

# 전열원리를 이용한 발열섬유 구조체의 최신 연구 현황

## 1. 서론

인간이 의복을 입는 목적은 여러 가지가 있지만 문명의 태동시기부터 현재까지 가장 근본적인 이유는 환경에 적응하기 위하여 체온을 유지하고 신체를 보온(保溫) 하는데 있다. 그러나 소재기술의 급진적인 발전 및 현대인들의 요구사항의 다양화가 이루어짐에 따라 오늘날의 삶에 있어서 의식주(衣食住) 중 피복에 해당하는 의(衣)는 이제 단순한 피복을 넘어서서 고(高)기능성을 추구하는 최첨단 신소재의 개발을 요구하고 있다. 일례로 기존의 섬유의 보온기능은 신체와 외부 사이에 열전도율이 낮은 공기층을 형성하여 체온을 유지하는 단순한 원리를 이용하였으나 최근에 들어서는 섬유 자체에서 외부자극에 의해 직접 열을 발생시키는 기능성 발열섬유가 주목을 받고 있다.

발열섬유가 현재 각광을 받는 이유는 보온 자체보다도 의료 분야에서 기대하는 발열효능 때문이다. 현재 의학계 연구에 따르면 신체의 국부적인 부분에 열을 가해 줄 경우 해당 부위의 혈액순환 촉진, 근육통 완화, 관절염 통증완화 등등 여러 가지 의학적 효능이 있다고 알려져 있다. 외상환자의 경우 상처 치유를 위해 반창고 위에 발열소자를 부착할 경우 상처의 치유속도가 향상된다는 연구결과도 보고되었다. 또한 국부적인 신체의 온도상승은 해당 부위에 약물이 방출되게 하는 온도감응형 약물전달시스템에도 효과가 있다고 학계에 알려져 있다[1]. 이러한 기대에 부응하듯 전 세계 의료용 섬유분야 시장은 지속적인 시장규모 상승을 이루었으며 2000년도에 57억 달러, 2005년도에 약 71억 달러, 2010년에는 82억 달러로 성장을 하였고 오는 2020년의 경우 220억 달러를 돌파할 것으로 전망이 된다[2]. 이에 따라 2010년 이후 중국 및 인도등과 같은 개발도상국들의 생활수준 향상 및 국민평균수

노 승 현

한양대학교 유기나노공학과

엄 원 식

한양대학교 유기나노공학과

최 인

한양대학교 유기나노공학과

한 태 희

한양대학교 유기나노공학과

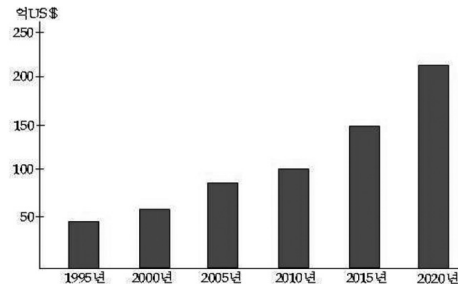


Figure 1. 세계 의료용 섬유소재 시장 전망[2].

(출처: Technical Textiles and Industrial Nonwovens: World Market Forecasts to 2010, David Rigby Associates)

명이 늘어난 것에 기대어 의료용 발열섬유소재에 대한 수요도 급증할 것으로 예상된다.

일반적으로 발열제품들은 줄 발열(Joule heating)이라는 원리를 통해서 발열을 하는데 자세한 원리는 후술하도록 하겠으나 현재 이러한 줄 발열 혹은 전열(電熱, electrothermal) 발열원리를 이용한 제품들은 대부분 다 저렴하고 가공성이 좋은 구리 전선을 발열체로 사용하고 있다. 그러나 구리는 밀도가 높아서 부피당 무게가 많이 나가고 굽힘성이 좋지 않아서 인간이 착용하거나 신체의 굴곡을 묘사하는 데에는 제한이 있다. 그리고 무엇보다도 전열 발열체를 동적(動的)인 신체에 적용시키기 위해서는 신축성, 굽힘성 등이 뛰어나야 하므로 섬유로 이루어진 직물형태가 가장 적합하나 구리선은 직조과정을 거치거나 기타 직물형태로 제조하는 것이 거의 불가능하다.

이러한 요구사항들로 인해 사람들은 가볍고 착용감이 좋은 섬유 혹은 직물 형태의 발열체에 관한 연구를 수행하였고 최근에 들어 많은 발전을 이루어 왔다. 본 논고에서는 근래에 이루어진 최신 발열섬유 구조체 연구동향을 간략하게 살펴보고자 하며 구조체의 개발 및 평가에 주안점을 두고 이를 이용한 다른 응용(예: 의료분야)에 대해서는 다루지 않도록 한다. 마지막으로 앞으로 국내섬유학계가 이 분야를 앞서가기 위해 도전해야 하는 의의와 방향에 대해 분석해보고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1. 발열섬유의 발열 메커니즘에 따른 구분 및 전열발열의 우수성

우선 섬유기반 소재 중 전열발열이 기타 발열방식에 비해 어떤 차이점이 있으며 어떤 다양한 측면에서 장점들을 갖는지 대해 설명을 하도록 하겠다. 발열섬유는 발열을 하는 원리로 구분하여 세가지로 나눌 수 있는데 (1) 광(光)발열, (2) 흡습(吸濕)발열, (3) 전열(電熱, electrothermal)발열 이렇게 세 종류가 있다. 광발열은 지르코늄과 같은 세라믹물질을 이용하여 태양광을 흡수한 후 열 에너지로 전환해서 이를 축적하는 방법을 통해 열을 발생시킨다. 흡습발열은 친수성이 강한 아크릴레이트(acrylate)계 섬유가 대표적인 소재로 쓰이는데 외부에 존재하는 수증기를 섬유가 흡수하여 수증기의 높은 운동에너지를 열에너지로 변환, 즉 피부로 다시 발산하게 만드는 원리이다. 이 두 가지 발열섬유들의 열을 발생시키는 인자들은(빛, 수분) 인체에 무해하며 작동하는 원리가 인체에 안전하다. 또한 이

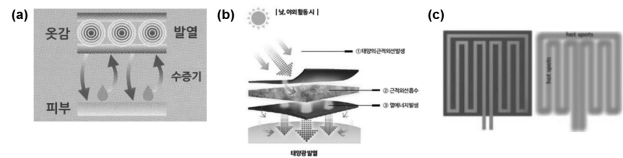


Figure 2. (a) 흡습발열, (b) 광발열, (c) 전열발열 제시 예.

미 제품의 상용화도 많이 이루어져있는 상태이다. 그러나 자연상태에서 존재하는 빛 과 수분의 양 은 지역별 편차의 존재 및 인간이 인위적으로 조절할 수 없다는 점, 또한 발열을 하기 위해서는 섬유가 외부와의 접촉이 꼭 필요하다는 착용제한요소가 존재한다. 그리고 제어 가능한 발열(controllable heating)이 힘들다는 부분도 향후 발전 가능성에 제한을 야기한다.

전열발열(electrothermal heating)은 열을 발생시키는 인자가 전류라는 점에서 위 두 방법과 차이를 보인다. 전열발열은 줄 발열(Joule heating 혹은 resistive heating 이라고도 함) 현상을 이용하여 열을 발생시키는 원리이다. 줄 발열은 어떤 도체나 반도체에 전류를 흐르게 할 경우 전류, 즉 전자의 흐름이 도체를 구성하고 있는 핵의 진동(phonon)과 서로 충돌하여 발생되는 운동에너지가 열의 형태로 발산이 되는 현상이다. 본(本) 방법은 인가하는 전류의 양을 조절할 경우 발생하는 발열량을 자유자재로 제어할 수 있다는 장점, 그리고 외부환경과는 무관하게 발열이 이루어진다는 이점이 있어서 최근 발열섬유소재 연구개발 분야의 추세는 이쪽으로 활발하게 넘어오고 있다.

### 2.2. 전열 원리를 이용한 발열섬유 구조체의 성능조절/평가 요인 및 제조법에 따른 구분

다음으로는 전열 원리를 이용한 발열섬유 구조체에서 발열량에 영향을 미치는 인자들 및 평가요소들을 간략하게 설명하고 현재 연구되고 있는 발열섬유 구조체를 제조법에 따라 구분을 해보도록 한다. 섬유의 줄 발열에서 발생하는 열의 양  $Q$  는 가해진 전류의 양  $I$  와  $Q \propto I^2$  인 비례관계가 존재한다. 전기분야에서 잘 알려진  $V=IR$  이라는 관계식을 다시 대입하게 되면  $Q \propto V^2/R$  이 되는데 여기서  $V$  는 해당 전류  $I$  에서의 전압,  $R$  은 해당 소재의 저항이다. 이렇듯 전열발열 섬유소재를 개발할 때에는 최대의 발열량을 얻기 위해 뛰어난 전도성을 지니는(즉, 낮은  $R$ ) 소재를 선정해서 개발을 해야 한다. 최근 각광받고 있는 나노소재들 중에 뛰어난 전도성을 나타내는 그래핀, 탄소나노튜브(carbon nanotube; CNT), 탄소나노섬유, 카본블랙 등이 기존에 존재하는 직물에 전도성을 부여하는 물질로 쓰이고 있다. 전열 원리를 이용한 추가 연구로 Noh et al

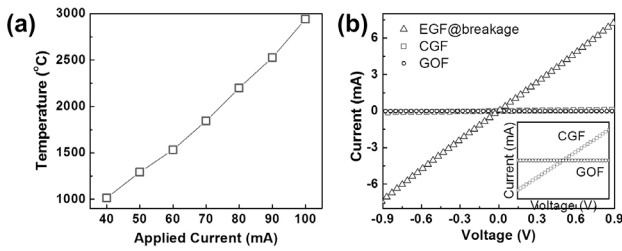


Figure 3. (a) 줄-발열 현상에서 인가된 전류에 따른 도달 온도 그래프. (b) 줄-발열 하기 전 그래핀 섬유(CGF)와 줄-발열 후 그래핀 섬유(EGF@breakage)의 전도도 비교[3].

은 그래핀으로 만든 섬유에 인가하는 전류를 조절하여 발열되는 온도를 상온부터 수 천 °C까지 도달하였다. 그리고 이 열을 이용하여 변화된 섬유의 내부구조가 어떻게 바뀌는지에 대해 연구를 수행하였고 이로 인해 전열 원리를 이용하여 단시간에 높은 전기 전도도를 갖는 소재를 만들 수 있음을 보였다 (Figure 3)[3].

발열섬유 구조체의 경우 인체에 착용을 하는 것이 가장 큰 의의이므로 발열체의 기존조건들과 취합하면 다음과 같은 요인들이 성능의 평가요소가 된다: (1) 빠른 발열 속도, (2) 낮은 인가전압, (3) 높은 굽힘성과 신축성. 이러한 요소들을 만족시키는 발열섬유구조체는 그 제조법에 따라 분류할 수 있으며 현재까지 연구되고 있는 발열섬유 구조체는 아래 세가지 부류 중 하나에 속해있게 된다.

- (1) 탄소계 소재를 직접 yarn 혹은 fiber 형태로 만든 부류
- (2) 일반 직물을 carbonization(탄화) 한 부류
- (3) 일반 직물에 전도성 물질을 첨가하여 복합화 한 부류

다음으로 본 논문에서는 최근 연구가 많이 되고 있는 이 세가지 부류의 발열섬유 구조체의 대표적인 연구현황 사례들을 앞서 언급된 평가 요인들과 결부하여 소개하고 분석해보도록 한다.

### 2.3. 탄소계 소재를 직접 yarn 혹은 fiber 형태로 만든 부류

그래핀은(graphene) 반복적인  $sp^2$  구조를 갖고 있는 2차원 탄소소재이며 바로 이 구조적 특성 때문에 높은 전기전도도 및 열전도도를 나타내고 이로 인해 열 관련 분야에서 활발히 연구되고 있는 소재이다. Wang et al은 최근 이러한 그래핀의 특성을 이용하고자 신축성이 있는 그래핀 섬유를 제조하여 발열소재로 응용을 한 연구를 발표하였다. 순수 그래핀 만으로는 어떠한 구조체를 만들기가 불가능하기 때문에 산화그래핀(graphene oxide; GO)으로부터 시작하여 GO film 을 만든 후

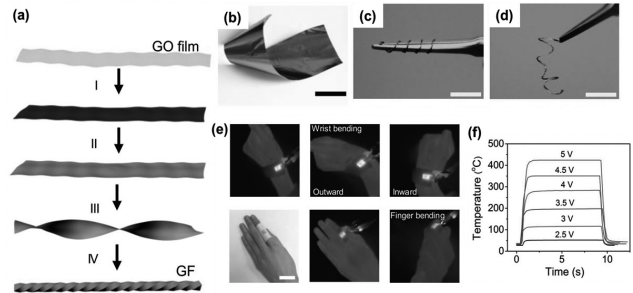


Figure 4. (a) 꼬인 형태의 그래핀 섬유를 만드는 방법. (b) 열적 처리된 후 GO film, (c,d) 꼬인 후의 그래핀 섬유. (e) 실제 인체에 착용하였을 시 모습. (f) 전압 별 도달 온도 그래프 [4].

열적 환원처리를 하여 열/전기 전도도와 관련이 있는  $sp^2$  구조를 생성하였다. 그 후 양 끝이 고정된 상태에서 해당 film을 twisting 방식으로 꼬아서 신축성을 부여하였다. 이렇게 만들어진 그래핀 섬유는 비교적 낮은 전압인 5 V 에서 거의 400 °C 부근까지 도달하며 여러 가지 모양으로 변환 된 후에도 발열 특성이 유지되는 것도 관찰하였다. 또한 승온 속도가 초당 570 °C 정도로 매우 빠르며 고속으로 목표온도에 도달하는 것이 가능함을 보였다(Figure 4)[4].

Li et al은 GO 로 짧은 섬유(filament)를 방사한 후 이를 필터를 통해 압착시킨 후 부직포 형태로 만든 뒤 고온 열적 환원과정을 거쳐서 그래핀 섬유로 이루어진 발열 부직포를 제조하였다. 기존의 그래핀 섬유만으로는 여러 가지 제한적 요소들 때문에 대면적 fabric을 제조하는 것이 어렵다는 점을 부직포 형태로 비교적 간단하게 제조하여서 극복한 것이 본 연구의 특징이다. 10 V 미만의 전압 범위에서 30 °C부터 380 °C까지 다양한 온도에 도달할 수 있음을 관찰하였고 최고온도에 도달할 때 걸리는 속도가 초당 1776 °C로써 초고속 급속발열이 가능

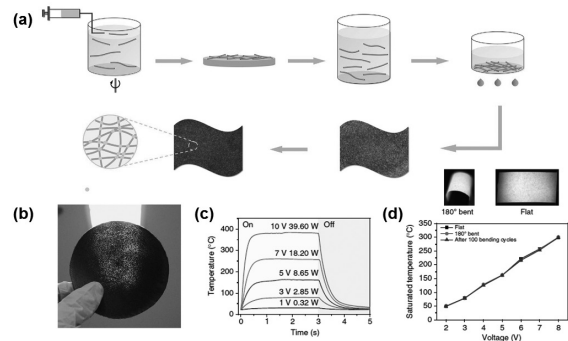


Figure 5. (a) 부직포 형태의 그래핀 섬유 직물발열체를 만드는 과정. (b) 완성된 모습. (c) 전압 별 도달 온도 그래프. (d) 초기 상태 및 물리적 굽힘 시 도달하는 온도 비교 그래프 [5].

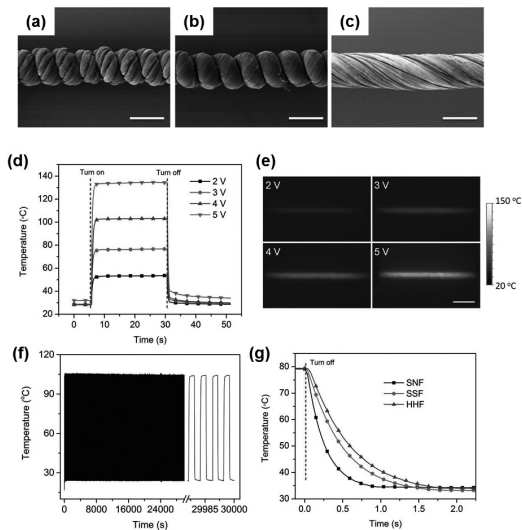


Figure 6. (a-c) CNT 섬유를 꼬아서 나선형 구조로 만든 모습. (b) 전압 별 도달 온도 및 (e) 해당 섬유에 대한 적외선 카메라 이미지. (f) 반복적인 전압 on/off 실험 시 안정성 test. (g) 전압 off 시 cooling 속도 그래프[6].

함을 보였다(Figure 5)[5].

탄소나노튜브(carbon nanotube; CNT)도 높은 전기 전도도와 열 전도도를 나타내는 소재이며 섬유형태의 구조체를 만드는 것 또한 가능하다. Liu et al은 chemical vapor deposition 방법을 통해 만든 CNT ribbon을 기계적으로 twisting을 하여 꼬아서 helical(나선형) CNT fiber를 제작하였다. 본 연구에서는 이러한 CNT fiber가 본래 길이의 150%까지 늘어날 수 있음을 보였고 승온 속도도 초당 1000 °C까지 가능함을 관찰하였다. CNT 고유의 뛰어난 전기전도도 덕분에 5 V에서도 135 °C의 온도 달성이 가능하였다. 전류를 on/off하는 반복실험을 진행해본 결과 5000회 이상 동안 온도가 유지되는 뛰어난 안정성도 관찰하였다(Figure 6)[6].

#### 2.4. 일반 직물을 carbonization(탄화) 한 부류

Zhang et al은 상업적으로 구할 수 있는 원단 중 하나인 modal textile(인조 셀룰로즈 직물 소재)을 고온 처리하여 carbonization 시킨 후 웨어러블 발열체로 사용하였다. 기존의 연구진들이 탄소기반 소재들을 이용하여 발열 fabric을 만들고자 하였다면 이 연구는 고온에서 탄소소재들은 carbonization되면서 sp<sup>2</sup> 구조가 생성된다는 점에 착안하여 쉽게 구할 수 있는 ready-made fabric인 Modal textile을 이용하여 fabric 형태의 발열섬유 구조체를 만들었다. 여기서 고온 처리를 통한 carbonization 과정 후에도 modal textile의 직물구조가 보존이 되었기

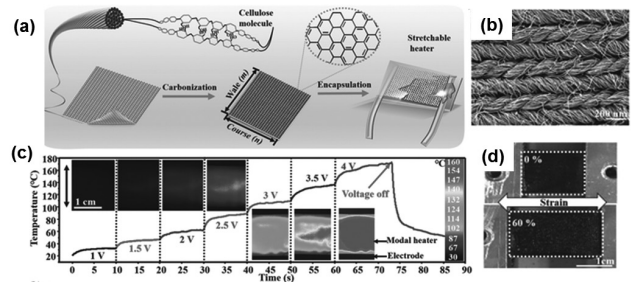


Figure 7. (a) Modal fabric을 carbonization 시켜서 전도성을 부여하는 과정 모습도. (b) 전자 현미경으로 관찰한 모습. (c) 전압 별 도달 온도 그래프. (d) 60% 인장시켰을 시 모습[7].

에 70%의 인장(strain)에서도 발열이 유지되는 뛰어난 신축성을 나타냈으며 3 V에서 100 °C에 도달하는 저(低)전력 요구사항도 충족을 하였다(Figure 7)[7]. 동일 저자는 우리가 쉽게 구할 수 있는 cotton fabric도 carbonization 처리를 통하여 140% 인장을 가하여도 형태가 유지됨을 보였다.

#### 2.5. 일반 직물에 전도성 물질을 첨가하여 복합화 한 부류

발열섬유 구조체에서 가장 활발하게 연구가 진행되고 있는 분야는 기존에 존재하는 일반 직물(ready-made fabric) 종류에다가 전도성 물질들을 첨가하여 복합체를 만드는 분야이다. 이 방법은 거의 모든 종류의 직물이 그 자체로 substrate로 사용될 수 있다는 점에서 여러 가지 복잡한 직조과정을 생략할 수 있으므로 유리하다. 또한 carbonization 과정을 거치지 않기에 처음 직물 상태의 형태 및 기계적 강도를 그대로 유지하므로 유리하다. 이 방법을 사용하면 전도성 물질과 복합화 할 때 다양한 공정을 사용할 수 있다, 예를 들면 drop-casting, brush-coating, blade-coating, dip-coating, spray-coating, screen-printing, inkjet-printing 등등 대량생산에 용이한 용액공정들이 가능하다. Cui et al은 쉽게 구할 수 있는 cotton fabric에다가 개질된 MWCNT(multiwall CNT)용액을 dip-coating으로 coating을 하여서 conductive cotton fabric을 제작하였다. 다른 방법과는 다르게 본 연구에서는 건조하면서 dehydration이 진행이 되면서 MWCNT와 cotton fabric 사이에 Si-O-Si 결합이 형성되어 공유 결합으로 서로 연결을 시키는 방법을 사용하였다. 이렇듯 화학적 결합으로 이어진 전도성 물질 때문에 반복적인 세탁에 대하여 직물의 전도성은 유지가 되었다. 발열성능은 27 V에서 53.2 °C를 달성하였으나 도달시간은 840 초가 걸렸다(Figure 8)[8].

Lima et al은 cotton fiber와 전도성 고분자인 polypyrrole, 그리고 CNT를 코팅하여 간단한 방법으로 전도성 직물발열체를



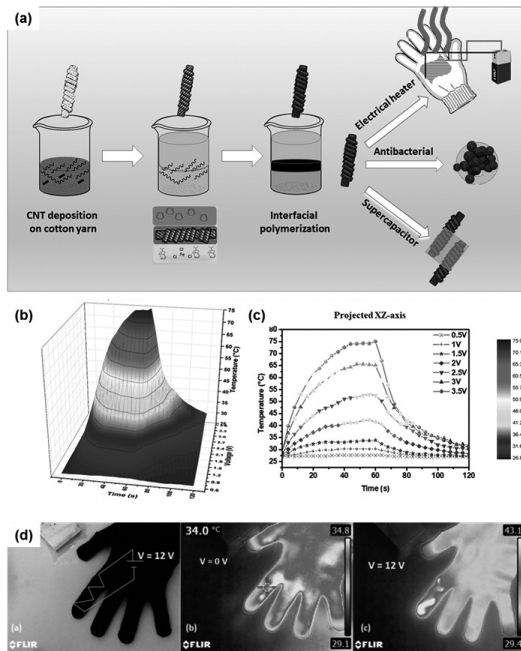


Figure 8. (a) Cotton fiber에 dip-coating을 통하여 MWCNT를 입히고 interfacial polymerization으로 polypyrrole을 성장시키는 과정. (b-c) 전압 대비 도달온도 그래프. (d) 실제 인체에 착용시켜 본 모습[8].

만들었다. polypyrrole은 수계에서 분산성 문제, 그리고 응집현상 등 코팅을 하는데 있어서 제한점이 많이 존재하였으나 본 연구에서는 interfacial polymerization 방법을 통하여 cotton에다가 polypyrrole 고분자를 균일하게 코팅하였다. 그러나 polypyrrole 자체만으로는 높은 전도성을 도달하기에는 한계가 있으므로 CNT를 dip-coating 방법을 통하여 복합화 하였다. 이렇게 만들어진 conductive fabric의 경우 5 V에서 70 °C의 온도를 발열 시켰고 도달시간은 16초 였다. 전도성 고분자를 이용한 다른 연구로써 Zhou et al은 PEDOT/PSS 를 hot-drawing을 포함한 wet-spinning을 통하여 microfiber bundle을 만들었다. 여기에 다른 연구진들은 시도하지 않은 ethylene glycol을 첨가하여 PSS를 제거하는 효과를 얻음으로 PEDOT/PSS microfiber의 전도도를 10배 향상시켰다. 발열성능은 7 V에서 75 °C까지 도달하였으며 도달하는 데에 걸린 시간은 2.5초 라고 보고하였다(Figure 9)[9].

Pahalagedara et al은 기존에 사용을 하지 않았던 carbon black을 cotton, nylon, polyester, nylon/spandex 등 상용화 되어 있는 직물에다가 printing 기법을 통하여 코팅을 하였다. 또한, 이 구조에서 직물들의 기계적 인장 및 굽힘 성능을 보완하기 위해 아래로 polyurethane을 입혀서 신축성을 향상시켰다. carbon

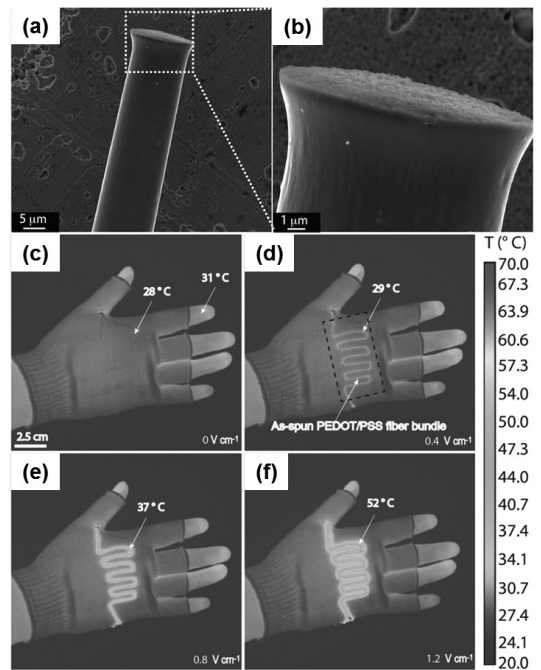


Figure 9. (a-b) 관찰한 PEDOT/PSS 섬유 구조체의 모습. (c-f) 인체에 착용 하였을 시 발열성능 평가 모습[9].

black은 CNT나 그래핀, 기타 전도성 고분자 물질들과는 다르게 가격 측면에서 매우 저렴하다는 이점이 있다. 본 직물의 발열성능은 15 V에서 65 °C로 준수한 성능을 나타냈고 도달하는데 걸리는 시간은 1분 이었다. 또한 이 온도에서 1시간 동안 계속 지속 되었다고 보고하였다[10].

### 3. 결론

지금까지 다양한 방법을 통해 제작된 발열섬유 구조체에 대하여 알아보았다. 최근 개발된 탄소나노 소재들을 접목시킨 직물형태 발열체들의 경우 제작방식에 차이가 있긴 하나 모두 뛰어난 전기전도도를 나타내며 이는 곧 낮은 인가전압 대비 높은 발열온도 도달이 가능함을 보였다. 그리고 직물형태의 발열섬유 구조체는 뛰어난 신축성을 보이며 인체에 굴곡 및 구부림에도 큰 성능의 변화가 없음을 관찰하였다. 그러나 우리는 이제 걸음마 수준의 첫걸음을 내디딘 것이라고 볼 수 있으며 현재 상용화를 거쳐서 제품을 판매할 수 있을 수준에 도달하기 위해서는 아직 여러 단계가 남아있다. 특히 발열섬유 구조체가 인체 피부와 닿았을 시 생길 수 있는 피부친화성 문제, 피부통기성 문제, 장시간 반복된 세탁 및 움직임에 의한

성능저하 문제, 그리고 직물의 제조로부터 연속적으로 공정이 가능한 부분 등등이 아직 극복해야 할 문제로 남아있으며 오랜 기간 연구가 필요한 상황이다[11].

차후 섬유산업은 단순 치장을 위한 피복의 단계에서 벗어나 웨어러블 디바이스/전자기기의 영역으로 계속해서 확장될 것인데 웨어러블 디바이스에서 가장 중요한 요소는 사용되는 섬유/직물에 전기전도성을 부여하는 것이다. 발열섬유 구조체 연구는 직물에 높은 전기전도성과 그에 따른 기계적 물성의 유지를 연구하는 분야이기 때문에 폭넓고 깊은 연구가 축적이 된다면 다른 웨어러블 영역(예를 들면 에너지 저장/발전, 센서 등)에도 적용될 수 있는 기초지식이 될 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 발열섬유 구조체 시장은 차후 엄청난 성장이 기대되는 바, 국내에서도 이에 대한 원천기술 확보를 위한 장기적인 안목이 필요하다고 판단된다.

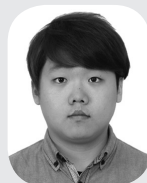
### 참고문헌

- Li, Y. et al., A smart, stretchable resistive heater textile, Journal of Materials Chemistry C, 2017, 5 (1), 41–16.
- 한국염색기술연구소, 메디컬 섬유소재 시장 및 산업구조, 이도현.
- Noh et al., Joule heating-induced sp<sup>2</sup> restoration of graphene fibers, Carbon, 2018, 142, 230–237.
- Wang, R. et al., Highly Stretchable Graphene Fibers with Ultrafast Electrothermal Response for Low-Voltage Wearable Heaters, Advanced Electronic Materials, 2017, 3 (2), 1600425.
- Li, Z., Xu, Z., Liu, Yi., Wang, R., Gao, C., Multifunctional non-woven fabrics of interfused graphene fibers, Nature Communications, 2016, 7, 13684.
- Liu, P. et al., Stretchable and DEnergy-Efficient Heating Carbon Nanotube Fiber by Designing a Hierarchically Helical Structure, Small, 2018, 14, 1702926.
- Zhang, M., et al., Weft-Knitted Fabric for a Highly Stretchable and Low-Voltage Wearable Heater, Advanced Electronic Materials, 2017, 3, 1700193.
- Lima, R. M. A. P., Alcaraz-Espinoza, J. J., da Silva Jr., F. A. G., de Oliveria, H. P., Multifunctional Wearable Electronic Textiles Using Cotton Fibers with Polypyrrole and Carbon Nanotubes, ACS Applied Materials and Interfaces, 2018, 10, 13783–13795.
- Zhou, J., Mülle, M., Zhang, Y., Xu, X., Li, E. Q., Han, F., Thoroddsen, S. T., Lubineau, G., High-ampacity conductive polymer microfibers as fast response wearable heaters and electromechanical actuators, Journal of Materials Chemistry C, 2016, 4, 1238–1249.
- Pahalagedara, L. R., Siriwardane, I. W., Tissera, N. D., Wijesena, R. N., de Silva, K. M. N., Carbon black functionalized stretchable conductive fabrics for wearable heating applications, RSC Advances, 2017, 7, 19174–9180.
- Zhang, L., Bima, M., Andrew, T., Transforming Commercial Textiles and Threads into Sewable and Weavable Electric Heaters, ACS Applied Materials and Interfaces, 2017, 9 (37), 32299–32307.



**노승현**

- 2014. 한양대학교 분자시스템공학과 졸업(학사)
- 2014-현재. 한양대학교 유기나노공학과 석박통합과정



**엄원식**

- 2015. 단국대학교 파이버시스템공학과 졸업(학사)
- 2015-현재. 한양대학교 유기나노공학과 석박통합과정



**최인**

- 2013-현재. 한양대학교 유기나노공학과(학사)



**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 부교수