산학연 연구실 소개(1)

서울대학교 화학생물공학부 고분자화학연구실
(Polymer Chemistry Lab., Seoul National University)

주소: 서울특별시 관악구 관악로 1 서울대학교 302동 730호 (우: 08826)
전화: 02-880-6989
E-mail: jongchan@snu.ac.kr, Homepage: http://pcl.snu.ac.kr

CCMP 코팅기반 화학공정 연구센터
Center for Coating Materials and Processing

연구책임자 | **이종찬** 교수
서울대학교
화학생물공학부

1. 연구실 소개

현대사회에서 고분자는 흔히 쓰이는 플라스틱에서부터 첨단 분야에 사용되는 고기능성 고분자에 이르기까지 우리 사회 전반에 걸쳐 사용되고 있다. 디스플레이, 반도체 공정, 에너지 저장 장치, 군사 및 항공 분야 등 고분자가 사용되지 않는 분야가 없을 정도로 고분자는 우리 생활에서 중요한 역할을 하고 있다. 하지만 각 분야에서 필요로 하는 고분자의 특성 및 성질은 다양하기 때문에 응용분야에 맞춰 고분자를 합성할 수 있는 기술이 필수적으로 요구된다. 본 연구실은 고분자 합성에 대한 기초지식과 기술 및 노하우를 보유하고 있으며 이를 중심으로, 사회 각 분야에서 사용될 수 있는 고분자를 합성 및 개발하고 있다.

본 "고분자화학연구실"은 1999년 설립된 이후 고분자 합성을 기반으로 하는 다양한 고분자 응용에 관한 연구를 수행해왔으며, 최근에는 리튬 이차전지용 고분자, 연료전지용 고분자 분리막 등 에너지 저장 장치와 관련된 고분자, 항균/방오 고분자, 그리고 수처리용 고분자 멤브레인 및 고분자 나노복합재료에 대한 연구를 다양한 국가 연구 개발 사업 및 산학 과제를 통하여 활발하게 진행하고 있다. 이와 같은 연구 활동을 통해 지금까지 225편의 논문을 게재하였으며, 183개의 국내외 특허를 출원 및 등록하였다.

2. 주요 연구 분야

2.1 연료전지용 고분자 전해질 막

연료전지는 수소와 산소를 원료로 하여 전기를 생산해 내는 친환경적인 에너지 생산방식으로 주목받고 있다. 현재 전지를 구성하는 요소 중 수소 이온을 전도시키는 전해질로써 고분자 소재가 많이 사용되고 있는 실정이다. 본 연구실에서는 현재 사용되고 있는 고분자 전해질의 단점을 극복하고 보다 높은 성능을 갖는 고분자 전해질을 합성하고 시험하고 있다. 최근에는 sulfonated polytriazole(SPTA)이 도입된 graphene oxide(GO)를 기존에 많이 연구되고 있는 sulfonated poly(arylene ether sulfone)(SPAES)막에 함침하여 성능을 측정하였다. 시험 결과, SPTA에 존재하는 sulfonic acid와 triazole 구조가 추가적인 수소 이온 전도 채널을 구성할 수 있음을 밝혀 내었고 실제로 해당 함침 막의 성능 실험 결과 기존의 SPAES보다 향상된 전도도 값을 얻을 수 있었다. 추가적으로, 이 함침 막을 이용하여 membrane electrode assembly (MEA)를 제작하고 80 ℃, 100% 상대 습도 조건에서 MEA test를 진행해 본 결과, 최대 전력 밀도가 약 1.58 W cm^{-2} 정도로 측정되어 같은 조건에서 현재 상용화되어 있는 Nafion 212(1.33 W cm^{-2})보다 우수한 성능을 보임을 또한 확인하였다(*J. Membr. Sci.*, 2020). 해당 연구 외에도 가교 구조, semi-IPN 구조 등의 구조적 변형을 이용한 연구 및 GO 외의 기타 여러 나노 물질을 개질하여 첨가제로 사용하는 등 연료전지용 전해질 막과 관련된 다양한 연구를 수행하고 있다.

2.2 리튬 이차전지용 고분자 소재

4차산업 혁명과 함께 모바일 전자기기, 전기자동차 산업이 크게 발전하면서 배터리 산업 역시 빠른 속도로 발전하고 있다. 기존의 배터리 시장의 주를 이루었던 리튬 이온 배터리의 낮은 용량 한계를 넘어서기 위해 많은 연구진들이 리튬 메탈 배터리(LMB), 리튬 황 배터리(LSB), 전고체 배터리(ASSB)로 분야를 확장해 나가는 중이다. 하지만 기존의 무기금속 위주의 배터리 시스템은 성능적/비용적인 한계

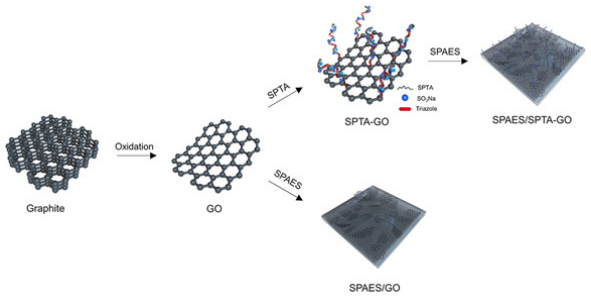

그림 1. 고성능 연료전지 전해질용 함침 막 SPAES/SPTA-GO의 제조 과정 (*J. Membr. Sci.*, 2020).

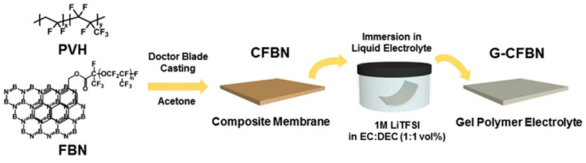

그림 2. Boron Nitride가 첨가된 PVH 고분자 전해질(*Energy Environ. Sci.*, 2017).

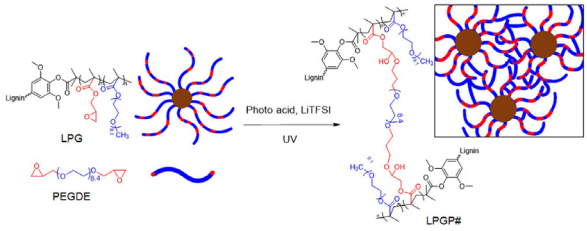

그림 3. Lignin 기반의 선형/가교 고분자(*ChemSusChem*, 2020).

와 더불어 안정성 문제까지 안고 있는 실정이다. 이를 해결하기 위해 다양한 각도에서 유기 고분자를 이용하는 방법들이 제시되고 있고 본 연구실에서도 같은 목표를 가지고 연구를 진행하고 있다. 전기적 안정성과 전극과의 계면 안정성을 동시에 가지는 P(VdF-*co*-HFP)(PVH) 고분자 전해질의 부족한 기계적 강도와 리튬 이온 전도도를 개선하기 위해 boron nitride(BN)를 첨가하여 이를 전해질로서 LMB에 응용한 연구를 수행하였고(*Energy & Environmental Science*, 2017), 자연계에 풍부하여 접근성이 좋고 가격 경쟁력이 뛰어난 리그닌(lignin)을 기반으로 한 고분자를 합성하여, 선형/가교 형태로 각각 배터리 양극의 바인더(binder)와 전고체 전해질로 응용하여 기존의 PVdF와 PE/PP Celgard 기반의 보편화된 배터리보다 안정적인 성능을 갖는 연구를 수행한 바 있다(*ChemSusChem*, 2020). 이외에도 폴리싸이오펜과 폴리에틸렌글라이콜 기반 전기/이온 전도성 고분자의 binder 응용, 고분자 기반의 리튬-황 배터리의 양극제/분리막/리튬음극 코팅제 개발 등을 통해 차세대 배터리를 위한 고분자의 연구를 이어나가고 있다.

2.3 수처리용 고분자 막

전세계적인 인구 증가와 급속한 산업화로 인해 담수에 대한 수요가 급증하고 있으며, 이로 인해 지구 상의 물의 97.5%를 차지하는 해수로부터 담수를 얻어내는 해수담수화 기술 및 공정에 대한 수요 또한 증가하고 있다. 해수담수화 공정 중 역삼투(reverse osmosis) 공정은 반투과성 막을 이용하여 해수로부터 염분을 제거하는 공정으로, 기존의 증류(distillation) 공정에 비해 에너지 효율이 우수하여 해당 분야에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적인 역삼투 분리막은 폴리술폰 지지체와 폴리아미드 선택층으로 구성되며, 막의 전체적인 분리 성능은 폴리아미드 선택층의

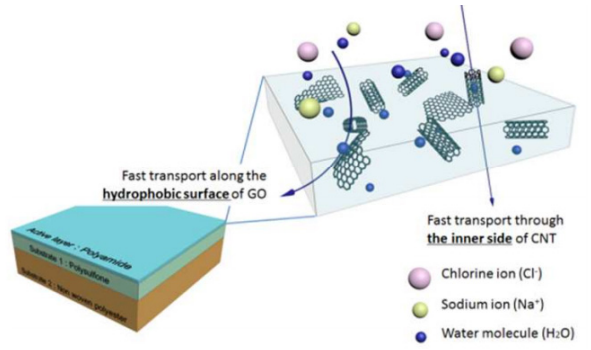

그림 4. 그래핀 옥사이드 및 산화된 탄소나노튜브가 동시에 포함된 역삼투 분리막의 모식도(*ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2014).

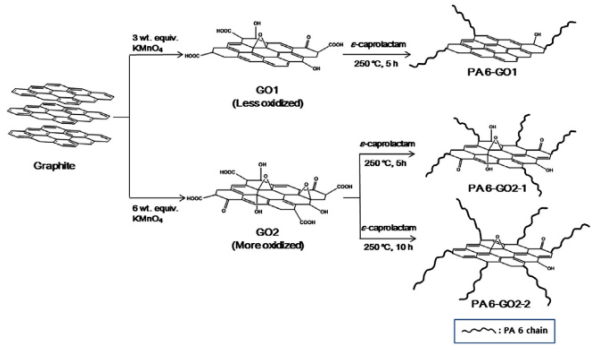

그림 6. ε-카프로락탐을 이용한 나일론이 그래프트 된 그래핀 옥사이드의 제조(*Carbon*, 2014).

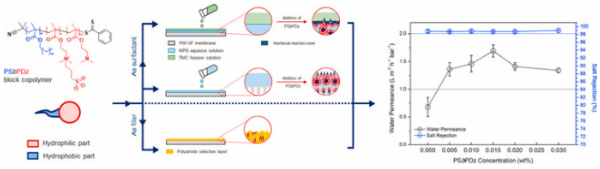

그림 5. 초친양매성을 가지는 블록 공중합체 구조 및 이를 포함한 역삼투 분리막의 성능 그래프(*J. Membr. Sci.*, 2021).

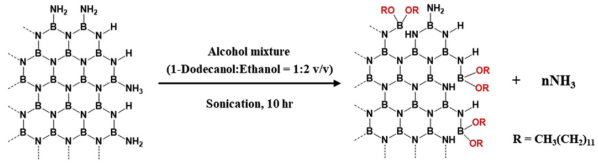

그림 7. 알킬기가 그래프트 된 질화 붕소의 제조(*Polymer*, 2019).

특성에 의해 좌우된다. 따라서 대부분의 역삼투 분리막 연구는 폴리아미드 선택층 제조 과정에 그래핀 옥사이드, 탄소나노튜브 등의 나노물질을 첨가제로써 투입하거나, 선택층 표면을 개질 및 코팅하는 방식을 통해 분리막의 성능을 향상시키는 방향으로 진행되고 있다.

본 연구실은 산화된 탄소나노튜브가 포함된 역삼투 분리막에 대한 연구를 진행하였으며, 탄소나노튜브의 산화 정도 및 분리막에 포함되는 농도를 조절함으로써 우수한 분리 성능 및 안정성을 가지는 분리막을 개발한 바 있다(*ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2014). 더 나아가 이후 본 연구실에서 개발된 그래핀 옥사이드 및 산화된 탄소나노튜브가 동시에 포함된 역삼투 분리막은 그래핀 옥사이드가 산화된 탄소나노튜브의 분산성을 증가시킴으로써, 나노물질이 포함되지 않은 분리막 및 한 가지의 나노물질이 포함된 분리막과 비교하여 향상된 분리 성능, 내구성 및 염소 저항성을 보였다(*J. Mater. Chem. A*, 2015). 최근에는 초친양매성(superamphiphilicity)을 가지는 블록 공중합체를 폴리아미드 선택층 제조 과정에 투입함으로써 역삼투 분리막의 분리 성능을 크게 증가시키는 연구가 진행된 바 있다(*J. Membr. Sci.*, 2021). 이러한 연구들은 역삼투 공정의 효율성을 크게 증가시킬 수 있으며, 급증하는 담수에 대한 수요를 충족시킬 수 있는 핵심 기술이 될 것으로 기대된다.

2.4 고분자 나노복합재료

고분자 나노복합재료는 탄소 나노 튜브(carbon nanotube), 그래핀(graphene), 질화 붕소(boron nitride) 등의 다양한 나노물질을 고분자에 첨가해 만든 물질로 소량을 첨가해 고분자의 물성을 개선할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 나노물질 첨가의 효과를 구현하기 위해서는 나노물질이 고분자 기지재에 고르게 분산되는 것이 중요하다. 따라서 기지재 고분자에 따라 나노물질을 적절하게 개질하는 기술이 고분자 나노복합재료 제조에 있어 가장 중요한 요소이다. 본 실험실에서는 그래핀 옥사이드를 나일론으로 개질하고 이를 폴리케톤(polyketone)에 소량 첨가해 기계적 성질과 열적 안정성이 향상된 연구 결과를 발표하였다(*Carbon*, 2014). 또, 질화 붕소를 폴리프로필렌(polypropylene)에 소량 첨가해 열전도도가 향상된다는 연구 결과를 발표하였다(*Polymer*, 2019).

2.5 항균/방오 고분자

인류의 공중 보건 및 건강의 증진을 위해서 인류는 오랜 기간 유해한 세균을 사멸시킬 수 있는 천연/합성 항균제를 사용하여 왔으며, 항균제의 개발은 인류의 평균 수명 연장에 큰 기여를 하였다. 항균제의 사용은 주위 환경을 청결하게 하고, 감염성 질병에 걸릴 위험을 현저히 줄일 수 있으나, 기존에 사용되는 항균제는 중 일부는 지속적으로 인체에 노출될 때 독성을 나타낼 수 있다. 흔히 사용되고 있는 항균제는 단분자 혹은 분자량 수천 이하의 저분자량을 가지는 물질로 용출형 항균제로 적합하다. 용출형 항균제의 경우, 주로 세균의 세포막에 흡착하여 그 구조를 파괴하므로 적은 양으로도 항균 효과를 볼 수 있다는 장점을 가지고 있으나, 공기를 통한 체내 흡입 및 피부로의 흡수가 가능하여 세포

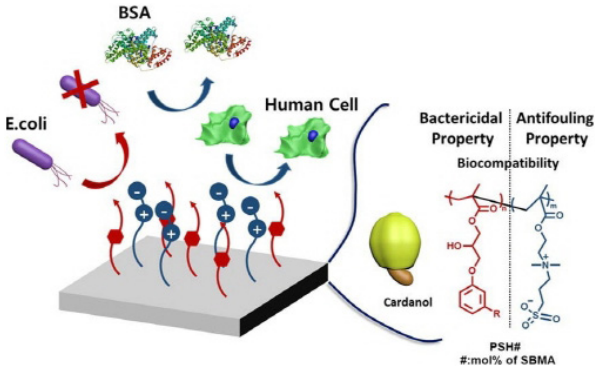

그림 8. 우수한 항균성 및 방오성을 가지는 공중합체의 합성(*Eur. Polym. J.*, 2019).

독성 문제 역시 존재한다. 이러한 용출형 항균제의 문제점을 해결하고자 최근 접촉형 항균 고분자가 발명되었으며, 사급 암모늄 혹은 사급 포스포늄 작용기를 포함한 고분자에 관한 연구가 많은 발전을 해왔다. 이러한 양이온성 작용기를 가진 고분자는 음이온을 가지고 있는 세균의 세포 외부와 상호작용하여 세포막의 물리적인 파괴 및 이온 교환의 방해 등을 야기하여 항균 특성을 나타낸다. 그러나, 이러한 고분자들은 이온성 작용기를 포함하므로 방수 성능 및 높은 강도의 재료를 개발하기에는 어려움이 있다. 이에 따라 높은 물성 및 항균성을 동시에 가지는 항균 고분자의 개발이 필요하다.

본 연구실은 자연 유래 항균 물질인 카다놀(cardanol)을 이용한 접촉형 항균 고분자에 대한 연구를 진행하였으며, 캐슈넛 추출 물질인 카다놀을 전구체로 HCPM(2-hydroxy-3-cardanylpropyl methacrylate) 단량체를 합성하여 우수한 항균성 및 물성을 가지는 항균 고분자 코팅을 개발하였다(*RSC Adv.*, 2014.). 측쇄에 카다놀 작용기를 포함한 고분자는 높은 항균성을 보였으며, 카다놀 작용기에 존재하는 불포화 이중결합을 통한 가교 반응을 통해 향상된 물성의 고분자 코팅을 구현하였다. 또한, 양쪽성 이온기 및 불소 작용기를 가진 단량체를 HCPM 단량체와 공중합하여 항균성 및 방오성을 동시에 가지는 공중합체를 합성하였다(*RSC Adv.*, 2017, *Eur. Polym. J.*, 2019). 합성된 공중합체는 우수한 세포 적합성 및 항균·방오 특성을 보였으며, 이는 의료·선박·코팅 분야에서 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

3. 고분자화학연구실 현황

본 연구실은 2020년도 1학기 기준 박사 34명, 석사 31명의 졸업생을 배출하였고, 이들은 국내외 산업체 및 국가기관 연구소 등의 연구원 혹은 대학 교수로 활약하고 있으며, 현재 석박사 통합과정 19명, 박사과정 3명, 석사과정 1명이 다양한 국가 연구 개발사업 및 산학 연구 활동에 참여하고 있다.