

탄소나노튜브의 비공유 기능기화

이선화 · 임보경 · 이원준 · 김상옥

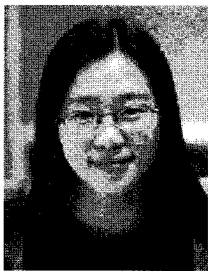
1. 서론

탄소나노튜브는 sp^2 탄소로 구성된 육각 벌집 구조의 흑연판이 나노 사이즈의 직경을 갖는 실린더 형태로 감겨져 있는 탄소 동소체를 말한다. 탄소나노튜브의 원주는 불과 수십 개의 탄소 원자로 이루어진 반면, 길이는 수 마이크로(μm)에 달하므로 중량비가 매우 큰 이상적인 일차원 시스템을 나타낸다. 이러한 구조로 인해 탄소나노튜브는 우수한 기계적, 전기적, 자기적, 광학적, 열적 특성을 가진다.¹ 그러나 1991년 Iijima에 의해 발견된 이후 계속 활발한 연구가 진행되고 있는 탄소나노튜브가 아직 그 특유의 특성을 활용한 상업화가 이루어지지 않은 것은 합성이나 정제과정에서 유도되는 튜브간의 반데르발스 인력으로 인한 번들(bundle) 현상 때문이다.^{2,3} 탄소나노튜브 고유의 특성을 충분히 활용하기 위해서는 튜브 하나하나가 분리되어야 하는데, 탄소나노튜브는 튜브간의 반데르발스 힘(Van der Waals force)으로 인해 다발을 형성하기 쉽고 잘 분리가 되지 않아 그 활용에 어

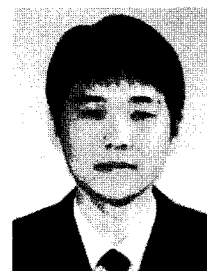
려움이 있었다. 또한 육각의 흑연구조를 가지고 있어 표면이 매우 매끄럽고, 표면적이 넓어, 고분자나 금속등과 함께 복합체를 만들 때 기질과의 접착력이 기계적, 열적 성질에 중요한 영향을 미친다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 탄소나노튜브의 표면을 개질하고 기능성을 부여하는 기능기화(functionalization)에 관한 연구가 이루어져오고 있다. 탄소나노튜브의 기능기화에는 결함 그룹 기능기화(defect group functionalization), 공유 기능기화(covalent functionalization) 등 여러가지 방법들이 있지만 본 특집에서는 비공유 기능기화(non-covalent functionalization)에 대해 소개하겠다.

2. 탄소나노튜브의 비공유 기능기화

탄소나노튜브의 비공유 기능기화(noncovalent functionalization)란 수소결합(hydrogen bond), 반데르발스 결합(van der Waals bond), 전하 이동(charge transfer), 쌍극자 상호작용(dipole-dipole)



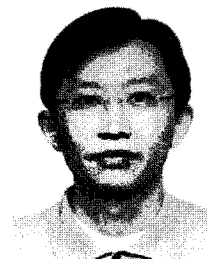
이선화
2005 한양대학교 신소재공학부(학사)
2007 KAIST 신소재공학과(석사)
2007~ 현재 KAIST 신소재공학과, 박사과정



이원준
2007 한양대학교 분자시스템공학과(학사)
2007~ 현재 KAIST 신소재공학과, 석사과정



임보경
2007 경희대학교 고분자·섬유신소재공학과
2007~ (학사)
현재 KAIST 신소재공학과, 석사과정



김상옥
1994 KAIST 화학공학과(학사)
1996 KAIST 화학공학과(석사)
2000 KAIST 화학공학과(박사)
2001 KAIST 응용과학연구소, 박사후연구원
2001~ University of Wisconsin-Madison,
2002,2004 USA, 박사후연구원
2003~ 삼성 SDS, 책임 컨설턴트
2004~ 현재 KAIST 신소재공학과 부교수

Noncovalent Functionalization of Carbon Nanotubes

KAIST 신소재공학과 (Sun Hwa Lee, Bo Kyung Lim, Won Jun Lee, and Sang Ouk Kim, Department of Materials Science and Engineering, KAIST, 373-1, Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea) e-mail: sangouk.kim@kaist.ac.kr

interaction), π 전자 상호작용(π - π stacking interaction) 등과 같은 비공유 결합을 이용하여 탄소나노튜브 표면에 개질하고자 하는 물질을 결합시켜 원하는 기능을 부여하는 방법이다. 비공유 기능기화는 탄소나노튜브 구조에 결합을 유도할 필요가 없어 튜브 고유의 성질을 그대로 유지하면서 기능기를 부여할 수 있다는 장점이 있다. 비공유 기능기화는 보통 계면활성제, 방향족 탄화수소, 바이오 물질 등을 이용하여 이루어지며, 대부분 수용액 상에서 안정적으로 탄소나노튜브를 분산시킨다.

2.1 방향족 탄화수소를 이용한 비공유 기능기화

방향족 탄화수소를 이용한 방법은 탄소나노튜브의 비공유 기능기화 방법들 중에서 가장 많이 연구된 방법 중 하나이다. 탄소나노튜브의 벽면은 육각의 흑연구조로 이루어져 있어 피렌(pyrene), 포르피린(porphyrin), 공액 고분자(conjugated polymer)와 같이 방향족 탄화수소로 이루어진 분자들과 π 전자 상호작용(π - π stacking interaction)을 할 수 있다. 이것은 탄소나노튜브의 가장 대표적인 비공유 기능기화 방법으로서 2001년 피렌(pyrene)을 이용하여 튜브 벽면에 단백질을 고정화시킨 R. J. Chen 등에 의해 소개되었다.⁴

피렌은 4개의 벤젠링으로 이루어진 여러 고리 방향족 탄화수소로,

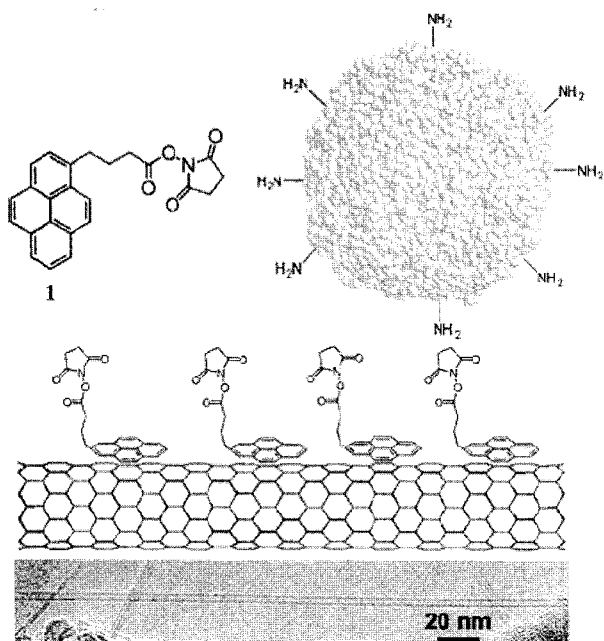


그림 1. π 전자 상호작용(π - π stacking interaction)을 이용한 1-pyrenebutanoic acid, succinimidy ester 1의 탄소나노튜브 위 비공유 결합.

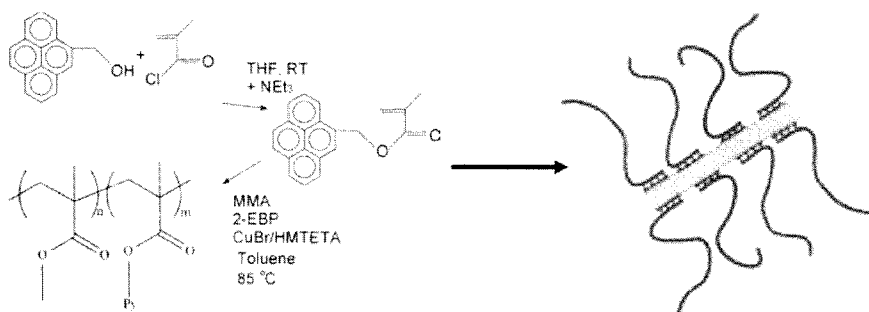


그림 2. Poly(methyl methacrylate-co-(1-pyrene)methyl 2-methyl-2-propenoate) 공중합체의 합성과 탄소나노튜브와의 상호작용 모식도.

흑연의 판상 구조와 비슷한 구조를 가지고 있다. R. J. Chen 등은 DMF나 메탄올과 같은 유기용매 내에서 피렌을 소수성인 탄소나노튜브 표면에 비가역적으로 흡착시켰고, 이 방법을 이용하여 페리틴(ferritin)과 금 나노입자도 나노튜브 위에 고정화하여 피렌을 이용한 비공유 기능기화가 여러 물질에 안정적으로 적용될 수 있음을 보였다.

P. Petrove 등은 메틸메타크릴레이트(Methyl methacrylate, MMA)와 피렌으로 개질한 메틸메타크릴레이트를 공중합체로 합성하는 방법을 이용하여 탄소나노튜브의 기능기화를 시도했다.⁵ 피렌으로 개질한 메틸메타크릴레이트 블록은 나노튜브의 벽면과 π 전자 상호작용을 일으키고 순수 메틸메타크릴레이트 블록은 용매 내에서 steric hindrance 효과로 탄소나노튜브를 분리시켜 다시 번들이 되는 것을 막아 분산력을 증가시킨다. 이러한 방법은 메틸메타크릴레이트 뿐만 아니라 스티렌(styrene), 아크릴릭산(acrylic acid) 등 다양한 고분자에 적용될 수 있어 유기용매뿐 아니라 수용성 용액 내에서도 탄소나노튜브를 분산시킬 수 있다.^{6,7}

π 전자 상호작용을 이용한 비공유 기능기화에는 피렌 외에 포르피린(porphyrin) 또한 많이 연구되고 있다.⁷⁻⁹ 포르피린은 피롤(pyrrole)과 같은 이종고리의 탄화수소 4개가 메틴(methine, =CH-)으로 연결된 모양의 고리형 거대분자(cyclic macromolecule)로서, 철, 마그네슘, 아연 등과 같은 여러 금속들과 배위결합하여 복합체(complex)를 형성할 수 있다. 포르피린 또한 고리형 분자이므로 탄소나노튜브 벽면과 상호작용할 수 있는 동시에 결합된 금속을 이용하여 특정 금속을 탄소나노튜브에 흡착시킬 수 있다. 유기분자로 개질된 복합 포르피린(conjugated porphyrin)은 이온성을 띠기도 하고, 유기용매나 수용액 모두에 녹을 수 있어 다양한 용매에서 탄소나노튜브를 기능기화 할 수 있다.

고분자 사슬 내에 벤젠링을 가지고 있는 공액고분자(conjugated polymer)는 나노튜브 벽면과 π 전자 상호작용을 하며 나노튜브를 감싸는 모양(wrapping)으로 기능기화가 일어난다. 이러한 공액고분자로는 poly(metaphenylene vinylene) (PmPV), poly(arylene-thiophylene)s (PPE), poly{(2,6-pyridinylenevinylene)-co-[(2,5-dioctyloxy-p-phenylene) vinylene]} (PPvPV), Poly{(5-alkoxym-phenylenevinylene) (PAmPV) 등이 잘 알려져 있다.¹⁰⁻¹² A. Star 등은 PmPV 고분자를 합성하여 탄소나노튜브와 복합체를 만든 결과 순수 고분자일 때보다 8배 이상의 전기전도도의 향상을 관찰했다. 또한 UV/Vis 흡수 파장으로부터 이것이 고분자의 사슬과 탄소나노튜브 벽면의 π 상호작용으로 인한 것이라고 결론지었다.¹⁰ 그들은 이 복합체를 이용하여 광전지(photovoltaic) 특성도 평가하였는데, 흡수된 광자(photon)의 신호가 상당히 증가한 것으로 보

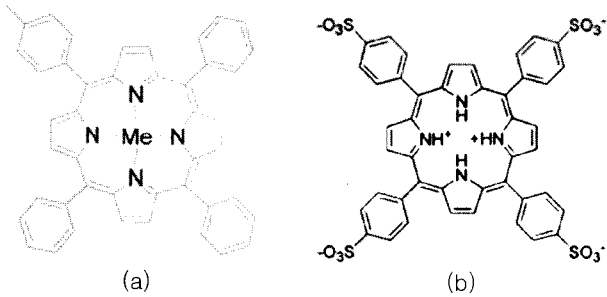


그림 3. (a) 금속과 배위결합한 포르피린(porphyrin)과 (b) 수용성으로 개질한 포르피린.

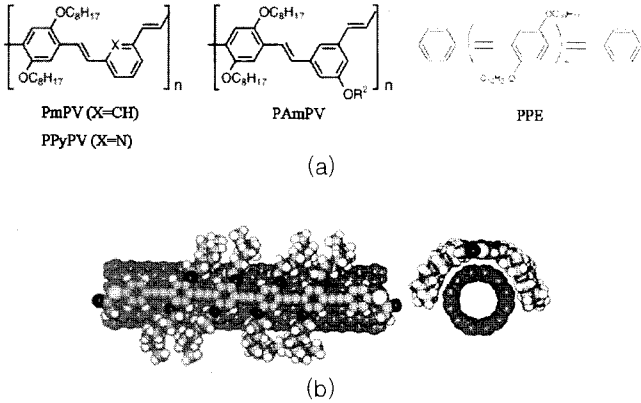


그림 4. (a) 공액고분자 PmPV, PPyPV, PAmPV, PPE, (b) 탄소나노튜브와 PPE의 상호작용 모식도.

아 고분자와 나노튜브 사이에 공고한 전기적 접촉이 이루어져 있음을 알 수 있었다. 또한 이러한 고분자를 개질하여 복합체 제조시 분자 스위치나 분자 액츄에이터로의 응용 가능성을 제시 하였다.¹¹ J. Chen 등은 PPE 고분자 사슬의 강직함(rigidity)의 정도를 조절하여 나노튜브와 고분자 사이의 거리를 조절하고 그에 따라 π 전자 상호작용을 조절하여 나노튜브의 용해도를 제어할 수 있음을 발표하였다.¹²

2.2 양친매성 분자를 이용한 비공유 기능기화

계면활성제와 블록 공중합체를 이용한 비공유 기능기화는 보통 소수성 상호작용(hydrophobic interaction)과 같은 반데르발스 결합을 이용한 방법이다. 계면활성제를 이용한 기능기화는 탄소나노튜브의 비공유 기능기화 중에 가장 먼저 제시된 방법임과 동시에 가장 간단한 방법으로서, 계면활성제는 소수성 꼬리가 나노튜브 표면에 물리흡착(physisorption)을 하고, 친수성 머리가 용매 쪽을 향하는 모양으로 정렬한다.^{13,14} 나노튜브의 소수성 표면이 친수성 용매와 만나는 것을 최소로 하기 위해 계면활성제가 표면을 감싸는 원리인 소수성 상호작용으로 기능기화가 이루어 지므로 수용액 상에서 효과적이다. 음이온, 양이온, 비이온 계면활성제가 모두 이용될 수 있으며, sodium dodecyl sulfate(SDS), Tween 20, Triton X-100, NaDDBS, octadecyltrimethylammonium bromide(OTAB) 등이 주로 사용된다.¹⁵⁻¹⁸ M. F. Islam 등은 그림 5와 같이 음이온과 비이온 계면활성제가 탄소나노튜브 표면에 흡착하는 모습과 머리부분과 꼬리부분의 특성에 따른 나노튜브 분산능력을 비교하였다.¹⁷ 꼬리부분에 더 긴 알킬(alkyl) 사슬이나 벤젠링을 가질수록 나노튜브의 벽면과 상호작용할 수 있는 확률이 높아지므로 나노튜브의 분산력을 증가시킬 수 있다. 또한 계면

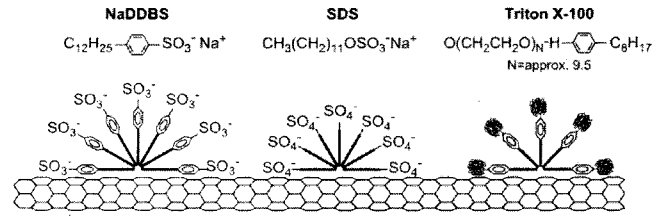


그림 5. 음이온, 비이온 계면활성제와 탄소나노튜브의 상호작용 모식도.

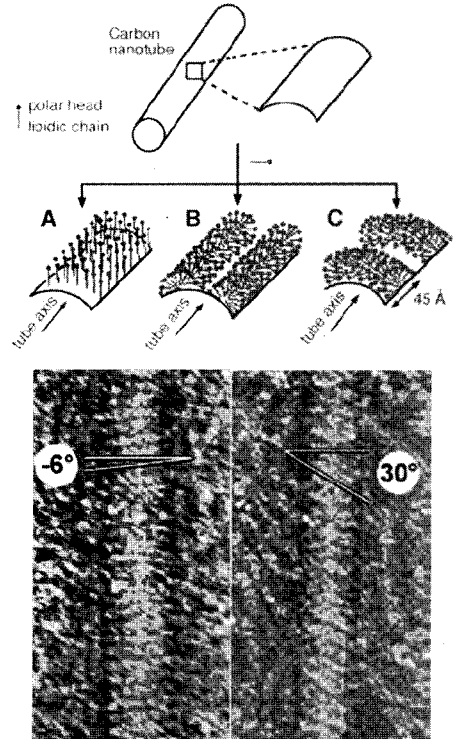


그림 6. SDS 분자의 탄소나노튜브 표면 위에서 가능한 정렬방법들과 실제 SDS와 나노튜브의 TEM 사진.

활성제 머리부분의 크기가 작고, 이온성을 떨어뜨릴수록 패킹 밀도(packaging density)가 높고 같은 이온끼리의 정전기적 반발력이 작용하여 나노튜브가 다시 번들을 형성하는 것을 막아준다.

C. Richard 등은 SDS가 나노튜브 위에서 어떻게 자기조직화 하는지를 TEM 관찰을 통해 밝혔다.¹⁸ SDS와 같은 음이온 또는 양이온 계면활성제는 나노튜브의 나선구조를 따라 나노튜브를 감싸며 주기적 나선줄모양으로 정렬하지만, 비이온 계면활성제는 이러한 주기적 정렬없이 단지 π 전자 상호작용으로 코팅되어 있음이 밝혀졌다. 이는 이온성 계면활성제의 경우, 전하를 띠고 있는 머리부분이 서로 정전기적 반발력을 일으켜 일정한 간격을 두고 정렬을 하게 되고 꼬리부분은 나노튜브의 나선구조를 따라 흡착되지만, 비이온 계면활성제는 전하를 띠지 않는 머리부분이 단지 수용액 상에서 계면에너지치를 낮추는 역할만 하고 정렬에는 영향을 미치지 못하기 때문이다.

소수성 부분과 친수성 부분이 함께 존재하는 블록 공중합체 또한 양친매성 분자로서 탄소나노튜브를 기능기화시킬 수 있다. polystyrene-block-poly(ethylene oxide) (PS-PEO), polystyrene-block-poly(4-vinylpyridine) (PS-*b*-P4VP), polystyrene-block-poly

(acrylic acid) (PA-PAA) 등이 나노튜브의 기능기화가 가능한 블록 공중합체들이다.^{17,19-20} 이들 블록 공중합체는 계면활성제와 마찬가지로 소수성 블록이 나노튜브 표면에 반데르발스 결합으로 흡착되고, 친수성 블록이 용매 내에서 분산을 도와주는 역할을 한다. Y. Kang 등은 DMF 용매 내에 PS-PAA와 나노튜브를 분산시키고 물을 조금씩 첨가하면서 미셀(micelle)을 형성시켜 소수성 코어(core)인 PS에 나노튜브를 가두고 친수성 쉘(shell)인 PAA를 교차결합(crosslinking)시키는 방법으로 탄소나노튜브를 미셀 캡슐화하였다.²⁰ 이 방법은 탄소나노튜브를 수용액 상에서 안정적으로 분산시킬 수 있고, 다른 용매에 녹인 후에도 나노튜브의 기능기화가 그대로 유지된다는 장점이 있다.

2.3 작용기를 이용한 비공유 기능기화

작용기를 이용한 비공유 기능기화는 나노튜브 표면에 카르복시기(-COOH)를 유도하고 이를 아민기(-NH₂)와 같은 작용기와 수소결합 또는 양성이온 결합(zwitterion interaction)을 통해 기능기화시키는 방법이다. 흔히 이온성 기능기화(ionic functionalization)라고도 불리는 이 방법은 기존의 비공유 기능기화와 비교해 산처리(acidic treatment)를 통해 나노튜브 표면에 미리 카르복시기를 형성시켜야 한다는 점으로 차별화된다. 나노튜브 표면에 카르복시기를 형성시키기 위한 산처리는 보통 질산이나 질산과 황산의 혼합용액(1:3 v/v)을 이용하여 이루어진다.²¹ 이러한 기능기화 방법은 M. A. Hamon 등에 의해 가장 먼저 소개되었는데, 그들은 탄소나노튜브 표면의 카르복시기와 옥타데실아민(octadecylamine)의 아민기를 반응시켰다.²² 그림 8에서 보여지듯이 카르복시기와 아민기를 반응시켰을 때 카르복시기의 수소(proton) 하나가 아민기로 옮겨가면서 각각 양전하와 음전하를 띠면서 양성이온 결합(zwitterion interaction)을 이룬다. J. Chen 등도 옥타데실아민을 이용하여 전길이(full length)의 나노튜브를 분산시켰다.²³ 이 방법은 카르복시기와 아민기를 공유 결합시킨

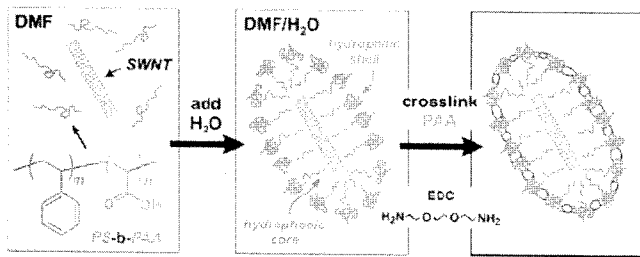


그림 7. PS-PAA 블록공중합체를 이용한 탄소나노튜브의 미셀 캡슐화.

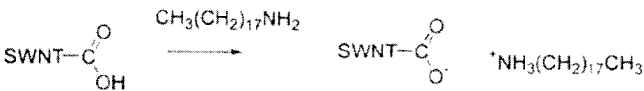


그림 8. 탄소나노튜브의 카르복시기와 옥타데실아민의 아민기의 양성이온 결합(zwitterion interaction).

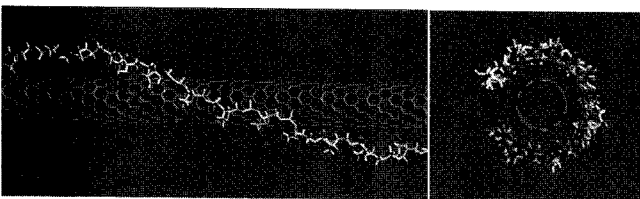


그림 9. 외가닥 DNA로 감싸인 (10,0) 탄소나노튜브의 결합 모델.

공유 기능기화보다 수율이 높고, 합성 공정이 생략되어 간단하고 저렴하며, 양이온을 가지고 있는 유/무기 분자에서 모두 응용 가능하다는 장점이 있다. M. Wang 등은 amine-terminated poly(ethylene oxide) (PEO-NH₂)을 이용하여 고분자 기질 내에서 탄소나노튜브의 분산성과 기질과의 접착력을 증가시켜 복합체의 기계적 성질을 증가시켰으며, A. B. Bourlinos 등은 poly(ethylene glycol)-(PEG-) substituted tertiary amine과 산화된 나노튜브를 반응시켜 35 °C의 낮은 용융점을 갖는 양친매성 유도체를 합성하였다.^{24,25}

C. Velasco-Santos 등은 표면에 카르복시기로 작용기화 되어있는 폴리스티렌 라텍스를 탄소나노튜브와 수소결합시켜 유도체를 만들었다.²⁶ 카르복시기 한 쌍은 수소결합으로 이어질 수 있는 작용기로 폴리스티렌 나노입자와 나노튜브의 카르복시기는 서로 수소결합으로 연결되어 유도체를 만들 수 있다. 이는 DNA나 단백질과 같은 카르복시기를 가지고 있는 다른 분자들과도 나노튜브가 안정적으로 비공유 기능기화를 통해 유도체를 만들 수 있음을 보여준다.

2.4 생체 고분자를 이용한 비공유 기능기화

DNA, RNA, 펩타이드(peptide), 단백질(protein), 효소(enzyme) 등의 생체 고분자를 이용한 비공유 기능기화는 앞서 언급한 π 전자 상호작용, 반데르발스 결합, 양성이온 결합, 수소결합 등을 통하여 이루어진다. 생체고분자의 특성상 대부분 수용액 상에서 기능기화가 일어나며, 인체 적합성을 띠므로 바이오 센서나 약물전달 등의 용도로 이용될 수 있다.

DNA는 나노스케일의 소자나 유전자치료, 핵산(nucleic acid) 센싱과 같이 응용가능 분야가 다양하고 원하는 구조로 쉽게 조절 가능하여 생체 고분자 중 가장 많이 연구된 분야이기도 하다. 이를 이용한 비공유 기능기화는 대부분 DNA가 나노튜브 표면을 나선형으로 감싸면서 이루어지는 형태이고, 길이가 짧은 DNA의 경우는 나노튜브 안으로 삽입되기도 한다. M. Zheng 등은 외가닥 DNA(single strand DNA)가 π 전자 상호작용을 통해 나노튜브 표면을 나선형 구조로 감싸고, 그것이 나노튜브의 지름이나 나선성(chirality)에 따라 다양한 나선형 구조로 가능함을 밝혔다.²⁷ 또한 이를 이용하여 이온 교환 크로마토그래피를 통해 나노튜브의 전기적 성질에 따라 금속성 나노튜브와 반도체성 나노튜브로 분리할 수 있음을 보였다.^{28,29}

H. Gao 등은 길이가 짧은 DNA 올리고뉴클레오타이드(oligonucleotide)가 수용액상에서 순간적으로 탄소나노튜브 안으로 삽입될 수 있음을 시뮬레이션을 통해 보였다.³⁰ 물분자의 강한 수소결합으로 인해 생긴 소수성 상호작용 힘이 소수성 용질인 나노튜브와 DNA를 응집하게 하고 이로 인해 가까워진 나노튜브와 DNA는 반데르발스 인력을 받아 그림 10과 같이 순간적으로 DNA가 나노튜브 안에 삽입되게 된다.

DNA와 달리 아직 연구가 많이 되지 않은 RNA는 DNA와 비교하여 여러 장점을 가지고 있다. RNA는 염색체에 바로 흡수될 수 없어 돌연변이를 일으킬 가능성이 적고, 포유류의 면역체계에 인식이 잘 되지 않아 전달물질을 효과적으로 운반할 수 있으며, 효소 ribonuclease(RNase)에 의해 쉽게 제거할 수 있다. J. C. G. Jeynes 등은 total cellular RNA(tcRNA)를 이용하여 탄소나노튜브의 표면을 감싸고, 이것이 수용액상에서 계면활성제 SDS 보다 더 효과적으로 나노튜브를 분산시킨다는 것을 보였다.³¹ RNA와 나노튜브의 결합원리는 DNA와 같이 π 전자 상호작용과 반데르발스 인력의 작용이다. 또한 그들은 나노튜브를 감쌌던 RNA를 RNase로 완벽히 제거함으로써

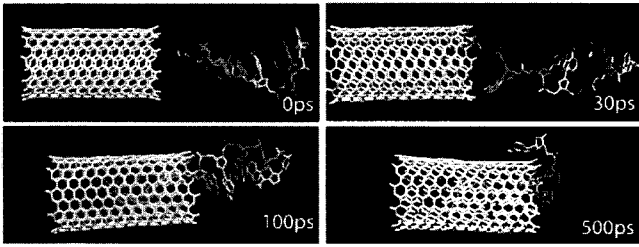


그림 10. 탄소나노튜브 안으로 삽입되는 DNA의 시뮬레이션 사진.

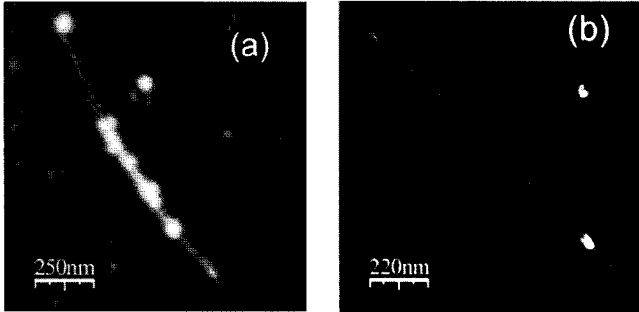


그림 11. (a) RNA로 코팅된 탄소나노튜브와 (b) RNase로 RNA가 제거된 탄소나노튜브의 AFM 사진.

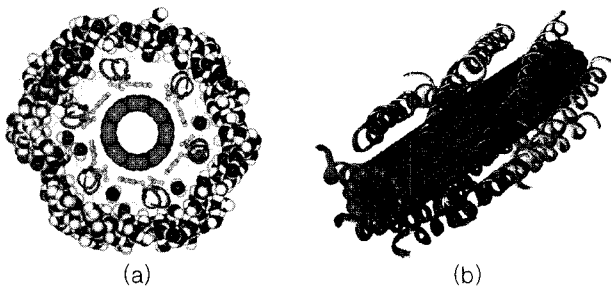


그림 12. (a) 6개의 펩타이드로 둘러싸인 나노튜브의 단면과 (b) 12개의 펩타이드로 둘러싸인 나노튜브의 비공유 기능기화 모델.

써 RNA가 나노튜브의 정제에 사용될 수 있는 가능성을 제시했다. 생체 고분자 중 비교적 분자량이 큰 단백질도 탄소나노튜브를 기능기화 하는데 이용된다. 단백질은 그 복잡한 구조와 다양한 작용기로 인해 π 전자 상호작용, 수소성 상호작용, 반데르발스 인력, 아민 작용기에 의한 양성이온 결합, 수소결합이 복합적으로 일어나며 나노튜브와 비공유 결합한다.³² 친수성/전하를 띠는 부분은 용매인 수용액과 반응하고 소수성/방향족 탄화수소를 가지고 있는 부분은 나노튜브와 반응한다. R. J. Chen은 이를 이용하여 용액상에서 선택적으로 단백질을 탐지할 수 있는 전자 바이오센서를 제작했다.³³ 이것은 나노튜브를 이용하여 간단한 전기적 소자로 다양한 단백질을 탐지할 수 있어 단백질 유전 정보학(proteomics), 질병 진단, 나노바이오기술에 중요한 응용분야가 될 수 있다.

2개 이상의 아미노산이 연결된 펩타이드 또한 탄소나노튜브를 기능기화 하는데 이용된다. DNA처럼 펩타이드도 아미노산의 순서를 조절하여 원하는 성질과 구조로 합성할 수 있어 나노튜브를 기능기화 하기 쉽게 조절할 수 있다. 트립토판(tryptophan), 페닐알라닌(phenylalanine), 티로신(tyrosine)과 같이 벤젠링을 가지고 있는 아미노산으로 이루어진 펩타이드는 나노튜브와 π 전자 상호작용을 하고, 양친

매성 펩타이드는 계면활성제처럼 소수성 상호작용을 통해 나노튜브와 반응한다.^{34,35} G. R. Dieckmann 등은 나노튜브와 비공유 결합을 할 수 있는 양친매성 펩타이드를 모델링하고 합성하여 나노튜브를 펩타이드로 코팅하였다.³⁶ 이 방법을 응용하여, 펩타이드 합성 시 특정항체를 포함시키면 패틴 된 항원 위에 나노튜브를 정렬시킬 수 있고 바이오센서로 이용할 수도 있다.

3. 결론

지금까지 본 특집에서는 탄소나노튜브의 비공유 기능기화에 관한 다양한 연구들을 살펴보았다. 앞에서 언급한 바와 같이 탄소나노튜브의 비공유 기능기화는 나노튜브의 고유 구조를 해치지 않으면서 다양한 기능을 부여할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이를 실제 복합체나 전자소자, 바이오 산업 등에 적용하기 위해서는 강력한 비공유 기능기화 방법을 확립하는 것이 중요하다. 그러나 앞서 살펴본 바와 같이 지금까지 연구되어온 방법들은 가능한 용매가 한정되어 있거나 결합을 유도해야 하는 한계가 있어 그 응용에 제한이 있는 것이 사실이다.

최근에는 바이오 센서 분야에서 탄소나노튜브에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 바이오 물질은 다른 합성 고분자에 비해 탄소나노튜브의 비공유 기능기화에 비교적 적합하여 그 응용 가능성이 기대된다. 바이오 센서 분야는 예상 시장 규모가 매우 클 뿐만 아니라 탄소나노튜브를 이용하면 간단한 전자 소자만으로 DNA, 단백질, 항원/항체 등 다양한 물질의 탐지뿐만 아니라 정렬도 가능하므로 매우 전망 있는 분야이다. 이 외에도 나노튜브의 비공유 기능기화는 전계 방출이나 전자 방출용 탐침 개발, 나노스케일의 소자를 만들기 위한 나노튜브 패틴화와 금속/반도체 나노튜브 분리 등에 매우 필수적인 기술이다. 앞으로 탄소나노튜브를 산업발전에 실질적으로 응용 가능하도록 하기 위해서는 목적에 따라 나노튜브의 표면을 개질할 수 있는 기능기화에 관한 연구가 더욱 활발히 되어야 할 것이다.

참고문헌

1. M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, and A. Jorio, *Annu. Rev. Mater. Res.*, **34**, 247 (2004).
2. S. Iijima, *Nature*, **354**, 56 (1991).
3. A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H. Dai, P. Petit, J. Robert, C. Xu, Y. H. Lee, S. G. Kim, A. G. Rinzler, D. T. Colbert, G. E. Scuseria, D. Tomanek, J. E. Fischer, and R. E. Smalley, *Science*, **273**, 483 (1996).
4. R. J. Chen, Y. Zhang, D. Wang, and H. Dai, *J. Am. Chem. Soc.*, **123**, 3838 (2001).
5. P. Petrov, F. Stassin, C. Pagnoulle, and R. Jérôme, *Chem. Commun.*, **9**, 2904 (2003).
6. G. J. Bahun, C. Wang, and A. Adronov, *J. Polym. Sci. Part A : Polym Chem*, **44**, 1941 (2006).
7. L. -S. Wan, B. -B. Ke, J. Wu, and Z. -K. Xu, *J. Phys. Chem. C*, **111**, 14091 (2007).
8. J. Chen and C. P. Collier, *J. Phys. Chem. B*, **109**, 7605 (2005).
9. Hiroto Murakami, Takuro Nomura, Naotoshi Nakashima,

- Chem. Phys. Lett.*, **378**, 481 (2003).
10. A. Star, J. F. Stoddart, D. Steuerman, M. Diehl, A. Boukai, E. W. Wong, X. Yang, S. -W. Chung, H. Choi, and J. R. Heath, *Angew. Chem.*, **113**, 1771 (2001).
 11. A. Star, Y. Liu, K. Grant, L. Ridvan, J. F. Stoddart, D. W. Steuerman, M. R. Diehl, A. Boukai, and J. R. Heath, *Macromolecules*, **36**, 553 (2003).
 12. J. Chen, H. Liu, W. A. Weimer, M. D. Halls, D. H. Waldeck and G. C. Walker, *J. Am. Chem. Soc.*, **124**, 9034 (2002).
 13. S. Bandow, A. M. Rao, K. A. Williams, A. Thess, R. E. Smalley and P. C. Eklund, *J. Phys. Chem. B*, **101**, 8839 (1997).
 14. X. Gong, J. Liu, S. Baskaran, R. D. Voise, and J. S. Young, *Chem. Mater.*, **12**, 1049 (2000).
 15. R. Bandyopadhyaya, E. Nativ-Roth, O. Regev, and R. Yerushalmi-Rozen, *Nano Lett.*, **2**, 25 (2002).
 16. V. C. Moore, M. S. Strano, E. H. Haroz, R. H. Hauge and R. E. Smalley, *Nano Lett.*, **3**, 1379 (2003).
 17. M. F. Islam, E. Rojas, D. M. Bergey, A. T. Johnson, and A. G. Yodh, *Nano Lett.*, **3**, 269 (2003).
 18. C. Richard, F. Balavoine, P. Schultz, T. W. Ebbesen, and C. Mioskowski, *Science*, **300**, 775 (2003).
 19. H. Shin, B. G. Min, W. Jeong, and C. Park, *Macromol. Rapid Commun.*, **26**, 1451 (2005).
 20. Y. Kang and T. A. Taton, *J. Am. Chem. Soc.*, **125**, 5650 (2003).
 21. J. Liu, A. G. Rinzler, H. Dai, J. H. Hafner, R. K. Bradley, P. J. Boul, A. Lu, T. Iverson, K. Shelimov, C. B. Huffman, F. Rodriguez-Macias, Y. Shon, T. R. Lee, D. T. Colbert, and R. E. Smalley, *Science*, **280**, 1253 (1998).
 22. M. A. Hamon, J. Chen, H. Hu, Y. Chen, M. E. Itkis, A. M. Rao, P. C. Eklund, and R. C. Haddon, *Adv. Mater.*, **11**, 834 (1999).
 23. J. Chen, A. M. Rao, S. Lyuksyutov, M. E. Itkis, M. A. Hamon, H. Hu, R. W. Cohn, P. C. Eklund, D. T. Colbert, R. E. Smalley, and R. C. Haddon, *J. Phys. Chem. B*, **105**, 2525 (2001).
 24. M. Wang, K. P. Pramoda, and S. H. Goh, *Carbon*, **44**, 613 (2006).
 25. A. B. Bourlinos, V. Georgakilas, V. Tzitzios, N. Boukos, R. Herrera, and E. P. Giannelis, *small*, **2**, 1188 (2006).
 26. C. Velasco-Santos, A. L. Martinez-Hernandez, and V. M. Castano, *J. Phys. Chem. B*, **108**, 18866 (2004).
 27. M. Zheng, A. Jagota, E. D. Semke, B. A. Diner, R. S. Mclean, S. R. Lustig, R. E. Richardson, and N. G. Tassi, *Nature Mater.*, **2**, 338 (2003).
 28. M. Zheng, A. Jagota, M. S. Strano, A. P. Santos, P. Barone, S. G. Chou, B. A. Diner, M. S. Dresselhaus, R. S. Mclean, G. B. Onoa, G. G. Samsonidze, E. D. Semke, M. Usrey, and D. J. Walls, *Science*, **302**, 1545 (2003).
 29. M. S. Strano, M. Zheng, A. Jagota, G. B. Onoa, D. A. Heller, P. W. Barone, and M. L. Usrey, *Nano Lett.*, **4**, 543 (2004).
 30. H. Gao, Y. Kong, D. Cui, and C. S. Ozkan, *Nano Lett.*, **3**, 471 (2003).
 31. J. C. G. Jaynes, E. Mendoza, D. C. S. Chow, P. C. P. Watts, J. McFadden, and S. R. P. Silva, *Adv. Mater.*, **18**, 1598 (2006).
 32. S. S. Karajanagi, H. Yang, P. Asuri, E. Sellitto, J. S. Dordick, and R. S. Kane, *Langmuir*, **22**, 1392 (2006).
 33. R. J. Chen, S. Bangsaruntip, K. A. Drouvalakis, N. W. S. Kam, M. Shim, Y. Li, W. Kim, P. J. Utz, and H. Dai, *PNAS*, **100**, 4984 (2003).
 34. S. Wang, E. S. Humphreys, S.-Y. Chung, D. F. Delduco, S. R. Lustig, H. Wang, K. N. Parker, N. W. Rizzo, S. Subramoney, Y.-M. Chiang, and A. Jagota, *Nature Mater.*, **2**, 196 (2003).
 35. V. Zorbas, A. Ortiz-Acevedo, A. B. Dalton, M. Miki Yoshida, G. R. Dieckmann, R. K. Draper, R. H. Baughman, M. Jose-Yacaman, and I. H. Musselman, *J. Am. Chem. Soc.*, **126**, 7222 (2004).
 36. G. R. Dieckmann, A. B. Dalton, P. A. Johnson, J. Razal, J. Chen, G. M. Giordano, E. Muñoz, I. H. Musselman, R. H. Baughman, and R. K. Draper, *J. Am. Chem. Soc.*, **125**, 1770 (2003).