

산학연 연구실 소개

서울대학교 화학생물공학부 연성소재 나노물리 연구실

(Laboratory for Soft Material Nanophysics, Seoul National University)

주소: 서울특별시 관악구 관악로 1 302동 제2공학관 (우: 08776)

전화: 02-880-1505

E-mail: soyounkim@snu.ac.kr, Homepage: <https://soyounkim.snu.ac.kr>



연구책임자 | 김소연 교수

서울대학교
화학생물공학부

1. 연구실 소개

연성소재(soft materials)는 고분자, 나노입자와 같은 콜로이드, 액정, 저차원 탄소기반 물질 등을 포함하며, 경질재료(hard materials)와는 다르게 온도와 외부 응력에 의해 그 구조와 물성이 쉽게 변형 가능한 재료로서 전기 전자, 바이오, 화장품 등 다양한 산업 분야에 널리 사용되고 있다. 연성소재만이 갖는 특수한 성질의 해석은 나노스케일의 구조 분석에 기반한 연구로부터 출발한다. 서울대학교 공과대학 화학생물공학부의 '연성소재 나노물리 연구실'은 연성소재의 구조 및 물성에 대한 근본적인 이해를 바탕으로 미시적 수준의 나노 구조와 분자 거동을 벌크(bulk) 상에서 나타나는 물성과 연관 짓는 연구를 수행하고 있다.

이러한 연구를 위해서 다양한 산란 기술(scattering techniques)을 이용해 연성소재의 구조와 물성을 분석하고 있다. 주로 방사광 가속기 및 연구용 원자로 등의 빔라인에서 수행 가능한 다양한 산란 기반 실험(SAXS, WAXS, SANS, QENS 등)을 통해 광범위한 영역에서 나타나는 연성소재의 독특한 구조적 특성을 관찰하고, 이를 물리적, 유변학적 물성과 연관지어 해석하고자 한다. 이를테면 블록공중합체의 자기조립 특성과 박막상에서만 나타나는 고분자 사슬의 독특한 거동, 용액 내에서

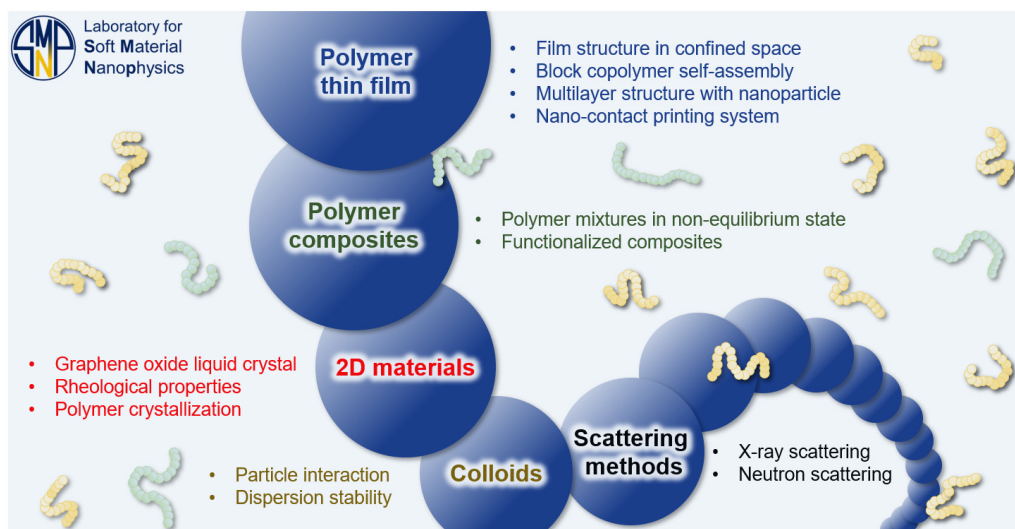


그림 1. 연성소재 나노물리 연구실의 주요 연구분야.

나타나는 입자의 분산성, 입자와 고분자 사슬 사이의 계면에서 일어나는 복잡한 물리적 거동이 그것이며, 유연학적 거동을 연관시킨 고분자 나노 복합체, 2차원 소재의 구조와 물성도 주요 관심사이다. 콜로이드 분산 및 고분자 물리 기반의 기초 연구를 수행하기 위해 국내외 여러 연구 그룹과 협력하고 있으며, 이들 시스템의 확장을 통한 응용 단계에서의 연구 또한 관련 기업체들과 함께 활발히 진행하고 있다.

2. 주요 연구분야

2.1 Polymer Nanocomposites and Colloids

나노 입자를 고분자 매트릭스에 고루 분산시켜 제작하는 고분자 나노복합체는 순수 고분자에 비해 향상된 전기적, 기계적, 열적, 광학적 물성을 갖는 복합 재료이다. 이러한 물성 향상은 입자 표면에 고분자가 흡착되어 생성되는 계면 고분자 층(interfacial polymer layer)에 의한 나노입자의 분산 정도에 영향을 받으며, 따라서 분산성을 결정하는 계면 고분자 층에 대한 이해가 중요하다. 계면 층 내의 고분자는 벌크(bulk) 상의 고분자와는 구별되는 구조적, 동역학적 성질을 가지고, 나노 입자 간 상호작용에도 영향을 미쳐 나노 입자의 미세 구조 및 재료의 최종 물성을 결정한다. 따라서, 본 연구자 그룹은 계면 고분자 층의 성질과 나노복합체의 최종 구조 및 물성 사이의 상관관계를 규명하여, 요구되는 물성 달성을 위한 최적의 가이드라인을 제시하고자 하는 연구를 수행중이다.

첫 번째로, 나노 입자 표면 개질에 따른 입자 분산성 및 물성 향상을 연구하고 있다. 일례로, 나노 입자 표면에 강하게 흡착하는 도파민 계열의 고분자를 이용하여 안정적인 계면 층을 형성한 나노복합체를 제작하였다. 그 결과, 도파민 계열의 고분자로 인해 나노 입자는 계층적 집합(agglomeration) 구조를 형성할 수 있었고, 도파민 계열의 고분자를 이용하지 않은 나노복합체와 비교했을 때 재료의 전단 물성이 100 배 이상 증가하였다. 또한, 계면 고분자와 매트릭스 고분자

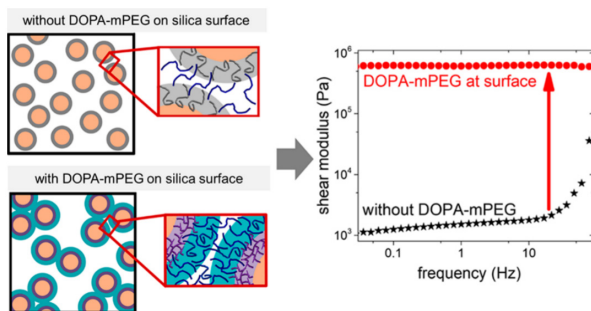


그림 2. 도파민 계열의 고분자(DOPA-mPEG)의 사용여부에 따른 고분자 나노복합체 내 나노 입자 미세 구조 및 전단 물성 결과(Reprinted with permission from *ACS Macro Lett.*, 2018, 7, 962. Copyright 2018, American Chemical Society).¹

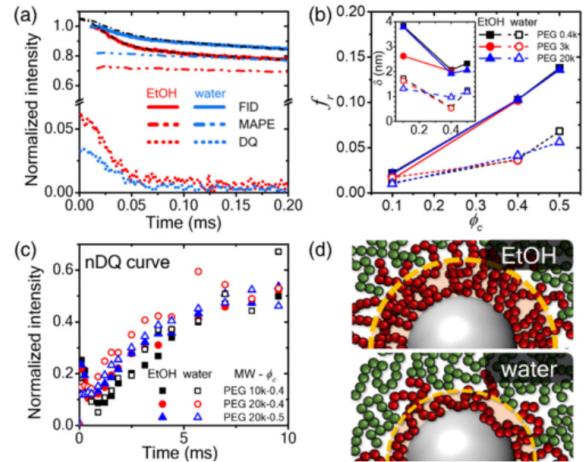


그림 3. (a) 용매의 종류에 따른 고분자 나노복합체의 $^1\text{H-NMR}$ 결과, (b) 흡착된 고분자(fr)의 분율 결과, (c) multiple-quantum (MQ) NMR 실험 결과, (d) 용매의 종류에 따른 계면 고분자 층 두께(Reprinted with permission from *Phys. Rev. Lett.*, 2019, 123, 167801. Copyright 2019, American Physical Society).²

사이의 길이 비율에 따라 나노 입자의 구조 및 물성이 극명히 달라지기도 하는 것을 확인할 수 있다. 현재는 다양한 체인 길이의 고분자 혹은 다양한 크기의 나노 입자를 이용함으로써 계면 고분자의 특징과 나노복합체의 최종 구조 및 물성을 연결짓고자 한다.

두 번째로, 나노복합체의 비평형 효과에 대한 연구를 진행하고 있다. 흔히 고분자 나노복합체를 제작할 때, 용매에 고분자와 나노 입자를 적절히 혼합한 후 용매를 모두 증발시켜 제거하는 방식을 취한다. 최근 연구에서는 최종적으로 재료의 종류와 분율이 같아 동일한 재료라고 여겨지는 고분자 나노복합체일지라도, 공정 과정에서 사용된 용매의 종류에 따라 계면 고분자 층의 두께가 다를 수 있음을 밝혔다. 이 결과는 고분자 나노복합체가 비평형 상태에 갇혀 있을 수 있음을 시사하고, 이 비평형 효과가 결과적으로 구조 및 물성에 큰 변화를 일으키는 주요 변수로 중요하게 고려되어야 함을 강조한다. 현재는 공정 조건과 고분자 나노복합체 시스템을 더욱 다양하게 확장하여 비평형 현상을 이해하는 연구를 진행하고 있다.

세 번째로, 최근 고분자의 환경적 문제, 즉 고분자의 우수한 물성이 야기하는 이면에 집중하는 연구를 시작하였다. 고분자 분해 및 재활용, 미세플라스틱의 문제 등에 접근하기 위해 분해성 고분자나노복합체를 디자인하고, 체인단위에서부터 벌크에 이르는 고분자의 거동 및 입자의 분산성 변화를 각각도로 해석하여, 고분자 가공 및 분해에 있어 가이드라인을 제공하고 자 한다.

2.2 Two-dimensional Material Colloids and Composites

넓은 면적 대비 얇은 두께를 가지는 2차원 재료는 그들의

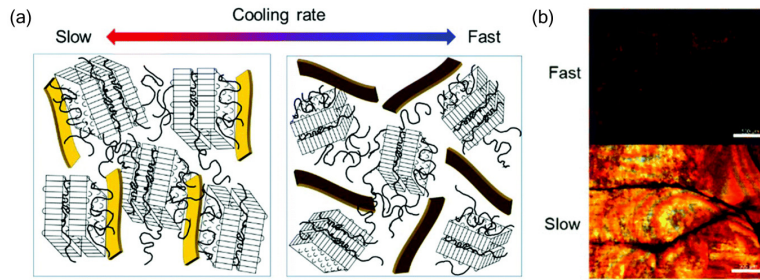


그림 4. (a) GO-고분자 복합체의 냉각속도에 따른 고분자 결정 구조와 GO 액정성의 개략도, (b) 냉각속도에 따른 GO-고분자 복합체 필름의 복굴절 이미지(Reproduced with permission from *Nanoscale*, 2021, 13, 2720. Copyright 2021, The Royal Society of Chemistry).³

배열 방향에 따라 그 재료의 특성과 최종 성능이 결정되기 때문에, 이를 이해하고 제어하려는 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 2차원 재료의 예로는 맥신(MXene), 클레이(clay), 질화 붕소(boron nitride), 그래핀(graphene), 산화 그래핀(graphene oxide, GO) 등이 있다.

그 중 산화 그래핀은 극성 용매에 대한 우수한 분산성 및 액정상 형성과 같은 특징들로 인해 2차원 콜로이드로서 많은 관심을 받아오고 있다. 뿐만 아니라, 환원 후에는 그래핀에 버금가는 높은 전기적/열적 전도성 및 뛰어난 물성을 확보할 수 있기 때문에 재료적인 측면으로도 주목을 끌고 있으며 이로 인해 고분자 복합체에서의 필러(filler)로서도 활용되고 있다.

본 연구실에서는 GO를 활용한 분산액과 이를 이용한 고분자 복합체의 나노 구조 및 물성에 대한 연구에 집중하고 있으며, 소각 X-선 산란(SAXS), 유변물성 측정기, 편광현미경 등을 이용한 복합적 분석을 진행하고 있다.

최근 연구 결과로는 냉각속도에 따라 고분자 결정화가 다르게 진행되기 때문에 GO-고분자 복합체 내의 GO 시트의 분산도와 정렬이 달라짐을 확인하였다. 빠른 냉각 속도는 고분자 결정이 벌크 고분자 매트릭스에서 무작위로 성장하며 결정화되도록 하는 반면, 느린 냉각 속도는 고분자가 GO 표면에서 우선적으로 결정화되도록 한다. 따라서 냉각 속도에 따라 GO-고분자 복합체 내의 GO 액정성 및 정렬도는 고분자 결정화 냉각 속도의 영향을 크게 받을 수 있음을 밝혔다.

현재는 냉각속도 이외에도 GO 분산액 및 복합체의 구조 및 물성에 영향을 미칠 수 있는 다양한 공정 조건(열처리, GO 종횡비, 전단력, 고분자 첨가 등)에 대한 더욱 심도 깊은 연구를 진행 중이며, GO 뿐만이 아닌 MXene과 같은 다양한 2D 입자의 분산성과 유변물성을 이해하는 연구도 진행하고 있다.

2.3 Block Copolymer Thin Films

블록공중합체는 서로 다른 종류의 고분자 사슬이 공유결합을 통해 연결되어 있는 물질로, 미세상분리 과정을 통해 다양한 크기 및 형태의 나노구조를 형성하는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 블록공중합체의 미세상분리를 박막 상태에

서 유도하여 여러 형태의 나노패턴을 제작할 수 있으며, 리소그래피와 같은 기존의 기술들에 비해 공정이 간단하고 저렴한 장점으로 인해 나노패턴에 높은 수요를 보이는 다양한 첨단분야(광소자, 광전소자, 플라스모닉소자 및 전자소자를 활용하는 분야들)에서 각광받고 있다. 본 연구실에서는 블록공중합체가 박막에서 미세상분리 현상을 보일 때 얻어지는 구조의 제어 및 변이, 그리고 계면에서 일어나는 자기조립 및 이에 대한 응용 연구를 수행하고 있다.

우리 연구그룹은 블록공중합체에 전단 응력을 가하고 연속적으로 용매 어닐링 공정을 수행함으로써 대면적에서 블록공중합체 선(line)패턴을 완벽하게 정렬시키는데 성공한 연구를 보고한 바 있다. 이전까지 전단 응력을 가하는 것만으로는 한계가 있었던 미세 결합 구조의 제거를 용매 어닐링을 추가적으로 수행함으로써 이뤄낼 수 있었고, 금속선으로의 치환을 통해 차세대 광전소자에 대한 적용 가능성을 보였다. 더 나아가 이와 같은 공정들을 응용하여 블록공중합체 점(dot)패턴을 단결정 구조로 대면적에서 만들고 이를 활용하는 연구, 패턴의 격자구조 변화를 일으키는 연구를 진행 중에 있으며, 이를 통해 블록공중합체 박막의 패턴 제어에 필수적인 이해를 관련 산업 및 학계에 제공하고자 한다.

뿐만 아니라 물-공기 계면에서의 자기조립 현상을 이용한 나노패터닝에 관련한 연구 또한 보고하였다. 물-공기 계면에서 블록공중합체가 분자량, 표면압과 같은 요인에 의하여 패턴크기, 간격 등이 바뀐다는 것을 확인하였고 적절한 물-공기 계면층을 계면에너지 조절에 활용하여 블록공중합체 나노패터닝에 성공적으로 적용하였다. 물-공기 계면층을 이용한 계면에너지 조절은 기관의 형태와 물질에 영향을 받지 않기에 더욱 다양한 분야에 적용이 가능하다는 장점이 있다. 이를 확장하여, 계면 자기 조립된 블록공중합체의 패턴 복잡화 및 이에 대한 매커니즘을 연구하고 있다.

3. 연구실 현황 및 비전

연성소재 나노물리 연구실은 2014년에 설립되어 연구를 진행해왔으며 2021년에 서울대학교 화학생물공학부로 이

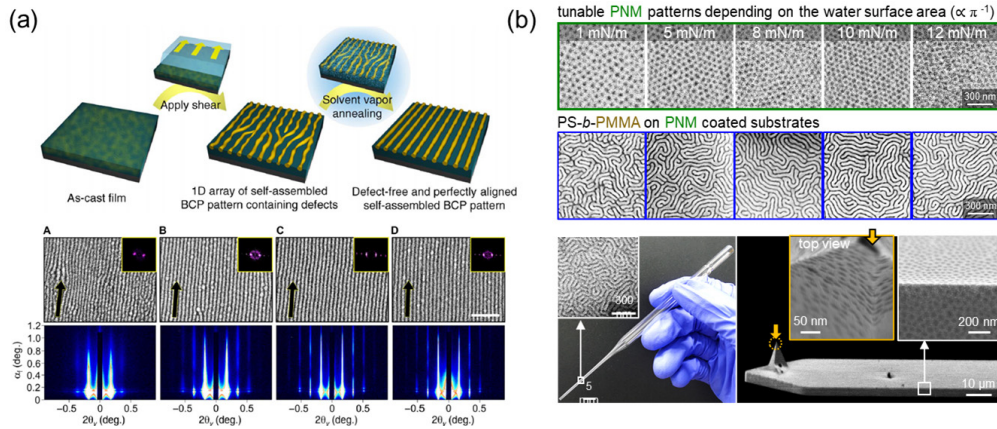


그림 5. (a) 전단 응력-용매 복합 공정으로 블록공중합체 선패턴에서 나타나는 구조적 결함을 효과적으로 감소시킨 연구(Reprinted with permission from *Sci. Adv.*, 2019, 5, 2375. Copyright 2019, American Association for the Advancement of Science),⁴ (b) 물-공기 계면 블록공중합체 자기조립 현상과 계면 에너지 조절을 통한 블록공중합체 나노패터닝(Reprinted with permission from *ACS Nano*, 2020, 14, 7140. Copyright 2020, American Chemical Society).⁵

전하여 연구활동을 이어가고 있다.

본 연구실은 김소연 교수의 지도하에 현재 박사 후 연구원 3명, 석박사 통합과정 5명, 박사과정 2명, 학부 인턴 4명으로 구성되어 있으며, 자유로운 연구환경이 조성되어 구성원 간의 창의적인 아이디어 교류가 활발히 이루어지고 있다. 앞서 언급한 다양한 연구내용들을 저명한 국제 학술지에 발표해왔으며, 다양한 국내외 학술대회에 활발히 참석하며 학술 활동을 꾸준히 이어오고 있다. 또한, 현재 연성소재 연구실은 다양한 국가 및 산학과제를 수행중으로 한국연구재단, 삼성전기 등에서 연구비를 지원받고 있다.

앞서 소개한 것처럼 본 연구실은 다양한 연성소재 및 이를 활용한 시스템에서 나노수준 물질 거동을 이해하고, 이를 벌크에서의 거시적 물성과 연관시키는 연구를 수행해 오고 있다. 특히, 다양한 산란 기술을 활용하여 콜로이드, 복합체 및 박막 상의 나노입자 및 고분자가 만드는 구조 및 동역

학(dynamics)을 체계적으로 이해하는 데에 중점을 두며, 궁극적으로 연성소재가 만드는 다양한 시스템에서의 거시적 물성을 예측하고 엔지니어링(engineering)하고자 하는 목표를 가지고 있다.

참고문헌

1. N. K. Kwon, H. Kim, I. K. Han, T. J. Shin, H.-W. Lee, J. Park, and S. Y. Kim, *ACS Macro Lett.*, **7**, 962 (2018).
2. S. M. Oh, M. Abbasi, T. J. Shin, K. Saalwächter, and S. Y. Kim, *Phys. Rev. Lett.*, **123**, 167801 (2019).
3. S. J. Mun, Y. H. Shim, G. W. Kim, S. H. Koo, H. Ahn, T. J. Shin, S. O. Kim, and S. Y. Kim, *Nanoscale*, **13**, 2720 (2021).
4. Y. C. Kim, T. J. Shin, S.-M. Hur, S. J. Kwon, and S. Y. Kim, *Sci. Adv.*, **5**, 2375 (2019).
5. D. H. Kim and S. Y. Kim, *ACS Nano*, **14**, 7140 (2020).

