

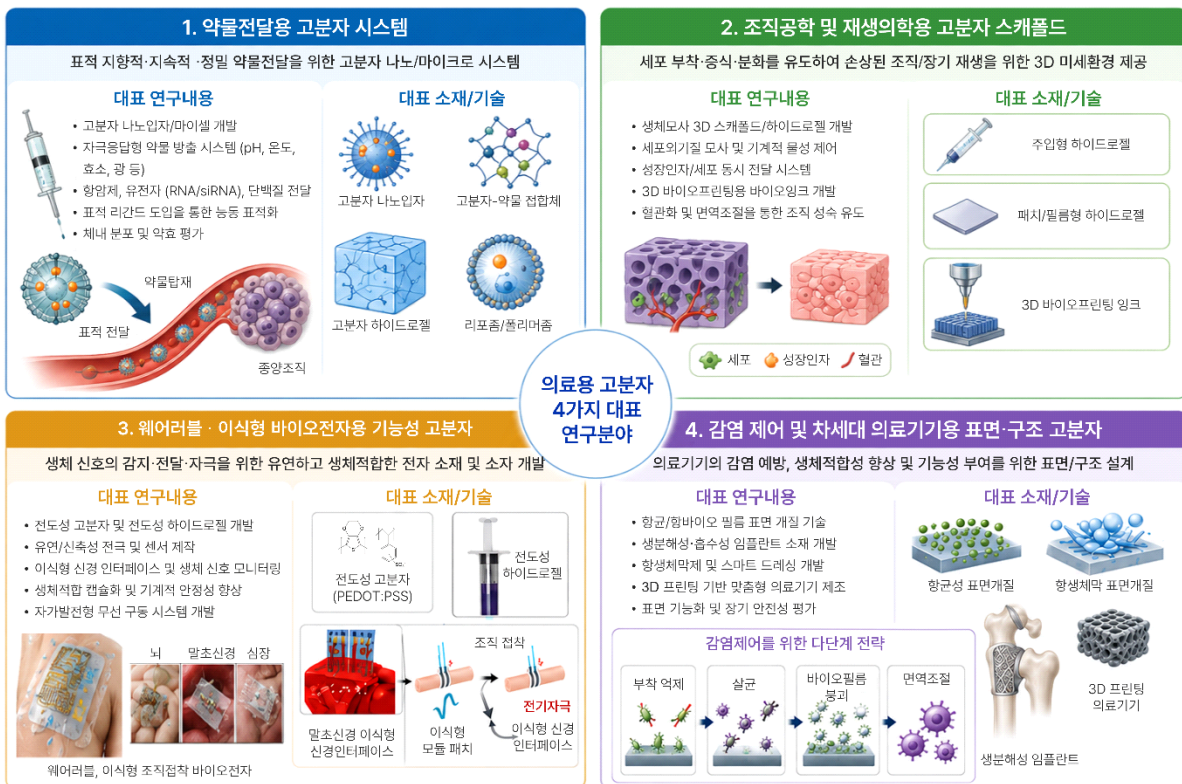
부문위원회 특별기고

의료용 고분자 연구의 주요 분야와 미래 발전 방향

1. 서론

의료용 고분자는 현대 의공학과 바이오소재 연구에서 가장 역동적으로 성장하고 있는 분야 중 하나이다. 과거에는 단순히 생체적합성을 갖춘 보형재, 봉합사, 필름, 카테터 재료 등으로 주로 사용되었으나, 최근에는 약물전달, 재생의학, 바이오 전자소재, 감염 제어, 맞춤형 의료기기 등으로 급속히 확대되고 있다. 특히 고분자는 분자 설계의 자유도가 높고, 기계적 물성, 분해성, 표면 특성, 자극 응답성을 정밀하게 조절할 수 있는 장점이 있어, 금속이나 세라믹이 구현하기 어려운 생체와의 동적 상호작용을 설계할 수 있다.

최근의 연구 흐름을 살펴보면, 의료용 고분자 분야는 단순 재료 개발을 넘어 임상 적용성, 제조 공정 확장성, 규제 적합성, 그리고 디지털 및 AI 융합이라는 새로운 방향으로 재편되고 있다. 이러한 관점에서 현재 의료용 고분자 연구는 크게 네 가지 분야로 정리할 수 있다. 첫째, 약물전달용 고분자 시스템, 둘째, 조직 공학 및 재생 의학용 고분자 스캐폴드, 셋째, 웨어러블 및 이식형 바이오 전자용 기능성 고분자, 넷째, 감염 제어 및 차세대 의료기기용 표면 및 구조 고분자이다. 이 네 분야는 서로 독립적으로 발전하기보다는 상호 융합되는 경향이 강하며, 앞으로의 발전 또한 다기능화와 통합 플랫폼 구축 방향으로 진행될 것으로 예상된다. 본 기고문에서는 각 분야에 대한 주요 연구를 살펴보고, 미래 발전 방향을 제시하고자 한다.



2. 현재 핵심 연구 이슈 & 향후 전망 및 발전 방향

2.1 약물전달용 고분자 시스템

약물전달시스템(drug delivery system, DDS)은 약물의 체내 분포와 방출을 정밀하게 조절하여 치료 효율을 극대화하고 부작용을 최소화하기 위한 핵심 기술이다. 의료용 고분자는 약물의 안정성, 체내 순환 시간, 표적 전달 및 방출 속도를 조절할 수 있어 현대 바이오의약품 개발에서 중요한 역할을 하고 있다. 대표적인 소재로는 폴리에틸렌글리콜(PEG), 폴리락트산(PLA), PLGA, 폴리카프로락톤(PCL), 키토산 및 히알루론산 등이 있으며, 이들 중 다수는 이미 FDA 및 식약처 승인을 받아 상용화되어 의료용 고분자로 사용되고 있다.

최근에는 특정 병변 환경에서만 약물을 선택적으로 방출하는 자극응답성(stimuli-responsive) 고분자 시스템이 활발히 연구되고 있다. pH, 온도, 빛, 효소 및 자기장 등에 반응하는 스마트 고분자는 종양 미세환경이나 염증 부위와 같은 특정 병리 환경에서만 선택적으로 활성화되는 전달 시스템 구현을 가능케 한다. 이러한 고분자는 나노입자, 고분자 마이셀, 하이드로젤, 덴드리머, 폴리머즈, 마이크로입자 등 다양한 형태로 제형화되어 경구, 주사, 흡입, 경피, 점막 등 거의 모든 투여 경로에 적용되고 있다. 특히 PEG화(PEGylation) 기술은 단백질 의약품의 혈중 반감기를 획기적으로 연장시켰으며, 항체-약물 접합체(Antibody-Drug Conjugate, ADC)의 링커, mRNA 백신의 지질나노입자(LNP) 보조 고분자 등으로 확장되어 현대 바이오의약품 산업의 기반을 형성하고 있다는 점에서 그 중요성은 점점 더 커지고 있다.

약물전달용 고분자 분야는 향후 다음과 같은 방향으로 빠르게 발전할 것으로 전망된다. 먼저, 인공지능(AI) 및 머신러닝 기반의 고분자 설계가 본격화될 것이다. 수십만 종에 달하는 후보 단량체 조합과 구조 변수를 실험적으로 모두 탐색하는 것은 사실상 불가능하므로, 고분자 정보학(polymer informatics) 및 고처리량 스크리닝과 결합된 AI 모델이 최적의 약물전달용 고분자 구조를 예측 및 설계하는 시대가 도래할 것이다. 둘째, 정밀의료 및 환자 맞춤형 제형화가 가속화될 것이다. 환자의 단백유전체(Proteogenomic) 및 미생물 군집(microbiome) 정보에 기반하여 약물 종류와 방출 프로파일을 맞춤형한 개인화 제형이 3D 프린팅, 미세유체(microfluidics) 기반 제조 기술과 결합하여 점진적으로 실용화될 전망이다. 셋째, 진단과 치료를 동시에 수행하는 테라노스틱스(theranostics) 플랫폼이 확산될 것이다. 형광·MRI·CT 조영물질과 약물을 동시에 탑재한 다기능 고분자 나노시스템은 종양학, 신경학, 심혈관 영역에서 진단과 치료의 경계를 허무는 새로운 패러다임을 제시할 것이다. 넷째, 디지털 헬스케어와의 융합이 본격화될 것이다. 폐쇄루프(closed-loop) 인슐린 펌프, 무선 통신 기반 약물 방출 임플란트, 웨어러블 마이크로니들 패치 등 능동형 전자-고분자 융합 디바이스가 만성질환 관리의 새로운 모델로 등장할 것이며, 이는 고분자 과학과 타 학문 분야의 본격적 융합을 요구한다. 다섯째, 지속가능한 친환경 의료용 고분자 개발이 중요한 화두로 부상할 것이다. 바이오 기반 단량체, 효소 분해형 고분자, 의약 폐기물 저감 제형 등 환경 친화적 의료 고분자 설계가 산업적 표준으로 자리 잡을 것으로 예상된다.

약물전달용 고분자시스템은 단순한 의약품 보조 재료에서 출발하여 이제는 치료 효과를 본질적으로 결정짓는 정밀 제어 플랫폼으로 진화하였다. mRNA 백신, 항체-약물 접합체, 장기 지속형 주사제 등 최근의 혁신적 의약품은 모두 고분자 과학의 발전 위에 서있다. 앞으로 인공지능, 정밀의료, 디지털 헬스케어와의 융합을 통해 더욱 폭발적으로 성장할 것이며, 우리나라가 이 흐름에서 선도적 역할을 수행하기 위해서는 융합연구 생태계, 임상 전환 역량, 규제 과학, 인력 양성의 균형 있는 발전이 동시에 추구되어야 할 것이다.

2.2 조직공학 및 재생의학용 고분자 스캐폴드

두 번째 핵심 분야는 손상된 장기의 재생을 유도하는 조직공학 및 재생의학이다. 고분자 스캐폴드는 세포가 부착하고 증식하며 분화할 수 있는 3차원 미세환경을 제공하는 핵심 플랫폼으로 사용된다. 천연고분자 기반 하이드로젤, 합성 생분해성 고분자 다공성 스캐폴드, 그리고 3D 바이오 프린팅용 바이오 잉크가 대표적이다. 최근에는 단순히 세포를 담는 지지체가 아니라, 조직재생에 관여하는 다양한 세포들의 기능을 능동적으로 조절하는 재생환경 응답형 스캐폴드 개념이 강조되고 있다. 현재 이 분야의 중요한 이슈는 생체모사성 및 기능적 성숙도 향상이다. 실험실에서 만든 스캐폴드는 세포생존율이나 초기 분화는 우수할 수 있지만, 실제 조직과 유사한 혈관화, 신경화, 면역조절, 장기적 기계적 안정성을 동시에 구현하는 경우는 아직 제한적이다. 특히 3D 바이오프린팅은 공간적으로 정교한 조직 제작을 가능하게 하지만, 프린팅 가능성(printability), 세포친화성, 기계적 강도, 장기 배양 안정성을 동시에 만족시키는 바이오잉크 개발이 여전히 어려운 과제로 남아 있다.

또 하나의 큰 이슈는 AI와 제조기술의 결합을 통한 스캐폴드의 정밀기능화이다. 최근 많은 논문들이 AI가 바이오 프린팅 공정 최적화, 노즐 조건 예측, 잉크 조성 설계, 프린팅 후 조직 형상 유지 예측에 중요한 역할을 하기 시작했음을 보여준다.

이는 재생의학용 고분자 연구가 더 이상 재료과학만의 문제가 아니라, 데이터과학과 공정공학이 결합된 분야로 이동하고 있음을 의미하며 멀티스케일 컴퓨터 시뮬레이션으로 세포-소재 상호작용을 예측하거나 AI 최적화로 설계 속도 향상과 임상 실패 최소화를 유도할 것으로 기대된다.

향후 의료용 고분자 스캐폴드는 환자 맞춤형 재생치료의 확대와 함께 중요성이 더욱 커질 것이다. 골, 연골, 피부, 혈관, 신경, 장기유사체(organoid) 분야에서 고분자 스캐폴드는 핵심 플랫폼으로 자리 잡을 가능성이 높다. 특히 주사형 하이드로젤, 체내 가교형 스캐폴드, 세포 및 성장인자 동시 전달 플랫폼, 4D 프린팅 기반 동적 스캐폴드는 차세대 재생의학의 중심 기술이 될 수 있다. 또한 천연고분자와 합성고분자의 장점을 결합한 하이브리드 스캐폴드는 생체모사성과 물성 안정성을 동시에 확보할 수 있어 앞으로 더욱 중요해질 전망이다.

2.3 웨어러블·이식형 바이오전자 시스템용 기능성 고분자

세 번째 분야는 최근 매우 빠르게 부상하는 바이오전자용 기능성 고분자이다. 웨어러블 및 체내이식형 센서들은 인체의 움직임이나 조직의 전기생리학적 신호를 측정, 치료용 전기자극을 가하기 위한 용도로 개발되고 있는데, 특히 타겟이 되는 조직에서의 급성/만성 염증 및 물리적 손상을 최소화하기 위한 형태로 다양한 고분자 소재가 응용된다.

신경전극, 인공피부를 포함하는 체내외 모니터링을 위한 바이오전자시스템은 연성 전극과 이를 지지하는 기질로 구성되며, 이에 사용되는 고분자 소재들은 전기적 특성, 인체 조직과 유사한 기계적 물성, 그리고 생체적합성을 반드시 필요로 한다. 기존 금속 기반 재료는 높은 기계적 강도와 낮은 체내 안정성으로 인해 장기간 사용 시, 지속적인 인체 조직과의 마찰에 의한 염증 및 손상을 유발할 수 있으며, 자극 효율의 감소 및 계속되는 신호 감도의 저하 등의 문제가 있었다. 최근 이러한 금속 기반 전자재료를 대체할 수 있는 소재로 생체적합한 전도성 고분자, 액체금속, 유기 반도체, 전도성 하이드로젤, 신축성 소재와 이들을 혼합한 복합 고분자 소재들이 활용되고 있으며, 이를 통해 고성능 뇌-기계 인터페이스, 페루프 재활로봇, 전자약 등의 개발이 가능하다.

현재 가장 중요한 이슈는 이러한 체내외 바이오전자시스템을 통하여 국소 타겟 부위에 전기자극을 가하고 신호를 획득하여, 이를 수개월에서 수년 동안 면역반응 없이 장기적으로 적용하는 것이다. 이를 위해서는 바이오전자시스템과 조직이 맞는 생체 인터페이스의 제어가 필수적이다. 바이오전자시스템을 안정적으로 고정하기 위해, 조직접착력을 보유한 하이드로젤 기반 인터페이스가 개발되고 있으며, 이는 특정 부위에 선택적으로 전기자극을 가하고, 신호를 측정하기 위한 핵심기술로 급부상하고 있다. 가령, 지속적으로 움직이는 말초신경, 근육, 심장 등의 조직에 적용되는 소자는 혈액 등의 과도한 체내 습윤성 환경을 오랜 시간 버티며 그 기능을 유지해야 한다. 따라서, 이에 사용되는 인터페이스용 고분자 소재는 적당한 이온 전도도, 유연성, 신축성, 조직접착성, 항염증성, 내수성 등의 특성을 요구하며, 기능이 다한 후 2차 수술 없이 제거될 수 있는 생분해성 또한 요구된다.

최근 연구들은 전도성 및 조직접착성 하이드로젤 기반 기질 소재와 액체 금속, 금속 나노입자 복합 엘라스토머 소재 등을 기반으로 이런 요구사항들을 충족할 수 있음을 보여주고 있으나, 실제 임상으로의 적용을 위해서는 유선 시스템이 아닌 무선 시스템으로의 접근과 타 생체 신호로부터 나오는 노이즈 제거, 장기 캘리브레이션, 지속적인 에너지 공급, 데이터 신뢰성, 개인정보 보호 문제가 여전히 큰 장벽으로 고려되고 있다. 또한 이 분야는 AI와 밀접하게 연결되고 있다. 2025년 미국 FDA는 인공지능 기반 의료기기(AI-enabled medical devices)에 대한 생애주기 관리와 허가 자료 제출 권고 초안을 발표했고, AI 기반 의료기기의 승인 현황도 지속적으로 축적되고 있다. 이는 앞으로 고분자 기반 바이오전자시스템이 단독 재료 기술로 평가되는 것이 아니라, 신호 획득용 소재와 데이터 해석용 AI가 결합된 통합 의료기기로 발전할 것임을 시사한다. 연속 혈당·젖산·전해질 측정용 웨어러블, 심혈관·신경계 실시간 모니터링용 이식형 센서, 전기자극 기반 재생치료 소자, 자가발전형 바이오전자 플랫폼, 이를 융합한 웨어러블 재활로봇, 체내삽입형 뇌-기계 인터페이스 등이 대표적인 응용 분야가 될 것이다.

2.4 감염 억제 및 차세대 의료기기용 표면·구조 고분자

감염 제어는 차세대 의료기기 분야에서 가장 중요한 연구 주제 중 하나이다. 카테터, 창상피복재, 인공관절, 혈관계 장치 및 조직융합 소재와 같은 의료기기는 미생물 부착과 세균 생체막(bacterial biofilm) 형성 위험에 지속적으로 노출되어 있다. 특히 생체막은 항생제와 면역반응에 높은 저항성을 가지기 때문에, 의료기기 감염의 주요 원인으로 작용한다. 이에 따라 최근 의료용 고분자 연구는 단순 항균 기능을 넘어, 세균 부착 억제, 생체막 제어 및 조직재생 기능을 동시에 구현하는 방향으로 발전하고 있다.

현재의 중요한 이슈는 항균성과 생체친화성의 균형이다. 강한 항균성을 부여하기 위해 양이온성 구조나 활성산소(일산화

질소 등) 방출 기능을 도입하면 정상세포 독성이나 조직 자극이 증가할 수 있다. 반대로 안전성을 우선하면 항균 성능이 충분하지 않을 수 있다. 특히, 실제 임상에서는 부유 상태(planktonic) 세균보다 생체막 형태의 미생물이 더 큰 문제이며, 생체막은 항생제와 면역반응에 대해 높은 저항성을 보인다. 따라서, 최근 연구는 단순 항균보다 부착 억제-살균-생체막 붕괴-면역조절과 같이 다단계 전략으로 이동하고 있으며, 대표적 접근법으로 방오성 표면처리, 항균성 펩타이드, 일산화질소 조절·방출 및 생체활성인자 고정화·방출 등이 있다.

이와 함께 생분해성·흡수성 의료기기용 고분자도 중요한 연구분야로 부상하고 있다. 일정 기간 기능을 수행한 후 체내에서 안전하게 분해되는 고분자는 2차 제거수술을 줄일 수 있다는 장점을 가진다. 최근에는 생체흡수성 전자소자, 흡수성 스텐트 및 시한성 임플란트(transient implants) 등으로 응용이 확장되고 있으며, 분해 속도와 기능 유지 기간을 정밀하게 제어하는 기술이 핵심 과제로 연구되고 있다.

또한 3D 프린팅과 적층 제조(additive manufacturing) 기술의 발전은 환자 맞춤형 의료기기 개발을 가속화하고 있다. 고분자 기반 맞춤형 임플란트와 의료기기를 제작하기 위해서는 소재 특성뿐 아니라 제조 재현성, 구조 안정성 및 규제 적합성을 동시에 확보해야 한다. 따라서 미래 의료용 고분자 연구는 소재 개발뿐 아니라 제조공정, 표준화 및 규제과학까지 포함하는 통합적 접근이 더욱 중요해질 것으로 예상된다.

향후에는 항균 코팅 카테터, 감염 억제형 창상피복재, 환자 맞춤형 3D 프린팅 임플란트 및 생체흡수성 의료기기의 임상 적용이 더욱 확대될 전망이다. 궁극적으로 감염 제어용 의료 고분자는 단순히 세균을 제거하는 소재를 넘어, 감염을 예방하고 조직 치유를 촉진하는 지능형 의료 플랫폼으로 발전할 것으로 기대된다.

3. 결론

의료용 고분자 연구는 현재 단순한 생체재료 개발을 넘어, 인공지능(AI), 디지털 헬스케어, 정밀의료 및 첨단 제조기술과 융합되는 방향으로 빠르게 발전하고 있다. 앞으로의 의료용 고분자는 단순히 생체적합성을 갖춘 소재를 넘어, 약물 전달, 조직 재생, 생체신호 모니터링 및 감염 제어 기능을 동시에 수행하는 다기능 플랫폼으로 진화할 것으로 예상된다.

특히 약물전달, 재생의학, 바이오전자 및 감염 제어 분야는 상호 융합되며 하나의 통합 바이오의료 시스템으로 발전할 가능성이 높다. 이에 따라 미래 의료용 고분자 연구에서는 소재 설계뿐 아니라 제조공정, 데이터 기반 최적화, 규제과학 및 임상 전환성을 함께 고려하는 전주기적 접근이 필수적이다. 또한 실제 임상 현장의 요구를 반영한 소재 개발과 산업·병원·학계 간 협력 체계 구축 역시 더욱 중요해질 것으로 전망된다.

한국고분자학회 의료용 고분자 부문위원회
신흥수(한양대), 정지훈(성균관대), 정용기(KAIST), 신미희(성균관대), 양승윤(부산대), 허강무(충남대)