

| 확대경 |

그래핀 소재의 개발 현황

채희엽

그래핀 소재의 원리 및 물성

그래핀(Graphene)은 탄소 원자들의 sp^2 결합으로 이루어진 벌집모양의 2차원 평면 구조 탄소 동소체이다. 그래핀은 축구공모양의 풀러렌(Fullerene, C_{60})과 원기둥 모양의 탄소나노튜브(Carbon Nanotube), 다층구조의 흑연(Graphite)과 함께 나노구조의 탄소 동소체의 한 가지로 분류될 수 있다. 2004년 영국 맨체스터 대학의 Geim과 Novoselov는 스키치 테이프를 사용하여 흑연으로부터 그래핀을 박리시켰고 이후 그래핀의 독특하고 뛰어난 물성을 확인하였으며, 이후 많은 연구자들이 다양한 응용 연구들을 진행하고 있다.

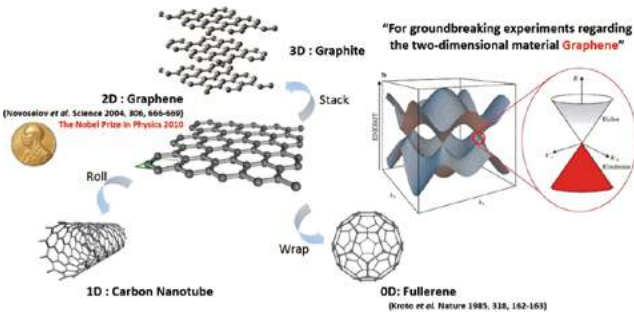
탄소 원자에 있는 4개의 최외각전자들 중에 3개의 전자는 육각형의 구조를 이루기 위해 σ -결합을 형성하고, 남은 1개의 전자들이 이루는 긴 범위의 π -공액구조(π -conjugation)로 인해 그래핀은 우수한 물리적, 전기적

특성을 가지게 된다. 그래핀은 반도체 소재의 주 원료인 실리콘보다 100배 이상의 높은 전자 이동도와, 구리보다 100배 이상의 전기전도도를 갖는다. 인장 강도는 강철의 200배 이상이며, 신축성이 좋아 10% 이상 면적을 늘리거나 구부러도 전기전도도가 감소하지 않는다. 또한 현존하는 물질 중 가장 높은 열전도도를 가지는 다이아몬드보다 2배 이상 높은 열전도성을 지닌다.

그래핀 소재의 합성 공정

단층 흑연(Monolayer graphite)의 합성은 일찍이 1975년에 B. Lang이 백금 단결정 위의 탄소를 열분해하여 그 결과 Mono-, Multi-layer 흑연이 형성되는 것을 보이면서 연구되어 왔다. 하지만 각각의 백금 결정면 위에 형성된 여러 시트들의 특성 간에 일관성 부족과 이 결과물의 유용한 응용을 정의하지 못함으로써, 이 공정은 널리 연구되지 못하였다. 하지만, 2004년에 Novoselov가 물리적 박리를 통한 그래핀 공정의 재현성을 보임으로서, 이후 그래핀 합성 공정은 물리·화학적 박리법(Exfoliation), 화학기상증착법(Chemical Vapor Deposition), 에피택셜 성장법(Epitaxial growth) 등의 방법으로 만들어지고 있다.

■ **물리적 박리법:** 테이프나 Shear Stress 등을 가하여 물리적인 방법으로 그래핀을 박리하는 방법이다. 이 방법으로는 연구에 필요한 양질의 그래핀을 얻을 수 있으나, 대면적이거나 대량생산은 어렵다. 하지만 용액내에서 회전력을 가하여 흑연으로부터 그래핀을 박리하는 공정

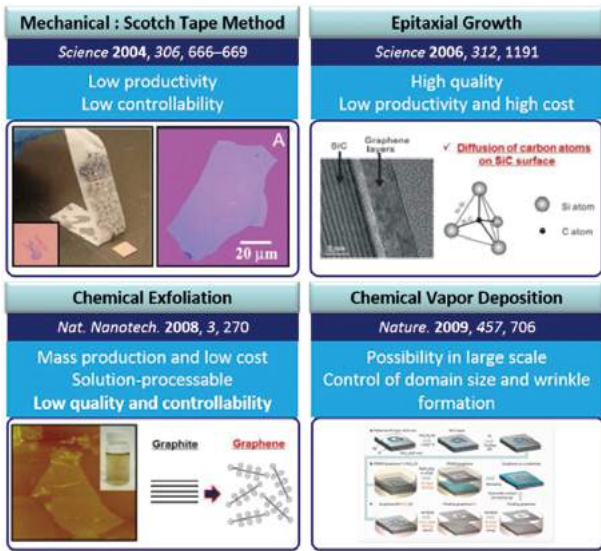


[Fig. 1] 그래핀 및 탄소동소체의 모식도와 그래핀의 밴드 구조



<저자 약력>

2000년 미국 매사추세츠 공과대학(MIT)에서 화학공학 박사학위를 받았으며, 이후 반도체 장비생산업체인 미국 Applied Materials에서 연구원으로 4년간 근무하였다. 2004년부터 성균관대학교 화학공학부 교수로 재직 중이며, 플라즈마 공정 및 장비, 양자점 발광소재 및 공정, 그래핀 소재 및 공정분야의 연구를 진행하고 있다. (hchae@skku.edu)



[Fig. 2] 그래핀의 대표적 합성방법

은 아직 초기단계이나 어느 정도 대량생산의 가능성을 보여주고 있다. 아직은 대학이나 연구소에서 연구를 진행 중이다.

■ **화학적 박리법:** 용매를 이용하는 방법으로서 강산과 산화제를 이용하여 산화흑연(Graphite Oxide)의 제조를 통한 박리를 유도한 후, 환원(Reduction) 공정 거쳐 그래핀을 얻는 방법이다. 화학적 박리법은 그래핀의 대량 생산에 가장 유리한 것으로 알려진 방법으로 알려졌지만, 강산을 이용한 흑연의 산화로 인하여 환원 후 그래핀의 결함 및 산소 작용기의 완벽한 제거가 어려운 단점이 있다. 현재 화학적 박리법에 의한 용액 그래핀을 생산하여 판매하는 기업으로는 미국의 Angstrom Materials, Vorbeck Materials, XG Science, 영국의 Thomas

[Table.1] 그래핀 합성 공정의 비교

공정 방법	박리법		성장법	
	물리적	화학적	화학기상 증착	에피택셜
특성	매우 우수	나쁨	우수	우수
전도도	매우 우수	낮음	우수	우수
크기	~ 100 μm	~ 100 μm	~ 30 inch	SiC wafer
공정 난이도	쉬움	쉬움	복잡	보통
대량 생산	어려움	가능	가능	어려움

Swan, 중국의 Sixth Element Materials등이 대략 연간 수십톤에서 수백톤의 생산이 가능한 것으로 알려져 있다. 하지만 화학적 박리법에 의한 그래핀은 많은 결함으로 인하여 물성이 좋지 않다. 효과적인 환원공정을 통하여 물성을 향상시키는 노력이 진행 중이다.

■ **화학기상증착법:** 화학기상증착법(Chemical Vapor Deposition)은 고온에서 Ni, Cu, Pt 등과 같이 탄소에 쉽게 흡착되는 금속을 SiO₂ 기판 위에 촉매층으로 증착하고, 메탄, 수소 등이 존재하는 혼합가스 분위기와 1,000℃ 이상의 고온조건에서 탄소가 촉매층과 반응한 후, 냉각을 시키면 촉매층에 녹았던 탄소원자들이 표면에서 결정화 되어 그래핀을 형성하는 공정이다. 이 방법으로 대면적 그래핀 형성이 가능하며 국내의 Graphene Square와 유럽의 Gladiator등의 기업이 시제품을 생산하고 있다. 유연전극등으로의 활용을 위해서는 전사(Transfer), 금속기판 에칭등의 추가 공정이 필요하다. 현재 공정단가를 낮추기 위해 Roll-to-Roll 공정등 대량생산 공정 개발이 진행되고 있다.

■ **에피택셜 성장:** 에피택셜 성장법은 실리콘 카바이드(SiC) 등의 탄소가 결정 구조에 흡착, 포함되어 있는 재료를 1,500℃의 고온에서 열처리하면 실리콘이 증발되고 SiC중의 탄소가 결정 표면을 따라 그래핀을 형성하게 된다. 이 공정은 다른 공정에 의해 형성된 그래핀보다 좋지 않은 물성을 가지며, 재료가 비싸고 공정이 복잡하다는 단점이 있다.

그래핀 소재의 응용

우수한 물성으로 인해 그래핀 소재는 매우 폭넓게 응용될 가능성을 가지고 있다. 투명 디스플레이, 발광소재, 에너지, 전극 재료 등의 분야에 응용할 수 있는 연구들이 진행되고 있다.

■ **투명전극:** 투명전극으로 사용되고 있는 대부분의 소재는 현재 ITO(Indium Tin Oxide)가 사용되고 있는데, 특히 유연투명전극 소재로 그래핀이 연구되고 있으며 산업화가 가장 활발히 진행되는 분야이기도 하다. 화학기상 증착에 의한 그래핀은 비교적 넓은 면적으로 금속기판위에 성장이 가능하며, 그 성능이 용액공정 그래핀에 비하여 이상적인 그래핀에 가까운 편이며 면저항의 경우 수십Ω/□가 보고되고 있다. 유연 투명전극과 터치패널 응용 시제품이 발표된바 있다. 화학기상증착공정의 경우 진공상태에서 증착이 필요하고, 전사공정을 거치며, 금

속기판을 녹이는 에칭공정이 필요하여 아직은 투자비와 비용이 높아 본격적인 상업화가 이루어지지 않고 있다.

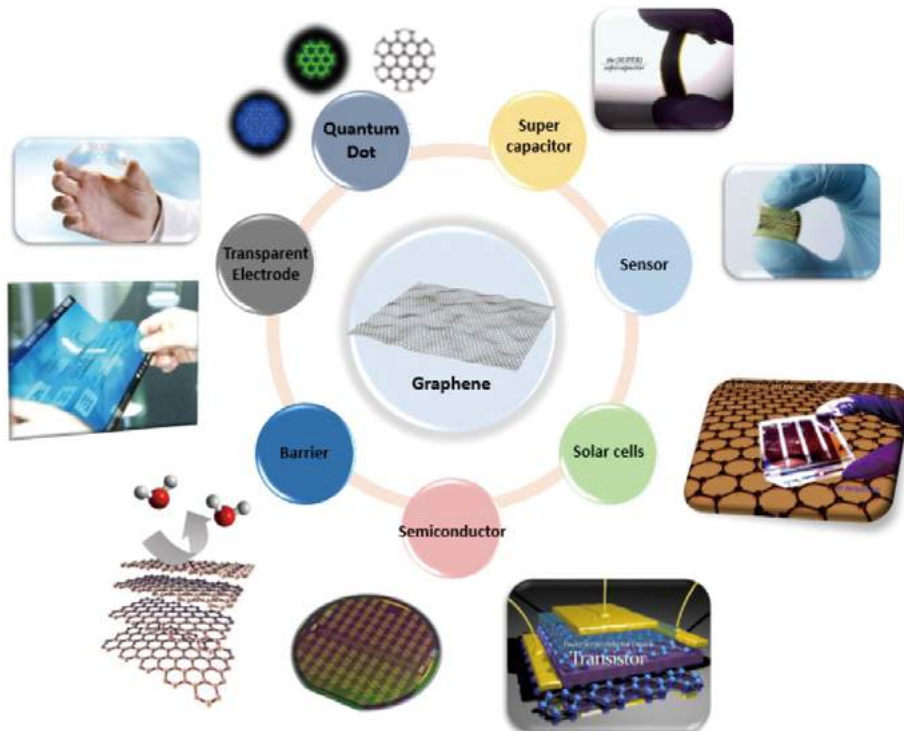
용액공정으로 만들어진 그래핀은 높은 저항으로 투명 전극으로 사용이 부적합하나 최근에는 은 나노선(Silver Nanowire)과 그래핀을 혼합하여 낮은 면저항과 높은 광 투과도를 가지는 투명 전극에 관한 연구가 진행되고 있다. 하지만 이들 용액 그래핀의 전기적, 물리적 물성은 이상적이 그래핀에 크게 못미치고 있다. 예를 들어, 면저항의 경우 수백 Ω/\square 수준으로 디스플레이용 투명전극에 적합하지 않다.

■ **발광소재:** 바이오센서와 광센서, 바이오 이미징 등 다양한 분야에 적용할 수 있는 그래핀 양자점이 최근 활발하게 연구되고 있다. 그래핀 양자점이란 도체물질인 그래핀을 반도체 형태로 만들기 위해 크기를 10 nm 이하의 점 형태로 만든 물질을 일컫는다. 이는 새로운 종류의 양자점으로, 입자가 수십 나노미터 이하인 경우 전자가 공간 벽에 의해 갇혀 반도체 특성을 갖는 점을 이용하고 있다. 연구초기 단계로서 형광 및 발광 특성이 보고되고 있다.

■ **에너지소자:** 전기 자동차 개발에 필수적인 높은 효율, 긴 수명의 2차전지(Rechargeable Battery)에 관한 수요가 증가하는 가운데, 그래핀의 넓은 표면적과 안정적인

결합 구조 등을 이용한 슈퍼 캐패시터 전극재료로 연구되고 있다. 그래핀을 둥글게 만 후, 수직 방향으로 얇게 잘라 필름을 만드는 등 그래핀의 표면적을 같은 공간 안에서 최대한 넓게 사용하도록 하는 연구들이 실제 진행되고 있다. 단위무게당 넓은 표면적을 제공하므로 용액공정의 화학적 박리법에 의한 그래핀으로 2차전지의 전극물질로 활발히 연구되고 있으며, 일부 시제품이 보고되고 있다. 그래핀소재의 상용화에 가까운 분야 중에 하나로 판단된다.

■ **기체투과방지막:** 수분과 산소에 취약한 OLED 소자를 보호하는 수분투과방지막을 그래핀으로 형성하는 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 이상적으로 결함(Defect)이 없이 대면적으로 형성된 그래핀이라면 매우 작은 분자의 기체도 투과할 수 없으나, 대면적의 결함이 없는 그래핀을 만드는 것은 아직 어려운 단계이다. 하지만 고분자 물질에 그래핀 시트를 적절히 섞어줌으로써 수분 기체가 지나는 투과 경로의 길이를 늘어나게 하여, 수분투과도(Water Vapor Transmission Rate)를 낮추는 연구가 진행 중이다. 이론적으로 이상적이거나 실제로는 많은 결함으로 아직은 낮은 기체투과방지 특성이 보고되고 있다.



[Fig. 3] 그래핀 소재의 응용