

---

# **그래핀(Graphene) 연료전지 시장조사분석**

---

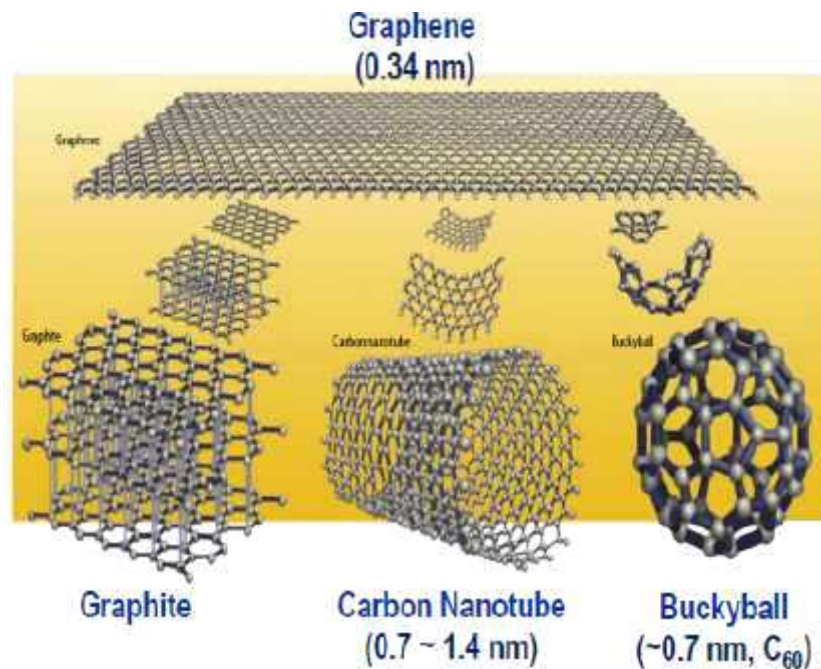
**2017. 06.**

# 1. 그래핀 소재 · 응용 기술 및 산업화 동향

## 가. 기술개요

### 1. 그래핀 소재의 특징

- 그래핀은 탄소 원자 한 층 두께의 2차원 물질로 여타 모든 차원의 탄소 물질을 만들 수 있는 기본 물질이다. 즉, 2차원의 그래핀이 어떻게 말아지냐에 따라 0차원의 풀러렌 혹은 1차원의 나노튜브가 되고, 적층되면 3차원의 흑연이 된다.



〈그래핀을 기본 단위로 하는 다양한 차원의 탄소 동소체〉

- 그래핀은 현존하는 물질 중에 가장 많은 현란한 수식어가 붙는 물질인데 노벨상 수상자인 맨체스터 대노보셀로프는 그래핀을 다음과 같이 소개하였다.

- 가장 얇은 물질(탄소 원자 두께)
- 가장 표면적이 큰 물질(~2,700 m<sup>2</sup>/g)
- 측정한 물질 가운데 가장 강한 물질(이론 한계 근접)

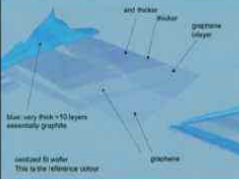



- 가장 강성이 큰 물질(다이아몬드보다 강성이 큼)
- 가장 잘 늘어나는 결정(20% 신장까지 탄성 영역임)
- 가장 열을 잘 통하는 물질(다이아몬드를 능가)
- 상온에서 가장 큰 전류 밀도(구리의 106 배)
- 완전히 비투과성(헬륨 원자조차도 통과 불가)
- 가장 큰 고유 이동도(실리콘 대비 100 배)
- 전기전도도가 무한대(전자의 한계 없음)
- 가장 가벼운 전하 캐리어 (정지 질량 제로)
- 상온에서 가장 긴 평균 자유 경로(마이크론 범위)

○ 그래핀이 갖는 상기 놀라운 특성들이 수많은 상업적 제품군을 통하여 실현된다면 진정 이들은 우리 삶의 모든 면들을 송두리째 바꿔놓을 수 있을 것이고 이 때문에 우리는 21세기 최대의 와해성 혁신 기술로서 그래핀 기술에 대해 흥분하고 있는 것이다.

○ 일반적으로 대부분의 2차원 소재들은 0 또는 1차원 소재들과는 달리 인공적으로 만들어져 왔다. 우리 생활의 필수품으로 여겨지는 대부분의 전자 소자들에 사용되고 있는 실리콘 트랜지스터가 대표적 2차원 소재의 예이다. 과거 물리학자들은 인공적으로 구조화시키지 않으면 2차원 구조를 갖는 소재는 열역학적으로 불안정하다는 이유로 자연에서 자발적으로 얻어낼 수 없다고 여겨왔다. 하지만 2004년 영국 맨체스터 대학의 노보셀로프와 가임 교수 연구팀이 스카치 테이프를 이용하여 기계적으로 박리시켜 단원자 층의 2차원 그래핀을 분리하여 처음으로 그 존재가 확인되었고, 그래핀의 독특한 전자 구조에 기인한 우수한 전기적, 물리적 특성으로 인하여 전세계 연구자들이 주목하게 되었다.

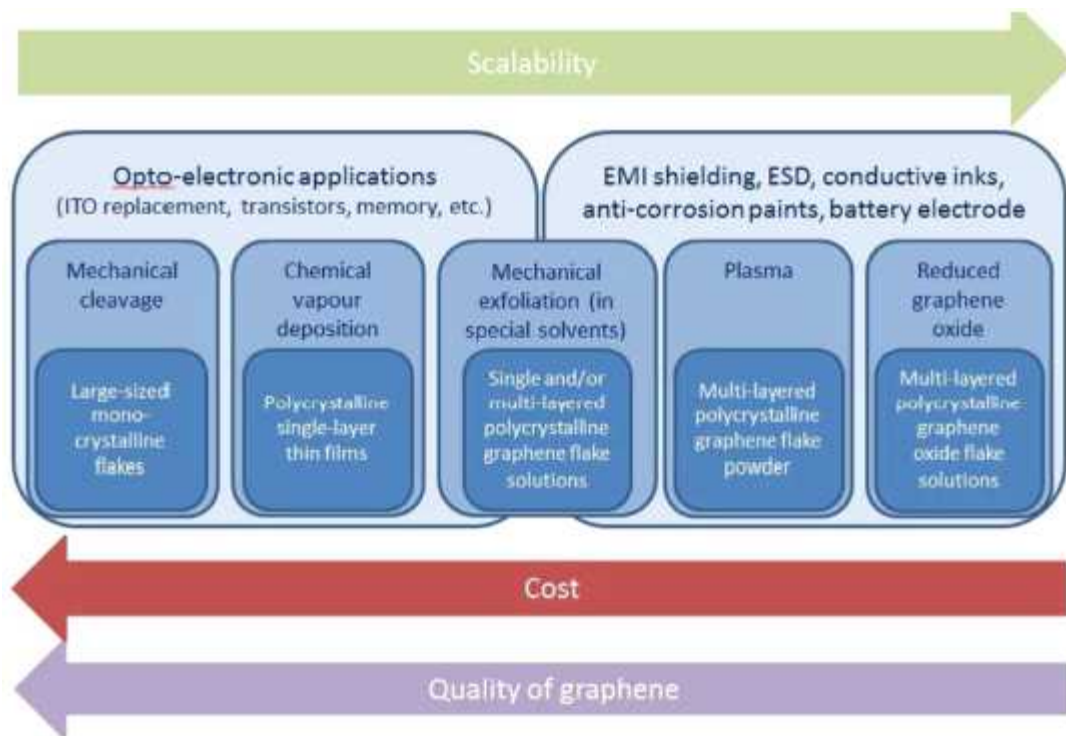
○ 그래핀의 이상적 형태인 대면적의 단결정 단층 쉬트는 앞서 언급한 최상

의 물질 특성을 제공한다. 그렇지만, 그래핀의 실상은 매우 다르다. 이는 이러한 이상적 형태는 제조하기가 매우 어렵고 비용이 많이 들기 때문이다. 이러한 이상적 형태의 그래핀은 스카치 테이프법과 같은 수작업의 기계적 박리법을 사용하여 얻어지는데, 이 방법은 원천적으로 고비용이고, 수율이 낮으며 대량 생산에 부적합하다. 스카치 테이프법 이외에 많은 그래핀 제조법들이 알려져 있는데 이들의 대량 생산 적합성 정도는 상이하지만, 대개 공통적으로 많은 함량의 산소를 포함할 수도 있고, 다결정성이며 복수층인 그래핀이 만들어진다. 제조 방법에 따라 그래핀 품질이 좌우되고 이는 궁극적으로 그래핀으로 가능한 응용 범위를 결정짓는 것이다. 대표적인 그래핀 제조법들에 대하여 크기, 전자 이동성, 전사 공정 가능 여부, 응용 범위 및 대량 생산성 등을 정리하였다.

Method	Mechanical exfoliation	Chemical reduction from graphene oxide	Epitaxial growth on SiC	CVD based graphene growth on Ni, Cu, Fe, Co
Size	10~100 $\mu\text{m}$	> 6 inch	< 4 inch	> 6 inch
Mobility	best	bad	high	high
Transfer	yes	yes	no	yes
Applications	no	yes	little	most
Scalable	no	yes	not yet	yes
				

〈그래핀을 제조법에 따른 제반 특성 비교〉

- 기계 박리법은 스카치 테이프법을 이용한 수작업으로 이루어지며 특정 용매에서 흑연을 초음파 처리하여 제조하는 기계적 박리법과는 구별되어야 할 것이다.
- 주요 그래핀 제조법인 수작업 박리, 화학증착(CVD) 법, 특별히 선정된 용매에서의 초음파를 이용한 기계적 박리, 플라즈마, 환원 그래핀 옥사이드(RGO) 법과 품질, 가격 및 대량 생산성의 관계를 개략적으로 나타내고 있다

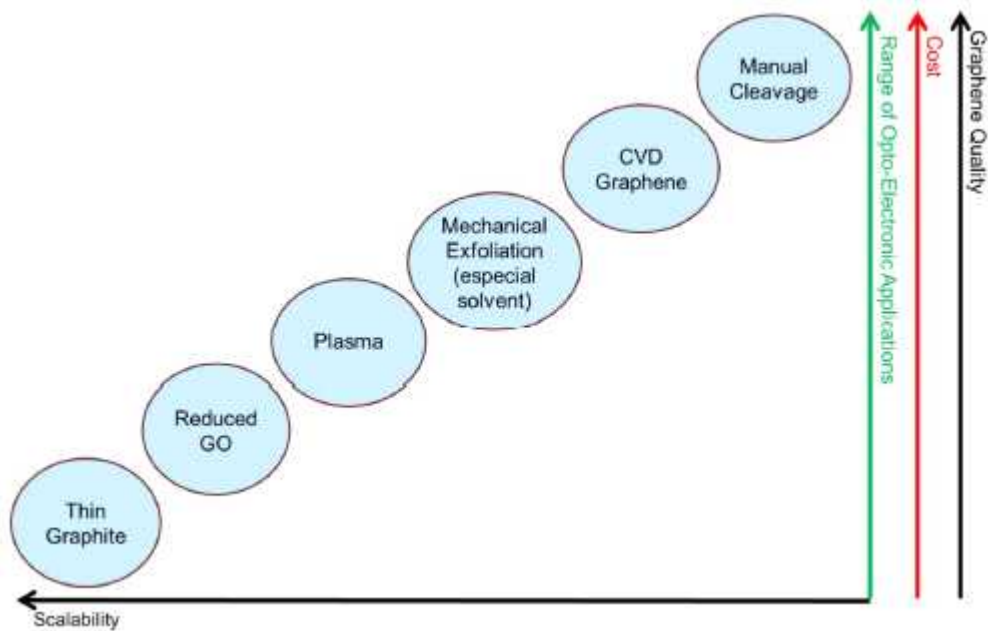


〈다양한 제조법들이 그래핀의 품질, 가격, 대량 생산성 및 접근 가능 시장 등에 미치는 영향〉

(출처 : IDTechEx)

- 위 그림에서 나타난 바와 같이 기계적 박리 및 CVD 법으로부터 유래된 그래핀이 ITO 대체 및 트랜지스터를 포함한 몇몇 광전자 응용 분야에 적합한 물성을 제공한다. 반면, 여타 제조법들은 가격 측면에서 유리하지만, 전자파 차폐, 정전 분산 필름 등 비전자 응용의 저가, 대량 소비형 일렉트로닉스 응용에만 적용 가능할 것이다. 많은 목표 시장에서 그래핀은 다른 형태의 탄소 소재(카본블랙, 탄소섬유, 탄소나노튜브 등)와 경쟁할 수밖에 없을 것이며, 이 때문에 가격과 대량 생산성이 더욱 중요한 변수가 될 것이다. 그래핀 생태계에서 궁극적인 승자는 향상된 제조 기법을 개발한 사람들이 될 것으로 예상되는데 최상의 제조 방법은 광전자 응용과 여타 응용의 두 부류의 응용 분야의 간격을 이어줄 것이다.

- 참으로 다양한 방법으로 그래핀이 제조된다는 사실에도 불구하고 저가, 대량으로 고품질의 그래핀을 생산하는 적합한 제조법은 아직 존재하지 않는다. 아래 그림에 상이한 그래핀 제조법들과 제반 특성들 간의 관계를 도식화하였다.



〈그래핀의 품질, 비용, 접근가능 시장 및 대량 생산성의 함수로 상이한 제조법들을 도식화〉

(출처 : IDTechEx)

- 여기서 주목할 만한 것은 이들 제조법들의 대량 생산성과 비용, 품질 및 응용 범위들 간에는 역비례 관계가 있다는 사실이다. 이는 그래핀 산업의 미래를 정의하는 데 있어서 중요한 특징이라 할 것이다. 대량 생산이 용이한 방법들에 의해서는 낮은 품질의 그래핀만이 제조되며 이들은 고부가가치 광전자 응용에 대응할 수 없고, 반면 가장 대량 생산성이 낮은 제조법들은 충분한 성능을 제공하지만 가격 측면에서 실패할 수밖에 없다.
- 현재로서는 최적의 그래핀 제조 방법이 없기 때문에 전체 그래핀 산업의 진전에 커다란 의문이 제기되고 있는데 그래핀 산업의 성공적 창출을 위해서는 현재 직면한 최대 도전 과제인 이러한 역관계를 제거해야만 할 것이다. 이는 아직도 그래핀 합성·제조 단계에서 급진적 혁신이 요구된다는 것을 의미한다. 이 단계에서, 기존 접근법들을 단계적으로 개선하는 것으로 충분하지 않고 오히려 이보다는 아마도 합성·제조 단계에서 급진적 혁신이 요구된다고 할 것이다. 이것이 출연 연구소와 대학들이 그래핀의 상업화 경쟁에서 아직도 해야 할 분명한 역할이 있고 궁극적 승자로서 부상할 수도 있는 이유라 할 것이다.



## 가) 그래핀의 활용(응용) 분야

- 그래핀 소재는 그림 4에 나타난 바와 같이 우수한 전기적, 기계적, 열적, 광학적 특성으로 인해 투명 전극 소재, 에너지용 전극 소재, 방열 재료, 배리어/코팅 재료, 차세대 반도체, 초경량/고강도 복합소재 등 원소재 및 복합소재 기반의 부품 및 완제품 등 산업적 응용 분야는 무궁무진할 것으로 예측된다. 특히, 그래핀 소재의 적용 분야는 제조법에 따라 그 특성이 다르기 때문에, 전식 방식의 CVD 법을 이용한 고품질/대면적 그래핀의 경우 디스플레이용 투명 전극, 배리어 필름, 초고속 반도체 소자, 에너지 전극, 유기전자 소자, 고성능 광전자 소자 및 초고감도 센서 등에 적용이 가능하다. 이와는 다르게 습식 방식의 화학적 박리법에 의해 얻어진 그래핀은 값싸고 대량 합성이 가능하며 넓은 표면적을 가지고 잔존하는 표면 극성으로 분산성이 우수하기 때문에 초경량/고강도 복합소재, 하이배리어용 복합소재, 이차전지, 연료 전지 등의 전극 소재, 전도성 잉크, 전자파 차폐 도료, 전자제품용 방열 소재 등에 적용이 가능하다.



〈그래핀 소재의 응용 분야〉

- 그래핀 소재를 적용한 제품은 기존의 소재를 대체하여 성능 개선을 기대하고 있으며, 다양한 분야의 시장에 기술이 활용되어 관련 산업의 성장을 견인할 전략적 핵심 소재로서 역할을 할 것으로 예측된다. 또한 현재 우리가 세계적으로 경쟁력 있는 분야뿐만 아니라 신에너지 소재, 초경량 소재 등 잠재성이 큰 분야에서 신시장을 창출할 수 있는 소재임을 알 수 있다.

## 2. 기술 개발 현황

### 가) 그래핀 소재 기술 및 개발 동향

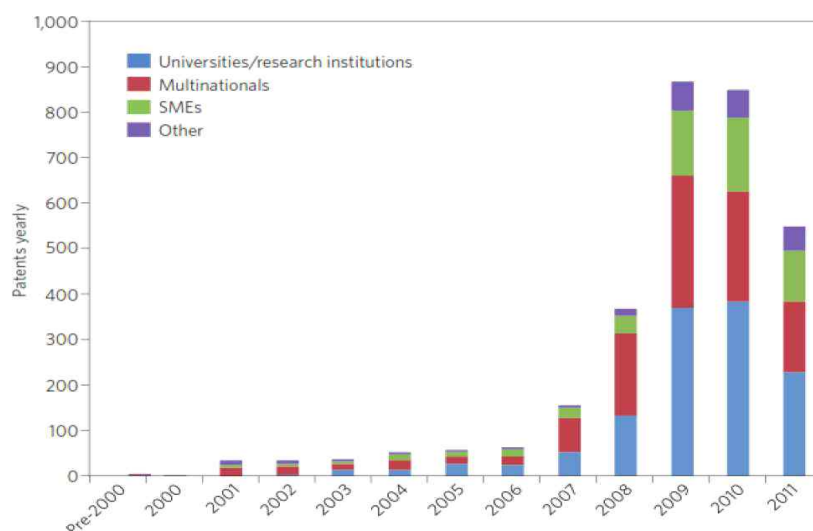
- 그래핀 연구회를 중심으로 활동하고 있는 국내의 그래핀 연구자는 대략 150여 명 규모이며, 국내 연구자들이 발표하고 있는 그래핀 관련 SCI급 논문은 2,167 편으로 전세계 논문 31,117 편의 약 7%를 차지하고 있다 (Web of Science 2004-2015년 ‘graphene’ 키워드 단순 검색 결과).
- 최근 상용화에 적용 가능한 그래핀 합성 기술이 개발되면서 국내 대학, 기업 및 연구소에서 그래핀 관련 연구가 심층적으로 진행 중이며, 주로 CVD 법과 흑연을 이용한 화학적 박리 방식에 의한 소재 합성 기술과 이를 응용한 투명 전극 및 다기능성 복합소재 등의 부품 및 소재 분야에 집중되어 연구되고 있다.
- CVD 법으로 합성하는 그래핀의 경우 양산공정 기술 개발과 이를 활용한 투명 전극 응용 분야에서 우리나라가 세계적인 수준을 보유하고 있으며, 빠른 상용화를 목표로 대학과 기업 및 연구소의 협력 체제를 중심으로 관련 연구 및 기술개발이 빠르게 진행 중에 있다. 또한, 대량생산 및 분산이 비교적 용이한 화학적 박리법으로 얻어진 그래핀 소재의 경우 다양한 기능성 복합재료로의 응용에 대한 연구개발이 주를 이루고 있으며 저온 화학적 박리 및 친환경 박리법 등 그래핀 합성 기술이 국내 대학 및 연구소에 의해 최근 개발되고 있다. 또한, 대학을 중심으로 반도체소자 분야에 적용하기 위한 기초특성 연구가 진행 중에 있으며, 삼성종합기술원에서 이를 이용한 6 인치급 웨이퍼에 소자어레이를 구현하였다.
- 세계적으로 아직까지 응용·상용화보다 기초·원천 연구에 대한 논문이 많이 투고되고 있지만, 최근 응용 및 상용화 연구가 가속화되고 추세이다. 전반적으로 물리 분야 논문이 강세를 보이거나, 화학 및 소재 분야 논문이 최근 들어 급증하고 있다. 이는 응용 연구가 지속적으로 늘어나고



있음을 나타낸다. 최근 그래핀 분야에서 중국이 투고하고 있는 논문의 수가 급증하고 있으며, 중국, EU, 미국에 이어서 한국이 네 번째로 그래핀 분야에서 두각을 나타내고 있다.

- 물리분야에서는 미국과 EU가 강세를 보이며, 중국은 화학, 재료 및 공학 계열에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 국내의 경우 물리학 분야에 비해, 화학 및 재료공학 부문에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 국내의 경우 기초·원천 연구가 많이 이루어졌지만, 2009년도 이후부터는 응용·상용화를 위한 연구도 활발히 이루어지고 있다.

- 아래 그림은 연도별, 출원 주체별 특허 현황을 나타내는데 논문과 거의 같은 추세로 꾸준히 증가 하면서 2011년까지 1,161 건이 출원되었다. 특히 2007년 이후 많이 증가하는 경향을 보이며 미국이 그래핀 관련 특허의 47.7%(554 건)을 보유하며 최다 특허 보유국으로 나타났다. 한편 한국은 354 건으로 30.5%를 차지하며 2위로 나타났으며, 상위 10대 출원인 중 절반이 국내 출원인임을 주목할 만하다(삼성전자, KIST, 성균관대 등). 또한 응용분야 중 OLED 관련 특허는 한국이 44 건의 특허를 출원하여 1위를 차지하였다. 이처럼 세계적 추세에 발맞추어 국내 연구진들도 그래핀 기초 및 응용 연구에 박차를 가하고 있다.



〈그래핀 관련 특허 출원 추세〉

- 특허 상황은 해당 기술이 성공적으로 상업화할 수 있는가를 가름하는 주요 파라미터다. 많은 초창기 업체들의 주된 가치가 그들이 보유한 특허 포트폴리오에 내재되어 있다. 그래핀 영역에서 특허는 많은 신기술들에서처럼 전형적으로 다음 세 카테고리로 출원된다. 첫째, 제조법 관련 특허, 둘째, 배합 및/혹은 마스터 배치 제조 관련 특허, 그리고 마지막으로 셋째, 논리 소자 및 메모리 소자와 같은 응용 관련 특허들이다. 삼성이 특히 특허 분야에서 활동적인데 이는 터치스크린 혹은 논리 및 메모리 소자에 있어서 그래핀의 적용 잠재성 때문인 것으로 추정된다. 또한 제조법 관련하여 매우 강한 특허 활동이 탐지되는데 제조법 측면에서 CVD 법을 이용한 제조법에서 신규 전사 공정에 대한 특허 출원과 그래핀의 액상 박리에 적합한 용제/계면 활성제 조합을 개발하는데 있어 아직도 많은 여지가 남아 있음을 나타낸다.

## 나) 국내외의 연구기관 및 연구그룹

- 국내의 경우 그래핀 연구 초기 단계부터 한국 과학자들의 주도적인 참여로 인해 그래핀 소재 관련 분야에서는 세계적으로 선도적인 위치에 있으며, 특히 대면적 그래핀 합성 기술을 기반으로 한 기초 및 응용 분야에서도 세계적 수준의 원천 기술을 확보하고 있다고 평가된다. 최근 습식 공정을 기반으로 하는 그래핀(graphene nanoplatelets, GNP) 합성 기술 및 복합소재 제조 공정에 관련해서도 우수한 기술력을 보유하고 있으며, 다양한 신규 친환경 대량 생산 기술을 개발해내는 성과도 보여 건식 및 습식 기반 전반에 걸쳐 그래핀 상용화를 위해 근접해 가고 있다.
- 해외의 경우, 2004년 그래핀이 처음으로 발견된 이후 미국과 유럽에서 습식 공정 기반 대량 합성 기술 및 응용 연구가 수행 중에 있으며, 2010년 노벨상 수상 이후 그 투자가 가속화되어 그래핀 상용화를 목표로 연구에 매진 중에 있다. 최근, 일본 소니사에서 롤투롤을 채용한 연속 CVD 공정으로 그래핀을 생산하는 공정을 개발하는 성과를 보이고 있다.
- 국내외의 주요 연구기관 및 그룹, 기술내용은 아래 표에 나타내었다.

기술명	개발기관	기술 내용
롤투롤 대면적 그래핀 CVD 합성기술	성균관대	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cu 촉매를 사용한 그래핀 합성 및 롤투롤 방식을 이용한 전사/에칭기술 개발</li> <li>• 그래핀 스케어로 기술이전</li> </ul>
대면적 그래핀 CVD 합성기술	성균관대-삼성중기원	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si 웨이퍼 상에서 Ni 촉매를 사용한 그래핀 합성기술 개발</li> </ul>
그래핀 터치패널 제작기술	성균관대-삼성테크윈	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 그래핀 투명전극을 활용한 플렉서블 터치스크린 구현</li> </ul>
그래핀 전자소자 제작기술	삼성중기원	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 6인치 웨이퍼에 RF 소자 어레이 구현</li> </ul>
그래핀 Nanoplatelet 저가 제조기술	KAIST, 앤바로테크KIST	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 복합소재용 그래핀 Nanoplatelet 제조기술</li> </ul>
고품질 그래핀 Nanoplatelet 제조기술	UNIST	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Edge 기능화에 의한 고품질 그래핀 제조기술</li> </ul>
저온 화학적 박리기술을 이용한 그래핀 대량 합성	성균관대	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 대량 흑연 화학적 박리 저온공정기술 개발</li> </ul>
습식공정 기반 그래핀 대량생산 상용화기술	KERI	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 화학적 흑연 박리를 통한 그래핀 페이스트 제작</li> <li>• ㈜상보에 기술이전</li> </ul>
그래핀 전극을 이용한 차세대 메모리 소자 제작기술	KAIST	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 그래핀 게이트 전극을 이용한 메모리 제작</li> </ul>
EFG 방식을 이용한 그래핀 대량생산 기술	UNIST	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ball Mill 고속분쇄를 이용한 친환경 저가 그래핀 대량생산 기술</li> </ul>
친환경 방식의 그래핀 대량생산 기술	KIST	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 초임계를 이용한 친환경 저가 그래핀 대량생산 기술</li> </ul>
그래핀을 이용한 슈퍼커패시터 기술개발	KAIST	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 도핑된 그래핀을 이용한 슈퍼커패시터 개발</li> </ul>
그래핀의 태양전지/연료전지 제조기술	GIST, 성균관대	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 그래핀을 태양전지/연료전지 등 에너지 소자 전극 응용</li> </ul>
그래핀 기반 방열필름 개발	SSCP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 세계 최초의 그래핀 대규모 양산 체제 및 방열 필름 제품 개발</li> </ul>

〈국내 주요 그래핀 기술 개발 현황〉

유형	기관명	기술 내용
대학/ 연구소	맨체스터대 (영국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 세계 최초 테이프를 이용하여 흑연으로부터 그래핀 박리</li> <li>• 그래핀을 이용한 가스센서 및 LCD 소자 구현</li> </ul>
	컬럼비아대 (미국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 그래핀 물성, 전자빔식각법에 의한 그래핀나노리본 구조 패터닝 연구</li> </ul>
	UCLA, Rutgers대 (미국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 그래핀의 용액상 분산 및 필름화에 대한 기술 개발 연구</li> </ul>
	프리츠하버연구소 (독일)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SiC 기판 위 그래핀 합성법 및 성질변환 연구</li> </ul>
	막스플랑크연구소 (독일)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 그래핀을 이용한 염료감응 태양전지의 투명전극 연구</li> </ul>
	AIST연구소 (일본)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 그래핀을 이용한 투명전극 및 리튬 이차전지 연구</li> </ul>
기업	IBM (미국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 그래핀을 이용한 RF 소자, 광전자 소자를 개발하는 등 반도체 적용을 위한 연구를 활발히 수행 중</li> </ul>
	XG Science (미국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 다양한 방법으로 그래핀 합성 기술 개발 및 판매</li> </ul>
	Angstrom Materials (미국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 에너지 전극용도의 그래핀 platelet 대량 양산기술 보유</li> </ul>
	Vorbeck Materials (미국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 다양한 방법으로 그래핀 합성 기술 개발 및 판매</li> <li>• Vor-ink TM 잉크 상용화</li> </ul>
	Texas Instruments (미국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CVD 공정으로 수 인치급 그래핀 합성</li> </ul>
	California Lithium Battery (미국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si/그래핀 복합재료 전극 기반 리튬 이차전지 개발</li> </ul>
	Fujitsu (일본)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 그래핀을 태양전지/연료전지 등 에너지 소자 전극 응용</li> </ul>

〈해외 그래핀 대표 연구기관〉

### 3. 산업화 동향

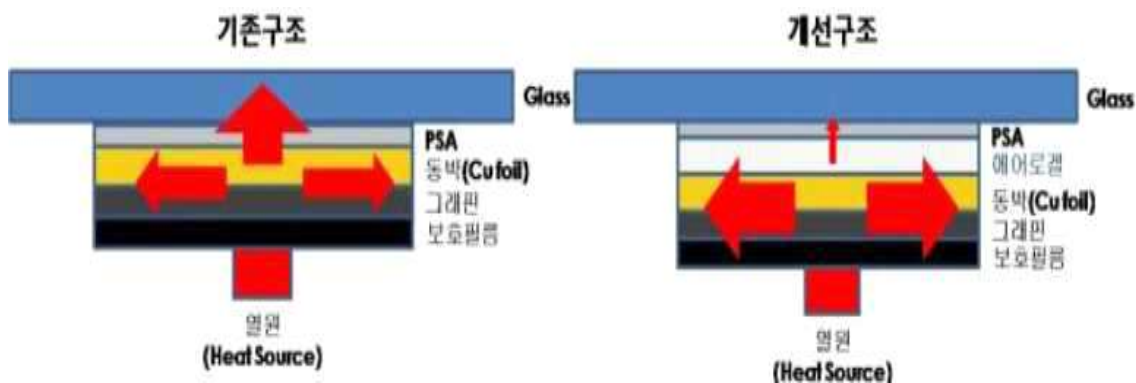
#### 가) 국내외의 산업화 현황 및 주요 업체

- 현재까지는 CVD 법에 의해 합성된 그래핀 소재에 비해 화학적 박리법에 의해 생산된 그래핀 소재를 기반으로 응용 개발이 가속화 되고 있다. 이를 이용한 제품 개발을 하는 국외 기업으로는 Nanotek 사의 경우 그래핀 기반의 슈퍼캐패시터를 개발하였고, 현재 그 성능은 상온에서 85.6 kg Wh/kg 정도로 니켈 금속 기반의 하이브리드 배터리와 그 성능이 유사할 정도로 우수하다.
- 미국의 California lithium battery 사는 그래핀과 실리콘 소재를 복합하여 리튬 이온 배터리용 양극 소재를 개발하고 있다. 실리콘의 경우 이론적으로는 흑연에 비해 약 10 배 이상의 정전 용량의 향상을 기대할 수 있지만, 상업화하여 사용하기에는 신뢰도가 부족하다는 단점이 있다. 이에 California lithium battery 사는 Argonne 사와 협약하여 실리콘과 그래핀 기반 복합소재를 리튬이온 배터리의 양극 물질로서 적용하면 훨씬 성능이 개선되고 안정성이 높아진다고 발표하였다.
- 미국의 Vorbeck 사의 경우 Pacific Northwest National Laboratory(PNNL)와 상업화를 위해 라이선스를 체결하고 그래핀 기반 리튬 이온 배터리를 개발하고 있다. 특히, Vorbeck 사의 경우 그래핀 기반 전도성 잉크 소재를 개발하여 대량 생산 라인까지 갖추었다. 이 전도성 잉크의 경우 유연 기판 위에 인쇄 기술을 적용하여 프린팅이 가능하며 향후 유연 전자소자의 전극으로 적용이 가능할 것으로 예상된다.



〈Vorbeck 사가 개발한 그래핀 기반 전도성 잉크 및 적용 사례〉

- 최근 Alibaba 사는 그래핀 기반 소재를 이용한 휴대폰용 기능성 방열 패드를 생산하여 시판하였다. 국내 기업으로는 Smart & Speed Creation Power(SSCP) 사가 이와 유사한 그래핀 기반 방열 필름을 개발하였다. LED, 디스플레이, 휴대폰, 태블릿 PC 등에 적용 가능한 방열 필름 및 접착제가 개발 완료되어 대규모 양산 체제 및 제품 개발이 이루어지고 있다. 기존의 구리 방열 필름에 비해 약 30% 이상 효과가 향상되고 상대적으로 생산 단가가 낮아지는 등 큰 효과를 얻고 있다.



<SSCP 사가 개발한 그래핀 기반 방열 필름>

- 그래핀 소재를 구조재료로서의 응용을 통해 시판된 제품으로는 Head 사가 개발한 제품으로 그래핀 강화 복합재료(에폭시+그래핀)를 사용하여 라켓 중앙 부분을 경량화함과 동시에 강도가 우수한 제품(테니스 라켓)을 개발하였다.
- CVD 방법으로 합성한 그래핀 소재를 통해 연구개발되고 있는 가능성이 높은 제품으로는 그래핀 투명 전극 기반 유연 터치스크린, OLED, 조명 등의 디스플레이 소자가 있지만 균일도 및 제품의 신뢰도 문제 때문에 양산화되어 제품화되기까지는 시간이 조금 더 필요할 것으로 예상된다.
- 국내외 대표적인 그래핀 관련업체와 주된 응용 분야를 아래 표에 정리하였다.

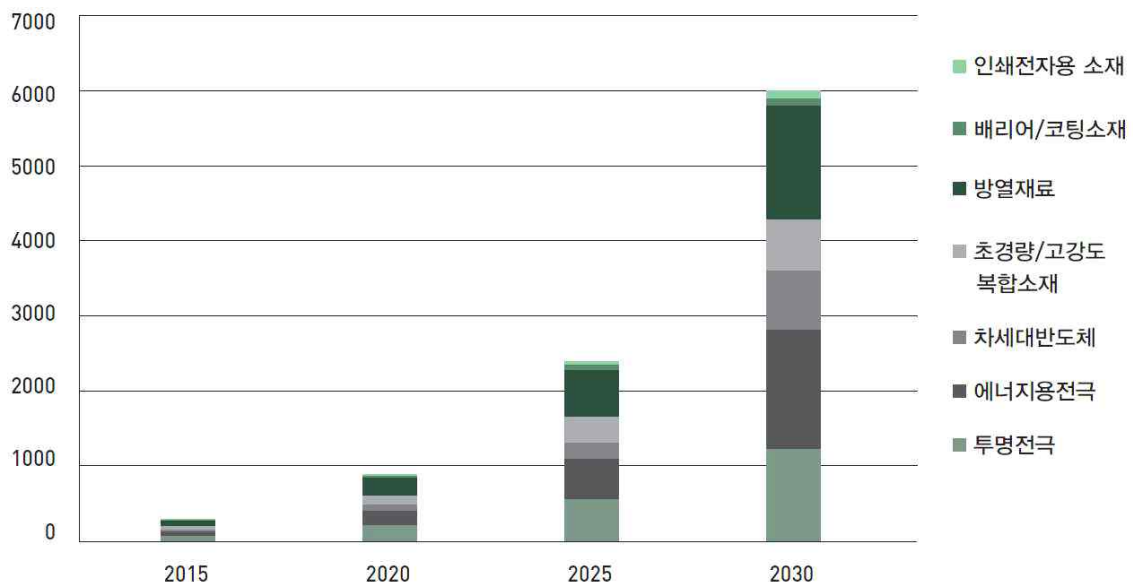


국명	업체명	응용 분야
국외	Graphene Industries	습식 기반의 그래핀 플레이크 생산
	Vorbeck	습식 기반의 그래핀 대량 합성 및 그래핀 소재 기반 전도성 잉크 양산
	Angstrom Materials	습식 기반의 그래핀 플레이크 생산
	XG Science	습식 기반의 그래핀 플레이크 생산 및 고분자 복합소재 제조
	Graphene Energy	습식 기반의 그래핀 플레이크 생산 및 슈퍼커패시터 개발
	Firstnano	고품질 그래핀 CVD 합성 및 장비제작
	California lithium battery	습식 기반의 그래핀 플레이크 생산 및 Si/그래핀 하이브리형 리튬 이온 배터리 양극 전극 개발
	Nanotek Instruments	습식 기반의 그래핀 플레이크 생산 및 슈퍼커패시터 개발
	Head	습식 기반의 그래핀 플레이크를 이용한 테니스 라켓 구조재료 응용 및 양산
	Airbus	습식 기반의 그래핀 플레이크를 이용한 고강도/경량화 복합재료 응용연구
	IBM	초고소 RF 소자, 광전자소자 개발
국내	후지쯔	고품질 그래핀 CVD 저온 합성 및 트랜지스터 개발
	히타치	고품질 그래핀 CVD 합성 및 트랜지스터 개발
	삼성테크윈	고품질 그래핀 CVD 합성 및 장비제작
	삼성중공업	Si/그래핀 하이브리드 트랜지스터 개발
	삼성디스플레이	CVD 그래핀 기반 디스플레이 응용 연구
	LG디스플레이	CVD 그래핀 기반 디스플레이 응용 연구
	LG화학	습식 기반의 그래핀 플레이크를 이용한 이차전지 전극 응용 연구
	현대기아자동차	그래핀 소재 기반의 초경량/고강도 복합소재를 이용한 차량용 구조재료 응용 연구
	포스코	습식 기반의 그래핀 플레이크 생산 및 복합재 양산
	상보	습식/건식 기반의 그래핀을 이용한 하이배리어 필름 개발
	창성	습식 기반의 그래핀을 이용한 전자파 차폐용 코팅제 및 대면적 인쇄 공정 기술 개발
	SSCP	습식 기반의 그래핀을 이용한 방열 필름개발 및 양산
	동진썬미켈	습식 기반의 그래핀을 이용한 에너지용 전극소재 개발
	울촌화학	습식/건식 기반의 그래핀을 이용한 배리어 코팅소재 및 포장재 개발

〈그래핀 소재 기반 상용화를 위한 국내외 연구 개발 현황〉

## 나) 산업화 확대 전망

- 그래핀은 편의성과, 휴대성이 강조되는 차세대 전자소자 트렌드 방향에 결정적인 역할을 할 가능성이 가장 높은 소재로 평가되고 있으며, 발견 초기의 기술 중심적 시야에서 벗어나 산업적 유용성 측면으로 그 관심이 확대되면서 본격적인 성장의 시기를 맞이하고 있다. 또한 미국 물리학회 선정 “미래 정보 기술을 바꿀 가장 주목할 만한 신소재” 로도 소개되고, 그래핀 트랜지스터는 “MIT 선정 10대 유망 기술”에 포함되는 등 국내뿐만 아니라 세계적으로도 각광 받고 있어 산업적 파급효과는 매우 클 것으로 예상된다. 그래핀 소재를 기반으로 한 글로벌 그래핀 시장 규모는 2015년 300억 달러로 성장해 2030년에는 6천억 달러 규모의 시장으로 확대될 것으로 전망된다.



〈그래핀 응용 분야별 시장 성장 규모 및 추세〉

- 그래핀 소재 및 응용 부품 시장은 현재 가장 많은 수요를 창출하고 있는 디스플레이 및 신재생 에너지산업을 중심으로 시장이 더욱 더 확대될 전망이다. 최근 IT 및 에너지용 재료는 희귀 금속 중 하나인 인듐 등 특정 원소재에 치우쳐 있어 단가가 지속적으로 상승할 것으로 예측된다. 따라서 차세대 전자 소자의 저비용, 고성능, 고효율화에 필요한 대체 소재 개발을 위해서 그래핀 및 복합소재 기반의 연구 및 상용화 연구개발이 지속적으로 이루어져 향후 다양한 응용 산업에 적용이 될 것으로 예측된다. 그래핀 소재 기반의 목표 시장 및 점유 시장 전망을 다음의 표에 나타내었다.

응용분야	내 용
투명 전극	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 높은 전기 전도성과 전류 밀도, 투명도를 가지는 그래핀을 이용하여 기존 ITO 전극 대체 가능</li> <li>• 고강도 및 고유연성을 바탕으로 플렉시블 디스플레이 소자에 활용 가능</li> </ul>
차세대 반도체	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 높은 전자 이동도를 가져 실리콘 반도체를 대체하거나 하이브리드 기반 고성능 소자 구현 가능</li> <li>• 20 nm급 이하 선폭에서 구리보다 나은 전도성을 가짐으로써 반도체 내부 배선소재로서 활용이 가능</li> </ul>
에너지용 전극재료	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 넓은 표면적, 우수한 전기적 특성 및 그래핀 기반 복합재료를 이용한 연료전지, 태양전지, 2차전지 등 고용량 및 고성능 전극 소재로 활용 가능</li> </ul>
초경량/고강도 복합소재	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 그래핀 소재 및 고분자 또는 금속과의 복합재료를 이용하여 기계적 물성이 향상되며 기존의 복합소재보다 경량화된 고성능 소재를 기반으로 한 구조재료 활용 가능</li> </ul>
방열재료	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 그래핀의 높은 열 전도도를 이용한 고성능, 경량화, 친환경 및 에너지 절감 고방열 그래핀 나노복합재료로 응용 가능</li> <li>• 디지털 기기의 소형화, 고집적화에 따른 IC, 전원 및 방열판, LED 조명 등에 적용 가능</li> </ul>
배리어/코팅 재료	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 그래핀 소재의 배리어 특성을 이용한 기체 및 수분의 확산/투과를 막는 기능성 코팅 소재로 활용 가능</li> <li>• 디스플레이 및 태양전지 등 수분이나 산소에 의해 취약한 내구성 및 신뢰성을 확보하기 위한 보호재나 식품 포장 재료로 활용 가능</li> </ul>
인쇄전자용 소재	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 분산성이 높은 그래핀 및 그래핀/금속 복합재료를 이용하여 고전도성 잉크 대체 소재로 활용 가능</li> <li>• 인쇄전자 기술 개발에 따른 차세대 나노소자의 프린팅 잉크로서의 활용 가능</li> </ul>

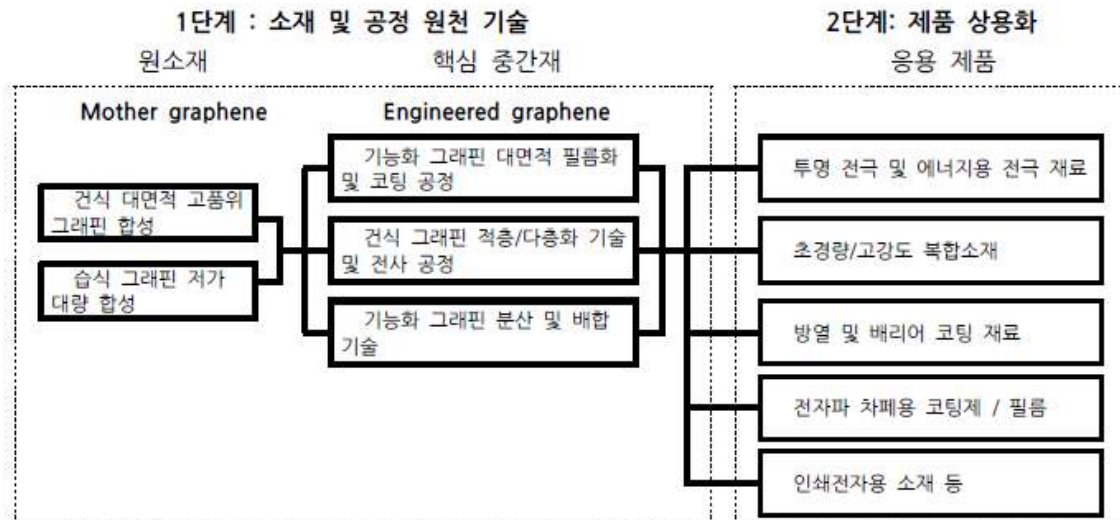
#### <향후 그래핀 소재의 활용성 및 목표 시장>

응용 분야		전 망				최종 점유율
		2015년	2020년	2025년	2030년	
투명 전극	금 액	47	147	356	690	58%
	점유율	80.80%	72.5%	65.0%	57.5%	
에너지용 전극	금 액	5	25	93	310	19%
	점유율	10.0%	13.0%	16.0%	19.0%	
차세대 반도체	금 액	4	20	91	371	48%
	점유율	40.0%	42.5%	45.0%	47.5%	
초경량/고강도 복합소재	금 액	8	25	63	138	21%
	점유율	10.0%	13.8%	17.5%	21.3%	
방열소재	금 액	14	59	202	618	40%
	점유율	20.0%	26.5%	33.0%	39.5%	
배리어/코팅소재	금 액	1	4	10	22	30%
	점유율	10.0%	16.5%	23.0%	29.5%	
인쇄전자용 소재	금 액	2	5	12	29	30%
	점유율	10.0%	16.5%	23.0%	29.5%	
금액 합계		81	285	828	2,178	36%
점 유 율		27.0%	31.7%	34.4%	36.3%	-

#### <향후 그래핀 소재의 활용성 및 목표 시장(단위 : 억 달러)>

## 다) 산업화를 위한 이슈 및 도전 요소

- 그래핀 소재는 우수한 특성과 더불어 다양한 산업에 적용될 수 있는 잠재력이 매우 큰 소재임은 분명하나, 그래핀 소재의 합성 방법에 따라 그 특성과 응용 분야에 대한 제한이 여전히 존재하고 있는 것이 현실이다.
- 대표적으로 양산이 가능한 두 가지 방법 중 화학적 합성법에 의해 얻어진 그래핀은 여러 화학적 처리 과정을 통해 그래핀 고유의 특성이 저하되어 전기적 성능이 좋지 못한 단점이 있어 이를 해결하기 위한 기술개발에 노력이 필요하다. CVD 방법을 이용하여 합성된 그래핀의 경우 고품질의 특성을 가지고 있으나 균일성 및 신뢰성 부분에 있어서 아직까지 지속적으로 개발되어야 할 과제로 남아 있다.
- 따라서 상용화 기술 개발을 위해서는 산 학 연의 유기적 협력을 통한 개발이 필요하며, 산업화를 위한 연구개발뿐만 아니라, 기초 및 원천 기술 단계의 개발도 계속해서 병행해서 이루어져야 함과 동시에 기존의 사고방식에서 벗어난 새로운 응용과 시장 창출이 병행되어야만 할 것으로 판단된다.
- 또한 배합 및/혹은 마스터 배치 관련 기술을 발전시키는 것이 중요하다. 그래핀은 원재료 혹은 분말 형태로서는 사용이 제한적일 것이다. 가장 큰 시장, 시장 창출에 가장 근접한 시장들은 기능성 잉크 혹은 그래핀/고분자 복합체를 기반으로 한다. 두 경우 모두 배합 단계에서 상당한 부가가치가 창출되므로 업체들은 제조와 배합 양자를 수직 계열화하는 것이 산업화 성공에 대단히 중요하다.
- 따라서 그래핀 원소재 뿐만 아니라, 응용 제품에 적용하기 위한 핵심 중간재 개발에 대한 연구도 계속해서 이루어져야 제품 상용화에 한걸음 더 수월하게 다가갈 수 있을 것으로 판단된다.



〈그래핀 소재 · 부품 상용화를 위한 기술 흐름 개략도〉

## 4. 발전 전망

### 가) 기술개발을 위한 각국의 주요 정책 및 수행 사례

- 최근 영국 정부는 5천만 파운드에 달하는 그래핀 프로젝트를 승인하여 그래핀 발견이 시작된 맨체스터 대를 중심으로 영국 내에 그래핀 기초 및 응용 연구 허브를 구축하여 세계적인 주도권 확보를 목표로 하고 있다. 이와는 별개로 EU 경제위원회는 연 1억 유로에 달하는 Graphene Flagship 프로젝트를 10년 계획으로 추진 중에 있으며, 17 개국 75 개 기관이 참여하고 있다.
- 미국의 경우 과학재단(NSF)는 그래핀 관련 연구를 지원하였으며, 2008년도까지 약 2천 8백만 달러 규모의 연구비를 지원하였다. 2008년 한해 지원 규모만 1천 200만 달러에 이르며, 이는 2004년도 지원된 연구비 규모의 10 배가 넘는 규모로, 그래핀 관련 연구 지원이 계속적 증가 추세를 나타내었다.
- 미국 DARPA에서는 Carbon Electronics for RF Application(CERA) 과제를 진행하였으며, 2011년까지 총 3천만 달러 투자를 통해 8 인치 웨이퍼급의 그래핀 제작, 층 수 제어를 통해 고속 RF 소자 개발을 추진하였다.
- 일본은 경제산업성 산하의 산업기술총합연구소(AIST)를 중심으로 그래핀 기초 및 응용 연구를 지원하였으며, 플라즈마를 이용하여 낮은 온도에서 그래핀을 합성하는 연구에 집중되었으며 2010년 약 140억 원 정도의 연구비를 지원하였다.
- 싱가포르는 싱가포르 국립대 그래핀센터를 중심으로 연구 인프라를 구축하고 노벨상급 연구자들을 초빙하여 그래핀 기초 및 응용 연구를 집중해서 육성할 수 있도록 2010년, 2011년에만 약 8000만 달러 정도의 연구비를 지원하였다.



- 국내의 경우, 그래핀 관련 연구는 대부분 교육과학기술부에 의해 지원되었다. 교육과학기술부는 2007~09년 동안 미래기반기술개발사업(6개), 일반연구자 지원사업(21개), 중견연구자지원사업(8개), 미래융합기술파이오니어사업(1개), 선도연구센터지원사업(1개), 세계적연구중심대학지원사업(5개), 기초연구지원사업(8개) 중점연구소 사업 등 총 86개 사업을 통해 총 177억 원 규모의 그래핀 관련 기초 연구를 지원하였다. 지식경제부에서는 산업원천기술개발사업을 비롯한 3개 과제를 통해 그래핀 기술 산업화를 위한 일부 원천 기술 및 응용 기술 개발을 지원되었으며 투자예산이 증가하는 경향을 보이지만 국내 투자 예산의 경우 과제당 지원 금액은 미국의 70%, 유럽의 20% 정도 수준에 불과했다. 신시장 창출 및 선점을 위해 최근 2013년도부터 민간 자본금을 포함하여 총 약 1,257억 원에 달하는 연구비(산업통상자원부 6년간 약 472억 원 규모의 연구비 지원)로 그래핀 원소재 개발 및 유망 응용 분야 개발을 진행하고 있다.

- 이렇듯, 국내뿐만 아니라 세계적으로 그래핀 기술 개발에 대한 투자가 대대적으로 이루어지고 있으며, 그래핀 기술 개발 영역은 고위험·고수익(high risk-high return)의 성격이 강하여 시장 형성 초기 단계에서 기업 주도의 투자는 위험 부담이 크므로 경쟁력 있는 원천 기술 확보와 더불어 상용화를 위한 대량 생산 기술 개발 및 응용 제품 개발을 위해서는 정부의 지속적이고 적극적인 지원이 필요할 것으로 판단된다.

## 나) 기대 및 파급 효과

- 폴러렌, 탄소나노튜브와 같이 그래핀 분야의 발전도 우연한 계기로 발견된 이래 유사한 특성을 갖는 탄소나노튜브에 대한 연구 경험을 바탕으로 급격히 발전하였으며 응용 연구의 전개도 놀라울 정도로 빠르게 이루어지고 있다. 예를 들어 그래핀의 투명 도전성 필름으로의 응용은 기초 연구가 충분히 이루어지지 않은 상태에서 이미 시작되었다. 이는 21세기 연구개발 형태에 있어서 일종의 패러다임의 전환이라 할 수 있다. 즉, 그래핀의 연구개발은 “기초연구→응용연구→실용화”라는 전통적인 연구개발 과정을 거치지 않고 이들 세 단계가 거의 동시에 진행되고 있다. 이는 그만큼 학계, 민간기업 할 것 없이 연구개발의 속도가 매우 빠르고 경쟁이 치열하다는 것을 의미한다.

- 한편 국내의 경우 그래핀 관련 정부 연구개발 투자 규모가 급격한 증가를 보이고 있으나 개인 연구과제 중심으로 산발적 지원에 머물러 있는 실정이었는데 주요 선진국들의 상용화를 위한 대규모 연구개발 투자에 자극을 받아 그래핀 분야 정부 예산 지원 방향이 기초 원천 기술 개발에서 상용화를 통한 미래 신사업 신시장 창출형 선도 기술 개발로 전환되고 있다. 특히 기존의 소규모 개별 연구에서 대규모 협력 연구로 그래핀 연구의 중심축이 이동됨으로써 소재-부품-장비-시스템에 이르는 가치 사슬 전반의 산업 경쟁력 향상을 도모할 수 있는 체계적 연구개발 지원이 개시되고 있음은 매우 다행한 일이다.
  
- 또한 최근 급속한 정보화 기술의 발전으로 언제 어디서나 정보를 접할 수 있는 유비쿼터스시대를 맞이하여 정보화 기기는 굵어지고, 늘어나고, 부착 가능하여 인간에게 편리함을 제공할 수 있으면서 가볍고, 착용감이 우수한 감성적인 제품들이 그래핀을 기반으로 하는 유연전자 기술을 통하여 구현될 것이다. 유연전자 분야뿐만 아니라 그래핀은 에너지용 전극 재료, 방열 소재, 배리어 소재, 고강도·경량화 복합소재, 차세대 반도체 소재 등으로도 활용되면서 20세기 실리콘시대에 이어 21세기 탄소 시대를 본격적으로 여는 첨병이 될 것이다.
  
- 풀러렌의 발견으로부터 23 년, 탄소나노튜브의 발견으로부터 22 년, 그래핀의 단층 분리로부터 9년이 경과하였지만, 나노탄소의 연구개발 역사를 실리콘 시대의 시간대와 비교한다면 이제 막 시작된 분야라 해도 과언이 아니다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 이 분야의 기술 발전 속도는 너무나 빨라서 아무도 기술 실현 시기를 정확히 예측할 수 없다. 이에 그래핀 기술 관련 종사자들은 시대적 사명감을 갖고 그래핀 기술이 가져다 줄 창조적 미래를 가능한 앞당길 수 있도록 매진해야 할 것이다.