

Review

CNT 복합재를 기반으로 하는 하이브리드 필러의 열전도 특성

신인혜[✉] · 김재익* · 김선우* · 배원규^{*,†}

충실대학교 화학공학과, *충실대학교 전기공학부

(2025년 11월 18일 접수, 2026년 4월 6일 수정, 2026년 4월 6일 채택)

Thermal Conductivity of CNT Composites Based on Hybrid Fillers

Inhye Shin[✉], Jaek Kim*, Sunwoo Kim*, and Won-Gyu Bae^{*,†}

Department of Chemical Engineering, Soongsil University, Dongjak-gu 06978, Korea

*Department of Electrical Engineering, Soongsil University, Dongjak-gu 06978, Korea

(Received November 18, 2025; Revised April 6, 2026; Accepted April 6, 2026)

초록: 최근 고집적·고출력 시스템의 발열 문제 해결을 위한 높은 열전도성과 전기 절연성을 갖춘 복합재료의 필요성이 대두되고 있다. 특히, 탄소나노튜브(CNT)는 뛰어난 물성으로 각광받지만, 반데르발스 힘에 의한 응집 및 불균일 분산의 한계를 지닌다. 상기한 단점을 극복하고 다기능성을 구현하기 위해 CNT와 2차원 소재, 세라믹 필러 등을 활용한 하이브리드 필러 전략이 주목받고 있다. 본 총설은 하이브리드 필러 전략의 이론적 배경, 주요 구성 요소, 제조 공정 및 복합재료의 열전도, 전기절연, 기계적 물성 변화를 심층 분석한다. 아울러, 최신 연구 동향을 종합적으로 제시하며 전자 장치, 배터리 등 다양한 응용 분야에서의 잠재적 가치를 조명한다. 이를 통해 차세대 고성능 복합재료 개발의 방향성을 제시하고자 한다.

Abstract: The imperative for composite materials possessing high thermal conductivity and electrical insulation has recently come to the forefront to address the heat dissipation challenges in high-integration and high-power systems. Notably, while carbon nanotubes (CNTs) have garnered attention for their outstanding physical properties, they are inherently limited by aggregation and non-uniform dispersion due to van der Waals forces. To overcome these aforementioned drawbacks and achieve multifunctionality, a hybrid filler strategy utilizing CNTs in conjunction with two-dimensional materials, ceramic fillers, and other components is attracting significant interest. This review provides an in-depth analysis of the theoretical background of the hybrid filler strategy, its principal components, manufacturing processes, and the resulting changes in the thermal conductivity, electrical insulation, and mechanical properties of the composites. Furthermore, it comprehensively presents recent research trends and highlights the potential value of these materials in diverse applications such as electronic devices and batteries. Through this, we aim to propose a directional framework for the development of next-generation, high-performance composite materials.

Keywords: carbon nanotube composites, hybrid fillers, thermal conductivity, electrical insulation.

서론

최근 고집적·고출력 시스템의 고성능화 및 소형화에 대한 수요 증가로 전력 밀도가 증가하고 있고, 이때 발생하는 발열 문제는 장치의 성능과 수명에 치명적이다. 종래의 방열 소재인 금속, 세라믹, 순수 폴리머는 각각 우수한 열전도성, 전기 절연성, 경량성, 가공 용이성 등의 장점을 가지지만 전기 절연 한계, 기계적 특성 저하, 낮은 열전도도 등의 한계를 지닌다. 일반적인 열전도 충전재로는 구리, 알루미늄 등 금속과

AlN, BN 같은 세라믹, 그래핀 및 CNT를 포함하는 탄소계 나노 소재가 사용된다. 그 예로, 초미립자 AlN(열전도도 285~320 W/mK)과 2D h-BN(평면 열전도도 250~400 W/mK)은 높은 열전도도를 갖지만,¹ 기존 단일 충전재 만으로는 충전량 증가에 따른 점도 상승과 분산 한계로 실용적 한계에 직면한다. 이러한 요구를 충족시키기 위해, 수천 W/mK의 열전도도를 갖는 탄소나노튜브(carbon nanotubes, CNT)와 같은 나노스케일 충전재(filler)를 고분자에 적용하는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 그러나 CNT를 단독 충전재로 사용할 경우, 반데르발스 힘(Van der Waals force)으로 인해 쉽게 응집(agglomeration)되거나 다발(bundle)을 형성하는 경향 등의 본질적인 한계로 고분자 매트릭스 내에 균일하게 분산시키기 어렵다.^{2,3} 불균일한 분산은 효과적인 CNT 네트워크 형성을 저해하고, 결과적으로

[†]To whom correspondence should be addressed.
wgbae@ssu.ac.kr, ORCID[®] 0000-0002-2891-5056
©2026 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

복합재료의 성능 저하의 주요원인이 된다. CNT 단독으로는 응집·계면저항으로 인한 물성 저하의 문제가 야기된다.^{4,6} 이러한 CNT 단독 필러의 한계를 극복하기 위한 시도로, 최근 CNT와 2차원(2D) 소재(예: 그래핀(graphene) 육방정계 질화붕소(hexagonal boron nitride, h-BN), 환원 그래핀 옥사이드(reduced graphene oxide, rGO)) 또는 0차원(0D) 구형체 소재(예: 알루미늄 니트라이드(aluminium nitride, AlN), 산화 알루미늄(Al_2O_3))등을 결합한 하이브리드 필러(hybrid filler)를 통한 3차원 열전달 경로 전략이 각광받고 있다.^{1,7,8} 하이브리드 필러는 서로 다른 특성을 지닌 필러들을 조합하여 각 필러의 장점을 극대화하고 단점을 상호 보완함으로써, 단일 필러로는 달성하기 어려운 다중 기능성을 구현한다.⁹ 그 구현에 있어 CNT의 높은 종횡비(aspect ratio)와 그래핀의 넓은 표면적을 활용하여 3차원 전도 네트워크를 형성하거나, CNT의 열전도성과 h-BN 및 AlN의 전기 절연성을 결합하여 방열 및 절연 특성을 동시에 확보하는 방식 등이 존재한다.^{7,10-12} 본 총설 논문은 하이브리드 필러 전략의 이론적 배경, 주요 구성 요소, 제조 공정, 물성 변화 및 응용 분야에 대한 심층적인 분석을 제공하며, 최신 연구 동향과 미래 전망을 종합적으로 제시한다.

CNT 단일 필러의 한계

CNT와 같은 탄소계열 나노 필러는 재료 자체의 열전도도가 매우 높지만, 복합재에서의 효과는 미흡한 경우가 다수 존재한다. 이는 충전재의 매트릭스 내 분산과 결합 인터페이스의 문제로 발생한다.^{4,5,8} CNT의 균일한 분산을 위해 초음파 처리, 기계적 혼합, 화학적 기능화 등 다양한 기술이 적용되고¹³ 있지만 상기 기술들에 대한 한계를 지적하는 연구 또한 대거 존재한다.

물리적 분산. 캘린더링(calendering), 초음파 처리(ultrasonication)와 같은 물리적 분산 방식은 CNT 다발을 푸는 데 효과적일

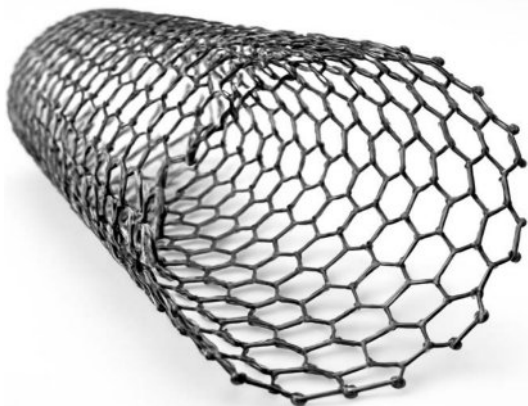


Figure 1. Structural model of a CNT showing its cylindrical sp^2 -bonded carbon lattice.

수 있으나 CNT의 길이를 손상시키거나 구조적 결함을 유발할 수 있다. 예를 들어, 캘린더링이라는 전단력을 통해 작은 틈으로 분산을 이루는 기술은 시간이 오래 걸리고 대량 생산을 위한 산업적 적용이 어렵다.^{14,15} 또한 가장 선호되는 방식인 초음파 분산은 용액에 나노필러를 분산시키는 방법으로, 국부적인 압력 피크 및 충격파로 나노 필러에 손상이 가거나 길이 단축 등의 표면 특성 변화 위험이 있다.^{14,16}

화학적 기능화. CNT 표면에 기능기를 도입하여 매트릭스와의 친화도를 높이는 화학적 기능화는 분산성을 향상시킬 수 있다. 하지만 공유결합(covalent) 기능화는 CNT의 결면에 있는 sp^2 구조를 교란하여 페르미 근처 전자 상태와 전도성에 직접적 악영향을 주는 것으로 실험을 통해 확인된다.¹⁷ 이는 특히 고밀도 covalent functionalization에서 기능화 정도가 커질수록 더 큰 전도도 감소로 이어진다.¹⁸ 비공유결합(non-covalent) 기능화는 전자구조 손상을 최소화하지만 장기적 안정성·내구성면에서 탈착, 이탈 등의 문제가 있을 수 있고,¹⁹ 복잡한 공정으로 인해 비용 효율성이 떨어진다는 단점이 있다.⁸

분산 안정성. CNT의 표면 산화·잔류제 변형 등의 노화(aging)가 탈착, 이동, 응집과 같은 분자 거동에 영향을 주어 장기적 분산 안정성 및 환경 거동을 변화시킴이²⁰ 보고되었으며 재응집 경향이 있어 분산 안정성 확보가 어렵다. 이는 복합재료의 장기적인 성능 신뢰도에 영향을 미친다.^{13,21}

CNT 결합 하이브리드 필러 전략

탄소-탄소 하이브리드 필러. CNT+그래핀: CNT와 그래핀은 탄소 동소체로서 뛰어난 전기 및 열전도성을 가진다.^{4,8}

이 둘을 조합하는 하이브리드 전략은 1차원(1D) CNT의 연속적인 네트워크 형성 능력과 2차원(2D) 그래핀의 넓은 표면적 및 우수한 평면 내(in-plane) 전도성을 활용하여 복합재료의 성능을 향상한다.^{4,8,22} 이는 다양한 실험에서 그 성능이 확인된다. CNT를 그래핀옥사이드(GO)에 화학적으로 그래프팅(grafting)하여 3차원 에어로겔 구조(골격)를 만들고, 이 에어로겔을 폴리스티렌에 인필(in-situ polymerization)하여 복합재를 제조한 실험에서는 SEM, Raman 등의 분석 기구를 통해 하이브리드 필러가 단일 충전재보다 파괴저항, 강도, 분산성을

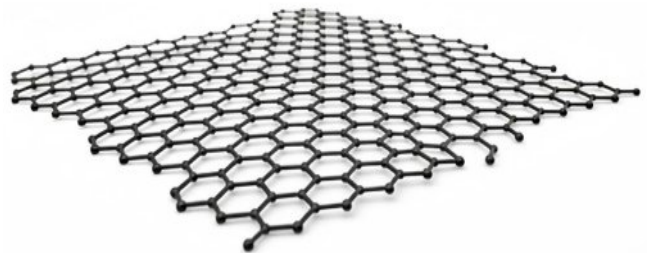


Figure 2. Structural model of a single-layer graphene with a two-dimensional sp^2 carbon lattice.

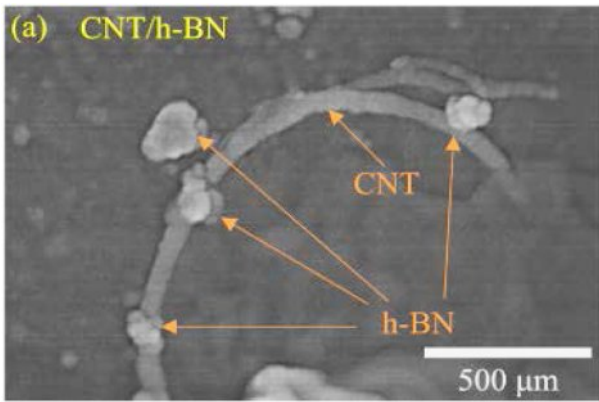


Figure 3. SEM image of the CNT/h-BN hybrid filler. Reproduced from Ref. 32, Zhang, T. *et al.*, *High Voltage*, **2024**, *9*, 546-555. ©2023 The Authors. Published by John Wiley & Sons Ltd under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License.

크게 향상시킴을 확인하였다.²³ Multi-walled carbon nanotubes (MWCNT)를 그래핀 나노 플레이트렛(GNP)과 하이브리드로 도입한 연구에선 단독 충전재에 비해 저전력에서 전기전도성 및 온도응답성이 뛰어난 것을 확인했다.²⁴ 이 외에도 강도·경도·항복강도 등의 기계적 성능과 전기·광학적 특성·열전도성 등 다양한 실험에서 CNT-그래핀 하이브리드 필러가 종래 CNT 단독 필러보다 성능적 우위를 점하고 있음이 보고되었다.²⁵⁻²⁸

탄소-2차원 절연체 하이브리드 필러. CNT+h-BN: 전자 패키징과 같은 분야에서는 높은 열전도성과 함께 전기 절연성이 요구된다.⁷

이를 위해 CNT를 h-BN과 같은 2차원 소재와 조합해 사용한다.¹¹ 열전도성이 높으면서 전기적으로 절연성을 띠는 BNNs (붕소 질화물 나노시트)는²⁹ CNT와 하이브리드로 사용할 시 다음 논문들을 기반으로 그 성능을 확인할 수 있다. 2024년 진행된 MWCNT를 전기적 자기조립(electrostatic self-assembly)으로 제작한 하이브리드 필러는 in-plane 열전도도가 순수 TPU 대비 약 8~10배 대폭 향상되었음을 밝혔으며, 이와 동시에 전기적 절연성을 ($\approx 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$)로 유지하였다.³⁰ 2023년 시행된 연구에서는 CNT와 BNNS를 포함하는 하이브리드 네트워크는 비교적 낮은 하이브리드 로딩($\sim 8-9 \text{ wt}\%$)으로도 복합체의 열전도도가 기지 대비 3.7배 이상 향상함을 보였다.³¹ 이는 절연 및 높은 열전도도에서 CNT+h-BN 하이브리드 소재가 고효율로 작동할 수 있음을 시사한다.

탄소-세라믹 하이브리드 필러. 세라믹은 경도, 고온 안정성, 전기 절연성, 산화·부식 저항성 등이 우수해 CNT 매트릭스에 소량만 첨가해도 기계적 성능을 크게 향상한다.^{33,34} 이를 분석 및 보고하는 사례는 아래와 같다.

CNT+AlN: aluminium nitride(AlN)은 질화알루미늄으로 플라즈마에 저항성을 가지며 전기 절연 및 열팽창 계수가 낮다는 특징을 갖는다. 또한 AlN 및 BN를 epoxy에 적용한 복합체의 제조와 유전 특성에 관한 선행연구도 보고되었다.³⁵

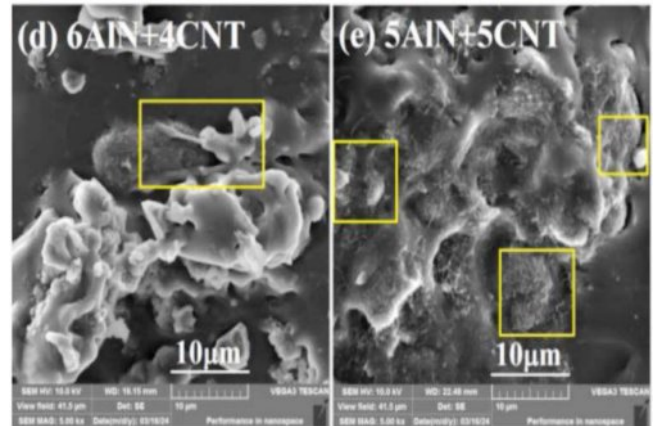


Figure 4. SEM images of AlN/CNT/SR nanocomposites with AlN/CNT hybrid fillers highlighted in the orange-marked regions. Adapted from Ref. 38, Gao, J. *et al.*, *Molecules*, **2024**, *29*, 2864. ©2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. Distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).

CNT를 AlN 표면에 합성함을 통해 퍼콜레이션 및 연결성 개선으로 더 낮은 충전비에서 더 높은 열전도도를 달성한 사례와,³⁶ 3D 연결망 등의 형성으로 기계적 성능에서 또한 향상시켰으며 촉매 코팅을 통한 정밀 제어 또한 실현할 수 있음³⁷ 실험을 통해 분석한 사례가 존재한다. AlN을 CNT와 5:5 비율 등 특정 비율에서 그 성능을 비교한 연구에선 단일 충전재에 비해 열전도도·기계적 특성이 동시에 개선되는 시너지효과가 관찰됨을 보고했다.³⁸

CNT+SiC: silicon carbide(SiC)는 탄화규소로, 내마모성과 내식성이 우수한 세라믹이다. 높은 열전도성 및 경도를 가지는 것이 특징이며 내열성에 대한 산업군의 선호가 높다.

상기 하이브리드 필러에 대해 3D CNT 스펀지(스캐폴드)에

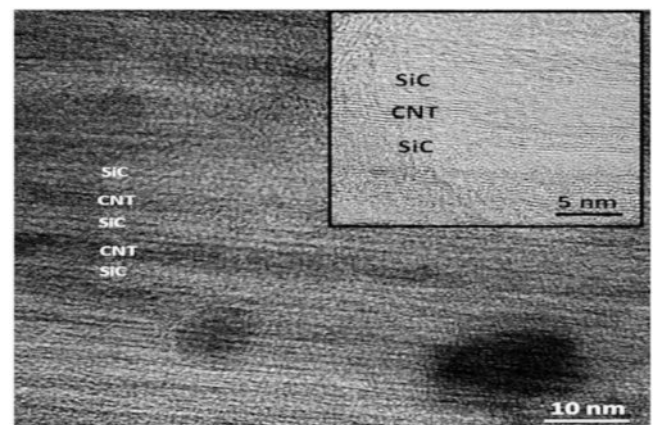


Figure 5. TEM image of the CNT/SiC fiber, showing a magnified view of the local SiC/CNT/SiC region. Reproduced from Ref. 39, Zhang, X. S. *et al.*, *RSC Adv.*, **2017**, *7*, 23334-23341. ©2017 The Royal Society of Chemistry. Licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported Licence.

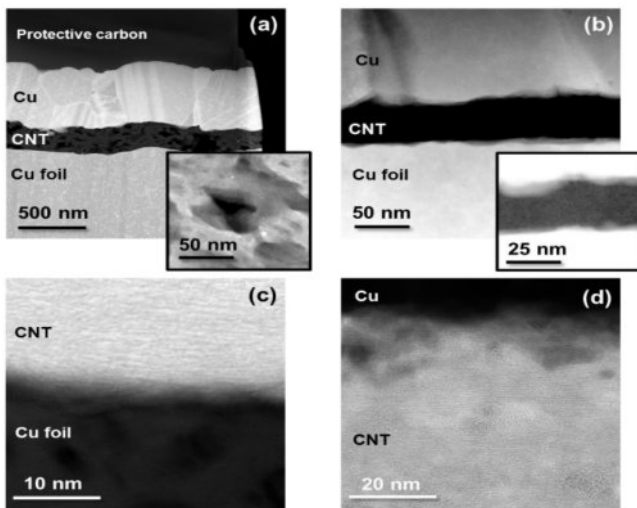


Figure 6. STEM images of Cu-CNT-Cu samples from (a) 5 wt%; (b) 10 wt% PVP dispersions; insets show the porous CNT network and Cu nanoparticles/single atoms. ABF images in (c) and (d) reveal the nanotube structures. Reprinted with permission from Ref. 46, Li, K. *et al.*, *ACS Appl. Nano Mater.*, **2020**, 3, 6863-6875. Copyright ©2020 American Chemical Society.

SiC층을 코팅한 CNT/SiC 스펀지 구조는 순수 CNT 스펀지에 비해 열저항·열내구성·기계적 피로 저항이 크게 개선되고, 전자파 차폐·고온 안정성 등 복합성능이 향상된 사례가 보고되었다.⁴⁰ MWCNT 표면을 Fe코팅으로 전처리 한 뒤 이산화 규소를 spark plasma sintering(SPS)를 통해 적층한 연구에서는 항복 강도가 약 46%, 영률이 58%로 성능에서 수치적 향상이 확인되었다.⁴¹

이 외에도 CNT+Al₂O₃,⁴² CNT+TiO₂ 등의^{43,44} 세라믹 하이브리드 재료가 선호되고 있으며, 세라믹 재료의 기계적 성능과 산화·부식에 강한 특성이 내구성이 높은 열전달 소재에 유리할 수 있음을 확인했다.⁴⁵

탄소-금속 나노입자 하이브리드 필러. 금속 나노 입자는 복합체 내에서 전도 경로를 촘촘히 연결함에 따라 전기 전도도 향상에 기여한다. 또한 CNT와 계면에서 효율적으로 열을 전달함을 통해 열확산도 등에서 기능을 향상한다.

CNT+Cu: 구리(Cu)는 약 401 W/mK로 높은 열전도도와 은(Ag) 다음으로 높은 전기 전도도를 갖는다.

높은 물리적 특성으로 하이브리드 필러를 사용하면 에너지 전달 면에서 성능을 향상한다. 2020년에 진행된 CNT 매트릭스를 구리로 증착하는 하이브리드 필러에 대한 연구에서, 하이브리드 필러의 영률이 순수 구리 대비 12 GPa에서 15 GPa로, 약 25% 증가했다. 전류 운반 용량 또한 순수 구리(Cu)에 비해 약 9% 증가하는 효과를 보였다.⁴⁶ 이 외 연구에서도 CNT 0.2-0.6 wt%를 구리 합금에 첨가 후 소결 시 강도, 경도에서 성능 개선을 확인했다.⁴⁷

CNT+Ni: 니켈(Ni)은 자성 물질로서, 강도가 높고 우수한

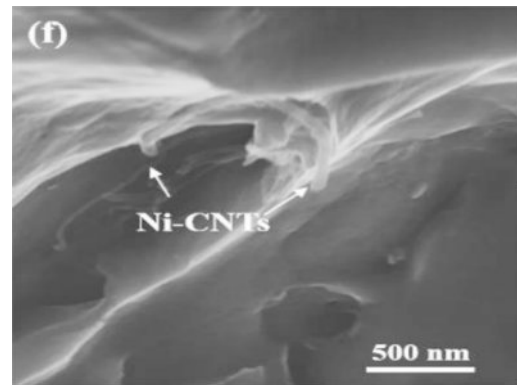


Figure 7. SEM image of the Ni-CNTs structure, showing the porous and intertwined morphology of Ni-decorated carbon nanotubes. Reproduced from Ref. 48, Wang, D. *et al.*, *Nanomaterials*, **2022**, 12, 2548. ©2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. Distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).

내식성을 가져 염분과 습기 등의 환경에서도 높은 안정성을 유지한다.

그 예로 니켈 나노 입자를 데코레이션하여 CNT 금속 계면 친화성을 키워 원활한 분산이 이루어지게 한 연구에서, 전단 및 인장 등의 기계적 성능에서의 개선이 이루어짐을 확인했다.⁴⁸ Ni-폼 표면에서 CNT를 결합해 바인더가 없는 전극/전도성 구조 제작을 통해 전기전도성, 기계적 부착성, 전기화학 적 안정성에서 유리한 성능을 보여 전극·촉매 지지체에서의 응용 가능성이 높다고 보고된⁴⁹ 연구가 존재한다. 이 외에도 CNT+Ag, CNT+Sn 등에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 상기 사례 열거를 통해 확인할 수 있듯 높은 열전달 및 원활한 분산을 요구하는 분야와 더불어 인성, 강성과 같은 응력(stress)을 버티는 데에 있어 많은 성능 향상을 이룬다.

탄소-유기 고분자 하이브리드 필러. 유기 고분자는 연신성과 탄성을 지녀 재료에 유연성(flexibility)을 부여하거나, 고분자 사슬로 계면을 감싸거나 흡착할 수 있다. 이는 균일한 분산이 이루어지게 하고, 전기·열 전도 경로를 고르게 형성할 수 있게 한다. 대표적으로 polyimide(PI), poly ether ether ketone(PEEK) 등이 있다.

CNT+PI: PI는 열에 대한 뛰어난 안정성을 특징으로 하며, 이 외에도 기계적 강도, 내화화성을 지녀 고성능 재료로 각광받는다.

이에 고온 응용 분야에서의 선호도가 높다. CNT 표면에 PI를 가지형(graft)으로 결합하는 방식이 선호되었으며,⁵⁰⁻⁵³ 그 예로 2020년에 진행된 연구에서 MWCNT 표면에 폴리이미드(PI)를 가지형(graft)으로, in-situ 방식으로 진행해 합성한 PI/CNT 하이브리드 필름 연구가⁵¹ 존재한다.

상기 연구에서는 소량 충전으로도 CNT와 PI의 화학적 결합이 열전달 경로 및 열안정성 향상에 기여함을⁵¹ 확인했다.

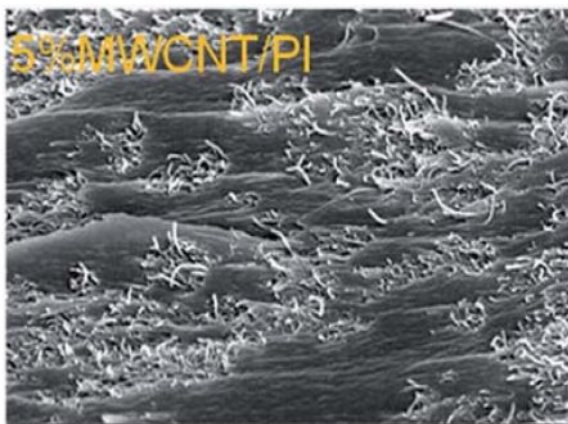


Figure 8. Cross-sectional SEM image showing the branched hybrid MWCNT filler network within the PI matrix. Reproduced from Ref. 51, Wang, C. *et al.*, *RSC Adv.*, **2020**, 10, 13517-13524. ©2020 The Royal Society of Chemistry. Licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 Unported Licence.

2024년에 진행된 연구에서도 가지형, 즉 그래프팅 방식이 사용되었으며, PI섬유에 MWCNT를 접목해 만든 복합체는 분해온도가 약 14.5 °C 증가, 300 °C에서의 마모율이 34.5% 감소 등 고온에서의 마모 저항, 열안정성 개선을⁵³ 보고했다.

CNT+PEEK: PEEK은 초고성능 엔지니어링 플라스틱으로, 의료용 임플란트, 고성능 항공우주 분야 등 극한의 환경에서 선호되는 만큼, 높은 수준의 내열성, 내화학성, 신체 적합성을 갖는 재료이다.⁵⁴

PEEK와 CNT 모두 고가 재료인 만큼, 경제적인 면에 의해 연구 접근성이 낮을 수 있으나, 그 성능 덕에 꾸준한 연구가 이루어지고 있다. PEEK 매트릭스에 용융혼합, 압출과 같은 방식으로 MWCNT를 분산시켜 나노 복합체를 제조한 연구에서는 강도 및 탄성 면에서 기계적 성능의 개선을⁵⁵ 보고했다. 3D 프린팅으로 제조한 PEEK/CNT 혼합재에 대한 실험에서는 적층제조 공정과 CNT의 원활한 분산 전략이 결합될 시 제품의 성능이 개선되었음을⁵⁶ 입증했다. 상기 열적 안정 및 기계적 특성 면에서 유기 고분자 재료와의 하이브리드 기술이 선호되며, 고온·고성능이 요구되는 용융공정, 계면접합 등의 구조화 및 결정화 제어에 관한 실험 및 연구가 활발함을 확인했다.

하이브리드 필러 유형별 핵심 특성

앞서 분류 및 분석한 연구들에 근거하여 각 필러들의 특성을 분석하였다. 모든 선행 연구를 망라하기에는 한계가 있어, 본 논문에 참고로 기재한 논문을 중심으로 분석하였으며 그 특성은 다음과 같이 요약된다.

CNT 하이브리드 필러의 기계적 특성 분석. 기계적 특성을 총괄하는 표는 아래 Table 1과 같이 구성하였다. 강도·탄성률은 대체로 CNT+그래핀 계열에서 3D네트워크 형성, CNT-그래핀 간 브리징 등의 구조를 형성함에 따라 성능이 두드러짐을 확인했다. 경도·내마모·인성의 강화는 CNT+세라믹이 우세하였는데 이는 core-shell, in-situ grown 등 직접 성장 구조가 계면 저항 및 응력 밀집을 완화해 효과적이라고 분석하였으며 고분자 분류에서는 결합의 안정성이 증가함에 따라 열팽창률 (CTE)이 감소함을 보고했다.

CNT 하이브리드 필러의 열적 특성 분석. 독자들이 CNT 기반 하이브리드 필러의 열전도 성능을 보다 직관적으로 비교할 수 있도록, 대표 문헌에서 보고된 열전도도 값을 필러 조합, 매트릭스 및 충전율과 함께 Table 2에 정리하였다. 이를 통해 CNT 하이브리드 필러의 열적 특성을 정성적·정량적으로 함께 분석하였다. Table 2에 제시된 정량값 기준으로는 Cu/CNT 계가 최대 637 W/m·K로 가장 높은 열전도도를 나타냈으며, MWNT/Ni 계는 70.3-75.8 W/m·K, CNT/AlN 및 AlN + CNT 계는 각각 10.5 W/m·K와 9.1 W/m·K, MWCNT-BN 계는 최대 7.28 W/m·K를 보였다. 반면 MWCNT/micro-SiC 계는 24.3 × epoxy로 제시되어 절대값보다는 상대적 향상 효과를 보여주는 결과로 해석된다. 종합하면, CNT 하이브리드 필러의 열전도 특성은 조합되는 이차 필러뿐 아니라 매트릭스와 충전 조건에 따라서도 크게 달라짐을 확인할 수 있다.

CNT 하이브리드 필러의 전기적 특성 분석. Table 3에서는 하이브리드 필러의 전기적 특성을 명시하였다. CNT+그래핀은 낮은 퍼콜레이션과 높은 전기 전도도로 스트레인 센서 및 가열 등에 적합하다. CNT+BN과 같은 2차원 절연체와의 혼합재는 절연성을 유지하면서도 고열전도의 조합이 강점이 되어 전력전자 포장과 같은 산업군에서의 선호가 높을 것이라고 평가된다.

CNT 하이브리드 필러의 그 외 특성 분석. Table 4를 통해

Table 1. Mechanical Property Enhancements in CNT-Based Hybrid Filler Systems

Hybrid Type	Summary of key mechanical properties of CNT-based hybrid fillers	Refs.
CNT + Graphene	Tensile strength +20~80%, elasticity modulus +10~50%, toughening effect ↑	4, 8, 23
CNT + BN	Slight increase in stiffness (5-20%)	1, 12, 30, 57, 58
CNT + Ceramic	Hardness and wear resistance +30~100%, impact strength improved	41, 45, 59
CNT + Metal (Ag, Cu, Ni)	Metal matrix strength +15~50%, fatigue performance ↑	46, 47, 48
CNT + Polymer (PI, PEEK)	Tensile strength +20~70% (PEEK, PI), heat resistance and toughness↑	51, 52, 54

Table 2. Representative Reported Thermal Conductivity Values of CNT-Based Hybrid Fillers According to Filler System, Matrix, and Filler Loading

CNT hybrid filler system	Matrix	Filler loading	Thermal conductivity	Refs.
MWCNT/micro-SiC	Epoxy	5 wt% MWCNT + 55 wt% micro-SiC	24.3 × epoxy	60
Cu/CNT	Cu	CNT 50 mg/L in electrolyte	441 W/m·K	61
Cu/CNT	Cu	CNT 100 mg/L in electrolyte	487 W/m·K	61
Cu/CNT	Cu	CNT 250 mg/L in electrolyte	637 W/m·K	61
MWNT/Ni	Ni	1 vol% MWNT	70.3 W/m·K	62
MWNT/Ni	Ni	3 vol% MWNT	75.8 W/m·K	62
CNT/AlN composite filler	Silicone rubber	50 vol%	10.5 W/m·K	36
AlN + CNT (simultaneous addition)	Silicone rubber	60 vol%	9.1 W/m·K	36
MWCNT-BN	TPU	40 wt%(in-plane)	7.28 W/m·K	30
MWCNT-BN	TPU	40 wt%(through-plane)	0.54 W/m·K	30
GO-CNTA	PS	around 1.0 wt% GO-CNT aerogel	0.127–0.128 W/m·K	23

Table 3. Electrical Property Characteristics of CNT-Based Hybrid Filler Systems

Hybrid Type	Summary of key electrical properties of CNT-based hybrid fillers	Refs.
CNT + Graphene	Electrical conductivity $10^4\sim 10^6$ S/m, low percolation threshold ($\sim 0.1\sim 0.5$ wt%)	23, 24, 25, 26
CNT + BN	Insulation maintenance (volume resistance 10^{12} $\Omega\cdot\text{cm}$ level)	30, 63
CNT + Ceramic	Ceramic-based insulation is possible, and when combined with TiO_2 , photocatalytic and semiconductor behavior is achieved.	39, 40
CNT + Metal (Ag, Cu, Ni)	Electrical conductivity $10^5\sim 10^6$ S/m (Cu based), EMI shielding 60–90 dB	46, 47, 48, 49
CNT + Polymer (PI, PEEK)	Designable for both insulation and conductivity, with polyimide maintaining insulation	51, 54, 55

선 제시한 Table 1, 2, 3 그 외 특성을 분석했다. 이때 과도한 초음파 분산으로 인해 CNT의 길이 단축 및 손상으로 k 와 σ 저하가 발생할 수 있다.

더불어, 공유결합에서는 계면 결합력 증가에 따라 전도성 감소가, 비공유결합시 전도성은 유지하나 내구성은 조건적으로 확보하는 등의 표면 개질 트레이드 오프, 세분화 아키텍처 (segregated network)같은 변수가 오차 원인으로 작동할 수 있다.

결론 및 향후 연구방향

결론. CNT 단독 필러는 우수한 이론적 물성을 지니고 있음에도 불구하고, 응집, 불균일 분산, 계면 저항 등의 한계로

인해 복합재 내에서 기대되는 성능을 충분히 구현하는 데 제약이 있다. 이에 따라 CNT를 다른 필러와 조합한 하이브리드 전략은 이러한 한계를 보완하면서 열전도 특성뿐 아니라 전기적, 기계적, 내구적 특성을 함께 조절할 수 있는 효과적인 접근으로 확인되었다. 본 총설에서 검토한 선행연구들을 종합하면, CNT+탄소계 하이브리드는 전도 네트워크 형성에 유리하여 열·전기 전도성 향상에 효과적이었고, CNT+2차원 절연체 계열은 열전도성과 전기 절연성의 균형이 중요한 응용에서 유의한 가능성을 보였다. 또한 CNT+세라믹 계열은 내마모성, 내열성, 강도 보강 측면에서 장점을 나타냈으며, CNT+금속 나노입자 계열은 전도 경로 보완과 기능성 부여에 효과적이었다. CNT+고분자 계열은 계면 안정성, 유연성, 내열성

Table 4. Features, Processing, and Applications of CNT-Based Hybrid Fillers

Hybrid Type	Summary of additional features, processing considerations, and representative applications of CNT-based hybrid fillers	Refs.
CNT + Graphene	3D network formation, suitable for crack pinning and sensor applications	8, 23, 33
CNT + BN	Electronic packaging and underfill materials, insulation and high heat conductivity	1, 30, 57, 58
CNT + Ceramic	30-50% reduction in filling rate when growing directly (core-shell CNT/ceramic)	39, 40, 45, 59
CNT + Metal (Ag, Cu, Ni)	Disadvantages of electrodes and conductors: corrosion and increased density	46, 47, 48, 49
CNT + Polymer (PI, PEEK)	High-temperature structural materials and biomaterials can be applied	51, 52, 54, 64

확보 측면에서 의미 있는 결과를 보였다.

따라서 CNT 기반 하이브리드 필러는 단일 필러의 한계를 보완하는 수준을 넘어, 요구 물성에 따라 조합과 구조를 설계할 수 있는 다기능 복합재 전략으로 이해될 필요가 있다. 본 총설은 CNT 기반 하이브리드 필러를 조합 유형별로 정리하고, 각 계열이 열전도 특성, 전기 절연성, 기계적 안정성 측면에서 보이는 주요 경향을 비교함으로써, 향후 열관리 복합재 설계를 위한 기초적인 정리 틀을 제시하고자 하였다. 전자 패키징, 에너지 저장 및 변환 장치, 고온 구조재와 같은 응용 분야에서 이러한 하이브리드 전략의 활용 가능성은 더욱 확대될 것으로 판단된다.

향후 연구 방향. 향후 CNT 기반 하이브리드 필러 연구에서는 개별 조합의 성능 향상 사례를 축적하는 것을 넘어, 실제 응용 조건에서 요구되는 특성 조합을 보다 명확히 반영한 설계가 필요하다. 우선, 산업적 활용을 위해서는 실험실 수준에서 제안된 분산 및 제조 전략을 대량 생산 공정으로 확장할 수 있는지에 대한 검토가 필요하며, 이 과정에서 공정 단순화, 비용 절감, 재현성 확보가 함께 고려되어야 한다. 또한 CNT의 재응집, 표면 기능기의 변화, 계면 열화 등은 장기 성능 저하로 이어질 수 있으므로, 분산 안정성과 장기 신뢰성에 대한 체계적인 평가가 요구된다.

아울러 향후 연구는 모든 조합에서 동일한 성능 지표를 일률적으로 추구하기보다, 응용 분야별 요구 특성에 따라 하이브리드 설계 방향을 달리할 필요가 있다. 예를 들어 전자 패키징 분야에서는 높은 열전도성과 전기 절연성의 동시 확보가 중요하므로 CNT+BN, CNT+AIN 계열이 유리할 수 있으며, 전도성 부여가 필요한 센서나 전극 분야에서는 CNT+탄소계 또는 CNT+금속계 조합이 보다 적합할 수 있다. 고온 또는 구조적 안정성이 중요한 환경에서는 CNT+세라믹 및 CNT+고분자 계열의 역할이 더욱 중요해질 수 있다. 결국 향후 연구에서는 조합 자체의 다양성보다, 어떤 응용 목적에 대해 어떤 조합과 구조가 가장 적절한 한지를 판단할 수 있는 비교와 축적이 필요하며, 이는 CNT 기반 하이브리드 필러의 실질적 상용화 가능성을 높이는 데 중요한 기반이 될 것이다.

감사의 글: 이 연구는 숭실대학교의 지원을 받아 수행했습니다.

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

참고문헌

- Lee Sanchez, W. A.; Li, J.-W.; Chiu, H.-T.; Cheng, C.-C.; Chiou, K.-C.; Lee, T.-M.; Chiu, C.-W. Highly Thermally Conductive Epoxy Composites with AlN/BN Hybrid Filler as Underfill Encapsulation Material for Electronic Packaging. *Polymers* **2022**, *14*, 2950.
- Rubel, R. I.; Ali, M. H.; Jafor, M. A.; Alam, M. M. Carbon Nanotubes Agglomeration in Reinforced Composites: A Review. *AIMS Mater. Sci.* **2019**, *6*, 756-780.
- Dyachkova, T. P.; Khan, Y. A.; Burakova, E. A.; Galunin, E. V.; Shigabaeva, G. N.; Stolbov, D. N.; Titov, G. A.; Chapaksov, N. A.; Tkachev, A. G. Characteristics of Epoxy Composites Containing Carbon Nanotubes/Graphene Mixtures. *Polymers* **2023**, *15*, 1476.
- Liu, B.; Sun, J.; Zhao, J.; Yun, X. Hybrid Graphene and Carbon Nanotube-reinforced Composites: Polymer, Metal, and Ceramic Matrices. *Adv. Compos. Hybrid Mater.* **2025**, *8*, 1.
- Lee, D.-K.; Yoo, J.; Kim, H.; Kang, B.-H.; Park, S.-H. Electrical and Thermal Properties of Carbon Nanotube Polymer Composites with Various Aspect Ratios. *Materials* **2022**, *15*, 1356.
- Tamayo-Vegas, S.; Muhsan, A.; Liu, C.; Tarfaoui, M.; Lafdi, K. The Effect of Agglomeration on the Electrical and Mechanical Properties of Polymer Matrix Nanocomposites Reinforced with Carbon Nanotubes. *Polymers* **2022**, *14*, 1842.
- Bera, S.; Singh, M.; Thantirige, R.; Tiwary, S. K.; Shook, B. T.; Nieves, E.; Raghavan, D.; Karim, A.; Pradhan, N. R. 2D-Nanofiller-Based Polymer Nanocomposites for Capacitive Energy Storage Applications. *Small Sci.* **2023**, *3*, 2300016.
- Jeevan Jyoti, B.; Singh, B. P. A Review on 3D Graphene-carbon Nanotube Hybrid Polymer Nanocomposites. *J. Mater. Sci.* **2021**, *56*, 17411-17456.
- Sanusi, O. M.; Jaafar, M. Development of Hybrid Fillers/Polymer Nanocomposites for Electronic Applications. In *Hybrid Nanomaterials*; Srivastava, S. K., Ed.; Wiley-Blackwell: Hoboken, NJ, USA, 2018; pp 349-369.
- Wang, J.; Wang, G. Nanocarbon-Based Hybrid Fillers in Thermally Conductive Polymer Composites: A Review. *Adv. Eng. Mater.* **2024**, *26*, 2301983.
- Aparna, A.; Sethulekshmi, A. S.; Jayan, J. S.; Joseph, K. Recent Advances in Boron Nitride Based Hybrid Polymer Nanocomposites. *Mater. Adv.* **2021**.
- Guo, Y.; Cao, C.; Luo, F.; Huang, B.; Xiao, L.; Qian, Q.; Chen, Q. Largely Enhanced Thermal Conductivity and Thermal Stability of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Composites via BN/CNT Synergy. *RSC Adv.* **2019**, *9*, 40800-40809.
- Gao, Y.; Luo, J.; Li, Z.; Teng, F.; Zhang, J.; Gao, S.; Ma, M.; Zhou, X.; Tao, X. Dispersion of Carbon Nanotubes in Aqueous Cementitious Materials: A Review. *Nanotechnology Rev.* **2023**, *12*, 20220560.
- Rennhofer, H.; Zanghellini, B. Dispersion State and Damage of Carbon Nanotubes and Carbon Nanofibers by Ultrasonic Dispersion: A Review. *Nanomaterials* **2021**, *11*, 1469.
- Yu, L.; Lin, Y.; Li, L.; Zong, H.; Zhou, Y.; Zhao, S.; Zhang, Z.; Grobert, N.; Maciejewska, B. M.; Qin, L. Understanding Interfacial Dynamics: Hydrostatic Pressure-Induced Sono-Dispersion of Carbon Nanotubes. *Surfaces and Interfaces* **2024**, *51*, 104740.
- Choi, Y. J.; Nacpil, E. J. C.; Han, J.; Zhu, C.; Kim, I. S.; Jeon, I. Recent Advances in Dispersant Technology for Carbon Nanotubes toward Energy Device Applications. *Adv. Energy Sustain. Res.* **2024**, *5*, 2300219.
- Benko, A.; Duch, J.; Gajewska, M.; Marzec, M.; Bernasik, A.;

- Nocuń, M.; Piskorz, W.; Kotarba, A. Covalently Bonded Surface Functional Groups on Carbon Nanotubes: From Molecular Modeling to Practical Applications. *Nanoscale* **2021**, *13*, 10152-10166.
18. Jouni, M.; Fedorko, P.; Celle, C.; Djurado, D.; Chenevier, P.; Faure-Vincent, J. Conductivity vs Functionalization in Single-Walled Carbon Nanotube Films. *SN Appl. Sci.* **2022**, *4*, 132.
19. Alosime, E. M. A Review on Surface Functionalization of Carbon Nanotubes: Methods and Applications. *Discover Nano* **2023**, *18*, 12.
20. Zhao, X.; Ding, C.; Wang, S.; Song, C. Ageing Regulates the Migration of Carbon Nanotubes in Saturated Quartz Sand. *J. Environ. Chem. Eng.* **2024**, *12*, 112267.
21. Fernandes, R. M. F.; Buzaglo, M.; Regev, O.; Furó, I.; Marques, E. F. Mechanical Agitation Induces Counterintuitive Aggregation of Pre-Dispersed Carbon Nanotubes. *J. Colloid Interface Sci.* **2017**, *493*, 398-404.
22. Xiao, Y.-J.; Wang, W.-Y.; Chen, X.-J.; Lin, T.; Zhang, Y.-T.; Yang, J.-H.; Wang, Y.; Zhou, Z.-W. Hybrid Network Structure and Thermal Conductive Properties in Poly(vinylidene fluoride) Composites Based on Carbon Nanotubes and Graphene Nanoplatelets. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* **2016**, *90*, 614-625.
23. Sun, Y.; Xu, H.; Zhao, Z.; Zhang, L.; Ma, L.; Zhao, G.; Song, G.; Li, X. Investigation of Carbon Nanotube Grafted Graphene Oxide Hybrid Aerogel for Polystyrene Composites with Reinforced Mechanical Performance. *Polymers* **2021**, *13*, 735.
24. Stoyanova, S.; Ivanov, E.; Hegde, L. R.; Georgopoulou, A.; Clemens, F.; Bedoui, F.; Kotsilkova, R. PVDFHybrid Nanocomposites with Graphene and Carbon Nanotubes and Their Thermoresistive and Joule Heating Properties. *Nanomaterials* **2024**, *14*, 901.
25. Long, R.; Liu, Y.; Tao, J.; Zhang, H.; Liu, Y.; Bao, R.; Li, F.; Li, C.; Yi, J. Synergistic Influence of Carbon Nanotube-Graphene Oxide Hybrid and Nanosized Interfacial TiC on the Mechanical Performance of Cu Matrix Composites. *J. Mater. Res. Technol.* **2023**, *25*, 2866-2879.
26. González-Martínez, J. R.; López-Oyama, A. B.; Del Ángel-López, D.; García-Guendulain, C.; Rodríguez González, E.; Pulido-Barragan, E. U.; Barffúson-Domínguez, F.; Magallanes Vallejo, A. G.; Mógica-Cantú, P. J. Influence of Reduced Graphene Oxide and Carbon Nanotubes on the Structural, Electrical, and Photoluminescent Properties of Chitosan Films. *Polymers* **2024**, *16*, 1827.
27. Chen, H.; Chen, N.; Ma, Q.; He, Y. Experimental Study on Preparation and Properties of Carbon Nanotubes-, Graphene-Natural Rubber Composites. *J. Thermoplast. Compos. Mater.* **2024**, *37*, 112-118.
28. Ke, K.; Sang, Z.; Chen, X.; Rohm, K.; Manas-Zloczower, I. Tuning Mechanical and Electrical Properties of Elastomer Composite with Hybrid Network via Graphene for Stretchable Strain Sensors. *Adv. Eng. Mater.* **2022**, *24*, 2100703.
29. Singh, B.; Han, J.; Meziani, M.J.; Cao, L.; Yerra, S.; Collins, J.; Dumra, S.; Sun, Y.-P. Polymeric Nanocomposites of Boron Nitride Nanosheets for Enhanced Directional or Isotropic Thermal Transport Performance. *Nanomaterials* **2024**, *14*, 1259.
30. Zhang, Y.; Wang, S.; Wu, H.; Guo, S. Constructing Heterostructured MWCNT-BN Hybrid Fillers in Electrospun TPU Films to Achieve Superior Thermal Conductivity and Electrical Insulation Properties. *Polymers* **2024**, *16*, 2139.
31. Zhang, X.; Tan, W.; Carey, T.; Wen, B.; He, D.; Arbab, A.; Groombridge, A.; Smail, F.; de La Verpilliere, J.; Yao, C.; Wang, Y.; Wei, X.; Liu, H.; Xie, S.; Torrisi, F.; De Volder, M.; Zhou, W.; Boies, A. Enhanced Composite Thermal Conductivity by Percolated Networks of In-Situ Confined-Grown Carbon Nanotubes. *Nano Res.* **2023**, *16*, 12821-12829.
32. Zhang, T.; Xu, H.; Dai, C.; Zhang, C.; Zhang, Y.; Chi, Q. Carbon Nanotubes and Hexagonal Boron Nitride Nanosheets Co-filled Ethylene Propylene Diene Monomer Composites: Improved Electrical Property for Cable Accessory Applications. *High Voltage*, **2024**, *9*, 546-555.
33. Almansoori, A.; Balázs, K.; Balázs, C. Advances, Challenges, and Applications of Graphene and Carbon Nanotube-Reinforced Engineering Ceramics. *Nanomaterials* **2024**, *14*, 1881.
34. Hughes, K. J.; Iyer, K. A.; Bird, R. E.; Ivanov, J.; Banerjee, S.; Georges, G.; Zhou, Q. A Review of Carbon Nanotube Research and Development: Materials and Emerging Applications. *ACS Appl. Nano Mater.* **2024**, *7*, 18695-18713.
35. Kochetov, R.; Andritsch, T.; Lafont, U.; Morshuis, P. H. F.; Picken, S. J.; Smit, J. J. Preparation and Dielectric Properties of Epoxy - BN and Epoxy - AlN Nanocomposites. *2009 IEEE Electrical Insulation Conference*, Montreal, QC, Canada, 2009, 31, May-03, June, pp. 397-400.
36. Matsumoto, N.; Futaba, D. N.; Yamada, T.; Kokubo, K. Enhancing the Thermal Conductivity of CNT/AlN/Silicone Rubber Composites by Using CNTs Directly Grown on AlN to Achieve a Reduced Filler Filling Ratio. *Nanomaterials* **2024**, *14*, 528.
37. Ji, P.; Lu, X. Microstructure and Thermal Conductivity of Nano-Carbon/AlN Composites. *Diamond Relat. Mater.* **2021**, *121*, 108710.
38. Gao, J.; Xiong, H.; Han, X.; An, F.; Chen, T. Synergistic Effect of Aluminum Nitride and Carbon Nanotube-Reinforced Silicon Rubber Nanocomposites. *Molecules* **2024**, *29*, 2864.
39. Zhang, X. S.; Yang, L. W.; Liu, H. T.; Zu, M. A Novel High-content CNT-reinforced SiC Matrix Composite-fiber by Precursor Infiltration and Pyrolysis Process. *RSC Advances*, **2017**, *7*, 23334-23341.
40. Tang, C.; Zhang, S.; Zhang, J.; Zhang, X.; Hang, Z.; Li, Y.; Yang, Z. Silicon Carbide Coated Carbon Nanotube Porous Sponge with Super Elasticity, Low Density, High Thermal Resistivity, and Synergistically Enhanced Electromagnetic Interference Shielding Performances. *Chem. Eng. J.* **2023**, *469*, 144011.
41. Yoo, S. C.; Kang, B.; Trinh, P. V.; Phuong, D. D.; Hong, S. H. Enhanced Mechanical and Wear Properties of Al6061 Alloy Nanocomposite Reinforced by CNT-Template-Grown Core-Shell CNT/SiC Nanotubes. *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 12896.
42. Ghosh, P.; Ramajeyathilagam, K. Experimental and Numerical Investigations on the Effect of MWCNT-COOH and Al₂O₃ Hybrid Nanofillers Dispersed CFRP Laminates Subjected to Projectile Impact. *Processes* **2023**, *11*, 1435.
43. Akter, J.; Hanif, M. A.; Islam, M. A.; Sapkota, K. P.; Hahn, J. R. Selective Growth of Ti³⁺/TiO₂/CNT and Ti³⁺/TiO₂/Carbon Nanocomposites for Enhanced Visible-Light Utilization to Degrade

- Organic Pollutants by Lowering TiO₂ Bandgap. *Sci. Rep.* **2021**, 11, 9490.
44. Wan, L.; Deng, C.; Zhao, Z.-Y.; Zhao, H.-B.; Wang, Y.-Z. A Titanium Dioxide–Carbon Nanotube Hybrid to Simultaneously Achieve the Mechanical Enhancement of Natural Rubber and Its Stability under Extreme Frictional Conditions. *Mater. Adv.* **2021**, 2, 2408-2418.
 45. Niu, C.; Zhang, Q.; Cheng, L.; Ye, F.; Zhang, L.; Huang, M.; Yang, T. Enhanced Thermal Conductivity and Mechanical Properties of 2D Cf/SiC Composites Modified by In-Situ Grown Carbon Nanotubes. *J. Adv. Ceram.* **2024**, 13, 19-33.
 46. Li, K.; McGuire, M.; Lupini, A.; Skolrood, L.; List, F.; Ozpineci, B.; Ozcan, S.; Aytug, T. Copper–Carbon Nanotube Composites Enabled by Electrospinning for Advanced Conductors. *ACS Appl. Nano Mater.* **2020**, 3, 6863-6875.
 47. Gholami-Kermanshahi, M.; Hsiao, Y.-C.; Lange, G.; Chang, S.-H. Effects of Carbon Nanotube Addition on the Microstructures, Martensitic Transformation, and Internal Friction of Cu–Al–Ni Shape-Memory Alloys. *Sci. Rep.* **2023**, 13, 21181.
 48. Wang, D.; Yan, A.; Liu, Y.; Wu, Z.; Gan, X.; Li, F.; Tao, J.; Li, C.; Yi, J. Interfacial Bonding Improvement through Nickel Decoration on Carbon Nanotubes in Carbon Nanotubes/Cu Composite Foams Reinforced Copper Matrix Composites. *Nanomaterials* **2022**, 12, 2548.
 49. Isacfranklin, M.; Rathinam, Y.; Ganesan, R.; Velauthapillai, D. Direct Growth of Binder-Free CNTs on a Nickel Foam Substrate for Highly Efficient Symmetric Supercapacitors. *ACS Omega* **2023**, 8, 11700-11708.
 50. Wu, Z.; Dong, J.; Teng, C.; Li, X.; Zhao, X.; Qin, X.; Ji, C.; Zhang, Q. Polyimide-Based Composites Reinforced by Carbon Nanotube-Grafted Carbon Fiber for Improved Thermal Conductivity and Mechanical Property. *Compos. Commun.* **2023**, 39, 101543.
 51. Wang, C.; Cong, B.; Zhao, J.; Zhao, X.; Wang, D.; Zhou, H.; Chen, C. In Situ Synthesis of MWCNT-Graft-Polyimides: Thermal Stability, Mechanical Property, and Thermal Conductivity. *RSC Adv.* **2020**, 10, 13517-13524.
 52. Lu, C.; Lin, F.; Shao, H.; Bi, S.; Chen, N.; Shao, G.; Jiang, J. Carboxylated Carbon Nanotube/Polyimide Films with Low Thermal Expansion Coefficient and Excellent Mechanical Properties. *Polymers* **2022**, 14, 4565.
 53. Yan, Y.; Zhang, B.; Wang, J.; Cao, C.; Yan, F. MWCNT–Polyimide Fiber-Reinforced Composite for High-Temperature Tribological Applications. *Coatings* **2024**, 14, 181.
 54. Cao, J.; Yang, S.; Liao, Y.; Wang, Y.; He, J.; Xiong, C.; Shi, K.; Hu, X. Evaluation of Polyetheretherketone Composites Modified by Calcium Silicate and Carbon Nanotubes for Bone Regeneration: Mechanical Properties, Biom mineralization, and Induction of Osteoblasts. *Front. Bioeng. Biotechnol.* **2023**, 11, 1271140.
 55. Silva, S.; Barbosa, J.M.; Sousa, J.D.; Paiva, M.C.; Teixeira, P.F. High-Performance PEEK/MWCNT Nanocomposites: Combining Enhanced Electrical Conductivity and Nanotube Dispersion. *Polymers* **2024**, 16, 583.
 56. Ye, X.; Hu, Z.; Li, X.; Wang, S.; Wang, B.; Zhao, Y.; He, J.; Liu, J.; Zhang, J. Effect of Annealing and Carbon Nanotube Infill on the Mechanical and Electrical Properties of Additively Manufactured Polyether-Ether-Ketone Nanocomposites via Fused Filament Fabrication. *Addit. Manuf.* **2022**, 59, 103188.
 57. Lee Sanchez, W.A.; Huang, C.-Y.; Chen, J.-X.; Soong, Y.-C.; Chan, Y.-N.; Chiou, K.-C.; Lee, T.-M.; Cheng, C.-C.; Chiu, C.-W. Enhanced Thermal Conductivity of Epoxy Composites Filled with Al₂O₃/Boron Nitride Hybrids for Underfill Encapsulation Materials. *Polymers* **2021**, 13, 147.
 58. Mohanraman, R.; Steiner, P.; Kocabas, C.; Kinloch, I. A.; Bissett, M. A. Synergistic Improvement in the Thermal Conductivity of Hybrid Boron Nitride Nanotube/Nanosheet Epoxy Composites. *ACS Appl. Nano Mater.* **2024**, 7, 13142-13146.
 59. He, X.; Feng, L.; Zhang, Z.; Hou, X.; Ye, X.; Song, Q.; Yang, Y.; Suo, G.; Zhang, L.; Fu, Q.-G.; Li, H. High-Performance Multifunctional Carbon–Silicon Carbide Composites with Strengthened Reduced Graphene Oxide. *ACS Nano* **2021**, 15, 2880-2892.
 60. Zhou, T.; Wang, X.; Liu, X.; Xiong, D. Improved Thermal Conductivity of Epoxy Composites Using a Hybrid Multi-walled Carbon Nanotube/micro-SiC Filler. *Carbon* **2010**, 48, 1171-1176.
 61. Chai, G.; Chen, Q. Characterization Study of the Thermal Conductivity of Carbon Nanotube Copper Nanocomposites. *J. Compos. Mater.* **2010**, 44, 2863-2873.
 62. Yamanaka, S.; Gonda, R.; Kawasaki, A.; Sakamoto, H.; Mekuchi, Y.; Kuno, M.; Tsukada, T. Fabrication and Thermal Properties of Carbon Nanotube/nickel Composite by Spark Plasma Sintering Method. *Mater. Trans.* **2007**, 48, 2506-2512.
 63. Seki, Y.; Tokgöz, M. M.; Öner, F.; Sarikanat, M.; Altay, L. Carbon Nanotube-, Boron Nitride-, and Graphite-Filled Polyketone Composites for Thermal Energy Management. *ACS Omega* **2023**, 8, 19265-19272.
 64. Wang, Y.; Li, Z.; Liu, Y.; Pei, P. Dynamic Thermo-Mechanical Properties of Carbon Nanotube Resin Composite Films. *Polymers* **2024**, 16, 3307.

출판자 공지사항: 한국고분자화학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.