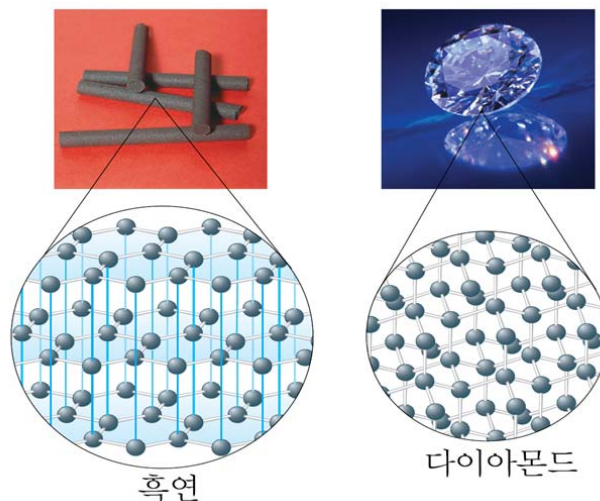


# Graphene의 최신 연구동향 1

## 1. 탄소 동소체 (Carbon allotrope)

Nanobiotechnology(나노바이오기술)는 biotechnology(생물학)와 nanoscience(나노과학)의 교차하는 지점에 존재하는 기술로써 태동한지는 얼마 되지 않았으나 매우 빠르게 발전하고 있는 연구 분야이다[1]. Nanobiotechnology(NBT)는 질병진단 및 치료, 생명연장 등 인류 삶의 질을 높이는데 큰 공헌을 할 것으로 기대되어 종종 21세기의 핵심 기술 중의 하나로 언급되고 있다. 이러한 NBT 분야에서 각광받고 있는 물질들 중에는 탄소 동소체인 플러린(fullerene), 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT), 그래핀(graphene)이 포함된다. 또한, 탄소 원자로만 구성된 탄소 동소체는 흑연(graphite), 다이아몬드(diamond)가 있다.



흑연은 sp<sup>2</sup> 혼성화를 하는 판상구조로써 축 방향으로 전자 이동이 가능하여 전도성 물질임에 반하여 다이아몬드는 sp<sup>3</sup> 혼성화를 하는 사면체 구조를 가지고 있어서 절연체이며 매우 단단하다. 흑연은 연필과 화학 공정에서 내열성 장비의 재료, 원자로에서 중성자 감속재 등에 사용되며 천연 다이아몬드는 광채가 뛰어나 보석으로 인조 다이아몬드는 단단한 경도 때문에 절삭 공구에 이용되고 있다.

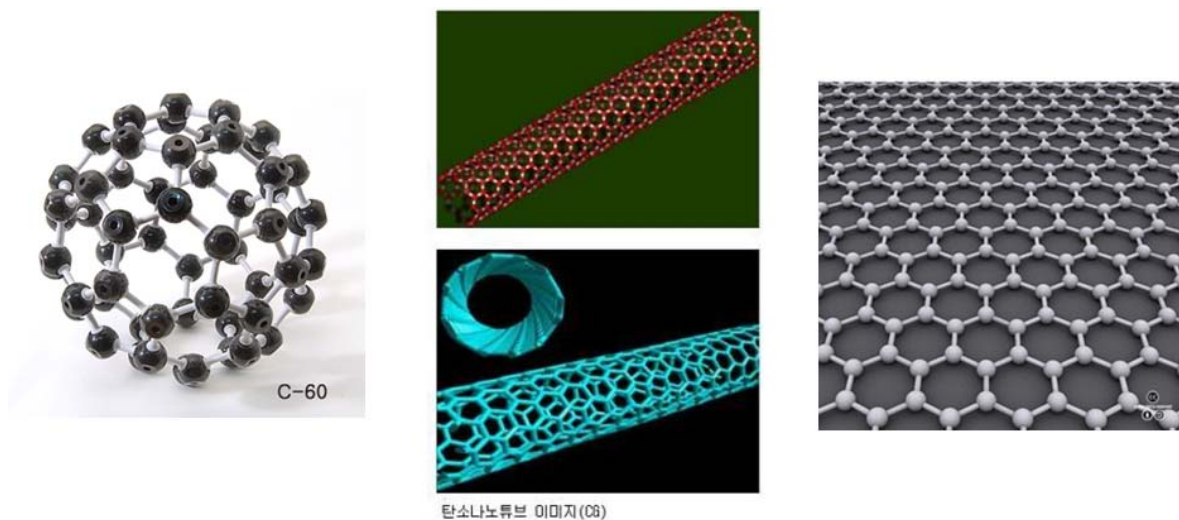
한편, NBT에서 각광받고 있는 플러린, CNT, 그래핀은 탄소 원자로만 구성되어 있는 그들의 고유한 특성들 때문에 다양한 기초 연구들과 응용들이 진행되고 있다.

## 2. Fullerene, carbon nanotube (CNT), graphene의 합성과 노벨상

세 물질 중에서 제일 먼저 발견된 것은 플러린으로 1985년에 영국학자 Kroto와 미국 과학자 Smalley와 Curl 교수에 의해서였다. 이들은 새로운 탄소화합물인 이

구조체를 '버크민스터 풀러린'이라 명명하였는데 이는 미국 건축가 R. 버크민스터 풀러가 1967년도 몬트리올 만국박람회를 위해 설계한 지오데식 돔이 이것과 똑같은 구조를 갖고 있었기 때문이다[2]. 보통 이를 풀러린이라 부르며 아래의 맨 왼쪽 그림은 풀러린의 표준 분자인 C60를 나타낸다. 기하학적으로 보면 C60은 꼭지점 60개와 면 32개를 가진 다각형인데, 그중 12개 면은 오각형이고 나머지 20개 면은 육각형으로 이루어져 있으며 내부가 비어 있다. 알칼리 금속을 내부에 도입하여 높은 온도에서 초전도성을 나타내는 특성에 대한 연구, 수지에 첨가하여 내구성이나 내열성을 높이는 연구, 날카롭고 단단한 절삭 도구나 단단한 플라스틱을 만드는 연구도 진행 중에 있다.

탄소나노튜브는 1991년 일본 전기회사(NEC) 연구소의 이지마(Iijima) 박사가 전자현미경을 통하여 처음 확인하여 Nature지에 보고하였다[3]. 이 구조체의 탄소원자 하나는 주위의 다른 탄소 원자 3개와 sp<sup>2</sup> 결합을 하여 육각형 벌집무늬를 형성하며 이 튜브의 직경이 대략 수 나노미터 정도로 작기 때문에 나노튜브라 부르게 되었다. 아래 중간 그림은 단일벽 나노튜브(singlewall nanotube; SWNT)의 모습을 보여주고 있는데 다른 구조로는 다중벽 나노튜브(multiwall nanotube; MWNT)와 다발(bundle) 등의 다양한 구조가 있다[4]. 감긴 형태에 따라 도체, 반도체의 성질을 띠기 때문에 합성 후에 이를 분리하는 것이 하나의 큰 도전과제이다. 나노 사이즈의 반도체 특성을 이용하여 차세대 전기소자로써 다양한 연구가 진행되었으나 아직까지 만족할 만한 성과가 보고되지는 않은 것으로 보인다. 2차 전지 및 초고용량 태패시터, 화학 센서, 고강도/초경량 복합재료 등에 응용하기 위한 연구들이 진행 중에 있다



그래핀은 흑연에서 한 겹만 뜯어낸 구조(위에 맨 오른쪽 그림)로써 이론적으로 많은 연구 성과들이 보고된 상태에 있다가 2004년에 최초로 영국 맨체스터 대학의

Andre Geim 교수 연구팀이 스카치 테이프를 이용하여 흑연으로부터 그래핀을 분리해냈다[5]. Graphene이라는 말의 어원은 다음과 같다. Graphite (흑연) + ene (탄소화합물을 뜻하는 접미어) = graphene, 즉 흑연으로부터 분리한 탄소화합물이라는 뜻이다. 스카치 테이프를 이용한 방법은 소면적의 그래핀(큰 것이 수십 um) 만을 제작할 수 있어서 주로 물리적 특성, 전기적 특성 등의 연구에 사용되었다. 하지만, 더 많은 응용성을 가지기 위해서는 대면적의 그래핀을 합성하는 방법이 필수적이다. 화학적으로 대면적 그래핀을 만드는 기술은 대한민국이 세계에서 가장 앞선 분야 중의 하나로 대표적인 연구자는 서울대 홍병희 교수, 성균관대 안중현 교수, UNIST 백종범 교수 등이 있다. 현재 터치 스크린, 투명전극, 전자 소자 등에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있지만, 본 연구회에서는 바이오-의학 응용에 대한 연구 동향의 소개에 주력하고자 한다.

위에서 간단하게 풀러린, CNT, 그래핀의 발견자와 특성 등에 대하여 알아보았다. 이제는 이 물질들을 발견한 연구자들과 노벨상 수상에 대하여 알아보자.

Material	노벨상 수상	연구자	수상이유
Fullerene	1996년 노벨 화학상	Smalley Kroto Curl	새로운 탄소화합물인 풀러린의 발견
CNT	미정	Iijima	×
Graphene	2010년 노벨 물리학상	Geim Novoselov	흑연에서 그래핀을 분리해낸 공로

풀러린과 그래핀을 합성한 연구팀들은 노벨상을 수상하였으나 탄소나노튜브를 발견한 이지마 교수는 아직 노벨상을 수상하지 못하였다. 또 하나 흥미로운 것은 풀러린은 노벨 화학상을 받았는데 그래핀은 노벨 물리학상을 수상하였다는 것이다. 만약 합성에서의 창의성이 높게 평가되었다면 노벨 화학상을 받는 것이 타당하겠지만 그래핀은 합성보다는 분리해낸 기술에 주안점을 주어 물리학상을 수상한 것이 아닌가 싶다. 두 물질에 대하여 노벨상 위원회에서 수상이유를 밝힌 것을 좀 더 살펴보자. 풀러린에 대하여는 “이들이 제시한 분자구조는 화학자들에게 비할 데 없이 아름답고 만족스러운 것이었다. 그것은 단일결합과 이중결합이 번갈아 나타나고, 따라서 이론적으로 매우 중대한 의미를 지닌 향기로운 3차원 체계에 해당한다.”며 높게 평가하였고 그래핀에 대하여는 “이들이 분리한 그래핀은 가장 얇으면서도 단단한 물질로써 전기 전도도가 구리보다 뛰어나고 열전도는 알려진 어

면 물질보다 우수하며 매우 투명한 물질로 새로운 물질의 창조와 혁신적인 전자 제품의 제조 등에 다양하게 응용될 수 있을 것이다. 많은 사람들이 2차원은 매우 얇은 물질인 그래핀의 분리가 불가능할 것으로 생각하였으나, 아주 손쉬운 방법인 스카치 테이프를 이용하여 간단하게 분리하였다.”며 수상 이유를 밝혔다. 한편, 2010년 노벨상과 관련하여 우리 나라에서는 콜롬비아 대학교의 김필립 교수가 공동수상자가 3명이었다면 받았을 수도 있지 않았을까? 라는 기사가 많이 발표되었다. 하지만 그것에 대하여는 명확하게 이야기할 수는 없다. 다만, 그 당시에 김필립 교수가 대단히 열심히 그래핀을 제조하기 위하여 노력했었다는 점(5겹 정도 분리 성공)과 가임 교수팀이 스카치 테이프를 이용하여 그래핀을 제조한 사이언스 논문을 보고 큰 충격에 빠졌었다가 이를 극복하고 다시 연구한 매진하고 있는 모습에 대한 동영상에 있으니 관심있는 사람들은 꼭 한번 보시기를 추천한다.

(세상을 바꾸는 15분, 188회, <http://www.youtube.com/watch?v=ObzkboQVmCQ>, 새로운 물질을 찾아서)

앞으로 탄소나노튜브도 확실한 응용분야가 산업화에 성공한다면 2014년 노벨 물리학상을 수상한 청색 LED를 연구한 일본 학자들처럼 충분히 노벨상을 수상할 수 있을 것이라 사료된다.

### 3. Graphene의 특성

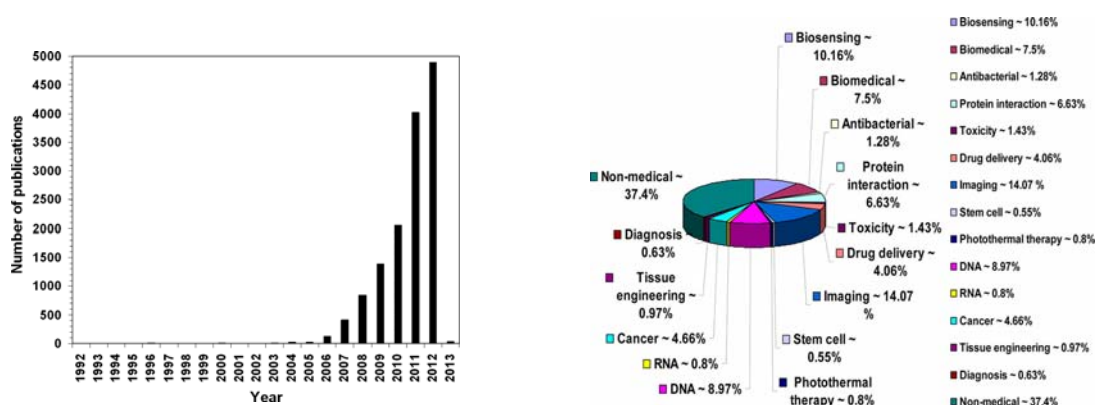
탄소원자들이 육각형의 벌집모양으로 서로 연결되어 2-D의 판상구조를 가지고 있는 그래핀의 특성을 알아보자. 4족의 탄소 원자는 3개의 다른 탄소원자와 결합되어 있고 자유롭게 움직일 수 있는 여분의 최외각 전자를 가지게 됨으로써 다른 원소의 도핑이 필요하지 않은 반도체 특성을 나타내어 매우 새로운 특성을 나타내는 물질이다. 다음 표에 몇 가지 특성을 정리하였다[6].

Properties	Characteristics
Carrier mobility	~200,000 cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> for suspended graphene ~500,000 cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> for graphene based FET
Quantum Hall effect	unusual half-integer quantum Hall effect
Transparency	~2.3% absorption for visible light
Unparalleled thermal conductivity	~5000 Wm K <sup>-1</sup>
Young's modulus	~1.1 TPa (superlative mechanical strength)
Large surface area	2630 m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>

그래핀은 위에 언급된 독특한 화학·물리적 특성들과 생체 적합성(biocompatibility) 때문에 바이오테크놀러지에서 수많은 잠재적 응용성을 가지고 집중적으로 연구되고 있다. 이와 관련된 연구 분야는 바이오센서, 질병 진단, 항균물질, 항바이러스 물질, 암타겟팅, 광열치료(photothermal therapy), 약물전달, 세포에 전기적 자극, 조직 공학 등을 포함한다.

#### 4. Graphene 관련 보고된 논문 수와 연구 분야

Scopus database(22 October 2012)를 이용하여 1992년부터 2012년까지 출판된 과학논문 제목에 그래핀이라는 단어가 들어간 논문 수의 경향을 살펴본 것이 아래 왼쪽 그림이다.



2008년부터 논문 수가 급증하는 것을 알 수 있는데 이는 최근 그래핀에 대한 과학계의 관심을 반영하는 것이라 할 수 있다. 2012년에는 5000편이 넘는 것이 확실하다. 위에 발표된 논문들 중에서 제목, 요약문, 키워드 리스트에서 나노의학 파생분야인 biosensing, biomedical, antibacterial, diagnosis, cancer and photothermal therapy, drug delivery, stem cell, tissue engineering, imaging, protein interaction, DNA, RNA, toxicity 등을 조사하여 정리한 것이 위의 오른쪽 그림이다. 그래핀이 나노바이오테크놀러지에서 매우 유용성이 있음을 보여주는 한 지표이며 바이오의학 분야에서 매우 많은 연구들이 진행되고 있음을 보여준다. 특히, 많은 연구가 진행되는 분야는 biosensing, imaging, biomedical, cancer therapy, drug delivery, protein interaction, DNA 연구이다.

최근에 특히 중요시 되고 있는 연구 분야는 그래핀의 독성(toxicity)에 관한 연구이다. 이는 그래핀을 나노의학에 다양하게 적용하기 위해서는 이에 대한 연구가 필수적이며 생체 적합성에 대한 연구는 꾸준히 증가하고 있다.

앞으로 위에서 언급된 그래핀의 나노의학 분야에 대한 최신 연구동향을 구체적으로 살펴보도록 하겠다.

## References

- [1] Rosi, N. L. and Mirkin, C. A., "Nanostructures in Biodiagnostics", *Chem. Rev.*, **105**, 1547, 2005.
- [2] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, S. F. Curl, and R. E. Smally, "C60: Buckminsterfullerene", *Nature*, **318**, 162, 1985.
- [3] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon", *Nature*, **354**, 56, 1991.
- [4] 이영희, "탄소나노튜브의 응용", *물리학과 첨단기술*, **24**, 2003.
- [5] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films", *Science*, **306**, 666, 2004.
- [6] H. Y. Mao, S. Laurent, W. Chen, O. Akhavan, M. Imani, A. A. Ashkarran, and M. Mahmoudi, "Graphene: Promises, Facts, Opportunities, and Challenges in Nanomedicine", *Chem. Rev.*, **113**, 3407, 2013.