특집

탄소계 나노 복합소재 적용 개발 동향

하수민

- 2019. 전남대학교 고분자공학과(석사)
- 2020–현재. 다이텍연구원 산업용소재연구단 전임연구원

김명순

- 2014. 경북대학교 섬유시스템공학과(박사수료)
- 2000–현재. 다이텍연구원 섬유소재분석센터 센터장

강기환

- 2022. 신라대학교 전자에너지소재공학 (박사)
- 2021–현재. 한국탄소산업진흥원 책임연구원

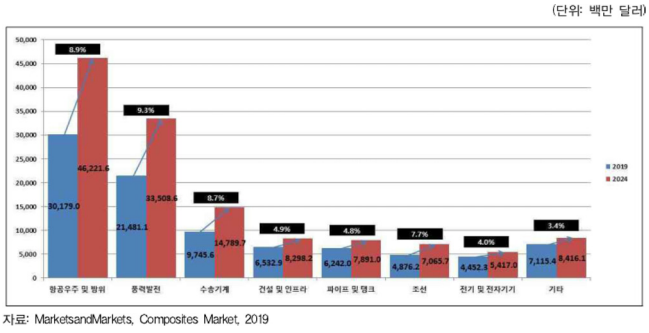
1. 서 론

나노 복합소재는 나노 소재와 기존 소재의 계면설계 및 제어, 다차원 구조화 및 복합화 공정 기술 등을 통해 새로운 물성과 기능을 발현하는 소재를 의미하며, 기지 소재에 따라 고분자, 세라믹 및 금속 기지 나노 복합소재로 나눌 수 있다. 산업에서 많이 사용되는 고분자 기지 나노 복합소재에는 탄소 소재, 무기 소재, 금속 소재 등이 첨가되며, 이 중에서 나노 탄소 소재를 첨가한 탄소계 고분자 나노 복합소재가 가장 널리 사용되고 있다. 나노 복합소재는 1980년대 Toyota에서 나노클레이 복합소재 자동차 부품이 최초로 도입되었으며, 최근에는 전자재료, 자동차 산업의 경량 고강도 소재 분야 및 친환경 소재 분야에서 나노 복합소재에 대한 수요가 높다.

전 세계 복합소재 시장은 크게 항공우주 및 방위, 풍력발전, 수송기계, 건설 및 인프라, 파이프 및 탱크, 조선, 전기 및 전자기기, 기타로 분류되며, 항공우주 및 방위 분야는 가장 큰 규모를 보유하고 있으며, 2019년 301억 7,900만 달러에서 연평균 성장률 8.9%로 증가하여, 2024년에는 462억 2,160만 달러에 이를 것으로 전망되고 있다. 수송기계 분야는 2019년 97억 4,560만 달러에서 연평균 성장률 8.7%로 증가하여, 2024년에는 147억 8,970만 달러에 이를 것으로 전망되었고, 전기 및 전자기기 분야는 2019년 44억 5,230만 달러에서 연평균 성장률 4.0%로 증가하여, 2024년에는 54억 1,700만 달러에 이를 것으로 전망되었다.

세계 복합소재 시장은 2021년 943억 달러에서 2026년 1,351억 달러로 연평균 7.21% 성장할 것으로 전망되고 있으며, 국내 복합소재 시장은 2021년 약 3조 4,139억 원에서 2026년 약 4조 8,105억 원으로 연평균 7.10% 성장할 것으로 전망되고 있다. 자동차, 풍력, 에너지, 운송, 항공·우주 및 방위와 같은 많은 분야에서 경량 재료 수요가 증가함에 따라 크게 영향을 받고 있으며, 나노기술의 발전과 함께 더욱 다양한 방향으로 발전할 전망이다.

Figure 1. 나노 복합소재의 분류.
출처 : Kisti, 2015



자료: MarketsandMarkets, Composites Market, 2019

Figure 2. 글로벌 복합소재 시장의 최종이용 산업별 시장규모 전망.

Table 1. 세계 복합소재 시장 규모 및 전망
(단위 : 십억 달러, %)

구분	2020년	2021년	2022년	2023년	2024년	2025년	2026년	CAGR (21~26)
세계 시장	89.0	94.3	100.1	107.9	116.3	125.3	135.1	7.21

Table 2. 국내 복합소재 시장 규모 및 전망
(단위 : 억 원, %)

구분	2020년	2021년	2022년	2023년	2024년	2025년	2026년	CAGR (21~26)
국내 시장	31,876	34,139	36,563	39,158	41,939	44,916	48,105	7.10

첨가된 나노소재의 종류와 구조에 따라 탄소 나노소재, 금속 나노소재, 산화물 나노소재, 다공성 나노소재, 그리고 기타 나노소재 등으로 구분할 수 있으며, 탄소 나노소재의 경우 탄소나노튜브 (CNT), 그래핀 등을 포함하며, 초경량/고강도용 탄소 분야와 전기적 특성을 활용한 고전도성 복합소재 분야에 활용되고 있다. 이외에도 기능성 나노 소재는 고기능 소재 (점착필름, 방열소재), 건자재 (바닥재, 시트, 난연 단열재) 등의 다양한 산업에 응용되고 있으며, 항공기, 자동차, 석유화학 분야에서는 연료 효율 향상 및 경량화를 위해 다양한 종류의 무기, 금속 및 유기 소재를 하이드리드화 하는 기술이 개발되고 있다. 본 논고에서 소개되는 탄소나노튜브, 그래핀 등은 높은 기계적 강도, 우수한 열적, 전기적 특성, 경량성으로 인해 기능성 복합소재용 첨가제로 활발히 고려되고 있는 저차원 탄소 나노 소재이다. 아래에서는 각 소재별 특성과 응용되는 분야를 소개하고자 한다.

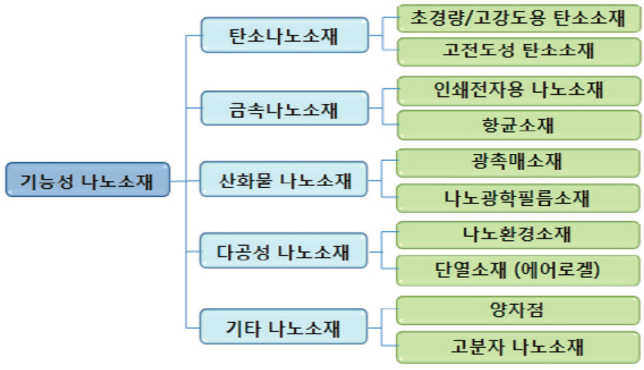


Figure 3. 기능성 나노소재의 분류.
출처 : 중소기업청 산업 로드맵(2012)

2. 탄소나노튜브 적용 나노 복합소재

탄소나노튜브 (Carbon Nano Tube, CNT)는 탄소로 이루어진 탄소 동소체로서 하나의 탄소가 다른 탄소 원자와 육각형의 벌집무늬로 결합되어 튜브 형태를 이루고 직경이 1 nm에서 100 nm 크기를 가지는 나노 물질이다. 탄소나노튜브는 종류에 따라 단일벽 탄소나노튜브 (SWCNT)와 다중벽 탄소나노튜브 (MWCNT)로 분류되며, 탄소와 탄소 간에 sp^2 결합을 이루고 있어서 구조적으로 매

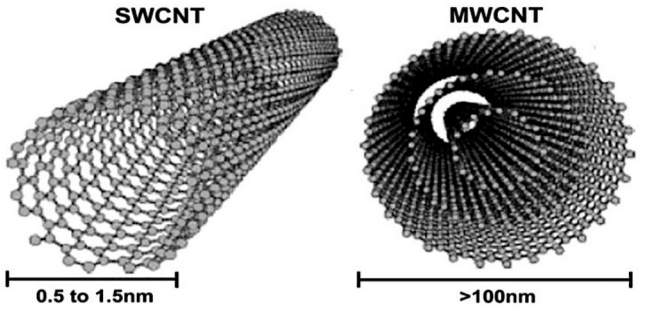


Figure 4. 탄소나노튜브의 구조.
출처 : Polímeros, 27, 247–255(2017).

우 높은 강성과 강도를 나타내며, 특히, 단일벽 탄소나노튜브의 경우 영률 5.5 TPa, 인장강도 ~ 45 GPa을 보유하고 있어 기존 복합재의 성능을 개선하여 고강도/초경량 복합재료의 충전재로 사용될 수 있으며, 전기전도성이 우수한 점을 이용하여 전자파차폐, 정전방지 및 방열재료 등으로 응용되고 있다. 또한, 최근 배터리 용량을 늘리기 위한 소재로 기존 도전재 대비 성능과 안전성이 뛰어난 탄소나노튜브 도전재가 주목받고 있다.

Table 3. 탄소나노튜브의 물성

특성	단일벽 탄소나노튜브	다중벽 탄소나노튜브	비고
직경(나노미터)	1.2 ~ 3.0	10 ~ 100	–
밀도(g/cc)	1.33 ~ 1.40	–	알루미늄(2.7)
저항(ohm · cm)	10×10^{-4}	5.1×10^{-6}	구리(1.7×10^{-6})
열전도율(W/m · K)	Max 6,000	Max 3,000	다이아몬드 (3,300)

출처 : KETI, 'CNT 생산 및 응용분야 사업화 동향'(2007)

Table 4. 전기전도를 위한 첨가 재료 종류에 따른 복합소재 특성 비교

구분	금속섬유	금속코팅 탄소섬유	탄소섬유	카본 블랙	탄소나노튜브
용도	전자파 차폐	전자파차폐 정전 분산	전자파차폐 정전 분산	정전 분산	전자파차폐 정전 분산
표면 정전기	큼	큼	큼	적음	거의 없음
표면 거칠기	거침	거침	거침	매끄러움	매끄러움
소재 등방성	등방적	비등방적	비등방적	등방적	등방적

출처 : 산업연구원, 탄소나노튜브(2014)

2.1. 탄소나노튜브 적용 방열 소재

흑연, 탄소나노튜브, 탄소섬유, 그래핀 등의 탄소계 첨가제들은 열전도도가 높고 기계적 물성이 우수하며 가벼워서 고기능성 복합재료를 요구하는 분야에서 응용이 기대되는 소재로 주목받고 있다. 탄소나노튜브는 3,000 W/m.K 이상의 우수한 열전도도 값을 가지고 있으며, 큰 종횡비로 인해 소량의 첨가만으로 열전도도를 향상할 수 있다. 열경화성 고분자, 열가소성 고분자 매트릭스에 탄소 나노소재를 첨가하여 방열 성능을 향상하는데 열경화성 고분자로는 실리콘계, 에폭시계가 주로 사용되고, 열가소성 고분자로는 LCP, PPS, PA6, PA66, PC/ABS 등이 사용되고 있다. 방열 소재는 주로 필름, 시트, 패드 형태로 개발되고 있으며, 향후 전자제품, 자동차의 분야의 수요 확대를 위하여 *Table* 5에 기술되어 있는 핵심 기술개발을 중심으로 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

Table 5. 방열 소재 핵심요소기술

분류	요소기술	세부 내용
고효율 방열 기술	고효율 방열도료의 조성설계 및 도포기술	고방사율 소재의 제조와 도포에 따른 특성평가 기술 확립
	선택적 방열구조 형성 고방열 필터	최적 방열구조를 구현하기 위한 부품 설계 기술
	LED 패키지용 방열 필름	고출력 LED의 방열특성 개선을 위한 복합 방열필름 제조 기술
복합 방열 소재 제품화	나노카본 복합 고방열 기판소재	열적 안정성을 갖는 고방열 복합 기판 소재 제조 및 응용기술 확보
	열가소성 폴리이미드 방열 재료	상용 패키지용 소재의 특성 개선에 필요한 요소기술 확보
방열 복합 소재	고방열 필러 (절연/비절연) 소재	금속 입자, 세라믹 파우더, Graphite, Carbon Nanotube, Carbon Fiber, Graphene 등의 탄소계 필러들, 우수한 열전도도, 저렴한 가격, 양호한 매트릭스 내 분산성
	고방열용 고분자 수지	열전도성 고분자는 용이한 가공성, 저비용, 경량화, 제품형 태의 다양성 등 유지, 금속과 세라믹 재료의 특성 가짐
	열가소성 방열 복합소재	인장 강도, 굴곡 탄성율 또는 충격 강도 등의 기계적 물성이 우수하고 높은 열전도도 및 방열 특성
	열경화성 방열 복합소재	그물망 구조의 얽힌 분자구조, 경화제 첨가, 열을 가하여 경화되면 더 이상 성형이 불가능, 페놀, 우레탄, 에폭시 등의 열경화성 소재를 포함하는 복합소재 기술

출처 : 중소벤처기업부, 「중소기업 기술로드맵 2018-2020: 화학 및 섬유소재」 신소재 기반 방열소재 2018.

탄소나노튜브 적용 고열전도성 고분자 복합소재는 탄소나노튜브의 뛰어난 열전도 특성 (max. 6,000W/mK)을 이용한 소재로서 고분자와 함께 마이크로 크기에서 열 전도도, 전기 전도도를 극대화한 것으로, 가공 기술에 따라 다양한 형태로 구현할 수 있다.

LED 패키징 시, 접착제는 각 물질 간의 접착을 위한 용도

로도 사용되지만, 기판이나 패키지와의 전기전도, 열 방출 역할도 수행한다. LED 패키지 방열 부속품은 LED 수명과 밀접한 관련이 있어 매우 중요한 구성 중 하나인데, *Figure* 5와 같이 LED 칩과 열트 싱크 사이에 열 인터페이스 소재 (thermal interface materials, TIM)로 CNT 열전도성 페이스트로 사용될 수 있으며, 히트 싱크를 대체하여 방열 소재로 CNT 복합소재가 이용될 수 있다. 이 외에도 탄소소재를 적용한 복합소재는 *Figure* 6과 같이 다양한 분야에 활용되고 있다.

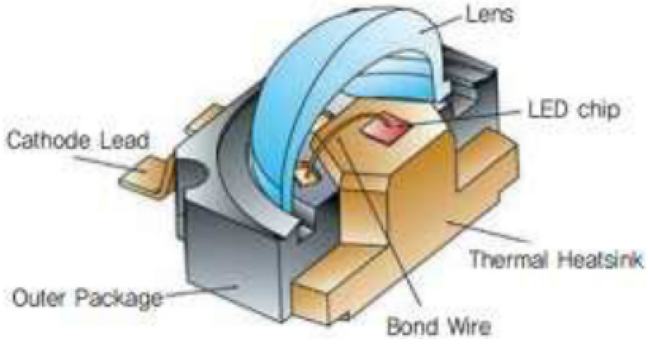


Figure 5. LED 칩의 열 히트 싱크 방열 구조.

Figure 6. 탄소 복합소재를 이용한 다양한 방열 응용부품 및 활용 제품.

2.2. 탄소나노튜브 적용 에너지 소재

향후 탄소나노튜브 시장에서 가장 빠른 성장이 예상되는 분야는 전지 소재로 이차전지 산업에서 음극재료, 도전재로 탄소나노튜브를 사용하려는 흐름이 가속화되고 있다. 기존 흑연기반의 음극은 에너지 용량 확대가 제한적이기 때문에 이를 극복하기 위하여 탄소나노튜브를 적용하려는 연구가 계속되고 있다. 또한, 현재 전지 전극의 전도성을 높이는 도전재로 카본블랙이 주로 사용되고 있는데 이를 탄소나노튜브로 대체하거나 탄소나노튜브를 섞어서 사용하면 전지의 에너지 밀도를 높일 수 있으며, 기존 제품 대비 사용 시간이 늘어나는 효과가 있는 것으로 나타났다. 2017년 LG전자에서는 노트북'그램(Gram)'의 전지에 탄소나노튜브를 적용하여 발매한 바 있다.

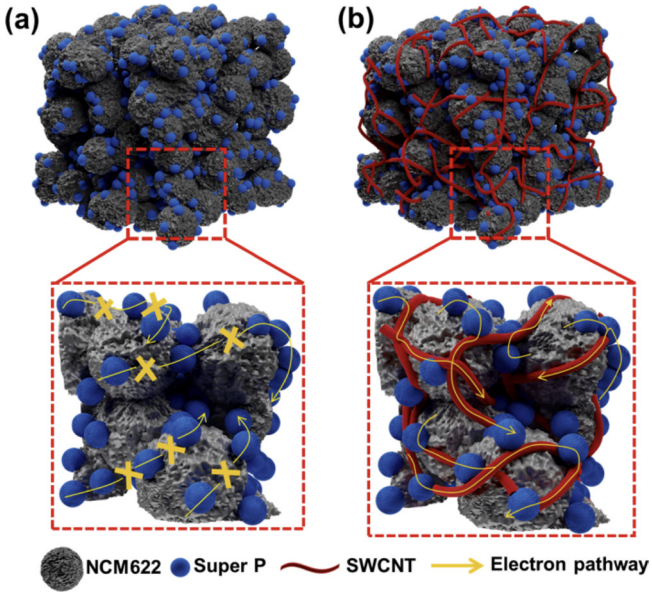


Figure 7. (a)Carbon black (b)Carbon black + SWCNT 첨가제 전극의 전자 운송 모식도.
출처 : Applied Surface Science 568, 150934 (2021)

높은 종횡비(약 1,000:1)를 보유하는 탄소나노튜브는 낮은 종횡비의 카본블랙 대비 저함량으로 동일한 전기 전도도를 구현할 수 있다. 이차전지의 양극재 제조에 필요한 탄소나노튜브 도전재의 양은 기존 도전재의 양 대비 1/5 수준이며, 이는 줄어든 도전재 양만큼 추가 양극활물질을 증가시킬 수 있으므로 이차전지의 에너지 밀도를 증가할 수 있다. 실리콘 음극재에서는 충·방전 과정에서 리튬이온과 반응되는 실리콘의 부피가 팽창함에 따라 내구성과 수명이 저하되는 이슈가 존재한다. 실리콘 음극재에 탄소나노튜브를 코팅하여 실리콘 입자의 팽창을 억제하면서 전기전도성을 높여 수명을 향상시키고, 충전시간을 단축시킬 수 있어 실리콘 음극재는 차세대 음극재 소재로 주목받고 있다.

2.3. 탄소나노튜브 적용 전자파 흡수 소재

각종 전자기기의 사용량 증가에 따라 전자파에 노출되는 시간이 증가하고 있으며, 이에 따른 질병이 발생하거나 전자파로 인한 기기 오작동, 성능저하를 발생할 수 있기 때문에 전자파를

차폐할 수 있는 차폐 소재에 대한 관심이 높아져 가고 있다. 전자기기는 경량화, 디자인, 생산 비용 등의 부분에서 고분자 수지를 많이 사용하고 있으나, 고분자 수지는 대부분 전자파가 투과하는 특성을 가지고 있기 때문에 전도성 재료를 첨가하여 사용하는 것이 효과적이다. 일반적으로 전자파 흡수체인 탄소 계열의 전도성 재료를 고분자 구조 내 복합화한 소재가 폭넓게 활용된다. 전자파 흡수 소재에 사용되는 탄소 소재로는, 카본블랙, 탄소섬유 및 필라멘트, 탄소나노튜브, 그래핀 등이 있으며, 카본블랙, 다중벽 탄소나노튜브 등은 낮은 비중에 비해 높은 전도성을 갖기 때문에 전자파 흡수체의 첨가제로 많이 활용된다.

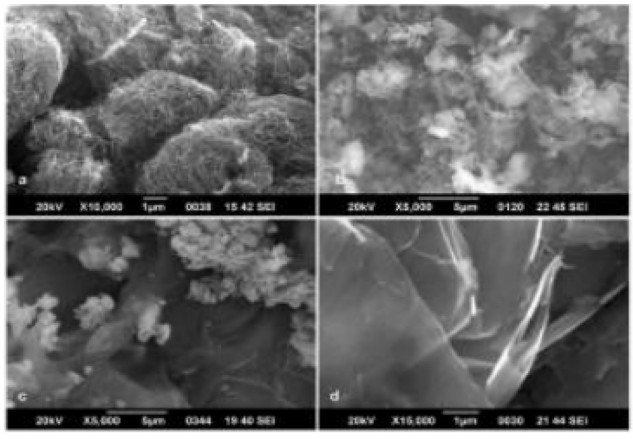
그래핀, 탄소나노튜브와 같은 저차원 나노 소재를 열전도 필러로 사용하는 경우, 열전달이 나노 소재의 자유전자 이동에 의해 이루어져 포논에 의한 열전달보다 효과적이다. 최근에는 탄소 나노소재를 혼합한 나노 복합소재를 이용하여 고효율의 전자기파 차폐 기능과 방열 기능을 동시에 만족하는 다양한 연구들이 진행되고 있다.

Table 6. 전도성 재료의 종류 및 특징

구분	전도성 필러		특징
	형태	성분	
금속계	분말, 플레이크, 리본, 섬유	Ag, Cu, Ni, ZnO, SnO2, Al, 스텐리스강	Ag은 안정하나 고가 / Cu는 저가 이나 산화 / 색깔이 다양
금속 복합계	Glass Bead, Glass Fiber Coating	금속 표면 코팅	가공시 변질
카본계	Carbon Black, Carbon Fiber, Graphite	Acetylene Black, Channel Black PAN/ Pitch계 천연/ 인조 Graphite	고순도, 분산성 양호 저전도성, 착색용 전도성 양호, 가공성 문제 분말화 곤란
전도성 고분자계	수계 에멀션, 수용성 분말형	폴리아닐린, 폴리피롤, 폴리티오펜	매우 가볍고 저가, 저전도성, 분말형은 분산이 어려움

출처 : HSE 실용화센터 (2016.01.26.)

복합소재의 경량화를 위하여 무거운 금속 차폐 소재나 장섬유 탄소섬유 등을 사용하지 않고 탄소나노튜브 혹은 그래핀 플레이크 같은 2차원 나노소재를 이용한 경량 복합소재를 제조하여 *Figure* 9와 같이 유연성을 가지면서 경량화된 전자파



* (a) MWCNTs, (b) graphene oxide, (c) reduced graphene oxide (d) graphene nanoplatelet

Figure 8. 탄소 소재 기반 다양한 전파 흡수 소재.
출처 : 고기능 신소재부품 산업별 기술동향 분석(고방열, 내열), 지식산업정보원 R&D 정보센터(2021)

차폐 시트 개발 연구가 진행된 바 있다.

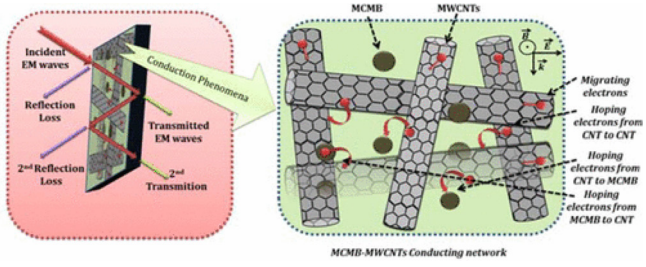


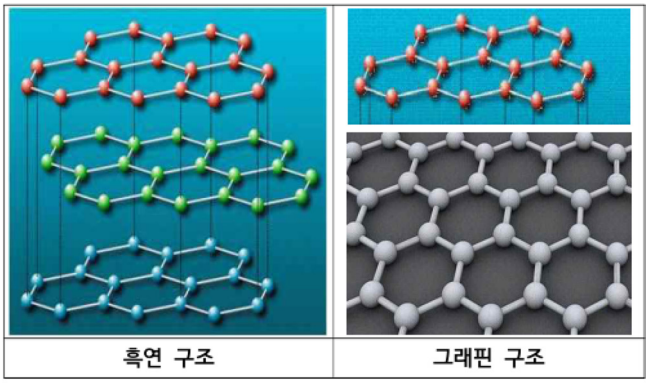
Figure 9. MCMB/MWCNT 나노 복합체로 구성된 초경량 유연 차폐 시트.
출처 : ACS Appl. Mater. Interfaces, 8, 16, 10600 – 10608(2016)

전자파차폐/흡수 기술은 스마트폰, PC, 자동차, 항공, 풍력발전기, 국방 등 다양한 분야에서 활용되고 있으며 우리 생활과 밀접한 산업 전 분야에 도입이 가능하며, 전자파 간섭에 따른 문제와 전자기기의 인체 유해성에 대한 문제 대두로 시장의 니즈가 크게 확대되고 있다. 5G 기술을 바탕으로 한 IoT의 실생활 적용이 확대되고 있으며 이에 따라 사용되는 전파의 종류와 양도 크게 확대되고 있어 전자파차폐/흡수 소재 기술력의 수요는 급격히 증대될 것이다.

3. 그래핀(Graphene) 적용 복합소재

2차원 평면 구조를 가지고 있는 그래핀은 흑연을 구성하고

있는 기본 단위이다. 흑연은 수많은 그래핀 층들이 0.34 nm의 간격으로 쌓여있는 결정 구조를 가지고 있다. 그래핀은 상온에서 은보다 열 전도성이 높으며, 전자 이동도는 실리콘의 약



자료: KDB산업은행, 차세대 신소재 그래핀의 기술동향

Figure 10. 흑연과 그래핀의 구조.

Table 7. 그래핀의 우수한 물리적 특성

물리적 성질	그래핀	비교재료
두께	가장 얇은 물질	–
인장강도	130 Gpa	강철의 200배
열전도율	5,300 W/mk	구리의 13배
허용 전류밀도	180 A/㎠	구리의 100만배
전자 이동도	200,000 ㎠/Vs	실리콘의 100배

출처 : KDB산업은행, 차세대 신소재 그래핀의 기술동향

Table 8. 그래핀 기술 응용분야

응용분야	목표 시장
디스플레이	Flexible/Transparent Display, 터치패널, 태양전지, 스마트윈도우 등의 ITO 전극을 대체 하는 투명 전극 및 배선 전극용 소재 및 응용부품 분야
차세대 반도체	기존 Si 반도체의 작동속도 및 성능한계 극복을 위하여 그래핀의 뛰어난 전자이동도를 이용한 초고속 반도체 소자(RFIC, Optical Switch, TFT) 분야
에너지용 전극소재	그래핀의 높은 전기전도도, 열전도도, 투명성, 높은 전류밀도 등을 이용해 기존 에너지용 전극의 물리적, 기능적 한계를 극복하는 고용량, 장수명 그래핀 응용 전극 소재 및 응용부품 분야
초경량 /고강도 복합소재	그래핀을 고분자 또는 금속 상에 3차원적으로 분산하여 그래핀과 고분자 또는 금속 사이에 물리적, 화학적 결합을 형성하여 기계적 물성의 향상 효과가 기존의 복합소재 보다큰 고성능 소재 및 응용부품 분야

출처 : 중소기업청, 『나노탄소소재』 중소 · 중견기업 기술로드맵 2017-2019

100배의 물성을 가지고 있어 실리콘 기판을 대체할 수 있는 차세대 재료로 각광받고 있다. 그래핀은 강도, 열전도율, 전자이동도 등 여러 가지 특징이 현존하는 물질 중 가장 뛰어난 소재로 디스플레이, 이차전지, 태양전지, 자동차 및 조명 등 다양한 분야에 응용되어 관련 산업의 성장을 이끌어나갈 핵심소재로 주목받고 있다. 뛰어난 열적, 전기적 특성을 활용하여 초경량/고강도 복합소재, 방열 소재, 인쇄전자용 소재, 차세대 반도체, 이차전지용 전극, 투명전극 등에 적용하기 위한 연구가 진행 중이다.

3.1. 그래핀(Graphene) 적용 전자 소재

탄소나노튜브나 그래핀을 적용한 투명전극은 기존의 산화 인듐주석 (indium tin oxide, ITO) 투명전극을 대체할 수 있는 유연한 투명전극으로 주목을 받고 있다. 투명전극은 통상 80% 이상의 고투명도와 면저항 500 Ω/sqm 이하의 전도도를 가지는 전자 부품으로 OLED 전극 등 디스플레이, 태양전지 등 전자분야에 광범위하게 사용되는 기술이다. 현재 주로 채용되고 있는 ITO (Indium Tin Oxide) 필름은 휨에 약하여 유연성에 한계가 있고, 인듐자체가 희소금속으로 자원 고갈의 우려도 있다. 이러한 단점을 극복할 수 있는 세상에서 가장 얇은 전도체인 그래핀은 투명전극에 유망한 소재이다. 그래핀은 크게 Chemical Vapor Deposition (CVD) 방법과 흑연의 산화 박리 방법으로 제조된다. CVD 방법으로 제조되는 그래핀은 높은 결정성을 가지며, 약 90%의 투과율에서 약 100 Ω/sqm를 나타낸다. 흑연을 산화 박리하여 제조되는 그래핀은 상대적으로 낮은 결정성을 나타내며, 약 90%의 투과율에서 약 2,000 Ω/sqm을 나타낸다.

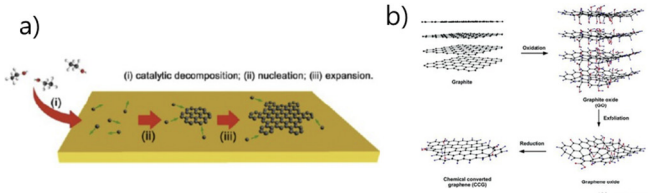


Figure 11. (a) CVD garphene 제조방법 (b) 산화 박리 Graphene 제조 모식도.
출처 : (a) Synthetic Metals 210 95–108 (2015), (b) Micromachines 10, 13 (2019)

최근에는 Graphene의 대면적 제조공정 연구가 활발히 이루어지고 있다. CVD 방법은 일반적으로 특정 기판에 비교적 고품질의 그래핀을 성장시키는 데 선호되며, PET 필름에 대면적 (30인치) 그래핀을 성공적으로 제조했지만 여전히 산업적 적용은 어려운 단계이다. 반면, 산화 박리 방법으로 제조되는

Graphene은 Roll-to-Roll 공정으로 연속적인 제조가 가능했으며, 제조된 Graphene은 91.9%의 투과율에서 3,840 Ω/sqm의 저항을 나타냈다.

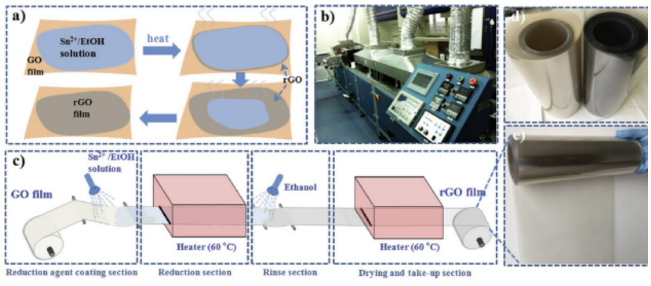


Figure 12. a) GO 필름의 환원 공정의 개략도, b) lab-scale 생산 라인, c) roll-to-roll 공정 모식도 d) GO, rGO 필름 (폭 25 cm) e) rGO 필름.
출처 : Advanced materials 29, 1605028 (2017)

3.2. 그래핀 (Graphene) 적용 전자파 흡수 소재

전자파 흡수 소재는 첨가제에 따라 유전 손실과 자성 손실 두 가지 형태로 나뉘는데, 탄소 소재는 유전 손실 (dielectric loss)을 통해 전자파를 흡수하고, 자성 재료는 자성 손실 (magnetic loss)를 통해서 전자파를 흡수한다. 입사된 전자파가 소재에 흡수되어 열로 변환되기 때문에 반사파에 의한 노이즈 영향을 억제할 수 있다. 향후 5G 및 6G 기술의 개발을 위해서는 전자파 적합성 (electromagnetic compatibility, EMC), 전자파 간섭 (electromagnetic interference, EMI) 문제를 해결할 수 있는 전자파 흡수 소재의 개발이 필요한 상황이다. 다양한 탄소 나노소재 기반 전자파 흡수 소재 중에서 5G 대역에서는 그래핀 기반의 흡수 소재 연구가 다양하게 진행되고 있다.

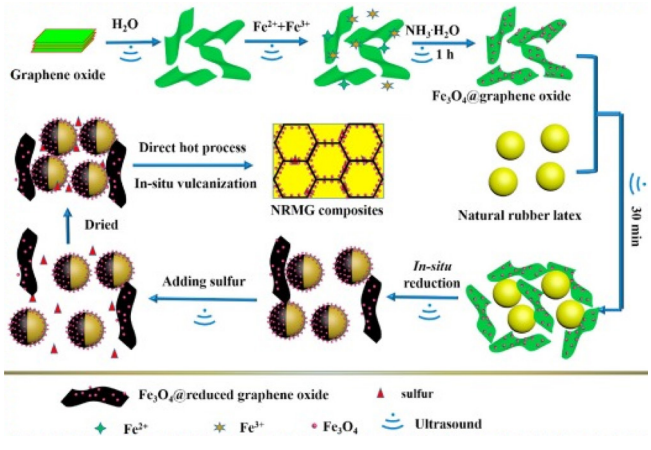


Figure 13. Graphene oxide 나노시트와 FeO 나노소재의 하이브리드 전자파 흡수 소재 제조 공정.
출처 : Chemical Engineering Journal, 344, 184-193(2018).

중국의 Sichuan University의 Hesheong Xia 교수 그룹에서는 그래핀 옥사이드 나노시트, Fe_3O_4 나노소재를 라텍스와 혼합한 하이브리드 전자파 흡수 소재를 개발한 바 있다. 그래핀 옥사이드의 환원시켜 환원 그래핀 옥사이드를 만들어 conductive path를 형성토록 함으로써 EMI 특성과 전기적 특성의 향상을 보고하였다.

3.3. 그래핀 적용 섬유 강화 복합소재

그래핀 첨가 복합소재 (graphene-integrated composite)는 자동차나 항공기 동체의 무게를 줄일 수 있는 큰 잠재력을 가지고 있다. 최근 그래핀과 같은 2차원 탄소 나노소재를 첨가함으로써 탄소섬유 강화 탄소 복합소재 (carbon fiber reinforced composites, CFRC)를 추가 공정 없이도 특성을 크게 개선할 수 있음이 밝혀지면서 탄소 나노소재는 복합재료 분야에서 큰 관심을 받고 있다. 항공기나 자동차는 금속으로 차체가 이루어져 있어 연비 향상 및 탄소 배출량 절감을 위해 경량화하려는 노력이 이어지고 있으며, 탄소 복합소재 적용을 위한 연구가 오랜 시간 동안 진행되어왔다.

아래에서는 그래핀 나노플레이트나 그래핀 옥사이드, 환원 그래핀 옥사이드와 같은 그래핀 관련 물질을 GRM (graphene related material)으로 통칭하였다. GRM을 첨가한 고분자 복합소재는 물질을 균일하게 합성하는 것이 핵심인데 *Figure* 14와 같이 GRM/epoxy 나노 복합소재를 부분적으로 열처리 하여 강화 소재를 제조하기도 한다. 이는 나노 복합소재를 탄소섬유 원단 시트 사이에 끼워 진공상태에서 압력을 가해 부착시키는 방법으로, 중간층을 만들기 위해 용매가 사용되기는 하지만 GRM을 골고루 분산하여 부착할 수 있는 방법이다.

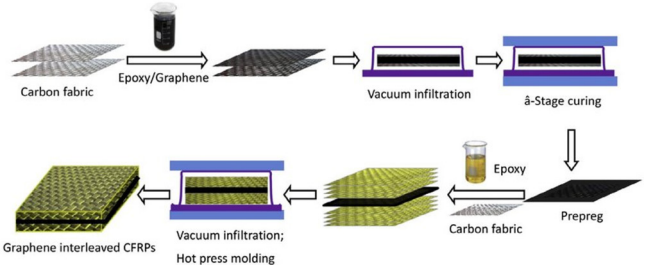


Figure 14. FRC 층 사이 GRM 층 첨가방법 모식도.
출처 : Composite Interfaces 25(14589)

가장 일반적으로 사용되는 dip-coating 방법은 분산된 GRM을 초음파로 분산하거나 기계적으로 고분자 매트릭스에 골고루 섞일 수 있도록 개발된 방법이다. *Figure* 15에 설명되어있는 dip-coating 방법은 GRM이 섬유 사이에서 잘 펴져 섞일 수 있게 하는데 아주 효과적인 방법이다.

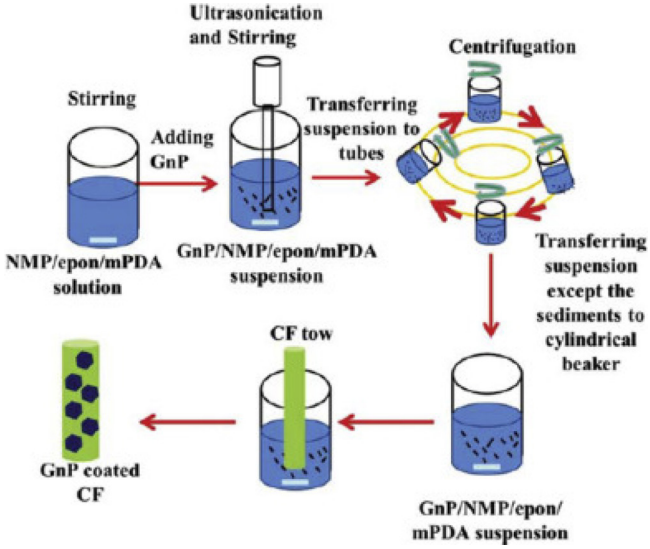


Figure 15. GRM을 매트릭스 수지에 분산시켜 섬유에 코팅.
출처 : Composites Part B: Engineering, 2018, 133: 240–257.

자동차, 항공 등 운송 업계는 환경 규제로 인하여 온실가스 배출 비중을 1/3 감축해야 하기때문에, 유럽 및 세계 각국의 그래핀 연구자들은 연비 효율을 높이고 이산화탄소 배출을 줄일 수 있는 경량 복합소재 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 위에서 소개한 연구들은 그래핀과 관련된 나노소재를 FRC (fiber reinforced composite) 형태로 합성하여 복합소재의 무게를 줄이고 강도를 높이는데 중점을 두었으며, 이를 통해 GRM 물질이 강화 소재로서 크게 기여함을 증명하였다.

4. 결 론

한국을 비롯한 세계 각국에서 항공, 자동차, 전자재료, 이차전지 등 많은 분야에서 탄소나노튜브와 그래핀 등 탄소 나노소재의 응용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있지만, 실질적으로 탄소 나노소재는 대량생산이 어렵고 단가가 비싸며, 강한 반데르발스 상호작용으로 인하여 분산이 어려운 단점이 있다. 그럼에도 탄소 재료의 우수한 열적, 전기적, 기계적 특성을 활용하기 위하여 표면 개질 및 기계적 처리를 통해 분산성 향상 연구를 지속하고 있으며, 대량생산 기술개발이 진행되고 있어 점차 생산단가가 낮아지고 있는 추세이다.

탄소 나노소재를 적용한 투명전극 시장규모는 2030년 71조원까지 확대될 것으로 전망되며, 초경량 복합소재, 전자소재, 에너지 산업 등에서도 큰 성장을 지속해 나갈 것으로 전망되고 있다. 탄소 나노소재는 현재 전기전도성 고분자 복합소재를 주로 대체하고 있으며, 전자파차폐 및 터치패널용 코팅 재료 분야에서도 빠른 속도로 시장에 진입하고 있다. 또한, 이차전지 시장에서 탄소나노튜브 도전재 수요가 급증하고 있어 시장이 확장될 전망이다.

최근에는 금속, 세라믹, 고분자 등의 나노 물질을 두 가지 혹은 그 이상을 혼합하여 시너지 효과를 낼 수 있도록 하는 나노 하이브리드 소재를 개발하고 있으며, 환경, 에너지, 디스플레이, 센서 등의 핵심부품에 신소재를 적용하기 위한 연구가 계속되고 있다. 금속코팅 탄소섬유, 탄소나노튜브로 강화된 금속 복합소재 (MM-CNT, Carbon Nanotube Reinforced Metal Matrix), 전이 금속층과 탄소층을 가지는 2D 형태의 MXene 소재 등 다양한 하이브리드 소재 연구를 통해 기존 소재보다 우수한 소재 개발 및 새로운 제품 창출을 위한 기술의 필요성이 증대되고 있다.

나노 복합소재는 성능향상 및 용도에 적합한 물성 구현을 통해 자동차, 항공 산업 분야뿐만 아니라 에너지, 전자소재, 신재생 에너지 등 다양한 사업 분야에서 성장 잠재력이 큰 소재로 전망되고 있다. 각국의 기업과 연구기관에서도 나노 소재에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 우리나라도 적극적인 시장 개척을 통해 기술력의 우위를 선점할 수 있도록 기술개발에 대한 적극적인 투자 및 지원이 필요할 것으로 전망된다.

감사의 글

본 기고는 2023년도 산업통상자원부의 연구과제 (과제번호 20010586)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 첨단 고기능 신소재 6개 복합재료 실태분석, 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2016).
2. 첨단 고기능 융 · 복합 미래 신소재 국내외 신기술/시장동향 실

태분석, 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2017).
3. 미래소재 산업의 전략품목별 기술개발 동향과 관련기업 및 정책 현황, 좋은정보사 (2023).
4. 기술로드맵_나노융합, 중소기업청(2012).
5. 나노탄소 고분자 복합재료, 최철림, Composites Research (2013).
6. 고기능성 유망복합재료 시장 분석과 첨단 슈퍼복합소재 연구개발 동향, 산업정책분석원 (2023).
7. 중소기업 전략기술로드맵 2022-2024 복합소재, 중소벤처기업부 (2022).
8. 탄소금속소재 산업기술개발분석, 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2021).
9. 고기능 신소재부품 산업별 기술동향 분석(고방열, 내열), 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2021).
10. 민복기 외 / 저차원 나노 소재 기반 다기능 전자파 차폐 및 센싱 응용기술, 전자통신동향분석 35권 제4호 2020년 8월.
11. 「그래핀 첨가 강화 복합소재 기술 동향 및 전망」, KIAT Europe, 2020. 09.
12. 전자파 차폐용 탄성 탄소 복합체, 고무기술 제22권 제4호, 2021.
13. M.H Woo, P.N. Diwal, H.J. Kim, Reinforcing effect of single-wall carbon nanotubes on the LiNi0.6Co0.2Mn0.2O2 composite cathode for high-energy-density all-solid-state Li-ion batteries, Applied Surface Science 568, 150934 (2021).
14. Y.S. Woo, Transparent Conductive Electrodes Based on Graphene- Related Materials, Micromachines 10, 13 (2019).
15. X. Chen, L. Zhang, Large area CVD growth of graphene, Synthetic Metals 210 95-108 (2015).
16. J. Ning, L. Hao, A Facile Reduction Method for Roll-to-Roll Production of High Performance Graphene-Based Transparent Conductive Films, Advanced materials 29 1605028 (2017).
17. C. Zhang, Y. Ma, X. Zhang, Two-Dimensional Transition Metal Carbides and Nitrides (MXenes): Synthesis, Properties, and Electrochemical Energy Storage Applications, energy & environmental materials 3, 29 (2020).