



그래핀 합성 및 응용 기술개발 동향



김종윤 연구원 (KAIST 그래핀연구센터), 최홍규 박사과정 (과학기술연합대학원대학교 차세대소재공학과)
최춘기 실장 (한국전자통신연구원 그래핀소재창의연구실), 최성울 교수 (KAIST 전기 및 전자공학과/그래핀연구센터)

1. 서론

20세기 이후 과학기술 분야, 특히 정보기술 (Information technology) 분야는 시대를 대변하는 물질에 기반을 둔 전자소자 기술의 진보를 통해 발전해 온 것을 알 수 있다. 지난 100년 동안 게르마늄, 실리콘 등 반도체 물질이 발견되면, 이런 소재의 물성에 대한 기초 연구가 빠르게 진행되고 이 신소재를 기반으로 하는 다양한 응용 연구가 진행되어 궁극적으로는 인류의 삶에 큰 영향을 주는 제품으로 발전할 수 있다. 대표적인 예로서 실리콘 집적회로는 실리콘이라는 반도체 소재와 실리콘에 가장 적합한 소자 구조인 전계효과 트랜지스터 (Field effect transistor)의 집적공정에 기반을 두어 오늘날 전자소자 및 시스템의 근간이 되어 왔다. 향후 회로형 반도체 기술의 핵심소재인 실리콘 등 무기 반도체 재료를 활용한 정보전자 기술의 한계를 극복할 수 있는 포스트 실리콘 시대의 후보 물질로서 다양한 나노 소재들이 연구되고 있는데 그 중에서도 2차원 탄소 소재인 그래핀 (Graphene)이 많은 주목을 받고 있다 (그림 1).

그래핀은 탄소 원자들이 벌집모양 (Honeycomb) 구조를 가지며 한 층을 이룬 2차원 물질이다. 1985년 발견된 풀러렌 (Fullerene, C_{60}), 그리고 1991년 발견된 탄소



그림 1. 나노·정보기술과 소재/소자 발전 단계.

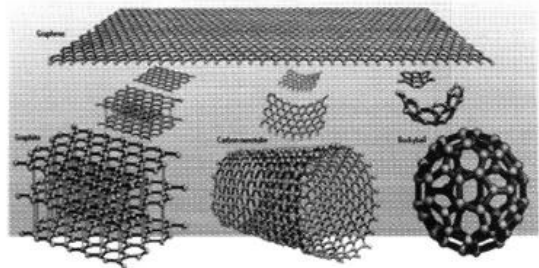


그림 2. 그래핀, 풀러렌, 탄소나노튜브 및 흑연 (그래파이트) 등 탄소동소체의 원자 구조 [2].

나노튜브 (Carbon nanotubes)와 같은 탄소 동소체 (Carbon allotropes)의 하나로 흔히 흑연을 구성하고 있는 한 원자결을 그래핀이라고 한다 (그림 2). 풀러렌과 탄소나노튜브가 발견된 이후 이들 물질에 대한 많은 연구가 진행되어 왔던 것처럼, 그래핀 발견 [1] 이후 전 세계적으로 많은 연구자들이 새로운 탄소 물질에 빠져들어 빠른 속도로 많은 연구를 진행해 왔다 [2-4].



사실 오랜 시간 동안 많은 연구자들이 단원자층으로 구성되어 양자역학적 특성이 발현되는 순수한 2차원 물질을 발견하기 위해 노력해 왔다. 2004년 영국 맨체스터 대학의 Andrea Geim 교수와 Konstantin Novoselov 박사가 최초로 단원자층 그래핀을 분리하여 그래핀 물성을 연구한 공로를 인정받아 2010년 노벨 물리학상을 수상하였고, 현재까지 그래핀은 모든 과학기술 연구 분야에서 가장 많은 관심을 받는 물질이 되었다.

그래핀은 지금까지 세상에서 발견된 가장 얇은 물질이면서 동시에 최고의 상온 전자 이동도와 가장 높은 열전도도를 가지는 물질이다. 이렇게 중요한 성질을 갖는 물질이라 해도 그래핀이 단기간에 수많은 사람들이 참여하는 연구주제로 발전하게 된 배경에는 스카치테이프로 간단하게 시편을 제작하여 연구를 시작할 수 있었기 때문이다. 또한, 그래핀에 관한 연구는 새로운 물리현상의 발견과 더불어 장차 전자·에너지 등 주력 산업과 밀접한 관계가 있는 중요한 새로운 소재 연구라는 측면에서 중요하다. 그동안 많은 연구자들은 일반적인 물질들보다 전기적, 기계적, 열적 특성 등이 월등하다고 알려진 그래핀의 본래 성질을 규명하고 분석하는 분야에 초점이 맞추어 왔으며, 규명된 물성을 이용해 다양한 응용소재로의 활용에 관한 연구를 활발히 진행하고 있다. 따라서 현 시점에서 그래핀 기술의 현황을 정리하고 앞으로의 기술개발 방향을 전망해 보는 것은 매우 시의적절하다고 여겨지며, 본고에서는 그래핀의 일반적인 물성, 합성법 및 응용기술 동향에 대해 소개하고자 한다.

2. 그래핀의 물성 [5]

1980년대 이후 반도체 박막으로 구현된 저차원 전자계의 독특한 물리적 특성에 관한 연구는 나노물리학의 시발점이 되었으며, 현

재에도 매우 중요한 연구 분야이다. 기존의 저차원 전자계는 고품질의 다층 반도체 박막을 제조하였기 때문에 고가의 분자선 에피택시 (Molecular beam epitaxy) 등의 방법을 사용하여 제조해 왔다. 반면 그래핀은 단층 탄소 원자로만 구성되어 있는 진정한 의미의 2차원 물질로서, 지구상에 풍부하게 존재하는 흑연을 박리하여 저비용으로 획득할 수 있다.

그래핀이 보여주는 높은 전자이동도, 열전도도, 강한 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 σ 결합을 이루며 남은 1개의 전자는 주변의 다른 탄소와 π 결합을 형성하면서 그림 3과 같이 육각형의 벌집 모양 이차원구조체를 이룬다. 그림 3과 같이 그래핀은 일반적인 물질과는 상이한 밴드구조를 가지며 밴드갭 (Bandgap)이 없어 전도성을 보이고 있으나, 페르미 준위 (Fermi level)에서 전자의 상태밀도 (Density of State)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 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 [6].

따라서 그래핀에서의 전자 운동을 표현하기 위해서는 일반적인 양자현상을 기술하는 슈뢰딩거 방정식이 아닌 특수상대론적 운동

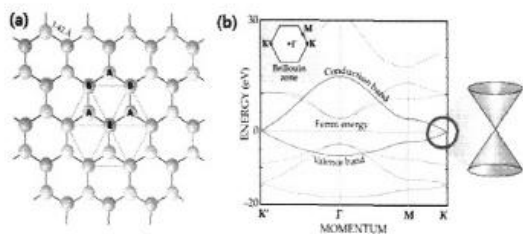


그림 3. 그래핀의 격자 구조 (a) 및 밴드 구조 (b)[3].

을 하고 스핀이 1/2인 입자를 기술하는 디랙 방정식 (Dirac equation)을 사용하는 것이 명확하며 그 해밀토니안 (Hamiltonian)은 다음과 같다.

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

위의 해밀토니안에서 $\vec{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y)$ 는 파울리 행렬이며 모멘텀은 $\vec{k} = (k_x, k_y)$ 로 정의된다. 여기서 파울리 행렬 σ_i 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 3(a)의 Honeycomb 격자구조에서 A와 B로 표시된 두 개의 독립된 단위격자 구조 (Sub-lattice)에 의한 것으로 각각의 단위격자 구조가 마치 전자의 스핀과 동일한 역할을 하게 되는 유사스핀 (Pseudospin)을 나타내고 있는 것이다.

그래핀만의 독특한 에너지띠 구조에 기인한 상대론적 디랙-페르미온 (Dirac Fermion)의 특성은 고체물리학의 범위를 넘어 입자물리학계에서도 깊은 관심을 보이고 있다. 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 전자 이동도를 설명해 준다. 또한, 단위자층 그래

핀의 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 보여 주는 단적인 예이다. 이 외에도 반정수 양자 홀 효과 (Fractional quantum Hall effect), 클라인 패러독스 (Klein paradox) 등 양자 전기역학적 현상 등이 실험적으로 증명 되고 있지만, 그래핀의 특이한 밴드구조에서 기인하는 상대론적 효과와 이를 활용한 응용소자 기술 등은 아직 초기 연구 단계에 있다고 할 수 있어 원천 연구와 함께 응용 분야로의 발전을 위해 많은 연구가 이루어 져야 할 것으로 생각된다.

3. 그래핀 합성법 [5]

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 스카치테이프법)을 통해 선보이게 된 그래핀은 고품질 대면적 그래핀의 성장이라는 어려운 숙제를 많은 연구자에게 안겨 주었다. 그 결과 현재는 스카치테이프 외에도 화학적 합성법, CVD성장법, 그리고 에피택시 (Epitaxy) 합성법 등을 이용한 연구가 진행되고 있고 우수한 결과들이 계속적으로 발표되고 있다.

3.1 스카치 테이프법

초기의 그래핀은 대부분 스카치테이프법이라는 매우 단순한 물리적 박리법에 의해 제조되었다. 우선 흑연 플레이크 (Graphite flake), 일반적인 스카치 테이프, 그리고 SiO₂ 웨이퍼를 준비한다. 준비한 플레이크를 스카치테이프에 올린 후 수 차례 접었다 폈다를 반복을 한다. 이 과정이 끝난 후 테이프를 SiO₂

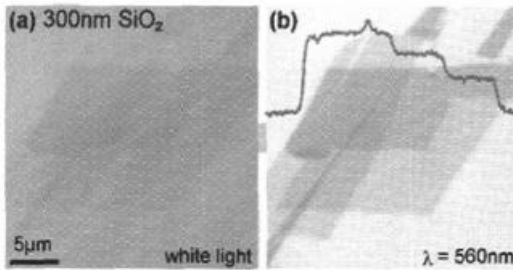


그림 4. 스카치테이프를 통해 300 nm SiO₂기판 위에 전사된 그래핀 [7].

웨이퍼에 올린 후 플레이크 자국이 남아있는 부분을 문질러 준 후 테이프를 제거하게 되면 그림 4와 같이 한 층의 그래핀부터 다 층의 그래핀을 광학 현미경을 통해 관찰할 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.

3.2 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, schfhaeutl을 시작으로, Staudenmaier, Hummers와 Offeman 등 많은 연구가 되어왔으며 [8], 그 중에서 Hummers가 제안한 방법을 연구자들이 가장 많이 사용하고 있다. 그림 5와 같이 강산과 산화제로 산화시킨 산화 흑연 (그래파이트 옥사이드, Graphite oxide)는 강한 친수성으로 물 분자가 면과 면 사이에 삽입되는 것이 용이하여, 이로 인해 면간 간격이 6~12 Å으로 늘어나 장시간의 교반이나 초음파 분쇄기

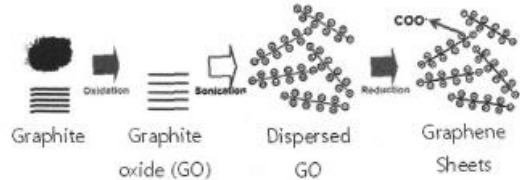


그림 5. 강산과 산화제를 이용한 그래파이트의 화학적 박리과정.

를 이용하면 쉽게 박리 시킬 수 있다 [9]. 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 노출 시키는 방법으로 대부분의 작용기가 제거된다 [9,10]. 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.

3.3 화학기상증착 (Chemical Vapor Deposition, 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 활발히 이루어지고 있고, 다양한 분야의 연구자들의 참여도 활발히 이루어지기 시작했다.

그림 6은 CVD성장법을 이용한 그래핀의

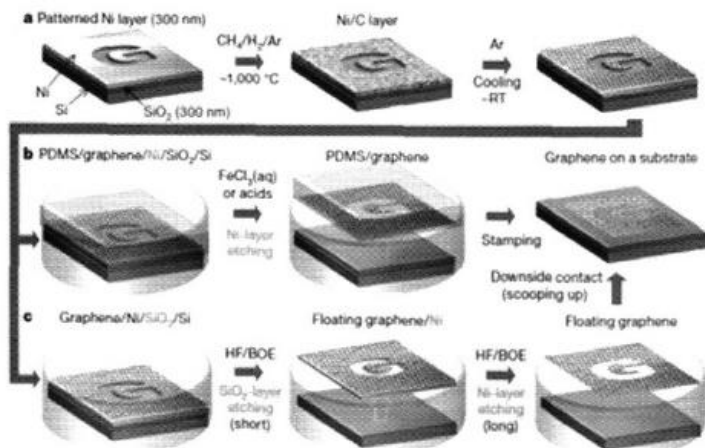


그림 6. CVD 성장법을 이용한 그래핀의 성장, 두 가지 방법을 이용한 촉매층의 식각, 그리고 원하는 기판으로의 전사 [11].

성장과 다양한 기판으로의 전사 과정을 보여 준다. 우선 Ni, Cu, Pt 등과 같은 탄화수소를 분해하는 전이금속을 촉매층으로 준비한 후 1,000°C 이상의 고온에서 CH₄, H₂, Ar의 혼합가스를 적당량 주입한다. 고온에서 주입된 혼합가스에서 탄소가 촉매층과 반응한 후 급랭되면 촉매로부터 탄소가 떨어져 나오면서 표면에 그래핀이 성장된다 [11]. 이후 식각용액을 활용해 촉매층이나 지지층을 제거하게 되면 그래핀을 분리하여 원하는 기판에 전사 할 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 7에

서 에피택시 합성법을 통해 성장한 그래핀과 LEED pattern을 통해 결정성이 우수한 단층 그래핀이 성장됨을 확인할 수 있다 [12]. 에피택시 성장법은 절연성 기판에 그래핀을 직접 성장하는 장점이 있으나, 이 방법으로 성장한 그래핀은 스키타입법이나 CVD 성장법에 의해 성장한 그래핀보다 특성이 뛰어나지 못하며 SiC 기판 재료가 비싸고 제

작이 어렵다는 단점이 있어 이를 극복하기 위한 연구가 진행되고 있다.

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

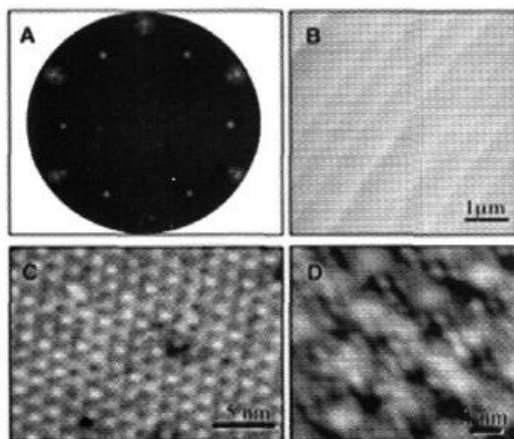


그림 7. LEED, AFM, STM을 통해 관찰한 에피택시 그래핀 [12].



5. 그래핀 응용 연구 동향 [13]

그래핀은 원자 한 층의 두께 정도로 얇아서 투명도가 뛰어나면서도 전도도가 뛰어나 디스플레이, 터치센서 및 태양전지의 전극이나 차세대 반도체소자용 신소재로 주목받고 있다 [6]. 또한, 기계적인 유연성까지 뛰어나 현재의 투명전극인 ITO를 대체하는 물질로서 산업계에서 큰 관심을 가지고 있어 앞으로 희소자원 대체재로서 부각되는 상황이다. 한편 그래핀의 전하이동도가 실리콘이나 화합물반도체보다 훨씬 크기 때문에 차세대 전자소자용 신소재로도 주목을 받고 있으며, 허용전류밀도가 커서 구리 대신 소자 사이의 전기연결 (Interconnect) 재료로 쓸 수 있고 열전도율이 좋아 방열 재료로도 관심을 끌고 있다. 또한, 그래핀의 얇지만 촘촘한 탄소-탄소 결합구조를 통해 기체나 액체 분자들이 관통하기 어렵기 때문에 이상적인 기체/물질 배리어 필름으로 활용될 수도 있다. 표 1에서 그래핀과 기존재료와의 물성을 비교하여 정리하였다.

이러한 우수한 물성으로 인하여 그래핀은 실리콘 나노전자소의 다음 세대를 이끌어갈 재료로서의 가능성으로 KISTEP 선정 10대 미래유망기술에 포함되었고, 미국 물리학회 선정 '미래 정보기술을 바꿀 가장 주목할 만한 신소재'로 소개되었으며, 그래핀 트랜지스터는 MIT 선정 10대 유망기술에 포함되는 등 관련 연구 및 연구인력

표 1. 그래핀의 물성과 기존재료와의 비교.

물성	그래핀	기존재료	비교
두께	가장 얇은 물질	NA	단원자층
전자이동도 (cm ² /v · s)	200,000	1,350 (Si)	150배
허용전류밀도 (A/cm ²)	10 ⁹	10 ⁶	1,000배
열전도도 (W/m · K)	5,300	400	13배
탄성계수 (GPa)	1,000	200 (Steel)	5배
파괴변형률 (%)	~ 20	< 1 (ITO, Si)	20배

양성이 국가의 경쟁력에 이바지하는 핵심요소로 각광받고 있다 [14].

2004년 이후 국제 논문에 발표된 논문의 수는 그래핀에 대한 기초연구 현황을 보여주는 주요 지표이다. '그래핀'이라는 키워드를 이용하여 전 세계 논문 데이터베이스를 검색했을 때, 발표 논문의 수는 2006년 649편, 2007년 723편, 2008년 858편, 2009년 1,287편으로 매년 폭발적으로 증가하는 경향을 보이는데, 이는 그래핀에 대해 전 세계적

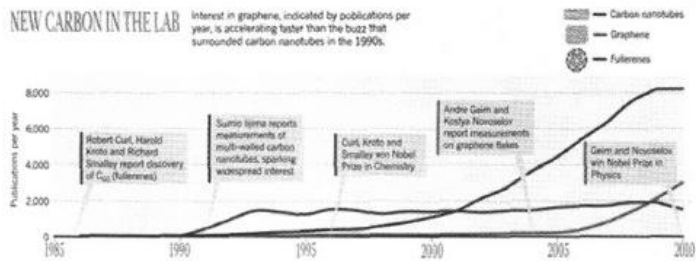


그림 8. 논문 숫자로 본 그래핀, 탄소나노튜브, 풀러렌의 연구동향 [15].

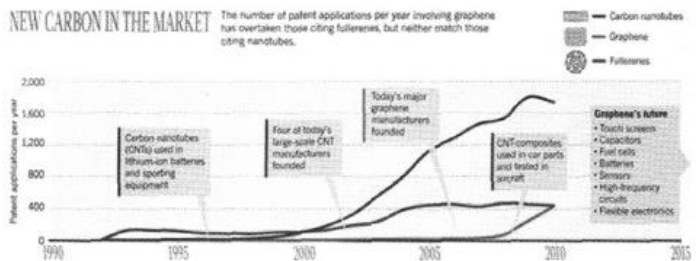


그림 9. 특허 숫자로 본 그래핀, 탄소나노튜브, 풀러렌의 상용화 기술개발 동향 [15].



으로 활발한 연구가 진행되고 있음을 의미한다. 그림 8은 풀러린, 탄소나노튜브 및 그래핀 분야의 연도별 발표 논문 수의 추이를 보여준다 [15]. 향후 그래핀 논문 발표 경향이 탄소나노튜브의 경향을 유사하게 따를 것으로 가정한다면, 그래핀 관련 연구논문은 향후 10년간 지속적으로 급격히 증가할 것이 예상된다.

이러한 그래핀 관련 연구는 기초과학적 측면에서는 양자효율과 발견과 다양한 물리 현상 규명으로 노벨 물리학상을 수상할 정도로 학문적 중요성이 입증되었다. 또한, 정보전자, 에너지, 화학 등 각 산업 분야에서 그동안 추구해온 전통적 소재를 기반으로 하는 성능 고도화 기반기술이 소재 측면과 공정기술 측면에서 서서히 그 한계에 도달하고, 현재 산업 각 분야에서 공통적으로 요구하는 신기능을 발현하는 신소재에 의한 새로운 기능의 창출에 대한 전반적 요구가 커지는 시점에 이르러 산업적 측면에서도 중요성이 커져 가고 있다 [15].

그림 9에서 보듯이 그래핀과 관련된 특허는 2005년 이후부터 출원되기 시작하여 최근 급격하게 증가하는 추세를 보이고 있다. 상용화 추세와 주요 지표로서 특허 출원의 전체적인 경향을 살펴보면 미국이 그래핀의 기초 및 응용 분야 전반에 걸쳐 두각을 나타내고 있지만, 최근 들어 한국이 그 뒤를 추격하고 있는 경향을 보이는데 이는 한국의 경우 산·학·연 연구개발을 통한 기초원천 연구로부터 상용화 기술까지의 기술이전 속도가 빠르기 때문인 것으로 파악된다.

2010년 Displaybank [16]에서 발표한 그래핀 관련 특허 출원 동향 분석에서 국가별 추이를 살펴보면, 전체 출원건수 대비 48% (554건)를 미국이 차지하고 있으며, 그 뒤를 한국이 30% (354건)를 출원하고 있다. 미국의 경우 2000년대 초반부터 출원건수가 지속적인 증가세를 보이고 있으며, 특히 2007년 이후 특허 출원이 급격히 증가하고 있고,

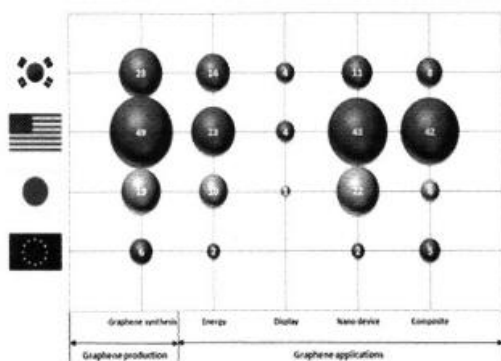


그림 10. 그래핀의 응용 분야별 핵심특허 분석 [16].

한국의 경우 최근 들어 특허 출원이 급격히 증가하여 2009년에는 150건의 특허 출원건수를 보이고 있다. 참고로 일본의 경우 2000년대 초반 다수의 특허를 출원하였으나 최근까지 양적으로 큰 성장세를 보여주고 있지 못하고 있는 것으로 파악되었다. 특히 그래핀 분야의 주요 출원인 (Top 10)을 살펴보면 삼성전자가 36% (104건)로 가장 많은 특허를 출원하고 있고, 그 뒤를 GSI가 15% (43건), KIST 14% (41건) 순을 나타내고 있는 등 Top10 기관 중 국적이 한국인 출원인이 5개를 나타내고 있어, 최근 들어 우리나라에서의 그래핀 연구의 성장세를 가늠할 수 있다.

이 보고에 따르면 [16] 그래핀의 응용 분야별 특허 수는 반도체 분야가 205건으로 특허 집중도가 가장 높으며, 다음으로는 이차전지 (142건), OLED 등 디스플레이 (127건), 경량·고강도 복합소재 (90건) 순으로 조사되었다. 특히, 우리나라의 경우는 반도체와 디스플레이 산업 강국의 면모를 보여주듯이 반도체 분야가 76건으로 가장 많은 특허가 출원되고 있으며, 다음으로 OLED 등 디스플레이 분야 (44건), 경량·고강도 복합소재 (36건), 이차전지 (30건) 순으로 특허가 출원되었다. 특허가 집중되는 분야는 그래핀의 상용화 가능성이 높고 향후 시장파급효과가 큰 분야라고 할 수 있어 상용화 기술 개발의 초



그림 11. 그래핀 소재 및 응용부품 적용 전략 기술 분야 [17].

접이 맞추어 지고 있다고 판단된다.

최근 그래핀 관련 분야의 연구는 기초과학 분야의 영역에서 그래핀의 물리적/화학적/재료적 특성에 관한 이론적, 실험적 연구 단계를 거쳐, 이를 토대로 한 다양한 응용 연구 및 현재의 산업적 인프라에 적용할 수 있는 공정 친화적 소재와 기능화 기술 연구에 이르고 있다. 불과 수년간의 연구 기간에 새로운 물성을 발현하는 소재에 대한 기초연구 단계에서 응용 및 적용 기술개발 단계까지 다다를 정도로, 그래핀 관련 연구는 그 유례를 찾기 힘든 정도로 급속한 발전 속도를 보이고 있는 것이다.

최근 우리 정부는 지금까지 그래핀 분야의 기초연구 위주 R&D 투자포트폴리오를 상용화 기술개발과 병행하여 상호 보완적인 구조로 재설계할 필요성과 산학연 협력에 의하여 그래핀 분야에 상용화를 위한 연구 인력 양성의 필요성을 인식하고 있다. 그래핀의 상용화를 위해서는 이상적 물성의 그래핀 제조 원천기술 개발, 제품적용을 위한 공정 및 양산화 기술개발 등이 필요하며, 개발되는 소재의 적용가능성 검토를 위한 테스트베드 및 전문인력 양성 등 기반구축이 요구되고 있다. 그래핀이 가지고 있는 모든 특성을 제품 특성으로 연계하여 안정적으로 구현하기 위해서는 기초·원천·응용·상용화 등 R&D 전주기에 걸친 전략적인 투자가 필요하다.

이런 요구에 부응하여 지식경제부에서는 전략기획단의 부품소재 MD실이 주관하여 디스플레이, 에너지, 복합소재 분야 관련 다양한 응용성 및 높은 미래 가치를 지닌 그래핀 소재를 조기 상용화하여, 글로벌 그래핀 시장을 선점하고, 그래핀 소재에서 완제품까지 가치사슬 (Value chain)을 포함하는 그래핀 산업과 그 생태계를 새롭게 만들어냄으로써 대·중·소 동반성장 및 새로운 일자리 창출에 기여할 수 있는 그래핀 소재 및 부품 상용화 기술 개발 사업을 추진하고 있다. 본 사업에서는 그래핀 산업 선도국 실현을 위해 그래핀 기술의 상용화를 통한 신시장·신산업 창출이 가능한 대형사업 기획한 결과로서, 디스플레이, 에너지, 및 복합소재 등 3대 핵심 기술 분야에서 상용화 비즈니스 모델을 기반으로 기존에 개발된 기초·원천기술 중 사업화 가능성 높은 9대 전략사업을 발굴하여 주력산업의 제품 경쟁력 향상이 가능한 특화된 제품 지향적 R&BD 사업을 추진하고 있다. [17]

세계적으로도 그래핀 분야는 우리나라가 기술 수준 우위를 인정을 받고 있는 만큼 조기 상용화를 통한 글로벌 시장 선점을 위해서는 상용화 및 양산화 기술개발에 정부 차원에서의 지원이 필요하며 현 시점에서 시급하다 할 수 있다. 이를 위하여 그래핀 산업의 기술 및 시장 Trend를 기반으로 사업의 비전과 목표, 추진전략과 체계를 도출하고 개발기술의 상용화를 가속화할 수 있는 프로그램으로서 정부주도 원천기술 개발 및 산업체 주도 상용기술개발을 추진하고 있다. 국내의 그래핀 기초원천 연구의 수월성을 바탕으로 산업기술과의 접목을 통해 일부 분야에서 5~7년 내에 상용화가 가능한 분야에 선별적으로 투자하여 그래핀 산업이라는 신사업 분야의 기술을 선점할 경우 미래 국가 경쟁력을 견인하는 산업으로의 발돋움이 기대된다.



6. 결론

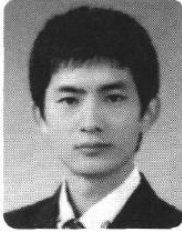
전술한 바와 같이 현재의 정보기술의 진보는 소자기술과 이를 뒷받침하는 소재기술의 발전에 따라 발전하여 왔으며, 특히, 21세기에 진입하여 회로형 반도체 기술의 핵심소재인 실리콘 등 무기 반도체 재료를 활용한 정보전자 기술의 한계를 극복할 수 있는 패러다임 전환형 소재로서 그래핀이 주목을 받고 있다. 그래핀의 발견은 2차원 물질이라는 새로운 분야를 개척하였고, 그래핀의 우수한 물성은 기초학문적인 관심뿐만 아니라 상용화 대한 관심을 집중시키고 있다. 이상적인 그래핀은 지금까지 인류에게 알려진 물질 중에서 가장 얇으면서도, 전기가 잘 통하고 투명한 특성을 가지고 있으며, 열전도율이 높고, 강하면서도 유연할 뿐만 아니라, 2차원 박막 구조로 물질을 투과시키지 않는 우수한 물성을 가지고 있다. 이런 우수한 물성으로 인하여 그래핀은 다양한 분야에 응용 가능성을 보여 주고 있는데, 단기적으로는 그래핀의 투명전극, 에너지 소재, 복합소재로의 응용분야에서 산업화가 진행될 것이고, 장기적으로는 전자 부품 및 바이오 응용 분야로 확대될 것으로 예상되고 있다. 또한, 양자 전기역학적 특성 등 특이한 물리적 특성은 미래의 신개념소재로의 출현을 기대하게 한다. 따라서 국가차원에서 그래핀 기초원천 기술과 더불어 상용화 기술에 대한 투자가 적극적으로 이루어 질 경우, 우리나라에서 그래핀 소재와 응용 핵심 기술을 확보하고 새로운 시장을 개척할 수 있을 것으로 기대한다.

참고 문헌

- [1] K.S. Novoselov et al., "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films", *Science*, 306, 666-669 (2004)
- [2] A.K. Geim and P. Kim, "Carbon wonderland", *Scientific American*, 298 (4), 68-75 (2008)
- [3] A.K. Geim and A.H. MacDonald, "Graphene: Exploring carbon flatland", *Physics Today*, 60(8), 35-41 (2007)
- [4] A.K. Geim and K.S. Novoselov, "The rise of graphene", *Nature Materials*, 6, 183-191 (2007)
- [5] 본 절은 본 연구팀에서 작성했던 다음의 기고문에서 인용하였음: 최성율, 김종윤, 최홍규, 김재현, 최춘기, 정태형, "그래핀의 합성, 물성 및 소자응용 기술", *전자통신동향분석*, 26(3), 61-70 (2011)
- [6] 최홍규, 김종윤, 김재현, 최춘기, 최성율, "그래핀 전자소자 및 광소자 응용", *고분자과학 기술*, 22(2), 154-159 (2011)
- [7] P. Blake et al., "Making graphene visible", *Applied Physics Letters*, 91(6), 063124 (2007)
- [8] S. Park and R.S. Ruoff, "Chemical methods for the production of graphenes", *Nature Nanotechnology*, 4, 217-224 (2009)
- [9] Dan Li et al., "Processable aqueous dispersions of graphene nanosheets", *Nature Nanotechnology*, 3, 101-105 (2008)
- [10] H.A. Becerril et al., "Evaluation of Solution-Processed Reduced Graphene Oxide Films as Transparent Conductors", *ACS NANO*, 2(3), 463-470 (2008)
- [11] K.S. Kim et al., "Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes", *Nature*, 457, 706-710 (2009)
- [12] C. Berger et al., "Electronics confinement and coherence in patterned epitaxial graphene", *Science*, 312, 1191-1196 (2006)
- [13] 본 절은 본 연구팀에서 작성했던 다음의 기고문에서 인용하였음. "한국의 그래핀 기술개발 동향 및 전망", *월간세라믹스*, 통권 289호, pp. 82-89 (2012)
- [14] 교육과학기술부 그래핀 원천기술개발 허브 구축 기획 보고서, 2011. 12
- [15] R. V. Noorden, "Chemistry: The trials of new carbons", *Nature*, 469, 14-16 (2011)
- [16] Displaybank, "Graphene Key Patent Analysis", 2010
- [17] 지식경제부 그래핀 소재·부품 상용화 기술 개발 사업 기획보고서, 2011.12



저자약력



성명 : 김종윤
 ◆ 학력
 • 2006년 대전대학교 응용화학과
 • 2008년 한양대학교 화학과 분석화학전공 이학석사

◆ 경력
 • 2008년 - 현재
 • 2012년 - 현재

한양대학교 화학과 분석화학전공 박사과정
 KAIST 그래핀연구센터 연구원



성명 : 최홍규
 ◆ 학력
 • 2007년 한국해양대학교 공과대학 전기전자공학부 공학사
 • 2009년 한국해양대학교 공과대학 전기전자공학과 공학석사

◆ 경력
 • 2009년 - 현재
 • 2009년 - 현재

한국전자통신연구원 연구연수생
 과학기술연합대학원대학교 차세대소자공학과 박사과정



성명 : 최춘기
 ◆ 학력
 • 1987년 성균관대학교 공과대학 금속공학과 공학사
 • 1992년 (프) U. Louis Pasteur de Strasbourg I, 기계공학과 재료전공 (D.E.A.)
 • 1996년 (프) U. d'ORLEANS 물리학과 응용물리전공 이학박사

◆ 경력
 • 1996년 - 현재

• 2006년 - 2006년
 • 2007년 - 현재
 • 2010년 - 2012년

한국전자통신연구원 그래핀소자창의연구실 책임연구원/실장
 영국 캠브리지대학교 CAPE 방문연구원
 과학기술연합대학원대학교 차세대소자공학과 교수
 한국연구재단 나노융합단 전문위원 (RB)



성명 : 최성울
 ◆ 학력
 • 1991년 KAIST 화학과 이학사
 • 1994년 KAIST 화학과 (물리화학) 이학석사
 • 1998년 KAIST 화학과 (물리화학) 이학박사

◆ 경력
 • 1998년 - 2011년

• 2006년 - 2007년
 • 2009년 - 2011년
 • 2011년 - 현재
 • 2012년 - 현재

한국전자통신연구원 그래핀소자창의연구실 실장/책임연구원
 영국 캠브리지대학교 화학과 및 CAPE 방문연구원
 과학기술연합대학원대학교 차세대소자공학전공 교수
 KAIST 전기 및 전자공학과 교수
 KAIST 나노융합연구소 그래핀연구센터 센터장

