

도시 간 연구 협력 네트워크의 공간 구조 분석*

: 2015년과 2023년 국가 R&D 사업을 중심으로

Spatial Changes in Inter-City Research Collaboration Networks

: Evidence from National R&D Data, 2015 and 2023

백효진** · 이지석***

Baek, Hyo-Jin · Lee, Ji-Seok

Abstract

This study examined the spatial and structural characteristics of intercity research networks by analyzing the centrality of national R&D collaboration in 2015 and 2023. Node-level hierarchical scores of research expenditure, degree centrality, and betweenness centrality were measured, and a backbone network consisting of the top 30% of intercity connections was extracted to identify major structural linkages. The results indicated that regional concentration intensified in 2023 compared with 2015, showing an apparent centralization trend toward the Seoul Capital Area and Daejeon. Daejeon experienced a notable increase in centrality and emerged as a national hub city, whereas peripheralization became more evident in the Gangwon and Honam regions. In the Gyeongnam region, the overall interregional connectivity weakened, but an internal polycentric structure appeared as Busan's dominance diminished. However, intercity linkages within the region remained weak. These findings suggest that the spatial structure of the national research network has become more centralized and imbalanced, indicating potential structural vulnerability. Strengthening hub connections in peripheral regions, such as Gangwon and Honam, and enhancing internal interconnectivity in polycentric regions, such as the Seoul Capital Area and Gyeongnam, are recommended.

주제어 R&D 네트워크, 네트워크 중심성, 네트워크 구조, 공간구조

Keywords R&D Network, Network Centrality, Network Structure, Spatial Structure

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

Manuel Castells(1996)는 도시는 자본, 노동, 기술, 지식 등에 있어 상호 협력의 관계를 가지며 이러한 요소들의 흐름을 통해 이해되어야 한다고 주장하였다. 다양한 인간 활동은 행위자 매개체

(actor carriers)로 작용하며, 공간 매개체(space carrier) 안에서 다양한 흐름(flow)을 만들어 낸다(Castells, 2007). 이때 도시는 가장 중요한 공간 매개체로 기능하며, 인간 활동이 상호 연결됨으로써 도시 간 네트워크가 형성된다(Yang et al., 2022).

네트워크 내 흐름의 구조와 강도는 도시 성장에 상당한 영향을 미치기 때문에(이희연·김홍주, 2006), 도시 네트워크의 구축은 지속가능한 도시 발전의 핵심 요소로 간주되며(Morrill, 1963),

* 이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00357422).
2025년 국토학회 춘계산학협력대회 발표자료를 데이터 오류수정, 재분석, 전면수정 하였음.

** Researcher, Ubiquitos City Research Cluster, Hanbat National University (Corresponding Author: baekhyojin@hanbat.ac.kr)

*** Undergraduate Student, Department of Urban Engineering, Hanbat National University (ljs2458@naver.com)

다양한 네트워크 활동은 도시 간 상호 성장과 협력을 가능하게 한다.

네트워크는 스스로 조직되며 거시적 패턴을 형성하는 특성을 가지는데(Batty, 2003), 이러한 특성은 도시 네트워크 관점에서 공간 구조의 변화를 해석하는 데 활용된다. 도시의 변화는 해당 도시의 고유한 속성만으로 설명하기에는 한계가 있으며, 네트워크 내에서의 구조적 위치와 관계적 특성을 함께 고려해야 한다(Peoples, 2019).

도시 간 네트워크 분석에 활용되는 대표적인 자료로는 교통량(이희연·김홍주, 2006, 김희철·안건혁, 2012), 전입전출량(성태영 외, 2015, 정다운, 2015, 이지민, 2017), 화물량(이봉조·임석희, 2014, 최병두, 2015) 등이 있으며, 이들 데이터는 방향성과 양이 명확하여 흐름의 쓸림현상을 진단하고 공간 구조를 분석하는데 효과적이다. 또한, 기업 간 네트워크를 활용하여 경제 공간 구조를 분석하거나(박소현 외, 2020, 이성호, 2025), 연구 및 특허 네트워크를 통해 정보 및 지식 공간 구조를 분석하는 연구도 활발히 이루어지고 있다(이정형·김형주, 2005, 임화진, 2013, 김규환, 2020). 이러한 연구들은 국토 공간 구조의 불균등성을 진단하고 연결성이 낮은 지역의 네트워크구조를 강화하는 방안 등의 논의를 이끌어낸다.

그중에서도 정보 및 지식은 오늘날과 같은 지식기반 경제사회에서 혁신을 주도하는 핵심 경쟁력으로 작용한다. R&D 투자 흐름은 특정 지역과 산업에 집중되며, 이로 인해 고기술 지식산업 클러스터가 형성되고 지식생태계가 더욱 공고화된다. 정부는 이러한 투자의 흐름을 전략적으로 조정함으로써 점진적인 기술 확산을 유도하고, 국가 전반의 혁신 역량을 높이는 데 기여할 수 있다(Sternberg, 1996).

이에 본 연구는 편중된 네트워크 구조가 지역 간 지식·정보 격차를 심화시키고 혁신체계 확산을 제한한다는 문제의식을 바탕으로, 연구 네트워크 내 허브 도시와 주변 도시 간의 구조를 분석하고 공간적 시사점을 도출하고자 한다. 이를 위해 2015년 대비 2023년 우리나라 연구 네트워크의 구조 변화를 분석하였다. 네트워크의 공간적 구조 변화를 통해 연구역량이 집중된 지역과 소외된 지역의 공간 특성을 고찰하고, 향후 연구투자 정책의 방향 설정에 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 흐름

본 연구는 우리나라 161개 시군(특광역시 및 특별자치시 포함)을 공간범위로 하며, 3차(2013~2017) 및 5차(2023~2027) 과학기술기본계획의 시기와 공개 데이터 시기를 고려하여 2015년과 2023년을 시간범위로 설정하였다. 국가과학기술지식정보서비스(NTIS)의 연구수행기관 데이터를 활용하여 각 연도에 진행 중인 사업의 주관기관-협력기관 네트워크를 구축하고, 기관 주소지를

바탕으로 시군별 도시 노드로 재구축하였다. 분석으로는 도시별 각 년도 연구비 총액의 위계 현황, 인구대비 연구비를 가중치로 설정한 전체 네트워크 구조 분석, 노드별 가중치 임계치를 설정한 백본 네트워크 구조 분석을 실시하였다. 네트워크의 구조는 차수 중심성(degree centrality)과 매개 중심성(betweenness centrality) 지표를 통해 분석하였으며, 2015년과 2023년의 네트워크 구조를 공간과 대조하여 중심 및 소외 지역을 고찰하였다.

II. 선행연구 검토

1. 도시 네트워크 중심성

네트워크 모델은 주로 복잡한 시스템의 내재된 속성과 그 역동성을 탐구하는 데 초점을 둔다(Ladyman et al., 2013). 네트워크 이론은 변화의 원인, 영향, 연관성이 단일 요소의 특성만이 아니라, 네트워크 내 메커니즘과 위상, 형성과정에 의해 설명된다고 본다(Borgatti and Halgin, 2011). 이러한 접근은 크리스탈러(Christaller, 1933)의 전통적인 중심지 이론과는 달리 도시 간 상호 연계성과 구조적 관계성에 주목하며, 도시 시스템 분석에 적용되어 공간 구조에 대한 보다 정교한 통찰을 제공한다(Capello, 2000). 따라서 네트워크 관점에서는 행위 주체인 노드와 관계를 나타내는 링크가 필수 요소가 된다.

도시 네트워크 분석에서 노드는 도시, 링크는 도시 간 연관성을 나타낸다. 분석 대상은 주로 네트워크의 구조적 연결 형태, 노드의 중심성, 노드 간 접근성과 유사성 등을 중심으로 이루어진다. 이 중 중심성은 개별 도시가 네트워크 내에서 얼마나 전략적인 위치에 있는지를 판단하는 핵심 지표가 된다(Bonacich, 1987). 중심성 지표는 Freeman(1979)과 Bonacich(1987)의 개발 이후 1990년대에 들어 공간분석에 적극 활용되고 있다. 대표적인 네트워크 중심성 지표에는 차수 중심성(degree centrality), 근접 중심성(closeness centrality), 매개 중심성(betweenness centrality), 위세 중심성(eigenvector centrality) 등이 있다. 차수 중심성은 도시 간의 직접적인 연결 정도, 근접 중심성은 전체 도시에 대한 평균적 접근 용이성, 매개 중심성은 도시 간 최단 경로상에 위치하여 중개(또는 제어)역할을 수행하는 정도, 위세 중심성은 중심성이 높은 도시들과 얼마나 밀접하게 연결되어 있는지를 나타낸다. 다양한 네트워크 중심성 지표를 통해 네트워크 구조와 주요 노드를 식별하며, 이는 도시 간 기능적 위계, 중심지의 공간적 배치, 그리고 도시 시스템 내 불균형 구조를 진단하는 데 핵심적인 분석 수단이 된다. 본 연구에서는 직접적인 연결 관계에 초점을 두고 허브를 식별하는 차수 중심성과 중개자를 식별하는 매개 중심성을 사용하였다.

2. 도시 네트워크 특성

도시 네트워크는 단순히 물리적인 거리나 행정 경계를 넘어서 비물리적 기능 간 연결성을 통해 도시의 경제성, 혁신성, 지속가능성을 확보한다. 특히, 도시들은 서로 연결된 네트워크를 통해 다른 도시의 경제 규모와 기능을 차용함으로써(Meijers et al., 2016; 엄현태·우명제, 2019), 지리적 집적경제(agglomeration economies)를 넘어서는 네트워크 기반의 외부 경제(network economies)로 확장되고 있다(Batty, 2003). 이러한 도시 간의 연결은 계획적이기보다 선호적 연결(preferential attachment)에 따라 기존에 중심성이 높은 허브 도시로 더욱 집중되는 경향이 있으며(Barabási and Albert, 1999), 이는 스몰 월드 네트워크(small-world network) 구조로 나타난다고 입증하였다(Watts and Strogatz, 1998).

스몰 월드 구조는 대부분의 노드가 상대적으로 짧은 경로(short path)를 통해 서로 연결되어 있는 네트워크로, 중요한 노드와의 단거리 연결을 통해 정보, 인구, 자본 등의 흐름을 효율적으로 전달하는 데 유리하다(Batty, 2003). 이처럼 연결이 특정 노드에 집중되면, 네트워크는 소수의 허브 노드가 연결을 독점하는 멱법칙(power-law) 분포를 따르게 된다. 이러한 멱법칙 분포는 실제 도시공간 구조에서도 나타나는 특성이다. 하지만 물리 세계에서는 네트워크가 성숙할수록 중심 허브 노드의 영향력이 낮아지고 다중 중심 구조(polycentric)가 강화되는 경향이 나타나게 된다(Zhao et al., 2017, Sarkar et al., 2020). 네트워크가 확장되면서 과부하 등의 비효율성 때문에 직접 연결성이 증가하고 상호작용이 분산되는 구조로 전환되는 것이다(Louf and Barthelemy, 2013). 우리나라는 여전히 서울의 위상이 높지만, 그 정도가 점차 완화되고 수도권 내 주요 도시와 지방 중점도시(광역시 및 혁신도시 등)가 성장하는 구조적 변화가 지속되고 있는 것으로 나타난다(김효성·구동희, 2019).

3. 연구 네트워크 선행연구

Louf and Barthelemy(2013)는 네트워크가 성숙할수록 나타나는 분산 구조가 물리적 네트워크뿐 아니라 사회 네트워크에서도 나타날 수 있음을 시사하였다. 1990년대를 분석 대상으로 한 Newman(2001)과 Barabási et al.(2002)의 연구 협업 네트워크 분석에서는 시간이 지날수록 중심 허브에 협력이 집중되는 양상이 확인되었다. 반면, 2000년대를 연구 기간으로 설정한 di Bella et al.(2021)의 연구에서는 초기에는 집중된 구조가 유지되다가 2011년 이후 허브 노드의 중심성이 급격히 낮아지며 탈중앙화 및 다핵화 경향으로 전환되는 양상을 보여주었다. 이는 연구 협업 네트워크도 일정 수준의 성숙도에 도달하면 분산화 구조로 변화할 수 있음을 시사한다. 그러나 이러한 분산화 경향이 실제 공간

으로 투영될 때에는 한계가 존재한다. 연구 네트워크를 국토 공간에 매핑하여 분석하는 경우 물리적 공간의 편중이라는 구조적 요인이 강하게 작용하기 때문이다. 즉, 네트워크가 아무리 분산화되더라도 국토 공간 자체가 불균형하다면, 그 결과 역시 공간적 편중의 형태로 나타날 가능성이 높다. 선행 연구들을 보면 한국의 연구 네트워크는 여전히 수도권과 일부 중심 도시에 집중된 공간 구조를 유지하고 있으며, 이는 네트워크의 사회적 성숙도가 아직 충분히 진전되지 않았음을 시사한다.

실제로 우리나라를 대상으로 한 지식 및 정보의 흐름 관점의 네트워크 분석은 주로 공동 특허, 논문 공동 저자, R&D 공동연구 데이터로 수행되어 왔다.

김규환(2020)은 R&D 연구과제 중 정보통신, 바이오, 에너지 분야를 대상으로 지역 간 연결구조를 분석하였다. 차수 중심성의 경우 수도권, 충청권, 동남권에 집중되어 있었고, 연결 밀도의 경우 수도권에서 수도권, 수도권에서 충청권으로의 연결이 가장 높았다. 이를 통해 해당 분야의 연구 네트워크의 중심성이 수도권과 충청도를 중심으로 이루어짐을 확인하였다. 임화진(2013)은 공동특허 발명자의 네트워크를 통해 국토공간구조를 진단하였다. 2000년대~2010년대 초반까지는 하위 클러스터들이 존재하다가 점차 수도권과 대전 등 중심 도시로 수렴되며 중심성이 집중되는 것을 확인하였다. 2010년대 이후 주변 지역과의 연결이 확대되고 일부 지역에서 자생적 클러스터가 발견되기 시작하였으나, 여전히 수도권과 대전 중심의 공간 집중 양상은 지속되는 것으로 분석하였다. 이경희·홍성호(2013)는 충북혁신도시 내 11개 이전 기관을 대상으로 그들이 발주한 R&D 사업(2009~2011)의 네트워크 관계를 분석하였다. 충북혁신도시의 연구 네트워크는 서울(587개 기관)과 경기도(79개 기관)에 집중되어 있었으며, 충청북도(14개)의 비중은 상대적으로 적었다. 충북혁신도시 정착기로 판단한 해당 분석 시기에도 주요 네트워크 대상은 수도권에 집중되어 수도권에 종속된 공간 구조 형태를 보이고 있었다. 김형주 외(2008)는 부처별 연구개발 사업 네트워크를 분석한 결과, 지역 간 네트워크에서는 여전히 수도권 종속적이며, 지역 차원의 독립적 네트워크 형성은 미흡한 수준으로 나타났다. 이정협·김형주(2005)는 SCI 공동저자의 지역 간 연계패턴을 분석하였다. 1994년 서울과 대전이 우리나라의 중추적인 위치를 차지하였지만 2004년에는 수도권과 호남권에서 광역권 단위의 연계가 강화되는 것으로 나타났다.

선행연구들을 종합하면, 우리나라 연구 네트워크는 실질적으로 수도권과 일부 광역권 중심 도시로 협력과 자원이 집중되는 구조를 유지하고 있으며, 점차 광역권 간 연계가 나타나는 과도기적 단계에 진입하고 있는 것으로 해석할 수 있다. 특히 수도권 및 일부 광역권에서는 권역 중심 도시의 위상이 낮아지고 주변 도시가 부상하는 다핵화 경향이 관찰되기도 한다. 혁신도시 및 기업도시와 같은 기관 이전 정책이 지방 광역화를 촉진한 것으로 해석

할 수 있으나 거시적 차원에서는 여전히 수도권 종속 구조가 지속되고 있는 것으로 확인된다.

다만, 선행연구들이 총량 중심의 지표를 활용하여 공간적 쏠림 현상을 잘 설명하였다면 본 연구는 도시인구 대비 연구비를 가중치로 적용하여 도시별 연구역량을 보다 강조하였다. Anderson et al.(1999)은 가중치의 정규화를 강조하고 있는데 전체 가중치의 정규화뿐 아니라 이중상 외(2018), Vallino et al.(2021), Lai et al.(2025) 등과 같이 노드 속성값을 기준으로 정규화하여 노드 규모 편향을 제거하는 방식을 적용하였다. 또한, 도시별 링크 가중치의 임계치를 설정해, 도시 간 강한 연결 관계에 집중한 네트워크 구조 분석을 시도하였으며, 2015년과 2023년을 대조함으로써 각 연도의 구조 특성을 비교하였다는 데에 차별점을 갖는다.

III. 분석 방법

1. 데이터 구축 및 가중치 설정

데이터는 국가과학기술지식정보서비스(NTIS)에서 제공하는 건설교통, 재난안전, 기계·제조 등 중점과학기술 12분야 주요 연구과제의 주관기관, 협력기관, 연구비이다. 2015년과 2023년 참여 중인 사업을 대상으로 2023년 5월부터 2024년 2월까지 데이터를 수집하였으며, 2015년 5,182개, 2023년 7,402개의 링크를 확보하였다. 주관기관별 협력기관 현황을 주소지 기반으로 시군 코드를 부여하여 도시별 네트워크를 구축하였다.

주관기관과 협력기관의 연구비 배분에 대한 정보가 없기 때문에 무방향 네트워크로 설정하여 관계에 중점을 두었으며, 도시 간 협력 관계를 파악하기 위해 OD가 일치하는 자기회귀(self-roop) 링크를 제거하였다. 또, 연구비는 백만 원 단위로 공개가 되고 있어, 백만 원 미만(연구비 기록 0원)의 협력기관과 해외 기관은 제외하였다.

네트워크에서 강한 연결 관계는 연결된 링크의 수와 경로 수로 나타나는데 이는 연결 강도의 속성을 고려하지 못한다. 본 연구에서는 연구비 규모가 클수록 연구역량 또는 연구투자가 강하고 그런 도시에 연결될수록 유리하다고 가정하여, 링크에 연구비 가중치를 반영하였다. 가중치(W_{ij})가 높을수록 강한 연결이며, 거리 계산에 있어서는 역수로 반영되어 가중치가 높을수록 짧은 경로가 된다. 하지만 단순히 연구비 규모만을 기준으로 할 경우, 인프라가 좋은 수도권 쏠림현상이 증폭될 가능성이 있다. 이를 보완하기 위해 연구비(F_i)를 해당 도시 인구수(P_i)로 나누어 밀도로 적용하였고, 이때 가중치 격차를 줄이기 위해 로그변환하였다. 연구역량이 인구 규모에 비례하지 않고 실질적인 협력 강도가 반영되도록 하였으며, 인구가 적은 도시더라도 협력 강도가 높다면 네트워크 내에서 중요한 위치를 차지하게 된다. 정제된 데이터로 도출한 전체 도시 네트워크(full network)는 2015년 노드 130개,

링크 653개, 2023년 노드 126개, 링크 596개로 구축되었다.

$$W_i = \ln(1 + \frac{F_i}{P_i}), W_{ij} = W_i + W_j (i \neq j) \quad (1)$$

W_i : i 도시 가중치, F_i : i 도시 연구비, P_i : i 도시 인구수

W_{ij} : 도시 간 링크 가중치

2. 연구비 분포 무게 분석

먼저 연구비 수혜에 따른 도시별 무게를 직관적으로 파악하기 위해 무게 점수(H_i)를 산출하여 연구비 분포성을 검토하였다. 이는 각 노드의 연구비 합(F_i)을 전체 네트워크 노드의 평균 연구비(\bar{F})로 나눈 값으로, 네트워크 내에서 각 도시가 차지하는 상대적 무게를 평가하였다. 시점별 네트워크의 노드 수가 다르기 때문에 연구비 비수혜 도시를 포함한 연구비 수준의 Z 점수도 함께 비교하였다.

$$H_i = \frac{F_i}{\bar{F}} \quad (2)$$

3. 백본 네트워크 추출

백본 네트워크(Backbone Network) 분석은 복잡하고 밀도가 높은 네트워크 내에서 핵심적인 연결만을 추출하여 네트워크의 주요 구조와 흐름을 명확히 파악하게 해준다. 백본의 추출은 연결 강도를 기반으로 약한 연결을 제거해 나가는 구조적 방식이 주로 사용된다. 하지만 네트워크 전체에서 약한 연결을 제거할 경우 많은 노드들이 제거되고 주요 허브 노드만 남게 되어 실질 연결구조를 파악하기 어려워진다. 따라서 개별 노드를 중심으로 약한 연결을 점진적으로 제거하는 퍼콜레이션(percolation) 방식으로 접근하여 쌍노드 양측에서 서로 강한 연결일 경우만 링크를 유지하였다. 임계치 설정은 전체 네트워크의 구조를 유지하는가에 초점을 두고 거대연결성분 비율(giant connected component share)을 기준으로 검토하였다. 전체 노드수 대비 가장 큰 네트워크 연결성분(component)에 포함되는 노드수 비율로 계산되며, 노드 손실을 최소화하면서 노이즈를 제거해 시각적으로 구조가 명확한 임계치를 선정하였다. 따라서 두 시점 모두 거대 연결성분 비율 0.9를 유지하는 상위 30%(threshold 0.7)로 최종 설정하였다(그림 1).

4. 네트워크 중심성 분석

중심성 분석에서는 네트워크 중심성 지표 중 차수 중심성(degree centrality)과 매개 중심성(betweenness centrality)을

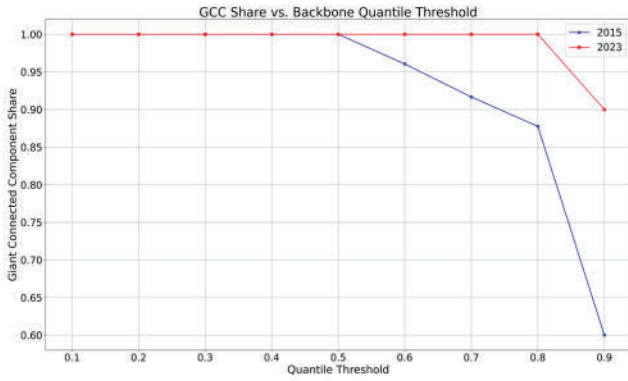


Figure 1. GCC share and threshold

산출하였다. 차수 중심성(C_D)은 해당 노드가 직접 연결된 링크 수를 해당 노드가 최대로 연결될 수 있는 노드 수로 나누어, 한 노드가 다른 노드와 얼마나 많은 노드에 직접 연결되어 있는지를 산출한다. 본 연구에서는 가중치를 부여하기 때문에 특정 노드에 연결된 링크들의 가중치 합(w_{vu})을 사용한다. 같은 노드 수에 연결되더라도 연구비가 높을 경우 더 높은 차수 중심성을 갖게 된다. 차수 중심성이 높은 도시는 네트워크 내에서 정보가 들어오고 나가는 경로가 많다는 의미가 되므로 접근성과 노출도가 높다는 뜻이다. 즉, 다양한 도시와 연구 협력을 많이 하는 도시를 나타낸다. 본 연구에서는 시점 간 판별이 용이하도록 정규화 점수를 사용하였다.

$$C_D^{(w)}(v) = \sum_{u \in M(v)} w_{vu} \tag{3}$$

$C_D^{(w)}$: 가중 차수중심성
 w_{vu} : 노드 v 와 이웃 u 사이의 링크 가중치
 $M(v)$: 노드 v 와 인접한 노드 집합

매개 중심성(C_B)은 특정 노드가 다른 노드들 간의 최단 경로에 얼마나 많이 등장하는지를 측정한다. 역수 가중치를 적용하여 연구비가 높을수록 가까운 경로, 즉 강한 연구 협력 관계로 설정하였다. 매개 중심성이 높은 노드는 흐름의 최단 경로에 위치하는 교차부로, 흐름의 조정하거나 연결을 하는 주요 매개자 역할을 한다. 즉, 연구 협력 네트워크에 있어서 도시 간의 협력을 증개할 수 있는 거점이 된다.

$$C_B^{(1/w)}(v) = \sum_{s \neq v \neq t} \frac{\sigma_{st}^{(1/w)}(v)}{\sigma_{st}^{(1/w)}} \tag{4}$$

$C_B^{(1/w)}$: 가중 매개 중심성
 $\sigma_{st}^{(1/w)}$: 노드 s 에서 t 까지 가중치 적용한 최단경로 수
 $\sigma_{st}^{(1/w)}(v)$: 그 중 노드 v 를 통과하는 경로 수

5. 2015년, 2023년 네트워크 구조 상호 검토

마지막으로 전체 네트워크 분석 결과를 고려하면서, 2015년과 2023년의 백본 네트워크를 시각화하여 대조하고 각 네트워크의 구조 특성을 고찰하였다. 네트워크 중심성을 각 네트워크 내 Z 점수로 치환하고 순위 변동을 검토하였다. 이를 통해 우리나라 연구 네트워크 국토 공간 구조를 파악하고 중심 도시와 매개 도시, 소외 도시를 고찰하였다.

IV. 분석 결과

1. 연구비 분포 위계

〈표 1〉은 2015년과 2023년의 네트워크 내 연구비 비중을 나타내는 위계 점수(hierarchy score)를 비교한 것이다. 위계 점수는 전체 도시($n=161$)를 대상으로 할 때 2015년 분산 18.57에서 2023년 분산 22.86, 지니계수는 0.898에서 0.900으로 도시 간 연구비 격차가 매우 높은 것으로 나타났다. 각연도 연구 참여 도시 내에서는 2015년 130개 도시에서 2023년 126개 도시로 감소하였고, 분산은 14.82에서 28.91로 크게 차이를 보여 격차가 심화된 것으로 나타났다. 순위 측면에서는 7대 광역시가 순위가 높아졌고(인천, 울산), 수도권 도시(성남, 수원, 용인)가 상위를 차지해 수도권 및 광역시에 연구비가 집중하는 것으로 나타났다. 경부축 거점 서울-대전-부산이 상위를 유지하고 있으며 강원권 거점 춘천은 순위에 포함되지 않았다.

2. 전체 네트워크 중심성

도시 간 연구 협력 네트워크의 구조를 이해하기 위해 네트워크 중심성을 분석하였다. 〈표 2〉의 기초 통계량을 보면 2015년의 노드 130, 링크 653, 2023년은 노드 126, 링크 596개로 구축되었으며, 네트워크 밀도는 각각 0.079, 0.076으로 네트워크 내 가능한 연결 수의 8% 이하로 연결되어 있었다. 낮은 밀도는 전체적으로 연결성이 매우 낮은 희소 네트워크로, 일부 거점 도시로만 연결되었을 가능성을 시사한다. 2015년 네트워크 내 지니계수는 0.59, 2023년은 0.63으로 불균형도는 아주 조금 증가하였다. 상위 5% 도시가 전체 연결 가중치에서 차지하는 비율은 2015년 27.76%에서 2023년 31.33%로 상위 도시로의 집중도도 증가하였다. 각 시점에 연구 투자 정책이 다르기 때문에 변화의 경향으로 보기는 어려우나, 2015년과 비교하여 2023년 연구 네트워크는 상위 도시로의 집중과 불균형도가 높아졌으며, 네트워크에서 제외된 도시까지 고려하면 지역 편중은 더욱 두드러질 것으로 예상된다.

〈표 3〉은 전체 네트워크의 차수 중심성(Weighted Degree Centrality)을 나타낸 것이다. 위계 점수와 달리 자기 회귀 링크

Table 1. Hierarchy score

2015 (H≥1)				2023 (H≥1)			
Rank	City	H(n=130)	Z(n=161)	Rank	City	H(n=126)	Z(n=161)
1	Seoul	36.58	10.31	1	Seoul	35.57	9.48
2	Daejeon	18.64	5.14	2	Daejeon	28.91	7.66
3	Wanju	12.78	3.45	3	Seongnam	7.34	1.79
4	Busan	9.07	2.38	4	Busan	5.04	1.16
5	Seongnam	5.22	1.27	5	Suwon	4.48	1.01
6	Daegu	3.63	0.81	6	Daegu	3.29	0.69
7	Uiwang	3.54	0.79	7	Yongin	3.01	0.61
8	Yongin	2.75	0.56	8	Incheon	2.42	0.45
9	Gwangju	2.46	0.48	9	Gwangju	2.35	0.43
10	Cheonan	2.45	0.47	10	Pohang	2.11	0.37
11	Goyang	2.37	0.45	11	Cheonan	2.06	0.35
12	Incheon	2.18	0.40	12	Changwon	1.99	0.33
13	Sejong	2.03	0.35	13	Ulsan	1.68	0.25
14	Changwon	1.90	0.31	14	Gimcheon	1.66	0.24
15	Suwon	1.58	0.22	15	Jinju	1.58	0.22
16	Ansan	1.51	0.20	16	Anyang	1.39	0.17
17	Pohang	1.44	0.18	17	Cheongju	1.31	0.15
18	Jingju	1.43	0.18	18	Jeonju	1.21	0.12
19	Ulsan	1.41	0.17	19	Ansan	1.10	0.09
20	Anyang	1.27	0.13				
21	Cheongju	1.15	0.10				

Table 2. Network summary statistics

	2015	2023
Number of nodes	130	126
Number of links	653	596
Network density	0.079	0.076
Gini coefficient	0.59	0.63
Top 5% nodes' share of total link weight	27.76%	31.33%

를 제거하고 도시 간의 연결 관계를 중점으로 분석하였다. 2015년에는 2023년보다 다양한 도시들이 순위 내에 포함되었으며, 2015년 네트워크에서는 서울(1.00), 광주(0.94), 대전(0.87)이 상위 순위를 차지하고, 부산(0.64)을 포함해 4개 특광역시가 Z 점수 1 이상 도시에 포함되었다. 2023년 네트워크에서는 대전(1.00), 서울(0.85)이 1·2위로 순위가 있었으며, 광주(0.38), 대구(0.34), 부산(0.28)을 포함해 5개 특광역시가 Z 점수 1 이상 도시에 포함되었다. 이 중 서울과 대전의 Z 점수만 상승한 것으로 나타나 이 두 도시로 연구 네트워크의 연결성이 더 집중된 것으로 판단된다. 특히 대전의 상승 폭이 높아(Z=3.85→6.28) 서울 보

다 대전의 역할이 신장 되었음을 확인하였다.

〈그림 2〉와 〈그림 3〉을 대조하여 검토하면 2015년에는 서울-대전-광주의 중심성이 높았고, 2023년에는 경남권의 중심성이 높아진 것으로 확인된다. 부산의 중심성은 낮아졌으나 창원(0.45)이 높은 순위로 새롭게 등장하였고 대구(0.34)와 진주(0.28)가 순위 내로 진입하였다. 또 2015년 네트워크에 포함되지 않았던 밀양과 청도가 포함되는 등 경남권 내 중심성 분산 경향이 나타났다.

또한, 총연구비로 계산한 위계 점수와 달리 2015년에는 춘천(0.46)의 중심성도 높았던 것으로 나타났다. 다시 말하면, 춘천시 내 다양한 협력기관이 부재하기 때문에 상대적으로 자기 회귀율이 낮고 외부도시와의 연결성이 높게 나타난 것이다. 하지만 2023년에는 순위에서 제외되어(16위 0.22) 외부연결성도 낮아진 것으로 해석할 수 있다.

광주의 경우 중심성과 Z 점수 모두 크게 하락하였다. 광주권 내 네트워크에서 제외된 도시가 증가한 원인을 포함하여, 춘천과 마찬가지로 외부연결성이 크게 낮아졌음을 의미한다. 2015년 순위 내에 있던 완주(0.49→0.06)와 전주(0.40→0.20)도 2023년 순위에서 제외되는 등 호남권의 약세도 두드러졌다.

Table 3. Weighted degree centrality

Rank	City	2015 (Z≥1)		Rank	City	2023	
		C _D	Z			C _D	Z
1	Seoul	1.00	4.51	1	Daejeon	1.00	6.28
2	Gwangju	0.94	4.21	2	Seoul	0.85	5.25
3	Daejeon	0.87	3.85	3	Goyang	0.55	3.20
4	Goyang	0.79	3.43	4	Changwon	0.45	2.48
5	Bucheon	0.74	3.15	5	Gwangju	0.38	1.97
6	Busan	0.64	2.63	6	Seongnam	0.35	1.80
7	Wanju	0.49	2.48	7	Daegu	0.34	1.70
8	Chuncheon	0.46	1.84	8	Yongin	0.32	1.56
9	Cheonan	0.43	1.70	9	Jinju	0.28	1.32
10	Jeonju	0.40	1.52	10	Busan	0.28	1.28
11	Yongin	0.37	1.38	11	Cheonan	0.26	1.16
12	Asan	0.35	1.21	12	Cheongju	0.24	1.02
13	Cheongju	0.34	1.09	13	Uiwang	0.23	0.99
14	Gongju	0.34	1.07	14	Pohang	0.23	0.97
15	Pohang	0.31	1.04	15	Chuncheon	0.22	0.89

Spearman's ρ (total-volume weighting): 0.64($p < 0.001$)
 Top-20 Jaccard Similarity (total-volume weighting): 0.38

Spearman's ρ (total-volume weighting): 0.73($p < 0.001$)
 Top-20 Jaccard Similarity (total-volume weighting): 0.60

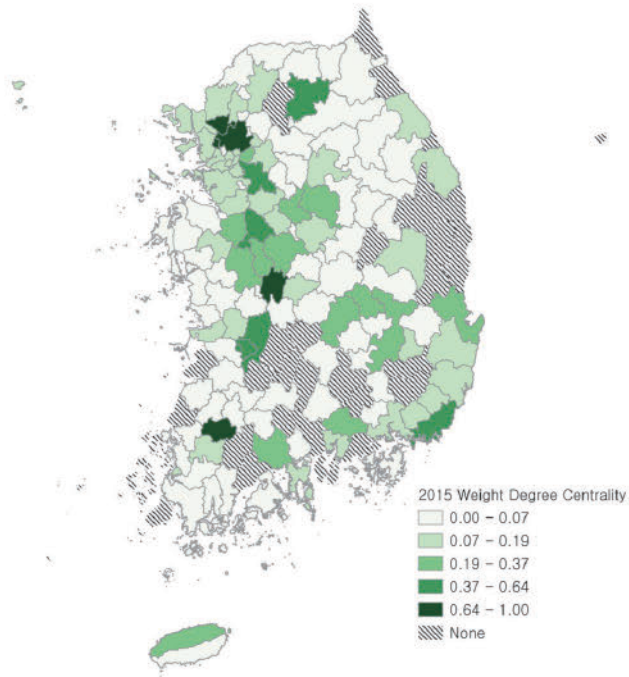


Figure 2. 2015 weighted degree centrality

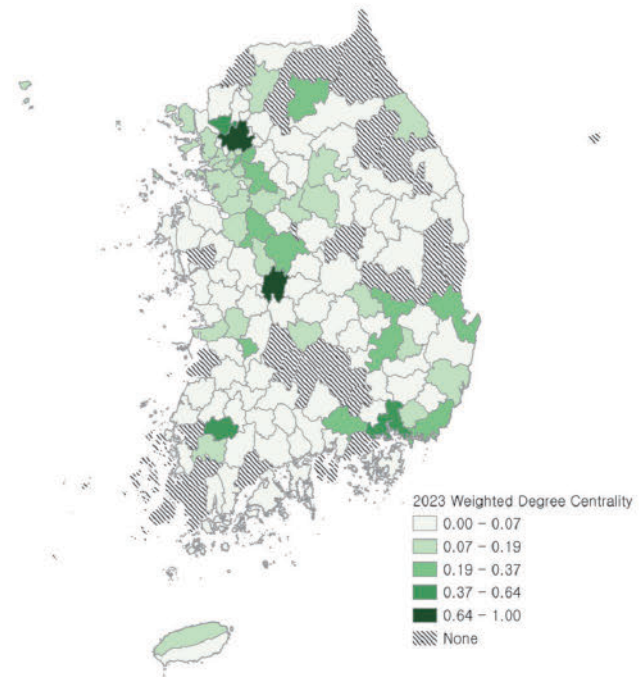


Figure 3. 2023 weighted degree centrality

〈표 4〉는 매개 중심성(weighted betweenness centrality) 분석 결과로 상위 도시들은 네트워크 내 중요한 중개거점을 의미한다. 차수 중심성 순위 내의 도시들이 매개 중심성도 높은 것으로 나타났으며, 2015년 서울(0.21), 광주(0.18)에서 2023년 대전(0.47), 서울(0.27)이 최상위를 차지하였다. 〈그림 4〉, 〈그림 5〉와

같이 2015년에는 2023년에 비해 더 다양한 중개 노드가 분포하였으나 2023년에는 대전과 서울로의 중심화 현상이 두드러진다. 대전($Z=9.39$)을 제외한 모든 도시의 Z 점수가 낮아지고 대전의 매개 중심성이 확연히 높아진 것을 알 수 있었다. 2015년에는 전반적인 매개 중심성 값의 분포가 유사하나 2023년에는 2개 노드를

Table 4. Weighted betweenness centrality

Rank	City	2015		Rank	City	2023	
		C_B	Z			C_B	Z
1	Seoul	0.21	6.21	1	Daejeon	0.47	9.39
2	Gwangju	0.18	5.21	2	Seoul	0.27	5.22
3	Chuncheon	0.13	3.66	3	Goyang	0.10	1.92
4	Goyang	0.11	3.10	4	Sungnam	0.05	0.82
5	Wanju	0.11	2.61	5	Changwon	0.05	0.74
6	Daejeon	0.10	2.50	6	Gwangju	0.04	0.65
7	Bucheon	0.09	2.46	7	Uiwang	0.03	0.51
8	Busan	0.08	2.14	8	Jeonju	0.03	0.46

Spearman's ρ (total-volume weighting): 0.68($p < 0.001$)
 Top-20 Jaccard Similarity (total-volume weighting): 0.48

Spearman's ρ (total-volume weighting): 0.76($p < 0.001$)
 Top-20 Jaccard Similarity (total-volume weighting): 0.67

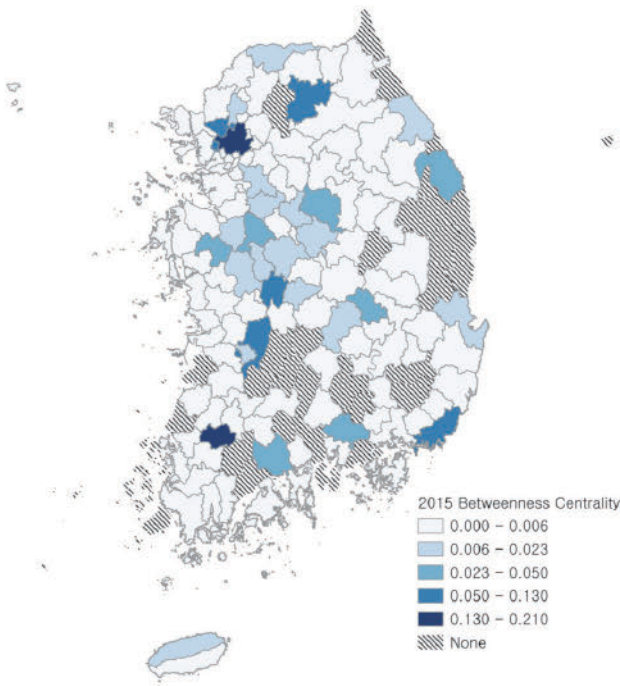


Figure 4. 2015 weighted betweenness centrality

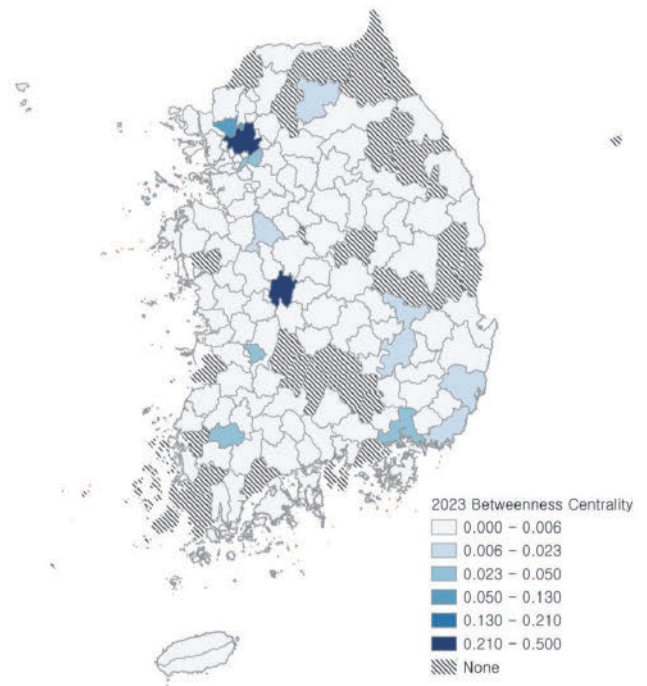


Figure 5. 2023 weighted betweenness centrality

제외하고 전반적인 매개 중심성 값이 낮아졌다. 이것은 2015년에는 다양한 경로의 선택지가 분산되어 있었으나 2023년에는 대전과 서울을 경유하는 집중화 구조로 변했다는 것을 의미한다. 즉, 두 도시로의 연결이 증가하고 다른 거점 도시들의 중개역할이 약해졌다는 것을 시사한다. 이는 차수 중심성에서 약세가 나타났던 춘천(0.13 → 0.02)과 광주(0.18 → 0.04), 분산화 경향이 나타났던 경남권 중 부산(0.08 → 0.02)의 매개 중심성이 낮아진 것에서 확인할 수 있다. 2015년에 비해 2023년에는 네트워크구조가 대전, 서울 집중적으로 재편되면서, 각 권역 거점 도시의 중개자 역할이 축소되는 양상을 보였다. 호남권과 강원권의 경우 네트워크에서 제외된 도시들이 다수 분포하여 광주와 춘천의 연계거점 역할은 더욱 약화 되었을 것으로 생각된다.

3. 백본 네트워크 중심성

백본 네트워크에서는 노드쌍 기준 상위 30%(threshold 0.7) 링크를 유지하여 2015년 노드 111개, 링크 151개, 2023년 노드 88개, 링크 128개를 추출하였다. 추출된 백본 네트워크의 기초 통계량을 보면(표 5) 전체 네트워크와 같은 경향에 있으며, 네트워크 밀도 값에서만 다소 차이를 보인다. 전체 네트워크에서는 시점 간 밀도 차이가 없으나 백본 네트워크에서는 2015년 0.025, 2023년 0.033으로 약간 상승한 것으로 나타나 중요한 협력 대상으로서의 연결은 미약하게 증가한 것으로 나타났다. 하지만 이는 노드 수 감소로 인한 수치로, 여전히 매우 낮은 밀도를 나타내 특정 도시가 연결을 독점하고 있음을 예상할 수 있다.

Table 5. Backbone network summary statistics

	2015	2023
Number of nodes	111	88
Number of links	151	128
Network density	0.025	0.033
Gini coefficient	0.49	0.51
Top 5% nodes' share of total link weight	24.57%	27.70%

백본 네트워크의 차수 중심성 결과는 <표 6>과 같다. 전체 네트워크와 비교하여 순위에 변동은 있으나 대부분의 상위 도시는 유사하다. 큰 차이점은 2015년 백본 네트워크에서 서울의 순위가 낮아진 점, 2023년 백본 네트워크에서 대구와 부산이 Z 점수 1 이하로 낮아진 점이다. 즉, 전체 네트워크에 비해 중심성이 낮아진 도시들은 다수의 약한 연결성이 제거되면서 순위가 낮아진 것이며, 반대로 순위가 높아진 도시는 전체 링크 수는 적지만 남은 강한 연결 링크가 구조적으로 중요하다는 것이다.

2015년 백본 네트워크에서는 광주가 가장 높은 차수 중심성을 갖는 것으로 나타났다. 다음이 대전(0.92), 고양(0.89), 서울(0.88), 완주(0.76), 부산(0.73)으로 나타났다. Z 점수 1 이상 중 수도권에서는 서울(0.88), 고양(0.89), 부천(0.55), 충청권에서는 대전(0.92), 천안(0.49), 아산(0.47), 공주(0.39), 호남권에서는 광주(1.00), 완주(0.76), 전주(0.39)가 포함되나, 강원권과 경남권에서는 춘천(0.48)과 부산(0.73)만이 등장하였다. 2023년에는 Z 점수 1 이상 도시 수가 대폭 감소하였고, 상위인 대전(1.00), 서울(0.77), 고양(0.51) 이하의 도시 중심성은 근소한 차이로 분포한다. 2015년 권역 내 거점 도시만 있던 춘천과 부산의 순위는 더욱

낮아졌으며, 대전 주변의 도시들도 모두 Z 점수 1 이하로 낮아졌다. 전체 네트워크와 마찬가지로 2023년에 대전과 서울의 Z 점수만 상승하여 서울과 대전으로의 집중이 심화되었다. 충청권의 경우 주변 도시들이 모두 Z 점수 1 이하로 떨어져, 충청권이 아닌 대전만이 네트워크 내 주요 도시임이 부각 되었다. 또, 경남권에서는 광역시보다 진주(0.29), 창원(0.25)의 중심성이 높은 특징을 나타냈다.

2015년 <그림 6>과 2023년 <그림 7>의 백본 네트워크로 살펴보면, 다양한 연결 관계가 단순해졌으며, 서울, 대전, 광주, 부산을 중심으로 하는 연결성이 서울, 대전으로 축소되었음이 나타났다. 특히, 2015년 춘천과 강원권 내 도시 간의 링크, 광주 및 부산의 링크가 대폭 감소한 것으로 나타났다. 경남권에서 부산 대신 주변 도시의 중심성이 높아진 것, 수도권과 충청권에서는 서울과 대전 외 주변 도시들은 중심성이 낮아진 점이 특징이다.

백본 네트워크의 매개 중심성은 <표 7>과 같다. 2015년 전체 네트워크에서 1·2위가 서울, 광주였다면 백본 네트워크에서는 광주(0.24), 서울(0.20)로 나타났으며, 전체 네트워크에서 낮은 순위였던 부산(0.19)이 3위로 나타났다. 앞서 백본 네트워크를 서술한 바와 같이 서울의 경우 대다수 도시와 연결되기 때문에 다수의 약한 연결이 상대적으로 대폭 제외되지만, 광주와 부산의 경우는 상대적으로 주요 도시와의 연결이 많기 때문에 순위에서 약간의 상승이 나타난 것으로 분석된다.

백본 네트워크의 매개 중심성 분석으로부터, 2015년 특광역시 중 광주, 서울, 부산, 대전이 주요 연계거점 역할을 하였으며, 2023년에 비해 도시 간 중심성 값의 차이가 크지 않아 다양한 경로가 존재했음을 알 수 있다(<표 7>, <그림 8>). 2023년 매개 중심성에서는 2015년에 비해 중심성 값의 차이가 더 커졌고, 대전

Table 6. Backbone network weighted degree centrality

Rank	City	2015 (Z≥1)		Rank	City	2023	
		C _D	Z			C _D	Z
1	Gwangju	1.00	4.24	1	Daejeon	1.00	6.15
2	Daejeon	0.92	3.83	2	Seoul	0.77	4.56
3	Goyang	0.89	3.68	3	Goyang	0.51	2.79
4	Seoul	0.88	3.66	4	Jinju	0.29	1.26
5	Wanju	0.76	3.01	5	Gwangju	0.27	1.11
6	Busan	0.73	2.86	6	Uiwang	0.26	1.04
7	Bucheon	0.55	1.95	7	Changwon	0.25	1.00
8	Cheonan	0.49	1.67	8	Yongin	0.25	0.96
9	Chuncheon	0.48	1.58	9	Seongnam	0.23	0.88
10	Asan	0.47	1.53	10	Cheonan	0.22	0.78
11	Gongju	0.39	1.16	11	Daegu	0.22	0.78
12	Jeonju	0.39	1.13	12	Chuncheon	0.21	0.70



Figure 6. 2015 backbone network weighted degree centrality



Figure 7. 2023 backbone network weighted degree centrality

Table 7. Backbone network weighted betweenness centrality

Rank	City	2015		Rank	City	2023	
		C_B	Z			C_B	Z
1	Gwangju	0.24	4.25	1	Daejeon	0.54	6.81
2	Seoul	0.20	3.46	2	Seoul	0.34	4.14
3	Busan	0.19	3.25	3	Goyang	0.24	2.92
4	Goyang	0.19	3.23	4	Yongin	0.14	1.50
5	Daejeon	0.18	3.06	5	Changwon	0.12	1.23
6	Wanju	0.15	2.57	6	Gwangju	0.11	1.15
7	Asan	0.15	2.44	7	Uiwang	0.11	1.06
8	Chuncheon	0.09	1.35	8	Seongnam	0.09	0.91

(0.54), 서울(0.34), 고양(0.24)이 다른 도시보다 높게 나타났다. 대전과 서울의 Z값은 상승하여 전체 네트워크에서만 아니라 백본 네트워크에서도 대전, 서울로의 집중화 구조가 확인되었다. 다만, 전체 네트워크보다 Z 점수가 낮아 강한 연결 내에서의 집중화 정도는 낮은 것으로 판단된다.

2015년 <그림 8>과 2023년 <그림 9>을 보면 2015년에는 중부권에 다수의 매개 노드가 존재하였으나 2023년에는 대전만의 매개 중심성이 커지고 수도권 노드의 밀집 현상이 관찰된다. 춘천, 광주, 부산의 중심성이 낮아지고, 경남권에서는 창원 중심성이 커진 것으로 나타났다.

서울과 대전을 제외한 주요 도시 간의 연결성은 약하고, 대전

과 수도권으로 경로가 집중하며 단순화되었다. 즉, 주요 연구 협력 관계의 네트워크는 서울과 대전을 중심으로 하며, 그 외 주요 도시들은 상호 연결성이 낮고 대부분의 도시가 서울과 대전으로 연결되는 구조로 나타난다. 이는 2015년과 비교하여 특정 도시로의 집중이 심화되고 경로의 다양성이 낮아졌음이 두드러진다. 다만 경남권에 있어서는 2015년 부산 집중형에서 주변 도시로 분산되는 경향이 눈에 띄나, 경남권 내 도시 간 연결은 강하지 않은 것으로 판단된다. 2015년 춘천, 2023년 진주에서 근거리 네트워크가 관찰되나, 강한 네트워크는 권역 내에서 이루어지기보다 국토 전체에 걸쳐 주요 도시를 중심으로 이루어지는 것으로 분석된다.

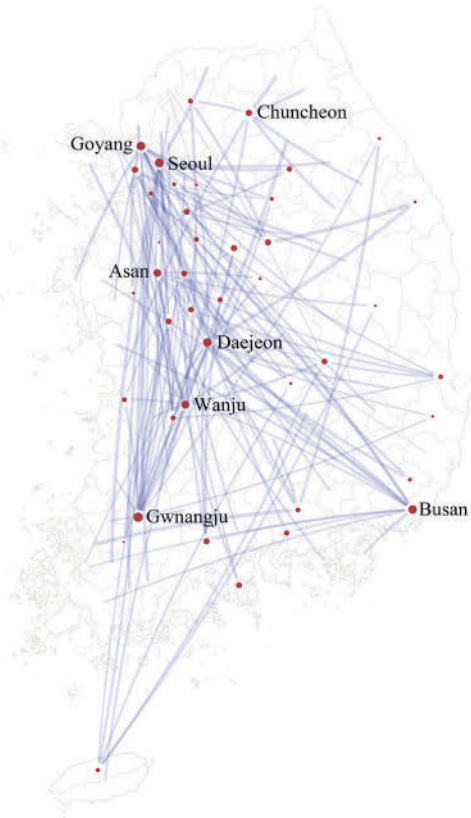


Figure 8. 2015 backbone network weighted betweenness centrality

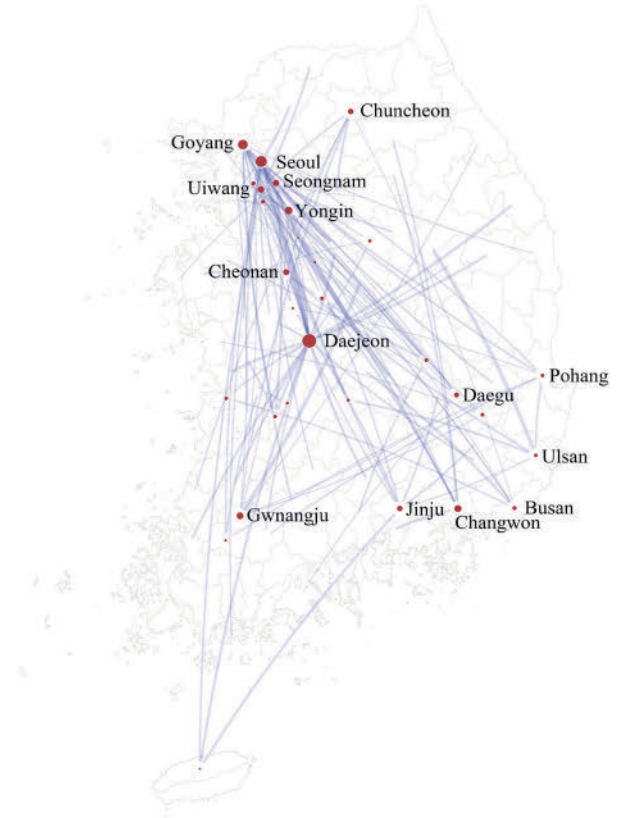


Figure 9. 2023 backbone network weighted betweenness centrality

V. 결론

본 연구는 2015년과 2023년의 도시 간 연구 협력 네트워크 구조와 네트워크 중심성 지표를 분석하여 공간 네트워크 관계 특성을 규명하였다. 네트워크 내 노드들의 연구비 비중을 나타내는 위계 점수, 네트워크 중심성 지표인 차수 중심성과 매개 중심성 값을 비교하였다.

분석 결과, 위계 점수에서는 2015년 대비 연구비 분산과 지니 계수가 증가하여 연구비의 지역 간 격차가 심화된 것으로 나타났다. 전체 네트워크에서는 2023년에 노드 수와 연결 수가 감소하였으며, 2023년 대전과 서울 중심으로 차수 중심성과 매개 중심성이 높게 나타나고 있었다. 상위 5% 도시가 차지하는 연결 가중치 비율 또한 증가하였다. 특히, 대전의 중심성이 급증하여 전국 중심 도시로 부각되었다. 반대로, 광주, 전주, 완주, 춘천 등 호남권과 강원권 도시의 중심성과 연결성 급감이 두드러진다. 백본 네트워크에서는 약한 연결을 제거한 후 주요 도시 간 협력 구조만 유지하였다. 따라서 서울 등 다수의 약한 연결을 보유한 중심 도시와의 중심성 값 격차는 완화된 것으로 나타나나 여전히 대전, 서울로의 중심 구조는 두드러진다. 2023년 링크의 분포가 단순해지고 수도권-대전의 연결구조로 축소된 것으로 나타났다. 수도권에서는 서울과 일부 도시로 군집하여 높은 매개 중심성을 보이지만 충청권의 경우 대전만이 강세를 나타낸다. 경남권의 경우

부산의 매개 중심성이 약해지고 창원, 진주, 대구 등의 주변 도시로 분산화되는 경향인 반면 호남권과 강원권은 중추도시인 광주와 춘천은 물론 주변 도시의 약세가 두드러졌다.

본 분석은 2015년과 2023년의 단면적 연구 네트워크를 분석하였기 때문에, 당시의 연구 투자 정책에 따라 네트워크 구조는 달라질 수 있으며, 하나의 경향으로 단정 짓기에는 무리가 있다. 하지만 우리나라 대도시의 분포와 개발편중 경향을 미루어 볼 때, 연구 네트워크의 구조와 실제 공간 구조의 유사성은 나타난다.

연구 네트워크뿐 아니라 네트워크 관련 연구들에서 우리나라 공간의 중심성이 수도권에서 충청권으로 확장되고 있음이 자주 언급된다. 하지만 본 연구에서는 오히려 대전을 제외한 중부권 도시들의 중심성이 2023년에 대폭 축소된 것으로 나타났다. 상대적으로 주요 대학과 연구기관은 정책적으로 분산 배치가 이루어져 있지만, 민간 협력기관의 경우 수도권에 집중되어 있기 때문에 판단된다. 2023년의 네트워크 구조를 통해 볼 때 광역권의 주변 도시 간 협력 관계는 전반적으로 약화된 것으로 나타났다. 지역을 기반으로 하는 주요 협력기관들 역시 광역 도시에 집중되어 있음을 유추할 수 있다. 수도권과 특광역시에 분포하는 기관들이 국가 R&D 수행에서 차지하는 비중과 영향력이 더욱 강화되고 있음을 보여준다.

연구개발 자원의 공간적 집중은 정책 방향에 따라 달라질 수 있다. 2023년 창원이 새로운 중심 도시로 나타나는 현상은 항공 관

련 방위산업에 대한 투자 확대의 영향으로 해석된다. 반면 2015년에만 중심성이 높은 완주 역시 농축산업 관련 투자가 높았기 때문이다. 이러한 사례에서 볼 때, 지방 도시의 경우 특광역시에 비해 연구투자 정책의 영향을 더 직접적으로 받고, 권역 내 중추 연구도시로 자리잡기보다는 특정 분야의 연구기관에 의존하는 구조를 띤다고 하겠다. 이는 주요 기관이 이전하더라도, 관련 사업체들이 주변 도시에 클러스터를 형성하지 못하는 현실을 반영하는 것이라고 할 수 있다.

네트워크는 성숙할수록 다핵화 경향을 보이며 직접 연결이 증가하면서 경로가 다양화된다. 본 분석 결과에 따르면, 경남권에서는 다핵화 경향이 일부 나타나고 있으나, 전반적으로는 수도권-대전 중심의 편향된 구조가 심화되고, 호남권과 강원권의 주변화 현상 역시 두드러진다. 따라서 보다 안정적인 네트워크 조성을 위해서는 주요 거점인 서울·대전과 광주 및 춘천의 연구 네트워크 강화가 필요하며, 성숙한 네트워크 조성을 위해서는 경남권 도시 간의 연계 강화가 필요하다. 장기적으로는 경남권과 같이 충청권의 네트워크 분산, 광주·춘천의 권역 내 자립성 강화가 제고되어야 한다. 연구 기능의 권역 간 클러스터링, 연구·교육·산업 관련 기관의 통합적 배분, 지역 기관들의 역량 강화를 위한 지속적인 정책적 지원 확대가 필요하다고 판단된다.

본 연구는 특정 시점의 국가 R&D 사업 네트워크를 분석한 결과로 도시 간 연구 네트워크에 한정되어 있으며, 시계열 추세로 해석하기에는 한계가 있다. 하지만 우리나라에 축적된 거시적 국토 공간 구조와 지역 간 격차 양상은 본 연구 결과에서도 나타나고 있었다. 향후 다양한 상호 연계 지표와 네트워크 분석 결과를 비교하고, 다층 네트워크를 구축함으로써 보다 복합적이고 정교한 변화 양상을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

인용문헌
References

- 김규환, 2022. "R&D협업 기관들의 공간적 분포와 지역 간 네트워크 분석-정보통신, 바이오, 에너지 산업을 중심으로", 『한국산학기술학회 논문지』, 23(5): 68-76.
- Kim, G.H., 2022. "Spatial Distribution of R&D Collaborative Organizations and Network Analysis between Regions-Focusing on Information and Communication, Bio, and Energy Industries", 『Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society』, 23(5): 68-76.
- 김형주·이정협·손동원, 2008. "정부의 R&D 정책과 연구개발 네트워크의 구조 및 공간적 특성: 한국의 국가연구개발사업 사례를 중심으로", 『한국경제지리학회지』, 11(3): 319-333.
- Kim, H.J., Lee, J.H., and Sohn, D.W., 2008. "Government Policies, R&D Networks and Space: The Case of Korean National R&D Projects", 『Journal of The Economic Geographical Society of Korea』, 11(3): 319-333.
- 김효성·구동희, 2019. "우리나라 도시 네트워크의 공간구조 변화", 『대한지리학회지』, 54(6): 621-636.
- Kim, H.S. and Koo, D.H., 2019. "The Change of Spatial Structure of Urban Networks in Korea", 『Journal of the Korean Geographical Society』, 54(6): 621-636.
- 김희철·안건혁, 2012. "연결망 이론으로 본 인구, 고용, 사회적 자본과 서울대도시권 중심성 사이의 관계", 『국토계획』, 47(3): 105-122.
- Kim, H.C. and Ahn, K.H., 2012. "The Relation of Population, Jobs, Social Capitals and Centrality in Seoul Metropolitan Area, using Social Network Theory", 『Journal of Korea Planning Association』, 47(3): 105-122.
- 박소현·권규상·박소영, 2020. "기업 간 거래망에 기초한 기능적 경제권의 설정", 『한국경제지리학회지』, 23(1): 1-17.
- Park, S.H., Kwon, K.S., and Park, S.Y., 2020. "Delineation of Functional Economic Areas in Korea based on Inter-firm Transaction Networks", 『Journal of The Economic Geographical Society of Korea』, 23(1): 1-17.
- 성태영·김신덕·이만형, 2015. "인구이동에 기반한 네트워크 특성 연구: 세종시와 연계한 충청권을 중심으로", 『도시행정학보』, 28(2): 107-126.
- Seong, T.Y., Kim, S.D., and Lee, M.H., 2015. "A Study on the Characteristics of the Network Based on Population Migration: Focused on Chungcheong Region Linked to Sejong City", 『Journal of the Korean Urban Management Association』, 28(2): 107-126.
- 엄현태·우명제, 2019. "중심도시와의 네트워크가 도시성장에 미치는 영향", 『국토계획』, 54(3): 15-26.
- Eom, H.T. and Woo, M.J., 2019. "The Impact of Network sith Central City on Urban Growth", 『Journal of Korea Planning Association』, 54(3): 15-26.
- 이종상·서영창·김성록, 2018. "지역의 규모를 고려한 네트워크 중심성분석: 통근통행 자료의 변환을 중심으로", 『한국지역개발학회』, 30(4): 71-84.
- Lee, J.S., Seo, Y.C., and Kim, S.R., 2018. "Network Centrality Analysis based on Regional Size: Focusing on Transformation of Commuting Data", 『Journal of the Korean Regional Development Association』, 30(4): 71-84.
- 이경희·홍성호, 2013. "사회 네트워크 분석 기법을 활용한 충북 혁신도시 이전기관의 R&D 네트워크 분석", 『지역정책연구』, 24(2): 1-22.
- Lee, G.H. and Hong, S.H., 2013. "R&D Networks Analyses of Relocating Organizations to the Chungbuk Innovation City Based on the Social Network Analysis(SNA) Methods", 『Regional Policy Review』, 24(2): 1-22.
- 이봉조·임석희, 2014. "상호작용 지수를 이용한 수도권 도시 네트워크 분석", 『한국지역지리학회지』, 20(1): 30-48.
- Lee, B.J. and Yim, S.H., 2014. "An Analysis of Urban Network in Seoul Metropolitan Area by Interaction Indices", 『Journal of The Korean Association of Regional Geographers』, 20(1): 30-48.
- 이성호, 2025. "공공부문 광역 업무 네트워크를 활용한 우리나라 도시체계 분석 - 인터로킹 네트워크 모델의 적용 -", 『대한지리학

- 회지], 60(2): 260-276.
 Lee, S.H., 2025. "Analysis of Korea's Urban System Using Intra-firm Business Networks in the Public Sector: An Application of Interlocking Network Model", *Journal of the Korean Geographical Society*, 60(2): 260-276.
12. 이정협·김형주, 2005. "국가연구개발시스템의 지역화와 지역간 지식네트워크의 발전", 「정부학연구」, 11(2): 33-62.
 Lee, J.H. and Kim, H.J., 2005. "Regionalization of the National R&D System and Evolution of Inter-regional Knowledge Networks", *Journal of Governmental Studies(JGS)*, 11(2): 33-62.
13. 이지민, 2017. "사회네트워크 분석을 이용한 광주 전남지역의 공간구조 변화 및 중심지 분석", 「농촌계획」, 23(2): 43-54.
 Lee, J.M., 2017. "Analysis of Spatial Structures and Central Places of Gwangju and Jeonnam Region using Social Network Analysis", *Journal of Korean Society of Rural Planning*, 23(2): 43-54.
14. 이희연·김홍주, 2006. "네트워크 분석을 통한 수도권 지역의 공간구조 변화 1980-2000년", 「국토계획」, 41(1): 133-151.
 Lee H.Y. and Kim H.J., 2006. "The Transformation of the Spatial Structure by Commuting Flows in the Capital Region Using Network Analysis, 1980-2000", *Journal of Korea Planning Association*, 41(1): 133-151.
15. 임화진, 2013. "사회 네트워크 분석을 통한 지식 네트워크의 국토 공간 구조 분석", 「국토계획」, 48(6): 235-248.
 Lim, H.J., 2013. "Analyzing the Spatial Structure of Knowledge Network through Social Network Analysis", *Journal of Korea Planning Association*, 48(6): 235-248.
16. 정다운, 2015. "네트워크 도시공간구조 형성 및 변화요인 분석", 한양대학교 박사학위논문.
 Jeong, D.W., 2015. "Analyzing Formation and Transition Factors of Urban Spatial Structure with Networks", Ph.D. Dissertation, Hanyang University.
17. 최병두, 2015. "네트워크도시 이론과 영남권 지역의 발전 전망", 「한국지역지리학회지」, 21(1): 1-20.
 Choi, B.D., 2015. "Theory of Network City and Perspective on Development of the Yeongnam Region", *Journal of The Korean Association of Regional Geographers*, 21(1): 1-20.
18. Anderson, B.S., Butts, C.T., and Carley, K.M., 1999. The Interaction of Size and Density with Graph-level Indices, *Social Networks*, 21(3): 239-267.
19. Barabási, A.L. and Albert, R., 1999. "Emergence of Scaling in Random Networks", *Science*, 286(5439): 509-512.
20. Barabási, A.L., Jeong, H., Neda, Z., Ravasz, E., Schubert, A., and Vicsek, T., 2002. "Evolution of the Social Network of Scientific Collaborations", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 311(3-4): 590-614.
21. Batty, M., 2003. "Network Geography: Relations, Interactions, Scaling and Spatial Processes in GIS", CASA Working Paper No. 63. Centre for Advanced Spatial Analysis (UCL), London: UK.
22. Bonacich, P., 1987. "Power and Centrality: A Family of Measures", *American Journal of Sociology*, 92(5): 1170-1182.
23. Borgatti, S.P. and Halgin, D.S., 2011. "On Network Theory", *Organization Science*, 22: 1168-1181.
24. di Bella, E., Gandullia, L., and Preti, S., 2021. "Analysis of Scientific Collaboration Network of Italian Institute of Technology", *Scientometrics*, 126(10): 8517-8539.
25. Castells, M., 1996. *The Rise of the Network Society*, Cambridge, MA: Blackwell.
26. Castells, M., 2007. "Centrality in the Space of Flows", *Built Environment*, 33(4): 482-485.
27. Capello, R., 2000. "The City Network Paradigm: Measuring Urban Network Externalities", *Urban Studies*, 37(11): 1925-1945.
28. Christaller, W., 1933. *Central Places in Southern Germany*, Translated by Carlisle, W.B., Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
29. Freeman, L.C., 1979. "Centrality in Social Networks: Conceptual Clarification", *Social Networks*, 1(3): 215-239.
30. Ladyman, J., Lambert, J., and Wiesner, K., 2013. "What is a Complex System?", *European Journal for Philosophy of Science*, 3: 33-67.
31. Lai, Z., Li, Y., He, T., and Liu, X., 2025. "Characterizing Inter-Urban Population Migration Network: A Case Study of Shenzhen, China", *Computational Urban Science*, 5: 46.
32. Louf, R. and Barthelemy, M., 2013. "Modeling the Polycentric Transition of Cities", *Physical Review Letters*, 111(19): 198702.
33. Meijers, E.J., Burger, M.J., and Hoogerbrugge, M.M., 2016. "Borrowing Size in Networks of Cities: City Size, Network Connectivity and Metropolitan Functions in Europe", *Papers in Regional Science*, 95(1): 181-198.
34. Morrill, R.L., 1963. "The Development of Spatial Distributions of Towns in Sweden: An Historical-Predictive Approach", *Annals of the Association of American Geographers*, 53(1): 1-14.
35. Newman, M.E.J., 2001. "The Structure of Scientific Collaboration Networks", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(2): 404-409.
36. Peeples, M.A., 2019. "Finding a Place for Networks in Archaeology", *Journal of Archaeological Research*, 27(4): 451-499.
37. Sarkar, S., Wu, H., and Levinson, D.M., 2020. "Measuring Polycentricity via Network Flows, Spatial Interaction and Percolation", *Urban Studies*, 57(12): 2402-2422.
38. Sternberg, R.G., 1996. "Government R&D Expenditure and Space: Empirical Evidence from Five Industrialized Countries", *Research Policy*, 25(5): 741-758.
39. Vallino, E., Ridolfi, L., and Laio, F., 2021. "Trade of Economically and Physically Scarce Virtual Water in the Global Food Network", *Scientific Reports*, 11: 22806.
40. Watts, D.J. and Strogatz, S.H., 1998. "Collective Dynamics of 'Small-World' Networks", *Nature*, 393(6684): 440-442.
41. Yang, L., Wang, J., and Yang, Y., 2022. "Spatial Evolution and Growth Mechanism of Urban Networks in Western China: A

Multi-Scale Perspective”, *Journal of Geographical Sciences*, 32(3): 517-536.

42. Zhao, M., Derudder, B., and Huang, J., 2017. “Polycentric Development in China’s Mega-City Regions, 2001-08: A Comparison of the Yangtze and Pearl River Deltas”, *Journal of the Geographical Society of Berlin*, 148(1): 1-13.

Date Received	2025-07-16
Reviewed(1 st)	2025-10-07
Date Revised	2025-10-30
Reviewed(2 nd)	2025-12-10
Date Accepted	2025-12-10
Final Received	2025-12-16