

## 論文

## 그래핀의 연구개발 동향 및 국방과학기술 적용 방안 연구

김건웅\*

## A Study on Research and Development Trends of Graphene and Applications of Graphene on Defense Science and Technology

Geonwoong Kim\*

## ABSTRACT

In this study, physical properties and main applications of graphene are investigated and the possibility for commercialization of graphene is suggested through the analysis of R&D(research and development) trends. In conclusion, the opinion about the applications of graphene for the defense S&T(science and technology) is suggested.

Graphene is a kind of carbon nanomaterials such as CNTs and Fullerenes. It is a two-dimensional, one-atom-thick planar sheet of carbon atoms that are densely packed in a honeycomb crystal lattice. Graphene has attracted potential attention of scientists as a future material due to the excellent electrical, mechanical, thermal and optical properties. Graphene is possible to be used in various fields such as flexible displays, secondary batteries, solar cells, low-weight, high-strength composite materials and biomedical applications because of its unique properties. Graphene is not currently commercialized yet but the research for its commercialization is in progress briskly in many developed countries. The Republic of Korea has participated in the research of graphene at the early stage and has a leading position in the world. Especially we has the source technology of fabrication of large-area CVD graphene. Graphene is possible to be used for new material of various defense S&T(science and technology) fields such as E-paper, wearable display, energy storage and the reducing weight of battle equipments.

## 초 록

본 연구에서는 그래핀의 물리적 성질과 주요 응용 분야에 대해 조사하였고, 국내외 연구개발 동향 분석을 통해 그래핀의 상용화 가능성을 제시하였다. 그리고 마지막으로 국방과학기술에서의 그래핀 적용 방안에 대한 의견을 제시하였다.

그래핀은 CNT, 풀러렌과 같은 탄소나노물질로써 원자 1개 크기 두께의 2차원 벌집 모양의 구조를 갖고 있다. 그리고 전기적, 기계적, 열적 특성 등 여러 가지 물리적 성질이 우수하여 미래 소재로써 주목받고 있다. 그래핀은 우수한 특성으로 인해 플렉시블 디스플레이, 이차전지, 태양전지, 초경량 고강도 복합소재, 바이오 분야 등 여러 분야에서 다양한 응용이 가능하다. 현재 그래핀은 아직은 상용화 이전 단계이며, 해외 선진국을 중심으로 여러 분야에서의 그래핀 상용화를 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 우리나라도 그래핀 연구에 초기부터 주도적으로 참여하여 전 세계적으로 선도적 위치를 점유하고 있고, 특히 CVD 기법 기반의 대면적 그래핀 제조 원천기술을 확보하고 있다. 그래핀은 그 우수한 특성으로 인해 차세대 국방 신소재로 사용될 수 있으며, E-Paper나 웨어러블 디스플레이 등의 전자 장비뿐만 아니라 에너지 저장 장치, 전투 장비 경량화 등 다양한 국방과학기술 분야에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

**Key Words** : Graphene(그래핀), Carbon Nanomaterials(탄소나노물질), Flexible Display (플렉시블 디스플레이), Defense Science and Technology(국방과학기술)

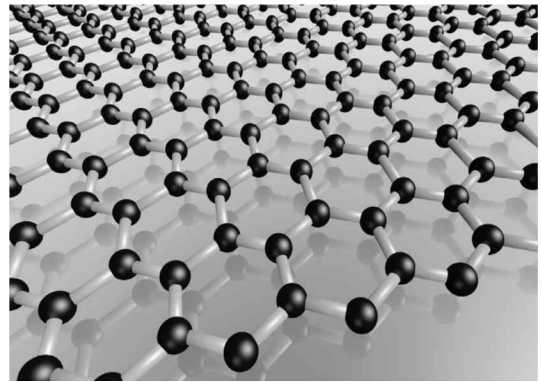
## 1. 서 론

그래핀(graphene)은 탄소나노물질로써 20세기의 신소재라는 플라스틱, 나일론, 실리콘 이후 인류 역사상 발견된 가장 획기적인 물질 중 하나이다. 그래핀은 흑연을 뜻하는 그래파이트(graphite)와 탄소 이중 결합을 가진 분자를 뜻하는 접미사 '-ene'을 결합하여 만들어진 용어이며, 흑연의 표면을 한 겹 벗겨낸 나노물질이다. <그림 1>에서 나타내는 바와 같이 그래핀은 탄소 원자로 만들어진 2차원의 벌집 모양의 구조를 가지고 있으며 단층의 그래핀은 3Å의 두께로 매우 얇은 반금속성(Semi-metallic) 물질이다.

그래핀은 2004년 영국 맨체스터대학교 연구진이 'Science'지에 발표함으로써 세상에 알려졌고, 최초로 단원자층 그래핀을 분리하는 데에 성공한 맨체스터대학교 Andrea Geim 교수와 Konstantin Novoselov 교수는 2010년에 노벨 물리학 상을 수여하였다. 특히 미국 콜롬비아대학교 김필립 교수는 그래핀 연구 분야에서 세계적으로 주목받는 학자로서 당시에 한국인 최초로 과학 분야 노벨상 후보로 오르기도 하였다.

1991년에 처음 발견되어 많은 과학자들의 주목을 받았던 탄소나노튜브(CNT: Carbon nanotube)가 여전히 노벨상 수상을 못한 것을 감안할 때, 그래핀에 대한 학계와 산업계의 폭발적인 관심은 이례적이라고 할 수 있다. 그래핀이 이와 같이 주목받은 이유는 기존의 반도체 물질에서 관찰되지 않았던 그래핀만이 가지고 있는 우수한 물리적 특성과 양산 가능성 때문이다. 또한 그래핀은 CNT와 화학적 성질은 매우 유사하지만, 감는 방향에 따라 반도체와 도체 특성이 달라지는 CNT와는 달리 금속성이 균일하여 산업적인 측면에서 훨씬 용이하다. 그래핀 상용화를 위해 대학·연구소뿐 아니라 각 기업들도 발 빠르게 그래핀 제조·양산 및 응용 시장에 진출하고 있다. <표 1>에는 각국 주요 기관에서 수행된 그래핀의 선행 연구 내용을 정리하였다.

본 연구에서 그래핀을 차세대 국산 신소재로 제시하는 근본적인 이유는 다음과 같다. 우선, 그래핀의 전자 운동은 흔히 알려진 슈뢰딩거 방정식을 따르지 않고 특수 상대론적 운동을 하며, 스핀이 1/2인 입자를 기술하는 디랙 방정식(Massless Dirac Equation)을 따른다. 이런 특이한 전자의 성질 때문에 그래핀은 2차원에서 양자 전기 역학을 고체 내에서 구현할 수 있는 물질로 평가받고 있다. 또한 그래핀은 상온·상압 조건에서 전자이동도가 매우 빠르므로 양자역학적 수송



<그림 1> 그래핀 격자구조의 모식도<sup>1)</sup>

특성을 연구하는 데 매우 좋은 물질이다. 특히 빛에 대한 투과율이 90% 이상인 소재로 디스플레이, 투명전극, 휘어지는(Flexible) 디스플레이 등 새로운 산업 창출 가능성이 높은 소재다. 이러한 그래핀은 연구단계에서 산업화 초기 단계로 이제 막 진입하려는 수준에 들어선 것으로 판단되며, 본격적인 그래핀 상용화를 위한 대량 생산 및 응용 기술 개발 등의 연구가 진행 중이다.

그래핀은 지난 2004년에 발견된 이후부터 기초연구에서 소자 응용 분야까지 다양하게 연구되었다. 그래핀이 차세대 소재로써 갖는 장점은 세상에서 가장 얇고, 단단하며, 휘어지면서도 투명한 도체라는 점이다. 그래핀은 기계적 강도, 탄성, 전기적 및 열적 물성 등 여러 특성들이 우수하며, 무엇보다도 이러한 특성들이 한 재료에 조합되어 있기 때문에 혁신적인 기술의 탄생을 기대할 수 있다. 그러나 값비싼 공정 등의 단점 때문에 최소한 플렉시블 디스플레이(Flexible Display)의 전격적인 상용화가 실현된 이후에 다시 논의되어야 한다는 견해도 있다.

그럼에도 불구하고 여전히 단층 그래핀은 현존하는 가장 얇은 물질로써 그 두께가 원자 1개의 크기인 0.35nm에 불과하고, 화학적 물리적 특성이 기존의 다른 물질들에 비해 월등하게 우수하기 때문에 본격적으로 상용화된다면 여러 분야에서의 혁명적인 발전이 전망된다. 그 예로 그래핀은 유연한 특성과 더불어 높은 투과율, 내화성, 고강도 특성 때문에 Si 반도체의 강력한 대체 소재로 플렉시블 디스플레이(Flexible Display), 웨

1) 출처 : Nabil A. Abdel Ghany, Safaa A. Elsharif, Hala T. Handal, "Revolution of Graphene for Different Applications: State-of-the-art", *Surfaces and Interfaces*, 9, Aug. 2017, pp.93~106

&lt;표 1&gt; 그래핀 선행 연구 내용

연도	연구 내용	국가	기관	주요 기능
2004	그래핀 최초 박리	영국	맨체스터대	· 스카치테이프를 이용한 기계적 박리법 · 가스센서 및 LCD 소자 제작
2006	SiC를 이용한 합성	독일	프리츠하버연구소	· SiC로부터 그래핀 합성
2007	물성 연구	미국	컬럼비아대	· 그래핀 물성 및 나노리본 구조 연구
2008	화학적 박리	미국	릿거스대	· 산화제 이용 박리 후 환원
2008	분산 공정	미국	UCLA	· 분산 및 필름화에 대한 기술 개발
2008	이차전지	일본	AIST	· 리튬이차전지 음극재 응용 연구
2009	대면적 CVD합성	미국	MIT-텍사스대	· 니켈 구리 등 금속 촉매를 이용한 대면적 그래핀 합성(cm <sup>2</sup> 웨이퍼)
		한국	성균관대 삼성전자	
2010	30inch 투명전극 개발	미국	성균관대	· 반정수 양자홀 효과(fractional QHE) 시연과 터치스크린 제작 수준의 소재성 (30인치 대면적)
		한국	삼성테크윈	
2011	50×40cm 대면적 투명전극 개발	한국	한국생산기술연구원	· 터치스크린 제작 수준의 소재 특성 · 증착공정 조건상 기판 크기의 한계 없이 다양한 기판에 증착 가능

어려블 컴퓨터(Wearable Computer), 전자 종이(Electronic Paper), 등의 응용 분야에서 주목받고 있다. 그리고 더 나아가 민간 산업 분야뿐만 아니라 국방과학기술과도 접목되어 네트워크 중심 작전환경(NCOE: Network Centric Operational Environment) 하에서 미래 핵심기술의 차세대 소재로써 응용될 것으로 예상된다.

## II. 본 론

### 2.1 그래핀의 구조와 물리적 성질

#### 2.1.1 그래핀의 구조

그래핀을 구성하는 원소는 탄소이다. 탄소는 연필심의 주재료인 흑연과 다이아몬드를 구성하는 원소이기도 하다. 탄소나노물질은 1985년 풀러렌(Fullerenes)이라는 동소체가 발견되면서 신물질로 주목받기 시작하였고, 1991년에는 CNT,

2004년에는 그래핀이 발견되었다. 이들은 모두 탄소원소로 이루어져있으며 배열상태와 결합 구조가 다른 탄소 동소체들이다.

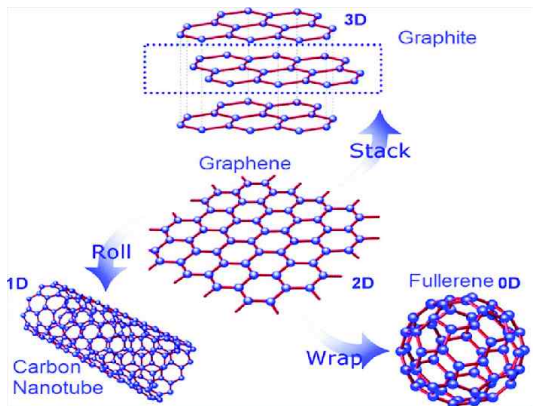
결합 구조를 살펴보면 그래핀은 <그림 2>에서 나타내는 바와 같이 탄소 원자로 만들어진 2차원 벌집 모양 구조이다. 흑연은 이 그래핀을 3차원으로 번갈아 어긋나게 쌓은 적층 구조 형태이고, CNT는 원통형, 풀러렌은 구형으로 가공한 형태이다. 모든 탄소 동체는 그래핀으로부터 출발하고, 그래핀은 탄소나노구조체의 기본 구조라고 할 수 있다. 각각의 탄소동소체들의 특성을 간략히 설명하자면 다음과 같다.

#### 1) 흑연

흑연은 평면을 이루려는 성향이 강하기 때문에 결정구조가 층층이 쌓인 지층 같은 형태를 띠고 있다. 그리고 판이 겹쳐진 결정구조로 인해 연필심으로 사용 시 부드럽게 밀리는 특성을 가지며 전기전도성이 우수하다.

#### 2) 풀러렌

풀러렌은 탄소 원자가 오각형과 육각형으로 배열된 공에 가까운 모양을 갖는 분자를 통칭한



<그림 2> 탄소나노소재의 결합 구조<sup>2)</sup>

다. 탄소 원자 60개가 공 모양으로 뭉친 결정구조이며 어떤 원자는 3개, 어떤 원자는 4개의 전자를 공유결합에 사용하기 때문에 소수의 자유전자가 생성되며 이 전자들은 초전도 현상을 일으킨다.

### 3) CNT

CNT는 탄소 원자 6개로 이루어진 육각형들이 서로 연결되어 관 모양을 이루고 있다. 육각형의 벌집무늬로 결합된 탄소 원자가 튜브 형태를 구성하고, 튜브의 지름이 수십 나노미터에 불과하다. 반도체, 평판 디스플레이, 배터리, 초강력 섬유 및 바이오센서 등에 사용되지만 형태가 약간만 바뀌어도 전기적 성질이 크게 바뀌는 등 여러 가지 한계가 나타나고 있다.

### 4) 그래핀

그래핀은 탄소 원자들이 강한 공유결합을 통해 각 원자가 3개의 이웃한 원자들에 결합하는 벌집(Honeycomb) 패턴을 갖는다. 단층 그래핀의 두께는 탄소 원자 1개의 크기인 약 0.35nm로 매우 얇지만 강도는 다이아몬드와 동일한 수준으로 매우 단단하다. 그래핀은 층의 개수에 따라 단층 그래핀(Single-Layer Graphene), 이중층 그래핀(Double-Layer Graphene), 및 다층 그래핀(Multi-Layer Graphene 또는 Graphite) 등으로 나눌 수 있다.

CNT는 다양한 특성에서 그래핀과 동등한 수준의 특성을 나타내고 있으나 CNT가 상용화에 실패한 이유는 1차원적인 형상에 의한 가공의 어

려움, 양산을 전제로 한 제조 프로세스를 확립할 수 없었기 때문이다. 이는 소재가 아무리 우수한 특성을 가져도 생산 프로세스의 확립 없이는 상용화로 이어지지 못한다는 사실을 보여주며, 그래핀의 생산 프로세스는 단순하여 상용화 가능성이 높은 것으로 판단된다.

### 2.1.2 그래핀의 물리적 성질

그래핀의 여러 특성은 다른 소재들의 특성에 비해 매우 우수하다. <표 2>에서 보는 바와 같이 그래핀은 강도, 열전도율, 전자기동도 등 여러 가지 특성이 현존하는 물질 중 가장 뛰어나다. 따라서 디스플레이, 이차전지, 태양전지, 자동차 및 조명 등 다양한 분야에 응용되어 관련 산업 성장을 견인할 차세대 핵심소재로써 각광받고 있다. 그래핀의 대표적인 특성은 다음과 같다.

#### 1) 전기적 성질

그래핀은 높은 전기전도도를 갖고 있다. 현재 반도체 소재로 많이 사용되는 실리콘(Si)보다 전자기동도가 약 150배 높다. 그래핀이 상용화된다면 컴퓨터 메모리 처리 속도가 100배 이상 빨라질 것으로 기대되고 있다. 빠른 전자기동도와 전자의 긴 평균 자유행로를 가지는 그래핀은 상온에서 최대 전자기동도가 200,000cm<sup>2</sup>/Vsec로 이론적 한계치에 가깝다.<sup>3)</sup> 따라서 그래핀 내에서 전자가 이동할 때에 방해 요소가 매우 적기 때문에 긴 평균 자유행로를 가지게 되어 낮은 저항값을 갖게 된다.

그러나 그래핀은 밴드갭(bandgap)이 없는 특이한 밴드 구조를 가지고 있어 전도성을 보이고 있으나, 페르미(fermi) 준위에서 전자의 상태 밀도가 '0'인 반금속 물질 특성을 보이고 도핑 정도에 따라 전하 운반자의 종류 및 밀도를 변화시킬 수 있는 양극성 전도(ambipolar conduction) 특성을 띤다. 그래핀의 전자는 질량이 없는 디랙 입자(massless Dirac Fermion)으로 정의된다. 그래핀의 물리적 성질을 결정하는 페르미 준위 근처의 전자의 파동함수들은  $\pi$ -오비탈들의 선형결합으로 이루어져 그래핀에서 전자의 결정 운동량과 에너지는 서로 비례하는 분산 관계를 가진다. 다른 이차원 전자계와는 사소한 차이처럼 보이는 선형적인 결정 운동량-에너지 분산 관계식과 육각형 모양의 살창구조가 새로운 이차원 전자계를

2) 출처: Nabil A. Abdel Ghany, Safaa A. Elsharif, Hala T. Handal, "Revolution of Graphene for Different Applications: State-of-the-art", *Surfaces and Interfaces*, 9, Aug. 2017, pp.93~106

3) Alexander S. Mayorov et al., "Micrometer -scale ballistic transport in encapsulated graphene at room temperature", *Nano Lett*, 11, May. 2011, pp.2396~2399

**<표 2> 그래핀(Graphene)의 전기적, 기계적, 열적, 광학적 특성**

성질	특성	그래핀(Graphene)	비고
전기적 성질	전자이동도( $\text{cm}^2/\text{Vsec}$ )	200,000	실리콘(Si)의 150배
	최대허용 전류밀도( $\text{A}/\text{cm}^2$ )	$\sim 5.0 \times 10^8$	구리(Cu)의 100배
	밴드갭(eV)	0~0.3	실리콘(Si)은 1.11
기계적 성질	강도(Gpa)	1,100	강철의 200배, 다이아몬드의 2배
	유연성/신축성	원면적의 약 20%	ITO는 1% 미만
열적 성질	열전도율( $\text{W}/\text{mK}$ )	5,000	다이아몬드의 2배, CNT의 1.5배
광학적 성질	투명도	98%	ITO의 80% 이상

만들어 내는 가장 중요한 구성 요소들이다.

그래핀의 zero-bandgap 특성으로 인해 트랜지스터 제작 시에 적은 전류 점멸비(on-off ratio)를 가지는 문제점과 소자의 크기가 줄어들어 따라잡음이 커지는 현상 등이 문제가 되어 이 문제들을 해결하기 위해 이중층 그래핀, 그래핀의 나노리본 구조, nanomesh 구조 등이 연구되었다.<sup>4)</sup>

현재 그래핀이 Si 반도체 기반의 전자 기술 한계를 해결할 수도 있지 않을까 하는 기대를 하지만 아직 웨이퍼 스케일에서 특성이 균일한 단결정 그래핀을 성장하는 기술과 전자이동도를 유지하면서 밴드갭을 열 수 있는 방법이 없으며, 그래핀의 전자구조에 적합한 새로운 패러다임의 소자가 제안되지 않고 있다는 점이 문제점으로 지적되고 있다. 그러나 과거에 비해 산화인듐주석(ITO: Indium Tin Oxide)의 가격이 많이 오른 상황에서 대체할 소재는 그래핀이 유일하다고 할 수 있다.

현재 트랜지스터는 전자 장치에서 사용될 때 열을 생성하는 고가의 Si으로 만들어지고 있다. 최근 Si 기반의 전자소자 기술이 한계에 이르면서 대체물질로 탄소기반이면서 반도체로 사용할 수 있는 전자 밴드갭을 갖는 물질이 요구되고 있다. 현재 그래핀은 앞서 설명한 바와 같이 원자

하나의 두께로 열과 전기전도에 매우 효율적이지만 밴드갭이 없어서 반도체로 활용되기 어렵다. 따라서 밴드갭을 만들기 위해 그래핀을 두 겹으로 쌓거나 리본으로 꼬아주는 연구들이 진행되고 있다. 그리고 2014년에 그래핀 이을 차세대 신소재로 새로운 트라이진 기반의 흑연탄소질화물(TGCN: Triazine-based Graphitic Carbon Nitride)이 발견되었다. 이 물질의 가장 큰 장점은 반도체에서 요구되는 전자 밴드갭이 존재한다는 점이다. 이 소재는 1996년 이론적으로 존재할 수 있다는 것이 밝혀진 이후, 18년 만의 발견으로 'A new member of graphene family', 'A new graphene-type material'로 취급되고 있다. 학계에서는 상호보완 연구를 하면 그래핀 상용화에도 큰 도움이 될 것으로 평가하고 있다.

## 2) 기계적 성질

그래핀의 강도는 강철의 200배, 다이아몬드의 2배 이상인 1,100GPa로 알려져 있다. 그래핀의 강도가 우수한 이유는 모든 물질은 그마다 고유한 균일(crack)이 있는데, 그래핀은 탄소 결합이 빠곡하기 때문이다. 현재 투명전극으로 사용되고 있는 ITO는 유리 재질이 들어가 부서지기 쉽기 때문에 유연한 디스플레이를 만들 수 없다. 게다가 인듐 매장량이 눈에 띄게 감소하고 주 수출국인 중국이 인듐 가격을 증가시키고 있어 대체재가 필요한 상황이다. 그래핀은 전도성이 높고 투명하며(가시광선 영역에서 투과율 약 98%) 기계적 특성이 우수하여 <그림 3>과 같은 유연한 디

4) 김진태 외, “그래핀 기반 전자소자 및 광전조사 기술”, 전자통신동향분석, 27, 2011, pp.32~40



**<그림 3> 그래핀을 이용한 Flexible Transparent Display<sup>5)</sup>**

스플레이를 만들 수 있고, 기존의 ITO가 갖는 문제점을 해결할 수 있다. 즉 그래핀은 그물처럼 연결된 구조 때문에 신축성이 생겨 구조가 변해도 비교적 잘 견딜 수 있으며 늘리거나 접어도 전기전도성을 잃지 않는 특성을 보인다. 그래핀의 탄성률은 강철의 120배에 달한다. 그래핀은 면적을 늘리거나 접어도 전기전도성을 잃지 않는 반면 ITO는 그렇지 않다. 그래핀의 이러한 유연성을 이용하면 플렉시블 디스플레이의 투명 전극으로 활용이 가능하다.

### 3) 열적 성질

그래핀은 상온에서 열전도율이 약 5000W/mK로 알려져 있다. 이는 다이아몬드의 2배, CNT의 1.5배, 구리의 10배 정도 큰 값이다. 이것은 그래핀이 원자 진동을 쉽게 전달할 수 있기 때문이다. 이러한 우수한 열전도성은 전자의 긴 평균 자유행로에도 영향을 준다. 그래핀의 육각형의 탄소 구조가 갖는 전자배치 특성 때문에 전도성을 잃지 않아 화학적으로도 안정적이다.

### 4) 광학적 성질

그래핀은 빛의 98%를 통과시킬 정도로 투명도가 아주 높다. 그래핀은 앞서 설명한 바와 같이 육각형의 벌집 구조를 갖고 있기 때문에 여유 공간이 넓다. 이 공간으로 빛이 통과함으로써 투과성이 높아져 유리처럼 투명하게 보이게 되는 것이다.

## 2.2 그래핀의 응용 및 기술 분야

그래핀은 우수한 물리적 특성과 구조적·화학적·열적 안정성, 광대역 흡수 특성, 광학적 투명 특성, 기타 유연성, 신축성 등의 특징들에 의해 <그림 4>에서 나타내는 바와 같이 투명전극소재,

반도체 소재, 에너지 전극 소재, 초경량 소재, 방열 소재, 배리어 소재, 나노잉크 등 다양한 분야에 활용이 가능하다.

현재 사용되고 있는 ITO는 늘리거나 구부리면 쉽게 깨지고, 전기전도성을 잃기 때문에 대부분의 전자기기는 이를 보호하기 위해 단단한 케이스가 필요하다. 그러나 그래핀은 늘리거나 접어도 전기전도성을 잃지 않는 특성 때문에 그래핀을 이용하면 투명 플렉시블 디스플레이의 구현이 가능하다. 그래핀은 ITO를 대체할 수 있는 물질로써 현재 터치패널, 플렉시블 패널 등에 그래핀이 적용된 시제품이 개발되고 있다.

전기자동차 개발을 위해 고효율, 장수명의 이차전지에 대한 요구가 높아지는 가운데 그래핀의 넓은 표면적과 안정적인 결합 구조 등을 활용하여 이차전지 및 슈퍼캐패시터의 전극재료를 개발하는 연구가 진행되고 있다. 리튬이온전지에서 그래핀은 음극에 전도성 필러나 새로운 core-shell 구조 또는 샌드위치 구조의 전극으로 적용될 수 있다. 또한 높은 열전도도가 유리하게 활용될 수 있다.

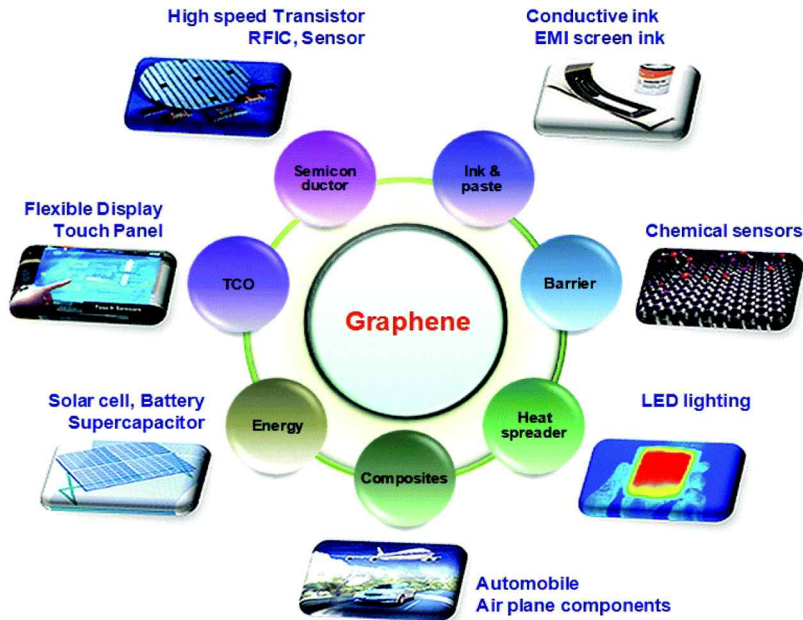
전기화학적 이중층 축전기 원리에 기반을 둔 슈퍼캐패시터에서 그래핀은 높은 전기전도도, 접근 가능하고 제련된 기공 구조, 우수한 내산화성, 고온 안정성 등을 고려할 때 매우 훌륭하게 활용될 수 있다. 최근 그래핀 기반 캐패시터 프로토타입은 축전 용량 뿐만 아니라 에너지밀도와 출력밀도를 선도하고 있다.<sup>6)</sup> 한 가지 큰 문제점으로는 비가역적 축전 용량이 너무 크다는 것으로 결합의 수를 줄이거나 더 적합한 전해질을 선정하는 등의 연구가 필요하다.

그래핀은 연료전지 분야에서도 촉매 담지체로 이용될 수 있다. 그래핀과 백금 입자의 강한 상호작용에 의해 입자가 나노미터 이하 수준까지 가능하다는 주장이 보고되는 등 촉매 활성을 극대화하는 기술의 활용이 연구되고 있다.

그래핀은 화학적, 열적 안정성이 높기 때문에 배리어 소재(차단재), 내열소재 등으로 적합하다. 그래핀을 표면에 얇게 도포하거나 고분자 같은 기지체에 고르게 분산시키면 분자의 화학적 침투를 막거나 단열막 역할을 할 수 있다. 또 그래핀은 비활성이기 때문에 물 또는 산소에 대한 부식 차단작용을 할 수 있고 원하는 금속에 직접 성장시켜 보호복합표면을 실현할 수 있다.

5) 출처: Zill-e-Huma, "Samsung introduced stretchable OLED displays, users can bend the screen in multi directions", 『Techstunt』, May 29, 2017

6) Stoller M. D. et al., "Graphene-based ultracapacitors", *Nano Lett*, 8, Sep. 2008, pp.3498~3502



<그림 4> 그래핀의 다양한 응용 분야<sup>7)</sup>

그래핀은 높은 전기 및 열전도도를 가지므로 스텔스 소재 및 도료, 방열소재 등으로도 응용할 수 있다. 특히 흑연으로부터 저가로 대량 생산되는 조각 형태의 그래핀을 플라스틱 등에 첨가하여 부품, 소재의 두께를 줄여 경량화를 할 수 있다. 따라서 향후 전자 부품, 수송기계(자동차, 항공기, 철도차량, 조선 등) 부품 등의 초경량, 고강도 소재로 활용이 가능하다.

에너지 생산과 저장 기술 분야에서의 그래핀 연구는 대부분 태양광 전지에 집중되어있다. 그래핀을 활물질로 이용하거나 전극 재료로 활용한다. 그래핀에서 전자는 초당 1,000km의 일정한 속도로 움직인다. 그뿐만 아니라 전자는 그래핀에서 특이한 터널링 현상을 보인다. 터널링 현상은 입자가 벽을 뚫고 지나가는 것으로 양자 세계에서 나타난다. 그래핀의 이러한 장점을 태양 전지에 적용한다면 높은 효율을 얻을 수 있다.

염료감응형 태양전지는 많은 장점이 있지만 효율성이 낮다는 단점을 갖고 있다. 그래핀은 벌집 모양 구조를 갖고 높은 전기적 전도성을 갖고 있기 때문에 이 단점을 극복하는데 이용될 수 있

다. 실제로  $TiO_2$ 에 그래핀을 소량 첨가하였을 때 전도성이 52.4%가 향상되는 연구 결과가 있었다. 그래핀이  $TiO_2$  사이사이 공간에서 다리 역할을 하여 전자들의 이동성이 높아졌기 때문이다.

그래핀은 바이오 응용 분야에서의 잠재성이 매우 크다. 큰 비표면적과 화학적 순도, 손쉬운 기능기 부착을 고려하면 약물 전달 기술에 이용될 수 있다. 기계적 물성 측면에서 조직공학 및 재생의학 분야에 이용될 가능성도 있다. 두께, 전도성, 강도의 장점 때문에 TEM(Transmission Electron Microscopy)에 활용될 수 있으며, 화학기능기가 부착된 그래핀은 포도당, 콜레스테롤, 헤모글로빈, DNA 등 생물학적 분자를 검출하는 바이오센서로도 활용될 수 있다. 특히 그래핀은 낮은 독성, 생물 용화성, 안정성, 얇은 두께 등의 특성 때문에 약물전달시스템(DDS: Drug Delivery System)에서의 응용 가능성이 크다.

그래핀의 전자, 반도체 및 에너지 분야 이외에 DDS 및 암 치료 연구결과는 기존에 보고된 CNT와 비교하여 열역학적, 광학적 및 기하학적 성질에서 유사한 결과를 보이고 있다. 하지만 그래핀이 CNT보다 분산성이 좋고 더 작은 크기 제어에 의한 효율성, 저비용 등의 이유 때문에 DDS 및 암 치료에 더 좋은 효과가 있는 것으로 나타나 앞으로 생의학(biomedicine) 분야에서의 응용 전망도 밝다.

7) 출처: Andrea C. Ferrari et al., "Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems", *Nanoscale*, 7, Mar. 2015, pp.4587~5062

〈표 3〉 해외 주요 기관 그래핀 연구개발 현황

기관 유형	기관명	현황
대학 및 연구소	맨체스터대(영)	세계 최초 테이프를 이용해 흑연에서 그래핀 박리 성공, 그래핀을 이용한 가스센서 및 LCD 소자 구현
	콜롬비아대(미)	그래핀 물성, 전자빔식각법에 의한 그래핀 나노리본 구조 패터닝 연구
	UCLA, Rutger(미)	그래핀의 용액상 분산 및 필름화에 대한 기술개발 연구
	프리즈하버 연구소(독)	SiC 기판 위 그래핀 합성법 및 성질변환 연구
	막스플랑크 연구소(독)	그래핀 염료감응 태양전지 투명전극 연구
	AIST(일)	그래핀 투명전극 및 리튬 이차전지 연구
기업	IBM(미)	그래핀 RF소자, 광전자소자 등 반도체 적용 연구개발
	XG Science(미)	다양한 방법의 그래핀 합성기술 개발 및 판매
	Angstrom Materials(미)	에너지 전극용 그래핀 platelet 대량 양산기술 보유
	Vorbeck Materials(미)	다양한 방법의 그래핀 합성기술 개발 및 판매, Vor-ink™ 잉크 상용화
	Texas Instruments(미)	CVD공정으로 수 인치급 그래핀 합성
	Fujitsu(일)	실리콘 웨이퍼상에 그래핀 성장

### 2.3 그래핀의 국내·외 연구개발 동향

그래핀 연구가 매우 빨리 전개되고 있는 것은 그래핀의 우수한 물리적 특성과 함께 실험실에서 양질의 그래핀을 비교적 간단하고 쉽게 얻을 수 있기 때문이다. 2004년 그래핀 발견과 2010년 노벨상 수상 이후 세계 각국은 그래핀 개발 및 상용화에 노력하고 있다. 특히 전자 분야 외에도 항공기, 자동차 등 여러 분야에서의 연구가 활발히 진행되고 있다. 그래핀은 선진국을 중심으로 기초연구 및 응용연구가 활발히 진행 중이며 아직은 상용화 이전 단계이다. 우리나라도 그래핀 연구에 초기부터 주도적으로 참여하여 전 세계적으로 선도적 위치를 점유하고 있고 해외에서는 미국과 유럽을 중심으로 대량 합성기술 및 응용 중심 연구가 수행 중이다.

#### 2.3.1 국외 연구개발 동향

##### 1) 미국

미국은 그래핀의 최고 기술 보유국으로 국가 과학재단(NSF) 등 여러 기관에서 그래핀 상용화

에 전폭적으로 지원하고 있다. 미 펜실베이니아 주립대학은 2011년 탄소층으로부터 Si를 증기 증착시키는 공정인 'Si 승화'를 사용하여 세계 최대 크기의 100nm 그래핀 웨이퍼를 개발하는 데에 성공했다. 또한 HRL 연구소는 2inch 지름의 웨이퍼 위에 단일층 그래핀으로 구성된 최초의 그래핀 트랜지스터를 개발하였는데 기존 Si보다 7배에서 8배 빠른 유효 이동도를 가져 초고속 초저전력 소자개발을 가능하게 할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 국방고등연구계획국(DARPA)은 그래핀을 이용한 RF 소자 개발을 위해 총 3,000만 달러를 투자하여 그래핀 웨이퍼 및 고속 RF 소자 개발을 추진하고 있고, 기타 그래핀 상용화를 위한 대량 생산기술 개발, 초경량 고강도 복합재 개발 등을 활발히 진행하고 있다.

##### 2) 유럽연합(EU)

유럽연합의 경우 17개국 60여 개 기관이 2013년부터 10년간 그래핀 상용화에 10억 유로(1조 3천억 원)를 투입하는 플래그십 프로젝트(Flagship Project)를 시작하였다. 이는 산발적으로 진행해 온 과제를 하나로 합쳐 향후 10년간 연간 1억 유

**<표 4> 국내 주요 그래핀 연구개발 현황**

기관명	현황
성균관대/삼성테크윈	구리 촉매를 사용한 그래핀 합성 roll-to-roll 방식을 이용한 전자/에칭기술 개발 그래핀 투명전극을 활용한 플렉시블 터치스크린 시연
성균관대/삼성중기원	실리콘 웨이퍼상에서 네켈 촉매를 이용한 그래핀 합성기술 개발
KAIST/엔바로테크	복합소재용 그래핀 Nanoplatelet 제조기술
UNIST	Edge 기능화에 의한 고품질 그래핀 제조기술 Ball Mill 고속 분쇄를 이용한 친환경 저가 그래핀 대량생산 기술
성균관대	대량 흑연 화학적 박리 저온공정기술 개발
KERI	화학적 흑연 박리를 통한 그래핀 페이스트 제작, 국내기업에 기술이전
KAIST	그래핀 게이트 전극을 이용한 메모리 제작
대주전자재료	그래핀 제조 전 단계 물질인 산화그래핀을 생산하여 미국 시그마 알드리치에 공급, 자동차 차체용 경량 그래핀 소재 개발에 주력

로의 규모로 유럽연합 컨소시엄을 구성하여 60개의 기관과 120개의 대학 연구실이 참여하는 초대형 프로젝트이다. 유럽연합은 이 프로젝트를 추진하며 기초연구와 상용화 연구를 병행하고 있다.

### 3) 일본

일본은 경제산업성 산하 산업기술총합연구소(AIST)를 중심으로 2010년에 약 140억 원을 투자하여 그래핀 합성 및 응용기술 개발을 추진 중이다.

### 4) 싱가포르

싱가포르는 싱가포르 국립대 그래핀 센터를 중심으로 5년간 약 1,000억 원을 투자할 계획을 추진 중이다. 노벨상 수상 연구자를 초빙하여 그래핀 기초 및 응용연구에 집중하고 있다. 특히 그래핀 소자를 이용하여 투명하고 유연한 전자소자를 개발하는 연구에 집중하고 우명 전도성 코팅산업은 2020년까지 550억 달러 규모로 성장할 전망이다.

<표 3>에는 해외 주요 기관들의 그래핀 연구개발 현황을 정리하였다.

## 2.3.2 국내 연구개발 동향

우리나라는 2007년에는 교육과학기술부, 2009년에는 지식경제부가 그래핀 기초 및 응용연구를 시작하였고 2012년부터는 '그래핀 소재 및 부품

개발 상용화 기술 개발'을 위해 6년간 민관합동으로 2,100억 원을 투자하여 KIST 주관 하에 41개의 산학연구기관이 참여하고 6개 컨소시엄을 통해 그래핀 상업화를 추진하였다. 우리나라는 그래핀 소재연구에서 세계를 선도하는 입장으로 특히 CVD 기법에 기반을 둔 대면적 그래핀 제조의 원천기술을 확보하고 있다.

국내 기업들도 그래핀 상용화에 매진하고 있다. 그 이유 중 하나는 LCD 등 평면 디스플레이 제작 재료인 ITO의 가격이 과거에 비해 매우 올랐으며, 이를 대체하는 새재로 그래핀이 주목받고 있기 때문이다. 삼성은 세계에서 그래핀 연구개발에 가장 적극적인 행보를 하고 있는 기업이다. 삼성 연구진은 그래핀을 터치스크린에 적용한 스마트폰을 개발하였으며 대량생산기술을 기반으로 그래핀을 상용화하는 데에 노력하고 있다. 또한 삼성전자와 성균관대는 대면적 단결정 그래핀을 성장시킬 수 있는 방법을 개발하였다. 작은 그래핀을 합성하여 큰 면적으로 키우는 방법으로는 그래핀의 전기적, 기계적 특성을 저하시키는 문제가 있어서 실용화가 지연되었지만 대면적 단결정 그래핀 성장 방법으로 그래핀의 상용화가 앞당겨질 것으로 기대하고 있다.

삼성과 서울대 연구팀은 고속열화기상증착으로 400x300mm<sup>2</sup> 이상의 그래핀 필름을 만든 논문을 국제 학술지 ACS Nano에 게재하였고, 이

<표 5> 그래핀 시장 규모 및 전망<sup>8)</sup>

(단위 : 만 달러, 억 원)

연도	2019	2020	2021	2022	2023	2024
세계 시장	8,836	11,893	16,008	21,547	29,003	39,037
국내 시장	46	61	83	111	150	202

연구팀은 삼성전자의 스마트폰에 그래핀 필름을 적용, 스마트폰의 터치스크린에 적용해 보였다. 그래핀 필름을 대량 생산하는 기술을 개발하고 이를 스마트폰에 적용하는 데에 성공했다는 것이다. 삼성벤처투자가 그래핀 원천기술을 보유한 미국 벤처기업 XG사이언스사 지분을 일부 인수하기도 하였으며, 삼성정밀화학, 삼성코닝정밀소재, 제일모직, 삼성전자, 삼성SDI가 공동으로 투자해 만든 ‘삼성 전자소재 연구 단지’에서도 그래핀 연구를 활발히 하고 있다.

리튬 배터리의 성능을 획기적으로 향상시키는 기술이 국내 연구진에 의해 개발되기도 하였다. 서울대 공과대학 재료공학부는 용해 그래핀이 균일하게 코팅된  $Li_4Ti_5O_{12}$  음극 전극의 개발에 성공했다. 그래핀이 코팅된 Li 배터리는 충전 속도가 빠르고 충전 횟수도 크게 늘어나 휴대전화, 노트북, 전기자동차 등의 분야에 혁신적인 발전

을 가져올 것으로 기대된다.

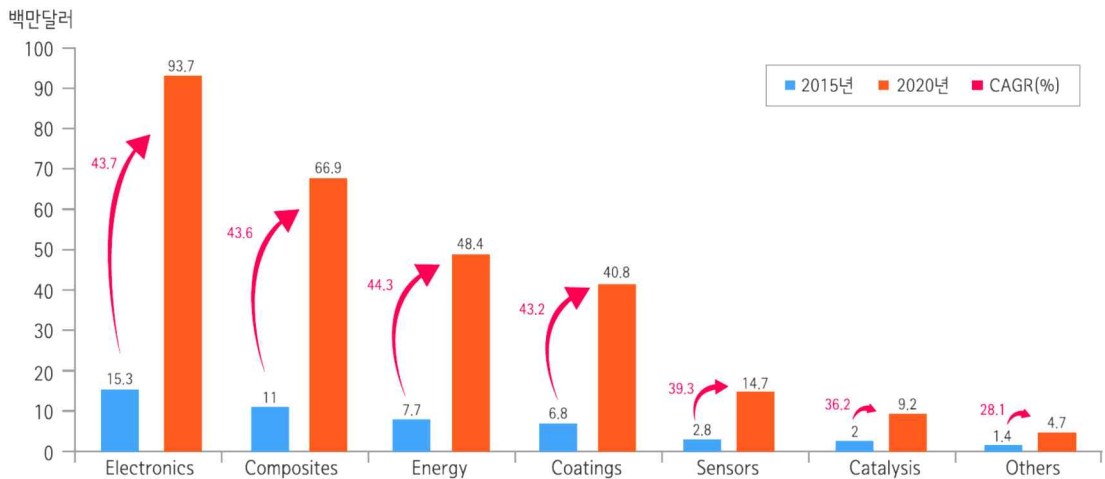
이외에도 그래핀의 투명성, 신축성, 내투과성을 활용해 OLED 용 그래핀 투명전극 등도 개발 중이다. 삼성은 대면적 그래핀으로 터치패널을, 전자통신연구원(ETRI)은 OLED를, 포스코는 그래핀 코팅 강판에서 성과를 내고 있다. 특히 한국과학기술원(KAIST)은 OLED 전극용 그래핀 기술을 활용해 OLED용 그래핀 원천기술을 확보했으며 ETRI는 그래핀 응용 OLED 소자 기술, LG디스플레이는 그래핀 응용 OLED 패널 기술을 확보했다. <표 4>는 국내 주요 그래핀 연구개발 현황을 나타내었다.

2.3.3 국내·외 시장 동향 및 전망

현재 상용화 연구 중인 그래핀이 디스플레이, 반도체, 이차전지, 자동차, 광 검출기, 기능성 잉크, 레이저 산업 등 다양하게 사용될 경우 세계 그래핀 시장 규모는 <표 5>에 나타난 바와 같이 2019년 기준 8,836만 달러에서 연평균 성장률(CAGR) 34.6%로 성장하여 2024년 3억 9,000만 달러까지 성장할 것으로 전망된다.

다만 그래핀의 상용화가 터치패널과 2차 전지 분야로 국한되어 상용화될 경우, 그 시장 규모는 2024년 기준 1억 4,100달러 정도로 전망된다.

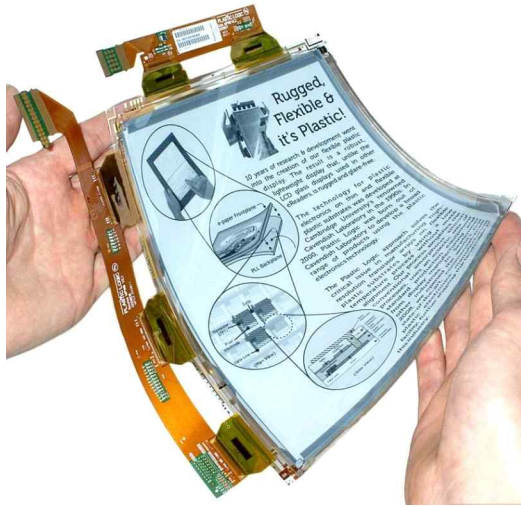
그래핀은 응용 분야별로 전자 분야, 복합재료, 에너지, 코팅, 센서, 촉매 등으로 나누어진다. 각 분야 중 전자 분야의 시장이 가장 크며 2015년에 1,530만 달러에서 2020년에 9,370만 달러에 이르



<그림 5> 응용 분야별 세계 그래핀 시장 현황 및 전망<sup>9)</sup>

8) 산업통상자원부, “부품소재 국내 시장 점유율”, 2017, pp.23.

9) 출처: 이종찬, 「산업체 관점에서 바라본 그래핀 산업 현황 및 전망」, 그래핀코리아, 2017, pp.15



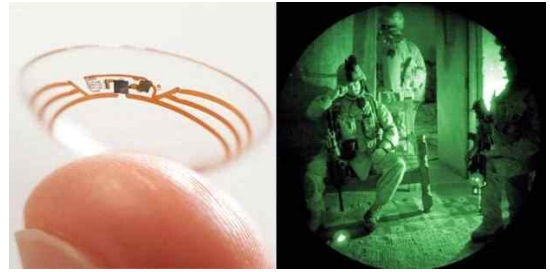
<그림 6> 그래핀을 이용한 E-Paper<sup>10)</sup>

고, 다음으로 복합재료 분야가 2015년에 1,100만 달러에서 2020년에 6,690만 달러에 이르며, 다음으로 에너지, 코팅 등의 순서로 시장을 형성하고 있다. 응용 분야별 세계 그래핀 시장 현황 및 전망을 <그림 5>에 나타내었고, 각 분야별로 연평균 28%에서 44%의 고성장을 이룰 것으로 전망된다.

한국의 부품 소재 시장 규모는 글로벌 부품 소재 시장에서 약 4.7%를 차지하는 것으로 조사된 바 있다. 따라서 이를 근거로 국내 그래핀 시장 규모를 추정하면 <표 5>에 나타낸 것과 같이 2019년 46억 원 규모에서 연평균 성장률(CAGR) 34.6%를 적용하여 2024년에 202억 원에 이를 것으로 전망된다.

## 2.4 그래핀의 국방과학기술 분야 응용

그래핀의 우수한 특징을 이용할 경우 차세대 국방 신소재로 전자 장비 분야뿐만 아니라 경량화된 전투 장비와 에너지 저장 장치 등 다양한 분야에 무궁무진하게 적용이 가능하리라 판단된다. 2008년~2011년 국방과학기술연구소에서 국제공동 기초연구과제로 'Flexible 투명전극 및 반도체 소자용 탄소 구조체에 대한 연구'를 이화여대, 미펜실베이니아대와 함께 수행한 바 있지만 전반적으로 국방 분야에 있어서 그래핀 연구개발 및 적용은 아직 미진하다. 아래에서는 현재 개발 중이거



<그림 7> 야간 투시용 콘택트 렌즈와 렌즈를 통해 보이는 상<sup>11)</sup>

나 미래에 적용 가능한 국방 관련 분야에 대해 언급하였다.

### 1) 전자종이(Electronic Paper)

현재 군에는 장비를 정비하기 위한 많은 기술 교범이 있다. 사용자 교범, 부대정비 교범, 야전정비 교범, 수리부속 교범 등 그 종류도 다양하다. 최초 웨어러블 컴퓨터가 나오게 된 배경은 항공기를 매뉴얼대로 정비를 하기 위해서 양손을 자유롭게 사용할 수 있도록 하기 위함이었다.

육군도 최근 많은 첨단 장비를 보유하고 있고 정비 작업 간 기술교범이 반드시 필요하다. 하지만 평소 또는 전시에 실제 현장에서 기술교범을 휴대하기에는 제한 사항이 많다. 최근 <그림 6>에서 보는 바와 같이 그래핀을 이용한 전자종이(Electronic Paper)의 연구개발이 진행되고 있다. 전자종이는 마음대로 휘거나 접어서 휴대가 가능하기 때문에 이를 활용한다면 손목, 안경 등 신체에 착용하여 양손을 자유롭게 정비에 집중할 수 있어 효과적인 임무수행이 가능해진다. 또한 그래핀은 휴대용 전자지도, 내비게이션 등으로 활용이 가능하다. 유리창에 내비게이션을 부착해 운전하면서도 즉각 정보를 얻을 수 있는 전자지도, 내비게이션을 이용하여 작전 임무 간 효율성을 높이고 각종 정보를 제공함으로써 전시작전승리에 기여할 것이다.

### 2) 야간 투시용 콘택트렌즈

야간 투시용 적외선 고글 대신 적외선 콘택트렌즈를 사용할 수 있다. 최근 미국 미시간대 연구소에서 그래핀의 하나의 원자층으로 된 얇은 재료를 겹쳐 만든 것을 활용하여 야시 기능을 지닌 콘택트렌즈(Night-Vision Contact Lenses) 등

10) 출처: 『Components in Electronics』, "Glass-free flexible plastic e-paper displays", August 31, 2017

11) 출처: James Vincent, "Lenses made from the atom-thick 'wonder material' could be used in phones or even contact lenses to make night vision available for all", 『Independent』, Mar. 21, 2014

다양한 분야에 활용 가능한 새로운 기술을 공개하였다. 기존 군용 야시장비 기술과 접목한 결과 그래핀이 적외선 렌즈를 만나는 순간 이를 흡수하여 전기신호로 변환시켜서 야간에도 주간처럼 풍경과 사물을 뚜렷하게 인식할 수 있는 콘택트 렌즈가 개발된 것이다. 이는 실리콘 칩이 가시광선으로 디지털카메라를 만들어내는 것과 같은 원리이다. 현재 실험 단계에 있는 콘택트렌즈의 적외선 흡수율이 2.3%에 불과하지만 연구진은 앞으로 수년 내에 다양한 온도 범위에서 작동해 더 많은 빛을 받아들일 수 있도록 감광성을 높이면 이 문제점이 해결될 것으로 전망하고 있다. <그림 7>에는 야간 투시용 콘택트렌즈와 렌즈를 통해 보이는 상을 나타내었다.

### 3) 담수화 멤브레인(membrane)

물은 생명의 원천으로 전시 전쟁의 승패를 좌우하는 중요한 요소이다. 미래의 전장 환경에서 전투력을 유지하기 위한 작전 지속 지원 요소 중 물은 소중한 자원이며, 급수 문제는 중요한 작전 변수로 작용할 것이다. 이에 따라 해수를 담수화 시키는 기술에 주목할 필요가 있다. 담수 방법에는 해수를 증발해서 순수한 물을 분류해내는 증발법과 삼투 현상을 반대로 이용하는 역삼투압법이 있지만 이 방법들은 장시간이 소요되며 대량생산에 제한이 있다.

그래핀은 물만 투과시키는 성질이 있는데 이 성질을 이용해서 바닷물을 담수화하여 물을 확보할 수 있다. 2012년 MIT의 D. Cohen-Tanugi 교수의 발표에 의하면 나노미터보다 작은 구멍을 가진 그래핀이 현재 사용되고 있는 폴리머 역삼투막보다 100~1000배의 투수성을 보여 염수 담수화를 위한 고성능막으로 사용될 수 있는 가능성을 발견하였다. 분자동역학 시뮬레이션을 통해 나노구멍을 가진 그래핀막이 99%이상의 염 제거 효율로 66L/cm<sup>2</sup>-day-Mpa의 물을 통과시킬 수 있다고 예측하였다.<sup>18)</sup>

2013년에 미 록히드마틴사는 강도가 강하고 오랫동안 유지 가능하며 1mm보다 작은 기공을 가진 그래핀 재질의 담수화 막을 개발했다. 물은 나노미터 크기의 세공을 충분히 통과할 수 있지만 바닷물의 염분은 통과할 수 없기 때문에 이를 이용해 바닷물을 담수로 만들 수 있다는 것이다. 사실 그래핀은 물질을 투과시키지 않는 불투과성 물질이다. 그래핀으로 막을 만들면 물질이 투과하지 못하기 때문에 분리막으로 사용할 수 없다. 하지만 불투과성 그래핀 막을 투과성 분리막으로 탈바꿈시킬 수 있었던 것은 그래핀 막에 나노미터 크기의 미세한 구멍을 뚫었기 때문이다. 바로



<그림 8> Wearable Display의 국방 분야 적용 사례<sup>12)</sup>

이것이 록히드마틴사가 그래핀으로 혁신적인 해수 담수화 분리막을 만들 수 있었던 이유이다.

하지만 해수 담수화에 사용할 분리막을 만들기 위해서는 다량의 그래핀이 필요하고 그러기에는 그래핀의 가격이 아직까지는 비싸다는 문제점이 제기되고 있다. 게다가 실제 해수 담수화 설비에 적용할 수 있을 정도로 크기가 큰 분리막을 만들기 위해 그래핀의 스케일업(scale-up) 작업도 병행되어야 한다. 그러나 그래핀의 연구개발 진행 추세를 고려해 볼 때, 국방 분야에서 담수화 장비 또는 정수 장비에 그래핀이 도입되는 것은 먼 미래의 일은 아닐 것으로 보인다. 이는 전시에 해안, 산악 지역 등 수도시설이 불비한 지역에서의 효율적인 급수지원을 통해 전투요원의 생존성 및 작전 지속 지원에 효과적일 것으로 판단된다.

### 4) 방탄복과 수리부속 경량화

그래핀은 복합섬유로도 개발되고 있다. 그래핀 섬유는 거미줄보다 6배 강하고 방탄조끼로 사용되는 합성섬유인 케블라보다 12배 이상 우수한 강도를 갖는다. 사람의 근육만큼 질기고 유연성도 뛰어나며 또한 전기적 특성까지 갖고 있기 때문에 인공근육이나 방탄복 등에 응용될 수 있을 것으로 기대된다. 방탄조끼는 총알을 막거나 수류탄 파편 등의 피해를 막기 위해 사용되고 있다. 일반적으로 방탄조끼는 섬유로 이루어져 있다. 탄소섬유는 강철보다 강도가 10배 이상 강하지만 무게는 강철의 20%밖에 안 된다. 또한 변형이 잘 일어나지 않고 열에도 강하여 방탄복 소

12) 출처: Ron Mertens, "UDC delivered 8 flexible wrist-mounted OLED displays to the US Army", 『Oled-Info』, Oct. 7, 2010

재료 아주 적합하다. 이러한 장점들로 인해 그래핀 복합소재는 군 전투 장비(항공기, 차량 등)의 각종 수리 부속품의 경량화에도 활용 가능하다.

그래핀은 기계적 성질에서 전기적 성질까지 수많은 우수한 특성을 갖고 있는 독특한 물질이다. 이 때문에 반도체 분야에서 그래핀이 가장 활발히 연구되고 있지만 상용화까지는 아직 수년이 더 걸릴 것으로 예상된다. 하지만 요구 조건이 까다롭지 않은 저품질의 전자 응용 분야인 터치스크린, 전자종이 등의 플렉시블 전자기기 분야에서는 다소 품질이 낮은 그래핀을 이용하여 기존 재료인 ITO를 조기에 대체할 수 있을 것으로 전망된다. 2020년 이후에는 <그림 8>과 같이 미래병사체계에 응용될 군사용 웨어러블 정보장치 등에 도입이 가능해질 것으로 판단된다.

그래핀의 응용 분야별 국내외 특허 및 시장 동향 예측을 기반으로 분석한 기술 성숙도를 고려해볼 때, 그래핀 기술의 현재 리딩 분야는 이차전지, 슈퍼캐패시터 분야이며 여기서 국방과학기술 적용 가능성이 가장 높을 것으로 예상된다. 그래핀을 Li 이온 이차전지의 양극 위에 코팅하면 그래핀의 구조적 특성 때문에 Li 이온들이 그래핀의 기공에 침투하여 충전시간을 대폭 단축시켜준다. 또 그래핀을 적층할 경우 다량의 전자를 저장할 수 있어 수분 내에 완전 고속 충전도 가능하다.

미사일, 전투기 등 비행체 구조 경량화를 위한 초경량 고강도 복합소재, 우수한 유연성 및 내충격성을 이용한 초경량 방탄소재, 전도성 잉크, 방열 재료 등의 분야에서는 디스플레이나 이차전지 분야에 비해 그래핀의 상용화 가능성이 다소 떨어지므로 장기 연구개발 소요가 필요하다. 현재 단일 그래핀만의 물성은 여러 연구 결과를 통해 입증되었지만 복합화를 통한 물성 극대화 기술은 관련 연구가 아직 진행 중이다. 따라서 그래핀을 이용한 고강도 복합재의 상용화에는 상당 기간이 소요될 것으로 예상된다.

### III. 결 론

그래핀은 전자이동도, 열전도도, 기계적 강도, 유연성 등 수많은 우수한 특성들을 보유하고 있는 원자 수준의 2차원 결정구조 물질이다. 따라서 그래핀은 응용 가능성과 잠재성이 무한하며 그래핀을 이용한 혁신적인 기술의 탄생을 기대할

수 있다. 지속적인 그래핀의 기초연구와 응용 기술 연구는 미래의 과학기술 패러다임과 사회문화 패러다임을 동시에 바꿀 수 있는 플렉시블 전자기기, 초고속 트랜지스터, 태양전지, 유기 발광소자, 광 검출기 등 다양한 신개념 전자소자 및 광전소자 부품의 혁신을 가져올 것으로 판단된다.

그래핀 공동 발견자인 Novoselov 멘체스터대 교수는 “그래핀은 산업에서 기존 소재를 대체하고 새로운 시장을 창출할 파괴적인 기술이 될 것”이라고 전망했다. 그래핀은 응용 분야가 매우 다양한 꿈의 소재이지만 아직은 제작 및 기술상 단점이 존재한다. 그렇기 때문에 그래핀의 단가를 낮출 수 있는 대면적 다량생산이 가능한 합성 및 제조공정 기술 개발 노력이 우선적으로 필요하다. 기존의 기계적 박리법을 통한 그래핀 제작은 크기가  $\mu\text{m}$  수준에 불과하므로 실제 응용에 제약이 있다. 그리고 화학적 합성법 역시 산화와 환원 과정을 거치면서 산화 그래핀이 완전히 환원되지 못해 그래핀 고유의 특성이 저하되는 단점 등이 있기 때문에 상용화를 위해서는 이를 해결하기 위한 기술 개발이 요구된다.

우리나라의 경우, 그래핀 제조 관련 원천기술은 다소 미흡한 실정이다. 그러나 응용기술 부분에서는 세계적 수준으로 평가받고 있다. 따라서 국가적으로도 그래핀 응용기술 개발에 위한 개발 전략을 통해 ‘그래핀 시장 선점을 통한 미래 소재산업 선도국’이라는 비전을 제시하고 있다.

우리나라는 그래핀 원소재 양산 및 합성 시스템 기술 확보, 그래핀 규격화 및 실시간 측정기술 확보, 6대 전략분야의 응용제품 개발을 통하여 2020년에 총매출 6,000억 원 달성, 2025년에 글로벌 기업 20개 육성 및 19조 매출을 달성한다는 목표를 세우고 이를 추진하고 있다. 이를 통해 그래핀 응용제품 개발 및 상용화, 글로벌 시장 선점을 위한 국가적 차원의 전략적 지원과 R&D 투자 확대 등 다양하고 적극적인 정책의 수립과 이행이 매우 중요하다고 사료된다.

그래핀 기술은 현재 기초 및 응용연구 단계에 있으나 조만간 본격적인 상용화가 시작될 것으로 보인다. 따라서 그래핀의 우수한 특성을 고려한 혁신적인 미래 무기체계 적용을 위한 종합적이고 체계적인 중장기 및 미래 계획 설계가 필요하다. 이미 세계 각국에서 민간 분야뿐 아니라 국방 관련 분야에서도 그래핀의 상용화에 노력 중이며, 우리나라도 국방과학기술 분야에서의 그래핀의 다양한 소요를 적극적으로 검토해야 할 것이다. 국방과학기술에 민간 그래핀 기술이 신속히 적용될 수 있도록 민간 상호 협력체계를 구축하고,

그래핀 연구개발에 힘쓴다면 이는 우리나라 국방력 향상에 혁신적으로 기여할 것으로 생각된다.

### 참고문헌

- 1) Nabil A. Abdel Ghany, Safaa A. Elsherif, Hala T. Handal, "Revolution of Graphene for Different Applications: State-of-the-art", *Surfaces and Interfaces*, 9, Aug. 2017, pp.93~106
- 2) Alexander S. Mayorov et al., "Micrometer-scale ballistic transport in encapsulated graphene at room temperature", *Nano Lett*, 11, May. 2011, pp.2396~2399
- 3) 김진태 외, "그래핀 기반 전자소자 및 광전 조사 기술", *전자통신동향분석*, 27, 2011, pp.32~40
- 4) Balandin A. A., "Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials", *Nature mater.*, 10, July. 2011, pp.569~581
- 5) Nair R. R. et al., "Fine structure constant defines visual transparency of graphene", *Science*, 320, Jun. 2008, pp.1308
- 6) Stoller M. D. et al., "Graphene-based ultracapacitors", *Nano Lett*, 8, Sep. 2008, pp.3498~3502
- 7) Novoselov K. S. et al., "A roadmap for graphene", *Nature*, 490, Oct. 2012, pp.190~200
- 8) Vanesa C. Sanchez et al., "Biological interactions graphene family nanomaterials: interdisciplinary review", *Chem.Res.Toxicol.*, 25, Sep. 2012, pp.15~34
- 9) Tapas R. Nayak et al., "Graphene for Controlled and Accelerated Osteogenic Differentiation of Human Mesenchymal Stem Cells", *ACS Nano*, 5, Apr. 2011, pp.4670~4678
- 10) Nair R. R. et al., "Graphene as a transparent conductive support for studying biological molecules by transmission electron microscopy", *Appl.Phys.Lett.*, 97, Oct. 2010, pp.153102
- 11) Andrea C. Ferrari et al., "Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems", *Nanoscale*, 7, Mar. 2015, pp.4587~5062
- 12) Zill-e-Huma, "Samsung introduced stretchable OLED displays, users can bend the screen in multi directions", 『Techstunt』, May 29, 2017
- 13) 『Advantage Environment』, "Super material with environmental potential", Jun. 4, 2014
- 14) 『한국산업기술평가관리원』, "그래핀 응용기술 연구개발 동향 및 사업화 전망", 2012
- 15) 『Components in Electronics』, "Glass-free flexible plastic e-paper displays", August 31, 2017
- 16) 윤옥자, "그래핀의 약물전달시스템 및 암 치료 연구동향", 한국공학연구센터, 2011
- 17) James Vincent, "Lenses made from the atom-thick 'wonder material' could be used in phones or even contact lenses to make night vision available for all", 『Independent』, Mar. 21, 2014
- 18) David Cohen-Tanugi, Jeffrey C. Grossman, "Water Desalination across Nanoporous Graphene", *Nano Lett.*, 12, June. 2012, pp.3602~3608
- 19) Ron Mertens, "UDC delivered 8 flexible wrist-mounted OLED displays to the US Army", 『Oled-Info』, Oct. 7, 2010
- 20) 산업통상자원부, "부품소재 국내 시장 점유율", 2017, pp.23.
- 21) 이종찬, 「산업체 관점에서 바라본 그래핀 상업 현황 및 전망」, 그래핀코리아, 2017, pp.15