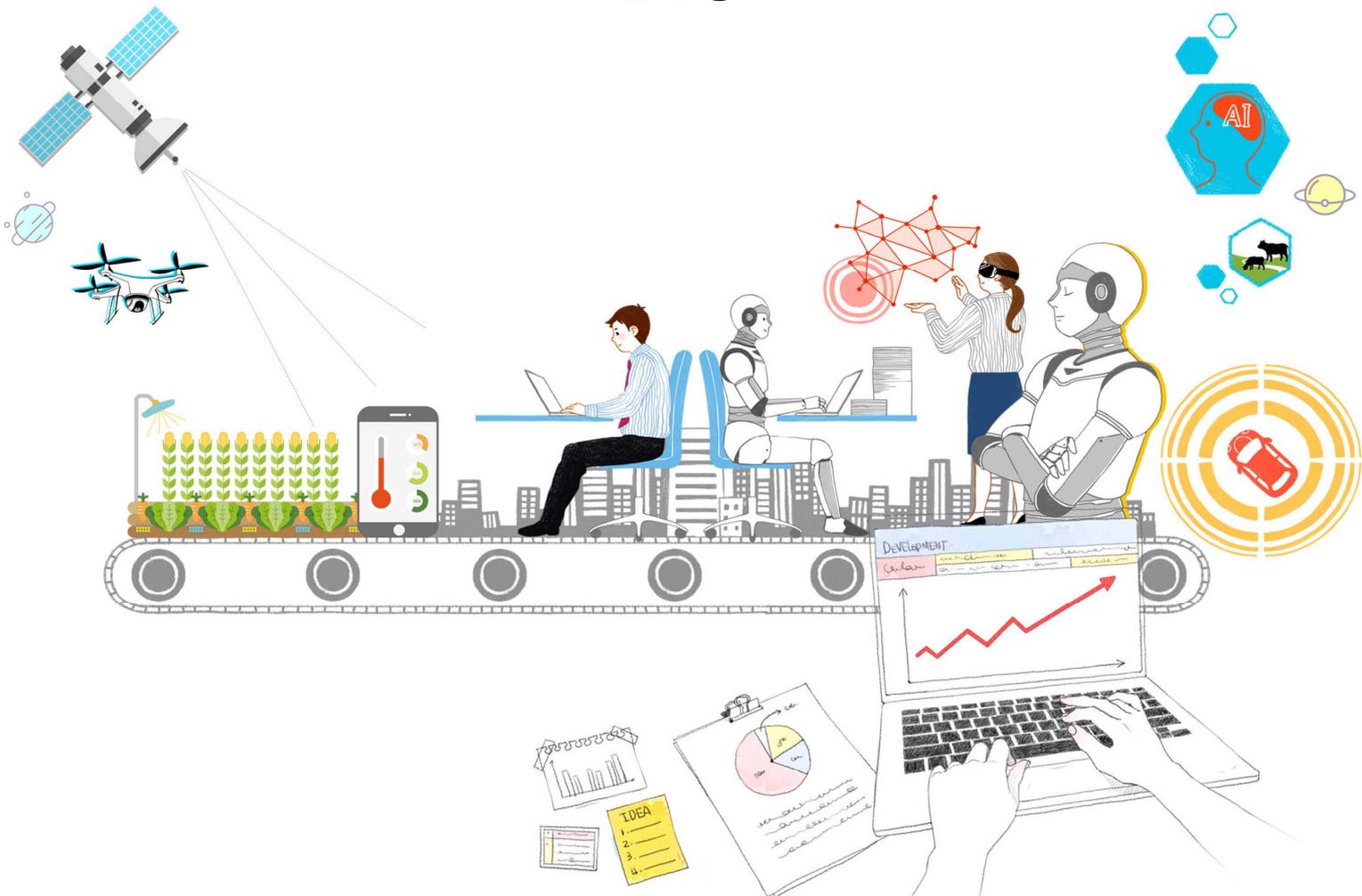
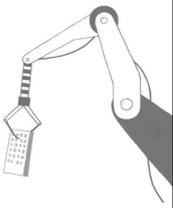
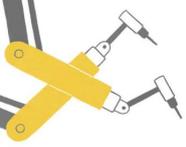


2차원소재

함선영





Contents

 제1장 개요	3
 제2장 기술동향	9
 제3장 산업동향	16
 제4장 정책동향	18
 제5장 R&D 투자동향	20
 제6장 결론	23



제1장 개요

1.1 작성배경

- 2차원소재는 사물인터넷, 휘어지는 소자, 초저전력 소자, 차세대 배터리, 정수 필터, 우주선 등 다양한 산업 분야에 적용 가능한 파급력이 큰 원천기술임



[그림 1] 휘어지는 소자 예시(왼) 및 그래핀 기반 터치스크린 장치(오)

자료: Kim S. J. et al. (2015), 「Annu. Rev. Mater. Res.」 45,16.1-16.22

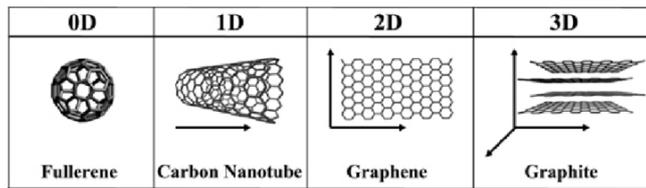
- 최근 다양한 전기적·광학적 성질을 가지는 2차원소재가 급부상하며 기술 응용 범위가 확대되고, 상용화 가능성이 높아짐
 - 최초의 2차원소재인 그래핀은 2010년 노벨물리학상의 주역으로 ‘꿈의 소재’라 불리며 다양한 산업분야에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있음
 - 그래핀은 도체 성질을 가지고 있어 반도체 분야 적용에 어려움이 있었으나, 최근 반도체 성질뿐만 아니라 부도체 성질을 가지는 다양한 2차원소재가 등장하며 응용범위가 확대됨
 - 지속적인 연구개발로 생산비용이 급격히 하락함에 따라 2차원소재의 상용화가 곧 가능할 것으로 전망되며, 세계경제포럼(World Economic Forum, WEF) 2016년 떠오르는 10대 기술 중 하나로 선정됨¹⁾
- 이에 따라 본고에서는 그래핀과 더불어 최근 급부상하는 2차원소재들의 개념 및 특징을 살펴보고, 관련 기술 동향 분석을 통해 시사점을 도출하고자 함

1) World Economic Forum (2016), 「The future of financial infrastructure」.

1.2 2차원소재 정의 및 분류

2차원(2D)소재란 원자들이 단일 원자층 두께(약 1nm=10억분의 1m)를 가지고 평면에서 결정구조를 이루는 물질을 지칭함

- 결정구조의 차원 수에 따라 3차원(3D), 2차원(2D), 1차원(1D), 0차원(0D) 물질로 구분 가능하고, 같은 원소로 이루어진 물질이라도 차원수가 달라지면 원자들 사이의 결합 특성이 달라지므로 기계적 안정성, 전하이동도 등 물질의 특성이 달라짐



[그림 1] 탄소 원자로 이루어진 0D, 1D, 2D, 3D 구조 예시

자료: Machado F. et al. (2015) "Carbon Nanoadsorbents", Springer

- 반데르발스 이종접합구조(Van der Waals heterostructure)는 단일 원자층 구조는 아니지만, 2차원소재의 장점을 극대화할 수 있는 구조로 2차원소재 범주에 속함²⁾
 - 반데르발스 이종접합구조는 서로 다른 2차원소재를 레고블록처럼 층층이 쌓아 만든 복합물질임
 - 반데르발스 이종접합구조를 구성하는 물질의 종류 및 쌓는 순서에 따라 상이한 특성을 가지는 소재를 만들 수 있으므로 2차원소재의 다양성 및 가능성을 극대화할 수 있음

2차원소재는 전기적 특성에 따라 도체, 반도체, 부도체로 분류할 수 있으며, 대표적으로 도체 성질을 가지는 그래핀, 반도체 성질을 가지는 전이금속 디칼코게나이드와 흑린, 부도체 성질을 가지는 육방정계 질화붕소가 있음³⁾

[표 1] 전기적 특성에 따른 2차원소재 구분

전기적 특성	2차원소재 종류			
도체	그래핀	그룹 V TMDCs (VS ₂ 등)	TiS ₂ , NiSe ₂ , PdS ₂ , PtS ₂ , PtSe ₂	...
반도체	전이금속 디칼코게나이드 (MoSe ₂ 등)	ReS ₂ , HfSe ₂ , InSe, GaSe 등	흑린	...
부도체	육방정계 질화붕소	산화 그래핀	2차원 산화물 (Ti _{0.8} O ₂ , LaNb ₂ O ₇ 등)	...

자료: Lee J. Y. et al. (2016), 「Nanomaterials」, 6(11), 193

2) Novoselov K. S. et al. (2016), "2D materials and van der Waals heterostructures" 「Science」, 353(6298), 461

3) 도체(부도체)는 전기가 잘 통하는(통하지 않는) 물질을, 반도체는 도체와 부도체의 중간 성질을 가지는 물질을 지칭하고, 전자띠구조에서 보면 띠틈폭이 0eV면 도체, 0~4eV 정도면 반도체, 5eV 이상이면 부도체로 구분됨

1.3 2차원소재의 개념 및 특징

※ 다양한 2차원소재 중 그래핀, 전이금속 칼코겐화합물, 흑린, 육방정계 질화붕소 물질에 대한 연구가 상대적으로 많이 진행됨

(1) 그래핀

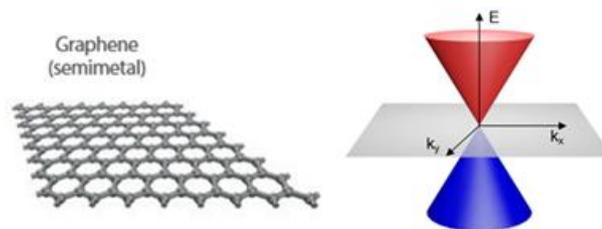
☞ 그래핀은 탄소 원자로 구성된 2차원소재이며, 동소체*로 연필심의 재료인 흑연, 다이아몬드 등이 있음

* 한 종류의 원자로 이루어졌으나 그 성질이 다른 물질로 존재할 때, 이 여러 형태를 부르는 이름

☞ (결정구조) 탄소 원자들이 육각형 모양으로 2차원 평면을 이루고 있음

※ 이 모양을 벌집구조(honeycomb structure) 또는 벌집격자(honeycomb lattice)라고 부름

- (기계적 특성) 2차원 평면상에서 탄소 원자들이 강한 공유결합으로 연결되어있어 물리적, 화학적 안정성이 높고, 강철보다 200배 이상 강하며 기계적인 유연성이 뛰어난



[그림 2] 그래핀의 결정구조(왼쪽) 및 전자띠구조(오른쪽)

자료: Lee J. Y. et al. (2016), 「Nanomaterials」, 6(11), 193

☞ (전자띠구조*) 모래시계 모양과 유사한 ‘디랙 콘(Dirac cone)’ 구조를 가짐

* 고체 내 전자가 가질 수 있는 혹은 가질 수 없는 에너지를 운동량에 대한 함수로 표현한 것

※ 전도띠(빨간색), 원자가띠(파란색), 띠틈격(빨간색과 파란색 사이 간격)으로 구성(그림2)

- ‘디랙 콘’이란 고체 내에서 전자가 가질 수 있는 에너지가 운동량에 대해 선형함수로 표현되는 전자띠구조를 지칭하며, 이 구조를 가지는 물질 내에서 움직이는 전하의 유효질량은 0임
- (전기적 특성) 띠틈격이 없으므로 도체의 성질을 보이며, 전하가 질량이 없는 것 같이 행동하므로 매우 빠른 전하이동도를 보임
 - 구리보다 100배 이상 전기가 잘 통하고, 반도체로 주로 쓰이는 단결정 실리콘보다 100배 이상 전자를 빠르게 이동시킬 수 있음

(2) 전이금속 칼코겐화합물

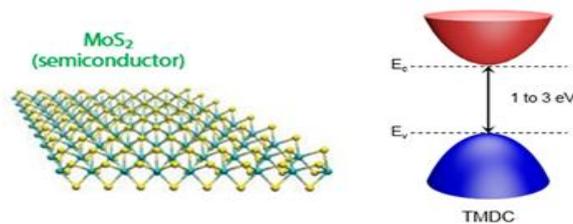
전이금속 칼코겐화합물이란 전이금속과 칼코겐 원소로 이루어진 2차원 층상 구조를 가지는 화합물을 지칭하며, 대표적으로 전이금속(M) 하나와 칼코겐원소(X) 둘이 결합한 전이금속 디칼코게나이드(MX₂)가 있음

※ 전이금속(M): 몰리브데넘(Mo), 텅스텐(W) 등. 칼코겐원소(X): 황(S), 셀레늄(Se) 등

(결정구조) 2차원 전이금속 디칼코게나이드는 칼코겐 두 원소층 사이에 전이금속 단일 원소층이 샌드위치 되어 있는 구조를 가짐

※ 3개의 원자층이 모여서 하나의 층 1TL(Trilayer)을 이룸

- (기계적 특성) 가운데의 전이금속 원자는 아래위로 존재하는 칼코겐 원소와 강한 공유결합을 이루고 있어 물리적, 화학적으로 안정적임



[그림 3] MoS₂ 결정구조(원) 및 전자띠구조(오)

자료: Lee J. Y. et al. (2016), 「Nanomaterials」, 6(11), 193

(전자띠구조) 그래핀과 다르게 1~3eV 정도의 띠허격이 존재하고, 전도띠와 원자가 띠가 포물선 모양으로 표현되며, 소재의 두께에 따라 전자띠구조가 변함

- 수 개의 TL에서 단일층인 1TL로 두께가 얇아지면 층간 상호작용이 달라져 전자띠구조가 변함
 - MoS₂의 경우 3차원소재는 띠허격 1eV의 간접천이형 반도체이지만, 두께가 얇아짐에 따라 단일층이 되면 띠허격 3eV의 직접천이형 반도체가 됨⁴⁾
 - 단일층(1TL)에서 직접천이형 반도체가 되면서 빛의 흡수/방출이 강하게 나타나므로, 광소자에 응용이 용이함
- (전기적 특성) 그래핀과 달리 반도체 특성을 보이므로, 기존의 반도체 소자 대체에 용이하나, 전하이동도는 실리콘이나 게르마늄과 비슷한 수준으로 그래핀보다 다소 낮음

4) Splendiani A. et al. (2010), "Emerging Photoluminescence in Monolayer MoS₂", 「Nano Lett.」, 10, 1271

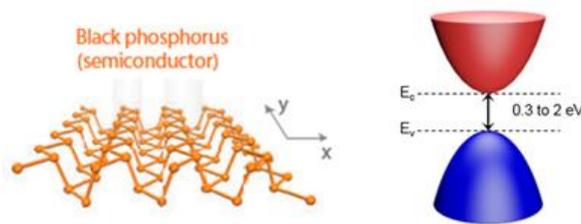
(3) 흑린

흑린은 인(P) 원자로 이루어진 2차원소재이며, 대표적 동소체로 폭죽과 화약에 사용하는 백린과 붉은색 성냥 머리에 활용되는 적린이 있음

※ 흑린은 백린 또는 적린을 고온 고압 환경(약 200°C, 1.2GPa)에서 처리하여 제작됨

(결정구조) 그래핀의 육각 벌집 모양의 결정구조가 마치 한 방향을 따라 규칙적으로 구부러진 것과 같은 ‘주름진 육각벌집(Puckered honeycomb)’ 구조를 가짐

※ 흑린의 단일 원자층을 포스포린이라 지칭하지만, 관용적으로 흑린과 포스포린 용어를 혼용함



[그림 4] 흑린의 결정구조(왼) 및 전자띠구조(오)

자료: Lee J. Y. et al. (2016), 「Nanomaterials」, 6(11), 193

- (비등방성*) 주름진 구조로 인해 특유의 비등방성을 가지며, 규칙적으로 구부러진 방향을 ‘암체어 방향’(x 방향), 그와 수직한 방향을 ‘지그재그 방향’(y 방향)이라 정의(그림4)

* 방향에 따라 물체의 물리적 성질이 다른 것을 뜻함

- 지그재그 방향의 전하 유효질량이 암체어 방향의 전하 유효질량 보다 10배 이상 높음
- 전기전도성은 암체어 방향으로 우세한 반면 열전도성은 지그재그 방향으로 우세함
- 플라즈몬 공명 주파수 역시 암체어-지그재그 방향에 따라 다르므로, 입사광의 선형 편광 방향을 조절하면 공명 주파수의 제어가 가능함

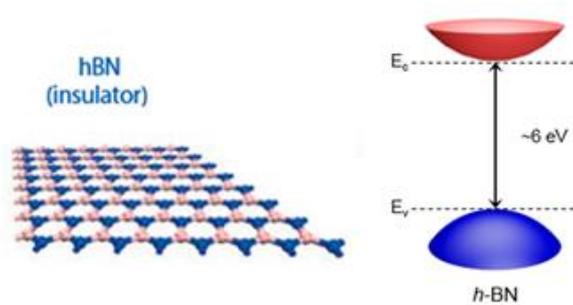
- (기계적 안정성) 산화 등의 문제로 대기 중에서 매우 불안정함

(전자띠구조) 소재의 두께에 따라 띠간격이 0.3~2.0eV로 바뀌지만 항상 직접천이형 반도체 전자띠구조를 유지함

- (전기적 특성) p형(p-type) 직접천이형 2차원 반도체로서 그래핀보다는 전하이동도가 낮지만, 전이금속 칼코겐화합물, 실리콘 보다 우수한 전하이동도를 가짐
- (광학적 특성) 직접천이형 전자띠구조를 가지므로 빛과 강하게 상호작용하고, 띠간격이 두께에 따라 0.3 부터 2.0eV까지 제어 가능하므로 원적외선부터 가시광에 이르기까지 폭넓은 스펙트럼 대역을 포괄하므로 광소자 적용에 용이함

(4) 육방정계 질화붕소

- 육방정계 질화붕소는 붕소와 질소가 1:1 비율로 구성되어있는 화합물 중 육방정계 결정구조를 가지는 물질을 지칭하며, 약칭으로 h-BN으로 표현함
- (결정구조) 그래핀과 유사하게 붕소와 질소 원자가 육각벌집 모양의 평평한 결정 구조를 가짐
 - 질소와 붕소 원자간 결합 길이는 0.144nm로 그래핀의 탄소 원자간 결합 길이인 0.142nm와 매우 유사함
 - (기계적 특성) 붕소와 질소가 강한 공유결합으로 결합되어있어 물리적, 화학적 안정성이 높음
 - 공기 중에서 섭씨 1,000도까지, 진공 중에서 섭씨 1,400도까지 구조가 유지되며, 화학물질과 반응하지 않음
 - 그래핀과 유사하게 투명하고 유연하면서 우수한 기계적 성질을 가짐



[그림 5] 육방정계 질화붕소 결정구조(원) 및 전자띠구조(오)

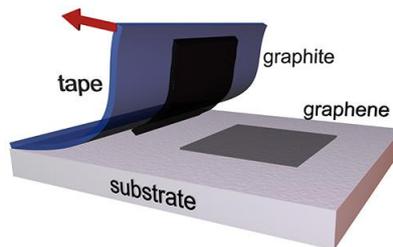
자료: Lee J. Y. et al. (2016), 「Nanomaterials」, 6(11), 193

- (전자띠구조) 그래핀과 결정구조가 유사하나, 육방정계 질화붕소는 6eV 정도의 띠간격을 가짐
 - (전기적 특성) 우수한 부도체의 특성을 보임
 - 그래핀과 거의 동일한 구조를 가지면서 부도체이므로, 이상적인 그래핀의 기판으로서 적합함
 - (열전 특성) 전자-포논간 상호작용이 약하므로 다른 탄소동소체들에 비해 더 높은 열전도성을 가짐

제2장 기술동향

2004년 흑연으로부터 그래핀을 분리하는데 최초로 성공한 이래로 본격적인 2차원소재 연구가 시작됨

- 흑연 덩어리 물질에 접착성 스카치테이프를 붙였다 떼었다 반복하여 몇 겹의 원자 층을 기계적으로 벗겨내는데 성공했고, 이러한 방법을 ‘기계적 박리법(Mechanical exfoliation)’이라 지칭함⁵⁾
 - 그래핀은 흑연과 같은 원소로 이루어졌음에도 불구하고, 흑연과 매우 상이한 특성을 가진다는 연구결과가 보고됐고, 이는 연구자들이 다른 3차원소재들의 2차원 결정구조에 관심을 가지게 되는 계기가 됨



[그림 6] 스카치테이프를 이용한 그래핀 제작 도식도

자료: <http://www.graphene.ac.rs/exfoliation.html>

- 별다른 장치 없이 기계적 박리법을 통해 고품질의 2차원소재를 얻을 수 있으므로, 연구자들은 흑연과 같이 층상구조를 보이는 3차원소재에 이 방법이 적용했고, 그 결과 다양한 2차원소재가 발견됨
 - 2010년 2차원 MoS₂의 직접천이형 반도체 특성⁶⁾과 2차원 육방정계 질화붕소⁷⁾의 발견 연구가 보고됐고, 2014년 최초의 2차원 흑린이 제작됨⁸⁾
- 그러나 기계적 박리법을 통해 얻은 시료의 크기가 대부분 1 μ m(=10⁻⁶m) 수준으로 매우 작다는 단점이 있어 주로 기초연구 단계의 2차원소재 제작에 사용됨

5) Novoselov K. S. et al. (2004), "Electric field effect in atomically thin carbon films", 『Science』, **306**, 666-669

6) Mark K. F. et al. (2010), "Atomically thin MoS₂: A New direct-gap semiconductor", 『Phys. Rev. Lett.』, **105**, 136805

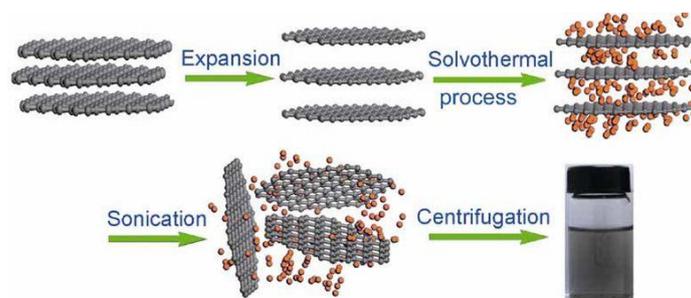
7) Dean C. R. et al. (2010), "Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics", 『Nat. Nanotechnol.』, **5**, 722-726

8) Li L. et al. (2014), "Black phosphorus field-effect transistors", 『Nature Nanotech.』 **9**, 372

- 현재 고품질·대면적 소재를 제작하기 위한 연구와 기초단계의 소재 적용 연구가 활발히 진행되고 있음

2.1 고품질·대면적 소재 제작 연구

- 다양한 산업 분야에 2차원소재를 적용하기 위해서는 양산되고 있는 반도체 웨이퍼 수준의 고품질·대면적 소재 제작이 필수적임
- 2차원소재 제작법은 덩어리 물질로부터 2차원소재를 분리하는 Top-down 방식과 기판 위에 결정을 성장시키는 Bottom-up 방식으로 분류됨
- 대표적 Top-down 방식으로, 기계적 박리법과 액상 박리법이 있음
 - (액상 박리법, Liquid exfoliation) 3차원소재의 층상구조 특징을 이용하는 방법으로, 용액에 3차원소재를 넣어 층간 간격을 넓힌 후 2차원소재를 얻는 방법임⁹⁾
 - 저렴한 비용으로 대량의 2차원소재 제작이 가능하며 주변 환경의 영향을 크게 받지 않는다는 장점이 있으나, 박막의 균일도가 떨어지며 대면적 소재를 얻는데 한계가 있다는 점과 용매를 제거하는 과정에서 오염 발생 가능성이 높다는 단점이 있음



[그림 7] 액상 박리법을 이용한 그래핀 추출 과정 도식도

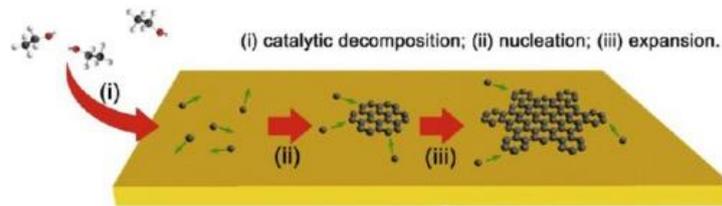
자료: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12274-009-9074-z>

- 대표적 Bottom-up 방식으로 화학기상 증착법과 초고진공 에피택시 합성법이 있음
 - (화학기상 증착법, Chemical Vapor Deposition, CVD) 주로 고온·저압에서 안정적인 가스를 이용해 하나 이상의 휘발성 전구체를 기판에 공급한 후 전구체와 기판 표면의 화학반응을

9) Nicolosi V. et al. (2013), "Liquid exfoliation of layered materials", 『Science』, **340**, 1226419

통해서 2차원소재를 성장시키는 방법임¹⁰⁾

- 2차원소재의 층수 조절이 용이하며 웨이퍼 크기 수준의 대면적 합성이 가능하나, 복잡하고 민감한 합성 조건이 필요하고, 고품질 박막 합성이 어렵다는 단점이 있음



[그림 8] CVD를 이용한 그래핀 성장 과정 도식도

자료: Chen X. -P. et al. (2015), 「Synth. Met.」 **210**, 95-108

- (초고진공 에피택시 합성, Ultra vacuum epitaxy) 초고진공 상태에서 하나 이상의 물질을 기화시키고, 기화된 분자들을 기판에 공급하여 기판의 결정축을 따라서 단결정 박막을 합성하는 방법¹¹⁾
 - 대표적으로 MBE(Molecular Beam Epitaxy)* 기술이 있음
 - * 초고진공 상태에서 증발된 결정 재료가 분자나 원자 형태로 빔을 형성하여 기판 위에 도달한 후 기판 표면과 반응하여 결정을 성장시키는 방법임
 - 환경적인 요인 통제가 용이하여 고품질의 박막성장이 가능하나, 고가의 장비가 필요하며 합성 공정이 복잡하다는 단점이 존재함

앞서 소개된 제작법 등을 통해 2차원소재 제작 연구가 활발히 진행되고 있음

- 그래핀의 경우 대면적 제작에 성공했고¹²⁾, 현재는 고품질의 그래핀 합성 및 시료 품질 확인을 위한 방법들이 연구되고 있음
- MoS₂의 경우 CVD 등의 방법을 이용해 4인치 크기의 균일한 소재를 합성하는데 성공함¹³⁾
- 육방정계 질화붕소는 대면적 합성이 가능하나, 결정 구조 내에 정교한 제어가 불가능한 결정 결점이 있어 이를 극복하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있음

10) Lee J. H. et al. (2014), "Wafer-scale growth of single-crystal monolayer graphene on reusable hydrogen-terminated germanium", 「Science」, **344**, 286-289

11) Tsai C. L. et al. (2009), "Molecular beam epitaxial growth of hexagonal boron nitride on Ni(111) substrate", 「J. Cryst. Growth」, **311**, 3054

12) Kim K. S. et al. (2009), "Large-scale pattern growth of graphene films stretchable transparent electrodes", 「Nature」, **457**, 706-710

13) Kang K. et al. (2015), "High-mobility three-atom-thick semiconducting films with wafer-scale homogeneity", 「Nature」, **520**, 656

- 볼 밀링(Ball-milling)* 방법으로도 소재 제작이 시도됐으나, 박막 사이즈와 두께조절의 어려움, 오염 등의 문제점이 존재함¹⁴⁾
 - * 고속으로 운동하는 구슬을 이용해 육방정계 질화붕소 덩어리 결정에 직접적으로 전단응력을 가해 반데르발스결합을 끊고 2차원구조로 분리하는 방법
- 최근 비교적 열팽창계수의 차이가 작은 사파이어를 기판으로 사용하여 대면적 다층 육방정계 질화붕소를 고품질로 합성한 결과가 보고됨¹⁵⁾
- 흑린의 대면적 합성 기술은 아직 정립되지 않았고, 최근 학계에서 흑린의 대면적 합성 기술 확보를 위한 다양한 시도들이 이루어지고 있음
 - 덩어리 흑린의 제조법을 차용하여 기판 위에 적린을 박막의 형태로 증착한 후 고온·고압 처리를 거쳐 수 밀리미터(~mm) 수준의 대면적 흑린을 제조¹⁶⁾
 - 고풍력 펄스 레이저를 덩어리 흑린에 쬐어 용삭하여 얇은 박막의 흑린을 남기는 제조 방법이 있는데, 이 방법을 통해 모체와 같은 크기의 대면적 흑린 제조가 가능할 뿐만 아니라 집적된 레이저를 이용하여 단일 공정으로 원하는 형태로 패턴화 된 흑린을 만들 수 있다는 장점이 있음¹⁷⁾
- 최근에 2차원 자성 소재(FePS_3 ¹⁸⁾, CrI_3 ¹⁹⁾, $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ ²⁰⁾) 합성에 성공함
 - FePS_3 는 반강자성, CrI_3 와 $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ 은 강자성 특성을 지님
 - ※ 강자성이란 막대자석처럼 외부 자기장이 없는 상태에서도 자화되는 물질의 자기적 성질을 말하며, 반강자성은 전자의 자화가 인접한 자화와 균일하게 반대로 정렬하여 순 자성이 없는 상태를 지칭함

2.2 기초단계의 소재 적용연구

 2차원소재를 다양한 산업분야에 적용하기 위한 소재 적용 연구가 활발히 진행되고 있음

-
- 14) Li L. H. et al. (2011), "Large-scale mechanical peeling of boron nitride nanosheets by low-energy ball milling", 「J. Mater. Chem.」, **21**, 11862
- 15) Jang A. R. et al. (2016), "Wafer-Scale and Wrinkle-Free Epitaxial Growth of Single-Orientated Multilayer Hexagonal Boron Nitride on Sapphire", 「Nano Lett.」, **16**, 3360
- 16) Li X. et al. (2015), "Synthesis of thin-film black phosphorus on a flexible substrate", 「2D Materials」, **2**, 031002
- 17) Qiu G. et al. (2018), "Ultrafast Laser-Shock-Induced Confined Metaphase Transformation for Direct Writing of Black Phosphorus Thin Films", 「Advanced Materials」, **30**(10), 1704405
- 18) Lee J. -U. et al. (2016), "Ising-Type Magnetic Ordering in Atomically Thin FePS_3 ", 「Nano Lett.」, **16**(12), 7433-7438
- 19) Huang B. et al. (2017), "Layer-dependent ferromagnetism in a van der Waals crystal down to the monolayer limit", 「Nature」, **546**, 270-273
- 20) Gong C. et al. (2017), "Discovery of intrinsic ferromagnetism in two-dimensional van der Waals crystals", 「Nature」, **546**, 265-269

☞ (디스플레이) 디스플레이의 핵심 요소인 투명전극과 트랜지스터에 2차원소재를 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있음

- 그래핀의 우수한 전기전도도와 가시광선에 투명한 특성은 투명전극으로서 적합하고, 최근 그래핀에서 기존의 대표적 투명전극인 ITO*에 근접하는 전류 및 밝기 효율이 보고됨²¹⁾
 - * ITO는 인듐 주석 산화물(Indium tin oxide)의 약칭이며, 주로 디스플레이, 터치스크린 등에 사용되는 대표적인 투명전극 소재로 가격이 비싸고 유연성이 떨어진다는 단점이 있음
- 최근 2차원소재로만 이루어진 트랜지스터(All-2D transistor) 구현 연구 결과가 보고됨
 - 흑린을 이용한 p형 및 n형의 전계 스위칭 소자가 구현됐고, 이를 이용해 흑린만으로 이루어진 시모스(CMOS, complementary metal-oxide-semiconductor) 회로 구성 가능²²⁾
 - 최근 전극 물질로 그래핀, 절연층으로 h-BN, 채널 물질로 MoS₂를 적용한 소자가 구현됐고, 상온과 저온에서 우수한 전하 이동도가 관측됨²³⁾
- 그래핀을 이용해 용매에 따라 자유자재로 색깔을 바꾸는 ‘하이브리드 탄소 구조체’ 개발에 성공했고, 미래형 TV, 의료용 영상 진단기기 등 다양한 분야에 응용이 기대됨²⁴⁾

☞ (광소자) 2차원소재는 자외선부터 테라헤르츠파에 이르기까지 다양한 빛과 상호 작용 가능하므로 광소자로서 활용범위가 넓음

- 트랜지스터 기반의 단일층 MoS₂ 광검출 소자는 가시광선 영역에서 우수한 광반응이 보고됨²⁵⁾
- 흑린에 수소나 플루오린을 흡착하면 에너지 전환 효율이 무려 20% 까지 증가하는 것으로 알려져 태양전지 등에 활용하고자 하는 연구 활발히 진행 중²⁶⁾

☞ (센서 및 필터) 2차원소재는 두께에 비해 표면적이 넓어 센서나 필터에 적합함

- 그래핀과 공기를 이용해 손가락이 스치는 힘부터 사람 몸무게로 누르는 큰 압력까지 감별

21) Han T. -H. et al. (2012), “Extremely efficient flexible organic light-emitting diodes with modified graphene anode”, 「Nat. Photonics」, **6**, 105

22) Perello D. J. et al. (2015), “High-performance n-type black phosphorus transistors with type control via thickness and contact-metal engineering”, 「Nat. Commun.」 **6**, 7809

23) Cui X. et al. (2015), “Multi-terminal transport measurements of MoS₂ using a van der Waals hetero-structure device platform”, 「Nat. Nanotechnol.」, **10**, 534-540

24) Choi Y. et al. (2017), “Morphology Tunable Hybrid Carbon Nanosheets with Solvatochromism”, 「Adv. Mater.」, **29**(24), 1701075

25) Oriol L. -S. et al. (2013), “Ultrasensitive photodetectors based on monolayer MoS₂”, 「Nat. Nanotechnol.」, **8**, 497

26) Hu W. et al. (2016), “Edge-Modified Phosphorene Nanoflake Heterojunctions as Highly Efficient Solar Cells”, 「Nano Lett.」, **16**, 1675

가능한 3차원 압력 센서가 제작됐고, 이는 3차원 터치패널, 스마트 운동화, 차세대 투명 전자소자 등에 응용이 기대됨²⁷⁾

- 그래핀을 이용한 생체모방형 촉감 구현 시스템이 개발됐고, 이는 물체 표면의 질감을 구분할 뿐만 아니라 수치화 할 수 있어 로봇에 적용이 기대됨²⁸⁾
- 물과 섞이지 않는 그래핀의 소수성을 이용해 물의 여과 및 해수 담수화 과정에 이용하기 위한 연구가 활발히 진행 중²⁹⁾
- 흑린과 전이금속 디칼코게나이드는 고민감도의 가스센서로 응용하기 위한 연구 진행 중
 - 흑린은 질소를 포함하는 분자가 흡착하면 단분자 단위의 전도성 변화가 예상됨³⁰⁾
 - 전이금속 디칼코게나이드의는 가스 분자들이 화합물 표면에 접촉 시 전하수송에 의해 전기적 특성이 민감하게 변화한다는 특성이 있음³¹⁾

 (배터리) 그래핀을 리튬이온전지 등의 음극재로 사용하여 충전 용량을 늘리고, 충전 속도를 높이는 연구가 진행되고 있음

- 3차원 그래핀을 합성해 전지의 음극재로 사용하여 약 100mAh 수준의 정전용량을 약 300mAh까지 끌어올리는데 성공했고, 전기자동차나 수소자동차에 응용이 기대됨³²⁾
- ‘그래핀볼’을 합성해 리튬이온전지의 음극재로 사용함으로써 기존의 리튬이온 전지보다 충전 용량은 45% 더 크고 충전 속도는 5배 이상 빨라지는 결과가 보고됨³³⁾

 (초경량·초강력 소재) 그래핀은 얇고, 가벼우면서 철강에 비견하는 강도를 가지고 있어 우주선, 우주복 등의 소재로서 주목받고 있음

27) Shin S. -H. et al. (2017), “Integrated arrays of air-dielectric graphene transistors as transparent active-matrix pressure sensors for wide pressure ranges”, 『Nat. Commun.』, **8**, 14950

28) Chun S. et al. (2017), “A tactile sensor using single layer graphene for surface texture recognition”, 『Nanoscale』, **9**, 10248-10255

29) Homaeigohar S. et al. (2017), “Graphene membranes for water desalination”, 『MPG Asia Materials』, **9**, e427

30) Ray S. J. (2016), “First-principles study of MoS₂, phosphorene and graphene based single electron transistor for gas sensing applications”, 『Sens. Actuators B: Chem.』, **222**, 492-498

31) Rao C. N. R. et al. (2015), “Comparative Study of Potential Applications of Graphene, MoS₂, and Other Two-Dimensional Materials in Energy Devices, Sensors, and Related Areas”, 『ACS Appl. Mater. Interfaces』, **7**, 7809-7832

32) Kim K. et al. (2016), “Lanthanum-catalysed synthesis of microporous 3D graphene-like carbons in a zeolite template”, 『Nature』, **535**, 131-135

33) Son I. H. et al. (2017), “Graphene balls for lithium rechargeable batteries with fast charging and high volumetric energy densities”, 『Nat. Commun.』, **8**, 1561

- 우주선의 경로에 존재하는 먼지입자 또는 원자 충돌에 의한 초소형 우주선 손상을 방지하기 위해 그래핀을 이용해 얇은 이중 차폐막을 만드는 아이디어가 제안됨³⁴⁾
- 옷처럼 가볍고 유연하면서도 다양한 방사선을 막아주는 우주복을 만드는데 이용할 수 있는 육방정계 질화붕소 나노튜브 소재 제작에 성공³⁵⁾

(바이오) 2차원소재를 이용해 생물과 기계를 연결하거나, 동물의 뇌 구조를 모사해 동물 실험 대체 가능성을 제시하는 연구결과들이 보고되고 있음

- 그래핀과 나노와이어 기술을 접목해 인간 뇌와 기계를 연결할 수 있는 고효율 뇌신경 탐침 개발에 성공했고, 전기 자극을 통한 뇌질환 치료, 로봇과 인체 결합 기술에 응용이 기대됨³⁶⁾
- 그래핀과 금속섬유를 이용해 신축성 있는 전자 피부 제작에 성공했고, 온도와 촉감을 느끼는 것은 물론 인간의 피부가 할 수 없는 다양한 기능까지 더할 수 있어 다양한 분야에 응용 기대됨³⁷⁾
- 산화그래핀을 이용해 동물의 실제 뇌의 구조를 모사하는 3차원 인공 신경네트워크 구현에 성공했고, 이는 동물 실험의 윤리적인 문제뿐만 아니라 여러 생체조직의 3차원 모사에도 널리 이용 될 것으로 기대됨³⁸⁾

34) Hoang T. et al. (2017), "The Interaction of Relativistic Spacecrafts with the Interstellar Medium", 「Astrophys. J.」, **837**, 1

35) <http://news.mk.co.kr/newsRead.php?year=2017&no=624109>

36) Ryu M. et al. "Enhancement of Interface Characteristics of Neural Probe Based on Graphene, ZnO Nanowires, and Conducting Polymer PEDOT", 「ACS Appl. Mater. Interfaces」, **9**(12), 10577-10586

37) An B. W. et al. (2014), "Stretchable and Transparent Electrodes using Hybrid Structures of Graphene-Metal Nanotrough Networks with High Performances and Ultimate Uniformity", 「Nano Lett.」, **14**(11), 6322-6328

38) Kim D. et al. (2017), "3D Neuronal Networks: Multiscale Modulation of Nanocrystalline Cellulose Hydrogel via Nanocarbon Hybridization for 3D Neuronal Bilayer Formation", 「Small」, **13**(26), 1700331

제3장 산업동향

2차원소재를 이용해 양산되고 있는 상용제품은 아직 없으며, 거래 되고 있는 제품은 고가의 연구용 시료가 대부분이고, 그래핀의 경우 여러 가지 응용제품이 출시되기 시작한 단계임³⁹⁾

- 해외 주요 그래핀 플레이크* 원소재·중간재 생산 업체로는 미국의 XG Science, Angstrom Materials, 중국의 Xiamen Knano, 영국의 Haydale 등이 있음

* 흑연으로부터 박리하는 형식으로 만들어진 작은 그래핀 조각

[표 2] 해외 주요 그래핀 플레이크 원소재·중간재 생산 및 개발 현황

기업체	생산 및 개발 현황
XG Science(미)	방열소재, 인쇄전자용 잉크, 에너지 저장 소재용 원소재, 방열필름, XG Leaf™ 생산 및 2차전지용 음극재 개발 중
Angstrom Materials(미)	전자파 차폐제, 에너지 저장 소재용 원소재 생산 및 2차전지용 음극재, 접촉소재, 배리어소재, 커패시터용 전극소재 개발 중
Vorbeck Materials(미)	원소재, 인쇄전자용 잉크소재 생산 및 전도성 페이스트, 복합소재 개발 중
Xiamen Knano(중)	원소재 생산 및 복합소재 개발 중
Applied Graphene Materials(미)	경량화 제품 적용을 위한 원료 배합물 소재 개발 중
Haydale(영)	플라즈마 전처리를 통한 고분산, 고기능화 그래핀 나노분말 소재 개발중

자료: 「그래핀 사업화 촉진 기술 로드맵」

- CVD 그래핀* 응용제품을 개발하고 있는 대기업은 미국의 IBM, 록히드마틴, 한국의 삼성, 네덜란드의 필립스 등이 있음

* 화학기상 증착법(Cheical Vapor Deposition)을 통해 제작된 그래핀

[표 3] 국내외 대기업 CVD 그래핀 응용제품 개발 현황

국적	기업명	개발중인 제품	장점
미국	IBM	저전력 트랜지스터	저전력
	록히드마틴	해수담수화막	담수용량 5배
한국	삼성	반도체	고속
네덜란드	필립스	OLED 조명, 진단기기	발광효율, 고해상도

자료: 「그래핀 사업화 촉진 기술 로드맵」

39) 소대섭 (2017), 「그래핀」, KISTI 마켓리포트 & 미래창조과학부·산업통상자원부 (2015), 「그래핀 사업화 촉진 기술 로드맵(2015~2020)」

- 국내 그래핀 플레이크 응용소재를 개발하는 대기업은 한화, 포스코, 일진 등이 있고, 중견기업은 동진세미켄, 상보, 창성, 대주전자재료, 솔브레인 등이 있으며, 중소기업은 에비켄텍, 월드튜브, 제이오, 우인에쓰티, 라미나 등이 있음

[표 4] 국내 그래핀 플레이크 응용소재 개발 업체

구분	기업명	원소재 공급 방법	개발중인 중간재
대기업	한화	XG Science 지분 매입	코팅용 페이스트
	포스코	XG Science 지분 매입	고내식 강판
	일진	Angstrom에서 수입	에너지 저장, 투명전극
중견기업	동진세미켄	Angstrom에서 수입	전자파 차폐막
	상보	XG Science에서 수입	배리어
	창성	Angstrom에서 수입	전자파 차폐막
	대주전자재료	Angstrom, XG Science에서 수입	에너지 저장
중소기업	솔브레인	Angstrom, XG Science에서 수입	잉크, 페이스트
	에비켄텍	Angstrom, XG Science에서 수입	정전기 방지막, OLED 적용 부품
	월드튜브	Angstrom에서 수입	방열시트
	제이오	Angstrom에서 수입	잉크, 페이스트
	우인에쓰티	Angstrom에서 수입	센서
	라미나	Angstrom에서 수입	잉크, 페이스트

자료: 「그래핀 사업화 촉진 기술 로드맵」

2차원소재 관련 기초연구 및 원천기술 확보를 위한 국내외 기업들의 노력이 활발히 이루어지고 있음

- 최근 5년간('12~'16년) 광소재로서의 전이금속 칼코겐화합물 특허출원 현황을 살펴보면, 대부분이 내국인의 특허 출원인 것으로 나타났으며(87.4%), 최다 출원인은 삼성전자(10.7%)임⁴⁰⁾

[표 5] 전이금속 칼코겐화합물의 광소재 응용 관련 특허출원 조사 결과('12~'16년)

내국		외국	
특허출원인	건수	특허출원인	건수
삼성전자 주식회사	23	타이완 세미콘덕터 매뉴팩처링 컴퍼니 리미티드 내셔널	3
경희대학교 산학협력단	21	마이크론 테크놀로지, 잉크	3
연세대학교 산학협력단	18	더 유니버시티 오브 맨체스터	3
에스케이하이닉스 주식회사	16	소니 주식회사	2
성균관대학교 산학협력단	11	벨레노스 클린 파워 홀딩 아게	2

자료: 특허청 (2017), 「광소재 분야 미래소재, 국내 연구개발 붐물!」

- 삼성전자, LG전자는 그래핀 관련 기초연구 수행 결과를 저명한 국제학술지에 게재함⁴¹⁾

40) 특허청(2017), 「광소재 분야 미래소재, 국내 연구개발 붐물!」

41) Son I. H. et al. (2017), "Graphene balls for lithium rechargeable batteries with fast charging and high volumetric energy densities", 「Nat. Commun.」, **8**, 1561 & Celebi K. et al. (2014), "Ultimate Permeation Across Atomically Thin Porous Graphene", 「Science」, **344**(6181) 289-292

제4장 정책동향

중국과 EU는 정부차원에서 전략적으로 그래핀 관련 정책을 수립하고 있음

- (중국) 정부차원에서 전략적으로 그래핀 연구개발을 추진하고 있음⁴²⁾
 - 국가혁신촉진발전전략요강에서 주력 산업에 대한 개혁 및 혁신을 통해 새로운 산업을 촉진하고 일자리를 마련할 것을 제시했고, 신소재 산업 부문에서는 나노 소재 및 그래핀이 주력 산업이라고 밝힘('16.5)
 - '13.5 계획 요강'에서 그래핀, 슈퍼신소재 등 나노미터급 소재 개발에 집중할 것이라고 표명함('16.3)
 - '그래핀 산업 혁신발전에 관한 몇 가지 의견'에서 그래핀 소재 표준화, 계열화, 원가 절감 등을 통해 2020년까지 그래핀 산업 시스템을 갖출 계획임을 밝힘('15.11)
 - 「중국제조 2025」를 달성하기 위한 10대 전략적 중점분야 중 그래핀 포함('15.5.)⁴³⁾
 - ※ '2020년까지 100억 위안 정도의 산업 규모로 확대, 2025년까지 전체 산업 규모 1,000억 위안 이상으로 조성' 이라는 중국 그래핀 산업에 관한 향후 10년 발전전략을 명시('15.9)⁴⁴⁾
- (EU) '미래 유망 기술 플래그십 사업' 중 하나로 그래핀 관련 프로젝트 추진 중
 - 그래핀 연구 활성화 및 유럽 경제성장과 일자리 창출을 목표로 기초·원천연구부터 부품 생산, 시스템 통합에 이르는 연구개발을 수행하고 있음⁴⁵⁾
 - (영국) 기술전략위원회는 '2017~2018 회계연도 사업계획'에 그래핀 관련 내용 포함('17.12)⁴⁶⁾
- (일본) 나노탄소소재의 산업응용을 위한 3가지 테마를 선정하여 실용화 개발에 착수함⁴⁷⁾
 - 테마 중 하나는 그래핀 양산기술개발을 통해 고품질이면서 저가인 그래핀을 시장에 공급하는 것을 목표로 하고 있음
- (미국) National Science Foundation(NSF)을 중심으로 지속적으로 지원하고 있음

42) Kotra 해외시장뉴스 (2017), "중국 그래핀(Graphene) 산업 동향과 전망", 9월 15일

43) 이용태 (2017), 「중국의 신소재 발전계획」, 과학기술정책연구원

44) 신화망 (2017), "그래핀, 기초 연구개발에서 산업화로 발전", 11월 11일

45) Wikipedia. "Graphene Flagship", https://en.wikipedia.org/wiki/Graphene_Flagship 검색일 2018년 3월 31일

46) Innovate UK (2017), 「Delivery plan-shaping the future 2017-2018」

47) 신에너지산업기술종합기공 (2015), "NEDO, 나노탄소소재의 산업응용을 위한 실용화개발 3테마에 착수", 12월 18일

 한국은 「제4기 나노기술종합발전계획」에 그래핀 산업화 촉진을 위한 핵심기술 확보관련 내용을 포함시킴⁴⁸⁾

- 「제4기 나노기술종합발전계획」 내 3대전략 12개 과제 중 그래핀 산업화 촉진 핵심기술 확보관련 내용 포함('16.4)
- 「제4기 나노기술종합발전계획」에 따라 '17년도 나노기술발전을 위한 범부처 차원의 세부 추진계획인 「2017년도 나노기술발전시행계획(안)」을 수립했고, 본 내용에 그래핀 및 2D 반도체 신소재 원천기술 개발 내용 포함('17.3)⁴⁹⁾
- 미래소재산업 선도국 실현을 위한 「그래핀 사업화 촉진 기술 로드맵(2015~2020)」 마련('15.4)⁵⁰⁾
 - 원소재 생산기술 확보 및 전략적 상용화를 통해 그래핀 세계시장을 선점하기 위해 국가 차원의 전략로드맵 제시

48) 관계부처합동 (2016), 「제4기 나노기술종합발전계획(대한민국 나노혁신 2025)」

49) 관계부처합동 (2017), 「2017년도 나노기술발전시행계획」

50) 미래장조과학부, 산업통상자원부 (2015), 「그래핀 사업화 촉진 기술 로드맵(2015~2020)」

제5장 R&D 투자동향

중국, EU, 싱가폴은 그래핀 관련 연구를 대형 프로젝트로 집중 투자하고 있고, 이러한 프로젝트를 수행하는 연구기관들은 대부분 그래핀에서 다른 2차원 소재까지 영역을 확장하여 연구를 수행 중임

- (중국) 국가자연과학기금위원회는 3억 위안(한화 약 500억 원) 이상의 자금을 그래핀 산업 관련 프로젝트에 투입⁵¹⁾
- (EU) 매년 1억 유로(한화 1590억 원) 규모의 '그래핀 플래그십' 프로젝트 추진
 - '13년부터 10년간 그래핀과 같은 2차원소재 상용화에 10억유로(약 1조4600억원)를 투자⁵²⁾⁵³⁾
- (싱가폴) 싱가포르국립대 'Center for Advanced 2D Materials(CA2DM)'을 중심으로 매년 약 1000억 원에 달하는 연구 인프라를 구축
- (일본) 경제산업성 주도로 나노탄소재료 실용화 프로젝트 추진 중이며, 약 15.4억 엔(한화 16억 원) 정도가 투자됨('14년 기준)

한국의 '16년 2차원소재 관련 정부R&D 투자액은 683억 원으로, 전체 정부R&D 투자액(19조44억)의 0.36%에 해당함

- ※ (조사방법) '14, '15, '16년도 「국가연구개발사업 조사·분석」 자료에서 정부R&D 투자로 수행된 과제 중 과제명에 다양한 2차원소재의 국문 혹은 영문명, '2차원', '이차원'을 포함하는 과제들을 선별한 후, 선별된 과제들의 요약문 검토를 통해 2차원소재와 관련된 과제들을 최종 선별함
- (기술분야 투자액) '14년도부터 '16년도까지 2차원소재 기술분야 정부R&D 투자액 및 투자액 비중은 매년 증가
 - 투자액은 '14년도 515억 원, '15년도 573억 원, '16년도 683억 원으로 매년 증가
 - 투자액 비중은 '14년도 0.29%, '15년도 0.30%, '16년도 0.36%로 매년 증가

※ 기술분야 투자액 비중(%)=(기술분야 투자액/총 정부R&D 투자액)×100

51) Kotra 해외시장뉴스 (2017), "중국 그래핀(Graphene) 산업 동향과 전망", 9월 15일

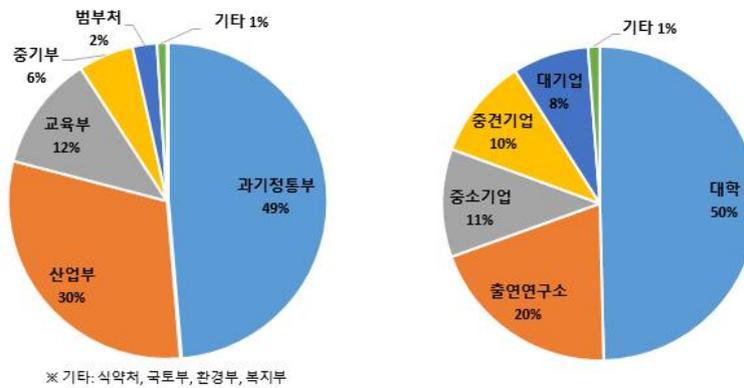
52) 매일경제 (2015), "실리콘반도체 뛰어넘는 '2차원 물질' 확보...이르면 5년내 상용화", 8월 7일

53) 박호선 (2015), 「유럽의 그래핀 기술개발 동향」



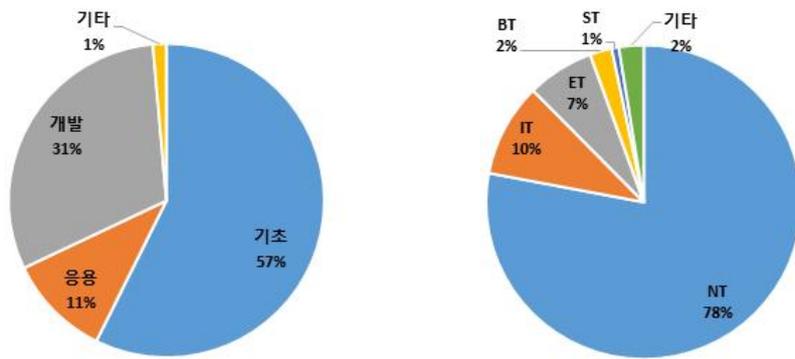
[그림 9] 기술분야 정부R&D 투자액 및 투자액 비중('14~'16)

- (부처별) '14~'16년도 부처별 투자액 비중은 과기정통부(49%), 산업부(30%), 교육부(12%), 중기부(6%), 범부처*(2%) 순
* 과기정통부와 산업부
- (연구수행주체별) '14~'16년도 연구수행주체별 투자액 비중은 대학(50%), 출연연구소(20%), 중소기업(11%), 중견기업(10%), 대기업(8%) 순



[그림 10] 부처별(왼), 수행주체별(오) 기술분야 정부R&D 투자액 비중('14~'16)

- (연구개발단계별) '14~'16년도 연구개발단계별 투자액 비중은 기초연구(57%), 응용연구(11%), 개발연구(31%) 순
- (6T기술분류별) '14~'16년도 6T기술분류별 투자액 비중은 NT(78%), IT(10%), ET(7%), BT(2%), ST(0.7%) 순
※ NT(나노기술), IT(정보기술), ET(환경·에너지기술), BT(생명공학기술), ST(우주항공기술), CT(문화기술)



[그림 11] 연구개발단계별(왼), 6T기술분류별(오) 기술분야 정부R&D 투자액 비중('14~'16)

- (주요사업) '16년도에 전략적으로 2차원소재 연구개발을 추진한 사업은 「나노융합산업핵심 기술개발」, 「나노소재기술개발」, 「나노융합2020」임
 - (투자액비중 기준 상위 5개 사업) 전부 산업부 혹은 과기정통부에 의해 수행된 사업으로, 이는 두 부처를 중심으로 기술분야에 정부R&D 비용이 전략적으로 투자되었다는 것을 의미함
 - ※ 「그래핀소재부품상용화기술개발」과 「나노소재수요연계제품화적용기술개발」 사업은 '16년도에 「나노융합산업핵심기술개발」 사업으로 통합됨
 - (투자액 기준 상위 5개 사업) 절반 정도가 연구자 수요 중심의 개인 기초연구 지원 사업*으로, 이는 2차원소재 연구가 연구자들의 수요에 의해 기초수준에서 진행되는 경우가 많다는 것을 의미함
 - * 「중견연구자」, 「일반연구자지원」, 「신진연구자지원」, 「이공학개인지초연구지원」, 「개인연구지원」

[표 6] 기술분야 투자액 및 투자액비중 기준 상위 5개 사업 목록('14~'16)

년도	투자액 기준 상위 5개 사업	투자액비중 기준 상위 5개 사업	
2014	그래핀소재부품상용화기술개발 (110억)	그래핀소재부품상용화기술개발 (100%)	산업부
	중견연구자 (75억)	나노소재수요연계제품상용화기술개발 (15%)	산업부
	일반연구자지원 (52억)	나노소재기술개발 (9%)	과기정통부
	신진연구자지원 (28억)	산학연협력활성화지원 (8%)	과기정통부
	나노소재기술개발 (27억)	나노융합2020 (6%)	산업부·과기정통부
2015	그래핀소재부품상용화기술개발 (116억)	그래핀소재부품상용화기술개발 (100%)	산업부
	중견연구자 (79억)	나노소재수요연계제품화적용기술개발 (14%)	산업부
	이공학개인지초연구지원 (56억)	나노소재기술개발 (10%)	과기정통부
	에너지자원융합핵심기술개발 (31억)	산학연협력활성화지원 (8%)	과기정통부
	신진연구자지원 (29억)	나노융합2020 (5%)	산업부·과기정통부
2016	개인연구지원 (120억)	나노융합산업핵심기술개발 (28%)	산업부
	나노융합산업핵심기술개발 (113억)	나노소재기술개발 (20%)	과기정통부
	나노소재기술개발 (89억)	나노융합2020 (10%)	산업부·과기정통부
	이공학개인지초연구지원 (49억)	산학연협력활성화지원 (8%)	과기정통부
	한국기계연구원연구운영비지원 (38억)	국제연구인력교류 (7%)	과기정통부

제6장 결론

6.1 요약 및 정리

-  2차원 평면에서 결정구조를 이루고 있는 2차원소재는 사물인터넷, 휘어지는 소자, 초저전력 소자, 차세대 배터리, 정수 필터, 우주선 등 다양한 산업 분야에 적용 가능한 파급력이 큰 원천기술임
-  2차원소재를 이용해 양산되고 있는 상용제품은 아직 없으며, 2차원소재와 관련되어 거래 되고 있는 제품은 고가의 연구용 시료가 대부분이고, 그래핀의 경우 여러 가지 응용제품이 출시되기 시작한 단계임
-  다양한 산업 분야에서 2차원소재를 상용화하기 위해 고품질·대면적 2차원소재 제작연구와 기초단계의 소재 적용연구가 활발히 진행되고 있음
 -  다수의 2차원소재의 대면적 제작에 성공했으나, 현재 상용되고 있는 반도체 웨이퍼 수준의 품질에는 이르지 못했고, 이를 개선하기 위한 노력이 활발히 이루어지고 있음
 -  2차원소재의 기본적인 특성을 연구하는 기초연구와 실제 소재를 소자에 적용하여 작동 여부 및 성능을 확인하는 적용연구가 진행되고 있고, 새로운 2차원소재 발굴을 위한 노력도 함께 이어지고 있음
-  EU, 싱가포르, 중국은 그래핀 관련 대형 프로젝트를 추진하여 전략적으로 연구 개발을 수행하고 있고, 미국은 기초연구 위주로 지속적으로 지원하고 있음
-  한국은 과기정통부와 산업부를 중심으로 정부R&D 예산이 2차원소재 기술분야에 투자되고 있으며, 연구자 수요 중심의 개인기초연구와 전략적 연구개발이 함께 진행되고 있음

6.2 정책제언

 2차원소재 기술분야에서 한국의 강점은 튼튼한 전·후방산업이 존재하는 것이고, 약점은 추격형R&D를 수행하고 있다는 것임⁵⁴⁾

- (강점, Strength) 반도체, 디스플레이 등의 전방산업이 활성화되어 있어 확실한 수요시장이 존재하고, 전방산업에 비해 다소 약하지만 소재제작 기술 등의 후방산업 원천기술도 보유*하고 있음

* 국내 연구진에 의해 최초로 대면적 그래핀 제작에 성공함

- (약점, Weakness) 신소재 발굴 등의 선도형R&D 및 기초연구 경험이 부족함
- (기회, Opportunity) 아직 2차원소재를 이용해 양산되고 있는 상품이 없으므로 국내의 튼튼한 전·후방 산업을 활용하여 2차원소재 기술 산업화 및 시장을 선도할 기회가 존재함
- (위기, Threat) 중국은 최근 막대한 자본력을 바탕으로 추격형R&D를 진행하고 있음

 한국은 강점과 기회를 활용하여 산업화를 선도해야하고, 약점과 위기를 보완하기 위해서 추격형R&D에서 선도형R&D로 전환해야 함

- 후방산업에 집중 투자하여 대면적·고품질 2차원소재 양산 기술을 다른 주요국 보다 먼저 확보하고, 국내의 튼튼한 전방산업을 기반으로 2차원소재 산업화를 선도해야 함
- 2차원소재 기술분야 정부R&D 투자액 중 절반 정도가 연구자 수요 중심의 개인기초에 투자되고 있다는 것은 추격형R&D에서 선도형R&D로 전환하는데 적합한 추세이나, 신소재 발굴 등 기술 공백이 발생할 수 있으므로 다부처 협업을 통한 연구개발 추진 전략 마련이 필요함

54) 2차원소재 전문가 3인의 자문을 통해 2차원소재 기술분야에서 한국의 S(강점), W(약점), O(기회), T(위협) 분석

| 참고 문헌 |

- 김근수 (2016), 「2차원 반도체와 흑린의 연구동향」, 물리학과 첨단기술
- 관계부처합동 (2016), 「제4기 나노기술종합발전계획(대한민국 나노혁신 2025)」
- 관계부처합동 (2017), 「2017년도 나노기술발전시행계획」
- 매일경제 (2015), “실리콘반도체 뛰어넘는 ‘2차원 물질’ 확보…이르면 5년내 상용화”, 8월 7일
- 미래창조과학부, 산업통상자원부(2015), 「그래핀 사업화 촉진 기술 로드맵(2015~2020)」
- 박호선 (2015), 「유럽의 그래핀 기술개발 동향」
- 소대섭 (2017), 「그래핀」, KISTI 마켓리포트
- 신에너지산업기술종합기구 (2015), “NEDO, 나노탄소재료의 산업응용을 위한 실용화개발 3테마에 착수”, 12월 18일
- 신현석 외 4명 (2016), 「육방정계 질화붕소의 최근 연구 동향」, 물리학과 첨단기술
- 신화망 (2017), “그래핀, 기초 연구개발에서 산업화로 발전”, 11월 11일
- 안종현 외 2명 (2016), 「전이금속 칼코겐화합물의 합성과 전자소자 응용」, 물리학과 첨단기술
- 양희준 (2016), 「전이금속 칼코겐화합물의 구조 상전이」, 물리학과 첨단기술
- 이용태 (2017), 「중국의 신소재 발전계획」, 과학기술정책연구원
- 조경재 (2016), 「2차원 반도체와 첨단 과학기술」, 물리학과 첨단기술
- 최성울 외 2명 (2016), 「이차원 소재 및 응용 소자 기술 동향」, 한국정보디스플레이학회
- 특허청(2017), 「광소재 분야 미래소재, 국내 연구개발 봇물!」
- Kotra 해외시장뉴스 (2017), “중국 그래핀(Graphene) 산업 동향과 전망”, 9월 15일
- Kotra 해외시장뉴스 (2017), “중국 그래핀(Graphene) 산업 동향과 전망”, 9월 15일
- 홍석륜 (2016), 「‘그래핀을 넘어’ 2차원 물질에 대한 연구 동향」, 물리학과 첨단기술
- 황찬용 (2016), 「그래핀2.0」, 물리학과 첨단기술
- An B. W. et al. (2014), “Stretchable and Transparent Electrodes using Hybrid Structures of Graphene-Metal Nanotrough Networks with High Performances and Ultimate Uniformity”, 「Nano Lett.」, 14(11), 6322-6328
- Celebi K. et al. (2014), “Ultimate Permeation Across Atomically Thin Porous Graphene”, 「Science」, 344(6181) 289-292
- Chen X. -P. et al. (2015), “Large area CVD growth of graphene” 「Synth. Met.」 210, 95-108

- Choi Y. et al. (2017), “Morphology Tunable Hybrid Carbon Nanosheets with Solvatochromism”, 「Adv. Mater.」, 29(24), 1701075
- Chun S. et al. (2017), “A tactile sensor using single layer graphene for surface texture recognition”, 「Nanoscale」, 9, 10248–10255
- Cui X. et al. (2015), “Multi-terminal transport measurements of MoS₂ using a van der Waals heterostructure device platform”, 「Nat. Nanotechnol.」, 10, 534–540
- Dean C. R. et al. (2010), “Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics”, 「Nat. Nanotechnol.」, 5, 722–726
- Gong C. et al. (2017), “Discovery of intrinsic ferromagnetism in two-dimensional van der Waals crystals”, 「Nature」, 546, 265–269
- Han T. -H. et al. (2012), “Extremely efficient flexible organic light-emitting diodes with modified graphene anode”, 「Nat. Photonics」, 6, 105
- Hoang T. et al. (2017), “The Interaction of Relativistic Spacecrafts with the Interstellar Medium”, 「Astrophys. J.」, 837, 1
- Homaeigohar S. et al. (2017), “Graphene membranes for water desalination”, 「MPG Asia Materials」, 9, e427
- Hu W. et al. (2016), “Edge-Modified Phosphorene Nanoflake Heterojunctions as Highly Efficient Solar Cells”, 「Nano Lett.」, 16, 1675
- Huang B. et al. (2017), “Layer-dependent ferromagnetism in a van der Waals crystal down to the monolayer limit”, 「Nature」, 546, 270–273
- Innovate UK (2017), 「Delivery plan-shaping the future 2017–2018」
- Jang A. R. et al. (2016), “Wafer-Scale and Wrinkle-Free Epitaxial Growth of Single-Orientated Multilayer Hexagonal Boron Nitride on Sapphire”, 「Nano Lett.」, 16, 3360
- Kang K. et al. (2015), “High-mobility three-atom-thick semiconducting films with wafer-scale homogeneity”, 「Nature」, 520, 656
- Kim D. et al. (2017), “3D Neuronal Networks: Multiscale Modulation of Nanocrystalline Cellulose Hydrogel via Nanocarbon Hybridization for 3D Neuronal Bilayer Formation”, 「Small」, 13(26), 1700331
- Kim K. et al. (2016), “Lanthanum-catalysed synthesis of microporous 3D graphene-like carbons in a zeolite template”, 「Nature」, 535, 131–135
- Kim K. S. et al. (2009), “Large-scale pattern growth of graphene films stretchable transparent electrodes”, 「Nature」, 457, 706–710

- Kim S. J. et al. (2015), "Materials for Flexible, Stretchable Electronics: Graphene and 2D Materials", 「Annu. Rev. Mater. Res.」 45,16.1-16.22
- Lee J. H. et al. (2014), "Wafer-scale growth of single-crystal monolayer graphene on reusable hydrogen-terminated germanium", 「Science」, 344, 286-289
- Lee J. -U. et al. (2016), "Ising-Type Magnetic Ordering in Atomically Thin FePS₃", 「Nano Lett.」, 16(12), 7433-7438
- Lee J. Y. et al. (2016), "Two-Dimensional Semiconductor Optoelectronics Based on van der Waals Heterostructures" 「Nanomaterials」, 6(11), 193 (2016)
- Li L. et al. (2014), "Black phosphorus field-effect transistors", 「Nature Nanotech.」, 9, 372
- Li L. H. et al. (2011), "Large-scale mechanical peeling of boron nitride nanosheets by low-energy ball milling", 「J. Mater. Chem.」, 21, 11862
- Li X. et al. (2015), "Synthesis of thin-film black phosphorus on a flexible substrate", 「2D Materials」, 2, 031002
- Machado F. et al. "Carbon Nanoadsorbents", Springer (2015)
- Mark K. F. et al. (2010), "Atomically thin MoS₂: A New direct-gap semiconductor", 「Phys. Rev. Lett.」, 105, 136805
- Nicolosi V. et al. (2013), "Liquid exfoliation of layered materials", 「Science」, 340, 1226419
- Novoselov K. S. et al. (2004), "Electric field effect in atomically thin carbon films", 「Science」, 306, 666-669
- Novoselov K. S. et al. (2016), "2D materials and van der Waals heterostructures" 「Science」, 353(6298), 461
- Oriol L. -S. et al. (2013), "Ultrasensitive photodetectors based on monolayer MoS₂", 「Nat. Nanotechnol.」, 8, 497
- Perello D. J. et al. (2015), "High-performance n-type black phosphorus transistors with type control via thickness and contact-metal engineering", 「Nat. Commun.」 6, 7809
- Qiu G. et al. (2018), "Ultrafast Laser-Shock-Induced Confined Metaphase Transformation for Direct Writing of Black Phosphorus Thin Films", 「Advanced Materials」, 30(10), 1704405
- Rao C. N. R. et al. (2015), "Comparative Study of Potential Applications of Graphene, MoS₂, and Other Two-Dimensional Materials in Energy Devices, Sensors, and Related Areas", 「ACS Appl. Mater. Interfaces」, 7, 7809-7832

- Ray S. J. (2016), “First-principles study of MoS₂, phosphorene and graphene based single electron transistor for gas sensing applications”, 「Sens. Actuators B: Chem.」, 222, 492-498
- Ryu M. et al. “Enhancement of Interface Characteristics of Neural Probe Based on Graphene, ZnO Nanowires, and Conducting Polymer PEDOT”, 「ACS Appl. Mater. Interfaces」, 9(12), 10577-10586
- Shin S. -H. et al. (2017), “Integrated arrays of air-dielectric graphene transistors as transparent active-matrix pressure sensors for wide pressure ranges”, 「Nat. Commun.」, 8, 14950
- Son I. H. et al. (2017), “Graphene balls for lithium rechargeable batteries with fast charging and high volumetric energy densities”, 「Nat. Commun.」, 8, 1561
- Splendiani A. et al. (2010), “Emerging Photoluminescence in Monolayer MoS₂”, 「Nano Lett.」, 10, 1271
- Tsai C. L. et al. (2009), “Molecular beam epitaxial growth of hexagonal boron nitride on Ni(111) substrate”, 「J. Cryst. Growth」, 311, 3054
- <http://news.mk.co.kr/newsRead.php?year=2017&no=624109>
- <http://www.graphene.ac.rs/exfoliation.html>
- <https://link.springer.com/article/10.1007/s12274-009-9074-z>
- Wikipedia. “Graphene Flagship”, https://en.wikipedia.org/wiki/Graphene_Flagship 검색일 2018년 3월 31일
- Wikipedia. “Graphene”, <https://en.wikipedia.org/wiki/Graphene> 검색일 2018년 3월 31일

| KISTEP 기술동향브리프 발간 현황 |

발간호	제목	저자 및 소속
2018-01	블록체인	유거송(KISTEP), 김경훈(KISDI)
2018-02	독일의 연구개발 동향	이주석·김승연(KISTEP)
2018-03	휴먼 마이크로바이옴	황은혜·김은정(KISTEP) 남영도(KFRI)
2018-04	신육종기술(NPBTs)	박지현·홍미영(KISTEP) 한지학(㈜틀젠)
2018-05	2차원소재	함선영(KISTEP)



| 저자 소개 |

함 선 영

한국과학기술기획평가원 생명기초사업센터 부연구위원

Tel: 02-589-2363 E-mail: syhamh@kistep.re.kr

※ 본 KISTEP 기술동향브리프의 내용은 필자의 개인적 견해이며, 기관의 공식적인 의견이 아님을 알려드립니다.

KISTEP 기술동향브리프 | 2018-05호

2차원소재