

산학연 연구실 소개

송실대학교 지능형 초분자 나노재료연구실 (Smart Supramolecular Nanomaterial Laboratory: SSNL)

주소: 서울특별시 동작구 상도로 369, 송실대학교 공과대학 유기신소재·파이버공학과 (우: 06978)

전화: 02-828-7047 FAX : 02-817-8346

E-mail: jwchung@ssu.ac.kr, Homepage: <http://ssnl.ssu.ac.kr>



연구책임자 | 정재우 교수
송실대학교
유기신소재·파이버공학과

1. 연구실 소개

2013년 송실대학교 공과대학 유기신소재·파이버공학과에 신설된 “지능형 초분자 나노재료연구실(Smart Supramolecular Nanomaterial Laboratory)”에서는 나노기술을 기반으로 자기집합(self-assembly) 및 분자인식(molecular recognition) 과정으로 형성되어진 유기초분자 및 유/무기 하이브리드 초분자를 개발하고 이를 활용하여 자가치유 재료 및 다중 응답형 스마트 신소재를 개발하는 연구를 실시하고 있다. 자가치유 재료는 “외부환경에 의해 손상을 입은 고분자가 스스로 결합을 감지하여 자신의 구조를 복구함은 물론 원래의 기능을 회복할 수 있는 지능형 재료”로 최초 자연계 생체 시스템이 스스로 복구되고 치유되는 것을 모방한 대표적 생체 모사 시스템이다. 재료의 손상은 재료자체의 물성과 기능의 손실을 야기하고 전체 제품의 내구성과 성능 지속성에 막대한 영향을 미치므로 송실대학교 지능형 초분자 나노재료연구실에서는 손상을 억제함은 물론 재료가 지닌 구조와 기능에 대해 근원적 복구가 가능한 자가치유 재료를 개발하고자 많은 노력을 기울이고 있다. 뿐만 아니라 온도 및 광에 의해 화학결합의 형태나 자기조립의 특성, 분자의 배향 또는 나노/마이크로 구조의 변화가 정교하게 조절된 스마트 초분자를 개발하여 약물전달체 및 바이오센서 등에 응용하고자 하는 연구를 활발히 진행하고 있으며, 나노미터 수준에서 구조가 정밀하게 제어된 지능형 초분자 재료의 기능 발현 메커니즘을 규명하기 위해 고차원적 기기분석을 이용하여 구조의 정확한 해석과 이해 및 물리적/기계적 특성 또는 기능성과의 상관성을 규명하는 연구를 진행하고 있다. 특히 재료의 화학적 구조와 분자 환경에 의해 발현된 분자의 거동을 분자 동역학적 입장에서 이해함으로 새로운 지능형 초분자 나노재료를 개발하기 위한 근간을 마련하고자 하는 노력을 기울이고 있다.

이를 위해 본 연구실은 크게 (1) 초분자형 자가치유 소재, (2) 자극감응형 기능성 소재, (3) 초분자형 고분자 구조-물성 해석의 세가지 분야에 대해 연구를 진행하고 있으며, 최근에는 분자 상호인력과 운동성 간의 모순으로 기인된 자가치유 재료의 한계를 극복할 수 있는 다중동적결합 네트워크구조를 제시하여 상온에서도 무한반복적으로 치유될 수 있는 신개념 소재를 개발하고 이에 대한 특성을 확인하는 연구를 진행하고 있다. 뿐만 아니라, 고차가치구조형 고분자 및 성형 고분자와 같은 비선형 고분자를 이용한 대체 가소제 개발, 나노구속환경(nano confined surrounding)에서의 1차원 고분자 재료의 구조-물성 해석 연구를 실시하여 기존에 보고되지 않았던 새로운 현상을 확인하는 등 다양한 연구를 진행하고 있다. 이러한 노력들은 기존 스마트 소재와는 차별된 신기능과 우수한 물성들을 발현시킬 수 있으며 이들에 대한 구조-물성 상관관계의 근원적 이해를 통해 미래 사회에 핵심이 되는 소재로 발돋움하길 기대하고 있다.

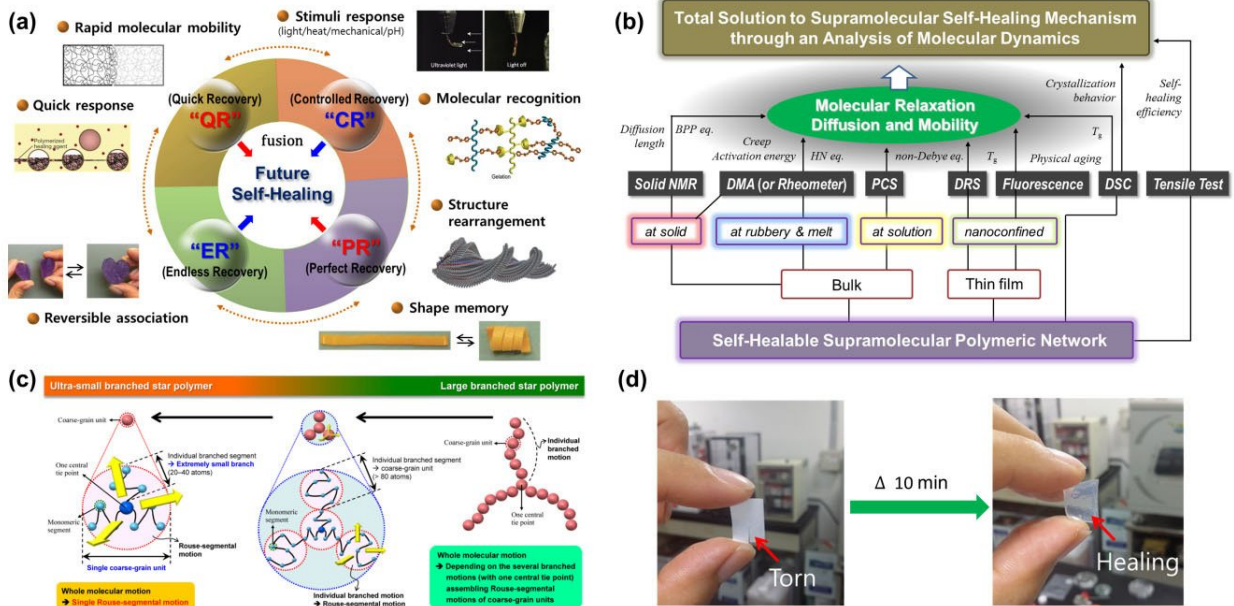


그림 1. (a) 연구실의 초분자형 자가치유소재 개발 방향, (b) 분자운동성과 완화가동 해석을 통한 초분자 나노재료의 구조-물성 관계 분석, (c) 동적점탄성 거동 분석을 통한 고분자 사슬구조 및 분자운동성 해석, (d) 개발된 초분자형 자가치유소재의 파단-치유 이미지.

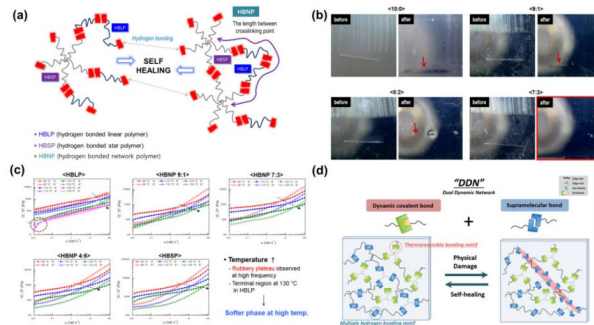


그림 2. (a) 초분자형 자가치유 고분자 구조 개념도, (b) 초분자형 자가치유 네트워크 구조제어에 따른 손상-치유 결과, (c) 동적점탄성 거동분석을 통한 초분자형 자가치유 네트워크의 치유 메커니즘 해석, (d) 다중동적결합 유도 네트워크 모식도.

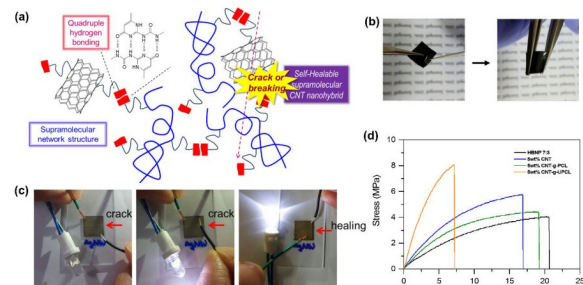


그림 3. (a) 초분자형 나노복합 자가치유 소재의 구조 모식도, (b) 초분자형 자가치유 복합소재의 파단(왼쪽) 및 치유(오른쪽) 이미지, (c) 메달나노와이어 복합화를 통한 손상 감지와 치유 테스트, (d) 초분자형 자가치유 복합소재의 기계적 거동.

2. 주요 연구 분야 소개

2.1 초분자형 자가치유 소재

자가치유 재료란 손상에 대해 재료 스스로 구조 및 기능을 복원하는 지능형 재료로 초분자 네트워크형 자가치유 재료의 경우 비공유결합을 바탕으로 한 올리고머 및 고분자에 초분자 형태의 네트워크 구조를 형성시켜 외부충격에 의한 파단시 분자인식(molecular recognition) 및 분자 재배치(rearrangement)를 통해 분자 간 상호작용력을 재형성시켜 단일 치유 뿐 아니라 반복적 치유도 가능케 하는 신개념 소재이다.

본 연구실에서는 다중수소결합체를 이용해 열가역적 자가치유 특성을 갖는 초분자 네트워크를 개발하였으며(그림 2b) 10회 이상의 스크래치에도 마이크로 단위까지의 치유가

이루어지는 스마트 소재를 개발한 바 있다. 뿐만 아니라, 초분자형 탄소나노튜브 복합체를 이용하여 기존 자가치유 재료의 한계를 극복한 고강도의 반복적 자가치유 재료를 개발하는 연구도 진행하고 있다(그림 3a, b). 특히, 초분자형 나노복합 자가치유재료 제조를 통해 전기적 신호로 파단과 치유의 감지가 가능한 지능형 소재를 개발하였으며, 다양한 구조 변수를 유도하여 반복적 자가치유가 가능한 초분자형 자가치유 재료의 구조 파라미터를 제시한 바 있다. 또한 동적점탄성 거동 분석을 통해 이들의 자가치유 메커니즘을 규명하고 있으며, 최근에는 자가치유 특성의 단순한 확인을 넘어 자가치유 기술을 산업적으로도 적용하기 위해 자가치유가 가능한 분리막 연구를 실시하고 있다. 이를 통해 수증기 부유물에 의해 손상을 입어 분리 성능이 크게 감소되었던 분리막 성능이 크게 개선되리라 기대된다.

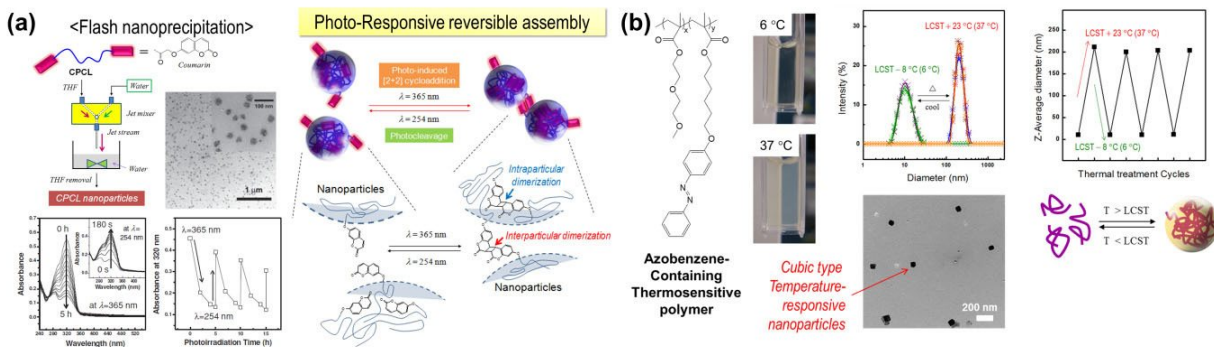


그림 4. (a) 쿠마린 도입형 광감응 나노입자, (b) 아조벤젠 및 온도 감응형 고분자의 융합을 통한 다중 자극-감응성 나노입자.

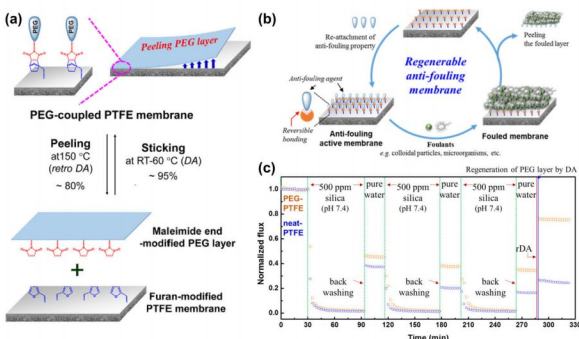


그림 5. (a) 열에 의한 PEG-PTFE 분리막의 peel-and-stick 모식도, (b) 열감응성 동적결합 적용 분리막 파울링 회복 연구, (c) 열감응성 동적결합이 적용된 분리막의 파울링 회복 결과.

2.2 자극감응형 기능성 소재

자극감응형 고분자는 온도, pH, 압력, 습도, 빛의 조사나 전자기장과 같은 외부환경의 변화에 따라 물질의 물리적/화학적 성질이 변화하는 특징을 가지고 있으며, 자극의 변화 정도에 따라 특성의 조절이 가능하여 다채로운 응용 가치를 지니고 있다. 본 연구실에서는 가역적 동적 결합 및 주게-반게 (host-guest) 상호작용, cis-trans 포토크로미즘(photochromism) 등을 이용하여 다중자극에 응답성을 지닌 유기 혹은 유기 하이브리드형 초분자를 개발하고 있으며, 특히 온도 및 광에 의해 나노입자의 자기집합 유도 특성 조절이 가능한 소재에 대해 연구를 진행하고 있다.

2.3 초분자형 고분자 구조-물성 해석

자가치유형 고분자의 치유효율은 결합강도 뿐만 아니라 분자사슬의 확산, 원화거동 및 분자운동성에 크게 영향을 받으며 이로 인해 자가치유는 파단 뒤 재결합까지의 동적 시간 등 분자의 동역학적 움직임에 좌우된다는 사실이 밝혀지고 있다. 즉, 우수한 초분자형 자가치유 고분자를 구현하기 위해서는 결합강도와 분자운동성이 최적화된 분자구조를 설계하고 이들의 구조-물성 상관관계를 밝히는 것이 매우 중요하다 할 수 있다. 이에 본 연구실에서는 자가치유 과정에

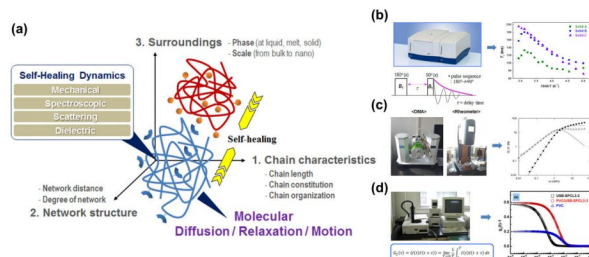


그림 6. (a) 다차원적 구조/환경/분석 요소를 기반으로 초분자형 고분자 네트워크의 자가치유 동역학 확립, (b) 고체자기공명, (c) 동적점탄성, (d) 광산란을 통한 초분자형 고분자 네트워크 자가치유 동역학 해석.

대한 심층적 이해를 위해 모델 초분자형 자가치유 고분자 네트워크를 설계 및 제조하고 다차원적 구조-환경-분석 요소를 접목시켜 사슬의 구조 및 물성과 스케일에 따른 자가치유 특성을 고찰하고 있다. 최근에는 고분자 사슬의 강직도, 화학구조, 가교구조 등 최적의 자가치유 능력을 발현시키기 위한 분자구조를 찾아 이들이 가지는 치유현상에 대해 유변학적 거동과 분자 운동성 해석으로 규명하려는 연구를 진행하고 있다. 뿐만 아니라 자가치유 고분자의 고체자기공명, 광산란, 형광 흡수-방출, 유전률 거동에 대한 분자 동역학적 해석 기법을 적용하여 초분자형 고분자 네트워크의 자가치유 메커니즘을 근본적으로 규명하는 연구를 진행해 나가고 있다.

더 나아가 고분자 나노소재의 크기에 따른 나노구속효과(nanoconfinement effect)에 대해서도 연구를 진행하고 있다. 일반적으로 고분자의 나노구속효과에 따른 유리전이온도의 감소 현상은 나노소재의 크기 감소에 따라 자유 표면층의 비율이 상대적으로 증가하기 때문인 것으로 알려져 있는데, 1차원 고분자 나노재료의 경우에는 예상과 달리 일반적 나노구속효과와 반대되는 현상이 나타난다는 것이 보고된 바 있다. 이는 고분자 사슬이 나노구속환경에서 보다 높은 배향성을 지니기 때문일 것 이라고 예측되어지고 있으나, 현재 이를 뒷받침할 만한 연구가 매우 부족한 상태로 이에 대한 정확한 규명을 위해 본 연구실에서는 아직 가설 혹은 현상관찰 수준에 머물고 있는 1차원적 고분자 나노소재의 나

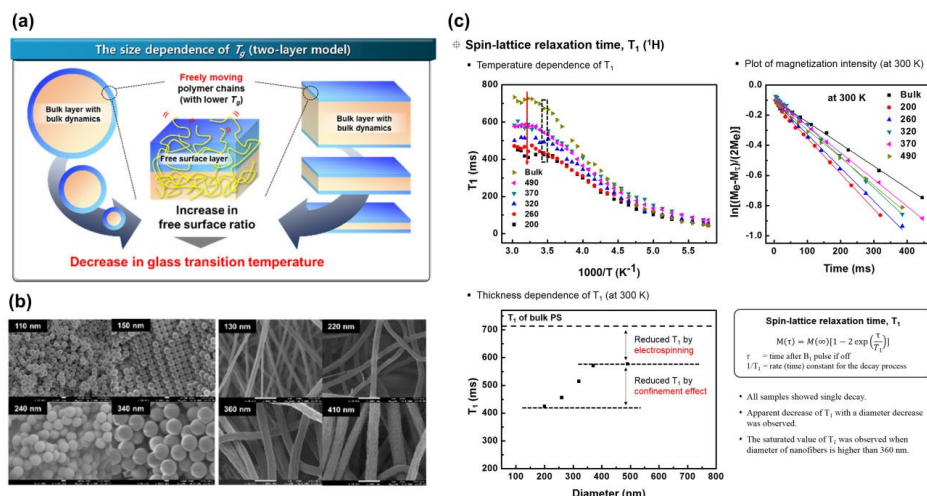


그림 7. (a) 3차원 및 2차원 고분자 나노재료의 크기 감소에 따른 유리전이온도 변화, (b) 다양한 크기별 3차원 및 1차원 고분자 나노재료 제조 결과, (c) 고체자기공명 분광법을 이용하여 얻은 1차원 고분자 나노재료의 나노구속효과에 따른 분자운동성 변이.

나노구속효과에 대해 심층적 연구를 수행하고 있다. 실제로 1차원 고분자 나노소재는 크기에 따라 결정 및 비정질 사슬의 미세구조 변화가 일어나고 열/화학적 안정성과 내부 도입된 약제의 유출성 등 기초적인 성질이 매우 크게 달라지는 것을 확인하였으며, 이러한 나노구속효과에 대한 관찰은 1차원 고분자나 나노재료의 응용에 매우 중요한 근간을 마련할 것으로 기대된다.

이외에도 고차가지구조형 폴리글리세롤(hyperbranched polyglycerol)의 분자구조를 조절하여 환경호르몬으로 작용하는 프탈레이트 가소제를 대체하고자 하는 연구를 진행한 바 있으며 그 결과의 우수성을 인정받아 최근에는 *Green Chemistry* 표지 논문으로 선정되기도 하였다. 이러한 연구를 확장하여 현재는 말단에 초분자력을 갖는 고차가지구조형 고분자를 제조하고 있고 이들을 이용하여 나노탄소재료의 분산성을 높이는 한편, 우수한 강도를 갖는 나노탄소 페이퍼를 제조하는 연구도 진행하고 있다. 특히 이러한 방법은

기존의 산처리 없이도 간단한 수계 방식으로 진행될 수 있어 매우 높은 환경적 가치를 가지고 있으며, 기존의 계면활성제로 처리하여 제조한 나노탄소 페이퍼에 비해 매우 우수한 기계적 강도를 지니므로 항공체나 우주탐사선, 특히 전자기장에 대한 차폐 성능이 필요한 분야에 많은 활용이 기대되고 있다.

3. 지능형 초분자 나노재료 연구실 현황

송실대학교 유기신소재·파이버공학과와 지능형 초분자 나노재료 연구실은 정재우 교수의 지도 하에 석사과정 6명, 그리고 학부연구생 3명이 앞서 소개한 다양한 연구분야에서 차세대 핵심 미래 기술 개발을 위한 연구를 활발히 진행 중이며, 이를 바탕으로 한 초분자형 자가치유 및 자극감응형 기능성 소재의 개발과 나노구조-물성에 대한 이해는 미래 핵심 소재에 대한 기술적 근간을 마련해 줄 수 있을 것으로 기대한다.

4. 연구진 소개

 양주호 석사과정 e-mail : onionjuho@naver.com	 유문성 석사과정 e-mail : msyoo90@naver.com	 정성훈 학부연구생 e-mail : 93sungxoon@naver.com
 최서영 석사과정 e-mail : ingan9401@gmail.com	 이준형 석사과정 e-mail : tellez7745@gmail.com	 임새영 학부연구생 e-mail : syjj6514@naver.com
 신경원 석사과정 e-mail : kyungwon90@gmail.com	 김건원 석사과정 e-mail : rjsdnjs7@naver.com	 정혜인 학부연구생 e-mail : vjov00@naver.com