

산학연 연구실 소개

충남대학교 응용화학공학과 고분자 합성 및 공정 실험실

(Polymer Synthesis and Engineering Lab, Chungnam National University)

주소: 대전 유성구 대학로 99 충남대학교 W3-453
 전화: 042-821-7009, E-mail: kjlee@cnu.ac.kr
 홈페이지: <https://sites.google.com/view/kjleelab/home>



연구책임자 | 이경진 교수
 충남대학교 응용화학공학과

1. 실험실 소개

최근 고분자 연구는 분자 구조와 미세구조를 정밀하게 설계하여 새로운 기능을 구현하고, 이를 센서·에너지·광학 구조체 등 다양한 응용으로 확장하는 방향으로 발전하고 있다. 특히 친환경 공정과 자극 반응형 고분자 설계, 미세 패턴 및 광학 구조 기반 신호 플랫폼 개발이 주요 연구 흐름으로 자리 잡고 있다.

고분자 합성 및 공정 실험실은 이러한 연구 동향에 맞추어 고분자의 구조-화학-공정 기술을 통합적으로 다루며, 기능성 박막, 반응성 TPU, 광학 기반 복합 구조체, 에너지 소재 등 다양한 고분자 시스템을 개발하는 연구를 수행하고 있다.

본 연구실은 chemical vapor deposition(CVD)을 이용해 poly(para-xylylene) 계열 박막과 미세 구조체를 합성하고, 전구체 조성과 공정 조건 제어를 통해 표면 특성, 두께, 형태를 정밀하게 조절한다. 이러한 vapor-phase 공정은 용매 없이 균일한 박막 형성이 가능하여 센서, 바이오 인터페이스, perovskite 소자, TFT 구조체 등 전자·에너지 응용으로 확장 가능한 기반을 제공한다.

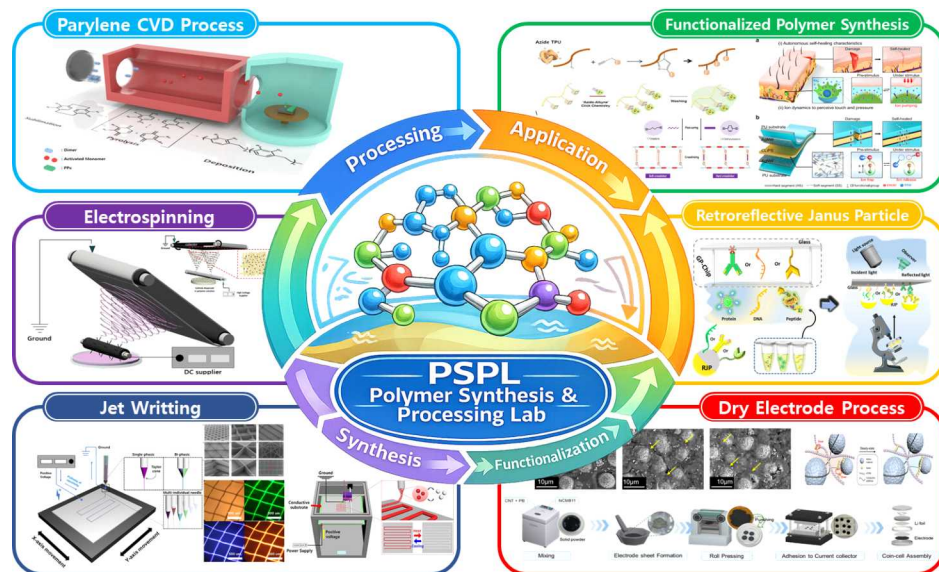


그림 1. 고분자합성 및 공정실험실의 주요 연구 분야.

열가소성 폴리우레탄(TPU) 연구에서는 사슬 구조 조절과 반응성 기능기 도입을 통해 소재의 기능성을 확장하고, azo 및 vinyl 기능기를 활용한 click 반응으로 네트워크 조성과 구조적 응답성을 정밀하게 설계함으로써 외부 자극에 대한 반응성을 제어한다.

복합 구조체 및 입자 연구 분야에서는 retroreflective Janus particles(RJP) 기반 미세 구조체와 microstructured optical probes를 제작하고, polymer brush 및 계면 화학을 활용해 생체분자 결합을 가시적인 광학 신호로 변환하는 biosensing 시스템을 개발하고 있다. 이러한 연구는 인공지능(AI) 기반 신호 분석과 결합되어 휴대형 바이오 센서 플랫폼으로 확장되고 있다.

Electrospinning 기반 나노섬유 연구에서는 콜로이드 전기방사를 통해 기능성 입자를 도입한 다공성 구조체를 제작하고, 이를 리튬이온배터리용 나노섬유 분리막 등 에너지 소재로 확장하고 있다. 또한 electrohydrodynamic 기반 jet-writing 공정을 활용해 센서 및 마이크로디바이스 응용에 적합한 구조체를 구현하고 있다.

아울러 용매를 사용하지 않는 solvent-free electrode 공정을 개발하여 전극 제조 과정에서의 에너지 및 비용 소모를 줄이고, 비불소계 바인더 적용을 통해 리튬이온배터리 제조 공정의 환경성과 생산성을 동시에 개선하는 연구를 수행하고 있다.

이와 같이 고분자합성 및 공정실험실은 vapor-phase 박막, 기능성 TPU 기반 구조체, Janus 광학 입자, electrospun 나노섬유, jet-writing 패턴, 건식 전극 공정에 이르기까지 고분자 시스템의 구조 제어와 응용 기술을 폭넓게 연구하며, 차세대 기능성 소재 개발에 기여하고 있다.

2. 주요연구분야

2.1 TPU(Thermoplastic polyurethane)

열가소성 폴리우레탄(TPU)은 연질 및 경질 세그먼트로 구성된 블록 공중합체로, 분자 구조 설계를 통해 물성, 가공성, 기능성을 폭넓게 조절할 수 있는 고분자 소재이다. 이러한 특성을 바탕으로 TPU는 기능기 도입과 네트워크 제어를 통해 다양한 반응성을 구현할 수 있는 플랫폼으로 활용된다.

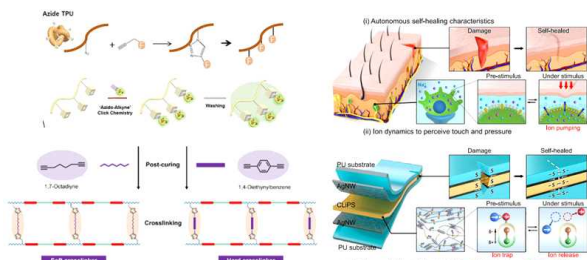


그림 2. Click chemistry를 통한 TPU의 기능화와 piezo-ionic 동역학을 보이는 iontronic skin 모식도.

본 연구실에서는 azide 및 vinyl 기능기를 도입한 TPU에 click 반응을 적용하여 염료, 하이단토티인 계열 작용기, 금속 반응성 치환기 등을 선택적으로 도입하고, chromic TPU, 표면 기능화 TPU, 반응성 및 post-crosslinkable TPU 시스템을 구현하였다. 이를 통해 가공 이후 기계적 특성 조절 가능성을 확인하였다.

또한 TPU foam 연구에서는 polyol 조성, segment 비율, blend 구성 및 VIPS 기반 기공 설계를 통해 압축 복원력과 탄성을 조절한 다공성 구조체를 개발하였으며, 최근에는 self-healing, leak-proof, mechano-responsive elastomer 및 iontronic skin 등 감응형 polyurethane 소재로 연구를 확장하고 있다(그림 2).

2.2 재귀반사 야누스 입자(RJP) 기반 생체분자 검출 센서

Retroreflective Janus particles(RJP)는 금속 반구(Au, Al)와 SiO₂ 반구로 이루어진 비대칭 구조의 입자로, 입사광 조사 시 금속 반구에서 재귀 반사 신호를 생성한다. 표적 생체분자가 RJP와 기관에 고정된 인식 분자에 의해 특이적으로 결합하면 입자의 방향성이 정렬되어 가시적인 신호가 관측되며, 형광 표지나 PCR 증폭 없이 신속한 검출이 가능하다.

본 연구실에서는 Stöber 방법을 이용해 균일한 크기의 SiO₂ 기반 RJP를 제작하고, 일반적인 광학 장비만으로 신호 관측이 가능한 검출 시스템을 구축하였다. 약 30분 이내에 DNA, 단백질, 펩타이드 등 다양한 target 분자를 검출하였으며, 검출한계(limit of detection, LOD)는 약 1 μM 수준이다.

또한 polymer brush 및 click chemistry 기반 계면 설계를 통해 RJP 표면의 관능기 밀도를 제어하여 생체분자 결합 효율을 향상시켰고, 이를 바탕으로 재귀 반사 신호 기반 센서 플랫폼을 구현하였다. 현재는 인공지능 기반 신호 분석을 결합한 휴대형 센서로 연구를 확장하고 있다(그림 3).

2.3 Electrospinning

Electrospinning은 고분자 용액에 고전압을 인가해 나노 섬유를 제조하는 기술로, 우수한 다공성 구조를 갖는 섬유

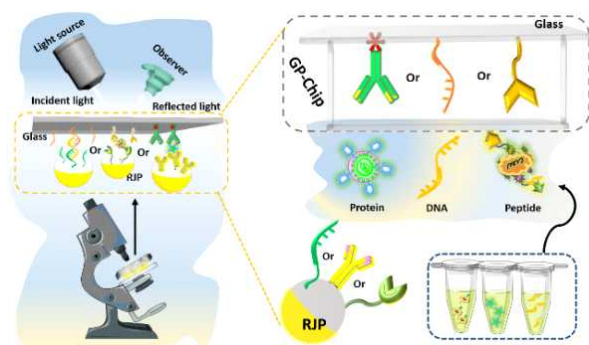


그림 3. RJP 프로브를 기반으로 한 생체분자 검출 방법 개략도.

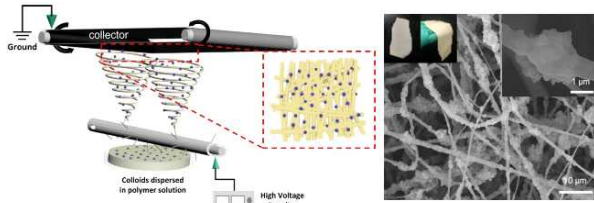


그림 4. Syringeless electrospinning을 이용한 콜로이드 전기방사 공정 개념도 및 제조된 나노 섬유 구조.

막을 형성할 수 있어 필터, 기능성 막, 분리막 분야에 활용된다. 본 연구실에서는 기존 syringe 기반 공정의 노즐 막힘 및 낮은 생산성 문제를 개선하기 위해 syringeless electrospinning 공정을 도입하여 대면적 나노섬유 막을 안정적으로 제조하고 있다.

Syringeless electrospinning은 콜로이드 용액에서도 안정적인 섬유 형성이 가능해 다양한 유·무기 기능성 물질 도입에 유리하다. 이를 활용해 무기 입자가 균일하게 분산된 복합 나노섬유 막을 제조하고, 독성 물질 흡착 성능을 평가하였다. 또한 리튬이온배터리용 분리막으로의 응용을 통해 전해액 흡수 특성과 기공 구조 제어에 따른 전기화학적 성능 향상을 목표로 연구를 수행하고 있다(그림 4).

2.4 EHD Jet Writing

본 연구실은 기존 electro-hydrodynamic(EHD) jetting 공정에서 전압 극성을 반대로 인가하는 charge reversal electro-jet writing(CREW) 기법을 통해, 정렬된 고분자 마이크로 섬유를 안정적으로 제조하는 기술을 보유하고 있다.

본 공정은 다양한 고분자에 적용 가능하며, 다중상 및 코어-셸 구조 등 복잡한 마이크로 섬유 구조 구현과 sectioning을 통한 마이크로 구조체 활용이 가능하다.

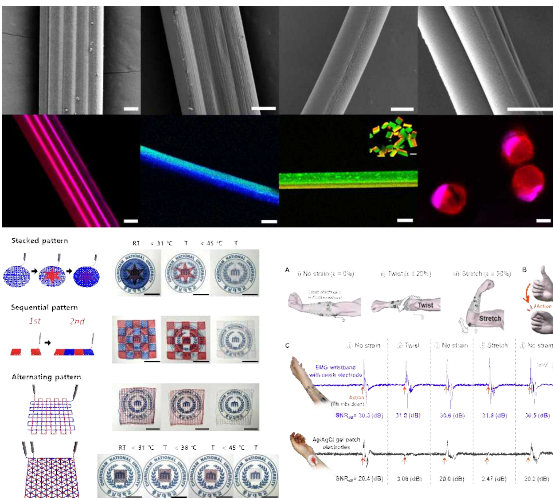


그림 5. CREW 방법으로 제조한 이등방성 고분자 마이크로 섬유 및 3D 프린터를 활용하여 제조한 다양한 패턴, 웨어러블 전자기기로의 활용.

또한 CREW 공정을 3D 프린팅과 결합해 고분자 마이크로 섬유 기반의 2D·3D 마이크로 구조체를 제조하고, 자성, 열변색, 이온 감지, 광 반응성, 액체속속 기반 전도성 등을 도입하여 센서, 웨어러블 전자기기, 암호화 분야로 연구를 확장하고 있다(그림 5).

2.5 리튬이온배터리용 비불소계 건식 바인더 개발

전기자동차 및 에너지저장시스템 확산에 따라 고성능 리튬이온배터리에 대한 수요가 증가하고 있으며, 제조 비용 절감과 환경성을 고려한 공정 연구의 중요성이 커지고 있다. 기존 NMP 기반 습식 공정의 한계를 극복하기 위해 건식 전극 공정이 주목받고 있으나, PTFE 기반 불소계 바인더 사용에 따른 환경 규제가 과제로 대두되고 있다.

본 연구실에서는 비불소계 요변성 바인더인 hydroxyl-terminated polybutadiene(HTPB)를 양극용 건식 전극에 적용하였다. HTPB 기반 전극은 우수한 가공성과 구조적 안정성을 보였으며, 가황 공정을 통해 요변성 거동과 전도성 네트워크 안정성이 더욱 향상되었다. GITT 분석과 접착력 평가에서도 우수한 성능을 확인하였고, HTPB 기반 전극은 PTFE 대비 향상된 사이클 특성을 나타냈다. 현재는 polyisoprene 기반 비불소계 바인더로 연구를 확장하고 있다(그림 6).

2.6 Parylene CVD-for Electronics

본 연구실은 CVD 공정을 통해 형성한 고분자 게이트 절연층을 산화물 TFT에 적용하여 기존 SiO₂ 및 용액 공정 고분자 절연층의 한계를 극복하고자 한다. 파릴렌 및 다양한 고분자를 활용해 핀홀 없는 균일한 박막과 낮은 누설 전류 특성을 확보하였으며, 작용기 도입 및 클릭 반응을 통해 유전 특성과 소자 성능을 조절하였다. 특히 hydroxyl기 도입 파릴렌은 반복 굽힘 조건에서도 안정적인 전기적 특성을 보여 플렉서블 소자 적용 가능성을 입증하였다.

또한 CVD 기반 조박막 형성 기술을 활용해 전자소자 계면

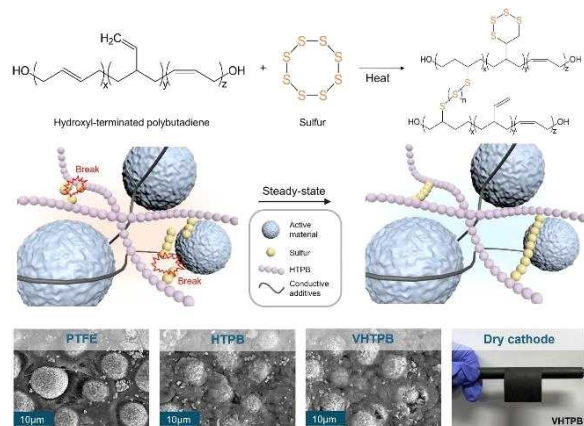


그림 6. 가황반응 및 건식공정 개요도.

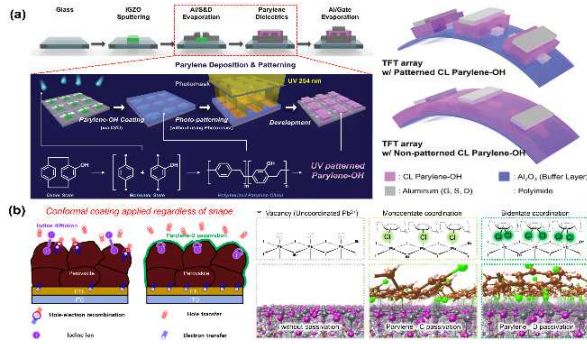


그림 7. (a) Parylene-OH의 photopatterning 공정 및 플렉서블 TFT 소자 적용, (b) parylene-D의 perovskite 계면 결합 패시베이션 효과.

특성 제어 연구를 수행하고 있으며, parylene-D 초박막을 적용해 정공전달층-페로브스카이트 계면에서의 이온 이동과 비방사 재결합을 억제하고 계면 결합 패시베이션 효과를 확인하였다(그림 7).

2.7 Parylene CVD-for Substrate Engineering

파릴렌 CVD의 가장 큰 장점은 상온에 가까운 저진공 조건에서 공정이 가능하므로 기판의 제약이 거의 없다는 점이다. 이에 따라 다공성 분리막, 탄성체, 금속, 얼음, 액체 등 다양한 기판에 적용이 가능하다. 다공성 기판에서는 pore blocking 없이 표면 개질이 가능하며, 탄성체에서는 free-volume을 따라 침투형 증착이 이루어진다. 또한 얼음을 기판으로 사용할 경우

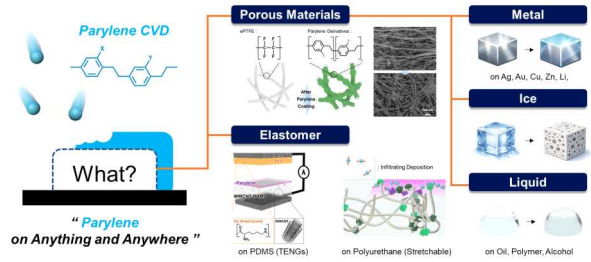


그림 8. Parylene CVD의 기판 엔지니어링.

승화 과정 중 다공성 구조체 형성이 가능하고, 특정 액체에서는 액체를 캡슐화하는 형태의 증착도 구현된다. 이러한 기판 엔지니어링을 통해 파릴렌 기판 기능성 부여 연구를 수행하고 있으며, 다양한 응용 분야로 확장하고 있다(그림 8).

3. 연구실 현황 및 비전

“고분자 합성 및 공정 실험실(PSPL)”은 액상 고분자 합성부터 기상 증착, 건식 공정, 입자 제조, 전기방사에 이르는 폭넓은 공정 스펙트럼을 기반으로 첨단 산업 분야 적용을 위한 연구를 수행하고 있다. 또한 이차전지, 반도체, 뉴로모픽, 재생에너지, 센서, 바이오 분야의 국내외 연구진과 협업을 통해 기능성 고분자 소재 플랫폼을 지속적으로 확장하고 있다.

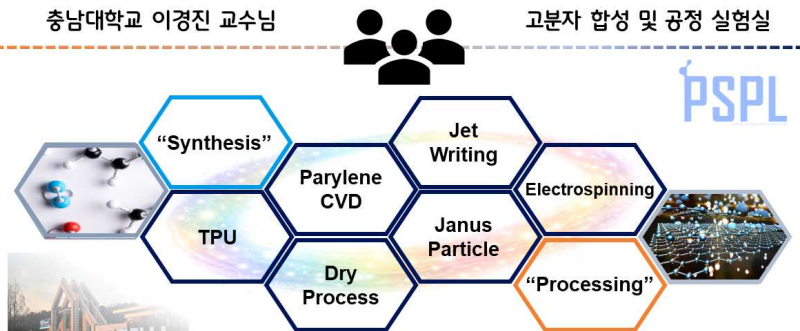


그림 9. 실험실 구성원 사진 및 연구 개요도.