

부문위원회 특별기고

탄소중립 시대의 탄소융복합 연구: 현주소와 국가 전략 방향

1. 서론

올해로 창립 50주년을 맞이한 한국고분자학회는 지난 반세기 동안 국내 고분자 과학과 소재 산업의 발전에 중추적인 역할을 수행해 왔다. 그러나 현재 전 세계 산업 생태계는 기후변화 대응, 자원 고갈, 공급망 재편이라는 구조적 전환기에 놓여 있다. 플라스틱과 탄소섬유로 대표되는 기존 소재는 현대 산업의 핵심 기반이지만, 제조 과정에서의 환경 부담과 폐기 이후 재활용의 한계라는 과제를 동시에 안고 있다. 미래 산업이 에너지 효율, 고성능, 자원 순환성을 함께 요구하는 만큼, 기존 소재의 물리적 한계를 보완하면서도 순환경제에 부합하는 차세대 소재 기술의 확보는 국가 경쟁력과 직결되는 사안이 되었다.

이러한 흐름 속에서 탄소융복합 연구는 중요한 기술적 대안으로 부상하고 있다. 여기서 탄소융복합 연구는 탄소섬유와 탄소계 나노소재, 고분자 매트릭스, 성형 및 가공, 신뢰성 평가, 재활용 기술을 포괄하는 차세대 복합소재 연구 전반을 의미한다. 서로 다른 물질의 특성을 정밀하게 조합함으로써 단일 소재로는 구현하기 어려운 기계적, 열적, 전기적 특성을 부여할 수 있다는 점에서, 탄소융복합 기술은 탄소중립 시대 구조소재 혁신의 핵심 축으로 평가된다.

현재 탄소 기반 첨단 복합소재 기술은 미국, 유럽, 일본 등이 선도하고 있으며, 상당수의 원천기술은 항공·우주, 국방, 에너지 산업과 연계된 전략 자산으로 관리되고 있다. 국내 복합소재 연구 역시 초기에는 선진 기술의 도입과 내재화에 역량이 집중되었으나, 지난 10여 년 동안 국방, 항공·우주, 자동차, 에너지 등 다양한 분야에서 소재 개발부터 공정, 부품 응용에 이르는 연구 기반을 꾸준히 축적해 왔다. 이제는 개별 기술의 축적을 넘어, 학계의 기초 연구, 산업계의 양산 기술, 정부의 제도와 정책을 유기적으로 연결할 수 있는 협력 체계가 요구된다. 이러한 배경에서 탄소융복합 부문위원회의 출범은 관련 분야의 학술적·산업적 수요에 대응하기 위한 제도적 진전으로 이해될 수 있다.

2. 현재 핵심 연구 이슈

최근 탄소융복합 분야의 연구는 단순한 경량화 소재 개발을 넘어, 성능과 신뢰성, 생산성, 환경성을 동시에 고려하는 방향으로 확대되고 있다. 특히 탄소 보강재와 고분자 매트릭스 사이의 계면 정합 설계는 복합소재의 기계적 물성, 피로 수명, 내환경성을 좌우하는 핵심 요소이다. 계면에서의 응력 전달 효율을 높이고 결함 발생을 최소화하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근에는 이를 데이터 기반으로 해석하고 예측하려는 접근도 확대되고 있다.

이 과정에서 인공지능(AI)과 머신러닝은 조성 설계와 공정 최적화를 지원하는 도구로 주목받고 있다. 예를 들어, 보강재 표면 개질 조건, 수지 조성, 성형 온도와 압력, 경화 시간 등의 변수를 학습하여 최적 조합을 탐색하거나, 성형 과정에서 발생할 수 있는 공극, 박리, 잔류응력과 같은 결함의 가능성을 예측하는 연구가 점차 증가하고 있다. 디지털 트윈 기술 역시 실제 제조 공정을 가상 환경에서 재현하고 예측함으로써 시행착오를 줄이고 품질 편차를 낮추는 방향으로 활용 범위를 넓혀가고 있다. 이러한 데이터 기반 접근은 향후 탄소융복합 연구와 제조의 중요한 방법론으로 자리 잡을 가능성이 높다.

한편, 구조 재료의 실제 적용 환경을 고려하면 난연성, 내환경성, 충격 저항성, 피로 수명에 대한 정밀한 평가가 필수적이다. 이에 따라 비파괴평가(NDE) 기술의 고도화와 함께 구조건전성모니터링(SHM) 연구도 빠르게 진전되고 있다. 최근에는 센서 데이터와 AI 기반 해석을 결합하여 구조물의 손상 위치와 진행 정도, 잔여 수명까지 예측하려는 시도가 이어지고 있으며, 이는 복합소재 구조물의 안전성 확보와 유지관리 비용 절감 측면에서 중요한 의미를 갖는다.

복합소재의 지속가능성을 높이기 위한 고분자 매트릭스 연구 역시 중요성이 커지고 있다. 기존 열경화성 수지는 우수한 기계적 성능을 제공하지만 재가공과 재활용이 어렵다는 한계를 지닌다. 이를 보완하기 위해 열가소성 수지와 동적 공유결합을

기반으로 재처리성을 부여한 비트리머(vitrimer)와 같은 새로운 매트릭스 시스템이 주목받고 있다. 이러한 고분자 설계는 탄소섬유의 회수와 재제조, 재생형 공정과도 직접 연결되며, 향후 순환형 복합소재 기술의 핵심 기반이 될 가능성이 크다.

3. 향후 전망 및 발전 방향

이러한 기술적 요구는 산업 수요와 맞물릴 때 더욱 분명해진다. 대표적인 예가 도심항공교통(UAM)과 미래항공교통(AAM)으로 상징되는 차세대 항공 모빌리티 분야이다. 이들 시스템은 배터리 효율 극대화를 위한 극한의 경량화와 함께, 수직 이착륙 및 반복 운용 과정에서 발생하는 하중을 견딜 수 있는 높은 강성과 내구성을 동시에 요구한다. 또한 향후 대량 생산이 전제되는 산업 구조를 고려하면, 짧은 성형 시간과 높은 생산성을 확보할 수 있는 아웃 오브 오토클레이브 공정이나 열가소성 탄소복합소재의 적용이 중요해질 수밖에 없다. 결국 UAM·AAM의 상용화와 인증 경쟁력은 복합소재의 신뢰성과 공정 재현성에 크게 좌우되며, 이는 고분자 기반 탄소융복합 기술 발전의 강한 수요 기반으로 작용하고 있다.

국제 환경 규제의 강화 역시 탄소융복합 연구의 방향을 재편하고 있다. 유럽연합(EU)을 중심으로 탄소국경조정제도(CBAM), 공급망 차원의 탄소배출 관리, 재활용 소재 사용 확대 정책 등이 본격화되면서, 소재의 성능뿐 아니라 생산, 사용, 폐기 전 과정에서의 환경 영향까지 함께 검토해야 하는 시대가 되었다. 복합소재는 경량화를 통해 운용 단계에서 탄소 저감 효과를 제공할 수 있으나, 제조와 재활용 단계의 환경성 데이터가 충분히 축적되지 않으면 국제 시장에서 객관적 경쟁력을 입증하기 어렵다.

따라서 제조부터 폐기까지의 전주기 환경영향평가(LCA)와 탄소발자국 산정 체계를 구축하는 일은 더 이상 부수적인 과제가 아니다. 특히 탄소섬유 생산과 복합소재 가공이 글로벌 공급망 안에서 이루어지는 현실을 고려하면, 객관적 데이터베이스와 평가 기준의 확보는 기술 개발만큼 중요하다. 원천기술과 함께 환경성 검증 체계를 선제적으로 마련하지 못할 경우, 국내 산업은 향후 글로벌 공급망과 인증 체계에서 불리한 위치에 놓일 가능성이 있다.

이러한 산업 및 기술 환경 속에서 탄소융복합 부문위원회는 학술과 산업을 연결하는 실질적 플랫폼의 역할을 수행할 필요가 있다. 위원회는 AI 기반 소재 설계, 탄소 보강재와 고분자 매트릭스 융합, 성형 및 가공, 수명 예측, 비파괴평가, 재활용 및 LCA를 포괄하는 중장기 기술 로드맵을 수립하고, 학·연·산·시험인증 기관을 연계하는 협력 허브로 기능해야 한다. 이를 통해 개별 연구 성과를 공동 연구 기획, 실증 사업, 표준화 활동으로 확장하는 기반을 마련할 수 있다.

특히 기계학습 활용의 전제가 되는 물질 데이터베이스와 재료카드의 표준화, 수명평가 및 비파괴검사 프로토콜 정립, 탄소발자국 산정 가이드라인 마련은 우선적으로 다뤄야 할 실질 과제이다. 나아가 국제 표준화 네트워크와의 연계를 통해 국내 기업의 UAM·AAM, 우주항공, 에너지, 첨단 모빌리티 분야 진출을 지원하고, 글로벌 인증 장벽에 대한 대응 역량을 높이는 역할도 중요하다. 또한 공정 장비 운용, 데이터 해석, 시험평가에 대한 실무형 교육 프로그램을 통해 산업 현장의 수요에 부합하는 전문 인력을 양성하고, 재활용 소재 활용 확대와 공공조달 연계 등 생태계 확산을 위한 정책 제언도 병행할 필요가 있다.

4. 결론

한국고분자학회의 지난 50년이 기초 소재의 축적과 국산화의 시간이었다면, 앞으로의 50년은 고분자 매트릭스, 탄소 보강재, 데이터 기반 공정, 신뢰성 평가, 순환경제를 통합하는 질적 도약의 시간이 되어야 한다. 탄소융복합 연구는 더 이상 특정 산업의 보조 기술에 머무르지 않으며, 탄소중립과 미래 전략산업 경쟁력을 동시에 좌우하는 핵심 분야로 자리하고 있다. 새롭게 출범한 탄소융복합 부문위원회가 산학연의 전문성과 데이터를 연결하고, 기술과 정책, 표준과 산업을 잇는 중심축으로 기능한다면, 대한민국은 UAM, 우주항공, 첨단 모빌리티를 비롯한 미래 산업에서 복합소재 경쟁력을 한층 강화할 수 있을 것이다. 그런 점에서 본 위원회의 출범은 탄소중립 시대의 첨단 복합소재 전략을 구체화하는 중요한 출발점이 될 것이다.

한국고분자학회 탄소융복합 부문위원회 위원장
박종수(한국탄소나노산업협회)