

산학연 연구실 소개

# 한양대학교 화학공학과

## 차세대 광전자 나노 소재 및 소자 연구실

### (Frontier Optoelectronic Nanomaterials and Devices LAB., Hanyang University)

주소: 서울특별시 성동구 왕십리로 222 한양대학교 화학공학과 (우: 04763)

전화: 02-2220-2617, E-mail: dhkim76@hanyang.ac.kr

홈페이지 주소: <https://fondlab.hanyang.ac.kr>

연구책임자 | 김도환 교수  
한양대학교 화학공학과

#### 1. 연구실 소개

‘모든 것이 연결된, 지능적인 사회로의 진화’라고 요약 가능한 4차 산업 혁명 시대를 맞이하여 차세대 광전자 나노 소재 및 소자 연구실(frontier optoelectronic nanomaterials and devices lab., FOND LAB)은 기존 플랫폼의 한계를 극복할 수 있는 새로운 개념의 소프트 나노 소재 및 공정, 그리고 차세대 소자 및 시스템 기술 개발을 통해 학문적 발전과 신수종 국가산업 정책 등에 기여하기 위하여 8년 전인 2012년 9월에 설립되었다. 현재, 인간친화형 소프트 ICT 기반기술과 미래 지향적 첨단 디지털기술이 융합되어 있는 기술 주도형 사회에서, 본 연구실이 수행하는 연구는 실제 산업현장에서 적용이 가능한 응용연구에서부터 차세대 미래 지향적 산업에 적용할 수 있는 기초연구에 이르기까지 큰 줄기 기반의 연구를 활발하게 진행하고 있다.

본 연구실에서 이루어지는 주된 연구 활동은 크게 두 가지 분야로 나눌 수 있다. 우선, 플렉서블 고해상도 마이크로디스플레이를 위한 유기반도체 변환 기술에 관한 연구이다. 외부 환경에 강한 내성이 있는 유기반도체로 변환하는 기술은 차세대 반도체, 센서 및 디스플레이, 그리고 더 나아가 인간친화형 바이오 일렉트로닉스 산업분야에 활용될 수 있는 잠재력을 보유할 수 있을 뿐만 아니라, 기존 소재의 한계 및 공정 방법 등을 극복할 수 있는 원천 기술로 확장이 가능한 연구라고 판단된다. 이러한 기술적 가치를 기반으로 현재 본 연구실에서는 강한 내성과 신뢰성이 구축된 용액공정용 유기반도체를 이용하여 플렉서블 고해상도 유기발광디스플레이, 고민감성 플렉서블 전자코, 고신뢰성 글루코오스 센서, 그리고 인공신경소자 등을 제작하는 연구를 수행하고 있다(그림1). 본 연구실에서 수행하고 있는 두 번째 줄기연구로는, 소프트 이온트로닉 소재 기반의 전자 피부 개발이다. 본 연구실에서는 점유탄성(visco-poroelasticity)과 이온 구속 및 방출(ion trap &

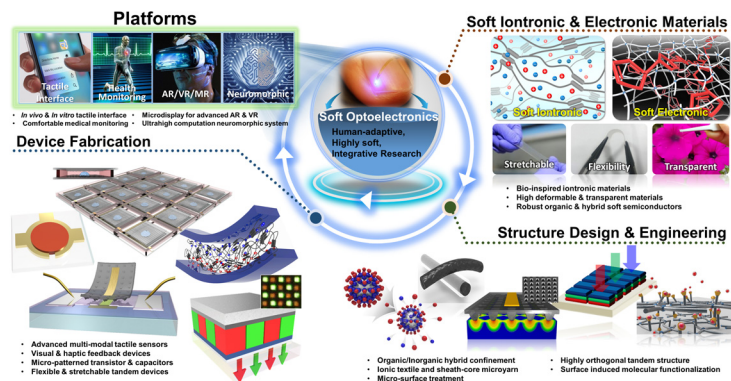


그림 1. 차세대 광전자 나노 소재 및 소자 연구실(FOND LAB) 주요 연구분야.

release) 거동이라는 포유류의 촉각센싱원리를 매우 근접하게 모사하여 인공이온 및 인공고무소재를 이용한 원천기술 개발을 통하여 사람의 피부와 같이 이온의 전달 메커니즘 및 신축성을 가지고 있을 뿐만 아니라, 사람 피부의 감지능력을 상회하는 동시에 기억과 학습능력까지 갖추어진 새로운 개념의 뉴로모픽 전자피부 플랫폼 개발에 관한 연구를 진행하고 있다(그림1). 따라서, 본 연구실에서는 미래지향적 그리고 인간친화형 차세대 소프트 소재 연구에서부터 공정, 소자 및 플랫폼 연구에 이르기까지 디스플레이, 반도체, 바이오, 국방 및 자동차/항공 등에 다양하게 응용이 가능한 기술개발을 목표로 다양한 국가 및 회사과제를 수행하고 있다.

## 2. 주요 연구 분야

### 2.1 초감도 이온트로닉 전자피부 개발

웨어러블 전자기기 및 유연 소재 기반의 디스플레이, 의료용 기기, 로봇기술이 발전됨에 따라 사용자의 주변환경을 실시간으로 인지하는 스마트 인터페이스 및 전자피부 기술의 중요성이 대두되었다. 인간의 피부가 넓은 자극범위를 매우 민감하게 인지하는 것과 대조적으로, 종래의 전자피부 기술은 소재의 물리적 형태변형에 의존하는 역학변환 메커니즘으로 인해 인지자극범위와 민감도의 한계점이 존재하였다. 본 연구실에서는, 기존 촉각센서 및 전자피부 기술이 채택하였던 역학적 메커니즘이 아닌, 역학적 자극에 의한 고분자 나노구조 변형과 이온의 분자 간 결합력 변화를 유도하는 이온 구속 및 확산 메커니즘을 통해 종래 기술의 민감도 및 인지자극범위의 한계를 극복하고자 하였다. 인간의 피부를 구성하는 촉각세포의 세포막 구조와 자극인지 원리를 모방함으로써 넓은 범위의 자극을 미세하게 구별 가능한 이온트로닉 인공 촉각세포를 구현하여, 차세대 소프트 디바이스의 핵심소재를 개발하였다. 더 나아가, 이러한 이온트로닉 소재를 기반으로 저전력 구동이 가능한 촉각적 피드백 유도형 고분자 액츄에이터를 개발하여 인간친화형 햅틱 플랫폼을 구현하였다(그림 2).

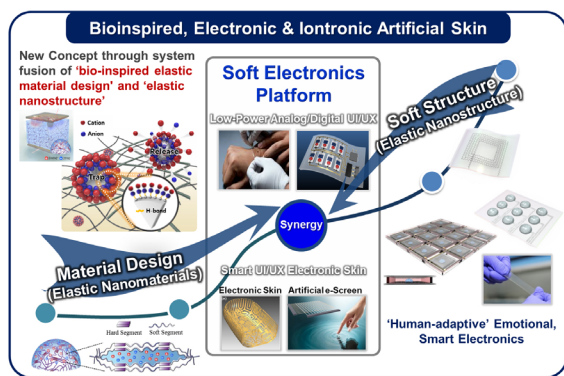


그림 2. FOND LAB 핵심연구전략: 생체모사기반 초감도 이온트로닉 전자피부 개발.

### 2.1.1 사람 촉각세포를 모방한 이온트로닉 전자피부 소재

생체 촉각세포는 세포막을 기준으로 구획되어 있는 이온들이 외부 역학적 자극에 의해 세포막 내부로 이동하여 막전위(plasma membrane potential)를 발생시키는 자극인지 원리를 가진다(그림 3a,b). 위 생체 시스템을 모방하고자 열가소성 폴리우레탄 고분자와 이온성 액체로 구성되어 있는 전해질 내부에 실리카 입자(silica particle)를 도입하여 이온과 수소결합을 유도하였다.

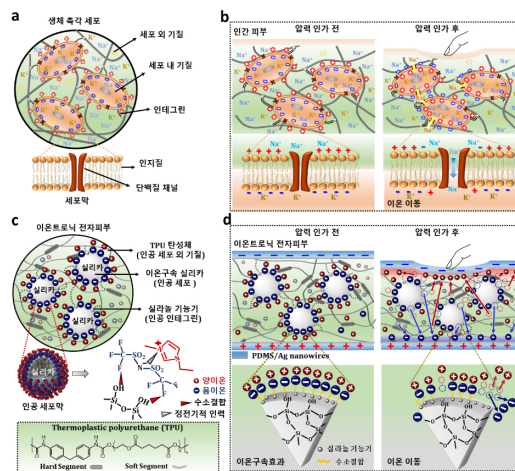


그림 3. 인간 피부 내 촉각세포 및 개발된 생체모사 이온트로닉 전자피부의 외부자극 인지과정에 대한 원리를 나타내는 모식도: (a) 인간 피부가 가지고 있는 촉각세포 내 구성요소, (b) 촉각세포의 외부자극 인지원리 모식도, (c) 촉각세포를 모사한 이온트로닉 전자피부 내 구성요소, (d) 개발된 이온트로닉 전자피부의 외부자극 인지원리 모식도.

또한, 양이온(EMIM<sup>+</sup>)과 음이온(TFSI<sup>-</sup>) 간 정전기적 인력(coulomb interaction)으로 인한 이온구속효과 기반 인공 세포막 구조를 구현하였다. 구현된 이온트로닉 소재에 역학적 자극 인가 시, 수소결합이 끊어짐에 따라 자유이온의 농도와 이동도가 증가되는 현상을 규명하였다(그림 3c,d). 이러한 현상을 통해 이온트로닉 전자피부 소자의 전기이중층 정전용량을 증폭시켜 기존 전해질 소재 대비 약 30배 높은 민감도(21.1 kPa<sup>-1</sup>)를 확보할 수 있었다.

더 나아가, 본 연구에서 개발한 초감도 이온트로닉 전자피부 소자와 블루투스 기반 무선통신 회로 및 모듈을 결합하여, 터치와 압력의 크기변화로 동력장치의 제어가 가능한 웨어러블 실감형 컨트롤러를 개발하였다(그림 4). 최근 2019년 1월 미국 라스베이거스에서 개최된 CES 2019 (세계가전전시회)에는 'wireless iontronic tactile sensor skin' 라는 제목으로 블루투스 무선통신 기술을 활용하여 초감도 이온트로닉 전자피부에 입력되는 외부 역학자극의 정보를 모바일을 통해 확인할 수 있는 촉각 플랫폼을 개발하고, 드론 등 무인비행체의 동력장치를 제어할 수 있는 실감형 웨어러블 마이크로 컨트롤러 시제품을 전시하였다. 이는 기존에 존재하는 가속

도와 방향제어가 분리된 컨트롤러와는 차별화된 가속도와 방향제어가 일체화된 새로운 개념의 촉각인터페이스로서의 활용가능성을 보여준 대표적인 사례로 판단된다.

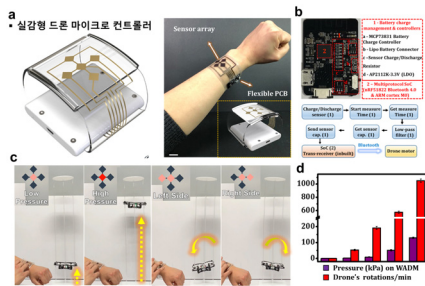


그림 4. 초고감도 이온트로닉 전자피부의 활용 가능성: (a) 초고감도 이온트로닉 전자피부를 무선통신기술과 결합하여 드론 컨트롤러로 활용, (b) 드론 컨트롤러의 무선통신 및 신호처리 과정, (c) 압력제어에 따라 드론의 방향뿐만 아니라 가속도 제어가 가능한 이온트로닉 전자피부, (d) 압력제어에 따른 드론의 RPM 변화.

## 2.2 포토리소그래피 공정을 이용한 초고해상도 탠덤형 유기일렉트로닉스

최근, 유기반도체는 전자전도특성이 산화물 반도체 수준까지 확보되었을 뿐만 아니라, 용액공정기반의 박막화 과정을 통하여 다양한 기계적 물성 및 색순도 확보가 가능하기 때문에 차세대 성장동력소재로 부각되고 있다. 그러나 전자소자의 성능 및 효율 향상을 위해서는 전자소재의 고해상도 패터닝 및 적층이 매우 필수적이다. 따라서 유기반도체 소자의 성능 향상 및 양산화를 위해서 고해상도 패터닝 및 탠덤형 소자 개발 연구가 절실히 요구되는 상황이다. 다만, 기존 유기반도체는 유기용매에 대한 화학적 내구성이 낮아서 포토리소그래피 패터닝 공정이나 적층 공정을 수행할 수 없다는 한계점이 있다. 따라서, 유기반도체의 물성을 고려한 고해상도 패터닝 및 탠덤형 소자의 개발 방법으로는 1) 고해상도 프린팅, 2) orthogonal 포토리소그래피, 3) 경화형 유기반도체 사용 등이 있다. 그러나, 기존의 연구개발방법들은 궁극적으로 연속적인 용액공정을 통한 고해상도 탠덤형 유기소자 제작에 한계점을 보인다.

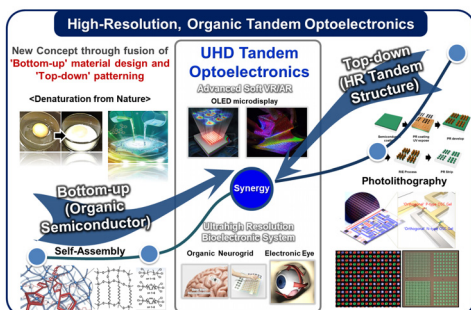


그림 5. FOND LAB 기술핵심전략: 포토리소그래피를 이용한 초고해상도 탠덤형 유기일렉트로닉스.

이에 본 연구실에서는 연속적 용액공정을 이용하여 내화학적, 내식각성이 확보된 ‘orthogonal’ 유기반도체 겔 변환 기술을 설계하여, 변환 메커니즘 및 겔 구조의 광전자 특성을 분석하고, 범용 포토리소그래피를 이용한 마이크론 이하의 초고해상도 유기반도체 패터닝을 성공적으로 달성하였다. 이를 바탕으로 용액공정 기반의 고해상도 탠덤형 유기전자소자(OLED, CMOS 회로)를 구현할 수 있었다(그림 5).

### 2.2.1 연속 용액 공정 기반 고해상도 탠덤형 광전자 소자 개발

졸-겔 화학에 기반한 유기반도체 박막의 3차원 침투형 고분자 구조변환(3-dimensional interpenetrating diphasic polymer network, 3D IDPN)을 통하여 외부 환경에 대해 기계적, 화학적, 전기적, 광학적 특성변화가 없는 p형/n형 유기반도체 겔 박막을 제조하였다. 본 연구실에서는 고분자 반도체와 사다리 구조의 유기실리카 네트워크 간 ‘3차원 초밀도 엉킴구조’를 유도할 수 있는 소재 변환 기술을 개발하고, 이를 통해 전기적 특성 저하 없이 내화학적 및 내식각성이 동시에 확보된 ‘orthogonal’ 유기 반도체 겔을 세계 최초로 구현하였다(그림 6). 개발된 ‘orthogonal’ 유기 반도체 겔 소재는 뛰어난 내화학적 및 내마모성을 가졌을 뿐만 아니라, 건식 식각 공정에도 높은 저항성을 보여 기존 유기 반도체에서 볼 수 없었던 뛰어난 물성을 나타내었다. 이러한 특성을 가지는 ‘orthogonal 유기 반도체 겔’을 이용해, 본 연구실은 건식 식각 공정을 통한 1  $\mu\text{m}$  미만의 초고해상도 정밀 패터닝 형성에 성공하였다. 또한, 연속 용액 공정과 범용 포토리소그래피 공정을 동시에 적용시켜 고성능의 유기 CMOS 회로를 개발하고, 더 나아가 red/green 발광형 유기반도체를 순차적으로 적층 및 패터닝으로써 고해상도

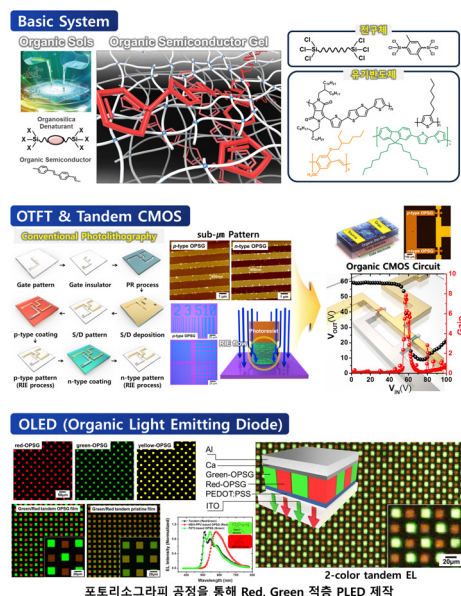


그림 6. 연속 용액 공정 기반 초고해상도 탠덤형 유기광전자 소자.



OLED 마이크로 디스플레이를 구현하였다. 본 연구실에서 개발한 유기 전자 소재 변환 기술은 특정 유기 반도체에만 국한되지 않고 범용적으로 적용될 수 있어 유기 전자 소재를 기반으로 하는 여러 응용 분야로의 확장이 가능하며, 최근에는 유기 전도성 소재에도 적용하여 고신축성·고전도도가 확보된 고성능 유연 전극 개발을 진행중에 있다.

### 2.3 이온 동역학 기반 다중 자극 감지-기억-학습 일체형 뉴로모픽 전자피부

인간은 피부는 촉각을 통해 다양한 자극들을 감지함으로써 외부 세계와 소통한다. 실제 인간이 느끼는 자극의 정보는 확립화되어 있지 않고 개인마다 상이한 특성을 지닌다. 이는 피부의 촉각 수용체가 감각 뉴런에 의해 뇌를 구성하고 있는 시냅스 기억 수용체와 연결되어 있어 자극을 느끼는 과정에서 개인의 인지작용이 개입되기 때문이다. 피부가 외부 자극을 감지하는 센서 역할에만 국한되는 것이 아닌, 뇌와 복합적 인지기능(기억/학습)을 통해 개인의 특성을 나타내는 하나의 수단임을 내포하고 있다. 현재 개발되고 있는 전자피부는 자극을 감지하는 피부의 센서 측면에 집중되어 있으며, 촉각과 뇌의 인지기능(기억/학습)을 모방한 전자피부 연구는 모두 회로적 접근에 한정되어 새로운 방법론에 기반한 소재 설계는 전혀 이루어지지 않고 있다. 또한, 촉각정보의 인지기능(기억/학습)까지 확장된 개념의 전자피부 기술은 관련 특허가 전무한 수준이기 때문에 관련 기반 기술 개발과 원천소재를 발굴하는 것이 시급하다.

따라서, 본 연구실에서는 생체 촉각 및 시냅스 기억 수용체의 이온 동역학인 'trap & release' 메커니즘을 구현하기 위해 이온 펌프 기반의 다중 자극 독립적 감지형 인공 촉각 수용체를 분자 설계하여 독립적 외부 자극에 대해 고민감성, 고신뢰성 감지 특성을 확보하는 연구를 진행하고 있다. 더불어, 외부자극에 의해 나타나는 신경 신호 변화의 가소성을 구현하기 위해 인공 시냅스 기억 수용체를 설계하여, 최종적으로, 이온 펌프 기반의 인공 촉각 수용체와 인공 시

냅스 기억 수용체로 구성되는 시냅틱 트랜지스터를 개발하여 다양한 촉각 정보에 대한 가소성 특성을 확보하고, 단위 소자의 고집적화를 통해 제작된 뉴로트랜지스터를 기반으로 '촉각 감지-기억-학습 일체형' 뉴로모픽 전자피부를 개발 중에 있다(그림 7).

### 3. 연구실 현황 및 비전

본 한양대학교 차세대 광전자 나노 소재 및 소자 연구실(그림 8)은 지난 8년간 인간친화형 소프트 광전자 나노 소재, 소자 및 플랫폼 분야에 110여 편의 SCI 학술논문을 게재하였으며(피인용 횟수: 10,700여 회), 국내외 특허 57건을 출원 및 등록(38건)을 했을 정도로 차세대 웨어러블 광전자 시스템에 분야에 큰 기여를 했다고 확인한다. 특히, 괄목한 만한 사항은 '냄새 맡는 전자피부' 및 '초감도 전자피부 기술'은 한국연구재단과 나노기술협회가 주관하는 각각 '2015년과 2017년 10대 나노기술'로 선정되어 본 연구실의 과학적 기술력을 인정받았으며, 2019년 1월에는 미국 라스베이거스에서 개최된 국제전자제품박람회(CES 2019)에 이온트로닉 전자피부 관련 기술을 전시하여 세계 각국 참가자들에게 많은 관심을 받았다. 이러한 본 연구실의 성과들을 바탕으로 작년에 중소기업을 상대로 기술이전을 하며 기술 상용화에 한걸음 더 나아가는 계기가 되었다.

현재 본 연구실은 김도환 교수의 지도로 박사후연구원 1명, 박사과정 2명 그리고 석박사 통합과정 6명, 석사과정 4명 및 3명의 학부연구생이 새로운 개념의 이온트로닉 소재 및 유기반도체 변환 기술을 기반으로 유연 촉각 인터페이스와 초고해상도 광전자 소자 개발을 위해 연구를 활발히 수행하고 있다. 더 나아가, 감지, 기억 및 학습이 가능한 인간의 신경전달 과정을 모방한 이온트로닉 뉴로모픽 시스템을 구현하고, 이를 컴퓨팅 및 인공지능 시스템과 연계를 통해 4차 산업혁명의 사물인터넷에 활용이 가능한 스마트 유언 디바이스의 발전을 선도할 수 있는 연구 그룹이 되기 위해 연구실의 모든 구성원들이 노력하고 있다(그림 8).

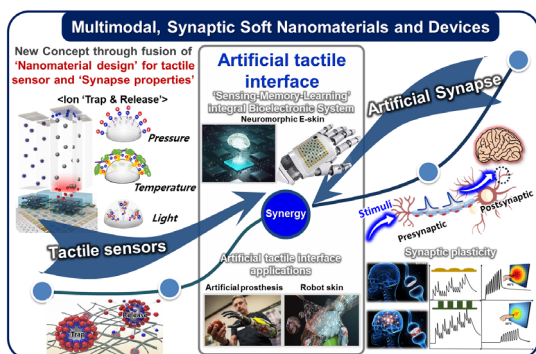


그림 7. FOND LAB 기술핵심전략: 자극 감지-기억-학습 일체형 뉴로모픽 전자피부.



그림 8. 차세대 광전자 나노소재 및 소자 연구실 단체사진.