

선인장 표면 구조를 모사한 자가가습 고분자분리막 개발

고분자분리막(polymeric membrane)은 저온 연료전지를 비롯하여 물 전기분해장치, 플로우 배터리(flow battery) 등 이온의 선택적 투과성 필요한 장치에 사용되는 핵심 소재이다. 하지만 가장 대표적인 고분자분리막인 Dupont사의 Nafion을 비롯하여 현재 사용되고 있는 대부분의 고분자분리막은 열적 안정성이 낮다(분리막이 견딜 수 있는 온도가 80~90 °C에 그친다). 따라서 구동 시 120 °C 이상 올라가는 연료전지를 안정적으로 이용하기 위해서는 온도를 80 °C로 유지하기 위한 별도의 냉각 장치가 필요하다. 또한 분리막의 우수한 이온전도도 확보를 위해서는 고분자분리막이 항상 일정량 이상의 수분을 머금고 있어야 하는데, 이 때문에 연료전지에는 별도의 습도제어 장치가 반드시 필요하다는 문제점이 있다. 이를 극복하기 위해서 한국의 한양대와 중국의 Tianjin University의 공동연구진은 표면의 기공을 통해 습도를 유지하는 선인장의 표면 구조에 주목하였다. 선인장 표면의 기공은 따뜻하고 건조한 낮에는 스스로 닫히고, 반대로 춥고 습한 밤에는 스스로 열려 수분의 손실을 최소화한다. 이를 모사하기 위해 공동 연구진은 저가의 비불소계 고분자분리막에 10~100 나노미터의 얇은 플라즈마 막을 씌워 표면에 나노크랙(nanocrack)을 형성하였다. 이 나노크랙은 주변 환경의 습도에 따라 열리고 닫히는 '밸브' 역할을 수행하여 별도의 습도제어 장치가 없어도 우수한 이온전도도 확보가 가능하다. 연구진은 이를 바탕으로 고온(120 °C), 저가습(35%) 조건에

서도 높은 수소이온전도 특성을 오랜 기간 동안 안정적으로 유지하는 저가의 비불소계 고분자분리막을 개발하였다. 이번 연구결과는 청정 수소에너지를 이용한 보급형 연료전지 차량과 가정용 연료전지 시스템에 적용 가능한 원천기술로, 나아가 바닷물로 에너지를 생산하는 역전기투석공정용 분리막 공정과 에너지하베스팅용 분리막 공정에도 응용 가능할 것으로 기대된다. 본 연구결과는 "Nanocrack-regulated self-humidifying membranes"라는 제목으로 *Nature*에 게재되었다.

<*Nature*, **532**, 480 (2016)
DOI: 10.1038/nature17634>

바이오필름 생성과 외벽 분해에 모두 관여하는 효소발견

캐나다 University of Toronto의 연구진은 미생물에 의해 형성된 바이오필름(biofilm)을 분해할 수 있는 두 종류의 효소를 발견하였다. 바이오필름 분해에 역할을 한 이 효소들은 흥미롭게도 바로 바이오필름을 형성시키는데 관여한 효소인지라 더욱 주목을 받았다. 미생물이 항생물질에 대해 내성을 확보하게 되는 방법 중 하나는 바로 외부로부터의 직접적인 공격을 막을 수 있는 바이오필름을 표면에 생성하는 것이다. 현재의 질병치료 기법을 통하여 병원균을 효과적으로 제어하기 위해서는 표면의 바이오필름을 무력화시키는 기술 개발이 반드시 필요하다. 특히나 이미 만들어진 바이오필름 장벽을 무너뜨려 항미생물 제제가 미생물에 접근하는 것을 용이하게 할 수 있는 방법이 필요한 실정이다. 이와 관련하여 캐나다의 연구진은 바이오필름의

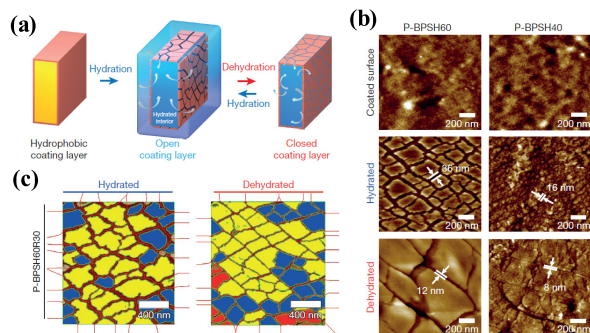


그림 1. (a) 자가가습 가능한 나노밸브가 도입된 고분자분리막의 개념도, (b) 플라즈마 처리를 통해 나노크랙이 형성된 고분자분리막 표면의 AFM 이미지, (c) 나노크랙이 형성된 고분자분리막 표면분석.

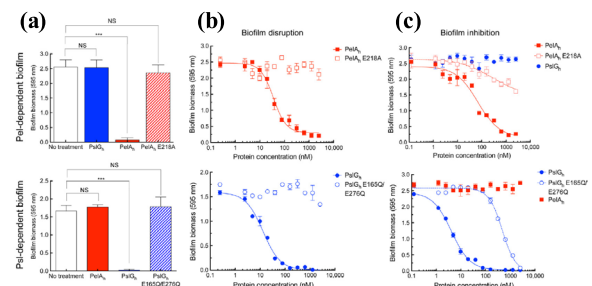


그림 2. *P. aeruginosa* 바이오필름 파괴(disruption) 및 억제(inhibition)에 관여하는 PelA와 PslG를 보여주는 연구결과.

구조와 형성과정 그리고 바이오필름이 어떻게 미생물에 의해 유지되는지를 확인하는 과정에서 바이오필름 생성 과정에 관여 하기도 하며, 또한 생성된 바이오필름을 분해하기도 하는 효소를 발견하였다. 기회감염 세균인 *Pseudomonas aeruginosa*는 바이오필름을 형성할 때 세포의 다당류(exopolysaccharides)인 Pel 과 Psl 의 합성이 이루어지며, 이 다당류는 바이오필름의 구조를 형성하고 유지하는데 주요한 역할을 한다. 이 다당류를 합성하는데에는 PelAh 와 PslGh 라는 두 종류의 효소가 관여하는데, 이 효소들은 미생물 세포 내에 이러한 다당체가 축적되는 것을 막는 역할(glycoside hydrolase)을 하기도 한다. 이 점에 착안하여 연구진은 *Pseudomonas aeruginosa*의 표면에 형성된 바이오필름을 위 두 효소를 이용하여 분해하여 녹여낸 뒤 바이오필름에 감추어져 있던 미생물들을 외부로 노출시킬 수 있음을 확인하였다. PelAh 와 PslGh 는 직접적으로 미생물을 죽이지는 않지만, 미생물을 외부로 노출시켜 미생물이 항미생물 제제에 보다 민감하게 반응 할 수 있게 하여 약물의 효과를 증대시킬 수 있다. 이는 바이오필름을 형성하는 사람의 감염증에 인체에 무해한 효소를 적용하여 병원균을 통제할 수 있다는 가능성을 보이는 첫 번째 단계의 결과로, 항미생물제제가 보다 효과적으로 대상 미생물을 공격할 방법을 제시하는 결과라 할 수 있다. 본 연구결과는 "Exopolysaccharide biosynthetic glycoside hydrolases can be utilized to disrupt and prevent *Pseudomonas aeruginosa* biofilms"라는 제목으로 *Science Advances*에 게재되었다.

<Science Advances, 2, e1501632 (2016)

DOI: 10.1126/sciadv.1501632>

해양을 표류하는 플라스틱 잔해

환류라고 불리는 대양의 소용돌이에는 엄청난 양의 분해되지 못한 플라스틱 잔해들이 떠다니고 있으며, 이들은 머지 않아 인류에게 심각한 환경문제를 초래한 것으로 예상된다. 그 동안 해양 플라스틱 잔해의 분해에 대한 연구는 주로 연구실 환경에서 시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 해양 탐사를 통해 획득한 실제의 잔해들의 모습과 비교하는 방법을 통해 진행되어왔다. 따

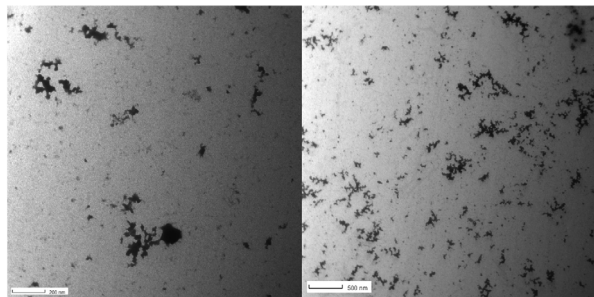


그림 3. 해양에서 채취된 나노플라스틱의 TEM 이미지.

라서 연구는 그나마 비교적 쉽게 샘플링 할 수 있는 수 밀리미터 (millimeter)크기를 갖는 비교적 커다란 스케일의 마이크로플라스틱(micro-plastic)에 집중되어 왔으며, 해양 플라스틱 잔해에 분해에 대한 모델과 및 플라스틱 잔해에 대한 환경적 영향분석 전부 마이크로플라스틱에 기초하여 이루어졌다. 이번 연구를 통해 프랑스 CNRS 연구팀은 처음으로 수백 나노미터 (nanometer) 크기의 나노플라스틱(nano-plastic)이 해양에 존재함을 확인하였다. 아직 나노플라스틱의 형성 메커니즘은 완벽하게 규명되지 않았으나, 일차적으로 마이크로플라스틱이 태양의 자외선에 의해 수백 나노미터 크기 이하의 소형 나노플라스틱(small nano-plastic)으로 광분해되고, 이들이 다시 결합하여 보다 큰 크기의 프랙탈 나노플라스틱을 형성하는 것을 확인하였다. 마이크로플라스틱과는 전혀 다른 환경적 유해성을 가질 수도 있는 해양 나노플라스틱의 발견은 나노크기의 플라스틱 잔해들의 운동과 분해 메커니즘을 밝힐 새로운 모델링 방법 개발에 대한 필요성과 더불어 이러한 잔해들이 생태계에 미치는 영향을 훨씬 더 다양한 각도에서 진행되어야 함을 시사한다. 본 연구결과는 "Marine plastic litter: the unanalyzed nanofraction"라는 제목으로 *Environmental Science: Nano*에 게재되었다.

<Environ. Sci.: Nano, 3, 346 (2016)

DOI: 10.1039/C6EN00008H>

웨어러블 스마트 기기에 적용가능한 케이블 타입의 휘는 Lithium-Air 전지

최근 주목을 받는 웨어러블 스마트 기기를 구현하기 위해서는 다양한 기능을 갖는 웨어러블 스마트 소자 개발뿐만 아니라 소자에 에너지를 공급하는 웨어러블 동력원이 필요하다. 이를 위해 중국 Chinese Academy of Science 산하 Changchun Institute

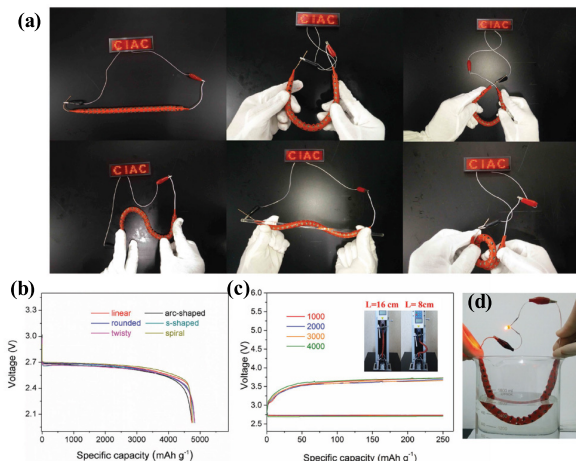


그림 4. (a) 다양한 조건에서 안정적으로 구동하는 케이블 타입의 플렉시블 리튬-산소 배터리 이미지. (b) 해당조건에서 안정적으로 유지되는 배터리의 방전특성. (c) 수천번의 구부림 후에 평가한 배터리의 충방전 특성. (d) 물속에 함침되어도 안정적으로 작동하는 배터리 이미지.

of Applied Chemistry의 Zhang 박사와 그의 연구팀은 자유자재로 휘 수 있는 케이블 모양의 리튬-산소 배터리(lithium-air battery)를 개발하였다. 리튬-산소 배터리는 기존의 배터리보다 10배 이상의 에너지를 저장할 수 있으나, 기존의 세라믹 소재에 기반한 리튬-산소 배터리는 휘게 되면 전해질이 새는 문제점이 있어 휘는 웨어러블 소자의 에너지원으로는 적합하지 않다. 휘 수 있는 리튬-산소 배터리 개발을 위해 Zhang박사와 연구진은 원통형 리튬-산소 배터리를 각종 휘 수 있는 소재를 이용하여 제작하였다. 우선 유연한 리튬선을 휘 수 있는 고분자 전해질 젤로 감싸고, 이를 탄소섬유 전극으로 감쌌다. 이를 폼(foam) 형태의 니켈 공기 확산층으로 감싸고, 가열이 되면 수축하는 고무로 둘러싼 뒤, 고무에 구멍을 뚫고, 최종적으로 고무층을 가열하여 모든 부품들이 밀착되어 구동되도록 하였다. 이렇게 제작된 배터리는 1,000번 정도 휘어도 LED 등을 켤 수 있었고 90회 재충전이 가능하였다. 게다가 개발된 배터리는 강한 소수성을 갖는 고분자 전해질이 수분에 취약한 리튬 전극을 보호하고 있어, 습한 환경에서도 지속적으로 배터리 구동이 가능한 장점을 가지고 있다. Zhang의 연구팀은 전극을 개선하기 위한 노력과 구조적인 디자인을 위한 추가 연구를 진행 중이다. 본 연구결과는 "Cable-type water-survivable flexible Li-O₂ battery"라는 제목으로 *Small*에 게재되었다.

<*Small*, 12, 3101 (2016)

DOI: 10.1002/sml.201600540>

하이드로젤을 이용한 대장균 신속 검출 장비 개발

캐나다 York University의 연구진은 하이드로젤에 기반한 대장균 검출 장비를 개발하여 물에 포함된 대장균 양을 수원에서 즉각 검출할 수 있는 방법을 제시하였다. 전통적인 수원의 대장균 오염 테스트 방법은 시료를 채취하여 그 시료를 특정 연구실에 보내고, 시료의 세균을 배양한 뒤 이를 이용하여 대장균 존재 유무를 판단하는 것이다. 이 방법은 시료를 연구실이 있는 지역까지 운반해야 하며 검사 시간도 오래 걸린다는 단점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위해 휴대용 워터키트(mobile water kit) 등이 개발되었으나, 이 역시 측정 단계가 복잡하여 숙달된 인원이 필요하고 검사를 위해 여러 가지 시약이 필요하여 현장 적용에 제한이 많다. 이에 반해 York University의 연구진은 보

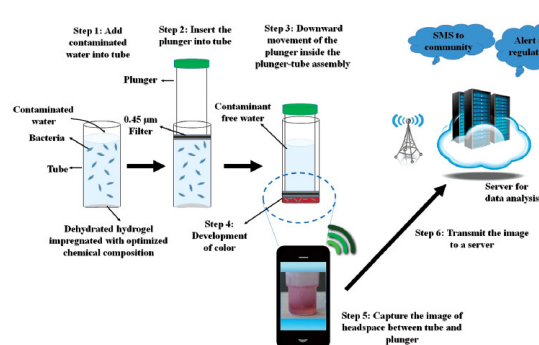


그림 5. 육안으로 확인 가능한 하이드로젤 기반 대장균 신속 검출 장비 모습도.

다 조작이 간단하고, 검사시간이 짧으며, 검사 비용 또한 저렴한 장비를 개발하였다. 검출 장비는 다공성 아가로스 하이드로젤(agarose hydrogel)에 대장균이 배출하는 특정 효소에 대한 기질(B-PER, LTB)을 고정하여 만들었다. 이렇게 만들어진 하이드로젤 기반 대장균 검출은 검사하려는 시료를 함침한 하이드로젤의 색깔 변화를 통해 이루어져 육안으로도 시료 내 대장균의 유무를 쉽게 판단할 수 있도록 한다는 커다란 장점이 있다. 하이드로젤의 색깔 변화는 검사하려는 물에 일정량 이상의 대장균이 존재할 때 대장균이 배출하는 특정 효소에 의해 하이드로젤에 고정화된 효소의 기질이 분해되는 과정에서 발생한다. 이에 기초한 수질검사 방법은 숙달되지 않은 사람조차도 쉽게 이용이 가능할 만큼 조작이 간단하며, 기존에 며칠씩 소요되었던 대장균 검사 기간을 수 시간 이내로 단축시킬 수 있으며, 검사 가격 역시 시료 당 3 캐나다 달러로 저렴하여 자원이 풍부하지 않은 원격지나 개발 도상국에서 적용이 용이하다. 게다가 하이드로젤의 색깔 변화에 기초한 수질 검사 결과는 모바일 앱을 통해 즉시 업로드 되어 다른 사람과 공유할 수 있도록 하였다. 본 연구결과는 "A hydrogel based rapid test method for detection of *Escherichia coli* (*E. coli*) in contaminated water samples"라는 제목으로 *Analyst*에 게재되었다.

<*Analyst*, 141, 2920 (2016)

DOI: 10.1039/C6AN00400H >

본 기술 뉴스의 일부는 NDSL 해외과학기술동향(<http://www.ndsl.kr>)의 기사를 참조하여 정리하였습니다.

<강문성, e-mail: mskang@ssu.ac.kr>