

산학연 연구실 소개

포항공과대학교 화학과 고분자 기반 에너지 소재 연구실 (Polymer-based Energy Materials Laboratory, POSTECH)

주소: 경상북도 포항시 남구 청암로 77 화학관 102호 (우: 37673)

전화: 054-279-2102

E-mail: soojin.park@postech.ac.kr



연구책임자 | 박수진 교수
포항공과대학교
화학과

1. 연구실 소개

전기화학 반응을 기반으로 에너지를 저장하는 이차전지는 가역적인 충·방전, 높은 에너지 밀도, 그리고 우수한 안정성을 바탕으로 1990년대 상업화가 시작된 이후 휴대용 전자기기를 비롯한 다양한 분야의 전원 장치로 적용되어 관련 분야 기술 발전을 가속화하는 역할을 하였다. 또한, 최근 수면위로 떠오르고 있는 에너지 고갈과 환경 오염과 같은 문제들을 해결하기 위한 방법으로 이차전지를 이용한 전기자동차와 전기화학적 에너지 저장 장치(electrochemical energy storage systems)에 관한 연구가 주목받고 있어, 이차전지가 개발된 지 오랜 시간이 지난 지금도 여전히 관련 분야 연구가 활발히 이루어져야 할 필요성이 존재한다.

본 연구실은 “고분자 기반 에너지 소재 연구실(polymer-based energy storage materials lab)”로 고분자 소재를 활용하여 에너지 밀도, 출력 특성, 수명 특성 등 이차전지가 지니는 기본적인 전기화학적 특성을 개선시키는 연구를 진행하고 있다. 한편, 본 연구실에서는 기존의 이차전지 시스템의 한계를 넘는 차세대 전지 시스템에 관한 연구를 활발히 수행하고 있으며, 웨어러블 기기에 적합한 연신성 전지(stretchable batteries)에 관한 연구 또한 연신성 전지의 상용화를 목표로 하여 이를 달성하고자 연구를 수행하고 있다(그림 1).

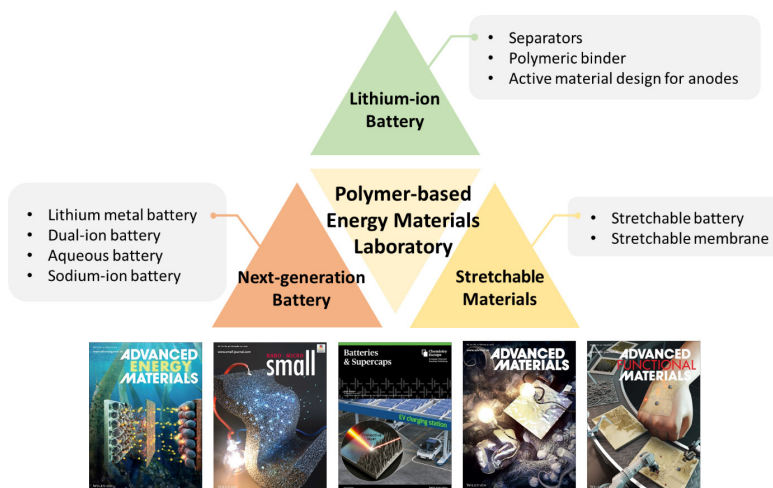


그림 1. “고분자 기반 에너지 소재 연구실”의 주요연구분야 및 연구 성과.

2. 주요연구분야

2.1 리튬 이차전지 성능 개선에 관한 연구

리튬 이차전지는 리튬 이온의 전기화학 반응을 활용하여 에너지를 저장하는 장치로 높은 에너지 밀도, 낮은 자가 방전으로 인한 우수한 전력 유지율과 같은 장점들로 인해 현재 가장 상용화된 이차전지 시스템으로 다양한 분야에 활용되고 있다. 그러나 리튬 이차전지를 구성하는 전극 활물질(active materials)은 수분에 민감하여 내부에 수분이 존재할 경우 급격한 성능 저하가 야기되며 이를 방지하기 위해 드라이룸(dry room)과 같이 수분이 존재하지 않는 공간이 요구되며, 이는 이차전지 제조 비용이 증가하는 문제점을 일으킨다. 이러한 문제점을 해결하고 전지의 성능을 향상시키기 위해 본 연구실에서는 3-(triethoxysilyl)propyl isocyanate

(ICPTES)와 다공성 실리카를 결합시켜 아마이드 결합으로 이어진 기능성 물질을 합성하고, 이를 고분자 분리막에 적용하는 연구를 발표하였다(그림 2a, b). 분리막은 이차전지 내부에서 두 전극 사이에 존재하며 내부 단락을 방지하는 필수 구성 요소로, 연구를 통해 개발한 기능성 분리막은 전지 내 불순물과 수분을 포획하여 배터리 성능을 기존 전지 대비 약 20% 향상시켰다. 또한, 해당 분리막은 기존의 상용화된 올레핀 계열 분리막이 높은 온도에서 수축하여 내부 단락 및 화재의 위험성을 유발하는 것과는 달리 우수한 열적 안정성을 보여 전지의 극한 환경 사용에 대한 가능성을 제시하였다.

한편, 현재 상용화된 리튬 이차전지의 음극 소재인 흑연보다 10배 이상 많은 용량을 저장할 수 있는 실리콘 음극은 기존의 흑연을 대체하여 리튬 이차전지의 성능을 획기적으

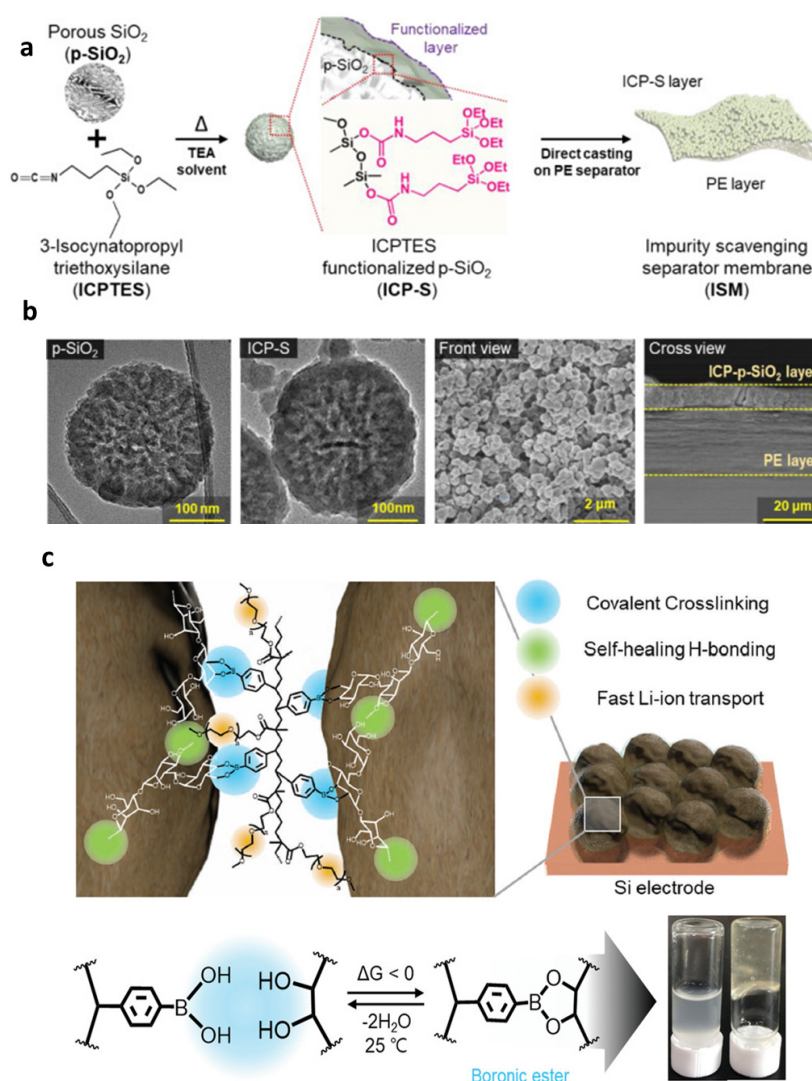


그림 2. (a) ICPTES와 다공성 실리카를 결합시켜 만든 다기능성 분리막의 제조 과정과 (b) 전자주사현미경으로 확인한 다기능성 분리막의 표면, (c) 다기능성 가교제를 기반으로 한 상온에서 가교 가능한 천연 고분자 바인더에 관한 연구.

로 개선시킬 수 있는 전극 소재로 각광받고 있다. 그러나 충·방전 과정에서 실리콘의 급격한 부피 변화로 인해 발생하는 전극 물질의 미분화(pulverization) 및 박리(delamination)가 전지 수명에 상당한 악영향을 미친다는 문제점이 있어 상용화에는 어려움을 겪고 있다. 전극 물질을 접착시켜 구조적 안정성을 제공하는 고분자 바인더는 실리콘 음극 소재가 가지고 있는 문제를 해결하는데 핵심적인 역할을 할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 이에 본 연구실에서는 붕산(boric acid)과 폴리에틸렌옥사이드(polyethylene oxide) 기반의 다기능성 가교제를 합성하고, 이를 구아검(guar gum)과 상온에서 결합시켜 천연 고분자 바인더를 개발했다. 개발된 천연 고분자 바인더는 자가 치유능력(self-healing), 강한 결합력 및 빠른 리튬 이온 전달 특성이 있어 두꺼운 실리콘 전극 제조에도 안정적으로 적용될 수 있어 전지의 에너지 밀도를 크게 높이고 실리콘 기반 전지의 수명 특성을 향상시켜 실리콘 음극재의 상용화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다(그림 2c).

2.2 연신성 전지 시스템 연구

현재 스마트 시계 혹은 스마트 안경과 같은 액세서리에 국한되어 있는 웨어러블 기기의 가능성은 기술적 발전을 바탕으로 스마트 의류, 더 나아가 피부나 장기에 직접적으로 부착할 수 있는 기기에 이르기까지 더 넓은 범위로 확대될 것으로 전망된다. 웨어러블 기기의 사용 환경을 고려하였을

때, 차세대 웨어러블 기기의 모든 소재들은 유연하면서 반복적인 굽힘이나 수축과 같은 기계적인 자극이 있어도 안정적으로 성능을 유지할 수 있는 유연성이 요구된다. 그러나, 기존의 리튬 이차전지에 사용되는 구리, 알루미늄과 같이 금속박을 사용한 전극은 높은 전기 전도성을 갖지만 연신성이 없으며 구부릴 경우 금속박에 붙어있던 전극 활물질이 탈리되어 전지의 성능 저하를 일으킨다는 문제점이 존재한다. 따라서 기계적인 변화(접힘, 연신, 뒤틀림 등) 후에도 안정적으로 전기 전도성을 유지할 수 있는 새로운 전극 시스템을 개발하는 것이 연신성 전지 연구의 핵심이라고 할 수 있다.

이에 본 연구실에서는 스티렌-부타디엔-스티렌 블록 공중합체(poly(styrene-*b*-butadiene-*b*-styrene), SBS) 지지체의 양쪽으로 은 나노입자로 구성된 양극과 아연 음극이 결합되어 있는 야누스 페이스(Janus-face) 전극을 개발하였다. 야누스 페이스 전극은 기계적 물성이 뛰어난 SBS 지지체의 사용으로 200% 연신 조건에서 200번의 반복적인 연신과 수축이 가능했으며, 100% 연신 조건에서도 2.1 Ω의 전기 전도도를 안정적으로 유지할 수 있었다. 또한, 고분자 지지체는 이온이나 전자가 흐를 수 없는 절연체이므로 독특한 성장 메커니즘인 backslide-plating configuration을 기반으로 충·방전이 진행되고, 아연 음극 사용에 있어 문제가 되는 수지상 성장으로 인한 내부 단락을 예방할 수 있었다. 또한, 야누스 페이스 전극으로 제작한 연신성 전지는 200번의

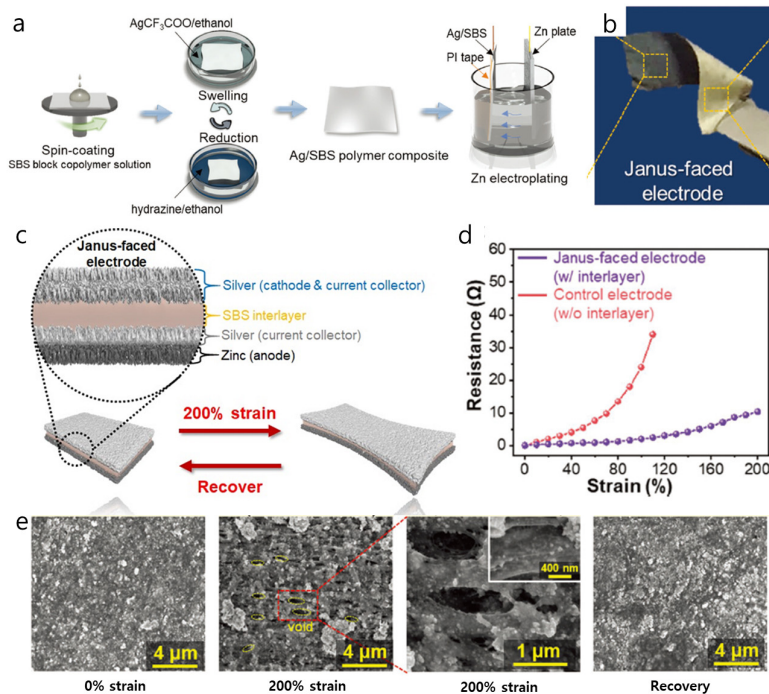


그림 3. (a) 야누스-페이스 전극의 제조 과정, (b) 제작된 야누스-페이스 전극, (c) 전극의 내부 구조, (d) 연신에 따른 저항의 변화 및 (e) 표면주사전자현미경으로 확인한 야누스-페이스 전극의 연신 전과 후의 전극 표면.

충·방전 과정 후에도 초기 용량의 90%를 유지하는 우수한 수명 특성을 보였다(그림 3). 본 연구를 통해 개발한 연신성 전지는 200%의 연신 조건에서도 안정적으로 전원으로써 역할을 수행하여 가까운 미래 연신성 전지의 상용화에 기여할 것으로 기대된다.

2.3 차세대 전지 시스템 관련 연구

글로벌 에너지 문제와 맞물려 이차 전지를 사용하는 분야가 확장됨에 따라 기존의 이차전지와 비교하여 더 많은 에너지를 저장할 수 있는 고에너지밀도 전지에 대한 수요가 증가하고 있는 추세이다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 기존의 흑연계 음극(372 mAh/g)보다 약 10배 이상 높은 이론 용량(3,860 mAh/g)을 가지며, 물질의 낮은 밀도와 낮은 전기화학적 반응 전위를 가져 시스템의 에너지 밀도를 높일 수 있는 리튬 금속을 음극으로 사용하는 리튬 금속 전지가 현재 주목받고 있다. 그러나, 충·방전 과정에서 형성되는 리튬의 수지상 성장으로 발생하는 화재의 위험성 및 전지의 수명 저하 문제를 해결해야 전지의 상용화에 근접할 수 있다. 이에 본 연구실에서는 균일한 리튬 전착을 위해 강유전성의 베타상 폴리비닐리덴 플루라이드(polyvinylidene fluoride, PVDF)를 전기방사를 통해 3차원의 나노매트를 제조하여 리튬 금속 음극의 보호층으로 사용하는 연구를 진행하였다. PVDF 보호층은 그림 4a와 같이 수소와 플루오린 원자가 일렬로 각각 배열된 베타상으로, 분극된 플루오린 표면을 따라 리튬 이온이 호핑(hopping) 과정을 통해 전달되면서 전하 전달 속도가 향상된다(그림 4b). 또한, 3차원의 섬유 구조로 인해 전해액 흡수가 촉진되고 이는 빠른 이온 분산과 리튬 금속 전착에 따른 부피 변화 완화를 유도하여 2.3 mA/cm²의 높은 전류 밀도에서도 400번의 충·방전 사이클 후 초기

용량 대비 약 82.8%라는 높은 용량을 유지하여 우수한 출력 능력을 갖는 리튬 금속 전지에 대한 가능성을 제시하였다.

또한, 본 연구진은 리튬 수지상 성장 억제제를 위한 다른 접근법으로 고분자 구조체에 강한 공유 결합을 형성하는 무기 나노입자를 첨가하여 실시간(*in-situ*) 가교를 통해 3차원 복합체 겔 폴리머 전해질을 제조했다. 그림 4c, d와 같이 균일한 복합체 형성으로 기계적 특성을 향상시키고 리튬 이온의 농도 구배 완화를 통해 리튬의 수지상 성장을 억제시켜, 고에너지 밀도를 갖는 리튬 금속 전지의 가능성을 연구를 통해 제시하였다.

3. 연구실 현황 및 비전

본 연구실은 지난 2009년부터 현재까지 고분자를 기반으로 한 에너지 소재에 관한 연구를 수행하고 있으며, 이외에도 차세대 전지 시스템에 관한 연구도 꾸준히 진행하고 있다. 특히, 현재 상용화된 유기계 전해액을 기반으로 한 이차 전지 시스템을 대체하여, 경제적이고 안전하며 높은 이온 전도도를 갖는 수계 전해액을 기반으로 한 전지에 대한 연구를 수행하고 있다. 더욱이, 리튬 이온만의 삽입·탈리 반응을 이용하는 일반적인 리튬 이차전지와 달리 전해질 내부의 음이온의 삽입·탈리 반응도 활용하는 듀얼 이온 전지에 대한 연구도 진행하고 있다. 듀얼 이온 전지에서는 충전 시 음극에는 리튬 이온이 양극에는 음이온이 삽입되며, 이 때 음이온의 삽입 전압대가 4.2~5.2 V로 높아 고전압의 전지를 구성할 수 있다는 장점을 가져 촉망받는 에너지 저장 시스템으로 여겨지고 있다. 본 연구실에서는 고분자를 기반으로 다양한 시스템의 전지에 대한 연구를 수행하여 미래에 도래할 에너지 부족 문제 및 환경 오염 이슈를 해결하는 데 이바지하여 국가 및 관련 산업의 발전에 기여하고자 한다.

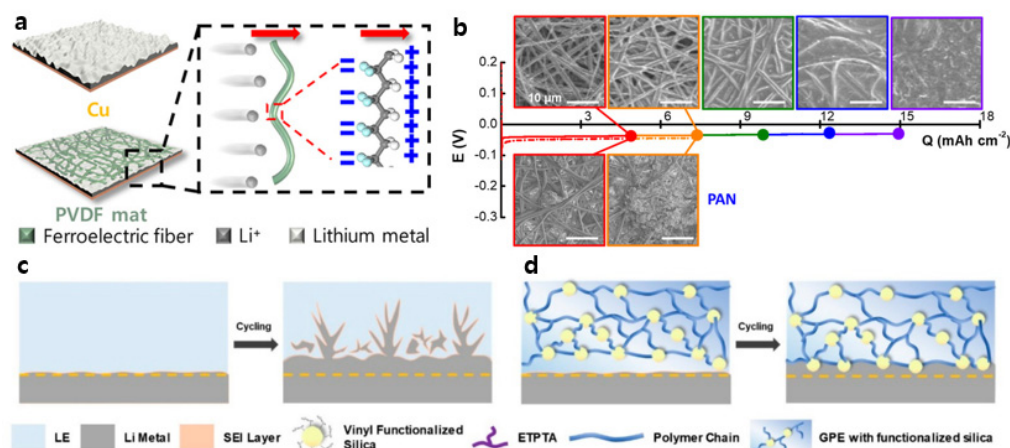


그림 4. (a) 3차원의 강유전성 PVDF 섬유 구조, (b) 같은 두께의 섬유로 구리 집전체에 전기방사된 PVDF와 polyacrylonitrile(PAN) 고분자 구조에 리튬 전착에 따른 표면주사전자현미경 사진과 전압 변화 거동, (c) 액체 전해질에서의 제어 불가능한 리튬 수지상 형성을 보여주는 모식도, (d) 3차원 복합체 겔 고분자 전해질의 리튬 수지상 형성 억제 효과를 보여주는 모식도.