

**사회연결망 분석을 활용한 나노기술 연구동향 국가간 비교분석:
탄소나노소재분야 중심**배성훈^a, 김재신^a, 신광민^a, 윤진선^a, 강상규^a, 김준현^a, 이정우^b, 김민관^b, 한창희^{c*}**Comparative Analysis of Co-Authorship and Keyword Network for Nanotechnology:
Carbon Nanomaterials Field**Seoung-Hun Bae^a, JaeSin Kim^a, Kwang-Min Shin^a, Jin-Seon Yoon^a, Sang-Kyu Kang^a,
Jun-Hyun Kim^a, Jungwoo Lee^b, Min-Kwan Kim^b, Chang-Hee Han^{c*}^a Korea Institute of Science and Technology Information, 66, Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02456, Korea^b Institute of Knowledge Service, Hanyang University, 55, Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan, Gyeonggi-do, 15588, Korea^c Department of Business Administration, Hanyang University, 55, Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan, Gyeonggi-do, 15588, Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	14	October	2016
Revised	10	January	2017
Accepted	23	January	2017

*Keywords:*Nanotechnology
Carbon nano material field
Scientometrics
Social network analysis
Keyword search strategy**ABSTRACT**

Nanotechnology is a leading branch of technology and is expected to improve national industrial competitiveness. For maintaining a sustainable growth in nanotechnology, Korean government has set up specific plans from a long-term perspective. One of these plans is tracking and promoting certain potential technologies called Future 30 Nanotechnologies. This study aims to develop an analysis framework for comprehending the Future 30 Nanotechnologies. We applied this framework to the carbon nanomaterials field. Through co-authorship and keyword network analysis, we identified the research trends of three countries (i.e., Korea, US, and China). This research framework could be utilized in the development of a nanotechnology policy.

1. 서론

나노기술은 ‘물질을 나노미터 크기의 범주에서 조작·분석하고 이를 제어함으로써 새롭거나 개선된 물리적·화학적·생물학적 특성을 나타내는 소재·소자 또는 시스템을 만들어 내는 과학기술로 국가법령으로 제시되고 있다³⁻⁵⁾. 나노기술은 범용기술(GPT) 측면이 강하여 IT, BT, ET, ST, CT 등 핵심기술 분야와 상승적 융합을 통해 국가 산업경쟁력의 획기적 향상에 기여할 것으로 기대되고 있다³⁾. 이러한 배경에서 한국은 2001년 나노기술개발촉진법 제정 이후 5년마다 나노기술종합발전계획을 수립·추진하고 있고³²⁾, 국

가적 투자의 시작점인 2001년 이후 14년간 나노기술분야 총 투자액은 3조 9,800억에 달하였으며, 그 성과로 2008년 기준 나노기술 4대 강국이라는 위상을 차지하였다^{29,31)}. 이처럼 나노기술에 대한 정부의 투자는 주목할 만한 성과를 나타내며³⁾ 어느 정도의 성공규모에 올라선 모습이다. 향후에도 지속적 성장을 이끌어낼 국가전략이 필수적인 상황에서 정부는 제4기 나노기술종합발전계획(안)을 발표하며 그 3대 전략 중 하나로 미래선도 나노기술을 확보하고자 하는 의지를 밝혔으며, 미래 나노기술 30이라는 30개의 미래 유망분야를 육성하고자 한다³²⁾. 이러한 국가전략을 실현시키기 위해서는 30개 나노기술과 관련된 현황을 객관적으로 파악하고 그 트랜

* Corresponding author. Tel.: +82-31-400-5634

Fax: +82-31-400-5039

E-mail address: chan@hanyang.ac.kr (Chang-Hee Han).

드를 추적하여, 합리적인 나노기술 정책을 수립해 나가야 한다. 나노기술종합발전계획이 시행된 2001년 이래로 나노기술 분야에 대한 우리 정부의 지속적인 투자는 매우 주목할 만한 성과를 창출해 내었으나, 이에 대한 연구동향 및 기술동향 분석은 체계적으로 이루어지지 않고 있다. 특히 해외의 과학계량학 연구그룹이 수행하는 나노기술 동향에 대한 연구상황과 비교했을 때 이에 대한 우리나라의 연구흐름은 매우 부족한 상황이라고 할 수 있다. 선도 연구그룹은 나노기술을 추적하기 위한 방법론 개발, 데이터 수집 전략, 연구동향 분석 등에 대한 체계적인 연구 속에 있다^{35-38,46,47}. 이에 반해 국내에서는 최근 들어서야 관련 부처에서 나노기술 동향에 대한 연구를 수행해 나가고 있으며 일례로 국가나노기술정책센터는 2013년부터 나노기술 동향에 대하여 연례 분석을 수행하고 있다⁴⁴. 국내 나노기술 기관 및 인프라 현황을 조사하여 국가나노사업의 투자성과를 파악 하였으며, 특허데이터 분석을 통해 국가별 상용화된 나노기술 수준에 대한 비교연구를 수행하였다³¹. 그러나 이러한 최근 몇 년간의 조사를 제외하고 나노기술 연구동향을 분석하는 국내연구는 다소 미흡한 실정이다. 나노기술 연구에 대한 데이터 수집절차의 타당성 문제가 제기되며, 분석자체도 주로 빈도분석에 의존한 단순 현황 파악에 그치는 수준으로 나타나고 있다.

따라서 본 연구에서는 나노기술종합발전계획에서 제시한 30개 미래나노기술의 연구동향을 추적할 수 있는 프레임워크를 개발하였다. 데이터 정합성을 확보하기 위해 어휘 쿼리 방식의 데이터 검색전략^{17,30,38,43}을 적용하였으며, 분석 모형으로는 최근 연구동향이나 기술동향을 분석하는 데 활용되는 방법론인 사회연결망분석(social network analysis)을 활용하였다. 결론적으로 2000년부터 2015년까지의 나노기술 논문 데이터에서 공저자 네트워크와 키워드 네트워크를 도출하여 한국, 중국, 미국의 연구동향을 분석하였다. 연구프레임워크의 사례적용을 위해 30개 분야 중 탄소나노소재 분야를 선정하였다. 나아가 국가별(한국·중국·미국) 나노기술 네트워크의 비교·분석을 통해 향후 나노기술 정책의 방향성을 제시하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 사회연결망 분석

사회연결망분석은 네트워크의 연결관계 구조를 나타내는 네트워크 변수를 이용하여 네트워크 내 액터의 성과나 액터 간 관계구조를 설명하고 예측하는 것을 목표로 하는 분석기법이다^{1,12,13,16,23}. 사회연결망은 하나 이상의 관계에 의해 연결된 네트워크 구성원의 집합, 즉 액터의 집합으로 정의된다^{23,41}. 소셜시스템은 네트워크 집합 내 구성원간의 관계에 의해 형성된 패턴에 의해 창조된다는 전체로 출발하며²⁸, 이러한 관계에 분석의 초점을 맞추어 관계패

턴으로부터 유의미한 시사점을 도출하는 방법론이다⁷. 이처럼 사회연결망분석은 관계패턴에 집중하기 때문에 전통적인 통계데이터 분석과는 다른 방법 및 분석적 개념을 필요로 한다. 사회연결망분석은 네트워크 수준, 액터 수준, 관계 수준 등 3가지 수준에서 분석이 가능하다²³. 네트워크 수준 분석은 네트워크 전체가 하나의 분석대상이며 전체를 특징짓는 하나의 값을 통해 분석한다. 액터 수준의 분석은 네트워크를 구성하는 개별 액터가 분석 대상이 되는 것을 말한다. 관계 수준 분석은 네트워크 내 임의의 액터간에 상호호혜적인 양자관계를 갖고 있는가가 분석이 되는 것이다²³. 본 연구에서 주로 활용하고자하는 것은 액터 수준의 분석이며, 사회연결망분석을 활용하는 다른 연구들에서도 액터 수준의 분석을 주로 수행하고 있다^{2,6,7,11,15,22,24,27,35}.

액터 수준 분석에서 다루는 중심성(centrality)은 전체 연결망에서 중심에 위치하는 정도를 의미하며, 핵심적인 액터가 누구인가를 네트워크 내 액터가 차지하는 중심적 위치의 관점에서 설명한다^{13,33,41}. 중심성은 독립성, 자율성, 지배력, 영향력 등으로 해석할 수 있다²³. 대표적인 지표로는 연결정도 중심성, 근접 중심성, 매개 중심성이 있다.

2.1.1 연결정도 중심성(Degree Centrality)

연결정도 중심성은 개별 액터가 네트워크 내 다른 액터와의 직접적 연결관계가 얼마나 많은지를 측정하여 위치적 우위를 분석하는 지표이다³³. 연결정도 중심성은 액터의 파워에 대한 가장 간단하면서도 효과적인 지표로 유용하게 활용된다. 높은 연결정도 중심성을 가진다는 것은 유용한 자원을 많이 가지고 있어 기회의 양이 많이 주어진다라는 것을 의미한다²³. Fig. 1은 네트워크 크기에 따라 표준화된 연결정도 중심성의 수식표현이다³³.

2.1.2 근접 중심성(Closeness Centrality)

근접 중심성은 한 액터가 다른 액터들과 얼마나 가까이 있는지를 측정하는 지표이다³³. 네트워크 내의 간접적 연결까지 고려하여 전체 네트워크에서의 한 액터와 다른 모든 액터 간의 거리를 계산한다. 연결정도 중심성이 활동성을 의미한다면, 근접 중심성은 액터의 독립성을 측정하는 것이다. 높은 근접 중심성을 가진다는 것은 네트워크 내의 정보를 신속히 접할 수 있고, 다른 액터에 비해 짧은 경로를 통해 더 많은 액터에게 접근하여 독립적인 영향력을

$$Degree\ Centrality = \frac{\sum_{j=1}^g x_{ij} \ (i \neq j)}{g-1}$$

g: The number of Actors

Fig. 1 Formula of degree centrality

발휘할 수 있다는 것을 의미한다. Fig. 2는 네트워크 크기에 따라 표준화된 근접 중심성을 수식으로 제시한 것이다²³⁾.

2.1.3 매개 중심성(Betweenness Centrality)

매개 중심성은 한 액터가 직접 연결되어 있지 않은 액터들 간 관계를 통제 또는 중개하는 정도를 측정하는 것이다³³⁾. 액터가 네트워크 내 어디에 위치해 있는지를 측정하기 위해 개별 액터가 다른 액터쌍 간의 최단경로 상에 위치하는 횟수를 측정한다. 매개 중심성이 높다는 것은 액터들이 다른 액터들과의 연결을 하기 위해서는 해당 액터에게 의존적이라는 것이며, 이는 즉 통제력을 의미한다고 볼 수 있다. Fig. 3은 표준화된 매개 중심성을 나타낸 것이다⁴¹⁾.

2.2 선행연구 고찰

2.2.1 사회연결망 분석의 기존 연구 고찰

사회연결망 분석을 활용한 네트워크의 특성 및 성과에 대한 연구들은 다양한 분야에서 수행되고 있다⁶⁾. 많은 연구들이 기업 내의 커뮤니케이션, 조언, 정보의 흐름 등에 대한 네트워크 구조를 파악하고 그러한 네트워크 지표들과 경영성과와의 연관성을 분석하고 있다^{6,27,34,43)}. Zhang and Venkatesh는 통신회사의 온-오프라인 상에서의 커뮤니케이션 네트워크 구조와 직무 성과와의 연관성에 대한 연구를 수행하였다⁴³⁾. Ahuja와 Galletta는 가상그룹에서의 개인별 역할특성이 개인성과와 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다²⁷⁾. 박병진 외는 기업간의 전략적 제휴에서 기업의 중심성이 혁신과 어떠한 영향관계가 있는지를 분석하였다. 연결정도 중심성과 매개중심성 등이 혁신적인 성과에 정의 영향을 미치는 것을 밝혀내었다⁶⁾.

기업 네트워크의 특성을 분석하는 추세와 별도로 논문 서지데이터를 활용하여 연구동향을 분석하는 흐름도 존재한다. 데이터를 구간으로 공저자 네트워크를 분석하거나^{10,11,15,18,21,42)}, 키워드 네트워크를 구성하여 해당 주제 분야의 주요 연구자가 누구인지, 어떤

한 키워드가 성장, 도태 되었는지를 분석하는 것이다^{20,22,40,45)}. 공저자 네트워크 선행연구로는 임혜선과 장태우가 물류 분야 학술지의 공저자 네트워크 및 연구주제를 분석하여 물류분야의 협력연구 형태와 주제를 분석하였다¹⁸⁾. Abassi 등은 철강구조 분야 연구논문의 공저자 네트워크를 살펴봄으로써 매개중심성이 높은 연구자들이 신규 연구자와의 협업이 빈번하다는 사실을 밝혀내었다¹⁾. 강동준과 이길남은 무역학 연구들에 대한 네트워크분석을 위해 한국 무역학회 지를 선정하여 40년 간의 공저자 네트워크에 대해 분석하였다²¹⁾. 최명재와 김민숙은 신경정신의학 학술지에 대한 연구 네트워크 특성을 분석하여 좁은 세상 효과가 나타났고 저자의 중심성이 높을수록 연구성과에 정의 효과가 있음을 밝혀내었다¹⁰⁾.

키워드 네트워크 선행연구로는 송민근 등이 사회연결망분석을 활용하여 중국 일대일로 사업의 연구동향을 파악하였다⁴⁰⁾. 연결정도 중심성, 매개 중심성 등의 지표를 통해 중국과 한국의 논문에서 각각 어떠한 키워드가 연구되고 있는지를 분석하였다. 정대현, 권오진, 권영일은 녹색기술 분야의 연구동향을 파악하기 위하여 녹색기술정보포털에서 제공하고 있는 녹색기술 정보 키워드를 네트워크 구축하여 분석하였다²⁰⁾. 고재창, 조근태, 조운호는 기술경영관련 연구의 거시적 흐름을 분석하기 위하여 네트워크 분석을 수행하였다. 혁신, 연구개발, 특허, 예측, 기술이전, 기술, 중소기업 등의 키워드가 기술경영 분야의 주요 키워드임을 확인하였다²²⁾.

2.2.2 나노기술 연구동향의 기존 연구 고찰

나노기술 분야는 다양한 학계간의 융합으로 인해 연구동향의 관측이나 분석이 용이하지 않다³⁸⁾. 그러나 나노기술에 대한 각국의 이니셔티브가 출범하고 R&D 투자 활성화됨에 따라 나노기술에 대한 연구동향을 분석하고자 하는 논문들도 점차 증가하고 있다. 주요 학술 데이터베이스 및 특허 데이터베이스에 축적된 데이터가 기하급수적으로 증가하였기 때문이다. Table 1의 선행연구들에서 나노기술 연구동향을 분석하는 목적은 주로 나노기술 특정 분야에 대한 연구동향 분석에 집중되는 경향을 보이고 있다. 초기의 연구동향분석은 사례연구 조사에 더하여 문헌정보 분석(논문게재 추이에 대한 기술통계 분석)으로 정량적인 분석을 수행하는 경향을 보인다 2007년 이후 논문 DB를 기초 데이터로 사회연결망 분석을 수행하는 형태를 보인다. 최근 과학계량학의 선도 연구자들은 나노기술의 특성에 맞는 새로운 방법론(Science Overlay Map, IDR metrics) 등을 개발하고 있지만³⁷⁾, 나노분야의 연구동향분석은 주로 사회 연결망 분석을 활용하여 특정분야의 연구동향에 대해 분석하고 있음을 알 수 있다^{11,15,25,26,39,42)}. 본 연구에서는 선행연구들에 나오는 특정 나노기술분야에 대한 개별연구가 아닌 향후 유망할 것으로 보이는 복수의 나노기술들에 대한 근거자료를 획득·생성하기 위한 방법론을 개발하고자 제4기 나노기술종합발전계획의 30

$$Closeness\ Centrality = \frac{1 * (g - 1)}{\sum_{j=1}^g d(A_i, A_j), (i \neq j)}$$

g: The number of Actors
d: Distance between Actor_{*i*} and Actor_{*j*}

Fig. 2 Formula of closeness centrality

$$Betweenness\ Centrality = \frac{\sum_{j < k} g_{jk} (N_i)}{g_{jk}} * \frac{2}{(g - 1)(g - 2)}$$

g: The number of Actors

Fig. 3 Formula of betweenness centrality

Table 1 Preceding research of nanotechnology trend

Researcher	Purpose
Lee, Kang (2005) ^[25]	Analysis of global research trends related to nanoparticle synthesis centering on functional nanoparticles
Choi et al. (2007) ^[8]	Analysis of research trends on environment, health and safety of nanotechnology
Choi et al. (2007) ^[9]	Analysis of current state of awareness and attitude research on nanotechnology
Rueda et al. (2007) ^[15]	Core researchers, coauthors, national and institutional analysis of nanotechnology
L. Leydesdorff (2008) ^[37]	Latest update on the status analysis of nanoscience and nanotechnology research
A. Porter et al. (2009) ^[36]	Analysis and analysis of interdisciplinary mutual fusion of nanoscience and nanotechnology
Shin et al. (2010) ^[39]	Patent Trend Analysis on Thermal Conduction Technology of Carbon Nanotubes
Lee et al. (2011) ^[26]	Analysis of size and intensity of cooperation between R & D partners and the degree of R&D performance creation by country
Lee & Lee (2012) ^[24]	Analysis of research trends of SCI-level theses in domestic bio-nano field
W. Fan et al. (2014) ^[42]	Analysis of structure and development of nano research collaboration network
Eun (2015) ^[11]	Analysis of the research results of China's implementation of 'National Nano Science and Technology Development'

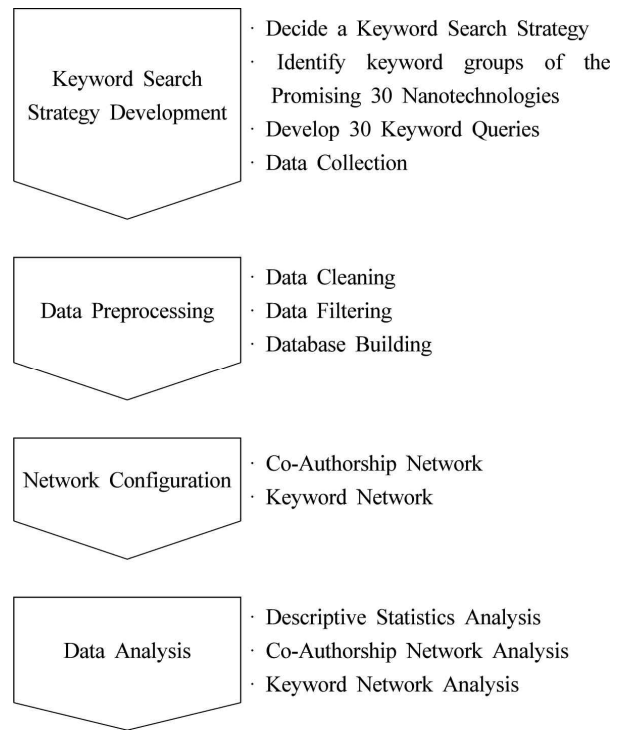


Fig. 4 Research framework

Table 2 Comparison between 3 Keyword Search Strategies

	Spreadability	Accuracy	Rationality	Independency
Lexical Query	Broad	High	Good	Poor
Citation Analysis	Broad	Low	Medium	Poor
Nano Core Journal	Narrow	High	Good	Good

개 미래나노기술의 연구동향을 추적할 수 있는 분석프레임워크를 제시하고자 한다.

3. 연구 프레임워크

본 연구의 프레임워크는 다음과 같다.

3.1 키워드 검색 전략 개발

나노기술은 고도로 복잡하고 횡적 융합이 활발한 특성을 가지고 있어 나노기술 관련 데이터의 수집에 있어 정확한 범위를 파악하기 힘들다는 문제가 존재한다. 이는 'nano*'라는 단순한 쿼리 검색식으로는 나노분야에 해당되는 정확하고 재현성이 높은 논문 서지데이터를 획득할 수 없다는 것을 의미한다^[38]. 이에 따라 정확성이 높은 데이터 수집을 위해 나노기술 검색 전략이라는 방법론(nanotechnology search strategy)이 연구된 바 있다^[17]. Wei Fan 등에는 의하면 나노기술 검색 전략 방법론은 3가지로 구분된다^[42]. 첫째 어휘 쿼리(lexical query) 방식은 전문가 의견을 수집하여 키

워드를 선정하는 것이다^[36,38]. 둘째는 인용 분석(citation analysis) 방식으로 Zitt과 Bassecouard이 제안하였는데, 핵심(고인용) 논문셋에서 인용된 논문들을 추적해서 데이터를 확보하는 방식이다^[47]. 셋째는 핵심 학술지 전략(nano core journal) 방식으로 L. Leydesdorff가 제안하였으며, 사회연결망 분석기법을 활용해 핵심 나노기술 학술지를 선별하고 그 학술지에 게재된 논문만을 데이터로 수집하는 방식을 추구한다^[38,42]. 각 방식에 대한 특성은 Table 2와 같다.

본 연구의 목적인 나노유망기술 30개 분야의 개별적인 연구동향 추적을 위해서는 모든 분야에 대한 각각의 검색 키워드가 필요하며, 30개 기술 각각에 대한 정확성이 높은 논문 서지데이터가 수집되어야 한다. 이러한 조건을 해결할 수 있는 어휘 쿼리 전략(lexical query strategy)이 가장 적합한 방법론으로 판단되었다. 하나 어휘 쿼리 방식은 키워드를 도출해내는 전문가의 전문성에 그 의존도가 심한 단점이 존재한다^[17,38,42]. 따라서 본 연구에서는 나노유망기술 30의 키워드를 도출하기 위해 제4기 나노기술종합발전계획에 참

여한 산학연의 전문가 집단을 활용하여 개별 기술에 대한 30개의 키워드 문치를 도출하였다. 하나의 키워드 문치 예시로 Table 3의 위쪽 키워드를 확인할 수 있다. 이 같은 키워드를 통해 데이터 수집을 하기 위해서는 데이터베이스에서 검색하는데 적합한 검색식(query)을 개발해야 한다. 30개 키워드 중 본 연구에서 사례를 적용한 나노탄소 소재 기술 분야의 키워드를 web of science 쿼리 규칙에 맞춰 Table 3과 같이 개발하였다.

데이터 수집은 Thomson Reuter사의 Web of Science™ 핵심 컬렉션 데이터베이스에서 SCIE, SSCI, A&HCI를 대상으로 고급 검색을 통해 1945년에서 2015년 사이에 발간된 296,164개의 논문(article, review, proceeding paper) 데이터를 수집하였다. 원활한 데이터 분석을 위해 영문(english)로 작성된 논문만을 대상으로 하였다.

3.2 데이터 전처리

데이터의 전처리란 분석에 적합하도록 최대한 소스 데이터의 정확성을 높이는 과정을 말한다. 아무런 값이 입력되지 않아 네트워크 구성에서 오류를 일으킬 수 있는 공란(NA)을 제거하는 데이터 클리닝작업과 다운로드 데이터에서 불필요한 속성정보를 제거하는 필터링 작업을 수행하였다. 또한 저자 및 국가 정보 등에 대해 하이픈 제거, 소문자 통일, 공백 제거 등을 수행하였다. 키워드 정보의 경우에는 저자가 작성한 저자 키워드(author keyword)와 WoS 알고리즘에 의해 자동 생성되는 키워드 플러스™(Keyword plus™) 정보가 존재하는데, 저자가 작성한 키워드의 경우 전처리가 복잡하고, 주관적인 키워드 삽입으로 불충분한 정보라는 단점이 존재한다^{14,19}. Zhang 등은 키워드 플러스™과 저자 키워드 정보의 정량적 비교분석을 통해 키워드 플러스™을 활용하여도 연구 동향 분석시 저자 키워드와 대동소이하다고 연구하였다¹⁹. 이에 본 연구에서는 키워드플러스™을 활용하였다. 위와 같은 일련의 작업으

Table 3 Lexical Query applied to Nano Carbon Material

carbon nanotube (carbon nano*), single wall carbon nano*, multi wall carbon nano*, puri*, doping, surface modi*, hybrid, chiral*, disper*, composite, film, ink, electr*, nanotube fib*, graphene, graphite, exfoliation, oxidation, graphite oxide, graphene oxide, graphene flake, CVD graphene, reduced graphene oxide, graphene nanopla* , single lay*, multi lay*, quantum dot

TS=((("carbon nanotube" OR "carbon nano*" OR "single wall carbon nano*"OR "multi wall carbon nano*"OR "nanotube fib*" OR "graphene" OR "graphite" OR"graphite oxide" OR "graphene oxide" OR "graphene flake" OR "CVD graphene" OR "graphene nanopla*") OR (("puri*"OR "doping" OR "surface modi*" OR "hybrid" OR"chiral*" OR "disper*"OR "composite" OR "film" OR "ink" OR "electr*"OR "exfoliation" OR "oxidation" OR "single lay*"OR "multi lay*" OR "quantum dot") AND "nano"))

로 공저자 네트워크와 키워드 네트워크 정보가 담긴 연도별 데이터 베이스를 구축하였다.

3.3 네트워크 구성

네트워크 구성 단계에서는 우선적으로 앞서 구축된 연도별 데이터베이스에서 공저자 네트워크와 키워드 네트워크 분석을 위해 필요한 기초 데이터를 사회연결망 분석 소프트웨어에 импорт한다²³. 이후 매트릭스를 구성하고, 행렬계산을 통해 주요 지표들을 도출하며, 시각화를 수행한다. 네트워크 구성 전 과정에서 활용한 소프트웨어는 오픈소스인 R과 SNA 분석 패키지인 igraph이다¹⁶. R은 GPL 라이선스 기반의 오픈소스 소프트웨어 통계 툴이다. 오픈소스 소프트웨어의 특징인 구입 및 유지비용이 전혀 들지 않는다는 것과 수많은 사용자에 의해 기능이 개방형 혁신된다는 장점을 가지고 있다. 또한 많은 함수들을 패키지에 내장하고 있어 이를 적절히 조합하거나 새로운 함수를 직접 코딩하여 쓸 수 있다는 장점도 있다. R은 웹을 통해 다운로드 및 설치가 가능하고, 다양한 컴퓨팅 운영체제에서 동작한다. Python D3.js 등 다양한 프로그래밍 언어 및 플랫폼과 연동을 통해 시각적 표현이나 자료배포를 할 수 있다.

4. 데이터 분석: 탄소나노소재분야 적용

본 연구에서는 나노유망기술 30개 중 탄소나노소재 분야에 사례 적용을 수행하였다. 탄소나노소재 분야를 선정한 이유는 나노전자 의 뒤를 잇는 나노소재는 미래 성장동력으로 인식되고 있고²⁹, 탄소나노소재는 전방 산업의 기술 수준이 높고, 국내 기술 및 생산기반 세계 경쟁력을 확보하였으며, 정부의 투자가 활발한 분야이기 때문이다. 탄소나노소재 분야 이외에도 앞에 제시한 연구 프레임워크를 통해 나머지 분야에도 적용이 가능하다.

4.1 기술통계 분석

4.1.1 전체 논문 발표 동향

Fig. 5는 탄소나노소재 분야에 발표된 논문 수와 연구 활동에

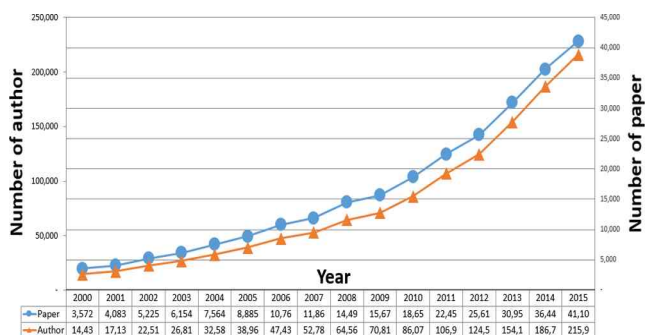


Fig. 5 Changes of the number of paper and author

참여 하고 있는 연구자 수 추이를 나타낸다. 논문발표 수와 연구자 수가 꾸준히 증가세에 있으며, 특히 2000년대 후반부터 그 추이가 급격히 증가하는 추세를 보이고 있다.

4.1.2 국가별 논문 발표 동향

Fig. 6은 탄소나노소재분야의 논문발표 동향을 국가별로 나타내고 있다. 2000년부터 2015년까지 발표된 논문 수를 국가별로 구분하고 누적 발표수가 가장 많은 상위 10개 국가(교신저자 국적 기준)를 기준으로 분석한 결과이다. 2006년까지 미국이 가장 많은 논문을 발표하였으나 2007년부터 현재까지 중국이 탄소나노소재 분야에 학술논문을 가장 많이 생산해 내고 있다. 중국은 2000년 중후반부터 시작하여 급격한 연구 성과의 성장을 나타내고 있다. 한국의 경우, 2010년까지는 일본에 비해 논문 발표 건수가 뒤지다가 2011년부터 일본보다 많은 논문을 발표하고 있으며 2015년 현재 논문발표 누적건수로 세계 3위를 차지하고 있다. 일본의 경우, 2000년대 초 미국과 비슷한 연구 성과를 보이다가 2000년대 중후반부터 연구가 줄어들어 최근에는 정체되어 있는 양상을 보이고 있다(Table 4 참조).

4.2 공저자 네트워크 분석

Fig. 7은 탄소나노소재분야의 연구자 네트워크 변화양상을 5개년 단위(2000년, 2005년, 2010년, 2015년)로 시각화한 결과이다. 네트워크 특성을 나타내는 분석치들을 통해 변화양상을 고찰해보

면 밀도(density)가 점차 하락하고 있음을 알 수 있다. 이는 발표논문이 많아짐에 따라 저자가 증가하면서 나타나는 현상이다. 또한, 중심핵에 나노탄소 소재분야의 핵심 연구자를 중심으로 선호적 공저관계가 밀도 있게 형성되었음을 추론할 수 있다.

평균연결(average edges)은 연구자 한 명당 다른 연구자와 몇 명과 공동연구를 하고 있는지를 나타내는 데, 2000년부터 2010년까지는 3~4 정도의 평균연결을 가지다 2015년에는 2000년과 비교했을 때 2배 이상의 공저관계를 가지는 것을 알 수 있다. 평균거리(average distance)는 네트워크의 크기를 나타내는 값으로써 4개 연도별 수치 모두 Newman이 제시한 좁은 세상 네트워크 값인 4-9에 포함된다. 즉 탄소나노소재분야는 좁은 세상 네트워크를 따름을 알 수 있다. 이것의 의미는 이 네트워크내에 소수의 허브에게 연결이 쏠리는 선호적 연결(preferential attachment) 현상이 나타난다는 것이며, 이들이 중심적인 위치에서 다양한 형태로 힘을 발휘할 수 있는 네트워크임을 의미한다. 노드간 상호연결이 가능한지를 확인하여 그룹핑을 하는 컴포넌트(component)를 통해 클러스터링을 하기도 하지만 기본적으로 이 네트워크에 속하는 그룹의

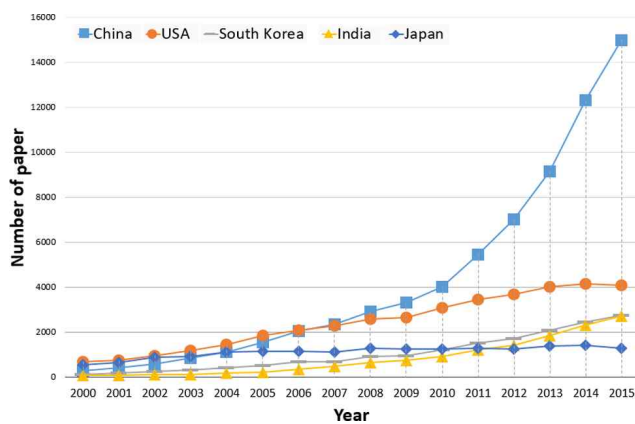


Fig. 6 Changes of paper publication by country

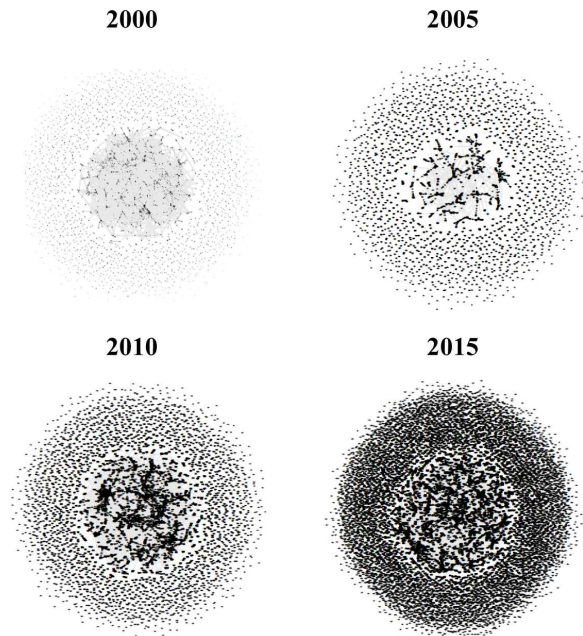


Fig. 7 Changes of co-authorship network (2000-2015)

Table 4 Changes of the number of paper publication by country (2000-2015)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
South Korea	103	176	250	323	430	503	676	666	932	952	1,219	1,532	1,714	2,074	2,448	2,740
China	296	416	575	838	1,130	1,549	2,063	2,362	2,912	3,323	4,019	5,466	7,005	9,163	12,318	14,989
USA	698	748	959	1,179	1,436	1,852	2,091	2,277	2,590	2,665	3,094	3,436	3,676	4,016	4,149	4,097
India	74	91	102	127	166	209	344	466	658	750	927	1,200	1,406	1,836	2,310	2,719
Japan	548	656	874	906	1,126	1,136	1,159	1,132	1,290	1,253	1,256	1,298	1,256	1,374	1,421	1,288

Table 5 Co-authorship network index

	2000	2005	2010	2015
Density	0.00062	0.00033	0.00012	0.00008
Nodes	9,876	23,309	59,774	125,147
Edges	30,671	90,129	213,448	611,829
Average Edges	3.1056	3.8667	3.5709	6.3691
Components	1,521	2,247	6,598	8,697
Average Distance	7.7517	6.1923	8.2378	4.8889
Diameter	21	22	27	28

개수를 확인할 수 있다. 전체 구간에서 약 1,000~9,000개 값으로 확인되는데, Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 선호적 연결을 소수의 핵심 연구네트워크와 연결이 끊긴 수많은 주변 연구자 그룹이 존재하기 때문에 보인다. 연결이 존재하는 그룹에서 가장 멀리 떨어진 연구자간 연결(diameter)을 위해서는 20번 이상의 연결이 필요하다고 나타났으나, 이는 공저관계에서 20명 이상이 같이 연구할 경우 나타날 때 발생할 수 있다.

Table 6은 연도별로 연결정도 중심성이 높은 상위 연구자 5명을 나열한 표이다. 공저자 네트워크에서 연결정도 중심성이 높다는 것은 다양한 연구자와 연구를 수행할 수 있는 위치에 있으며, 그만큼 많은 공동연구기회를 갖는 것을 의미한다. 2000년에 1위를 보이는 Iijima, Sumio가 2005년 3위, 2010년에 4위를 나타내면서 계속 상위권에 랭크되는 핵심 연구자로 보인다. 한국의 성균관대 교수인 Lee, Young Hee는 2005년과 2010년에 연속으로 2위를 차지하였다. 구체적인 2010년 이후부터의 변화양상은 나타나지 않지만 2015년에는 중국 연구자들이 5위권에 모두 랭크되어 기술통계에서 확인한 것처럼 중국세를 확인할 수 있다.

Table 7은 연도별로 근접중심성이 높은 상위 연구자 5명을 나열한 표이다. 공저자 네트워크에서 근접중심성이 높다는 것은 연결된 모든 연구자에게 가장 빠르게 접근할 수 있다는 것을 말하며, 파급력이 높다는 것을 의미한다. 근접중심성을 분석하기에는 같은 연구자들이 많아 의미있는 분석이 어렵다. 그러나 2005년과 2010년 당시 중국인 연구자들 연결정도 중심성은 떨어졌었지만, 근접중심성에서 많은 중국인들이 나타남을 보아 파급력을 가진 연구자들이 등장하고 있었음을 유추할 수 있다. 중국의 탄소나노소재분야는 Zhang, Jin, Liu, Jie 등의 연구자들을 중심으로 성장하여 2015년에는 연결정도 중심성도 급격히 높아진 것으로 분석할 수 있다.

Table 8은 연도별로 매개중심성이 높은 상위 연구자 5명을 나열한 표이다. 공저자 네트워크에서 매개중심성이 높다는 것은 다른 연구자들을 이어줄 수 있는 매개자적 역할을 하고 있다는 것이며, 이는 달리 말해 다른 연구자들에 대한 통제력을 행사할 수 있다는 것을 의미한다. 2000년에는 Iijima, Sumio가 연결정도 중심성, 매

Table 6 Top5 Researchers by Degree Centrality

	2000		2005		
	Researcher	Degree Centrality	Researcher	Degree Centrality	
1	Iijima, Sumio	0.01438	Dresselhaus, MS	0.008709	
2	Terrones, M	0.012658	Lee, Young Hee	0.007723	
3	Grobert, N	0.012253	Iijima, Sumio	0.007379	
4	Kroto, HW	0.012253	Yoo, JB	0.007379	
5	Walton, DRM	0.012253	Kim, JM	0.007079	
		2010		2015	
	Researcher	Degree Centrality	Researcher	Degree Centrality	
1	Li, Yan	0.003463	Wang, Lei	0.004754	
2	Lee, Young Hee	0.003078	Chen, Wei	0.004267	
3	Endo, Morinobu	0.003062	Wang, Wei	0.004211	
4	Iijima, Sumio	0.002744	Liu, Yang	0.004187	
5	Ruoff, Rodney S.	0.002727	Zhang, Wei	0.003756	

Table 7 Top 5 researchers by closeness centrality

	2000		2005		
	Researcher	Closeness Centrality	Researcher	Closeness Centrality	
1	Iijima, S	1.56E-08	Wang, Y	4.57E-09	
2	Li, HD	1.56E-08	Zhang, Jin	4.57E-09	
3	Terrones, M	1.56E-08	Liu, Jie	4.57E-09	
4	Yudasaka, M	1.56E-08	Li, J	4.57E-09	
5	Colliex, C	1.56E-08	Wang, Jun	4.57E-09	
		2010		2015	
	Researcher	Closeness Centrality	Researcher	Closeness Centrality	
1	Li, Yan	5.04E-10	Wang, Lei	1.84E-10	
2	Liu, Jie	5.04E-10	Wang, Jun	1.84E-10	
3	Jin, Zhong	5.04E-10	Chen, Wei	1.84E-10	
4	Liu, Zhongfan	5.04E-10	Li, Yang	1.84E-10	
5	Zhang, Jin	5.04E-10	Wang, Wei	1.84E-10	

개중심성을 높게 가졌던 것과 마찬가지로 상당히 높은 매개중심성을 가지고 연구를 하고 있었음을 알 수 있다.

4.3 키워드 네트워크 분석

키워드 네트워크 분석에서는 연결, 근접, 매개 중심성의 의미를 명확히 구분 짓기 어렵다. 따라서 연결정도 중심성 중심으로 고찰하였으며, 우선 전체 탄소나노소재분야에서의 연구 트렌드를 확인하였다. Table 9는 탄소나노소재분야의 연구에 등장하는 주요 핵심어의 변화 추이를 나타낸 표이다. 2000년부터

2015년까지 탄소나노소재분야에 다양한 핵심어(key word)가 등장하는데, 탄소나노소재분야의 주요 키워드(graphite, carbon nanotubes, quantum dots, graphene 등 4개)를 연도별로 비교 분석하였다.

탄소나노튜브(carbon nanotubes)는 꾸준히 연구가 진행되고 있으며, 최근까지 다른 주제들과 가장 많은 연구가 수행되고 있다는 것을 확인할 수 있다. 그래핀(graphene)의 경우, 2010년 이전까지는 그다지 연구가 활발하게 이루어지지 않았으나, 2010년부터 논문 수가 급격히 늘어나고 있으며, 다른 키워드와 함께 현재 가장 많은 연구가 수행되고 있다는 것을 확인할 수 있다. 2015년에는 탄소 나노튜브를 제친 그래핀은 2008년 MIT의 10대 유망기술로 꼽힌 기술로서 2004년에 그래핀의 최초 박리가 성공한 후 2010년에 최초 박리자가 노벨물리학상을 수상한 바 있다.

4.3.1 한국 키워드 네트워크 분석

Fig. 8은 탄소나노소재분야의 한국 키워드 네트워크의 변화 양상을 시각화한 결과이다. 네트워크의 변화양상을 살펴보면 밀도가

점차 낮아지고 있음을 확인할 수 있는데, 이는 다양한 연구주제가 등장하기 때문으로 보인다.

2000년에는 소규모 그룹 다수가 등장하여 분산된 형태의 네트워크를 보이고 있으나 2005년 점차 소규모 그룹 단위로 집중화되는 현상을 보이고, 2015년에는 3~4개의 네트워크로 뭉쳐진 형태를 보이고 있다. 이는 Table 10의 키워드의 평균 연결정도의 증가(3.615 → 5.9773 → 8.9471 → 13.8641)에서도 키워드 1개당 연결된 키워드들이 많아졌음으로 뒷받침된다. 컴포넌트는 평균 20개

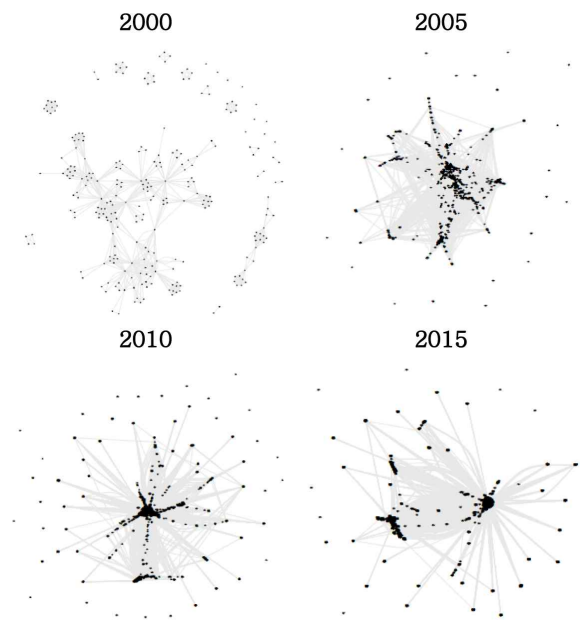


Fig. 8 Keyword network trend: Korea

Table 8 Top 5 researchers by betweenness Centrality

	2000		2005	
	Researcher	Betweenness Centrality	Researcher	Betweenness Centrality
1	Iijima, Sumio	1816384.961	Zhang, Jin	5876181.76
2	Forro, L	876397.0813	Wang, Y	5811958.52
3	Li, WZ	560137.6374	Li, J	4352741.374
4	Achiba, Y	558478.6116	Liu, Jie	3847370.196
5	Li, HD	508527.0565	Roth, S	3749770.709

	2010		2015	
	Researcher	Betweenness Centrality	Researcher	Betweenness Centrality
1	Li, Yan	27538056.35	Wang, Lei	110589584.2
2	Liu, Jie	15237911.02	Chen, Wei	101453211.3
3	Wang, Jun	13584914.4	Wang, Jun	85270974.27
4	Iijima, Sumio	13367345.38	Liu, Yang	77702506.79
5	Dresselhaus, Mildred S.	12414011.78	Wang, Wei	73944425.94

Table 10 Keyword Network Index: Korea

	2000	2005	2010	2015
Density	0.0274	0.0104	0.0063	0.0047
Nodes	265	1,150	2,821	5,815
Edges	958	6,874	25,240	80,620
Average Edges	3.615	5.9773	8.9471	13.8641
Components	26	26	35	16
Average Distance	3.1598	3.1901	2.9369	2.8165
Diameter	6	7	7	6

Table 9 Changes of Core Keyword (2000-2015)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Carbon Nanotubes	741	890	1,613	2,359	3,046	4,054	5,165	6,895	9,143	10,452	13,818	17,505	20,162	25,758	29,559	33,465
Graphite	2,169	2,345	3,123	3,271	3,552	3,657	3,989	4,308	4,857	5,351	6,746	7,823	9,191	10,453	10,947	11,605
Quantum Dots	41	84	98	96	185	398	514	549	894	877	1,193	1,531	2,234	2,503	3,877	4,483
Graphene	5	22	12	39	72	29	217	388	744	1,010	1,884	3,908	6,762	13,283	24,429	34,647

Table 11 Top 5 Keyword of Korea: Degree Centrality (2000, 2005, 2010, 2015)

	2000		2005		2010		2015	
	Keyword	Degree Centrality	Keyword	Degree Centrality	Keyword	Degree Centrality	Keyword	Degree Centrality
1	ARRAYS	0.159091	FILMS	0.228024	NANOPARTICLES	0.282979	NANOPARTICLES	0.402649
2	CHEMICAL-VAPOR-DEPOSITION	0.159091	GROWTH	0.16275	CARBON NANOTUBES	0.27766	PERFORMANCE	0.401273
3	GRAPHITE	0.147727	CARBON NANOTUBES	0.151436	FILMS	0.239716	GRAPHENE	0.400929
4	GROWTH	0.147727	DEPOSITION	0.140122	COMPOSITES	0.198582	FILMS	0.363089
5	CARBON	0.140152	BEHAVIOR	0.105309	NANOCOMPOSITES	0.180851	CARBON NANOTUBES	0.303406

Table 12 Keyword network index: U.S

	2000	2005	2010	2015
Density	0.00626	0.0039	0.00294	0.00255
Nodes	1896	4501	7374	10243
Edges	11254	39536	79961	133945
Average Edges	5.9356	8.7838	10.843	13.076
Components	50	42	34	26
Average Distance	3.3864	3.0741	2.9855	2.9344
Diameter	7	6	6	6

정도의 그룹으로 유지되다가 16개로 군집되었다. 이는 키워드들이 16개 정도로 군집된다는 것을 의미한다. 평균거리는 최저 2.8165 (2015년)로 좁은 세상 네트워크를 보인다.

Table 11은 탄소나노소재의 한국 키워드 네트워크 내에서 키워드의 연결정도 중심성을 나타낸 표이다. 2000년에는 array, chemical-vapor-deposition 등의 반도체, 메모리 관련된 연구에 부상하였다. 2005년과 2010년에는 이후 탄소나노튜브(carbon nanotubes)가 눈에 띄게 성장하였고, 2010년과 2015년의 연구에서는 나노입자(nanoparticles)가 연속 1위를 차지하였다. 앞서 전 반적 연구동향에서 확인한 그래핀(graphene)은 2015년 들어서 3위에 등장하면서 한국에서도 주요한 키워드임을 확인할 수 있다. 종합적으로 2000년 초반에는 반도체 중심의 키워드에서 최근에 들어서는 원천기술과 관련된 키워드를 중심으로 전환되었으며, 반도체는 물론 이차전지, 디스플레이 등 다양한 활용분야와 관련된 키워드들이 중심을 이루고 있다는 것을 확인하였다.

4.3.2 미국 키워드 네트워크 분석

Table 12의 미국 키워드 네트워크 동향을 분석해보면, 다른 국가에 비해 밀도의 하락세가 (0.00626 → 0.0039 → 0.00294 →

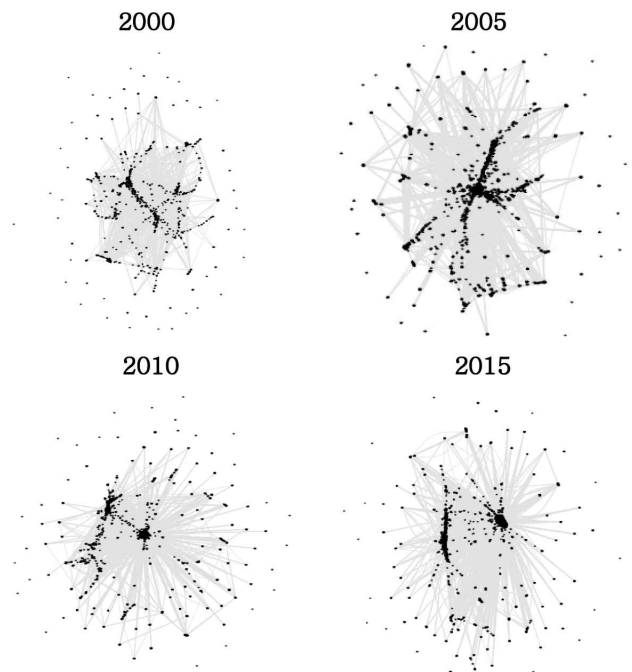


Fig. 9 Keyword network trend: U.S

0.00255) 상대적으로 급격하지 않음을 알 수 있다. 이는 초기부터 비교적 연구 분야가 고르게 이루어져 있었음을 의미할 수 있다.

Table 13에서 보듯 미국의 키워드 네트워크 분석결과 개별 키워드의 연결정도 중심성 순위를 바탕으로 보자면 탄소나노튜브(carbon nanotubes), 그래핀(graphene), 필름(films), 성장(growth) 등의 나노기술 키워드가 탄소나노소재 분야 연구의 주요 핵심어로 확인되고 있다. 특히, 나노기술, 전기공학, 광학 및 재료공학 등 다양한 분야에서 유용하게 사용되고 있는 탄소나노튜브(carbon nanotubes)가 2000년도부터 2015년 현재까지 꾸준히 주요 키워드로 연구되어 오고 있으며, 앞서 언급한 것처럼 그래핀(graphene), 해당 분야에 노벨 물리학상이 수여된 2010년 중반부터 주요 키워드로 등장하여 2015년 현

제까지 키워드 연결정도 중심성 상위에 포진하고 있다. Films 역시 2005년부터 2015년에 이르기까지 꾸준한 연구추세를 보인다.

연구가 많이 수행되었음을 볼 수 있다. 2005년, 2010년부터 탄소 나노소재가 1위를 차지하였고, 전체적으로 반도체, 디스플레이 관련 분야로 연구가 수행되었음을 확인할 수 있다. 2015년에는 나노

4.3.3 중국 키워드 네트워크 분석

Fig. 10은 중국 키워드 네트워크의 변화 양상을 시각화한 결과이다. 2005년, 2010년, 2015년 노드 수가 급격히 증가되고 있음을 확인할 수 있다. 특이할 점으로 2000년에는 소규모 그룹 여러 개가 등장하여 분산된 형태의 네트워크를 보이고 있으나 2005년 점차 소규모 네트워크가 집중화 되는 현상을 보이고, 2010년과 2015년에는 별 모양으로 네트워크가 한국, 미국과 달리 유독 일부 키워드로 모이는 형태를 볼 수 있다. 평균 연결거리는 2015년만 놓고 비교하였을 때 한국과 미국의 약 2배에 달하는 연결정도를 가지고 있다. 컴포넌트는 평균 38개 정도의 그룹으로 유지되고 있으며, 평균 거리는 최저 2.9855(2010년)으로 좁은 세상 네트워크를 따르다 2015년 다시 증가한 것을 볼 수 있다.

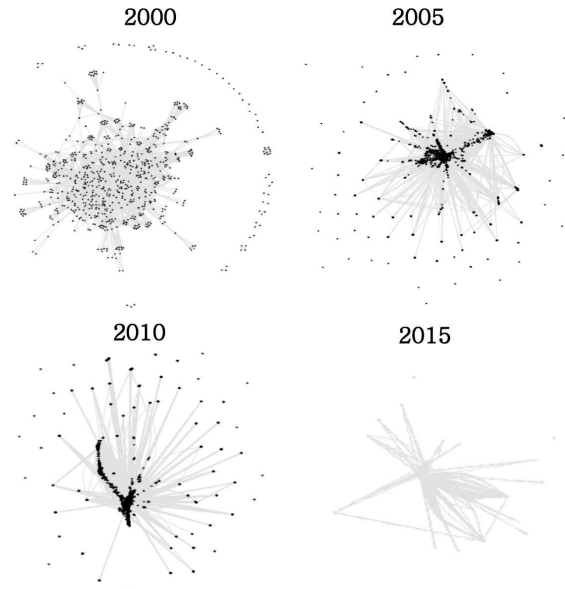


Fig. 10 Keyword network trend: China

Table 13 Top 5 keyword of U.S: degree centrality (2000, 2005, 2010, 2015)

	2000		2005		2010		2015	
	Keyword	Degree Centrality	Keyword	Degree Centrality	Keyword	Degree Centrality	Keyword	Degree Centrality
1	GRAPHITE	0.2279683	CARBON NANOTUBES	0.257333	CARBON NANOTUBES	0.409196	GRAPHENE	0.375708
2	GROWTH	0.1208443	GRAPHITE	0.162889	FILMS	0.261223	CARBON NANOTUBES	0.313806
3	CARBON NANOTUBES	0.1029023	GROWTH	0.144222	GRAPHITE	0.189611	FILMS	0.240969
4	SURFACE	0.0807388	FILMS	0.143111	NANOPARTICLES	0.156381	PERFORMANCE	0.227006
5	MODEL	0.0759894	WALLED CARBON NANOTUBES	0.102444	WALLED CARBON NANOTUBES	0.139292	NANOPARTICLES	0.213435

Table 14 Top 5 keyword of China: degree centrality (2000, 2005, 2010, 2015)

	2000		2005		2010		2015	
	Keyword	Degree Centrality	Keyword	Degree Centrality	Keyword	Degree Centrality	Keyword	Degree Centrality
1	GRAPHITE	0.17576	CARBON NANOTUBES	0.26569	CARBON NANOTUBES	0.500382	NANOPARTICLES	0.916121
2	GROWTH	0.14380	GROWTH	0.21854	NANOPARTICLES	0.407747	GRAPHENE	0.908154
3	CARBON NANOTUBES	0.11185	FILMS	0.20165	FILMS	0.314475	CARBON NANOTUBES	0.694626
4	SURFACE	0.07856	NANOPARTICLES	0.16502	NANOCOMPOSITES	0.202217	PERFORMANCE	0.687522
5	FILMS	0.07323	BEHAVIOR	0.12870	OXIDATION	0.192278	OXIDE	0.462627

Table 15 Keyword network index: China

	2000	2005	2010	2015
Density	0.01395	0.00565	0.00348	0.00267
Nodes	752	3140	7849	19708
Edges	3941	27892	107394	520424
Average Edges	5.2406	8.8828	13.682	26.4067
Components	36	46	33	37
Average Distance	3.3864	3.0741	2.9855	3.3864
Diameter	8	7	6	6

입자가 연결정도 중심성 1순위에 해당하는 것을 확인할 수 있으며 한국, 미국과 마찬가지로 그래핀(graphene)이 급상승한 것을 볼 수 있다.

5. 종합 및 결론

본 연구에서는 나노기술종합발전계획에서 제시한 30개 미래 나노기술의 연구동향을 추적할 수 있는 프레임워크를 제시하고자 키워드 검색 전략을 확보하고 분석모형으로 최근 연구동향이나 기술 동향을 분석에 활용되는 방법론인 사회연결망분석(social network analysis) 이론과 도구를 활용하였다. 논문DB인 web of science 가 제공하는 2000년부터 2015년 사이에 발표된 논문의 서지정보를 대상으로 기술통계분석 방법과 사회연결망(네트워크)분석 방법을 적용하여 데이터를 분석해 보았다.

기술통계분석을 통해서 탄소나노소재분야의 연구가 꾸준히 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 국가별로는 한국은 꾸준히 성장을 해오면서 인도와 근소한 차이로 3위를 달성하고 있다. 미국은 꾸준히 1위를 차지해오다가 2007년 이후부터 중국이 급격히 많은 수의 연구논문을 최근까지 발표하여 추월하였다. 사회연결망 분석 기법을 통해서 공저자 네트워크와 키워드 네트워크를 중점적으로 분석해 보았다. 공저자 네트워크 분석에 의하면 연도별로 연구자들의 연구 활동이 증가하면서 공동연구가 활발하게 발생하고 있음을 확인할 수 있었다. 연결정도 중심성이 높은 연구자들의 국적을 비교해 본 결과 기술 통계적 분석 결과와 유사하게 최근 탄소나노소재 분야에서 중국 연구자들이 활발한 연구 활동을 수행하고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 중국 연구자들의 수는 2015년 기준으로 한국과 미국에 비해 압도적인 숫자(52만 명)를 보이고 있다. (한국은 5천 800명, 미국은 13만 여명) 근접중심성은 연구자간 유의미하게 구별되는 수치를 도출하지 못하였지만, 근접중심성의 의미인 전파력을 가진 중국 연구자들이 2005년부터 등장함을 알 수 있었다. 이러한 수치가 기회를 의미하는 연결정도 중심성과 통제력을

Table 16 Comparison among three countries

	Korea	U.S.	China
Expansion Aspect	Gradual increase	Gradual increase	Radical change
Network Characteristics	Evenly Distributed	Less change	A tilting phenomenon
Research Topic	Specific (Semiconductor)	Variety & Steady	Specific

의미하는 매개중심성에서 2015년에 중국연구자들을 촉발시키는 기초가 되었음을 유추할 수 있다.

키워드 네트워크분석은 논문발표 빈도가 높은 상위 3개 국가인 중국, 미국, 한국의 학술정보를 대상으로 분석을 실시하였다. 연구의 주요 주제라고 할 수 있는 키워드 네트워크 분석 결과, 네트워크 특성들이 3국 모두 초기에 다양한 연구 주제들이 분산되어 형성된 개별 그룹(컴포넌트)들을 중심으로 진행되다가 시간이 지남에 따라 점차 주요 키워드(연구주제)를 중심으로 집중화 되는 현상을 확인할 수 있었다. 이 양상은 2015년의 중국이 특히 심하였는데, 중국의 논문 수가 압도적으로 많다는 사실에 기초할 때 탄소나노소재 분야에 있어서는 나노입자, 그래핀, 탄소나노튜브에 편중된 연구가 진행되는 것을 알 수 있다. 이는 2015년의 중국 키워드들의 연결정도 중심성 수치가 0.6 이상을 보이는 것으로 확인할 수 있다. 이에 반해 한국과 미국은 상위 키워드들의 연구분포가 고르다고 할 수 있다. 한국은 초기 반도체에 집중했던 것에서 탈피하여 나노입자, 그래핀, 필름, 탄소나노튜브 등에 고르게 연구하고 있다. 미국은 두 국가와 달리 2000년 초기부터 고른 연구분포를 가지고 있으며, 그래프와 그래핀 등에서 2000년, 2005년 초창기부터 연구를 진행해온 사실을 확인할 수 있다(Table 16).

본 연구를 통해 분석된 나노기술 개발 동향 및 핵심기술에 대한 각국의 분석 결과는 나노기술 정책동향과 함께 국내 나노기술 분야에 연구개발 및 정책의사결정에 있어서 주요한 정보를 제공할 수 있다. 뿐만 아니라 향후 연구를 수행할 연구자들에게 연구동향에 대한 과학적이고 신속한 정보를 제공함으로써 연구방향을 안내하거나 연구지원 방향을 설정하는데 중요한 도구로 활용될 수 있을 것이다. 즉, 나노기술과 관련된 이해관계자들의 의사결정에 있어서 기존에 부족한 과학적이고 계량적인 근거를 제시하는데 큰 의의가 있다.

본 연구는 다양한 나노기술 분야 중에서 탄소나노소재 분야의 논문정보를 중심으로 사회연결망 분석을 적용하는 것을 목적으로 수행되었다. 향후 본 연구를 기반으로 분석 대상의 범위를 본문에서 다루지 않은 나머지 29개의 유망 나노기술 전 영역으로 확대하여 기술 전반에 대한 연구가 가능할 것이라 생각한다. 본 프레임워크의 데이터 범위를 확장하여 특허데이터도 분석할 수 있지만 본

연구에서는 학술정보(논문) 데이터를 중심으로 분석하였기에 전체적인 동향 분석에 다소 한계가 있었다. 또한, 본격적인 정책이 계획·수립 되는 2000년 이후의 연구동향을 5년 단위 따라서 향후 연구에 있어서 논문 데이터 외에 다양한 데이터를 반영한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

References

- [1] Abbasi, A., Hossain, L., Leydesdorff, L., 2012, Betweenness Centrality as a Driver of Preferential Attachment in the Evolution of Research Collaboration Networks, *Journal of Informetrics*, 6:3 403-412.
- [2] Ahn, S. J., Kim, D. H., Kwon, O. J., Bae, Y. C., Lee, J. Y., 2012, Analysis on the Dynamics of Keyword Mapping for Detecting Emerging Technologies : A Case Study on Graphene, *The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, 7:6 1393-1401.
- [3] Bae, S. H., Kim, J. H., Yoon, J. S., Kang, S. K., Shin, K. M., Cho, S. J., Lee, K. K., 2016, Measuring Efficiency of National R&D Programs within Nanotechnology Field Using DEA Model, *Journal of society of Korea industrial and systems engineering*, 39:2 64-71.
- [4] Bae, S. H., Lim, J. S., Shin, K. M., Yoon, J. S., Kang, S. K., Lee, S. H., Kim, M. K., Lee, J. W., Kim, J. H., Shin, M. S., Han, C. H., 2015, An Analysis for Economic Value of Nano-Technologies : Focused on Secondary Batteries, *Journal of society of Korea industrial and systems engineering*, 38:1 131-142.
- [5] Bae, S. H., Shin K. M., Lim, J. S., Yoon, J. S., Kang, S. K., Kim, J. H., Kim, M. K., Han, C. H., 2015, Social Impact Assessment for Nano Technology Using a System Dynmaics, *Journal of society of Korea industrial and systems engineering*, 39:2 129-137.
- [6] Baek, H. M., Oh, S. H., 2015, Identifying the Network Characteristics of Contributors That Affect Performance in Open Collaboration : Focusing on the GitHub Open Source, *The Journal of Society for e-Business Studies*, 20:1 23-43.
- [7] Borgatti, S. P., Everett, M. G., Johnson, J. C., 2013, *Analyzing Social Networks*, Thousand Oaks, CA.
- [8] Choi, B. K., Kim, K. H., So, D. S., Yoom I. J., 2007, R&D Trend on the Environmental, Health and Safety Impacts of Nanotechnology, *Prospectives of Industrial Chemistry*, 10:1 48-71.
- [9] Choi, B. K., Kim, K. H., So, D. S., Park, H. J., 2008, Public Understanding and Attitude toward Nanotechnology, *Prospectives of Industrial Chemistry*, 11:5 62-80.
- [10] Choi, M. J., Kim, M. S., 2015, The Characteristic Analysis of Researches Network for Journal of Korean Neuropsychiatric Association, *J Korean Neuropsychiatr Assoc*, 54:4 418-426.
- [11] Eun, J. H., 2015, Achievements and Characteristics of the Chinese Nano Science: A Network Analysis, *The Journal of Modern China Studies*, 17:1 193-229.
- [12] Freeman, L.C., 1979, Centrality in networks: I. Conceptual clarification. *Social Networks*, 1 215-239.
- [13] Hanneman, M. R., 2005, *Introduction to Social Network Methods*, University of California, <<http://faculty.ucr.edu/~hanneman>>.
- [14] Garfiled, E., Sher, I. H., 1994, Keywords Plus™ Algorithmic Derivative Indexing, *Journal of the American Society for Information Science*, 44:5 298-299.
- [15] Rueda, G., Pisek G., Kocaoglu, D., 2007, *Bibliometrics and Social Network Analysis of the Nanotechnology Field, PICMET 2007 Proceedings*, Portland, Oregon, USA.
- [16] Heo, M. H., 2010, *An Introduction to Social Network Analysis using R*. 2nd ed., Jayou Academy, Korea.
- [17] Huang, C., Notten, A., Rasters, N., 2010, Nanoscience and Technology Publications and Patents: A Review of Social Science Studies and Search Strategies, *Journal of Technology Transfer*, 36:2 145-172.
- [18] Im, H.S., Jang, T.W., 2012, A Study on Co-authorship Network in the Journals of a Branch of Logistics, *IE Interfaces*, 25:4 458-471.
- [19] Zhang, J., Yu, Q., Zheng, F., Long, C., Lu, Z., Duan, Z., 2016, Comparing Keywords Plus of WOS and Author Keywords: A Case Study of Patient Adherence Research, *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 67:4 967-972.
- [20] Jung, D. H., Kwon, O. J., Kwon, Y. I., 2012, Network Analysis of Green Technology using Keyword of Green Field, *The Journal of the Korea Contents Association*, 12:11 511-518.
- [21] Kang, D. J., Lee, G. N., 2015, A Study on Co-author Networks of Journal of Korea Trade Research Association using Social Network Analysis, *The Journal of Korea Trade Research*, 40:5 1-23.
- [22] Ko, J. C., Cho, G. T., Cho, Y. H., 2013, A Study on Recent Research Trend in Management of Technology Using Keywords Network Analysis, *Journal of Intelligence and Information Systems*, 19:2 101-123.
- [23] Kwak, K.Y., 2013, *Social Network Analysis*, Chunglam, Korea.
- [24] Lee, H. J., Lee, C.S., 2012, A Study on the Knowledge Transfer of Korean Nano-biotechnology based on SCI Citation Analysis, *Korea Society for Information Management Proceedings 19th*, 121-124.
- [25] Lee, J. W., Kang, S. K., 2005, Nanoparticle Manufacturing Technology Research Trend, *KISTI, BA525* 1-105.
- [26] Lee, W. H., Yeo, W. D., Park, J. C., 2011, A Study on the Analyzing International Cooperation Using Bibliometrics: Focused on LED, *The Journal of Information Systems*, 20:3 111-127.
- [27] Ahuja, M., Galleta, D., Carley, K., 2003, Individual Centrality and

- Performance in Virtual R&D Groups: An Empirical Study, *Management Science*, 49:1 21-38.
- [28] Marin, A., Barry, W., 2011, Social network analysis: An introduction. In *The SAGE Handbook of Social Network Analysis*, London: SAGE.
- [29] Ministry of Trade, Industry & Energy, 2015, Organization for Nano-convergence Industrial Cooperation, Korea Institute for Industrial Economics & Trade, Survey on Nano-converged Industry, Seoul Korea.
- [30] Mogoutov, A., Kahane, B., 2007, Data Search Strategy for Science and Technology Emergence: A Scalable and Evolutionary Query for Nanotechnology Tracking, *Research Policy*, 36:6 893-903.
- [31] National Nanotechnology Policy Center, 2015, Korea Nanotechnology Annual 2014, National Nanotechnology Policy Center.
- [32] National Science & Technology Commission, 2011, The Third Nanotechnology Master Plan ('11-'20), Seoul Korea.
- [33] Newman, M., 2004, Analysis of Weighted Networks, *Physical Review E*, 70:5 1-9.
- [34] Park, B. J., Bae, S. H., Baek, S. I., 2013, Exploring the Effects of Alliance Networks on Firm's Innovation Performance, *Entrue Journal of Information Technology*, 12:1 117-131.
- [35] Porter, A. L., Youtie, J., 2009, How interdisciplinary is nanotechnology?, *Journal of Nanoparticle Research*, 11:5 1023-1041.
- [36] Porter, A. L., Youtie, J., Shapira, P., Schoeneck, D. J., 2008, Refining Search Terms for Nanotechnology. *Journal of Nanoparticle Research*, 10:5 715-728.
- [37] Rafols, I., Porter, A. L., Leydesdorff, L., 2010, Science Overlay Maps: A New Tool for Research Policy and Library Management. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 61:9 1871-1887.
- [38] Arora, S. K., Porter, A. L., Youtie, J., Shapira, P., 2013, Capturing New Developments in an Emerging Technology: An Updated Search Strategy for Identifying Nanotechnology Research Outputs, *Scientometrics*, 95:1 351-370.
- [39] Shin, D. J., Noh, G. B., Kim, T. C., Jung, H. Y., 2010, Analysis of the Patents Trend for the Carbon Nano Tube Technology with Applying its Heat Conductivity Property, *The Korean Operations Research and Management Science Society Proceedings*, 297-302.
- [40] Song, M. G., Cha, Y. D., Yeo, G. T., 2016, An Analysis of the One Belt, One Road Research Trend Using Social Network Analysis, *The Journal of Shipping and Logistics*, 90 387-413.
- [41] Wasserman, S., Faust, K., 1994, *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge, ENG and New York: Cambridge University Press.
- [42] Wei, F., Yun, L., Luciano, K., Yijie C., 2014, Two Poles in Global Nano Research: Structure and Evolution of the Global Nano Collaborative Innovation Network, *Proceedings of PICMET 2014*, 140-150.
- [43] Zhang, X., Venkatesh, V., 2013, Explaining Employee Job Performance: The Role of Online and Offline Workplace Communication Networks, *MIS Quarterly*, 37:3 695-722.
- [44] Yoon, J.S., Bae, S.H., Lim, J.S., Shin, K.M., Kang, S.K., Kim, C.W., 2014, Survey Report on Nanotechnology Field Institutions in Korea 2013, National Nanotechnology Policy Center.
- [45] You, G. O., Kim, H. M., Kim, J. W., 2013, Evolution and Development Process of Customer Value Research Using Network Analysis in Marketing: Focusing on SSCI Rank 20 Journals Using Author Co-Citation Analysis, *Journal of the Korean Operation Research and Management Science Society*, 38:2 1-24.
- [46] Youtie, J., Shapira, P., Porter, A. L., 2008, Nanotechnology Publications and Citations by Leading Countries and Blocs., *Journal of Nanoparticle Research*, 10 981-986.
- [47] Zitt, M., Bassecouard, E., 2006, Delineating Complex Scientific Fields by An Hybrid Lexical-Citation Method: An Application to Nanosciences. *Information Processing and Management*, 42:6 1513-1531.