

나노바이오 분야 국내 연구자의 동적 협업 네트워크 변화 요인 분석*

Factors Changing Dynamic Research Collaboration Network in Korean Nanobiotechnology

이 혜 진 (Hye Jin Lee)**

이 춘 실 (Choon Shil Lee)***

목 차

- | | |
|------------------------------|--------------------------|
| 1. 서 론 | 3.1 연구의 가설과 모형 |
| 1.1 연구의 배경 및 필요성 | 3.2 연구 방법 |
| 1.2 연구의 목적 및 연구 내용 | 4. 분석 결과 |
| 2. 이론적 배경 및 선행연구 | 4.1 전반적 협업 메커니즘 분석 |
| 2.1 동적 네트워크 | 4.2 학문 발전 시기별 협업 메커니즘 분석 |
| 2.2 관련 연구 | 5. 결 론 |
| 3. 연구자의 동적 협업 네트워크 분석을 위한 설계 | |

초 록

본 연구의 목적은 학술논문에 출현하는 공저 관계를 중심으로 연구자들 간에 동적으로 변화하는 협업 네트워크를 분석하여 협업 형성의 요인을 규명하는 것이다. 연구 목적을 달성하기 위하여 국내 나노바이오 분야 연구자들이 SCI 저널에 투고한 논문 1,631편을 대상으로 총 3,898명의 연구자들 간의 공저 관계를 추출하고, 2001년부터 2015년까지 세 구간으로 나누어 동적 네트워크 분석을 수행하였다. 그 결과, 직전년도 공저 요인은 모든 구간에서 유의하였으나 연구 경력 요인은 구간2→3에서 유의한 것으로 나타났다. 그리고 연구자 영향력 요인은 구간2→3에서, 연구자 부상성 요인은 구간1→2에서 유의한 것으로 나타났으나 연구자의 인기도와 기관의 명성 요인은 모든 구간에서 유의하지 않은 것으로 나타났다. 마지막으로 동일 소속기관, 주제의 유사성, 저널의 유사성 요인 모두가 구간에 관계없이 유의한 것으로 나타났다.

ABSTRACT

This study attempted to identify dynamically changing structure and analyze factors of collaboration. In order to perform this study, 1,631 articles in SCI journals were collected, and 3,898 researchers' information were extracted. To examine the dynamics of collaboration networks, the co-authorship data collected from 2001 to 2015 were divided into three sets, and were analyzed with respect to each period. The results of this study were summed up as: 1) "Co-authorship of the last year" was entirely significant factors while research career was significant only in the period of 2 to 3. 2) It was found that "Influence of the researchers" and "Emergence of the researchers" were significant factors in the period of 2 to 3 and in the period of 1 to 2. 3) "Same institutions", "Same subject", and "Journal similarity" were significant factors in all periods.

키워드: 동적 네트워크 분석, 공저자 네트워크 분석, 협업 요인, 확률적 행위자 기반 모형, 나노바이오
Dynamic Network Analysis, Co-authorship Network Analysis, Collaboration Factors, Stochastic Actor-Oriented Model(SAOM), Nanobiotechnology

* 이 논문은 숙명여자대학교 대학원 박사학위논문 "국내 나노바이오 분야 연구자의 동적 협업 네트워크 분석" 중 일부를 발췌·요약·수정한 것임.

** 숙명여자대학교 문헌정보학과, 한국과학기술정보연구원(hyejin@kisti.re.kr) (제1저자)

*** 숙명여자대학교 문헌정보학과 교수(cslee@sookmyung.ac.kr) (교신저자)

논문접수일자: 2018년 1월 17일 최초심사일자: 2018년 1월 17일 게재확정일자: 2018년 2월 12일
한국문헌정보학회지, 52(1): 231-258, 2018. [http://dx.doi.org/10.4275/KSLIS.2018.52.1.231]

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 필요성

협업이란 일반적으로 공통적인 목적을 달성하기 위하여 개인, 집단, 조직 간에 발생하는 행동이다(Katz and Martin 1997). 즉, 특정한 목표를 위해 두 사람 이상이 정해진 규칙에 따라 공동 작업을 하는 행위를 의미한다. 사회학적 측면에서 협업은 특정 작업환경에서 공통으로 달성해야 하는 상위 목표에 대한 이해를 공유하고 목표 달성을 위하여 이루어지는 인간행동으로 정의한다(McLaughlin and Sonnenwald 2005). 또한 경영학적 측면에서 협업은 조직내부나 외부에서 공동으로 계획을 수립하고, 실행, 관리, 성과를 측정하는 것으로 정의한다(Anthony 2000).

연구자들에게 협업은 연구자들 간의 상호작용으로서 학문의 발전을 위한 오랜 과학적 관행과도 같다. 따라서 연구자 간 상호작용은 연구자 커뮤니티에서 효과적인 의사소통뿐만 아니라 다양한 연구 관련 정보들을 공유할 수 있다는 점에서 연구의 한 과정으로 인식된다(Lee and Bozeman 2005). 연구자들은 협업을 통해 연구 주제에 대한 아이디어를 교환하거나 연구 장비를 공동 활용하는 등, 폭넓은 정보원에 접근하고, 새로운 지식의 발견과 연구 결과의 확산 속도를 향상시키는 기회를 갖는다.

이처럼 연구자 협업은 그 자체로도 중요한 의미가 있지만 계량적·수리적 데이터 분석 관점에서도 많은 내재적 가치를 가지고 있다. 이는 협업이 동료 평가(peer review), 보상체계(reward system), 과학적 패러다임, 국가 과학 정책 등과 같은 환경적 기본 요소들이 포함되

어 있어서(Sonnenwald 2007) 다각적인 해석이 가능하기 때문이다. 이에 Amabile 외(2001)와 Sonnenwald(2007)는 연구자 협업의 의미를 분석하기 위한 관점을 다음과 같이 정의하고 있다. (1) 전문가들의 특성; (2) 소속기관; (3) 협업의 구성적 차원; (4) 주제 분야; (5) 지역적 관점. 따라서 일례로 어떤 연구자와 협력을 하느냐는 해당 연구자가 협업에 있어 중요하게 생각되는 것이 무엇인지 판별할 수 있고, 협업의 패턴을 통해 학문적 교류 시 내외부 다양한 요인들이 어떻게 서로 작용하는지를 파악할 수 있다.

협업의 의미를 분석·측정하기 위해 활용되는 연구 방법으로 저자기입순서를 통한 기여도 분석, 동시출현 키워드 분석, 동시 인용분석, 공저자 분석 등이 있다. 위의 방법은 연구 성과물에서 발생하는 정보를 이용하여 분석이 가능한 서지 계량적 방법으로 이 중 가장 빈번하게 활용되는 협업 분석 방법은 공저자 분석이다. Lee 외(2012)는 연구자 협업 연구에 공저자 데이터를 활용하는 핵심적인 이유는 데이터 자체에서 공저자가 갖는 고유의 성질을 활용하여 협업의 범위를 측정할 수 있을 뿐만 아니라 분석 시 측정이 용이하고 시간에 따른 객관성, 실증성, 안정성을 가지기 때문이라고 하였다. 특히 공저자 네트워크 분석은 개별저자들이 지식의 생산자(Knowledge creator) 혹은 지식의 매개자(Knowledge mediator)로서 얼마나 중요한 역할을 수행하는지 알 수 있고(김용학 2003), 학문 내부의 지식 흐름과 지식 구조화 경향을 밝히기에 유용한 연구방법이다(김선덕 외 2016).

최근 이러한 관점에서 논문의 공저자 분석을 통해 나타나는 연구자들의 협업 활동은 큰 폭

으로 증가하였는데, 이는 협업이 대형화되고 심화되었기 때문이다. 특히 최근 'Big Science', 'Data Science' 등의 연구동향으로 인해 대형 협업을 바탕으로 하는 공저 논문이 폭발적으로 증가하였다. Adams(2012)에 의하면 Thomson Reuters 사의 Web of Science에 포함된 물리학 분야의 논문을 분석한 결과, 2011년 1,000명 이상의 공저 논문이 120편, 3,000명 이상의 공저 논문이 44편이 발표된 것으로 나타났다. 또한 최근 연구 경향이 융합연구를 지향하고 있는 것도 협업의 증가 원인 중에 하나로 우리나라의 경우도 정부의 학제 간 융합지원사업이 활발해지면서 나노 분야와 같은 대표적인 융합 학문을 통해 분야 간 협업을 유도하고 있다. Melin(2000)은 이러한 현상에 대해 과학적 결과는 대규모의 협업을 통한 산물이며, 다수의 공저자를 가진 논문이 대량 생산될 수 있다는 의미라고 설명하였다.

이처럼 협업 증가를 통한 연구자의 증가는 다양하고 새로운 유형의 연구자와 협력할 수 있는 기회가 생기게 되며, 이것은 결국 지식의 생산을 가속화시켜서 학문의 발전을 이루게 된다(Demirkan et al. 2013; Cannella and McFadyen 2016; Liu and Guan 2015). 따라서 연구자 협업 측정을 위한 공저자 네트워크 분석은 학문 분야의 발전 시기와 함께 어떻게 변화하는지 분석할 필요가 있다. 즉, 특정 시점에서 발생하는 정적인(static) 공저자 네트워크뿐만 아니라 네트워크의 진화과정 즉, 'Dynamic Network'의 관점에서 분석이 이루어져야 함을 의미한다(Perianes-Rodriguez et al. 2016). 'Dynamic Network' 분석은 네트워크를 구성하는 행위자의 선택과 환경이 시간에 따라 변화한다는 것

을 전제로 네트워크의 성장과 변화를 분석하는 것이 목적이며, 핵심 개념은 네트워크가 어떻게 진화하고 성장하는가(Barabási 2002)이다.

따라서 본 연구는 공저자 네트워크를 동적으로 변화하는 네트워크로 정의하고 학문의 발전 시기에 따른 네트워크의 변화를 관찰·추적하였다. 특히 우리나라에서 차세대 융합학문으로 대표되는 나노바이오(Nanobiotechnology) 분야를 중심으로 논문에서 나타나는 국내 연구자의 공저 관계를 사회연결망으로 바라보고, 현재의 공저 네트워크가 형성되기까지 네트워크 구조가 어떻게 변화되었는지를 분석하였다.

1.2 연구의 목적 및 연구 내용

본 연구는 시간에 따른 연구 협업 요인을 분석하는 연구로서 연구의 목적은 공저자 네트워크를 통하여 나노바이오 분야의 학문발전 시기별 학술협업구조 변화의 핵심 요인을 탐색하는데 있다. 즉, 역동적인 변화를 갖는 공저자 네트워크의 학술적 협력 구조를 분석하여 현재의 네트워크를 생성하기까지 협력을 이루는 핵심 요인을 규명하는 것이다. 이러한 방법은 협업의 구조적인 측면과 개인의 협업 선택 요인이 서로 어떻게 작용하는지를 시간적인 흐름에 따라 분석할 수 있다. 즉, 협업을 형성하는데 영향을 주는 연구자 개인별 속성 요인과 네트워크의 구조적 속성 요인이 무엇인지 파악하여 속성 요인과 구조 요인간의 관계를 살펴본다.

이에, 본 연구는 이상에서 제시한 연구의 필요성 및 목적에 따라 연구문제를 다음과 같이 설정하였다.

• 연구문제 1 (RQ 1)

학문발전 시기별로 학술협업구조에 영향을 미치는 공동 연구자 선택 요인은 무엇인가?

• 연구문제 2 (RQ 2)

학문발전 시기별로 공동 연구자 선택에 영향을 미치는 학술협업구조 형성 요인은 무엇인가?

본 연구의 단계별 세부 연구내용 및 방법은 다음과 같다.

첫째, 분석 대상인 국내 나노바이오 분야 연구자를 WoS에 2001년부터 2015년까지 수록된 나노바이오 분야 논문에서 수집하여 추출하였다. 분석 기간은 나노기술종합발전계획 발표 시점에 따라 학문이 발전되는 시기로 간주하여, 2001년부터 2015년까지 5년을 기준으로 세 구간으로 나누었다. 나노바이오 분야 협업은 Chung 외(2016)의 연구 분석 결과에서 보여지듯이 정부에서 추진하는 과제와 펀딩이 중요한 영향을 미치기 때문이다. 나노기술지도 총괄보고서와 나노기술연감에 따르면, 각 시기별로 <표 1>과 같은 특징을 갖는다. 또한 본 연구는 한국의 나노바이오 분야 연구 환경의 특성을 고려한 분석 연구이므로 분석 대상인 국내 연구자는 한

국에 거주하는 연구자로 한정하였다.

둘째, 연구자 정보와 공저된 두 연구자 간의 관계를 확률적으로 측정하여 협업을 형성하는 요인을 규명하였다. 협업 형성 요인은 네트워크의 시간적 흐름, 즉 동적 네트워크 분석과 네트워크를 이루는 요인에 대한 확률분석을 동시에 측정할 수 있는 확률적 행위자 기반 모형(Stochastic Actor-Oriented Model, SAOM)을 활용하였다. 확률적 행위자 기반 모형은 동적 네트워크 분석 모형의 하나로 행위자인 연구자 수준에 초점을 맞추어 시간에 따른 개인 속성과 개인이 속한 개체 간의 관계를 측정하고 분석할 수 있는 계산 모형이다. 이에, 나노바이오 분야 연구자를 대상으로 연구자의 개별적 특성과 네트워크의 구조적 특성을 추출하여 학문 발전 시기별로 공저 관계를 맺는 데에 어떤 요인들이 유의한지 검증하였다.

2. 이론적 배경 및 선행연구

2.1 동적 네트워크

네트워크 상에서 관계 형성의 동기를 두 가

<표 1> 나노바이오 분야 학문 발전 시기별 특징

학문 발전 시기	특징
2001년-2005년	나노기술종합발전 계획에서 세부 중점 분야로 선정 대학교와 중소기업위주의 기초연구
2006년-2010년	기존 기술과의 연계 및 융합 확대 대기업의 기술 투자 다각화
2011년-2015년	나노융합분야 산업기술로드맵을 통해 미래유망기술로 제시 미래기술 도출을 통해 집중 육성 - 농수산식품, 나노웰빙제품, 나노진단, 생체분자, 지능형 나노치료제 등으로 정의 R&D 예산 대폭 증가

지 측면으로 설명할 수 있다. 하나는 개인이 어떤 관계를 맺기 위해서 기존 연결망 내에 있는 또 다른 개인과 연결하려고 하는 것이고, 다른 하나는 관계가 없던 또 다른 개인과의 관계를 형성하는 것이다(Yan et al. 2015). 이런 두 가지 동기는 네트워크 구조를 역동적으로 만들어 내는 근본적인 핵심이다. 네트워크 구조가 역동적이 되는 것은 개인이 다양한 요구를 충족시키는 과정에서 사회적 관계가 확립되거나 공전되면서 네트워크가 지속적으로 발전하기 때문이다.

따라서 네트워크 상에서 관계가 형성되고 사라지는 것은 결국 시간에 따라 행위자에 의해 만들어지며, 협업은 개인이 자원과 공통 관심사 등에 대한 필요성과 한계에 직면하였을 때 효과적인 관계를 이룬다(Liu and Guan 2015). 또한 자원요구와 공통 관심사 등과 같은 협업의 배경은 시간에 따라 변화하며 협업 동기에 직접적인 원인이 된다. 이렇듯 역동적인 요구와 환경 변화를 수용하기 위해서 개인은 자신의 지식과 자원을 다른 사람들과 교환하고 결합할 수 있는 새로운 기회를 모색해야 하는데 이는 자신을 중심으로 새로운 파트너를 추가하고 도움이 되지 않는 기존 파트너를 삭제함으로써 충족시킬 수 있다(Koka et al. 2006).

네트워크에서 노드(개인)의 구조적 위치를 이해하는 것은 특정 시점에서 네트워크의 상태뿐만 아니라 시간 경과에 따른 네트워크의 진화과정에서도 고려해야 할 중요한 요소가 된다. 따라서 시간이 지남에 따라 네트워크의 동적 구조 패턴을 밝히기 위해서는 노드가 동작하는 방식을 파악하는 것이 중요하다(Abbasi 2016). 동적 네트워크는 구조의 구축이 시간과 함께

왜, 그리고 어떻게 진화하는지에 대한 강력한 이해를 전제로 한다(Koka et al. 2006). 따라서 네트워크는 정적이 아니라 시간이 지남에 따라 발전하는 것이며, 이러한 의미에서 크게 세 가지의 관점으로 네트워크를 분석할 수 있다. 그것은 네트워크의 진화를 유도하는 기본 메커니즘, 즉 관계에 대한 개별적인 선택이 무엇인지, 개별적인 선택이 어떤 네트워크 구조를 형성하는지, 마지막으로 이러한 구조가 시간에 따라 어떻게 변화하는지를 분석하는 것이 동적 네트워크 분석의 핵심이다.

앞서 설명한 세 가지 관점의 분석이 가능해지기 위하여 동적 네트워크 분석에서는 통계적 접근법을 선택한다. 통계적 접근법은 행위자간의 관계형성이 어떻게 발생하는지, 형성된 관계가 행위자의 속성에 어떤 영향을 미칠지, 서로 다른 영역에 존재하는 관계 속에서 네트워크 구조가 어떻게 서로 상호작용하는지에 대한 예측을 모형화하는 것이 가능하다(이인원 2013).

시간적인 측면의 통계적 분석은 크게 두 가지, 지수무작위그래프 모형(Exponential Random Graph Model: ERGM)과 확률적 행위자 기반 모형(Stochastic Actor-Oriented Model: SAOM)으로 나뉜다.

이 중 본 연구에서 채택한 확률적 행위자 기반 모형은 행위자 수준에 초점을 맞추어 복잡계를 구현하는 계산 모형으로(윤영수, 채승병 2005), 상호 작용하는 많은 행위자들로 이루어진 작은 가상세계가 기반이 된다. 이 가상세계는 크게 행위자, 행위자가 활동하고 상호작용하는 체계, 체계에 영향을 미치는 외부환경 등의 세 가지 요소로 구성된다. 본 모형의 독립변수는 내생변수(endogenous variables)와 외생

변수(exogenous variables)로 나뉘며, 내생변수는 현재 존재하는 네트워크 구조에 대하여 변화를 설명할 수 있는 변수로 네트워크 이형성이나 호혜성, 위계성 등과 같은 네트워크 구조변수가 해당된다. 외생변수는 관계가 이루어지는 확률을 기반으로 협업 구조에 영향을 주는 변수로써 행위자의 공변인(covariates), 즉 행위자의 특성을 나타내는 성별, 주제의 유사성 등과 같은 변수가 포함된다(Zinilli 2016). 따라서 행위자 기반 모형은 다양한 행위자 간에 상호작용하는 것을 연구하고 개인의 특성이나 선택이 또 다른 개인에게 영향을 미칠 수 있는 실제세계를 보다 잘 반영하여 분석할 수 있다. 개인적 상호관계와 같은 미시적인 상호작용 효과가 거시적으로 어떠한 영향을 미칠 수 있는지에 대한 연구에 특히 효과적이다. 최근 네트워크 분석 연구는 시간에 따른 흐름, 즉 네트워크의 생성, 유지, 소멸에 대한 연구가 증가하고 있으며, 특히 확률적 행위자 기반 모형은 이러한 네트워크의 시계열적인 분석에 상당히 적합한 모형으로 평가받고 있다. 이는 네트워크의 변화에 기인하는 요인들을 표현하고 그러한 영향을 나타내는 다양한 파라미터를 측정하여 가정에 따라 검증이 가능하기 때문이다.

또한 동적 네트워크에서의 확률적 행위자 기반 모형은 네트워크가 변화하는 과정에서의 통계적 추론을 원칙으로 한다. 확률론적 행위자 기반 모형은 경험적이면서 종단적인 데이터 셋을 통해 일반적인 추론과 통계적인 결과를 함께 이끌어낸다. 이것이 가능한 이유는 개별 선택의 메커니즘이 중첩되어 네트워크의 구조가 형성되며, 구조가 다시 선택의 과정에 반영되기 때문이다(Gulati 1995; Powell 1998).

2.2 관련 연구

본 연구에서는 다양한 관련 선행연구에서 얻어진 연구 협업 네트워크 형성 요인을 크게 세 가지 범주의 메커니즘으로 나누었으며, 각각의 메커니즘은 논문의 서지정보에서 추출 가능한 요인을 중심으로 분류하였다. 또한 다음의 세 가지 범주는 해당하는 연구자의 개별 속성임과 동시에 연구자 협업 형성의 요인이다.

첫째, 연구 협력은 상호관계 및 신뢰에 기반하여 네트워크가 형성된다는 것이다. 사회학적 측면에서 상호관계는 개별적인 행위자들이 불확실성을 줄이기 위해 기존의 관계에 의존해서 교류를 맺는 현상을 의미한다. 네트워크를 형성하는 데 있어 상대에 대한 정보가 없고 성과에 대한 불확실성이 높은 경우에 기존의 관계에 더욱 의존하여 새로운 네트워크를 형성하게 된다(Gulati and Gargjulo 1999).

연구자 협업 네트워크에서 상호관계 및 신뢰는 Price(1976)와 Garfield, Merton(1979)의 연구에서 소개된 누적 이익 이론(theory of cumulative advantage)과 작은 세계 구조 이론(theory of small world structure) 등에서 살펴볼 수 있다. 누적 이익 이론은 연구자들 사이에 누적 이익의 차이가 존재하고 이로부터 연구 생산력, 연구 업적 등의 분포가 불균등하게 나타난다고 보는 것인데, 이는 연구자 사회의 계층화 과정에서 초기 네트워크 진입 시 불확실성으로 인해 연구자의 생산성과 동료의 인정이 갖는 중요성을 강조하는 것이다. 또한 작은 세계 구조 이론에서 상호관계는 상대가 주는 친근함, 안전함, 익숙함 등을 기반으로 끊임 없이 서로 접촉하고자 하는 사람들 간의 관계

를 추구한 결과, 작은 세계 구조를 이루게 된다는 의미이다.

안순일(2009)은 연구자들은 이전에 협업을 해 본 연구자를 선호하는 경향이 있는데, 연구를 진행하는데 있어 필요한 여러 절차와 논의를 최소화할 수 있어 효율적으로 협업을 할 수 있기 때문이라고 하였다. 또한 Hara 외(2003)는 이전 협업 관계를 통한 파트너 선택은 연구 성과의 실패를 줄여주기 때문이라고 해석하고 있다.

Sonnenwald와 McLaughlin(2005)은 협력 파트너의 선택에 있어 연구자의 연구능력, 가치관, 학문적 지식 등에 대한 신뢰를 중요한 요소로 판단하고 있다. 또한 이러한 학문적 지식 뿐만 아니라 개인의 특성, 이전의 협업 관계를 신뢰의 기준으로 삼기도 하였다.

뿐만 아니라 연구자들은 협업 연구자의 전문성을 통해 상대에게 신뢰를 느끼며, 협업 결정에 영향을 줄 수 있는데, 전문성은 기술, 연구방법 등에 대한 지식으로서 연구 능력과 스킬을 모두 포함한다(Sonnenwald and McLaughlin 2005). 이러한 다양한 전문성에 대한 접근과 융합은 종종 협업을 촉진시킨다(Thorsteinsdottir 2000).

둘째, 연구자는 자신보다 상위의 특성을 갖는 연구자와 협업 관계를 형성하려는 경향이 있다. 이는 게임이론에서 선호적 매칭(preferential attachment)이라고 부르기도 하고 사회학, 심리학에서는 지위기대(status expectation), 성과기대(performance expectation) 등으로 불리기도 한다. 소위 '인기도'가 높은 소수의 연구자를 중심으로 관계가 집중되는 것은 더 높은 지위 혹은 인기가 있는 연구자가 더 많은 정

보를 가지고 있고 함께 연구를 수행하면 더 좋은 성과를 예상할 수 있기 때문이다. 이 같은 선택은 네트워크 구조상으로는 누적적으로 성과 기대가 높은 행위자에게 더 많은 연결을 갖게 되므로(Ruef et al. 2003) 중심성이 높은 노드에만 집중적으로 관계와 노드가 몰리는 경우가 생긴다. Abbasi, Altmann과 Hossain(2011)은 연결 중심성, 아이겐벡터 중심성, 평균 연결강도, 네트워크 효율성이 개별 연구자의 연구 성과를 나타내는 g-지수에 영향을 주는 핵심 요인임을 발견하였다.

또한 연구자는 자신의 연구 분야에서 타 분야와 융합한 새로운 연구 기획을 세우거나 정보자원을 획득함에 있어 다른 네트워크 활동에 참여해야 하는 경우가 발생한다. 이 때 자신이 속한 네트워크의 연구자들보다는 상이한 집단의 연구자와의 협업을 통해 아이디어를 얻는 것이 합리적이다. 따라서 연구자들은 상이한 집단으로 진입하기 위해서는 연구의 명성이나 평판 등을 통해 시간, 비용, 불확실성 등을 고려하여 검증된 연구자를 선택하게 된다(Thorsteinsdottir 2000).

셋째, 유사관계 메커니즘은 동종선호라고도 하며, 행위자 간의 유사한 특성, 자질이 친밀감, 유대감을 형성하여 네트워크 구조를 발전시킬 가능성이 높다는 의미이다. 유사성에 기반 하는 관계는 상대적으로 빨리 안정화되고, 정보, 생각 등이 신속하게 공유되기 때문에 의사소통의 갈등 완화나 유대관계 형성에 있어 긍정적으로 작용한다. 그 결과 이러한 동종선호 관계는 시간이 지남에 따라 더 강화되는 것으로 다수의 연구 결과에서 나타났다.

Sonnenwald와 McLaughlin(2005)은 연구자가 다른 연구자와 협업을 할 때 연구자의 연

구 주제가 중요한 요인으로 작용한다고 보았고, Kronegger 외(2012)는 연구자 개인의 소속기관의 유사성에 따라 네트워크가 형성된다고 하였다. 또한 연구자들은 어떤 연구자가 어느 저널에 투고하는지 등을 파악하는 것을 중요하게 생각하는데(Birnholz 2007), 학술지는 연구방법이나 주제의 특성을 반영하는 경향이 많기 때문에 연구자들은 동일한 학술지에 낸 연구자들을 선호할 가능성이 있다. 이렇듯, 연구 관심사나 연구 방법 등이 서로 동일하고 보완이 될 수 있는 경우, 협업으로 이어질 수 있다(Hara 2007). 따라서 파트너에 대한 불확실성을 극복하기 위해 유사관계 메커니즘의 영향력이 상당히 크게 작용할 수 있을 것이다.

이상의 개별 메커니즘에 대한 주요 관련 연구와 핵심개념을 <표 2>와 같이 정리하였다.

본 연구에서는 기존 연구에서 수행되었던 공저자 네트워크 분석 방법을 보완하고 차별화할 수 있도록 다음과 같은 분석에 주안점을 두었다.

첫째, 현재의 공저자 네트워크가 왜 생기게 되었는지 네트워크의 진화적 관점에서 분석하였다.

둘째, 협업을 형성하게 되는 원인은 매우 다채롭기 때문에 다양한 요인을 반영하여 분석하였다.

셋째, 연구자의 협업 연구자 선택 요인이 전체 네트워크 구조를 변화시킬 수 있다는 관점에서 분석을 수행하였다. 즉, 연구자의 개인속성, 연구자 간의 관계, 전체 네트워크 구조가 서로 어떻게 영향을 주는지에 초점을 맞추었다.

<표 2> 연구자 협업 형성 메커니즘별 주요 관련 연구 및 핵심 개념

연구자(발표년도)	상호관계 메커니즘	선호관계 메커니즘	유사관계 메커니즘
Hara 외 (2003)	Socio-Technical Infrastructure - 기존 협업 관계 - 리더쉽	Work Connection - 연구자의 전문성	Compatibility - 작문 스타일
Ruef 외 (2003)	Network - 기존 협업 관계	Status Expectation - 네트워크 연결정도	Homophily - 동일 소속 기관 Ecological - 주제의 유사성
Sonnenwald and McLaughlin (2005)	Trust - 신뢰성	Expertise - 전문성 - 연구자 능력 - 기관 영향력	Resource Factors - 투고 저널 유사성
Abbasi, Altmann and Hossain (2011)	-	네트워크 중심성 영향력	-
Kronegger 외 (2012)	-	Preferential Attachment - 중심성 - 기관 영향력	-
남은경과 박지홍 (2014)	신뢰 - 이전협업경험	연구자 명성 - 영향력 - 기관 명성	연구연관성 - 키워드 일치도 지리적근접성 - 동일 소속 기관

3. 연구자의 동적 협업 네트워크 분석을 위한 설계

3.1 연구의 가설과 모형

본 연구에서는 연구자 협업 형성 요인에 대해 확률적 행위자 기반 모형을 이용하여 연구자들이 협업 네트워크에서 어떤 방향으로 자신들의 관계 구조를 변화시켜 가는지를 통계적으로 검증하였다. 확률적 행위자 기반 모형은 공저자 네트워크를 통해 개인 연구자의 속성, 연구자 간 관계적 속성, 네트워크 구조적 속성을 포괄하여 현재의 네트워크가 생기게 된 다양한 요인을 하나의 모형으로 통계적 유의성을 검증할 수 있다. 이에 선행연구에서 범주화한 연구자 협업 요인 메커니즘에 따라 다음과 같이 상위 가설을 설정하고, 학술논문에서 측정 가능한 협업 요인을 중심으로 하위 가설을 설정하였다.

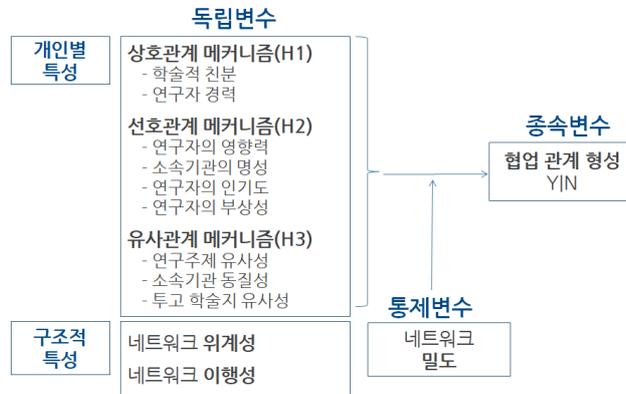
- H1: 연구자의 상호관계 구조는 학술 협업 네트워크 형성에 영향을 줄 것이다.
 - H1.1: 연구자의 학술적 친분은 협업 네트워크 형성에 영향을 줄 것이다.
 - H1.2: 연구자의 경력은 협업 네트워크 형성에 영향을 줄 것이다.
- H2: 연구자 선호관계 구조는 학술 협업 네트워크 형성에 영향을 줄 것이다.
 - H2.1: 연구자의 영향력은 협업 네트워크 형성에 영향을 줄 것이다.
 - H2.2: 연구자 소속기관의 명성은 협업 네트워크 형성에 영향을 줄 것이다.

- H2.3: 연구자의 인기도는 협업 네트워크 형성에 영향을 줄 것이다.
- H2.4: 연구자의 부상성은 협업 네트워크 형성에 영향을 줄 것이다.

- H3: 연구자 유사관계는 학술 협업 네트워크 형성에 영향을 줄 것이다.
 - H3.1: 연구자 간의 연구주제 유사성은 협업 네트워크 형성에 영향을 줄 것이다.
 - H3.2: 연구자 간의 소속기관 동질성은 협업 네트워크 형성에 영향을 줄 것이다.
 - H3.3: 연구자들의 투고 학술지 유사성은 협업 네트워크 형성에 영향을 줄 것이다.

본 연구에서는 연구자 선택에 의한 협업 네트워크 형성 메커니즘을 분석하기 위하여 <그림 1>의 연구모형처럼 '협업 관계 형성 여부'라는 종속변수에 영향을 미치는 메커니즘에 개인 연구자의 속성, 네트워크 구조적 속성을 포함하였다.

독립변수들은 개인의 선택에서 비롯되는 개인별 행위차원(개인별 특성)과 네트워크 전체 구조(구조적 특성)에서 형성되는 구조차원으로 나뉜다. 개인별 특성은 다시 개인적인 속성, 양자적인 속성을 중심으로 살펴보았다. 그리고 각 속성들이 협업 관계 형성에 미치는 영향이 관찰 구간에 따라 어떤 변화 양상을 보이는지 분석하였다. 종속변수는 학술적 협업 형성에 유의한 영향력을 미치는 메커니즘이 시간에 따라 어떻게 변화하였는지를 분석하였다.



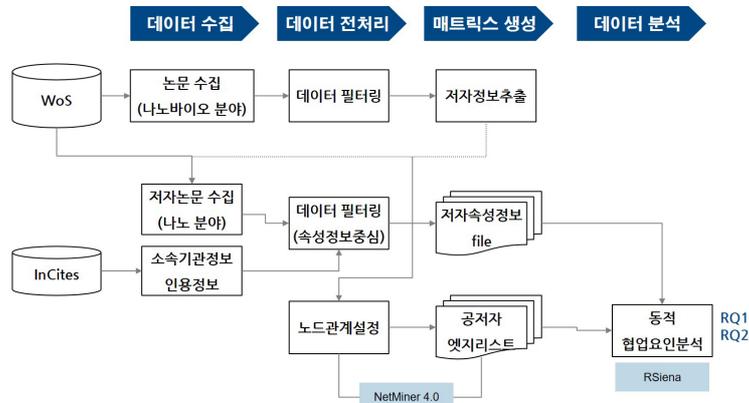
〈그림 1〉 동적 협업 네트워크 요인 분석을 위한 연구모형

3.2 연구 방법

본 연구는 〈그림 2〉와 같이 네 단계의 연구 절차를 따른다. 1) 데이터 수집, 2) 데이터 전처리, 3) 매트릭스 생성, 4) 데이터 분석 및 검증.

데이터 수집은 본 연구의 대상이 되는 연구자를 수집하기 위한 단계와 수집된 연구자의 속성 정보와 공저 관계 정보를 추출하는 과정으로 나뉜다. 나노바이오 분야에서 수집된 논문을 기반으로 대상 연구자 정보를 추출하여 해당 연구자

에 대한 속성 정보를 나노 분야를 대상으로 다시 재추출하는 과정을 수행하였다. 그리고 이를 기반으로 연구자 속성 정보와 공저 관계 정보를 형성하였다. 나노 분야를 대상으로 연구자의 속성 정보를 추출한 이유는 나노 분야가 다학제간 학문 분야로 세부 분야 간에 서로 긴밀하게 연관되어 있기 때문이다. 따라서 연구자와 연구자 간 공저 관계 정보 수집은 나노바이오 분야 논문을 대상으로 하며, 연구자의 속성 정보 수집은 나노 분야의 논문을 대상으로 하였다.



〈그림 2〉 연구절차

학문 발전 시기별 네트워크 분석을 위해서 본 연구에서는 데이터의 분석 구간을 나노기술 종합발전계획에 따라 구간1(2001년-2005년), 구간2(2006년-2010년), 구간3(2011년-2015년)으로 선정하였다.

협업 형성 요인 분석은 각 구간별로 요인을 적용하지 않은 기본 네트워크와 요인을 적용한 네트워크가 통계적으로 유의한 차이가 있는지를 분석한다. 통계적 유의성을 판단하기 위해서 각 구간별 개인별 특성을 적용하지 않은 기본 네트워크를 대상으로 요인이 하나씩 추가되었을 때 어떻게 구조적으로 차이가 발생하는지를 분석하는 것이다. 요인을 하나씩 추가하는 이유는 협업 네트워크 형성 요인들 서로 배타적인 성격을 지니고 있지 않아서 한 가지 요인만으로 네트워크 특성을 설명하기 어렵기 때문이다. 따라서 요인을 하나씩 누적적으로 추가하여 통계적으로 유의한지를 분석하였다.

연구문제를 해결하기 위하여 동적 네트워크 분석에 특화된 RSiena(R기반의 "Simulation Investigation for Empirical Network Analysis")¹⁾를 활용하여 협업 메커니즘에 대한 가설을 검증하였다.

3.2.1 데이터 수집 및 전처리

(1) 대상 연구자 추출을 위한 논문 수집
나노바이오 분야의 연구자를 추출하기 위하여 Web of Science(이하, WoS)를 통해 해당

분야의 논문을 수집하였다. 나노바이오 분야는 나노 분야(NT: Nano Technology)와 바이오 분야(BT: Bio Technology)가 융합된 학문으로, 단순 쿼리 혹은 특정 용어기반의 쿼리 검색으로는 정확하고 재현성이 높은 논문을 수집하기 어렵다. 또한 나노기술정책이나 유망나노기술에서 사용하는 기술 용어는 논문에서 활용하는 용어와 차이가 있을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 WoS에서 제공하는 주제 분야를 중심으로 아래와 같은 검색식을 활용하여 논문을 수집하였다.

- ① WC=NANOSCIENCE
NANOTECHNOLOGY AND
CU=SOUTH KOREA (in
PY=2001-2015) AND
TYPE=(ARTICLE)
- ② WC=BIOPHYSICS OR BIOCHEMICAL
RESEARCH METHODS OR
PHARMACOLOGY
PHARMACY OR TOXICOLOGY
OR
PHYSICS ATOMIC
MOLECULAR CHEMICAL OR
ENGINEERING BIOMEDICAL
OR MATERIALS SCIENCE
BIOMATERIALS OR
BIOTECHNOLOGY APPLIED
MICROBIOLOGY OR MEDICINE
RESEARCH EXPERIMENTAL

1) 옥스퍼드 대학에서 개발한 네트워크 데이터의 통계적 분석을 위한 R기반의 네트워크 분석 패키지로 행위자 기반 모형을 탑재하고 있으며, 네트워크의 동적/중단적 분석에 특화되어 있다
(<https://www.stats.ox.ac.uk/~snijders/siena/>).

그 결과, 총 수집된 논문수는 1,704편(2017년 3월 1일 검색 결과)이었으며, 이 중 단독저자 논문과 해외저자와의 공저 논문 73편을 제외하여 총 1,631편의 논문을 분석대상으로 선정하였다.

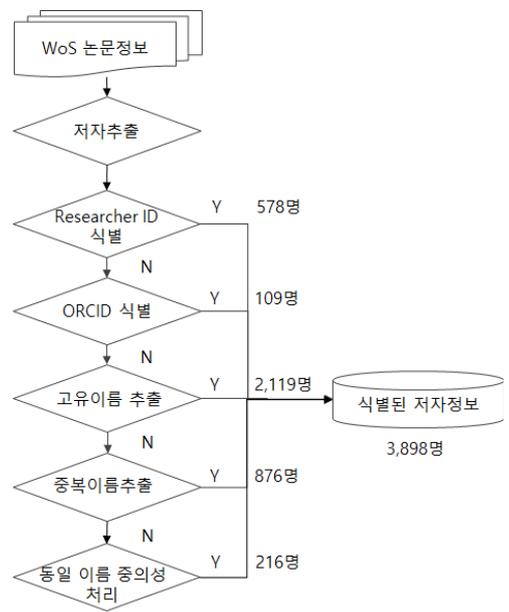
(2) 국내 나노바이오 분야 연구자 선정

공저자 네트워크 분석에서 저자를 명확하게 구분해 내는 것은 매우 중요한 과정이다. 저자가 잘못 병합되거나 분할되면, 통계적으로 과장되거나 축소되는 결과가 도출되기 때문이다(Kim and Diesner 2016). 이에 본 연구는 앞서 수집된 논문 1,631편을 대상으로 연구자 리스트를 선정하고 식별하는 과정을 수행하였다.

먼저 대상 논문에서 발견된 총 연구자수는 중복을 포함하여 9,471명이었으며, 이 중 국내 순수 나노바이오 분야 연구자를 선정하기 위해 외국인 연구자 1,660명(중복포함), 해외기관 소속 한국인 연구자 328명(중복포함)을 제외하였다. 그 결과 중복을 포함하여 7,483명의 연구자를 추출하였다.

본 연구에서는 연구자 식별번호를 우선 활용하여 저자를 식별하는 과정을 수행하였다. 앞서 추출된 연구자 7,483명 리스트를 대상으로 WOS의 Researcher ID를 가진 저자를 식별하고, 다음으로는 식별이 되지 않은 연구자를 대상으로 ORCID(Open Researcher and Contributor ID) 번호를 가진 연구자를 추가로 식별하여 총 687명(중복 1,315명)의 연구자 정보를 수집하였다. 그리고 식별자를 갖지 않는 연구자들을 대상으로 고유 이름을 갖는 연구자와 동일 연구자를 추출하여 연구자 정보를 구축하였다. 마지막으로 식별되지 않은 동명이인으로 판단

되는 동일한 이름을 가진 연구자에 대하여 동명이인 연구자 중의성 처리를 수행하였는데 이는 국내 저자명의 식별 성능이 높은 Seol 외(2016)의 연구에서 제시하는 방법을 채택하여 처리하였다. 동명이인 연구자 식별 절차는 전자우편 매칭, 공통 공저자 매칭, 공저자와 소속기관 매칭, 공저자와 저널 매칭, 소속과 저널 매칭의 단계를 통해 이루어졌으며, 동일 저자로 판명된 저자 클러스터는 관련 속성 정보를 기준으로 유사도 검증을 하여 최종 동일 저자를 판명하는 방식으로 연구자 정보를 병합해 가는 과정을 거쳤다. 이렇듯 연구자 식별 과정을 거쳐 논문 1,631편에서 국내 나노바이오 연구자 총 3,898명이 추출되었다.



〈그림 3〉 연구자 추출 과정

(3) 연구자 속성 정보 및 관계 정보 생성
추출된 3,898명의 저자를 대상으로 연구자

속성 정보와 공저 관계 정보를 생성하였다. 본 연구는 연구자 간의 공저 구조를 네트워크로 분석하므로 공저를 한 저자들을 공저 네트워크에 참여한 것으로 간주한다. 독립변수의 자료는 다음의 출처들에서 수집되었다. 학술적 친분, 연구자의 경력, 연구자의 영향력(h-index), 연구자의 부상성(최근 4년 피인용 비율), 연구주제 유사성, 소속기관 동질성, 투고 학술지 유사성은 모두 WoS의 나노 분야 논문을 대상으로 수집하였다. 소속기관의 명성(h-index)은 인용기반의 연구 현황 분석 틀인 Thomson Reuters의 InCites²⁾의 기관 정보에서 수집하였다. 연구자의 인기도(연결 중심성)와 네트워크 구조 변수인 위계성, 이행성은 NetMiner 4.0에서 해당 값을 추출하였다.

네트워크 데이터는 공저 관계를 가지는 저자쌍이 1의 값을 가지며 공저 관계가 없는 저자쌍이 0의 값을 가지는 바이너리 네트워크 형식으로 생성된다. 또한, 특정 구간에서 2회 이상의 공저 관계를 갖더라도 별도의 가중치를 부여하지 않고 모두 1의 값을 부여하였다. 가중치를 부여하지 않은 이유는 다수의 논문을 발표한 연구자의 경우, 협업 강도가 높아져서 요인 분석 시 특정 요인이 과장된 결과를 가질 수 있기 때문이다.

네트워크 데이터는 시간 구간별로 생성하였으며, 전반적인 협업 구조 특성 분석을 위하여 연구자 속성에 따른 관계 네트워크를 모두 생성한다. 즉, 연구자 간에 상호관계가 있는 네트워크, 선호관계가 있는 네트워크, 유사관계가 있는 네트워크 데이터를 별도로 추출하였다.

3.2.2 동적 협업 네트워크 요인 분석을 위한 변수의 구성

(1) 독립변수

① 행위변수

먼저, 행위차원의 독립변수들은 본 연구에서 분석하고자 하는 협업 네트워크 메커니즘을 구성하는 요인들이다. 해당 변수들은 시간에 독립적인지, 개인차원의 변수인지, 양자(관계) 차원의 변수인지에 따라 그 유형이 다르다.

상호관계 메커니즘을 표현하는 변수들은 친분관계, 연구자 경력이며, 친분관계는 양자변수, 연구자 경력은 개인변수이다. 이 두 가지 변수들은 모두 시간의 흐름에 따라 서로 다른 값을 가지게 되며, 각 구간별로 측정치가 입력된다. 친분관계는 두 연구자 간의 학술적 친분관계를 표현하는 요인을 변수로 하며, 본 연구에서는 최근 협업의 경험을 학술적 친분관계로 보아 두 연구자의 직전년도 공저 여부를 변수로 채택하였다. 따라서 두 연구자가 직전년도에 공저자 관계이면 '1', 공저자 관계가 아니면 '0'의 값을 갖게 된다. 연구자 경력은 WoS에서 나노 분야에서 발견되는 첫 번째 저작 논문의 출판 년도와 마지막 논문출판 년도의 차를 이용하여 산출하고, 1년 이하는 '1', 2년부터 5년까지는 '2', 6년부터 10년까지는 '3', 10년부터 15년까지는 '4', 16년 이상은 '5'로 범주화하였다.

선호관계 메커니즘을 표현하는 변수들은 연구자의 영향력, 연구자의 소속기관 명성, 연구자의 인기도, 연구자의 부상성이다. 선호관계 메커니즘의 변수들 역시 시간에 따라 측정값이

2) InCites(<http://incites.thomsonreuters.com/>)는 인용기반의 연구 평가 도구로서 전 세계 기관의 연구 성과를 기반으로 소속 기관의 학술 성과 분석 및 정부 정책의 벤치마킹을 위하여 활용되고 있다.

모두 변화하는 시간 종속적인 변수들인 동시에 개인변수들로 구성되어 있다. 연구자의 영향력은 다수의 연구에서 연구자의 영향력 척도로 사용되는 h-index로 선정하였다. 이는 측정 시점의 h-index로써 선정된 연구자와 나노 분야 주제 논문을 대상으로 별도로 추출하여 산정하였다. 연구자의 소속기관 명성도 연구자의 영향력과 유사한 방식으로 기관에 소속된 연구자가 발표한 논문을 대상으로 연구자의 h-index 방식과 동일하게 추출하였으며, 한 연구자의 소속 기관에 변화가 있는 경우나 소속기관이 여러 개인 경우 각각의 기관 h-index를 합산 후, 이를 소속기관 수로 나누는 방식으로 계산하였다(남은경, 박지홍 2014).

연구자의 인기도는 네트워크에서의 연결 중심성(Degree Centrality)을 개인별로 추출하여 얼마나 많은 연결을 가지고 있는지를 측정하였다. 연결 중심성 측정은 가장 보편적으로 사용되는 'Freeman'의 중심성 지표 산정방식을 따랐다(이수상 2012).

마지막으로 연구자의 부상성은 최근 논문 영향력 지수(RCF: Recent Citation Factor, Martin and Irvine 1984)를 활용하였으며, 이는 나노 분야에서 측정 시점을 기준으로 지난 4년간 발간된 논문에 대한 인용비율로서 최신 영향력을 측정하였다.

유사관계 메커니즘을 표현하는 변수들로는 연구자 간 연구주제 유사성, 소속기관의 동질성, 투고학술지의 유사성이다. 유사관계 메커니즘은 기본적으로 연구자들 간의 유사도를 측정하는 방식이기 때문에 모두 양자변수이면서 시간에 따라

다른 값을 가지므로 시간종속적인 변수이다. 연구주제 유사성은 자카드 계수³⁾에 동일 키워드 빈도에 대한 가중치를 부여하여 유사도 값을 추출하였다. 자카드 계수 측정을 위해 연구자들이 WoS에 수록한 논문의 키워드를 중심으로 연구자 간 동일한 키워드 사용 빈도를 측정하였다. 즉, 양자 간의 모든 키워드 개수 대비 공통적으로 사용하는 키워드 개수를 측정한 것이다. 소속기관의 동질성은 분석 시점에 두 연구자 간의 소속기관이 동일하면 '1', 동일하지 않으면 '0'의 값을 입력한다. 투고학술지의 유사성 역시 연구주제 유사성과 마찬가지로 유사도 계수 중 자카드 계수를 활용하여 해당 연구자들이 WoS에 수록된 저널에 투고한 저널명을 개인 연구자별로 추출하여 연구자 간 동일한 저널의 빈도를 측정하였다.

② 구조변수

네트워크는 크기나 밀도 등과 같은 네트워크의 기본적인 외적 속성이 존재하지만 그러한 속성을 기반으로 내포된 다양한 속성을 파악하는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 네트워크에 내재된 속성을 반영할 수 있는 구조변수를 활용하고자 하였으며, 구조변수로 이행성(transitivity)과 위계성(hierarchy)을 선정하였다.

이행성은 네트워크에서 3개의 노드 간의 관계를 기반으로 군집화된 구조를 표시할 수 있는 지표로 3개 노드 간의 연결은 이행성으로 노드의 삼자관계를 기반으로 한다. 이행성의 측정은 삼자관계에서 두 행위자 연결이 기여하는 바를 계산한다. 이행성은 각 행위자들이 서로

3) 자카드 계수(Jaccard coefficient)는 두 개체 간의 유사도를 측정하는 계수 중의 하나로, 두 개체가 가지는 자질의 합집합에서 교집합의 비율을 의미한다.

얼마나 완결된 구조를 가지고 있는지를 의미하며, 모든 연결이 동등하게 분포한 경우는 이행성이 높게 나타나며, 이는 평등한 네트워크를 의미한다고 할 수 있다. 즉, 균등한 구조를 가진 네트워크는 협업 네트워크의 생성에 긍정적인 기여를 하는지를 측정하는 것이다. 삼자관계가 많을수록 네트워크는 군집구조를 갖게 되며, 이런 의미에서 이행성은 네트워크의 군집화와 구조적 균형 정도를 살펴볼 수 있다.

위계성(hierarchy)은 관계의 연결이 소수의 행위자에 얼마나 집중이 되었는가를 보여주며 위계성이 높게 나타날수록 소수의 연구자들을 중심으로 협업이 집중되고 나머지 연구자들 사이에서는 서로 간 연계를 없는 위계적 구조에 가깝게 된다. 즉, 위계성이 높을수록 네트워크 구조는 불평등한 군집구조를 이루고 있다는 의미로 해석될 수 있다.

이렇듯 네트워크 구조변수로 이행성과 위계성을 선정한 이유는 양자 간의 관계뿐만 아니라 양자에 영향을 받은 삼자 간의 관계에 관한 구조 변수가 필요하기 때문이다. 즉, 삼자 간의 관계를 통해 계층 관계, 동등 관계, 배척 관계 등을 모두 파악할 수 있다. 그리고 공저자 관계는 방향성 없는 네트워크이므로 이를 포괄할 수 있는 구조 지표를 선정하였다.

③ 종속변수와 통제변수

본 연구의 종속변수는 두 연구자 간의 학술적 협업 여부이며, 이는 이항변수로 측정하였다(협업있음=1, 협업없음=0). 네트워크 변화를 살펴보기 위하여 종속변수는 N by N 행렬 변수로 구성이 되며, 일정한 시간 간격을 유지해야 하므로, 앞서 설명한 것처럼 관찰구간은

2001년부터 2015년까지의 5년 단위 변화를 분석하였다. 학술적 협업 형성 행렬의 분석을 통해 현재의 협업 네트워크가 지금과 같은 모습으로 형성되는데 어떠한 요인이 통계적으로 유의한지를 보여준다.

본 연구의 통제변수는 네트워크 밀도이다. 네트워크 밀도는 구조변수로서 일반적으로 네트워크 구조 분석에 있어서 통제변수로 사용된다. 왜냐하면 이행성, 위계성 등 네트워크 분석 지표를 측정할 때 밀도를 통제하지 않으면 단순히 밀도에 의해 나타나게 된 현상일 수 있어서 분석결과 값의 신뢰성에 영향을 주기 때문이다. 밀도는 노드들 사이에 연결된 정도를 의미하며, 즉 연구자들 간의 관계가 얼마나 치밀하게 연결되어 있는지를 나타낸다.

앞의 내용을 바탕으로 전체 변수의 속성과 측정 방법에 대한 구성은 <표 3>과 같이 요약된다.

4. 분석 결과

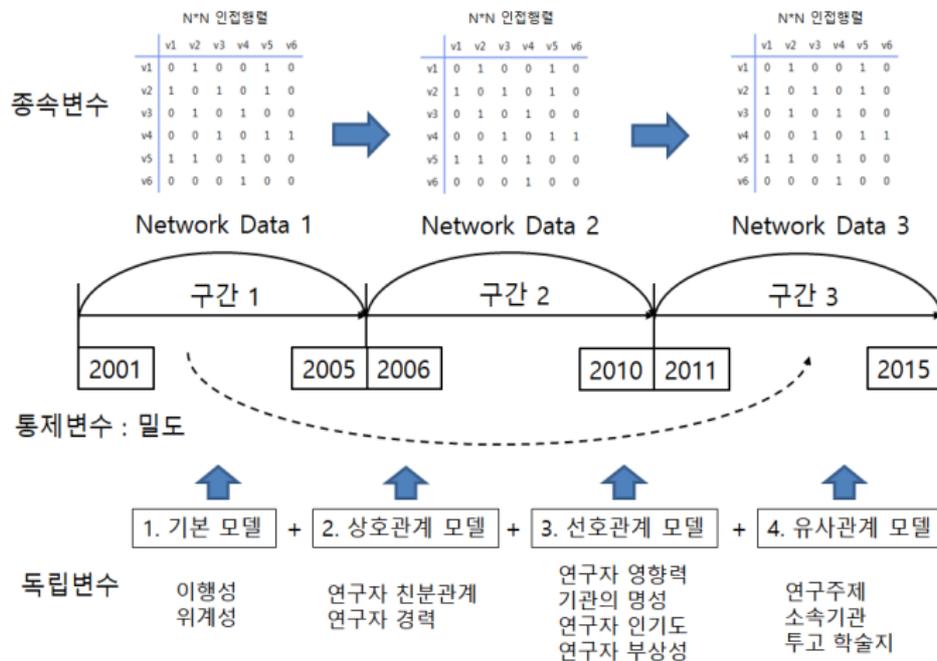
4.1 전반적 협업 메커니즘 분석

협업 메커니즘 분석은 가설에서 설정한 국내 나노바이오 분야의 협업 메커니즘을 동적으로 측정하였다. 이를 위해 국내 나노바이오 분야 공저자 네트워크 기본 모델(basilar network) 위에 11개의 독립변수가 종속변수의 변화에 영향을 주는 정도를 측정하고 그 결과를 해석하였다.

분석과정은 <그림 4>와 같이 도식화할 수 있다. 3개의 구간별로 네트워크 데이터 1, 2, 3을 종속변수로 구성하고 독립변수에 따른 종속변수의 구간별 변화 양상을 RSiena를 통해 확인하였다.

〈표 3〉 변수 정의 및 변수 측정방법

변수		측정방법	시간변화	유형	
독립 변수	상호관계 (H1)	연구자 친분관계	직전년도 공저 여부	종속	양자
		연구자 경력	측정 기간 동안 연구자의 연구경력(마지막 출판물 발표년도 - 처음 출판물 발표년도 + 1)	종속	개인
	선호관계 (H2)	연구자의 영향력	연구자의 h-index	종속	개인
		기관의 명성	기관의 h-index	종속	개인
		연구자의 인기도	연구자의 연결 중심성	종속	개인
		연구자의 부상성	최근 4년 발표한 논문의 피인용 비율	종속	개인
	유사관계 (H3)	연구주제	연구자 간 키워드 동시 출현 빈도에 가중치 부여	종속	양자
		소속기관	동일한 소속기관 여부	종속	양자
투고 학술지		연구자 간 동일 투고 학술지 빈도에 가중치 부여	종속	양자	
네트워크 구조	네트워크 위계성	소수의 연구자에게 밀집된 정도	종속	구조	
	네트워크 이행성	소수의 연구자에게 밀집되지 않고 동등하게 분포된 정도	종속	구조	
종속 변수	협업 네트워크	협업있음="1", 협업없음="0"	종속	양자	
통제 변수	네트워크 밀도	노드들 사이에 연결된 정도	종속	구조	



〈그림 4〉 협업 메커니즘 분석 절차

4.1.1 기본 모델

〈표 4〉는 국내 나노바이오 분야 공저 협업 메커니즘의 분석 결과를 보인 것이다. 모델 1은 다른 종속변수가 포함되지 않고 구조변수만으로 나노바이오 분야의 공저 네트워크를 파악한 것이다. 이 기본 모델위에 상호관계 메커니즘, 선호관계 메커니즘, 유사관계 메커니즘을 따르는 행위 변수들을 추가하여 네트워크 형성 요

인을 확률변수의 변화를 통해 살펴보았다.

Rate 변수는 구간별 시간의 흐름에 따라 연구자당 기대되는 공저자 수의 변화를 의미한다. 이 변수에 따르면 종속변수를 넣지 않은 기본 모델에서 나노바이오 분야 국내연구자의 협업이 기대되는 공저자 수는 구간1에서 구간2 사이는 3.05명, 구간2에서 구간3 사이는 3.68명으로 나타났다. 이 수치들은 구조변수만 고려했

〈표 4〉 공저 협업 형성 요인 분석 결과

	모델 1	모델 2 +	모델 3 +	모델 4 +
	기본 모델	상호관계	선호관계	유사관계
	평균(표준오차)	평균(표준오차)	평균(표준오차)	평균(표준오차)
Rate (구간1→2)	3.0519	3.311	3.510	3.9562
Rate (구간2→3)	3.687	3.8486	4.0335	4.7742
이행성	0.4669** (0.144)	0.3107** (0.1011)	0.401 (0.4986)	0.4625 (1.0694)
위계성	8.4961* (4.3971)	9.2562** (3.4971)	9.6689+ (5.1939)	9.345* (4.5832)
연구자 친분관계		0.5356*** (0.1009)	0.577*** (0.1137)	0.514* (0.2037)
연구자 경력		-0.2142* (0.1228)	-0.212 (0.139)	-0.332 (0.2546)
연구자 영향력			2.9865** (1.0134)	2.506** (0.9206)
기관의 명성			2.1584 (3.0826)	0.0165 (0.0193)
연구자 인기도			-0.558 (0.4407)	-4.6514 (6.5109)
연구자 부상성			0.0226* (0.0088)	0.373 (0.5781)
연구주제				0.5983** (0.2296)
소속기관				4.8065** (0.7921)
투고 학술지				3.9876+ (2.0905)
밀도	2.6961** (1.634)	2.2692*** (0.2284)	2.2509*** (0.153)	2.2662*** (0.188)

*** p<.001, ** p<.01, * p<.05, + p<.10

을 때 예측되는 공저자 수이며, 독립변수들을 추가하였을 때 이 수치가 어떻게 변화하는지에 대한 기준을 제시한다.

기본 모델에서의 이행성과 위계성은 모두 유의한 결과를 갖는다. 따라서 기본 모델에서는 이행성의 관점에서 공저자의 공저자가 향후에 공저자가 될 가능성이 높고 네트워크 구조가 비교적 촘촘한 구조를 가지고 있음을 의미한다. 위계성 또한 이행성보다는 작지만 유의한 요인으로 나타나 국내 나노바이오 분야 연구가 특정 연구자를 중심으로 집중되면서 중간 위치에 있는 연구자들이 서로서로 연결이 되어 있는 구조를 갖추었음을 의미한다. 즉 기본 모델에서의 협업 네트워크 모습은 국내 나노바이오 분야의 일부 핵심 연구자들이 서로 방사형으로 연결되어 있는 네트워크 구조이지만 고립된 네트워크가 존재하지 않는다는 의미로 연구 그룹간의 협업이 이루어지고 있다고 해석될 수 있다.

4.1.2 행위 변수에 기반한 모델

〈표 4〉의 모델 2에서 상호관계 메커니즘을 분석한 결과 친분관계와 경력 요인 모두 유의한 변수로 나타났다. 특히, 학술적 친분(직전년도 공저)이 있는 연구자를 협업의 대상으로 선택하는 가설은 매우 높은 수준에서 유의한 결과가 나타나는데, 정부가 추진하는 연구 과제의 연속성, 시기별 중점 연구분야 등의 특성을 고려하면 최근 협업은 중요한 요인으로 예측될 수 있다. 한편, 연구자 경력 요인은 선호관계, 유사관계 메커니즘에 해당하는 독립변수를 추가하게 되면서 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이는 연구자 경력이 많다고 하더라도 반드시 협업 연구자로 선호되는 것이 아닐 수 있다는

것을 보여준다. 또한, 연구자 경력보다 다른 메커니즘의 독립변수들이 협업 연구자의 선호 요인으로 작용할 수 있음을 의미한다. 구조적 변수 차원에서 모델 2의 이행성과 위계성은 모델 1과 큰 차이 없이 유의미한 결과를 갖는데 이 또한 상호관계 메커니즘이 적용된 네트워크 구조도 일부 핵심 연구자를 중심으로 방사형 연결형을 갖는 구조이고 고립된 네트워크가 존재하지 않음을 의미한다.

〈표 4〉의 모델 3은 선호관계 메커니즘을 살펴본 것이다. 선호관계 메커니즘 분석결과, h-index가 높은 연구자와 최근 연구 활동이 활발한 연구자는 학술 협업 네트워크 형성에 유의한 요인으로 분석된 반면, 소속기관의 영향력과 연구자의 인기도는 이 분야의 협업에 있어 큰 효과가 없는 것으로 나타났다. h-index가 높은 연구자는 기본적으로 연구 활동이 많은데다가 연구 성과가 뛰어나다고 가정할 수 있으므로 이들을 중심으로 한 네트워크 형성이 활발하게 이루어질 수 있음을 의미하며, 최근 연구 활동이 활발한 연구자 또한 이후 구간에서 연구 활동이 지속될 확률이 크기 때문에 이들을 중심으로 네트워크가 형성되었을 것으로 보인다. 한편 선호관계 메커니즘의 네 가지 변수들이 추가되면서 상호관계 메커니즘의 연구자 경력은 유의하지 않은 수치를 나타내었다. 이는 연구자의 경력보다 연구자의 영향력이나 최근 연구 활동이 협업 요인으로 더 유의하다는 의미이다.

모델 3에서의 이행성 지수는 모델 1과 모델 2와 다르게 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이는 선호관계 변수들이 네트워크의 계층적 구조를 생성하고, 고립된 네트워크를 생성하는데 일정부분 영향이 있음을 의미하는 것으로 시간

의 흐름에 따라 나노바이오분야의 규모가 커지고 주제분야가 세분화됨에 따라 인접 네트워크 집단과의 협업보다는 영향력 있는 연구자를 중심으로 네트워크의 하위그룹이 생성되는 형태로 변화된 것으로 해석할 수 있다.

〈표 4〉의 모델 4는 유사관계 메커니즘을 살펴본 것이다. 유사관계 메커니즘 분석결과, 세 변수 모두 네트워크 형성 요인에 유의한 결과를 보였다. 특히 나노바이오 분야가 융합학문임에도 불구하고 연구자 협업에 있어서는 동일한 소속기관의 연구자와 협업을 하는 경향이 매우 높게 나타났다. 이는 연구자 협업에 있어서 파트너의 불확실성을 극복하기 위해 유사관계 메커니즘이 매우 크게 작용하고 있음을 의미한다. 특히 나노바이오 분야가 국가 중점 개발 대상 분야로서 정부가 주도하는 연구과제들을 수행하는 주체가 대학, 연구소 등 특정 기관 소속의 주요 연구자들일 확률이 높기 때문에 성공적인 과제 수행을 위해서는 파트너의 선택에 신뢰성, 안전성, 친밀성이 핵심 요인이 될 수 있을 것이라는 추정이 가능하다. 모델 4의 Rate 변수는 구간1 → 2와 구간2 → 3에서 모델 1에 비해 약 1씩 증가하였으며 특히 구간2 → 3에서는 모델 3에 비해 큰 폭으로 그 수치가 증가하였다. 이는 유사관계 메커니즘의 변수가 적용됨에 따라 기대되는 협업 연구자의 수가 기본 모델에서 1명 정도 증가할 수 있음을 의미하며 특히 구간3에서는 이러한 경향이 더 뚜렷해지고 있음을 알 수 있다. 이행성과 위계성은 모델 3과 마찬가지로 위계성은 유의한 수치를 가지고 이행성은 유의한 수치를 보이지 않았다. 이는 모델 3의 이행성 지수와 마찬가지로 나노바이오분야가 핵심연구자 그룹간 융합보다는 핵심

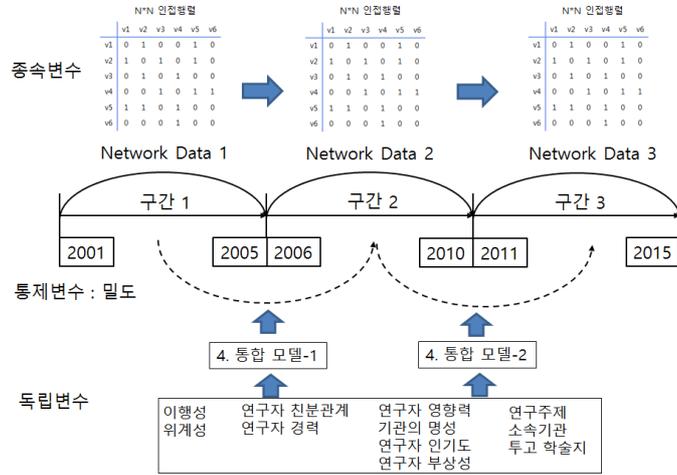
연구자 중심의 하위 그룹으로의 분화 및 이들과의 협업 형태로 변화되는 모습을 보이는 것으로 해석할 수 있다.

4.2 학문 발전 시기별 협업 메커니즘 분석

다음으로는 국내 나노바이오 분야의 협업 메커니즘을 구간 단위로 나누어 분석하였다. 즉, 2006년부터 2010년까지의 구간2 공저 네트워크 모습을 2001년부터 2005년까지의 구간1 공저 네트워크와 비교하여 구간1에서 구간2로의 네트워크 변화 요인을 독립변수와 구조변수를 대상으로 측정하였다. 마찬가지로 2011년부터 2015년까지의 구간3 공저 네트워크 모습을 2006년부터 2010년까지의 구간2 공저 네트워크와 비교하여 구간2에서 구간3으로의 네트워크 변화 요인을 동일한 변수를 대상으로 분석하였다. 〈그림 5〉는 구간의 흐름에 따른 학문 발전 시기별 메커니즘 분석 절차를 보인 것이다.

4.2.1 네트워크 구조 변화

구간별로 Rate 변수와 이행성, 위계성 지표를 분석하였다. 〈표 5〉의 Rate 변수를 살펴보면 구간1 → 2, 구간2 → 3으로 변화하는 구간에 기대되는 공저 협업의 수는 각각 3.4527, 4.8334로 앞절에서 분석한 모델 3의 Rate 구간1 → 2의 값 3.510과 모델 4의 Rate 구간2 → 3의 값 4.7742와 유사한 것으로 나타난다. 이는 구간별 메커니즘 분석이 모델 4를 기반으로 구간을 쪼개서 동일한 방식으로 실험하였기 때문에 Rate변수 수치가 모델 3, 4에 가까운 수치를 보인 것으로 해석된다.



<그림 5> 구간별 메커니즘 분석 절차

<표 5> 구간별 공저 협업 생성 요인 분석 결과

	모델 4 통합모델	모델 4-1 (구간1 → 2)	모델 4-2 (구간2 → 3)
	평균(표준오차)	평균(표준오차)	평균(표준오차)
Rate (구간1 → 2)	3.9562	3.4527	
Rate (구간2 → 3)	4.7742		4.8334
이행성	0.4625 (1.0694)	0.3036 (0.7546)	0.4546 (0.3962)
위계성	9.345* (4.5832)	12.5442** (4.7363)	6.9424** (2.5736)
연구자 친분관계	0.514* (0.2037)	0.5633+ (0.3909)	0.8612** (0.3001)
연구자 경력	-0.332 (0.2546)	-0.1487 (0.3241)	0.2168* (0.1098)
연구자 영향력	2.506** (0.9206)	0.1139 (0.1531)	2.5905** (1.0871)
기관의 명성	0.0165 (0.0193)	-0.107 (0.0916)	1.4536 (0.9328)
연구자 인기도	-4.6514 (6.5109)	-0.0964 (0.5419)	-4.4248 (7.7103)
연구자 부상성	0.373 (0.5781)	0.785* (0.431)	0.2524 (0.1945)
연구주제	0.5983** (0.2296)	0.409*** (0.1137)	0.3608*** (0.0961)
소속기관	4.8065** (0.7921)	0.518* (0.226)	5.0227** (1.9387)
투고 학술지	3.9876+ (2.0905)	0.9615** (0.3265)	5.6329* (2.6089)
밀도	2.2662*** (0.188)	1.229** (0.4412)	2.2444** (0.8522)

*** p<.001, ** p<.01, * p<.05, + p<0.10

구조 변수인 이행성과 위계성 분석결과, 모델 4-1, 모델 4-2 모두 위계성만 유의한 것으로 나타났다. 시간이 흐를수록 이행성은 평균값이 소폭 증가하였으나 확률적으로는 의미가 없었으며, 위계성은 구간2→3에서 평균값이 대폭 감소하였다. 이는 구간2→3로 변화하면서 네트워크 규모가 커지고 분절된 네트워크의 수와 핵심 연구자의 수가 많아지기 때문에 이행성 변수보다 위계성 변수가 유의하게 나타난 것으로 판단된다.

4.2.2 메커니즘의 변화

〈표 5〉에서와 같이 상호관계 메커니즘, 선호관계 메커니즘, 유사관계 메커니즘 별로 구간별 변화는 앞서 분석한 전체 구간 〈표 4〉에서의 공저 협업 요인 분석 결과와 유사한 것으로 나타났다.

상호관계 메커니즘의 연구자 친분관계는 모델 4-1과 모델 4-2 모두 유의한 것으로 나타났는데 이는 전체 구간에서의 공저 협업 요인 분석결과와 연관성이 높다고 볼 수 있으며 직전년도 공저여부는 향후 공저 관계를 유지하는데 기간에 상관없이 중요한 변수라고 할 수 있겠다. 반면 연구자 경력은 모델 4-2에서만 유의한 것으로 나타났는데, 이는 나노바이오 분야의 연구가 시간이 지남에 따라 활성화되면서 주제가 세분화됨에 따라 해당 주제에 경력이 있는 연구자를 선택하는 경향이 나타나기 때문이라고 추정할 수 있다. 실제로 나노바이오 분야 국내 연구자들은 Chung 외(2016)의 연구에 따르면 협업 연구자 선택에 있어서 새로운 연구를 성공적으로 수행하기 위해 동료 연구자의 전문 지식을 중시하는 경향을 보이는 것으로

나타났다. 따라서 새로운 분야가 유입·파생되는 구간2→3에서 연구경력이 많은 연구자가 공저 관계를 맺을 가능성이 높아졌다고 해석할 수 있다.

선호관계 메커니즘의 변수들 중에서 연구자 영향력은 모델 4-2에서, 연구자 부상성은 모델 4-1에서 유의한 변수로 확인되었으며 연구자 인기도와 기관의 명성은 모든 구간에서 공저 관계 형성 요인으로 유의하지 않은 결과가 나타났다. 또한 구간2, 3 안에 새롭게 네트워크에 출현하면서 h-index가 높은 연구자들은 In-vitro, drug-delivery, cancer 등 생명과학 분야의 연구자들이었으며, 해당 분야의 영향력이 있는 연구자들이 새롭게 유입되었을 것으로 보인다. 반면 구간1→2에서는 국내 나노바이오 분야 연구가 정부에서 주도하는 활성화 단계에 들어서기 때문에 최근 연구 성과가 훌륭한 연구자를 중심으로 공저 관계를 맺을 가능성이 높으므로 연구자 부상성이 의미 있는 변수로 해석될 수 있다.

유사관계 메커니즘은 구간1→2, 구간2→3에서 모두 유의한 변수로 확인되었다. 구간별 수치 또한 모델 4와 유사한 값을 가지는데 특히 동일 소속기관인 연구자와 투고 학술지가 유사한 연구자는 전 구간에서 모두 공저 관계를 맺을 확률이 큰 것으로 나타났다.

종합해보면 상호관계 메커니즘의 연구자 친분관계, 유사관계 메커니즘의 연구주제 유사성, 동일 소속기관, 투고학술지의 유사성은 모든 구간에서 공저 형성에 유의한 요인으로 분석되었다. 또한 상호관계 메커니즘의 연구자 경력과 선호관계 메커니즘의 연구자 영향력은 모델 4-2에서, 선호주의 메커니즘의 연구자 부상성

은 모델 4-1에서 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면 선호관계 메커니즘의 기관의 명성, 연구자 인기도는 모든 구간에서 공저 형성 요인에 유의하지 않은 것으로 나타났다.

5. 결 론

학문분야의 주제가 복잡해지고 다양해짐에 따라 협업은 연구과정에서 필수요소가 되었다. 특히 최근 국가 차원의 대형 과제 증가, 융복합 연구의 지원 강화, 기관 간/국가 간 연구 협력 유도 등의 이유로 협업은 전 세계적으로 빠른 속도로 대형화되고 심화되었다. 이렇듯 연구자의 협력이 증가하고 활성화되면서 협력에 참여하는 연구자 수는 증가하고, 연구자의 유형은 점점 다양화되고 있다. 연구자의 다양화는 지식의 생산을 가속화시키는 핵심적인 역할을 하게 되고 이는 곧 학문의 발전으로 이어지게 된다.

학문적인 협업 활동은 학술활동의 결과물을 통해 실증적인 확인이 가능한데, 이를 가장 잘 나타내주는 것이 공저자 분석이다. 저술활동을 같이한 공저자를 분석함으로써 협업 활동을 계량학적으로 측정할 수 있기 때문에 또 다른 연구 수단이 된다. 특히 공저자 네트워크 분석은 데이터 자체 내에서 협업의 범위, 협업의 내용 및 특징, 협업을 이루는 연구자 간의 관계 등을 측정할 수 있는 가장 객관적이면서 안전한 도구로 평가받고 있다.

이렇듯 협업의 빠른 진화와 학문의 발전은 결국 공저자 네트워크 데이터에 고스란히 반영된다. 그렇기 때문에 공저자 네트워크도 네트워크가 진화하는 과정으로 이해되는 것이 필요

하다. 즉, 공저자 네트워크 데이터가 갖는 내재적인 속성을 학문의 발전, 인간 간의 관계적인 측면 등을 활용하여 분석하는 것이다. 왜냐하면 네트워크의 형성은 개인적인 측면, 환경적인 측면, 커뮤니티 구조상의 측면 등 여러 가지의 배경이 함께 어우러져 나타나는 현상이기 때문이다.

이에 본 연구는 국내 나노바이오 분야의 연구자 협업 네트워크를 분석하여 동적으로 변화하는 협업 패턴을 규명하고, 동적 네트워크 환경에서 협업을 형성하게 된 요인을 학문 발전의 시기에 따라 분석하는 것을 목적으로 하였다. 나노바이오 분야를 선정한 이유는 해당 분야가 학문의 융합과 국가적인 지원이 함께 결합되어 빠르게 학문 발전이 일어나고 있는 분야이기 때문이다.

연구 목적을 달성하기 위해 본 연구는 학문 분야 시기별 협업 네트워크의 특징 및 변화와 변화를 일으키게 된 협업 형성의 요인을 중심으로 분석하였다. 협업의 형성 요인은 관련 문헌을 통해 가설을 도출하고 확률적 행위자 기반 모형을 활용하여 검증을 수행하였다.

먼저, 협업 연구자를 선택하는 데 있어 어떤 요인을 중심으로 연구자를 선택하는지 분석하였다. 연구자의 친분관계, 연구자 영향력, 연구 주제 유사성, 동일 소속기관, 투고학술지 유사성의 요소가 협업 연구자를 선택하는 데 있어 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 유사관계 메커니즘은 다른 메커니즘보다 훨씬 영향력 있는 요인으로 발견되었으며, 이는 나노바이오 분야의 국내 연구자들의 협업에 있어 유사한 연구내용을 중심으로 동일한 기관내의 협력이 많이 이루어지고 있음을 의미한다. 반

면, 연구자 경력, 기관의 명성, 연구자 인기도, 연구자 부상성은 유의하지 않은 요소로 나타나 선호관계 메커니즘이 전반적으로 낮은 선택요인으로 발견되었다. 하지만 연구자 경력은 단독으로는 유의한 요인으로 작용하였으나 연구자 선호관계가 추가됨에 따라 유의하지 않은 요인으로 나타났다. 이는 연구자의 경력보다는 연구자의 연구 성과능력 등과 관련한 선호관계가 협업을 하는 데 영향을 받고 있음을 의미한다. 이행성과 위계성은 상호관계에서는 모두 유의한 요인으로 나타나 특정 연구자를 중심으로 한 연구 그룹이 형성되었으면서도 서로 다른 연구 그룹을 잇는 중간 위치의 연구자들이 존재함을 의미한다. 하지만 선호관계와 유사관계에서는 위계성만이 유의한 요인으로 나타나 특정 연구자나 기관을 중심으로 위계적 구조를 갖는 모습을 보이는 것으로 나타났다.

다음으로는 시간이 지남에 따라 협업 연구자를 선택하는 데 있어 어떤 요인이 중요한 요인으로 선택되는지를 분석하였다.

첫째, 상호관계 메커니즘 분석 결과, 연구자의 친분관계는 구간과 상관없이 모두 유의한 것으로 나타났고, 연구경력은 구간2→3에서 높게 나타나 학문이 발전하면서 연구경력이 길어짐에 따라 함께 협업하는 연구자가 늘어나기 때문으로 해석될 수 있다. 또한 구간2와 구간3은 융합연구와 세부 주제 영역이 발전하는 시기로 해당 분야의 경력 있는 연구자 그룹이 새롭게 네트워크에 유입되었을 것으로 추정된다. 특히 3구간으로 가면서 나노바이오 분야는 나노진단, 생체분자, 지능형 나노치료제 등 특정 분야의 연구가 집중됨에 따라 연구자 경력이 유의미한 결과를 보이게 되었을 것으로 보인다.

둘째, 선호관계 메커니즘 분석 결과, 연구자 영향력은 구간2→3에서, 연구자 부상성은 구간1→2에서 유의한 변수로 확인되었으며, 연구자의 인기도와 기관의 명성은 전 구간 연구자 협업 형성에 있어 유의하지 않은 변수로 확인되었다. 이는 연구자의 영향력이 높은 연구자는 오랫동안 양질의 연구 성과물을 발표하기 때문에 학문 분야 활성화 단계에서 함께 연구를 함으로써 관련 연구 성과가 우수할 수 있다는 기대 효과가 크게 작용할 수 있다고 판단된다. 부상성의 경우, 연구 초기 혹은 진입 단계에서 최근 성과가 눈에 띄게 좋은 우수한 연구자들과 협업함으로써 초기 연구 진입의 어려움을 어느 정도 해소할 수 있기 때문일 것이다.

셋째, 유사관계 메커니즘은 모두 유의한 변수로 확인되었다. 특히 동일 소속기관인 연구자와 투고학술지가 유사한 연구자는 모두 공저 관계를 맺을 확률이 높은 것으로 확인되었다. 융복합 학문의 특성을 갖는 분야이긴 하지만 기관 내의 협력이 협업 형성의 강한 요인으로 작용한다는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 구간1의 경우, 대형 군집은 크게 두 개의 기관을 중심으로 생성된 것이 뚜렷하게 나타나고 있었다. 앞서 설명한 바와 같이 정부에서 주도하는 사업과제 위주로 구성된 연구진이 많을 수 있기 때문에 성공적인 과제 수행을 위해 안정적인 파트너 선택을 하는 것으로 판단된다. 그리고 대형 과제의 경우, 하위 과제는 기관 단위로 연구원이 구성되어 있는 것도 이러한 현상을 유발하게 한다. 마지막으로 투고 학술지 요인 분석 결과를 통해 나노바이오 주제 분야의 특성상 연구 방법을 유사하게 사용하는 연구자와의 협업을 원한다는 것을 파악할 수 있었다.

넷째, 구조적 특성 결과, 요인을 추가하지 않게 되면 이행성과 위계성이 모두 유의한 결과로 나타나 나노바이오 분야는 공저자의 공저자가 향후 공저자가 될 확률이 높고, 소수의 연구자에게 공저가 물리는 현상이 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 위계적인 구조를 가지고 있지만 연구 그룹 간에 연계된 촘촘한 네트워크를 형성하고 있다는 것을 의미한다. 하지만 요인이 추가되면서 이행성은 통계적으로 의미가 없는 것으로 나타났는데 요인을 중심으로 고립된 연구 그룹이 생기기 때문으로 판단된다. 이러한 현상이 생기는 이유는 나노바이오 분야가 구간 3으로 진입할수록 융복합 학문의 특성이 강화되어 세분화된 주제 분야의 유입이 나타나고 있기 때문이며, 이러한 특징으로 구조적으로 고립되고 위계적인 구조를 보이는 형태로 변화되고 있는 것으로 판단된다.

본 연구는 동적 네트워크 분석 이론인 확률적 행위자 기반 모형 개념을 정보학 측면에 적용함으로써 공저자 네트워크 현상을 새로운 측면에서 분석하였다. 공저자 네트워크라는 것은 결국 행위자인 연구자의 협업 연구자 선택에 의해서 형성되기 때문이다. 특히 흔히 계량학 분석에서 놓칠 수 있는 인간 행위에 대한 관점을 데이터를 통해 발견하고 이를 독립변수를 활용하는 방법을 채택하였는데, 공저자 네트워크 데이터 분석 측면에서 흥미로운 연구 방법으로 제시될 수 있을 것이다. 또한 본 연구에서 수행한 연구자의 동적 협업 네트워크 및 변화 요인 분석에 대한 연구를 더욱 심화 발전시키기 위한 후속 연구로 동적 네트워크와 정적 네트워크 분석 결과 비교 연구, 종속변수의 다양화를 통한 협업 형성의 다각적 분석, 특정 주제 분야 간 비교 등의 연구 확장이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] 김용학. 2003. 『사회연결망 이론』. 서울: 박영사.
- [2] 김선덕 외. 2016. 한국시스템다이내믹스 학회지 공저자 네트워크 특성에 관한 연구. 『한국시스템다이내믹스연구』, 17(3): 31-50.
- [3] 나노기술정책센터. 2015. 『나노기술연감』. 과천: 미래창조과학부.
- [4] 남은경, 박지홍. 2014. 연구자 협업의 영향 요인에 관한 연구. 『정보관리학회지』, 31(4): 201-227.
- [5] 미래창조과학부. 2014. 『제2기 국가나노기술지도 총괄보고서』. 과천: 미래창조과학부.
- [6] 안순일. 2009. 협동연구의 영향요인에 대한 실증적 연구. 『대한경영학회지』, 22(1): 291-327.
- [7] 윤영수, 채승병. 2005. 『복잡계 개론』. 서울: 삼성경제연구소.
- [8] 이수상. 2012. 『네트워크 분석 방법론』. 서울: 논형.
- [9] 이인원. 2013. 기술적 네트워크 분석에서 통계적 네트워크 분석으로: 정책학 연구에 있어서 네트워크 방법론의 접목 가능성. 『한국정책학회보』, 22(2): 31-61.

- [10] Abbasi, A. 2016. "A Longitudinal Analysis of Link Formation on Collaboration Networks." *Journal of Informetrics*, 10(3): 685-692.
- [11] Abbasi, A., Altmann, J. and Hossain, L. 2011. "Identifying the Effects of Co-Authorship Networks on the Performance of Scholars: A Correlation and Regression Analysis of Performance Measures and Social Network Analysis Measures." *Journal of Informetrics*, 5(4): 594-607.
- [12] Adams, J. 2012. "Collaborations: The Rise of Research Networks." *Nature*, 490(7420): 335-336.
- [13] Anthony, T. 2000. "Supply Chain Collaboration: Success in the New Internet Economy." *Achieving Supply Chain Excellence through Technology*, 2: 41-44.
- [14] Amabile, T. M. et al. 2001. "Academic-Practitioner Collaboration in Management Research: A Case of Cross-profession Collaboration." *Academy of Management Journal*, 44(2): 418-431.
- [15] Barabási, A. L. 2002. *LINKED: The New Science of Networks* Perseus Publishing, Massachusetts: Cambridge.
- [16] Birnholtz, J. P. 2007. "When Do Researchers Collaborate? Toward a Model of Collaboration Propensity." *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 58(14): 2226-2239.
- [17] Cannella Jr, A. A. and McFadyen, M. A. 2016. "Changing the Exchange: The Dynamics of Knowledge Worker Ego Networks." *Journal of Management*, 42(4): 1005-1029.
- [18] Demirkan, I., Deeds, D. L. and Demirkan, S. 2013. "Exploring the Role of Network Characteristics, Knowledge Quality, and Inertia on the Evolution of Scientific Networks." *Journal of Management*, 39(6): 1462-1489.
- [19] Chung, E., Kwon, N. and Lee, J. 2016. "Understanding Scientific Collaboration in the Research Life Cycle: Bio- and Nanoscientists' Motivations, Information-Sharing and Communication Practices, and Barriers to Collaboration." *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 67(8): 1836-1848.
- [20] Garfield, E. and Merton, R. K. 1979. *Citation Indexing: Its Theory and Application in Science, Technology, and Humanities (Vol. 8)*. New York: Wiley.
- [21] Gulati, R. 1995. "Social Structure and Alliance Formation Patterns: A Longitudinal Analysis." *Administrative Science Quarterly*, 40(4): 619-652.
- [22] Gulati, R. and Gargiulo, M. 1999. "Where Do Interorganizational Networks Come From?" *American Journal of Sociology*, 104(5): 1439-1493.
- [23] Hara, N. 2007. "Information Technology Support for Communities of Practice: How Public

- Defenders Learn about Winning and Losing in Court.” *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 58(1): 76-87.
- [24] Hara, N. et al. 2003. “An Emerging View of Scientific Collaboration: Scientists’ Perspectives on Collaboration and Factors That Impact Collaboration.” *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 54(10): 952-965.
- [25] Katz, J. S. and Martin, B. R. 1997. “What Is Research Collaboration?” *Research Policy*, 26(1): 1-18.
- [26] Kim, J. and Diesner, J. 2016. “Distortive Effects of Initial Based Name Disambiguation on Measurements of Large Scale Coauthorship Networks.” *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 67(6): 1446-1461.
- [27] Koka, B. R., Madhavan, R. and Prescott, J. E. 2006. “The Evolution of Interfirm Networks: Environmental Effects on Patterns of Network Change.” *Academy of Management Review*, 31(3): 721-737.
- [28] Kronegger, L. et al. 2012. “Collaboration Structures in Slovenian Scientific Communities.” *Scientometrics*, 90(2): 631-647.
- [29] Lee, D. H. et al. 2012. “Collaboration Network Patterns and Research Performance: The Case of Korean Public Research Institutions.” *Scientometrics*, 91(3): 925-942.
- [30] Lee, S. and Bozeman, B. 2005. “The Impact of Research Collaboration on Scientific Productivity.” *Social Studies of Science*, 35(5): 673-702.
- [31] Liu, N. and Guan, J. 2015. “Dynamic Evolution of Collaborative Networks: Evidence from Nano-Energy Research in China.” *Scientometrics*, 102(3): 1895-1919.
- [32] Martin, B. R. and Irvine, J. 1984. *Foresight in Science - Picking the Winners*. Pinter: London.
- [33] Melin, G. 2000. “Pragmatism and Self-organization: Research Collaboration on the Individual Level.” *Research Policy*, 29(1): 31-40.
- [34] Perianes-Rodriguez, A., Waltman, L. and van Eck, N. J. 2016. “Constructing Bibliometric Networks: A Comparison between Full and Fractional Counting.” *Journal of Informetrics*, 10(4): 1178-1195.
- [35] Powell, W. W. 1998. “Learning from Collaboration: Knowledge and Networks in the Biotechnology and Pharmaceutical Industries.” *California Management Review*, 40(3): 228-240.
- [36] Price, D. D. S. 1976. “A General Theory of Bibliometric and Other Cumulative Advantage Processes.” *Journal of the American Society for Information Science*, 27(5): 292-306.

- [37] Ruef, M., Aldrich, H. E. and Carter, N. M. 2003. "The Structure of Founding Teams: Homophily, Strong Ties, and Isolation among US Entrepreneurs." *American Sociological Review*, 195-222.
- [38] Seol, J. W., Lee, S. H. and Kim, K. Y. 2016. "Author Disambiguation Using Co-Author Network and Supervised Learning Approach in Scholarly Data." *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, 10(4): 73-82.
- [39] Sonnenwald, D. H. 2007. "Scientific Collaboration." *Annual Review of Information Science and Technology*, 41(1): 643-681.
- [40] Sonnenwald, D. H. and McLaughlin, K. L. 2005. "Factors that Impact Interdisciplinary Natural Science Research Collaboration in Academia." *In International Society for Scientometrics and Informetrics (ISSI) 2005 Conference*.
- [41] Thorsteinsdottir, O. 2000. "External Research Collaboration in Two Small Science Systems." *Scientometrics*, 49(1): 145-160.
- [42] Yan, L., Peng, J. and Tan, Y. 2015. "Network Dynamics: How Can We Find Patients Like Us?" *Information Systems Research*, 26(3): 496-512.
- [43] Zinilli, A. 2016. "Competitive Project Funding and Dynamic Complex Networks: Evidence from Projects of National Interest (PRIN)." *Scientometrics*, 108(2): 633-652.

• 국문 참고자료의 영어 표기

(English translation / romanization of references originally written in Korean)

- [1] Kim, Yong-Hak. 2003. *Social Network Theory*. Seoul: Bakyounsa.
- [2] Kim, Sun-Duck et al. 2016. "Co-author Network Characteristics of Korean System Dynamics Review." *Korean System Dynamics Research*, 17(3): 31-50.
- [3] National Nanotechnology Policy Center. 2015. *Korea Nanotechnology Annual 2015*. Gwacheon: Ministry of Science, ICT and Future Planning.
- [4] Nam, Eunkyung and Park, Ji-Hong. 2014. "Factors Influencing Research Collaboration in the Field of Informetrics." *Journal of Korean Society for Information Management*, 31(4): 201-227.
- [5] Ministry of Science and ICT. 2014. *2nd Nanotechnology Roadmap*. Gwacheon: Ministry of Science and ICT.
- [6] Ahn, Sun-il. 2009. "An Empirical Study on the Factors Affecting the Cooperative R&D Project between Academia and Industry." *Journal of the Korean Academic Association of Business Administration*, 22(1): 291-327.

- [7] Yoon, Young-Soo and Chai, Seong-Byoung. 2005. *Introduction of Complex System*. Seoul: Samsung Economic Research Institute.
- [8] Lee, Soo-Sang. 2012. *Network Analysis Methodology*. Seoul: Nonhyung.
- [9] Lee, In-Won. 2013. "From Descriptive to Statistical Network Analysis in Policy Studies." *Journal of the Korean Association for Policy Studies*, 22(2): 31-61.