

2차원 나노소재의 국방분야 적용방안

Application of 2D materials to the defense area

배정호¹⁾

Jungho Bae¹⁾

[초 록]

2차원 평면에 결정구조를 갖는 2차원 소재는 2004년 처음 발견된 그래핀(Graphene)을 시작으로 2011년 발견된 맥신(MXene)에 이르기까지 나노기술 분야의 차세대 소재로 주목받고 있다. 2차원 소재 중 광범위하게 연구되고 있는 그래핀, 맥신, 육방정계 질화붕소, 전이금속 칼코게나이드의 특성을 소개하고 각 2차원 소재를 국방 분야에 적용할 수 있는 기술을 소개하여 차세대 무기체계 및 전력지원체계에 적용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

[ABSTRACT]

Two-dimensional materials, which have a crystal structure in a two-dimensional plane, are attracting attention as next-generation materials in nanotechnology, from Graphene, first discovered in 2004, to MXene, discovered in 2011. In this study, Among new 2D materials, we introduce the characteristics of Graphene, MXene, hexagonal boron nitride, and transition metal chalcogenide, which are being studied extensively, and introduce technologies that can be used to apply each 2D material to the defense field. We would like to present a method that can be applied to next-generation weapon systems and war-power support systems.

Key Words : 2D materials(2차원소재), Graphene(그래핀), MXene(맥신), TMD(전이금속칼코겐화합물), h-BN(육방정계 질화붕소)

1. 서론

빠르게 발전하는 과학기술 속에서 국방분야도 2023년 국방혁신 4.0 계획을 발표하면서 AI과학기술강군을 육성하기 위해 많은 노력과 투자를 하고 있다. 특히 인공지능 기반 핵심 첨단 전력 확보를 위해 5대 중점과 16개 과제를 선정하여 발표하였다.^[1] 또한 2023년 4월에는 2023-2037 국방과학기술혁신 기본계획(안)을 발표하여 국방전략기술 10대 분야 30개 기술을 선정하여 미래전장을 주도할 과학기술 강군 건설을 위해 첨단 기술분야 집중 투자, 국방과학기술 거버넌스 재정립 등을 추진 전략으로 국방과학기술 발전에 투자하고 있다^[2]

국방과학기술분야는 유·무인복합, 에너지, 센서·전자기전 등 다양한 분야를 연구하고 있으며 이를 구현하기 위한 기반기술로서 첨단소재는 반드시 연구 및 투자되어야 하는 사항이며 특히 소재분야에서 나노기술은 빠져서는 안 될 국방기술분야이다.

나노기술은 1959년 미국의 물리학자 리처드 파인만(Richard Feynman)이 발표한 “극소의 공학 분야에 무한한 가능성이 있다”라는 주제 연설을 통해 나노개념을 최초 언급하면서 성립되었고 미래 나노기술의 발전을 예견하였다^[3]. 이후 1985년 약 1nm의 풀러렌이 처음 발견되었으며 1991년 탄소나노튜브(CNT)가 발견되면서 나노 기술이 본격적으로 연구되기 시작하였다.

우리나라에서도 2001년 나노기술종합발전계획을 수립하여 국가차원에서 나노기술 발전을 위한 계획이 수립되었으며 2008년 나노기술개발 촉진법을 제정하면서 5년마다 나노기술 종합발전계획을 수립하여 향후 10년 나노기술발전의 비전과 목표를 제시하고 이를 실행하기 위한 전략과 중점과제 추진계획을 수립하고 있다.

1) 육군 교육사령부 과학기술분야 KAIST 정책연수
(KAIST policy training in the field of science and technology for the ROKA TRADOC)

* Corresponding author, E-mail: kma62bjh@hanmail.net

Copyright © The Korean Institute of Defense Technology

Received : December 4, 2023 Revised : February 5, 2024

Accepted : March 30, 2024

이러한 나노기술 중에서도 2004년 최초 발견된 그래핀(Graphene)부터 2011년 발견된 맥신(MXene)까지 2차원 소재가 나노기술에 있어서 차세대 소재로서 주목받고 있으며 지속적인 연구개발로 생산비용이 급격히 하락함에 따라 앞으로 상용화가 전망되며 세계경제포럼(WEF)에서도 떠오르는 10대 기술 중 하나로 선정하였다⁴⁾.

본 연구에서는 최근 주목받고 있는 2차원 신소재에 중에서 그래핀, 맥신, 육방정계 질화붕소, 전이금속 칼코겐화합물을 소개하고 국방분야에 적용방안을 제시하고자 한다.

2. 2차원 신소재 소개

2.1 2차원 신소재의 정의 및 분류

결정구조의 물질은 차원수에 따라 아래 < 그림 1 > 과 같이 3차원(3D), 2차원(2D), 1차원(1D), 0차원(0D) 물질로 구분이 가능하며 같은 원소로 이루어진 물질이라도 차원수가 달라지면 원자들 사이의 결합특성이 달라지므로 기계적 안전성, 전자 이동도 등 물질의 특성이 달라진다. 2차원(2D)소재란 원자들이 단일 원자층 두께(약 1nm=10억분의 1m)를 가지고 평면에서 결정구조를 이루는 물질을 지칭한다.

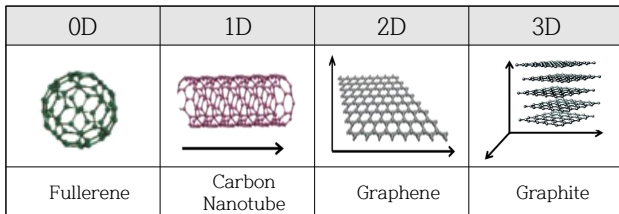


그림 1. 0D, 1D, 2D, 3D 구조 예시
Fig. 1. 0D, 1D, 2D, 3D structure examples

2004년 흑연에서 원자 한 층으로 박리된 그래핀에서 높은 전자이동도 및 열전도도와 우수한 기계적 강도가 관찰되었으며 이러한 새로운 물리적 현상들이 발견되면서 자연스럽게 다른 2차원 소재들도 큰 관심을 받았다. 2차원 소재는 <표 1>에서와 같이 전기적 특성에 따라 도체, 반도체, 부도체로 분류할 수 있으며 대표적으로 도체성질을 가진 그래핀과 맥신, 반도체 성질을 가지는 전이금속 디칼코게나이드와 흑린, 부도체 성질을 가지는 육방정계 질화붕소가 있다.

표 1. 전기적 특성에 따른 2차원 소재 구분
Table 1. Classification of 2D materials according to electrical properties

| 특성 | 2차원 소재 종류 |
|-----|-------------------|
| 도체 | 그래핀, 맥신 |
| 반도체 | 전이금속 칼코겐화합물, 흑린 |
| 부도체 | 육방정계 질화붕소, 산화 그래핀 |

2.2 그래핀(Graphene)

그래핀은 1947년 이론상으로 제작이 가능할 것으로 알려진 이후 2004년 영국 맨체스터 대학의 연구팀에 의해 처음 발견된 물질로서 우리가 실생활에서 쉽게 접할 수 있는 연필심의 주연료인 흑연의 기본 구성물질이다. 그래핀(graphene)은 흑연을 뜻하는 그래파이트(graphite)와 화학에서 탄소이중결합을 가진 분자를 뜻하는 접미사 ene를 결합하여 만든 용어이다.

그래핀은 2004년 최초 발견된 이후 지금까지 활발한 연구가 이루어 지고 있으며 흔히 꿈의 소재라고 불린다. 그래핀은 <표 2>에서 보는 것과 같이 강철보다 200배 강하고 구리보다 100배 이상 전기가 잘 통하며 다이아몬드보다 열전도성이 2배 이상 높다. 또한 탄성과 높은 비표면적을 가지고 있고 투명에 가까운 특성을 지니고 있어 현존하는 물질 중 가장 뛰어난 소재로 디스플레이 이차전지, 태양전지, 자동차 및 조명 등 다양한 분야에 응용되어 관련 산업의 성장을 견인할 전략적 핵심소재로 인정받고 있다.

표 2. 그래핀의 특성
Table 2. Characteristics of Graphene

| 성질 | 특성 |
|--------|-----------------------------|
| 두께 | 0.2nm |
| 인장강도 | 130GPa |
| 열전도율 | 5,300W/(m·K) |
| 허용전류밀도 | 108A/cm ² |
| 전자 이동도 | 200,000cm ² /V·s |

그래핀은 2004년 발견 이후 지속적인 연구를 통하여 다양한 분야에 적용 할 수 있는 연구들이 많이 이루어 졌으나 생산공정이 복잡하고 비용이 많이 들어 대량생산에 제한사항이 있었다. 하지만 최근 지속적인 연구 및 투자를 통해 국내에서도 대기업 및 벤처기업에서 그래핀 소재에 대한 대량생산 및 상용화가 다양한 분야에서 이루어 지고 있으며 이를 통해 국방분야에서도 그래핀 기반 보호 직물설계 기술 연구, 그래핀 복합체를 적용한 압전소재의 에너지 발생기술에 대한 R&D연구가 이루어졌으며 이밖에도 방탄복, 웨어러블소재, 투명디스플레이, 항공기 소재 등에 적용하기 위한 노력이 이루어지고 있다.

2.3 맥신(MXene)

맥신은 금속층과 탄소층이 교대로 쌓인 2차원 나노물질로 전이금속에 탄소 또는 질소가 결합되어 있는 원자두께의 층으로 구성된 신물질이다. 2011년에 미국 Drexel대학의 Yury Gogotsi교수에 의해 최초 발견되었으며 맥신이라는 이름은 M이 전이금속을 X는 탄소 또는 질소를, en은 2D구조를 의미한다. 이러한 맥신의 가장 큰 특징은 높은 전기전도성이다. 맥신의 전기전도성은 흑연의 100배, 구리의 2배에 달한다. 또한 다양한 화합물로 조합할 수 있다. 맥신은 전이금속의 종류와 화학적 조성을 조절하여 다양한 특징을 가진 맥신을 만들 수 있다. 이러한 높은 전기전도성 및 화합물 조합 특성으로 인해 맥신은 배터리, 반도체, 촉매, 의료, 전자기기, 센서 등 다양한 분

야에 활용될 것으로 판단된다.

2.4 육방정계 질화붕소(h-BN)

육방정계 질화붕소는 붕소와 질소가 1:1 비율로 구성되어 있는 화합물 중 육방정계 결정구조를 가지는 물질을 지칭하며 약칭으로 h-BN으로 표현된다. 육방정계 질화붕소는 그래핀의 격자상수와 유사한 층 구조를 가지고 있어서 때로는 “화이트 그래핀”으로 불리며 그래핀과 유사하게 투명하고 유연하면서 우수한 기계적 물성을 가지고 있을 뿐만 아니라 절연특성을 가지고 있으면서도 열전도성이 우수하여 2차원 물질 연구 및 응용으로 주목받고 있는 소재이다⁵⁾. 특히 전기적 진동에 대한 내열 충격성과 전기장 파괴에 대한 높은 내성을 가지기 때문에 공정 능력이 우수하고 중성자 흡수능력까지 가지고 있다. 또한 다양한 금속 또는 화학적 부식에 대한 저항성이 우수하고, 무독성이며, 환경 친화적이고, 다른 우수한 물리적 및 화학적 특성을 가지기 때문에 널리 사용 될 수 있다.

2.5 전이금속 칼코겐화합물(TMD)

전이금속 칼코겐화합물은 전이금속과 칼코겐 원소로 이루어진 2차원 층상구조를 가지는 화합물을 지칭하며 대표적으로 전이금속(M) 하나와 칼코겐원소(X) 둘이 결합한 전이금속 디칼코게나이드(MX₂)가 있다. 2차원 전이금속 디칼코게나이드는 칼코겐 두 원소층 사이에 전이금속 단일 원소층이 샌드위치되어있는 구조를 가지며 이러한 구조 덕분에 물리/화학적으로 매우 안정적이며 그래핀과 다르게 1~3eV의 밴드갭이 있어서 반도체 특성을 가진다. 대표적으로 이황화몰리브덴(MoS₂)이 있다.

이황화몰리브덴은 2010년경부터 활발한 연구가 이루어지기 시작하였으며 두께에 따른 전자구조의 변화로 인한 특이한 전기적 특성, 투명성, 얇은 두께로 인한 유연성을 가지고 있어 다양한 분야로의 적용 연구가 이루어지고 있다. 특히 가스 분자들이 가스 분자들이 화합물 표면에 접촉 시 전하 수송의 전기적 특성이 민감하게 변화하기 때문에 고감도 가스센서 제조에 유리하다. 또한 트랜지스터 기반의 단일층 이황화몰리브덴은 광검출소자로서 가시광선 영역에서 우수하다는 연구 결과가 있다⁶⁾.

3. 2차원 신소재 국방분야 적용

2차원 신소재는 아직 개발 및 연구가 초기 단계이기 때문에 민간에서도 상용화된 사례가 많지 않다. 더욱이 국방분야에서는 실제 군 무기체계 및 전력지원체계에 적용되어 사용하고 있는 사례는 전무하다. 하지만 미래전을 준비하기 위한 미래도전국방과학기술 및 범용기술로서 국방분야에 적용 가능한 기술을 제시하고자 한다.

3.1 그래핀 활용

그래핀은 2차원 신소재 중 가장 먼저 등장하여 관련 응용연구가 가장 활발하게 이루어지고 있는 소재이며 국방분야에서도 다양한 분야에 그래핀 적용이 가능하다.

3.1.1 방탄복 소재

가장 먼저 그래핀의 물리적 특성을 활용하여 방탄복을 적용하는 방안이다. 2014년도 연구에서 그래핀의 방탄성능은 케블라의 2배, 강철의 10배의 성능을 보여주었으며⁷⁾ 2018년 국내 그래핀 업체에서 미군에 그래핀을 1,000~5,000층 쌓아 총알을 막는 방탄복을 납품한 뉴스도 소개되었다. 또한 국방과학연구소(ADD)에서도 2018년부터 2020년까지 그래핀 기반 보호복물 설계 기술을 선행핵심기술로 연구하였으며 2024년부터는 그래핀을 이용한 방탄소재 연구가 미래도전 국방기술과제로 진행될 예정이다. 이러한 연구를 통해 기존 방탄복보다 더 가볍지만 강도는 높은 착용성이 양호한 방탄복 개발이 이루어질 것이다.

3.1.2 스마트 콘택트 렌즈 소재

그래핀의 높은 전도성과 유연성, 투명성을 활용하여 스마트 콘택트 렌즈 개발이 가능하다. 2014년 미시간대 연구소에서 야간 투시용 적외선 콘택트 렌즈 개발에 성공하였으며⁸⁾ 2017년 융합기술연구원에서도 전자기 간섭차폐 콘택트렌즈를 개발하여 이를 응용하여 표면에 LED 소자를 구현하여 디스플레이 기술 응용이 가능할 것으로 판단된다⁹⁾. 즉 그래핀을 전기화학적 색변화 기술을 활용하는 디스플레이인 EC(Electrochromic) 디스플레이의 투명전극으로 활용하는 방법이 적용될 수 있다. 이렇듯 그래핀은 스마트 콘택트 렌즈로 미래 전장에서 전투원이 손쉽게 정보를 이용할 수 있도록 하여 전투능력을 향상시켜 줄 수 있을 것으로 판단된다.

3.1.3 수질정화 장치 개발 소재

그래핀은 소수성을 가지고 있어 물을 밀어 내지만 좁은 구멍이 만들어지면 물이 빠른 속도로 침투하며 이를 이용하여 아주 미세한 구멍이 뚫린 그래핀 시트는 물 분자를 통과시키고 그 밖의 다른 오염물질을 통과시키지 않기 때문에¹⁰⁾ 이를 이용하여 국내 그래핀 업체에서 수처리 소재를 개발하여 수처리 관련 인증기관인 NSF International 인증을 취득하는 등 상용화도 눈앞에 두고 있다. 이렇듯 그래핀을 이용하여 해수를 담수로 만들 수 있으며, 북한지역의 수도시설이 불비한 지역에서 효율적인 급수를 가능하게 하는 휴대용 정수 장치 개발에 중요한 요소가 될 수 있어서 전투원의 생존성 증대에 기여할 수 있을 것이다.

3.1.4 인공근육 개발 소재

인공근육은 실제 생물체의 근육을 모방한 인위적으로 만들어진 근육으로 전압, 전류, 온도, 압력 등의 변화에 따라서 팽

창, 수축, 회전 등의 운동이 일어나는 물질 또는 기계 장치를 의미한다. 그래핀의 높은 인장강도와 뛰어난 열 전도성을 이용하여 액정복합섬유에 그래핀을 충전제로 도입하여 인간근육과 유사하면서도 최대 17배 강한 힘을 발휘할 수 있는 근육이 최근 개발되었다^[11]. 이러한 인공근육을 활용하여 다족보행로봇의 모터를 대체하는 동력장치를 만들 수 있으며 또는 인공근육을 엮어 직물로 만들어서 입으면 웨어러블플랫폼에 근력보조장치로도 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 맥신 활용

3.2.1 전자기 차폐 스텔스 소재

전자기파 에너지는 반사, 흡수 및 다중반사의 메커니즘에 의해 차폐되는데 맥신은 전자기파를 흡수하여 차폐하는 특성을 가지고 있으며 이를 이용하여 다양한 분야에 적용 할 수 있을 것으로 판단된다. 2016년 Ti_3C_2Tx 맥신과 Mo_2TiC_2Tx 및 $Mo_2Ti_2C_3Tx$ 맥신편이 합성되어 탁월한 전자파 차폐 효과가 있음이 최초로 보고되었으며^[12] 2020년 연구에서는 전자파 차폐 소재 기술로써 자가조립기술을 활용하여 원자 수준의 두께 균일도를 가지는 초박막 맥신 필름을 제작하였다. 이 필름을 55nm 두께로 적층하면 99% 이상 전자파 차단이 가능했다. 이는 현재까지 보고된 어떤 전자파 차단 소재보다 우수한 성능(두께 대비 차단 효과)을 보여주는 것으로 나타났다(40 μ m에서 114db)^[13]. 이러한 특성을 국방분야에 적용하기 위한 노력으로 KIST(한국과학기술연구원)에서는 2021년 보안과제로 EMP 차폐 및 스텔스 기술 적용 맥신 2D소재 기술 개발 연구가 진행되었으며 성균관대학교에서는 2022년부터 2027년까지 광대역 다중밴드전자기파 차폐 흡수기술연구가 진행중이다.

이러한 맥신의 전파 차폐/흡수기능은 기존의 전도성이 높은 금속(예, Ag 및 Cu)의 차폐효과와 유사하며 전투기의 스텔스 기능에 적용될 수 있을 뿐만 아니라 육군에서 운영하고 있는 무인감시정찰기 및 드론보트에 적용되어 스텔스 기능을 향상시키고, 금속 스텔스 소재를 적용하는 것보다 중량을 감소시킬 수 있어 생존성 및 활용성을 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 시설물 EMP 차폐를 위한 최근 연구중인 콘크리트계 구조체 개발시 기존 차폐소재로 사용되는 나노탄소튜브 및 그래핀 복합소재의 효과성을 증가하는 차폐소재로 사용될 수 있을 것이다.

3.2.2 증기 기반 하베스팅 소재

증기 기반 하베스팅은 식물이 뿌리에서 흡수한 물을 잎의 기공을 통해 내보내는 증산작용 원리에서 착안한 에너지 하베스팅으로 기본원리는 전도성 물질이 도포되어 있는 섬유에 물을 비대칭적으로 떨어뜨리면 물의 부분적 흡착이 일어나고 이때 물의 부분적 흡착과 축전용량(C)과 전압(V)의 차이가 나타난다. 이렇게 되면 섬유의 증산작용에 의해 물이 반대쪽으로 움직이게 되고 이를 통해 전류(I)가 생성되는 원리이다.

이러한 증기 기반 하베스팅 소재로서 맥신의 친수성과 높은

전도성은 기존 탄소나노입자가 적용된 결과보다 약 24배 높은 에너지 효율을 보였으며 맥신을 전도성 고분자와 복합하였을 때는 약 100배 더 높은 에너지 효율을 달성하였다^[14]. 이러한 증기 기반 에너지 하베스팅 기술은 웨어러블플랫폼에 GPS와 같은 전자장비의 에너지원으로 사용될 수 있으며 군에서 독립적으로 운영되는 IoT 센서의 전원 공급에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

3.2.3 유연 에너지 저장소재 소재

최근 5G 통신, 사물인터넷(IoT), 무인기/드론, 웨어러블플랫폼 등 국방분야에서도 전자기기 도입이 증가함에 따라 유연하고 고성능을 가진 소형 에너지 저장장치의 수요가 지속 제기되고 있다. 특히 소형 에너지 저장장치 중 슈퍼캐패시터는 높은 출력, 빠른 충·방전과 우수한 사이클 특성으로 많은 연구가 이루어지고 있으나 작은 에너지 저장용량, 유연성 부족 등으로 상용화가 어려운 사항이 있었다. 하지만 최근 국내 연구진에 의해 맥신의 높은 전도성과 유연성을 이용하여 마이크로 슈퍼캐패시터가 개발되었으며 이는 웨어러블 에너지 소자로서 매우 높은 수준의 저장용량(1,730 F/cm³)과 10,000번의 벤딩 사이클 이후에도 저장용량 유지율이 우수한 특성을 보였다^[15]. 이러한 특성을 이용한다면 국방분야에서도 웨어러블플랫폼의 각종 센서 및 전자장치의 에너지 저장장치로 활용될 수 있을 뿐만 아니라 드론 및 무인기, 소규모 부대의 ESS, 주요 장비의 IoT센서의 에너지 저장장치로 활용 될 수 있을 것이다.

3.3 육방정계 질화붕소 활용

3.3.1 방사능 차폐 소재

육방정계 질화붕소의 붕소는 단일원자로 다이아몬드 다음으로 단단한 것으로 알려진 준금속 원소이며 붕소의 열 중성자 흡수 단면적이 탄소의 100만배를 넘어 오래전부터 원자력 분야에 사용되고 있다. 이러한 특성은 육방정계 질화붕소가 높은 열전도도와 900도 고온에서 방사선 차폐에 뛰어난 특성을 가지게 하여 미래 우주환경에서 방사선 차폐에 다양하게 활용될 수 있다. KIST(한국과학기술연구원)에서는 2017년부터 1차원 소재인 BNNT(질화붕소나노튜브)로 우주복 개발 연구를 진행 중에 있는데 이러한 기술력이 성숙되면 육방정계 질화붕소는 차폐능력 및 유연성과 경량성을 갖추고 있어 국방위성 등 우주발사체에 적용하여 우주 방사선을 차폐할 수 있을 뿐만 아니라 북한의 핵무기 제거 작전에 투입된 전투원의 생존성 보장을 위한 피복류 및 장비류에 적용 할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3.2 에너지하베스팅 압전소재

압전소재는 웨어러블 센서나 로봇을 실현하기 위한 필수요소로서 소재에 압력을 가해 변형시키면 전기적 특성이 나타나는 소재이다. 최근 국내 연구진에서 육방정계 질화붕소의 압전

성을 확인하였고 이를 응용하여 플렉시블 압전소자를 제작하여 발표하였다¹⁶⁾. 이 기술을 상용화하면 육방정계 질화붕소의 방열성과 방사능 차폐 등의 성질을 함께 이용하여 고온 방사선 극한 환경인 우주에서 스마트 센서 및 무선네트워크 구현을 위한 에너지 하베스팅 기술로 활용할 수 있으며 웨어러블 랩톱 및 드론 등에서도 압전하베스팅 소재로 전투력 발휘에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 전이금속 칼코겐화합물 활용

3.4.1 유연 디스플레이 소재

전이금속 칼코겐화합물은 그래핀과 유사한 구조를 가진 나노소재로서 유연하고 투명한 특성과 함께 전기적으로 1~2eV 대 밴드갭이 존재하여 논리회로 제작이 가능하며 이를 통해 차세대 전자소자로 활용될 수 있다. 이러한 차세대 전자소재로 유연디스플레이, 터치스크린 패널에 사용할 수 있으며 실제 2022년 국내 연구진에 의해 전이금속 칼코겐화합물의 한 종류인 이황화몰리브덴과 양자점으로 고해상도 삼원색 마이크로 LED 디스플레이를 개발되었으며 이를 이용해 증강현실 및 가상현실 디스플레이 개발에 활용할 수 있다¹⁷⁾. 또한 미래 전투 현장에서 유무인복합전투체계에서 전투원이 무인체계와 연동된 화면을 바라볼 수 있는 디스플레이 개발이 가능할 것으로 판단된다.

3.4.2 가스센서 소재

전이금속 칼코겐화합물의 한 종류인 아황화몰리브덴은 넓은 비표면적, 높은 전도성, 강한 표면활성과 높은 흡착계수로 최근 가스센서의 주 소재로 많은 연구가 이루어 지고 있다. 특히 2023년 국내 연구진에 의해 이산화질소를 낮은 전력소비로 기존의 60배 이상 높은 감도로 감지할 수 있는 센서가 개발되었다¹⁸⁾.

이러한 가스센서는 소재 합성단계에서 원료물질에 포함된 탄소 함량을 조절해 소재의 전기화학적 특성을 변화시킬 수 있으며 이를 이용하여 다양한 다른 가스를 감지하는 센서 개발도 가능하다. 이를 통해 적외 화학공격을 하였을 때 드론이나 로봇에 가스센서를 부착하여 대기중에 화학가스 존재 여부를 확인할 수 있으며 정비공장 및 탄약폐처리 공정에서 발생할 수 있는 유독가스에 대한 검출을 통해 작업자의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

앞에서 알아본 2차원 평면에서 결정구조를 이루고 있는 2차원 소재는 2004년 그래핀이 처음 발견된 이후 현재까지 학계와 산업계에서 많은 연구와 투자가 이루어지고 있으며 민간에서도 사물인터넷, 휘어지는 소자, 차세대 배터리, 정수필터, 우주선 등 다양한 산업분야에 적용가능한 파급력이 큰 원천기술이다. 아직 2차원 소재가 상용화되어 대중적으로 알려진 제품

은 없으나 그래핀을 선두로 응용제품이 출시되기 시작하였으며 다른 2차원 소재들도 각각의 특성에 맞게 응용연구가 활발히 이루어 지고 있다. 우리 군에서도 과학기술군으로 발돋움하기위해서 기반기술로서 소재 기술에 대한 연구에 관심을 가져야 할 것이며 앞서 소개한 2차원소재가 미래 전장의 차세대 무기체계 및 전력지원체계에 적용되어 우리군의 전투력 향상에 기여될 수 있길 기대한다.

References

- [1] Ministry of National Defense, "Press release announcing the Defense Innovation 4.0 basic plan", 2023
- [2] National Science and Technology Advisory Council "2023-2037 Defense Science and Technology Innovation Basic Plan (draft)", 2023
- [3] R.P. Feynman, "There's plenty of room at the bottom (data storage)" *Journal of Microelectromechanical Systems* 1 (1) : 60-66, 1992
- [4] Sunyoung Ham, "2D Materials", *KISTEP Technology Trend Brief* 2018-5, 2018
- [5] C. Hyun, S. Hong, G. Kim, A. R. Jang, and H. S. Shin, "Recent trends in hexagonal boron nitride", *Physics and HighTechnology*, 7/8 : 9-14, 2016
- [6] Youngin Jeon, "2D new materials research trends and prospects", *KOSEN Report*, KOSEN21, 2019
- [7] Lee Jae Hwang et al., "Dynamic mechanical behavior of multilayer graphene via supersonic projectile penetration", *Science* 346 : 1092-1096, 2014
- [8] 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
- [9] Sangkyu Lee et al., "Smart Contact Lenses with Graphene Coating for Electromagnetic Interference Shielding and Dehydration Protection", *ACS Nano* 2017 11(6) : 5318-5324, 2017
- [10] Prangya Bhoi et al., "Graphene-Based Membranes for Water and Wastewater Treatment : A Review, *ACS Appl. Nano Mater* 2021 4(4) : 3274-3293, 2021
- [11] Kim et al., "Human-muscle-inspired single fibre actuator with reversible percolation", *Nature Nanotechnology* Vol.17 No. 11, 2022
- [12] F.Shahzad, "Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes)", *Science* vol.353 no. 6304 : 1137-1140, 2016
- [13] Taeyeong Yun, "Electromagnetic Shielding of

- Monolayer MXene Assemblies”, *Advanced Material* vol 32, 2020
- [14] Jaehyeong Bae et al., “Towards Watt-scale hydroelectric energy harvesting by Ti₃C₂T_x-based transpiration-driven electrokinetic power generators”, *Energy & Environmental Science* 15(1) : 123-135, 2022
- [15] Eunji Kim et al., “Scalable fabrication of MXene-based flexible micro-supercapacitor with outstanding volumetric capacitance”, *Chemical Engineering Journal* Volume 450, Part4, 2022
- [16] Gyoung-Ja Lee et al., “Piezoelectric Energy Harvesting from Two-Dimensional Boron Nitride Nanoflakes”, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2019 11(41) : 37920-37926, 2019
- [17] Sumin Hwangbo et al., “Wafer-scale monolithic integration of full-colour micro-LED display using MoS₂ transistor”, *Nature Nanotechnology* volume 17 : 500-506, 2022
- [18] Jeongin Song et al., “MOCVD of Hierarchical C-MoS₂ Nanobranches for ppt-Level NO₂ Detection”, *Small Structures* Volume4 Issue8, 2023