

산학연 연구실 소개(2)

부산대학교 화학소재학과 스마트 고분자재료 연구실

(Smart Polymer Materials Lab. Pusan National University)

주소: 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2 화학관 117호 (우: 46241)

전화: 051-510-2697

E-mail: jinhwan@pusan.ac.kr

홈페이지: <https://www.yoongroup.net>

연구책임자 | 윤진환 교수
부산대학교 화학교육과,
대학원 화학소재학과

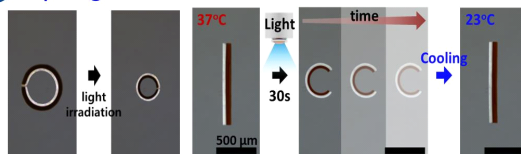
1. 연구실 소개

하이드로젤은 수분 흡수 및 보유 능력이 뛰어난 3차원 네트워크 구조의 고분자 재료이다. 본 연구실은 스마트 하이드로젤의 기계적 물성의 제고를 통해 다양한 광전자 소자로의 응용을 모색하고 있다. 이온젤은 이온 전도성을 갖는 고분자 네트워크로, 이온젤의 구조 및 전해질 이동성에 대한 이해를 높이고, 고성능 에너지 저장 장치 및 전극 재료로의 응용 가능성에 대해서도 탐구하고 있다.

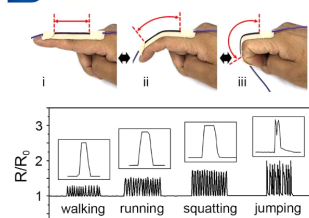
전도성 하이드로젤은 기존의 금속과 유기 기반의 전자재료에 비해 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 첫째, 고유의 유연성과 내재적 신축성을 가지고 있어 더 유연하며 변형이 가능한 소자 제작에 활용될 수 있다. 둘째, 하이드로젤 소재로 만들어진 소프트 전자소자는 착용자의 피부와 자연스럽게 조화를 이루어 편안한 착용감을 제공할 수 있다. 셋째, 생체적합성이 높아 피부에 무해하여 바이오 센서나 동작감지 센서 등과 같은 응용 분야에 이상적이라 할 수 있다.

이런 장점을 활용하기 위해서 물성이 우수하며 높은 전도성을 가지는 하이드로젤 소재의 개발이 필수적이다. 본 연구실은 새로운 고분자 연성소재 개발을 통해 극한의 변형이 가능한 투명전극, 스트레인 센서, 하이드로젤 광섬유 등의 응용을 통해 새로운 기술 및 제품 개발에 기여하고자 노력하고 있다.

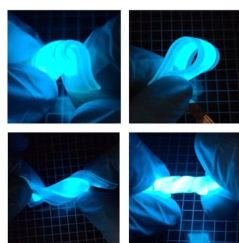
Hydrogel actuators



Strain sensors



Deformable EL devices



Hydrogel optical fibers



Smart Windows

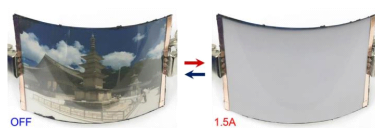


그림 1. 스마트 고분자재료 연구실 주요 연구분야.

2. 주요 연구분야

2.1 전도성 하이드로젤, 이온젤 소재 개발 및 고신축성 광전자소자 제작

본 연구실은 유연한 전자소자 제작을 위한 전도성 하이드로젤과 이온젤에 대한 연구를 주력으로 하고 있다. 전도성 소재의 제조는 크게 2가지 방법을 통해 진행되고 있다. 첫째, 공액 고분자, 탄소나노튜브, 그래핀 등의 전도성 필러를 하이드로젤 네트워크에 포함하는 방법이다. 필러들은 전자가동이 가능한 도메인을 형성하기 때문에 전도성 하이드로젤 소재를 얻을 수 있다. 둘째, 제조된 하이드로젤 네트워크를 이온성 액체(ionic

liquid)나 이온 전해질(electrolyte)에 팽윤시키는 방법이다. 젤 소재의 많은 부피를 차지하는 미디움의 이온 전도를 통해 전도성 이온젤 혹은 이온성 하이드로젤의 제조가 가능하다.

전도성 젤 소재를 응용소자 제작에 활용하기 위해서는 높은 기계적 강도가 바탕이 되어야 한다. 가교된 고분자 사슬은 탄성을 가지지만, 기계적 강도는 높지 않은 것으로 알려져 있다. 따라서 극한의 변형이 가능한 고신축성 가교 네트워크의 제작을 위해서 물리적으로 결합하여 있는 이중네트워크 구조를 도입하여, 외부에서 가해지는 응력을 분산시켜 높은 인성을 가짐을 확인하였다.

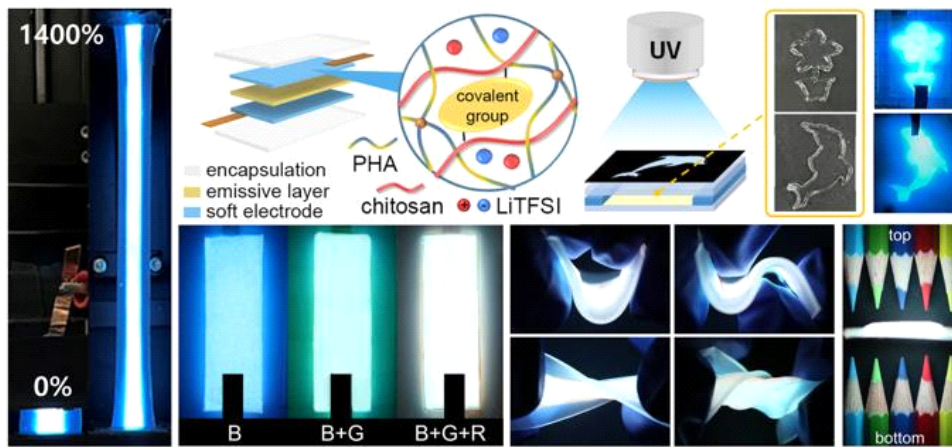


그림 2. 고변형이 가능한 ACEL 소자 개발.

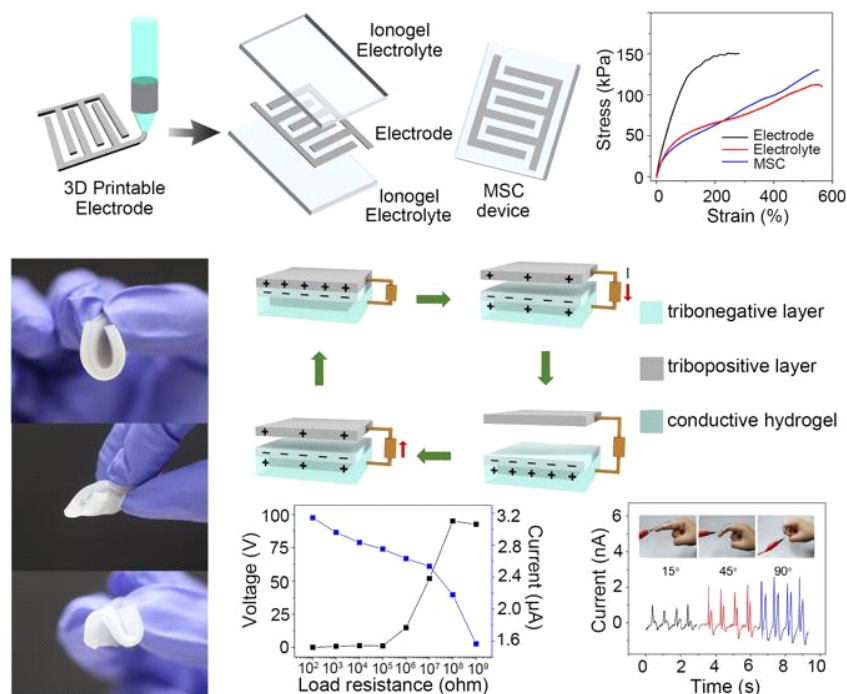


그림 3. 신축성 하이드로젤 슈퍼커패시터 및 마찰전기나노발전기.

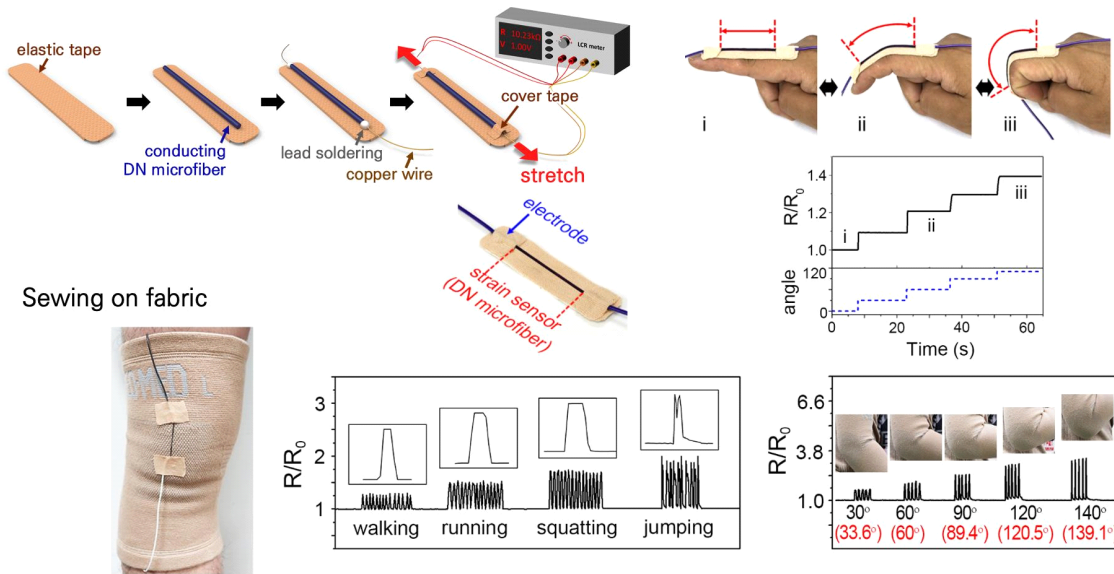


그림 4. 하이드로젤 파이버를 이용한 스트레인 센서의 제작 및 응용.

본 연구실은 개발된 전도성 젤 소재를 극도로 신축 가능한 교류 전계발광 장치(ACEL) 제작에 전극으로 활용하고 있다. 아크릴 고분자와 키토산의 이중 네트워크를 이온성 액체에 우수한 기계적 특성과 높은 전도성을 가진 소재를 전극으로 활용해 1200%까지 신축이 가능한 ACEL을 제작할 수 있었다. 새로운 키토산 가교제를 활용하여, 뛰어난 신축성(1400%), 높은 광 투과율(>99%) 및 높은 전도성($1.95 \times 10^{-2} \text{ Sm}^{-1}$)을 보이는 이온성 하이드로젤 소재도 개발하였다. 이를 통해 비틀림과 같은 변형 및 1400%의 초고신장 상태에서도 안정적이고 높은 휘도의 발광소자를 얻을 수 있었다. 최근에 고휘도 백색 발광이 가능한 ACEL 디바이스를 위한 새로운 접근법을 개발하였다. 청색 발광을 흡수하여 적색과 녹색 발광을 나타내는 양자점을 색상변환 층(color conversion

layer)으로 활용하여 백색 발광 소자를 제작할 수 있었다. 이때, 고-유전율(high-k) 물질을 발광층에 포함해 500 cd m^{-2} 에 근접하는 고휘도 백색광을 얻을 수 있었다.

고변형이 가능한 전도성 하이드로젤 소재를 활용한 마찰전기 나노발전기(triboelectric nanogenerator)와 슈퍼커패시터에 대한 연구도 진행 중이다. 유연한 하이드로젤 소재를 기반으로, 변형된 상태에서도 에너지를 저장하거나 마찰전기를 발생할 수 있는 특성을 얻었다.

2.2 미세유체장치를 이용한 섬유형태의 하이드로젤 제조 및 응용

본 연구실에서는 다양한 플랫폼을 가지는 하이드로젤을 제조하고 응용 소자를 제작하고 있다. 특히, 미세유체장치를

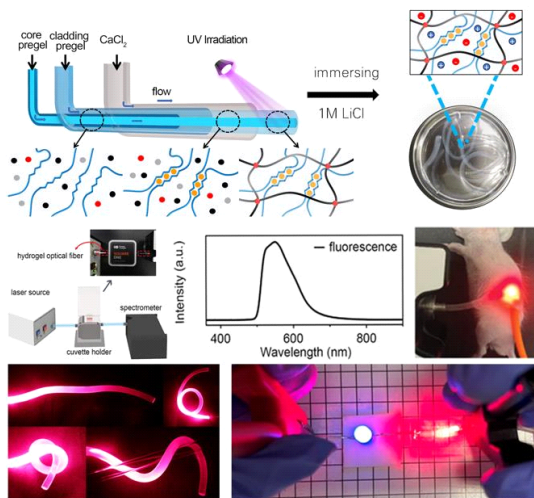


그림 5. 미세유체장치로 제조된 하이드로젤 광섬유.

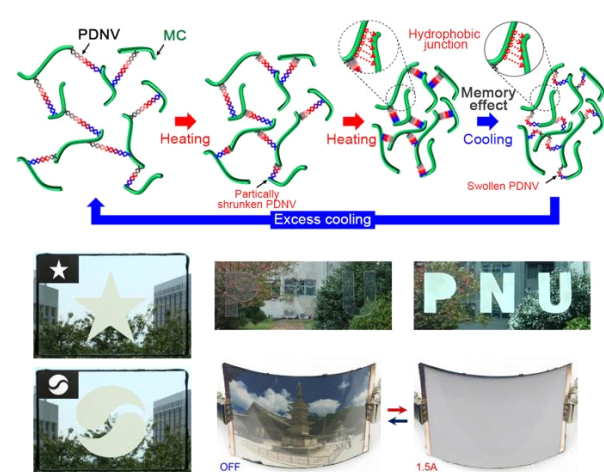


그림 6. 상전이 고분자를 활용한 스마트윈도우 연구.

활용하여 마이크로 파이버 형태의 하이드로젤 제조를 연구하고 있다. 서로 다른 직경의 유리관이 동축으로 정렬된 미세유체 장치를 제작하고, 연속적인 용액의 흐름과 유리관 교차점에서의 용액 간 응고 반응을 통해 수-수백 마이크로미터 크기의 일정한 지름을 가지는 파이버 형태의 하이드로젤을 제조하고 있다. 용액의 주입 위치와 유리관의 결합 형태에 따라 튜브, 다중벽, 이중코어 구조 등 다양한 형태의 하이드로젤 파이버의 제조가 가능했다. 또한, 이온결합, 온도 차이, 중화 등의 다양한 응고 메커니즘을 이용하여, 알긴산, 아크릴계 고분자, 천연고무 등의 소재를 파이버 형태로 제작할 수 있었다.

전도성의 부여와 기계적 물성의 제고를 통해 제조된 하이드로젤은 넓은 작동 범위, 높은 선형성, 빠른 반응 속도를 갖는 스트레인 센서 제작에 활용된다. 제조된 파이버들은 1,000% 이상 신축이 가능하며, 5만 번 이상의 신축 사이클에서도 견고함을 유지하였다. 0.05%의 미세한 신축의 감지가 가능하며 수십 ms의 짧은 응답 시간을 가지며, 높은 선형성을 통해 측정된 저항 변화를 신축으로 정량 변환이 가능하였다. 손가락이나 팔꿈치 구부리기, 걷기, 점프, 발성 등 다양한 인간 움직임을 실시간으로 감지할 수 있었다.

파이버 형태 하이드로젤의 두 번째 응용으로, 생체 응용을 위한 유연한 신축성 광섬유를 연구하고 있다. 서로 다른 굴절률을 가지는 코어/클래딩 구조를 통해 전반사를 통한 높은 효율의 광 전달이 가능하였고, 생체 조직 이식 및 고변형 상태에서도 광 전달 특성 등을 유지함을 알 수 있었다. 개발된 광섬유는 UV/Vis, 형광 및 광음향 분광학에서 사용되는 전통적인 실리카 광섬유를 대체할 수 있었다. 또한, 동물 내부에 이식되어 생체 내에서 생성된 형광 신호의 검출이 가능함을 확인하였다.

2.3 자극 감응성 하이드로젤의 특성 연구와 스마트 윈도우 응용

본 연구실은 외부 환경의 변화에 민감하게 반응하여 부피, 형태, 혹은 기계적 물성을 변화시키는 하이드로젤에 대한 연구도 진행하고 있다. 대표적인 온도 감응성 고분자 폴리(N-이소프로필아크릴아마이드)(PNIPAm) 기반 하이드로젤의 부피 상전이 특성을 조절하기 위한 연구를 수행하였다. 다양한 온도 감응형 단량체와의 공중합과 화학조성이 시간에 따라 변화하는 중합 방법의 고안 등을 통해 하이드로젤의 전이 온도를 조절하고, 넓은 온도 범위에서 단계적인 전이, 그리고 큰 열적 히스테리시스 등의 효과를 얻을 수 있었다. 하이드로젤의 기계적 물성은 고분자 사슬의 종류, 가교 밀도, 고분자 사슬 간의 상호작용에 따라 제조 과정에서 이미 결정되며, 제조 이후에는 변화시키기가 매우 어렵다. 본 연구실에서는 실시간으로 외부 자극이나 환경 변화에 따라 기계적 물성, 탄성이 가역적으로 변화하는 유연 소재에 대해 연구도 진행하고 있다.

자극 감응성 하이드로젤을 활용한 장치로 태양광 차단이

가능한 스마트 윈도우에 대한 연구를 수행하고 있다. PNIPAm의 열적 부피 상전이를 활용하여 투명-불투명 상태를 온도 혹은 빛의 세기를 통해 조절이 가능하여 하이드로젤 기반의 스마트 윈도우를 개발할 수 있었다. 열적 히스테리시스의 증가를 통한 메모리 윈도우를 가지는 에너지 절약형 스마트 윈도우를 개발할 수 있었다. 기존의 유리 기반 기반의 스마트 윈도우의 불편한 설치와 기존 유리를 제거해야 하는 제약을 극복하기 위해 표면에 쉽게 부착과 탈착이 가능한 필름 형태의 스마트 윈도우를 개발하였다. 투명한 고분자 기반에 하이드로젤 아크릴 접착제 및 이형 필름으로 구성된 다층 스마트 필름을 제작하였다. 이러한 스마트 필름은 실외 온도에 반응하여 투명과 불투명 사이를 전환할 수 있으며, 다양한 형태로 재단 후 정보를 표시하는 데 활용될 수 있다.

3. 연구실 현황 및 비전

현재 교수 1명, 박사후연구원 2명, 박사과정 3명, 석사과정 4명이 새로운 연성소재의 제조와 특성분석, 응용장치 제작에 대한 연구를 수행하고 있다. 앞에서 설명한 다양한 고분자 소재와 소자의 연구를 통해 하이드로젤의 새로운 응용 가능성의 탐구에 매진하고 있다. 현재까지 석사 19명, 박사 2명, 박사후 연구원 3명을 배출하였고, 모두 111편(피인용 5,333회, 최근 5년 39편) 논문을 출판하였다.

본 연구실은 연성소재 연구 분야에서 다양한 성과를 달성하고 있으며, 특히, 고신축성 하이드로젤을 활용한 광전자소자 및 동작 감지 센서 분야에서 학술적·기술적인 진보를 이끌어 내고 있다. 고변형이 가능한 전도성 연성 소재는 에너지저장 장치, 마찰전기발생소자로의 활용 또한 연구되고 있다. 섬유 형태의 하이드로젤을 이용한 응용 분야는 다양한 생체 응용 분야에서의 활용 가능성을 제시하고 있으며, 이는 광 치료 및 생체 감지 분야에서 혁신적인 발전을 도출할 것으로 기대된다. 이런 연구를 통해 연성 소재에 대한 과학 지식을 넓히며 혁신적이고 실용적인 제품을 개발하여 사회에 기여하고자 하는 목표 달성을 위해 노력하고 있다.



그림 7. 스마트 고분자재료 연구실 구성원.