스·셀 수준의 통합 연구도 깊이를 더하고 있다. 이는 차세대 전지가 마주한 본질적 난제가 더 이상 이온전도도 수치 그 자체가 아니라, 반복되는 충방전과 부피 변화, 계면 열화 속에서 고분자 소재가 얼마나 오래 버티는가의 문제로 이동했음을 보여준다.

한편 최근 세션에서는 사용 후 전극의 재생, 유기 소재 기반의 지속가능 전지 설계, 비불소계 바인더와 같은 순환성·환경성 관점의 연구도 함께 다루어졌다. 이는 차세대 전지 연구의 평가 기준이 성능뿐 아니라 제조 공정과 수명 종료 이후의 처리 가능성까지 확장되고 있음을 시사한다.

2.2 수소 에너지를 위한 이온전도성 고분자

수소연료전지와 수전해는 이미 실증을 넘어 본격적인 상용화 문턱에 와 있으며, 그 성패는 전해질막과 막-전극 접합체(MEA)의 고분자 소재에 달려 있다. 이 분야 연구의 흐름은 분명한 방향성을 갖는다. 불소계 전해질막에 대한 의존을 줄이려는 술폰화 폴리아릴렌계 탄화수소 전해질막의 분자 설계가 정교해지고 있으며, 음이온교환막(AEM)에서는 4가 암모늄, 이미다졸륨, 피페리디늄과 같은 양이온 작용기의 알칼리 안정성 확보가 중심 과제로 부상했다. 이와 함께 측쇄와 주쇄 구조를 조절하여 막 내부의 미세상 분리와 이온 채널 형성을 정밀하게 설계하려는 시도가 활발하다. 최근 발표들은 연구의 초점이 단순한 이온 전도도 향상을 넘어, 실제 운전 조건에서의 계면 안정성, 이오노머 산화 내구성, 나아가 이오노머 없이 순수한 물만 공급하는 운전 방식까지 포함하는 시스템 관점의 고분자 설계로 옮겨가고 있음을 보여준다.

이러한 분자 설계의 정교화는 다양한 응용에서 그 효과를 드러내고 있다. 알칼라인 수전해용 분리막에서는 전도도와 기계적 강도 사이의 오랜 상충 관계를 고분자 구조 설계로 풀어내려는 시도가 활발하며, 졸-겔 전이를 활용한 새로운 막 조립 방식, PEM 수전해 양극의 이오노머-촉매 계면 전자전달 문제, 그리고 직접 암모니아 연료전지로의 응용 확장도 함께 보고되고 있다. 산업계 역시 탄화수소계 MEA를 통한 저가·고내구 PEM 연료전지 상용화에 박차를 가하고 있어, 학계와 산업계의 연결 고리가 어느 분야보다 탄탄한 영역이라 할 수 있다.

2.3 전기화학적 전환을 위한 고분자

전기화학을 활용한 화학종 전환, 그 가운데서도 특히 이산화탄소 전환은 에너지 부문위원회의 새로운 성장 영역으로 빠르게 부상하고 있다. 이 분야에서 고분자가 기여하는 지점은 분명하다. 가장 핵심에는 이오노머가 만들어내는 촉매 미세환경의 엔지니어링이 자리한다. 촉매 표면 인접부의 이온 농도, 친수와 소수 영역의 균형, 가스·물·이온의 확산 경로는 모두 이오노머의 화학적 구조와 측쇄 분포에 의해 결정되며, 이는 곧 반응 선택성과 패러데이 효율의 결정 변수가 된다. 더 나아가 이산화탄소 전해 셀의 고알칼리·고전류 환경에 특화된 새로운 주쇄와 작용기 설계, 그리고 단원자 촉매와 이오노머가 결합한 복합체에서 운전 중 활성점이 동적으로 재구성되는 현상은, 고분자가 더 이상 보조 소재가 아니라 반응 활성을 능동적으로 조율하는 주체임을 보여준다. 이러한 전기화학적 전환은 향후 수년 내에 성장 가능성이 큰 영역 중 하나가 될 것으로 전망된다.

2.4 첨단 분석과 데이터·계산과학의 융합

에너지용 고분자 연구의 또 하나의 핵심 축은 첨단 분석과 데이터·계산과학의 융합이다. 운전 중(in-situ/operando) 셀 거동을 실시간으로 관찰하는 분석 기법 — 투과전자현미경(TEM), 싱크로트론 X-선 회절, 다양한 분광 기법 — 은 고분자 사슬의 변형, 결정상의 변화, 이온 채널의 동적 형성을 직접 들여다볼 수 있게 해 주고 있다. 계산 측면에서도 분자동역학(MD)과 밀도범함수이론(DFT)에 기반한 멀티스케일 시뮬레이션이 이온교환막의 수화 구조와 이온 채널, 촉매-이오노머 계면의 반응 경로, 결정상-비정질상이 전기 거동에 미치는 영향을 정량적으로 밝혀내고 있다. 셀 단위 거동을 가상으로 구현하는 디지털 트윈, 그리고 기계학습 기반 원자 간 포텐셜을 활용한 소재 탐색까지 보고되며, 데이터·계산과학과의 융합은 에너지용 고분자 연구의 속도와 방향을 변화시키고 있다.

3. 향후 전망 및 발전 방향

위의 네 가지 흐름을 종합해 보면, 에너지용 고분자 연구의 패러다임은 분명한 방향으로 이동하고 있다. 지금까지의 연구가 물질 수치의 개선을 향해 달려왔다면, 앞으로는 실제 디바이스 안에서 구현되는 성능과 내구성, 그리고 운전 조건에서의 동적 거동, 나아가 순환성·환경성의 관점까지 포괄하는 통합적 설계가 승부처가 될 것이다.

산업계와의 거리 또한 빠르게 좁혀지고 있다. 최근 네 차례의 학술대회에는 국내 기업의 연사들이 직접 참여하여 상용화 단계의 R&D 현황을 공유하였다. 이는 우리 분야가 기초연구와 상용화를 잇는 가교 역할을 실제로 수행하고 있음을 보여주며, 에너지 부문위원회는 이러한 산학 교류가 가장 자연스럽게 이루어지는 플랫폼으로 기능하고 있다.

4. 결론

한국고분자학회 50주년을 맞이하는 이 시점에, 이차전지·수소·전기화학적 전환은 다음 50년 인류가 탄소중립을 향해 나아가는 여정에서 핵심이 될 주제들이다. 에너지 부문위원회는 이 주제들을 떠받치는 핵심 고분자 소재의 학술 공동체로 자리매김해 갈 것이다.

한국고분자학회 2026년도 에너지 부문위원회 위원장
문준혁(고려대학교)