

# 그래핀의 합성, 물성 및 소자응용 기술

Synthesis, Properties, and Applications of Graphene

만물 지능 서비스를 준비하는 신기술 특집

최성율 (S.-Y. Choi)	그래핀소자창의연구실 실장
김종윤 (J.Y. Kim)	그래핀소자창의연구실 위촉연구원
최흥규 (H.K. Choi)	그래핀소자창의연구실 UST연구생
김재현 (J.H. Kim)	그래핀소자창의연구실 UST연구생
최춘기 (C.-G. Choi)	그래핀소자창의연구실 책임연구원
정태형 (T. Zyung)	전력제어소자연구팀 책임연구원

## 목 차

- .....
- I. 서론
  - II. 그래핀의 물성과 전자구조
  - III. 그래핀 합성법
  - IV. 그래핀 응용소자
  - V. 결론

2011년 현재 세상에서 가장 뜨겁게 이슈가 되고 있는 물질이 바로 그래핀이다. 탄소 원자 한 층의 2차원 물질인 그래핀은 2004년 발견된 이래 여러 가지 새롭고 우수한 물성으로 인하여 많은 연구자들의 주목을 받고 있으며, 특히 2010년 노벨 물리학상이 단일자층 그래핀을 최초로 분리한 기임과 노보셀로프 두 사람에서 수여됨으로써 전 세계의 연구자들뿐만 아니라 일반인들의 많은 관심을 끌고 있다. 그래핀은 지금까지 알려진 물질 중에 가장 얇으면서도, 전기나 열을 가장 잘 전도할 수 있을 뿐 아니라 가장 강하면서도 유연한 물질이다. 그래핀을 실질적으로 응용하기 위해서 품질이 우수한 그래핀을 대량으로 제조하고 물성을 제어할 수 있는 기술과 그래핀의 물성에 적합한 응용 소자를 개발하는 것이 그래핀 연구의 큰 주제이다. 본 고에서는 그래핀의 물리적 특성, 합성법 그리고 지금까지 연구된 여러 소자로의 응용 기술 동향을 정리하고 앞으로의 연구 전망을 소개하고자 한다.

## I. 서론

최근 실리콘 기반의 전자소자 기술이 한계에 다다르게 되면서 많은 연구자들이 한계를 뛰어넘기 위한 다양한 패러다임을 제시하고 있다. 그 중 실리콘을 대체할 물질에 대한 연구가 가장 활발히 진행되고 있으며 대체 가능물질을 이용한 결과들이 발표되고 있다. 2004년 이론적으로만 존재했던 그래핀이라는 물질을 흑연으로부터 떼어낼 수 있는 방법이 발표되면서 많은 연구자들에게 실리콘을 대체할 물질로서 주목을 받아 왔고, 대면적 성장과 물성 제어 기술에 대한 기초연구로부터 그래핀의 물성을 이용한 소자로의 응용 기술에 대해 많은 연구가 진행되고 있다.

특히 2010년 영국 맨체스터 대학의 Konstantin Novoselov와 Andrea Geim 교수가 최초로 단원자층 그래핀을 분리하여 그래핀 물성을 연구한 공로로 노벨 물리학상을 받으면서 그래핀은 모든 연구분야에서 가장 이슈가 되는 물질이 되었다. 그래핀이라는 단어는 심지어 패션잡지나 드라마를 통해서도 접할 수 있을 정도로 일반인들에게조차 친숙해지고 있어 이와 관련된 분야의 성장속도를 가늠해 볼 수 있다.

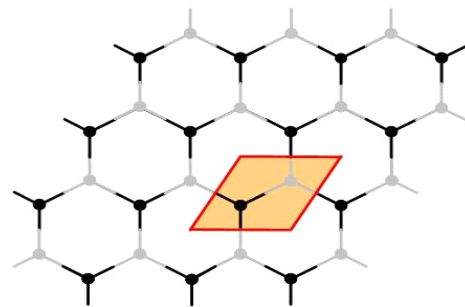
많은 연구자들은 일반적인 물질들보다 전기적, 기계적, 열적 특성 등이 월등하다고 알려진 그래핀의 본래 성질을 규명하고 분석하는 분야에 초점이 맞추어져 있으며, 규명된 물성을 이용해 다양한 응용소자로의 활용에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 따라서 본 동향에서는 그래핀의 우수한 물성, 다양한 성장방법, 그리고 소자로의 응용기술 현황을 정리하고 앞으로의 연구주제에 대해 알아보고자 한다.

## II. 그래핀의 물성과 전자구조

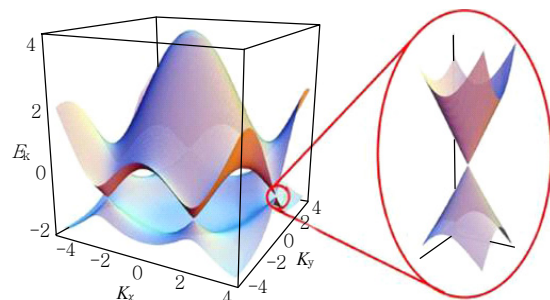
그래핀이 보여주는 높은 전자이동도, 열전도도, 강

한 기계적 특성, 유연성, 신축성 등의 우수한 성질은 그 내부에 존재하는 전자들의 특이한 성질로 설명할 수 있다. 그래핀을 구성하고 있는 탄소의 최외각 전자 4개 중 3개는  $sp^2$  혼성 오비탈( $sp^2$  hybrid orbitals)을 형성하여 강한 공유결합인  $\sigma$  결합을 이루며 남은 1개의 전자는 주변의 다른 탄소와  $\pi$  결합을 형성하면서 (그림 1)과 같이 육각형의 벌집 모양 이차원구조체를 이룬다.

(그림 2)와 같이 그래핀은 일반적인 물질과는 상이한 밴드구조를 가지며 밴드갭(bandgap)이 없어 전도성을 보이고 있으나, 페르미 준위에서 전자의 상태 밀도(DOS)가 “0”인 반금속(semi-metal) 물질이다. 또한 도핑 여하에 따라 쉽게 전하 운반자의 종류를 변화시킬 수 있는 양극성 전도특성(ambipolar conduction)을 띠게 된다. 특히 그래핀의 전자구조는 브릴루앙 영역(Brillouin zone)의 각 꼭지점에서 conduction 밴드와 valance 밴드가 만나 페르미 에너지



(그림 1) 육각형의 벌집모양 격자구조를 가진 그래핀[1]



(그림 2) 그래핀의 밴드구조[2]

근처에서 전자의 모멘텀과 에너지는 서로 비례하는 분산관계( $E \propto k$ )를 가지는 선형적인 에너지-모멘텀 분산관계(linear energy-momentum dispersion)를 보이는데, 이런 점이 그래핀의 전기적, 광학적 특성을 결정하는 중요한 요소들이다[2].

따라서 그래핀에서의 전자 운동을 표현하기 위해서는 일반적인 양자현상을 기술하는 슈뢰딩거 방정식이 아닌 특수상대론적 운동을 하고 스핀이 1/2인 입자를 기술하는 디랙 방정식(Dirac equation)을 사용하는 것이 명확하며 그 헤밀토니안(Hamiltonian)은 다음과 같다[3].

$$H = \hbar v_F \begin{pmatrix} 0 & k_x - ik_y \\ k_x + ik_y & 0 \end{pmatrix} = \hbar v_F \vec{\sigma} \cdot \vec{k}$$

위의 헤밀토니안에서  $\vec{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y)$  는 파울리 행렬이며 모멘텀은  $\vec{k} = (k_x, k_y)$  로 정의된다. 여기서 파울리 행렬  $\sigma_z$  의 고유상태인  $|\uparrow\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  과  $|\downarrow\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  은 실제 전자스핀을 의미하는 것이 아닌 (그림 1)의 honeycomb 격자구조에서 검은색과 회색으로 표시된 두 개의 독립된 단위 격자 구조에 의한 것으로 각각의 단위 격자 구조가 마치 전자의 스핀과 동일한 역할을 하게 되는 유사스핀(pseudospin)을 나타내고 있는 것이다.

위의 디랙 방정식의 해가 디랙점(Dirac point) 근처에서 선형적 에너지-모멘텀 분산관계를 가지기 위해서는 그 유효질량이 "0"이어야 하므로 그래핀의 전자는 질량이 없는 디랙입자(massless Dirac fermion)로 정의되며 이는 그래핀에서의 높은 전자이동도를 설명해 준다.

또한 단위자층 그래핀의 광투과율이( $T \approx 1 - \pi\alpha = 99.7\%$ ) 양자전기역학 이론에서 주어지는 미세구조상수(fine structure constant,  $\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c \approx 1/137$ )

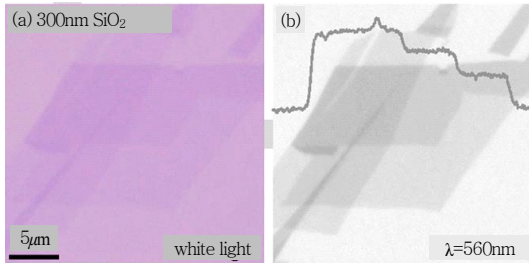
로 기술되는 점은 그래핀 물성이 양자전기역학에 기인함을 보여주는 단적인 예이다. 이 외에도 반정수 양자 홀 효과(fractional quantum Hall effect), 클라인 패러독스(Klein paradox) 등 양자전기역학적 현상 등이 실험적으로 증명되고 있지만 그래핀의 특이한 밴드구조에서 기인하는 상대론적 효과와 이를 활용한 응용소자 기술 등은 아직 초기 연구 단계에 있다고 할 수 있어 원천연구와 함께 응용분야로의 발전을 위해 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

### III. 그래핀 합성법

그래핀이 많은 연구자들에게 매력적으로 다가갈 수 있었던 이유는 우수한 물성뿐만 아니라 쉽고 간편하게 그래핀을 얻을 수 있다는 점이였다. 2004년 처음 연구자들에게 기계적 박리법(mechanical exfoliation, 일명 스킨치테입법)을 통해 선보이게 된 그래핀은 고품질 대면적 그래핀의 성장이라는 어려운 숙제를 많은 연구자에게 안겨 주었다. 그 결과 현재는 스킨치테입법 외에도 화학적 합성법, CVD 성장법, 그리고 에피택시(epitaxy) 합성법 등을 이용한 연구가 진행되고 있고 우수한 결과들이 계속적으로 발표되고 있다.

#### 1. 스킨치테입법

그래핀 연구의 불씨가 된 스킨치테입법은 초등학교도 따라 할 수 있을 정도로 매우 간단하다. 우선 흑연 플레이크(graphite flake), 일반적인 스킨치테입, 그리고 SiO<sub>2</sub> 웨이퍼를 준비한다. 준비한 플레이크를 스킨치테입에 올린 후 수 차례 접었다 폈다를 반복을 한다. 이 과정이 끝난 후 테입을 SiO<sub>2</sub> 웨이퍼에 올린 후 플레이크 자국이 남아 있는 부분을 문질러 준 후



(그림 3) 스카치테이프를 통해 300nm SiO<sub>2</sub> 기판 위에 전사된 그래핀[4]

테이프를 제거하게 되면 (그림 3)과 같이 한 층의 그래핀부터 다층의 그래핀을 광학 현미경을 통해 관찰할 수 있다.

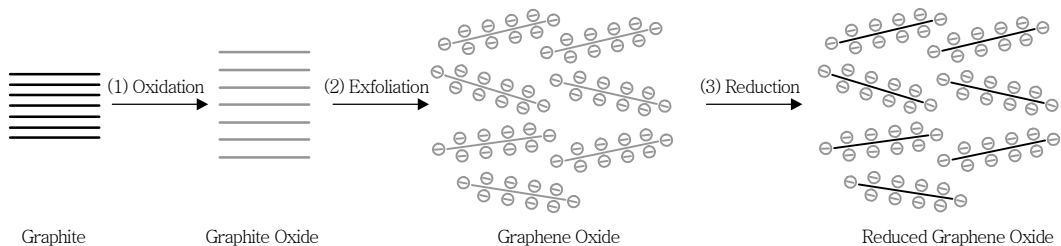
위의 방법이 가능한 이유는 그래핀의 원자구조를 살펴보면 알 수 있다. 앞서 설명한 바와 같이 그래핀은 2차원 평면상으로 3개의 탄소 원자들이 강한 공유 결합을 형성하는 반면 수직인 방향으로는 상대적으로 약한 반데르발스 힘으로 연결되어 있어 층간의 마찰계수가 매우 낮아 스카치테이프의 약한 접착력으로도 분리가 가능하게 되는 것이다. 하지만 이와 같은 방법으로 제조된 그래핀은 크기와 형태를 제어할 수 없기 때문에 소자로의 응용에 어려움이 있다.

## 2. 화학적 합성법

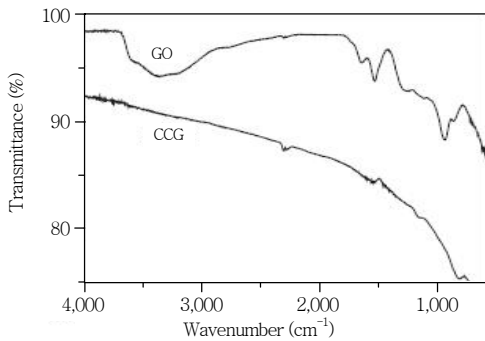
그래핀의 대면적 성장과 대량생산이라는 두 가지 목표에 가장 근접해 있는 방법으로 흑연의 산화-환원을 통한 화학적 합성법이 있다. 흑연을 산화시키는 방법은 19세기 Brodie, Schfhaeuti를 시작으로, Stau-

denmaier, Hummers와 Offeman 등 많은 연구가 되어 왔으며[5], 그 중에서 Hummers가 제안한 방법을 연구자들이 가장 많이 사용하고 있다. (그림 4)와 같이 강산과 산화제로 산화시킨 산화 흑연(그래파이트 옥사이드, graphite oxide)은 강한 친수성으로 물 분자가 면과 면 사이에 삽입되는 것이 용이하여, 이로 인해 면간 간격이 6~12Å로 늘어나 장시간의 교반이나 초음파 분쇄기를 이용하면 쉽게 박리시킬 수 있다[6]. 이렇게 얻어진 산화 그래핀(graphene oxide) 시트는 표면에 수산기와 에폭시기, 가장자리에는 카르복실기와 결합한 형태로 존재하기 때문에 그래핀 고유의 성질을 대부분 상실하게 된다. 하지만 산화 그래핀을 다시 환원시켜 산소를 포함한 작용기를 제거해 주면 다시 그래핀과 유사한 특성을 나타내기 때문에 환원 반응을 통해 작용기를 완전히 제거할 수 있는 연구가 활발히 진행 중이다.

대표적인 환원법은 액상 또는 기상인 하이드라진을 산화 그래핀에 노출시키는 방법으로 (그림 5)와 같이 대부분의 작용기가 제거된다[6],[7]. 하지만, 이 방법의 경우 지금까지 보고된 바에 따르면 환원 과정에서 유독 가스가 발생하며 질소 원자가 그래핀 시트 표면에 흡착되는 단점이 있다. 다른 방법으로는 800°C 이상의 고온에서 환원시키는 방법이 있으며 [7], 최근에는 요오드산과 아세트산 혼합물을 이용하여 불순물을 줄이고 기상과 액상에서 환원이 가능하며 저온에서 유독가스가 발생하지 않는 환원법이



(그림 4) 강산과 산화제를 이용한 그래파이트의 화학적 박리과정[6]



(그림 5) 산화 그래핀(GO)과 환원된 그래핀(CCG)의 FT-IR 스펙트럼[6]

발표되었다[8].

화학적인 그래핀 합성법은 그래핀의 물성이 다른 방법에 비해 저하되는 단점이 있으나, 기능화가 용이하고 대량생산과 대면적화가 가능하며 기판의 종류나 구조에 제약을 거의 받지 않는다는 큰 장점을 가지고 있어 이를 이용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

### 3. CVD 성장법

2009년 CVD 성장법을 이용한 그래핀의 대면적 성장이라는 놀라운 결과는 그래핀 연구의 새로운 장을 열었다고 해도 과언이 아니다. 그래핀의 대면적 성장이 이루어지면서 실제적으로 소자응용 연구가 활

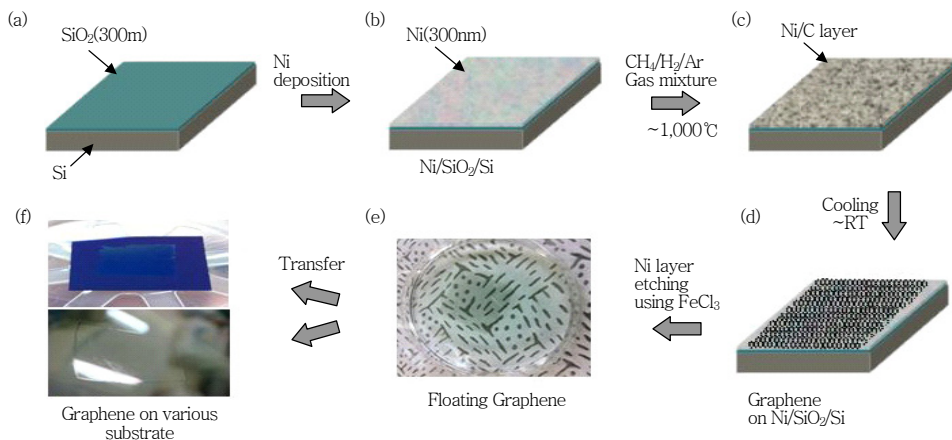
발히 이루어지고 있고, 다양한 분야의 연구자들의 참여도 활발히 이루어지기 시작했다.

(그림 6)은 CVD 성장법을 이용한 그래핀의 성장과 다양한 기판으로의 전사 과정을 보여준다. 우선 Ni, Cu, Pt 등과 같은 탄소를 잘 흡착하는 전이금속을 촉매층으로 준비한 후 1,000°C 이상의 고온에서 CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, Ar의 혼합가스를 적당량 주입한다. 고온에서 주입된 혼합가스에서 탄소가 촉매층과 반응한 후 급랭되면 촉매로부터 탄소가 떨어져 나오면서 표면에 그래핀이 성장된다[9]. 이후 식각용액을 활용해 촉매층이나 지지층을 제거하게 되면 그래핀을 분리하여 원하는 기판에 전사할 수 있다. 최근에는 PE-CVD, ICV-CVD, LP-CVD 등 다양한 CVD 성장법을 연구하여 고품질의 대면적 그래핀을 저온에서 성장하기 위한 연구가 진행 중이다.

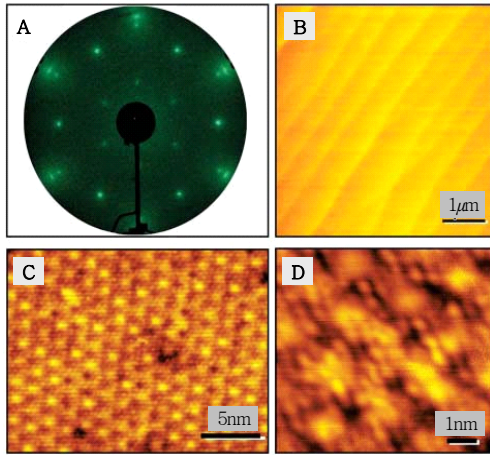
### 4. 에피택시 합성법

에피택시 합성법은 실리콘 카바이드(SiC)와 같이 탄소가 결정에 흡착되거나 포함되어 있는 재료를 약 1,500°C의 고온 분위기에서 열처리를 통해 탄소가 표면의 결을 따라 성장하면서 그래핀층을 형성한다.

(그림 7)은 에피택시 합성법을 통해 성장한 그래



(그림 6) CVD 성장법을 이용한 그래핀의 성장, 두 가지 방법을 이용한 촉매층의 식각, 그리고 원하는 기판으로의 전사[9]



(그림 7) LEED, AFM, STM을 통해 관찰한 에피택시 그래핀[10]

핀과 분석을 위해 사용한 LEED pattern을 통해 결정성이 우수한 단층 그래핀이 성장됨을 확인할 수 있다 [10]. 하지만 에피택시 성장법은 절연성 기판에 그래핀을 직접 성장하는 장점이 있으나, 이 방법으로 성장한 그래핀은 스카치테이프법이나 CVD 성장법에 의해 성장한 그래핀보다 특성이 뛰어나지 못하며 재료가 비싸고 제작이 어렵다는 단점이 있어 이를 극복하기 위한 연구가 진행되고 있다.

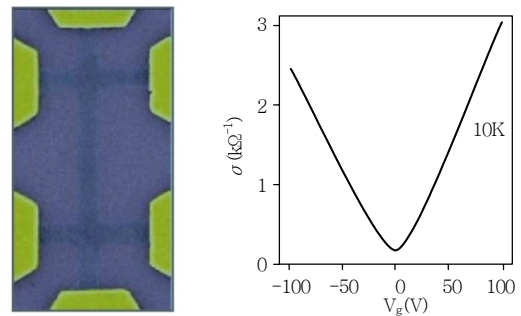
위와 같이 소개한 성장방법은 그래핀을 기반으로 하는 소자의 응용에 매우 중요한 부분이다. 따라서 소자의 응용을 위해서는 다양한 성장법과 고품질의 대면적 그래핀 성장에 관한 연구가 유기적으로 진행되어야 할 것이다.

#### IV. 그래핀 응용소자

이론적인 내용으로 알려진 그래핀의 특성들이 실제로 보여짐에 따라 많은 과학자들이 이를 응용한 소자 연구를 활발히 진행 중이며 상용화에 근접한 결과들도 쏟아져 나오고 있는 실정이다. 그래핀의 특징에 따른 소자의 응용에 대해 알아보려고 한다.

### 1. 초고속 트랜지스터

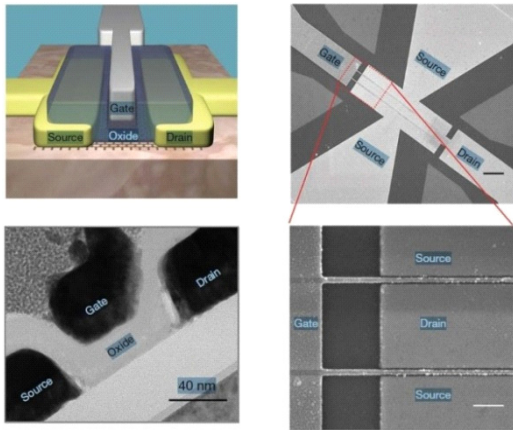
그래핀의 높은 전자이동도 특성은 많은 연구자들로 하여금 소자로의 응용을 위한 자극제로 충분히 작용하였다. 더군다나 (그림 8)과 같이 2005년에 발표된 그래핀의 전계효과 특성은 그래핀 트랜지스터 연구의 가속화를 불러 일으켰다[11].



(그림 8) 그래핀에서의 전계효과 특성[11]

하지만 그래핀의 zero-bandgap 특성으로 인해 트랜지스터 제작 시에 적은 on-off ratio를 가지는 문제점과 소자의 크기가 줄어들어 따라 잡음이 커지는 현상 등이 문제가 되었다. 이와 같은 심각한 문제들을 해결하기 위해 많은 연구자들이 나노리본, 이중층 그래핀, 그래핀의 nanomesh 구조 등에 관한 연구를 진행하여 많은 발전을 이루었고, 최근에는 고성능 플렉시블 트랜지스터에 관한 연구도 발표되었다[13]-[15].

(그림 9)는 최근 IBM 그룹에서 DLC 웨이퍼 위에 CVD로 성장한 그래핀을 이용해 제작한 RF 트랜지스터이다. 이 연구에서 발표한 그래핀 RF 트랜지스터는 현재 그래핀 트랜지스터 분야에서 가장 짧은 40nm의 게이트 길이, 155GHz의 cut-off 주파수, 그리고 극저온에서의 동작이라는 놀라운 성과를 보여주고 있다[12]. 이와 같은 결과는 그래핀의 전계효과 특성이 알려진 지 약 6년 만에 보인 결과로서 그래핀에 비해 연구기간이 긴 또 다른 탄소동소체인 탄소



(그림 9) DLC 기판 위의 초고속 그래핀 트랜지스터의 모식도와 SEM과 TEM 이미지[12]

나노튜브나 기존의 전통적인 반도체를 이용한 트랜지스터와 견주어 보았을 때 월등히 우수함을 알 수 있으며 앞으로의 발전 가능성을 전망할 수 있다.

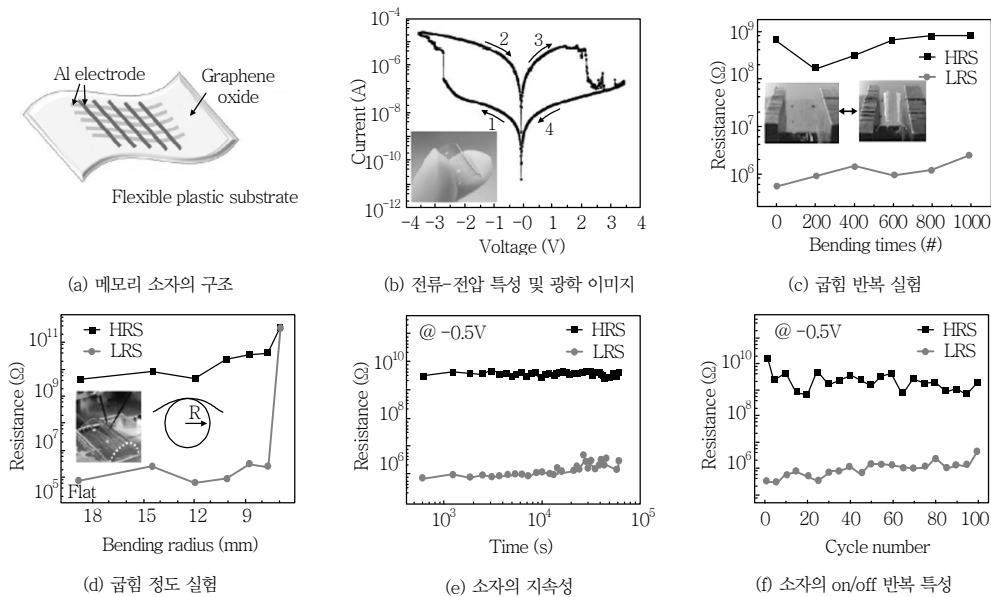
## 2. 그래핀 기반 플렉시블 메모리 소자

실리콘 기반의 메모리의 한계를 극복하기 위하여 차세대 비휘발성 메모리, 연성 메모리 소자 등에 대한

연구가 진행되고 있다. 하지만 데이터를 읽고 쓰는 처리 속도가 늦고, 연성 기판에 소자를 구현했을 때 전극과의 접합에 대한 문제와 물질 자체에서 나타나는 물성 변화의 저항성, 그리고 휘어졌을 때 금속 전극이 파괴되는 문제를 안고 있다. 이러한 차세대 메모리들의 문제점을 해결할 수 있는 방안으로 그래핀 기반의 메모리 소자가 연구되고 있으며 최근 두 가지의 문제점을 해결한 그래핀 기반의 플렉시블 비휘발성 메모리에 관한 연구결과가 본 연구실에서 발표되었다.

메모리 소자의 구현은 가장 보편적인 금속-절연체-금속 적층구조인 Al/GO/Al로 PES 플렉시블 기판에 제작하였다. 소자의 활성층인 산화 그래핀 필름은 Hummers가 제안한 화학적 방법으로 안정적인 수용성 산화 그래핀 용액을 제조하여 spin-coating 방법으로 형성하였으며, 전극 사이에 수~수십 nm 두께의 균일한 박막으로 형성되었다.

(그림 10)에서 볼 수 있듯이, 전류-전압 특성을 측정할 결과 이극성 저항 메모리 특성을 보였으며,  $I_{on}/I_{off}$  ratio는 약  $10^3$ , on/off 지속 실험은 약  $10^5$ 초, on/off



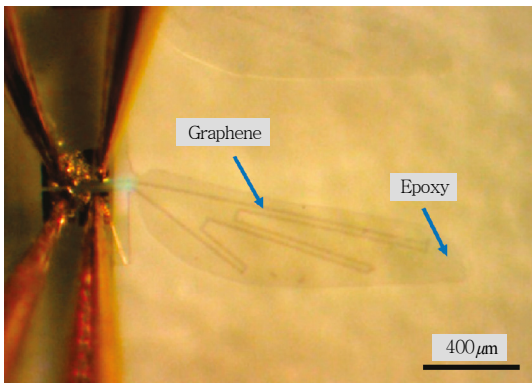
(그림 10) 플렉시블 메모리 소자구조 및 전기적 특성[16]

반복 실험은 100회 이상으로 아주 안정적인 실험 결과를 보였다. 또한, 금속 전극을 사용했음에도 불구하고  $10^3$ 회 이상의 반복 굽힘에도 메모리 특성을 잃지 않았으며, 굽혀진 정도가 약 7mm가 될 때까지 메모리 특성을 유지하였다[16]. 이 결과에서 알 수 있듯이 전기적 특성 및 안정성이 우수한 것으로 평가되며 앞으로 구조적, 물성적 개선이 이루어진다면 그래핀 기반의 메모리 소자의 출현을 기대할 수 있다.

### 3. 그래핀 생체모방 소자

전기적 특성을 물리적 에너지로 전환 가능케 하는 마이크로 액추에이터는 생체모방 응용소자 분야에서 매우 매력적이다. 생체모방 응용소자로의 사용을 위해서는 빠른 응답특성, 변위, 그리고 조절이 가능한 실제 근육의 동작을 재현하는 것이 가장 중요하다. 이와 같은 동작특성을 구현해 내기 위해 무기물질, 압전 세라믹, 폴리머를 사용한 마이크로 액추에이터를 제작하였으나 구동 가능한 온도 및 전압의 제한, 느린 응답속도, 짧은 지속성 그리고 어려운 제작 방법 등이 문제가 되어 왔다.

(그림 11)은 최근 발표된 그래핀을 이용하여 만든 바이몰프 마이크로 액추에이터(bimorph microac-



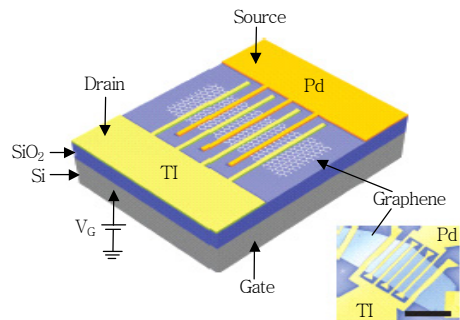
(그림 11) 그래핀을 이용해 만든 잡자리 날개 모양의 바이몰프 마이크로 액추에이터[17]

tuator)이다. 그래핀의 전기적, 기계적, 열적 특성을 이용해 제작한 마이크로 액추에이터는 저전력에서도 큰 변위, 빠른 응답속도를 가지며 온도의 증가에 따라 변위도 상승하는 우수한 특성을 보여주고 있다. 또한 제작방법도 간단하여 실제 생체모방 응용소자로서의 실현 가능성을 제시한 성과라 할 수 있겠다[17].

### 4. 광 검출기

그래핀은 한 개 층이 약 2.3%의 빛 흡수율을 가지고 있고, 가시광선 대역인 입사 빛이 0.1% 이하를 반사하며 UV 대역에서부터 테라헤르츠 대역까지 흡수한다. 이와 같은 그래핀의 특성을 이용한 광 검출기는 기존의 광 검출기와 비교하였을 경우, 보다 넓은 파장 대역에서 동작하며 응답속도 또한 매우 빨라 초고속 광 검출기로서의 구현을 가능케 한다.

(그림 12)는 최근 IBM에서 발표한 광 검출기에 관한 연구로서, 0.514, 0.633, 1.55 및 2.4 $\mu$ m 파장에서 광 응답에 대해 보고하고 있으며, 1.55 $\mu$ m 파장에서 최대 외부 광 응답이 6.1mA W<sup>-1</sup>의 결과를 얻었음을 보여주고 있다. 이 결과 값은 기존의 광 검출기보다 낮지만 이 연구에서는 단층 그래핀을 사용하여 짧은 광 캐리어 수명과 작은 유효 광 검출 영역으로 인해 광 흡수가 제한되었기 때문으로 보고 있으며, 앞으로의 발전 가능성에 대해서도 이야기하고 있다[18].



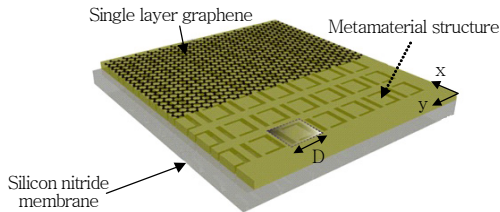
(그림 12) 금속-그래핀-금속 구조의 광 검출기[18]



## 5. 광 메타물질

메타물질은 금속이나 유전체 또는 반도체와 같은 물질로 만들어지며, 대단히 작은 반복 패턴으로 배치되어 집단적 특성이 변화된다. 그러므로 보통의 물질들로는 달성될 수 없는 방식으로 빛을 다룰 수 있게 되며, 그 대표적인 특성이 음의 굴절률이다. 음 굴절률 메타물질을 이용하면 기존 광학렌즈가 회절한계로 인해 반파장보다 작은 분해능을 갖지 못하는 한계를 극복할 수 있다.

최근 CVD로 성장한 그래핀을 메타물질의 표면에 전사하여 특성을 측정된 결과가 발표되었다. (그림 13)은 메타물질 구조 위에 한 층의 그래핀이 전사되어 있는 구조를 보여주고 있다. 이 실험을 통해 광 투과 특성이 250% 이상 향상되어 극미량의 분자 농도를 측정할 수 있는 광 센서에 사용될 수 있을 것으로 예상된다[19].



(그림 13) 상보적인 Split-ring 메타물질 구조에 그래핀을 전사한 모식도[19]

위와 같이 다양한 분야에서 그래핀이 응용소자로서 사용되고 있는 결과물들이 끊임없이 발표되고 있으며 에너지, 환경, 바이오, 헬스케어 등의 분야에서도 연구가 이루어지고 있어 앞으로의 그래핀 응용소자로서의 발전에 대한 귀추가 주목된다.

## V. 결론

2010년 노벨 물리학상을 받은 그래핀은 현재 가장 이슈가 되고 있는 신소재라는 것은 자명한 사실이

다. 본문에서 이야기한 바와 같이 그래핀의 우수한 물성은 현재 존재하는 여러 분야에 다양한 응용 가능성을 보여주고 있으며, 또한 양자전기역학적 특성은 미래의 신개념소자로의 출현을 기대하게 한다. 이러한 가능성들은 많은 사람들에게 그래핀이 현재의 실리콘 반도체 기반의 전자기술의 한계를 해결할 수도 있지 않을까 하는 기대를 가지게도 한다. 하지만 아직도 웨이퍼 스케일에서 특성이 균일한 단결정 그래핀을 성장하는 기술과 전하의 이동도를 유지하면서 밴드 갭을 열 수 있는 방법이 없으며, 그래핀의 전자구조에 적합한 새로운 패러다임의 소자가 제안되지 않고 있다는 점에서 다소 성급하다고 할 수 있다.

따라서 그래핀에 대한 본격적인 연구는 바로 지금 시작되고 있으며, 특히 전 세계가 주목하는 그래핀의 반도체 응용을 위한 원천기술에 대한 연구는 실리콘 기반의 기술과는 다르게 모든 국가가 같은 출발점에서 시작을 하고 있다. 현재 우리나라는 그래핀 성장 기술이나 응용소자 부분에서 선두그룹에 속해 있으므로 차근차근 원천기술을 확보해 나간다면 그래핀 분야에서 글로벌 리더가 될 수 있을 것으로 기대한다.

### ● 용어해설 ●

그래핀(Graphene): 탄소로만 이루어진 동소체로서 2차원 상에서 벌집모양의 배열을 가진 원자 한 층을 이야기하며 현존하는 물질 중 전기적, 기계적, 열적 특성 등이 가장 우수하다고 알려져 있다.

### 약어 정리

AFM	Atomic Force Microscopy
CCG	Chemically Converted Graphene
CVD	Chemical Vapor Deposition
DLC	Diamond-Like-Carbon
DOS	Density of State
FTIR	Fourier Transform Infrared
GO	Graphene Oxide
ICP-CVD	Inductively Coupled Plasma CVD

LEED	Low Energy Electron Diffraction
LP-CVD	Low Pressure CVD
PE-CVD	Plasma Enhanced CVD
SEM	Scanning Electron Microscope
STM	Scanning Tunneling Microscope
TEM	Transmission Electron Microscope

### 참고 문헌

- [1] Wolfgang S. Bacsa, "A Theorist's Pencil and One Layer of Carbon Atoms, Graphene," sciti-zen.com, Nov. 2007.
- [2] A.H. Castro Neto, F. Guinea, N.M.R. Peres, K.S. Novoselov, and A.K. Geim, "The Electronic Properties of Graphene," *Reviews of Modern Physics*, 2009, pp.110-155.
- [3] A.K. Geim and K.S. Novoselov, "The Rise of Graphene," *Nature Materials*, 2007, pp.183-191.
- [4] P. Blake, E.W. Hill, A.H. Castro Neto, K.S. Novoselov, D. Jiang, R. Yang, T.J. Booth, and A.K. Geim, "Making Graphene Visible," *Applied Physics Letters*, Aug. 2007, pp.91-93.
- [5] Sungjin Park and Rodney S. Ruoff, "Chemical Methods for the Production of Graphenes," *Nature Nanotech.*, Apr. 2009, pp.217-224.
- [6] Dan Li et al., "Processable Aqueous Dispersions of Graphene Nanosheets," *Nature Nanotech.*, Mar. 2008, pp.101-105.
- [7] Héctor A. Becerril, Jie Mao, Zufeng Liu, Randall M. Stoltenberg, Zhenan Bao, and Yongsheng Chen, "Evaluation of Solution-Processed Reduced Graphene Oxide Films as Transparent Conductors," *ACS NANO*, Feb. 2008, pp.463-470.
- [8] In Kyu Moon, Junghyun Lee, Rodney S. Ruoff, and Hyoyoung Lee, "Reduced Graphene Oxide by Chemical Graphitization," *Nature Communications*, Sep. 2010, pp.1-6.
- [9] K.S. Kim et al., "Large-Scale Pattern Growth of Graphene Films for Stretchable Transparent Electrodes," *Nature*, Feb. 2009, pp.706-710.
- [10] Claire Berger et al., "Electronics Confinement and Coherence in Patterned Epitaxial Graphene," *Science*, May 2006, pp.1191-1196.
- [11] K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, M.I. Katsnelson, I.V. Grigorieva, S.V. Dubonos, and A.A. Firsov, "Two-dimensional Gas of Massless Dirac Fermions in Graphene," *Nature*, July 2005, pp.197-200.
- [12] Yanqing Wu et al., "High-frequency, Scaled Graphene Transistors on Diamond-like Carbon," *Nature*, Vol.472, Apr. 2011, pp.74-78.
- [13] Y-M Lin and Phaedon Avouris, "Strong Suppression of Electrical Noise in Bilayer Graphene Nanodevice," *Nano Lett.*, Feb. 2008, pp.2119-2125.
- [14] Jingwei Bai, Xing Zhong, Shan Jiang, Yu Huang, and Xiangfeng Duan, "Graphene Nanomesh," *Nature Nanotech.*, Feb. 2010, pp.190-194.
- [15] B.J. Kim, H. Jang, S.K. Lee, B.H. Hong, J.H. Ahn, and J.H. Cho, "High-Performance Flexible Graphene Field Effect Transistors with Ion Gel Gate Dielectrics?," *Nano Lett.*, 2010, pp. 3464-3466.
- [16] Hu Young Jeong, Jong Yun Kim, Jeong Won Kim, Jin Ok Hwang, Ji-Eun Kim, Jeong Yong Lee, Tae Hyun Yoon, Byung Jin Cho, Sang Ouk Kim, Rodney S. Ruoff, and Sung-Yool Choi, "Graphene Oxide Thin Films for Flexible Nonvolatile Memory Applications," *Nano Lett.*, Oct. 2010, pp.4381-4386.
- [17] Shou-En Zhu et al., "Graphene-based Bimorph Microactuators," *Nano Lett.*, Jan. 2011, pp.977-981.
- [18] Thomas Mueller, Fengnian Xia, and Phaedon Avouris, "Graphene Photodetectors for High-Speed Optical Communications," *Nature Photonics*, Mar. 2010, pp.297-301.
- [19] Nikitas Papasimakis, Zhiqiang Luo, Ze Xiang Shen, Francesco De Angelis, Enzo Di Fabrizio, Andrey E. Nikolaenko, and Nikolay I. Zheludev, "Graphene in a Photonic Metamaterial," *Optics Express*, Apr. 2010, pp.8353-8359.