

# IoT 기술의 홈텍스타일 적용을 위한 스마트 섬유 개발 동향



서영빈

- 2022. 한양대학교 유기나노공학과(학사)
- 2022-현재. 한양대학교 유기나노공학과 석사과정



정우재

- 2020. 경북대학교 섬유공학과(학사)
- 2020-현재. 한양대학교 유기나노공학과 석박사통합과정



한태희

- 2004. 한양대학교 섬유고분자공학과(학사)
- 2006. KAIST 생명화학공학과(석사)
- 2010. KAIST 신소재공학과(박사)
- 2010. KIST 기능성고분자센터(Post-Doc.)
- 2012. Northwestern Univ.(Post-Doc.)
- 2012-현재. 한양대학교 유기나노공학과 조교수/부교수/교수

## 1. 서론

오늘날의 주거 공간은 인간을 다양한 위협으로부터 안전하게 지켜주는 공간이라는 개념을 넘어 자신의 개성을 보다 다양하고 풍부하게 담을 수 있는 공간으로 변화하였다. 인테리어가 하나의 트렌드로 자리 잡자 홈텍스타일 산업의 수요 역시 증가하고 있다. 홈텍스타일(home textile)이란 섬유, 실 등을 소재로 하여 실내 공간에 온도나 빛 조절, 질감, 패턴, 색채를 통해 실내 공간 환경을 다양하게 연출해 주는 직물을 말한다[1].

정보통신기술, 나노기술, 생명공학기술 등 다양한 기술과 결합하여 개발된 스마트 섬유(smart fabric)에 대한 연구가 활발히 이루어지면서 스마트 섬유를 홈텍스타일 분야에 적용하려는 시도 역시 늘어나고 있다. 특히 그 중에서도 IoT(Internet of Things, 사물인터넷) 기술을 적용한 홈텍스타일 연구개발이 활발하게 진행 중이다. IoT 기술이란 사물에 센서와 같은 디바이스 등을 부착해 실시간으로 데이터를 인터넷으로 주고 받는 기술이나 환경을 말하며, 이러한 IoT 기술을 홈텍스타일에 접목한 것이 바로 스마트 홈텍스타일(smart-home textile)이다. 스마트 홈텍스타일 연구는 기존의 전자기기에 들어간 소자 및 부품의 섬유화로 유연성, 내구성과 전도성이 확보된 스마트 홈텍스타일을 구현하는 방향으로 이루어지고 있다. 섬유 소재의 범위는 전도성 금속에서부터 맥신(MXene), 그래핀(graphene), 탄소나노튜브(CNT) 같은 신소재까지 다양하게 연구되고 있으며 센서, 에너지 저장, 하베스터, 항균-항바이러스 특성을 갖는 스마트 홈텍스타일을 개발하기 위한 많은 연구가 진행 중에 있다[3,4,6,7].

본 논고에서는 현재 IoT 기술을 홈텍스타일에 적용시키기 위해 어떠한 연구가 진행되고 있는지를 소재 중

심으로 살펴보면 앞으로 학제간 연구가 진행되어야 할 방향을 제시해 보고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1. 스마트 홈텍스타일을 위한 전도성 섬유 개발

최근 주변의 가구나 생활 공간에 전자기기를 접목하기 위해 기존 디바이스를 소형화 및 섬유화하는 연구가 이루어지고 있다[1]. 스마트 텍스타일을 이루는 전자섬유는 몇 가지 중요한 특성을 가지고 있어야 한다. 인터넷을 통해 사물이 실시간으로 연결될 수 있도록 섬유의 전기 전도도가 높아서 전기적 신호를 빠르게 주고받을 수 있어야 하며, 스마트 홈텍스타일이 구조적 안정성을 가질 수 있도록 뛰어난 물성을 필요로 한다. 기존 전자섬유의 재료로는 금속, 전도성 고분자가 주로 사용되어 왔으며, 최근에는 그래핀(graphene), 맥신, 탄소나노튜브(CNT) 등 저차원 나노소재가 섬유화 연구에 성공하면서 전자섬유의 폭이 넓혀지고 있다[2].

#### 2.1.1. 맥신을 이용한 전도성 섬유 개발

맥신은 2011년에 처음 보고된 2차원 평면구조의 물질로 티타늄과 같은 전이금속에 탄소나 질소가 결합되어 있는 형태로 존재한다. 맥신은 전기 전도성이 높고, 말단에 존재하는 친수성 작용기로 인해 물에 잘 분산되는 특징을 가져 다양한 분야에 응용될 가능성이 높아 주목받고 있는 물질이다[3].

2020년에 한양대학교 연구팀은 2차원 나노 물질 맥신을 이용해서  $7,713 \text{ S cm}^{-1}$ 의 높은 전기 전도도를 가진 섬유 제조에 성공하였다. 본 연구팀은 맥신을 이용하여 안정된 3D 네트워크를 구축한 후 습식 방사함으로써 배향성이 강해진 맥신 섬유가 제조됨을 보고하였고, 해당 섬유는  $12,504 \text{ S cm}^{-1}$ 의 전기

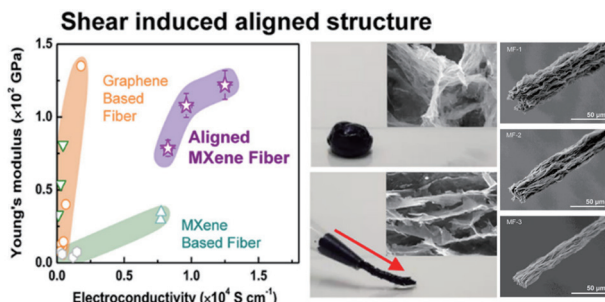


Figure 1. 제작된 맥신(mxene) 섬유의 단면 및 우수한 물성[4].

전도도와  $122 \text{ GPa}$ 의 높은 모듈러스 성능을 보였다. 제작된 섬유는 뛰어난 전기 전도성과 기계적 물성으로 홈텍스타일 제품에 적용될 수 있는 가능성을 제시하였다[4].

#### 2.1.2. 그래핀을 이용한 전도성 섬유 개발

그래핀(graphene)은 탄소 원자들이 육각형 벌집 구조를 이루며 2차원 평면 구조로 연결된 탄소 동소체의 일종이다. 각 탄소 원자들이  $sp^2$  공유결합을 이루며 2차원 평면 구조를 이루고 있기 때문에 전도성과 물성이 매우 뛰어나다. 다만 대량생산이 힘들고 생산 비용 역시 높기 때문에 대량생산에 용이한 산화 그래핀을 이용해 구조체를 제작하는 연구가 주를 이루고 있다[5]. 그래핀 옥사이드(graphene oxide, GO)로 제작된 구조체들은 추가적인 화학적, 물리적 후처리를 통해 환원시켜 전기 전도성 및 물성을 회복할 수 있다. 그래핀 섬유는 우수한 전기적·기계적 특성을 갖기 때문에 전자섬유로 활용될 가능성이 높고, 현재 연구가 산화 그래핀 섬유의 전기 전도도를 증가시키는 방향으로 활발히 진행 중이다[6].

한양대학교 연구팀은 줄 발열(joule heating) 현상을 이용하여  $3,000 \text{ K}$ 에 달하는 온도로 환원시켜  $2,721 \text{ S cm}^{-1}$ 의 높은 전기 전도도를 가지는 그래핀 섬유에 대해 보고하였다. 해당 방법은 기존의 열처리 환원의 단점인 많은 시간과 에너지 소모를 극복했다. 제작된 그래핀 섬유는 요오드화수소(hydroiodic acid)를 이용한 기존의 화학적 환원 방식보다 10배 이상 높은 전기 전도도를 보였다. 또한 해당 그룹은 연속적인 줄 발열을 이용해 그래핀 섬유의 생산성을 높인 연구를 추가로 보고하였다[6-7].

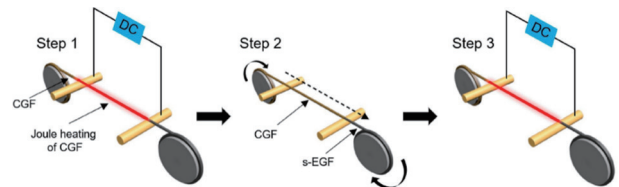


Figure 2. 줄 발열(joule heating)한 그래핀 섬유의 제조 과정[7].

#### 2.1.3. 복합소재를 이용한 전자섬유 개발

단일 소재 섬유뿐만 아니라, 복합소재로 방사한 섬유에 대한 연구도 활발하다. 금속, 세라믹, 고분자, 탄소소재 등 다양한 종류의 소재가 합쳐져 기존의 단일 소재가 가지는 한계를 보완할 수 있기에 복합소재를 스마트 홈텍스타일에 적용하려

는 노력이 이루어지고 있다.

최근 캠브리지 대학의 J. Kim 그룹에서는 하이테크 복합 섬유로 만든 다기능 디스플레이 제품을 개발했다. 다기능 디스플레이는 7가지의 복합 전자 섬유를 원하는 패턴으로 제작한 뒤, LED가 부착된 얇은 구리 섬유와 함께 직조하여 제작되었다[8]. 디스플레이 화면은 안테나 역할을 하는 Ag/PA 복합섬유와 UV 검출을 위한 ZnO/그래핀 복합섬유 등 다양한 복합소재 섬유로 구성되어 있다. 이 제품은 접촉, 빛, 생체 신호 등 다양한 신호를 감지하고 이를 디스플레이 화면에 시각화해 줄 수 있다. 또한, 디바이스에 변형을 줘도 기능이 사라지지 않아 커튼, 카펫 등 변형이 쉬운 스마트 홈텍스타일에 적용 가능성을 보여주었다[8].

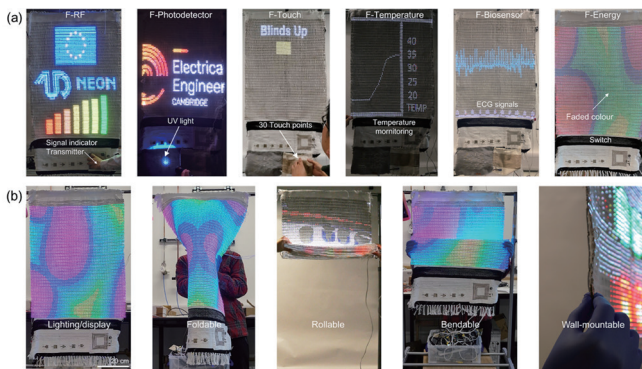


Figure 3. (a)스마트 섬유 디바이스의 UV, 접촉 감지와 온도, 심장 박동 시각화 등 다양한 기능. (b) 디스플레이를 접고, 말고 구부려도 기능에 영향 없이 안정적인 모습[8].

## 2.2. 스마트 홈텍스타일을 위한 발열 섬유 제조

발열 섬유는 겨울철 의복에서부터 침구류나 커튼까지 다양한 홈텍스타일 분야에 사용될 수 있다. 하지만 현재 상용화되어 있는 발열선 응용 제품은 장시간 사용 시 열 축적으로 인한 화재 발생 가능성이 존재한다[9]. 특히, 홈텍스타일의 경우 주변 환경이 타기 쉬운 소재로 구성되어 있어 화재에 더욱 취약하다. 기존 발열선이 가지는 단점을 극복하기 위해 최근 IoT 기술과 병합한 스마트 섬유 및 텍스타일이 개발되고 있는 추세이다[10].

### 2.2.1. 광발열 섬유

흡광축열(吸光蓄熱) 섬유라고도 불리는 광발열 섬유는 태양의 빛에너지를 열에너지 형태로 축적하는 메커니즘으로 구동

된다. 적외선, 가시광선 영역의 빛 흡수율이 좋은 소재로 텍스타일을 만들고 흡수한 태양광을 열에너지의 형태로 저장하여 발열 효과를 낸다. 주로 지르코늄 화합물, 숯, 산화전이금속 같은 세라믹 물질을 이용한 섬유가 주 연구대상이다[11].

Guo 그룹은 환원된 텅스텐 옥사이드(reduced tungsten oxide,  $WO_{2.72}$ )와 PLA(polylactic acid)를 용융 전기 방사한 섬유에 적외선을 조사했을 때, 발열 효율이 증가한다는 연구결과를 보고하였다[12]. 일반 PLA 섬유와 환원된 텅스텐 옥사이드를 7 wt.% 함유한 PLA 섬유에 각각 적외선을 조사한 경우, 최대 70°C 정도의 온도 차이가 발생하는 것을 확인했다. 이 연구는 환원된 텅스텐 옥사이드를 함유한 PLA 복합소재 섬유가 우수한 광발열 홈텍스타일 소재로 사용될 수 있는 가능성을 제시했다[12]. 이외에도 다양한 광발열 섬유 연구가 보고되고 있으며 스마트 홈텍스타일에도 충분히 응용될 수 있는 가능성이 보인다.

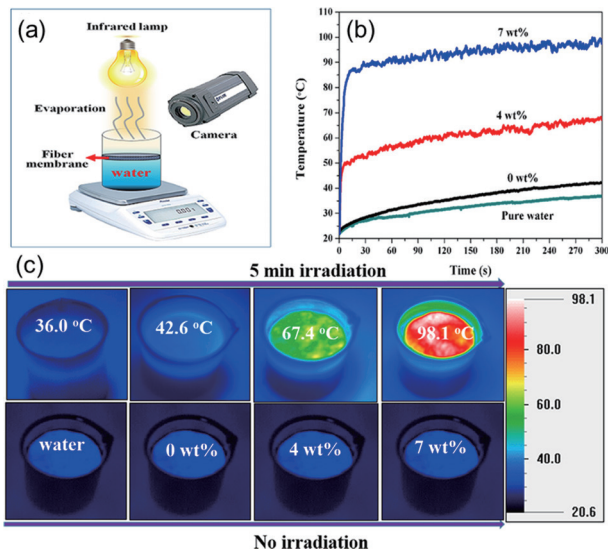


Figure 4. (a) 멤브레인 적외선 조사 실험 구조도, (b) 텅스텐 옥사이드 복합 함량별 PLA 섬유의 적외선 조사 온도 변화 그래프와 (c) IR 카메라 이미지[12].

### 2.2.2. 흡습발열 섬유

흡습발열 섬유는 대기 중 수증기가 섬유에 흡착되는 과정에서 발생하는 운동에너지를 열에너지로 전환시켜 발열하는 섬유이다. 따라서 수증기가 섬유에 잘 흡착될 수 있도록 친수성을 띄는 섬유를 주 소재로 사용한다. 카르복실기, 아미노기, 수산화기, 숯핀기 등의 친수성 작용기를 가진 섬유일수록 흡착열이 많이 발생하기 때문에, 일반적으로 반응기가 많은 천연

섬유가 화학섬유에 비해 발열 현상이 잘 발생된다[13].

그 중에서 아크릴레이트계 섬유는 폴리머 개질을 통한 분자의 고 가교화로 다수의 친수성 작용기를 포함하고 있어 천연섬유 이상의 흡습성을 가져 20 °C, 65%의 상대습도(RH) 환경에서 천연섬유인 양모의 흡습율보다 약 3배 정도 높다 [11]. 아크릴레이트계 섬유는 흡습 발열성이 좋을 뿐만 아니라 방습 냉각성 역시 우수해서 흡습 시에는 발열하고 방습 시에는 냉각한다. 이에, 아크릴레이트계 섬유를 홈텍스타일에 응용하면 발열 성능뿐만 아니라 건조해지기 쉬운 실내공간의 과도한 건조상태를 막아주는 기능까지 활용할 수 있는 가능성을 보여준다. 다만 흡습발열 섬유의 경우 고도로 높은 친수성 때문에 섬유 사이 젖음 현상이 과하게 일어나 발열 성능에 악영향을 줄 수 있기에 이를 보완하는 방향으로 연구가 요구되고 있다[11].

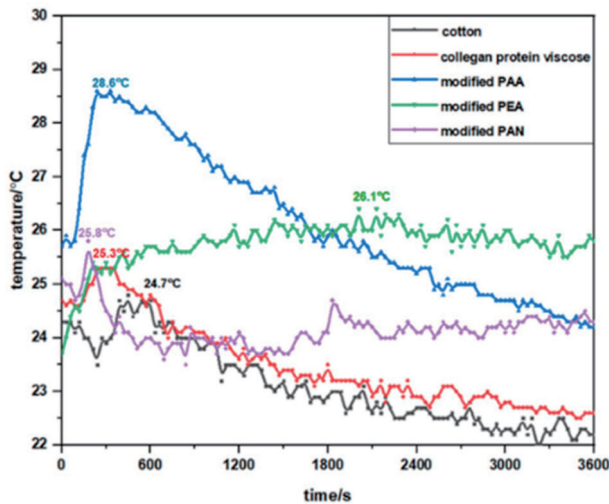


Figure 5. 섬유의 흡습성에 따라 달라지는 발열성능[13].

### 2.2.3. 전열 섬유

도체 물질에 전류가 흐르게 되면 도체 내부의 전자가 이동하며 포논(phonon)과 충돌하여 열이 발생한다. 이를 줄 발열(joule heating) 현상이라 하고, 이를 이용해 열에너지를 생산하는 섬유를 전열 섬유라 한다. 섬유의 줄 발열 현상을 통해 생산되는 열의 양은 가해준 전류의 제곱에 비례한다. 전류의 세기는 옴의 법칙에 따라 도선의 저항에 반비례하므로 섬유가 생산하는 열의 양 Q는 섬유의 저항에 반비례한다. 즉, 전열을 이용한 발열섬유는 저항이 낮은 소재를 섬유화하여 최대의 발열량을 얻는 것을 그 목표로 한다. 폴리아닐린, 폴리싸이오펜

등 전도성 고분자를 이용한 섬유가 고분자 계열 전열 섬유로 많이 쓰이고 있으며, 최근에는 그래핀(graphene), 맥신, 탄소나노튜브(CNT) 등 탄소 기반 나노소재가 새로운 전열 섬유 소재로 부상하고 있다.

한양대학교 연구팀은 탄소나노튜브/폴리에스터 텍스타일을 제조하고 분산제에 따라 달라지는 발열 성능에 대해 보고하였다[14]. 탄소나노튜브의 분산성을 높이기 위해 CMC(carboxymethyl cellulose) 분산제를 사용한 코팅액으로 폴리에스터 텍스타일에 코팅하였으며, UV-vis spectrometer를 이용해 50 wt.% 분산제 혼합 용액이 가장 높은 분산도를 가짐을 확인했다. 분산제 없이 코팅한 텍스타일과 50 wt.% 분산제 혼합 코팅액으로 코팅한 텍스타일의 발열 양상을 비교하자, CMC 분산제 미첨가 되어 분산도가 낮은 코팅 직물에서 열 집중 현상을 확인할 수 있었다. 또한, SEM 분석을 통해 CMC/탄소나노튜브 코팅액이 전도성 망을 형성하며 추가적인 전류 pathway를 제공함으로써 전류 집중 현상을 완화함과 동시에 열 집중 현상을 방지하는 것을 확인하였다.

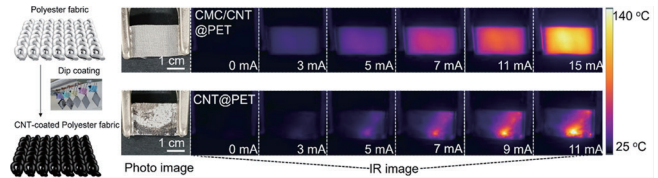


Figure 6. 탄소나노튜브/폴리에스터 유연 발열 직물 제조 방법과 발열 성능[14].

### 2.3. 항바이러스 및 항균 스마트 홈텍스타일

현재 신종 코로나 바이러스 감염증 사태가 장기화되면서 의료분야 뿐 아니라 실내 감염병 확산 방지를 위한 에어컨 및 자동차 항균필터, 문 손잡이, 마스크 등 홈웨어를 텍스타일 등과 같은 다양한 분야에서 항균/항바이러스성 소재의 필요성이 높아지고 있다[15-16].

기존 텍스타일에서 항균 및 항바이러스 가공을 실시하는 방법은 주로 후처리법과 혼합법으로 이루어진다. 후처리법은 유·무기 항균제를 사용하여 직물, 섬유, 부직포 등에 침지, 스프레이 등과 같은 방식을 사용하여 가공한다[17-18]. 하지만, 최근 유기항균제의 독성과 유지 시간, 세탁 등으로 인한 항균제의 탈락으로 고분자 계열 및 무기항균제가 적극 연구되고 있다[19-20]. 혼합법은 Cu, Au, ZnO, TiO<sub>2</sub> 와 같은 무기물을 분산시켜 섬유, 필름 등에 혼합하여 사용되는 방식으로 텍스타

일의 강도는 첨가되는 무기 나노입자의 분산성에 많은 영향을 받기 때문에 무기 나노입자의 분산성에 대한 연구도 이루어지고 있다[21].

### 2.3.1. 광촉매 및 광열 촉매 항균-항바이러스 소재

스마트 홈텍스타일에 광촉매 및 광열 촉매 물질을 적용하여 항균 및 항바이러스 특성을 부여하기 위한 방법으로 무기물을 첨가하는 연구가 지속되고 있다[22].

다양한 광촉매 반응들에서 공통적으로 나타나는 기본적인 반응 원리는 다음과 같다.  $\text{TiO}_2$ 와 같이 광촉매로 사용되는 물질은 특정 파장의 빛을 주사하게 되면 표면에 전자와 정공이 생기게 된다. 이때 전자는 광촉매 표면에 있는 산소와 반응하여 슈퍼옥사이드 음이온( $\text{O}_2^-$ )을 생성하고, 정공은 공기 속 존재하고 있는 수분과 반응하여 하이드록실 라디칼(hydroxyl radical)을 생성하게 된다. 이때 하이드록실 라디칼은 강력한 유기 물질들을 산화·분해할 수 있기 때문에 바이러스, 박테리아 같은 세균 등을 분해하여 물과 이산화탄소를 생성한다[23]. 또한 뛰어난 광열 효과를 갖는 금속, 산화그래핀, 맥신과 같은 물질은 특정 파장대의 빛 에너지를 조사하면 전자가 여기하여 공명을 일으켜 진동을 발생하게 된다. 이때, 전자들이 원자들과 충돌하여 열이 발생하게 되고 이때 발생하는 열로 인해 세균,

바이러스들이 사멸하게 된다[24].

Yang 그룹은 가시광선을 효과적으로 흡수하고 광촉매 효율이 좋은 물질인 비스무트 옥시요오다이드(bismuth oxyiodide, BiOI) 등의 비스무트 옥시할라이드계 물질과 우수한 광열 효과 및 열전도율을 가진 그래핀 옥사이드(graphene oxide, GO)를 용매열법을 통해 광촉매·광열 특성을 동시에 갖는 하이브리드 물질을 제조하였다. 이 나노복합체는 파우더 형태로 제조할 수 있었고 광촉매 및 광열 항균 제품의 최대 단점인 빛이 강하지 들지 않는 실내에서도 고 효율 항균활성을 보였다. 이 연구는 스마트 홈텍스타일 제조에 있어 첨가제로 적용할 수 있는 가능성을 제시했다[25].

### 2.3.2. 소수성 방오소재 및 방오코팅 항균-항바이러스 소재

방오소재 및 방오코팅 기술은 표면에 각종 오염물이 붙지 못하도록 표면처리 및 코팅을 하는 기술이다. 이때 바이러스 및 박테리아와 같은 세균이 표면에 부착하는 것을 완벽히 차단하는 방법으로 항균-항바이러스 기능성을 가질 수 있다[26].

가장 일반적인 방오소재와 방오코팅은 소수성 표면을 형성하여 오염물과의 결합력을 낮추고, 물과 같은 외부 자극에 의해 쉽게 탈락할 수 있게 한다. 이러한 방오소재 및 코팅의 활용을 통해 홈텍스타일에 적용하는 연구가 증가하고 있다[26]. Song 그룹은 폴리에스터 직물에 불소화 다중 양이온 방오코팅을 통해 박테리아와 같은 미생물의 접촉을 막는 연구를 수행하였다[27]. 방오코팅으로 소수성 특성을 갖는 폴리에스터 직

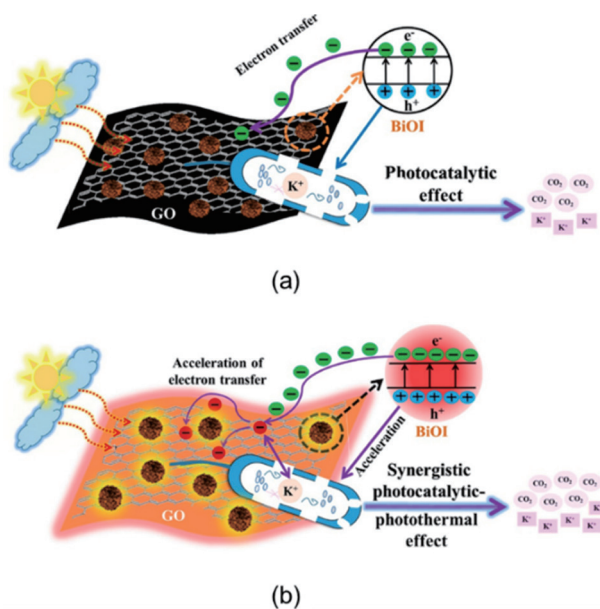


Figure 7. (a)광촉매 및 (b)BiOI-Graphene oxide 복합재에 대한 광촉매-광열 시너지효과(synergistic) 항균 항바이러스 기작[25].

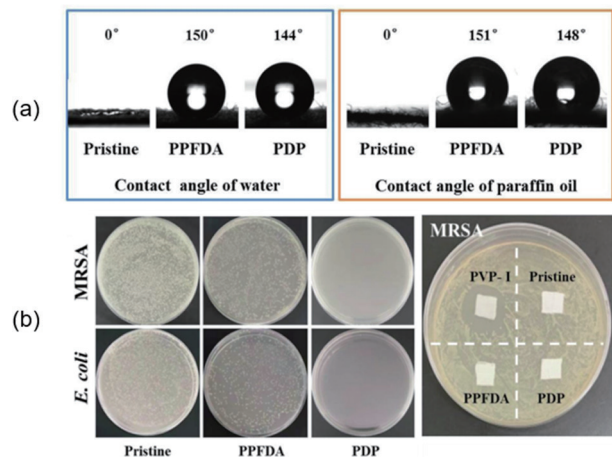


Figure 8. 방오 코팅된 polyester 직물의 (a) 소수성 및 소수성 평가 및 (b) 대장균 및 MRSA 항균 성능 검사[27].

물은 혈액, 커피, 우유 등과 같은 다양한 수성 오염물질의 부착을 방지해 주었고, 파라핀 오일과 같은 기름에 대해서도 높은 소수성 특성을 보여주었다. 또한 표면의 음전하를 갖고 있는 폴리에스터 직물을 양전하로 개질함으로써 세균과 바이러스의 표면 부착 방지가 가능하였다.

### 2.3.3. 금속 이온/나노 입자를 이용한 항균-항바이러스 소재

항균-항바이러스 특성을 부여하기 위한 첨가제는 유기항균제와 무기항균제로 구분 지을 수 있다. 하지만 유기항균제는 주로 액상이며, 내성균을 발생시킬 우려와 급성 독성이 높아 인체 안전성에 대한 문제점이 있으므로 인체 접촉이 많은 홈텍스타일용 소재 적용에는 어려운 부분이 있다[19]. 무기항균제는 세균의 세포벽과 세포막을 파괴하기 때문에 내성을 방지할 수 있고, 주로 은, 구리, 망간, 아연 등의 금속이 활용되고 있다. 금속 이온은 세균의 단백질과 결합하여 미생물의 에너지 대사를 저해하고 내부 구조를 변화시켜 세균의 성장을 억제한다[28]. 또한 무기항균제는 내열성이 높아 유기항균제를 대체하여 일상생활에서 활용 가능한 섬유, 항균 벽지, 마스크, 에어컨 필터 및 인테리어 시트 등에 적용하는 소재 구조체 내부에 분산시켜 제조하고 있다[29-30].

C. Balagna 그룹은 최근 시중에서 구입할 수 있는 실리카 필터에 은 나노 클러스터를 코팅하여 공기 여과 필터를 개발했다. 개발된 에어필터는 고농도 바이오 에어로졸에 노출된 상태에도 미생물의 성장을 억제했으며, 에어컨 필터를 한 달 이상 적용하여 실생활에서 장기간 노출했을 때에도 우수한 항균 성능을 유지했다. 이는 필터에 코팅된 은 나노 이온이 박테리아 세포벽에 결합하여 세포벽을 파괴하고, 세포질에 응집했기 때문이다[31].

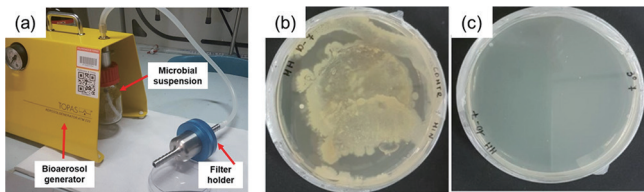


Figure 9. (a)은 나노 클러스터가 코팅된 필터의 항균 테스트를 위한 실험 장비 사진, (b)은 나노 클러스터가 코팅 되지 않은 필터의 박테리아 성장 사진과 (c)은 나노 클러스터가 코팅된 필터의 박테리아 성장이 억제된 사진[31].

### 2.3.4. 천연고분자를 이용한 항균-항바이러스 소재

최근 미세먼지, 코로나 바이러스와 같은 감염병사태의 확산으로 의복 및 홈텍스타일에서 항균-항바이러스 기능성 소재들

의 관심이 급격히 증가하고 있다. 의복, 홈텍스타일에서 사용하기 위한 항균-항바이러스 소재는 충분한 내구성을 갖기 위해 석유계 화석자원을 이용하여 제조된 합성고분자를 항균-바이러스 소재의 모체, 또는 활물질로 사용하고 있다[32-33]. 석유계 합성 고분자는 이산화탄소의 대기 중 방출을 통해 지구 온난화를 가속화하고 매립 폐기시, 분해가 매우 느리게 진행되어 토양 및 수질오염의 원인이 된다. 이에 따라 지하에 있는 탄소를 대기 중으로 배출시켜 온실가스를 증가시키는 석유계 자원 대신 대기 중에 있는 이산화탄소를 고정화하여 얻어지는 바이오매스를 사용하여 탄소 중립적인 고분자 소재를 개발하기 위해 노력 중이다[33]. 이러한 탄소중립형 바이오매스 고분자는 지구의 이산화탄소 총량을 증가시키지 않는다는 점에서 친환경성이 인정되고 있다. 바이오매스 친환경 고분자, 특히 갑각류의 껍질을 이루고 있는 키틴과 그를 화학적으로 가공한 키토산은 기계적 특성이 매우 뛰어나고, 전 세계적으로 풍부한 자원을 이루고 있기 때문에 현재 많은 연구가 진행 중이다 [35].

Nechyporchuk 그룹은 키토산을 습식 방사하여 얻은 섬유의 항균 특성을 조사하였다[37]. 키토산 섬유는 식물로 제작될 정도로 우수한 인장강도를 보였고, 섬유의 표면, 기계적 성질, 화학적 조성에 대한 연구를 통해 키토산 섬유의 아세틸화도 (degree of deacetylation, DD)와 분자량(molecular weight, Mw)의 정도에 따라 항균 작용이 다르다는 것을 보였다. 이러한 천연고분자 키토산을 이용하여 제작된 섬유는 환경오염 문제를 줄일 수 있고, 천연고분자를 이용한 스마트 홈텍스타일 제작을 촉진시킬 것으로 기대된다[36-37].

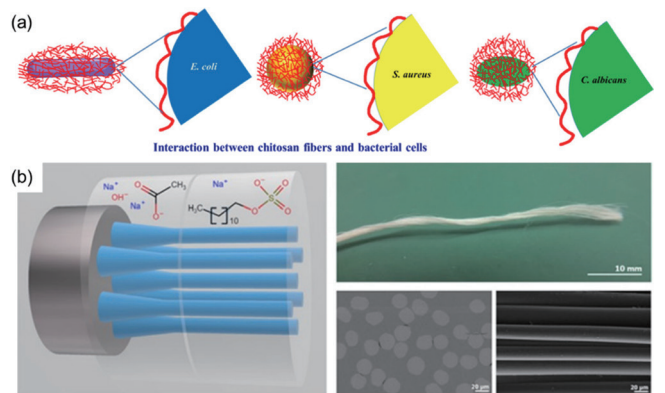


Figure 10. (a) 키토산 섬유의 항균 항바이러스 기작을 나타내는 모식도, (b) 습식 방사 계략도와 섬유의 평면 및 단면도 사진[36-37].

## 2.4. 스마트 홈텍스타일을 위한 에너지 하베스터

4차 산업혁명이 도래한 현재, 웨어러블 또는 포터블 디바이스(portable device)의 보급은 건강 모니터링, 인공지능, 스마트 센서 네트워크, IoT 및 HMI(human-machine interface)의 광범위한 응용으로 점차 대중화되고 있다. 하지만 소형 포터블 디바이스들의 배터리는 부피에 지배적이기 때문에 낮은 에너지 저장 용량을 가진다. 또한, 사용되는 배터리는 전해질의 누출로 인해 인체와 환경에 막대한 피해를 줄 수 있다. 웨어러블 및 스마트 홈텍스타일 제품으로 사용되는 디바이스들의 배터리를 교체 및 충전하는 것으로 인해 디바이스 활용 효율성 떨어지기 때문에, 스마트 홈텍스타일 디바이스를 위한 지속 가능한 에너지 공급 소자와 에너지 수확 매체를 결합하는 것은 기존의 배터리를 대체하거나 보완할 수 있는 하나의 해결책으로 대두되고 있다[39].

에너지 수확 매체는 주변의 다양한 환경에서 에너지를 수확할 수 있으며, 텍스타일 소재와 결합한 에너지 하베스터는 낮은 에너지 밀도를 가지고 있다는 기존 물질의 단점을 극복하여 사용자의 동선에 따라 에너지를 꾸준히 수확할 수 있다는 장점을 갖게 된다. 압전 에너지(piezoelectric energy)와 마찰 전기 에너지(triboelectric energy)는 움직임에 의해 발생하는 물리적인 압력 또는 마찰이 소재에 전해져 발생하는 에너지이기 때문에 홈텍스타일에 적용하기 용이하다. 이를 위해서는 소재 자체의 유연성 및 내구성이 요구되며 사람 및 사물의 움직임에 의해 작동 환경이 제한되기 때문에 그에 맞는 변위와 주기에서 가용할 수 있는 양의 에너지를 확보할 수 있는 효율성 또한 요구된다.

### 2.4.1. 스마트 홈텍스타일 적용을 위한 압전 에너지 하베스팅

압전 재료는 기계적인 외력에 따라 분극을 일으켜 전하를 발생시키는 재료를 말한다. 압전 효과는 크게 두 가지로 나뉘는데, 첫번째는 기계적인 외력 하에 전하를 발생시키는 정압전 효과(direct effect)이며, 1차 압전이라고도 부른다. 두번째는 전기장을 가하면 변형이 발생하는 역압전 효과(converse effect)이며 2차 압전이라고도 불린다. 압전 재료는 소위 강유전체(ferroelectrics)에 속하며 분자 구조의 분극이 일정한 방향으로 배열되어 있는 전기 쌍극자(electric dipole)특성을 포함한 재료를 말한다. 일반적으로 쌍극자는 일정한 방향이 없이 흩어져 있으나 퀴리(curie) 온도 이상의 열을 가하거나 강한 전기장을 가해주면 전기장을 따라 재배열 되는데 이 과정을 분극

(poling)이라 하며, 이 분극 과정을 거치고 나면 재료는 압전성을 나타낸다[40].

Hong 그룹은 간단한 공정으로 웨어러블 및 스마트 홈텍스타일을 구현하기 위한 고효율 압전 하베스터를 제작했다[41]. 제작된 에너지 하베스터는 사람이 누르거나 구부리는 동작에서 최대 5.3 V의 출력 전압과 69 nA라는 높은 전류를 생성했고, 적용된 충격 압력(55.5 kPa)에서 16.83 nW cm<sup>-2</sup>의 전력 밀도를 생성했다. 이러한 섬유 기반 압전 하베스터는 카펫, 시트 등으로 제작돼 스마트 홈텍스타일을 구현하기 위한 방법으로 사용될 수 있는 가능성을 제시했다[41].

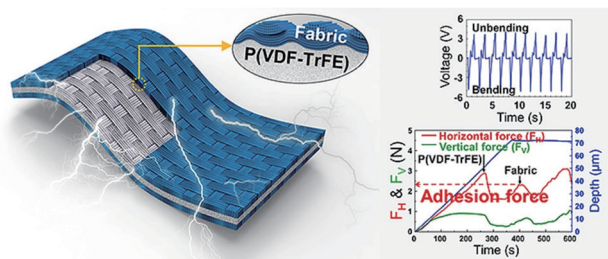


Figure 11. 제작된 직물 기반 압전 하베스터의 구조 그림, 표면 및 계면 절단 분석 시스템(surface and interfacial cutting analysis system, SAICAS)에 의해 측정된 수평 및 수직 힘과 깊이 프로파일[41].

### 2.4.2. 스마트 홈텍스타일 적용을 위한 마찰 전기 에너지 하베스팅

서로 다른 두 물질이 접촉하고 분리될 때 전하의 이동에 의해 전기적으로 대전되는 현상인 마찰대전(triboelectrification)이 발생한다. 이때 생성되는 전기적 전하들을 발전에 이용한 것이 마찰전기 에너지 하베스팅이다. 마찰전기 나노발전기(triboelectric nanogenerator, TENG)의 하베스팅 성능은 기본적으로 마찰대전의 수준에 의해 결정된다. 따라서 현재 마찰 전기 에너지 하베스팅의 높은 효율을 위해 표면의 마찰대전의 양을 증가시키기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다[42].

J. Shen 그룹은 최근 스마트 홈텍스타일 및 웨어러블 기기에 적용할 수 있는 고효율 마찰전기 에너지 하베스터를 제작하였다[43]. 이들은 전기방사법으로 제작한 부직포에 아미노 작용기를 표면 처리하여 수분에 안정적인 마찰전기 에너지 하베스터를 제작했다. 제작된 에너지 하베스터는 카펫으로 제작되어 발판을 밟을 때 400개의 LED 전구를 작동시킬 수 있을 만큼 높은 에너지 효율을 내었고, 전자 시계는 전원을 60초 이상 유지할 수 있었다[43].

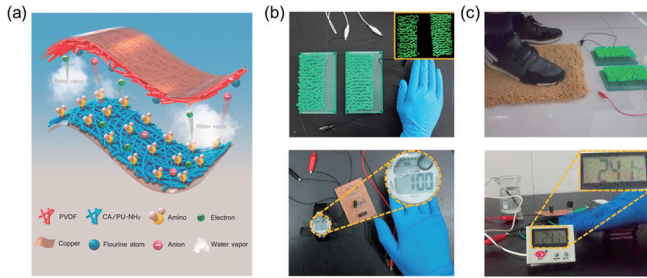


Figure 12. (a)에너지 수확을 위한 마찰 전기 에너지 하베스터(HR-TENG)의 구조를 보여주는 그림, (b)HR-TENG으로 제작한 전자 손목시계 구동을 위한 마찰 전기 하베스팅, (c)스마트 홈텍스타일 적용을 위한 스마트 카펫의 마찰 전기 하베스팅[43].

## 2.5. 센싱을 위한 스마트 홈텍스타일

스마트 홈텍스타일의 기능성을 효과적으로 제어하기 위해서는 주위 환경 변화를 빠르게 감지해야 할 필요성이 있다. 이를 위해 외부 자극에 빠르게 반응하면서 자극에 대한 안정성 역시 뛰어난 스마트 섬유 센서의 필요성이 대두되고 있다. 기존의 섬유형 센서는 이 두 가지를 모두 만족시키기 어려운 경우가 많았지만, 최근 물성과 전기적 성능이 뛰어나면서 안정적인 소재가 많이 개발됨에 따라 기존 센서보다 더욱 성능이 뛰어난 스마트 센서의 생산이 가능하게 되었다.

### 2.5.1. 습도 센서 텍스타일

스마트 홈텍스타일에 활용하기 위한 습도센서는 습도를 빠르고 정확하게 측정하는 능력이 요구된다. 여러 가지 습도 측정 방식 중 스마트 홈텍스타일 디바이스에 사용하기 좋은 방법은 전기저항식 측정법이다. 고분자와 세라믹 같은 물질은 대기 중의 수증기를 흡수할 시 저항이 변한다. 고분자는 공기 중의 물 분자와 결합하면 이온을 생성하게 되고, 이로 인해 전도도에 변화가 일어나며, 세라믹은 다공질 표면에 흡착된 물 분자가 이온으로 분리되어 역시 전기 전도를 일으킨다. 그리고 상대 습도가 바뀌면 생성되는 이온의 농도가 변화하고 센서의 저항에 변화를 주게 된다. 이는 주위 습도 변화를 전기적 신호로 나타낼 수 있고, 회로가 간단하여 소형화가 용이해 스마트 홈텍스타일에 적합한 측정 방식으로, 이러한 측정 방식을 유연한 섬유에 적용하기 위해 짧은 응답시간과 높은 민감도, 안정성 및 신뢰성을 가지는 습도 센서형 섬유를 만들기 위한 연구가 활발하게 진행 중에 있다.

R. Han 그룹이 최근 텍스타일에 맥신과 MWCNT를 차례대로

반복 코팅한 텍스타일 형태의 습도센서를 개발했다[44]. MWCNT가 맥신의 층과 층 사이 공간에 침투하여 그 넓이를 넓혀 좁은 틈으로 더 많은 물 분자를 흡수할 수 있도록 하여 습도에 대한 민감도를 높여주는 구조로 텍스타일 센서를 설계하였다. 센서의 민감도를 측정하기 위해 마스크에 장착 후 호흡 속도에 의한 습도 변화를 관찰하였는데, 호흡이 빨랐던 경우에도 습도 변화를 민감하게 포착하였다. MWCNT가 텍스타일 변형 시 맥신 시트 사이의 접착력을 높여줘서 센서가 움직이며 발생하는 물리적 변형에도 안정적인 성능을 보여주어 변형이 일어나기 쉬운 스마트 홈텍스타일 센서 소재로 적용 가능성을 보여 주었다[44].

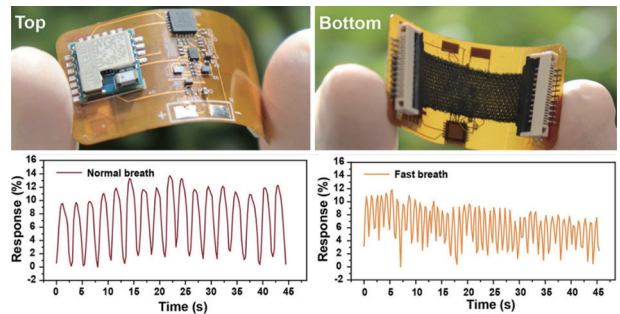


Figure 13. 맥신/MWCNT 코팅 텍스타일을 사용한 센서의 민감도[44].

### 2.5.2. 온도 센서 텍스타일

섬유 기반의 온도 센서는 실내 공간의 온도를 빠르게 파악

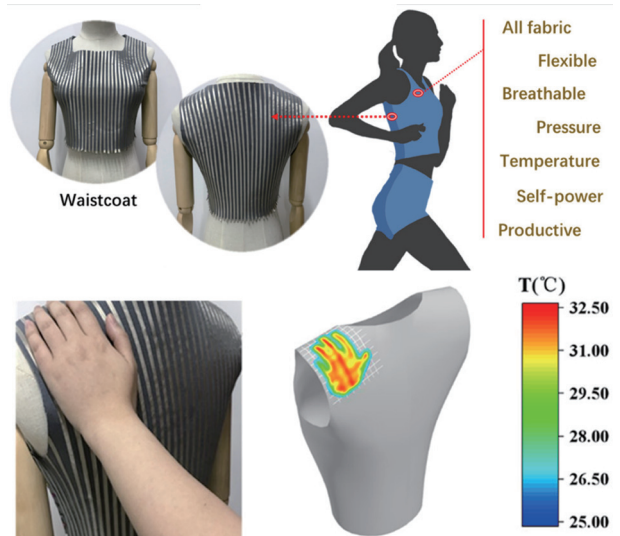


Figure 14. 센서를 이용해 만든 의류와 온도 변화를 2D 맵핑(mapping)한 모습[45].



하는 것 역시 중요하다. 홈텍스타일 제품이 실온을 빠르게 파악하고 이에 맞는 기능성을 보일 수 있도록 민감하고 미세하게 온도를 측정하는 센서가 홈텍스타일에 요구되고 있다.

한 예로 Wang 그룹은 2020년 PET 직물에 PEDOT:PSS를 코팅한 PPSF 텍스타일을 제작한 후 이를 기반으로 온도 센서를 제작한 연구를 보고하였다[45]. 해당 센서는 0.1°C 단위로 미세한 온도 차이를 감지할 수 있고, 반응 속도 역시 1초 정도로 매우 빠른 우수한 성능을 보여주었다. 해당 섬유를 전극과 교차배열(cross-arrangement) 하여 대면적 텍스타일로 설계한 후 웨어러블 디바이스에 응용함으로써 온도를 2D 맵핑(mapping) 할 수 있는 기능성 텍스타일을 제조하였다[45].

### 2.5.3. 화학 센서 텍스타일

기술이 발전함에 따라 독성 물질을 가정이나 공장에서 다루는 일이 많아졌고, 화학물질, 가스 누출 사고 역시 꾸준히 발생하고 있다. 몇몇 독성 물질은 무색무취하여 감지가 쉽지 않기 때문에 누출 사고 발생 시 인명 사고로 커지기 쉽다. 사고 발생을 막기 위해 화학 물질을 효과적으로 감지하는 센서 연구가 활발히 진행 중에 있으며, 이를 홈텍스타일에 도입한다면 실내에서 누출된 화학 물질을 조기에 감지할 수 있다.

최근 그래핀 섬유에 금속과 금속산화물 촉매를 이용하여 이산화 질소 가스를 감지하는 센서 연구가 보고되었다[46]. 이 연구에서는 그래핀 섬유가 이산화 질소 센서로 이용될 수 있지만 그 민감도는 높지 않았는데 텅스텐, 구리, 니켈 같은 비귀금속(non-noble metal)/금속산화물(metal oxide) 촉매와 그래핀을 혼합 방사한 경우 이산화질소 가스 농도 5 ppm에서 18%의 민감도로 감지할 수 있었고, 이로서 금속 촉매 그래핀 섬유는 유독가스 누출 감지에 매우 유용한 홈텍스타일 소재가 될 가능성을 확인하였다[46].

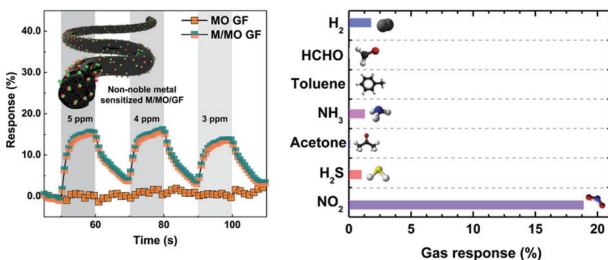


Figure 15. 촉매로 강화된 그래핀 섬유의 NO<sub>2</sub> 가스 감지 능력[46].

## 2.6. 스마트 홈텍스타일을 위한 에너지 저장 텍스타일

생활 전반에 광범위하게 적용될 초소형 디바이스의 구동 전

원을 유선으로 구축하는 것은 불가능하므로 이를 구동할 파워 제로 시스템인 초소형 유연 에너지 저장 소재가 국내·외로 지속적으로 연구되고 있다. 하지만 지금 대표적으로 사용되고 있는 에너지 저장 소재들은 낮은 유연성, 형상 적응성 등으로 인하여 안정적인 에너지 저장이 어렵고, 화재 및 전해질 누출 등으로 인한 인체 부적합성으로 인체에 부착하거나 홈텍스타일 적용에 어려움이 많다. 따라서, 홈텍스타일 적용을 위해서 고용량, 고출력으로의 성능 개선뿐만 아니라, 신축성 섬유 형태의 에너지 저장 소재가 개발 연구되는 중이다.

### 2.6.1. 섬유형 배터리

전도성 섬유 기술과 IoT 기술의 융합으로 웨어러블 디바이스, 홈텍스타일에 적용하기 위한 연구가 지속되고 있으며, 특히 유연성을 가진 배터리에 대한 관심은 국내뿐만 아니라 국외에서도 주목받고 있다. 유연성을 가진 배터리 개발의 가장 중요한 인자는 유연성과 안정성이다. 따라서 섬유형 배터리는 고체 전해질을 배터리에 적용하여 전해질의 누수 염려가 없고 분리 막이 필요하지 않으며, 안정성과 긴 수명을 확보하려는 연구들이 늘고 있다. 이는 제조공정의 단순화, 전지의 소형화 등 경제적 측면에서 매우 유리하다.

Chen 그룹은 이황화니켈(nickel disulfide, NiS<sub>2</sub>) 나노입자가 표면에 요크-셸(yolk-shell) 구조로 성장된 섬유형 배터리를 개발했다[47]. 나트륨(Na) 저장 능력을 가진 고 다공성 탄소 섬유는 빠른 전자 수송과 전해질 침투를 용이하게 할 뿐만 아니라, 나노 입자의 응집을 방지하여 우수한 사이클링 안정성과 속도 성능을 제공하였다[47].

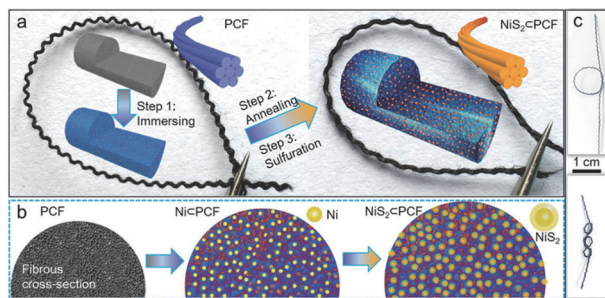


Figure 16. (a)NiS<sub>2</sub> in PCF의 제조 공정. (b)유연한 특성을 갖는 NiS<sub>2</sub> in PCF의 구조적 변화에 대한 단면도. (c)매듭이 있는 NiS<sub>2</sub> in PCF 섬유 번들의 사진[47].

### 2.6.2. 섬유형 슈퍼커패시터

웨어러블 디바이스의 빠른 시장 형성 계기를 통해 고출력

및 유연성을 가진 섬유형 슈퍼커패시터에 대한 연구가 지속되고 있다. 이에 따라, 강한 기계적 물성, 우수한 유연성을 가진 탄소소재를 전극 재료로 사용하는 섬유형 슈퍼커패시터로 많은 연구가 이루어지고 있다.

C. Choi 그룹은 고 신축성을 가진 망간산화물(manganese oxide, MnO<sub>2</sub>)이 코팅된 MWCNT(multi-walled carbon nanotube) 섬유형 슈퍼커패시터를 제조했다[48]. 이 MWCNT 섬유형 슈퍼커패시터는 400%~800%의 탄성을 가지고 있으며, 높은 면적 정전용량(4.8 mF cm<sup>-1</sup> and 22.8 mF cm<sup>-2</sup>)을 가진 섬유로 제조되었다. 이와 같은 섬유형 슈퍼커패시터는 유연하고, 고 신축성을 갖고 있기 때문에 웨어러블 디바이스 및 스마트 홈텍스타일 적용될 수 있는 가능성을 보인다[48].

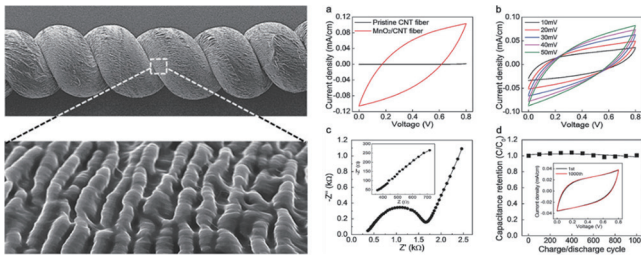


Figure 17. 제조된 BCF 섬유형 슈퍼커패시터의 SEM 이미지와 물성 데이터[48] (a) MnO<sub>2</sub> 증착 후 BCF 슈퍼커패시터의 CV 곡선. (b) 10 ~ 50 mV s<sup>-1</sup>의 스캔 속도로 측정된 CV 곡선. (c) 0.05 ~ 1000kHz의 주파수 범위에 대한 나이퀴스트 곡선. (d) 커패시턴스 유지 vs. 충전 및 방전 주기 데이터[48].

### 3. 결론

스마트 텍스타일은 고 기능성 그리고 전도성 섬유 소재에 센서, 하베스터, 배터리 등 다양한 첨단 기술을 부여한 소재이다. 이러한 스마트 텍스타일은 웨어러블뿐만 아니라, 사용자의 집에서 활용 가능할 수 있다. 따라서, 스마트 홈텍스타일에 적용하기 위해서는 인체 친화성, 내구성, 유연성 및 안정적인 전기적 유연성이 요구된다. 이러한 스마트 텍스타일을 제조하기 위해 최근 친환경 고분자, 저 차원 나노 물질 등을 소재로 사용한 전자 소재의 개발은 섬유 형태로 제조하기 위한 구조체 조립 연구, 형태학적인 연구를 중심으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 하지만 많은 연구에 비해 실질적인 제품으로의 상용화는 아직 초기단계이며, 상용화를 위해 제품의 인체 친화성, 친환경성, 내구성, 그리고 대량 생산 등 거쳐야 할 많은 과제들이 아직 많이 남아있다.

이를 해결하기 위해 전 세계적으로 섬유 제품에 기능을 부

여하는 것 이외에도 의류, 전자, 화학, 기계 등 다학제적 연구가 진행되고 있다. 따라서 스마트 텍스타일의 기술적 융합은 더욱 중요해질 것이며, 국내에서도 다학제 간 섬유 융합 기술을 통해 다양한 섬유기반 원천기술을 개발하고 질적 성장을 이룰 수 있는 미래 섬유산업 기술경쟁력을 확보함으로써, 세계적으로도 섬유 강국으로의 위상을 더욱 높일 수 있는 기회가 될 것이라고 생각된다.

### 참고문헌

- Cherenack K., Pieterse, L. van, Smart textiles: Challenges and opportunities. *J. Appl. Phys.* **2012**, 112, 091301.
- Fernandez-Carames, T. M., Fraga-Lamas, P. Towards The Internet of Smart Clothing: A Review on IoT Wearables and Garments for Creating Intelligent Connected E-Textiles. *Electronics* **2018**, 7, 405.
- Naguib, M., Kurtoglu, M., Presser, V., Lu, J., Niu, J., Heon, M., Hultman, L., Gogotsi, Y., Barsoum, M. W. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>. *Adv. Mater.* **2011**, 23, 4248-4253.
- Shin, H., Eom, W., Lee, K. H., Jeong, W., Kang, D. J., Han T. H. Highly Electroconductive and Mechanically Strong Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene Fibers Using a Deformable MXene Gel. *ACS Nano* **2021**, 15, 3320-3329.
- Geim, A. K. Graphene: Status and Prospects. *Science* **2009**, 324, 1530-1534.
- Noh, S. H., Eom, W., Lee, W. J., Park, H., Ambade, S. B., Kim, S. O., Han T. H. Joule heating-induced sp<sub>2</sub>-restoration in graphene fibers. *Carbon* **2019**, 142, 230-237.
- Lee, H. B., Noh, S. H., Han, T. H. Highly electroconductive lightweight graphene fibers with high current-carrying capacity fabricated via sequential continuous electrothermal annealing. *Chem. Eng. J.* **2021**, 414, 128803.
- Choi, H. W., Shin, D. W., Yang, J. J., Lee, S., Figueiredo, C., Sinopoli, S., Ullrich, K., Jovancic, P., Marrani, A., Momente, R. et al. Smart textile lighting/display system with multifunctional fibre devices for large scale smart home and IoT applications. *Nat. Commun.* **2022**, 13, 814.

9. Yu, Y. C., Jee, S. W. Investigation on the Ignition of Self-Regulating Heating Cables due to Overheating. *Fire Sci. Eng.* **2021**, 35, 100–104.
10. Trancón, A. Powering the IoT revolution with heat. *Nat. Electron.* **2019**, 2, 270–271.
11. Lee, D. E. Development trend of heat release fiber. *Fiber Technology and Industry* **2015**, 19, 255–261.
12. Chala, T. F., Wu, C. M., Chou, M. H., Gou, Z. L. Melt Electrospun Reduced Tungsten Oxide/Poly(lactic Acid) Fiber Membranes as a Photothermal Material for Light-Driven Interfacial Water Evaporation. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2018**, 10, 28955–28962.
13. Cui, Y., Gao, S. Y., Zhang, R. Y., Cheng, L. D., Yu, J. Y. Study on the Moisture Absorption and Thermal Properties of Hygroscopic Exothermic Fibers and Related Interactions with Water Molecules. *Polymers* **2020**, 12, 98.
14. Kang, D. J., Shin H., Lee, H. B., Jeong, W., Lee, H., Han, T. H. SWNT Coated PET Fabric Heaters with Stable Electrothermal Response from CMC/SWNT Conductive Network. *Text. Sci. Eng.* **2021**, 58, 267–273.
15. Chakhalian, D., Shultz, R. B., Miles, C. E., Kohn, J. Opportunities for biomaterials to address the challenges of COVID-19. *J. Biomed. Mater. Res. A* **2020**, 108, 1974–1990.
16. Ghaffari, M., Mollazadeh-Bajestani, M., Moztarzadeh, F., Uludag, H., Hardy, J. G., Mozafari, M., An overview of the use of biomaterials, nanotechnology, and stem cells for detection and treatment of COVID-19: towards a framework to address future global pandemics. *Emergent Mater.* **2021**, 4, 19–34.
17. Kumaran, S. Oh, E., Han, S. M., Choi, H. J. Photopolymerizable, Universal Antimicrobial Coating to Produce High-Performing, Multifunctional Face Masks. *Nano Lett.* **2021**, 21, 5422–5429.
18. Azlin-Hasim, S., Cruz-Romero, M. C., Cummins, E., Kerry, J. P., Morris, M. A. The potential use of a layer-by-layer strategy to develop LDPE antimicrobial films coated with silver nanoparticles for packaging applications. *J. Colloid Interface Sci.* **2016**, 461, 239–248.
19. Chang, S. H., Kim, Y. H. Antimicrobial Additives for Plastics. *Polym. Sci. Tech.* **1995**, 6, 145–150.
20. Akhavan, O. Lasting antibacterial activities of Ag-TiO<sub>2</sub>/Ag/a-TiO<sub>2</sub> nanocomposite thin film photocatalysts under solar light irradiation. *J. Colloid Interface Sci.* **2009**, 336, 117–124.
21. Ma, L., Chen, Y., Ding, Y., Zheng, J. P. High-performance antibacterial film via synergistic effect between uniformly dispersed TiO<sub>2</sub> nanoparticles and multifunctional quaternary ammonium cationic ligand. *Prog. Org. Coat.* **2021**, 157, 106322.
22. Altan, M., Yidrim, H. Mechanical and Antibacterial Properties of Injection Molded Polypropylene/TiO<sub>2</sub> Nanocomposites: Effects of Surface Modification. *J. Mater. Sci. Technol.* **2012**, 28, 686–692.
23. Gao, Y., Duan, J. Z., Zhai, X. F., Guan, F., Wang, X. T., Zhang, J., Hou, B. R. Photocatalytic Degradation and Antibacterial Properties of Fe<sup>3+</sup>-Doped Alkalized Carbon Nitride. *Nanomaterials* **2020**, 10, 1751.
24. Lee, J. Y., Kim, B. M., Park, S. H., Choi, Y. H., Shim, K. D., Moon, S. B., Jang, E. S., Yang, S. A., Jhee, K. H. Development of Thermo-Cosmetics Using Photothermal Effect of Gold Nanoparticles. *J. Soc. Cosmet. Sci. Korea* **2015**, 41, 27–34.
25. Yang, Y., Yin, H., Li, H., Zou, Q., Zhang, Z., Pei, W., Luo, L., Huo, Y., Li, H. Synergistic photocatalytic-photothermal contribution to antibacterial activity in BiOI-graphene oxide nanocomposites. *ACS Appl. Bio Mater.* **2018**, 1, 2141–2152.
26. Cheng, Q. L., Asha, A. B., Liu, Y., Peng, Y. Y., Diaz-Dussan, D., Shi, Z. S., Cui, Z. C., Narain, R. Antifouling and Antibacterial Polymer-Coated Surfaces Based on the Combined Effect of Zwitterions and the Natural Borneol. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, 13, 9006–9014.
27. Song, Q., Zhao, R. X., Liu, T., Gao, L. L., Su, C. C., Ye, Y. M., Chan, S. Y., Liu, X. Y., Wang, K., Li, P., Huang, W. One-step vapor deposition of fluorinated polycationic coating to fabricate antifouling and anti-infective textile against drug-resistant bacteria and viruses. *Chem. Eng. J.* **2021**, 418, 129368.

28. Saidin, S., Jumat, M. A., Amin, N. A. A. M., Al-Hammadi, A. S. S. Organic and inorganic antibacterial approaches in combating bacterial infection for biomedical application. *Mater. Sci. Eng. C* **2021**, 118, 111382.
29. Pullangott, G., Kannan, U., Gayathri, S., Kiran, D. V., Maliyekkal, S. M. A comprehensive review on antimicrobial face masks: an emerging weapon in fighting pandemics. *RSC Adv.* **2021**, 11, 6544–6576.
30. Olmos, D., Gonzalez-Benito, J. Polymeric Materials with Antibacterial Activity: A Review. *Polymers* **2021**, 13, 613.
31. Balagna, C., Perero, S., Bosco, F., Mollea, C., Irfan, M., Ferraris, M. Antipathogen nanostructured coating for air filters. *Appl. Surf. Sci.* **2020**, 508, 145283.
32. Moustafa, H., Youssef, A. M., Darwish, N. A., Abou-Kandil, A. I. Eco-friendly polymer composites for green packaging: Future vision and challenges. *Compos. B, Eng.* **2019**, 172, 16–25.
33. El-Shafei, A., Al-Shemy, M., Abou-Okeil, A. Eco-friendly finishing agent for cotton fabrics to improve flame retardant and antibacterial properties. *Carbohydr. Polym.* **2015**, 118, 83–90.
34. Yu, Y. S., Overview of Bio Plastic. *The monthly packaging world* **2011**, 217, 45–56.
35. Ilyas, R. A., Aisyah, H. A., Nordin, A. H., Ngadi, N., Zuhri, M. Y. M. et al. Natural-Fiber-Reinforced Chitosan, Chitosan Blends and Their Nanocomposites for Various Advanced Applications. *Polymers* **2022**, 14, 874.
36. Li, J. H., Fu, J., Tian, X., Hua, T., Poon, T., Koo, M., Chan, W. Characteristics of chitosan fiber and their effects towards improvement of antibacterial activity. *Carbohydr. Polym.* **2022**, 280, 83–90.
37. Nechyporchuk, O., Nilsson, T. Y., Ulmefors, H., Kohnke, T. Wet Spinning of Chitosan Fibers: Effect of Sodium Dodecyl Sulfate Adsorption and Enhanced Dope Temperature. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2020**, 2, 3867–3875.
38. Sim, S. B. Study on the explosion and fire risks of lithium batteries due to high temperature and short circuit current. *Fire Sci. Eng.* **2016**, 30, 114–122.
39. Dolez, P. I. Energy Harvesting Materials and Structures for Smart Textile Applications: Recent Progress and Path Forward. *Sensors* **2021**, 21, 6297.
40. Lee, S. Y., Choi, Y. Piezoelectric Energy Harvesting Principles and Materials. *Polym. Sci. Tech.* **2020**, 31, 484–489.
41. Kim, J., Byun, S., Lee, S., Ryu, J., Cho, S., Oh, C., Kim, H., No, K., Ryu, S., Lee, Y. M., Hong, S. Cost-effective and strongly integrated fabric-based wearable piezoelectric energy harvester. *Nano Energy* **2020**, 75, 104992.
42. Rasheed, A., Park, H., Sohn, M. K., Lee, T. H., Kang, D. J. Review on the Recent Advances in Composite Based Highoutput Piezo-Triboelectric Energy Harvesters. *Ceramist* **2020**, 23, 54–88.
43. Shen, J. L., Li, Z. L., Yu, J. Y., Ding, B. Humidity-resisting triboelectric nanogenerator for high performance biomechanical energy harvesting. *Nano Energy* **2017**, 40 282–288.
44. Xing, H., Li, X., Lu, Y., Wu, Y., He, Y., Chen, Q., Liu, Q., Han, R. MXene/MWCNT electronic fabric with enhanced mechanical robustness on humidity sensing for real-time respiration monitoring. *Sens. Actuators B: Chem.* **2022**, 361, 131704.
45. Li, M. F., Chen, J. X., Zhong, W. B., Luo, M. Y., Wang, W., Qing, X., Lu, Y., Liu, Q. Z., Liu, K., Wang, Y. D., Wang, D. Large-Area, Wearable, Self-Powered Pressure-Temperature Sensor Based on 3D Thermoelectric Spacer Fabric. *ACS Sens.* **2020**, 5, 2545–2554.
46. Eom, W., Jang, J., Lee, S. H., Lee, E., Jeong, W., Kim, I., Choi, S., Han, T. H. Effect of metal/metal oxide catalysts on graphene fiber for improved NO<sub>2</sub> sensing. *Sens. Actuators B: Chem.* **2021**, 344, 130231.
47. Chen, Q., Sun, S., Zhai, T., Yang, M., Zhao, X. Y., Xia, H. Yolk-Shell NiS<sub>2</sub> Nanoparticle-Embedded Carbon Fibers for Flexible Fiber-Shaped Sodium Battery. *Adv. Energy Mater.* **2018**, 8, 1800054.
48. Choi, C., Kim, J. H., Sim, H. J., Di, J., Baughman, R. H., Kim, S. J. Microscopically Buckled and Macroscopically Coiled Fibers for Ultra-Stretchable Supercapacitors. *Adv. Energy Mater.* **2017**, 8, 1800054.