

키워드 매핑 기반 2차원 물질 연구 영역 탐지와 발전 과정 분석

안세정, 이준영^a

한국과학기술정보연구원 미래정보연구센터 과학계량연구실

Identification of Research Areas and Evolution of 2D Materials by the Keyword Mapping Methodology

Sejung Ahn and June Young Lee^a

Department of Scientometric Research, Future Information Research Center,
 Korea Institute of Science and Technology Information, Seoul 02456, Korea

(Received November 9, 2017; Accepted November 16, 2017)

Abstract: Two-dimensional (2D) materials such as transition metal dichalcogenides have attracted tremendous scientific interests owing to their potential of solving the zero band-gap issue of graphene. In this work, the research areas and technology evolutionary dynamics of the 2D materials were identified using the scientometric method focusing on keyword mapping and clustering. The time-series analysis showed that the technological progress of 2D material is in the early growth period. The overlay mapping analysis were carried out to investigate the technology evolution of 2D materials with time. The strategic diagram of co-word analysis classifying the topological positions of keyword was derived to support the analysis results. It is conjectured that extensive research will be conducted widely on the application of 2D materials not only in electronic and optoelectronic devices, but also in various other fields such as biomedical applications, and that their development will be more rapid based on accumulated results of extant graphene research.

Keywords: Two-dimensional materials, Evolution of research area, Keyword mapping, Co-word analysis, Scientometrics

1. 서론

기존 실리콘 기반 반도체의 한계를 넘는 전기전자재료로 지난 10여 년간 그래핀이 많은 주목을 받았다. 그래핀은 탄소 원자 한 층으로 이루어진 대표적인 2차원 물질로 2004년 영국 맨체스터 대학의 A. Geim과 K. Novoselov가 흑연 덩어리에서 그래핀 한 겹을 떼어내는 데 성공한 후 [1], 그래핀의 안정성, 전기 전도도, 투명도, 전하 이동도 등 우수한 물리적 특성이 보

고되면서 꿈의 신소재로 일컬어지며 관련 연구자들에 의해 많이 연구되고 있는 재료다. 그러나 오히려 전기가 너무 잘 통하는 그래핀의 특성 때문에 현재까지의 기술 개발 수준에서는 실리콘을 대체하여 활용하기는 어려운 상황으로 알려지고 있으며, 에너지 저장 소재, 바이오센서 등 다양한 응용 가능성에 대한 탐색 연구가 수행되고 있다 [2].

이에, 실리콘을 대체하여 반도체 소재로 활용이 가능한 천연 상태에서 밴드갭을 갖는 2차원 반도체 물질을 찾기 위한 연구가 활발하다. 2차원 물질의 대표격인 그래핀의 박리 이후, 과거 1960~70년대에 주목받았던 2차원 층상구조 물질이 재조명되고 있는 것이다. 특히, 최근 이황화몰리브덴(MoS_2), 이황화텅스텐(WS_2) 등 전이 금속칼코겐화합물(transition metal dichalcogenides),

a. Corresponding author; road2you@kisti.re.kr

Copyright ©2018 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

흑린(black phosphorus) 등이 새로운 전자재료로 급부상하고 있다 [2].

한편, 과학 연구의 양적 확대에 따른 관련 정보량의 급증으로 과학자어나 과학기술 정책입안자들은 연구 영역을 탐지하고 그 관계를 연결하여 분석하는 데 어려움을 겪는 경우가 많다. 이에 점점 늘어나는 과학기술 데이터로부터 연구 동향과 기술의 발전 과정을 파악하기 위해 과학기술의 구조와 변화를 정량적으로 측정하는 과학계량학 기법을 적용한 연구가 많이 확산되고 있다. 특히 과학의 구조를 매핑하기 위한 정량적 방법으로 공저자 분석(co-author analysis), 동시 인용 분석(co-citation analysis), 다양한 분석 방법론의 연구와 적용이 시도되고 있다 [3-5].

본 연구에서는 그래핀을 넘어선 새로운 전자재료로 각광받고 있는 2차원 물질 관련 연구 영역을 탐지하고 발전 과정을 키워드 맵 중심의 과학계량학 기법을 적용하여 분석하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 데이터 수집

본 연구를 위한 데이터 수집을 위해 Clarivate Analytics의 Web of Science (WoS) 데이터베이스를 사용하였다. 2차원 물질 연구에 대한 문헌 집합을 구성하는 방법으로 키워드 검색식을 활용하였다. 2014년 창간된 2차원 물질 연구 분야에 특화된 저널인 「2D Materials」에 2014년부터 2017년 10월에 발표된 684건의 논문에 출현한 저자 키워드를 확인하여 검색식 TS=(“2d material*” OR “two dimensional material*” OR “transition metal dichalcogenide*”)을 구성하였다. WoS 핵심 컬렉션의 Science Citation Index Expanded (SCIE) 및 Emerging Sources Citation Index (ESCI)를 대상으로 제목, 초록, 저자키워드 필드에 대한 상기 검색식을 통해 1986년부터 2017년 10월 23일 기준으로 32년간 발표된 2차원 물질 관련 논문 8,691편의 서지정보를 수집하여 문헌집합을 구성하였다.

2.2 분석 프로세스

2차원 물질 관련 논문의 서지정보 분석 및 단수, 복수의 정제, 유사 키워드의 대표명화 등 키워드 정제를 위해 Search Technology, Inc.의 VantagePoint 9.0

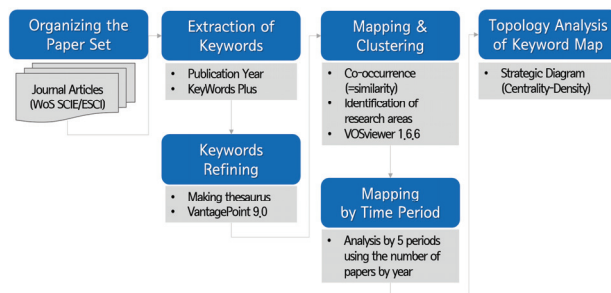


Fig. 1. Research process to investigate the research areas and evolution of 2D materials.

을 사용하였으며, 키워드 매핑과 클러스터링 분석은 네덜란드 라이덴 대학의 CWTS에서 개발한 소프트웨어 VOSviewer 1.6.6을 사용하였다 [6]. 키워드 동시 출현 데이터를 기반으로 전체 구간에 대해 매핑 및 클러스터링하여 연구 영역을 탐지하고 5개 시구간으로 나누어 각 시구간별 키워드 변화를 오버레이(overlay) 매핑 기법으로 분석하였다 [7,8]. 또한, 중심성(centrality)-밀도(density) 전략 다이어그램(strategic diagram)을 도입하여 키워드 맵의 네트워크 위상 분석을 수행하였다 [9]. 그림 1에 분석 프로세스를 도식화하여 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 2차원 물질 연구의 시계열 분석

2차원 물질 연구 영역의 시간에 따른 변화를 살펴보기 위해 문헌집합을 구성하는 개별 논문에서 출판연도를 추출하고 출판연도별 논문 수를 산출하였다. 그림 2는 2차원 물질의 연도별 논문 수를 보여주고 있으며, 삽입 그림에 탄소나노튜브, 그래핀, 2차원 물질의 연도별 논문 수를 나타내어 비교하였다. 탄소나노튜브는 1991년에 S. Iijima가 처음 발견한 이후 [10], 90년대 중반부터 성장하기 시작하여, 최근에 이르기까지 꾸준히 연구되고 있으며, 그래핀이 급부상하기 이전에 많은 연구자들의 관심이 집중되었던 연구 주제다. 그래핀 관련 연구는 2005년부터 급격한 성장세를 보이고 2014년부터는 그래핀 관련 논문의 연간 발표 논문 수가 탄소나노튜브 관련 연구의 연간 발표 논문 수보다 많은 것을 알 수 있다. 한편, 2차원 물질 관련 논문은 2010년 이전에 매년 40~50편가량이 발표되었으나, 이후, 연평균 성장률이 72.27% (2010~2017년 산출)에 이를

정도로 논문 수가 급격히 증가하였다. 이는 2010년에 그래핀 분리의 공로를 인정받아 Geim과 Novoselov에게 노벨상이 수여된 것이 2차원 물질에 큰 관심이 집중되기 시작한 계기가 되었음을 보여주는 결과로 판단된다.

연도별 논문 수와 같은 시계열 데이터로부터 기술 성장 패턴을 추정하여 수리적 확산 모형에 곡선접합하고 산출된 모수 값을 활용하면, 기술 변화의 속도를 파악하고 기술별 특성을 도출할 수 있다. 특히, 기술 성장 곡선에서 변곡점은 기술 성장의 속도가 증가하다가 감소하기 시작하는 시점으로 기술이 가장 활발하게

발전하고 있는 때임을 의미한다 [11,12]. 이에, 2차원 물질과 탄소나노튜브, 그래핀의 연도별 누적 논문 수로 산출한 기술 성장 패턴을 로지스틱 회귀모형으로 2027년까지 신뢰구간 95%로 예측하여 분석하였다(그림 3). 그 결과, 탄소나노튜브 연구의 기술 성장 패턴의 변곡점 값은 2,013.7로 산출되어 2017년 현재 시점에서 기술 수명 주기에서 성숙 단계에 접어든 것으로 나타났다. 한편, 그래핀 연구의 기술 성장 패턴의 변곡점 값은 2,015.9로 급성장 시기를 막 지난 단계에 있으며, 2차원 물질 연구의 기술 성장 패턴에서는 2,019.3으로 산출되어 기술이 성장 초기 단계에 진입한 것으로 판단된다.

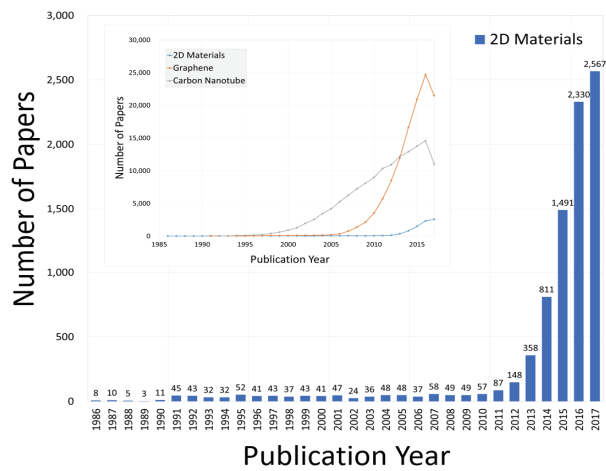


Fig. 2. Number of papers by publication year for 2D Materials and (inset) 2D Materials, Graphene, Carbon Nanotube.

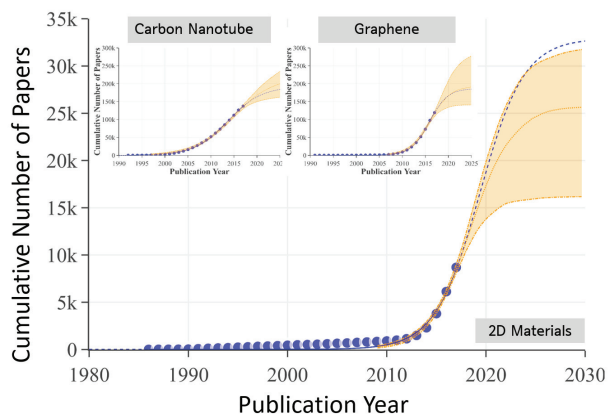


Fig. 3. Cumulative number of papers with prediction value (blue dashed line) until PY=2027 (95% confidence interval) by publication year for 2D Materials, (inset) Graphene and Carbon Nanotube.

3.2 전체 키워드 매핑 및 클러스터링 분석

2차원 물질 연구 영역의 탐지를 위해 전체 분석 기간 동안 논문들의 서지정보 가운데, 키워드플러스 (keywords plus) 필드에서 키워드를 추출하고, 시소러스를 적용한 후, 전체 구간에서 10회 이상 출현한 키워드 845개를 분석대상으로 한정하였다. 본 연구에서는 매핑과 클러스터링의 통합 알고리즘 기반의 매핑 도구인 VOSviewer를 사용하여 키워드 맵을 도출하였다 [6]. 연구 영역 해석에 적합하도록 클러스터링 해상력(resolution) 파라미터인 감마값은 0.8로 설정하였다. 그림 4의 2차원 물질 연구에 대한 키워드 맵에서 키워드 간 거리가 가까울수록 서로 관련성이 높은 것으로 해석할 수 있으며, 원의 크기는 각 키워드별 출현 빈도의 상대적 차이를 보여준다. 클러스터링 결과, 모두 4

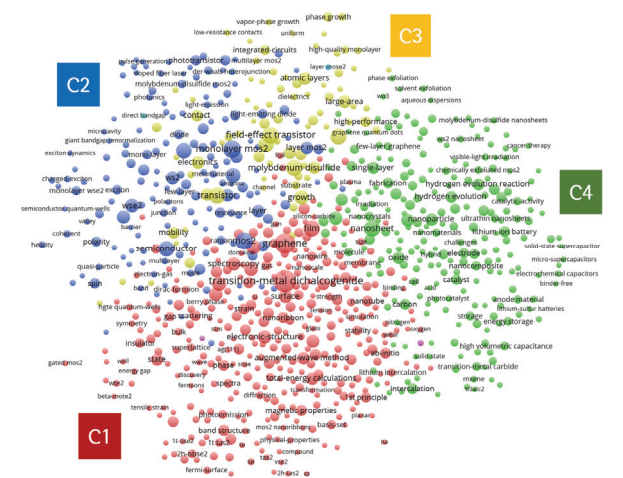


Fig. 4. Keyword map for 2D Materials (1986~2017).

개의 클러스터로 나뉘었으며 각 클러스터별 특징과 핵심 키워드를 표 1에 나타내었다.

C1 클러스터에는 밴드 구조(band structure), 전자 구조(electronic structure), 전하수송(transport), 전하밀도파(charge density wave), 초전도성(superconductivity), 자기적 특성(magnetic properties), 위상 절연체(topological insulator) 등이 핵심 키워드로 출현하고 있으며, 이는 C1 클러스터가 2차원 물질의 전기적·자기적 특성 등 기초 물성 연구 영역을 의미하는 것으로 해석된다. 반도체 구조상(2H), 도체 구조상(1T)으로의 구조 상전이(phase transition) 현상도 C1 클러스터에서 중요하게 관찰되는 연구 영역이다.

C2 클러스터는 발광(photoluminescence), 광트랜지스터(phototransistor), 광전 소자(optoelectronic devices) 등의 키워드를 중심으로 한 광전자학으로의 응용에 관한 연구가 핵심인 영역으로 파악된다. p-n 접합(p-n junction), 이종접합(heterojunction), 양자우물(quantum-well) 등의 키워드는 2차원 물질의 p-n 접합이 높은 광검출 효율 특성을 보이지만 [11], 발광 소자로의 응용이 어려운 단점을 해결하기 위해 양자우물을 형성한 연구와 관련이 있다 [12].

C3 클러스터는 전계효과트랜지스터(field-effect transistor), 집적회로(integrated-circuit) 등 전자소자로의 응용 연구 영역으로 해석되며, 원자층(atomic layer), 얇은 층(thin-layers)과 같은 키워드가 출현한 것은 2차원 물질의 차세대 전자소자로서의 활용성 연구와 관련이 있다 [13,14]. 2012년에 보고된 화학기상증착법(chemical vapor deposition)을 통하여 대면적 단층 이황화몰리브덴 박막을 합성(large area synthesis)하는 연구 [15]와 전이금속 칼코겐화합물이 가스 센서(gas sensor)로 활용되고 있는 것도 C3 클러스터에서 파악할 수 있다 [16].

C4 클러스터에서는 2차원 물질의 전자소자, 광전자학 외의 타 분야로의 응용 연구들을 살펴볼 수 있다. 수소 생산(hydrogen evolution reaction), 촉매(catalyst), 전기화학적 성능(electrochemical performance) 등이 주요 키워드로 출현하고 있는데, 2차원 물질이 수소 에너지 연구에서 값비싼 백금 촉매를 대체하기 위한 전기화학 촉매로서 활용되는 연구가 활발히 이루어지고 있음을 의미한다 [17]. 리튬이온배터리(lithium ion battery), 에너지 저장(energy storage), 슈퍼커패시터(super capacitor)와 같은 키워드는 2차원 물질을 에너지 저장용 커패시터로 활용하기 위한 연구도 진행되고 있음을 보여준다. 또한, 바이오센서(biosensor), 약물전

Table 1. The core keywords and properties by clusters of 2D materials research.

Cluster#	of Keywords	Properties	Core keywords
C1	355	Physical properties	electronic structure, band structure, transport, transition, total energy calculation, charge density wave, phase-transition, lithium intercalation, magnetic properties, superconductivity, topological insulator
C2	241	Applications for optoelectronics	black phosphorus, semiconductor, optical properties, phototransistor, photoluminescence, optoelectronic devices, p-n junction, heterojunction, quantum-well
C3	166	Applications for electronics	electronics, field-effect transistor, integrated-circuit, chemical vapor-deposition, large-area synthesis, gas sensor, atomic layers, thin-layers, hexagonal boron nitride
C4	83	Applications for other fields (energy storage, batteries, biomedical applications, etc.)	hydrogen evolution reaction, catalyst, lithium ion battery, energy storage, supercapacitor, electrochemical performance, biosensor, drug-delivery, exfoliation, fabrication, intercalation

달(drug-delivery), 암 치료(cancer therapy) 등의 키워드가 출현하는데, 2차원 물질을 바이오 기술 분야에 응용하기 위한 연구도 진행되고 있는 것을 알 수 있다. 액상 박리(liquid exfoliation), 삽입(intercalation) 등 2차원 물질의 다양한 합성과 관련한 키워드도 C4 클러스터에서 출현하였다.

3.3 시구간별 키워드 변화 분석

2차원 물질 연구의 발전 과정을 분석하기 위해 전체 분석기간 대상의 키워드 맵을 기반 맵(base-map)으로 하여 시기별 변화를 투영한 오버레이 매핑(overlay mapping)을 하였다 [6,7]. 전체 32년간의 분석기간을 5개의 시구간으로 나누고, 845개 키워드 가운데, 시구간별로 10회 이상 출현한 키워드를 대상으로 매핑하였다. 표 2에 시구간별 논문 수, 매핑에 활용된 키워드 수와 기술수명주기 상에서의 발전 단계를 나타내었다.

그림 5는 1기(period 1: 1986~2000)의 오버레이 키워드 맵을 보여준다. 이 시기에는 2차원 물질 가운데, MoS₂, 전이금속 칼코겐화합물을 중심으로 C1 클러스터에 해당되는 기초 물성 연구 영역이 주로 연구된 것을 알 수 있다. 전이금속 칼코겐화합물의 전자구조, 결정구조에 대한 연구, 리튬 삽입 등으로 물질의 구조를 변형하는 연구, 주사 터널링 현미경을 활용한 물질의 표면 특성 연구 등이 주로 수행된 것으로 해석할 수 있다. 2기(period 2: 2001~2010)에 속한 2차원 물질 관련 논문 수는 453편으로 1기의 446편과 비교했을 때, 거의 비슷한 양이지만, 그림 6의 오버레이 키워드 맵에서 볼 수 있듯이 조금 더 다양한 연구 영역으로 확장하기 시작하려는 움직임이 관찰된다. 이셀레늄화텅스텐(WSe₂), 탄소나노튜브, 나노 입자, 박막 등이 새로운 키워드로 등장하고, 기초 물성 연구에서도 초전도성이 주요 키워드로 출현하였다. 1기와 2기에는 2차원 물질의 재료 자체의 물리적 특성에 대한 연구가 주로 수행되어 기술수명주기에서 태동기(beginning)로 해석된다.

3기(period 3: 2011~2013)에 3년간 593편의 논문이 발표된 것은 1기와 2기에 비하여 본격적으로 2차원 물

질 연구가 이루어지기 시작한 것을 의미한다. 따라서 이 시기는 기술수명주기에서 도약기(emerging)로 구분할 수 있다. 그림 7은 3기의 오버레이 키워드 맵을 보여준다. 3기에 C1 클러스터의 키워드는 오히려 1, 2에 비해 상대적으로 줄어든 것을 볼 수 있는데, 이전에 축적된 기초 물성 연구 성과가 응용 연구에 적용되어 연구 영역이 확장하는 단계에 있는 것으로 해석된다. 특히, 3기의 두드러진 특징은 그래핀이 키워드 맵에 등장한 것이다. 이는, 전이금속 칼코겐화합물 연구가 그래핀 연구와 병행하여 수행되고 있음을 의미한다. 앞

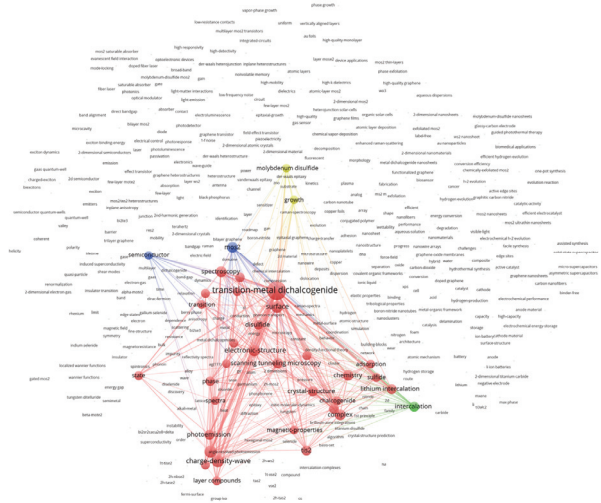


Fig. 5. Overlay keyword map on period 1 (1986~2000).

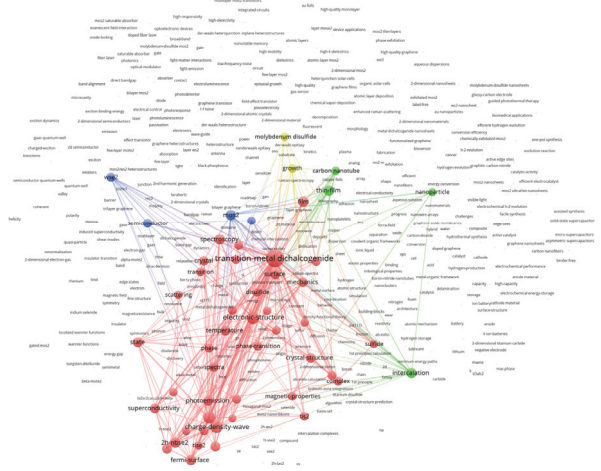


Fig. 6. Overlay keyword map on period 2 (2001~2010).

Table 2. Number of papers and number of keywords used in keyword mapping analysis.

Time Period	Year	# of Papers	# of Keywords	Technology Cycle Time
Period 1	1986~2000	446	36	Beginning
Period 2	2001~2010	453	52	
Period 3	2011~2013	593	86	Emerging
Period 4	2014~2015	2,302	299	Growing
Period 5	2016~2017	4,897	561	

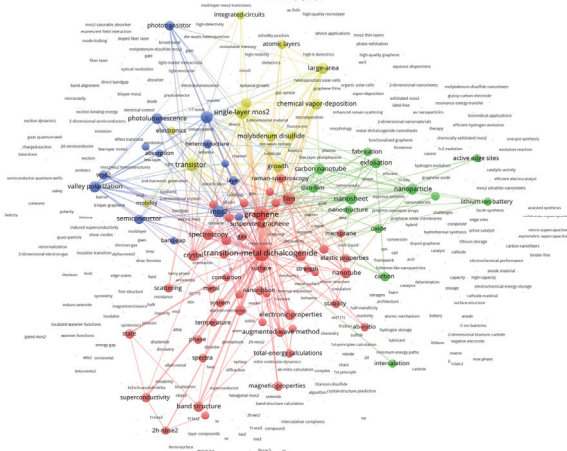


Fig. 7. Overlay keyword map on period 3 (2011~2013).

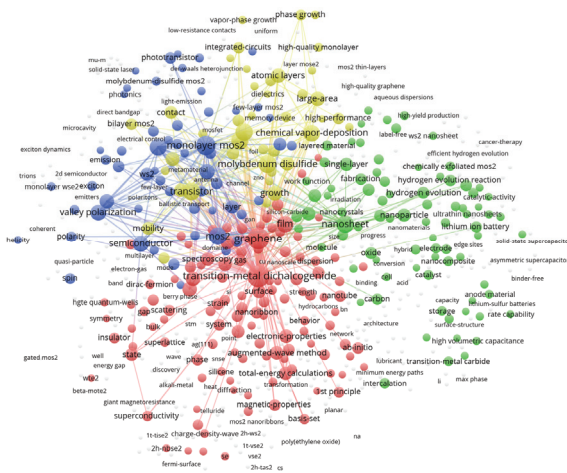


Fig. 8. Overlay keyword map on period 4 (2014~2015).

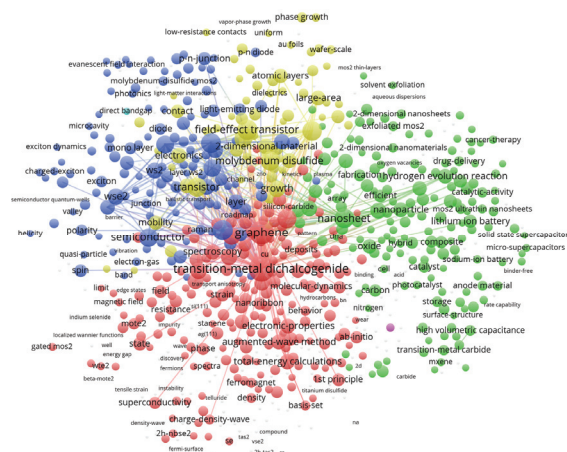


Fig. 9. Overlay keyword map on period 5 (2016~2017).

서 언급했던 2010년 그래핀 연구에 대한 노벨상 수여 영향으로 2차원 물질의 재조명과 관련 연구의 확대가 키워드 매핑 분석을 통해 확인된 것이다. 3기에 이루어진 응용 영역으로의 확장은 C2 클러스터의 2차원 물질의 광학적 특성을 이용한 광소자의 응용 연구, C3 클러스터의 화학기상증착법으로 대면적 단층 MoS₂ 박막을 합성하는 연구, C4 클러스터의 리튬 이온배터리 관련 연구 등으로 구체화된 것으로 파악된다.

4기(period 4: 2014~2015)는 2차원 물질 연구의 급성장이 이루어진 시기이다. 연도별 논문 수 기준의 기술 수명 주기상에서 성장기(growing)에 접어든 것으로 해석되며, 키워드 맵의 중심부에서 바깥으로 연구 영역이 확장되고 있는 것을 알 수 있다. 특히, C2 클러스터와 C4 클러스터에서의 발전이 두드러지는데, C4 클러스터에서 수소 생산을 위한 촉매로의 응용 연구, 에너지 저장 관련 연구가 새롭게 급부상하고 있는 것을 그림 8을 통해 알 수 있다.

5기(period 5: 2016~2017)에는 모든 클러스터에서 2차원 물질 연구의 양적 팽창을 보이는 것으로 나타났으며, 기초 물성 연구 영역보다 응용 연구 영역에서 더욱 확대되고 있음을 알 수 있다. 특히, 4기에는 출현하지 않던 바이오센서, 약물전달, 암 치료 등의 키워드가 5기에 등장하여 2차원 물질 연구가 의학 및 바이오 분야로의 응용으로 발전하고 있는 것을 확인할 수 있다.

3.4 전략 다이어그램 분석

매핑과 클러스터링 분석에서는 클러스터 간의 관계와 클러스터 내의 연결을 구분하지 않았다. 본 연구에서는 2차원 물질 연구 주제의 발전 과정을 면밀하게 살펴보기 위해 키워드들의 클러스터 내 연결 관계, 클러스터 간 연결 관계를 이용한 동시 단어 분석을 수행하였다. 키워드 발생 빈도, c_i 를 이용한 키워드 간의 동시발생 행렬에서 키워드 간의 연결 강도(equivalence index), $e_{ij}=c_{ij}^2/(c_i \cdot c_j)$ 를 기반으로 타 클러스터와의 연결 강도를 의미하는 중심성(centrality), $c = 10 \cdot \sum e_{kh}$ 및 각 클러스터 내의 연결 강도를 의미하는 밀도(density), $d = 100 \cdot \sum e_{ij}/w$ 를 계산(i, j는 개별 키워드, k는 클러스터, w는 각 클러스터에 속한 키워드 수)하고, 중심성과 밀도를 두 축으로 한 전략 다이어그램(strategic diagram)을 산출하여 키워드의 위상을 분석하였다. 사분면으로 구성된 전략 다이어그램에서 신규 등장 키워드는 주로 3사분면(emerging theme)에 위치한다. 이들 키워드에 점차 관심이 확대되면서 4사

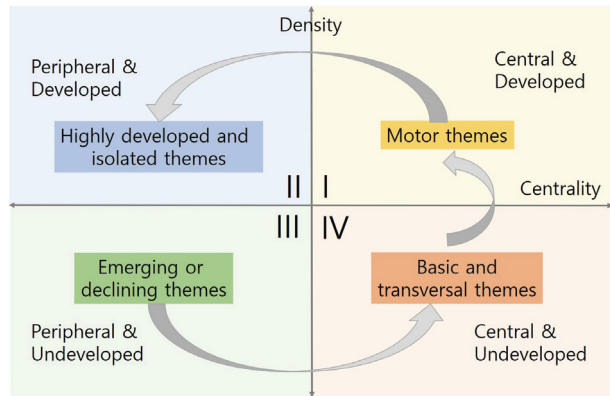


Fig. 10. Strategic diagram by co-word analysis [9].

분면(basic theme)으로 연구 주제가 이동하고, 연구 결과가 누적됨에 따라 1사분면(motor theme)에 위치하면서 해당 분야의 연구들이 핵심 연구 주제화되는 경향을 보인다. 이후, 이러한 핵심 연구 주제들이 관련 연구자들에게 널리 수용되고 안정화되면서, 2사분면(developed theme)으로 이동하는 것으로 해석할 수 있다 [9].

본 연구에서는 4기와 5기에 해당하는 2014~2017년 동안 발표된 논문을 대상으로 10회 이상 출현 키워드 726개에 대해 동시발생 행렬로부터 중심성과 밀도를 계산하였다. 중심성과 밀도의 평균값을 기준으로 하여 사분면을 구성한 전략 다이어그램을 산출한 결과, 93%의 키워드가 1사분면과 3사분면에 속하는 결과가 도출되었다. 이것은 2차원 물질 연구의 발전 단계가 기술 성장 초기에 있는 것을 의미하며, 앞선 기술 성장 패턴 분석 결과와 일치한다.

표 3에 각 사분면에 해당되는 키워드 수와 핵심 키워드를 나타내었다. 전략 다이어그램상에서 2사분면에는 초전도성, 양자 우물 등 33개의 키워드가 위치하였는데, 시공간 1기부터 출현한 키워드와 상당 부분 일치하여 2차원 물질 관련 연구에서 현재 기술 발전 단계가 성숙기에 이른 연구 주제로 해석된다. 한편, 4사분면에는 밀도는 낮으나, 중심성이 높은 키워드로 탄소 나노튜브, 층상구조 물질, 전하이동, 나노결정 등의 키워드 등 17개의 키워드가 위치했다. 이는 2차원 물질 연구의 초석이 되는 연구 주제들이지만, 1사분면으로 이동하지 못한 키워드가 남아 있는 것으로 보이며, 이들 키워드와 2차원 물질에 함께 관련된 연구 결과가 충분히 누적되지 못한 경우로 생각할 수 있다. 한편, 중심성과 밀도가 모두 높은 1사분면에는 그래핀, 이황화몰리브덴, 흑린, 육방정계 질화붕소, 전계효과 트랜

Table 3. The core keywords by themes on strategic diagram of 2D materials research.

Quadrant	Theme	# of Keywords	Core keywords
I	Motor	128	field-effect transistor chemical vapor-deposition molybdenum disulfide transition-metal dichalcogenide hydrogen evolution reaction black phosphorus lithium ion battery p-n-junction hexagonal boron-nitride
II	Developed	33	quantum-well superconductivity high volumetric capacitance photocurrent generation
III	Emerging	548	exfoliated black phosphorus vertical heterostructures piezotronics direct-band-gap terahertz organic solar-cells hydrogen storage sodium-ion battery biomedical applications heterojunction solar-cells drug-delivery cancer-therapy liquid-phase exfoliation
IV	Basic	17	layered material charge-transfer nanowire nanocrystals bilayer graphene transparent carbon nanotube atomically thin mos2

지스터, 화학기상증착법 등 2차원 물질과 관련한 핵심 연구주제들이 위치하였다. 3사분면에는 548개의 키워드가 위치하였으며 압전 특성, 테라헤르츠, 태양전지, 바이오메디컬 응용, 약물전달, 암 치료 등 시공간 4기와 5기에 새롭게 등장한 C4 클러스터 연구 영역의 키워드들이 포진되어 있다. 이러한 전략 다이어그램 분석을 통한 2차원 연구의 발전 과정 해석 결과는 앞선 클러스터링과 시공간별 오버레이 매핑의 결과를 뒷받침한다.

4. 결론

본 연구에서는 최근, 포스트-그래핀으로 급부상하고 있는 전이금속 칼코겐화합물로 대표되는 2차원 물질의 연구 영역 탐지와 그 발전 과정을 과학계량학 기법으로 분석하였다. WoS 핵심 컬렉션의 SCIE, ESCI 데이터베

이스에서 키워드 검색으로 1986년부터 2017년까지 논문 8,691편의 서지정보를 확보하고, 연도별 논문 수를 이용해 시계열 분석을 하였다. 2차원 물질 연구는 2010년을 계기로 급성장하고 있는데 로지스틱 회귀모형으로 기술 성장 패턴을 곡선접합하여 산출된 변곡점 값은 2,019.3으로 2차원 물질 연구가 2017년 현재에는 성장 초기 단계에 있음을 확인하였다. 연구 영역 탐지를 위해 전체 키워드 매핑 및 클러스터링을 수행하였고, 그 결과, 2차원 물질 연구 영역을 4개의 클러스터로 구분하였다. 한편, 5개 시구간별 오버레이 매핑으로 시간에 따른 키워드 변화를 분석하여 2차원 물질 연구의 발전 과정을 살펴보았다. 또한, 동시 발생 단어의 중심성과 밀도를 계산하여 전략 다이어그램을 산출하고 해석하여 2차원 물질 연구의 발전 과정을 다시 한번 확인하였다. 그 결과, 2차원 물질 연구는 기초 물성 연구 영역과 응용 연구 영역으로 나뉘며, 응용 연구는 광전소자 및 전자소자로의 응용 영역이 2개의 클러스터로 분할되어 발전하고 있으며 수소 생산을 위한 전기화학 촉매, 에너지 저장, 배터리, 바이오 분야 등 다양한 응용 연구 영역이 별도의 클러스터로 존재하는 것을 알 수 있었다. 이러한 키워드 매핑 및 클러스터링 결과는 전략 다이어그램에서 도출된 키워드 맵의 네트워크 위상 분석 결과와 일치하는 것을 확인하였다. 2017년 현재, 2차원 물질 연구는 성장 초기 단계에 막 진입하였지만, 탄소나노튜브, 그래핀 등의 연구에서 축적된 연구 노하우 및 성과가 단시간 내에 발현되어 더욱 빠른 성장을 할 것으로 기대된다. 특히, 2차원 물질은 그 종류가 매우 다양하고, 연구 주제가 무궁무진하여 더 많은 연구자들의 관심이 집중될 것이다.

감사의 글

본 논문은 한국과학기술정보연구원의 주요사업 “과학기술계량학 기반 신기술 다이내믹스 분석·연구(K-17-L02-C02-S02)”의 지원으로 작성되었습니다.

REFERENCES

- [1] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, *Science*, **306**, 666 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1102896>]
- [2] S. Hong, *Physic & High Technology*, **25**, 2 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.3938/PhiT.25.034>]
- [3] Q. He, *Library Trends*, **48**, 133 (1999).
- [4] R. R. Braam, H. F. Moed, and A.F.J. van Raan, *J. Assoc. Inf. Sci. Technol.*, **42**, 233 (1991). [DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4571\(199105\)42:4<233::AID-ASI1>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4571(199105)42:4<233::AID-ASI1>3.0.CO;2-I)]
- [5] K. Börner and A. Scharnhorst, *J. Informetr.*, **3**, 161 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2009.03.008>]
- [6] N. J. van Eck and L. Waltman, *Scientometrics*, **84**, 523 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>]
- [7] L. Leydesdorff and I. Rafols, *J. Informetr.*, **6**, 318 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2011.11.003>]
- [8] L. Kay, N. Newman, J. Youtie, A. L. Porter, and I. Rafols, *J. Assoc. Inf. Sci. Technol.*, **65**, 2432 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1002/asi.23146>]
- [9] M. Callon, J. P. Courtial, and F. Laville, *Scientometrics*, **22**, 155 (1991). [DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02019280>]
- [10] S. Iijima, *Nature*, **354**, 56 (1991). [DOI: <https://doi.org/10.1038/354056a0>]
- [11] J. P. Martino, *Technol. Forecast. Soc. Chang.*, **70**, 719 (2003). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(02\)00375-X](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(02)00375-X)]
- [12] T. U. Daim, G. Rueda, H. Martin, and P. Gerdri, *Technol. Forecast. Soc. Chang.*, **73**, 981 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.04.004>]
- [13] C. H. Lee, G. H. Lee, A. M. van der Zande, W. Chen, Y. Li, M. Han, X. Cui, G. Arefe, C. Nuckolls, T. F. Heinz, J. Guo, J. Hone, and P. Kim, *Nat. Nanotechnol.*, **9**, 676 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.150>]
- [14] F. Withers, O. Del Pozo-Zamudio, A. Mishchenko, A. P. Rooney, A. Gholinia, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. J. Haigh, A. K. Geim, A. I. Tartakovskii, and K. S. Novoselov, *Nat. Mater.*, **14**, 301 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat4205>]
- [15] Y. H. Lee, X. Q. Zhang, W. Zhang, M. T. Chang, C. T. Lin, K. D. Chang, Y. C. Yu, J.T.W. Wang, C. S. Chang, L. J. Li, and T. W. Lin, *Adv. Mater.*, **24**, 2320 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201104798>]
- [16] Y. J. Park, H. Jang, and J. H. Ahn, *Physic & High Technology*, **25**, 15 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.3938/PhiT.25.036>]
- [17] H. Yang, *Physic & High Technology*, **25**, 21 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.3938/PhiT.25.037>]