



# 스마트 전자 피부(E-Skin)를 위한 변형 가능한 열 방출 소재

배이경<sup>1</sup>, 최문기<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 울산과학기술원 반도체 소재·부품 대학원

<sup>2</sup> 울산과학기술원 신소재공학과

## Deformable Heat-Dissipation Materials for Smart E-Skin

Lee Kyung Bae<sup>1</sup> and Moon Kee Choi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Semiconductor Materials and Devices Engineering, Center for Future Semiconductor Technology (FUST),  
Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan 44919, Korea

<sup>2</sup> Department of Materials Science and Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST),  
Ulsan 44919, Korea

(Received September 5, 2024; Revised October 7, 2024; Accepted October 8, 2024)

**Abstract:** Smart electronic skin (E-skin) is an emerging technology that integrates electronic devices with human skin, enhancing human-machine interactions. One critical challenge in its development is effective thermal management to ensure device reliability, longevity, and user comfort. This review highlights passive cooling techniques - thermal conduction, convection, radiation, and phase-change materials - as key strategies to address this challenge without additional power consumption. These integrated mechanisms have demonstrated the ability to efficiently dissipate heat, preventing thermal buildup and maintaining optimal performance in E-skin devices. Recent advancements indicate that combining these methods can significantly enhance the thermal management of flexible electronics. Future research should focus on refining these materials and techniques to overcome challenges related to cost, durability, and environmental stability, thereby advancing the practical application of E-skin technology.

**Keywords:** Heat dissipation, Smart electronic skin (E-skin), Thermal management, Passive cooling techniques, Flexible electronics

## 1. 서론

피부에 부착 가능한 스마트 전자 피부(electronic skin, E-skin)는 인간과의 밀접한 상호작용을 중심으로 발전하고 있는 핵심 분야이다 [1-3]. 이러한 기술은 단순한 웨어

러블 기기를 넘어, 인간의 피부와 자연스럽게 통합되어 동작하는 전자기기의 개발을 가능하게 했다 [4]. 스마트 전자 피부는 실시간 생체 신호 모니터링, 가상현실(VR) 및 증강 현실(AR)과의 통합을 통해 사용자의 경험을 혁신적으로 향상시키며, 기계와 인간 간의 상호작용에 새로운 지평을 열고 있다 [5].

그러나 스마트 전자 피부의 장기적이고 안정적인 사용을 위해서는 효과적인 열 관리가 필수적이다 [6]. 피부에 밀착된 유연한 전자기기 작동 시 발생하는 열은 기기의 성능 저하와 수명 단축뿐만 아니라, 사용자의 불편함과 피부

✉ Moon Kee Choi; [mkchoi@unist.ac.kr](mailto:mkchoi@unist.ac.kr)

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

손상을 초래할 수 있기 때문이다 [7]. 기존의 능동 냉각 시스템은 부피가 크고 전력 소모가 많아 유연한 전자기기의 휴대성과 착용성을 제한하는 문제가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 수동 냉각 소재의 중요성이 부각되고 있다. 수동 냉각 기술은 전력 소모 없이 자연적인 열 전달을 통해 효과적인 열 관리를 가능하게 하며, 이를 위해 열전도, 열대류, 열복사, 상변화 소재 등을 활용한다 [8]. 예를 들어, 열전도 소재는 높은 열전도율을 통해 열을 빠르게 분산시키고, 열대류는 공기나 액체의 움직임을 통해 열을 주변으로 방출한다. 열복사는 특정 파장의 복사 에너지를 활용하여 열을 방출하고, 상변화 소재는 고체와 액체 간의 전이 과정에서 대량의 열을 흡수하거나 방출하여 온도를 조절한다. 이러한 열 관리 기법들은 장시간 착용 시 발생하는 열 문제를 해결해 기기의 성능과 사용자의 안전을 보장한다.

본 리뷰에서는 수동 냉각 소재의 기본 원리와 최신 기술 동향을 집중적으로 분석하고, 스마트 전자 피부를 위한 유연한 전자기기용 방열 소재 개발에 대해 자세히 고찰하고자 한다. 이를 통해 방열 소재의 도입으로 인한 스마트 전자 피부의 성능과 수명을 향상시키는 방법에 대해 논의할 것이다.

## 2. 스마트 전자 피부

### 2.1 스마트 전자 피부의 개요

스마트 전자 피부는 인간의 피부와 유사한 유연성과 신축성을 가지면서도 전자적 기능을 수행할 수 있는 첨단 웨어러블 소자 시스템으로, 최근 웨어러블 및 플렉서블 전자 기기 분야에서 중요한 역할을 하고 있다 [9]. 기존의 웨어러블 기기는 유연성과 밀착성이 부족하여 장시간 사용 시 불편함을 초래하거나 신체의 자연스러운 움직임을 충분히 반영하지 못하는 한계를 가지고 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 개발된 스마트 전자 피부는 피부와 유사한 모듈러스 및 신축성과 같은 물리적 특성을 갖추어 자연스럽게 효율적인 착용감을 제공하며, 유연한 전자소자를 기반으로 자유로운 움직임이 가능하다 [10-13].

스마트 전자 피부는 다양한 생체 신호를 실시간으로 모니터링할 수 있어 체온 [14], 심박수 [15,16], 혈중 산소 농도 [17], 혈압 [18] 등 헬스케어 및 의료 분야에서 혁신적인 응용이 가능하다. 또한, 웨어러블 혹은 스트레처블 디스플레이 [19-21]와 결합될 경우, 사용자가 실시간으로 시각적

피드백을 받을 수 있어 정보 전달의 효율성이 크게 향상된다 [22-28]. 특히 최근에는 스마트 전자 피부가 다기능 센싱 모듈을 포함하여 더욱 다양한 물리적 자극을 동시에 구별할 수 있는 방향으로 발전하고 있다 [29-32]. 이를 통해 인장 및 변형, 비틀림과 같은 복잡한 외부 자극을 감지하고 구분하는 기능이 추가되었으며, 자가 치유 및 자가 전력 공급 기능이 탑재된 기기들은 차세대 스마트 전자 피부로서 주목받고 있다 [33-37].

이러한 스마트 전자 피부기술은 단순한 웨어러블 기기를 넘어, 피부와의 자연스러운 통합을 통해 웨어러블 전자기기의 활용성을 크게 확장하고, 사용자의 경험을 혁신적으로 향상시키는 데 기여하고 있다 [38].

### 2.2 스마트 전자 피부의 열 관리 중요성

이렇듯 우리 생활에 편리함을 제공해 주는 스마트 전자 피부가 개발됨에 따라, 효율적이고 안전한 사용을 염두에 둔 열 관리 기술이 필수적으로 요구되고 있다. 전자기기에서 열이 발생하는 주된 원인은 저항성 발열이다. 전류가 회로를 통과할 때, 도체 내의 전자들이 저항 요소와 충돌하여 에너지를 열 형태로 방출하는 과정인 줄열(joule heat)이 발생한다. 스마트 전자 피부는 고밀도 전자 소자들이 집적된 구조를 가지고 있어, 전류가 흐르는 경로가 좁고 복잡하여 열이 집중적으로 발생할 가능성이 크다. 또한, 고속 신호 처리 과정에서도 소자의 스위칭 동작에 의해 열이 추가로 발생한다. 이렇게 발생한 열은 스마트 전자 피부의 성능과 사용자 경험에 여러 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

첫째, 내부 온도가 상승함에 따라 전자 소자의 성능이 저하된다. 대부분의 전자 소자는 온도에 민감하며, 온도가 상승할수록 전자 이동도가 감소하고, 이에 따라 소자의 반응 속도와 효율이 떨어진다 [39]. 이는 소자의 신뢰성을 저하시킬 수 있으며, 장기적인 사용에 있어서도 문제가 될 수 있다. 둘째, 장시간의 열 축적은 스마트 전자 피부의 물리적 손상을 초래할 수 있다. 고온 상태가 지속되면, 소자와 기판 간의 접합부가 약화되어 기계적 결함이 발생하거나, 열 팽창으로 인해 소재의 변형이 일어날 수 있다 [40]. 셋째, 전자기기가 피부에 직접 부착되어 사용되기 때문에 열 축적이 사용자에게 직접적인 영향을 미친다 [41]. 사람 피부의 평균 온도는 약 32~35°C이며, 약 40°C를 초과하는 온도에 장시간 노출될 경우 피부에 불편함이나 저온 화상이 발생하여 피부 조직에 손상을 줄 수 있다 [42]. 이는 스마트 전자 피부를 장시간 착용해야 하는 사용자에게 특히 큰 위험이 될 수 있다.

이렇듯 스마트 전자 피부의 열 관리는 기기의 성능 유지 뿐만 아니라, 사용자의 안전과 편안함을 보장하기 위해 매우 중요한 요소이다. 열 관리 기술은 스마트 전자 피부의 안정성과 장기 사용성을 높여 다양한 응용 분야에서 스마트 전자 피부가 실질적으로 활용될 수 있도록 하는 핵심적인 역할을 한다.

### 3. 스마트 전자 피부의 열 방출

#### 3.1 다양한 열 관리 메커니즘

유연한 전자기기에서 발생하는 열을 효과적으로 관리하기 위해서는 열전도, 열대류, 열복사, 상변화 소재와 같은 다양한 열 관리 메커니즘을 각각의 상황에 따라 활용해야 한다 (그림 1). 이들 메커니즘은 각각의 상황에 따라 열을 효과적으로 분산시키고 방출하여 기기의 성능을 유지하고 사용자의 안전을 보장하는 데 중요한 역할을 한다 [43,44].

열전도는 물질 내부의 고온 영역에서 저온 영역으로 열이 전달되는 과정을 의미하며, 주로 금속이나 고열 전도성 폴리머를 통해 이루어진다. 전통적으로 구리(Cu)와 알루미늄(Al) 같은 금속 소재들이 주로 사용되어 왔다. 최근에는 그래핀(graphene)과 보론 나이트라이드(BN)와 같이

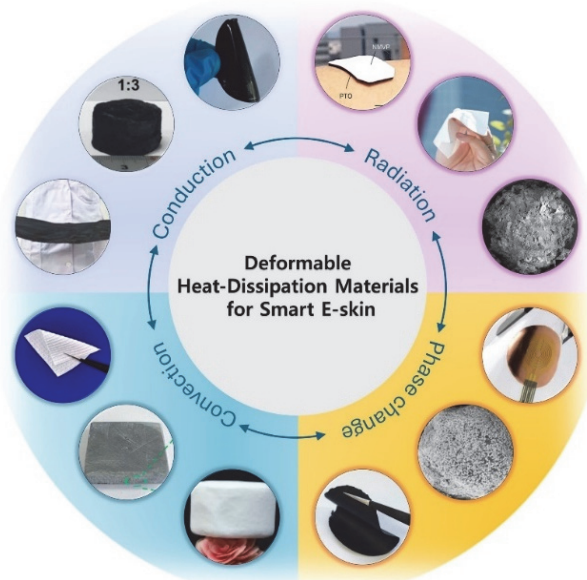
높은 열전도율을 갖는 소재들이 전자기기에서 발생하는 줄 열을 빠르게 분산시켜 국부적인 과열을 방지할 수 있다는 점에서 꾸준히 연구되고 있다.

열대류는 열이 유체(액체나 기체)의 움직임에 의해 전달되는 것으로, 열이 발생한 부분에서 주변의 공기나 액체가 가열되면, 가열된 유체가 상승하거나 이동하면서 열을 다른 곳으로 운반하는 메커니즘이다. 유연한 전자기기에서는 자연 대류가 주로 외부 표면에서 이루어지며, 공기의 자연스러운 흐름을 통해 복잡한 기계적 장치 없이도 열을 효과적으로 방출할 수 있어 기기의 휴대성과 착용성을 유지하는 데 유리하다. 특히, 레이어 구조에서는 다른 열 방출 메커니즘을 위한 레이어와 함께 작동하여, 방출된 열을 대류를 통해 효과적으로 외부로 방출할 수 있도록 돕는다.

열복사는 물체가 열에너지를 전자기파의 형태로 방출하는 메커니즘으로, 모든 물체는 그 온도에 따라 적외선 범위의 열복사를 발생시키며, 온도가 높을수록 방출되는 복사 에너지도 증가한다. 유연한 전자기기에서는 주로 대기창 (atmospheric window) 영역에서 열복사를 통해 열을 방출하며, 이때 기기의 표면에 고방사율 물질을 적용해 열을 효율적으로 외부로 방출한다. 동시에 가시광선 영역에서는 열복사가 아닌 열반사가 중요하며, 고반사율 물질을 사용하여 기기의 열을 반사함으로써 외부로의 열 방출을 극대화할 수 있다. 이러한 복합적인 접근은 밀폐된 환경이나 진공 상태에서 열을 효과적으로 전달할 수 있는 방안을 제공한다 [45].

상변화 소재(phase change materials, PCMs)는 고체와 액체 상태 간의 전이 과정에서 발생하는 흡열 또는 발열 특성을 활용하여 열을 관리하는 메커니즘이다 [46]. 이러한 소재는 특정 온도에서 상변화가 일어날 때 다량의 잠열 (latent heat)을 흡수하거나 방출하여 온도를 일정하게 유지한다. 예를 들어, 파라핀 왁스와 같은 상변화 소재는 고체에서 액체로 전환될 때 열을 흡수하여 기기의 온도 상승을 억제할 수 있으며, 이는 주기적으로 열이 발생하는 유연한 전자기기의 온도를 효과적으로 관리하는 데 매우 유용하다.

이처럼 다양한 열 관리 메커니즘을 효과적으로 활용하기 위해, 유연한 전자기기에서는 기능성 필러를 포함한 유연하거나 신축성 있는 매트릭스 소재를 사용한다. 매트릭스 소재는 유연성과 내구성을 제공하며, 미세 구조 공정을 통해 표면 특성을 최적화하여 열 방출을 극대화하는 데 기여하는 역할이다. 따라서 본 리뷰에서는 이러한 기술들을 중심으로 스마트 전자 피부와 같은 유연한 전자기기의 열 관리 전략을 소개하고자 한다.



**Fig. 1.** Introduction of passive cooling mechanisms for deformable heat-dissipation materials in smart e-skin: conduction, convection, radiation, and phase change, with example materials for each mechanism.

### 3.2 능동 냉각과 수동 냉각의 비교

스마트 전자 피부와 같은 유연한 전자기기의 열 관리를 위해 다양한 열 관리 메커니즘이 사용되지만, 실제 응용에서 이들 메커니즘을 구현하는 방식은 크게 두 가지로 나뉜다. 바로 능동 냉각과 수동 냉각이다. 앞서 언급된 열전도, 열대류, 열복사, 상변화 소재와 같은 메커니즘들이 스마트 전자 피부에 어떻게 적용되는지에 따라, 이 두 가지 접근법이 기기 설계에 미치는 영향은 크게 달라진다.

능동 냉각은 팬, 펌프, 압축기와 같은 기계적 장치를 사용해 열을 강제로 제거하는 방식이다. 이 방법은 높은 열 방출 효율을 제공하지만, 스마트 전자 피부와 같은 소형화되고 유연성이 요구되는 기기에서는 여러 제약이 따른다. 특히, 전력 소모가 크고 복잡한 구조가 필요하며, 이는 스마트 전자 피부의 핵심적인 특성인 휴대성과 착용성을 저해할 수 있다. 더 나아가, 장시간 사용 시 능동 냉각 시스템 자체에서 발생하는 추가적인 열이 문제를 악화시킬 수 있다. 반면, 수동 냉각은 외부 에너지원 없이 자연적인 열 전달 메커니즘을 활용하는 방식으로, 스마트 전자 피부에 특히 적합하다. 열전도, 열대류, 열복사, 상변화 소재를 활용한 수동 냉각은 구조적으로 단순하고 전력 소모가 없으며, 기계적 부품이 없기 때문에 고장이 발생할 가능성이 적어 높은 신뢰성을 보인다. 결론적으로, 수동 냉각은 복잡한 유지 보수가 필요 없고, 장시간 사용해도 성능 저하가 발생하지 않으며, 피부에 밀착된 상태에서도 열 축적을 효과적으로 방지하여 사용자의 안전과 편안함을 보장한다. 또한, 에너지 효율적이고 환경 친화적이며, 복잡한 기계적 장치를 필요로 하지 않기 때문에 구조적으로도 단순하여 스마트 전자 피부의 실용성과 내구성을 극대화할 수 있다. 이러한 특성으로 인해 수동 냉각 기술은 유연한 전자기기의 발전과 함께 더욱 중요한 역할을 할 것이며, 다양한 응용 분야에서 그 활용 가능성이 크게 확대될 것이다.

## 4. 스마트 전자 피부를 위한 열 방출 소재

### 4.1 열전도 소재

열전도 소재는 스마트 전자 피부에서 발생하는 열을 효과적으로 분산시켜 과열을 방지하는 핵심 역할을 한다. 열전도 소재들은 주로 고온 영역에서 저온 영역으로 열을 전달하며, 이를 통해 열이 한 곳에 집중되지 않도록 돕는다. 높은 열전도율을 가지는 소재는 열을 더욱 빠르고 효율적으로 전달할 수 있어 중요하다.

**Table 1.** Performance of functional filler materials for thermal management materials and interfaces.

Filler materials	Coefficient of thermal expansion ( $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ )	Thermal conductivity ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	Density ( $\text{g cm}^{-3}$ )
Ag	19.7	429	10.49
AlN	4.2	285	3.26
Cu	16.5	398	8.96
BN (boron nitride)	4.1	300	3.45
CNT (carbon nanotube)	~1.6	~3,500	~1.3
Graphene	-3.26	4,000	2.267
h-BN (hexagonal-BN)	1	200	2.1
SiC	4.0	270~490	3.21
GO (graphene oxide)	-3.3	500~600	2.2
MWCNT (multi-walled CNT)	~1.2	~3,000	~1.4

표 1을 보면, 고열 전도성을 가진 다양한 재료들이 열 관리 소재로 사용된다. 예를 들어, 구리는  $398 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , 알루미늄은  $237 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 의 열전도율을 가지며, 이러한 금속들은 전통적으로 열전도성 소재로 널리 활용되었다. 그러나 이러한 금속 소재는 상대적으로 높은 밀도와 열 팽창 계수로 인해, 스마트 전자 피부와 같은 유연하고 가벼운 구조에는 적합하지 않을 수 있다.

이에 비해, 그래핀과 보론 나이트라이드는 매우 높은 열전도율과 낮은 열 팽창 계수를 가지며, 상대적으로 낮은 밀도로 스마트 전자 피부에 적합한 소재로 주목받고 있다. 그래핀은 약  $4,000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 의 열전도율을 가지고 있으며, 유연성과 투명성 또한 갖추고 있어 전자 피부의 다양한 구조에 쉽게 통합될 수 있다. BN은 그래핀과 유사한 층상 구조를 가지며, 약  $300 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 의 열전도율을 제공하면서도 전기 절연 특성을 갖추고 있어 절연체로서 다양한 전자기기 응용에서 유용하다. 이와 같은 이유로 고열 전도성을 가진 여러 재료들 중에서 특히 그래핀과 보론 나이트라이드를 이용한 방열 소재에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 따라서 이 논문에서는 그래핀과 보론 나이트라이드를 활용한 방열 소재의 설계 및 응용 가능성에 대해 심도 있게 소개하고자 한다.

### 4.1.1 그래핀(graphene)

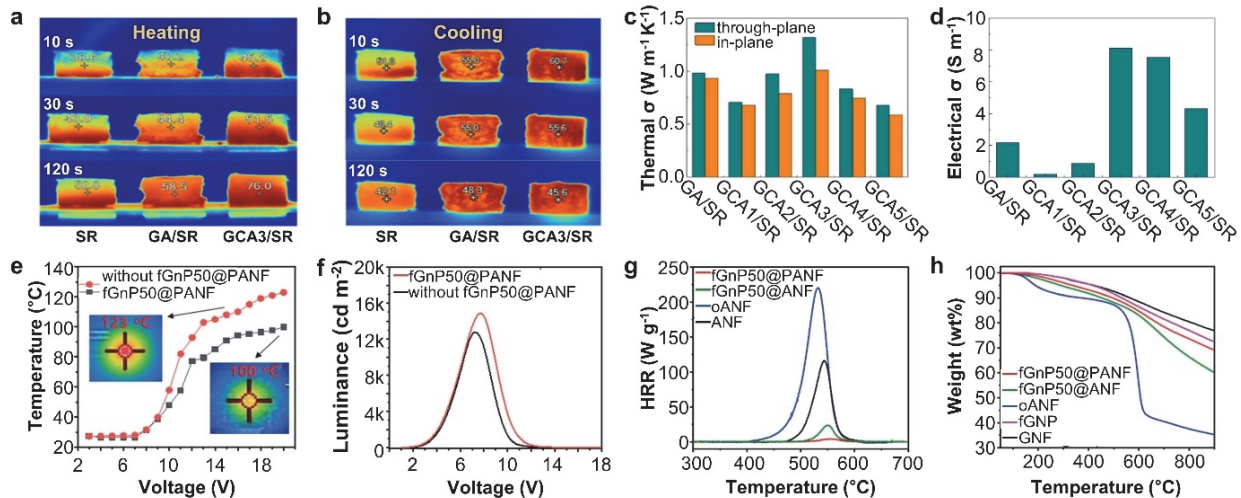
2021년 Chen 그룹은 기존의 그래핀 및 다중벽 탄소 나노튜브(MWCNT)를 단일 구조로 사용할 경우 열전도 및 전자기 간섭 차단 성능의 향상 효율이 낮다는 한계를 극복하고자, 산화물(GO)과 다중벽 탄소 나노튜브(MWCNT)를 결합한 3D 복합체(GCA3/SR) 개발에 성공하였다. 적외선 열화상 이미지를 통해 가열 및 냉각 과정에서의 온도 변화를 시각적으로 비교한 결과, GCA3/SR 복합체는 120초 후 가열 시 76.0°C에 도달하여 SR과 GA/SR에 비해 더 높은 열흡수 능력을 보였으며, 냉각 시에도 45.6°C로 온도가 낮아져 열을 효과적으로 방출하는 모습을 확인할 수 있었다 [그림 2(a), (b)]. 특히, GCA3/SR 복합체는 in-plane에서 약 0.7 W/m·K, through-plane에서 약 1.3 W/m·K의 열전도성을 보여주었으며 [그림 2(c)], 7.65 S/m의 전기 전도성을 기록하여 [그림 2(d)], 우수한 열전도성과 전자기 간섭 차단 성능을 입증하였다 [47]. 이러한 열전도성 수치는 그래핀의 이론적 값인 약 4,000 W/m·K에 비해 낮지만, 복합체 내 필러와 기질 간의 상호작용 및 네트워크 구조로 인해 발생하는 필연적인 결과이다. GCA3/SR 복합체는 이러한 구조적 특성에도 불구하고 스마트 전자 피부에서 요구되는 열 분산 성능을 충분히 충족시키며, 이론적 수치와 실험적 결과 간의 차이는 복합재 설계와 필러 배향에 따른 것으로 해석할 수 있다.

같은 해 Kim 그룹은 기존 열전도성 소재들이 가진 유연

성과 열전도성 간의 트레이드오프 문제를 극복하고, 높은 기계적 유연성과 열전도성을 동시에 갖춘 소재를 개발하고자, 그래핀 나노 플레이트(GnP)와 아라미드 나노 섬유(ANF)를 화학적으로 교차 결합하였다. 이 복합체는 높은 열전도성(최대 68.2 W/m·K)과 우수한 기계적 유연성(인장 강도 331 MPa, 10,000회 이상 굴곡 가능)을 동시에 갖춘 얇은 필름 형태(21 μm)로 제작되었으며, 유연한 전자기기에 쉽게 통합될 수 있다. GnP@PANF 복합체를 OLED 디바이스에 적용한 결과, 최대 온도가 기존보다 23°C 감소하였으며 [그림 2(e)], 이는 GnP@PANF 복합체가 열 방출에 효과적임을 보여준다. 또한, GnP@PANF 복합체의 적용이 OLED의 휘도(luminance) 특성에 영향을 미치지 않음도 확인되었다 [그림 2(f)]. 열 방출률(HRR) 곡선을 통해 GnP@PANF 복합체는 30 W/g의 매우 낮은 열 방출률을 기록하였으며, 이는 이 복합체가 높은 난연성(fire resistance)을 갖추고 있음을 시사한다 [그림 2(g)]. 열 중량 분석(TGA) 결과는 GnP@PANF 복합체가 약 600°C까지 열적 안정성을 유지하며, 고온 환경에서도 우수한 성능을 유지할 수 있음을 보여준다 [그림 2(h)] [48].

### 4.1.2 보론 나이트라이드(boron nitride)

2021년에 발표된 Liu 그룹의 연구는 기존의 셀룰로오스 나노 섬유(CNF) 에어로겔이 열전도성에서 한계를 보이는 문제를 극복하고자, 보론 나이트라이드 나노 시트(BNNS)



**Fig. 2.** Infrared thermography images of SR, GA/SR and GCA3/SR during the (a) heating and (b) cooling process at 10s, 30s, and 120s. (c) Thermal conductivity of composites in the in-plane and through-plane directions, (d) electrical conductivity of all tested samples, (e) surface temperature of the OLED operated between 3~20 V, with infrared thermal images showing the OLED at 20 V without (left inset) and with (right inset) the fGnP50@PANF heat spreader, (f) luminescence of the OLED operating between 3~20 V, comparing the presence and absence of the fGnP50@PANF heat spreader, (g) HRR curves of ANF, oANF, fGnP50@ANF, and fGnP@PANF bioinspired papers, and (h) thermogravimetric analysis compares the thermal stability of GnP, fGnP, oANF, fGnP50@ANF, and fGnP@PANF bioinspired papers.

와 셀룰로오스 나노 섬유(CNF)를 결합하여 고효율 열 관리 복합체인 CNF/BNNS 에어로젤을 개발하였다. 이 에어로젤은  $0.57 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 의 열전도성을 달성하였으며, 이는 순수 CNF 에어로젤의 열전도성( $0.105 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ )보다 약 443% 향상된 수치이다. S-CNF/BNNS 에어로젤은 가열 과정에서 150초 후 표면 온도가 약  $60^\circ\text{C}$ 에 도달하며, CNF, S-CNF, CNF/BNNS 등 다른 복합체들에 비해 낮은 온도를 유지하였다. 냉각 과정에서도 300초 후 약  $23^\circ\text{C}$ 까지 온도가 빠르게 감소하여, 뛰어난 열 방출 성능을 입증하였다 [그림 3(a)]. 또한, S-CNF/BNNS 에어로젤은 가열 시간 동안 약  $60^\circ\text{C}$ 에서 안정적으로 유지되며, CNF, S-CNF, CNF/BNNS 복합체들에 비해 열 축적이 적었다 [그림 3(b)]. 냉각 시간에서도 S-CNF/BNNS 에어로젤은 CNF, S-CNF, CNF/BNNS 복합체들 중 가장 빠르게 열을 방출하여, 300초 후 약  $23^\circ\text{C}$ 까지 온도가 낮아졌다 [그림 3(c)] [49].

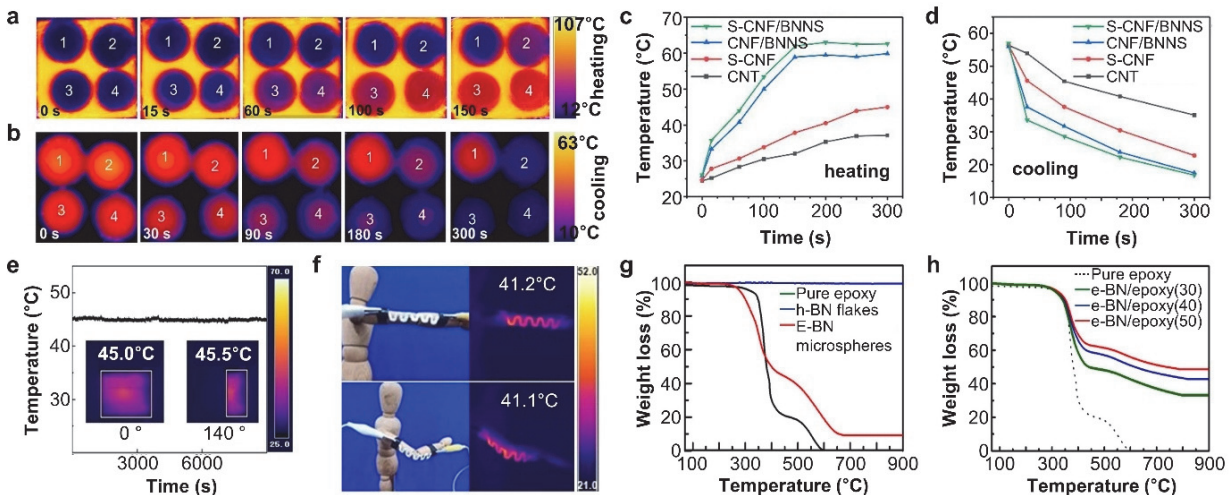
2023년 Sun 그룹은 유연한 전자 기기의 열 관리를 개선하기 위해 BNNS (boron nitride nanosheets)와 TPU (thermoplastic polyurethane) 섬유 매트릭스를 결합한 고효율 열 관리 복합체를 개발하였다. 이 복합체는  $0^\circ$ 에서  $140^\circ$ 까지의 굽힘-해제 사이클 2,000번 후에도 표면 온도가 약  $45.0^\circ\text{C}$ 에서  $45.5^\circ\text{C}$ 로 거의 변동이 없었으며, 이는 복합체의 열 관리 성능이 반복적인 변형에도 안정적으로 유지됨을 시사한다 [그림 3(d)]. 또한, BNNS 함량이 25 wt%

인 복합체를 인형 팔꿈치에 부착한 상태에서 굽힘과 확장이 이루어졌을 때, 표면 온도가  $41.1^\circ\text{C}$ 에서  $41.2^\circ\text{C}$ 로 유지되었으며, 이는 반복적인 동작에도 열 방출 성능이 우수함을 의미한다 [그림 3(e)] [50].

같은 해 Yang 그룹은 육방정계 질화붕소(h-BN) 플레이트와 코어-셸 구조의 e-BN 마이크로스피어를 결합하여 e-BN/BN/에폭시 복합체를 개발한 연구를 발표하였다. 이 복합체는 h-BN 플레이트 함량이 50 wt%일 때 약  $4.27 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 의 높은 횡평면 열전도도를 달성하였으며, 이는 기존 BN/에폭시 복합체의 열전도도( $1.17 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ )보다 약 3.7배 향상된 수치이다. TGA 분석 결과, e-BN 마이크로스피어는 약  $400^\circ\text{C}$  이상에서 중량 손실이 가장 적어 우수한 열적 안정성을 보였으며 [그림 3(f)], h-BN 플레이트 함량이 증가할수록 복합체의 열적 안정성이 더욱 향상됨을 확인할 수 있었다 [그림 3(g)]. 이는 h-BN 플레이트가 복합체의 열적 안정성을 크게 높이는 데 기여함을 시사한다 [51].

#### 4.1.3 그래핀과 보론 나이트라이드

이렇듯, 최근 그래핀의 뛰어난 열전도성과 보론 나이트라이드의 우수한 열적 안정성을 활용하여 향상된 열 관리 성능을 목표로 하는 연구가 각각 활발히 진행되고 있다. 또한, 두 소재의 장점을 결합한 그래핀과 보론 나이트라이드



**Fig. 3.** Infrared thermal images during the (a) heating process and (b) cooling process (1: CNF aerogel, 2: S-CNF aerogel, 3: CNF/BNNS aerogel, and 4: S-CNF/BNNS aerogel). (c) Surface temperature variation during the heating phase for CNF, S-CNF, CNF/BNNS, and S-CNF/BNNS aerogels, (d) surface temperature change with cooling time for CNF, S-CNF, CNF/BNNS, and S-CNF/BNNS aerogels, (e) temperature stability of the flexible conductor during over 2,000 cycles of vending-releasing between  $0^\circ$  and  $140^\circ$ , (f) surface temperature of the as-cut conductor with 25 wt% BNNSs, attached to the elbow of an IKEA doll during flexion and extension, (g) TGA curves of pure epoxy, h-BN flakes, and e-BN microspheres under air atmosphere, and (h) TGA curves of e-BN/BN/epoxy composites with different h-BN flake contents under air atmosphere.

를 함께 사용하는 복합체 연구도 주목받고 있으며, 이에 대해 소개하고자 한다.

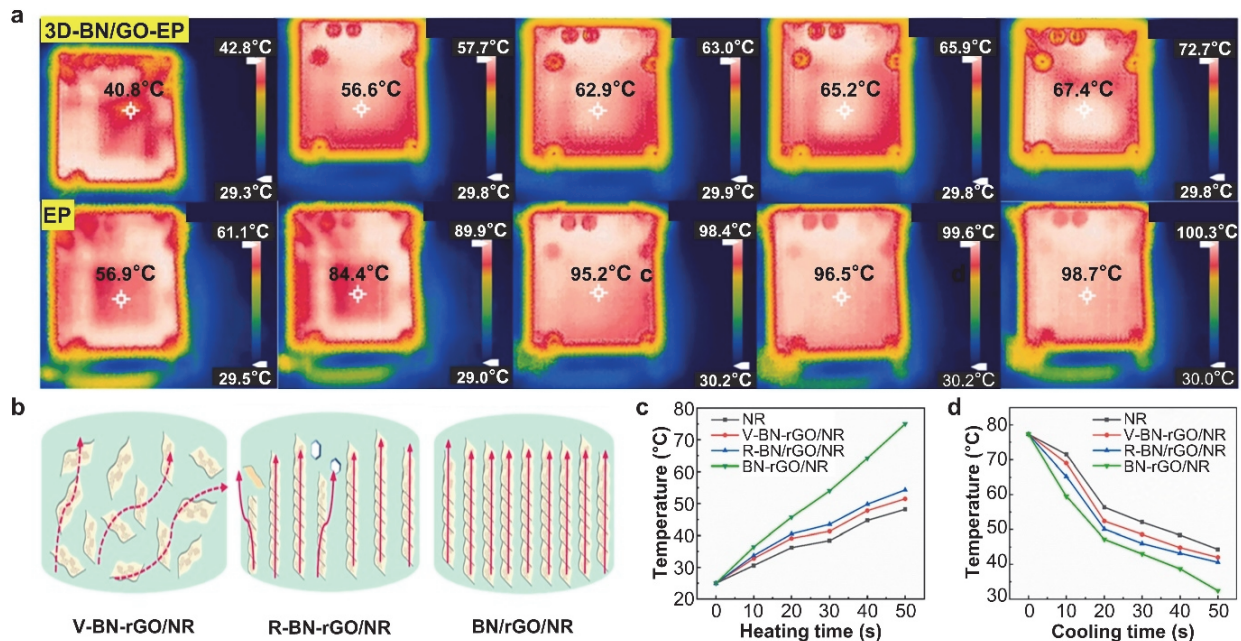
2024년, Shang 그룹은 기존 에폭시 수지 기반 열전도 복합체의 낮은 열전도성 문제를 해결하기 위해 3D 구조를 활용하여 보론 나이트라이드(BN)와 그래핀 산화물(GO)을 결합한 열전도 복합체(3D-BN/GO-EP) 개발에 성공하였다. 이 열전도 복합체는 포논(phonon)의 이동을 촉진하고, 필러 간 및 필러-기질 간의 인터페이스 열 저항을 감소시켜 열전도도를 1.07 W/m·K까지 향상시키는 데 성공하였다. 이는 순수 에폭시 수지에 비해 약 5배 높은 수치이다. 또한, 적외선 열화상 이미지를 통해 3D-BN/GO-EP 복합체가 순수 에폭시 대비 600초 동안 약 31.3°C 더 낮은 온도를 유지할 수 있음을 입증하였다 [그림 4(a)] [52].

Wong 그룹이 발표한 논문에서는 보론 나이트라이드(BN)와 환원된 그래핀 산화물(rGO)을 이용하여 고효율 열 인터페이스 재료(TIMs)에 대해 다루고 있다. BN과 rGO를 무작위로 배치한 구조(V-BN-rGO/NR), 부분적으로 정렬한 구조(R-BN/rGO/NR), 그리고 완전히 수직으로 정렬한 구조(BN/rGO/NR)를 비교 분석한 결과 [그림 4(b)], 완전히 수직으로 정렬한 BN/rGO/NR 구조가 가열 50초 후 약 78°C의 표면 온도에 도달했으며, 냉각 과정에서도 가장 빠르게 열을 방출하여 다른 구조들에 비해 더 높은 열전도도를 보임을 확인했다 [그림 4(c), (d)] [53].

### 4.2 열 복사 및 열 반사 소재

열 복사 및 열 반사 소재는 스마트 전자 피부의 열 관리에서 중요한 역할을 한다. 복사 열 전달과 반사 특성을 활용하여 전자기기에서 발생하는 열을 효과적으로 외부로 방출하거나 반사하여, 기기 내부의 온도를 안정적으로 유지하게 하는 것이 주된 메커니즘이다. 특히, 복합체 내 다공성 폴리머층과 같은 특정 레이어는 열대류를 촉진하여 열을 공기 중으로 빠르게 분산시킬 수 있다. 예를 들어, 다층 복합체의 경우 상부 레이어가 열을 흡수한 후, 하부 레이어가 자연 대류를 통해 열을 외부로 빠르게 방출하는 방식으로 작동한다. 이러한 대류 메커니즘은 열이 축적되지 않도록 방지하며, 복합체의 전반적인 열 방출 성능을 극대화하는 역할을 한다.

열복사 소재는 높은 방사율(emissivity)을 통해 적외선 영역에서 열을 방출하며, 특히 장파 적외선(long-wave infrared, LWIR) 영역인 8~13 μm에서 열을 방출하여 전자기기의 과열을 방지하고 냉각 성능을 극대화한다 [54]. 이 파장대는 대기 중 수증기나 이산화탄소에 의한 흡수 없이 우주로 직접 열을 방출할 수 있는 지구 대기창(atmospheric window)으로 불리는 영역이다. 방사 냉각을 최적화하기 위해서는 태양광이 강하게 들어오는 파장대인 0.3~2.5 μm에서 높은 반사율을, 대기창 영역인 8~13



**Fig. 4.** (a) Infrared thermal images of EP and 3D-BN/GO-EP composites and (b) schematic representations of heat transfer in the three different TIMs. Surface temperature over (c) heating time and (d) cooling time for four different TIMs.

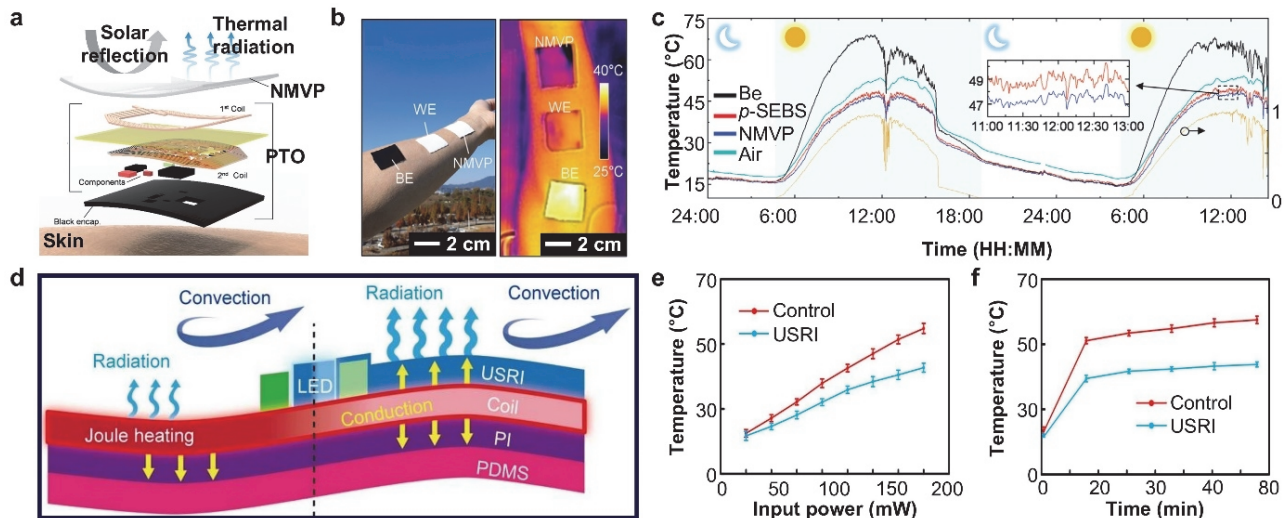
$\mu\text{m}$ 에서는 높은 방사율을 동시에 갖추는 것이 이상적이다 [55]. 이런 특성을 가진 재료는 태양 아래에서도 자체적으로 냉각 효과를 발휘할 수 있어 열 관리에 매우 유리하다.

반면, 열반사 소재는 외부에서 들어오는 태양광이나 열을 반사하여 기기 내부로의 열 흡수를 최소화한다. 주로 은 (silver)이나 알루미늄(aluminum)과 같은 금속 또는 금속 코팅된 폴리머로 구성되며, 반사율(reflectivity)을 95% 이상으로 유지하도록 설계된다. 높은 반사율 덕분에 가시광선(약  $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$ ) 및 근적외선(NIR, 약  $0.7\sim 2.5\ \mu\text{m}$ ) 영역에서의 열 흡수를 크게 줄일 수 있으며, 내부 열을 외부로 효율적으로 방출해 스마트 전자 피부의 성능과 사용자의 편안함을 장시간 유지할 수 있다.

2021년, Song 그룹은 나노/마이크로공극 폴리머(NMVP)를 이용하여 태양광을 반사하고 열을 방출하는, 이른바 수동 방사 냉각 구조를 갖춘 무선/배터리 프리 패치형 조직 산소 포화도계(PTO)를 개발하였다. NMVP의 구조는 태양 반사를 극대화하고 열 복사와 더불어 다공성 구조를 통해 자연 열대류를 촉진하여 열이 공기 중으로 빠르게 분산되도록 설계되었다 [그림 5(a)]. 적외선 열화상 이미지에서는 NMVP가 적용된 장치의 온도가  $25^\circ\text{C}$ 로 측정되어, WE ( $40^\circ\text{C}$ ) 및 BE ( $45^\circ\text{C}$ )보다 현저히 낮은 온도를 기록했다 [그림 5(b)]. NMVP는 38시간 모니터링 동안 다양한 기상 조건에서도  $47^\circ\text{C}$ 에서  $49^\circ\text{C}$  사이의 비교적 안정적인 온도를

유지하여 p-SEBS와 BE와 같은 다른 소재보다 우수한 냉각 성능을 발휘했다 [그림 5(c)]. 이는 NMVP가 장기간 동안 더 낮은 온도를 유지하며 효과적인 열 관리를 제공함을 시사한다 [56].

Yu 그룹은 2023년 신축성이 있는 무선 RF 기반 피부 전자 장치를 위한 효율적인 열 관리 전략으로 USRI (ultrathin, soft, radiative cooling interface) 도입을 제시했다. USRI 시스템의 다층 구조는 LED 소자에서 발생한 열을 전도를 통해 아래로 분산시키고, USRI 층에서 방사를 통해 외부로 열을 방출하며, 상부 공기와의 상호 작용을 통해 자연 대류를 유도하여 열을 공기 중으로 확산시킴으로써 효율적인 열 관리가 이루어지도록 하였다 [그림 5(d)]. 이 연구에서 USRI를 적용한 장치는 입력 전력 증가에 따라  $70\ \text{mW}$ 에서 약  $25^\circ\text{C}$ ,  $180\ \text{mW}$ 에서 약  $50^\circ\text{C}$ 로 온도가 상승한 반면, USRI가 적용되지 않은 컨트롤 장치에서는 동일한 조건에서 각각 약  $30^\circ\text{C}$ 에서 약  $65^\circ\text{C}$ 로 더 높은 온도 상승을 보였다 [그림 5(e)]. 또한, 시간 경과에 따른 온도 변화를 측정된 결과, USRI가 적용된 장치는 60분 동안 약  $55^\circ\text{C}$ 를 유지하며, 컨트롤 장치의 약  $65^\circ\text{C}$ 에 비해 약  $10^\circ\text{C}$  더 낮은 온도를 유지하여 열 방출 성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있었다 [그림 5(f)]. 이러한 결과는 USRI가 장치의 열 관리를 효과적으로 개선하여 발열 문제를 완화함을 시사한다 [57].



**Fig. 5.** (a) Exploded schematic view of the wireless/battery-free patch-type tissue oximeter with radiative cooling layers, (b) photographs and infrared thermography of black elastomer (BE), white elastomer (WE), and NMVP on a human arm, (c) temperature profiles over time for different samples including BE, p-SEBS, NMVP, and air, with a focus on the time-dependent cooling effect, (d) illustration of thermal exchange mechanisms in a USRI-coated flexible heating wire, (e) temperature response of a USRI-integrated epidermal lighting system versus a control as input power increases, and (f) temperature change in the USRI-coated epidermal lighting system under prolonged stretching conditions, ranging from 5% to 50% over 75 minutes.

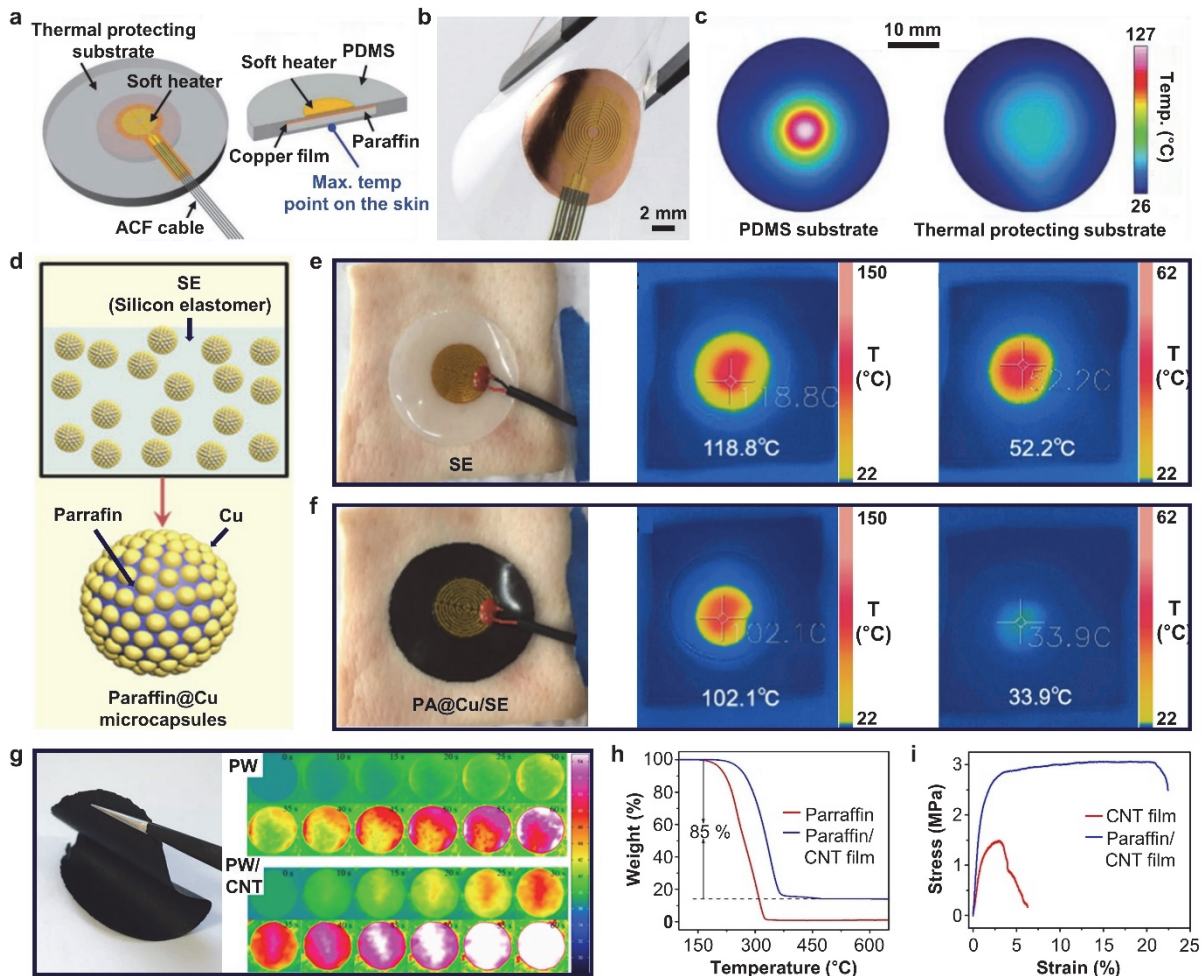
### 4.3 상변화 물질 및 인터페이스

상변화 물질은 스마트 전자 피부와 같은 고밀도 전자기기의 열 관리에 핵심적인 역할을 한다 [58]. 상변화 물질은 특정 전이 온도(transition temperature)에 도달하면 고체에서 액체로 변하면서 열을 흡수하는데, 이때 흡수된 열은 물질의 온도를 올리지 않고 상변화 과정에서 잠열(latent heat)로 사용된다 [59]. 이 과정에서 물질은 전이 온도에 머물러 추가적인 열이 공급되어도 온도가 일정하

게 유지되며, 이를 통해 과열을 방지할 수 있다.

예를 들어, 파라핀은 약 47~65°C에서 고체에서 액체로 전이되면서 상당한 양의 잠열을 흡수해 주변의 온도 상승을 억제한다 [60]. 이는 얼음이 물로 녹을 때 0°C에서 온도를 유지하는 원리와 유사하다. 이러한 상변화 원리를 통해 스마트 전자 피부는 효과적으로 열을 관리할 수 있으며, 과열을 방지하여 안정적인 작동을 가능하게 한다.

또한, 상변화 물질은 금속 필름이나 고분자 기판과 함께 사용되어 열이 수평 방향으로 효과적으로 분산될 수 있도



**Fig. 6.** (a) Schematic diagram of a wearable device featuring a soft ultrathin heater on a functional soft composite with embedded paraffin as the phase change material, and a copper film on top within PDMS, (b) optical image showing the wearable device under bending deformation, (c) experimental temperature distributions on the bottom surfaces of PDMS substrate and thermal protecting substrate, (d) schematic illustration of the fabrication process for shape-stabilized PA@Cu microcapsules, (e) temperature distribution on the upper surfaces of substrates and pig skin after 60 seconds of heating (9 V, 1 W) with a flexible heater using pure SE as the substrate, (f) temperature distribution using a PA@Cu/SE composite with 40 wt% PA@Cu as a flexible substrate under the same conditions, (g) optical image of the highly flexible PW/CNT phase change material (PCM) and its infrared thermal imaging response compared to PW, (h) TGA curves comparing the flexible PW/CNT PCM to pure PW, and (i) mechanical performance comparison between the flexible PW/CNT PCM and CNT film.

록 설계된다. 금속 필름은 열을 빠르게 전도하여 집중된 열을 분산시키고, 상변화 물질은 전이 온도에서 열을 흡수하여 열 축적을 방지하는 역할을 한다 [61]. 이러한 복합 구조는 스마트 전자 피부가 유연성과 밀착성을 유지하면서도 높은 열 관리 성능을 발휘할 수 있게 하며, 장시간 사용 시에도 안정적으로 작동할 수 있도록 도와준다.

2019년 Song 그룹은 단순한 폴리머 구조가 폴리디메틸실록산(PDMS)을 사용하여 열전도율이 낮고 전자기기에서 발생하는 열을 효과적으로 분산하지 못해 피부에 과도한 열이 전달된다는 문제점을 해결하기 위해 상변화 물질인 파라핀(paraffin)과 금속 필름인 구리를 사용하여 열 관리 성능을 극대화한 새로운 구조를 설계했다 [그림 6(a), (b)]. 이 설계에서 파라핀은 약 56°C에서 고체에서 액체로 전이되며 열을 흡수하여 기기의 온도를 안정적으로 유지하게 하고, 구리 필름은 파라핀 위에 배치되어 열을 수평 방향으로 효과적으로 분산시켜 피부로 전달되는 열을 줄이는 역할을 한다. 기능성 소프트 컴포지트를 활용한 열 보호 기판을 소프트 히터에 적용한 결과, 기존의 PDMS 기판에 비해 피부의 최대 온도를 85% 이상, 즉 약 127°C에서 51°C로 감소시키는 데 성공하였다 [그림 6(c)] [62].

2021년 Li 그룹의 논문에서는 상변화 물질(PCM)에서 발생하는 액체 누출 문제와 강성의 한계를 해결하기 위해 파라핀과 나노 구리 입자를 활용한 새로운 유연 복합체를 제안한다. Pickering 에멀션 방법을 사용하여 파라핀을 나노 구리 입자(nano-Cu particles)로 캡슐화한 PA@Cu 마이크로 캡슐을 제조한 후, 이를 실리콘 엘라스토머(SE) 매트릭스에 균일하게 혼합하여 PA@Cu/SE 복합체를 완성했다 [그림 6(d)]. 순수 SE 기판을 사용했을 때 기판의 표면 온도는 약 118.8°C, 피부 표면 온도는 약 52.2°C에 도달했지만, PA@Cu/SE 복합체를 적용한 경우 기판의 표면 온도는 약 102.1°C, 피부 표면 온도는 약 33.9°C로 측정되었다 [그림 6(e), (f)]. 이러한 차이는 복합체 내의 파라핀이 전이 온도에서 고체에서 액체로 변화하면서 열을 흡수하는 상변화 메커니즘에 기인한다 [63].

Jia 그룹은 2023년 기존 PCM들이 가진 기계적 강성과 열적 안정성의 문제를 해결하기 위해 유연하고 고열 전도성을 지닌 탄소 나노튜브(CNT) 기반의 경량 유연 상변화 복합체를 개발에 성공했다. 이 복합체는 85 wt%의 파라핀을 CNT 필름에 적재하여 제작되었으며, 가열 테스트에서 순수 파라핀(PW)은 30초 이내에 표면 온도가 약 64°C까지 급격히 상승한 반면, 파라핀/CNT 복합체(PW/CNT)는 동일 조건에서 표면 온도가 약 48°C로 더 낮게 유지되어 열 축적이 감소된 것을 확인할 수 있었다 [그림 6(g)]. 또한, TGA 분석을 통해 PW/CNT 복합체가 약 214°C에서 중량

손실이 시작되며, 상변화 시 액체 누출 없이 85%의 파라핀을 유지하는 것을 확인할 수 있었다 [그림 6(h)]. 더불어 PW/CNT 복합체는 3.1 MPa의 인장 강도와 21%의 변형률을 보여, 유연한 전자기기에 적용할 수 있는 가능성을 보여준다 [그림 6(i)] [64].

## 5. 결론

본 리뷰에서는 다양한 열 관리 메커니즘과 최신 기술 동향을 바탕으로 스마트 전자 피부의 성능과 사용자 경험을 극대화하기 위한 전략을 제시하였다. 스마트 전자 피부의 열 관리는 단순한 기능적 요구 사항을 넘어 기기의 신뢰성, 내구성, 그리고 사용자 안전에 직결되는 중요한 요소로, 수동 냉각 방식은 전력 소모를 최소화하면서 효율적인 열 분산을 가능하게 한다는 점에서 핵심적인 역할을 한다. 그러나 고성능 소재의 제조 비용, 장기간 사용 시 발생하는 열화, 극한 환경에서의 안정성 등은 여전히 해결해야 할 과제로 남아 있으며, 이는 앞으로의 연구에서 혁신적인 소재 개발과 제조 기술의 개선을 통해 극복해야 할 부분이다. 결론적으로, 스마트 전자 피부의 발전과 함께 변형 가능한 열 방출 소재의 중요성은 더욱 커질 것이며, 이러한 혁신적 소재의 응용은 미래 웨어러블 기술의 중요한 전환점이 될 것이다. 꾸준한 연구와 개선을 통해 스마트 전자 피부의 방열 문제를 해결함으로써, 인간과 전자기기의 통합적 상호작용을 실현하고, 궁극적으로 사용자의 삶의 질을 크게 향상시킬 수 있을 것이다.

## ORCID

Moon Kee Choi

<https://orcid.org/0000-0003-4536-3393>

## 감사의 글

This work was supported by the 2024 research Fund (1.240007.01 and 1.240010.01) of UNIST.

## REFERENCES

- [1] X. Wang, L. Dong, H. Zhang, R. Yu, C. Pan, and Z. L. Wang, *Adv. Sci.*, **2**, 1500169 (2015).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adv.201500169>
- [2] J. Park, D. H. Kang, H. Chae, S. K. Ghosh, C. Jeong, Y. Park,

- S. Cho, Y. Lee, J. Kim, Y. Ko, J. J. Kim, and H. Ko, *Sci. Adv.*, **8**, eabj9220 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abj9220>
- [3] K. Lee, Y. Kim, E. Ahn, J. I. Kwon, H. Ma, J. H. Jang, S. Li, H. C. Lee, G. H. Lee, S. Lee, K. Kim, N. J. Sung, D. Kim, M. H. Song, M. K. Choi, and J. Yang, *Mater. Today*, **75**, 2 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2024.03.008>
- [4] S. Jung, U. J. Yang, J. Oh, S. Jeong, Y. Cho, G. H. Lee, M. K. Choi, and C. Yang, *Adv. Funct. Mater.*, **34**, 2406200 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202406200>
- [5] P. Zhu, H. Peng, and A. Y. Rwei, *Med. Novel Technol. Devices*, **14**, 100118 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.medntd.2022.100118>
- [6] B. Sun and X. Huang, *npj Flexible Electron.*, **5**, 12 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41528-021-00109-9>
- [7] J. Li, Y. Fu, J. Zhou, K. Yao, X. Ma, S. Gao, Z. Wang, J. G. Dai, D. Lei, and X. Yu, *Sci. Adv.*, **9**, eadg1837 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adg1837>
- [8] Y. Zhu, R. Haghniaz, M. C. Hartel, S. Guan, J. Bahari, Z. Li, A. Baidya, K. Cao, X. Gao, J. Li, Z. Wu, X. Cheng, B. B. Li, S. Emaminejad, P. S. Weiss, and A. Khademhosseini, *Adv. Mater.*, **35**, 2209300 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202209300>
- [9] C. Park, M. S. Kim, H. H. Kim, S. H. Sunwoo, D. J. Jung, M. K. Choi, and D. H. Kim, *Appl. Phys. Rev.*, **9**, 021312 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1063/5.0093261>
- [10] J. Yoo, S. Li, D. H. Kim, J. Yang, and M. K. Choi, *Nanoscale Horiz.*, **7**, 801 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1039/D2NH00158F>
- [11] G. L. Nor and M. K. Choi, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **34**, 401 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2021.34.6.2>
- [12] S. M. Park and U. H. Choi, *Macromol. Res.*, **31**, 499 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s13233-023-00120-1>
- [13] G. D. Cha, W. H. Lee, C. Lim, M. K. Choi, and D. H. Kim, *Nanoscale*, **12**, 10456 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1039/d0nr01456g>
- [14] R. C. Webb, A. P. Bonifas, A. Behnaz, Y. Zhang, K. J. Yu, H. Cheng, M. Shi, Z. Bian, Z. Liu, Y. S. Kim, W. H. Yeo, J. S. Park, J. Song, Y. Li, Y. Huang, A. M. Gorbach, and J. A. Rogers, *Nat. Mater.*, **12**, 938 (2013).  
doi: <https://doi.org/10.1038/NMAT3755>
- [15] X. G. Yu, Y. Q. Li, W. B. Zhu, P. Huang, T. T. Wang, N. Hu, and S. Y. Fu, *Nanoscale*, **9**, 6680 (2017).  
doi: <https://doi.org/10.1039/C7NR01011G>
- [16] H. H. Kim, K. Kim, J. Yang, and M. K. Choi, *Adv. Mater. Technol.*, **9**, 2301262 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1002/admt.202301262>
- [17] H. Li, Y. Xu, X. Li, Y. Chen, Y. Jiang, C. Zhang, B. Lu, J. Wang, Y. Ma, Y. Chen, Y. Huang, M. Ding, H. Su, G. Song, Y. Luo, and X. Feng, *Adv. Healthcare Mater.*, **6**, 1601013 (2017).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adhm.201601013>
- [18] D. J. Lipomi, M. Vosgueritchian, B.C.K. Tee, S. L. Hellstrom, J. A. Lee, C. H. Fox, and Z. Bao, *Nat. Nanotechnol.*, **6**, 788 (2011).  
doi: <https://doi.org/10.1038/NNANO.2011.184>
- [19] D. C. Kim, H. Seung, J. Yoo, J. Kim, H. H. Song, J. S. Kim, Y. Kim, K. Lee, C. Choi, D. Jung, C. Park, H. Heo, J. Yang, T. Hyeon, M. K. Choi, and D. H. Kim, *Nat. Electron.*, **7**, 365 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41928-024-01152-w>
- [20] A. Lee, M. Kang, D. Y. Kim, H. Y. Jang, J. W. Park, T. W. Kim, J. M. Hong, and S. K. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 420 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.4.9>
- [21] S. Chang, J. H. Koo, J. Yoo, M. S. Kim, M. K. Choi, D. H. Kim, and Y. M. Song, *Chem. Rev.*, **124**, 768 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00548>
- [22] G. H. Lee, K. Kim, Y. Kim, J. Yang, and M. K. Choi, *Nano-Micro Lett.*, **16**, 45 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s40820-023-01254-8>
- [23] P. Shiveshwarkar, S. V. Siurano, M. Kadyrova, N. Tran, and J. Jaworski, *Macromol. Res.*, **30**, 1 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s13233-022-0006-z>
- [24] F. A. Viola and V. Mattoli, *Adv. Electron. Mater.*, **9**, 2300295 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1002/aelm.202300295>
- [25] J. Yoo, K. Lee, U. J. Yang, H. H. Song, J. H. Jang, G. H. Lee, M. S. Bootharaju, J. H. Kim, K. Kim, S. I. Park, J. D. Seo, S. Li, W. S. Yu, J. I. Kwon, M. H. Song, T. Hyeon, J. Yang, and M. K. Choi, *Nat. Photonics*, **18**, 1105 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41566-024-01496-x>
- [26] D. Y. Lee, H. Liu, T. K. Won, and D. J. Ahn, *Macromol. Res.*, **30**, 930 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s13233-022-0096-7>
- [27] D. Kim and M. K. Choi, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **35**, 547 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.6.2>
- [28] J. Yang, J. Yoo, W. S. Yu, and M. K. Choi, *Macromol. Res.*, **29**, 391 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s13233-021-9055-y>
- [29] S. Li, J. H. Jang, W. Chung, H. Seung, S. I. Park, H. Ma, W. J. Pyo, C. Choi, D. S. Chung, D. H. Kim, M. K. Choi, and J. Yang, *ACS Nano*, **17**, 20013 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c05178>
- [30] D.S.W. Gunasekara, X. Niu, W. Lqbal, Y. He, and H. Liu, *Macromol. Res.*, **30**, 153 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s13233-022-0022-z>
- [31] M. Lee, H. Seung, J. I. Kwon, M. K. Choi, D. H. Kim, and C. Choi, *ACS Omega*, **8**, 5209 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00440>
- [32] Y. Kim and M. K. Choi, *J. Flex. Print. Electron.*, **1**, 175 (2022).

- doi: <https://doi.org/10.56767/jfpe.2022.1.2.175>
- [33] S. Jo, S. Cho, U. J. Yang, G. S. Hwang, S. Baek, S. H. Kim, S. H. Heo, J. Y. Kim, M. K. Choi, and J. S. Son, *Adv. Mater.*, **33**, 2100066 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202100066>
- [34] W. Shin, J. S. Kim, H. J. Choi, H. Kim, S. Park, H. J. Lee, M. K. Choi, and K. Chung, *Macromol. Rapid Commun.*, **42**, 2100011 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1002/marc.202100011>
- [35] W. Koh and M. K. Choi, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 537 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.6.1>
- [36] X. G. Yu, Y. Q. Li, W. B. Zhu, P. Huang, T. T. Wang, N. Hu, and S. Y. Fu, *Nanoscale*, **9**, 6680 (2017).  
doi: <https://doi.org/10.1039/c7nr01011g>
- [37] J. Yoo, S. Ha, G. H. Lee, Y. Kim, and M. K. Choi, *Adv. Funct. Mater.*, **33**, 2302473 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202302473>
- [38] J. I. Kwon, G. Park, G. H. Lee, J. H. Jang, N. J. Sung, S. Y. Kim, J. Yoo, K. Lee, H. Ma, M. Karl, T. J. Shin, M. H. Song, J. Yang, and M. K. Choi, *Sci. Adv.*, **8**, eadd0697 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.add0697>
- [39] D. Wolpert and P. Ampadu, *Managing Temperature Effects in Nanoscale Adaptive Systems* (Springer, New York, 2012) p. 15.  
doi: [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0748-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0748-5_2)
- [40] J. Lee, H. Sul, W. Lee, K. R. Pyun, I. Ha, D. Kim, H. Park, H. Eom, Y. Yoon, J. Jung, D. Lee, and S. H. Ko, *Adv. Funct. Mater.*, **30**, 1909171 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201909171>
- [41] S. Ozen, S. Helhel, and S. Bilgin, *Radiat. Environ. Biophys.*, **50**, 483 (2011).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s00411-011-0364-y>
- [42] Y. Li, J. Zhang, Y. Xing, and J. Song, *J. Appl. Mech.*, **84**, 111004 (2017).  
doi: <https://doi.org/10.1115/1.4037704>
- [43] H. Wang, X. Chen, J. Hu, and X. Zeng, *Korean J. Chem. Eng.*, **39**, 2069 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s11814-022-1126-z>
- [44] M. Khoshvaght-Aliabadi, A. Feizabadi, A. Salimi, and M. M. Rashidi, *Korean J. Chem. Eng.*, **39**, 1436 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s11814-022-1071-x>
- [45] D. Li, X. Liu, W. Li, Z. Lin, B. Zhu, Z. Li, J. Li, B. Li, S. Fan, J. Xie, and J. Zhu, *Nat. Nanotechnol.*, **16**, 153 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41565-020-00800-4>
- [46] X. Zhao, D. Zou, and S. Wang, *Chem. Eng. J.*, **431**, 134231 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134231>
- [47] D. Liu, Q. Q. Kong, H. Jia, L. J. Xie, J. Chen, Z. Tao, Z. Wang, D. Jiang, and C. M. Chen, *Carbon*, **183**, 216 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.07.013>
- [48] M. C. Vu, P. J. Park, S. R. Bae, S. Y. Kim, Y. M. Kang, W. K. Choi, M. A. Islam, J. C. Won, M. Park, and S. R. Kim, *J. Mater. Chem. A*, **9**, 8527 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1039/d0ta12306d>
- [49] Y. Liu, Y. Zhang, T. Liao, L. Gao, M. Wang, X. Xu, X. Yang, and H. Liu, *Carbohydr. Polym.*, **241**, 116425 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116425>
- [50] H. Chen, Y. Ding, G. Zhu, Y. Liu, Q. Fang, X. Bai, Y. Zhao, X. Li, X. Huang, T. Y. Zhang, B. Li, and B. Sun, *npj Flexible Electron.*, **7**, 24 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41528-023-00257-0>
- [51] W. Jang, S. Lee, N. R. Kim, H. Koo, J. Yu, and C. M. Yang, *Composites, Part B*, **248**, 110355 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110355>
- [52] L. Zhang, H. Liu, Z. Wang, W. Sui, Y. Gong, J. Cui, Y. Ao, and L. Shang, *J. Alloys Compd.*, **985**, 173935 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.173935>
- [53] D. An, Z. Li, H. Chen, C. Liang, Z. Sun, J. Li, J. Yao, Y. Liu, and C. Wong, *Compos. Part A*, **156**, 106890 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.106890>
- [54] A. P. Raman, M. A. Anoma, L. Zhu, E. Rephaeli, and S. Fan, *Nature*, **515**, 540 (2014).  
doi: <https://doi.org/10.1038/nature13883>
- [55] J. Liang, J. Wu, J. Guo, H. Li, X. Zhou, S. Liang, C. W. Qiu, and G. Tao, *Natl. Sci. Rev.*, **10**, nwac208 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwac208>
- [56] M. H. Kang, G. J. Lee, J. H. Lee, M. S. Kim, Z. Yan, J. W. Jeong, K. I. Jang, and Y. M. Song, *Adv. Sci.*, **8**, 2004885 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1002/advs.202004885>
- [57] J. Li, Y. Fu, J. Zhou, K. Yao, X. Ma, S. Gao, Z. Wang, J. G. Dai, D. Lei, and X. Yu, *Sci. Adv.*, **9**, eadg1837 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adg1837>
- [58] B. Sivapalan, K. S. Suganthi, S. Kiruthika, M. K. Saranprabhu, and K. S. Rajan, *Korean J. Chem. Eng.*, **41**, 2389 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s11814-024-00163-9>
- [59] Z. Li, Y. Lu, R. Huang, J. Chang, X. Yu, R. Jiang, X. Yu, and A. P. Roskilly, *Appl. Energy*, **283**, 116277 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116277>
- [60] Y. Xie, Y. Yang, Y. Liu, S. Wang, X. Guo, H. Wang, and D. Cao, *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, **4**, 543 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00249-6>
- [61] Y. Lin, Q. Kang, Y. Liu, Y. Zhu, P. Jiang, Y. W. Mai, and X. Huang, *Nano-Micro Lett.*, **15**, 31 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s40820-022-01003-3>
- [62] Y. Shi, C. Wang, Y. Yin, Y. Li, Y. Xing, and J. Song, *Adv. Funct. Mater.*, **29**, 1905470 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201905470>
- [63] N. Sun and X. Li, *J. Mater. Sci.*, **56**, 15937 (2021).  
doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-021-06290-6>
- [64] H. Li, F. Yang, D. Guo, L. Han, T. Chen, and X. Jia, *J. Electron. Mater.*, **52**, 6009 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s11664-023-10542-3>