

나노섬유로 코팅된 수소 감지 센서용 원사 제작 기술

나노섬유는 넓은 비표면적과 수 많은 기공 덕분에 가스를 감지하는데 유리한 조건을 가지고 있다. 하지만 나노스케일의 섬유는 물질을 지지하기에는 약한 강도를 가지고 있어 제한적 활용도를 가지고 있다.

본 연구에서는 단일 원사에 나노섬유를 직접 전기방사한 후 Pd/Pt 또는 Pd를 스퍼터 증착 하여 나노섬유 기반 유연한 수소 감지 원사 플랫폼을 개발 하였다. 개발된 나노섬유 원사는 증착과정을 통해 Pd와 Pt를 순차적으로 도포하여 제작 되었으며, 얇은 금속막 덕분에 넓은 농도 범위(0.0001 - 4%)에서의 수소 가스에 대한 검출 분해능과 빠른 수소 검출 속도를 보여주었다. 또한 원사 기반의 core-shell 구조로 인하여 높은 유연성과 cycling reliability까지 가질 수 있었다.

본 연구진에 따르면 개발된 새로운 나노섬유/원사 제조 방법은 쉽고 낮은 가격으로 높은 표면적과 다공성을 갖는 단일 가닥의 원사를 제작 할 수 있어 웨어러블 chemiresistors로 높은 가능성을 가질 것으로 전망하였다.

본 연구 결과는 “High-Resolution, Fast, and Shape Conformable Hydrogen Sensor Platform: Polymer Nanofiber Yarn Coupled with Nanograined Pd@Pt”라는 제목으로 2019년 *ACS Nano*에 게재되었다.

<D.-H. Kim *et al.*, *ACS Nano*, **13**, 5, 6071 (2019), DOI:10.1021/acsnano.9b02481>



그림 1. 금속 코팅된 나노섬유/원사 제작 모식도 및 원사 사진.

근거리 전기 방사를 활용한 높은 종횡비의 3차원 적층 나노구조 제어

최근 개발된 근거리 전기방사(NFES) 방법은 감소된 전기장 하에서 나노섬유를 제어하여 원하는 디자인으로 나노섬유를 증착하기 위해 개발되었다. 이 방법은 전통적인 전기방사 방법의 한계를 극복하고 2차원 및 3차원의 정밀한 패터닝을 위한 방법으로 활용되고 있는 방법이다. 하지만 NFES 방법으로 제작된 3차원 적층 구조물은 마이크론 크기 또는 제한된 형상으로만 제작 가능하였다.

본 연구에서는 고분자 용액에 NaCl을 첨가하여 3차원 나노구조체를 제작하는 3D NFES 기술에 대하여 보고하였다. 고분자 용액의 전도도를 조정함으로써 전기장을 조절하게 되면 self-aligned된 나노섬유를 제작 가능하다. 실험에서는 0.1 - 1 %의 NaCl을 함유하는 poly(ethylene oxide) (PEO) 용액을 사용하여 폭 92 ± 3 nm, 높이 6.6 ± 0.1 μm, 종횡비가 72인 최대 80개의 층을 갖는 nanowall을 구현하였다. 이를 활용하여 곡선형 “nanowall arrays”, “jungle gyms”, “nanobridges” 등 다양한 디자인을 구현함으로써 적응된 3D 나노섬유 Array의 다양한 응용방법을 제시하였다.

본 연구진에 의하면 제시된 3D 프린팅 나노섬유 방법은 높은 정밀도의 NFES 기술을 구현함으로써 nanoelectronics, 스마트 재료 및 생체 의학 재료 등 높은 잠재력을 가지고 있다고 전망하였다.

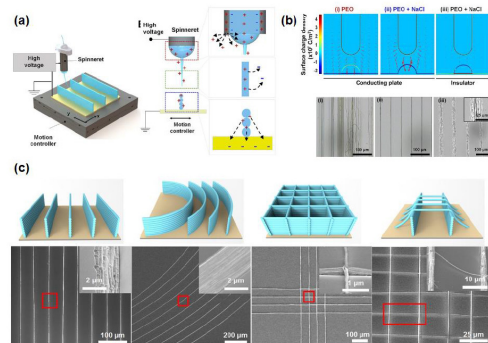


그림 2. NFES 장비 모식도 및 구현된 3D Nanoarchitecture.

본 연구 결과는 “Near-Field Electrospinning for Three-Dimensional Stacked Nanoarchitectures with High Aspect Ratios”라는 제목으로 2019년 *Nano Letters*에 게재되었다.

<S. Chen *et al.*, *Nano Lett.*, **19**, 2059 (2019),
DOI: 10.1021/acs.nanolett.9b00217>

배열된 나노섬유를 활용한 3D 스캐폴드 제조 연구

스캐폴드는 3D 구조 내에서 이식된 세포의 부착, 성장, 증식, 분화, 및 세포 이동에 대한 환경을 제공하여 조직공학 연구에서 중요하게 연구되고 있는 소재이다. 세포에 최적의 환경을 제공하기 위해서는 적합한 형태의 3D 구조의 다공성을 디자인하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 제어된 두께의 2차원의 나노섬유를 미리 설계된 모양으로 3D 구조체로 변환할 수 있는 새로운 접근 방법을 제시하였다. 2D 배열된 나노섬유를 한쪽 면만 선택적으로 열처리를 하고, sodium borohydride(NaBH_4) 수용액에 침지 후, 진공에 노출시키는 과정을 반복하면 열처리 한 면을 중심으로 구조체가 회전, 팽창하여 3D 구조체가 형성된다. 3D 구조체는 수 μm 에서 mm 범위 간격으로 분리·정렬된 나노섬유층으로 구성된 다공성 물질이며, 압축 후 원래 형태로 돌아가는 복원력을 가지고 있다. 본 방법으로 제조된 3D 나노섬유 구조체는 다수의 기공으로부터 높은 비표면적을 보유하기 때문에 조직공학에 이용되기에 유리하다. 생체 내 실험 결과, 세포 침윤, ECM 침착 및 신 혈관 형성을 촉진하는 것을 확인하였다.

본 연구진은 이러한 새로운 종류의 3D 나노섬유는 복잡한 3D 조직구조 및 모델을 제작 가능하며, 재생의학에서 높은 가능성을 가질 것으로 기대하고 있다.

본 연구 결과는 “Three-Dimensional Objects Consisting of Hierarchically Assembled Nanofibers with Controlled Alignments for Regenerative Medicine”의 제목으로 2019년에 *Nano Letters*에 게재되었다.

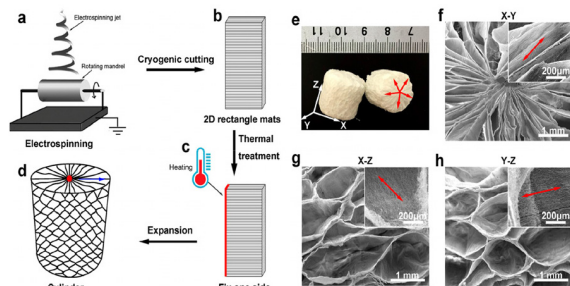


그림 3. 3D 구조의 나노섬유 스캐폴드 제조 모식도 및 3D 구조체.

<S. Chen *et al.*, *Nano Lett.*, **19**, 2059 (2019),
DOI: 10.1021/ACS.nanolett.9b00217>

Dual-Track 시스템을 이용한 마이크로/나노 섬유 제작 방법

전통적인 나노섬유 제작방법인 전기방사법은 용해도가 낮은 소재나 전도도가 낮은 소재에는 적용이 어려웠다. 이러한 전기방사법의 한계를 극복하기 위해 기계적 힘을 이용한 나노섬유 제작 방법이 개발되고 있다.

본 연구에서는 dual-track 시스템을 이용하여 “Track spinning”이라는 새로운 마이크로/나노 섬유 제작 방법을 소개하고 있다. Track spinning은 고분자 용액을 두 개의 회전 트랙 사이에 적하하고 트랙을 아래방향으로 구동시켜서 정렬된 섬유를 제조하는 시스템이다. 트랙사이의 거리가 증가함에 따라 기계적 연신이 이어지고 용매의 증발을 통해 고형화가 된다. 본 연구에서는 이 시스템을 이용하여 매끄럽고 균일한 섬유형태를 갖는 poly(vinyl acetate) (PVAc), poly(urethane) (PU), poly(styrene) (PS), poly(caprolactone) (PCL) 등의 마이크로/나노 섬유를 제조하였다. 고분자 용액의 농도 및 점도, 수집거리, 두 트랙 간의 각도 및 속도 등을 조절하면 원하는 직경의 섬유를 제조할 수 있으며, 전기방사로 제조할 수 없던 소재도 간단하고 저렴한 방법으로 섬유화가 가능했다. 높은 전압과 노즐이 없이 간단한 셋업만으로 나노섬유를 연속적으로 제작가능함을 보여주었고, 추후 섬유 수율 및 정밀도 향상을 위한 장비 개조도 가능하여 새로운 나노섬유 제작 방법을 제시하였다는데 큰 의의가 있다.

본 연구결과는 “Continuous Dual-Track Fabrication of Polymer Micro-/Nanofibers Based on Direct Drawing”의 제목으로 2019년에 *ACS Macro Letters*에 게재되었다.

<D. Jao *et al.*, *ACS Macro Lett.*, **8**, 588 (2019),
DOI: 10.1021/acsmacrolett.9b00167>

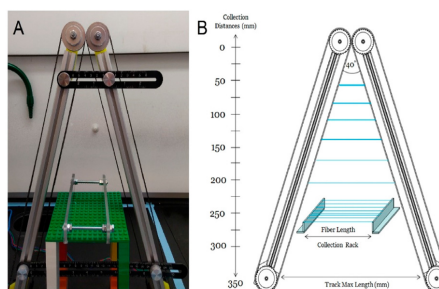


그림 4. Dual-Track 시스템 사진 및 모식도.

<이호익, hoik@kitech.re.kr>