

인하대학교 바이오융합시스템 연구실

전태준*†, 김선민**†

1. 서론

자연계의 다양한 현상을 공학적으로 응용하는 연구는 삶의 질 개선 등 인류의 발전에 지대한 공헌을 해오고 있다. 그렇지만 자연현상에 대한 이해 및 관련 연구는 여전히 극복해야 할 난제들이 많다. 따라서 현재 연구 단계를 극복하기 위한 새로운 융합 기술에 대한 요구는 점점 커지고 있으며, 이러한 요구에 대응하기 위하여 본 연구실은 2012년 인하대 최초로 상이한 학과(기계공학, 생명공학) 간의 융합연구실로 설립되었다. 본 연구실은 공간뿐만 아니라 연구 주제에 있어서도 완전히 장벽 없이 교류하여 창의적인 아이디어가 도출될 수 있는 환경을 갖추고 있다. 본 연구실에서는 융합연구를 통해 (1) 세포/동물 기작연구를 위한 시스템 개발 (2) 약물과 세포막 간의 상호작용 분석 (3) 생체 소자를 이용한 정수막 제작 (4) 생체 단백질을 이용한 정수 시스템 개발 (5) 전기 습윤 현상을 이용한 에너지 하베스팅 (6) 미세유체 채널을 이용한 바이오 센서개발을 수행하고 있다. 특히 미세유체 시스템을 이용하여 인간과 신경계가 유사하여 널리 모델 동물로 이용되는 예쁜 꼬마선충의 전기/열 자극에 의한 영향을 관찰할 수 있는 시스템과, 피

부세포의 상처회복 과정을 모사할 수 있는 시스템을 개발하였다. 또한 우수한 정수 능력을 지닌 세포 단백질을 활용하여 기존 정수막보다 뛰어난 바이오 융합 정수 막을 개발하였다. 이 외에도 미세구조를 모방하고 전기 습윤현상을 적용하여 고성능의 에너지 생성이 가능한 장치 개발, GMO 단백질이 검출 가능한 비드형태의 바이오 센서를 개발하였다. 이처럼 본 연구실은 폭넓은 분야에서 다학제적인 연구결과를 도출하기 위하여 노력하고 있으며 도전적으로 새로운 분야를 개척하기 위해 다양한 시도를 하고 있다

2. 연구 내용 소개

2.1 미세유체 시스템을 이용한 세포칩(cell chip) 개발

최근 생체 내부의 시공간적 조건들을 정교하게 모사하여 생체 내에서 일어나는 질환 및 생체 현상을 모방할 수 있도록 하는 세포칩에 관한 연구들이 진행되고 있다. 특히 미세 유체 시스템을 이용한 세포 환경의 미세한 제어는 기존의 실험에 비해서 세포 처리 공정의 많은 과정을 간소화할 수 있으며, 소형의 칩 위에 실험실을 구현할 수 있어서 세포 분석 분야 등에 널리 쓰여 지고 있다. 세포칩 개발은 PDMS, 생체폴리머 등 생체 친화적 재료들과 세포 외 기질(ECM)을 이용하여 생체 내 환경과 유사한 환경을 조성하는 연구가 수반된다.

본 연구실에서는 현재 상처 치유 및 피부 조직을 3차원으로 모방할 수 있는 피부 칩과 심근 세포를 이용한 심근세포 모사 칩 연구를 진행하고 있다. 또한 순환계 기능 이상으로 인해 심장이 혈액

† Sun Min Kim: Department of Mechanical Engineering, Inha University
E-mail : sunmk@inha.ac.kr

† Tae-Joon Jeon: Department of Biological Engineering, Inha University
E-mail : tjjeon@inha.ac.kr

* 인하대학교 생명공학과

** 인하대학교 기계공학과

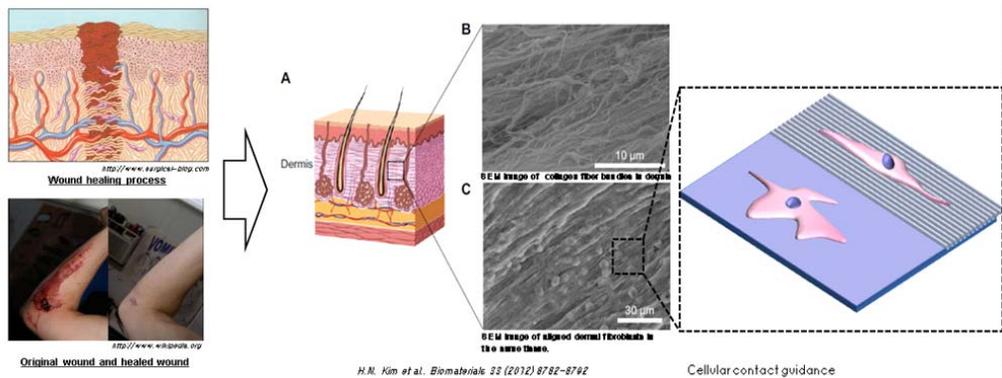


Figure 1. 생체 내 상처 발생 모식도와 피부 진피층에서의 ‘Contact guidance effect’에 의한 세포 정렬 SEM 이미지

부족 상태에 이르러 발생하는 질환인 허혈성 심장 질환에 대한 연구도 진행하고 있다. 이러한 세포칩을 이용하여 질병 발생 및 치료의 기전 규명에 대한 연구를 진행하고 있다.

피부 조직 중 진피는 주로 fibroblast로 이루어져 있으며 생체 내에서 collagen fiber로 이루어진 다발에 의해 방향성을 가지고 정렬되어 있으며, 이를 따라 이동 및 성장을 한다. 따라서 본 연구실은 다양한 패턴 표면 위에서 fibroblast를 배양하여 정렬 정도에 따른 세포의 이동 및 성장을 관찰하는 연구를 진행하였으며(Fig.1), 이를 미세유체 시스템과 결합하여 화학적으로 상처를 발생시키고 치유 과정을 관찰할 수 있는 2차원 피부 칩(2D Skin on a chip)을 개발하였다. 미세유체 시스템 내에서 유체의 흐름은 대부분 Laminar flow이기 때문에 Multiphase flow를 형성할 수 있는데, 이러한 특성을 이용하여 2차원 미세유체 피부 칩은 유체의 흐름을 제어하여 상처의 범위 및 정도를 조절할 수 있다. 또한, 실시간으로 세포의 상태를 관찰할 수 있어서 기본적인 상처 치유 과정에 대한 병리학적 분석 연구에 기여할 수 있으며, 기능성 화장품 및 의약품 검사에 이용될 수 있다. 그리고 이 2차원 진피 모델을 발전시켜 표피 조직과의 공배양을 통해 실제 피부와 더 유사한 구조를 갖는 3차원 피부 모델을 제작에 대한 연구를 진행하고 있으며, 이를 통해 다양한 질병과 생체 현상들을 제어 및 규명하기 위한 연구가 지속될 예정이다. 그리고 허혈 및 재관류 현상의 모사가 가능한 소형화된 칩 형태 플

랫폼의 각 세포 배양웰에 서로 다른 조건들로 허혈 및 재관류 현상을 재현할 수 있도록 하였다. 또한 이를 가지고 조건에 따른 다양한 세포 손상 정도를 분석할 수 있도록 제작하였다. 나아가 이 플랫폼을 발전시켜 심장 질환 이외에 다른 세포를 이용한 허혈성 질환을 모사하고, 기존 치료제나 신약(또는 후보 물질)의 효용성과 안정성을 평가할 수 있는 효과적인 모델로 사용하기 위한 연구가 지속될 예정이다.

2.2 예쁜꼬마선충의 특성 분석을 위한 미세유체 시스템 개발 연구

예쁜꼬마선충은 약 1000 여개의 세포로 이루어져 있으며 몸체의 길이가 최대 1 mm인 작은 생명체이나 유전학적으로 최대 80%까지 인간과 상동한 특성으로 인하여 전 세계적으로 신경학적 측면, 행동학적 측면에서 활발히 연구되고있는 모델동물이다. 특히 예쁜꼬마선충은 화학적, 물리적 자극에 대해서 특정한 행동 반응을 나타내는데, 본 연구실에서는 이러한 예쁜꼬마선충의 자극-반응 특성 분석을 위한 미세유체시스템 개발 연구가 진행되고 있다.

예쁜꼬마선충의 다양한 자극에 대한 행동반응을 연구하기 위한 플랫폼으로는 미세유체시스템의 활용이 확대되고 있다. 예쁜꼬마선충이 마이크로 수준의 크기를 갖기 때문에 미세유체시스템 상에서 예쁜꼬마선충에 다양한 자극을 인가하고 그에 따른 행동반응을 분석하는 것은 매우 효율적이다.

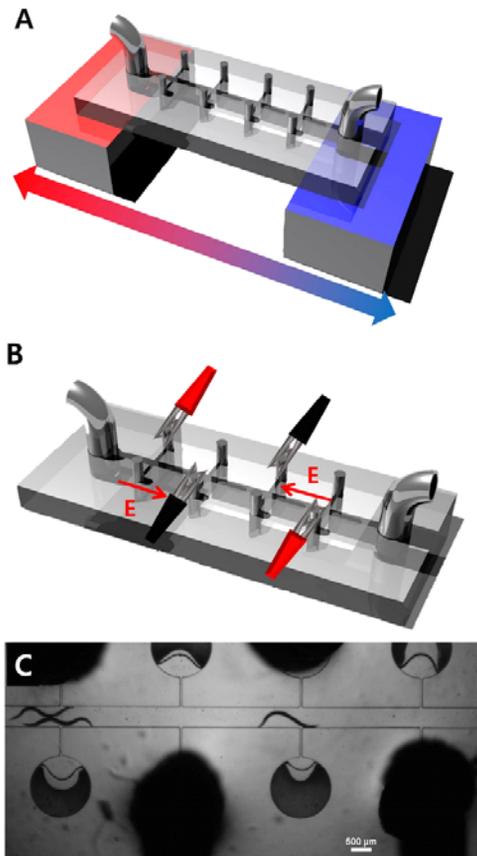


Figure 2. 다양한 물리적 자극을 인가할 수 있는 미세유체시스템 (A) 온도구배 시스템 (B) 전기장 형성 시스템 (C) 채널 속에서의 예쁜꼬마선충 (윤선희, 박해령, 전태준, & 김선민, 2015)

따라서 본 연구실에서는 PDMS를 이용하여 미세유체시스템을 제작하여 예쁜꼬마선충의 행동 반응 연구를 진행하고 있다. PDMS는 광학적으로 투명한 특성을 가지기 때문에 이를 이용하여 제작한 미세유체시스템은 현미경 하에서 실시간으로 예쁜꼬마선충의 자극에 대한 반응을 관찰하고 기록하기에 적합하다.

대표적으로 본 연구실에서는 미세채널을 이용하여 NaCl의 농도 구배를 구현할 수 있는 미세유체시스템을 제작하고, 이에 대한 예쁜꼬마선충의 화학주성(chemotaxis)을 분석한 연구를 진행하였고, 물리적 자극으로는 전기장, 온도 구배를 인가하여 이에 대한 예쁜꼬마선충의 전기주성

(electrotaxis), 온도주성(thermotaxis)을 확인하고 분석할 수 있는 미세유체시스템 개발 연구를 진행하였다. 후속 연구로는 더 다양한 화학적, 물리적 자극의 인가로 스펙트럼을 넓힌 연구가 지속적으로 진행되고 있으며 이러한 연구는 모델생물체인 예쁜꼬마선충의 다양한 특성을 효율적으로 연구할 수 있는 플랫폼 개발이라는 의미를 가진다. 더 나아가 이러한 연구로부터 산출되는 결과는 개체 수준의 High-throughput 시스템의 기초가 되며, 신약 스크리닝과 같은 응용 연구에 활용될 수 있다.

2.3 미세유체시스템 분석을 위한 휴대용 이미징 시스템의 개발

최근 마이크로/나노 기술 발달이 다양한 연구분야로 긍정적인 영향을 미치고 있으며, 특히 의학/생명과학 분야에 적용되어 기존에 해결하지 못했던 문제들을 해결하는데에 사용되고 있다. 조직공학, Organs on Chips과 같은 분야가 대표적인 적용 사례로 인체, 동물의 생체 미세환경을 모사/재현하고 이를 의료, 생물학적 연구모델로 활용하기 위해 멀티프로세싱이 가능한 소형 시스템으로 구현하는 연구가 활발히 수행되고 있다. 한편 이러한 소형 시스템은 필연적으로 특성 및 성능평가를 위한 분석을 필요로 하게 되는데, 문제는 사용되는 분석 방법이 기존의 광학현미경과 같은 대형화된 시스템을 그대로 사용하는 것이 일반적이다. 이 경우 개발된 소형 칩의 효율적 분석뿐만 아니라 응용분야에도 한계가 발생한다. 따라서 본 연구실에서는 Multi-wavelength LED를 탑재한 미니현미경을 개발하여 이미징 수행이 가능하고, 또한 LED 제어를 통해 cell/tissue phototaxis 연구가 가능한 포터블 광학 분석 시스템을 개발을 목적으로 한다.

기본적으로 해당 시스템은 기존의 역상현미경(inverted microscope) 시스템의 구조를 토대로 바이오 샘플의 촬영 및 분석에 용이하도록 설계되었다. 광학이미지 데이터 수집을 위해 CMOS 센서가 사용되었고, 특히 시스템의 소형화를 위해Webcam 내 CMOS센서를 사용하여 스케일의 축소 및 USB 연결을 통한 PC 호환성을 획득하고자 했다. 광원의 경우 1개의 칩에 4개의 각기 다른 파장의 LED가 집적된 ACULED(PerkinElmer社)를 탑재함으로

서 광학이미지 촬영 및 광학적 자극이 가능하도록 시스템을 제작하였다.

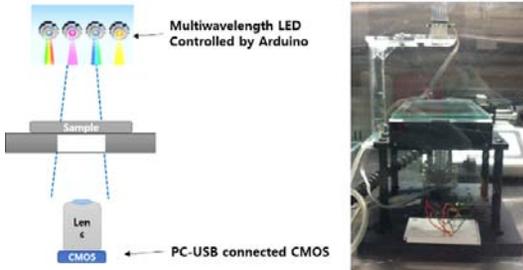


Figure 3. 다파장 LED 탑재 포터블 이미징 시스템의 모식도 및 사진

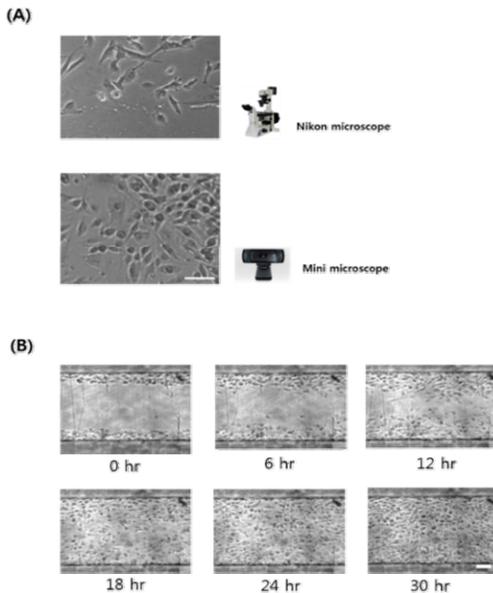


Figure 4. 포터블 이미징 시스템의 촬영 성능 테스트(A) 기존 일반 광학현미경과의 세포 촬영 결과 비교(B) 시간에 따른 상처치료 모델의 연속촬영 사진(Scale bar = 50um)

광원 제어 및 이미지 데이터 수집에는 Matlab, Arduino 기반 프로그래밍이 활용되었다. 특히 광학 자극 목적이 아닌 단순 광학촬영의 경우 지속적인 빛 노출을 바이오샘플에 의도치 않은 자극이 될 수 있으므로, 이미지 획득 전후에만 광원이 작동되도록 하였다. 한편 바이오샘플에 광학적 자극을 주기 위해서 파장별 LED를 개별적 혹은 혼합하여 작동

할 수 있도록 프로그래밍 하였다.

제작된 시스템의 바이오샘플 칩 대상의 이미징 성능을 평가하기 위해 in vitro wound healing model(체외 상처치유모델)을 촬영하였다. 해당 샘플 칩은 미세채널 내 배양된 3T3 fibroblast에 대한 trypsinization을 통해 cell free area를 형성한 in vitro wound healing model로서 촬영은 인큐베이터 내, 37 °C, 5% CO₂ 조건에서 48시간동안 이루어졌다.

2.4 역전기습윤현상(REWOD)을 이용한 에너지 하베스팅

빛에너지, 열에너지, 운동 에너지 등 자연현상 및 실생활에서 에너지는 지속적으로 발생하지만 실제로 사용되는 에너지는 일부 밖에 되지 않는다. 이렇게 버려졌던 에너지들을 수집하여 재사용하는 기술을 에너지 하베스팅(Energy harvesting)이라고 한다. 에너지 하베스팅 기술은 아직까지 그 출력이 낮지만 기존에 사용되고 있는 에너지원의 환경문제에 대한 우려로 대체 에너지의 개발이 필요하게 되고 낮은 출력에서도 구동 가능한 기기들의 개발로 인해 기술의 단점이 보완되면서 소모가 적지만 장기적으로 에너지가 필요한 센서나 웨어러블 디바이스 분야에서 주목하고 있다.

본 연구실에서는 물과 같은 극성액체가 유전물질(Dielectric materials)과 접할 때, 물과 유전물질의 경계에서 서로 다른 전하를 띠게 되어 이로 인해 전위차를 발생시킬 수 있는 역전기습윤현상(Reverse electro wetting on dielectric, REWOD)을 이용한 에너지 하베스팅 기술을 연구하고 있다. 물이 유전물질과 접하게 되면 물은 양전하를 띠고 유전물질은 음전하를 띠며 물과 유전물질 경계에서 전기 이중층(Electrical double layers, EDL)이 형성된다. 유전물질과 물의 경계에서 이러한 대전이 일어나는 동안 유전물질 내부에서는 분극 현상이 일어나 전극과 닿아있는 반대쪽 경계는 양전하를 띤다. 이로 인해 전극 간에 전위차(Electric potential difference, EPD)가 발생하며 전자의 이동을 야기한다.

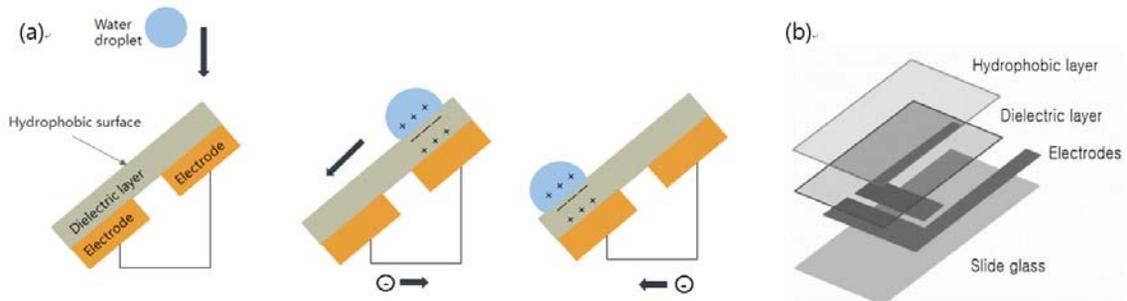


Figure 5. (a) 역전기습윤현상(REWOD)의 원리 및 (b) REWOD 시스템의 구성(Cho et al., 2015)

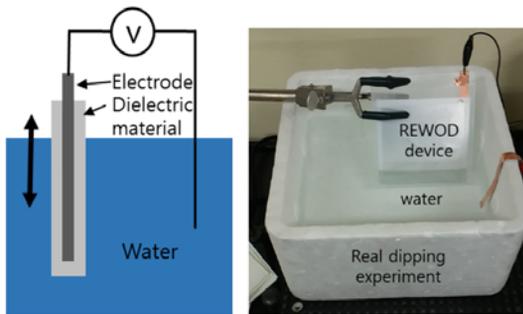


Figure 6. 대량의 물에서의 REWOD 시스템 모식도 및 wave 환경을 모사한 실제 작동 환경

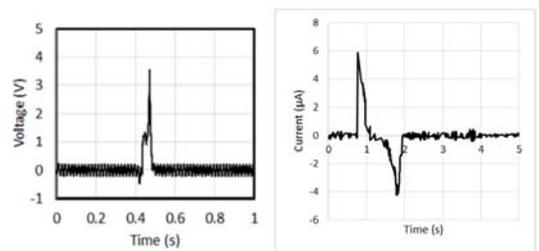


Figure 7. 물에 의한 전압 차 및 전류 발생 확인 (Cho et al., 2015)

2.5 생체막 단백질(Aquaporin)을 이용한 정수막 제작

물이 전극 위를 지나는 속도에 따라 발생하는 전류의 양이 다르기 때문에 이를 조절하기 위해 REWOD 시스템을 구성하는 유전물질의 종류를 달리하여 전류 발생량을 관찰하였으며 주변에서 쉽게 구할 수 있는 재료를 이용해서도 전류를 발생시킬 수 있음을 보았다. 또한 재료의 종류뿐 아니라 재료의 표면 상태를 변형시켜 물의 움직임을 조절할 수 있으며 전극의 모양에 따른 변화도 관찰함으로써 REWOD 시스템 자체의 구조를 실제 제품으로 사용하기 위해 개선하고 있다. 더불어 시스템의 구조를 다양하게 설정하여 최종적으로 높은 효율을 가질 뿐만 아니라 초소형화의 REWOD 시스템을 개발하는 것을 목표로 연구를 지속하고 있다.

현재, 이온 정수에 대한 기존의 담수화막들은 폴리머 사슬간에 존재하는 매우 긴 자유체적(free volume)을 투과경로로 하여 물분자만 투과하고 다른 분자나 이온은 차단되는 방식을 이용하기 때문에, 선택도는 매우 우수하나 투과도는 매우 저하되는 문제가 있으며, 이것을 극복하지 못하는 개발의 한계의 다다라 있다. 따라서 카본나노튜브(CNT)나 이쿠아포린(aquaporin)과 같은 새로운 소재에 대한 관심이 증가하고 있으며 수많은 연구자들이 해당 소재를 담수화막에 적용하기 위하여 노력하고 있다.

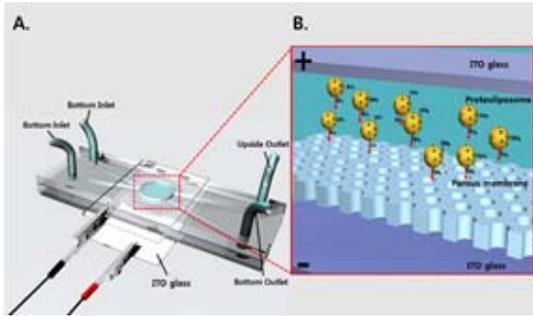


Figure 8. 인공생체막의 전기적 유도 디바이스와, 이를 이용한 인터페이싱 과정의 모식도

이중 아쿠아포린은 크기를 기반으로 물만 통과하는 생체채널로써 기존 분리막에 비하여 10,000 배 이상의 투수율과, 동시에 99.99% 이상의 이온배제율을 지닌 매우 우수한 소재로 손꼽힌다. 하지만 그 동안 압력에 취약한 생체막의 한계와 정수막으로 구성이 어렵다는 이유, 그리고 대면적화의 어려움으로 사용되지 못하고 있다. 본 연구실에서는 가교결합을 통하여 견고하게 만든 아쿠아포린을 포함한 리포솜을 전기적인 힘으로 농축하여 이러한 문제점을 극복하였다. 해당 시스템은 리포솜이나 포어의 크기와 상관없이 전기적힘으로 지지체의 포어를 다수의 리포솜이 덮는 구조이기 때문에 쉽고 빠르게 고성능의 정수시스템을 구성할 수 있었으며, 성공적으로 전면전 면적의 지지체를 균일하게 덮을 수 있었기 때문에 기존 기술이 가진 한계점을 극복이 가능하였다.

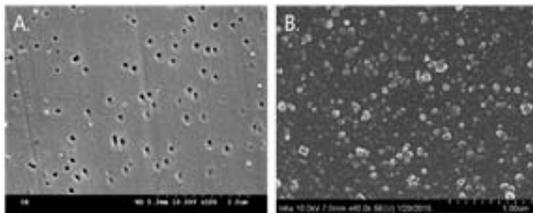


Figure 9. PDA 및 생체인공생체막으로 도포되지 않은(A), 도포된(B) PCTE film의 표면

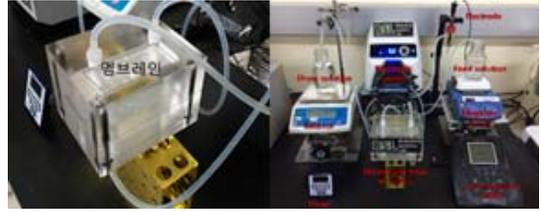


Figure 10. 인공생체막 챔버와 정삼투를 위한 디바이스

본 실험에서 리포솜은 양전하를 띤 물질을 섞어서 전기적으로 지지체로 유도되게 하였으며, 이 리포솜은 홍합접착 단백질로 알려진 폴리도파민으로 표면에서 떨어지지 않게 접착 되었다. 이 같은 방법을 사용할 경우 지지체 위에 인공생체막 구체가 95%이상의 pore에 대하여 성공적으로 도포됨이 확인 되었다. 이렇게 제작된 아쿠아포린 정수막은 85%이상의 이온 배제율과 기존 폴리머기반의 정수막보다 5배가량 증가된 투수율을 나타냈다.

우수한 성능의 아쿠아포린을 정수시스템에 활용하는 방법은 끊임없이 개발 중에 있으며 아직까지 산업서 활용하기 위해서는 극복해야할 요소가 많이 있다. 본 연구에서 사용된 방법은 기존의 방법보다 간단하고 활용하기 용이한 반면 높은 성능을 나타내기 때문에, 아쿠아포린의 산업적 활용의 길목기술로써 역할을 할 것으로 기대된다.

2.6 비색형 바이오센서 (Chromatic biosensor)

바이오센서는 음용수나 식품에서 독성물질을 검출하거나 인체의 질병을 진단하는 검출도구로 민감도가 뛰어난 생체소재를 이용한 센서를 말하며 생명공학뿐만 아니라 기계공학 분야에서도 각광받고 있는 분야다. 바이오센서의 주된 구성요소는 생물질 (biomolecule)을 인식하는 수용체 (receptor), 인식된 자극을 전기적신호나 광학적신호와 같이 측정이 가능한 신호로 변환해주는 변환기 (transducer) 그리고 신호를 정량적으로 측정하는 측정기 (measuring instrument)로 이루어진다. 최근 질병과 오염을 조기에 진단하는 요구가 증가함에 따라, 의료, 환경, 식품에서부터 군사용에 이르기까지 미량의 샘플로도 신속하고 정확하게 목적

물질을 검출하는 바이오센서의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이에 따라 본 연구실에서는 인공 생체막 (artificial cell membrane)을 활용한 비색형 바이오센서를 개발하는 연구를 수행하고 있다.

구체적으로 설명하면, 본 연구팀은 폴리디아세틸렌 (PDA, polydiacetylene) 베시클을 이용한 비색형 바이오센서 개발 연구를 수행하고 있다. 이 폴리디아세틸렌 베시클은 디아세틸렌 (diacetylene) 계열의 양친매성 단량체 (amphiphilic monomer)가 수용액상에서 자가정렬 (self-assembly)하여 생체막 구조와 같은 이중막 형태를 형성하고 있는 수백 나노크기의 구형 구조체인데, 특히, 디아세틸렌계열의 단량체가 가지고 있는 삼중결합 (triple bond)이 정렬된 이후 254 nm 파장의 자외선에 노출되었을 때 주변의 삼중결합과 가교 (cross-link)를 형성하게 되어 구조체의 색이 무색에서 푸른색으로 변하게 된다. 푸른색의 폴리디아세틸렌 베시클은 pH, 온도 그리고 표면에서 일어나는 물리적 자극과 같은 외부 자극이 가해졌을 때 가교의 꺾임 현상에 의해 붉은색으로 변하는 색전이 특성을 가지고 있다 (Fig 1.A). 이러한 색변화는 육안으로 쉽게 판별 가능하기 때문에 다양한 종류의 현상용 비색형 바이오센서 개발에 응용되고 있다. 본 연구팀은 이러한 폴리디아세틸렌 베시클을 활용하여 GMO (genetically modified organisms) 검출 센서를 개발했다 (Fig 1.B). 먼저, GMO를 검출하기 위해 현재 가장 흔하게 사용되는 GMO 마커단백질인 PAT (phosphinothricin acetyltransferase) 단백질을 인지하는 항체를 폴리디아세틸렌 베시클 표면에 기능화하여 단백질 특이적인 색변화가 일어나도록 유도했다. 그리고 이를 하이드로겔 (hydrogel) 내부로 농축하여 색변화 신호를 증폭시켰으며, 미세유체 시스템 (microfluidic system)을 통해 하이드로겔을 비드 (bead) 형태로 만들어 센서의 활용 및 회수가 용이하게 했다. 이뿐만 아니라 연구팀은 개발된 폴리디아세틸렌 베시클 기반 센서의 한계를 극복하고 민감도를 개선하기 위한 다양한 후속연구를 수행하고 있으며, 이와 동시에 병원균과 같은 다른 목적물질을 현장에서 신속하게 검출하는 센서관련 연구도 지속적으로 수행하고 있다.

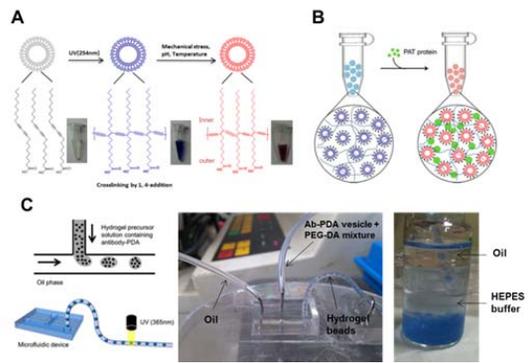


Figure 11. 폴리디아세틸렌 베시클을 이용한 비색형 바이오센서 연구; (A) 폴리디아세틸렌 베시클의 색변화 특성(Kim et al., 2012), (B, C) 폴리디아세틸렌 베시클을 이용한 GMO 검출 센서 및 센서 제작 시스템(Jung et al., 2015)

2.7 막단백질과 약물간의 상호작용 확인을 위한 인공세포막 플랫폼

데시프라민 (DesipramineTM)과 메플로퀸 (MefloquineTM) 등의 약물과 이외의 다양한 화학물질은 막과 막단백질에게 영향을 줌에도 불구하고 이에 대한 정확한 메커니즘은 오랜기간 밝혀지지 않아왔다. 본 연구실에서는 완전히 화학적으로 통제된 상황에서 막과 막단백질에 다양한 화학물질이 어떻게 영향을 주고받는지 다양한 방법을 통하여 밝혀내는 연구를 진행하고 있다. 연구를 통해 최근 대체 용매로써 각광을 받고 있는 이온성액체가 막과 막단백질 미치는 영향에 대하여 독성 평가 플랫폼을 구성하여 확인 하였다.

이온성 액체는 대기오염에 대해서는 안전한 물질이지만, 수생환경에서의 독성은 기존의 용매들보다 오히려 더 심각하다고 보고되고 있었다. 하지만 이온성액체가 세포막과 상호작용하는 기작은 밝혀지지 않았기 때문에, 인공세포막을 구성하여 이러한 영향을 조사하였다.

본 연구에서는 막단백질 중 한 종류인 (그라미시딘 A) Gramicidin A를 모델 단백질로 선정하고 막단백질과 세포막 그리고 이온성액체의 상호작용에 대하여 확인하였다. gA는 막단백질로, 지질 이중막의 양쪽에 각각 2개의 단위체로 존재하며, 단위체가 만나 이합체를 형성할 때 1가 양이온만 선

택적으로 투과시키는 성질을 지녔다. 이때 이온의 투과속도나 이합체의 지속 시간은 막의 상태에 영향을 받는다. 이러한 이온성 액체의 gA 단백질에 대한 영향을 전기적(electrical)인, 그리고 광학적(optical)인 방법을 이용하여 확인하였다.

전기적인 측정은 평면 지질막 위에 그라미시딘 A를 재건하고, 이온성액체의 농도 및 종류에 따른 이합체의 지속시간 및 전도도의 변화를 기록함으로써 수행되었다. 그 결과 단일 채널 수준에서 이온성액체가 이합체의 지속시간을 증가시키며, 전도도의 감소, 즉 이온의 이동을 방해한다는 것을 밝혀냈다. 형광 측정법은 형광물질을 포함하고 있는 리포솜(liposome)을 구성하여 그라미시딘A의 채널을 투과해 들어가는 퀸처(quencher)의 투과 정도에 따른 형광감소를 이온성액체의 농도에 따라 분석함으로써 수행되었다. 마찬가지로, 이온성액체의 탄화수소 체인의 길이가 길수록 그리고 농도가 높을수록 막단백질에 더 큰 영향을 주었다. 이것은 또한 기존의 세포를 기반으로 한 독성실험과 일치하는 결과로 이온성액체가 막에 교란을 주고, 이차적으로 막단백질에도 영향이 미쳐, 세포독성으로 이어진다는 것을 의미한다.

결과적으로, 본 플랫폼을 통하여 이온성 액체뿐만 아니라 다양한 화학물질의 독성평가를 정량적으로 진행할 수 있었으며, 이러한 연구결과는 더 생체친화적인 화합물의 디자인을 위한 자료로 사용될 수 있을 것이다.

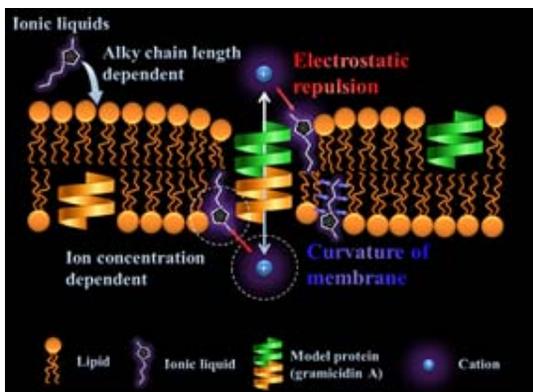


Figure 11. 이온성액체와 막단백질의 상호작용 (H. Ryu & Bartwal, 2008)

3. 맺음말

인하대학교 바이오융합시스템 연구실에서는 의료, 생명과학, 환경 분야에서 직면한 문제를 효율적으로 해결하기 위해 다학제적 관점에서 생체/비생체 재료의 융합시스템을 개발하고 있다. 세포, 개체 수준의 생체재료 융합시스템으로 생체모사 세포칩, 꼬마선충 연구 플랫폼, 그리고 이 같은 시스템 연구를 위한 포터블 이미징 시스템 개발 연구를 수행하고 있다. 단백질 수준에서는 아쿠아포린 막단백질을 이용한 초순수 정수시스템, 비색형 바이오센서 그리고 인공세포막을 통한 약물테스트 연구를 위한 융합시스템을 개발하고 있다. 이 같은 융합연구를 통해 원천기술 확보 및 시장 선점을 이루고, 관련분야에 학술적/산업적 파급효과를 주고자 다양한 분야 간의 끊임없는 연구교류 및 융합 연구를 이어가고자 한다.

REFERENCE

- 1) Cho, J. H., Kim, G. Y., Choi, S. B., Jeon, T., & Kim, S. M. (2015). Micro Energy Harvesting System Based On Reverse Electro Wetting On Dielectric (REWOD).
- 2) Jung, S. H., Jang, H., Lim, M. C., Kim, J. H., Shin, K. S., Kim, S. M., ... Jeon, T. J. (2015). Chromatic biosensor for detection of phosphinothricin acetyltransferase by use of polydiacetylene vesicles encapsulated within automatically generated immunohydrogel beads. *Analytical Chemistry*, 87(4), 2072-2078.
- 3) Kim, Y.-R., Jung, S., Ryu, H., Yoo, Y.-E., Kim, S. M., & Jeon, T.-J. (2012). Synthetic Biomimetic Membranes and Their Sensor Applications. *Sensors*, 12(12), 9530-9550. <http://doi.org/10.3390/s120709530>
- 4) Ryu, H., & Bartwal, K. S. (2008). Investigations on luminescence characteristics of Eu and Cr codoped BaAl₂O₄. *Materials Chemistry and Physics*, 111(1), 186-189. <http://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.04.007>
- 5) Ryu, H., Choi, S., Park, J., Yoo, Y.-E., Yoon, J.

S., Seo, Y. H., ... Jeon, T.-J. (2014). Automated Lipid Membrane Formation Using a Polydimethylsiloxane Film for Ion Channel Measurements. *Analytical Chemistry*, 86, 8910-8915. <http://doi.org/10.1021/ac501397t>

6) 윤선희, 박해령, 전태준, & 김선민. (2015). 미세 유체시스템을 이용한 예쁜꼬마선충의 물리적 자극에 대한 반응 분석. *한국가시화정보학회지*, 13(2), 22-27.