

## 산학연 연구실 소개

# 한국과학기술연구원 스마트 섬유·고분자 복합소재연구실 (Smart Fiber and Polymer Composite Materials Laboratory; KIST)

주소: 전라북도 완주군 봉동읍 추동로 92 한국과학기술연구원 전북분원 복합소재기술연구소

다기능구조용복합소재연구센터 R3254 (우: 55324)

전화: 063-219-8153 FAX : 063-219-8289

E-mail: ycjung@kist.re.kr, Homepage : <http://www.jb.kist.re.kr>



연구책임자 | 정용재 박사  
한국과학기술연구원 전북분원  
복합소재기술연구소

## 1. 연구실 소개

한국과학기술연구원 전북분원 복합소재기술연구소는 지역전략산업 육성과 연계하여 대한민국 복합소재산업 발전을 견인할 전문국책연구소로써 복합소재분야의 첨단 원천 소재개발, 기업지원 및 인력육성 기능등을 수행하고 있다. 2007년 8월 전라북도의 새로운 미래 먹거리 창출과 지역산업활성화를 위하여 “복합소재” 키워드를 선택하고, 한국과학기술연구원(KIST) 분원 설립요청을 시작으로 2012년 11월 전라북도 완주군(소재지)에 한국과학기술연구원 전북분원 복합소재기술연구소가 10만여 평의 면적으로 준공 후 현재까지 운영되고 있다.

“Open another world with composite materials beyond the limit”의 비전 및 전략으로 3개 연구센터와 1개의 연구지원부 그리고 중소기업지원센터로 조직되어 원천소재의 개발부터 첨단복합소재로의 응용까지 다양하고 폭 넓은 연구범위로 석·박사급 150여명의 연구진들이 새로운 소재 개발에 꿈을 가지고 연구에 매진하고 있다.

“스마트 섬유·고분자 복합소재 연구실(smart fiber and polymer composite materials laboratory)”은 2012년 11월부터 나노기술을 기반으로 지능형 형상기억고분자(shape memory polymer, SMP) 나노복합소재, 유전자 재조합된 단백질을 활용한 생체모방 자가복원소재 및 나노카본의 분산/분리 그리고 기능성 펩타이드의 합성등에 관한 소재를 연구하고 이를 응용하여 미래형 스마트 복합 소재를 개발하는 연구를 수행 중에 있다(그림 1). 이러한 연구는 지능형 텍스타일, 인공근육 소재, 로봇 작동기 소재, 우주항공소재 등의 분야에 이용할 수 있다. 최근 본 연구실에서 집중적으로 수행해 오고 있는 지능형 고분자 복합소재(형상기억소재 및 자가복원소재)에 관한 연구는 열적 자극 뿐만 아니라 전기적 및 물(水)에 의해서도 소재의 응답 특성을 제어하고 응용할 수 있는 소재 연구 시스템을 구축함으로써 원하는 응용분야에 적합한 형상기억 재료를 제공해 줄 수 있다. 또한 현재 실질적인 소재의 응용을 위하여 장시간 사용했을 때의 지능 성능을 시험하는 연구도 병행하고 있다. 이러한 연구들은 기본적으로 소재의 소형화가 가능하고 가벼울 뿐만 아니라 우수한 성능을 부여해 줄 수 있는 나노화 및 나노복합화 기술에 바탕을 두고 있다. 대표적인 예로서 탄소나노튜브의 기능화에 의한 나노튜브 나노구조화 고분자 및 탄소나노튜브 나노복합체 연구가 있다.

한편, 자가복원 소재는 “외부의 다양한 환경 및 자극에 의해 소재의 구조가 손상되거나 물성등이 저하되었을 때 소재가 결함을 감지하여 능동적으로 치유를 함으로써 원래의 물성을 회복하고 동시에 수명을 연장할 수 있는 지능형 재료”라 정의할 수 있다. 한국과학기술연구원 스마트 섬유·고분자 복합소재 연구실에서는 폴리우레탄과 유전자 재조합 단백질등을 이용하여 손상을 치유하고 물성을 복원하며 동시에 구조와 물성과의 상관관계에 관한 근원적 연구를 수행하는데 많은 노력을 기울이고 있다. 최근에는 상온에서 수분내에 외부의 손상을 회복하거나 물성을 극복할 수 있

는 기능성 외장소재와 마이크로 캡슐을 기반으로 하는 자가복원 송전케이블 접속함을 개발하는 연구를 진행하고 있다. 뿐만 아니라, 유전자 재조합 기술을 적용한 단백질 접착제와 기능성 펩타이드를 활용하여 나노하이브리드 기반 웨어러블 전자 나노섬유소재와 친환경 항균섬유복합소재 및 코팅소재 개발 등에 관한 연구도 병행하고 있다.

좀 더 구체적으로 본 연구실은 크게 1) 지능형 고분자 나노복합소재 시스템 연구, 2) 탄소나노튜브의 구조제어와 고성능 고분자 복합소재 시스템 연구, 3) 고분자복합소재를 이용한 작동기 시스템 연구, 4) 단백질 기반 기능성 펩타이드가 융합된 접착 단백질의 발현 벡터 시스템 및 응용 연구등의 네 가지 분야에 대해 연구를 진행하고 있으며, 기존에 보고되지 않았던 새로운 현상을 확인하는 등 다양한 연구를 하고 있다.

## 2. 주요 연구 분야 소개

### 2.1 지능형 고분자 나노복합소재 시스템 연구

고분자를 이용한 형상기억 특성의 발현은 우수한 형상회복률 외에도 큰 변형, 낮은 밀도, 쉬운 가공성, 낮은 비용 등 형상기억합금이 갖지 못하는 장점들이 있다. 형상기억고분자(SMP)는 전이온도(소프트 세그먼트의 용점 또는 유리전이온도) 이상으로 열을 가했을 때 원래의 형상을 회복할 수 있는 고분자를 말한다. 주로 물성과 가공성이 우수한 폴리에탄계 블록 공중합체에 관해 많은 연구가 이루어져 왔는데, 본 연구실에서도 우레탄계 고분자를 중심으로 하는 멀티블록 공중합체 및 나노구조 공중합체, 나노복합체 등에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다. 특히 탄소나노튜브를 이용한 전도성 나노구조 고분자 또는 나노복합체를 이용한 전기응답형 형상기억 소재의 개발은 작동기, 로봇, 인공근육 소재, 지능형 텍스타일 등의 응용 분야에 큰 기여를 할 것으로 기대하고 있다.

본 연구실에서 수행하고 있는 SMP 연구내용으로는 폴리에탄 블록공중합체의 구조 디자인과 합성, 새로운 특성을 갖는 나노구조 SMP, 기능화한 탄소나노튜브를 이용한 전기작동

SMP, 유기-무기 하이브리드 SMP, 형상기억 나노섬유 등이 있다(그림 2a).

자가치유(self-healing) 시스템은 자연에서도 쉽게 살펴볼 수 있는데 홍합단백질(mussel protein)이 그 대표적이 예이다. 홍합과 따개비등은 수중환경에서 거의 모든 표면에 강하게 붙어서 자라는 수중 생물로 특이한 접착능력을 가지고 있는데 이 접착력에 관계되는 화학적 작용기를 모방한 폴리도파민/폴리노르에이네프린 표면 개질 기술은 기존의 홍합이 가지는 특성을 그대로 가지고 있어 염기성 pH 하에서 표면의 성질에 관계없이 우수한 접착특성을 나타낸다.

본 연구실에서 수행하고 있는 생체모사 자가복원 나노복합소재 연구내용으로는 유전자 재조합기술로 합성된 접착단백질을 기반으로 나노탄소(탄소나노튜브, 그래핀, BNNT 등)등과 나노하이브리드화하여 생체나노복합소재를 개발하였으며 구조변화에 따른 물성향상 및 계면에서의 메커니즘의 이해등에 관하여 결과를 제시한 바 있다. 또한, 다양한 자극(온도, 전기, 광, pH 등)에 감응하는 기능성 관능기들을 접착단백질 또는 나노탄소에 부여하여 새로운 개념의 생체모사 자가복원 복합소재의 개발에 관한 연구도 수행하고 있다(그림 2b).

또한, 자가치유 물질을 포함하는 전도성 마이크로캡슐 시스템을 개발하고 나노섬유화하여 외부의 자극에 대해 스스로 섬유의 손상 부위가 치유될 수 있고, 특히 산화 및 환원 분위기하에서 코어재가 방출하여 섬유 시트 또는 나노섬유 웹의 손상 부위가 자가치유될 수 있는 연구도 진행하고 있다(그림 2c). 그리고 형상기억특성을 갖는 폴리에탄 블록 공중합체의 3차원 네트워크 구조를 상온에서도 쉽고 빠르게 형상회복력과 자가복원력을 갖는 고분자 구조-물성등의 상관관계 및 메커니즘 규명에 관한 연구도 병행하고 있으며, 현재 숭실대학교 정재우 교수팀과 삼성미래기술육성사업을 지원받아 공동으로 진행하고 있다(그림 2d).

이외에도 가장 최근에는 마이크로캡슐을 기반으로 하는



그림 1. 스마트 섬유·고분자 복합소재 연구실의 주요연구분야.

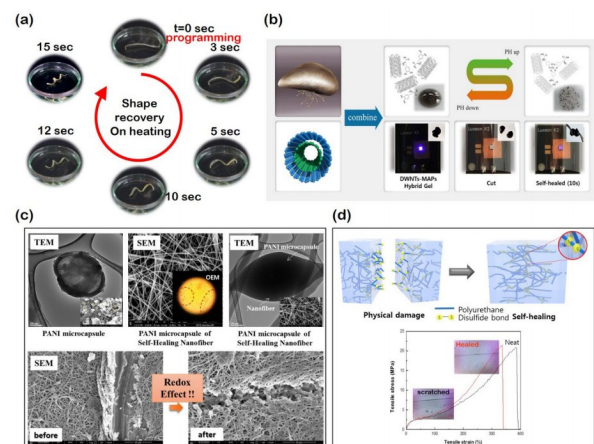


그림 2. (a) 온도에 반응하는 형상기억고분자, (b) pH 감응형 CNT-홍합접착 단백질 기반 자가복원 나노복합소재, (c) 전도성 고분자를 이용한 자가복원 마이크로캡슐의 제조와 나노섬유의 자가회복거동에 관한 연구, (d) disulfide bond를 포함하는 폴리에탄 블록 공중합체의 자기회복 개념도.

자가복원 송전케이블 접속함(한국전력공사재원)의 개발에 관하여 한국과학기술연구원(정용채 박사, 김재우 박사, 안석훈 박사) 외 숭실대학교(정재우 교수), 경기대학교(차상호 교수), KCC(강승현 박사), 대한전선(김화중 연구소장, 홍동석 책임 연구원)과 함께 새로운 자가복원 복합소재를 개발중에 있다. 이러한 일련의 연구들은 앞으로 복합소재시장에 새로운 기술의 제안과 더불어 다양한 산업군에 혁신적 기능성 소재로 성장할 것으로 전망한다.

## 2.2 탄소나노튜브의 구조제어와 고성능 고분자 복합소재 시스템 연구

복합소재는 그 기술이 점차 나노화됨에 따라서 기존의 소재와는 차별화된 성능들을 가지고 소재의 특성을 강조할 수 있는 유연성, 휴대성, 낮은 전기저항, 투명성 등이 요구되어 산업 전반에 응용되고 있으며 대표적인 연구분야가 바로 “나노카본을 기반으로 한 고분자 복합소재”이다.

본 연구실에서는 탄소나노튜브의 표면에 단분자부터 고분자까지 다양한 입자들을 코팅하여 탄소나노튜브의 강한 기계적 물성에 다기능성을 갖는 나노탄소소재를 개발하고 응용하고 있다(그림 3a, b). 특히 기능화도에 따른 분광학적 해석을 통하여 탄소나노튜브의 물리적 및 광학적특성을 해석하고 필요에 따라 외벽과 내벽의 특성을 분리/분산하고 카이랄리티를 조절하는 등의 연구를 수행하고 있다(그림 3c).

기능화된 나노탄소를 이용하여 고분자와 복합화하여 최종적으로 유연성과 높은 기계적 강도 그리고 투명도등이 확보되는 나노복합소재를 개발할 수 있는데, 대표적인 연구 결과로 탄소나노튜브 표면에 결합길이가 서로 다른 단분자를 결합시킨 후 최적의 분산도를 확보한 후 원심분리하에서 초고압화하여 얻어진 분산용액으로 복합소재를 제조할 경우 수 마이크로 농도만으로도 기계적 물성 및 광학적 물성이 확

보된 폴리이미드 나노복합소재를 제조할 수 있었다. 이러한 결과는 그 동안 벌크 복합소재에서의 충전제의 함량에 따른 물성 향상한계의 해결방안으로 새로운 복합소재 제조기술로 제안할 수 있다(그림 4a).

## 2.3 능동형 고분자복합소재를 이용한 작동기(Morphing) 시스템 연구

작동기(morphing) 시스템 기술은 미래 사회의 바이오 및 로봇산업에서 필요로 하는 핵심적인 기술로 이 분야에 대한 장기적이고도 집중적인 연구개발과 투자가 필요하다. 소재 입장에서 보면 작동기에 관한 연구는 생물체의 근육 소재를 모방하고 이를 구현하는 연구가 우선적으로 필요하다. 실제 생체의 근육 작동은 전기적인 신호 조절에 의하여 이루어지며 이 전기적인 조절이 화학적인 반응으로 이어져 이완과 수축을 일으키게 한다.

본 연구실에서는 형상기억고분자를 매개체로 나노필러, 바이오필러등을 이용하여 생체 및 근육의 작동원리를 구현할 수 있는 작동기 소재 개발과 응용을 목표로 한 연구를 수행하고 있다. 또한, 전기방사, 용액블러워방사, 초음파방사 등을 통해서 소재를 가공하고 제어함으로써 다양한 성능을 갖는 섬유형태의 유연 전기 작동기를 개발하고 있다.

## 2.4 단백질 기반 기능성 펩타이드가 융합된 접착단백질의 발현 벡터 시스템 및 응용 연구

나노카본은 소수성 표면에서의 반데르발스 결합으로 인한 응집현상으로 추가적인 분산제 없이 용매 또는 용질내에서 균일한 분산이 어려워 그 동안 다양한 소재로의 적용과 응용에 한계가 있었다. 이러한 문제점등을 해결하기 위해 본 연구실에서는 유전자 재조합된 접착단백질에 분산기능성을 향상시킬 수 있는 기능성 펩타이드를 설계/조합하여 다양한 용매에서 나노카본의 분산성과 안정성을 동시에 해결하는 연구와 특정 조건하에서 나노튜브의 분리(금속성과 반도체성)에 관한 연구를 수행하고 있으며 투명전도성 필름 또는 전도성 생체접착소재로의 응용연구도 실시하고 있다(그림 5a, b). 구체적으로는 상시 분산기능성을 갖는 펩타이드를 아미노산 서열로 표시되는 접착단백질(fp-1, fp-3, fp-5,

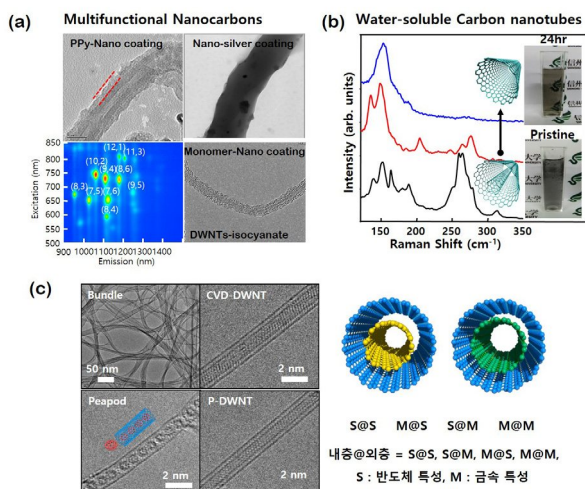


그림 3. (a) 탄소나노튜브 표면의 다기능화, (b) 이중벽 탄소나노튜브의 구조를 제어하여 물에서분산성이 우수한 탄소나노튜브의 제조에 관한 연구결과, (c) 탄소나노튜브의 합성방법과 분리를 통한 튜브의 내벽 및 외벽의 구조제어.

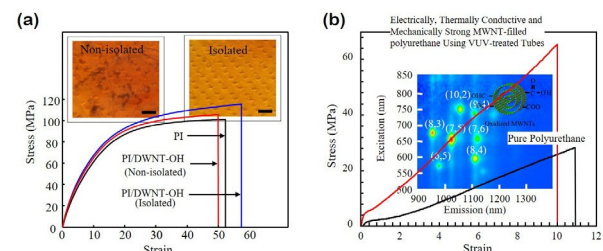


그림 4. (a) 초고압화된 이중벽 탄소나노튜브를 이용한 폴리이미드 나노복합소재의 광학적, 기계적 연구결과, (b) 진공자외선(VUV)를 활용하여 탄소나노튜브의 표면을 기능화하고 폴리우레탄과 나노복합화하여 열적, 전기적, 기계적으로 우수한 나노복합소재를 제조한 연구결과.

fp-6등)의 카르복실 말단, 아미노 말단, 카르복실 말단 및 아미노 말단의 양에 결합하여 발현함으로써 그 특성을 효과적으로 제어할 수 있다.

또한, 접착 단백질의 DOPA는 금속이온과의 배위결합을 통해 3차원 가교결합이 가능하여 전도성과 인장강도 향상을 위한 금속 첨가제의 변화에 따른 분광학적 이해와 인체친화성 바인더로서의 응용연구도 진행하고 있다(그림 5c). 아울러 우수한 생분해성과 생체적합성, 그리고 금속이온의 흡착성 등의 특성을 응용하고자 소재의 구조제어를 통하여 마이크로 기공을 구성하고 최종적으로 강직한 에어로겔의 제조와 생체복합소재로의 적용 연구도 실시하고 있다(그림 5d).

최근 심각한 환경오염으로 인한 해로운 세균이나 바이러스(메르스), 일본 방사능 누출, 사건사고 등으로 우리 건강과 안전을 위협하는 인자들에 쉽게 노출된 상황이며, 이러한 문제는 국가·사회적 현안문제로 대두되고 있다. 이에 따라 다양한 유해요소로부터 안전성이 확보되고 다기능성(항균, 방오, 차폐, 흡수, 보호, 고강도 등)을 동시에 가지며 인체 친화적인 특성을 갖는 나노하이브리드 기술을 적용한 미래형 소재 기술 개발이 시급한 상황이다. 이러한 문제를 해결하고자 본 연구실에서는 친환경적으로 미생물을 사멸시키거나 미생물이 코팅 표면에 부착하지 못하는 환경을 조성하여 미생물을 퇴거하는 방식으로 항생 효과를 발휘하는 신개념 생체 항균 접

착소재를 개발하고 있다(그림 6).

### 3. 스마트 섬유 · 고분자 복합소재 연구실 현황

한국과학기술연구원 전북분원 복합소재기술연구소의 스마트 섬유·고분자 복합소재 연구실은 정용채 박사의 지도 하에 박사후 연구원 2명, 연구원 1명, 박사과정 1명, 석사박사통합과정 1명 그리고 석사과정 1명이 앞에 소개한 다양한 연구분야에서 차세대 핵심 미래 복합소재기술 개발을 위한 연구를 활발히 진행하고 있다. *Advanced Materials*, *Advanced Functional Materials*, *Macromolecules*, *Macromolecular Rapid Communications*, *Small*, *Carbon*, *ACS Nano*, *Journal of Materials Chemistry B* 등 재료 분야의 권위 있는 국제학술지에 다수의 논문을 게재하는 등 현재까지 60여 편의 SCI 논문 출판, 20여 편의 국내/외 특허를 출원/등록 실적을 달성하였다.

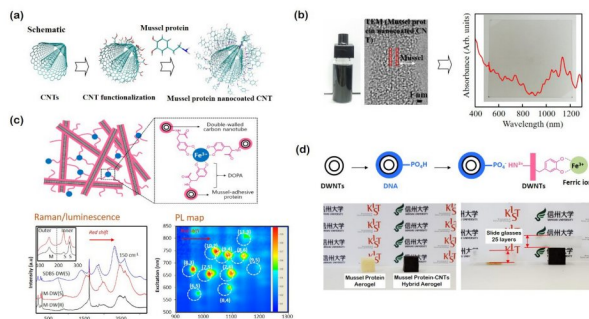


그림 5. (a) 탄소나노튜브 표면의 단백질기능화 개념도, (b) pH 감응형 CNT-융합접착단백질 기반 자가복원 나노복합소재, (c) 접착단백질로 분산된 이중벽 탄소나노튜브(DWNT)와 금속이온( $\text{FeCl}_3$ ) 복합체의 모식도, (d) 접착단백질기반 탄소에어로겔.

### 인체친화적 천연 항균/방오 펩티드 조합의 구조 설계 및 평가

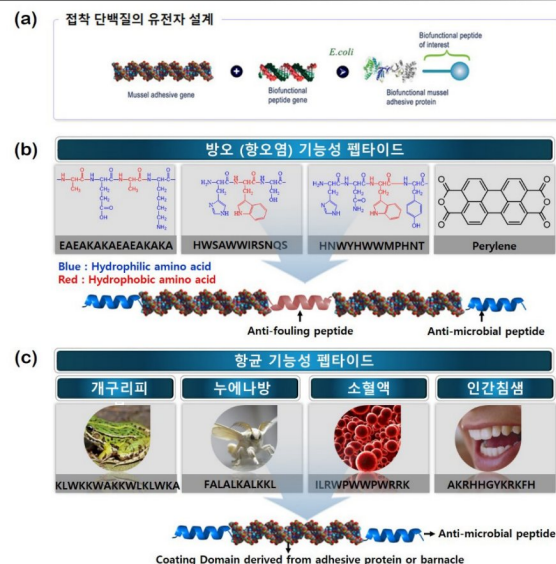


그림 6. (a) 항균 접착 단백질 유전자 설계 과정 개요도, (b) 항오염 펩티드, (c) 항균 펩티드가 기능화된 접착단백질의 개념도.

### 4. 연구진 소개



**김영오**  
| 박사후 연구원  
e-mail : zerofive@kist.re.kr  
펩타이드 자기조립제어 및 응용



**하유미**  
| 박사과정  
e-mail : T14226@kist.re.kr  
자가치유 고분자복합체 합성 및 응용, 탄소기반 나노복합체 합성 및 구조물성



**임다운**  
| 연구원  
e-mail : limda0439@gmail.com  
1D, 2D 나노카본의 합성과 분광 분석, 기능성 나노섬유제조 및 응용



**김영남**  
| 석박통합과정  
e-mail : T15930@kist.re.kr  
마이크로캡슐기반 자가치유 고분자복합체, 초임계유체활 나노소재합성 및 응용



**고영일**  
| 박사후 연구원  
e-mail : T16278@kist.re.kr  
나노탄소 기능화 및 복합화, 섬유고분자 구조 및 물성



**이솔이**  
| 석사과정  
e-mail : T16150@kist.re.kr  
단백질기반 나노탄소의 분산/분리 및 응용, 투명전도성 필름제조 및 응용