

산학연 연구실 소개(2)

연세대학교 화공생명공학과 나노복합소재 연구실 (Nano Complex Materials Lab. (NCML), Yonsei University)

주소: 서울특별시 서대문구 연세로 50 연세대학교 화공생명공학과 (우: 03722)
전화: 02-2123-7288, E-mail: jinkee.hong@yonsei.ac.kr
홈페이지: <https://ncmlys.wixsite.com/ncml>



연구책임자 | 홍진기 교수
연세대학교 화공생명공학과

1. 연구실 소개

고분자는 단량체(monomer)의 중합(polymerization)을 통해 형성되는 다재다능한 물질이며 단량체는 기능성 작용기를 포함하는 기본 분자들로 이루어져 있다. 고분자의 구조와 물성은 단량체가 배열되는 방식과 고분자 사슬 간의 상호작용에 따라 크게 달라진다. 이러한 배열 방식에 따라 선형(linear), 분지형(branched), 가교형(crosslinked) 구조 등 다양한 형태가 나타날 수 있다. 또한, 고분자는 물리적 상호작용이나 공유 결합(covalent bonding)을 통해 상호 연결된 네트워크를 형성할 수 있으며 이는 고분자의 다기능성을 더욱 증대시킨다.

고분자 네트워크의 기계적 및 기능적 특성(탄성, 강도, 생체적합성 등)은 조정 가능하며 분자량, 기능성 작용기 조성, 특정 사슬 배열과 같은 요인에 의해 결정된다. 이러한 관계를 깊이 이해하는 것은 다양한 분야의 과제를 해결할 수 있는 고급 소재를 개발하는 데 필수적이다.

본 “나노복합소재 연구실”은 고분자 구조의 정밀 제어를 기반으로 한 다기능성 고분자 소재 개발에 선도적인 연구를 수행하고 있다(그림 1). 특히, 고분자의 기계적 성질, 생체적합성, 열적·전기적 특성 등을 최적화하여 다양한 분야의 복합적인 문제를 해결할 수 있는 고분자 기반 융합 소재를 설계하는 데 중점을 두고 있다. 그로 인해, 의료, 에너지, 환경, 식품 등 다양한 응용 분야를 아우르며 소재의 기능을 극대화하고 새로운 활용 가능성을 제시하고 있다.



그림 1. “나노복합소재 연구실”의 주요 연구 분야 및 참여 연구원.

체내 안정성을 갖춘 의료용 고분자부터, 향미와 질감을 개선한 배양육 소재, 효율적인 에너지 하베스팅 소자, 그리고 환경 정화를 위한 복합소재까지 다양한 산업적 활용 가능성을 입증한 연구 성과를 이루어냈다. 고분자와 무기물의 상호작용을 활용하여 재생의학 및 약물 전달 시스템에 최적화된 신소재를 개발하였고 이를 바탕으로 세포 재생과 조직 복원을 효과적으로 촉진하는 기술을 제시하였다. 또한, 고분자 나노 구조를 조절하여 향미 화합물 방출을 제어하고 배양육의 맛과 질감을 자연적으로 증진시키는 소재를 개발하여 식품 산업에서도 연구 성과를 인정받고 있다.

에너지 및 환경 소재 분야에서도 다양한 고분자 복합소재를 통해 효율적인 에너지 변환과 환경 정화가 가능한 다기능성 소재를 설계하였다. 나노 구조와 기능기의 조합을 통해 열전 소자의 성능을 극대화하고 공기 이동을 감지하여 전기 에너지를 생성할 수 있는 새로운 개념의 소재를 제안함으로써 기존 에너지 소재의 한계를 극복하였다. 또한, 구강 미생물 환경을 제어하여 감염된 조직의 재생을 유도하는 나노복합 소재 개발에 성공하여 다양한 질환 치료에도 응용할 수 있는 융합적 소재 설계의 가능성을 보여주었다.

2. 주요연구분야

2.1 배양육(Cultured Meat)

배양육(실험실 배양육, 세포 기반 육류 등)은 동물 세포를 배양하여 생산된 육류이다. 일반적으로 알려진 대두 단백질(식물성 단백질)과 달리 배양육은 외형뿐만 아니라 맛과 영양 성분 등 육류의 품질을 결정하는 모든 요소를 재현하는 것이 특징이다. 최근 본 연구진은 식물성 단백질과 천연 고분자를 활용한 스캐폴드(scaffold)부터 세포시트(cell sheet) 및 분말 형태의 배양육까지 실제 고기의 특성을 모방할 수 있는 다양한 형태의 배양육을 개발하고 있다.

조직공학에서 사용되는 스캐폴드와 달리 배양육용 스캐폴드는 식용 가능해야 하며 세포 분화를 유도하면서도 육류와 유사한 특성을 가져야 한다는 점이 특징이다. 또한, 배양육의 상업화를 위해서는 ① 비용 절감, ② 대량 생산, ③ 실제 고기와 유사성이 해결해야 할 핵심 과제이다. 이를 위해 생산 비용에서 상당한 비중을 차지하는 배양액의 비용을 절감하는 동시에 세포 분화율과 영양 가치 등 배양육의 품질을 향상시키는 것이 중요하다. 본 연구진은 경제성이 높은 배양육을 성공적으로 개발한 바 있다(그림 2).

실제 고기와 유사성을 높이는 것도 중요한 과제이다. TVP(textured vegetable protein, 조직화 식물성 단백질)와 쌀 알갱이를 기반으로 한 식품 소재 스캐폴드를 활용하여 배양육을 개발하였다(그림 3). 뿐만 아니라, 실제 고기의 질감과 풍미를 모방한 스캐폴드를 제조하는 연구를 진행하여 지속 가능한 식품으로서 배양육 산업 발전에 기여하고 있다.

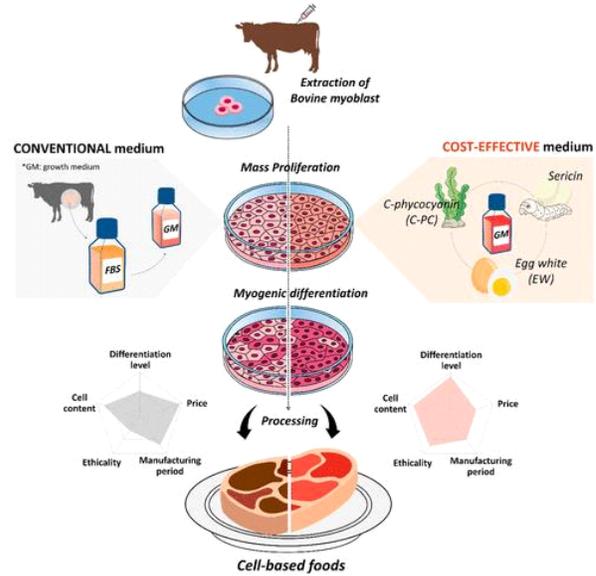


그림 2. 배양육 생산을 위한 기존 배지와 비용 절감형 배지의 비교.

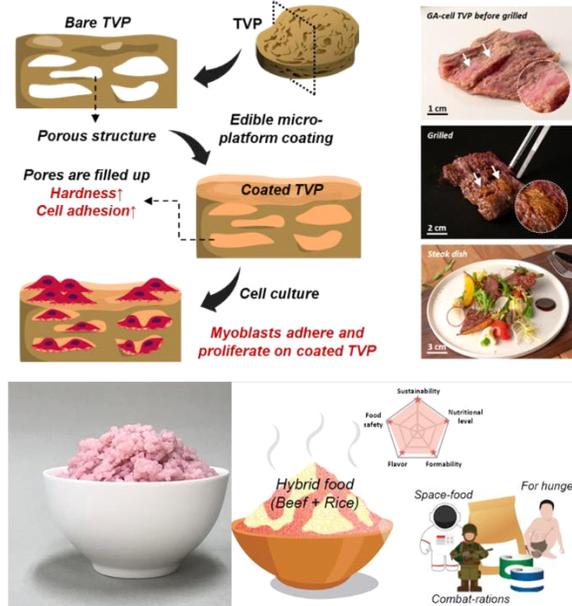


그림 3. TVP를 이용한 배양육 개발 및 하이브리드 식품 응용.

2020년부터 배양육 관련 연구 및 프로젝트를 적극적으로 수행해 왔다. 현재까지 약 14건의 관련 특허를 출원 및 등록 하였으며 8편의 학술 논문을 발표하였다. 또한, 연구 결과는 Nature News, BBC, CNN, Science News 등 국내외 주요 언론에 소개되었다.

2.2 바이오플라스틱(Bioplastics)

본 연구진은 바이오플리머의 구조 제어 및 기능 향상 기술을 기반으로 기존 석유화학/바이오플라스틱의 한계를 극복한 혁신적인 바이오플라스틱을 개발하였다(그림 4). 간단한

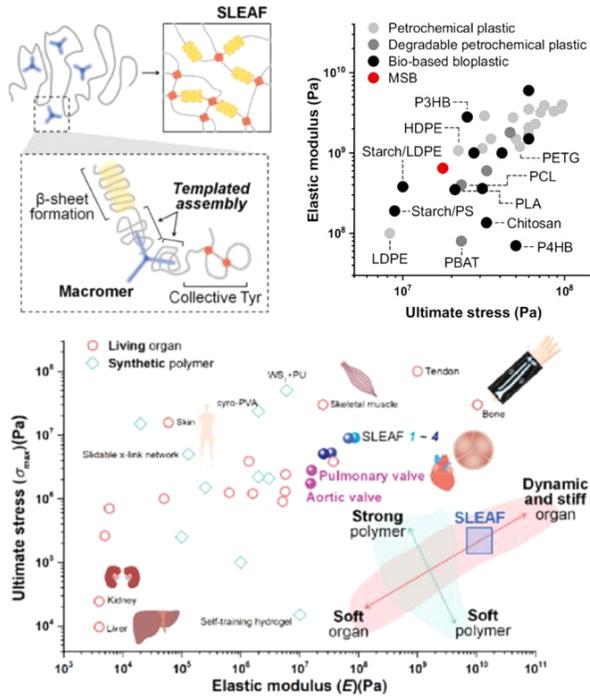


그림 4. SLEAF(silk-based leaflet for advanced function) 기반 바이오 플라스틱의 구조적 설계 및 물성 비교.

공정을 통해 ① 높은 비용, ② 제한적인 바이오매스 자원, ③ 생체 친화성 부족, ④ 폐기물 발생, ⑤ 낮은 물성 및 기능성 등 바이오플라스틱의 주요 문제를 해결할 수 있는 우수한 제조 기술을 확립하였다.

이 기술을 통해 기존 생체 삽입물 및 의료기기보다 우수한 성능을 갖는 바이오플라스틱 소재를 개발하였다. 특히, 풍부하게 존재하는 누에고치 바이오매스를 활용해 심장판막(heart valve leaflet)과 치아 교정용 투명 장치(orthodontic aligner)를 제작하였으며 이를 통해 ① 생체 친화적인 점탄성, ② 우수한 항균/방오 특성, ③ 뛰어난 항응고 성능을 입증하였다. 더불어, 해당 기술을 단순한 산(acid)을 이용한 재활용 공정으로 확장해 비용 절감과 폐기물 저감까지 달성하였다(그림 5).

또한, 산업용 보호 필름, 포장재 등 다양한 분야에 활용 가능한 바이오플라스틱 개발을 위해 대표적인 생분해성 바이오매스인 셀룰로오스(cellulose)를 이용한 소재도 개발하였다. 셀룰로오스 기반 소재의 낮은 물성 한계를 극복하기 위해 실험실에서 개발한 첨가제를 적용하였고 이를 통해 물성을 조절할 수 있는 생분해성 바이오플라스틱을 구현하였다.

듀얼 네트워크 전략과 ring-opening polymerization을 통해 소재의 성능과 생분해성을 향상시켰으며 분해 후 생성된 부산물이 식물 성장과 세포에 유해하지 않음을 확인하였다(그림 6).

본 연구진의 바이오플라스틱 연구는 다양한 매체를 통해 소개되었으며 이를 통해 순환 경제(circular economy)를 위한

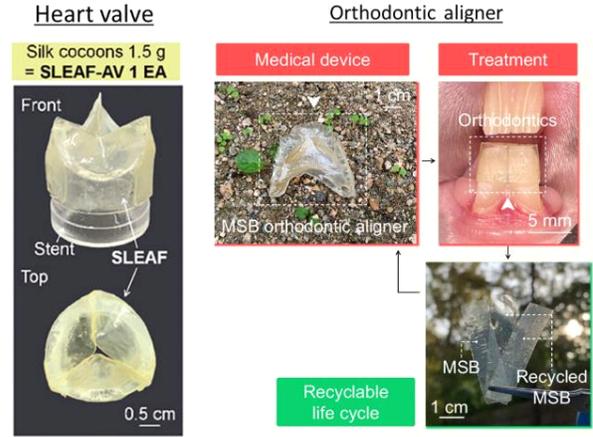


그림 5. 실크 고치 기반 바이오 플라스틱의 의료기기 적용 및 재활용.

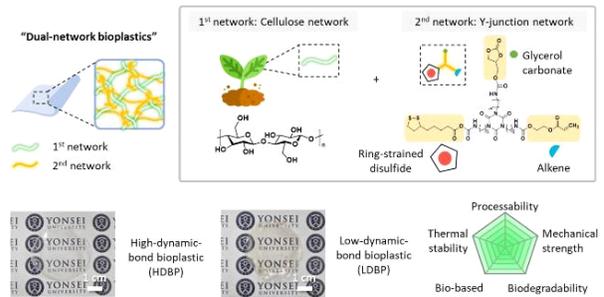


그림 6. 셀룰로오스 네트워크와 Y-결합 네트워크로 구성된 듀얼 네트워크 바이오플라스틱.

바이오플라스틱 분야를 선도할 연구실로서의 가능성을 인정받고 있다.

2.3 약물 전달(Drug Delivery)

본 연구진은 현대 의학의 주요 난제를 해결하기 위한 고도화된 약물 전달 시스템 개발에 주력하고 있다. 고분자 과학, 나노기술, 바이오공학 분야의 전문성을 융합해 암 치료, 골재생, 폐동맥 고혈압 등 다양한 질환에 대한 혁신적인 솔루션을 설계하며 환자 치료 효과를 높이고 미충족 의료 수요를 해결할 수 있는 효과적이고 지속 가능한 치료 플랫폼 개발을 목표로 하고 있다.

주요 연구 중 하나는 기존 수지상세포(dendritic cell, DC) 기반 암 백신의 한계를 극복하기 위한 혁신적 접근법인 인공 나노 수지상세포(anDC) 플랫폼 개발이다(그림 7).

이 플랫폼은 다양한 암 항원을 안정적으로 전달할 수 있으며 대량 생산과 장기 보관이 가능하다. 특히 CTLA-4 항체를 최적화하여 적용한 anDC는 암 특이적 T세포를 효과적으로 활성화하고 면역반응을 억제하는 조절 T세포(regulatory T cell)를 억제하는 뛰어난 성능을 보였다.

전임상 연구를 통해 anDC 플랫폼은 종양 성장을 억제하는 효과와 장기 저장 가능성을 입증했으며 기존 백신과 차별화된

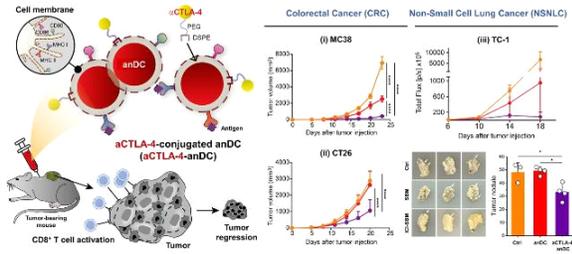


그림 7. CTLA-4 항체가 결합된 인공 나노 수지상세포의 항암 효과.

우수성을 보여주었다. 이러한 성과는 암 면역치료 분야의 발전에 대한 연구진의 기여를 보여주는 대표적 사례이며 현대 의학에서 치료 전략을 향상시키는 데 중요한 역할을 한다.

치유가 어려운 대형 골결손(critical-sized bone defect) 치료를 위한 이중 단계 약물 전달 시스템을 개발하였다(그림 8).

임상에서 널리 사용되는 성장인자인 BMP-2와 항생제를 젤라틴 마이크로입자에 탑재하고 이를 이중상 구조의 이칼슘 인산염(BCP) 블록에 적용하였다. 이 시스템은 기존 BMP-2 전달 방식에서 발생하는 과도한 방출, 비정상 조직 형성, 효과 감소 등의 문제를 해결하며 치료제를 순차적이고 정밀하게 전달한다.

이중 단계 방출 메커니즘을 통해 초기에는 항생제를 빠르게 방출해 염증을 줄이고 감염을 예방하며 이후에는 성장인자를 지속적으로 방출해 장기적인 골재생을 유도한다. 이러한 정밀 조절은 분해 속도가 다른 젤라틴 마이크로입자 설계와 약물 방출을 추가로 조절하는 표면 코팅 기술을 통해 구현되었다.

3. 연구실 현황 및 비전

본 나노복합소재 연구실(Nano Complex Materials Laboratory, NCML)은 차세대 융합 소재 기술을 통해 환경과 인류의 지속 가능한 미래를 실현하는 것을 목표로 한다. 고분자 과학, 나노기술, 생명공학을 바탕으로 한 소재 혁신을 통해 현재 직면한 환경오염, 자원 고갈, 식량 위기 등의 문제를 해결하고 순환경제 구축에 기여하는 원천 기술을 개발하고 있다.

주요 연구 분야는 ▲ 생분해성과 기계적 성능을 동시에 갖춘 고기능성 바이오플라스틱, ▲ 실제 고기의 조직과 영양을

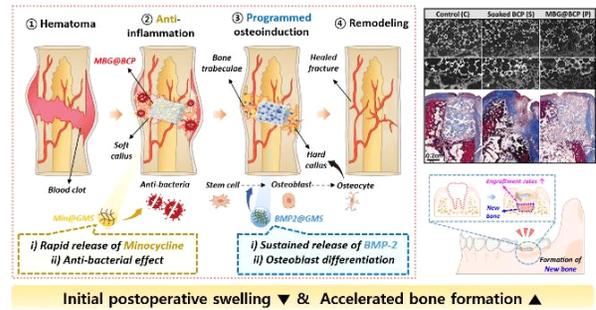


그림 8. 이중 단계 약물 방출 시스템을 통한 골재생 치료.



그림 9. 나노복합소재 연구실(NCML) 단체 사진.

모사하는 배양육 및 하이브리드 식품 소재, ▲ 의료 및 산업 현장에서 재활용이 가능한 고부가가치 바이오소재로 이를 통해 의료, 식품, 에너지, 환경 분야에 적용 가능한 융합 기술 플랫폼을 제시한다.

특히, 소재의 구조적 제어와 기능적 설계를 통해 생체 적합성, 지속 가능성, 경제성을 모두 만족하는 차세대 소재 시스템을 구축하고 있으며 실험실 수준을 넘어 산업적 확장과 상용화를 위한 연구도 적극적으로 수행 중이다.

NCML은 해외 유수의 연구기관(하버드 병원의 MGH 5명, McLean hospital 1명 과건 등)과의 창의적 융합 연구와 글로벌 협력을 통해 과학기술의 한계를 넘어서는 혁신을 이어가고 있으며 궁극적으로 미래 사회를 선도할 지속 가능한 소재 생태계를 조성하는 세계적 연구기관으로 도약하고자 한다.